



Application des couches métalliques minces à la réalisation de résistances électriques en particulier de résistances électriques de valeurs élevées

B. Vodar

► To cite this version:

B. Vodar. Application des couches métalliques minces à la réalisation de résistances électriques en particulier de résistances électriques de valeurs élevées. Journal de Physique et le Radium, 1956, 17 (3), pp.298-305. 10.1051/jphysrad:01956001703029800 . jpa-00235363

HAL Id: jpa-00235363

<https://hal.science/jpa-00235363>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

APPLICATION DES COUCHES MÉTALLIQUES MINCES A LA RÉALISATION DE RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES EN PARTICULIER DE RÉSISTANCES ÉLECTRIQUES DE VALEURS ÉLEVÉES

Par B. VODAR,

Laboratoire des Hautes Pressions Bellevue (S.-et-O.) (France).

Summary. — Conditions are described under which thin metallic layers on glass may be used as good resistors. The importance of refractory and noble metal is shown. Some data are given on the properties of thin layers resistors : temperature coefficient (which may be widely varied) ; voltage coefficient (almost negligible) power dissipation ; stability (order of 0,1 %).

Are presented some practical devices for making different types of resistors by evaporation under vacuum : In order to use a thicker layer long et narrow films are employed ; procedures in order to make layers of such a shape are given.

A brief description is presented of an interrupted vacuum arc where the evaporated metal is ionised and may be concentrated by an electric field on the usefull area ; this arc is especially interesting for the practical evaporation of high melting metals.

Les conditions imposées aux résistances électriques utilisées dans les circuits électroniques et radioélectriques de toutes sortes deviennent de plus en plus difficiles.

Ces conditions portent principalement sur : la stabilité, les coefficients de température et de tension, le bruit provoqué par le passage du courant (extranoise) ; les températures maxima et minima d'emploi admissibles, la puissance dissipée, la valeur maximum des tensions applicables (résistances haute tension), le comportement en HF, faible encombrement et solidité mécanique, résistance aux agents atmosphériques.

Les principales résistances usuelles sont : les résistances agglomérées, les résistances à base d'oxyde de palladium, les résistances à couches de carbone obtenue par pyrolyse, des résistances bobinées. Les défauts essentiels de ces résistances sont : pour les résistances bobinées, fragilité du fil, self et capacités propres non négligeables même avec des enroulements spéciaux ; encombrement prohibitif pour les valeurs ohmiques élevées ; pour les résistances agglomérées et les résistances à couche de carbone : généralement une stabilité insuffisante et un bruit trop élevé ; leur coefficient de température est variable suivant les réalisations ; leur coefficient de tension est le plus souvent trop élevé.

Des progrès ont été réalisés récemment tels que la réalisation de résistances à couches de carbone contenant du bore, et la réalisation de résistances bobinées de très haute valeur ohmique.

L'application des couches métalliques minces constitue un progrès particulièrement riche en possibilités nouvelles. L'emploi comme résistances des couches métalliques a été tenté il y a longtemps ; les connaissances sur les couches minces étaient alors très fragmentaires et les résistances (faites

d'ailleurs par pulvérisation cathodique et mal protégées), ne jouissaient pas d'une très bonne réputation ; leurs usages étaient limités à la réalisation de résistances de fuite de très grande valeur ohmique.

La formation, la structure et les propriétés électriques des dépôts métalliques minces sont maintenant mieux connus. Aussi peut-on essayer de donner les conditions à remplir pour obtenir des couches satisfaisantes.

Les couches métalliques minces ont une résistivité qui croît lorsque l'épaisseur décroît ; parallèlement, le coefficient de température $\Delta R/R\Delta T$ qui est élevé (0,5 % environ pour les métaux purs) décroît, tend vers zéro et devient négatif. Les couches relativement épaisses à coefficient de température encore positif sont continues et ont probablement une conduction métallique avec un libre parcours gêné par l'épaisseur, ce qui réduit le coefficient de température. L'apparition du coefficient de température négatif est le signe de l'existence d'une énergie d'activation dont l'origine peut être la structure granulaire des couches plus minces, l'électron devant franchir des barrières de potentiel pour passer d'un grain à l'autre ; la résistance des couches est sensible à l'adsorption des gaz (abaissement des barrières de potentiel) et varie légèrement avec le potentiel appliqué (effet Shottky modifié). Les variations irréversibles de la résistance (vieillessement) sont liées à des transformations de la structure dues à la mobilité propre des atomes du métal et favorisées par l'énergie d'agitation thermique.

Un des avantages des couches métalliques est de permettre dans une large mesure le choix du coefficient de température α et en particulier d'un coefficient de température pratiquement nul.

Le coefficient $\alpha = \Delta R/R\Delta T$ en fonction de la

résistivité superficielle ρ_s (pour un carré de dimensions quelconques) prend pour un métal pur les valeurs suivantes (à la température ordinaire) :

ρ_s	10^2	10^3	10^4	10^5
$\alpha \%$	+ 0,1	0	— 0,1	— 0,2.

