

Transducteurs et capteurs de mesure

Les principes physiques de fonctionnement et les principes de construction des transducteurs de mesure de divers paramètres physiques sont examinés. L'attention principale est accordée aux capteurs à semi-conducteurs de température, de déformation mécanique et de champs magnétiques. Certains aspects du fonctionnement des capteurs d'humidité, des dispositifs d'ionisation, de divers phototransducteurs, des débitmètres, des niveaux de remplissage, de la pression, etc. sont examinés.

Les résultats d'une étude des caractéristiques des capteurs considérés et de l'influence de divers facteurs externes sur ceux-ci sont présentés.

Pour les ingénieurs et les techniciens impliqués dans le développement et l'utilisation de transducteurs et de capteurs de mesure, les chercheurs, les étudiants de troisième cycle et les étudiants universitaires.

Nikolay Gorbachuk Professeur associé au département de physique appliquée et de mathématiques supérieures de l'université nationale de technologie et de design de Kiev, Ukraine.

Capteurs, transducteurs, mesures



EDITIONS NOTRE **SAVOIR**

Transducteurs et capteurs de mesure

Monographie

Nikolay Gorbachuk

Nikolay Gorbachuk



EDITIONS NOTRE **SAVOIR**

Nikolay Gorbachuk

Transducteurs et capteurs de mesure

FOR AUTHOR USE ONLY

Nikolay Gorbachuk

Transducteurs et capteurs de mesure

Monographie

FOR AUTHOR USE ONLY

ScieniaScripts

Imprint

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

This book is a translation from the original published under ISBN 978-620-7-47057-0.

Publisher:

Scientia Scripta

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom

Str. Armeneasca 28/1, office 1, Chisinau MD-2012, Republic of Moldova, Europe

Printed at: see last page

ISBN: 978-620-7-37639-1

Copyright © Nikolay Gorbachuk

Copyright © 2024 Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

TABLE DES MATIÈRES

Introduction.....	2
Chapitre 1. La température. Transducteurs, mesures	3
Chapitre 2. Grandeurs mécaniques. Transducteurs, capteurs, mesures.....	37
Chapitre 3. Champs magnétiques. Transducteurs, capteurs, mesures	94
Chapitre 4. Humidité, gaz. Méthodes de mesure de l'humidité. Hygromètre	116
Chapitre 5. La lumière. Transducteurs, cellules photoélectriques	120
Chapitre 6. Transducteurs d'ionisation, Capteurs	141
Annexe	152

Introduction

Il est difficile d'imaginer les techniques et technologies modernes sans les différents types de transducteurs de mesure, de capteurs, de transducteurs, d'éléments sensibles. De nombreux travaux sont consacrés au développement de ces dispositifs, les principes et les méthodes de mesure, la conception des transducteurs et des capteurs sont constamment améliorés.

Les transducteurs de mesure sont des dispositifs qui convertissent une variation d'une grandeur en une variation d'une autre grandeur. En règle générale, un tel transducteur convertit une grandeur physique non électrique, appelée grandeur physique mesurée, en un signal électrique. Les transducteurs de mesure sont utilisés dans les systèmes électroniques qui affichent le résultat des mesures ou des observations. Les principaux générateurs de signaux électriques concernant une grandeur physique non électrique sont les capteurs (transducteurs, éléments sensibles).

La monographie présente les résultats du développement de divers transducteurs et capteurs de mesure. Elle décrit les méthodes et moyens de mesure de l'auteur et d'autres méthodes et moyens de mesure connus dans la littérature. L'attention est portée sur les moyens de mesure de la température dans une large gamme de températures - de la température cryogénique à la température ambiante et aux températures de fusion de certains matériaux solides. Les méthodes de mesure des paramètres mécaniques - déformations, pressions, déplacements, vitesses d'écoulement, etc., la mesure des champs magnétiques par divers moyens, les paramètres des gaz - humidité, etc., les convertisseurs d'énergie solaire, les dispositifs d'ionisation sont examinés.

Chapitre 1. La température. Transducteurs, mesures

Il existe une grande variété de méthodes et de moyens pour mesurer la température. Pour créer un capteur de température (thermomètre), on peut utiliser toutes les propriétés des substances solides, liquides ou gazeuses qui dépendent de la température. Par exemple, les états physiques et chimiques, les dimensions, les caractéristiques électriques, etc. Parallèlement, les thermomètres (capteurs) qui utilisent un nombre relativement limité de propriétés électrophysiques des matériaux et de méthodes de mesure ont trouvé une large application pratique.

1.1. Thermomètres à contact mécanique

Ces thermomètres sont basés sur la dilatation thermique des substances. Ils se caractérisent par un faible coût et une précision satisfaisante. Ils sont principalement destinés à un usage pratique quotidien et à des travaux de laboratoire.

Dans un thermomètre de contact, l'élément sensible peut être une tige métallique dont l'allongement dépend de la température (thermomètres dilatométriques) :

$$l = l_0 (1 + \alpha t), \quad (1.1)$$

où l_0 - longueur à 0 °C, α - coefficient de dilatation thermique, t - température en °C.

Plus souvent encore, on utilise la différence de dilatation thermique de deux métaux différents - les thermomètres bimétalliques. Ces thermomètres peuvent être de petite taille, faciles à fabriquer et peu coûteux.

Les thermomètres à liquide en verre sont largement utilisés. La majeure partie du liquide est concentrée dans un réservoir volumétrique, qui est pratiquement un capteur (élément sensible). N'importe quel liquide peut être utilisé pour le remplissage, en fonction des conditions de fonctionnement. Le plus souvent, on utilise du mercure ou de l'alcool. Ces thermomètres ne sont pas très précis, mais ils sont les plus courants dans les ménages et les laboratoires. Dans l'industrie, ils sont progressivement remplacés par des thermomètres qui permettent d'automatiser la production.

Les thermomètres mécaniques à contact présentent un inconvénient majeur : leur information (signal) ne peut pas être transmise à distance pour être traitée. C'est pourquoi l'industrie utilise des thermomètres qui utilisent

les changements électriques des propriétés d'une substance avec un changement de température.

1.2. Thermomètres basés sur l'effet thermorésistif

La résistance électrique de la plupart des substances varie considérablement en fonction de la température. Cette dépendance est utilisée pour créer des thermomètres - thermorésistances. Une thermistance est un dispositif composé d'un conducteur de courant dont la résistance électrique dépend de la température et auquel sont connectés des fils électriques.

La dépendance de la résistance électrique des métaux par rapport à la température est due à la dépendance de la mobilité des porteurs de courant (électrons). Dans les semi-conducteurs, le rôle principal est joué par la dépendance de la concentration des porteurs de courant par rapport à la température.

La plage de mesure des thermomètres est principalement limitée par les températures élevées, qui affectent la linéarité de la caractéristique du capteur, ainsi que par les propriétés mécaniques du matériau de l'élément sensible du capteur et du boîtier.

La dépendance de la température de la résistance des métaux peut être exprimée comme suit :

$$R = R_0 (1 + \gamma t) \quad (1.2),$$

où R_0 - résistance à 0°C , γ - coefficient de température de la résistance, t - température en $^\circ\text{C}$.

Les matériaux utilisés pour l'élément sensible du thermomètre à thermistance sont le platine, le nickel, le cuivre et d'autres. Les éléments sensibles des thermomètres à base de métal sont des fils très fins enroulés sur un cadre ou un film déposé sur un substrat isolant.

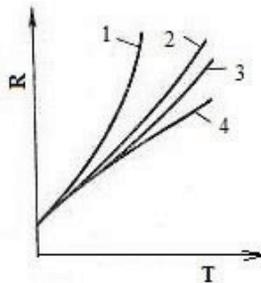


Fig. 1.1. Dépendances caractéristiques de la résistance R de quelques métaux en fonction de la température T : 1 - nickel, 2 - tungstène, 3 - cuivre, 4 - platine

Les dépendances typiques de la résistance de certains métaux en fonction de la température sont illustrées à la figure 1.1. Elles indiquent la possibilité d'obtenir un degré élevé de linéarité de la relation entre la résistance et la température.

1.3. Thermomètres à résistance à semi-conducteur

Il s'agit de capteurs de température (thermistances) qui utilisent la dépendance de la résistance électrique d'un semi-conducteur par rapport à la température. Cette dépendance peut être exprimée comme suit

$$R = R_o \cdot e^{B/T} \quad (1.3),$$

où R_o est la résistance à la température T tendant vers l'infini, B est le coefficient déterminant la sensibilité t_o température.

La dépendance exponentielle montre une forte non-linéarité de la caractéristique d'un tel thermomètre et c'est l'un des principaux inconvénients de ce type de capteur. D'autre part, ces thermomètres sont les plus sensibles aux changements de température. Aux températures de l'hélium liquide, leur sensibilité peut atteindre 100-200 %/K. En outre, la résistance élevée (jusqu'à 1 mégohm) permet de négliger les interférences aux points de connexion des fils du circuit électrique. Des semi-conducteurs tels que le silicium, le germanium, l'arséniure de gallium, etc., ainsi que des oxydes métalliques sont utilisés pour la fabrication de ces thermomètres.

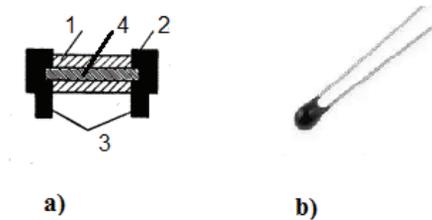


Fig. 1.2. a) - l'un des modèles typiques de thermomètre à semi-conducteur - thermistance. 1 - verre, 2 - acier, 3 - argent, 4 - élément sensible, b) - échantillon de thermistance miniature à semi-conducteur.

Les thermomètres à semi-conducteurs peuvent être de différents types. Grâce à la technologie de la microélectronique, l'élément sensible de la thermistance peut être rendu micro-miniature. La figure 1.2 présente quelques modèles de thermomètres à semi-conducteurs.

Les thermistances à semi-conducteur sont largement utilisées. Un semi-conducteur sous forme de film sur un substrat isolant ou en vrac sert de conducteur de courant électrique. La taille totale des thermistances peut être inférieure à 1 mm³, la résistance électrique de quelques Ohm à 100 kOhm, les courants d'alimentation, en règle générale, de 10 à 100 µA, la sensibilité de 3 %/K dans le domaine de la température ambiante à 100 %/K dans le domaine des températures cryogéniques, l'inertie peut atteindre plusieurs dizaines de millisecondes et moins.

Les thermistances à semi-conducteur sont largement utilisées pour mesurer et contrôler la température dans une large gamme, mais, en règle générale, pas au-dessus de 200 °C, car à haute température, la conductivité intrinsèque et la dépendance de la température de la résistance chutent brusquement, deviennent non monotones et ne sont pas stables. Dans une large gamme de températures, la dépendance de la température de la résistance du semi-conducteur $R(T)$ a un caractère complexe et dépend du type d'impureté dopante et du niveau de dopage. Il est donc impossible d'exprimer la dépendance de $R(T)$ par une formule simple qui permettrait d'effectuer un étalonnage avec une grande précision. En règle générale, l'ensemble de l'intervalle de température est divisé en sections distinctes, dans lesquelles la dépendance de $R(T)$ est décrite par sa formule d'interpolation.

Le groupe de transducteurs semi-conducteurs sensibles à la température utilisés dans les thermomètres est souvent appelé thermistances. Ils présentent une caractéristique hautement non linéaire, mais peuvent être utilisés efficacement dans les systèmes de mesure de la température.

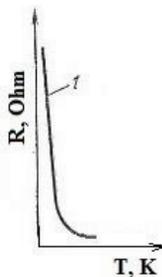


Fig. 1.3. Dépendance de la température de la résistance d'une thermistance typique.

Une caractéristique typique d'une thermistance est illustrée à la figure 1.3. La comparaison des caractéristiques des transducteurs résistifs métalliques avec celles d'une thermistance permet de conclure que cette dernière :

1) sont plus raides, c'est-à-dire que leur coefficient de résistance à la température est sensiblement plus élevé que celui des métaux, du moins dans la partie principale de la courbe ;

2) diminuent avec l'augmentation de la température, c'est-à-dire que leur coefficient de résistance à la température est négatif.

Les thermistances dont le coefficient de résistance à la température est négatif sont mieux connues sous le nom de thermistances NTC. Il convient de noter qu'il existe également des thermistances avec un coefficient de résistance positif, qui sont appelées thermistances CTP. Ces dernières sont le plus souvent utilisées non pas pour mesurer la température mais, par exemple, pour éviter une surchauffe.

Les thermistances sont nettement plus petites que les transducteurs résistifs métalliques et réagissent donc plus rapidement aux changements de température. D'autre part, la petite taille des thermistances signifie qu'un faible courant est nécessaire pour l'auto-échauffement. On peut donc supposer que le courant influe sur la précision de la mesure.

La méthode d'étalonnage d'une thermistance à semi-conducteur peut être examinée à l'aide de l'exemple suivant. Par exemple, dans la région de la température ambiante, la dépendance de $R(T)$ pour les thermistances à semi-conducteur peut être exprimée par la formule (1.3).

Pour l'étalonnage des thermistances (obtention des tableaux de dépendance de la résistance électrique en fonction de la température), nous transformons la formule (1.3) :

$$\ln R = \ln R_0 + B(1/T) \quad (1.4),$$

L'expression obtenue (1.4) est l'équation d'une droite en coordonnées $1/T$ et $\ln R$. $\ln R_0$ est la valeur du logarithme de la résistance lorsque T tend vers l'infini. Le coefficient B est égal à la tangente de l'angle α de la pente de la droite à l'axe $1/T$. Si, à deux températures fixes T_1 et T_2 , on mesure les résistances de la thermistance R_1 et R_2 respectivement, on peut tracer la dépendance de $\ln R(1/T)$ en fonction des deux points :

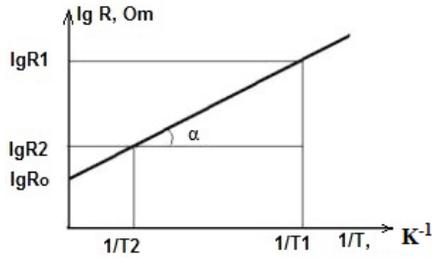


Fig. 1.4 Dépendance de la température de la résistance R d'une thermistance à semi-conducteur

En utilisant la formule (1.4) et le graphique obtenu, il est possible de trouver pour toute valeur de R dans l'intervalle de R_1 à R_2 la valeur de température correspondante - pour établir des tableaux d'étalonnage.

Pour obtenir des mesures de température précises, l'étalonnage des thermistances est effectué dans des laboratoires spécialisés à l'aide de mesures de haute précision appropriées et de formules d'approximation pour la plage de température requise, le traitement des données par ordinateur, etc. Dans une large gamme de températures, la dépendance de la résistance des thermistances à semi-conducteur par rapport à la température est assez complexe.

Les thermomètres à résistance sont utilisés dans les dispositifs de mesure, de contrôle et de régulation automatique de la température. Outre l'élément sensible, elles comportent une source de courant et un circuit de mesure. Le circuit de mesure, par exemple, d'un pont à courant continu équilibré est illustré à la figure 1.5.

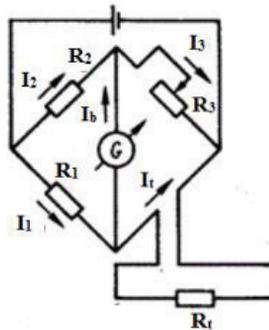


Fig. 1.5. Schéma du pont CC équilibré

En déplaçant le curseur du rhéostat R_3 , on amène le pont à l'état d'équilibre, auquel le galvanomètre G fixe l'absence de courant dans la diagonale du pont ($I_t = 0$). Ainsi, la valeur de R_3 est proportionnelle à la résistance mesurée R_t , qui dépend de la température. L'équilibrage du pont peut être réalisé automatiquement. Pour ce faire, par exemple, la résistance de la résistance change sous l'influence de la flèche zéro du galvanomètre G .

Outre les ponts de mesure équilibrés, on utilise également des ponts déséquilibrés, qui se caractérisent par une plus grande fiabilité mais une précision moindre en raison de l'influence des fluctuations de la tension de la source.

1.4. Exemples de thermistances industrielles

Par exemple, nous pouvons considérer les thermistances industrielles bien connues des séries MMT et KMT. Les thermistances de type MMT-1 et KMT-1 sont constituées d'un barreau semi-conducteur recouvert de peinture émaillée, avec des capuchons de contact et des fils. Ces fils de thermistance ne peuvent être utilisés que dans des pièces sèches. Les thermistances de type MMT-4 et KMT-4 sont montées dans un boîtier métallique et scellées. Elles peuvent être utilisées dans n'importe quelle humidité et n'importe quel environnement qui n'est pas agressif pour le boîtier. L'étanchéité est assurée par du verre et de l'étain. Le noyau de la thermistance de type MMT-4 est enveloppé d'une feuille métallique. Le dissipateur de courant est constitué d'un fil de nickel. Ces thermistances sont produites pour des valeurs de résistance nominale de 1 à 200 kOhm (à 20°C) et peuvent être utilisées dans une plage de température allant de -100 à 129°C.

Les métaux purs sont également utilisés comme matériaux pour les thermomètres à résistance : par exemple, le platine sous forme de fil fin d'un diamètre de 0,05-0,07 mm pour mesurer des températures allant jusqu'à 630°C. Le cuivre, le nickel ou le fer pour mesurer des températures de 100 à 150°C. Ils sont utilisés sous forme de fils d'un diamètre de 0,1 mm ou sous forme de films des matériaux respectifs.

Le matériau des thermomètres à résistance peut être enroulé de différentes manières :

- sur une plaque de verre
- sur un tube de verre

- sur une croix en mica ou en porcelaine.

Les métaux les plus utilisés dans la fabrication des éléments sensibles des thermistances sont le platine, le nickel et le cuivre.

1.5. Thermomètres à résistance de platine

Ces transducteurs utilisent le changement de résistance d'un fil ou d'un film de platine pour déterminer la température. Ils sont également appelés détecteurs de température résistifs. Il ne s'ensuit pas que d'autres métaux ne puissent pas être utilisés pour mesurer la température, mais les éléments sensibles en platine sont le plus souvent utilisés dans ces transducteurs.

La sensibilité de ces détecteurs de température résistifs est assez faible et la réponse dynamique est assez lente (en raison de la conception du dispositif). Ils sont également susceptibles d'être détruits par les vibrations et les chocs.

Il existe deux types fondamentaux de transducteurs résistifs à fil de platine : la sonde immergée et l'élément sensible monté en surface. Les éléments filaires sont généralement montés sur une base en céramique avec une tension minimale et sont généralement recouverts d'un matériau protecteur pour éviter qu'ils ne soient exposés à l'environnement.

La conception d'une sonde à fil de platine typique est illustrée à la figure 1.6(a), et l'élément sensible à la température monté en surface à la figure 1.6(b). Les transducteurs à film (fig. 1.6, c), qui utilisent une feuille métallique sur un substrat isolant, ne sont pas aussi courants que les sondes à fil, bien que leur utilisation soit en constante augmentation en raison de leur petite taille, de leur réponse dynamique améliorée, de leur sensibilité plus élevée et de leur coût relativement faible.

Les transducteurs résistifs en platine sont généralement inclus dans l'un des bras d'un pont de Wheatstone, ce qui permet d'assurer une grande précision de mesure. Bien entendu, la faible résistance du dispositif (environ 100 ohms) pose des problèmes lorsqu'il est connecté à un équipement de mesure, car la résistance des fils reliant le transducteur au circuit de mesure peut être proportionnelle à la résistance du transducteur.

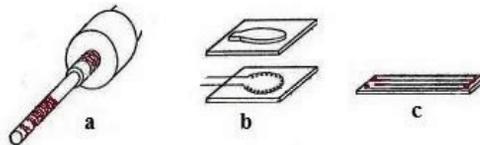


Fig. 1.6. Modèles de transducteurs résistifs à fil de platine : a - sonde à fil, b - transducteur à fil monté sur la surface de l'élément sensible, c - transducteur à couche mince monté sur la surface de l'élément sensible.

1.6. Chauffage propre des thermomètres à résistance

L'échauffement intrinsèque des éléments sensibles à résistance s'entend comme une augmentation de la température ΔT par rapport à la température ambiante mesurée, due au dégagement de chaleur joule dans ces éléments lors du passage du courant de mesure. Cet excès de température constitue une erreur de mesure supplémentaire, qui dépend non seulement du courant, mais surtout de la quantité de chaleur qui peut être dissipée dans l'environnement.

Le transfert de chaleur est déterminé par le matériau et les dimensions de l'élément sensible ainsi que par l'état et les propriétés thermodynamiques de l'environnement. Les fabricants d'éléments sensibles de thermomètres indiquent généralement pour chaque type d'élément la chute de courant et de tension maximale admissible à travers celui-ci sous la forme d'un diagramme, par exemple (fig. 1.7). L'élément sensible peut être utilisé uniquement dans la branche ascendante gauche de la caractéristique de sorte que, dans certaines conditions limites, il n'y ait pas d'interférence due à son échauffement par le courant de mesure. Par exemple, un élément sensible en platine (Pt 100) sur un cadre en céramique dans un tube métallique s'échauffe d'environ 0,01-0,02 K dans l'eau calme et de 0,1 K dans l'air calme lorsqu'il est traversé par un courant de 3 mA. Le courant maximal ne doit pas dépasser 10 mA. Pour les petits thermistors NTC, le courant maximal admissible peut n'être que de quelques microampères.

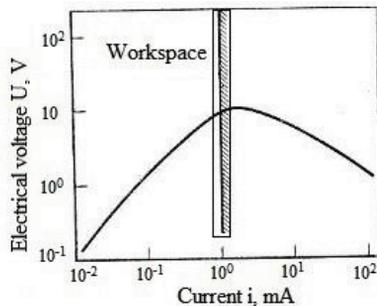


Fig. 1.7. Exemple de diagramme des valeurs admissibles du courant traversant la thermistance et de la chute de tension sur celle-ci

1.7. Thermomètres à résistance à basse température (cryogéniques) - thermistances. Mesure de la température dans la zone cryogénique

Les capteurs semi-conducteurs et métalliques - thermomètres à résistance (thermistances) et thermocouples avec des caractéristiques appropriées sont utilisés pour mesurer la température dans la région cryogénique.

Très souvent, les mesures à basse température doivent être effectuées en présence de champs magnétiques assez puissants. C'est pourquoi les thermomètres (capteurs) à basse température, en plus d'une bonne sensibilité à la température et d'une stabilité des caractéristiques, doivent avoir une faible sensibilité à l'influence des champs magnétiques. Des organisations de renom telles que VNIIFTRI (Russie), LakeShore (États-Unis), l'Institut de physique des semi-conducteurs (Ukraine), etc. sont engagées dans le développement, la recherche et la fabrication de thermistances cryogéniques (ainsi que d'autres capteurs pour la gamme cryogénique).

Parmi les thermomètres à résistance métallique connus, on peut citer les thermistances en platine, qui se distinguent par des caractéristiques métrologiques élevées. Cependant, par exemple, le champ magnétique $B=2$ Tesla à une température de 4,2 K provoque une croissance de la résistance équivalente à 5 K. On considère qu'il n'est possible de prendre en compte l'influence du champ magnétique qu'à des températures supérieures à celles de l'azote liquide (77 K).

Les thermistances en fer-rhodium sont moins sensibles aux champs magnétiques. À une température de 4,2 K, un champ de 3 Tesla entraîne une augmentation de la résistance de 3 % (équivalant à environ 0,5 K).

Parmi les thermistances à semi-conducteur, les thermistances au germanium sont les plus utilisées. Elles présentent une bonne stabilité à long terme, une sensibilité élevée ($\cong 100 \text{ \%}/\text{K}$ à 4,2 K) et une précision d'environ 0,01 K. Les thermistances au germanium sont fabriquées à partir de germanium en vrac, de germanium dispersé ou de films de germanium sur des substrats isolants. Il existe des thermistances au germanium connues qui, en raison de leur faible valeur de magnétorésistance et dans des champs magnétiques allant jusqu'à 6 Tesla, offrent une précision de 0,01 K.

Outre le germanium, d'autres matériaux semi-conducteurs, tels que l'arséniure de gallium, sont également utilisés pour les thermistances cryogéniques. Toutefois, on considère que les caractéristiques métrologiques de ces thermomètres sont, en règle générale, moins bonnes que celles des thermomètres au germanium.

Il existe également des capteurs au carbone - des thermomètres à résistance, qui sont souvent utilisés pour mesurer les températures dans la région cryogénique en présence de champs magnétiques. Il s'agit des thermomètres Allen-Bradley, Spear, Mitsushita, TSU (fabricant VNIIFTRI), ainsi que TVO. Il est noté dans la littérature que, par exemple, les thermomètres TCU offrent une reproductibilité de $\Delta T/T$ avec une erreur ne dépassant pas 0,0002. Dans un champ magnétique de 6 Tesla à une température de 4,2 K, leur erreur est de 0,35 K. Les thermomètres TBO dans le champ de 6 Tesla offrent une précision qui n'est pas inférieure à 0,12 K.

1.8. Thermistances cryogéniques à base de germanium dispersé

Pour améliorer les caractéristiques techniques des dispositifs microélectroniques à semi-conducteurs et créer leurs variétés, on utilise à la fois de nouvelles solutions de conception utilisant des matériaux connus et de nouvelles technologies permettant d'obtenir des matériaux aux propriétés électrophysiques prometteuses. Lors de la création de thermomètres, dont le fonctionnement est basé sur l'effet thermorésistif, la stabilité de la dépendance à la température de la résistance électrique du matériau utilisé et la conception du convertisseur thermique, une sensibilité suffisante, une erreur minimale due à l'influence d'éléments extérieurs sont d'une importance cruciale. L'instabilité des thermistances à semi-conducteurs connues commence à se manifester surtout à des températures cryogéniques.

À des températures inférieures à 20 K, le manque de répétabilité rend de nombreux thermomètres à résistance inadaptés aux mesures de précision. La pratique montre que ces inconvénients sont moins inhérents aux thermomètres au germanium. Cependant, le germanium pur n'est pas utilisé en thermométrie car, à basse température, il présente une résistance très élevée et une faible sensibilité. Souvent, les mesures doivent être effectuées dans des conditions de diverses influences externes (présence de champs magnétiques, etc.) qui, en affectant la résistance du germanium pur, peuvent conduire à des erreurs significatives. Actuellement, pour obtenir des propriétés électrophysiques adéquates du germanium en vrac, diverses

méthodes de dopage assez coûteuses et nécessitant beaucoup de travail sont utilisées. Elles utilisent également le germanium sous forme de film. Certains travaux ont étudié des thermistances cryogéniques basées sur des films de germanium sur de l'arséniure de gallium semi-isolant. A 4,2 K, ils peuvent avoir une sensibilité d'environ 20 %/K, certains sont résistants à l'irradiation neutronique à 77 K à des doses de l'ordre de 10^{15} cm².

On connaît des études sur des échantillons expérimentaux de thermistances à base de germanium dispersé en vrac obtenu par passage mécanique à différentes températures et pressions d'une poudre de germanium monocristallin finement dispersée. L'objectif de l'étude était de créer des thermistances pour la plage de température de 4,2 à 300 K, résistantes aux influences extérieures. La dépendance de la température de la résistance électrique dans la gamme de température ci-dessus, la magnétorésistance à T=4,2 K et l'effet de l'irradiation neutronique sur la résistance électrique à température ambiante ont été étudiés.

Le germanium dispersé a été obtenu à partir d'une poudre de germanium monocristallin de conductivité de type p avec une résistivité de 15 Ohm.cm. Les échantillons ont été produits par exposition à des pressions et des températures élevées. Il a été constaté que la pression et la température auxquelles la poudre a été pressée déterminent les propriétés électrophysiques du germanium dispersé obtenu. Les échantillons les plus appropriés ont été utilisés pour la création de thermorésistances à des températures cryogéniques. Le germanium dispersé obtenu avait une conductivité de *type p*, une résistance spécifique à température ambiante $\rho = (1-4)$ Ohm.cm. On peut supposer que les niveaux d'accepteurs sont dus aux particularités de la structure cristalline du matériau obtenu. On sait que le type de conductivité peut être déterminé par différents types de défauts structurels. Les particularités de la structure du germanium dispersé (en poudre) peuvent également expliquer la résistance accrue aux radiations de ce matériau. Les échantillons expérimentaux de thermistances avaient un élément sensible d'une dimension d'environ 1 mm³ (fig. 1.8).

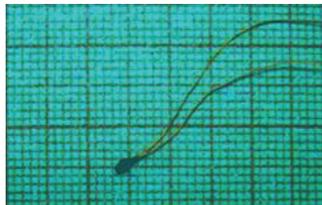


Fig. 1.8. Échantillon expérimental d'une thermistance à base de germanium dispersé

Les résultats des mesures de la dépendance de la température de la résistance électrique sont présentés à la figure 1.9. On y voit la dépendance en température de la résistance du germanium monocristallin en vrac de conductivité de type p (courbe 1) et des thermistances expérimentales en germanium dispersé (courbes 2,3).

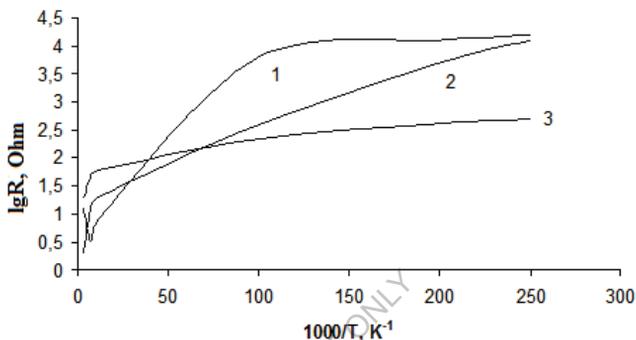


Fig. 1.9. Dépendance de la température de la résistance électrique : 1 - germanium monocristallin initial en vrac, 2- thermistance à base de germanium dispersé de type A, 3- thermistance à base de germanium dispersé de type B. Les types A et B diffèrent principalement par la température et la valeur de la pression lors de l'obtention du germanium dispersé.

La dépendance de la température de la résistance électrique des thermistances en germanium dispersé (poudre) de type A (courbe 2) à basse température est plus abrupte que la dépendance du germanium initial monocristallin et présente un caractère plus monotone dans l'ensemble de la plage de température. Le caractère lisse de la dépendance de la résistance électrique par rapport à la température permet de l'approximer avec des formules mathématiques très simplement et avec une bonne précision. Pour un échantillon de type A, par exemple, même pour la plage de température 77-300 K, l'utilisation d'un polynôme de la forme :

$$\ln R = \sum_{i=0}^n A_i (\ln T) \quad (1.5),$$

(où A_i - coefficients constants déterminés par la méthode des moindres carrés, n - déterminés à partir de la condition de l'erreur

d'approximation la plus faible) déjà pour $n = 3$ nous obtenons la dépendance :

$$\ln R = 15,1077031 + 1,6552736 * \ln T - 1,7901811 * (\ln T)^2 + 0,193233 * (\ln T)^3$$

avec un coefficient de corrélation $r^2 = 0,9995$ et une erreur d'environ 0,1 K dans la région de 77K.

La sensibilité des thermistances de type A dans la zone de température de l'hélium liquide (4,2 K) atteint des valeurs supérieures à 100 %/K. La sensibilité des thermistances en matériau de type B est d'environ 20 %/K et, à 4,2 K, leur résistance électrique ne dépasse généralement pas 500 Ohm.

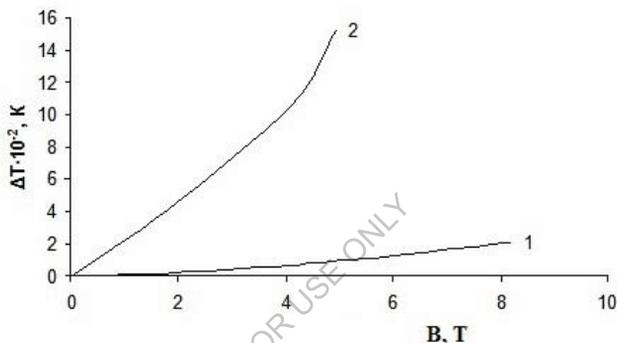


Fig. 1.10. Dépendance de l'erreur de mesure de la température ΔT dans la région de 4,2 K en fonction de la valeur du champ magnétique B pour les thermistances de type A (courbe 1) et de type B (courbe 2).

La figure 1.10 montre la dépendance de l'erreur ΔT de la mesure de la température dans la région de l'hélium liquide en présence de champs magnétiques par rapport à la magnitude du champ magnétique. L'erreur des thermistances en matériau de type A (courbe 1) dans un champ de 8 T est d'environ 0,02 K, et celle des thermistances de type B dans un champ de 4 T atteint 0,15 K. Il convient de noter que la magnétorésistance $\Delta R/R$ (où ΔR est la variation de la résistance sous l'influence du champ magnétique, R étant la résistance initiale) dans les deux types de thermistances est à peu près la même. Par exemple, dans un champ de 4 T, la magnétorésistance des deux types de thermistances se situe dans une fourchette de (2,5 - 3,0) %. Mais la précision de la mesure dans les champs magnétiques des thermistances de type A est plus élevée en raison d'une plus grande sensibilité à la température.

Afin d'éliminer les erreurs induites par le champ magnétique, une configuration spéciale a été utilisée. Le schéma est présenté à la figure 1.11. Les fils de mesure sont fixés à la tête de détection de manière à ce que les contacts électriques soient à la distance

$$l = aR_H / \rho M, (1.6)$$

où a est la largeur de la plaque ; R_H , est la constante de Hall ; ρ est la résistivité ; $M = \Delta\rho/\rho B$ est la magnéto-résistance au champ B .

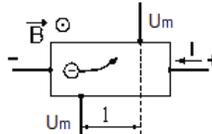


Fig. 1.11. Capteur de température à compensation de champ : U_m - tension mesurée ; l - distance entre les contacts.

Par conséquent, les tensions générées sur les contacts en raison de l'effet Hall et de la magnéto-résistance sont mutuellement compensées de manière à minimiser l'effet de champ sur la précision de la mesure.

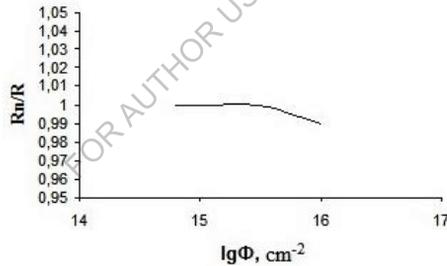


Fig. 1.12. Dépendance de la variation relative de la résistance électrique d'une thermistance (type A) après irradiation neutronique par rapport à la valeur des flux neutroniques Φ . R - résistance initiale, R_n - résistance après irradiation.

L'influence de l'irradiation sur les caractéristiques des thermistances à base de germanium dispersé a été étudiée. La figure 1.12 montre la dépendance de la résistance des thermistances de type A par rapport à l'exposition au rayonnement. L'effet du rayonnement sur la valeur de la résistance a jusqu'à présent été étudié de manière évaluative et uniquement à température ambiante. Les caractéristiques ont été mesurées à une température de 300 K avant irradiation et après irradiation avec des flux de

neutrons Φ de $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ à $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. La température pendant les mesures a été stabilisée avec une précision de 0,1 K. L'énergie des neutrons était de 1 MeV et l'intensité du flux était de $(2-4) \cdot 10^8 \text{ fl/s}$. La figure montre que la résistance électrique des thermistances commence à changer de façon marquée à l'approche de niveaux d'irradiation neutronique de 10^{16} cm^{-2} .

1.9. Thermodiodes et thermotransistors

Les thermodiodes et les thermotransistors sont utilisés dans les capteurs de température fonctionnant dans une plage de -80 à $+150$ °C. La limite supérieure de la plage de température est limitée par le claquage thermique de la jonction $p-n$ et atteint 200 °C pour certains types de capteurs au germanium, et jusqu'à 500 °C pour les capteurs au silicium. La limite inférieure de la plage de température des thermodiodes et des thermotransistors est déterminée par la diminution de la concentration des porteurs principaux et peut atteindre pour les capteurs au germanium $(-240 - 260)$ °C, pour les capteurs au silicium -200 °C.

Les principaux avantages des thermodiodes et des thermotransistors sont leurs dimensions réduites, leur interchangeabilité et, surtout, leur faible coût, ce qui permet de les utiliser dans des capteurs à usage unique.

La relation entre le courant I à travers une jonction $p-n$ (diode ou transistor) et la chute de tension U à travers elle est définie par une certaine équation. Cette équation définit le courant à travers la jonction, à la fois à la polarisation directe et à la polarisation inverse de la jonction. Les équations et formules connues nous permettent de constater que les courants direct et inverse d'une jonction $p-n$ sont fonction de la température. Les jonctions $p-n$ ouvertes sont principalement utilisées pour mesurer la température. La théorie montre que la chute de tension aux bornes d'une jonction $p-n$ ouverte pour un courant I traversant la jonction est déterminée par une formule approximative, d'où il ressort que la chute de tension dépend linéairement de la température et diminue avec l'augmentation de la température. La sensibilité à la température de la jonction $p-n$ en termes de tension est de $\approx 1,5 \text{ mV/K}$. Si l'on compare les coefficients de sensibilité à la température pour la chute de tension à travers la jonction $p-n$ et la thermofréquence électromagnétique des thermocouples fonctionnant dans la même plage de température (par exemple, chromel - copel), on peut dire que la sensibilité de la jonction $p-n$ est environ 100 fois plus élevée que la sensibilité des thermocouples.

1.10. Transducteurs thermoélectriques (thermocouples). Principe de fonctionnement, schémas d'allumage et d'utilisation des thermocouples.

Le principe de fonctionnement d'un thermocouple est basé sur l'effet thermoélectrique, qui consiste dans le fait que dans une boucle fermée constituée de deux conducteurs dissemblables, une thermo-FEM (tension) apparaît si les points de jonction des conducteurs ont des températures différentes. Si nous prenons un circuit fermé (voir fig. 1.13) constitué de conducteurs dissemblables (thermoélectrodes), il apparaîtra à leurs jonctions une CEM thermique $E(t)$ et $E(t_0)$, qui dépendent des températures de ces jonctions t et t_0 . Étant donné que les thermoélectrodes considérées sont incluses dans une contre-mesure, la CEM thermoélectrique résultante agissant dans le circuit sera définie comme $E(t) - E(t_0)$.

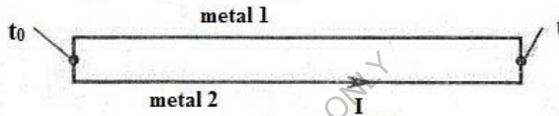


Fig. 1.13. Schéma d'un circuit fermé de deux conducteurs

Dans le cas d'une température égale des deux jonctions, la FEM thermique résultante sera égale à zéro. Dans la pratique, l'une des jonctions du thermocouple est immergée dans un thermostat (en général, de la glace fondante) et la différence de température et la température de l'autre jonction sont déterminées par rapport à elle. La jonction qui est immergée dans le milieu contrôlé (étudié) est appelée l'extrémité utile du thermocouple, et la seconde jonction (dans le thermostat) est appelée l'extrémité libre.

Dans toute paire de conducteurs homogènes, l'ampleur de la FEM thermoélectrique résultante ne dépend pas de la distribution de la température le long des conducteurs, mais dépend uniquement de la nature des conducteurs et de la température de la jonction. Si un circuit thermoélectrique est déconnecté à n'importe quel endroit et qu'il comprend des conducteurs dissemblables, alors, à condition que tous les points de jonction résultants soient à la même température, la FEM thermique résultante dans le circuit ne changera pas. Ce phénomène est utilisé pour mesurer la FEM thermique d'un thermocouple. La FEM résultante dans les

thermocouples est faible : elle est inférieure à 8 mV par 100 °C et, en règle générale, ne dépasse pas 70 mV en valeur absolue.

Les thermocouples peuvent être utilisés pour mesurer des températures comprises entre -270 et 2200 °C. Pour mesurer les températures jusqu'à 1100 °C, on utilise des thermocouples en métaux communs ; pour mesurer les températures entre 1100 et 1600 °C, on utilise des thermocouples en métaux nobles et en alliages du groupe du platine. Pour mesurer des températures encore plus élevées, on utilise des thermocouples en alliages à base de tungstène résistant à la chaleur.

Actuellement, le platine, le platine-rhodium, le chromel et l'alumel sont le plus souvent utilisés pour les thermocouples.

Lors de la mesure de la température dans une large gamme, il est nécessaire de tenir compte de la non-linéarité de la fonction de conversion des thermocouples. Par exemple, la fonction de conversion des thermocouples cuivre-constantane pour la plage de température de -200 à 300 °C avec une erreur d'environ $\pm 2 \mu\text{V}$ est décrite par la formule suivante

$$E = At^2 + Bt + C \quad (1.7),$$

où A , B et C sont des constantes déterminées en mesurant la force électromotrice thermique à trois températures, t est la température de la jonction de travail en °C.

La constante de temps (inertie) des convertisseurs thermoélectriques dépend de la conception du thermocouple, de la qualité du contact thermique entre la jonction de travail du thermocouple et l'objet étudié. Pour les thermocouples industriels, la constante de temps est de l'ordre de plusieurs minutes. Cependant, il existe également des thermocouples à faible inertie, dont la constante de temps est comprise entre 5 et 20 secondes, voire moins.

L'instrument de mesure est connecté au circuit du thermocouple à l'extrémité libre du thermocouple et à l'une des thermoélectrodes.

Comme indiqué ci-dessus, l'extrémité libre du thermocouple doit se trouver à une température constante lors de la mesure de la température. Si la longueur du thermocouple lui-même est insuffisante, on utilise, pour amener cette extrémité dans une zone de température constante, des fils constitués de deux noyaux en matériaux (métaux) ayant les mêmes propriétés thermoélectriques que les électrodes du thermomètre.

Pour les thermocouples en métaux communs, les fils de rallonge sont le plus souvent fabriqués dans les mêmes matériaux que les thermoélectrodes principales. Pour les thermocouples en métaux nobles, les fils de rallonge

sont fabriqués dans d'autres matériaux (peu coûteux) qui développent la même force électromotrice thermique que les électrodes du thermocouple dans la plage de température de 0 à 150 °C. Par exemple, pour les thermocouples en platine - platine-rhodium, les thermoélectrodes d'extension sont faites de cuivre et d'un alliage spécial. Ces métaux forment un thermocouple identique au thermocouple platine-platine-rhodium dans la plage de 0 à 150 °C. Pour les thermocouples chromel-alumel, les thermoélectrodes d'extension sont en cuivre et en constantan, et pour les thermocouples chromel-copel, les thermoélectrodes d'extension peuvent être les thermoélectrodes principales sous forme de fils flexibles. Si les thermoélectrodes d'extension sont mal connectées, une erreur importante peut se produire.

En laboratoire, la température de l'extrémité libre du thermocouple est maintenue à 0°C en le plaçant dans un vase Dewar rempli de glace pilée et d'eau. Dans les conditions industrielles, la température de l'extrémité libre du thermocouple est généralement différente de 0 °C et est habituellement égale à la température ambiante (température de la pièce). Étant donné que les thermocouples sont étalonnés à une température de l'extrémité libre de 0 °C et que les tables d'étalonnage sont données par rapport à 0 °C, cette différence peut être une source d'erreur importante. Pour réduire cette erreur, il convient en règle générale d'introduire une correction dans les relevés du thermomètre (thermocouple). Lors du choix de la correction, on tient compte à la fois de la température des extrémités libres du thermocouple et de la valeur de la température mesurée (ceci est dû au fait que la fonction de conversion du thermocouple n'est pas linéaire), ce qui rend difficile la correction précise de l'erreur.

