

UNIVERSITÉ D'ALGER
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT ÉLECTRICITÉ

8/74

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
الميكانيكية
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

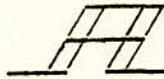
200

PROJET DE FIN D'ETUDES

MESURE DE L'ÉPAISSEUR
DES
COUCHES MINCES

PROPOSÉ PAR :
Mr. KOULECHOV

ETUDIÉ PAR :
A. DIRAMI



V A N T - P R O P O S

Nous exprimons notre gratitude aux professeurs de l'ENPA pour l'enseignement qu'ils nous ont dispensé durant notre formation ,

Nous tenons à remercier vivement Monsieur KOULECHOV qui nous a guidés dans l'élaboration de ce projet et qui nous a conseillé tout au long de notre travail ,

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui nous ont honorés de leur présence ,

Nous exprimons notre profonde reconnaissance au service FORMATION de SONELEC pour sa contribution à la réalisation de ce polycopié ,

Nous remercions enfin tous les camarades qui nous ont apporté une aide précieuse .

-----oOo-----

— PLAN D'ETUDE —

I- INTRODUCTION

II-NOTIONS SUR LA REALISATION DES CIRCUITS INTEGRES

- 2.1-Classement
- 2.2-Notions sur les circuits monolithiques et hybrides
- 2.3-Les couches minces dans les circuits intégrés
- 2.4-Les contacts ohmiques dans les circuits intégrés
- 2.5-Réalisation des couches minces

III-DIFFERENTES METHODES DE MESURE DE L'EPAISSEUR
DES COUCHES MINCES

- 3.1-Méthodes radiologiques
- 3.2-Méthode par courants de FOUCAULT
- 3.3-Méthode rhéométrique
- 3.4-Méthodes magnétique et électromagnétique
- 3.5-Appareil à transducteur inductif
- 3.6-Appareil à transducteur piézoélectrique
- 3.7-Méthode ellipsométrique
- 3.8-Méthode interférométrique

IV-CHOIX DE METHODE DE MESURE

V-ETUDE DE L'APPAREIL DE MESURE

- 5.1-Introduction
- 5.2-Notions sur le cristal de quartz
- 5.3-Détermination de l'épaisseur de la couche en
fonction de la fréquence de résonance du quartz
- 5.4-Choix du capteur piézoélectrique à utiliser
- 5.5-Description de l'appareil

VI-REALISATION DE L'APPAREIL

- 6.1-Etude des oscillateurs
- 6.2-Etude du mélangeur
- 6.3-Etude du filtre
- 6.4-Etude de l'amplificateur

6.5-Etude de l'alimentation

6.6-Etude du montage global

6.7-Etude du circuit de commande du processus de dépôt

VII-CONCLUSION

L'évolution de la technologie des composants électroniques s'accompagne tout naturellement d'un développement accru des méthodes de fabrication de contrôle et de mesure.

Cette évolution s'est produite, comme on le sait, dans le sens de la miniaturisation des composants et aussi de leur intégration. Les avantages de la microélectronique sont très intéressants: on gagne en fiabilité, en encombrement et surtout en prix de revient. Il existe actuellement de nombreux types de circuits intégrés (CI) qui diffèrent d'abord par leur structure interne, ensuite par leur fonction. Selon la structure on distingue deux catégories de CI:

-les circuits intégrés monolithiques élaborés dans un seul bloc de silicium

-les circuits intégrés hybrides, à couches minces, constitués d'un substrat isolant sur lequel sont rapportés un ou plusieurs circuits monolithiques et déposées des couches minces formant les composants passifs. Dans les deux types de circuit, les interconnexions sont constituées de couches minces métalliques déposées.

Les caractéristiques de ces éléments formés par dépôt de couches minces, dépendent des dimensions de couches ou films, et aussi des matériaux constitutifs.

Il existe plusieurs méthodes de contrôle de la surface de base des films: masque métallique "in situ", masque photographique "in situ", masquage direct par photogravure, masquage mécanique.

Une autre grandeur géométrique qui influe beaucoup sur les caractéristiques des composants à films minces: c'est l'épaisseur du film.

La présente étude porte sur la mesure de cette épaisseur qui n'est pas accessible par les méthodes classiques.

La valeur de cette épaisseur ne dépassera pas en général 2 μ m (au maximum 6 μ m). Un point important de l'étude est que la mesure devra se faire pendant la formation de la couche, c'est à dire que l'on devra faire un contrôle continu de l'épaisseur du film.

Dans une première partie, nous verrons rapidement les diverses techniques de fabrication des circuits intégrés; ce sera d'abord une description des circuits essentiels, puis nous insisterons sur les méthodes de réalisation des couches minces, ce qui nous fixera le domaine de travail et imposera les contraintes de la mesure. Nous exposerons ensuite les différentes méthodes qui peuvent permettre la mesure de l'épaisseur du film; ce chapitre sera suivi du choix de la méthode de mesure, ce choix se fera naturellement en fonction des différentes contraintes qui entrent en jeu. Viendra, ensuite, l'analyse de la méthode choisie, où l'étude du transducteur utilisé tiendra une place importante, et enfin nous passerons à la réalisation de l'appareil de mesure où nous trouverons les calculs des circuits électriques et une ébauche du circuit de commande du processus de dépôt. Notons que l'étude porte essentiellement sur la mesure de l'épaisseur de la couche, mais nous nous sommes rendu compte qu'un circuit de commande doit accompagner le circuit de mesure.

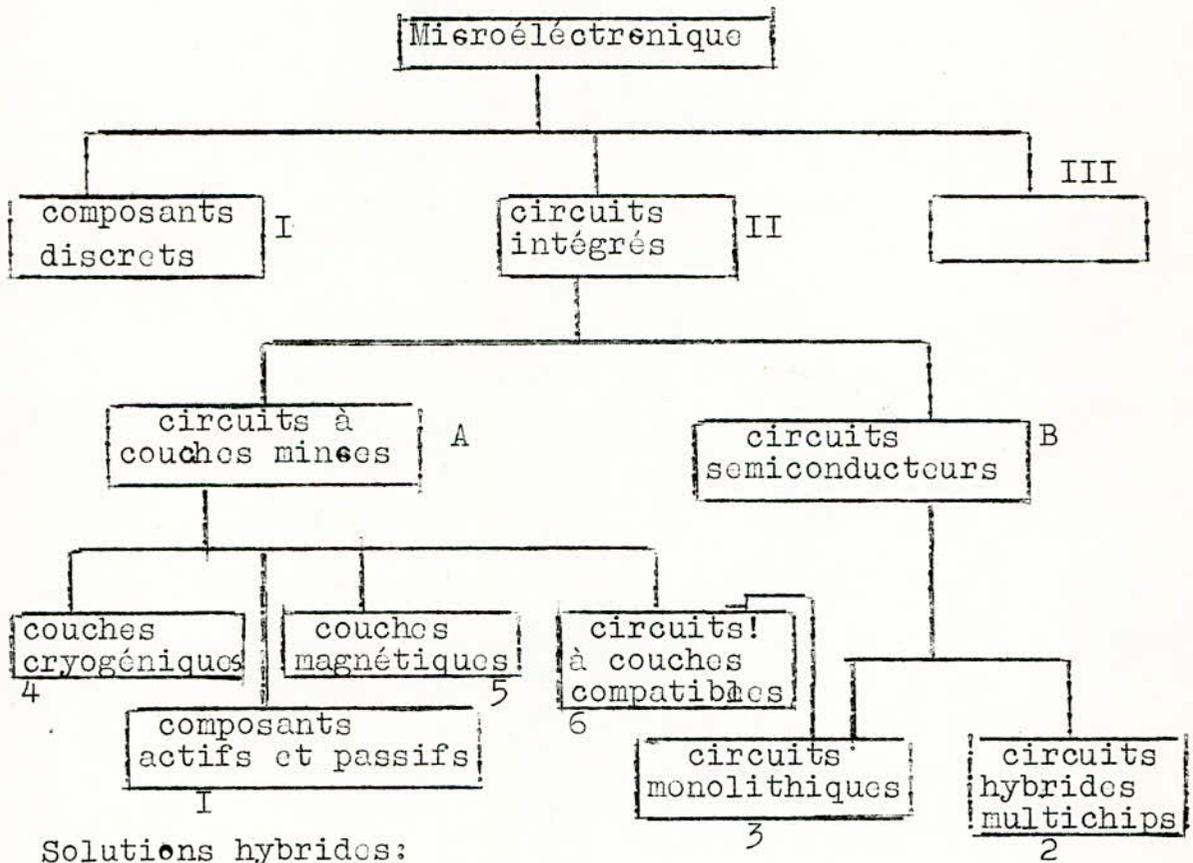
Dans l'étude des différentes méthodes de mesure des couches minces, ^{nous} éliminerons dès l'abord, la méthode de mesure du temps de dépôt, qui pourra se faire dans tous les cas de dépôt; car elle est imprécise parce que la vitesse de dépôt n'est en général pas uniforme.