Des valeurs plus favorables peuvent être obtenues (par ex. : $\alpha = -0,05$ pour $\rho_s = 10^4$) ; une plus grande diversité de valeurs de α du moins du côté des valeurs positives s'obtient en utilisant des alliages. En pratique si l'on admet une largeur minimum du dépôt de 0,1 mm et une longueur totale de 100 cm (repliée sur quelques cm au maximum), on constate que par exemple un $\alpha \neq 0$ pourra être réalisé à partir des données du tableau ci-dessus, pour des résistances comprises entre 10^3 et 10^7 ohms.

La variation du coefficient α avec la température dépend de l'épaisseur de la couche ; pour des valeurs de α très faibles, ce coefficient reste remarquablement constant dans une gamme étendue de température, en particulier jusqu'à des températures assez basses. Ce comportement est assez spécifique des couches minces car les alliages massifs ne présentent généralement une valeur de α faible que dans une région restreinte de l'échelle des températures ; la différence s'explique par le fait que la faible valeur de α dans les couches minces est due à un tout autre mécanisme que dans les métaux massifs (probablement la limitation du libre parcours et les actions opposées d'une énergie d'activation et de la diffusion). Pour les couches les plus minces l'effet de l'énergie d'activation est prédominant et la variation de α est exponentielle en fonction de $1/T$, le coefficient α diminue donc aux températures supérieures et augmente aux basses températures (à peu près comme $1/T^2$).

La stabilité, c'est-à-dire une bonne constance de la valeur ohmique est une des qualités essentielles d'une résistance pour de nombreux usages. Pour une couche mince, cette stabilité dépend avant tout de l'adhérence au support et de la mobilité superficielle des atomes du métal. On sait que l'adhérence au support dont dépend pratiquement la tenue mécanique de la couche est un des facteurs les plus étudiés en vue des applications optiques. Pour les applications électriques, cette adhérence joue un rôle encore plus important puisque la constance de la résistance en dépend. Pour réaliser des couches très adhérentes, on sait que la principale condition est le dégazage du support. On est amené pour réaliser des couches électriquement stables à associer le nettoyage par bombardement ionique avec le chauffage du support sous vide. Des couches stables n'étant obtenues que sur des supports dégazables, l'emploi des supports en plastique n'est pas recommandable (d'ailleurs, il a été montré dans une publication récente que chaque molécule en chaîne d'un polymère organique produirait un germe de

cristallisation ce qui conduit à une couche granulaire avec des granules espacés ayant un espacement égal à la longueur des chaînes ; si cet argument est vérifié il y aurait là une autre raison pour éviter l'emploi des plastiques). Encore faut-il que le support soit stable et rigide, les verres remplissent à peu près ces conditions mais ce ne sont peut-être pas les meilleurs matériaux à ce point de vue. Le déplacement des atomes métalliques sur une surface met en jeu des énergies relativement faibles. On sait, par exemple, que les atomes de mercure migrent même aux très basses températures et que les couches même épaisses de métaux alcalins se granulent totalement en quelques jours à température ordinaire. Pour ces raisons, les métaux à très haut point de fusion donnent les couches particulièrement stables. Ces couches sont d'ailleurs à grains très fins parce que même au moment de la formation par évaporation sous vide, la température superficielle est élevée et la granulation est très limitée. Aussi bien pour améliorer l'adhérence que pour éviter l'occlusion des gaz dans la couche qui crée des dislocations plus ou moins étendues, un vide propre et élevé est recommandé pendant le dépôt du métal. L'absence de vapeur d'huile paraît essentielle.

A tous ces points de vue l'évaporation sous vide est le meilleur procédé, l'usage d'un piège à air liquide au-dessus d'une pompe à diffusion d'huile est une précaution nécessaire.

Pour les couches les plus minces qui, partant au moment de leur formation d'une structure à grains très fins, continue et macroscopiquement amorphe, ne peuvent que se granuler au cours de leur évolution, les métaux les plus réfractaires sont les meilleurs (point de fusion au-dessus de $1\ 900^\circ$ par exemple).

Les couches plus épaisses au contraire peuvent évoluer vers un film plus ou moins continu avec quelques lacunes ; les métaux moins réfractaires peuvent alors être utilisés à condition que la recristallisation soit favorisée par l'absence de gaz et par un traitement thermique convenable et que l'adhérence soit excellente ; les alliages peuvent être intéressants à cause de leur coefficient de température plus faible.