Pour éliminer l'erreur, la correction automatique de la température des extrémités libres du thermocouple est largement utilisée. À cette fin, un pont est inclus dans le circuit du thermocouple et du millivoltmètre, dont un bras est une thermistance en cuivre, et les autres bras sont formés par des thermistances en manganine. Lorsque la température des extrémités libres du thermocouple est égale à 0 °C, le pont est en équilibre ; lorsque la température des extrémités libres du thermocouple s'écarte de 0 °C, la tension à la sortie du pont n'est pas égale à zéro et s'ajoute à la FEM thermique du thermocouple, ce qui entraîne une correction dans les relevés de l'appareil (la valeur de la correction peut être réglée à l'aide d'une résistance spéciale). En raison de la non-linéarité de la fonction de

conversion du thermocouple, il n'est pas possible de compenser totalement l'erreur, mais celle-ci est considérablement réduite.

En fonction de la précision requise dans la pratique lors de l'utilisation d'un thermocouple, les schémas de connexion suivants sont le plus souvent utilisés (voir fig. 1.14). Par exemple, le thermocouple cuivre (M) - constantan (K) est utilisé :

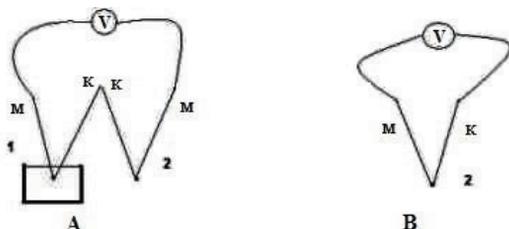


Fig. 1.14. Schémas de connexion des thermocouples.

A) circuit différentiel. B) dans ce schéma, la température de l'extrémité libre peut être considérée comme égale à la température ambiante (température aux points de connexion du dispositif de mesure au thermocouple).

Dans le schéma de connexion différentielle (fig. 1.14.A), l'extrémité libre 1 est à une température constante (glace fondante, 0°C). Une force électromotrice thermique se forme en raison de la différence de température entre la jonction de travail 2 et l'extrémité libre 1. Dans le schéma de connexion illustré à la figure 1.14.B, la température de l'extrémité libre peut être considérée comme égale à la température ambiante (température aux points de connexion du dispositif de mesure au thermocouple) et la température dans la zone de la jonction de travail 2 est calculée (corrigée) par rapport à celle-ci. Dans ce cas, la FEM thermique dans le thermocouple est formée en raison de la différence de température entre la jonction de travail et la température ambiante.

Pour mesurer la force électromotrice thermique, on utilise des voltmètres à haute impédance d'entrée ou d'autres types de galvanomètres. Pour déterminer la température, on utilise des tables d'étalonnage (voir l'ANNEXE), qui sont établies pour la condition que l'extrémité libre du thermocouple soit à zéro degré Celsius. Certaines tables d'étalonnage, par exemple pour les thermocouples en chromel-alumel, etc., sont présentées dans les tableaux à la fin de la monographie.

1.11. Fabrication de thermocouples

Pour les mesures et les recherches en laboratoire (à domicile), les thermocouples peuvent être fabriqués de manière indépendante. Pour ce faire, on utilise des fils produits industriellement à partir de matériaux adaptés à la fabrication de thermocouples. Le diamètre du fil est important lorsqu'il s'agit de mesurer des processus thermiques dans de petits volumes (étude de petits objets). Plus le diamètre du fil du thermocouple est petit, plus l'erreur dans la détermination de la température et des paramètres des processus thermiques est faible, car l'influence du thermocouple lui-même sur l'échange de chaleur est réduite. Le matériau du thermocouple est choisi en fonction de la plage de températures de fonctionnement prévue, de la sensibilité requise, de la présence d'équipements secondaires, etc. Les thermocouples les plus utilisés sont le chromel-alumel, le cuivre-constantane, etc.

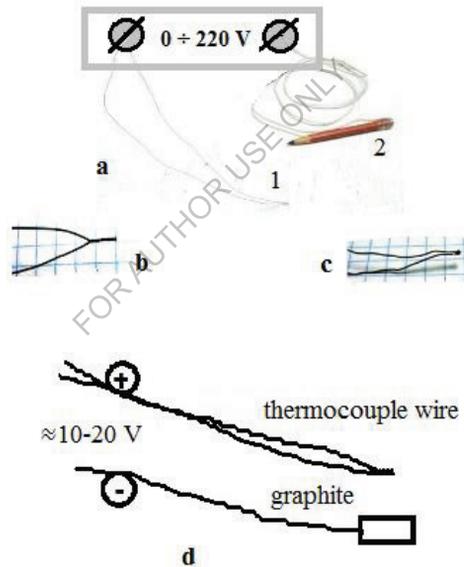


Fig. 1.15. Soudage de thermocouples : a - utilisation d'un transformateur de laboratoire, 1 - fils de thermocouple connectés, 2 - graphite (crayon), b - fils pré-connectés, c - connexion soudée, d - schéma général de connexion pendant le soudage.

La fabrication d'un thermocouple consiste à créer une connexion solide (soudure, fig. 1.15) entre deux matériaux (fils). Pour ce faire, vous

pouvez utiliser une source de tension de puissance suffisante (par exemple, LATR - autotransformateur de laboratoire (a), batterie de voiture). Un thermocouple (les deux extrémités libres) est connecté à un pôle de la source de tension - fig. 1.15.a (1), d avec des fils connectés mécaniquement - fig. 1.15.b , et une mine connectée à un morceau de graphite (par exemple un crayon - fig. 1.15.a (2)) est connectée à l'autre pôle.

Lorsque les extrémités connectées du thermocouple touchent le graphite, un arc électrique d'une puissance suffisante est généré et les fils du thermocouple sont soudés. La tension nécessaire au soudage est choisie expérimentalement, en commençant par de petites tensions de 3 à 5 V.

La tension optimale pour le soudage dépend du matériau du thermocouple, de son diamètre, de sa longueur et, en règle générale, ne dépasse pas 30-40V. Lors du travail, il est nécessaire de veiller au respect des mesures de sécurité : ne pas utiliser de tensions trop élevées, ne pas toucher les parties dénudées du circuit électrique. Pour des raisons pratiques, une petite section des fils du thermocouple peut être recouverte (isolée) avec du ruban isolant, des tubes en céramique, etc.

Une connexion suffisamment bonne peut également être obtenue en chauffant les fils de thermocouple au moyen d'une décharge d'arc allumée entre eux et une solution aqueuse forte de sel de table.

1.12. Graduation du thermocouple

La graduation d'un thermocouple consiste à établir la dépendance de la force thermoélectromotrice par rapport à la différence de température entre les fils de jonction du thermocouple. Ceci est fait, en règle générale, afin de ne pas utiliser à l'avenir des tables d'étalonnage standard, etc. La graduation peut être effectuée, par exemple, comme suit.

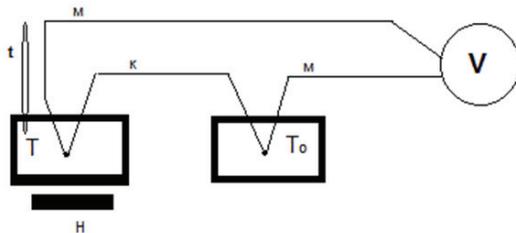


Fig. 1.16. Schéma des connexions lors de l'étalonnage du thermocouple

La figure 1.16 présente un dispositif expérimental simple, qui permet de comprendre l'essence de la technique de graduation. Une jonction (de travail) du thermocouple (par exemple, cuivre (m) - constantan (k)) est immergée dans un récipient contenant de l'huile (à la température T), l'autre libre - dans un récipient contenant de la glace $T_0 = 0$ °C. Étant donné que les tableaux d'étalonnage figurant dans la littérature sont donnés par rapport à 0 °C, il est préférable de respecter cette condition, car il sera facile à l'avenir de comparer les résultats expérimentaux obtenus avec ceux figurant dans les tableaux. En outre, la fonte de la glace permet de fixer simplement et avec précision l'une des températures par rapport à laquelle l'étalonnage est effectué et, par la suite, les mesures avec ce thermocouple. Un récipient contenant de l'huile est chauffé par un chauffage électrique H, et la température T est mesurée à l'aide d'un thermomètre t de la précision requise. La FEM thermique résultant de l'échauffement de la jonction du thermocouple est mesurée à l'aide d'un potentiomètre à courant continu V. Dressez un tableau ou un graphique de la dépendance de la FEM par rapport à la température T .

Si une grande précision de graduation et de mesure n'est pas requise, il est possible de graduer par rapport à la température ambiante. Dans ce cas, la jonction libre peut être placée dans de l'huile à température ambiante (T_0 environ 20 °C).

1.13. Alliages pour thermocouples

Pour la fabrication des thermocouples, on utilise principalement des alliages à base de métaux, bien qu'il existe des matériaux dont les valeurs de f.é.m. thermique sont beaucoup plus élevées que celles des métaux. Les semi-conducteurs font partie de ces matériaux. Toutefois, il est très difficile de fabriquer des thermocouples à partir de semi-conducteurs et, en raison de leurs caractéristiques techniques et de leur conception, ces thermocouples ne sont pas largement utilisés.

Les alliages les plus couramment utilisés pour les thermocouples sont les suivants :

- 1) copel (56% Cu et 44% Ni) ;
- 2) l'alumel (95 % de Ni, le reste étant constitué d'Al, de Si et de Mn) ;
- 3) le chromel (90 % Ni et 10 % Cu) ;
- 4) platine-rhodium (90 % Pt et 10 % Rh).

La figure 1.17 montre les dépendances de la FEM thermique en fonction de la différence de température entre la jonction chaude et la jonction froide pour différents thermocouples.

L'incohérence des compositions des alliages peut entraîner des changements significatifs dans les valeurs de la force thermoélectrique. Dans de tels cas, un étalonnage préliminaire est nécessaire pour obtenir une grande précision au lieu d'utiliser des tables standard.

En fonction de la composition, les thermocouples sont utilisés pour mesurer les températures dans les plages suivantes : platine-rhodium - platine jusqu'à 1600°C ; cuivre - constantan et cuivre - copel jusqu'à 350°C ; fer - constantan, fer - copel et chromel - copel jusqu'à 600°C ; chromel - alumel jusqu'à 900-1000°C.

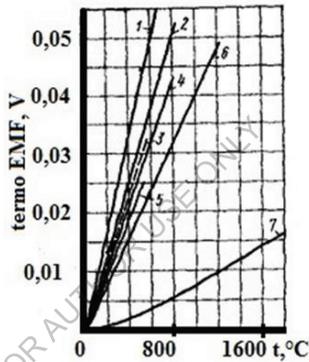


Fig. 1.17. Dépendance de la FEM thermique en fonction de la différence de température entre la jonction chaude et la jonction froide pour les thermocouples : 1 - chromel - copel, 2 - fer - copel, 3 - cuivre - copel, 4 - fer - constantan, 5 - cuivre - constantan, 6 - chromel - alumel, 7 - platine-rhodium - platine.

Parmi les thermocouples métalliques, le thermocouple chromel - copel a la plus grande CEM thermique à la même différence de température. Le signe de la FEM thermique des thermocouples illustrés à la figure 1.17 est le suivant : à la jonction froide, le courant est dirigé du premier matériau de la paire vers le second (du chromel au copel, du cuivre au constantan, etc.), et à la jonction chaude - vice versa.

La plupart des thermocouples fonctionnent régulièrement dans un environnement oxydant. Au cours d'un fonctionnement à long terme, on peut observer une modification progressive de la tension thermoélectrique du thermocouple. Les raisons de cette instabilité sont la contamination par les

impuretés de l'atmosphère environnante, l'oxydation des fils, la volatilité des composants, les courbures prononcées et les déformations mécaniques, qui introduisent des contraintes internes et créent une inhomogénéité de la structure. Les thermocouples platine-rhodium présentent la stabilité, la précision et la reproductibilité les plus élevées, malgré la faible valeur de la force électromotrice thermique. Cela est dû à l'inertie chimique du matériau et à un degré élevé de pureté du matériau obtenu.

1.14. Exemples de mesure et de calcul de la température à l'aide de thermocouples

a) Calcul à partir de la valeur thermoélectrique d'un thermocouple en cuivre constant.

En fonction de la précision requise, la température peut être calculée différemment à partir de la valeur de la tension thermoélectrique du thermocouple.

Pour les mesures, lorsque la précision est suffisante à quelques fractions de degrés près, on peut utiliser les tables d'étalonnage et, en fonction de leurs données et des relevés du voltmètre (galvanomètre), en mesurant la valeur de la FEM thermique, déterminer la température. Dans ce cas, si le thermocouple est inclus dans le schéma de la figure 1.14.A et que l'extrémité libre est à 0°C, la température déterminée par la méthode ci-dessus par la valeur de la FEM thermique entre la jonction de travail et la jonction libre devrait coïncider avec la température réelle (à l'intérieur de l'erreur déterminée par la qualité du thermocouple, la méthode d'utilisation des tables) dans la zone de la jonction de travail du thermocouple.

Si un schéma plus simple d'inclusion de thermocouple fig.1.14.B est utilisé (conditionnellement parlant, l'extrémité libre du thermocouple est à la température ambiante et la FEM dans le thermocouple est générée en raison de la différence de température entre la jonction de travail et la température ambiante), il est nécessaire d'effectuer une correction lors de l'utilisation des tableaux.

Par exemple, la température dans la région de la jonction de travail peut être déterminée par la valeur de la FEM thermique mesurée (E_i) additionnée à la FEM thermique tabulée (E_{t_0}) pour une température ambiante donnée (la température à laquelle l'appareil de mesure est situé) : $E = E_i + E_{t_0}$. Si, par exemple, la température ambiante est de 20 °C, la valeur de $E_{t_0} = 0,790$ mV pour le thermocouple cuivre-constantan pour cette

température - voir le tableau d'étalonnage. Supposons que la lecture (EMF mesuré) du thermocouple cuivre-constantan $E_i = 2,119$ mV. Dans ce cas, la FEM à utiliser pour déterminer la température de la jonction de travail à partir des tableaux est la suivante : $E = 0,790 + 2,119 = 2,909$ (mV). En utilisant les tableaux, nous obtenons la valeur de la température dans la zone de jonction de travail $t = 70$ °C. La figure 1.18 montre la dépendance de la valeur EMF mesurée (E_i) et de la valeur du tableau (E_t) en fonction de la température pour ce cas.

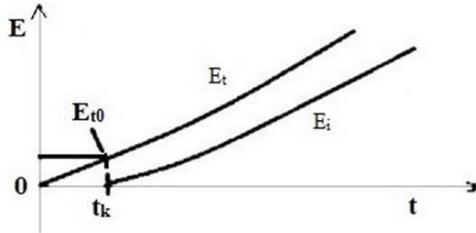


Fig. 1.18. Schéma graphique de la dépendance en température de la FEM thermique E d'un thermocouple différentiel E_t et d'un thermocouple à simple jonction E_i .

Dans le même temps, la FEM thermique des thermocouples peut parfois différer sensiblement des valeurs indiquées dans le tableau, même si l'on utilise un thermocouple différentiel et qu'on l'enclenche selon le schéma dans lequel l'une des jonctions est à 0 °C. Cela peut être dû à la présence d'impuretés, d'inhomogénéités, de déformations mécaniques, d'écarts par rapport au rapport des matériaux de l'alliage dans le fil du thermocouple. Par conséquent, si des mesures plus précises sont nécessaires, une graduation spéciale du thermocouple est effectuée (voir graduation). Il est également possible, par exemple, de sélectionner plusieurs points de la plage de température de travail, où la température peut être stabilisée et déterminée d'une manière suffisamment précise et indépendante. Ensuite, après avoir tracé la dépendance de la différence ΔE des valeurs de CEM thermique (selon les données du tableau et les valeurs mesurées) par rapport à la température, il est possible d'effectuer des corrections - d'ajouter ou de soustraire la valeur de ΔE de la CEM thermique mesurée. De cette manière, il est possible d'atteindre une précision de mesure de la température de 0,05 °C. Si une précision encore plus grande est requise, l'étalonnage est effectué dans des laboratoires de métrologie spécialisés.

b) Mesure et calcul de la température à l'aide d'un thermocouple en alliage chromel-copel.

Nous décrivons ici la mesure de la température avec un thermocouple fabriqué de nos propres mains, mais les informations données sont également utiles pour comprendre le fonctionnement des thermocouples fabriqués dans le commerce.

Si la précision de la mesure de la température doit être de 0,5 K (elle peut être supérieure ; l'erreur dépend des capacités de l'appareil de mesure V), il est nécessaire de fabriquer et d'utiliser un thermocouple différentiel (voir fig. 1.19.a). m1, m2 - métal 1 et 2 du fil du thermocouple, respectivement.

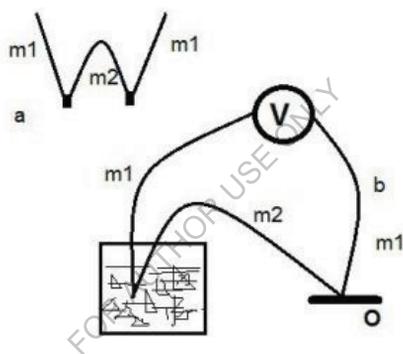


Fig. 1.19. Thermocouple différentiel - a, et schéma de mesure de la température de l'objet O - b.

Il convient de noter que pour les mesures de température dans le domaine climatique (températures ambiantes), le thermocouple chromel-cuivre est le mieux adapté, son principal avantage étant sa grande sensibilité dans le domaine des températures ambiantes. Pour les mesures dans le domaine des basses températures, il est possible d'utiliser des thermocouples chrome-alumel, cuivre-constantan, etc. (voir tableaux d'étalonnage). Pour les températures élevées, on utilise des thermocouples à base de platine, des thermocouples en chromel-alumel, etc.

Rappelons que les tables d'étalonnage des thermocouples sont établies pour la condition où l'une des jonctions du thermocouple différentiel est à 0 °C. Pour utiliser cette condition dans la pratique, l'une des jonctions du

thermocouple est immergée dans un récipient (thermos) contenant de la glace fondante, dont la température est connue pour être de 0 °C.

Le schéma d'une telle mesure de la température de l'objet **O** par un thermocouple différentiel est illustré à la figure 1.19.b.

Pour l'exemple, nous considérons que les mesures sont effectuées à l'aide d'un thermocouple en cuivre chromé. La température de l'objet **O** est déterminée par les lectures du voltmètre (galvanomètre) **V**. Par exemple, nous savons que l'objet est à une température supérieure à 0°C, la lecture du voltmètre $U = 6,43$ mV. Nous consultons le tableau et déterminons qu'une telle valeur de la FEM thermique correspond à une température de +93 °C. Il convient de garder à l'esprit que le signe de la FEM thermique dépend de la polarité de la connexion du thermocouple à l'appareil de mesure **V** et que, lors du passage de la température de l'objet à 0 °C, il sera inversé.

Si les conditions techniques permettent une précision de mesure au niveau des unités de degrés, il est possible d'utiliser un thermocouple à une jonction (voir fig. 1.20).

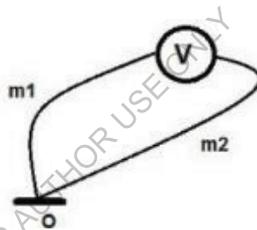


Fig. 1.20. Schéma de mesure de la température de l'objet **O** à l'aide d'un thermocouple à simple jonction.

Si nous analysons les processus physiques dans un tel circuit de mesure, nous pouvons constater que dans ce cas (comme indiqué ci-dessus), le rôle de la température, par rapport à laquelle la thermofréquence est formée, joue la température ambiante (la température à laquelle les bornes de l'appareil de mesure - le voltmètre - se trouvent). Il en est donc tenu compte lors de l'utilisation des tables d'étalonnage et de la détermination de la température de l'objet. La valeur de la FEM thermique U , qui permet de déterminer la température de l'objet à l'aide des tables, sera égale à :

$$U = U_k + U_v \quad (1.8),$$

où U_k - valeur de la table de la FEM du thermocouple différentiel (à deux jonctions) à la température ambiante t_k (température de l'appareil - par exemple, $t_k = 24$ °C, dans ce cas $U_k = 1,57$ mV), U_v - FEM thermique mesurée (lecture du voltmètre en V).

Nous avons pris par exemple la température dans la pièce de 24°C ($U_k = 1,57$ mV), si le voltmètre indique, par exemple, 3,05 mV, alors, respectivement, $U = 4,62$ mV et à l'aide des tableaux déterminer que la température de l'objet **O** - 68°C.

Pour simplifier le calcul (si une petite diminution de la précision est acceptable) lors de la détermination de la température à l'aide d'un thermocouple à jonction unique, on peut approximer la dépendance de la FEM du thermocouple par rapport à la température par une dépendance linéaire. Dans ce cas, la température de l'objet est déterminée :

$$t_o = t_k + U_v / j \quad (1.9),$$

où $j = \Delta U / \Delta t$ est la sensibilité moyenne à la température du thermocouple dans une certaine plage de température.

Par exemple, pour un thermocouple à broche chromée dans la plage de température (0 - 200) °C, la sensibilité moyenne j est d'environ 0,074 mV/°C.

1.15. Pyromètres

Les pyromètres sont des instruments qui utilisent le rayonnement électromagnétique des corps pour déterminer leur température.

Les surfaces de tous les corps de substances dont la température est supérieure au zéro absolu émettent des ondes électromagnétiques. La nature de ce rayonnement et ses caractéristiques dépendent de la température.

La longueur d'onde du rayonnement thermique se situe entre 0,1 et 1000 μm . Outre le rayonnement, les corps absorbent également le rayonnement d'autres corps. En général, un corps absorbe une partie de l'énergie, la réfléchit en partie et la transmet en partie. Tout cela est caractérisé par des coefficients appropriés. Dans la physique du rayonnement thermique, il existe le concept de corps absolument noir. Un corps absolument noir est un corps qui absorbe toutes les radiations qui tombent sur lui. L'absorption et le rayonnement des corps sont considérés par rapport à un tel corps.

Dans la pratique, aucun corps n'absorbe et ne rayonne comme un corps absolument noir. Un modèle de corps absolument noir peut être l'ouverture d'une chambre dont la surface intérieure a une bonne capacité d'absorption et la même température.

L'émissivité d'un corps absolument noir et sa dépendance à la température sont illustrées à la figure 1.21 :

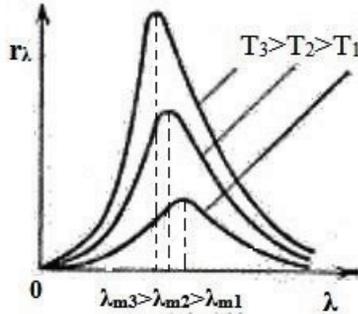


Fig.1. 21. Dépendance de l'émissivité r_λ d'un corps complètement noir en fonction de la température T et de la longueur d'onde λ .

La longueur d'onde de l'intensité maximale du rayonnement est déterminée par la loi de Wien :

$$\lambda_m = b/T \quad (10),$$

b est la constante de Wien, T est la température absolue.

Connaissant les lois du rayonnement, il est possible de déterminer la température de la surface irradiée par le flux de rayonnement mesuré tombant sur une certaine surface.

Il existe les récepteurs de rayonnement suivants :

A) Récepteurs noirs et gris (thermiques). Ces récepteurs comprennent des capteurs de température (thermorésistances, thermocouples) fixés sur des plaques noircies recevant le rayonnement. Leur sensibilité est indépendante de la longueur d'onde.

B) Éléments de détection sélective. Il s'agit de cellules photoélectriques, de photorésistances, de photodiodes et de phototransistors. La sensibilité absolue des éléments sensibles sélectifs est beaucoup plus élevée.

Les récepteurs de rayonnement provoquent une modification du courant, de la résistance et de la tension dans les circuits de traitement des signaux électriques correspondants.

À des températures élevées de la surface rayonnante (supérieures à 650°C), lorsque la couleur commence à changer, l'œil de l'observateur peut également servir de récepteur de rayonnement.

On distingue les pyromètres :

Pyromètres optiques. Les pyromètres optiques ne sont sensibles que dans une gamme étroite de longueurs d'onde. Cela est possible grâce à l'utilisation d'un filtre spécial.

Le rayonnement de l'objet étudié est analysé soit par un récepteur de rayonnement, soit par comparaison avec une source de rayonnement de référence. Les pyromètres les plus utilisés sont ceux dont le filament disparaît. Avec ces pyromètres, le chercheur compare, dans une gamme étroite de longueurs d'onde du spectre visible, la luminosité du rayonnement mesuré et celle du rayonnement de référence (filament de tungstène incandescent). Lorsque les deux luminosités sont égales, le filament disparaît.

La puissance de chauffage (courant) du filament est une indication de la température optique de l'objet surveillé. La température est déterminée par une courbe graduée ou le pyromètre peut déjà être muni d'une échelle. La température de brillance (spectrale, optique) mesurée par un pyromètre est égale à la température réelle si le coefficient d'émission spectrale de la surface de l'objet contrôlé est égal à un (corps absolument noir). Dans la pratique, la température mesurée est toujours inférieure à la température réelle et il est nécessaire d'introduire une correction dans la valeur mesurée, qui est déterminée en fonction de la température mesurée et du coefficient d'émission spectrale k_i (déterminé par des tables) (par exemple, pour une longueur d'onde $\lambda = 0,65 \text{ nm}$ - porcelaine $k_i = 0,78$ à $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, fer $k_i = 0,35$ à $800 \text{ }^\circ\text{C}$).

Les pyromètres à filament disparu sont des pyromètres très pratiques et simples. L'inconvénient est la limitation de la limite inférieure de température, ainsi qu'une certaine subjectivité des résultats de mesure. En même temps, la correction apportée au résultat de la mesure pour les objets rayonnants non noirs est plus précise que pour les pyromètres à rayonnement. Des pyromètres optiques dotés d'un récepteur de rayonnement objectif, d'un élément photoélectrique, etc. ont également été mis au point.

Les mesures avec un pyromètre à filament disparu sont effectuées d'une distance de 2 m à l'infini. La distance peut être corrigée à l'aide d'optiques spéciales. La limite inférieure de température est de $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ou de $200 \text{ }^\circ\text{C}$ pour le récepteur de l'objectif. La limite supérieure ne dépasse généralement pas $2500 \text{ }^\circ\text{C}$. Les pyromètres sont gradués sur un émetteur noir ou une lampe à filament de tungstène.

Pyromètres à rayonnement (à rayonnement complet). Il s'agit de pyromètres qui détectent le rayonnement sur l'ensemble de la gamme spectrale. Ils sont considérés comme tels si au moins 90 % du rayonnement de l'objet est utilisé dans le pyromètre. Pour ces pyromètres, seuls des récepteurs thermiques - thermocouples, thermistances - peuvent être utilisés comme récepteur. Ces pyromètres peuvent mesurer la température dans une plage allant de -50 °C à 2000 °C et plus. Dans de nombreux pyromètres, la correction des mesures en fonction du coefficient de rayonnement se fait automatiquement et le pyromètre indique immédiatement la température réelle, à condition que la valeur du coefficient de rayonnement soit connue à l'avance.

Bibliographie

1. Orlova M.P., Pogorelova O.F., Ulybin S.A. *Nizkotemperaturnaya termometriya* [Thermométrie à basse température]. M. : *Energoatomizdat*, 1987.-280 p.

2. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Répertoire "Mesures dans l'industrie"] 1-3 volumes. M. : *Metallurgiya*, 1990.

3. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4.

4. N.S. Boltovets, V.K. Dugaev, V.V. Kholechuk et al, New Generation of Resistance Thermometers Based on Ge Films on GaAs Substrates, *Temperature : Its Measurement and Control in Science and Industry 7*, 399-404 (2003).

5. Zarubin L.I., Nemish I.Yu. *Miniatyurnyy termometr soprotivleniya na 1,3-200K*. [Thermomètre à résistance miniature pour 1,3-200K]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1971, n° 4, p. 260.

6. Astrov D.I., Abilov G.S., Alshin B.I. *Izmerenie nizkikh temperatur v prisutstvii sil'nykh magnitnykh poley*. [Mesure des basses températures en présence de champs magnétiques puissants]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1977, n° 4, p. 39.

7. V. F. Mitin. *Termometry soprotivleniya na osnove plenok germaniya*. [Thermomètres à résistance basés sur les films de germanium]. *Fizika poluprovodnikov, kvantovaya elektronika i optoelektronika*. 1999. V. 2, N 1. P. 115-123.

8. Medvedeva L.A., Orlova M.P., Rabinkin A.G. *Termopara dlya izmereniya nizkikh temperature* [Thermocouple pour mesurer les basses températures]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1970, n° 5, p. 208.

9. Gorbachuk N.T., Shybyryn V. S. "SEMICONDUCTOR TEMPERATURE SENSORS - THERMORESISTORS", *Modern engineering and innovative technologies*, Germany, issue No16. Avril, 2021.

10. N. T. Gorbachuk, *Sposob izmereniya temperatury*. [Méthode de mesure de la température], Brevet de la Fédération de Russie. No. 2025736, No. 24, 1994.

11. Kiknadze G.I., Plesh A.G., Safronov A.N., Gorbachuk N.T. et autres. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa okhlazhdeniya model'noy sektsii i eksperimental'nogo bloka sverkhprovodyashchey obmotki toroidal'nogo polya ustanovki T-15 na komplekse SIMS* [Résultats d'une étude expérimentale du processus de refroidissement de la section modèle et du bloc expérimental de l'enroulement supraconducteur du champ toroïdal de l'installation T-15 sur le complexe SIMS]. *Preprint IAE-4320/10*, M., 1986, 24 p.

12. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Transducteurs semi-conducteurs de mesure de la déformation, de la température et du champ magnétique destinés à être utilisés dans des conditions d'exposition aux rayonnements, dans une large gamme de températures et de champs magnétiques]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, *Seriya : Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.

13. Mykola Gorbachuk. *MATÉRIAUX ÉLECTROTECHNIQUES*. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Royaume-Uni, 2024, 112p. ISBN : 978-620-3-46212-8.

14. N. Stefan, S. A. Mulenko, N. T. Gorbachuk. "Laser Synthesis of Nanometric Chromium Oxide Films with High Seebeck Coefficient and High Thermoelectric Figure of Merit : An Experimental Study". *Current Overview on Science and Technology Research Vol. 4, Chapter 1*, p. 1-22. ISBN imprimé : 978-93-5547-861-0, ISBN eBook : 978-93-5547-862-7, DOI : 10.9734/bpi/costr/v4/6196F

15. S.A.Mulenko, N.T.Gobachuk. Synthesis of nanometric iron oxide films by RPLD and LCVD for thermo-photo sensors. Applied Physics B : Lasers and Optics, v.105, #3, p.517-523, 2011.

16. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Transducteurs de mesure basés sur GaAs, le polysilicium et le germanium dispersé et perspectives d'utilisation]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, p.93-97.

17. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [L'influence de l'irradiation neutronique sur les caractéristiques des transducteurs de mesure semi-conducteurs de la température, de la déformation et du champ magnétique]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.

18. N.T.Gorbachuk, S.A. Mulenko, Yu.N.Petrov. Photon synthesis of iron oxide thin films for thermo-photo-chemical sensors. Applied Surface Science. Volume 258, Issue 23, 15 septembre 2012, Pages 9186-9191.

19. Sergii Mulenko, Nicolaie Stefan, Floralice Miroiu, Nikolay Gorbachuk.

Laser Synthesis of Transitional-Metal Oxides in 2D Structure and Heterostructure for Thermo Sensors with High Seebeck Coefficient. *Frontiers in Sensors (FS)* Volume 4, 2016, p.16-26.

20. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconducteurs].- *L. Nauka* 1967. 439p.

21. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki : Navchal'niy posibnik* [Cours général de physique : guide d'étude], T. 1-3. - K. : Tekhnika, 2001.

Chapitre 2. Grandeurs mécaniques. Transducteurs, capteurs, mesures

2.1. Cellules de charge

La résistance d'un conducteur étant définie par la relation suivante

$$R = \rho l/S \text{ (2.1),}$$

où ρ est la résistivité du matériau ; l est la longueur S est la surface de la section transversale, alors la résistance peut changer à chaque fluctuation de la valeur mesurée, ce qui affecte un ou plusieurs des arguments inclus dans cette expression.

Cette relation est utilisée dans les jauges de contrainte, qui sont des transducteurs convertissant une variation de la force appliquée en une variation de la résistance. Généralement, un tel transducteur est utilisé avec un pont de Wheatstone, où un, deux ou même les quatre bras sont des cellules de charge et où la tension de sortie change en réponse aux variations de la force mesurée.

Les jauges de contrainte utilisent, par exemple, des éléments transducteurs métalliques qui, lorsqu'une charge mécanique leur est appliquée, modifient leur longueur et leur section transversale. Cela entraîne une modification de la résistance. Certains matériaux utilisés pour les jauges de contrainte, tels que les matériaux semi-conducteurs, présentent un effet piézoélectrique, c'est-à-dire qu'une charge appliquée au matériau entraîne une variation importante de sa résistivité. Les jauges de contrainte de ce type ont une sensibilité supérieure de deux ordres de grandeur à celle des jauges métalliques mentionnées précédemment.

En général, tout paramètre permettant de suivre le mouvement ou la force peut être utilisé pour créer des capteurs à jauge de contrainte.

Les jauges de contrainte à fil (fig. 2.1) se présentent sous la forme de conducteurs rigidement reliés à une base de papier ou de film 2. Le conducteur 3 est un fil fin en zigzag de 0,02-0,05 mm de diamètre, aux extrémités duquel des fils (conducteurs en cuivre 4) sont reliés par soudure ou brasage. Les conducteurs sont recouverts de papier, de film ou de vernis 1. Après collage du substrat de la jauge de contrainte sur la surface déformable étudiée, la déformation de cette surface est transmise aux conducteurs et entraîne une modification de leur résistance.

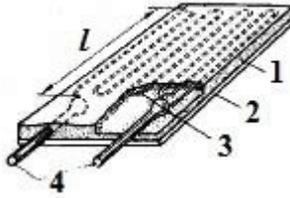


Fig. 2.1. Conception d'une résistance à jauges de contrainte à fil.

La résistance R de la résistance constituée d'un fil de longueur l est déterminée par l'expression ci-dessus (2.1).

L'effet de déformation est caractérisé par le signal de sortie associé à la variation relative de la résistance $\Delta R/R$. Le rapport entre la variation relative du signal de sortie et la déformation relative ε qui l'a provoquée à des valeurs fixes de courant, de température, etc. est appelé coefficient de sensibilité à la déformation de la jauge de contrainte.

$$k = \Delta R/R\varepsilon \quad (2.2).$$

Le rapport $\Delta R/R$ est déterminé (mathématiquement, il peut être obtenu par différenciation (2.1)) par $\Delta R/R = \Delta\rho/\rho + \Delta l/l - \Delta S/S$, où ΔR , $\Delta\rho$, Δl , ΔS - changements dans la résistance, la résistivité, la longueur et la surface de résistance transversale du conducteur, respectivement.

Dans le domaine des déformations élastiques, en utilisant la théorie des corps solides, on peut obtenir une expression du coefficient de sensibilité à la déformation sous la forme de :

$$k = 1 + 2\mu + \nu \quad (2.3).$$

Pour les conducteurs, les composantes μ (coefficient de Poisson) et ν (coefficient d'élastorésistance) ne diffèrent pas beaucoup en magnitude. Pour les semi-conducteurs, la valeur de ν peut être supérieure de deux ordres de grandeur à celle de μ et dépend de la température, de la déformation et de la direction cristallographique. Par conséquent, les jauges de contrainte à semi-conducteurs ont une sensibilité à la déformation beaucoup plus élevée, mais sont également plus sensibles aux influences extérieures.

La qualité des jauges de contrainte est déterminée par leurs coefficients de sensibilité à la déformation k et la valeur du coefficient de résistance à la température (TCR) - $\Delta R/R\Delta T$. Plus le coefficient de sensibilité à la déformation k est élevé et plus le coefficient de résistance à la température (TCR) du matériau à partir duquel la jauge de contrainte est fabriquée est faible, plus sa qualité est élevée.

Par exemple, pour les jauges de contrainte à fil en alliages de constantan et de manganin, $k \approx 2$, $TCR = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ et $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, respectivement. Pour les jauges de contrainte semi-conductrices, k atteint la valeur de 100 et plus (par exemple, le silicium).

Dans les jauges de contrainte à feuille, l'élément sensible est constitué d'une feuille d'une épaisseur de 3 à 6 microns. Les principaux avantages des jauges de contrainte à feuille sont la possibilité de former des jauges de contrainte de n'importe quelle forme et la dissipation efficace de la chaleur pendant les mesures, ce qui permet d'obtenir un signal de sortie plus élevé. Les jauges de contrainte en feuille sont insensibles aux déformations transversales et peuvent être produites dans des tailles allant jusqu'à 0,3 mm.

L'une des principales caractéristiques métrologiques des jauges de contrainte est la sensibilité à la déformation, le fluage, l'hystérésis mécanique et l'instabilité de la température.

La sensibilité à la déformation est déterminée principalement par les propriétés de résistance à la déformation du matériau de l'élément sensible. La sensibilité à la déformation est le principal paramètre qui détermine la valeur de la déformation mesurée :

$$\varepsilon = \Delta R/Rk \quad (2.4).$$

Le fluage se manifeste par une modification du signal de sortie à une valeur donnée et inchangée de ε . Le fluage est principalement causé par des imperfections élastiques dans le substrat et l'adhésif.

L'hystérésis mécanique, comme le fluage, est causée par l'imperfection élastique du substrat et de l'adhésif et est déterminée numériquement par la différence des valeurs de résistance de sortie pour la même valeur de déformation, à condition que la valeur de déformation donnée soit obtenue avec une augmentation et une diminution sans à-coups.

L'instabilité de température, consiste en la modification de la résistance de la jauge de contrainte due à son TCR, mais aussi à l'apparition de contraintes mécaniques supplémentaires dues à la différence des coefficients de température de dilatation linéaire du matériau de la jauge de contrainte et de la pièce étudiée.

Un paramètre important des jauges de contrainte est la puissance admissible qui peut être dissipée dans la jauge de contrainte, à condition que sa surchauffe ne dépasse pas la valeur admissible. La puissance admissible d'une jauge de contrainte dépend de ses dimensions géométriques.

2.2. Jauges de contrainte à feuille

Dans les jauges de contrainte à feuille, l'élément sensible est constitué d'une feuille d'une épaisseur de 3 à 6 microns.

L'épaisseur des jauges de contrainte à feuille est inférieure à celle des jauges de contrainte à fil et se situe entre 30 et 50 microns. Les principaux avantages des jauges de contrainte à feuille sont la possibilité de former des jauges de contrainte de n'importe quelle forme et la dissipation efficace de la chaleur pendant les mesures, ce qui permet d'obtenir un signal de sortie plus élevé pour les mêmes déformations. Les jauges de contrainte en feuille sont insensibles aux déformations transversales et permettent des conceptions à petite base à partir de 0,3 mm.

Les jauges de contrainte en feuille sont généralement fabriquées en feuille de constantan. Les propriétés électromécaniques de la feuille sont moins constantes au sein d'un même lot que celles du fil de jauge de contrainte en constantane. Son traitement thermique est moins efficace, de sorte que la plage de fonctionnement des jauges de contrainte en feuille ne dépasse pas $\pm(3-5)10^{-3}$ ($\pm 3000...5000$ URD, où $1\text{URD} = 1\text{m}\ln^{-1} = 10^{-6}$ - une unité de déformation relative)), et la plage de température est de 75...575 K. La technologie de fabrication des jauges de contrainte en feuille, en règle générale, est basée sur l'utilisation de processus photochimiques. Cette technologie est la plus adaptée à la production de masse. En fonction de la forme des réseaux tensoriels, les jauges de contrainte à feuille sont divisées selon les modifications typiques suivantes (fig. 2.2) :

- rectangulaire à un seul élément pour les mesures linéaires ;
- jauges de contrainte à deux ou trois éléments, rectangulaires ou en rosette, pour les mesures dans des zones où l'état de contrainte est plat ;
- spéciaux utilisés comme jauges de contrainte dans les éléments sensibles à membrane ;
- etc.

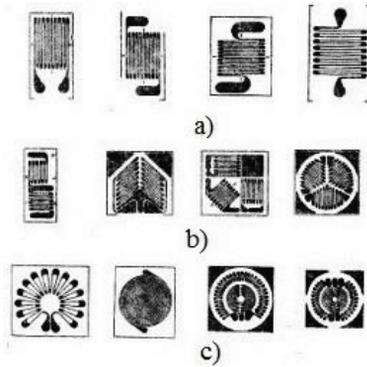


Figure 2.2. Formes de certains réseaux tensoriels de jauges de contrainte en feuille.

a - élément unique rectangulaire ; b - élément multiple rectangulaire et rosette ; c - membrane.

2.3. Mesure des contraintes mécaniques par corde vibrante.

Tenzomètre

Cette méthode de mesure des contraintes mécaniques (déformations, allongements) utilise comme élément sensible un fil d'acier tendu entre deux pinces fixées dans la structure dont on étudie les déformations. Une variation de la tension mécanique de la corde entraîne une variation v de sa fréquence d'oscillation, et la mesure de Δv permet de déterminer les déformations. L'un des avantages de la méthode considérée est la longue durée de vie du capteur (transducteur, jauge de contrainte), la fiabilité, la faible sensibilité aux influences externes (humidité, rayonnement, etc.). Ces avantages sont dus à la solidité de la corde et à la construction de la jauge de contrainte. Dans cette méthode, le support de l'information est la fréquence du signal de sortie, ce qui crée des avantages supplémentaires en termes de résistance aux interférences sous forme de bruit, d'interférences, d'influences des lignes de transmission. En outre, un tel signal peut être facilement converti sous forme numérique.

La fréquence fondamentale v des vibrations mécaniques d'une corde à jauges de contrainte tendue entre deux points à une distance l et soumise à une force F est exprimée par la formule suivante

$$v = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{S\rho}} \quad (2.5),$$

où S est la section transversale de la corde, ρ est sa densité.

Sous l'influence de la contrainte mécanique F/S , la corde du tensomètre subit un allongement Δl . En analysant l'état de contrainte-déformation de la corde, on peut obtenir une expression de l'allongement relatif (déformation relative) par le changement de fréquence :

$$\Delta l/l = (4l^2 \rho/E)(v_1^2 - v_0^2) \quad (2.6),$$

où E est le module d'Young. Connaissant v_0 (fréquence initiale) et mesurant v_1 (fréquence après déformation de la structure), il est donc possible de déterminer la déformation de la structure.

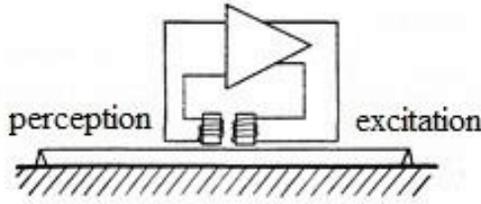


Fig. 2.3 Jauge de contrainte avec corde vibrante

La figure 2.3 montre une jauge de contrainte (schéma) avec une corde vibrante. La corde d'acier vibre avec une fréquence v devant la bobine de signal, provoquant des oscillations périodiques de la résistance magnétique de son circuit magnétique, ce qui génère un signal électrique de la même fréquence v . Ce signal est amplifié et transmis à la bobine d'excitation, qui entretient la vibration. La fréquence v peut être mesurée à l'aide d'un fréquencemètre. Les caractéristiques de ce type de jauges de contrainte peuvent être trouvées dans la littérature. Par exemple, une jauge de contrainte fabriquée par "Telemac" présente les caractéristiques suivantes : fréquence maximale ~ 1200 Hz, fréquence minimale ~ 400 Hz, plage de mesure $4000\mu\text{m/m}$, résolution $1\mu\text{m/m}$, précision 1 à 2% de la plage de mesure.