I- NOTIONS SUR L'ETUDE ET LA REALISATION
DES CIRCUITS INTEGRES

1.1. CLASSEMENT . [1]

Al'heure actuelle, il existe une grande variété de circuits intégrés, qui ne cessent de croître d'ailleurs. Ainsi arrive t-il que la terminologie diffère d'un groupe à l'autre, sans que les principes généraux ne soient remis en cause.

L'Américain R.L. PRITCHARD, a classé la microélectronique selon les aspects technologiques et constructifs (fig. I.1)



toute combinaison de (I et II), (A et B), (I, 2 et 3) (fig. I, I)
(I): Les composants discrets sont des micromodules formés par un assemblage ordonné et à haute densité d'éléments ne différant des composants classiques que par leurs faibles dimensions.

(III)

- (III): Eléments fonctionnels, morphologie intégrée ou électronique moléculaire : ce sont des dispositifs à l'état solide remplissant des fonctions électriques particulières ; mais il est impossible de distinguer ou de localiser les composants habituellement responsables de ces fonctions (ex: filtre à quartz).
- (II) : cette catégorie de circuits intégrés se subdivise en circuits à couches minces et circuits à semiconducteurs.
- 1- : Composants actifs et passifs : les composants passifs tels que résistances et condensateurs et interconnexions sont obtenus par dépôt de couches minces. Les éléments actifs (diodes, transistors) sont rapportés séparément.
- 3 - : Circuits monolithiques : le circuit complet est réalisé dans un bloc unique de matériaux semiconducteur.
- 2 - : Circuits hybrides ou multi.chips ou polyolithiques : formés de deux ou plusieurs semiconducteurs contenant les composants du circuit (résistances, condensateurs, diodes, transistors..) les blocs sont interconnectés et assemblés dans un boîtier unique.

Combinaisons hybrides : ce sont toutes les combinaisons de (I et II), (A et B), (1, 2 et 3) -exemple : circuits à couches minces compatibles (6) : les éléments passifs sont déposés en couches minces directement sur un substrat en silicium dans lequel sont intégrés les autres composants du circuit (transistors, diodes et éventuellement résistances, condensateurs).

1.2 - NOTIONS SUR LES CIRCUITS MONOLITHIQUES ET HYBRIDES .[I] , [II] , [IV]

1.2.I. Méthodes générales de réalisation des différents circuits intégrés (c.i.)

Il existe trois méthodes principales de fabrication des CI : la technique hybride, la technique monolithique et la technique compatible.

-Technique hybride : un CI à couches minces comprend un substrat isolant en verre, céramique, céramique vitrifiée ou en silicium oxydé, sur lequel sont déposées par sulvérisation, évaporation sous vide..., des couches très minces de matériaux divers qui forment les composants passifs du circuit. Les interconnexions sont réalisés par métallisation et les composants actifs sont rapportés individuellement sur le circuit passif. Cette technique ne permet donc

pas d'obtenir des circuits entièrement intégrés dont tous les éléments seraient fabriqués et interconnectés simultanément et globalement.

-Technique monolithique: dans un circuit monolithique, tous les composants (actifs et passifs) sont réalisés à l'intérieur ou à la surface d'un bloc unique de silicium (S.i) appelé pastille ou puce. Cette technique fait appel aux procédés de fabrication des semiconducteurs (diffusion, épitaxie) et permet l'obtention simultanée de tous les éléments du circuit en un nombre d'opération à peine supérieur à celui nécessaire à la réalisation d'un seul transistor. L'étude et la réalisation des masques photographiques nécessaires à l'élaboration, l'isolement et l'interconnexion des diverses parties du bloc de S.i. sont assez critiqués, mais cette technique se prête bien à une production en série. Notons que la gamme des valeurs possibles et la tolérance des éléments passifs sont moins favorables que pour les circuits à couches minces.

-Technique compatible : Elle combine les avantages des 2 procédés cités plus haut. Ici les éléments actifs sont réalisés à l'intérieur de la pastille de silicium et les éléments passifs sont déposés par la technique des couches minces à la surface de la couche passivante (bioxyde de silicium (SiO_2)) qui recouvre le circuit actif. Cette technique combine donc les avantages d'un circuit monolithique et la souplesse d'un circuit en couches minces; cependant la fabrication nécessite plus d'opérations que pour celle d'un circuit monolithique, ce qui élève leur prix de revient.

1.2.2 Les circuits monolithiques

Le matériau de départ est une plaquette de silicium monocristallin type P (substrat) de diamètre $\varnothing=3$ à 5 cm et d'épaisseur : $e = 0,25$ mm - Chaque C.I. est élaboré sur une partie de substrat : sur un cristal de 2×2 mm à $0,5 \times 0,5$ mm. Une fois le processus physique de fabrication achevé, la plaquette est découpée afin de livrer le C.I. élémentaire (puce). Vient ensuite la deuxième phase de fabrication : montage et encapsulation.

Un circuit monolithique peut être réalisé de trois façons différentes : par épitaxie et diffusion, par la méthode du collecteur diffusé, par triple diffusion.

Ces méthodes permettent d'obtenir des structures à quatre couches; elles diffèrent par la succession des opérations et par les caractéristiques des circuits obtenus. La méthode par épitaxie et diffusion présente beaucoup d'avantages et c'est actuellement la plus utilisée.

Epitaxie: Elle se fait par croissance d'atomes, à partir d'une phase vapeurs sur la surface d'un minocrystal porté à haute température. L'épaisseur de la couche épitaxiale est d'environ $15 \mu\text{m}$

Diffusion: il existe plusieurs procédés.

-Après dépôt du dopeur, on place la plaquette dans un four parcouru, à température choisie, par un courant d'oxygène ayant barboté dans l'eau distillée.

-On fait arriver au dessus de la plaquette chauffée dans un four, des gaz contenant les impuretés adéquates; sans l'action du gradient de concentration des impuretés et sans l'influence de la chaleur, celles ci pénètrent dans le semi-conducteur selon un plan parallèle à sa surface.

Oxydation: la couche de SiO_2 est formée en exposant la plaquette à 1200°C à un courant d'oxygène- L'épaisseur de la couche est de 0,5 à 1,0 μm .

Photogravure: la surface de la plaquette étant recouverte de SiO_2 , on doit avant chaque diffusion, détruire cette couche de SiO_2 au dessus des zones à traiter et ouvrir ainsi des fenêtres- L'opération de photogravure se déroule comme suite:

-Dépôt sur la plaquette oxydée, d'une pellicule^{de} résine-photensible de 0,6 à 0,8 μm d'épaisseur, étalée par centrifugation.

-Cuisson de la résine à 90°C pour la durcir.

-Application sur la pellicule d'un masque pour délimiter la surface et la forme des éléments qui seront produits au cours de la diffusion suivante- Les parties chromées du masque aux motifs correspondent aux fenêtres.

- Insolation de la résine aux ultra-violets au travers du masque -Les endroits non protégés par les motifs sont polymérisés.
- Développement dans un produit approprié qui dissout la laque non polymérisée.
- Cuisson de la plaquette à 150°C pour durcir la laque subsistante.
- Ouverture des fenêtres par désoxydation des surfaces correspondantes dans une solution d'acide fluorhydrique et de fluorure d'ammonium qui dissout le SiO_2 en laissant intact le Si.