Ce qui précède concerne surtout la formation de la couche. Pour qu'elle garde une bonne stabilité au cours de sa conservation un autre facteur est essentiel surtout pour les couches les plus minces : l'adsorption qui agit de deux façons, soit réversiblement en abaissant les barrières intergranulaires, soit irréversiblement, l'impact des molécules gazeuses et l'énergie d'adsorption provoquant les transformations de structures. Il y a donc intérêt, soit à réaliser des résistances sous vide très élevé dans une ampoule qui ne sera jamais mise en communication avec l'atmosphère, soit à enfermer une couche préparée sous cloche à vide dans une

ampoule qui est ensuite vidée. Dans ce dernier cas, il est important de maintenir un vide élevé en permanence dans l'ampoule et de redégazer la couche après son contact avec l'atmosphère. Pour que ce dégazage puisse être fait d'une manière efficace à une température suffisante sans que la couche évolue, l'emploi d'un métal très réfractaire est souhaitable. Étant donné le nombre élevé de chocs sur une surface même dans un bon vide usuel, l'emploi d'un getter à l'intérieur de l'ampoule est essentiel lorsqu'on veut atteindre une stabilité élevée. Pour bien mettre en évidence l'importance du vide dans lequel est conservée la couche, on peut rappeler que les auteurs anglais ont montré que les couches minces de molybdène se comportent comme de véritables getters. Dans le cas du molybdène évidemment il peut y avoir des actions chimiques entre certains des gaz résiduels et la couche ; ceci indique d'ailleurs que les métaux chimiquement inertes offrent une sécurité de plus. Au moins pour les couches les plus minces, c'est-à-dire lorsqu'on recherche des résistivités superficielles élevées les métaux réfractaires et nobles sont particulièrement intéressants. Le choix du métal est ainsi relativement limité ; l'iridium et l'osmium sont très utiles. Ils donnent dès les premiers jours de leur mise sous vide des stabilités de l'ordre de 0,1 % même pour des valeurs de la résistivité superficielle dépassant 10^6 ohms.

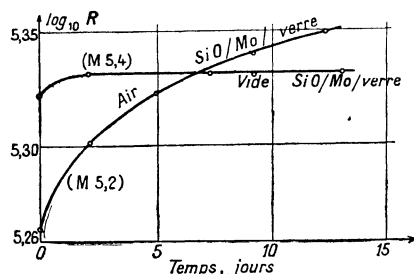


FIG. 1. — Comparaison de l'évolution d'un film de Mo protégé par SiO₂ dans l'air et dans le vide.

Pour réduire l'action physique ou chimique (oxydation des gaz) on peut envisager la protection du dépôt métallique par une couche de diélectrique. La protection qui paraît la plus séduisante est celle qui se fait dans le vide même de la cloche à évaporation sans que le métal soit exposé à l'atmosphère, c'est la protection par le recouvrement par une couche diélectrique évaporée par dessus le dépôt métallique, procédé déjà utilisé en optique. Cette couche diélectrique doit être aussi étanche que possible. En microscopie électronique et pour d'autres usages on utilise des lames minces obtenues en évaporant le composé SiO. Ces lames sont connues par la finesse de leurs grains et par leur étanchéité presque parfaite (des lames de 200 Å d'épaisseur, montées sur des grilles très fines résistent à des pressions de gaz de quelques mmHg).

Le recouvrement par un dépôt évaporé de SiO protège dans une certaine mesure les couches de l'oxydation ainsi qu'on peut le voir sur la figure 1 qui correspond à un dépôt de molybdène sous pression réduite ; la protection est très efficace mais dans les conditions atmosphériques habituelles, elle n'est pas parfaite. Il faut remarquer cependant que l'oxydation d'une couche de molybdène de cette épaisseur et non protégée est pratiquement immédiate. Grâce à des dépôts de protection des métaux oxydables peuvent être faits en cloche, exposés à l'atmosphère et scellés sous vide sans attaque importante, ce qui permet éventuellement d'utiliser les métaux réfractaires mais non nobles à la réalisation de résistances pelliculaires. En outre, le dépôt peut avoir un autre rôle, celui de rendre plus difficile la migration des atomes métalliques, ce qui peut avoir pour effet d'augmenter la stabilité. Par contre, il est probable qu'il faut utiliser avec précaution les dépôts diélectriques protecteurs : les dépôts vraiment épais sont les plus efficaces mais ils peuvent exercer des contraintes mécaniques importantes sur la couche métallique à cause de la différence de dilatation et même provoquer des ruptures ou des dislocations.

La linéarité des résistances, c'est-à-dire la constance de la résistance en fonction du voltage appliqué, peut être excellente dans le cas des dépôts pelliculaires métalliques du moins au voisinage de la température ordinaire. L'effet de champ dans les couches minces suit une loi analogue à celle de l'effet Shottky de telle sorte que $\log R$ est à peu près proportionnel à $E^{1/2}/T$, E étant le champ effectif, ce qui veut dire que les écarts à la linéarité ne croissent pas très vite avec le potentiel appliqué ; le champ effectif est le champ appliqué aux barrières de potentiel intergranulaire ; il dépend donc beaucoup de la structure de la couche si le potentiel est concentré sur un petit nombre de barrières séparant de gros grains l'effet de potentiel est plus élevé ; les couches très uniformes et à grains fins sont donc particulièrement désirables ; en fait à la température ordinaire pour les couches de métaux réfractaires, l'effet de potentiel est très faible, souvent non mesurable étant inférieur à 0,02 % par volt (et pouvant descendre jusqu'à 0,0002 % par volt). D'ailleurs on peut diminuer ce coefficient par le recouvrement du dépôt métallique par un diélectrique car dans ce cas la constante diélectrique intervient pour diminuer l'effet du champ sur les barrières de potentiel. La diminution dépendrait en principe de $D^{1/2}$.