Le type d'allongeur décrit (jauge de contrainte) est utilisé pour le contrôle des déformations et des contraintes mécaniques dans la construction (barrages, ponts, tunnels, etc.), dans la mesure du poids, etc.

2.4. Adhésifs, liants pour le montage des jauges de contrainte

Les adhésifs et les liants utilisés pour le montage des jauges de contrainte sur la surface étudiée doivent répondre aux exigences de base suivantes :

A) Assurer le transfert de la déformation de la surface étudiée à la jauge de contrainte et le fluage le plus faible possible des relevés dans la

gamme de températures et de contraintes d'utilisation. Le fluage est dû à la plasticité de l'adhésif.

B) Assurer l'isolation électrique de la jauge de contrainte par rapport à la surface testée

En règle générale, les fournisseurs de jauges de contrainte fournissent dans leur documentation une liste d'adhésifs présentant des caractéristiques optimales pour ce type de jauges et une description de la technologie de leur application.

Les adhésifs les plus souvent utilisés dans les jauges de contrainte sont brièvement décrits ci-dessous.

Pour les jauges de contrainte à feuille :

L'adhésif Cyacrine EO. Il s'agit d'adhésifs à prise rapide et à froid. Elles sont utilisées pour le collage de matériaux non poreux et de métaux. Elles durcissent en 48 heures sans forces de compression. Plage de température d'utilisation -80 - +80 °C.

Colle UVS-10T. Durcissement à chaud, monocomposant. Connecte les matériaux non métalliques, non poreux et les métaux. Plage de température de fonctionnement -70 - +200 °C. La polymérisation (durcissement) de la colle s'effectue comme suit : les jauges de contrainte collées doivent être conservées pendant 0,5 heure dans des conditions normales. Puis 5 heures à la température de 180 °C avec une pression de 0,1 - 0,3 MPa (1 - 3 atm) dans les conditions de l'armoire thermoélectrique. Ensuite, durcir pendant 5 heures à 215 °C dans des conditions de durcissement ouvertes.

Colle BFR-2K. Se réfère aux adhésifs monocomposants à prise à chaud, phénol-formaldéhyde. Les conditions de polymérisation et la technologie d'utilisation sont similaires à celles de la colle UVS-10T.

2.5. Attestation, étalonnage, vérification des jauges de contrainte

Pour l'attestation, l'étalonnage (détermination des caractéristiques d'étalonnage) des jauges de contrainte, on utilise des éléments élastiques de référence (poutres). En règle générale, la poutre a des dimensions (forme) qui offrent une résistance égale à la flexion (fig. 2.4.a) ou une section transversale constante (fig. 2.4.b). La poutre a une section (zone de travail, ombrée sur la figure) à l'intérieur de laquelle la déformation est pratiquement constante.

La valeur de la déformation de la surface de la poutre à résistance égale est déterminée par la formule :

$$\varepsilon = \frac{6PL}{EB(h+\Delta h)^2} \quad (2.7)$$

où : P est la valeur de la force de chargement (charge), H, L est la distance entre la ligne de fixation de la poutre et le point d'application de la force, E est le module d'élasticité du matériau de la poutre, B est la largeur de la poutre au point de fixation, h est l'épaisseur de la poutre, Δh est la distance entre la surface de la poutre et le milieu de l'épaisseur de la jauge de contrainte.

L'ampleur de la déformation de la surface de la poutre de section constante est calculée par la déviation f selon la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{4(h+2\Delta h)f}{l^2+4f^2\pm 4fh} \quad (2.8),$$

où : h - épaisseur de la poutre, Δh - distance entre la surface de la poutre et le milieu de l'épaisseur de la jauge de contrainte, l - base du dispositif à l'aide duquel la déflexion est déterminée, f - flèche de déflexion à la base l .

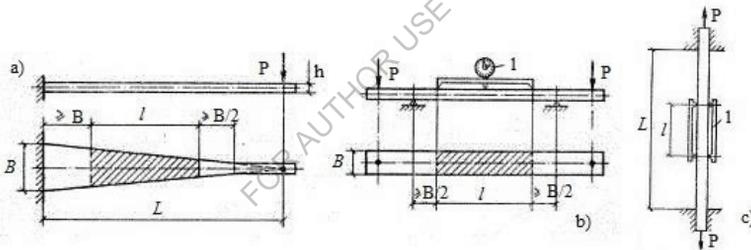


Fig. 2.4. Eléments élastiques de référence : a - d'égal résistance à la flexion, b - de section constante, c - poutre travaillant en tension. 1- dispositif de mesure de la déformation réelle.

Les poutres travaillant en tension (fig. 2.4.c) peuvent également être utilisées pour l'étalonnage. Dans ce cas, la mesure directe de la valeur de la déformation dans la zone de travail est utilisée. L'inconvénient de cette méthode est la difficulté de créer une charge axiale stable.

2.6. Mesure des déformations mécaniques (contraintes) à l'aide d'une jauge de contrainte

Comme indiqué ci-dessus, une jauge de contrainte est un dispositif dont la résistance électrique change lorsqu'il est déformé. Ce changement de

résistance est lié à l'ampleur de la déformation mécanique ε par le biais du coefficient de sensibilité à la déformation (voir 2.2).

Actuellement, les jauges de contrainte les plus utilisées pour mesurer les déformations mécaniques sont les jauges de contrainte à feuille (le matériau de la feuille est le métal) et, pour résoudre certains problèmes, les jauges de contrainte à semi-conducteur. Les avantages et les inconvénients de ces deux types de jauges de contrainte sont bien présentés dans la littérature. Le principal avantage des jauges de contrainte à semi-conducteur est leur sensibilité à la déformation plus élevée (jusqu'à 100 fois), mais elles sont en même temps plus fragiles, plus rigides et leurs paramètres dépendent davantage de la température. La grande sensibilité à la déformation des jauges de contrainte à semi-conducteur s'explique par des changements dans la structure de la zone du matériau semi-conducteur sous l'influence de contraintes mécaniques et, par conséquent, par une forte dépendance de la conductivité (résistance) à la déformation. Dans le cas des jauges de contrainte métalliques, la sensibilité à la déformation est assurée par des changements dans la taille de l'élément sensible (feuille).

Les jauges de contrainte à feuille se distinguent par leur objectif - mesurer des déformations uniaxiales, des déformations réparties, pour différentes plages de température, par la taille et la forme du réseau (forme de la feuille conductrice d'électricité), par les valeurs de la résistance électrique, ainsi que par d'autres paramètres.

L'une des jauges de contrainte les plus simples est illustrée à la figure 2.5. La conception de la jauge de contrainte est telle qu'elle réagit (modifie sa résistance) pratiquement uniquement lorsque la contrainte est dirigée (appliquée) le long de l'axe du réseau de jauges de contrainte ou lorsqu'il existe une composante de contrainte à distribution complexe dans cette direction (c'est ce que l'on appelle la "sensibilité à la contrainte longitudinale").

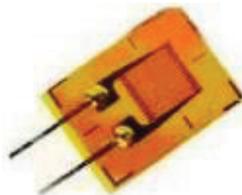


Fig. 2.5. Jauge de contrainte à feuille typique

En outre, la variation de la résistance est proportionnelle à l'ampleur de la déformation longitudinale (ou composante du complexe) et est liée à son ampleur par le coefficient k . Il convient de noter qu'il existe également une sensibilité à la déformation transversale, c'est-à-dire une sensibilité à la déformation dirigée perpendiculairement à la base (axe longitudinal) de la jauge de contrainte, mais elle est insignifiante, en règle générale, pour les jauges de contrainte en feuille est proche de zéro, et pour les jauges de contrainte en fil ne dépasse pas 1 % de la déformation longitudinale.

La principale raison de la variation de la résistance de la jauge de contrainte en feuille sous l'influence de la déformation est la modification de la taille du réseau électriquement conducteur. Comme on le sait, la résistance électrique des matériaux est déterminée par la dépendance (2.1). Sous l'effet de la traction, la résistance augmente, tandis qu'elle diminue sous l'effet de la compression. Dans le processus d'utilisation des jauges de contrainte, ce facteur est pris en compte pour déterminer le signe de déformation de l'objet.

Pour les jauges de contrainte à feuille, le coefficient de sensibilité à la déformation dépend du matériau de la feuille. Sa valeur est comprise entre $k = 2-4$ et est indiquée dans les passeports et les descriptions joints au lot de jauges de contrainte. La valeur de la résistance électrique est généralement de 50 Ohm.

Pour mesurer l'ampleur de la déformation de l'objet étudié, la jauge de contrainte est montée (collée) à l'endroit de l'objet où il est nécessaire de mesurer la déformation. Afin de mesurer la déformation de l'objet avec la plus grande précision possible, il est nécessaire de s'assurer que la déformation est transférée de l'objet au réseau de jauges de contrainte presque sans pertes. Pour ce faire, il convient de choisir le liant (adhésif) et la technologie de montage appropriés. La principale exigence pour le liant est l'absence de déformation plastique dans la plage de fonctionnement de la jauge de contrainte. Le liant optimal et la technique de travail avec celui-ci sont spécifiés dans les descriptions techniques des lots de jauges de contrainte. Très souvent, des colles de type BF-2 sont utilisées comme liant.

La résistance indiquée dans la fiche technique et mesurée après le montage de la jauge de contrainte sur l'objet peut légèrement différer - au cours du processus de polymérisation du liant, des déformations du réseau de la jauge de contrainte peuvent se produire. Il est nécessaire d'en tenir compte lors de mesures précises.

En outre, après avoir monté la jauge de contrainte sur l'objet pendant l'essai mécanique de l'objet, la résistance électrique de la jauge de contrainte est mesurée. Si, par exemple, le coefficient de sensibilité de la jauge de contrainte $k = 2$, la résistance initiale (spécifiée dans le passeport ou mesurée après le montage de la jauge de contrainte sur l'objet) $R_0 = 200,1$ Ohm, et pendant la charge mécanique de l'objet $R_\epsilon = 200,9$ Ohm, alors l'importance de la déformation mécanique (dans ce cas, l'étirement) au point de montage de la jauge de contrainte et dans la direction de sa base est égale :

$$\epsilon = \Delta R/kR_0 = (R_\epsilon - R_0)/kR_0 = 0,002 = 2 \cdot 10^3 \text{ mln}^{-1} = 2 \cdot 10^3 \text{ URD.}$$

C'est-à-dire que la valeur de la déformation relative est égale à 0,002. Les valeurs de déformation relative sont parfois exprimées en URD - unité de déformation relative, qui est égale à 1/1000000 (un millionième de partie - mln⁻¹) de l'unité de déformation.

Dans la pratique, des équipements spéciaux sont utilisés pour mesurer les déformations afin d'automatiser les mesures, les technologies de mesure sont plus complexes pour atteindre une précision maximale, le calcul des erreurs selon certaines méthodes, etc.

S'il est nécessaire de déterminer les contraintes mécaniques de l'objet au point de mesure de la déformation, la relation connue entre la déformation mécanique ϵ et les contraintes mécaniques σ est utilisée :

$$\sigma = \epsilon E \quad (2.9),$$

où E est le module d'Young (élasticité) du matériau de l'objet.

La technique et la séquence de mesure des contraintes mécaniques avec une jauge de contrainte à semi-conducteur sont fondamentalement les mêmes que celles décrites ci-dessus pour une jauge de contrainte à feuille.

2.7. Matériaux hydroprotecteurs pour jauges de contrainte

L'imperméabilisation des jauges de contrainte après leur installation sur l'objet à mesurer est effectuée, en règle générale, dans tous les cas où l'humidité de l'environnement peut augmenter de plus de 50 %.

La méthode la plus répandue est celle de l'imperméabilisation relative, qui consiste à appliquer des compositions hydrophobes et des produits d'étanchéité sur les lieux d'installation des jauges de contrainte. En général, ces compositions ont une bonne adhérence à la base des jauges de contrainte et à la surface étudiée, de sorte que, tout comme les adhésifs, elles font corps avec la jauge de contrainte après durcissement.

Les compositions hydrophobes et les produits d'étanchéité ne doivent pas se déformer à la suite d'un retrait ou de changements dans les conditions environnementales, ne doivent pas renforcer visiblement les sites de mesure et doivent conserver leur capacité de déformation élastoplastique. Ils ne doivent pas non plus attaquer chimiquement les matériaux des jauges de contrainte et des fils de raccordement.

Les revêtements imperméables utilisés pour la mesure de la déformation sont subdivisés en plusieurs catégories :

- des revêtements en film appliqués en plusieurs couches d'une épaisseur totale de 50... 100 microns ;
- mastics souples avec un module d'élasticité allant jusqu'à 100 MPa, généralement appliqués en une seule couche d'une épaisseur de 2...3 mm.
- dur avec un module d'élasticité supérieur à 100 MPa, appliqué en une ou plusieurs couches d'une épaisseur totale de 0,5 à 2...3 mm.

Les revêtements en couches minces sont constitués de solutions adhésives telles que le BF-2 et d'autres. Les revêtements souples et imperméables sont constitués de vaseline technique, de mélanges paraffine-vaseline, de graisses et de lubrifiants à base de cire, ainsi que de pâte à modeler.

Les mélanges de graisses à base de cire et les graisses ou composés comprennent, outre la cire d'abeille, un certain nombre de composants plastifiants et scellants, car la cire n'adhère pas suffisamment et est susceptible de se fissurer à des températures inférieures à zéro.

Les revêtements étanches solides sont constitués de composés polymères et bitumineux. Par exemple, carbinol-ciment et époxy, mastics époxy et autres.

Les composés époxy et les mastics sont préparés à partir des résines époxy ED-5 et ED-6 avec l'ajout de durcisseurs. Des plastifiants sont ajoutés au composé pour en réduire la rigidité. Les composés époxy se caractérisent par un faible coefficient d'absorption de l'humidité (moins de 0,05 % en 24 heures), une bonne adhérence à la plupart des matériaux et une résistance suffisante aux milieux agressifs. Leurs inconvénients sont la fragilité, la tendance à la fissuration et la rupture des liaisons adhésives sur la surface de contact lors de la déformation, ainsi que la toxicité.

2.8. Montage des jauges de contrainte à usage général

Le montage des jauges de contrainte, en fonction de leur type et des conditions d'essai, s'effectue par collage ou soudage sur la surface testée, ainsi que par encastrement à l'intérieur des éléments testés constitués de matériaux adhésifs, par exemple des plastiques en fibre de verre.

Le collage des jauges de contrainte à usage général destinées à mesurer des déformations jusqu'à ± 1 % dans la gamme des températures climatiques est effectué dans la plupart des cas avec des adhésifs polymérisables à froid des groupes nitrocellulose et cyanoacrylate. Le collage des jauges de contrainte thermocompensées utilisées dans la plage de 175...475 K est effectué avec des colles thermodurcissables des groupes phénolique, viniflex et furane, en fonction du matériau de l'objet de mesure et de la plage de température de fonctionnement. Pour le montage des jauges de contrainte haute température fonctionnant à des températures de 525...575 K, on utilise des liants organosiliciés.

La technologie du collage avec les colles de tous les groupes énumérés, à l'exception des colles express du groupe des cyanoacrylates, se réduit aux opérations suivantes :

- immédiatement avant le collage, les emplacements de montage des jauges de contrainte sont dépoussiérés et nettoyés à l'aide d'un tampon imbibé d'alcool éthylique ou d'éther afin d'éliminer la condensation d'eau ;

- une fine couche de colle est appliquée au pinceau sur les zones préparées de l'objet de mesure ; en même temps, la même couche est appliquée sur la surface de contact de la base de la jauge de contrainte et séchée pendant 10 à 15 minutes ;

- la deuxième couche de colle, plus épaisse, est appliquée sur la jauge de contrainte et maintenue pendant 2 à 3 minutes jusqu'à ce qu'elle s'épaississe ;

- la jauge de contrainte est orientée en fonction des marques de repérage sur le lieu d'installation et pressée fermement sur la surface ;

- Un film en plastique fluoré ou en triacétate est placé sur la jauge de contrainte, après quoi l'excès de colle est enlevé avec un doigt ou un rouleau en caoutchouc ;

- la jauge de contrainte collée est maintenue pendant 1 à 2 heures sous une pression (charge) d'environ 0,2...0,3 MPa ;

- une fois la pression supprimée, la jauge de contrainte est libérée du film et séchée jusqu'à ce que l'excès de solvant soit complètement éliminé, généralement dans un délai de 1 à 2 jours. Un signe objectif de l'achèvement

du séchage est la stabilisation de la résistance d'isolation par rapport à la surface testée (pour les matériaux conducteurs) ;

- si le collage des jauges de contrainte est effectué avec un adhésif thermodurcissable, un traitement thermique normal est effectué après séchage selon le mode recommandé pour cet adhésif ; pendant la période de traitement thermique, les jauges de contrainte doivent être soumises à une pression allant jusqu'à 0,3...0,5 MPa ;

- après séchage ou polymérisation des jauges de contrainte collées, vérifier la qualité du collage et la position correcte des jauges de contrainte par rapport aux marques de marquage ; vérifier également la rectitude des fils de la grille, la présence d'un circuit électrique, la résistance et le niveau d'isolation des jauges de contrainte par rapport à la surface testée.

Le collage des jauges de contrainte avec l'adhésif express cyanoacrylate cyacrin-30 peut être effectué après un apprêt préalable du support papier avec un peu d'adhésif pour jauges de contrainte, suivi d'un séchage ou d'une polymérisation. Les jauges de contrainte à base de film ne nécessitent pas d'apprêt préalable. L'ampoule de polyéthylène contenant la colle est sortie du réfrigérateur et maintenue à une température de 295 ± 10 K pendant 15 ± 20 min. Ensuite, un trou d'un diamètre d'environ 0,3 mm est percé dans l'ampoule et une fine couche de colle est appliquée sur la surface de contact de la base de la jauge de contrainte. Immédiatement après l'application de la colle, la jauge de contrainte est placée aussi précisément que possible à l'endroit marqué et maintenue sous pression pendant 1 minute. Le séchage ultérieur est effectué à une température normale et à une humidité de 50 à 80 % pendant 6 heures.

Dans tous les cas, il est nécessaire d'utiliser du matériel didactique contenant une description détaillée de la technique de collage avec un adhésif de montage particulier. Les exigences technologiques générales pour le collage des jauges de contrainte sont indiquées dans les descriptions.

En même temps que le collage des jauges de contrainte, installer et coller des patins de montage en matériau isolant avec des conducteurs terminés pour la soudure des jauges de contrainte et des fils de raccordement. Les patins sont collés près du bord transversal de la base de la jauge de contrainte, du côté des fils conducteurs. Les patins de montage protègent les jauges de contrainte contre les ruptures pendant le montage et éliminent le risque de court-circuit pendant les mesures.

Le niveau d'isolation des jauges de contrainte collées ne doit pas être inférieur à 50...100 Mohm si les mesures sont effectuées dans des conditions normales et si les déformations attendues ne dépassent pas 1%.

2.9. Jauges de contrainte à semi-conducteur

Les principaux matériaux utilisés pour les jauges de contrainte à semi-conducteur sont actuellement le silicium et le germanium, le silicium étant plus largement utilisé en raison de sa plus faible sensibilité à la température. Des composés semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium GaAs et d'autres sont également utilisés.

En fonction des matériaux utilisés, les jauges de contrainte à semi-conducteur peuvent être divisées en deux groupes : monocristallines et polycristallines. Les jauges de contrainte monocristallines comprennent les jauges de contrainte obtenues par découpage d'un monocristal, les cristaux aiguilles obtenus par croissance à partir de la phase gazeuse, les films épitaxiaux et les dendrites. Les jauges polycristallines comprennent les tensolites, qui sont des mélanges artificiels de carbone (ou de noir de carbone) et de vernis de bakélite, par exemple.

Les matériaux utilisés pour les jauges de contrainte à semi-conducteur doivent avoir le coefficient de sensibilité à la déformation (SSC) le plus élevé possible et le coefficient de résistance à la température (TCR) le plus bas, tout en garantissant la stabilité des paramètres des jauges de contrainte.

Une opération très importante dans la fabrication des jauges de contrainte à semi-conducteur est la création d'un contact métal-semiconducteur, qui est obtenu par différentes méthodes : soudure, fusion, soudage, pulvérisation, revêtement électrochimique ou chimique.

Les jauges de contrainte semi-conductrices constituées de rubans dendritiques de germanium, qui se sont répandues grâce à une technologie de fabrication simple et abordable, présentent un certain intérêt. Les dendrites sont des cristaux en forme d'arbre, d'aiguille ou de lamelle, de structure jumelle complexe, formés par cristallisation dans une matière fondue surfondue ou à partir d'une phase gazeuse sursaturée.

Les jauges de contrainte dendritiques en germanium se caractérisent par une résistance mécanique réduite par rapport aux jauges de contrainte fabriquées à partir d'un lingot monocristallin. Les jauges de contrainte dendritiques présentent l'avantage d'être simples à fabriquer et relativement bon marché (comparées à d'autres jauges de contrainte semi-conductrices,

les jauges de contrainte dendritiques sont les moins chères). La fabrication des jauges de contrainte dendritiques en germanium ne nécessite pas d'équipement spécial (par exemple, des machines pour le meulage et la découpe) et se réduit à la découpe transversale de l'aiguille en corindon du ruban dendritique, au détachement de la jauge de contrainte et à la soudure des fils électriques avec une soudure spéciale. Pour la fabrication des jauges de contrainte, on utilise principalement des rubans dendritiques en germanium ayant une résistance spécifique $\rho=1\pm 0,2$ ohm ·cm. Les paramètres de ces jauges de contrainte dépendent fortement de la température.

Les jauges de contrainte à semi-conducteur peuvent être divisées en jauges de contrainte à semi-conducteur collées et non collées en fonction de leur conception. Les jauges de contrainte à semi-conducteur collées peuvent être utilisées avec ou sans substrat.

Les jauges de contrainte à semi-conducteur sans substrat diffèrent par la forme de la section, le matériau et la méthode de contact ohmique. Leur conception est largement déterminée par la technologie de fabrication. Le type de jauge de contrainte le plus courant est la barre.

Les jauges de contrainte obtenues par croissance à partir de la phase gazeuse sont des aiguilles monocristallines d'un diamètre de 10 à 100 microns. La conception d'une telle jauge de contrainte avec un substrat est illustrée à la figure 2.6.a. La construction d'une jauge de contrainte à film est illustrée à la figure 2.6.b ; les jauges de contrainte sont fabriquées sous la forme d'une simple bande conductrice, qui est recouverte d'une couche de vernis. Les paramètres de certaines jauges de contrainte à semi-conducteur sont indiqués dans le tableau 2.1.

Les jauges de contrainte à semi-conducteur sont principalement utilisées dans les capteurs de pression, de force et de contrainte. L'application des jauges de contrainte à semi-conducteur dans les accéléromètres est prometteuse.

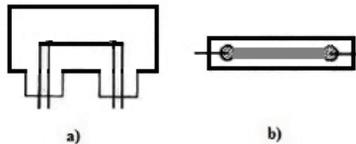


Fig. 2.6. Conception de certaines jauges de contrainte à semi-conducteur : a - jauge de contrainte à cristal aiguille avec substrat, b - jauge de contrainte à film.

Tableau 2.1. Spécifications de certaines jauges de contrainte à semi-conducteur

Parameter	Strain gauge type				
	p-Si	p-Si	n-Si	n-Ge (dendrite)	n-Ge
ρ , Ohm•cm	0,017	0,02	0,35	0,25	0,8
Dimensions, mm					
length	12,7; 4,4	5	5	10	3,5
thickness	0,017	0,03-0,05	0,1	0,15-0,22	0,5
width	0,5	0,3	0,8	0,7-2,0	0,2
Nominal resistance at 20 °C	350;120	100-200	150-400	50-200	350
Strain sensitivity coefficient at 20 °C	130	135	-133	-100	-
Operating current, mA	20;35	20-40	10-20	20-35	5
Maximum operating temperature, °C	+300	+500	-	+150	-

2.10. Effet piézorésistif dans les semi-conducteurs et jauge de contrainte basée sur cet effet

En utilisant les méthodes de l'analyse mathématique, nous examinerons la physique de l'effet piézorésistif dans les matériaux solides. Nous nous concentrerons sur les semi-conducteurs tels que le Si en vrac et sous forme de films de silicium sur des substrats isolants. Nous examinerons l'utilisation pratique de l'effet pour créer des transducteurs de mesure des déformations mécaniques - les jauges de contrainte. Des exemples de conception de capteurs et de leurs principales caractéristiques et capacités sont donnés. Nous analysons les avantages et les inconvénients des jauges de contrainte à semi-conducteur.

Les résultats d'études expérimentales sont présentés ici pour des films de silicium implantés par ionisation sur des substrats de silicium semi-isolants avec une couche de SiO₂ à la surface. La plupart des résultats obtenus peuvent être utilisés pour le développement de jauges de contrainte basées sur d'autres semi-conducteurs.

On sait que les propriétés électrophysiques des semi-conducteurs sont 10 à 100 fois plus sensibles aux contraintes mécaniques que celles des métaux. En même temps, un certain nombre de raisons empêchent l'utilisation pratique généralisée des matériaux semi-conducteurs dans la mesure de la déformation. Les principales sont la dépendance à la température des paramètres électrophysiques de ces jauges de contrainte (transducteurs de mesure), la faible résistance mécanique et la rigidité, qui entraînent un fluage dans les lectures, et une sensibilité importante à la déformation transversale.

Le développement de la science et de la technologie est impossible sans l'amélioration des moyens de contrôle des différents paramètres physiques. Il en va de même pour les jauges de contrainte, qui sont désormais nécessaires dans des conditions telles que les températures cryogéniques, les champs magnétiques intenses, l'exposition aux radiations, etc.

Comme vous le savez, l'effet piézorésistif est une variation de la résistance électrique d'un matériau soumis à une contrainte mécanique. On sait que la variation de la résistance électrique dans ce cas se produit pour deux raisons : en raison de changements dans les dimensions géométriques et en raison de changements dans la mobilité des porteurs de charge et, par conséquent, dans la conductivité du matériau. La première raison concerne les métaux, où la mobilité des porteurs de courant sous l'impact mécanique ne change pratiquement pas, et la résistance change en raison des changements de taille au cours de la déformation - fig. 2.7.

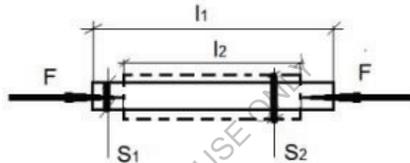


Fig. 2.7. Variation des dimensions l - longueur, S - surface de la section transversale de l'échantillon sous l'action mécanique d'une force F .

La résistance électrique R du matériau est déterminée par l'expression ci-dessus (2.1) :

$$R = \rho l / S,$$

où ρ est la résistivité, l est la longueur de l'échantillon et S est la surface de la section transversale.

Comme le montrent la figure 2.7 et l'expression (2.1), la résistance électrique de l'échantillon diminue sous compression en raison d'une diminution de la longueur $\Delta l = l_1 - l_2$ et d'une augmentation de la surface de la section transversale $\Delta S = S_2 - S_1$, et augmente sous tension.

Dans les semi-conducteurs à réseau cubique, dans le cas général où la direction de la contrainte mécanique σ et la densité de courant j sont des angles arbitraires, l'effet piézorésistif est théoriquement décrit par les coefficients piézorésistifs π_{ij} ($\pi = \Delta\rho/\rho_o X$, où $\Delta\rho$ est le changement de résistivité, ρ_o est la résistivité initiale, X est la contrainte mécanique) ou élastorésistifs m_{ij} , qui sont des tenseurs de quatrième rang. Ces coefficients sont reliés entre eux par les coefficients de malléabilité et les modules

élastiques. Pour les cristaux de la classe de symétrie à laquelle appartient le silicium, il suffit de connaître trois coefficients dans le système des axes cristallographiques pour décrire l'effet piézorésistif : π , π_{112} , et π_{44} , qui sont parfois appelés les coefficients piézorésistifs principaux. Les principaux coefficients piézorésistifs dépendent de nombreux facteurs : matériau, type de conductivité, résistivité, niveau de dopage, température et degré de déformation mécanique (contrainte).

Par exemple, diverses combinaisons de coefficients de piézorésistance sont connues dans la littérature pour des directions de contrainte mécanique et de densité de courant qui coïncident avec certains axes cristallographiques. Les trois principaux coefficients de piézorésistance peuvent être déterminés par trois mesures dans des directions différentes. Le tenseur de piézorésistance complet π_{ijkl} est défini comme suit :

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_0} = \sum_{kl}^3 \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.10),$$

où σ_{kl} est le tenseur des contraintes, $\Delta\rho_{ij}$ est le tenseur de résistivité. On sait que le tenseur des contraintes est un tenseur symétrique et qu'il a six composantes indépendantes. Il en va de même pour le tenseur de résistivité.

Dans cette optique, dans un espace à six dimensions, nous pouvons obtenir :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \sum_{j=1}^6 \pi_j \sigma_j, i=1,2,\dots,6 \quad (2.11)$$

Pour le *n-Si* en vrac à dopage uniforme et $\rho = 11,7 \text{ Ohm-cm}$, les valeurs suivantes sont données dans des articles scientifiques : $\pi_{11} = -102,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, $\pi_{12} = 53,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, $\pi_{44} = -13,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, et pour le *p-Si* avec $\rho = 7,8 \text{ Ohm-cm}$, $\pi_{11} = 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, $\pi_{12} = -1,1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, $\pi_{44} = 138,1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$.

Dans les couches de silicium dopées par diffusion, les coefficients piézorésistifs sont déterminés par la concentration de l'impureté à la surface de la couche N_n et ne dépendent pratiquement pas de la loi de distribution des impuretés. D'après les résultats obtenus dans différents travaux, il est clair que pour les couches de *n-Si*, le coefficient π_{11} à température ambiante varie de $17 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ($N_n = 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) à $88 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ($N_n = 1,8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). La dépendance de π_{11} par rapport à la température est perceptible à partir de $N_n = 9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (environ 0,1 %/K).

En raison des particularités de la structure de bande du *n-Si*, les hypothèses concernant le silicium faiblement dopé sont valables :

$$\pi_{44} \approx 0 ; \pi_{11} \approx -2 \pi_{12} .$$

Lorsque la concentration d'impuretés augmente, il y a violation de ces hypothèses, ce qui doit être pris en compte lors de l'analyse des caractéristiques des effets de déformation. Pour les couches de diffusion, les violations se produisent à $N_n \geq 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

Selon l'orientation cristallographique de l'échantillon de silicium, on obtient différentes combinaisons de coefficients de piézorésistance longitudinaux et transversaux. Il est important d'en tenir compte lors de la conception des jauges de contrainte, en particulier celles dont l'élément sensible fonctionnera sous déformation uniaxiale et dont les composants de l'élément sensible seront orientés à la fois dans les directions longitudinale et transversale. En utilisant les données de la littérature, on peut calculer que pour le *p-Si* faiblement allié, les rapports optimaux des orientations longitudinale et transversale sont de $110 \perp 110$, et pour le *n-Si* de $100 \perp 010$. Pour des échantillons de *p-Si* faiblement allié avec une orientation longitudinale $\langle 110 \rangle$, on obtient par exemple $\pi_{\parallel} \approx 72 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$, et $\pi_{\perp} \approx -65 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$ (π_{\parallel} est le coefficient de piézorésistance longitudinale, π_{\perp} est le coefficient de piézorésistance transversale).

En analysant les données connues dans la littérature, on peut observer que les relations valables pour le silicium *p* pur sont violées pour le silicium *p* dans un matériau fortement allié. En même temps, la sensibilité à la déformation pour certaines directions peut augmenter par rapport au silicium pur, ce qui peut s'expliquer par une augmentation de la contribution des trous lourds.

On connaît d'autres facteurs qui déterminent de manière significative les caractéristiques de la jauge de contrainte. Par exemple, l'influence de ses dimensions géométriques sur les paramètres de la jauge de contrainte est significative. Certaines études ont montré que toute la déformation n'est pas transmise de l'objet déformé étudié à l'élément sensible de la jauge de contrainte, même avec un liant rigide. La déformation transmise dépend de la taille de la jauge de contrainte, de ses propriétés élastiques et des propriétés du liant avec lequel le capteur est fixé à la poutre. Cet effet peut être pris en compte par le coefficient de transmission, dont la valeur (pour le cas où la jauge de contrainte est située au centre de l'échantillon) peut être déterminée par la formule :

$$k_{nep} = 1 - \frac{2}{bl} \left(1 - e^{-b/l} \right) \quad (2.12)$$

où, $b = \sqrt{GC/EQ}$, G est le module de cisaillement du liant, E est le module d'élasticité de l'élément sensible (échantillon), Q est la surface de la

section transversale de l'échantillon, $C = \frac{2\pi}{\ln \frac{4h_c}{h}}$, h est l'épaisseur de

l'échantillon, h_c est l'épaisseur du liant, l est la longueur de l'échantillon.

Pour l'étude et le développement de transducteurs de mesure, de minces films de silicium polycristallin dopés au phosphore et au bore par implantation ionique ont été utilisés sur le plan (100) du silicium monocristallin avec une couche isolante de SiO_2 . De telles structures peuvent être plus avancées technologiquement lors de l'utilisation de technologies planaires pour la fabrication de transducteurs de mesure.

La résistivité ρ , les coefficients de $k_{II} = \Delta\rho_{II} / \rho \cdot \varepsilon_{III}$ (où $\Delta\rho_{II}$ est le changement de résistivité le long de la direction de déformation ε_{II}), et de $k_{\perp} = \Delta\rho / \rho_{\perp} \cdot \varepsilon_{II}$ (où $\Delta\rho_{\perp}$ est le changement de résistivité perpendiculaire à la direction de déformation ε_{II}) sensibilité à la déformation ont été mesurés expérimentalement, coefficients de piézorésistance $\pi_{II} = (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$ et $\pi_{\perp} = (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$, dépendance des paramètres des transducteurs expérimentaux par rapport à la température et à la déformation.

Les coefficients de piézorésistance ont été mesurés à l'aide d'une poutre en acier en porte-à-faux d'égale résistance à la flexion, sur laquelle l'échantillon a été collé avec de l'adhésif BF-2, et en chargeant directement les échantillons. En comparant les résultats obtenus, il est possible de calculer la valeur du coefficient de transfert de contrainte et d'évaluer sa coïncidence avec celle calculée théoriquement à l'aide de la formule (2.12). Les films utilisés sont de type n sur un plan de silicium (100). L'épaisseur des films est de 0,6 μm , la concentration de l'impureté de phosphore d'alliage est de $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. La résistivité est de 0,013 ohm-cm. Les mesures ont été effectuées sur des échantillons (jauges de contrainte) de dimensions $8 \times 0,6 \times 0,4 \text{ mm}$ dont la surface est recouverte d'un film.

Lorsque l'on mesure avec une poutre et que l'on utilise la valeur de déformation calculée selon la formule bien connue $\varepsilon_b = h\delta / l_b^2$ (où h est l'épaisseur de la poutre, l_b est la longueur de la poutre, δ est le déplacement de l'extrémité libre de la poutre), les valeurs des coefficients de sensibilité à la déformation $k_{II}^b (\varepsilon_{II} <110>; J <110>)$ $i k (\varepsilon <110>; J <110>)$ $110 >; J_{II} <110>)$ $i k_{\perp}^b (\varepsilon_{II} <110>; J_{\perp} <110>)$ -27,3 et -2,8, respectivement.

Lors de la mesure de la sensibilité à la déformation par la méthode de la charge directe, l'échantillon a été mis en porte-à-faux et une charge de flexion a été appliquée. L'erreur de mesure des coefficients par cette méthode n'a pas dépassé 4 %. Les valeurs suivantes ont été obtenues à température

ambiante : $\pi_{II} = -24,9$ et $\pi_{\perp} = -2,4$. Si nous utilisons les coefficients d'élasticité connus pour le silicium et calculons k , nous obtenons $k_{II} = -39,1$, $k_{\perp} = -3,8$. En comparant, on obtient le coefficient de transmission expérimental $k_{tr}^e = 0,71$

A titre de comparaison, des mesures ont été effectuées en utilisant la méthode de la charge directe. En substituant les paramètres des conditions de mesure dans la formule (2.12) (pour $h_c = 0,15$ mm), nous obtenons la valeur théorique $k_{tr} = 0,68$. Ainsi, les paramètres de transfert de contrainte déterminés expérimentalement et théoriquement coïncident pratiquement.

Il a également été constaté que dans les films de *p-Si* implantés par voie ionique avec une concentration d'impuretés de $N_p = (10 \cdot 10^{18} \text{ } 19) \text{ cm}^{-3}$, par exemple, les coefficients de sensibilité à la déformation longitudinale et transversale k ($k = \Delta\rho/\rho_o \varepsilon$, ε est la déformation mécanique relative) pour l'orientation longitudinale $\langle 100 \rangle$ étaient proches en valeur et s'élevaient au moins à $k = 30$. Ceci peut s'expliquer par la polycristallinité du film et les particularités de la structure de bande du *silicium p*, qui peuvent déterminer l'effet de la déformation par des trous légers dans un matériau faiblement allié, alors que leur contribution diminue dans un matériau fortement allié.

Le mécanisme de transmission des déformations conduit au fait que, comme le montre le rapport entre la largeur du capteur d et la hauteur h $d/h < 2$, la déformation transversale de l'objet n'est pratiquement pas transmise à sa surface. Cette propriété est utilisée pour la fabrication de jauges de contrainte expérimentales (transducteurs de mesure).

Pour la fabrication de transducteurs de contrainte mécanique, des films de polysilicium de conductivité de *type n* et *p*, d'une épaisseur de $0,6 \mu\text{m}$ et avec des niveaux de dopage $(1 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}) \text{ cm}^{-3}$ ont été utilisés. Fondamentalement, des échantillons avec des films de *type p* d'orientation longitudinale $\langle 100 \rangle$ et transversale $\langle 010 \rangle$ ont été utilisés dans l'expérience, étant donné que pour le *silicium p* polycristallin fortement dopé, les coefficients transversaux et longitudinaux pour cette orientation s'avèrent être proches en valeur. L'impureté d'alliage pour le *silicium p* était le bore.

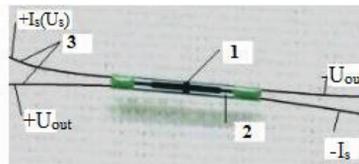


Fig. 2.8. Capteur de contrainte. 1 - microcircuit sensible à la déformation ; 2 - substrat ; 3 - bornes électriques ; I_s (U_s) - courant ou tension d'alimentation, U_{out} - tension de sortie.

La figure 2.8 montre une image d'un type de capteur de déformation (contrainte) et la polarité de l'alimentation électrique et des dispositifs de mesure. Il se compose d'un élément sensible intégral 1 réalisé à partir d'un film de silicium déposé sur un substrat de silicium monocristallin 2 dont la surface est recouverte d'une couche d'oxyde.

Les fils électriques 3 sont constitués d'un fil d'aluminium $d=80 \mu\text{m}$, dont les extrémités sont équipées de bandes de métal qui peuvent être soudées avec une brasure conventionnelle. La conception et l'exécution intégrale de l'élément sensible du capteur assurent la compensation thermique des principaux paramètres, la compensation de l'influence du champ magnétique et l'absence de sensibilité à la déformation transversale. La taille de la base du capteur est de 8 mm, les résistances électriques d'entrée R_{in} et de sortie R_{out} dépendent du niveau de dopage et de l'épaisseur du film et sont de l'ordre de (200 - 3000) Ohm, le courant d'alimentation dépend de la valeur de la résistance et est généralement de l'ordre de (1 - 10) mA. La différence de résistance électrique des capteurs d'un lot ne dépasse pas 5 % et, si nécessaire, un lot de capteurs peut être constitué à partir de caractéristiques techniques presque identiques.

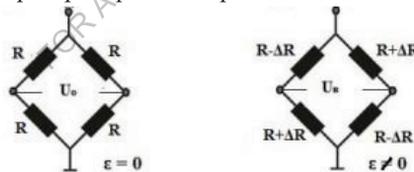


Fig. 2.9. Schéma de l'élément de détection à jauge de contrainte.

Le principe de fonctionnement de la jauge de contrainte consiste à modifier la résistance électrique des éléments résistifs du circuit intégré lorsqu'une déformation mécanique est appliquée le long de l'axe du capteur (fig. 2.9), à compenser le circuit et, par conséquent, à générer une tension électrique U_{out} sur les contacts de mesure lorsque le capteur est alimenté en courant ou en tension (voir fig. 2.9). Après avoir préprogrammé le capteur, c'est-à-dire obtenu la dépendance de la tension de sortie U_{out} par rapport à la valeur de la déformation mécanique, la déformation de l'objet est déterminée par la valeur de la tension de sortie du capteur fixé rigidement à l'objet :

$$\varepsilon = (U_{out} - U_o) / k \quad (2.13)$$

où U_{out} est le signal de sortie du capteur après l'apparition de la déformation ε de l'objet étudié, U_o est le signal de sortie initial mesuré après le montage du capteur sur l'objet, $k = \Delta U_{out} / \Delta \varepsilon$ est la sensibilité à la déformation du capteur.

Pour monter le capteur sur l'objet à tester, on peut utiliser les adhésifs BF-2, BC-350 et autres, qui sont largement utilisés dans les jauges de contrainte et offrent une rigidité de montage suffisante. L'admissibilité de l'utilisation de ce liant peut être vérifiée par la valeur des lectures du capteur après chargement de la poutre d'essai, qui ne doit pas dépasser l'erreur de mesure admissible.

Voici les résultats d'une étude plus détaillée des transducteurs de mesure avec $R_{in} = 1,7 \text{ k}\Omega$ ($N_p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). La sensibilité à un courant d'alimentation de 2 mA est d'environ $42 \mu\text{V}/\text{mN}^{-1}$ ($42 \mu\text{V}/\text{URD}$). La valeur du signal de sortie zéro (initial) du capteur U_o est de $\sim 6,2 \text{ mV}$ et peut être ajustée proche de zéro si nécessaire. La sensibilité à la déformation dépend de la température et est légèrement supérieure à $0,02 \text{ \% /K}$, $U_o \sim 8 \mu\text{V}/\text{K}$, $R \sim 0,03 \text{ \% /K}$. Les caractéristiques peuvent être modifiées, par exemple en augmentant le courant d'alimentation (sans surchauffe et sans bruit inacceptable), pour augmenter la sensibilité.

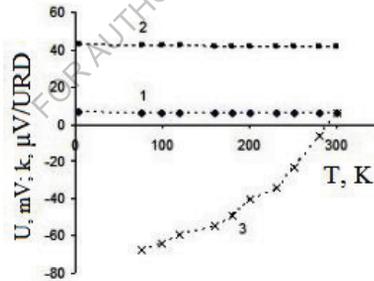


Fig. 2.10. Dépendances de la température du signal de sortie zéro (déformation relative $\varepsilon = 0$) (1), de la sensibilité à la déformation $k = \Delta U_{out} / \Delta \varepsilon$ (2) et du signal de sortie du capteur collé à une plaque d'acier (3).

La figure 2.10 montre la dépendance de la température du signal de sortie zéro (déformation relative $\varepsilon = 0$) (1), de la sensibilité à la déformation $k = \Delta U_v / \Delta \varepsilon$ (2) et du signal de sortie du capteur collé à la plaque d'acier (3). Ce dernier surveille les contraintes thermiques.