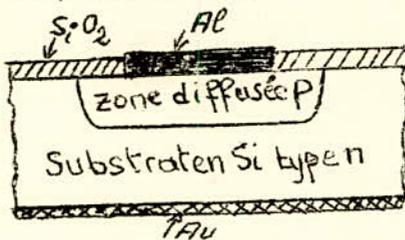
1.2.3- Les circuits hybrides

Dans les circuits hybrides, les composants passifs ne ressemblent pas aux composants discrets habituels, et les interconnexions et l'encapsulation se font différemment.

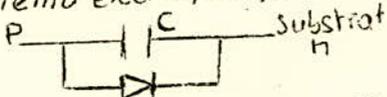
Les éléments actifs rapportés sur le support (isolant) sont des pastilles identiques à celles des composants actifs habituels. Chaque composant semiconducteur du circuit hybride est fixé par soudure sur le substrat commun, puis relié au reste du circuit par soudure.

Les éléments passifs peuvent être réalisés par diffusion comme pour les circuits monolithiques puis rapportés individuellement sur le support, ou déposés par couches minces directement sur le support. Dans ce paragraphe, nous étudierons le cas des éléments passifs diffusés, tandis que les couches minces seront traitées ultérieurement. (voir fig : I.2, I.3).

capacité diffusée :



Schema électrique équivalent



La capacité utile est celle de la jonction P-n
les couches d'Al et d'Au servent de contacts.

fig. 1.2.

Résistance diffusée

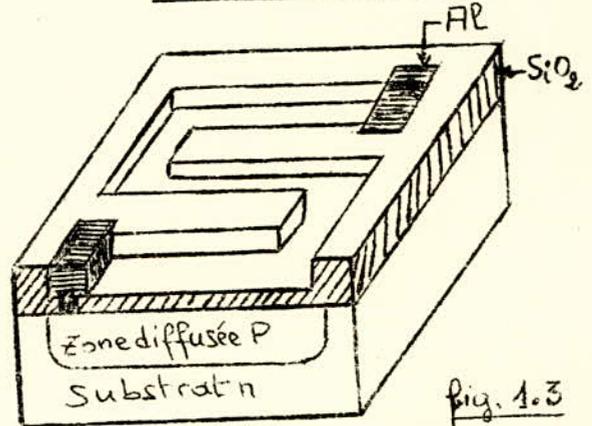
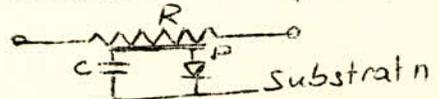


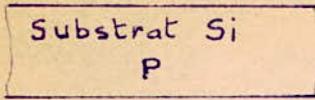
fig. 1.3

Schema électrique équivalent

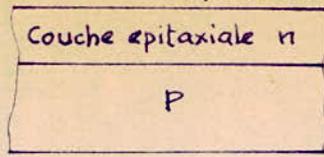


Processus de fabrication des circuits monolithiques.

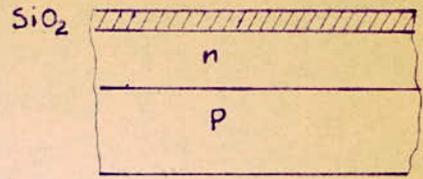
a. Plaquette initiale.



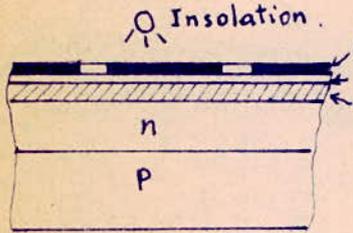
b. Dépôt d'une couche épitaxiale.



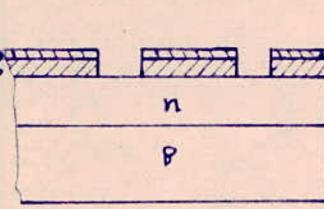
c. Oxydation de la surface.



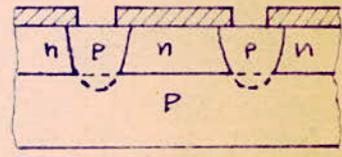
d. Vernissage masquage et insolation.



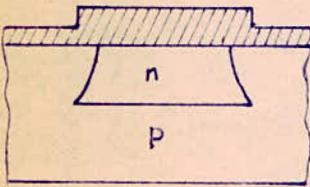
e. Dissolution du vernis non litholé. Elimination des zones correspondantes de SiO2.



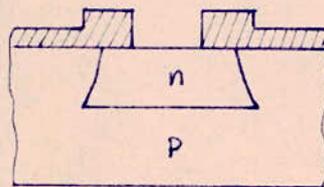
f. Elimination du reste de vernis - Diffusion pour former les caissons d'isolement.



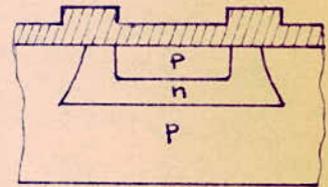
g. 2^{ème} oxydation.



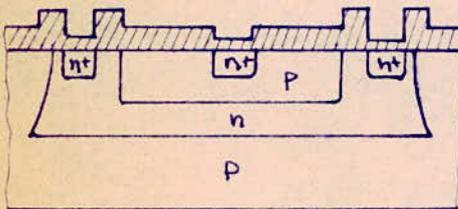
h. 2^{ème} photogravure - création d'une fenêtre.



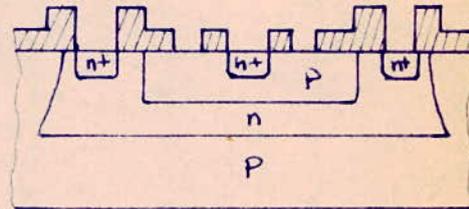
i. Diffusion de base et réoxydation.



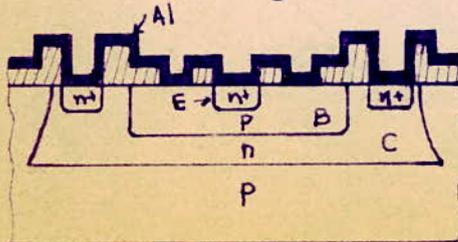
j. 3^{ème} photogravure Diffusion des émetteurs et réoxydation.



k. 4^{ème} photogravure fenêtres pour les connexions.

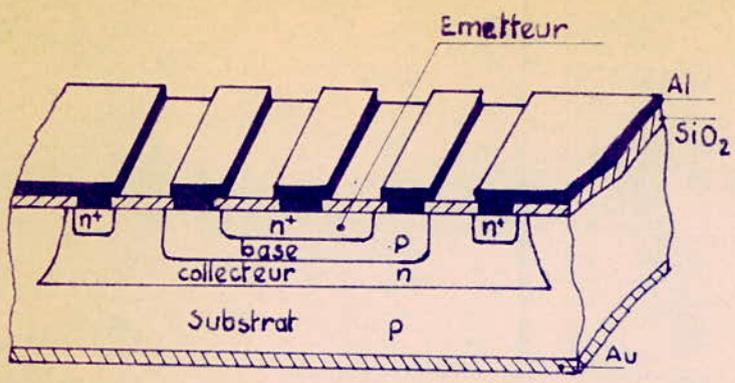


l. Dépôt d'une couche d'aluminium. Uniforme qui sera suivi par la 5^{ème} photogravure.



N.B: Pour la prise des contacts dans les régions "n", dopage "n+" pour éviter l'effet redresseur métal semi-conducteur.