Même pour des fréquences très élevées et pour les métaux bons conducteurs l'épaisseur de pénétration du champ électromagnétique est relativement grande, elle serait encore plus grande pour un matériau de résistivité plus élevée comme celui d'une couche mince ; l'épaisseur des résistances

pelliculaires métalliques même si elles sont relativement épaisses (quelques centaines d'Å) et toujours très inférieure à l'épaisseur de pénétration du champ et il n'y a pas de variation de la résistance par effet de peau. Ceci est un avantage important des dépôts pelliculaires.

D'autres effets exercent cependant une certaine influence sur la valeur résistive de l'impédance en fonction de la fréquence. L'effet des capacités réparties (selon Howe) est calculable par analogie avec une ligne de transmission ; c'est un effet non spécifique des couches minces et qui existe pour tout conducteur employé dans un circuit ; il abaisse la valeur mesurée de la résistance ; il suffit de dire ici que pour une résistance usuelle ayant 1 mm de large et 10 mm de long enfermée dans un tube de verre de 50 mm de long environ, cet effet est négligeable à 1 Mhz. Lorsque la couche n'est pas uniforme l'effet des capacités réparties se trouve amplifié et la résistance varie plus vite avec la fréquence. Si l'on admet une structure granulaire des couches très minces, on conçoit qu'en HF on peut avoir un court-circuit capacitif des grains et que ce court-circuit produise un abaissement de la résistance si en CC cette résistance est surtout localisée dans les barrières ; en pratique, heureusement, il apparaît que cet effet (effet Maxwell-Wagner des conducteurs complexes) est faible à température ordinaire probablement parce qu'à cette température les barrières sont assez conductrices et que les électrons excités thermiquement peuvent les traverser. A température ordinaire pour 1 megohm à 1 Mhz, l'effet global pour une résistance du type ci-dessus est pratiquement négligeable.

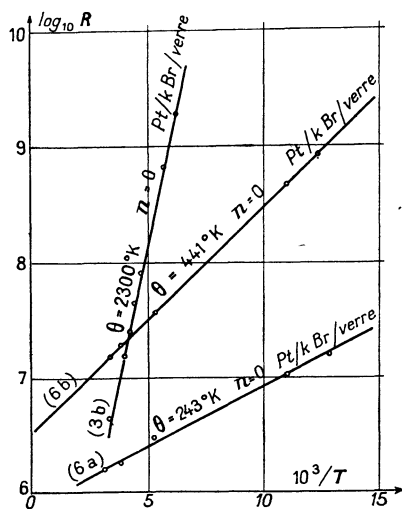


FIG. 2. — Variation de la résistance avec la température (Pt sur KBr).

Le bruit de fond dû au passage du courant (extranoise ou effet de scintillation) est lié vraisemblablement aux contacts intergranulaires ; pour les couches relativement épaisses, à coefficients de

température positif, lorsqu'elles sont réalisées d'une manière uniforme, seul le bruit thermique est présent comme dans les métaux à l'état massif. Dans les couches plus minces le bruit parasite est faible ; sous 30 V, pour 1 résistance de 1 megohm il n'est pas décelable dans une bande comprise entre 40 000 et 50 000 cycles/seconde ; cependant le spectre du bruit parasite donne un bruit plus fort aux très basses fréquences (quelques cycles/sec.).

Dans les applications comme résistances nous avons déjà dit qu'on recherche surtout une faible valeur de coefficient de température, quoique parfois une valeur négative puisse être utile, en vue par exemple d'associer plusieurs résistances dont la valeur totale équivalente ait un coefficient de température nul. Toutefois, les couches métalliques minces sont susceptibles de jouer un certain rôle en tant que thermistances ; leur énergie d'activation est faible (0,1 à 0,001 eV), mais précisément pour cette raison on peut les utiliser à très basses températures parce que la résistance y est encore mesurable ; comme le coefficient de température croît comme $1/T^2$ il peut atteindre des valeurs énormes pour de faibles valeurs de la température absolue T ; une couche portée à la température de l'hélium liquide peut avoir une valeur de α de l'ordre de 2 000 % par degré. L'utilisation en bolomètre pour la mesure des énergies rayonnantes est également possible.

Nous allons maintenant donner quelques exemples de procédés de réalisation de résistances pelliculaires métalliques.