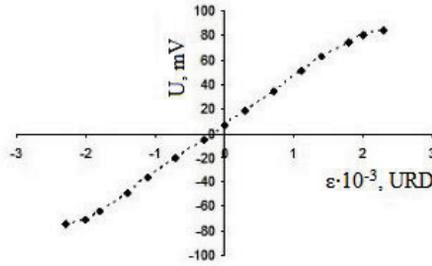


Fig. 2.11. Dépendance de la tension de sortie U_{out} en fonction de la valeur de la contrainte appliquée.

La figure 2.11 montre la dépendance de la tension de sortie U_{out} par rapport à la valeur de la déformation appliquée. Le graphique indique une bonne linéarité de la caractéristique jusqu'à des déformations d'environ $1 \cdot 10^3$ URD. La sensibilité à la déformation du capteur étudié, comme le montre le graphique, est égale à $42 \mu\text{V/URD}$.

Si l'on considère le fonctionnement d'une jauge de contrainte de type pont, dans laquelle une paire de résistances a un signe de l'effet de contrainte et l'autre le signe opposé (à condition que les résistances soient égales), on peut obtenir l'expression suivante pour la tension dans la diagonale du pont :

$$U = I R_{oo} [(k_{\parallel} + k_{\perp})/2]\epsilon \quad (2.14).$$

$$\text{Si } |k_{\parallel}| = |k_{\perp}| = k, \text{ alors } U = I_o R_o k\epsilon,$$

où k est le coefficient de sensibilité à la déformation du bras du pont (résistance), I_o est le courant d'alimentation du circuit du pont, R_o est la résistance initiale de la résistance du circuit.

En d'autres termes, la tension de sortie à un courant d'alimentation constant est linéaire dans la région de linéarité de la dépendance de $k(\epsilon)$ de la jauge de contrainte ou de constance de la valeur de k . La non-linéarité expérimentale observée après $\epsilon > 1 \cdot 10^3$ URD (mln^{-1}) peut être liée à la fois aux propriétés électrophysiques du film de silicium sensible et aux propriétés du liant.

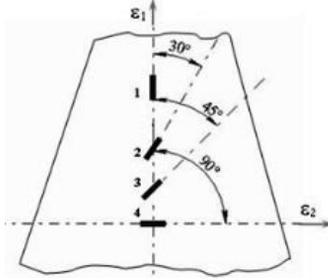


Fig. 2.12. Disposition de la jauge de contrainte dans l'étude du cas de divergence de l'axe de capteur et de la direction de la déformation principale ε_1 .

Nous avons également étudié l'erreur des mesures de déformation à l'aide de jauges de contrainte dans des conditions où l'axe de la base du capteur ne coïncide pas avec la direction de la déformation principale de l'objet. La figure 2.12 montre la direction de la déformation principale ε_1 de la poutre et la disposition des capteurs sur la poutre. Les capteurs ont été fixés à l'aide de la colle BF-2. L'axe de base du capteur 1 coïncide avec la direction de la déformation principale ε_1 , le capteur 2 est situé à un angle de 30° par rapport à ε_1 , le capteur 3 à un angle de 45° et le capteur 4 à un angle de 90° (coïncidant avec la déformation principale ε_2). Tous les capteurs ont été prélevés dans le même lot produit selon le même mode technologique.

La valeur de la déformation mesurée ε_φ a été déterminée à l'aide de la formule (2.13). Les déformations calculées utilisées pour la comparaison avec celles obtenues expérimentalement ont été déterminées par la formule :

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\varphi \quad (2.15)$$

où φ est l'angle entre la direction ε_1 et la direction pour laquelle la déformation est calculée.

La déformation ε_2 a été calculée à l'aide de la formule $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$ (où μ est le coefficient de Poisson). Les résultats de l'étude sont présentés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Dépendances des déformations ε_φ calculées et ε_e expérimentales par rapport à l'orientation du capteur par rapport à l'axe principal.

φ	0°	30°	45°	90°
$\varepsilon_\varphi, \text{ URD}$	$1 \cdot 10^3$	$0,68 \cdot 10^3$	$0,37 \cdot 10^3$	$-0,25 \cdot 10^3$
$\varepsilon_\varepsilon, \text{ URD}$	$1 \cdot 10^3$	$0,64 \cdot 10^3$	$0,36 \cdot 10^3$	$-0,24 \cdot 10^3$

La plus grande différence entre ε_φ et ε_ε est observée pour $\varphi = 30^\circ$ et est de 6%, ce qui est au niveau de l'erreur expérimentale. Les résultats indiquent que la sensibilité à la déformation transversale des capteurs est insignifiante.

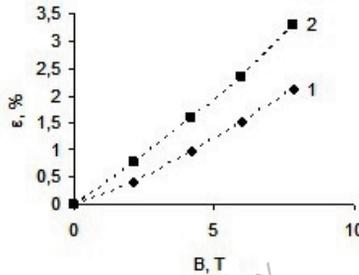


Fig. 2.13. Dépendance de l'erreur de mesure dans un champ magnétique à 4,2 K : 1 - capteur non déformé, 2 - déformé à $\varepsilon = 10^3$ URD.

La figure 2.13 montre les résultats de l'étude d'un des capteurs dans un champ magnétique à $T = 4,2$ K. La courbe (1) correspond à la valeur de déformation qui semble se produire lorsqu'un champ magnétique agit sur un capteur non déformé ($\varepsilon = 0$), et la courbe (2) sur un capteur pré-déformé à $\varepsilon = 1 \cdot 10^3$ URD. Un champ de 7 T conduit à une erreur d'environ 3%.

Il est connu que la précision des mesures dépend largement d'un paramètre tel que le fluage des relevés. Le fluage est déterminé par la rigidité de la structure du capteur et du liant et est causé par la déformation plastique du liant (colle) sous l'effet d'une déformation mécanique. En règle générale, le fluage des capteurs à semi-conducteurs est nettement plus élevé que celui des capteurs à feuille métallique.

Pour les capteurs considérés, le fluage est probablement le principal inconvénient et il est dû à la conception plutôt rigide du transducteur. La miniaturisation et l'optimisation de la forme du capteur, ainsi que le choix d'un liant, sont autant de moyens de réduire le fluage.

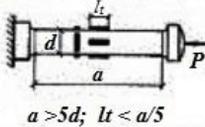
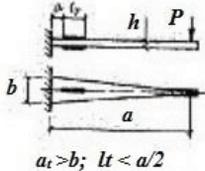
2.11. Capteurs de contrainte et de pression pour la mesure de la force et de la pression

Les capteurs de force et de pression à jauges de contrainte sont utilisés dans une grande variété d'applications, car ils peuvent mesurer des forces et des pressions dans une plage allant de quelques milli- à plusieurs MN en utilisant des éléments élastiques (poutres) de formes et de tailles diverses. Lors de la conception des jauges de contrainte (capteurs de pression et de force), une attention particulière est accordée à la déformation la plus faible possible du système qui perçoit la force et la pression, et à la compensation de l'influence des composantes latérales de la force qui résultent des excentricités. Pour éviter les excentricités, on utilise généralement des supports intermédiaires pour les billes et les segments, ainsi que des membranes élastiques flexibles le long de l'axe de la force et rigides de part et d'autre de cet axe. Afin de réduire l'hystérésis aux points d'accouplement des éléments des capteurs de force et de pression, il est recommandé d'utiliser des joints élastiques.

Pour mesurer des forces importantes de 10 kN à 10 MN, différentes formes d'éléments élastiques (poutres) sont utilisées dans les capteurs de force et de pression. Le plus simple est l'élément élastique en forme de barre utilisé pour mesurer des forces de 50 kN à 5 MN. Afin d'assurer une répartition uniforme des contraintes sur la section transversale de l'élément élastique dans la zone des jauges de contrainte, le rapport entre la hauteur et la dimension transversale doit être d'au moins 3. L'augmentation de ce rapport au-delà de 5 peut entraîner une perte de stabilité. Pour augmenter la stabilité, on utilise un diaphragme élastique de centrage ou un système de joints élastiques.

Les capteurs de force et de pression destinés à mesurer de petites forces (jusqu'à 10 kN) sont généralement constitués d'éléments élastiques en forme de poutre. Les dynamomètres de contrainte sous forme d'anneaux pliés fonctionnant sur une déformation à deux chiffres sont également très répandus. Les éléments élastiques de type anneau ont une sensibilité relativement élevée avec une rigidité suffisante par rapport au plan d'action de la force.

Tableau 2.3. Schémas de calcul et formules pour la caractérisation de certains éléments élastiques simples de capteurs de force et de pression.

Type of elastic element	Elastic element diagram	Calculation formula
Rods	 <p>$a > 5d; lt < a/5$</p>	$\frac{4P10^6}{\pi d^2 E}$
Beam	 <p>$a_t > b; lt < a/2$</p>	$\frac{6Pa10^6}{bh^2 E}$

2.12. Transducteurs électromécaniques

Les transducteurs électromécaniques se présentent sous la forme d'un dispositif de contact mécanique fonctionnant sous l'action d'une grandeur physique changeante, qui est mesurée. Ils peuvent être fabriqués sous différentes formes. En général, les contacts ont une forme simple et fonctionnent en mode discret, comme, par exemple, un commutateur bimétallique (fig. 2.13).

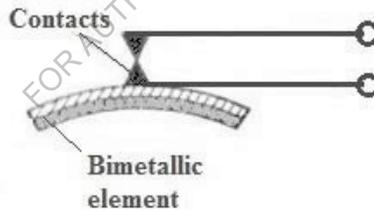


Fig. 2.13. Exemple d'un élément bimétallique fonctionnant comme un transducteur électromécanique

Lorsque la valeur mesurée dépasse le point de commutation, le contact s'ouvre ou se ferme, ce qui entraîne un signal de sortie du transducteur dans le circuit fermé ou ouvert.

Les transducteurs électromécaniques sont généralement numériques (discrets) car leurs contacts ne peuvent être que dans deux positions et représentent un élément tout ou rien.

2.13. Capteurs d'accélération. Accéléromètres.

Les accéléromètres sont des transducteurs qui mesurent l'accélération d'un objet, qu'il acquiert lorsqu'il est déplacé par rapport à sa position initiale. Les accéléromètres sont utilisés pour mesurer l'accélération des déplacements horizontaux, les accélérations causées par la gravité terrestre et autres. De nos jours, les accéléromètres sont produits en masse sur la base de microsystèmes électromécaniques (MEMS).

Examinons les principes de fonctionnement des principaux circuits d'accéléromètres. La figure 2.14 montre quelques modèles d'accéléromètres à jauges de contrainte. L'accéléromètre le plus simple (a) se compose d'une base, d'un élément sensible en porte-à-faux avec des jauges de contrainte et d'une masse inertielle à l'extrémité. Le calcul d'un tel accéléromètre se réduit à la détermination de la section et de la portée de la poutre en porte-à-faux pour l'action d'une force égale au produit de la masse par l'accélération mesurée. Les accéléromètres de ce type sont utilisés pour mesurer des accélérations dans les plages de 0...20g à 0...20000g avec une plage de fréquence de 0...15 à 1500 Hz. La fréquence naturelle des accéléromètres de type cantilever est déterminée par la rigidité du cantilever et de la masse inertielle. La gamme de fréquences peut être étendue en utilisant des éléments élastiques sans masse concentrée. La force agissant sur un tel accéléromètre est déterminée par le produit de l'accélération mesurée par la masse du porte-à-faux.

L'accéléromètre illustré à la figure 2.14.b) diffère en ce sens qu'il comporte un élément de détection avec une masse inertielle supportée par deux poutres en porte-à-faux. Par rapport aux accéléromètres de type cantilever, il est possible dans ce cas d'obtenir un facteur de conversion plus élevé pour les mêmes fréquences naturelles. L'élément de cadre est conçu pour être fixé de manière rigide aux montants aux deux extrémités. Les accéléromètres basse fréquence sont généralement dotés d'un amortissement liquide, l'élément sensible étant placé dans un boîtier scellé rempli, par exemple, de polyxyloxane liquide.

Les accéléromètres à haute fréquence sont dotés d'une masse inertielle, qui est reliée à la base par l'intermédiaire d'un dynamomètre de section solide ou tubulaire. L'accéléromètre est orienté de manière à ce que l'accélération mesurée agisse le long de l'axe de l'élément sensible. Le calcul d'un tel accéléromètre se réduit à la détermination des dimensions du dynamomètre chargé d'une force égale au produit de l'accélération et de la masse.

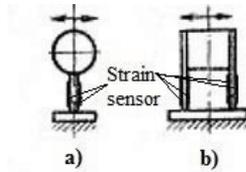


Fig. 2.14. Exemples de conceptions d'accéléromètres.

2.14. Accéléromètre à faisceau semi-conducteur intégral

Les technologies de la microélectronique moderne permettent de créer des accéléromètres miniaturisés aux caractéristiques métrologiques stables. Il est donc possible de les utiliser dans une grande variété de dispositifs techniques et de résoudre divers problèmes scientifiques, techniques et de production.

Prenons par exemple l'**accéléromètre au silicium à faisceau intégré** bien connu (**transducteur MEMS**). Il s'agit d'un modèle micro-miniature illustré à la figure 2.15. L'accéléromètre est constitué d'un cristal de silicium orienté dans le plan cristallographique optimal en termes de propriétés tensométriques. Une poutre sur laquelle se trouvent un concentrateur de contraintes mécaniques et des jauges de contrainte, ainsi qu'une partie massive - la masse inertielle, qui peut être fabriquée soit à partir du même silicium que la poutre, soit à partir d'un autre matériau, est fabriquée dans le cristal au moyen d'une gravure anisotrope. La poutre est séparée de la base par un trou oblong. Le cristal de silicium est fermé en haut et en bas par des couvercles en verre avec des cavités gravées, qui forment une chambre fermée protégeant la poutre et la cellule de contrainte de l'environnement extérieur et limitant le mouvement libre de la poutre sous l'effet des surcharges. Les couvercles sont reliés au silicium au moyen d'un ajustement anodique. En outre, des plots de contact sont fabriqués sur le couvercle supérieur, auxquels les fils conducteurs externes sont connectés. Selon les auteurs, les dimensions de l'accéléromètre considéré sont les suivantes : $2 \times 3 \times 0,6$ mm, masse de 0,02 g, gamme d'accélération mesurées de 0,1 à 500 m/s^2 , dans la gamme de fréquences de 0 à 100 Hz.

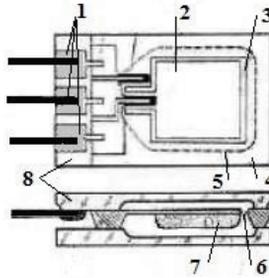


Fig. 2.15. Exemple de construction de l'accéléromètre à faisceau intégral. 1 - plaquettes de contact ; 2 - poutre ; 3 - entrefer ; 4 - silicium ; 5 - encoche dans le couvercle ; 6 - entrefer ; 7 - masse d'inertie ; 8 - couvercle en verre

2.15. Transducteurs de mesure des vibrations. Vibromètres

Les transducteurs de mesure de vibrations à tensorésistance inertielle (vibromètres) peuvent être construits selon les schémas des accéléromètres et ne diffèrent de ces derniers que par le rapport entre les fréquences naturelles et les fréquences des processus étudiés. Étant donné que les masses inertielles des vibromètres sont relativement plus importantes et que la plage d'amplitude doit correspondre à l'amplitude des vibrations mesurées, la conception des vibromètres à basse fréquence et des accéléromètres est également quelque peu différente.

La figure 2.16 montre le schéma d'un vibromètre inertiel dans lequel la masse inertielle est supportée par des roulements. La masse est maintenue en état d'équilibre par un ressort d'un élément élastique (suspension) et ses mouvements provoquent la déflexion d'une poutre avec des jauges de contrainte du capteur de déplacement 4. Les vibromètres de cette conception peuvent avoir une fréquence propre de l'ordre de plusieurs hertz. Les vibromètres à basse fréquence sont caractérisés par une certaine instabilité de la référence zéro due à l'influence des forces de frottement dans les roulements, ce qui limite la plage de mesure.

Il existe également des vibromètres avec une masse d'inertie sous forme de pendule. Dans ce cas, la masse d'inertie sur le levier est maintenue en position d'équilibre par deux ressorts ou des éléments de détection élastiques de capteurs de déplacement.

Dans les vibromètres à contact, les vibrations sont transmises à l'élément sensible par l'intermédiaire d'une tige. Pendant les mesures, le corps du vibromètre est tenu dans les mains ou renforcé sur un support fixe.

Les vibromètres sous forme de sondes vibratoires à contact sont utilisés dans l'étude des structures qui relient l'objet de l'étude à un support fixe. En tant que sondes de vibration, il est possible d'utiliser des transducteurs de déplacement à tensorésistance de n'importe quel type, dont la plage de mesure correspond aux déplacements vibratoires de l'objet d'étude. Une variante des sondes vibratoires de type contact sont les sondes vibratoires portables. Pendant la mesure, l'opérateur tient le corps du stylet dans ses mains, en appuyant la pointe contre l'objet de manière à ce que le capteur de déplacement à jauge de contrainte se trouve au milieu de la plage de mesure.

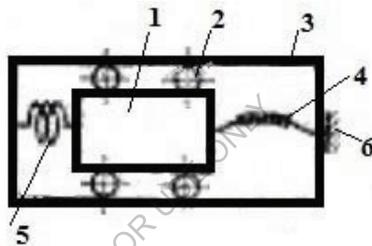


Fig. 2.16. Exemple de conception d'un vibromètre. 1 - masse inertielle, 2 - rouleaux, 3 - boîtier, 4 - poutre avec jauge de contrainte, 5 - ressort, 6 - montage de la poutre.

2.16. Capteur de pression à jauge de contrainte en silicium

Les membranes de silicium pour la création de transducteurs de pression sont assez largement utilisées, les effets tensioactifs dans ces membranes avec différentes orientations cristallographiques sont bien étudiés, les technologies de travail avec ces membranes, la création d'éléments sensibles résistants à la déformation sur ces membranes et leur connexion dans des circuits intégrés sont élaborées. L'utilisation du silicium et des technologies microélectroniques modernes permet de créer des capteurs de pression miniatures pour des applications médicales et d'autres tâches spéciales dans divers domaines de la science et de la technologie.

Considérons l'un des transducteurs de pression absolue à jauge de contrainte intégrée connus et décrits dans la littérature. Sa structure est illustrée à la figure 2.17. Il se compose d'un couvercle plat en verre, dans

lequel une cavité est gravée, et d'un cristal de silicium avec une fine membrane, dans laquelle sont fabriquées quatre jauges de contrainte, connectées dans un circuit en pont. La membrane est entourée d'une base annulaire épaisse en silicium. Une cavité dans la plaque de verre est située sous la membrane, et la plaque elle-même est collée au cristal de silicium au moyen d'un ajustement anodique. La liaison anodique est réalisée en chauffant les plaques de verre et de silicium jusqu'à 400 °C, puis en appliquant une tension de 600 V au silicium par rapport à la plaque de verre mise à la terre. L'ajustement de l'anode assure une connexion totalement hermétique, de sorte que la cavité de la plaque de verre et la membrane forment une chambre hermétique fermée.

Selon les auteurs, les dimensions externes du transducteur peuvent être : 1,5x2,0x0,2 mm. La sensibilité est de 0,2 mV/ (kPa· V). La dérive en température est équivalente à 250 Pa par 1 °C, et la tension de sortie varie linéairement jusqu'à une pression de 40 kPa.

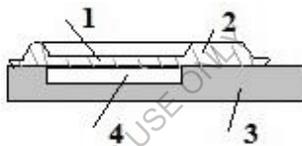


Fig. 2.17. Exemple de structure d'un transducteur de pression absolue intégral au silicium : 1 - membrane en silicium ; 2 - base ; 3 - plaque de verre ; 4 - chambre hermétique.

2.17. Quelques capteurs de pression disponibles dans le commerce. Sapphire, Motorola

Capteur de pression (transducteur) Sapphire. Le capteur de pression du complexe Sapphire 22 est conçu pour la conversion continue de la valeur du paramètre mesuré - pression absolue, pression relative, vide, pression hydrostatique et différence de pression des milieux neutres et agressifs, ainsi que pour la conversion du niveau en un signal de sortie de courant unifié. Le transmetteur de pression est conçu pour fonctionner dans des systèmes de contrôle automatique, de régulation et de gestion des processus technologiques dans diverses industries, y compris dans la production d'explosifs de l'industrie pétrolière et gazière, dans les centrales nucléaires (EAU) et pour l'exportation.

Le transmetteur de pression se compose d'une unité de mesure et d'une unité électronique. Tous les convertisseurs ont une unité électronique unifiée et ne diffèrent que par la conception de l'unité de mesure.

Le principe de fonctionnement des capteurs de pression Sapphire 22 est basé sur l'effet de la pression mesurée (différence de pression) sur les membranes de l'unité de mesure, ce qui provoque une déformation de l'élément sensible élastique et une modification de la résistance des jauges de contrainte. La variation de la résistance est convertie en un signal électrique, qui est transmis de la jauge de contrainte au convertisseur électronique. Ce signal se présente sous la forme d'un signal unifié de courant normalisé.

Le transmetteur de pression est doté d'une version antidéflagrante. Le transmetteur de pression antidéflagrant est conçu pour être installé dans les zones dangereuses des locaux et des installations extérieures, conformément aux documents réglementant l'utilisation des équipements électriques dans les zones dangereuses.

Capteurs de pression Motorola. Motorola est largement connu pour la création et la production de différents types de capteurs. Les derniers développements sont des capteurs de pression à semi-conducteurs. Les capteurs se caractérisent par leur petite taille et leur facilité d'utilisation. La conception utilise des membranes développées un nouvel élément de détection breveté. Cet élément sensible fonctionne sur le principe d'un capteur à effet Hall. Dans celui-ci, sous l'action d'une contrainte mécanique sur les bornes de sortie du capteur apparaît une tension électrique proportionnelle à la pression. La tension apparaît en raison de la déformation inhomogène des éléments résistifs du capteur de pression. Comme indiqué, le capteur de pression avec la conception proposée de l'élément sensible présente des avantages tels qu'une linéarité améliorée, la simplicité de la compensation thermique, etc. Selon le type de pression à mesurer, des capteurs de pression différentielle, relative et absolue sont produits.

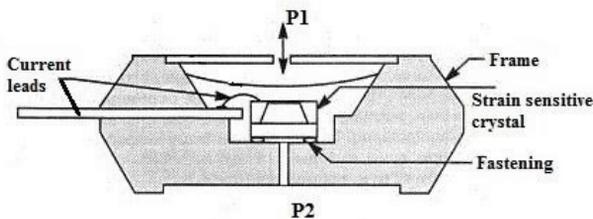


Fig. 2.18. Conception générale de l'un des transducteurs de pression Motorola.

Transducteur de pression piézoélectrique. Schéma général du dispositif. L'effet piézoélectrique, utilisé dans les transducteurs, est l'apparition de charges électriques à la surface de certains diélectriques cristallins (quartz, titanate de baryum) sous l'action d'une contrainte ou d'une déformation mécanique.

La figure 2.19 montre le schéma d'un dispositif de mesure de la pression d'un gaz à l'aide d'un transducteur piézoélectrique. La pression mesurée P agit sur la membrane 1- en bas du corps du transducteur. Deux plaques de quartz 2 sont prises en sandwich entre trois entretoises métalliques 3. Une bille 4 est placée entre le couvercle et la partie supérieure pour assurer une distribution homogène de la pression mesurée. Sur la plaque centrale - l'électrode négative - est fixé un fil 5 traversant un manchon isolant.

La différence de potentiel entre l'électrode négative et le boîtier est proportionnelle à la pression mesurée. La pression est déterminée par la différence de potentiel mesurée.

Étant donné que les charges disparaissent lorsque la pression est supprimée, il convient d'utiliser des circuits de mesure appropriés afin que la charge n'ait pas le temps de changer de manière significative.

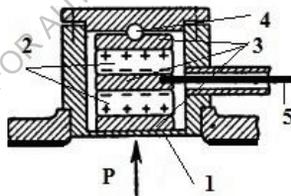


Fig. 2.19. Dispositif de transducteur piézoélectrique pour la mesure de la pression du gaz. Schéma général du dispositif.

2.18. Capteurs de déplacement

L'un des transducteurs de déplacement les plus simples est un diviseur potentiométrique résistif, dans lequel le contact coulissant ou le curseur du potentiomètre se déplace le long de l'élément résistif (fig. 2.20). Le curseur est relié mécaniquement à un rouleau sensible (broche) qui suit les mouvements de l'objet à mesurer. Lorsqu'une tension est appliquée à

l'élément résistif, la tension retirée du curseur du potentiomètre indique la valeur du mouvement.

Les capteurs de déplacement angulaire linéaires et rotatifs basés sur le principe de la division de la tension sont assez courants. Les capteurs angulaires sont utilisés pour mesurer les déplacements angulaires de quelques degrés à quelques tours de disque, tandis que les capteurs linéaires fonctionnent dans une plage allant de quelques millimètres à quelques mètres.

La forme de l'élément résistif détermine la résolution du transducteur. Lorsque cet élément est constitué d'un fil, la résolution dépend du nombre de tours de fil par unité de longueur de l'élément. D'autres types de transducteurs à division de tension utilisent un film de métal, de carbone, etc. pour créer l'élément résistif, ce qui permet une résolution théoriquement infinie.

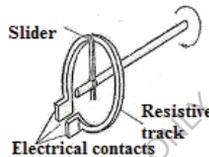


Fig. 2.20. Le dispositif potentiométrique le plus simple pour la détection des déplacements angulaires

Capteurs de déplacement capacitifs. Les capteurs de déplacement capacitifs fonctionnent sur le principe d'un condensateur, formé de deux plaques séparées par un diélectrique. Une modification de la taille des plaques, de la distance entre elles ou entre elles et le diélectrique entraîne une variation de la capacité.

La figure 2.21 illustre l'un des principes de fonctionnement d'un capteur de déplacement capacitif. La capacité y est modifiée en déplaçant le diélectrique entre les deux plaques du condensateur. Il existe également d'autres principes - déplacement d'une plaque par rapport à l'autre, modification de la zone de chevauchement des plaques - ainsi qu'une conception dans laquelle le diélectrique, tout en restant stationnaire, modifie ses caractéristiques.

C'est sur ce principe que sont basés les capteurs de proximité capacitifs et les détecteurs de proximité capacitifs, capables de détecter la cible à une certaine distance de l'appareil. Le transmetteur capacitif de niveau de liquide

repose sur le même principe. Il fait varier la constante diélectrique en fonction des variations du niveau de liquide.

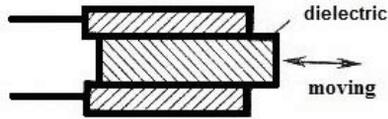


Fig. 2.21. Principe de fonctionnement d'un capteur de déplacement capacitif

Capteurs de déplacement inductifs. L'auto-inductance d'une bobine change lorsqu'un corps magnétiquement perméable s'en approche, de sorte que le déplacement du corps par rapport à la bobine peut être déterminé à l'aide d'une bobine de détection à auto-inductance. Les transducteurs de mesure qui utilisent ce principe sont généralement sans contact (fig. 2.22.a). Il existe également des capteurs de déplacement inductifs couplés (fig. 2.22.b), dans lesquels le noyau de la bobine est couplé mécaniquement au corps dont le déplacement est mesuré. Les transducteurs sans contact du type décrit sont utilisés comme base pour la construction de capteurs de proximité inductifs et de détecteurs de proximité inductifs.

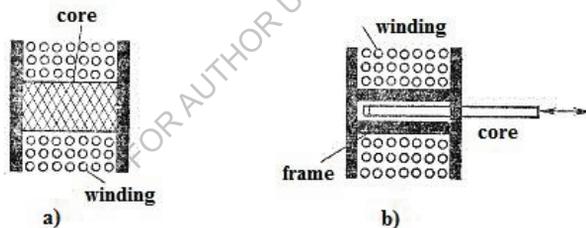


Fig. 2.22. Transducteurs inductifs de déplacement : a - sans contact ; b - connectés

Transducteurs de déplacement magnétique. Les transducteurs de ce type sont basés sur l'utilisation de la variation de la résistance magnétique entre deux ou plusieurs bobines magnétiques, en fonction du déplacement du corps. Le déplacement entraîne une modification de la tension de sortie du transducteur. Des champs magnétiques constants ou alternatifs, dont la magnitude varie linéairement, peuvent également être utilisés. Dans ce cas, un capteur de champ magnétique placé sur le corps en mouvement suivra le déplacement.

Capteurs de déplacement inductifs. Le principe de fonctionnement des transducteurs inductifs repose sur la dépendance de l'inductance ou de l'inductance mutuelle des enroulements par rapport à la position, aux dimensions géométriques et à l'état magnétique des éléments constitutifs de leur circuit magnétique.

Il ressort de la théorie (et des formules mathématiques) que l'inductance et l'inductance mutuelle peuvent être modifiées en influençant les dimensions géométriques (longueur, surface de la section) de la section aérienne du circuit magnétique, la perméabilité magnétique et les pertes dans le noyau magnétique.

Le courant alternatif qui circule dans la bobine crée un champ magnétique alternatif. Lorsqu'un matériau conducteur d'électricité (métal, etc.) est placé dans ce champ, une partie de l'énergie du champ magnétique est transférée à l'objet métallique. Cette énergie transférée induit des courants de Foucault à la surface de l'objet. Leur ampleur dépend de la taille, de la composition du métal et de la position de l'objet par rapport au champ magnétique. Les courants de Foucault dans l'objet créent leur propre champ magnétique, qui interagit avec le champ primaire généré par la bobine. Sous l'effet de cette interaction, l'inductance effective de la bobine diminue et, par conséquent, la fréquence de résonance du circuit dans lequel l'inductance est incluse change.

2.19. Instruments de mesure du débit. Débitmètres

Mécanique. Dans la pratique, on connaît un grand nombre de méthodes de détermination du débit. Les méthodes de mesure du débit les plus simples et donc les plus courantes sont celles qui utilisent des éléments de détection mécaniques, dans lesquelles le débit déplace ou fait tourner un corps solide. Le déplacement ou la rotation du corps solide est alors proportionnel au débit.

La figure 2.23 présente un schéma de l'une des méthodes de mesure mécanique du débit. Elle montre une palette à ressort, suspendue à un pivot, qui dévie pour ouvrir un orifice lorsque le fluide passe à travers le transducteur. Plus le débit est important, plus la lame dévie.

Il existe d'autres méthodes mécaniques de mesure du débit. Dans un transducteur de débit, la méthode de l'hélice tournant lorsqu'une substance s'écoule peut être réalisée. La vitesse de rotation de l'hélice est proportionnelle au débit de cette substance.

Le transducteur de débit mécanique le plus courant est un débitmètre à turbine doté d'une hélice rotative (ou, dans ce cas, d'une turbine). La turbine est montée dans le flux de la substance au moyen de roulements. En général, les pales de la turbine sont faites d'un matériau ferromagnétique. Par conséquent, une bobine montée sur le corps du débitmètre est utilisée pour déterminer la vitesse de la turbine. L'élément de détection électromagnétique du transmetteur de débit crée un effet de freinage de la turbine, qui peut affecter la vitesse angulaire de la turbine à faible débit. D'autres types d'éléments de détection, tels que les éléments électro-optiques, sont utilisés pour les mesures de faibles débits.

Pour obtenir des mesures précises, il est important qu'il n'y ait pas de tourbillonnement de la substance en circulation, car cela affecte directement la vitesse de la turbine. C'est pourquoi des ailettes de redressement du flux sont généralement installées à l'entrée du débitmètre. Ces aubes constituent également l'un des points de référence de la turbine. Bien entendu, il est également possible de concevoir des débitmètres beaucoup plus simples lorsque la précision de la mesure n'est pas essentielle, c'est-à-dire lorsque le freinage et le tourbillonnement de l'écoulement peuvent être ignorés.

L'un des avantages des débitmètres à turbine par rapport aux autres types de débitmètres est la dépendance linéaire de leur signal de sortie par rapport à la vitesse d'écoulement dans la plage définie pour l'appareil.

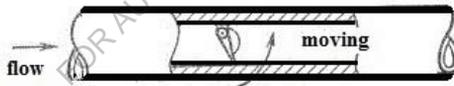


Fig. 2.23. Exemple de conception d'un dispositif mécanique de mesure du débit.

Mesure de débit basée sur des phénomènes thermiques. Les débitmètres thermiques fonctionnent selon le principe que la chaleur transportée par une substance d'un point à un autre est proportionnelle au débit massique de cette substance. Par exemple, la figure 2.24.a montre comment deux transducteurs de température (T) déterminent la température d'une substance avant et après le chauffage, qui est effectué par un élément chauffant situé entre ces transducteurs.

La figure 2.24.b montre un thermoanémomètre qui mesure le débit d'une substance au moyen d'un seul élément chauffant situé dans son écoulement. L'effet de refroidissement de la substance qui traverse cet

élément caractérise le débit massique, c'est-à-dire que le refroidissement est surveillé en raison du changement de résistance des fils de l'élément chauffant. Souvent, un film métallique ou semi-conducteur est utilisé à la place d'un élément filaire dans le transducteur. Le thermoanémomètre permet de mesurer les fluctuations extrêmement rapides du débit des substances.

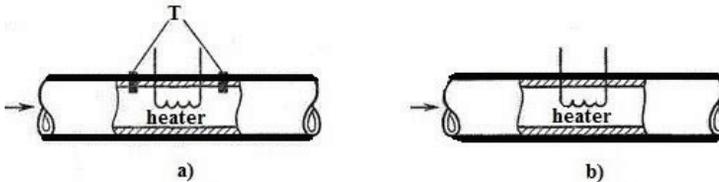


Fig. 2.24. Méthodes de réalisation du principe thermique de mesure du débit à l'aide d'un élément chauffant

Méthode thermoanémométrique de détermination du débit.

Principe de la mesure. La méthode permet de déterminer le débit par le changement de température d'un fil ou d'un film métallique chauffé électriquement (transducteur de débit) placé dans le flux de gaz contrôlé. Le refroidissement du transducteur dépend de la vitesse du flux, des propriétés physiques du gaz (conductivité thermique, température et densité) et de la différence de température entre le transducteur et le gaz.

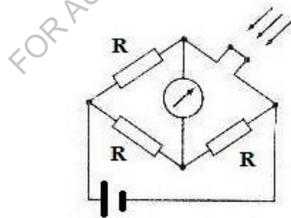


Fig. 2.25. Thermoanémomètre alimenté en tension continue

Deux méthodes sont connues :

A. Méthode du courant constant. Le courant (ou la tension) qui chauffe le fil est maintenu constant et mesuré par le changement de résistance provoqué par son refroidissement : $R = f(V)$. Les paramètres et l'alimentation du circuit du pont (fig. 2.25) sont choisis de façon à ce qu'il soit en équilibre à la vitesse nulle V du gaz. La déviation de la flèche du galvanomètre sert à mesurer la vitesse d'écoulement.

La méthode n'est suffisamment sensible qu'aux faibles vitesses des flux contrôlés et n'est pas adaptée à la mesure des vitesses élevées ($V > 0,5$ cm/s).

B. Méthode de la température constante. La résistance du transducteur refroidi par le flux est maintenue constante en ajustant la tension de chauffage (tension d'alimentation du pont). Cette tension ou ce courant d'alimentation du pont sert à mesurer la vitesse du flux surveillé. Comme dans le cas précédent, la sensibilité du thermoanémomètre diminue à mesure que la vitesse de l'écoulement surveillé augmente, mais cette diminution est nettement moins importante que dans le cas d'un circuit thermoanémométrique à tension de chauffage constante.

Évaluation de la méthode thermoanémométrique. La méthode thermoanémométrique présente un certain nombre d'avantages :

- haute sensibilité ;
- les dimensions miniaturisées de l'élément sensible ;
- des schémas et des dispositifs simples sont applicables pour les mesures.

Les inconvénients de la méthode sont les suivants :

- une sensibilité décroissante avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement ;
- nécessité d'un étalonnage individuel des transducteurs primaires ;
- instabilité de la caractéristique d'étalonnage.

L'utilisation d'un fil recuit réduit le taux de vieillissement. La faible température de fonctionnement du fil augmente l'influence de la température du gaz. Cette influence peut être éliminée par une compensation de température. Les flux de gaz auto-convectifs autour du fil chauffé (à vitesse nulle du flux contrôlé) faussent également les relevés, ce qui est particulièrement important pour les mesures à faible vitesse. En raison de leur faible inertie, les thermoanémomètres à fil sont utilisés dans les études sur les écoulements turbulents.

Méthode de mesure du débit par magnéto-induction. Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique, selon la loi de l'induction électromagnétique, une force électromotrice est générée dans le conducteur et un courant électrique est induit. Cet effet est utilisé dans le débitmètre à induction pour déterminer le débit. Le liquide qui s'écoule doit avoir une certaine conductivité minimale. Selon la loi de Faraday, un champ électrique est généré dans un fluide électriquement conducteur qui s'écoule à travers un

champ magnétique. Le flux contrôlé s'écoule dans un tuyau recouvert d'un isolant, dans les parois duquel deux électrodes diamétralement situées sont installées perpendiculairement à la direction du champ magnétique et de l'écoulement du fluide (milieu), à partir duquel la tension est retirée. La valeur de la tension est proportionnelle à la vitesse moyenne de l'écoulement du fluide. Cette tension, générée par une source à haute impédance (liquide), est amenée au moyen d'un câble au transducteur de mesure, qui l'amplifie et procède à un traitement ultérieur. La valeur du signal est généralement de quelques millivolts.

La théorie du débitmètre à induction est basée sur les équations de Maxwell. Un liquide conducteur en mouvement possède un certain nombre (concentration) de charges électriques. La force de Lorentz agit sur les charges en mouvement et les dévie dans une direction perpendiculaire, ce qui provoque une différence de potentiel électrique (tension électrique). La valeur de la tension est proportionnelle à la vitesse d'écoulement et aux propriétés électrophysiques du fluide (écoulement).

Le signal utile de sortie d'un tel débitmètre est faible. Dans un tel schéma de mesure du débit, il y a des interférences significatives. Pour éliminer ces inconvénients dans l'industrie, les débitmètres de ce type utilisent un champ magnétique variable ou commutable. Cette technique permet d'isoler le signal utile et d'obtenir une précision de mesure acceptable.

2.20. Interrupteurs et capteurs pour la détection de proximité (capteurs de mouvement)

Les capteurs de proximité n'ont pas de lien physique avec les objets. Ils évaluent la présence d'un corps au moyen d'un principe de détection physique mis en œuvre dans les transducteurs respectifs,

Un capteur de proximité inductif utilise un oscillateur accordé. Lorsqu'un corps conducteur s'approche du capteur, les oscillations détectées par le circuit de couplage sont amorties. Des dispositifs plus généraux et plus simples sont les détecteurs de proximité inductifs, dans lesquels un circuit d'interface est utilisé pour les activer ou les désactiver lorsqu'un corps conducteur s'en approche.

Les capteurs de proximité capacitifs se présentent sous la forme de transducteurs de mesure ou d'interrupteurs. Leur principe de fonctionnement est le suivant : un corps proche modifie la constante diélectrique d'un condensateur, ce qui déséquilibre le pont dans l'un des bras où est placé le

condensateur. Les capteurs capacitifs sont capables de détecter la proximité de corps constitués de différents matériaux dans une large gamme de distances.

Il existe également un grand nombre de **capteurs optiques** pour la détection de proximité. Ils se composent d'un élément de détection de base et d'un schéma de connexion au système de mesure. Les méthodes suivantes de détection de proximité peuvent fonctionner dans les dispositifs considérés (fig. 2.26). Les capteurs peuvent être du type (fig. 2.26.a) où la source lumineuse et l'élément sensible sont placés ensemble et où la lumière émise est réfléchi et suit le même chemin que la lumière incidente. Dans d'autres dispositifs (fig. 2.26.b), le faisceau provenant de la source et le faisceau de lumière réfléchi forment un certain angle l'un par rapport à l'autre et sont réfléchis par la surface du corps comme par un miroir. Des capteurs, dans lesquels le passage de la lumière à travers la surface du corps est également utilisé, sont possibles.

Les capteurs de proximité magnétique sont des dispositifs très courants et comprennent les relais à lames ou les capteurs à effet Hall.

Les capteurs de proximité radar se composent d'un générateur de signaux radar et d'un mélangeur où les signaux réfléchis et les signaux de sonde interagissent. Grâce à l'effet Doppler (la fréquence du signal réfléchi diffère de la fréquence du signal de sonde lorsque le corps est en mouvement), la fréquence de sortie du mélangeur est nulle lorsque le corps est immobile et différente de zéro lorsqu'il est en mouvement. La plupart de ces capteurs de proximité fonctionnent dans le domaine des *rayons X*.

L'application de ces dispositifs (capteurs de proximité) ne se limite pas à la mesure du déplacement. Les capteurs peuvent également enregistrer la distance, et donc la vitesse, en déterminant le temps entre les impulsions émises et réfléchies et en effectuant les calculs nécessaires à l'aide des résultats de ces mesures.

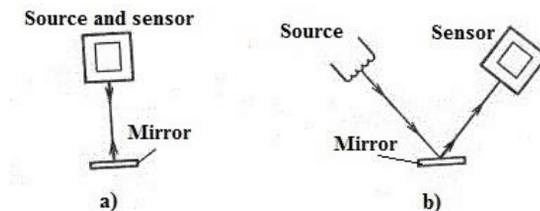


Fig. 2.26. Principes de fonctionnement de certains dispositifs optiques (capteurs, transducteurs) pour la détection de proximité

2.21. Capteurs de poids. Méthodes et moyens de conversion

Capteurs de poids électromécaniques. Capteurs de poids avec jauges de contrainte. Les capteurs de poids avec jauges de contrainte sont parmi les dispositifs de mesure de force les plus précis utilisés pour le pesage. Les capteurs de poids à jauges de contrainte intègrent des résistances destinées à ajuster le circuit du pont, ce qui permet l'interchangeabilité des capteurs, ainsi que la possibilité d'inclure plusieurs capteurs dans un circuit commun si nécessaire. La caractéristique du capteur de poids à jauge de contrainte indique la valeur de la tension de sortie en millivolts à charge nominale, rapportée à une tension d'alimentation de 1V. Typiquement, cette valeur est de 1-2 mV/V. Les surcharges supérieures à 150 % de la charge nominale n'entraînent pas de décalage du zéro. Les surcharges allant jusqu'à 500 % de la valeur nominale n'entraînent pas non plus de dommages mécaniques.

Capteurs de pesage avec corde vibrante. Le principe de fonctionnement prévoit l'excitation de la vibration à fréquence constante d'une corde pré-tendue au moyen d'un système électromagnétique et le transfert à la corde de la force développée par la charge dans la balance. Cette force augmente la tension de la corde et, par conséquent, la fréquence de sa vibration. Le changement de fréquence est une mesure de la masse déterminée de la charge. Ces capteurs permettent d'obtenir une grande précision dans la mesure du poids.

Capteurs de poids magnéto-élastiques. L'effet magnétoélastique fait que certains matériaux (par exemple le permalloy) soumis à une charge modifient leur susceptibilité magnétique. Un tel matériau est utilisé comme noyau d'un enroulement dont la résistance totale diminue avec l'augmentation de la charge en raison de la diminution de la susceptibilité magnétique. Ces éléments de détection ont une puissance de sortie relativement élevée, ce qui permet d'utiliser leur signal de sortie sans amplification. Toutefois, la faible plage de linéarité de la caractéristique ne permet pas d'effectuer des mesures précises.