DESCRIPTION DES COMPOSANTS DANS LES CIRCUITS MONOLITHIQUES



Structure d'un transistor (ou d'une diode)

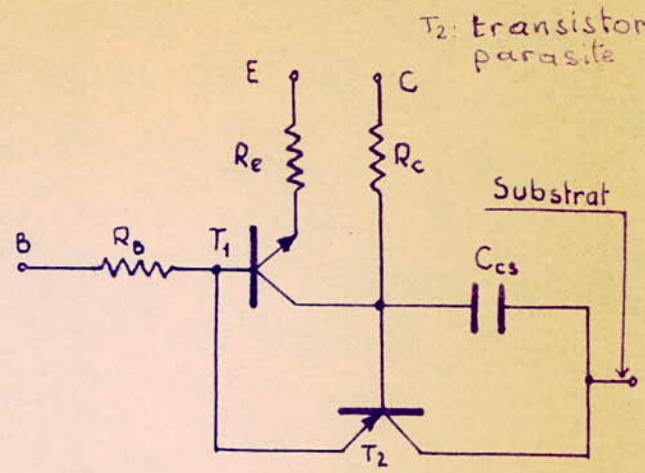
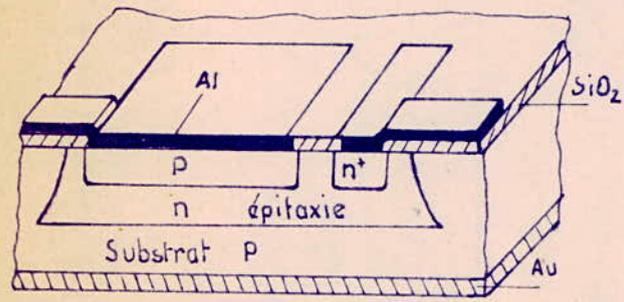


Schéma équivalent



Structure d'une capacité

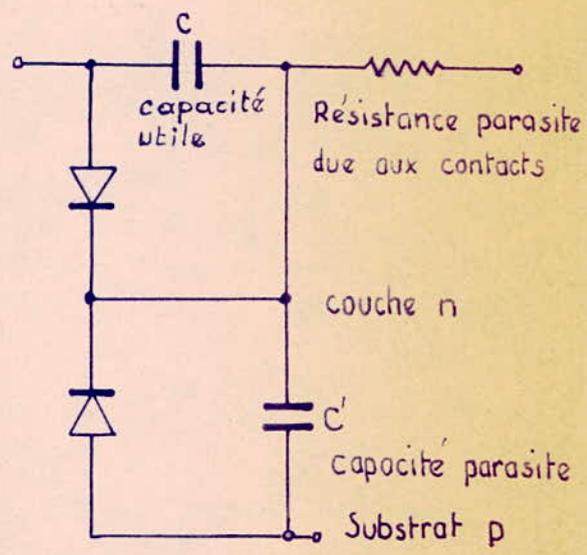
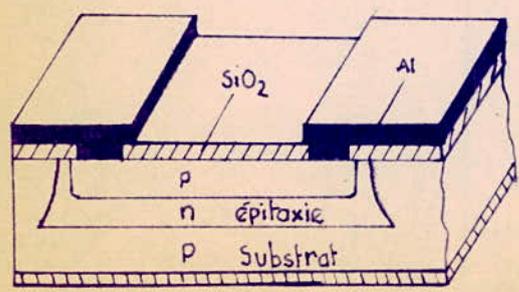
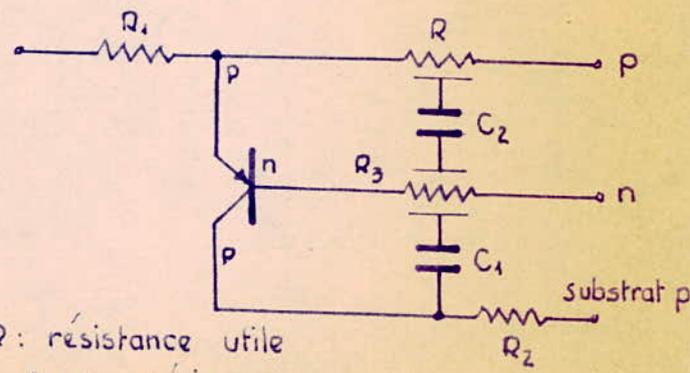


Schéma équivalent



Structure d'une résistance



R : résistance utile
 R_1, R_2, R_3 : résistances parasites
 C_1, C_2 : Capacités parasites

Schéma équivalent

1.3 - LES COUCHES MINCES DANS LES CIRCUITS INTEGRES [I], [II], [III], [IV]

On entend par couches minces (thin films), celles qui sont obtenues par évaporation et gravure sur substrats complétés par dépôts anodiques et oxydations sélectives, de certaines zones. Leur épaisseur va de la monocouche (5 Å) à quelques microns

Les couches épaisses (thick films) sont réalisées par impression sérigraphique et cuisson à haute température sur céramique ; les circuits à couches épaisses sont appelés "cermets".

Les couches minces sont employées presque dans tous les circuits intégrés, ne serait-ce que pour réaliser les interconnexions ; on les emploie également pour former des résistances et des capacités. Ces composants en couches minces présentent des avantages sur leur équivalents diffusés ; et afin de bénéficier de ces avantages, les technologies à base de silicium et de couches minces sont employées simultanément dans le même circuit intégré.

La technique des couches minces est donc employée dans tous les circuits intégrés pour la réalisation des interconnexions (couches d'aluminium, d'or, d'argent...) et des couches isolantes (SiO_2 , SiO , Si_3N_4 , ...) ; elle est utilisée particulièrement dans les circuits hybrides et dans les circuits compatibles pour la réalisation des éléments passifs.

1.3.1. Capacités en couches minces :

- Capacités au bioxyde de silicium (SiO_2)
- Cas d'une structure monolithique (fig. 1.4)

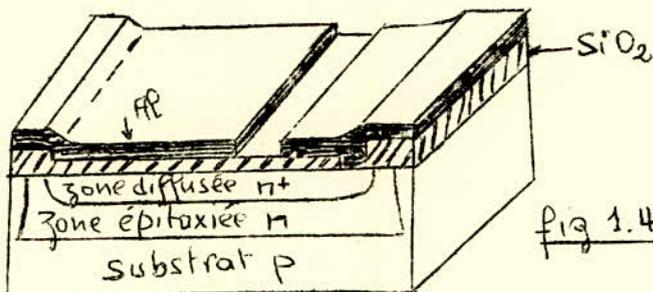
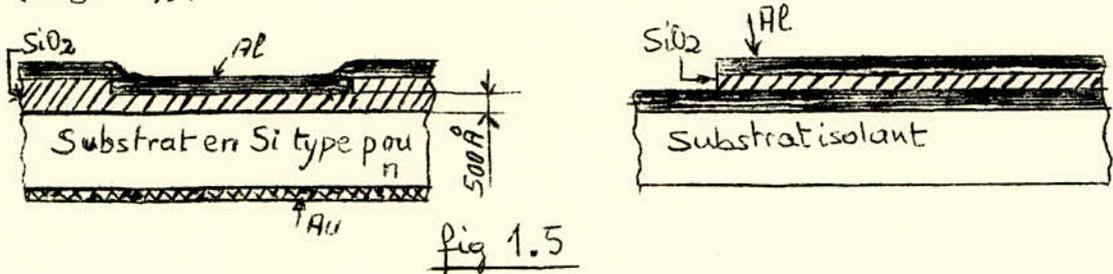


fig 1.4

- Cas d'une structure hybride :

Les principaux substrats employés sont : le verre pyrex, la céramique, la céramique vitrifiée, du silicium oxydé, l'oxyde de béryllium, l'alumine glacée; exemple de structure (fig. I,5)



Capacités à l'oxyde de tantale (Ta_2O_5)

La première armature de condensateur est obtenue par pulvérisation d'une couche mince de tantale sur le substrat. L'adhérence du tantale est très bonne car le substrat est nettoyé pendant la pulvérisation.

La couche mince diélectrique est obtenue par traitement anodique de la couche de tantale pour l'oxyder.

La deuxième armature est également réalisée par pulvérisation de tantale sur la couche de Ta_2O_5 .

Pour les condensateurs hybrides, le dépôt de la première armature est réalisé directement sur le substrat, tandis que pour les condensateurs compatibles, le dépôt est fait sur la couche de SiO_2 recouvrant le substrat monolithique. L'aluminium ne peut être utilisé ici comme contact car il diffuse à basse température dans le Ta_2O_5 .