Citons d'abord l'ancien procédé, utilisé en céramique, du dépôt par réduction à chaud (incrustation thermique) d'un sel en suspension dans une huile ; ce procédé s'applique essentiellement aux métaux nobles argent, or, platine et leurs alliages ; il donne des couches adhérentes mais même par dilution de la solution, il est difficile de faire par ce procédé de bons films plus minces que 200 ou 300 Å. La résistance superficielle maximum est de l'ordre de quelques dizaines d'ohms et en pratique les valeurs ohmiques de ces résistances ne dépassent pas le megohm.

L'évaporation sous vide est un procédé plus général, applicable aux couches de toutes épaisseurs. En observant les précautions décrites ci-dessus on obtient des couches excellentes. Pour les couches relativement épaisses la dureté et l'adhérence des couches de nickel-chrome par exemple dépasse de loin celle des dépôts de métaux nobles faits par incrustation thermique. Pour les couches plus minces l'évaporation semble être la seule méthode de réalisation pratique. L'observation des conditions nécessaires à la réalisation d'un bon dépôt conduit à l'emploi de dispositifs variant un peu avec le type de résistance que l'on veut obtenir.

L'évaporation en vide statique permet de réali-

ser de très bonnes résistances parce que le dégazage est bon et la couche ne vient jamais au contact de l'air ; sur les figures 3, 4 et 5, on voit diverses résis-

cas d'un support plan peut être celle d'une grecque ; on l'obtient à l'aide d'un cache formé de deux tôles

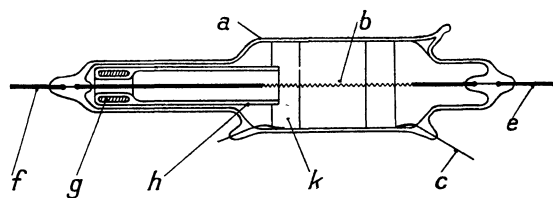


FIG. 3.

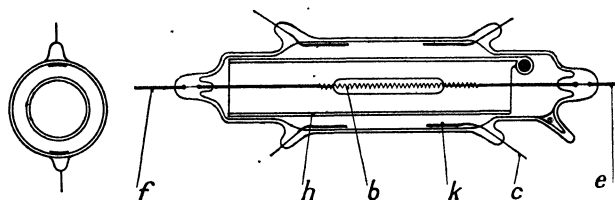


FIG. 4.

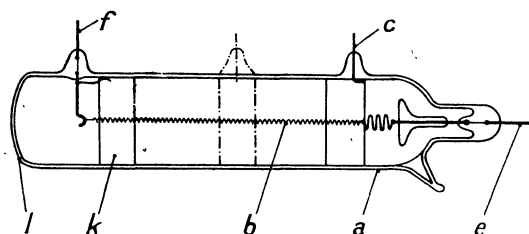


FIG. 5.

tances de ce type, h est le cache qui permet le dégazage du filament, sur la figure 4 de cette planche ce cache muni d'une fente peut tourner, on obtient ainsi plusieurs résistances dans la même ampoule.

La figure 6 donne le schéma de principe d'un montage pour la réalisation d'un certain nombre de petites résistances sous cloche à vide ; les bâtonnets-supports placés autour d'un cylindre d muni de fentes sont placés dans un four de dégazage ; un dispositif permet de dégazer le filament sans polluer les supports (ici, c'est l'échappement du filament en dehors du cylindre). Les résistances sont ainsi constituées par un trait étroit le long d'un bâtonnet de verre. La résistance de l'un de ces dépôts qui est isolée, peut être mesurée pendant l'évaporation de la couche. Pour certaines applications (gravure ultérieure) et afin d'augmenter la stabilité qui peut être perturbée par les bords, on a intérêt à faire un dépôt uniforme sur toute la surface latérale. Le figure 7 montre un mécanisme simple qui permet de faire tourner chaque bâtonnet autour de son axe pour obtenir un tel dépôt.

Nous avons vu l'intérêt des dépôts longs et étroits. Pour réduire l'encombrement, ces dépôts doivent être repliés. Pour réduire la self, la forme dans le

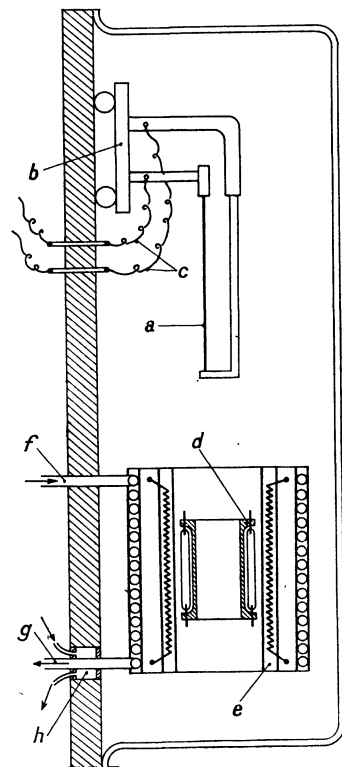


FIG. 6. — Regarder la figure en la tournant de 90°, la partie hachurée en bas.