Détecteurs de poids inductifs. Dans les capteurs de poids inductifs, la variation de l'inductance de l'enroulement est provoquée par le déplacement du noyau de fer sous l'effet de la force mesurée.

Les appareils suivants sont particulièrement importants dans le domaine de la technologie de mesure du poids :

a) Avec deux ou quatre inductances variables (inductance double avec armature de traction ou de croisement) ;

b) à inductance mutuelle variable (transformateur différentiel à induit rentrant).

Par rapport aux jauges de contrainte, les capteurs de poids inductifs ont des tensions de sortie plus élevées, une sensibilité moindre à la température et à l'humidité, et des déplacements d'armature plus importants. Ces propriétés permettent d'utiliser des ressorts souples, ce qui permet de mesurer de petites forces. Toutefois, la précision des capteurs de poids inductifs est inférieure à celle des jauges de contrainte.

Capteurs de poids avec dispositif de compensation de la force électromagnétique. Dans ce dispositif, le bol de la balance est relié par un levier à une bobine de compensation, qui se trouve dans le champ d'un aimant permanent. Le courant dans l'enroulement de cette bobine est contrôlé par un capteur de position connecté à un amplificateur. La variation du courant dans l'enroulement de la bobine de compensation a lieu jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint. Lorsque la charge change dans la balance, le courant dans la bobine, qui est une mesure du poids de la charge, change en conséquence.

Capteurs de poids hydrauliques. La force est déterminée en mesurant la pression développée par la charge sur le piston ou la membrane du système hydraulique. La pression du fluide est mesurée par un manomètre. La conception de la membrane en caoutchouc élimine les frottements. En outre, les capteurs de ce type permettent des déviations de la direction de la force agissante jusqu'à quelques degrés par rapport à la verticale sans erreurs supplémentaires. L'erreur est estimée à $\pm 0,2$ % dans la plage de pesage. Les limites de pesage les plus importantes vont de 50 kg à 500 tonnes.

Capteurs de poids utilisant des méthodes de mesure par ionisation. Le pesage avec des isotopes radioactifs peut être effectué selon deux méthodes : la méthode de transmission et la méthode de diffusion.

Lors de l'utilisation de la méthode de transmission, l'absorption du rayonnement par le poids à peser est mesurée. L'utilisation d'un rayonnement dur permet de considérer la valeur du coefficient d'atténuation de masse comme indépendante de la composition chimique du matériau. Dans la méthode par diffusion, le rayonnement direct est protégé. Le rayonnement latéral est diffusé par le matériau et dirigé vers le détecteur. La méthode de pesage permet d'utiliser ce type de balance comme balance de convoyeur ou

de camion dans des conditions environnementales difficiles où les balances équipées de systèmes de mesure conventionnels s'usent rapidement. Les plages d'erreur peuvent atteindre plusieurs pour cent.

2.22. Capteurs de niveau de remplissage. Mesure du niveau de remplissage

Selon l'industrie et les conditions dans lesquelles les capteurs de niveau doivent être utilisés, les exigences sont différentes. Lorsque l'on envisage d'utiliser une jauge de niveau, il est nécessaire de connaître les propriétés physiques et chimiques des matériaux de remplissage (viscosité, conductivité électrique, radioactivité, abrasivité, etc.), les conditions de mesure externes - température, pression, agressivité de l'environnement, etc.

Il existe un grand nombre d'effets physiques et de propriétés matérielles sur la base desquels des capteurs (transducteurs de mesure) de niveau de remplissage peuvent être conçus et fabriqués.

Mesure avec un flotteur. Un flotteur est utilisé comme élément sensible d'un capteur de niveau de liquide. En règle générale, on utilise comme flotteur des corps sphériques dont la densité est inférieure à celle du liquide. La transmission de l'information du capteur sur le niveau de remplissage peut se faire mécaniquement à l'aide de divers rouleaux, engrenages, câbles ou utiliser des systèmes de transmission de données électriques (en reliant le mouvement à une résistance variable, etc.) Pour la transmission des données, on peut également utiliser des commutateurs à échelons, envoyant des impulsions, la transmission magnétique du mouvement du flotteur, des capteurs de déplacement inductifs.

Les erreurs de mesure dans ces appareils sont principalement dues aux variations de la densité du liquide à remplir ou aux variations des conditions de transmission des données (frottements, contrecoups, etc.).

Méthode capacitive de mesure du niveau. Capteurs de niveau capacitifs. La méthode capacitive de mesure de niveau permet de mesurer le remplissage de matériaux pulvérulents, visqueux, granuleux. La méthode capacitive mesure les niveaux d'aliments en poudre, de céréales, de lessives, de ciment, de sable, de poussière de charbon, de fuel, de mazout, d'eau, d'acides, de bases, etc. La méthode capacitive permet de mesurer en continu le niveau des aliments en poudre, des céréales, des poudres à laver, du ciment, du sable, des poussières de charbon, du fioul, du mazout, de l'eau, des acides, des bases, etc. La méthode capacitive permet des mesures en

continu. Le mode de fonctionnement des capteurs est basé sur la mesure de la capacité électrique (principe de fonctionnement du condensateur). Le condensateur est formé par la paroi du réservoir et une sonde immergée dans le contenu du réservoir. La capacité est généralement mesurée en appliquant une tension électrique à haute fréquence. La capacité varie en fonction du niveau de remplissage. La capacité est égale à la somme des capacités de la partie immergée et de la partie dans l'air. Les deux capacités sont connectées en parallèle et la capacité totale est additionnée. La précision dépend de la conception de la sonde. La sonde est constituée d'un câble, d'une tige ou d'un tube. Si nécessaire, un revêtement isolant est appliqué.

Si le réservoir est constitué d'un matériau diélectrique, il faut prévoir une électrode opposée séparée. Dans la conception des jauges de niveau, on utilise parfois un condensateur cylindrique dont l'extrémité ouverte est immergée dans le milieu.

Mesure du niveau de remplissage basée sur la conductivité. Les capteurs et la méthode de mesure du niveau basée sur la conductivité ne peuvent être utilisés que pour la mesure du niveau de liquides conducteurs.

Le principe de mesure est basé sur la variation de la résistance électrique entre deux électrodes lorsqu'elles sont immergées dans le matériau de remplissage. La résistance diminue avec l'immersion. Cette méthode et ces capteurs ont été utilisés pour mesurer le niveau de remplissage des chaudières à vapeur. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne peut être utilisée que pour mesurer le niveau de matériaux liquides conducteurs d'électricité.

Méthodes hydrostatiques et pneumatiques de mesure du niveau. Ces méthodes peuvent être utilisées pour mesurer le niveau de n'importe quel liquide. La méthode hydrostatique utilise la pression du liquide au fond de la cuve et sa variation en fonction du niveau. La pression au fond d'un réservoir de liquide peut être mesurée dans des réservoirs ouverts à l'aide d'un manomètre conventionnel ou différentiel. Dans les réservoirs fermés, où le liquide peut être pressurisé, elle ne peut être mesurée qu'à l'aide d'un manomètre différentiel. La pression dépend de la hauteur de la colonne de liquide et de sa densité. Si le manomètre n'est pas installé au niveau du fond, une correction doit être apportée.

Dans la méthode pneumatique de mesure du niveau, de l'air ou un gaz protecteur doit être introduit dans le réservoir. Cette méthode est utilisée dans les chaudières à vapeur, les réacteurs, etc.

La méthode pneumatique de mesure de niveau consiste à immerger un tube jusqu'à un certain niveau dans le liquide dont le niveau doit être mesuré. De l'air (ou tout autre gaz) est introduit dans le tube par l'intermédiaire d'un étranglement spécial. La pression dans le tube et, respectivement, au-dessus de l'étrangleur est égale à la pression de la colonne de liquide (et dépend, respectivement, du niveau du liquide) par rapport au bord inférieur du tube.

Les avantages de ces méthodes et capteurs de niveau considérés sont leur degré de fiabilité assez élevé.

Méthode de mesure du niveau par ultrasons. La méthode de mesure de remplissage par ultrasons peut être utilisée pour les liquides et les solides en vrac. Elle ne peut pas être utilisée uniquement si le liquide contient des particules solides, ce qui peut entraîner d'importantes erreurs de mesure. Cette méthode de mesure permet d'automatiser facilement le processus de mesure.

Pour réaliser la méthode ultrasonique de mesure du niveau de remplissage, il est nécessaire de disposer d'une source d'ondes ultrasoniques (émetteur) et d'un récepteur. On utilise généralement des fréquences allant de 20 kHz à plusieurs mégahertz. Il existe deux façons de produire des vibrations ultrasoniques : piézoélectrique et magnétostrictive.

Une mesure de niveau peut être, par exemple, le temps de transit d'un faisceau ultrasonique. La vitesse du faisceau dépend du milieu de propagation. Cette méthode de mesure du niveau peut servir à signaler les limites du niveau de remplissage (voir fig. 2.27). Lorsqu'un certain espace est rempli, l'appareil à ultrasons envoie un signal.

Mais pour les liquides, la méthode de mesure du niveau par ultrasons basée sur le principe de l'écho-sondeur est plus pratique et plus précise. Les ultrasons se propagent dans l'espace au-dessus du liquide, sont réfléchis par la surface (interface air-liquide) et le temps de retour au récepteur permet de déterminer le niveau.

L'un des principaux avantages du capteur de niveau à ultrasons est qu'il peut être utilisé dans des endroits difficiles d'accès.

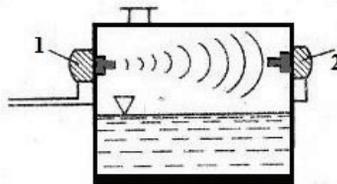


Fig. 2.27. Conception d'un détecteur de niveau à ultrasons. 1 - émetteur, 2 - récepteur

Indicateurs de niveau basés sur des isotopes radioactifs. Méthode de mesure. Les détecteurs de niveau à base d'isotopes radioactifs sont utilisés lorsqu'il est impossible d'effectuer des mesures avec des détecteurs conventionnels. Le plus souvent, la méthode de mesure de niveau basée sur les isotopes radioactifs est utilisée pour mesurer le niveau de matériaux agressifs, dans des réservoirs à haute température, dans des usines métallurgiques, dans des matériaux tels que le charbon, le minerai, etc. L'application la plus courante des capteurs de niveau à base d'isotopes radioactifs est la mesure du niveau de matières agressives.

Le fonctionnement des capteurs est basé sur le phénomène d'absorption du rayonnement radioactif par les matériaux contenus dans le réservoir. Dans la pratique, on mesure généralement des couches épaisses de matériaux, c'est pourquoi les rayons γ sont le plus souvent utilisés dans ces capteurs. Le faisceau de rayons γ traverse le réservoir en ligne droite. Un récepteur de rayonnement est situé sur la paroi opposée du réservoir. L'intensité des rayons qui atteignent le récepteur dépend du degré d'absorption du matériau. La conception des capteurs et des systèmes de mesure de niveau utilisant des isotopes radioactifs peut varier en fonction des conditions techniques et des exigences.

Si un capteur de niveau fonctionnant sur le principe d'un dispositif de signalisation est nécessaire, sa conception est à peu près la même que sur la base du rayonnement ultrasonique (voir fig. 2.27). Lorsque le niveau change et que le matériau chevauche le faisceau, le capteur et le système de mesure sont déclenchés.

Si une mesure continue du niveau est nécessaire, d'autres types de capteurs sont utilisés. Par exemple, lorsque plusieurs émetteurs sont placés sur la paroi du réservoir, leurs faisceaux sont dirigés vers le récepteur situé de l'autre côté. Lorsque le niveau du matériau change, une partie des faisceaux se chevauchent et l'intensité du rayonnement atteignant le récepteur change.

Les avantages de la méthode de mesure du niveau considérée sont : l'absence de contacts, la possibilité d'effectuer des mesures dans des conditions particulièrement difficiles, la fiabilité opérationnelle.

Autres méthodes et capteurs pour la mesure du niveau. Mesure du niveau à l'aide de capteurs de température - thermocouples, thermistances.

Cette méthode de mesure est possible pour les matériaux liquides qui ne sont pas agressifs. Le principe de la mesure est basé sur la différence entre la température du matériau dans le réservoir et la température extérieure. La conception de ces capteurs de mesure dépend des exigences et des conditions de mesure.

Mesures à l'aide de dynamomètres. Il s'agit essentiellement de peser le réservoir et le matériau qu'il contient. Cette méthode convient pour mesurer le niveau de remplissage des matériaux en vrac et des matériaux agressifs. Les systèmes de mesure peuvent être conçus de différentes manières et sont développés en fonction des exigences techniques.

La mesure du niveau de remplissage peut également être effectuée à l'aide d'interrupteurs de fin de course dotés d'éléments de détection vibrants, etc. Il existe des capteurs de niveau basés sur la méthode interférométrique.

Méthodes mécaniques de mesure du niveau de remplissage.
Mesure du niveau de remplissage du liquide à l'aide d'un flotteur. Le principe physique de la mesure peut être expliqué à l'aide de la figure 2.28. Trois forces agissent sur le flotteur - le poids P , la force de poussée (force d'Archimède) F_a et la force de réaction du système de transmission des données F_r . L'ampleur des forces dépend principalement de la densité de l'air, de la densité du liquide et du type de système de communication entre le flotteur et l'appareil de mesure. À l'état d'équilibre, la somme de ces forces est égale à 0. Lorsque le niveau de liquide change, l'équilibre des forces est rompu et le flotteur se déplace vers le haut ou vers le bas. Le déplacement détermine la hauteur du liquide par rapport à la position initiale.

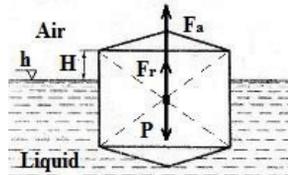


Fig. 2.28. Méthode de mesure du niveau de liquide par flotteur

Les flotteurs utilisés dans les capteurs sont principalement des corps sphériques ou sphéro-cylindriques creux, dont la densité est inférieure à celle du liquide, de sorte qu'ils peuvent flotter à sa surface. La modification de la densité du liquide ou des conditions de frottement dans le système de transmission du capteur entraîne une distorsion du résultat de la mesure. Cet

effet est d'autant moins prononcé en ce qui concerne la hauteur de levage que le flotteur du capteur est plat.

Dans le cas le plus simple, le flotteur du capteur est attaché à un câble ou à une chaîne qui passe sur un rouleau ou une roue dentée. Dans ce cas, la valeur mesurée est transmise mécaniquement. Pour assurer un fonctionnement continu du capteur, un contrepoids est fixé à l'autre extrémité du câble ou de la chaîne.

Dans cette méthode de mesure du niveau de liquide, l'angle de rotation du rouleau correspond à la variation du niveau de liquide. L'axe du rouleau de guidage peut être relié au curseur du potentiomètre du capteur afin de réaliser la transmission électrique de la valeur mesurée.

Il est assez simple de transmettre mécaniquement les données de niveau dans les réservoirs ouverts au moyen d'un système de câble ou, dans les réservoirs fermés, au moyen d'un presse-étoupe si les distances de transmission des données sont courtes.

Cependant, dans la plupart des cas, que ce soit dans des réservoirs ouverts ou fermés, des systèmes de transmission de données électriques sont utilisés dans les capteurs de niveau, en particulier si le résultat de la mesure est transmis à un dispositif de calcul.

Un exemple de capteur de niveau à flotteur est un capteur de niveau de carburant automobile (fig. 2.29). Dans ce cas, la méthode dite potentiométrique de transfert d'informations sur le niveau de liquide est utilisée (capteur de niveau potentiométrique). Le flotteur 1 est relié mécaniquement au rhéostat 2. Le flotteur, qui se déplace en fonction du niveau de liquide, déplace mécaniquement la glissière du potentiomètre (rhéostat) 2. La résistance électrique de sortie du potentiomètre (rhéostat) change donc, ce qui est traité et transmis par le capteur à l'indicateur de niveau de carburant approprié.

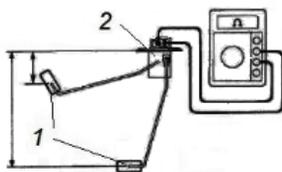


Fig. 2.29. Schéma de fonctionnement d'un capteur de niveau de carburant automobile.

Les avantages des capteurs potentiométriques de niveau de carburant sont la simplicité du dispositif et son faible coût. L'inconvénient est l'usure des contacts électriques mobiles du capteur. Cela est particulièrement vrai pour les véhicules qui utilisent des carburants agressifs tels que l'éthanol, le méthanol et le biodiesel. Dans ces conditions, un capteur de niveau de carburant sans contact utilisant l'interaction d'éléments magnétiques est utilisé.

2.23. Mesure de la vitesse. Tachymètres

Les transducteurs de ce type sont utilisés pour mesurer la vitesse linéaire ou angulaire. Les compteurs de vitesse angulaire sont généralement des dispositifs électromagnétiques et sont appelés tachymètres. Les tachymètres de type électronique-optique sont appelés stroboscopes. La vitesse linéaire est généralement déterminée indirectement en convertissant la vitesse linéaire de la rotation du volant ou de l'engrenage. La vitesse angulaire est alors mesurée à l'aide d'un codeur angulaire (tachymètre). La détermination directe de la vitesse linéaire est assurée par des transducteurs électromagnétiques, des transducteurs radar à micro-ondes Doppler sans contact, etc.

Tachymètres à impulsions. La méthode de conversion la plus courante est celle dans laquelle la bobine réceptrice de conception connue permet de déterminer la vitesse de rotation de l'arbre. En règle générale, un tel arbre est constitué d'encoches ou de protubérances, formant ainsi une roue dentée (fig. 2.30). Lorsque la saillie ou l'encoche passe à travers la bobine, la tension du courant de sortie change. Le calcul de la variation de la tension de sortie sur un certain intervalle de temps donne la valeur de la vitesse angulaire.

Dans les tachymètres à impulsions, il est possible d'utiliser, par exemple, l'effet Hall, les courants de Foucault inductifs, les phénomènes optiques (dans les transducteurs sans contact), mais le principe électromagnétique est le plus courant dans les tachymètres.

Le rotor ferromagnétique avec un élément sensible est fabriqué ici sous la forme d'un aimant permanent ou d'une bobine. L'aimant crée un champ magnétique autour de l'élément sensible. Lorsque la dent du rotor traverse le champ, le flux magnétique change et une force électromotrice est induite dans la bobine du tachymètre. L'avantage de ce principe de conversion est que le signal de sortie dépend de la configuration des dents

du rotor. Certains types connus d'impulsions de sortie pour différentes formes de dents de rotor de tachymètre sont illustrés à la figure 2.30.

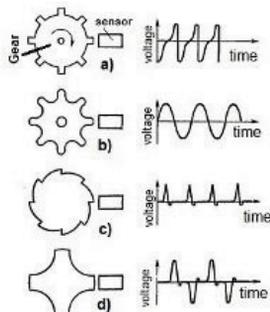


Fig. 2.30. Dépendance du signal de sortie du tachymètre à impulsions électromagnétiques par rapport à la configuration des dents du rotor : a-dents rugueuses, b-dents du tachymètre à rotor usinées avec précision, c- et d-formes spéciales des dents.

Générateurs de tachymètre. Lorsque la mesure de la vitesse concerne un oscillateur particulier, la vitesse angulaire peut être évaluée à partir de l'amplitude ou de la fréquence de sa tension de sortie. Les générateurs utilisés à cette fin sont appelés tachymètres.

Il convient de choisir, pour le transducteur de mesure, une énergie aussi faible que celle du corps mobile afin d'éliminer l'influence de la génératrice tachymétrique sur la vitesse angulaire de l'arbre.

Stroboscopes. Les stroboscopes sont des tachymètres électro-optiques d'un type particulier dans lesquels l'arbre en rotation est éclairé par des flashes de lumière. La vitesse des éclairs est réglée manuellement tant que l'image de l'arbre est immobile. Cela se produit lorsque chaque éclair correspond à un tour de l'arbre du tachymètre.

Bibliographie

1. Klokova N.P. *Tenzorezistory* [Jauges de contrainte]. - M.Mashinostroenie, 1990.-224p.

2. Daychik M.L., Prigorovskiy N.I., Khurshudov G.Kh. *Metody i sredstva naturnoy tenzometrii. Spravochnik* [Méthodes et moyens de mesure de la déformation à l'échelle réelle. Répertoire] M. Mashinostroenie, 1989.-240p.

3. Vaganov V. I. *Integral'nye tenzopreobrazovateli* [Jauges de contraintes intégrales]. -M. : Energoatomizdat, 1983. - 136 p.
4. Gridchin V.M., Lyubimsky V.M. *P'ezosoprotivlenie v plenkakh polikristallicheskogo kremniya p-tipa* [Piézorésistance dans les films de silicium polycristallin de type p]. *FTP*, 2004, v.38, №.8, 38-46p.
5. Klokova N.P. *Tenzorezistory* [Jauges de contrainte]. *Datchiki i sistemy* [Capteurs et systèmes] 2004, №3, p.10-12.
6. Nikolay Gorbachuk, Mikhail Larionov, Aleksey Firsov, Nikolay Shatil. *Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range* (Capteurs à semi-conducteurs pour une large gamme de températures). *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4
7. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Issledovanie nekotorykh elektrofizicheskikh svoystv plenok n-Si, legirovannykh ionnoy implantatsiy* [Étude de certaines propriétés électrophysiques des films n-Si dopés par implantation ionique]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya*, 2006, №4, p.104-106
8. Druzhinin A.A., Mar'yamova I.I., Kubrakov A.P., Pavlovskiy I.V. *Tenzorezistory dlya nizkikh temperatur na osnove nitevidnykh kristallov kremniya* [Jauges de contrainte pour basses températures basées sur des trichites de silicium]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2008, №4, s. 26-30.
9. Terston R. *Primenenie poluprovodnikovyykh preobrazovateley dlya izmereniya deformatsiy, uskoreniy i smeshcheniy* [Application des transducteurs à semi-conducteurs pour mesurer les déformations, les accélérations et les déplacements]. -V kn. : *Fizicheskaya akustika/ Pod red. U. Mezona, t.1, chast' B -Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy. Per. s angl.* - M. : Mir, 1967, p.187-209.
10. Mykola Gorbachuk. *MATÉRIAUX ÉLECTROTECHNIQUES. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Royaume-Uni, 2024, 112p. ISBN : 978-620-3-46212-8.*
11. Zeeger K. *Fizika poluprovodnikov* [Physique des semi-conducteurs]. *Per. s angl. pod red. Yu.K. Pozhely.* -M. : Mir, 1977, p. 615.
12. Smith C.S. Piezoresistance effect in germanium and silicon. - *Phys. Rev.* 1954, v. 94, 1, p. 42-49.
13. Tufte O.N., Stelzer E.L. Piezoresistive properties of silicon diffused lauers. - *J. Appl. Phys.*, 1963, v. 34, 9, p. 313-318.

14. Brevet RF 2043671. *Poluprovodnikovyy tenzorezistor* [Jauge de contrainte à semi-conducteur]. *Avt. Gorbachuk N.T. / B.I. 1995, №25.*

15. A.B.Renskiy et etc. *Tenzometrirovaniye stroitel'nykh konstruktsiy i materialov* [Mesure de la déformation des structures de construction et des matériaux]. M.- Stroyizdat, 1977, 239p.

16. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Piezo-Hall effect in p-germanium. *Phys. Stat. Sol.(c) 100. 1980, p.309.*

17. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. On determining the deformation potential constants of semiconductors of the p-germanium type from the temperature dependence of the piezoresistance. *FTP, vol. 15, v. 14, p. 649, 1981.*

18. Gorbachuk N.T., Shvarts Yu.M. *Vliyaniye deformatsii na velichinu magnitosoprotivleniya v ob "emnom p-Ge i plenkakh p-Ge na arsenide galliya* [Effet de la déformation sur l'ampleur de la magnétorésistance dans les films de p-Ge en vrac et de p-Ge sur l'arséniure de gallium]. *OPT, 1984, №6, s.88.*

19. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *Poluprovodnikovyy termotenzodatchik* [Jauge de contrainte thermique à semi-conducteur]. *PSU, 1984, n° 9, p. 21.*

20. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *P'ezogal'vanomagnitnye svoystva plenok germaniya na arsenide galliya i perspektivy ispol'zovaniya ikh v kachestve tenzorezistorov* [Propriétés piézogalvanomagnétiques des films de germanium sur l'arséniure de gallium et perspectives de leur utilisation comme jauges de contrainte]. *UFZh, 1984, n° 12, p. 1850.*

21. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *Sposob opredeleniya temperatury i deformiruyushhego usiliya.* [Méthode de détermination de la température et de la force de déformation]. *A.s. No. 932282, 05/30/82 Bulletin. No. 20.*

22. Gorbachuk N.T., Sakidon P.A., Thorik Yu.A., Shvarts Yu.M. *Poluprovodnikovyy tenzorezistor* [jauge de contrainte à semi-conducteur]. *A.s. No. 11 16305 1984.*

23. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Transducteurs de mesure basés sur GaAs, polysilicium et germanium dispersé et perspectives d'utilisation]. *Perspektivnyye materialy, 2004, N 5, p.93-97.*

24. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovatelye temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [L'influence de l'irradiation neutronique sur les caractéristiques des transducteurs de mesure semi-conducteurs de la température, de la déformation et du champ magnétique]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.

25. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Répertoire "Mesures dans l'industrie"] 1-3 volumes. M. : *Metallurgiya*, 1990.

26. Kiknadze G.I., Plesh A.G., Safronov A.N., Gorbachuk N.T. et autres. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa okhlazhdeniya model'noy sektsii i eksperimental'nogo bloka sverkhprovodyashchey obmotki toroidal'nogo polya ustanovki T-15 na komplekse SIMS* [Résultats d'une étude expérimentale du processus de refroidissement de la section modèle et du bloc expérimental de l'enroulement supraconducteur du champ toroïdal de l'installation T-15 sur le complexe SIMS]. *Preprint IAE-4320/10*, M., 1986, 24 p.

27. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Transducteurs semi-conducteurs de mesure de la déformation, de la température et du champ magnétique destinés à être utilisés dans des conditions d'exposition aux rayonnements, dans une large gamme de températures et de champs magnétiques]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", *Seriya : Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.

21. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki : Navchal'niy posibnik* [Cours général de physique : guide d'étude], T. 1-3. - K. : *Tekhnika*, 2001.

Chapitre 3. Champs magnétiques. Transducteurs, capteurs, mesures

3.1. Capteurs à effet Hall. Principe de fonctionnement, description, dispositif

Un capteur de Hall est un dispositif qui mesure la magnitude d'un champ magnétique en utilisant l'effet Hall. Le capteur de Hall est constitué d'une plaque rectangulaire semi-conductrice à laquelle sont connectés quatre fils électriques. L'élément sensible d'un capteur de Hall est représenté schématiquement à la figure 3.1.

Effet Hall. L'échantillon se présente sous la forme d'une plaque rectangulaire de longueur l , de largeur d et d'épaisseur b (voir fig.3.1).

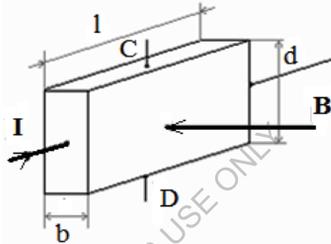


Fig. 3.1 Effet Hall dans une plaque avec un courant longitudinal I et un champ magnétique B perpendiculaire au plan de la plaque.

Si un courant électrique I passe le long de l'échantillon et qu'un champ magnétique B est créé perpendiculairement au plan de la plaque, un champ électrique, appelé champ de Hall, apparaît sur les plans latéraux de la plaque dans la direction CD . Dans la pratique, le champ de Hall est généralement caractérisé par une différence de potentiel mesurée entre les points symétriques C et D de la surface latérale de l'échantillon. Cette différence de potentiel est appelée différence de potentiel de Hall U_{hal} ou EMF de Hall ε_{hal} .

Dans la théorie classique de la conduction, l'effet Hall s'explique par le fait que, dans un champ magnétique, la force de Lorentz agit sur des charges électriques en mouvement, dont l'amplitude et la direction sont déterminées par l'équation vectorielle :

$$F = e [V\mathbf{B}] \quad (3.1),$$

où \mathbf{B} est le vecteur de l'induction du champ magnétique, \mathbf{V} est le vecteur de la vitesse de la charge, e est la charge des porteurs de courant en tenant compte du signe.

En raison de cette force dans la direction CD, il y a une différence dans la concentration des porteurs de courant et, par conséquent, un champ électrique. Dans notre cas, \mathbf{V} est perpendiculaire à \mathbf{B} et, sur la base des lois connues de l'électrophysique, le champ électrique de Hall est défini :

$$E_{hal} = F/e = VB \quad (3.2),$$

Le champ est lié à la force électromotrice de Hall ε_{hal} , ou à la différence de potentiel de Hall U_{hal} , comme suit :

$$\varepsilon_{hal} \approx U_{hal} = E_{hal} d = VBd \quad (3.3).$$

La force du courant qui traverse une unité de surface de l'échantillon est égale à la densité de courant :

$$J = I/S = enV \quad (3.4),$$

où n est le nombre de porteurs de courant dans une unité de volume de l'échantillon (concentration de porteurs de courant).

D'où la force actuelle :

$$I = jbd = enVbd \quad (3.5).$$

Ce qui permet d'écrire :

$$V = I / enbd \quad (3.6).$$

D'où :

$$\varepsilon_{hal} = IB / enb \quad (3.7).$$

Ainsi, la FEM de Hall (ou U_{hal}) est proportionnelle à l'intensité du courant, à l'induction du champ magnétique, et inversement proportionnelle à l'épaisseur de l'échantillon et à la concentration des porteurs de courant qui s'y trouvent.

Il est souvent écrit :

$$\varepsilon_{hal} = R \cdot IB/b \quad (3.8).$$

Le coefficient $R = 1/ne$ est la constante de Hall qui, par exemple, pour les semi-conducteurs, a une valeur comprise entre 10 et 10^5 cm/Kl.³

3.2. Principe de fonctionnement d'un capteur à effet Hall

La figure 3.2 montre une forme typique de l'élément sensible d'un capteur à effet Hall. Ce type d'élément sensible peut être fabriqué soit à partir d'un matériau en vrac, soit à partir de matériaux sous forme de film.

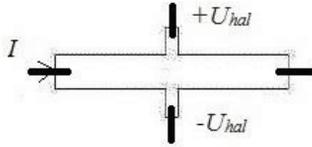


Fig. 3.2 Représentation schématique de la forme de l'élément sensible du capteur à effet Hall.

La figure 3.3 montre la dépendance caractéristique de U_{hal} (différence de potentiel dans la direction des contacts CD - fig. 3.1) par rapport au champ magnétique à courant d'alimentation constant.

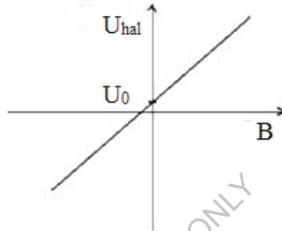


Fig. 3.3. Dépendance de la tension électrique sur les contacts à effet Hall U_{hal} en fonction de la valeur de l'induction du champ magnétique B

En l'absence de champ magnétique, la FEM de Hall (différence de potentiel) devrait être égale à zéro. Cependant, en raison de divers phénomènes secondaires (par exemple, une disposition insuffisamment symétrique des électrodes de mesure du capteur), l'appareil de mesure peut afficher une certaine différence de potentiel U_o à la sortie du capteur de Hall, même en l'absence de champ magnétique. Afin d'éliminer les erreurs associées, la valeur de U_o doit être soustraite de la différence de potentiel mesurée dans le champ magnétique.

L'une des principales caractéristiques d'un capteur à effet Hall est sa sensibilité :

$$\gamma = \Delta U_{hal} / \Delta B \quad (3.9).$$

La sensibilité du capteur à effet Hall, spécifiée dans sa fiche technique, est utilisée pour déterminer l'ampleur de l'induction du champ magnétique mesuré :

$$B = U_{hal} / \gamma \quad (3.10).$$

Notez que le capteur à effet Hall mesure la composante perpendiculaire (au plan du capteur) du vecteur de champ magnétique. Par

conséquent, si la valeur maximale du champ magnétique doit être mesurée, le capteur à effet Hall doit être orienté en conséquence.

Les semi-conducteurs InP, InSb, GaAs, Ge, Si sont le plus souvent utilisés pour la fabrication des capteurs de Hall. L'utilisation de semi-conducteurs est due au fait qu'en raison de la grande mobilité des porteurs de courant, ils ont une grande sensibilité à l'influence du champ magnétique. L'élément sensible du capteur de Hall peut être fabriqué soit à partir d'un matériau en vrac, soit à partir de films semi-conducteurs sur des substrats isolants. Le capteur de Hall peut avoir une forme différente, ce qui affecte la linéarité de la dépendance du signal de sortie par rapport au champ magnétique, la sensibilité. Les dimensions des capteurs de Hall modernes ne dépassent pas 1x1x0,5 mm, les courants d'alimentation sont généralement de 1 à 100 mA (en fonction de la résistance d'entrée du capteur), la sensibilité peut atteindre 1000 mV/T et plus, la plage de température de fonctionnement s'étend de -270 °C à 200 °C. Outre la sensibilité, l'un des principaux paramètres des capteurs à effet Hall est la dépendance de la sensibilité par rapport à la température, la résistance d'entrée, le signal de sortie initial U_0 . Dans les bons capteurs à effet Hall, ces paramètres doivent être insignifiants.

3.3. Capteurs à effet Hall modernes

Les capteurs à effet Hall sont produits par de nombreuses entreprises dans le monde, par exemple Honeywell. Les capteurs DHC-0.5A sont connus en Russie.

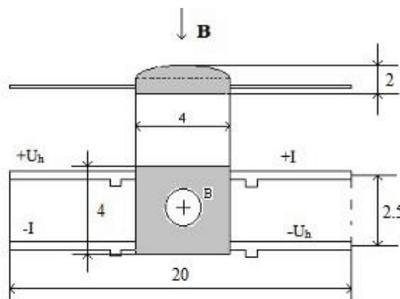


Fig. 3.4. Représentation schématique d'un des capteurs DHC-0.5A

Le capteur à effet Hall DHC-0.5A est conçu pour mesurer la valeur de l'induction magnétique sur la base de la conversion de l'induction

magnétique en tension de sortie. Le capteur est fabriqué à partir d'une structure topologique planaire formée à la surface d'un cristal de silicium.

Principales caractéristiques techniques :

Le courant de commande nominal est de 3 mA ;

Tension de Hall pour une induction magnétique de 0,25 T et un courant de commande nominal - 70 mV (sensibilité $\gamma = 280$ mV/T) ;

Tension résiduelle au courant de commande nominal - pas plus de 7 mV

Résistance d'entrée - 1,8 ... 3 kOhm (résistance entre les broches I) ;

Résistance de sortie - pas plus de 3 kOhm (résistance entre les broches U_h) ;

Poids - pas plus de 2,5 g.

- I_h et + I_h - broches pour la connexion de la source de courant de commande (broches de courant) ;

- U_h et + U_h sont des broches de signal de sortie (broches de Hall) ; la résistance entre les broches de courant est plus faible qu'entre les broches de Hall.

Le capteur DHC-0.5A est sensible à la fois à la direction de l'induction magnétique et à la polarité du courant de commande.

Capteurs de champ magnétique (capteurs à effet Hall) basés sur des films de GaAs. Les caractéristiques techniques des capteurs de champ magnétique basés sur l'effet Hall (capteurs de Hall) dépendent à la fois du matériau utilisé et des dimensions géométriques et de la forme de l'élément sensible. Les matériaux les plus couramment utilisés pour les éléments sensibles des capteurs de Hall sont l'InSb et le GaAs, dont les principaux avantages sont la grande mobilité des porteurs de charge, ce qui se traduit par une grande sensibilité des capteurs.

Les résultats du développement et de l'étude expérimentale des caractéristiques métrologiques des transducteurs de champ magnétique (capteurs) et l'effet de l'irradiation neutronique sur les principaux paramètres sont présentés ci-dessous.

Des films de GaAs sur de l'arséniure de gallium semi-isolant ont été utilisés pour créer des capteurs. L'objectif du développement était de créer des capteurs présentant un faible niveau de bruit, une grande linéarité de la dépendance du signal utile par rapport au champ magnétique, une faible dépendance des paramètres par rapport à la température, ainsi qu'une

miniaturisation de la zone de travail. La figure 3.2 montre un schéma approximatif de l'élément sensible du capteur.

L'épaisseur des films de CaAs variait entre 0,1 et 5 μm , et la concentration de porteurs de courant $\cong 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. La taille de la zone de travail était de $100 \times 100 \mu\text{m}$. En fonction de l'épaisseur des films et de la concentration des porteurs de courant, les résistances électriques d'entrée et de sortie des capteurs variaient dans une fourchette de 15 - 1500 ohms. Les courants d'alimentation étaient compris entre 3 et 150 mA. Le signal de sortie initial U_o était compris entre 0,01 et 5 mV, la dépendance à la température de U_o était inférieure à 0,1 %/K, $R \sim 0,08 \text{ \%}/\text{K}$, la sensibilité au champ magnétique était comprise entre 80 et 500 mV/T. La linéarité du signal de sortie dans un champ allant jusqu'à 2 Tesla n'est pas inférieure à 0,1 %.

Les capteurs peuvent fonctionner dans une plage de température allant de 4,2 à 400 K.

Il est connu, par exemple, que la résistance des dispositifs semi-conducteurs à l'irradiation dépend du niveau de dopage, de la défektivité du matériau semi-conducteur, etc. Les propriétés électrophysiques des semi-conducteurs sont surtout affectées par l'irradiation neutronique. L'irradiation neutronique a le plus grand impact sur les propriétés électrophysiques des semi-conducteurs. Le mécanisme d'influence réside principalement dans la formation de défauts structurels et la transformation radioactive des atomes. L'influence de l'irradiation s'affaiblit avec l'augmentation du niveau de dopage.

Les caractéristiques des capteurs ont été mesurées à une température de 300 K avant et après irradiation avec des flux de neutrons Φ de $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ à $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. La température pendant les mesures a été stabilisée avec une précision de 0,1 K. L'énergie des neutrons était de 1 MeV, l'intensité du flux était de $(2-4) \cdot 10^8 \text{ fl/s}$.

La figure 3.5 montre la dépendance de la variation relative de la résistance d'entrée des transducteurs de mesure du champ magnétique (capteurs à effet Hall) par rapport à la valeur du flux de neutrons Φ . La résistance d'entrée des capteurs est de 1,1 kOhm, le signal de sortie initial ne dépasse pas 4,5 mV, la sensibilité est de 350 mV/T.

Les changements de résistance commencent à des flux de $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ et s'élèvent à 15-20 %, et à $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ la résistance augmente de 3,3 fois. Dans le même temps, le signal de sortie initial à une tension d'alimentation constante de 4,5 V n'a pas changé de plus de 15 %, ce qui équivaut à l'effet

d'un champ magnétique allant jusqu'à 1 mT. À tension d'alimentation constante, la sensibilité après irradiation a diminué d'environ 1,4 fois. Après irradiation avec des flux de $1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, la résistance des capteurs augmente jusqu'à l'infini.

Ainsi, les capteurs de champ magnétique sont utilisables dans une large gamme de températures, la sensibilité et le signal de sortie initial dépendent peu de la température (moins de 0,1 %). La non-linéarité du signal de sortie ne dépasse pas 0,1% dans le champ jusqu'à 2T, la sensibilité peut atteindre 500 mV/T.

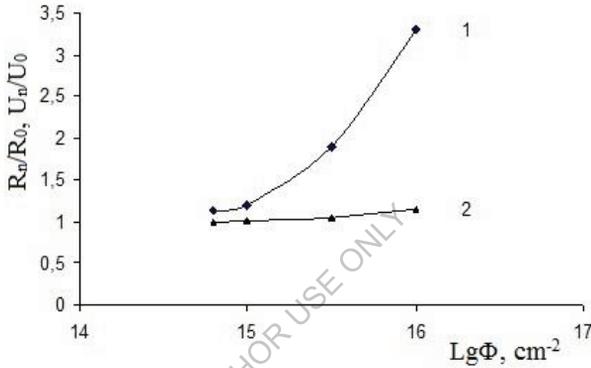


Fig. 3.5. Dépendance de la variation relative de la résistance d'entrée R_n / R_0 (1) (où R_n - valeur de la résistance après irradiation, R_0 - résistance initiale) et du signal de sortie initial U / U_{n0} (2) (où U_n - valeur du signal de sortie après irradiation, U_0 - signal de sortie initial) du transducteur de mesure du champ magnétique sur la valeur de l'irradiation du flux de neutrons.

Les études ont montré qu'à 300 K, les transducteurs développés sont opérationnels jusqu'à des niveaux d'irradiation neutronique de 10^{15} cm^{-2} . Les changements qui en résultent dans les caractéristiques des transducteurs jusqu'à des niveaux de $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ peuvent être expliqués dans une certaine mesure, étant donné qu'une bonne répétabilité des résultats a été observée. Les transducteurs peuvent être utilisés à la fois pour le diagnostic des dispositifs techniques de l'ingénierie de l'énergie nucléaire, de l'équipement cryogénique et, en raison de leur sensibilité élevée, en écologie pour le contrôle des paramètres environnementaux, tels que les champs électromagnétiques, etc.

Quelques caractéristiques des capteurs expérimentaux de champ magnétique (capteurs de Hall) basés sur des films de GaAs pour des températures cryogéniques et des plages climatiques :

- matériau - GaAs
- plage de température de fonctionnement 4,2 - 400 K
- courant d'alimentation 1 - 100 mA
- sensibilité 60 - 500 mV/T
- signal initial compris entre 0,010 et 5 mV
- zone active du capteur 100x100 μm
- Dimensions totales - au moins 1x1x0,4 mm

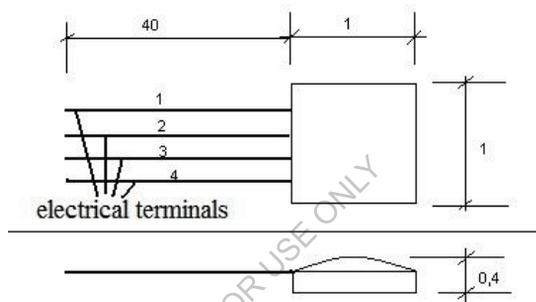


Fig. 3.6 : Représentation schématique du capteur à effet Hall. Sorties : 1,4 - tension d'alimentation (courant) ; 2,3 - tension de sortie (U_h)

3.4. Une série de générateurs de force électromotrice à effet Hall de précision (capteurs à effet Hall)

Les résultats de la recherche et les caractéristiques des capteurs à effet Hall de haute précision basés sur l'InSb et le GaAs sont présentés ici (Zhelamsky M.V., Gorbachuk N.T. et al.). Les mesures magnétiques sont l'une des principales dans le développement d'équipements électrophysiques utilisant des champs magnétiques. La petite taille des générateurs de f.é.m. de Hall (HG) est un avantage indéniable par rapport aux autres dispositifs magnétométriques, ce qui détermine leur large application pour les mesures magnétiques en électrophysique.

Lors de la mesure de champs intenses, l'une des principales sources d'erreur est l'influence de la température sur le signal de sortie HG, qui est insignifiante par rapport à un signal de sortie relativement important. Par exemple, dans un champ de 2 Tesla, le signal de sortie HG peut atteindre 200

mV, alors qu'un changement de température de 1°C modifie le signal de sortie de quelques microvolts. En outre, à ce niveau de signal, l'influence de la température s'ajoute au signal principal et peut être compensée méthodiquement, en particulier dans la région cryogénique, où l'hélium liquide est un stabilisateur de température idéal et où les champs sont suffisamment élevés. Lors de la mesure de champs intenses, une attention particulière doit être accordée à la minimisation des composantes planaires et de gradient du signal de sortie du HG.