Capacités à l'alumine (Al_2O_3)

-La première armature est réalisée par évaporation sous vide d'une couche d'aluminium sur le substrat isolant (ou sur la couche de SiO_2 recouvrant la rondelle monolithique pour les condensateurs compatibles) -Une couche de nickel (Ni) est ensuite évaporée sur l'Al afin d'empêcher la migration de l'Al dans l'alumine. Le diélectrique est déposé sur le Ni par décomposition d'un composé d'aluminium. Pour la deuxième armature, on évapore une autre couche de Ni, puis une couche d'Al. (fig. I.6).

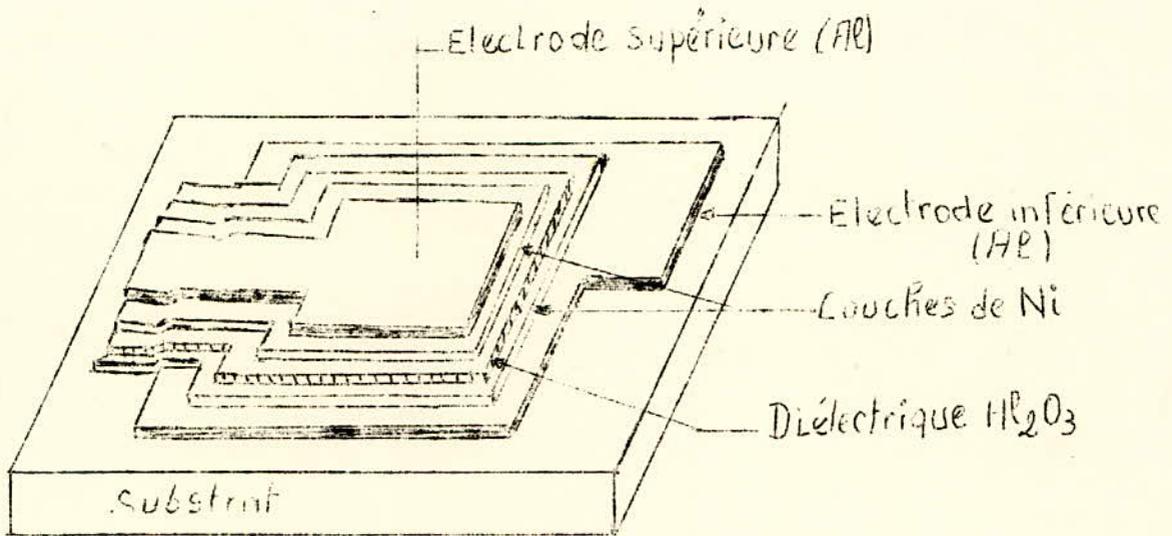


Fig 1.6

1.3.2- Résistances à couches minces

pour les circuits hybrides, la couche de matériau constituant la résistance est déposée sur le substrat isolant; pour les circuits monolithiques, elle est déposée sur une couche de SiO_2 recouvrant la rondelle qui contient les autres éléments du circuit. La géométrie de la couche mince résistive est réalisée par découpe masquée. Une couche isolante est ensuite déposée sur la résistance, laquelle sera découpée pour la réalisation des contacts ohmiques.

Résistances à oxyde d'étain (SnO_2)

A l'état pur, le SnO_2 est isolant; après évaporation, il devient semi-conducteur de type n, par manque d'atomes d'oxygène dans la couche; l'adjonction d'ions trivalents (indium) pendant l'évaporation fait baisser la conductivité de la couche. L'adhérence du SnO_2 sur le verre est bonne.

Résistances au tantale (Ta)

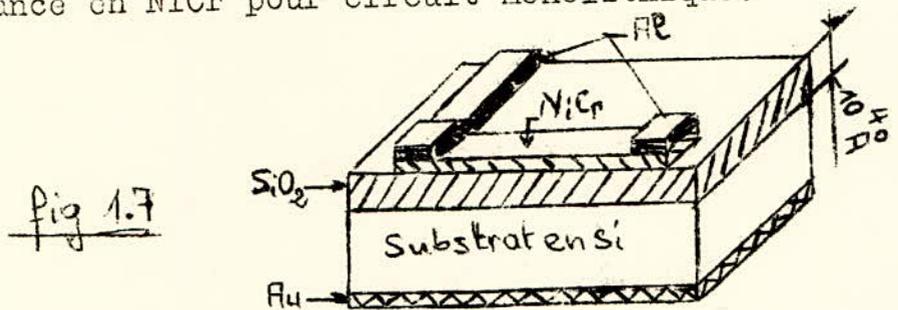
Le dépôt des couches de tantale est obtenu par pulvérisation. Pour avoir une bonne adhérence sur le métal, et une bonne protection, on pratique une oxydation anodique sur la couche.

Pour réduire le coefficient de température de la résistance, on introduit de l'azote dans l'enceinte de pulvérisation.

Résistances en Nichrome (NiCr)

Les couches de NiCr (alliage de 80% de Ni et 20% de Cr) sont obtenues par évaporation sous vide sur le substrat porté à une température de 300°C - Une évaporation initiale de chrome seul permet une excellente adhérence de la couche. Exemple de structure (fig. I,7)

Résistance en NiCr pour circuit monolithique.



1.3.3. Inductances en couches minces

Les inductances sont les composants les plus difficiles à réaliser en circuits intégrés. Le substrat utilisé est en général le verre. Elles sont réalisées en spirale, avec du cuivre, de l'argent ou de l'or.

1.4 - LES CONTACTS OHMIQUES DANS LES CIRCUITS INTEGRES [XII]

La fabrication de circuits intégrés consiste à remplacer l'assemblage par soudure de différents composants formant le circuit, par des opérations globales permettant de les réaliser simultanément sur, ou dans un même substrat.

Dans les couches minces et épaisses, les chemins conducteurs sont formés par photogravure dans les couches métalliques déposées sur des substrats isolants ou par sérigraphie.

Dans les circuits monolithiques les chemins métalliques allant, sur l'oxyde de silicium, d'une fenêtre à l'autre interconnectant ainsi les différents composants, sont formés par dépôt d'une couche d'aluminium photogravée.

Les chemins d'aluminium qui relient les fenêtres des cristaux se terminent par des plages de surfaces relativement grandes. Pour connecter un tel cristal à son support, on procède par un traitement d'ensemble faisant partie de la fabrication par lots : c'est la technique des connexions intégrés. Il en existe deux procédés.

- Dans le procédé "flip chip", le cristal monolithique est placé sur une couche mince de façon à faire coïncider les extrémités des conducteurs de la couche mince avec les plages métalliques du cristal; une soudure est ensuite pratiquée pour assurer les connexions.

- Dans le procédé "beam leads" (connexions dépassantes), les métallisations débordent, en porte à faux, sur l'oxyde recouvrant le cristal monolithique - De même que précédemment le cristal sera placé sur une couche mince adéquate et on réalise par soudure la connection entre les métallisations du cristal et de la couche mince.

Le film métallique utilisé pour réaliser les connections doit remplir les conditions suivantes :

- bonne adhérence au silicium et au bioxyde de silicium
- ne doit pas se combiner à l'oxygène provenant de la silice.

- réalisation d'un contact réellement ohmique (non redresseur) sur le semiconducteur.

- bon conducteur.

- propriétés métallurgiques suffisantes pour permettre

la soudure des interconnexions.

Les métaux pouvant être employés sont : l'aluminium, l'or, l'argent, le chrome- L'aluminium est le métal le plus utilisé.

La couche d'aluminium est obtenue par évaporation sous vide; son épaisseur est de 1 à 2 microns- Ce dépôt d'aluminium doit se faire à moins de 600°C afin d'éviter l'oxydation du métal.

1.5. REALISATION DES COUCHES MINCES

Différentes méthodes, qui, toutes font appel aux techniques du vide, mènent à l'élaboration des circuits intégrés hybrides à couches minces.

-Evaporation sous vide (par filament chauffant, thermo-évaporation, bombardement ionique, canon électronique).