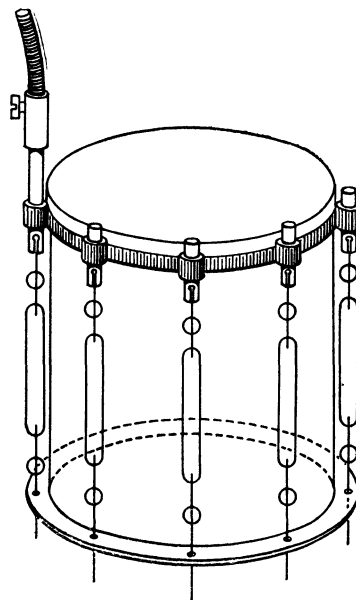


FIG. 7.

taillées en créneaux (fig. 8). On évapore à travers ce cache sur le support c (fig. 9) e sont les électrodes de nettoyage ionique. Lorsque le support

est long un mouvement relatif du support par rapport à l'évaporateur est nécessaire ; on l'obtient (pour gagner de la place) en déplaçant l'évapo-

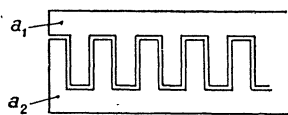


FIG. 8.

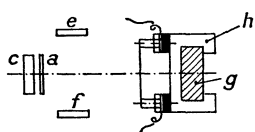


FIG. 9.

rateur sur des rails (fig. 10 et 11) ; k est une boîte qui limite le faisceau évaporé, de manière à délimiter des ombres nettes ; le faisceau ne doit pas être toutefois trop diaphragmé car on sait qu'à cause de la rugosité atomique de la surface un évaporateur large et un faisceau assez ouvert donnent la couche la plus uniforme, ayant le moins d'ombres et donc de lacunes.

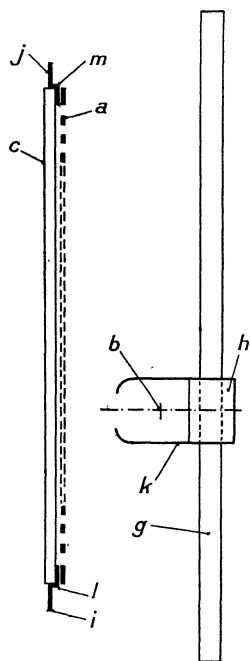


FIG. 10.

Le procédé des fig. 9, 10, 11 peut servir à réaliser des résistances pour haute tension. La plaquette support (10 cm de long environ) après avoir reçu le dépôt est enfermée dans une ampoule vidée et munie d'un getter par exemple un getter au baryum (n sur les fig. 12, 13, 14 et 15) ; une telle résistance supporte une tension de service de 20 000 V et plusieurs watts de dissipation, sa stabilité est de l'ordre de 0,1 %. Les écarts à la loi d'Ohm sont de l'ordre de 1 % sous 20 000 V. La largeur de la couche est de 0,3 mm et sa longueur totale d'environ 1 m. Le bon vide assure la stabilité et en

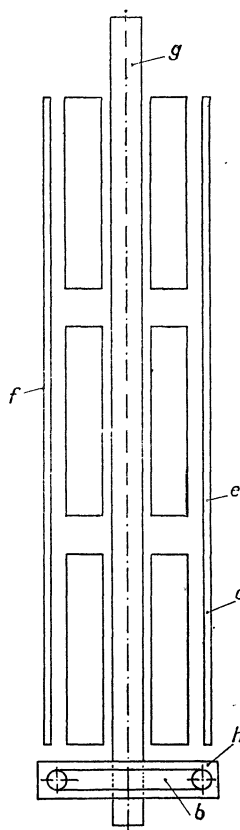


FIG. 11.

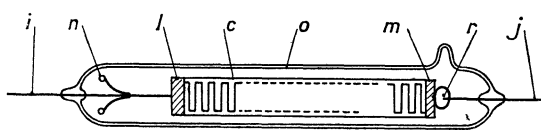


FIG. 12.

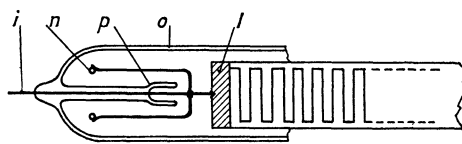


FIG. 13.

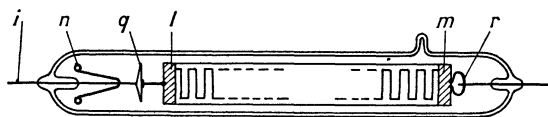


FIG. 14.

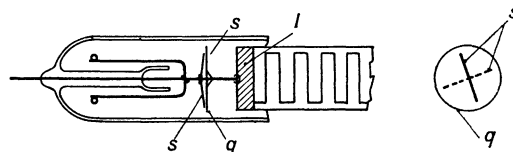


FIG. 15.

même temps la tenue à la tension. Toutefois lorsqu'on met plusieurs de ces résistances en série pour utilisation à des tensions très élevées, certaines de ces résistances se trouvent à des potentiels considérables par rapport à la terre, et des actions électrostatiques entraînent parfois la destruction des résistances agglomérées habituelles. Dans le cas des résistances pelliculaires sous vide des blindages électrostatiques (fig. 16 à 19) terminés dans l'araldite par exemple protègent presque complètement la résistance.