Dans les champs magnétiques faibles, au niveau des petits signaux de sortie HG, d'autres sources d'erreur, telles que les effets thermoélectriques (Seebeck, Peltier), les effets de champ propre, les propriétés et l'homogénéité du matériau appliqué, sont plus prononcées. C'est pourquoi, par exemple, des mesures spéciales sont nécessaires pour mesurer la distribution du champ magnétique dans la zone centrale d'un aimant quadripolaire.

Dans les deux cas, la minimisation de l'erreur, l'étalonnage et la directionnalité sont également importants.

L'objectif de ces travaux était à la fois d'obtenir la sensibilité absolue des générateurs à effet Hall dans la mesure des champs magnétiques faibles et de maximiser la précision et la stabilité de la mesure des champs forts.

Les résultats du développement de dispositifs magnétométriques basés sur des générateurs à effet Hall pour mesurer des champs magnétiques faibles au niveau du champ terrestre sont décrits, y compris l'optimisation de la conception, de la technologie de fabrication et des propriétés électrophysiques des générateurs à effet Hall, ainsi qu'un ensemble de circuits, de conceptions et de mesures méthodologiques visant à atteindre une grande précision et une sensibilité absolue des mesures.

Les capteurs de champ magnétique à trois composantes développés sont également décrits.

Les principales propriétés et caractéristiques des dispositifs développés sont analysées.

Deux matériaux semi-conducteurs ont été utilisés : l'arséniure de gallium dopé (GaAs) et l'antimoniure d'indium (InSb). Le premier est utilisé pour obtenir une stabilité de température et une linéarité maximales, le second pour une sensibilité maximale des mesures.

Pour améliorer la précision de la mesure, une forme optimale de cristal en croix est choisie, comme le montre la figure 3.7.



Fig. 3.7. Cristal (puce) de l'oscillateur de Hall.

Les dimensions de la zone active du générateur sont de $100 \times 100 \mu\text{m}$ et peuvent être réduites si nécessaire. La détermination de la position centrale de la zone de travail est effectuée sur un équipement spécial avec une précision qui n'est pas inférieure à $\pm 0,5 \mu\text{m}$, la détermination de la position angulaire de la normale au plan HG - avec une précision qui n'est pas inférieure à $\pm 0,1^\circ$.

Une large plage de variation de la résistance d'entrée (5-1500 ohms) permet de sélectionner la valeur nominale du courant entre 1 et 200 mA avec une sensibilité magnétique inchangée afin d'obtenir la résolution et la vitesse requises pour les mesures du champ magnétique.

La valeur du décalage HG initial déterminée par la technologie est de $-500 \mu\text{V}$. La réduction du décalage à la valeur $< 100 \mu\text{V}$ est assurée par un ajustement supplémentaire. La variation des paramètres dans un lot ne dépasse pas 10 %. Le coefficient de température de la tension d'offset initiale est déterminé par la conception du HG et peut être amené à une valeur inférieure à $1-2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

La thermostabilisation active de l'HG assure la stabilité des résultats à $\pm 0,05 \text{Gs}$ pendant 8 heures de fonctionnement. La plage de température de fonctionnement est de $4,2-450 \text{K}$.

Pour les HG de précision, la sensibilité magnétique au courant d'alimentation nominal est de $8 \pm 2 \mu\text{V}/\text{Gs}$ pour GaAs et de $25 \pm 3 \mu\text{V}/\text{Gs}$ pour InSb. La sensibilité absolue élevée des mesures est assurée par la minimisation du bruit du HG et de l'équipement, les circuits adoptés et les mesures de conception, ainsi qu'un algorithme spécial.

Des assemblages thermostabilisés à trois composants ont été créés sur la base des HG décrits. Chaque assemblage se compose de trois HG à un composant assemblés sur les plans orthogonaux du cube de cuivre de support. Un thermomètre et un dispositif de chauffage sont montés sur les plans libres et utilisés pour stabiliser la température de l'assemblage. Le cube de support sur le circuit imprimé est recouvert d'une isolation thermique

externe et monté sur un support calorifuge. Les principaux paramètres des assemblages HG à trois composants sont indiqués dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Paramètres de base des assemblages HG à trois composants

Parameter	Value
Assembly size	Cube with a side of 7 mm
Accuracy of determining the spatial and angular coordinates of single-component GH	0.5 μm , 0.1 corner radius
Rated supply current	30 mA
Assembly stabilization accuracy in the range + - 60	No worse 0,05 °C
Absolute sensitivity with special equipment	<1 mGs
Assembly dimensions without equipment	20x20x15 mm

3.5. Estimation des mesures de champs magnétiques alternatifs dans l'environnement

De nombreux ouvrages sont consacrés aux problèmes de la mesure des champs magnétiques et des champs électromagnétiques alternatifs. En analysant la littérature, on peut dire que les méthodes les plus courantes utilisées pour mesurer les champs magnétiques sont basées sur le phénomène de l'induction électromagnétique et de l'effet Hall.

La méthode de mesure par induction est basée sur le phénomène de l'induction électromagnétique, qui consiste en ce que dans un circuit conducteur placé dans un champ magnétique, sous certaines conditions, une force électromotrice (EMF) apparaît, qui est déterminée par l'expression connue :

$$\varepsilon_i = -Nd\Phi/dt \quad (3.11),$$

où N est le nombre de tours dans le circuit, Φ est le flux magnétique pénétrant dans le circuit, t est le temps.

La méthode de l'induction peut être utilisée pour mesurer des champs magnétiques variables et constants.

Pour mesurer les champs magnétiques permanents, il est nécessaire de modifier un ou plusieurs paramètres de la bobine d'induction (circuit) directement au cours du temps : l'angle α entre la normale au plan du circuit et le vecteur d'induction magnétique, la surface du circuit S , la perméabilité magnétique relative du noyau μ_c , le coefficient de démagnétisation du noyau

k. La valeur de l'induction EMF pour ces conditions peut être déterminée par l'expression suivante

$$\varepsilon_i = -N \left(X \frac{dB}{dt} + B \frac{dX}{dt} \right) \quad (3.12),$$

où $X = S \cdot \mu \cdot \cos \alpha / [1 + N(\mu_c - 1)]$ est le paramètre généralisé de la bobine d'induction, dont les détails ne sont pas importants pour ce travail.

La précision de la mesure des champs magnétiques à l'aide d'un capteur à induction dépend à la fois des caractéristiques de conception du capteur lui-même et, dans une large mesure, du schéma de mesure et de l'équipement secondaire qui détermine l'ampleur du signal de sortie.

Il convient de noter que, dans la pratique, le signal mesuré n'a généralement pas une forme sinusoïdale correcte et se présente souvent sous la forme d'impulsions séparées, etc.

L'essence de la méthode de mesure à l'aide de transducteurs (capteurs) de Hall consiste en l'utilisation de l'effet Hall, qui consiste en l'apparition de la FEM ε_{hal} dans la direction perpendiculaire au courant I dans la plaque conductrice placée dans le champ magnétique B . Pour une valeur constante du courant dans la plaque, la valeur de la FEM est déterminée par l'expression :

$$\varepsilon_{hal} = A \cdot I \cdot B / n \cdot e \cdot d \quad (3.13),$$

où A est une constante variant de 1 à 2 en fonction des mécanismes de diffusion des porteurs de courant, n est la concentration des porteurs de courant dans le matériau de la plaque, e est la charge électronique, d est l'épaisseur de la plaque.

Les matériaux semi-conducteurs sont utilisés pour la fabrication des convertisseurs de Hall, car l'effet considéré y est de la plus haute importance. Récemment, des semi-conducteurs sous forme de films sur des substrats isolants ont été utilisés, ce qui simplifie la technologie de fabrication, permet la miniaturisation, etc.

Les transducteurs à effet Hall basés sur l'InSb et le GaAs ont la plus grande sensibilité. En outre, diverses méthodes technologiques sont utilisées pour accroître la sensibilité : conception intégrée, utilisation de concentrateurs ferromagnétiques, etc.

L'évaluation expérimentale des valeurs des champs magnétiques alternatifs dans l'environnement résultant du fonctionnement de divers équipements ménagers et industriels a été réalisée à l'aide d'une bobine d'induction fabriquée et, dans certains cas, d'un transducteur à effet Hall à base d'InSb.

Les mesures à l'aide de la bobine d'induction ont été effectuées après son étalonnage selon le schéma de connexion simplifié. Lors de l'étalonnage, la bobine a été placée dans un champ magnétique alternatif créé par un courant sinusoïdal I dans le conducteur. Un générateur de courant alternatif a été utilisé à cet effet. Le signal de sortie de la bobine a été mesuré à l'aide d'un voltmètre à tension alternative.

L'amplitude du champ magnétique à une certaine distance r du conducteur a été calculée sur la base de la loi de Bio-Savard-Laplace :

$$B = -N\mu\mu_0 I/2\pi r \quad (3.14),$$

où μ est la perméabilité magnétique relative du milieu, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Gn/m est la constante magnétique.

La distance du conducteur, l'intensité du courant et sa fréquence ont été modifiées pendant l'étalonnage. Les résultats ont ensuite été moyennés et tracés.

La figure 3.8 montre la dépendance de la force électromotrice résultante dans la bobine (tension U mesurée par un voltmètre) par rapport à la fréquence du champ magnétique alternatif (courant dans le conducteur). Le graphique montre le nouveau calcul de U en fonction du champ magnétique.

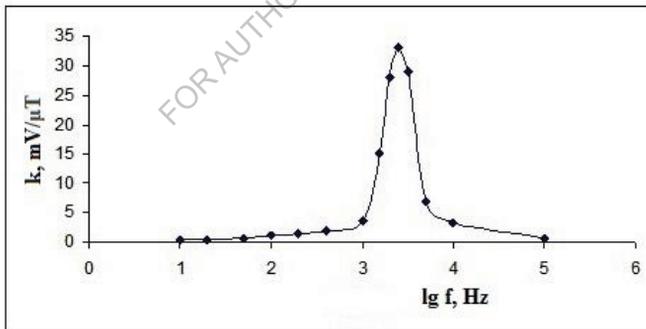


Fig. 3.8. Dépendance de la sensibilité $k = \Delta U / \Delta B$ de la bobine d'induction fabriquée en fonction de la fréquence du champ magnétique f .

Lors de l'application pratique ultérieure de la bobine, le signal de sortie et sa fréquence ont été mesurés. Le même voltmètre a été utilisé pour les graduations et les mesures pratiques, car ses caractéristiques techniques peuvent influencer les résultats obtenus. En fonction des données obtenues

et de la courbe d'étalonnage, la valeur du champ magnétique alternatif a été déterminée.

Un concentrateur ferromagnétique a été utilisé pour les mesures avec le transducteur de Hall à base d'InSb. En conséquence, la sensibilité était d'environ $1 \cdot 10^4$ mV/T et peut être augmentée en améliorant la conception. Les données obtenues avec les transducteurs de Hall correspondent aux mesures de la bobine d'induction avec une précision de 20 %.

Les valeurs déterminées des champs magnétiques alternatifs émis par divers appareils électriques sont résumées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Résultats des mesures des champs magnétiques de différentes sources de rayonnement

Object	Distance	Magnetic field value, μT
Supra TV	1.5 m from the screen	1-2
	3.5 m from the screen	0.03
TV Slavutich (big screen)	1.5 m from the side	5
	3 m from the screen	4
computer monitor	0,2 m from the side	50
high-voltage power line (110 kV)	0,1-0,2 m from the screen	3-5
in - off household appliances (iron, lamp)	70-100	2-5
	0.1-1.0	up to 2 (pulses)

Les normes sanitaires existantes pour les niveaux admissibles de champs magnétiques, tirées de diverses sources, sont des valeurs de 0,2-0,5 μ T. Il convient de noter que la littérature connue ne mentionne pas les fréquences des rayonnements, bien que, d'un point de vue physique, elles n'affectent pas les objets biologiques de la même manière.

Malgré l'approche plutôt simplifiée, les résultats obtenus concordent assez bien avec d'autres données bibliographiques connues. Cela nous permet de parler de la possibilité d'utiliser les méthodes décrites pour l'indication et l'évaluation des niveaux de rayonnement électromagnétique, la création d'indicateurs peu coûteux (domestiques) de rayonnement

électromagnétique, ainsi que la création d'appareils de mesure de haute précision basés sur des transducteurs de Hall.

3.6. Capteur Hall automobile. Capteur à effet Hall dans le système d'allumage

Actuellement, les capteurs à effet Hall sont largement utilisés dans l'industrie automobile. Ils servent à contrôler le mouvement et la rotation de divers composants de la voiture, les vibrations du moteur, le système d'allumage, etc.

Le plus connu est probablement le capteur à effet Hall automobile, utilisé pour contrôler et garantir le fonctionnement du système d'allumage de la voiture. Le schéma de ce dispositif est illustré à la figure 3.9.

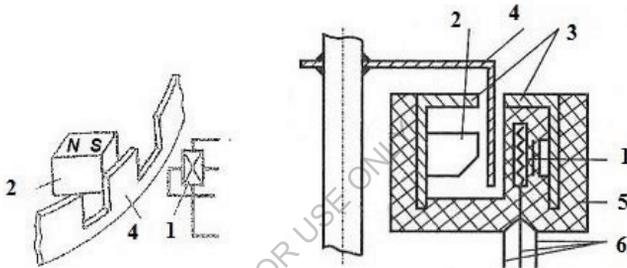


Fig. 3.9. Représentation schématique du dispositif du capteur de Hall automobile. 1 - élément sensible du capteur de Hall, d'où partent les fils de la puce de traitement du signal de sortie, 2 - aimant permanent, 3 - conducteurs magnétiques, 4 - pales du rotor, 5 - boîtier en plastique, 6 - fils du capteur.

Le capteur se compose d'un élément sensible 1 (capteur de Hall directement) et d'un microcontrôleur 1 intégré (microcircuit pour le traitement du signal de sortie du capteur de Hall). Par conséquent, le capteur automobile à effet Hall possède trois contacts 6 (bornes) pour la connexion au circuit électrique (circuit) du véhicule. Le capteur automobile à effet Hall pour le système d'allumage comporte également un aimant permanent 2, qui est séparé par un espace de l'élément sensible du capteur à effet Hall, et des fils magnétiques. Le champ magnétique de l'aimant permanent est capable d'induire un signal de sortie du capteur de Hall, et les pales métalliques 4 de l'arbre rotatif, en chevauchant (shuntant) le flux magnétique, conduiront à un changement correspondant (oscillation) du signal de sortie. En outre, le signal de sortie est connecté au système d'alimentation en étincelles d'allumage au moment souhaité de la position de l'arbre.

Comment vérifier le capteur à effet Hall ?

Il existe plusieurs façons de vérifier si le capteur de Hall de votre voiture fonctionne correctement. L'une des plus simples est la suivante. Connectez le capteur de Hall automobile conformément au schéma de la figure 3.10. Le capteur de Hall retiré peut être alimenté par une pile Krona (9 V). Pour mesurer le signal de sortie (tension) V , il est préférable d'utiliser un multimètre numérique compact. Si le flux magnétique traversant l'élément sensible du capteur de Hall change (par exemple, en faisant tourner l'arbre du rotor ou simplement en comblant l'espace avec une plaque métallique), le signal de sortie du capteur changera également, ce qui indiquera qu'il est opérationnel. Le signal de sortie peut varier en fonction du modèle de capteur, mais se situe généralement entre 0,5 et 1,0 V.

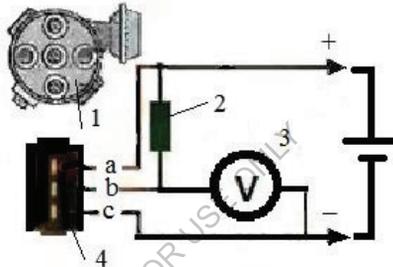


Fig. 3.10. Vérification du capteur à effet Hall. Chimie générale. 1 - capteur de distribution, 2 - résistance de 2 kOhm, 3 - voltmètre (multimètre numérique), 4 - connecteur du capteur de distribution (capteur de Hall).

3.7. Transducteurs magnétorésistifs. Effet magnétorésistif

La modification de la résistance au champ magnétique d'un conducteur (semi-conducteur) dans lequel circule un courant électrique est appelée effet magnétorésistif. L'augmentation de la résistance électrique sous l'action d'un champ magnétique se produit aussi bien dans le cas où le vecteur d'induction magnétique est perpendiculaire à la surface des plaques semi-conductrices (magnétorésistance transversale) que dans le cas où il est parallèle (magnétorésistance longitudinale). Toutefois, dans le second cas, la résistance change en général de manière insignifiante.

La variation de la résistance du semi-conducteur dans un champ magnétique B est proportionnelle au carré de la mobilité μ des porteurs de courant :

$$\Delta\rho/\rho = c \mu^2 \cdot B^2 \quad (3.15),$$

où c est le coefficient de proportionnalité lié à la diffusion des porteurs de charge.

Dans une plaque semi-conductrice placée dans un champ magnétique, une force de Lorentz proportionnelle au champ électrique de Hall agit sur les porteurs de charge en mouvement. Toutefois, le champ de Hall n'équilibre que les porteurs qui se déplacent à des vitesses moyennes. Dans les milieux lents, le champ de Hall est plus important, dans les milieux rapides, la force de Lorentz est plus importante. La trajectoire se courbe et la longueur effective du libre parcours diminue, ce qui entraîne une augmentation de la traînée. Il est évident que plus l'effet Hall est faible dans un semi-conducteur, plus la résistance est grande. Dans un semi-conducteur avec deux types de porteurs, le champ de Hall est plus faible, les lignes de courant ne sont donc pas parallèles aux faces, et l'effet de magnétorésistance est donc plus important.

Pour éliminer l'influence de l'effet Hall, il est possible d'utiliser des formes géométriques spéciales d'échantillons dans un semi-conducteur avec une prédominance d'un type de porteurs. L'exemple le plus évident de l'influence de la structure sur l'effet de magnétorésistance est le disque de Corbino, qui est une plaque semi-conductrice avec un arrangement concentrique de contacts : un au centre et le second sur la circonférence à égale distance du premier. Si une tension est appliquée aux électrodes d'un tel disque, les trajectoires des électrons ressemblent à des rayons radiaux partant du centre. Lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique perpendiculaire au plan de la plaque, les porteurs sont déviés le long de la surface, les lignes de courant sont allongées, mais il n'y a pas d'accumulation de charges et la force électromotrice de Hall n'apparaît pas. Dans cette structure, l'effet de magnétorésistance maximal est observé, mais en raison de difficultés techniques, l'application pratique du disque de Corbino est très difficile.

3.8. Modèles de magnétorésistances

L'effet d'augmentation de la magnétorésistance dû à la géométrie de la résistance peut également être obtenu dans une plaquette semi-conductrice dont la longueur L est beaucoup plus petite que la largeur W . Lorsque la plaque est soumise à un champ magnétique dont la direction est perpendiculaire au plan de la plaque, la tension de Hall est atténuée en raison de l'effet de shunt des électrodes de courant. Géométriquement, l'effet de

magnétorésistance dans ce cas est d'autant plus fort que le rapport L/l est faible. Pour augmenter encore l'effet, des résistances avec un petit rapport L/W sont connectées.

Le matériau de base de la magnétorésistance est généralement l'antimoniure d'indium, qui présente une mobilité élevée des porteurs de courant, auquel on ajoute 1,8 % de NiSb. Après fusion puis refroidissement, l'antimoniure de nickel cristallise en antimoniure d'indium sous forme d'aiguilles d'une épaisseur de 1 μm et d'une longueur d'environ 50 μm , disposées parallèlement les unes aux autres et perpendiculairement au sens du courant. La conductivité de l'aiguille de NiSb est d'environ $10^4 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, alors que celle de l'InSb est inférieure de deux ordres de grandeur.

Ainsi, les aiguilles jouent le rôle de bonnes électrodes conductrices divisant la masse du semi-conducteur en régions séparées avec un faible rapport L/L . Cela conduit à une forte suppression du champ Hall et, par conséquent, à la courbure des trajectoires des électrons sous l'action du champ magnétique, c'est-à-dire à une augmentation de l'effet de magnétorésistance.

Il existe une autre façon de réaliser ce principe sur la base de la technologie microélectronique. Son essence réside dans la formation de magnétorésistances basées sur un film épitaxial de silicium contenant des sections de shunt à faible résistance en silicium polycristallin (PS) situées perpendiculairement à la direction du courant.

La technologie de fabrication d'un tel matériau magnétorésistif est basée sur la croissance simultanée de films de silicium monocristallin et polycristallin (PS). Grâce à des processus d'oxydation et de photolithographie, des régions locales de SiO_2 sont formées dans lesquelles des films de PC se développent au cours de la croissance épitaxiale des films.

Pour fermer le champ électromagnétique de Hall, les régions PS sont dopées avec des atomes de phosphore jusqu'à une concentration de 10^{21} cm^{-3} et, compte tenu du taux de diffusion plus élevé des atomes dopants dans le PS par rapport au silicium monocristallin, le dopage est effectué simultanément avec le processus de création de film dans les régions n^+ - monocristallines sous des contacts ohmiques.

Bibliographie

1. O.K.Homeriki. *Poluprovodnikovye preobrazovateli magnitnogo polya* [Transducteurs semi-conducteurs de champ magnétique]. M.-Energoatomizdat, 1986, 136 p.
2. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Physique des dispositifs semi-conducteurs]. M. : *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
3. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Transducteurs semi-conducteurs de mesure de la déformation, de la température et du champ magnétique destinés à être utilisés dans des conditions d'exposition aux rayonnements, dans une large gamme de températures et de champs magnétiques]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", Seriya : *Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.
4. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil *Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range*. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4.
5. Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shekhovtsov V.I. et al. *Deystvie pronikayushchey radiatsii na izdeliya elektronnoy tekhniki*. Moskva [Action des rayonnements pénétrants sur les équipements électroniques]. Moscou : *Sov. radio*, 1980. 224 p.
6. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Transducteurs de mesure basés sur GaAs, le polysilicium et le germanium dispersé et perspectives d'utilisation]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, p.93-97.
7. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [L'influence de l'irradiation neutronique sur les caractéristiques des transducteurs de mesure semi-conducteurs de la température, de la déformation et du champ magnétique]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, pp.57-58.
8. Henrichsen K. N. *Classification des méthodes de mesure magnétique //CERN acceleration schol. Mesure magnétique et alignement*. Montreux. Suisse. Mars 1992, p.70-83.

9. Berkes B. Générateurs de Hall //CERN acceleration schol. Mesure et alignement magnétique. Montreux. Suisse. Mars, 1992 , p.167-192.

10. Afanasyev Yu, V., Sludentsov N. V., Shchelkin A. P. *Magnitometricheskie preobrazovateli, pribory, ustanovki*. L. : [Transducteurs magnétométriques, dispositifs, installations]. L. : *Energiya. Leningradskiy filial*. 1972.- 272p.

11. Knoopers H. G. et.al. Third round of the ITER strand bench mark test // Proceedings of EUCAS-97. P. 1271-1274.

12. Zhelamskii M.V., Sychevskii S.E., Filatov O.G., Gorbachuk N.T. et al. *Ryad pretsizionnykh generatorov E.D.S. Kholla* [Une gamme d'oscillateurs de Hall de précision E.D.S.]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya : Elektrofizicheskaya apparatura*, v. 1(27), 2002, pp.9-14.

13. V.V.Panin, B.M.Stepanov. *Izmerenie impul'snykh magnitnykh i elektricheskikh poley* [Mesure des champs magnétiques et électriques pulsés]. - *Moskva : Energoatomizdat*, 1987. - 120 p.

14. I.A.Bolshakova, M.R.Gladun, R.L.Golyaka et autres. *Mikroelektronnye sensornye ustroystva magnitnogo polya : Monografiya / Pod red. Z.Ya. Gotri* [Dispositifs de détection microélectronique du champ magnétique : Monographie / Sous la direction de Z.Y. Gotry]. - *L'vov : Izdatel'stvo Natsional'nogo universiteta "L'vovskaya politekhnik"*, 2001. - 412 p.

15. Gorbachuk N.T., Firsov A.A.. *Datchiki magnitnogo polya (datchiki Kholla) na osnove plenok GaAs* [Capteurs de champ magnétique (capteurs de Hall) basés sur des films GaAs].

Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Perspektivnye innovatsii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte '2010" [Conférence internationale scientifique et pratique "Innovations en perspective dans les domaines de la science, de l'éducation, de la production et des transports '2010"']. *Sbornik nauchnykh trudov*, vol.6, pp.24-25, 21-30 juin 2010, Odessa.

16. N.T. Gorbachuk, P.I. Didenko. *Otsenochnye izmereniya peremennykh magnitnykh poley v okruzhayushchey srede* [Mesures estimées des champs magnétiques alternatifs dans l'environnement]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Nauchnye issledovaniya i ikh prakticheskoe primenie. Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya '2010"* [Conférence internationale scientifique et pratique "La recherche scientifique et son application pratique. État moderne et voies de

développement '2010']. *Sbornik nauchnykh trudov*, vol.3,p.40-41, 4-15 octobre 2010, Odessa.

17. Amoskov V.M., Vasiliev V.N., Gorbachuk N.T., Sychevsky S.E. et al. 16. *Pretsizionnyy trekhkomponentnyy magnitometr na generatorakh e.d.s. Kholla dlya izmereniya slabykh magnitnikh poley* [Magnétomètre de précision à trois composantes sur des générateurs Hall e.d.s. pour la mesure de champs magnétiques faibles] // *Girokopiya i navigatsiya* [Gyroscopie et navigation], No. 4(31), 2000. p. 56.

18. Filatov, O.G. ; Soldatenkov, V.A. ; Sychevskiy, S.E. ; Gorbachuk, N.T., et al. *Sistema elektromagnitnogo pozitsionirovaniya dlya sistemy pritselivaniya i indikatsii, ustanovlennoy na shleme* [Système de positionnement électromagnétique pour le système de ciblage et d'indication monté sur casque]. *Elektronika : Nauka, tekhnologii, biznes*. [Électronique : science, technologie, affaires]. 5/2003, p.62-67.

19. Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Gorbachuk N.T., et al. *Razrabotka pretsizionnykh datchikov fizicheskikh velichin na osnove optimizirovannykh magnitnykh tsepey* [Développement de capteurs de précision de grandeurs physiques sur la base de circuits magnétiques optimisés]. *Nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal "Aviakosmicheskoe priborostroenie"* [Revue scientifique et technique "Aviakosmicheskoe Instrument Engineering"], 2004, N 5, pp. 7-13.

20. Zhelamskiy M.V., Konstantinov A.B., Sychevskiy S.E., Gorbachuk N.T., et al. *Odnokomponentnyy pervichnyy preobrazovatel', odnokomponentnyy datchik, trekhkomponentnyy pervichnyy preobrazovatel' i trekhkomponentnyy datchik magnitnogo polya, rabotayushchie na effekte Kholla*. [Transducteur primaire à une composante, capteur à une composante, transducteur primaire à trois composantes et capteur de champ magnétique à trois composantes fonctionnant selon l'effet Hall]. Brevet de la Fédération de Russie №2001115570.

21. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Piezo-Hall effect in p-germanium. *Phys. Stat. Sol.(c)* 100. 1980, p.309.

22. Gorbachuk N.T. *Chuvstvitel'nost' magnitosoprotivleniya i khollovskoy podvizhnosti v slabolegirovannom p-Ge k izmeneniyu kontsentratsii primesi* [Sensibilité de la magnétorésistance et de la mobilité de Hall dans le p-Ge légèrement dopé aux changements de concentration d'impuretés]. *UFZh*, 1984, n° 6, P.92.

23. Gorbachuk N.T., Shvarts Yu.M. *Vliyanie deformatsii na velichinu*

magnitosoprotivleniya v ob "emnom p-Ge i plenkakh p-Ge na arsenide galliya [Effet de la déformation sur l'ampleur de la magnétorésistance dans les films de p-Ge en vrac et de p-Ge sur l'arséniure de gallium]. *OPT*, 1984, n° 6, p. 88.

24. Mykola Gorbachuk. MATÉRIAUX ÉLECTROTECHNIQUES. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Royaume-Uni, 2024, 112p. ISBN : 978-620-3-46212-8.

25. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconducteurs].- *L. Nauka* 1967. 439p.

26. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki : Navchal'niy posibnik* [Cours général de physique : guide d'étude], T. 1-3. - K. : *Tekhnika*, 2001.

27. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika* [Micromagnétoélectronique]. *Tom 1, DMK.-M.*:2001.

FOR AUTHOR USE ONLY

Chapitre 4. Humidité, gaz. Méthodes de mesure de l'humidité. Hygromètre

L'air qui nous entoure contient une certaine quantité de vapeur d'eau (molécules d'eau). La quantité maximale possible de vapeur d'eau dans l'air (saturation de l'air en vapeur d'eau) dépend de la température. Le nombre de molécules dans la vapeur d'eau saturante augmente avec la température. La vapeur d'eau saturante se forme, par exemple, à la surface de l'eau lorsque les températures de l'eau et de l'air sont égales - l'équilibre se produit : le nombre de molécules d'eau qui s'évaporent est égal au nombre de molécules qui se condensent.

En général, l'air normal à une température donnée ne contient pas de vapeur d'eau saturante. Mais lorsque la température de l'air change (baisse, par exemple la nuit), la vapeur d'eau non saturante peut se transformer en vapeur d'eau saturante - le point de rosée. Le point de rosée est la température à laquelle la vapeur d'eau dans l'air devient saturante.

En fonction de sa teneur en vapeur d'eau, l'air est caractérisé par l'humidité. L'humidité absolue ρ est la quantité de vapeur d'eau contenue dans 1 mètre cube à une température donnée. L'humidité relative de l'air f est le rapport entre l'humidité absolue et la quantité de vapeur ρ_o , nécessaire pour saturer 1 mètre cube d'air à une température donnée (c'est-à-dire la quantité correspondant à la condition du point de rosée pour une température donnée. la valeur de ρ_o peut être trouvée dans les tableaux correspondants) :

$$f = (\rho/\rho_o) 100 \% (4.1).$$

Les instruments de mesure de l'humidité sont appelés hygromètres. Actuellement, les méthodes et instruments suivants sont principalement utilisés pour mesurer l'humidité de l'air.

4.1. Hygromètres

Hygromètres à point de rosée. Un petit miroir refroidi (par exemple au moyen d'un élément Peltier) est placé dans le flux du gaz étudié. La température du miroir est réglée à l'aide d'une cellule photoélectrique qui détecte la formation de rosée sur le miroir. Après avoir mesuré la température, on détermine le point de rosée. Il existe des hygromètres qui utilisent des électrodes au lieu d'un miroir, dont la conductivité change en raison de la formation de buée.

Psychromètre. Instrument composé de deux thermomètres, l'un humidifié et l'autre ordinaire. L'analyse de la différence entre les relevés des

thermomètres permet de déterminer le point de rosée. Plus la saturation de l'air en vapeur d'eau est faible, plus l'évaporation de l'eau à la surface du thermomètre humidifié est intense, plus sa température est basse et plus la différence entre les relevés des deux thermomètres est importante.

Hygromètre à électrolyse. Un flux d'air (gaz) mesuré passe à proximité d'électrodes de platine contenant du pentoxyde de phosphore, qui absorbe l'eau. Lorsqu'une tension est appliquée aux électrodes, l'eau se décompose en hydrogène et en oxygène. Le courant d'électrolyse est proportionnel à la quantité d'eau absorbée, c'est-à-dire à l'humidité absolue.

Hygromètre à infrarouge. La mesure de l'absorption du rayonnement infrarouge permet de déterminer l'humidité absolue.

Hygromètres électriques dotés d'un film conducteur. En fonction de la quantité de vapeur d'eau absorbée, la résistance électrique du film conducteur varie. Une fois le film étalonné, il est possible de déterminer l'humidité absolue du gaz étudié.

Hygromètres à cheveux. Ces hygromètres mesurent l'allongement des cheveux humains dégraissés et déterminent l'humidité de l'air. L'allongement sous l'influence de l'humidité peut atteindre jusqu'à 2,5 %.

Hygromètres à élément bimorphe. La base d'un tel hygromètre est un ressort métallique enroulé, recouvert d'un côté d'une substance absorbant l'humidité. Sous l'influence de l'eau absorbée, la substance se dilate et modifie les paramètres géométriques du ressort. L'étalonnage permet de déterminer l'humidité de l'air (gaz).

Hygromètre à film conducteur. L'eau absorbée par certains matériaux peut affecter les propriétés électrophysiques de ces matériaux. Ce phénomène est à la base de l'hygromètre à film conducteur. En fonction du taux d'humidité de l'air (gaz) dans les hygromètres à film conducteur, la résistance électrique du film - l'élément sensible de l'hygromètre - change.

Ce type d'hygromètre mesure l'humidité relative de l'air, ce qui constitue l'un de ses principaux avantages, car l'humidité relative dépend très peu de la température. L'inconvénient est la nécessité d'étalonner chaque hygromètre et la faible stabilité de cet étalonnage. L'étalonnage peut se décaler en raison des dépôts d'ions sur le film lorsqu'il entre en contact avec de la poussière et d'autres constituants gazeux. En outre, l'hygromètre n'a pas une puissance de signal de sortie élevée, ce qui constitue également un inconvénient. La puissance du signal de l'hygromètre peut être augmentée en

augmentant la taille de l'élément sensible, mais en même temps il perd de la vitesse et l'hystérésis apparaît.

Un hygromètre à film conducteur se compose d'un élément sensible - une couche de substance hygroscopique appliquée sur un substrat isolant. Les oxydes de certains métaux et d'autres matériaux sont souvent utilisés comme substance hygroscopique (élément sensible de l'hygromètre). Les contacts électriques sont généralement réalisés sous la forme de peignes. Lorsque l'humidité du gaz et, par conséquent, du film de détection augmente, sa résistance électrique diminue. Dans la plupart des cas, la dépendance est exponentielle.

Un hygromètre avec un film conducteur a une inertie suffisamment faible et est souvent utilisé pour déterminer de petites valeurs d'humidité de l'air (gaz).

4.2. Analyse résistive des gaz. Transducteur de concentration de gaz

Un transducteur résistif de concentration d'oxygène, tel qu'un transducteur à base d'oxyde de titane, peut servir de base à un analyseur de gaz d'échappement (capteur). L'oxyde de titane est une substance dont la résistance varie en fonction du nombre de molécules d'oxygène adsorbées à sa surface.

Le transducteur est constitué, par exemple, d'un fil de platine ou d'une résistance à couche mince, dont la surface est recouverte d'oxyde de titane. En fonction de la teneur en oxygène des gaz d'échappement, la couche d'oxyde de titane modifie sa résistance et donc la résistance globale du dispositif.

D'autres substances sont utilisées dans les analyseurs de gaz résistifs pour déterminer la teneur d'autres gaz. Il existe également des transducteurs résistifs pour la détection du propane et du méthane. Les transducteurs résistifs comportent généralement deux éléments de détection, l'un revêtu d'une substance et l'autre non revêtu. Cette dernière est utilisée comme élément de compensation de la température lorsque les mesures sont effectuées avec le transducteur inclus dans un circuit en pont.

Il existe des analyseurs de gaz résistifs et des éléments de détection de gaz basés sur leur sensibilité aux changements des caractéristiques thermophysiques des gaz environnants.

Par exemple, un élément sensible basé sur la variation de la résistance électrique des métaux en fonction de la température. L'élément sensible d'un tel transducteur (cataromètre) est constitué d'un fil métallique suffisamment long relié à une source de tension électrique. Le fil se trouve dans le flux du gaz analysé. La quantité de courant qui circule et chauffe le fil est contrôlée avec une grande précision. Lorsque la concentration du gaz environnant varie, la conductivité thermique du gaz change en conséquence. Par conséquent, le transfert de chaleur entre le fil et le gaz environnant change. En conséquence, la température du fil et sa résistance électrique changent. Cela entraîne une modification de la valeur du courant électrique, qui est détectée par l'appareil de mesure.

Bibliographie

1. Jan F.Kreider. Manuel du chauffage, de la ventilation et de la climatisation. -Taylor & Francis, 2019, 680p.

2. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. Zagal'niy kurs fiziki : Navchal'niy posibnik [Cours général de physique : guide d'étude], T. 1-3. - K. : Tekhnika, 2001.

3. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconducteurs].- L. Nauka 1967. 439p.

4. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Répertoire "Mesures dans l'industrie"]-1-3 volumes. M. : Metallurgiya, 1990.

Chapitre 5. La lumière. Transducteurs, cellules photoélectriques

5.1. Photoconductivité

Alors que dans les métaux, la conduction est observée à différentes températures, la conductivité des semi-conducteurs, dans des conditions ordinaires, n'apparaît que par un mouvement thermique. Cependant, il est possible de créer des conditions qui assurent l'apparition de la conductivité dans un semi-conducteur sans en augmenter la température. Puisque la conductivité électrique du semi-conducteur ne naît que du fait que les électrons tombent dans la zone de conduction, il suffit de donner aux électrons l'énergie nécessaire pour les projeter dans la zone libre pour que la conductivité apparaisse. Cette énergie, dans des conditions normales, les électrons la reçoivent d'autres particules impliquées dans le mouvement thermique, mais l'énergie peut aussi venir de l'extérieur, notamment, par exemple, sous forme de rayonnement.

Dès le siècle dernier, on a découvert que la résistance d'un bâton de sélénium changeait considérablement en fonction de l'éclairage. Des études approfondies ont montré que la résistance du sélénium diminue avec l'éclairage.

Plus tard, il a été établi que cette propriété est possédée non seulement par le sélénium, mais aussi par d'autres semi-conducteurs. L'émergence des concepts de la mécanique quantique a permis d'expliquer ce phénomène, qui a été baptisé photoconductivité ou photoeffet interne en science.

La nature physique de la photoconductivité est la suivante. À une certaine température, dans un semi-conducteur obscurci, un certain nombre d'électrons n se trouvent dans la zone libre. Ces électrons sont responsables de la conductivité électrique normale de la substance, également appelée conductivité dans l'obscurité. Si le semi-conducteur est ensuite exposé à la lumière, un nouveau nombre n_1 d'électrons lumineux apparaît dans la zone libre, en plus des électrons sombres qui existaient auparavant, et le nombre total d'électrons dans la zone devient égal à $n + n_1$. La conductivité électrique dans ce contexte augmente et devient égale à :

$$\sigma = neU + n_1 eU_1, (5.1)$$

où le premier sommand correspond à la conduction sombre, et le second - à la photoconductivité, e - charge électronique, U - mobilité des porteurs de courant (électrons).

À partir des idées générales sur la nature des semi-conducteurs, la raison de l'apparition des photoélectrons dans la zone libre devient claire. Il ne fait aucun doute que le fournisseur des électrons sombres et des électrons légers dans un semi-conducteur exempt d'impuretés est une zone remplie. Il est clair que ces électrons, ainsi que d'autres, ne sont entrés dans la zone libre que parce qu'ils ont reçu l'énergie nécessaire pour franchir la zone interdite

"avec une largeur de ΔE . Par conséquent, la photoconductivité est due au fait que les photons tombant sur la surface du semi-conducteur et absorbés par celui-ci ont donné toute leur énergie aux photoélectrons. Chaque photon porte une énergie $h\nu$. Si cette énergie est supérieure à l'énergie ΔE ou au moins égale à celle-ci, alors l'électron de la zone remplie peut passer dans la zone de conduction. Il en découle une conséquence indispensable : la photoconductivité est possible lorsque $h\nu > \Delta E$. Ainsi, pour chaque substance photosensible, il existe une limite différente de photoconductivité, correspondant à la condition suivante :

$$h\nu_0 = \Delta E \quad (5.2).$$

Si la fréquence ν du rayonnement incident sur le semi-conducteur est inférieure à ν_0 , il n'y a pas de photoconductivité.

Seul un rayonnement de fréquence $\nu > \nu_0$ peut créer de la photoconductivité.

La limite de l'effet photo (limite rouge), c'est-à-dire la valeur de ν_0 , dépend du semi-conducteur lui-même, dans lequel l'effet photo est observé, qu'il soit exempt d'impuretés ou non.

La photoconductivité, ou photoeffet interne, ne se produit pas dans tous les semi-conducteurs. Indépendamment de cela, la condition indispensable à l'apparition de la photoconductivité est l'absorption du rayonnement incident de la matière. Ce n'est que dans ce cas, en principe, que l'effet photo peut se produire.

Les expériences des physiciens ont établi que le comportement des photoélectrons ne diffère pas de celui des électrons thermiques jusqu'à une coïncidence presque totale de leur mobilité.

Une étude minutieuse du photoeffet interne a montré que le changement de résistance dans différentes substances se produit sous l'action d'un rayonnement de composition spectrale différente : dans certaines substances, il est observé lorsque la substance est éclairée par des rayons ultraviolets, dans d'autres - lorsqu'elle est éclairée par des rayons visibles ou infrarouges.

Les électrons libérés par la lumière se trouvent dans la zone libre pendant une période très courte. Pendant ce temps, ils se déplacent dans les espaces interatomiques et, en présence d'une différence de potentiel entre deux points du semi-conducteur, se déplacent principalement dans une direction, formant ainsi un courant électrique. Les photoélectrons se déplacent ensuite vers des niveaux d'impuretés plus bas ou vers la zone remplie. Cependant, avec l'illumination continue du semi-conducteur, de plus en plus de photoélectrons apparaissent et, dans le même temps, un certain nombre d'entre eux reviennent. Il en résulte un équilibre dynamique, c'est-à-dire que le nombre de photoélectrons émergents devient égal au nombre d'électrons qui reviennent.

À l'état libre, les photoélectrons restent très peu de temps (de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-7} secondes). Mais pendant cette courte période de vie, ils sont des électrons de conduction à part entière. Les substances semi-conductrices augmentent considérablement leur conductivité électrique, et pas seulement sous l'action du rayonnement. Toute autre particule pénétrant dans l'atome et donnant toute son énergie à l'électron est en principe capable de transférer l'électron dans un état libre. En effet, de nombreuses expériences répétées ont montré que la conduction se produit également lorsque la surface d'une substance est bombardée par des électrons rapides, des particules alpha, des protons et d'autres particules. Il est clair qu'à cette fin, l'énergie de la particule bombardante doit être supérieure à l'énergie de transfert de l'électron à l'état libre.

Dans les semi-conducteurs, la concentration d'électrons de conduction à température ambiante est beaucoup plus faible que dans les métaux, et le nombre de photoélectrons apparaissant sous l'influence de la lumière est relativement important. Sous un éclairage approprié, dans certaines substances, comme le sulfure de cadmium (CdS), le nombre de photoélectrons peut dépasser de quatre ordres de grandeur le nombre d'électrons de conduction dans l'obscurité. Dans d'autres substances moins photosensibles, le nombre de photoélectrons, même s'ils ne sont pas soumis à une irradiation trop intense, peut atteindre 20 à 30 % du nombre total d'électrons de conduction. Cette propriété de certains semi-conducteurs les rend importants et nécessaires dans diverses technologies de conversion.