-Pulvérisation cathodique

-Dépôt par voie gazeuse (réduction par H₂, décomposition thermique).

-Dépôt par électrolyse.

-Dépôt par électroless (oxydation-réduction)

-Dépôt par sérigraphie (pour les couches épaisses)

L'évaporation sous vide et la pulvérisation cathodique sont parmi les plus employées.

1.5.I- Evaporation sous vide [11]

La substance à évaporer (source) est en contact avec un filament qui est chauffé à haute température par effet Joule. L'évaporation se fait sous vide poussé (10^{-6} à 10^{-5} Torr)

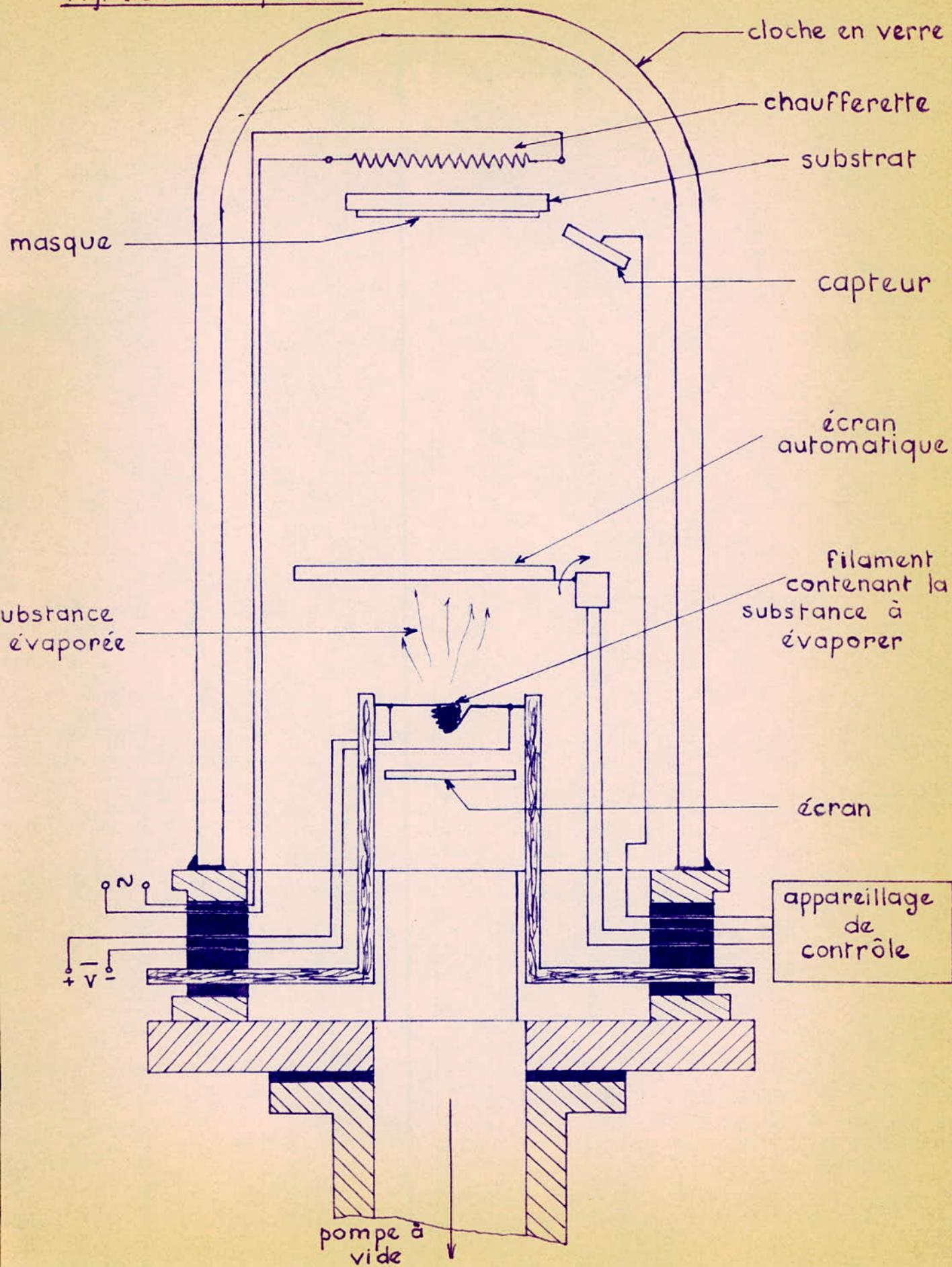
Le libre parcours moyen des molécules évaporées est de l'ordre du diamètre de la cloche.

La substance évaporée rayonne dans toutes les directions à partir de la source et se dépose uniformément sur tous les objets qui se trouvent à son chemin.

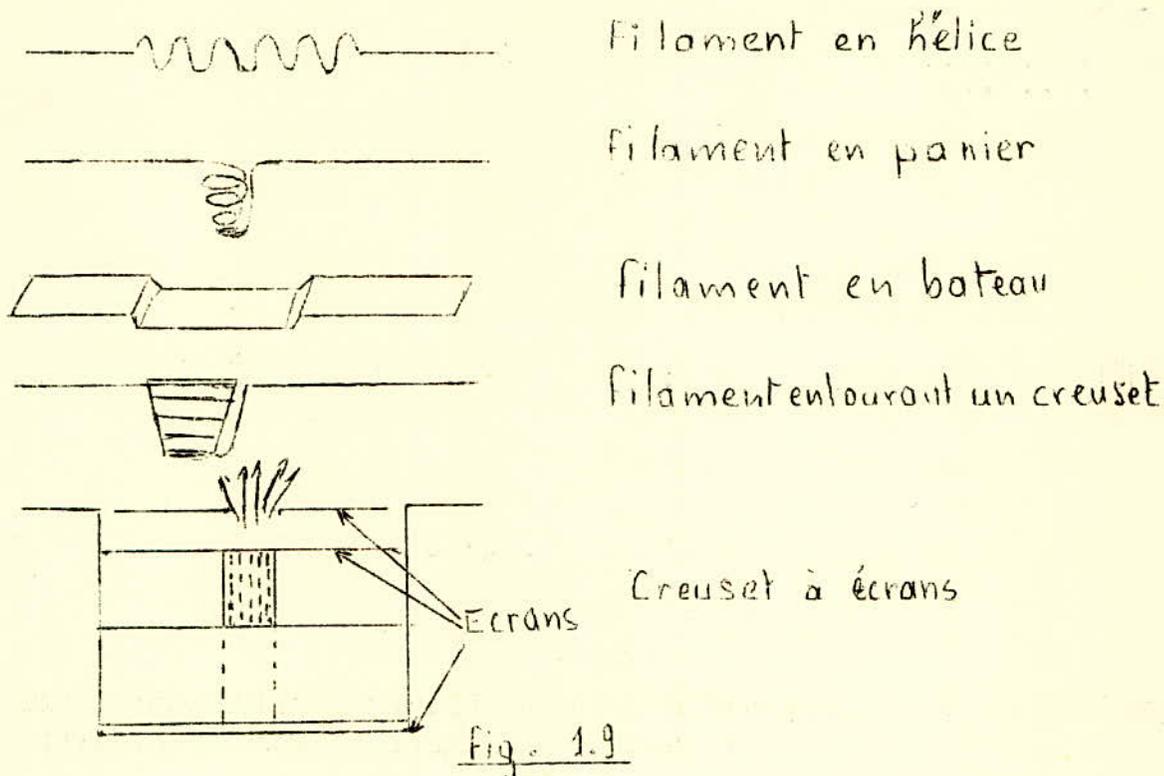
Le substrat est placé à une distance appréciable de la source (quelques Cm); il est chauffé pendant l'évaporation afin d'augmenter l'adhérence et les caractéristiques du dépôt.

La température du substrat augmente sous l'effet de l'énergie cinétique des particules. (fig. I, 8) et de l'énergie rayonnée par la source.

Fig. 1.8. Evaporateur.