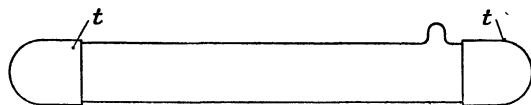


FIG. 16.

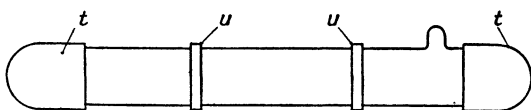


FIG. 17.

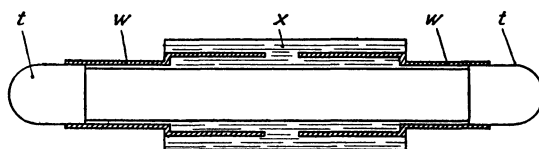


FIG. 18.

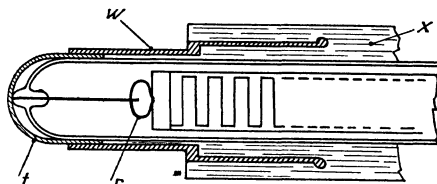


FIG. 19.

Un autre moyen d'obtenir par évaporation des dépôts longs et sinueux d'encombrement limité est de réaliser des mouvements convenablement couplés du support et d'un ou plusieurs diaphragmes à travers lesquels on évapore (sinusoïdes sur une surface plane, ou hélices sur des cylindres).

Pour des dépôts relativement épais qui craignent moins les manipulations, les procédés de gravure sont applicables pour la réalisation de dépôts longs. La gravure directe de la couche n'est guère commode et elle est vraiment impossible pour les couches très dures obtenues par évaporation sous vide, couches qui endommagent rapidement le diamant. On grave donc sur un vernis et on attaque ensuite les endroits découverts pour enlever le métal ; divers procédés de gravure ont été envisagés. Les procédés de gravure s'appliquent indifféremment aux dépôts obtenus par voie chimique ou par évaporation mais pour les dépôts du pre-

mier type ce sont les seuls procédés pour obtenir des dépôts étroits, à part la possibilité de métalliser des fils de verre ou de quartz très fins qui sont ensuite bobinés, ce dernier procédé ne paraît cependant pas avoir une grande valeur pratique. La gravure mécanique peut être faite en série, elle est le mieux adaptée à la réalisation d'hélice sur des

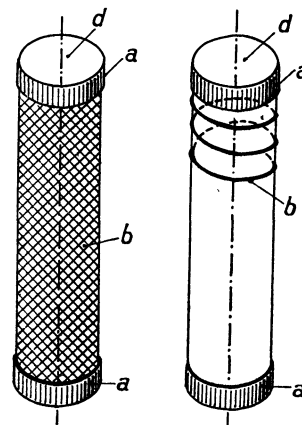


FIG. 20.

FIG. 21.

cylindres (fig. 20 avant gravure, formant une résistance type pour HF, fig. 21, après gravure) ; elle convient aussi à la réalisation de spirales.

La photogravure consiste à rendre insoluble par exposition à la lumière une gélatine traitée ; ce procédé est surtout intéressant pour les dépôts plans qu'on veut découper en forme de créniaux.

Une résistance gravée du type de la figure 21 peut avoir les caractéristiques suivantes : diamètre 20 mm, longueur 100 mm, puissance 5 W, coefficient de température $\pm 0,01$ % suivant la valeur, comprise entre $5 \cdot 10^4$ et $2 \cdot 10^8$ ohm. L'attaque

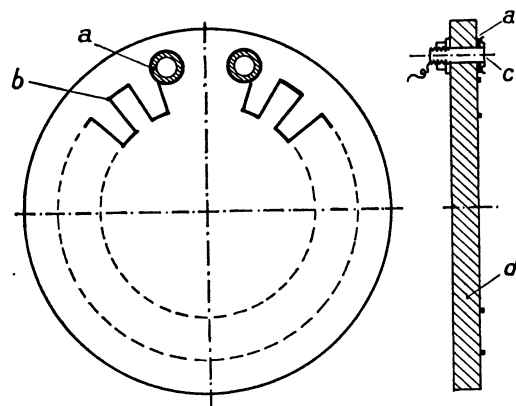


FIG. 22.

FIG. 23.

après gravure nécessite, surtout pour les couches évaporées très dures, des moyens énergiques. Les fig. 24, 25, 26 représentent des résistances spiralées sur disques ; celles de la figure 25 portent des spirales sur les deux faces ; leur empilement (fig. 26) est

peu encombrant. Pour les dépôts longs et étroits, l'uniformité du dépôt et la planéité du support sont particulièrement essentiels pour que la résistance ne présente pas de points faibles.