5.2. Le photoeffet de la couche de confinement

La section 5.1 a montré que sous l'action de la lumière absorbée, les électrons peuvent se déplacer de la zone remplie vers la zone libre, créant ainsi une photoconductivité. Dans ce cas, seule une conduction supplémentaire se produit dans le semi-conducteur, mais aucune force électromotrice intrinsèque n'est générée. Cependant, un autre phénomène est ouvert et connu : l'apparition de forces électromotrices suite à l'illumination du semi-conducteur. Par exemple, si l'on soumet le semi-conducteur à un éclairage inégal, de sorte que certaines parties de l'échantillon sont éclairées beaucoup plus fortement et d'autres beaucoup plus faiblement, il est possible dans certains cas de détecter une différence de potentiel entre les zones claires et les zones sombres. Ce phénomène s'explique par le fait qu'au moment de l'illumination, les électrons commencent à diffuser des parties éclairées vers les parties sombres en plus grand nombre que dans la direction opposée. Cette diffusion préférentielle fait que, dans le cas du mécanisme de conduction électronique, les zones sombres sont progressivement chargées négativement, tandis que les zones claires sont chargées positivement. En conséquence, un champ électrique progressivement croissant se forme à l'intérieur du semi-conducteur, qui finira par établir un état d'équilibre caractérisé par le fait que les flux électroniques dans les deux directions sont égaux.

Lorsque l'équilibre se produit, il existe entre les parties claires et sombres du semi-conducteur une certaine différence de potentiel, pouvant aller jusqu'à des dixièmes de volt.

En outre, l'effet de la lumière sur le semi-conducteur se manifeste par ce que l'on appelle le photoeffet de la couche de verrouillage.

Si nous créons la structure illustrée à la figure 5.1, il est possible d'observer expérimentalement le photo-effet de la couche de verrouillage.

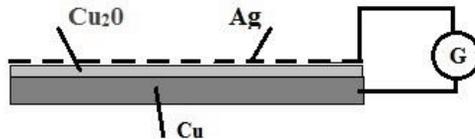


Fig. 5.1. Effet photo de la couche barrière. Schéma de la structure du matériau

Si nous oxydons une plaque de cuivre Cu et formons une couche d'oxyde de cuivre Cu₂O sur celle-ci, nous obtenons un semi-conducteur classique. Plaçons ensuite une fine couche d'argent sur le semi-conducteur

Cu_2O . La fine couche d'argent sera transparente à la lumière. La fine couche d'argent sera transparente à la lumière. Si nous connectons un galvanomètre entre la couche d'argent et une plaque de cuivre (voir fig. 5.1), un courant circulera dans le circuit lorsque la surface argentée sera éclairée. Ce phénomène s'explique par l'existence d'une couche dite barrière dans le système métal-semiconducteur.

Dans ce cas, sous l'influence de la lumière, les électrons passent de l'oxyde de cuivre au cuivre en traversant la couche barrière. Par conséquent, la plaque de cuivre est chargée négativement et l'électrode d'argent transparente est chargée positivement. Lorsque le circuit est fermé, un courant est induit dans le circuit. Un phénomène similaire peut être observé dans d'autres semi-conducteurs. Cet effet est particulièrement prononcé dans les systèmes contenant des semi-conducteurs tels que le soufre-thallium, le soufre-argent, le sélénium, le germanium, le silicium et d'autres.

Le photoeffet de valve (photoeffet de couche bloquante) désigne l'apparition d'une force électromotrice lors de l'absorption de lumière dans un système contenant le contact de deux semi-conducteurs à impuretés de conductivité différente ou dans le système semi-conducteur-métal (fig. 5.2).

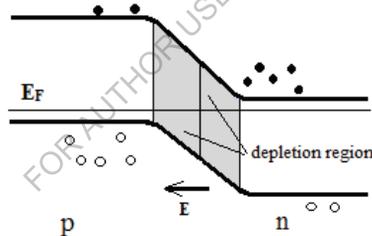


Fig. 5.2. Diagramme énergétique général d'une jonction $p-n$ (couche de verrouillage)

Lorsqu'un tel système est éclairé, la lumière absorbée transfère les électrons de la bande de valence à la bande de conduction. Des trous se forment alors dans la zone de valence, c'est-à-dire que des paires électron-trou sont générées. Le comportement des porteurs hors équilibre dépend de la région du système dans laquelle le rayonnement est absorbé. Si le rayonnement est absorbé dans la *région p*, les électrons proches de la jonction $p-n$ peuvent l'atteindre et, sous l'action du champ électrique de contact, se déplaceront vers la région n .

Si le rayonnement est absorbé dans la *région n*, seuls les trous sont éjectés à travers la jonction *p-n* dans la *région p*.

Si les paires sont générées dans la région de charge globale (jonction *p-n*), le champ "distribue" les porteurs de charge de manière à ce qu'ils aboutissent dans la région où ils sont essentiels.

Dans ce cas, les électrons sont concentrés dans le *semi-conducteur n*, tandis que les trous sont concentrés dans le *semi-conducteur p*.

Le champ électrique créé par ces derniers augmente, ce qui empêche la poursuite de la transition des porteurs non basiques à travers la couche de confinement.

Il se produit un équilibre dynamique, dans lequel le nombre de porteurs non basiques se déplaçant par unité de temps à travers la couche de verrouillage est égal au nombre de ces mêmes porteurs se déplaçant pendant la même période de temps dans la direction opposée.

Avec l'apparition de l'équilibre, une différence de potentiel est établie entre les *semi-conducteurs p* et *n*, représentant la force photoélectromotrice.

Le phénomène d'émergence de la photo-EMF à valve lors de l'illumination de la jonction *p-n* est utilisé pour créer des photodétecteurs et des convertisseurs d'énergie photovoltaïque - des batteries solaires.

C'est le mécanisme de la force photoélectromotrice dans un système composé de semi-conducteurs *p* et *n* et d'une couche de verrouillage entre eux.

Le photoeffet de valve est particulièrement actif dans les systèmes semi-conducteurs présentant une grande longueur de diffusion des porteurs de courant "non principaux" et, par conséquent, une longue durée de vie.

L'examen du mécanisme d'apparition de la force photoélectromotrice de la valve montre clairement que l'électrode en contact direct avec le semi-conducteur à électrons est toujours chargée négativement, tandis que l'électrode en contact direct avec le semi-conducteur à trous est chargée positivement. Par conséquent, dans les différents types de cellules à valve, l'électrode supérieure translucide peut être chargée positivement ou négativement.

La découverte de l'effet de verrouillage de la couche photoélectrique a élargi les possibilités d'utilisation pratique des semi-conducteurs et a constitué la base du dispositif des cellules photovoltaïques à valve - dispositifs qui convertissent l'énergie de la lumière en énergie électrique.

5.3. Batterie solaire

La cellule solaire est le nom donné à la première cellule photovoltaïque à base de silicium. La cellule photoélectrique est un convertisseur d'énergie solaire (lumière) en énergie électrique.

La conductivité électrique du silicium varie dans une fourchette assez large en fonction de la qualité et du nombre d'impuretés qui y sont introduites. Depuis de nombreuses années, le silicium fait l'objet de recherches physiques approfondies. De nombreuses années de recherche ont permis d'obtenir des résultats d'une grande valeur à la fois pour la théorie et pour la pratique.

Un résultat important doit être considéré comme le développement d'une technologie permettant d'introduire des impuretés d'atomes étrangers dans des monocristaux de silicium, ce qui a permis d'obtenir dans un cristal une jonction $p-n$, sur la base de laquelle a été créée une cellule photoélectrique en silicium avec une couche de verrouillage. Une batterie solaire a été créée sur la base de ces cellules photoélectriques.

La technologie de fabrication des cellules photoélectriques en silicium est assez complexe. Aujourd'hui, les technologies modernes de microélectronique planaire sont utilisées à cette fin.

Les cellules photovoltaïques individuelles peuvent être connectées les unes aux autres en série et en parallèle, ce qui permet d'obtenir une batterie photovoltaïque (solaire). Une telle batterie solaire peut être utilisée pour alimenter des appareils ménagers, des appareils électroniques portables, etc. Les premières cellules solaires ont déjà été créées.

En pratique, les premières cellules photovoltaïques au silicium avaient déjà un rendement d'environ 6 %. À titre de comparaison, les moteurs à vapeur ont un rendement d'environ 6 à 8 %. En outre, il convient de garder à l'esprit que, contrairement à d'autres convertisseurs d'énergie, la durée de vie des cellules semi-conductrices peut être très longue.



Fig. 5.3. Batterie solaire portable moderne - batterie (chargeur solaire)

5.4. Bolomètres

Un bolomètre est un appareil qui permet de mesurer l'énergie de rayonnement avec une grande précision. La plupart des bolomètres sont basés sur le principe de la conversion de l'énergie radiante en énergie thermique. Avec la découverte des propriétés électrophysiques des semi-conducteurs, ceux-ci ont été utilisés pour la technologie des bolomètres et ont considérablement augmenté la limite de sensibilité des bolomètres.

Les bolomètres sont largement utilisés à des fins très diverses. Les bolomètres sont d'une valeur exceptionnelle lorsqu'il est nécessaire d'effectuer des études spectrométriques.

Le circuit principal d'un bolomètre ordinaire est un pont dont l'un des bras comprend une résistance thermique sensible. Lorsqu'un rayonnement thermique tombe sur la thermistance, il augmente sa température, ce qui perturbe l'équilibre du pont et fait dévier la flèche de l'instrument de mesure, préprogrammée dans les unités appropriées, d'un nombre de divisions adéquat. La thermistance est souvent placée dans un cylindre à vide en métal ou en verre avec une fenêtre en matériau transparent. Sur la partie extérieure du cylindre, des fils partent de la thermistance pour l'inclure dans le circuit.

La sensibilité des bolomètres modernes est de $10^{-5} \cdot 10^{13}$ V/W. Les bolomètres sont utilisés pour enregistrer le rayonnement optique dans l'infrarouge. Ils sont très sensibles au rayonnement thermique et sont principalement utilisés pour enregistrer le rayonnement IR avec des longueurs d'onde de 10 à 5000 μm .

5.5. Photocellules au sélénium

La première cellule photoélectrique était composée d'oxyde de cuivre et a été utilisée pendant plusieurs années. Presque au même moment, on a découvert la cellule au sélénium, qui était beaucoup plus répandue et qui n'a pas perdu de son importance aujourd'hui.

La technologie de fabrication d'une cellule photoélectrique au sélénium a subi d'importantes modifications.

Toute cellule photoélectrique avec une couche de verrouillage est un système composé d'un substrat métallique, d'une couche semi-conductrice et d'une électrode métallique supérieure semi-transparente.

Le substrat de la future cellule photoélectrique remplit deux fonctions. D'une part, il sert de support à la fragile couche de sélénium, la protégeant

des dommages mécaniques, et d'autre part, il est utilisé pour établir un contact électrique fiable. La face en forme de disque du substrat sur laquelle la couche de sélénium est appliquée est rectifiée afin que la couche de sélénium adhère bien au disque d'acier. Le substrat rectifié est suspendu à l'intérieur de l'unité à vide.

La couche de sélénium est appliquée par évaporation sous vide.

Pour obtenir des cellules photovoltaïques avec de bons paramètres, il est nécessaire que l'épaisseur de la couche semi-conductrice soit égale à 0,1 mm.

Le sélénium déposé est sous forme amorphe, a une résistivité très élevée et n'a pas encore les propriétés photovoltaïques requises. Par conséquent, à l'étape suivante du processus technologique, le sélénium est converti d'une modification amorphe en une modification cristalline, qui présente une photosensibilité élevée. Pour ce faire, un disque sur lequel du sélénium a été déposé est retiré de la hotte et placé dans un four spécial. À l'aide d'un certain processus technologique dans le four, le sélénium amorphe est transformé en sélénium cristallin.

L'électrode métallique translucide supérieure est généralement appliquée par pulvérisation cathodique.

Les disques finis de la cellule photoélectrique sont assemblés dans un mandrin en ébonite ou en plastique avec deux pinces dirigées vers l'extérieur.

5.6. Photorésistances au sélénium

La résistance électrique d'un échantillon de matériau semi-conducteur diminue sous l'influence d'un rayonnement lumineux, mais aucune force électromotrice ou courant électrique n'est généré dans cet échantillon.

Ainsi, la photorésistance est un dispositif semi-conducteur qui modifie sa résistance électrique sous l'action de la lumière.

L'examen précédent de l'essence physique de l'effet photo interne permet de comprendre la structure fondamentale de la photorésistance. Une photorésistance est une plaque (dans la plupart des cas une fine couche de semi-conducteur), sur les bords de laquelle des électrodes métalliques sont appliquées pour assurer un contact électrique fiable. Une telle photorésistance est incluse dans un circuit en série avec l'alimentation électrique.

Lorsque la photorésistance est obscurcie, un courant électrique circule dans l'ensemble du circuit, et donc dans la photorésistance elle-même, dont

la valeur est déterminée par la résistance ohmique de la photorésistance et la différence de potentiel qui lui est appliquée. Ce courant est appelé courant d'obscurité. A l'illumination de la photorésistance, le courant augmente et cette augmentation est d'autant plus grande que le flux lumineux est important. La différence entre les courants lumineux et les courants d'obscurité nous donne la valeur du photocourant.

En fonction de leur utilisation, les photorésistances sont fabriquées à partir de différents matériaux semi-conducteurs. La sensibilité des photorésistances est beaucoup plus élevée que celle des cellules photoélectriques à vide à effet photoélectrique externe. Cela signifie que pour un même éclairage, la photorésistance permet une augmentation du courant dans le circuit plusieurs fois supérieure à celle d'une cellule photoélectrique à effet externe. L'inconvénient essentiel de la plupart des premières photorésistances créées était une inertie importante, alors que la cellule photoélectrique sous vide à effet photoélectrique externe est un dispositif pratiquement sans inertie.

Le deuxième inconvénient majeur des photorésistances est la dépendance non linéaire de l'augmentation du photocourant par rapport à l'augmentation de l'intensité du flux lumineux. La figure 5.4 montre la dépendance du photocourant par rapport au flux lumineux.

Aujourd'hui, de nouveaux matériaux semi-conducteurs, largement dépourvus de ces inconvénients, sont obtenus et de nouveaux types de photorésistances aux paramètres améliorés sont conçus. Plus récemment, les physiciens ont réussi à résoudre de nombreuses difficultés et à obtenir des photorésistances largement dépourvues des inconvénients inhérents à leurs prédécesseurs.

Selon la substance à partir de laquelle les photorésistances sont fabriquées, elles présentent des caractéristiques spectrales et une sensibilité intégrale différentes. La sensibilité spectrale caractérise la quantité de photocourant résultant de l'action d'une unité de flux d'énergie lumineuse d'une certaine longueur d'onde. Ainsi, si la sensibilité intégrale d'une cellule photoélectrique peut être déterminée par un chiffre - la valeur du photocourant attribuée à l'unité d'énergie incidente, la sensibilité spectrale de chaque cellule photoélectrique est généralement représentée sous la forme d'un graphique. La première photorésistance a été fabriquée à partir de sélénium, qui a joué un rôle majeur dans l'histoire de la science et de la technologie.

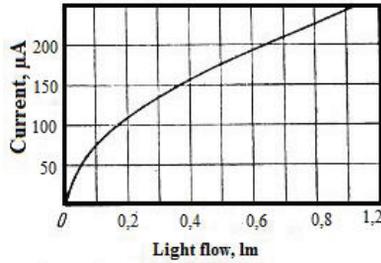


Fig. 5.4. Dépendance du photocourant en fonction du flux lumineux. Exemple de caractéristique lumineuse de la photorésistance au sélénium.

5.7. Transducteurs photoélectriques. Principes généraux de fonctionnement

Les transducteurs photoélectriques sont des transducteurs de mesure primaires qui réagissent au rayonnement électromagnétique tombant sur la surface de l'élément de conversion. Le rayonnement peut être visible, c'est-à-dire lumineux, mais aussi avoir une longueur d'onde plus ou moins grande et être invisible.

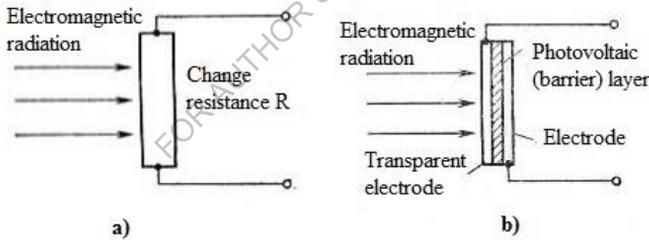


Fig. 5.5. Exemples de photoconvertisseurs. a) - conversion par photoconduction, b) - cellule solaire comme exemple de conversion photovoltaïque.

Convertisseurs photoconducteurs. Ces convertisseurs transforment la variation de la quantité mesurée en variation de la résistance du matériau utilisé (fig. 5.5.a). Ces convertisseurs sont dits passifs, c'est-à-dire qu'ils nécessitent une alimentation externe. Souvent, leur nom caractérise le type de conversion utilisé, comme les résistances photosensibles.

La résistance d'un matériau est fonction de la densité des porteurs de charge de base, et comme la densité augmente avec l'intensité du rayonnement, la conductivité augmente. La conductivité étant inversement

proportionnelle à la résistance, on peut en conclure que la résistance est une fonction inverse de l'intensité de l'irradiation. La valeur de la résistance à pleine irradiation est généralement de 100 à 200 ohms, et dans l'obscurité totale, cette résistance est de l'ordre du mégohm. Le sulfure de cadmium, le séléniure de cadmium, etc. sont utilisés dans la conception de résistances dépendantes de la lumière.

Les cellules solaires. Les cellules solaires sont des convertisseurs photovoltaïques qui transforment l'énergie électromagnétique en énergie électrique (fig. 5.5.b).

La conception du convertisseur comprend une couche de matériau photosensible à haute résistivité placée entre deux électrodes conductrices. L'une des électrodes est constituée d'un matériau transparent à travers lequel le rayonnement passe et frappe le matériau photosensible. Lorsqu'elle est entièrement éclairée, une cellule unique produit une tension de sortie d'environ 0,5 V entre les électrodes.

En règle générale, les cellules photovoltaïques à valve semi-conductrice (cellules photovoltaïques avec couche de verrouillage) sont utilisées comme couche photovoltaïque (fig. 5.5.b).

L'un des paramètres les plus importants d'une cellule photovoltaïque utilisée comme source d'énergie électrique est le facteur d'efficacité (EF). Le rendement d'une cellule solaire est le rapport entre la puissance maximale du courant électrique qui peut être obtenu de la cellule et la puissance du rayonnement lumineux qui tombe sur la cellule. Le rendement sera d'autant plus élevé que la partie du spectre du rayonnement lumineux impliquée dans la génération des porteurs de courant sera importante. L'un des moyens d'accroître l'efficacité des cellules solaires consiste à créer des cellules photoélectriques présentant les caractéristiques spectrales les plus larges possibles. Les cellules photoélectriques en silicium ont un rendement allant jusqu'à 12 %. Les cellules photoélectriques basées sur des composés d'arséniure de gallium ont un rendement allant jusqu'à 20 %.

Photodétecteurs. Les transducteurs semi-conducteurs conçus pour mesurer les variations des paramètres du rayonnement lumineux sont appelés photodétecteurs. Un transducteur photoélectrique, qui est le type le plus simple de photodétecteurs, est une diode semi-conductrice. L'un des principaux transducteurs de ce type est la photodiode, qui utilise l'effet de l'irradiation par la lumière (visible ou d'autres longueurs d'onde) d'une jonction $p-n$ polarisée négativement. En présence d'irradiation, le courant

traversant la jonction change. Le temps de réponse d'une telle photodiode n'est que de quelques nanosecondes.

Pour obtenir une réponse plus rapide aux modifications des paramètres de rayonnement, des diodes PIN ont été mises au point, dans lesquelles une couche de semi-conducteur sans impureté se trouve entre les couches de *type p* et de *type n*.

Phototransistors. Dans un certain nombre de dispositifs, les photodiodes sont utilisées avec des amplificateurs pour augmenter la sensibilité. Mais il existe des dispositifs qui combinent ces propriétés : les phototransistors. Ils sont fabriqués dans un boîtier transparent qui laisse passer le rayonnement lumineux. La lumière qui tombe sur la jonction collecteur-base du phototransistor (jonction *p-n* avec polarisation négative) provoque un photocourant dans la base, qui est amplifié avec le gain du transistor, ce qui donne un courant d'émetteur très important.

Les photodétecteurs étant des dispositifs à semi-conducteur, leur courant de saturation dépend de la température. En l'absence de rayonnement lumineux, un courant d'obscurité circule dans les photodétecteurs, ce qui limite les mesures de faibles niveaux de rayonnement lumineux.

Photorésistances. Caractéristiques de la photorésistance. La valeur de la résistance à l'obscurité dépend de la forme, de la taille, de la température et de la nature physico-chimique de la couche photosensible de la photorésistance. Une résistance à l'obscurité très élevée (de 10^4 à 10^9 Ohm à 25°C) caractérise les photorésistances à base de PbS, CdS, CdSe. La résistance à l'obscurité de InSb, InAs, CdHgTe (10 à 10^3 Ohm à 25°C) n'est pas très élevée. La résistance de la photorésistance irradiée diminue rapidement avec l'augmentation de l'irradiation (fig. 5.6).

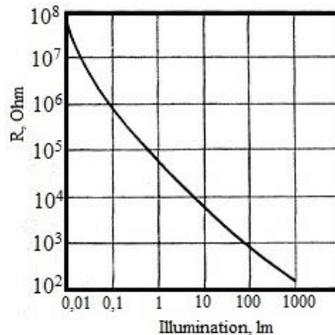


Fig. 5.6. Exemple de dépendance de la résistance de la photorésistance à l'illumination

5.8. Photocellules pour vannes. Modèles

La construction de toutes les cellules photoélectriques dotées d'une couche de verrouillage est pratiquement la même. Il peut y avoir quelques différences, mais elles ne modifient pas le caractère général de la construction des cellules photoélectriques. La forme de la photocellule, ses dimensions, les méthodes d'application de l'électrode supérieure, le rendement de ces électrodes, etc. peuvent varier.

En général, la fabrication de la cellule photoélectrique à valve (fig. 5.7) commence par ce que l'on appelle l'électrode inférieure - une plaque de métal de 1 à 2 mm d'épaisseur, sur laquelle est appliquée une fine couche de semi-conducteur. La couche de semi-conducteur est ensuite traitée pour créer une jonction $p-n$ dans son épaisseur. Ensuite, une électrode métallique supérieure, qui est une fine couche de métal translucide transmettant la lumière, est appliquée sur la surface extérieure dans la plupart des cas.

Une cellule photoélectrique à valve comprend une électrode métallique inférieure, une couche semi-conductrice à électrons (ou à trous), une couche de verrouillage, une couche à trous (ou à électrons) et une électrode métallique supérieure semi-transparente (fig. 5.7).

La cellule photoélectrique est placée dans un boîtier en plastique avec des fils électriques et une fenêtre pour la lumière.

Le flux radiant tombant sur la surface de la photocellule est partiellement réfléchi par l'électrode métallique semi-transparente et partiellement absorbé par celle-ci. Une partie du flux qui a traversé l'électrode est absorbée dans la couche semi-conductrice adjacente. Par conséquent, des paires électron-trou apparaissent dans cette couche. Les électrons sont concentrés sur l'électrode recouvrant la couche semi-conductrice, qui possède un mécanisme de conduction électronique, et les trous sont concentrés sur l'électrode du semi-conducteur à trous.

Entre l'électrode inférieure et l'électrode supérieure apparaît une différence de potentiel dont la valeur, jusqu'à une certaine limite, sera d'autant plus grande que l'intensité du flux radiant sera importante. En fermant les électrodes de la photocellule par un circuit externe, on crée les conditions pour que le courant électrique y circule. Ce sera le cas lorsque la photocellule est éclairée, et dans la gamme des petits flux lumineux avec une valeur limite de 1 lumen, le courant de court-circuit de la photocellule

dépend presque linéairement de l'intensité du flux lumineux. Lorsqu'une résistance externe est incluse dans le circuit de la cellule photoélectrique, cette linéarité est rompue.

Les scientifiques mènent des recherches constantes et s'efforcent d'obtenir des cellules photoélectriques à partir de nouveaux matériaux présentant une sensibilité intégrale significative et de faire en sorte que la cellule photoélectrique détecte non seulement l'ensemble de la partie visible du spectre, mais également des éléments plus invisibles, tels que l'infrarouge et l'ultraviolet.

Les processus photovoltaïques qui se produisent dans les cellules photoélectriques à valve ont une inertie notable, qui affecte la forme de leurs caractéristiques de fréquence. La forte diminution du rendement de la plupart des cellules à valve avec l'augmentation de la fréquence limite leur utilisation dans les cas de flux lumineux variables de fréquence relativement élevée.

Les cellules photovoltaïques à valve sont composées de différents matériaux semi-conducteurs photosensibles. Les cellules photoélectriques au sélénium sont largement utilisées. La caractéristique spectrale de la cellule photoélectrique au sélénium est proche de la sensibilité de l'œil humain, le maximum de sensibilité spectrale se situant dans la région de 5500-6000 Å (0,55 - 0,6 μm), c'est-à-dire dans la partie visible du spectre (fig. 5.8). La sensibilité intégrale de la cellule photoélectrique au sélénium atteint 600 μA/lm, c'est-à-dire qu'elle dépasse la sensibilité des cellules photoélectriques à effet externe.

Les cellules photoélectriques au sulfure d'argent (Ag₂S) - PCSS - sont encore plus répandues. La sensibilité intégrale des PCSS atteint 9000 μA/lm, avec une caractéristique spectrale assez large (de 0,4 à 1,4 μm) et une sensibilité maximale dans le proche infrarouge (0,8 - 0,9 μm). Les cellules photoélectriques soufre-argent ont une grande stabilité de fonctionnement.

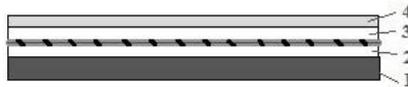


Fig. 5.7. Structure schématique d'une cellule photoélectrique à valve : 1 - électrode métallique inférieure ; 2 - couche semi-conductrice à électrons (trous) ; 3 - couche semi-conductrice à trous (électrons) ; 4 - électrode semi-conductrice métallique supérieure. La zone en tirets est la couche de verrouillage.

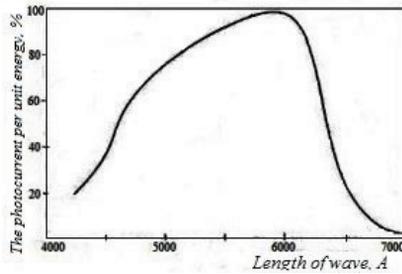


Fig. 5.8. Caractéristique spectrale d'une cellule photoélectrique au sélénium. Sélénium pur.

5.9. DEL

L'émission dans les LED est due à la recombinaison des porteurs injectés dans une partie de la jonction $p-n$. La recombinaison se produit lorsque les porteurs se déplacent des niveaux supérieurs vers les niveaux inférieurs. Les transitions interzones entre le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence s'accompagnent d'une émission effective si les transitions sont directes, c'est-à-dire si le minimum et le maximum sont situés à la même valeur du vecteur d'onde k . De telles transitions sont réalisées, par exemple, dans l'arséniure de gallium à $k = 0$.

La principale caractéristique des LED est l'efficacité quantique interne η_{iqe} (le rapport entre le nombre de photons générés et le nombre de porteurs injectés dans la base) et externe η_{eqe} (le rapport entre le nombre de photons quittant la LED et le nombre total de porteurs de charge la traversant).

La diminution de η_{eqe} est due à la recombinaison sans rayonnement au niveau des défauts de la structure et à l'absorption des photons dans le semi-conducteur lui-même (auto-absorption), étant donné que l'énergie des photons est proche de E_g .

Des η_{iqe} significatifs (jusqu'à 20-28%) sont possédés par les LED les plus répandues aujourd'hui, créées par assemblage épitaxial d'arséniure de gallium dopé au silicium (*type p*) sur $n-GaAs$. Cela est dû à la fois à la plus grande perfection de la structure cristalline et au fait que la région du semi-conducteur hautement compensé au silicium émet des quanta de lumière avec des énergies de 1,31 ... 1,34 eV, inférieures à E_g de l'arséniure de gallium non compensé, ce qui réduit l'auto-absorption lorsque le rayonnement est émis à travers la *région n*.

De nombreux problèmes liés aux DEL sont également résolus par l'utilisation d'hétérojonctions modernes.

Le tableau 1 résume les principaux matériaux actuellement utilisés pour créer des LED présentant les meilleures performances dans les régions spectrales correspondantes. Le paramètre η_{eqe} dépend de manière significative de la technologie et son niveau peut être augmenté de manière significative avec la croissance.

Les DEL sont largement utilisées dans les indicateurs numériques et les affichages lumineux pour les instruments de mesure et les dispositifs de sortie d'ordinateur, ainsi que dans les dispositifs optoélectroniques. Par rapport aux sources lumineuses classiques, les DEL ont un encombrement réduit, une faible tension de fonctionnement, une vitesse élevée (jusqu'à 10^{-9} s) et une longue durée de vie.

Tableau 5.1. Quelques matériaux utilisés pour créer des LED

Material	Impurity or composition	Glow color	λ_{max} , nm	η_{liqe}
GaAs	Si, Zn	IR	950	12-50
			900	
GaP	Zn, O, N	Red	690	7
		green	550	0,7
GaAs _{1-x} P _x	x=0,39 x=0,5-0,75	Red	660	0,5
		amber	610	0,04
Ga _{1-x} Al _x As	x=0,05-0,1 x=0,3	IR	800	12
		red	675	1,3
In _{1-x} Ga _x P	x=0,58 x=0,6	Red	659	0,2
		Amber	617	0,1
		yellow-green	570	0,02

5.10. Lasers à semi-conducteurs. Laser à jonction P-n

Le principe de fonctionnement d'un laser à semi-conducteur est le suivant. Dans un semi-conducteur intrinsèque, il y a toujours des électrons thermiquement abandonnés de la bande de valence dans la bande de conduction. Lorsque la lumière traverse le semi-conducteur, les électrons de la bande de valence absorbent des quanta de lumière et peuvent passer dans la bande de conduction si la fréquence de la lumière incidente est de :

$$\nu \geq E_g / h \quad (5.3),$$

où E_g est la largeur de la zone interdite, h est la constante de Planck. Par conséquent, l'intensité de la lumière diminue après avoir traversé le semi-conducteur. Simultanément, le rayonnement incident sur le semi-conducteur stimule les transitions des électrons excités de la bande de conduction à la bande de valence et l'émission de quanta de lumière (fig. 5.9.a). Ces quanta sont ajoutés au rayonnement externe lorsqu'il traverse le semi-conducteur, c'est-à-dire qu'il y a amplification de la lumière.

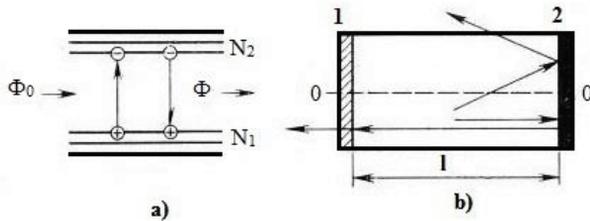


Fig. 5.9. Transitions interzones sous l'action du rayonnement sur un semi-conducteur - a, schéma d'un laser à semi-conducteur - b.

Les transitions qui se produisent sous l'influence d'un rayonnement externe sont dites induites, par opposition aux transitions spontanées qui se produisent indépendamment du rayonnement externe. Dans un état d'équilibre thermodynamique, le nombre d'électrons dans la bande de valence est plusieurs fois supérieur à celui de la bande de conduction. Par conséquent, l'absorption de la lumière domine sur l'amplification. Pour l'amplification de la lumière, il est nécessaire de créer des conditions dans lesquelles la concentration d'électrons près du fond de la zone de conduction sera supérieure à leur concentration près du plafond de la zone de valence ($N_2 > N_1$). Un tel état du semi-conducteur est appelé état avec inversion de population de niveau.

Le facteur d'amplification de la lumière α lorsque la lumière traverse un semi-conducteur dépend de la différence entre les populations des niveaux supérieurs et inférieurs. Comme les probabilités des transitions électroniques vers le haut et vers le bas sont égales, l'amplification se produit lorsque la différence de population entre les niveaux supérieur et inférieur $N_2 - N_1 > 0$.

L'atténuation de la lumière qui traverse un semi-conducteur est due non seulement aux transitions des électrons de la bande de valence à la bande de conduction, mais aussi à la diffusion de la lumière sur diverses

inhomogénéités du cristal. En conséquence, l'intensité de la lumière varie en fonction de la distance x à l'intérieur du semi-conducteur selon la loi :

$$\Phi = \Phi_0 \exp(\alpha - \chi_{ls})x \quad (5.4),$$

où α est le coefficient de gain, le coefficient χ_{ls} caractérise les pertes, x est la distance.

Ainsi, un cristal semi-conducteur amplifie le rayonnement externe s'il y a une inversion de population de niveau en son sein et que le gain dépasse le coefficient de perte ($\alpha > \chi_{ls}$).

Pour transformer un amplificateur en générateur de rayonnement, il est nécessaire d'introduire une contre-réaction positive, c'est-à-dire d'acheminer une partie du rayonnement de la sortie vers l'entrée. Dans les lasers, pour créer une rétroaction, le cristal de travail est placé entre deux miroirs parallèles (1 et 2 dans la figure 5.9.b). La lumière qui traverse le cristal est amplifiée $\exp(\alpha - \chi_{ls})^l$ fois, puis elle est réfléchiée par le miroir, traverse à nouveau le cristal et est amplifiée à nouveau par le même facteur, etc. Les quanta primaires de lumière proviennent de transitions spontanées, puis il y a amplification de la lumière lors de sa propagation dans le cristal grâce à des transitions induites.

L'inversion de population des niveaux de semi-conducteurs peut être créée par plusieurs méthodes. L'une d'entre elles consiste à irradier le semi-conducteur lui-même avec une lumière intense (pompage optique). Les électrons de la bande de valence se déplacent vers la bande de conduction et s'y accumulent. Si l'intensité du pompage est suffisamment élevée, une inversion de la population de niveaux peut se produire. Une autre méthode consiste à transférer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction en bombardant le semi-conducteur avec des électrons rapides. Les deux méthodes permettent d'obtenir des puissances d'émission élevées, mais l'efficacité des dispositifs est généralement faible.

Le laser à jonction p - n est le plus efficace et le plus simple à concevoir. L'action du laser est basée sur le fait qu'en cas de polarisation directe, les électrons sont injectés dans la *région p*, où se produit leur recombinaison radiative avec les trous présents dans cette région. Pour créer un état d'inversion de population, il faut une grande concentration de trous dans la bande de valence, ce qui est obtenu en augmentant la concentration de l'impureté acceptrice de dopage. Pour que l'injection d'électrons dans la *région p* dépasse l'injection de trous dans la *région n* (où la recombinaison est sans rayonnement), il est nécessaire que la concentration d'impuretés

donneuses dans la *région n* soit supérieure à la concentration d'impuretés acceptrices dans la *région p*, c'est-à-dire que $n_n > p_p$.

Ainsi, pour obtenir un état avec inversion de population dans la *région p*, un degré élevé de dopage des deux régions de la jonction *p-n* avec des impuretés est nécessaire.

Le meilleur matériau pour les diodes laser est l'arséniure de gallium. L'épaisseur de la partie émettrice de la *région p* est de l'ordre de $2 \mu\text{m}$. La diode laser est le premier laser dans lequel il a été possible de réaliser une conversion directe de l'énergie électrique en énergie de rayonnement lumineux cohérent. Elle présente également le rendement le plus élevé et les performances les plus rapides.

Fondamentalement, la principale raison de la diminution de l'efficacité de la diode laser est la nécessité d'un fort dopage des *régions p* et *n* de la transition. Simultanément à l'introduction d'impuretés dans le semi-conducteur, un grand nombre de défauts se forment dans la région active, ce qui entraîne d'importantes pertes de rayonnement. En outre, les défauts peuvent former des niveaux d'énergie dans la zone interdite du semi-conducteur. Comme la concentration d'impuretés dans les deux parties de la jonction *p-n* est importante, la largeur de la jonction *p-n* est faible et, par conséquent, les porteurs de courant peuvent passer de la bande de conduction à ces niveaux, puis passer par effet tunnel dans la bande de valence de la *région p*. Le courant d'effet tunnel n'est pas couplé à la bande de conduction. Le courant de tunnel n'est pas couplé au rayonnement, ce qui dégrade également l'efficacité.

Les diodes laser peuvent être utilisées dans les localisateurs de lumière pour l'observation et la photographie dans l'obscurité, dans les télémètres et pour les communications, entre autres.

Bibliographie

1. John Kimbala, Mehmet Kanoglu. Principes fondamentaux et applications des énergies renouvelables. - McGraw-Hill, 2019, 416p.
2. David L. Greenaway, Gunter Harbeke. Optical properties and band structure of semiconductors. Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall, Oxford 4&5 Fitzroy Square, London W.I. 1968, 172p.
3. Paul Holmes, Shalve Mohile, Shantanu Mohile. L'énergie solaire pour les débutants : Comment concevoir et installer le meilleur système d'énergie solaire pour votre maison (DIY Solar Power) Kindle Edition. 2020, 179p, ISBN-13979-8642013625
4. Nsakalagos L., Balch J., Fronheiser J., Korevaar B.A., Sulima O., Rand J. Silicon nanowire solar cells//Appl. Phys. Lett. - 2007. - Vol. 91. - P. 233117(1)-233117(3).
5. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovykh priborov* [Physique des dispositifs semi-conducteurs]. M. : *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
6. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconducteurs].- L. *Nauka* 1967. 439p.
7. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Répertoire "Mesures dans l'industrie"] 1-3 volumes. M. : *Metallurgiya*, 1990.
8. Mykola Gorbachuk. MATÉRIAUX ÉLECTROTECHNIQUES. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Royaume-Uni, 2024, 112p. ISBN : 978-620-3-46212-8.
9. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki : Navchal'niy posibnik* [Cours général de physique : guide d'étude], T. 1-3. - K. : *Tekhnika*, 2001.

Chapitre 6. Transducteurs d'ionisation. Capteurs

6.1. transducteurs de pH

Les transducteurs d'ionisation convertissent une variation d'une grandeur mesurée en une variation, par exemple, d'un courant d'ionisation qui circule dans un liquide placé entre deux électrodes (fig. 6.1). Un exemple typique de l'utilisation du principe d'ionisation est l'instrument de mesure de l'acidité d'une solution. Le degré d'acidité d'une solution est déterminé par la concentration d'ions hydrogène chargés positivement qu'elle contient, appelée potentiel hydrogène (mieux connu sous l'abréviation pH). En outre, le principe d'acidité est un instrument de mesure de l'acidité d'une solution :

$$pH = -\log[H^+],$$

où H^+ est la concentration d'ions hydrogène en grammes par litre.

La valeur du pH est de 0 pour une solution purement acide, de 7 pour une solution neutre (comme l'eau pure) et de 14 pour une solution purement alcaline.

Une sonde de pH typique comporte des électrodes en gélatine dont la valeur du potentiel hydrogène est connue. Elles sont formées par une membrane de verre spéciale qui est en contact avec la solution dont le pH est mesuré. La différence de potentiel entre les deux électrodes reflète la valeur du pH de la solution (environ 59 mV par unité de pH).

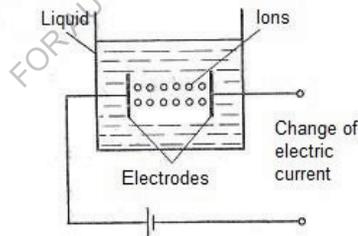


Fig. 6.1 Transformation d'ionisation, dans laquelle les ions migrent dans les liquides vers les électrodes et agissent en tant que porteurs de charge, créant un courant électrique

6.2. Chambres d'ionisation. Principes généraux de fonctionnement

Un instrument (capteur) à chambre d'ionisation se compose d'une chambre K avec une électrode intérieure et une électrode extérieure, d'une source de tension, d'un système d'indication (dispositif d'indication) G et d'une résistance de mesure R ou d'un condensateur de mesure C (fig.6.2). Le

courant d'ionisation (densité de flux ou débit de dose) est mesuré par la valeur de la chute de tension aux bornes de la résistance R. La mesure de la charge en tant qu'intégrale du courant dans le temps (mesure du flux ou de la dose) est déterminée par la charge du condensateur C.

Différentes chambres d'ionisation sont utilisées en fonction de la sensibilité requise et de l'adaptation géométrique à la tâche de mesure. La plage de mesure des détecteurs basés sur le principe de la chambre d'ionisation couvre des valeurs allant de fractions de micrograys à des milliers de grays ($\mu\text{Gy/h}$ à kGy/h).

Lorsqu'elles sont remplies d'air, les chambres d'ionisation conviennent par définition à la mesure de la dose d'ions. Toutefois, à cette fin, il est nécessaire d'utiliser des constructions spéciales excluant ou compensant l'influence des parois de la chambre d'ionisation qui limitent le volume d'air. De nombreuses chambres de mesure ont été développées pour les mesures pratiques. Lors de leur utilisation, outre la sensibilité, la plage de mesure et la reproductibilité des résultats obtenus, les considérations suivantes doivent être prises en compte :

1. La dépendance énergétique de la sensibilité indique dans quelle mesure la valeur mesurée dépend de l'énergie du rayonnement. Des exemples typiques de cette dépendance énergétique pour différents types de détecteurs de rayonnement sont présentés à la figure 6.3.

2. La dépendance de la sensibilité à la direction de vol des particules (rayons) est due à la conception même du détecteur. En fonction de la direction d'incidence des rayons, il est nécessaire d'introduire des corrections qui, à leur tour, peuvent dépendre de l'énergie du rayonnement.

3. La dépendance de la sensibilité à l'égard de la température et de la pression se manifeste par le fait que, dans le cas des systèmes à chambre d'ionisation non scellée, la masse calculée varie en fonction de la température et de la pression de l'air. Cela nécessite également un facteur de correction par lequel la lecture doit être multipliée pour obtenir la valeur correcte de la quantité mesurée, si la sensibilité du système de mesure n'a pas été ajustée au préalable à l'aide d'un courant de référence.

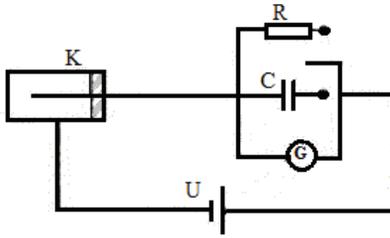


Fig. 6.2. Schéma de principe d'une chambre d'ionisation pour la mesure du débit de dose ou de la dose absorbée

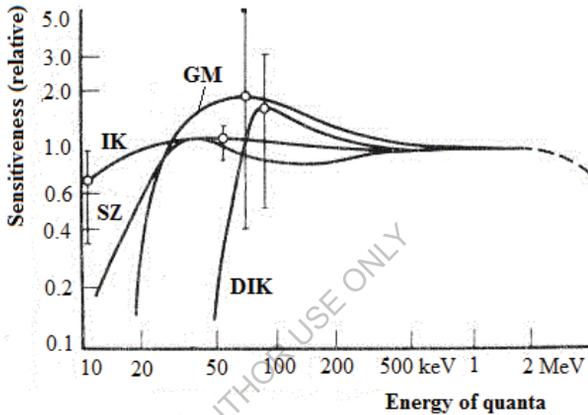


Fig. 6.3. Dépendances typiques de la sensibilité de différents détecteurs de rayonnement en fonction du niveau d'énergie (valeurs moyennes pour un grand nombre de détecteurs individuels) et écarts maximaux dans la région critique. GM - compteur Geiger-Muller ; IK - chambre d'ionisation ; SZ - compteur à scintillation ; DIK - chambre d'ionisation à haute pression.