Filaments utilisés : filament en hélice, filament en panier, filament en bateau, filament entourant un creuset à écrans (fig. I,9)



Les métaux pliables sous forme de cavaliers (Au, Ag, Al) sont suspendus sur le fil de tungstène constituant le filament en hélice. Pour les substances non disponibles sous forme de fils, on utilise des filaments en panier ou en bateau; le filament en panier rayonne dans toutes les directions, tandis que le filament en bateau ne rayonne que par dessus. Si la substance réagit avec le tungstène à haute température, on emploie un creuset entouré du fil de tungstène (c'est le cas du carbone et de l'alumine).

Le creuset à écrans est employé dans le cas où la substance à évaporer tend à éclabousser et perturber la continuité du fil déposé (cas du SiO).

-Les sources flash à chauffage ultra-rapide sont employées pour les composés qui se fractionnent à haute température.

-Le bombardement électronique est employé pour les substances qui se décomposent ou réagissent rapidement avec le tungstène; dans ce cas la source est disposée dans un récipient refroidi à l'eau (cas de l'évaporation du Nichrome).

-Le canon à électrons est utilisé pour localiser les électrons sur une zone étroite de la source qui s'évapore rapidement; pour conserver une composition constante, on fait un balayage de la source par le canon.

Au début de l'évaporation, un écran métallique est placé entre la source et le substrat afin de recueillir les impuretés provenant de la source; l'écran est mis de côté pendant l'évaporation, et il ne reprend sa position initiale que lorsque l'épaisseur de dépôt désirée est atteinte.

L'installation de montages mécaniques dans la cloche, permettant des dépôts successifs sur plusieurs substrats (principe du "carrousel"), augmente les possibilités de l'évaporation.

La couche déposée est polycristalline; la taille du grain peut être modifiée; elle diminue lorsque la vitesse de l'évaporation augmente.

Dans certains cas, la source est complètement évaporée; ainsi l'épaisseur de la couche est fonction de la masse de la source et de la distance entre source et substrat.

1.5-2. Pulvérisation cathodique - [V]

La pulvérisation est plus lente que l'évaporation (pour une épaisseur de 1 μ m elle demande quelques mn à quelques heures, alors que pour l'évaporation il suffit de quelques minutes). Elle consiste à créer une décharge entre deux électrodes placées dans un mélange de gaz, tel que l'argon ou l'azote. Les ions Ar^+ produits par la décharge sont accélérés vers la cathode avec une énergie suffisante pour percuter les atomes de la cathode qui s'en séparent. Les derniers viennent frapper le substrat et ont une vitesse suffisante pour y adhérer.

La pulvérisation est utilisée pour les métaux réfractaires tel que le tantale. Dans le cas de la pulvérisation réactive un deuxième gaz destiné à être incorporer dans la couche

déposée est introduit dans la cloche (dépôt du SiO_2 et de la vitreure de tantale) (fig.I.10))

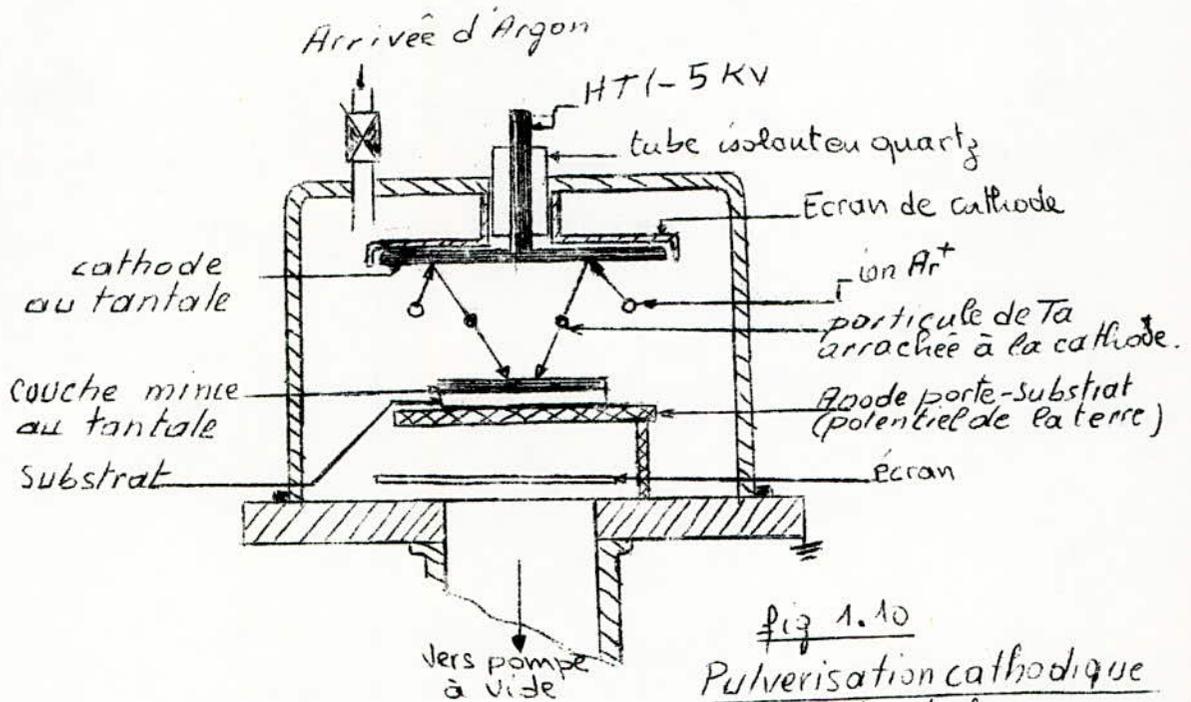


fig 1.10
Pulvérisation cathodique du tantale.