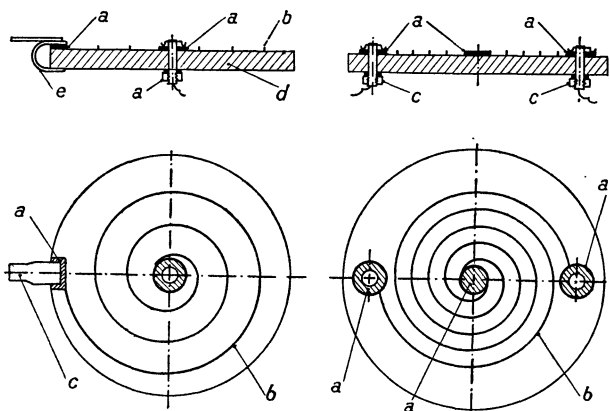


FIG. 24.

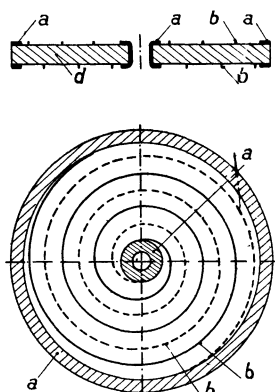


FIG. 25.

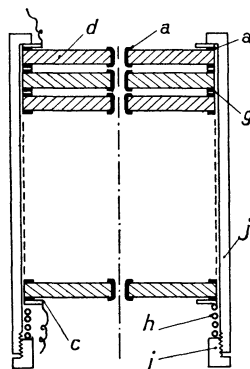


FIG. 26.

Outre leur emploi comme résistances fixes, les couches minces commencent à servir à la construction de potentiomètres, un de leurs avantages est alors de donner une résolution angulaire pratiquement infinie. Cependant pour augmenter la valeur ohmique dans certaines applications; on peut allonger la couche (figures 22 et 23, où les crêneaux sont représentés très dilatés).

En très haute fréquence, les atténuateurs de guide d'onde sont des couches minces sur verre ayant une résistance superficielle de l'ordre de 100 ohms.

Une application particulière pour laquelle les dépôts minces seraient bien adaptés est la réalisation de jauges de contrainte; le support plan serait fixé solidement sur la surface à étudier; on a proposé il y a très longtemps d'utiliser comme résistances variables des couches minces déposées sur un plastique pouvant être courbé.

Pour terminer, nous voulons présenter une remarque sur les procédés d'évaporation.

Il n'est pas facile d'évaporer des quantités

importantes des métaux réfractaires. Le chauffage par bombardement électronique dans le four de O'Bryan ou le canon de Jacquot obligent à utiliser quand même un creuset ou à évaporer un métal dont la tension de vapeur est suffisante à l'état solide. Ces difficultés sont levées par l'emploi d'un arc dans le vide (¹). Un tel arc a été proposé récemment pour évaporer le carbone qui est le type même du métal sublimable. Nous n'avons trouvé (en collaboration avec Minn) qu'en créant un arc interrompu automatiquement à un rythme variable l'évaporation est suffisante et régulière pour la plupart des métaux étudiés même les plus réfractaires et que le collage des électrodes n'est pas à craindre. Une caractéristique importante d'un tel évaporateur est qu'il fournit des atomes métalliques ionisés (généralement des ions négatifs) et comme la tension de l'arc est faible, un potentiel auxiliaire de valeur modérée suffit à concentrer les produits de l'évaporation sur les surfaces utiles. Cela est intéressant dans le cas des métaux rares. Des couches de tungstène et d'iridium ont été obtenues très facilement. Ajoutons, qu'en outre, on peut supposer que l'arc est un évaporateur permettant d'évaporer des alliages sans modifier la composition, puisque l'analyse spectrochimique est fondée sur l'émission des raies par la vapeur de l'arc.

DISCUSSION

M. Dufour. — Est-ce que la méthode de l'arc ne donne pas accidentellement une projection de grosse particules ?

M. Vodar. — C'est très compliqué. Quand il n'y a pas de potentiel appliqué, cela va très bien, à condition que les métaux soient bien dégazés. Si on met un potentiel négatif on peut provoquer une destruction de la couche.

M. Dufour. — Pour quelles raisons avez-vous choisi le KBr pour la préparation de couches mixtes diélectrique-métal ?

M. Vodar. — Avec M. Feldman nous avons essayé différents produits en mettant le métal dessous, dessus ou mélangé. C'est avec le KBr que nous avons obtenu le coefficient de température le plus fort.

M. Dufour. — Les couches ne sont pas plus granulaires ?

M. Vodar. — Certainement, je pense qu'il y a une interprétation de ce genre.

(¹) Note ajoutée à la correction. Voir pour plus de détails B. VODAR, S. MINN et M^{lle} S. OFFRET, *J. Physique Ral.*, 1955, 16, 811-812; le procédé antérieurement proposé pour l'évaporation du carbone est en réalité un procédé de chauffage par résistance de contact, et non un procédé utilisant un arc.