6.3. Transducteurs de mesure de l'ionisation

La figure 6.4 montre le schéma structurel de l'un des transducteurs d'ionisation à isotope radioactif. L'appareil est conçu pour mesurer en continu l'épaisseur d'une bande en mouvement ou, par exemple, d'un acier laminé.

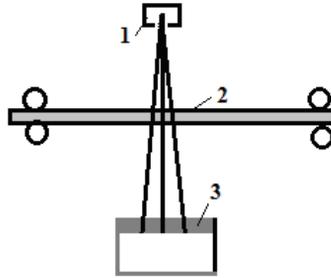


Fig. 6.4. Schéma du transducteur d'ionisation pour la mesure de l'épaisseur du ruban.

Le principe de fonctionnement de l'appareil est le suivant. Le rayonnement radioactif de l'isotope 1 est partiellement absorbé par le produit 2. La quantité d'énergie reçue par l'indicateur 3 dépend du matériau et de l'épaisseur du produit. L'indicateur 3 est relié, par l'intermédiaire d'un amplificateur, au système de mesure calibré en valeurs de la valeur mesurée.

La figure 6.5 montre des schémas de dispositifs de jauge de niveau et de compteur de pression de gaz fonctionnant sur le principe de l'ionisation.

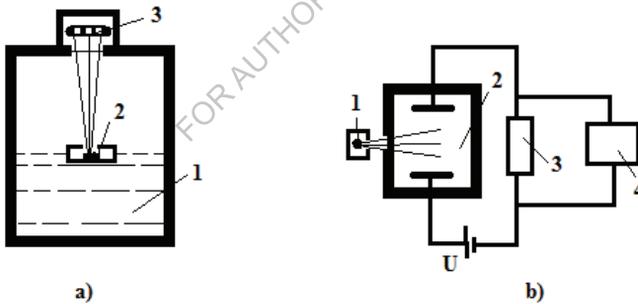


Fig. 6.5. a - schéma d'une jauge de niveau à ionisation, b - schéma d'un dispositif de mesure de la pression du gaz.

Le flotteur 2 contenant un isotope radioactif flotte à la surface du liquide 1 (fig. 6.5.a). L'indicateur 3, qui perçoit le rayonnement, est situé au-dessus du flotteur. Lorsque le niveau du liquide change, la distance entre la source de rayonnement et l'indicateur et, par conséquent, la quantité

d'énergie reçue par l'indicateur changeant. Le niveau de liquide est ainsi surveillé.

La figure 6.5.b montre le schéma structurel du compteur de pression de gaz à ionisation. Sous l'influence du rayonnement radioactif de l'isotope 1, l'ionisation du gaz se produit dans le récipient 2. L'intensité de l'ionisation varie en fonction de la pression du gaz. Par conséquent, le courant d'ionisation circulant dans le circuit sous l'action de la tension appliquée U change. L'appareil de mesure est relié à la résistance 3, sur laquelle la chute de tension est créée par le courant d'ionisation.

Les analyseurs de gaz par ionisation sont dotés d'un dispositif similaire.

6.4. Chambre d'ionisation. Rayonnement radioactif. Compteurs

Dans le cas le plus simple, la chambre d'ionisation est un dispositif composé de deux plaques métalliques isolées l'une de l'autre et séparées par un espace gazeux (fig. 6.6).

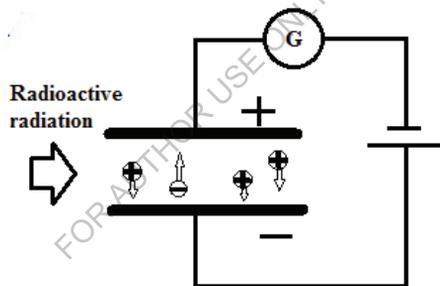


Fig. 6.6. Schéma et principe de fonctionnement d'une chambre d'ionisation.

Tout condensateur d'air peut servir de chambre d'ionisation. L'espace entre les plaques est appelé le volume de travail de la chambre. Si une tension constante est appliquée à une plaque, il se forme un espace avec un champ électrique dont les lignes de force sont dirigées de la plaque positive vers la plaque négative. Une force agit sur une particule chargée électriquement placée dans le champ électrique et celle-ci se déplace le long d'une trajectoire qui coïncide avec la direction des lignes du champ électrique. La direction du mouvement des particules chargées positivement coïncide avec la direction des lignes de champ. Les particules négatives se déplacent dans la direction opposée.

Considérons les processus qui se produisent dans le volume de travail de la chambre d'ionisation. En l'absence de tension sur les électrodes de la chambre, les ions et les électrons formés dans le volume de travail sous l'effet du rayonnement radioactif se déplacent au hasard avec les atomes neutres, dont certains atteignent les électrodes. Si une petite tension constante est appliquée aux électrodes, sous l'influence du champ électrique, les ions et les électrons acquièrent un mouvement orienté correspondant aux lignes de champ (fig. 6.6). Les électrons se déplacent vers la plaque anodique chargée positivement et les ions positifs vers la plaque cathodique chargée négativement. La vitesse de déplacement des ions positifs lourds est des milliers et des dizaines de milliers de fois inférieure à la vitesse des électrons légers.

À basse tension, le champ de l'électrode est faible et les particules se déplacent lentement. Par conséquent, la plupart d'entre elles se recombinent et n'atteignent pas les électrodes. Elles se transforment en particules de gaz neutre. Par conséquent, le courant dans le circuit externe sera très faible.

L'intensité du courant d'ionisation est égale à la charge électrique totale apportée par les particules chargées à la surface de l'électrode pendant une seconde. Plus il y a d'ions sur l'électrode, plus le courant est important. Ce courant est enregistré à l'aide d'un instrument électrique connecté au circuit de la chambre.

Lorsque la tension appliquée aux plaques augmente, l'intensité du champ électrique augmente et un nombre croissant de particules chargées, qui n'ont pas eu le temps de se recombiner, tombent sur les électrodes. L'intensité du courant dans le circuit externe augmente (fig. 6.7, de O à A).

Ensuite, à une certaine tension U_1 , l'intensité du champ électrique augmente, de sorte que toutes les particules chargées formées par l'ionisateur externe dans le volume de travail de la chambre tombent sur les électrodes. Dans ce cas, le courant dans le circuit externe est déterminé uniquement par la capacité d'ionisation du rayonnement. Si la capacité d'ionisation du rayonnement ne change pas, le courant dans la chambre ne change pas (courbe A-B). Ce courant est appelé courant de saturation de la chambre.

Lorsque la tension est encore augmentée jusqu'à U_2 , le courant circulant dans le circuit de la chambre recommence à augmenter, d'abord lentement, puis de plus en plus rapidement (partie de la courbe au-dessus du point). Cela est dû au fait qu'à des tensions supérieures à U_2 , l'intensité du champ électrique à l'intérieur de la chambre augmente de sorte que les

électrons acquièrent des vitesses suffisantes pour ioniser les atomes de gaz neutres lorsqu'ils se rencontrent. Par conséquent, le courant dans le circuit externe est déterminé par la quantité totale de charges formées sous l'influence de l'ionisateur externe et sous l'action des électrons ionisants piégés à l'intérieur du volume de travail de la chambre.

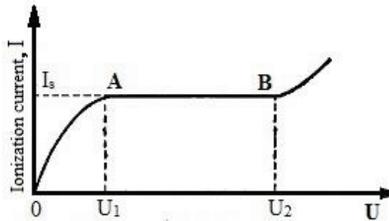


Fig. 6.7. Caractéristique volt-ampère d'une chambre d'ionisation.

La courbe de dépendance du courant d'ionisation de la chambre par rapport à l'ampleur de la tension appliquée est appelée caractéristique volt-ampère.

Les chambres d'ionisation fonctionnent généralement dans la zone de saturation du courant. L'intensité de ce courant étant proportionnelle au nombre d'ions produits, elle peut servir à mesurer la capacité d'ionisation du rayonnement.

En fonction de leur utilisation, les chambres d'ionisation sont de deux types :

- Une chambre utilisée pour mesurer l'ionisation totale causée par le passage à travers elle d'un nombre significatif de particules ionisantes est appelée chambre d'ionisation intégratrice. L'ampleur du courant de saturation est égale au produit du nombre de paires d'ions produites par seconde et par centimètre cube de la chambre, de sa polarisation et de la charge de chaque ion. Par conséquent, la valeur du courant de saturation peut servir de mesure de la dose de rayonnement.

- Le deuxième type est celui des chambres d'ionisation de comptage, qui peuvent être utilisées pour tester et déterminer la capacité d'ionisation de toute particule ionisante unique (par exemple, une particule α) capturée dans le volume de travail de la chambre.

Chambre d'ionisation Geiger-Muller. La figure 6.8 montre un appareil constitué d'un cylindre métallique, sur l'axe duquel un filament métallique est tendu sur des isolateurs. Un tel dispositif est appelé compteur

à décharge. La figure 6.8 montre la section transversale du compteur. Le cylindre est relié à la borne négative de la batterie et est appelé cathode. L'anode est reliée à la résistance de charge.

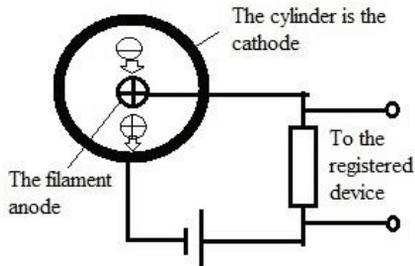


Fig. 6.8. Schéma et fonctionnement du compteur d'ionisation

Si une particule ionisante traverse le volume de travail du compteur, des ions positifs et des électrons apparaissent dans la chambre, qui, sous l'action du champ électrique, se déplacent vers les électrodes : les électrons vers le filant, les ions vers le cylindre. Une impulsion de courant circule dans le circuit externe, ce qui forme une impulsion de chute de tension sur la résistance de charge. Cette impulsion de tension peut être enregistrée à l'aide d'un appareil d'enregistrement.

La quantité d'électricité contenue dans l'impulsion de courant dépend de l'ampleur de la tension appliquée. En général, cette dépendance est illustrée à la figure 6.7, et les principes physiques de fonctionnement du compteur sont similaires à ceux de la chambre d'ionisation (figure 6.6).

En fonction de la tension appliquée, le compteur peut fonctionner comme une chambre d'ionisation, un compteur proportionnel et un compteur Geiger-Muller à décharge. Toutefois, dans la pratique, il s'agit de trois types d'appareils différents, de conception différente, et qui, selon l'utilisation prévue, utilisent l'un ou l'autre des appareils.

Conception de compteurs. Conception du compteur gamma. La conception des compteurs à décharge est constamment améliorée et modifiée. Les compteurs peuvent être divisés en plusieurs groupes : compteurs gamma, dits compteurs bêta-gamma, compteurs de *particules* β douces, dont la conception doit comporter une fenêtre pour le passage des particules β douces, compteurs de photons (quanta de lumière) et autres.

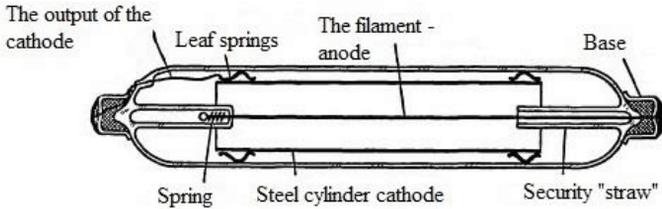


Fig. 6.9. Vue schématique du compteur gamma en coupe

Le dispositif du compteur gamma est assez simple. Un compteur gamma contenant de l'argon est illustré à la figure 6.9. Ici, un cylindre à paroi mince - cathode en acier inoxydable - est inséré dans un cylindre en verre. Le contact est sorti du cylindre à l'aide d'un fil de molybdène. Un filament métallique (anode) est fixé à l'axe. Le compteur est rempli d'un mélange d'halogènes (néon-argon-brome) et peut être utilisé en mode impulsif (comptage) et en mode courant. Ce compteur appartient à la série STM (steel meter).

En mode impulsion, le compteur a une très longue durée de vie. Les compteurs de la série STM permettent des taux de comptage de cent mille impulsions par minute et plus, ce qui maintient la proportionnalité entre l'intensité de l'irradiation et le taux de comptage jusqu'à deux cent mille impulsions par minute.

Cette caractéristique du taux de comptage correspond à une dose d'environ 0,25 (R / h). Le débit de dose jusqu'auquel le taux de comptage lui reste directement proportionnel, ainsi que la valeur de la dose maximale du fonctionnement du compteur en mode courant, dépendent des dimensions géométriques. Plus le diamètre de la cathode et la longueur de fonctionnement sont petits, plus la limite de dose est grande et plus la proportionnalité entre le taux de comptage et le débit de dose de rayonnement est maintenue longtemps.

Lors de la sélection de la longueur de travail, les rapports de longueur de travail sont ajustés dans le compteur pour être au moins deux fois le diamètre de la cathode. Avec une longueur de travail plus petite, le compteur fonctionne également, mais la valeur de la décharge d'étincelles potentielle augmente considérablement.

Par exemple, pour un compteur ayant un diamètre de cathode de 10 mm et une longueur de travail égale à 5 diamètres (50 mm), à un certain remplissage de gaz, la tension de démarrage est de 400 V, à une longueur de

travail égale à deux diamètres de cathode - 405, à une longueur de travail égale à un diamètre de cathode - 450 V, et à une longueur de travail égale à 0,5 diamètre de cathode, le potentiel d'allumage augmente jusqu'à 500 V.

Lorsque la longueur utile du filament diminue, la longueur du plateau de comptage et les caractéristiques diminuent.

FOR AUTHOR USE ONLY

Bibliographie

1. Radiation Technologies and Applications in Materials Science. Édité par Subhendu Ray Chowdhuru. -Taylor & Francis, 2022, 396 p. ISBN 9781032343945
2. Mykola Gorbachuk. MATÉRIAUX ÉLECTROTECHNIQUES. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Royaume-Uni, 2024, 112p. ISBN : 978-620-3-46212-8.
3. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki : Navchal'niy posibnik* [Cours général de physique : guide d'étude], T. 1-3. - K. : *Tekhnika*, 2001.
4. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Physique des dispositifs semi-conducteurs]. M. : *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
5. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Semiconducteurs].- L. *Nauka* 1967. 439p.
6. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Répertoire "Mesures dans l'industrie"] 1-3 volumes. M. : *Metallurgiya*, 1990.

Annexe

Tableau 1.

Dépendance de la FEM d'un thermocouple différentiel chrome-cuivre (Тип L) par rapport à la température de la jonction de travail (table d'étalonnage).

Plage de température de -20°C à $+200^{\circ}\text{C}$

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	EMF, mV									
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
-0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,93
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,23	14,33	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38

Tableau 2.

Dépendance de la FEM d'un thermocouple différentiel en chromel-alumel (**type K**) par rapport à la température de la jonction de travail (table d'étalonnage).

Plage de température de -270 °C à 1370 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-270	-6.458										
-260	-6.441	-6.444	-6.446	-6.448	-6.450	-6.452	-6.453	-6.455	-6.456	-6.457	-6.458
-250	-6.404	-6.408	-6.413	-6.417	-6.421	-6.425	-6.429	-6.432	-6.435	-6.438	-6.441
-240	-6.344	-6.351	-6.358	-6.364	-6.370	-6.377	-6.382	-6.388	-6.393	-6.399	-6.404
-230	-6.262	-6.271	-6.280	-6.289	-6.297	-6.306	-6.314	-6.322	-6.329	-6.337	-6.344
-220	-6.158	-6.170	-6.181	-6.192	-6.202	-6.213	-6.223	-6.233	-6.243	-6.252	-6.262
-210	-6.035	-6.048	-6.061	-6.074	-6.087	-6.099	-6.111	-6.123	-6.135	-6.147	-6.158
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.585	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.105	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138

Suite du tableau 2

200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539	200
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940	210
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343	220
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747	230
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153	240
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561	250
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971	260
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382	270
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795	280
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209	290
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624	300
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040	310
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457	320
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874	330
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293	340
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713	350
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133	360
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554	370
380	15.554	15.595	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975	380
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397	390
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820	400
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243	410
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667	420
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091	430
440	18.091	18.134	18.176	18.219	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516	440
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941	450
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366	460
470	19.368	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792	470
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218	480
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644	490
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071	500
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497	510
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924	520
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350	530
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776	540
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203	550
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629	560
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055	570
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480	580
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905	590
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330	600
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755	610
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179	620
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602	630
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025	640
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447	650
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869	660
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289	670
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710	680
690	28.710	28.752	28.794	28.836	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129	690

Suite du tableau 2

700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
710	29.546	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.965	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.289	32.330	32.371	32.412	32.453
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.094
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867	34.908
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.725
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.255	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802	48.838
1200	48.838	48.875	48.911	48.946	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166	49.202
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.655	52.689	52.724	52.759
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819
1370	54.819	54.852	54.886								1370

Tableau 3.

Dépendance de la FEM d'un thermocouple différentiel en cuivre - constantan (**type T**) par rapport à la température de la jonction de travail (tableau d'étalonnage).

Plage de température de -270 °C à 400 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-270	-8,258										
-260	-8,232	-8,236	-8,239	-8,242	-8,245	-8,248	-8,251	-8,253	-8,255	-8,256	-8,258
-250	-8,180	-8,187	-8,193	-8,198	-8,204	-8,209	-8,214	-8,219	-8,223	-8,228	-8,232
-240	-8,105	-8,114	-8,122	-8,130	-8,138	-8,146	-8,153	-8,160	-8,167	-8,174	-8,180
-230	-8,007	-8,017	-8,028	-8,038	-8,049	-8,059	-8,068	-8,078	-8,087	-8,096	-8,105
-220	-5,888	-5,901	-5,914	-5,928	-5,938	-5,950	-5,962	-5,973	-5,985	-5,996	-6,007
-210	-5,753	-5,767	-5,782	-5,795	-5,809	-5,823	-5,836	-5,850	-5,863	-5,876	-5,888
-200	-5,603	-5,619	-5,634	-5,650	-5,665	-5,680	-5,695	-5,710	-5,724	-5,739	-5,753
-190	-5,439	-5,456	-5,473	-5,489	-5,506	-5,523	-5,539	-5,555	-5,571	-5,587	-5,603
-180	-5,261	-5,279	-5,297	-5,316	-5,334	-5,351	-5,369	-5,387	-5,404	-5,421	-5,439
-170	-5,070	-5,089	-5,109	-5,128	-5,146	-5,167	-5,186	-5,205	-5,224	-5,242	-5,261
-160	-4,865	-4,886	-4,907	-4,928	-4,949	-4,969	-4,989	-5,010	-5,030	-5,050	-5,070
-150	-4,648	-4,671	-4,693	-4,715	-4,737	-4,759	-4,780	-4,802	-4,823	-4,844	-4,865
-140	-4,419	-4,443	-4,466	-4,489	-4,512	-4,535	-4,558	-4,581	-4,604	-4,628	-4,649
-130	-4,177	-4,202	-4,226	-4,251	-4,275	-4,300	-4,324	-4,348	-4,372	-4,395	-4,419
-120	-3,923	-3,949	-3,975	-4,000	-4,026	-4,052	-4,077	-4,102	-4,127	-4,152	-4,177
-110	-3,657	-3,684	-3,711	-3,738	-3,765	-3,791	-3,818	-3,844	-3,871	-3,897	-3,923
-100	-3,379	-3,407	-3,435	-3,463	-3,491	-3,519	-3,547	-3,574	-3,602	-3,629	-3,657
-90	-3,089	-3,118	-3,148	-3,177	-3,206	-3,235	-3,264	-3,293	-3,322	-3,350	-3,379
-80	-2,788	-2,818	-2,849	-2,879	-2,910	-2,940	-2,970	-3,000	-3,030	-3,059	-3,089
-70	-2,476	-2,507	-2,539	-2,571	-2,602	-2,633	-2,664	-2,695	-2,726	-2,757	-2,788
-60	-2,153	-2,186	-2,218	-2,251	-2,283	-2,316	-2,348	-2,380	-2,412	-2,444	-2,476
-50	-1,819	-1,853	-1,887	-1,920	-1,954	-1,987	-2,021	-2,054	-2,087	-2,120	-2,153
-40	-1,475	-1,510	-1,545	-1,579	-1,614	-1,648	-1,683	-1,717	-1,751	-1,785	-1,819
-30	-1,121	-1,157	-1,192	-1,228	-1,264	-1,299	-1,335	-1,370	-1,405	-1,440	-1,475
-20	-0,757	-0,794	-0,830	-0,867	-0,904	-0,940	-0,976	-1,013	-1,049	-1,085	-1,121
-10	-0,383	-0,421	-0,459	-0,496	-0,534	-0,571	-0,608	-0,646	-0,683	-0,720	-0,757
0	0,000	-0,039	-0,077	-0,116	-0,154	-0,193	-0,231	-0,269	-0,307	-0,345	-0,383
0	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,312	0,352	0,391
10	0,391	0,431	0,470	0,510	0,549	0,589	0,629	0,669	0,709	0,749	0,790
20	0,790	0,830	0,870	0,911	0,951	0,992	1,033	1,074	1,114	1,155	1,196
30	1,198	1,238	1,279	1,320	1,362	1,403	1,445	1,486	1,528	1,570	1,612
40	1,612	1,654	1,696	1,738	1,780	1,823	1,865	1,908	1,950	1,993	2,036
50	2,036	2,079	2,122	2,165	2,208	2,251	2,294	2,338	2,381	2,425	2,468
60	2,468	2,512	2,556	2,600	2,643	2,687	2,732	2,776	2,820	2,864	2,909
70	2,909	2,953	2,998	3,043	3,087	3,132	3,177	3,222	3,267	3,312	3,358
80	3,358	3,403	3,448	3,494	3,539	3,585	3,631	3,677	3,722	3,768	3,814
90	3,814	3,860	3,907	3,953	3,999	4,046	4,092	4,138	4,185	4,232	4,279
100	4,279	4,325	4,372	4,419	4,466	4,513	4,561	4,608	4,655	4,702	4,750
110	4,750	4,798	4,845	4,893	4,941	4,988	5,036	5,084	5,132	5,180	5,228
120	5,228	5,277	5,325	5,373	5,422	5,470	5,519	5,567	5,616	5,665	5,714
130	5,714	5,763	5,812	5,861	5,910	5,959	6,008	6,057	6,107	6,156	6,206
140	6,206	6,255	6,305	6,355	6,404	6,454	6,504	6,554	6,604	6,654	6,704
150	6,704	6,754	6,805	6,855	6,905	6,956	7,006	7,057	7,107	7,158	7,209
160	7,209	7,260	7,310	7,361	7,412	7,463	7,515	7,566	7,617	7,668	7,720
170	7,720	7,771	7,823	7,874	7,926	7,977	8,029	8,081	8,133	8,185	8,237
180	8,237	8,289	8,341	8,393	8,445	8,497	8,550	8,602	8,654	8,707	8,759
190	8,759	8,812	8,865	8,917	8,970	9,023	9,076	9,129	9,182	9,235	9,288

Suite du tableau 3

200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822	200
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362	210
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907	220
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458	230
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013	240
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574	250
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139	260
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709	270
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283	280
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862	290
300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.388	15.445	300
310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.914	15.973	16.032	310
320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564	16.624	320
330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159	17.219	330
340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759	17.819	340
350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362	18.422	350
360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969	19.030	360
370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579	19.641	370
380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193	20.255	380
390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810	20.872	390
400	20.872											400

FOR AUTHOR USE ONLY

Tableau 4.

Dépendance de la FEM d'un thermocouple différentiel c platine-30% rhodium/platine-6% rhodium (**type B**) par rapport à la température de la jonction de travail (tableau d'étalonnage).

Plage de température de 0 °C à 1820 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002
10	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003
20	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
30	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
50	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
60	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011
70	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017
80	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.025
90	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033
100	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043
110	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053
120	0.053	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.062	0.063	0.064	0.065
130	0.065	0.066	0.068	0.069	0.070	0.072	0.073	0.074	0.075	0.077	0.078
140	0.078	0.079	0.081	0.082	0.084	0.085	0.086	0.088	0.089	0.091	0.092
150	0.092	0.094	0.095	0.096	0.098	0.099	0.101	0.102	0.104	0.106	0.107
160	0.107	0.109	0.110	0.112	0.113	0.115	0.117	0.118	0.120	0.122	0.123
170	0.123	0.125	0.127	0.128	0.130	0.132	0.134	0.135	0.137	0.139	0.141
180	0.141	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.157	0.159
190	0.159	0.161	0.163	0.165	0.166	0.168	0.170	0.172	0.174	0.176	0.178
200	0.178	0.180	0.182	0.184	0.186	0.188	0.190	0.192	0.195	0.197	0.199
210	0.199	0.201	0.203	0.205	0.207	0.209	0.212	0.214	0.216	0.218	0.220
220	0.220	0.222	0.225	0.227	0.229	0.231	0.234	0.236	0.238	0.241	0.243
230	0.243	0.245	0.248	0.250	0.252	0.255	0.257	0.259	0.262	0.264	0.267
240	0.267	0.269	0.271	0.274	0.276	0.279	0.281	0.284	0.286	0.289	0.291
250	0.291	0.294	0.296	0.299	0.301	0.304	0.307	0.309	0.312	0.314	0.317
260	0.317	0.320	0.322	0.325	0.328	0.330	0.333	0.336	0.338	0.341	0.344
270	0.344	0.347	0.349	0.352	0.355	0.358	0.360	0.363	0.366	0.369	0.372
280	0.372	0.375	0.377	0.380	0.383	0.386	0.389	0.392	0.395	0.398	0.401
290	0.401	0.404	0.407	0.410	0.413	0.416	0.419	0.422	0.425	0.428	0.431
300	0.431	0.434	0.437	0.440	0.443	0.446	0.449	0.452	0.455	0.458	0.462
310	0.462	0.465	0.468	0.471	0.474	0.478	0.481	0.484	0.487	0.490	0.494
320	0.494	0.497	0.500	0.503	0.507	0.510	0.513	0.517	0.520	0.523	0.527
330	0.527	0.530	0.533	0.537	0.540	0.544	0.547	0.550	0.554	0.557	0.561
340	0.561	0.564	0.568	0.571	0.575	0.578	0.582	0.585	0.589	0.592	0.596
350	0.596	0.599	0.603	0.607	0.610	0.614	0.617	0.621	0.625	0.628	0.632
360	0.632	0.636	0.639	0.643	0.647	0.650	0.654	0.658	0.662	0.665	0.669
370	0.669	0.673	0.677	0.680	0.684	0.688	0.692	0.696	0.700	0.703	0.707
380	0.707	0.711	0.715	0.719	0.723	0.727	0.731	0.735	0.738	0.742	0.746
390	0.746	0.750	0.754	0.758	0.762	0.766	0.770	0.774	0.778	0.782	0.787
400	0.787	0.791	0.795	0.799	0.803	0.807	0.811	0.815	0.819	0.824	0.828
410	0.828	0.832	0.836	0.840	0.844	0.849	0.853	0.857	0.861	0.865	0.870
420	0.870	0.874	0.878	0.883	0.887	0.891	0.896	0.900	0.904	0.909	0.913
430	0.913	0.917	0.922	0.926	0.930	0.935	0.939	0.944	0.948	0.953	0.957
440	0.957	0.961	0.966	0.970	0.975	0.979	0.984	0.988	0.993	0.997	1.002
450	1.002	1.007	1.011	1.016	1.020	1.025	1.030	1.034	1.039	1.043	1.048
460	1.048	1.053	1.057	1.062	1.067	1.071	1.076	1.081	1.086	1.090	1.095
470	1.095	1.100	1.105	1.109	1.114	1.119	1.124	1.129	1.133	1.138	1.143
480	1.143	1.148	1.153	1.158	1.163	1.167	1.172	1.177	1.182	1.187	1.192
490	1.192	1.197	1.202	1.207	1.212	1.217	1.222	1.227	1.232	1.237	1.242

Suite du tableau 4

500	1.242	1.247	1.252	1.257	1.262	1.267	1.272	1.277	1.282	1.288	1.293	500
510	1.293	1.298	1.303	1.308	1.313	1.318	1.324	1.329	1.334	1.339	1.344	510
520	1.344	1.350	1.355	1.360	1.365	1.371	1.376	1.381	1.387	1.392	1.397	520
530	1.397	1.402	1.408	1.413	1.418	1.424	1.429	1.435	1.440	1.445	1.451	530
540	1.451	1.456	1.462	1.467	1.472	1.478	1.483	1.489	1.494	1.500	1.505	540
550	1.505	1.511	1.516	1.522	1.527	1.533	1.539	1.544	1.550	1.555	1.561	550
560	1.561	1.568	1.572	1.578	1.583	1.589	1.595	1.600	1.606	1.612	1.617	560
570	1.617	1.623	1.629	1.634	1.640	1.646	1.652	1.657	1.663	1.669	1.675	570
580	1.675	1.680	1.686	1.692	1.698	1.704	1.709	1.715	1.721	1.727	1.733	580
590	1.733	1.739	1.745	1.750	1.756	1.762	1.768	1.774	1.780	1.786	1.792	590
600	1.792	1.798	1.804	1.810	1.816	1.822	1.828	1.834	1.840	1.846	1.852	600
610	1.852	1.858	1.864	1.870	1.876	1.882	1.888	1.894	1.901	1.907	1.913	610
620	1.913	1.919	1.925	1.931	1.937	1.944	1.950	1.956	1.962	1.968	1.975	620
630	1.975	1.981	1.987	1.993	1.999	2.006	2.012	2.018	2.025	2.031	2.037	630
640	2.037	2.043	2.050	2.056	2.062	2.069	2.075	2.082	2.088	2.094	2.101	640
650	2.101	2.107	2.113	2.120	2.126	2.133	2.139	2.146	2.152	2.158	2.165	650
660	2.165	2.171	2.178	2.184	2.191	2.197	2.204	2.210	2.217	2.224	2.230	660
670	2.230	2.237	2.243	2.250	2.256	2.263	2.270	2.276	2.283	2.289	2.296	670
680	2.296	2.303	2.309	2.316	2.323	2.329	2.336	2.343	2.350	2.356	2.363	680
690	2.363	2.370	2.376	2.383	2.390	2.397	2.403	2.410	2.417	2.424	2.431	690
700	2.431	2.437	2.444	2.451	2.458	2.465	2.472	2.479	2.485	2.492	2.499	700
710	2.499	2.506	2.513	2.520	2.527	2.534	2.541	2.548	2.555	2.562	2.569	710
720	2.569	2.576	2.583	2.590	2.597	2.604	2.611	2.618	2.625	2.632	2.639	720
730	2.639	2.646	2.653	2.660	2.667	2.674	2.681	2.688	2.695	2.703	2.710	730
740	2.710	2.717	2.724	2.731	2.738	2.746	2.753	2.760	2.767	2.775	2.782	740
750	2.782	2.789	2.796	2.803	2.811	2.818	2.825	2.833	2.840	2.847	2.854	750
760	2.854	2.862	2.869	2.876	2.884	2.891	2.898	2.906	2.913	2.921	2.928	760
770	2.928	2.935	2.943	2.950	2.958	2.966	2.973	2.980	2.987	2.995	3.002	770
780	3.002	3.010	3.017	3.025	3.032	3.040	3.047	3.055	3.062	3.070	3.078	780
790	3.078	3.085	3.093	3.100	3.108	3.116	3.123	-3.131	3.138	3.146	3.154	790
800	3.154	3.161	3.169	3.177	3.184	3.192	3.200	3.207	3.215	3.223	3.230	800
810	3.230	3.238	3.246	3.254	3.261	3.269	3.277	3.285	3.292	3.300	3.308	810
820	3.308	3.316	3.324	3.331	3.339	3.347	3.355	3.363	3.371	3.379	3.388	820
830	3.388	3.394	3.402	3.410	3.418	3.426	3.434	3.442	3.450	3.458	3.466	830
840	3.466	3.474	3.482	3.490	3.498	3.506	3.514	3.522	3.530	3.538	3.546	840
850	3.546	3.554	3.562	3.570	3.578	3.586	3.594	3.602	3.610	3.618	3.626	850
860	3.626	3.634	3.643	3.651	3.659	3.667	3.675	3.683	3.692	3.700	3.708	860
870	3.708	3.716	3.724	3.732	3.741	3.749	3.757	3.765	3.774	3.782	3.790	870
880	3.790	3.798	3.807	3.815	3.823	3.832	3.840	3.848	3.857	3.865	3.873	880
890	3.873	3.882	3.890	3.898	3.907	3.915	3.923	3.932	3.940	3.949	3.957	890
900	3.957	3.965	3.974	3.982	3.991	3.999	4.008	4.016	4.024	4.033	4.041	900
910	4.041	4.050	4.058	4.067	4.075	4.084	4.093	4.101	4.110	4.118	4.127	910
920	4.127	4.135	4.144	4.152	4.161	4.170	4.178	4.187	4.195	4.204	4.213	920
930	4.213	4.221	4.230	4.239	4.247	4.256	4.265	4.273	4.282	4.291	4.299	930
940	4.299	4.308	4.317	4.326	4.334	4.343	4.352	4.360	4.369	4.378	4.387	940
950	4.387	4.396	4.404	4.413	4.422	4.431	4.440	4.448	4.457	4.466	4.475	950
960	4.475	4.484	4.493	4.501	4.510	4.519	4.528	4.537	4.546	4.555	4.564	960
970	4.564	4.573	4.582	4.591	4.599	4.608	4.617	4.626	4.635	4.644	4.653	970
980	4.653	4.662	4.671	4.680	4.689	4.698	4.707	4.716	4.725	4.734	4.743	980
990	4.743	4.753	4.762	4.771	4.780	4.789	4.798	4.807	4.816	4.825	4.834	990

Suite du tableau 4

1000	4.834	4.843	4.853	4.862	4.871	4.880	4.889	4.898	4.908	4.917	4.928
1010	4.926	4.935	4.944	4.954	4.963	4.972	4.981	4.990	5.000	5.009	5.018
1020	5.018	5.027	5.037	5.046	5.056	5.065	5.074	5.083	5.092	5.102	5.111
1030	5.111	5.120	5.130	5.139	5.148	5.158	5.167	5.176	5.186	5.195	5.205
1040	5.205	5.214	5.223	5.233	5.242	5.252	5.261	5.270	5.280	5.289	5.299
1050	5.299	5.308	5.318	5.327	5.337	5.346	5.356	5.365	5.375	5.384	5.394
1060	5.394	5.403	5.413	5.422	5.432	5.441	5.451	5.460	5.470	5.480	5.489
1070	5.489	5.499	5.508	5.518	5.528	5.537	5.547	5.556	5.566	5.576	5.585
1080	5.585	5.595	5.605	5.614	5.624	5.634	5.643	5.653	5.663	5.672	5.682
1090	5.682	5.692	5.702	5.711	5.721	5.731	5.740	5.750	5.760	5.770	5.780
1100	5.780	5.789	5.799	5.809	5.819	5.828	5.838	5.848	5.858	5.868	5.878
1110	5.878	5.887	5.897	5.907	5.917	5.927	5.937	5.947	5.956	5.966	5.976
1120	5.976	5.986	5.996	6.006	6.016	6.026	6.036	6.046	6.056	6.066	6.076
1130	6.075	6.085	6.095	6.105	6.115	6.125	6.135	6.145	6.155	6.165	6.175
1140	6.175	6.185	6.195	6.205	6.215	6.225	6.235	6.245	6.255	6.266	6.276
1150	6.276	6.286	6.296	6.306	6.316	6.326	6.336	6.346	6.356	6.367	6.377
1160	6.377	6.387	6.397	6.407	6.417	6.427	6.438	6.448	6.458	6.468	6.478
1170	6.478	6.488	6.499	6.509	6.519	6.529	6.539	6.550	6.560	6.570	6.580
1180	6.580	6.591	6.601	6.611	6.621	6.632	6.642	6.652	6.663	6.673	6.683
1190	6.683	6.693	6.704	6.714	6.724	6.735	6.745	6.755	6.766	6.776	6.786
1200	6.786	6.797	6.807	6.818	6.828	6.838	6.849	6.859	6.869	6.880	6.890
1210	6.890	6.901	6.911	6.922	6.932	6.942	6.953	6.963	6.974	6.984	6.995
1220	6.995	7.005	7.016	7.026	7.037	7.047	7.058	7.068	7.079	7.089	7.100
1230	7.100	7.110	7.121	7.131	7.142	7.152	7.163	7.173	7.184	7.194	7.205
1240	7.205	7.216	7.226	7.237	7.247	7.258	7.269	7.279	7.290	7.300	7.311
1250	7.311	7.322	7.332	7.343	7.353	7.364	7.375	7.385	7.396	7.407	7.417
1260	7.417	7.428	7.439	7.449	7.460	7.471	7.482	7.492	7.503	7.514	7.524
1270	7.524	7.535	7.546	7.557	7.567	7.578	7.589	7.600	7.610	7.621	7.632
1280	7.632	7.643	7.653	7.664	7.675	7.686	7.697	7.707	7.718	7.729	7.740
1290	7.740	7.751	7.761	7.772	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.837	7.848
1300	7.848	7.859	7.870	7.881	7.892	7.903	7.914	7.924	7.935	7.946	7.957
1310	7.957	7.968	7.979	7.990	8.001	8.012	8.023	8.034	8.045	8.056	8.066
1320	8.066	8.077	8.088	8.099	8.110	8.121	8.132	8.143	8.154	8.165	8.176
1330	8.176	8.187	8.198	8.209	8.220	8.231	8.242	8.253	8.264	8.275	8.286
1340	8.286	8.298	8.309	8.320	8.331	8.342	8.353	8.364	8.375	8.386	8.397
1350	8.397	8.408	8.419	8.430	8.441	8.453	8.464	8.475	8.486	8.497	8.508
1360	8.508	8.519	8.530	8.542	8.553	8.564	8.575	8.586	8.597	8.608	8.620
1370	8.620	8.631	8.642	8.653	8.664	8.675	8.687	8.698	8.709	8.720	8.731
1380	8.731	8.743	8.754	8.765	8.776	8.787	8.799	8.810	8.821	8.832	8.844
1390	8.844	8.856	8.866	8.877	8.889	8.900	8.911	8.922	8.934	8.946	8.956
1400	8.956	8.967	8.979	8.990	9.001	9.013	9.024	9.035	9.047	9.058	9.069
1410	9.069	9.080	9.092	9.103	9.114	9.126	9.137	9.148	9.160	9.171	9.182
1420	9.182	9.194	9.205	9.216	9.228	9.239	9.251	9.262	9.273	9.285	9.296
1430	9.296	9.307	9.319	9.330	9.342	9.353	9.364	9.376	9.387	9.398	9.410
1440	9.410	9.421	9.433	9.444	9.456	9.467	9.478	9.490	9.501	9.513	9.524
1450	9.524	9.536	9.547	9.558	9.570	9.581	9.593	9.604	9.616	9.627	9.639
1460	9.639	9.650	9.662	9.673	9.684	9.696	9.707	9.719	9.730	9.742	9.753
1470	9.753	9.765	9.776	9.788	9.799	9.811	9.822	9.834	9.845	9.857	9.868
1480	9.868	9.880	9.891	9.903	9.914	9.926	9.937	9.949	9.961	9.972	9.984
1490	9.984	9.995	10.007	10.018	10.030	10.041	10.053	10.064	10.076	10.088	10.099

1500	10.099	10.111	10.122	10.134	10.145	10.157	10.168	10.180	10.192	10.203	10.215	1500
1510	10.215	10.226	10.238	10.249	10.261	10.273	10.284	10.296	10.307	10.319	10.331	1510
1520	10.331	10.342	10.354	10.365	10.377	10.389	10.400	10.412	10.423	10.435	10.447	1520
1530	10.447	10.458	10.470	10.482	10.493	10.505	10.516	10.528	10.540	10.551	10.563	1530
1540	10.563	10.575	10.586	10.598	10.609	10.621	10.633	10.644	10.656	10.668	10.679	1540
1550	10.679	10.691	10.703	10.714	10.726	10.738	10.749	10.761	10.773	10.784	10.796	1550
1560	10.796	10.808	10.819	10.831	10.843	10.854	10.866	10.877	10.889	10.901	10.913	1560
1570	10.913	10.924	10.936	10.948	10.959	10.971	10.983	10.994	11.006	11.018	11.029	1570
1580	11.029	11.041	11.053	11.064	11.076	11.088	11.099	11.111	11.123	11.134	11.146	1580
1590	11.146	11.158	11.169	11.181	11.193	11.205	11.216	11.228	11.240	11.251	11.263	1590
1600	11.263	11.275	11.286	11.298	11.310	11.321	11.333	11.345	11.357	11.368	11.380	1600
1610	11.380	11.392	11.403	11.415	11.427	11.438	11.450	11.462	11.474	11.485	11.497	1610
1620	11.497	11.509	11.520	11.532	11.544	11.555	11.567	11.579	11.591	11.602	11.614	1620
1630	11.614	11.626	11.637	11.649	11.661	11.673	11.684	11.696	11.708	11.719	11.731	1630
1640	11.731	11.743	11.754	11.766	11.778	11.790	11.801	11.813	11.825	11.836	11.848	1640
1650	11.848	11.860	11.871	11.883	11.895	11.907	11.918	11.930	11.942	11.953	11.965	1650
1660	11.965	11.977	11.988	12.000	12.012	12.024	12.035	12.047	12.059	12.070	12.082	1660
1670	12.082	12.094	12.105	12.117	12.129	12.141	12.152	12.164	12.176	12.187	12.199	1670
1680	12.199	12.211	12.222	12.234	12.246	12.257	12.269	12.281	12.292	12.304	12.316	1680
1690	12.316	12.327	12.339	12.351	12.363	12.374	12.386	12.398	12.409	12.421	12.433	1690
1700	12.433	12.444	12.456	12.468	12.479	12.491	12.503	12.514	12.526	12.538	12.549	1700
1710	12.549	12.561	12.572	12.584	12.596	12.607	12.619	12.631	12.642	12.654	12.666	1710
1720	12.666	12.677	12.689	12.701	12.712	12.724	12.736	12.747	12.759	12.770	12.782	1720
1730	12.782	12.794	12.805	12.817	12.829	12.840	12.852	12.863	12.875	12.887	12.898	1730
1740	12.898	12.910	12.921	12.933	12.945	12.956	12.968	12.980	12.991	13.003	13.014	1740
1750	13.014	13.026	13.037	13.049	13.061	13.072	13.084	13.095	13.107	13.119	13.130	1750
1760	13.130	13.142	13.153	13.165	13.176	13.188	13.200	13.211	13.223	13.234	13.246	1760
1770	13.246	13.257	13.269	13.280	13.292	13.304	13.315	13.327	13.338	13.350	13.361	1770
1780	13.361	13.373	13.384	13.396	13.407	13.419	13.430	13.442	13.453	13.465	13.476	1780
1790	13.476	13.488	13.499	13.511	13.522	13.534	13.545	13.557	13.568	13.580	13.591	1790
1800	13.591	13.603	13.614	13.626	13.637	13.649	13.660	13.672	13.683	13.694	13.706	1800
1810	13.706	13.717	13.729	13.740	13.752	13.763	13.775	13.786	13.797	13.809	13.820	1810
1820	13.820											1820

FOR AUTHOR USE ONLY

**More
Books!**



yes
I want morebooks!

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.morebooks.shop

Achetez vos livres en ligne, vite et bien, sur l'une des librairies en ligne les plus performantes au monde!

En protégeant nos ressources et notre environnement grâce à l'impression à la demande.

La librairie en ligne pour acheter plus vite
www.morebooks.shop



info@omniscryptum.com
www.omniscryptum.com

OMNIScriptum