Autre système de pulvérisation cathodique

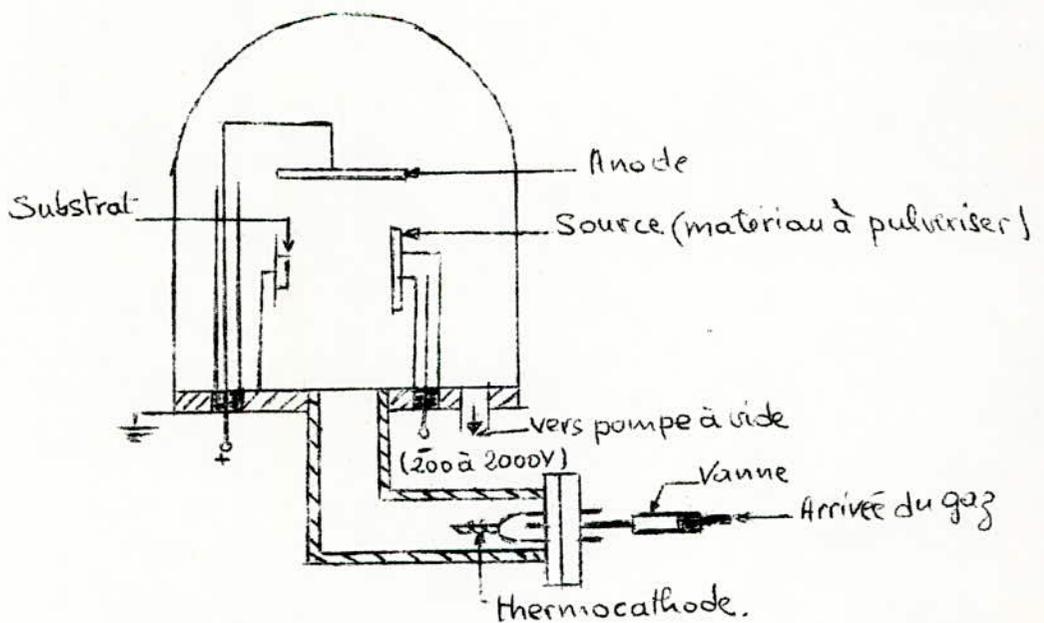


fig 1.11 - Installation de pulvérisation par ions et plasma

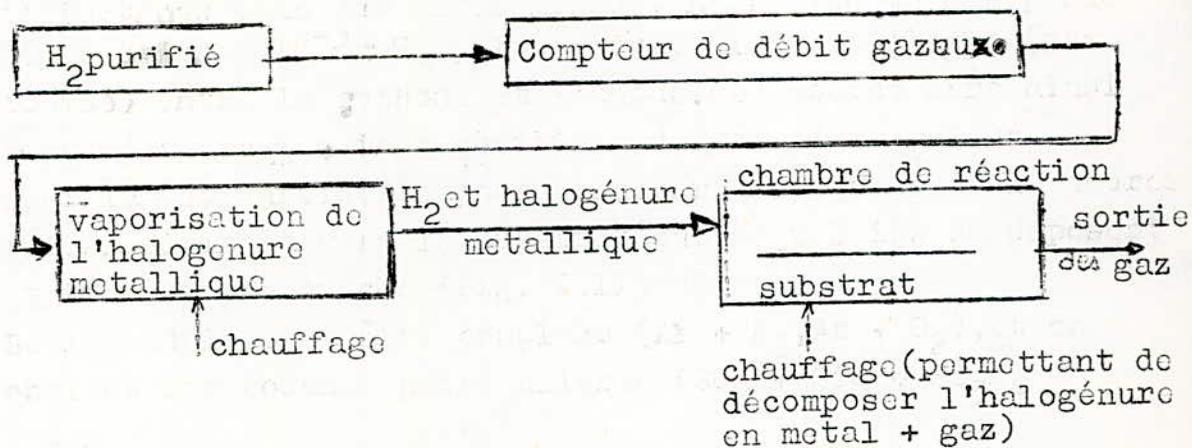
On réalise un vide de 10^{-6} mm Hg et on chauffe la cathode électriquement; lorsqu'elle atteint 2800°C , la densité d'électrons émis est assez grande. L'arrivée de gaz porte la pression à 10^{-3} mmHg ; il se forme alors un plasma (gaz ionisé) entre la cathode et l'anode. La source sera ainsi bombardée par les ions positifs du gaz admis ; leur énergie est suffisante pour arracher des atomes de la source qui se dirigent vers le substrat sur lequel ils se déposent et forment une couche (fig. I, II)

Le gaz admis peut être complexe ($\text{Ar} + \text{N}_2, \text{Ar} + \text{O}_2$), et on obtient des couches particulières ($\text{SO}_2 + \text{SiO} + \text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiO}_2 \dots$).

1.5-3. Dépôt par voie gazeuse

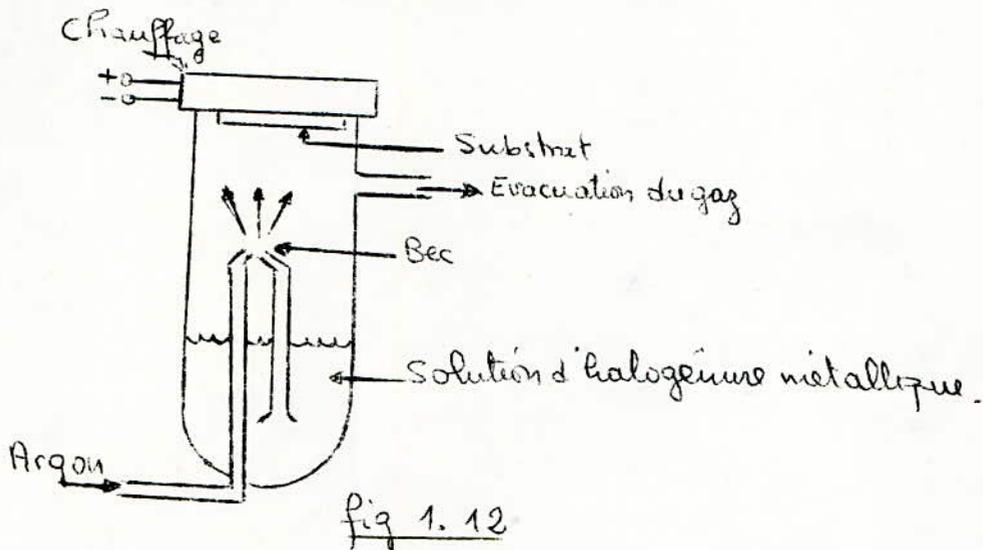
Dans cette méthode, il est nécessaire que les atomes qui composent la source se dissocient ou soient réduits à des températures inférieures au point de fusion de la couche ou du substrat. Le dépôt peut se faire par réduction par H_2 ou par décomposition thermique.

-Réduction par H_2



Le métal se dépose sur le substrat dans la chambre de réaction, où la température est de 750 à 1000°C, L'épaisseur du dépôt peut atteindre 20 μm . L'uniformité de la couche augmente avec le débit gazeux.

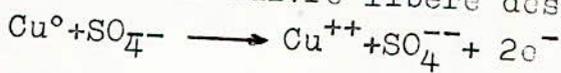
-Décomposition thermique : (fig. I.12)



1.5.4. Dépôt par électrolyse

Un sel métallique se dissocie dans l'eau. Prenons l'exemple de : $\text{Cu}^{++}\text{SO}_4^{--}$:

L'anode en cuivre libère des ions Cu^{++} suivant l'équation :



et il se forme un dépôt de cuivre sur la cathode : $\text{Cu}^{++} + \text{SO}_4^{--} + 2e^- \longrightarrow \text{Cu}^0 \downarrow + \text{SO}_4^{--}$

La loi des faraday donne la masse de métal déposée sur la cathode.

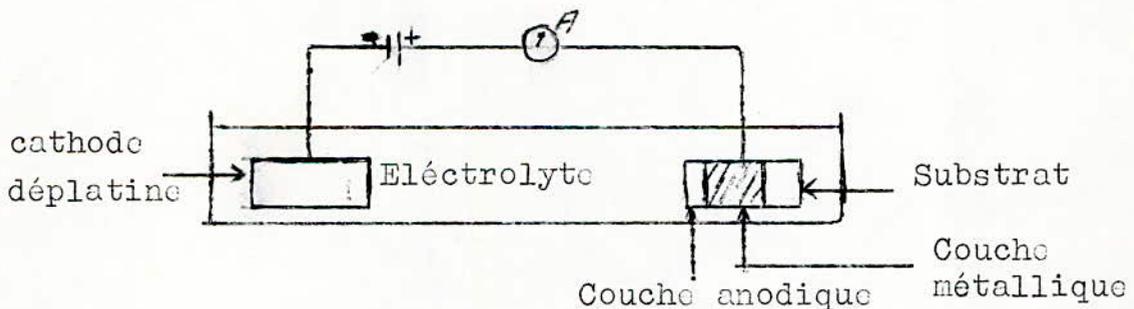
5.5. Dépôt par "électroless"

Dans une réaction électroless, sans faire intervenir une source de tension, l'ion métallique est réduit et Δe déposé. Cette méthode est employée pour former des couches métalliques sur des substrats de céramique, de verre et de plastique.

1.5.6. Dépôt par sérigraphie,

La sérigraphie est employée pour la fabrication des circuits intégrés à couches épaisses et notamment pour les zones d'interconnexion et les soudures des pastilles sur le substrat céramique. Elle était employée anciennement avec un écran de soie, lequel est remplacé actuellement par un écran métallique. Le matériau à déposer est pressé sur l'écran, qui est mis en contact avec la céramique; une couche passe à travers les ouvertures de l'écran et est déposée sur le substrat, que l'on passe dans un four à hydrogène à 1400°C pour le séchage.

Des modifications peuvent être apportées aux couches minces c'est le cas de l'oxydation anodique. Pour obtenir, par exemple, la couche diélectrique d'un condensateur en oxyde de tantale, un film de tantale est déposé par pulvérisation cathodique, puis sera converti en oxyde de tantale par une oxydation anodique.



Afin d'obtenir les découpes désirées de couches minces, on utilise l'évaporation à travers un masque métallique ou le masquage "in situ" par plaques photographiques ou par masques ~~mécaniques~~ mécaniques:

-Le masquage mécanique se fait pendant l'évaporation en collant le masque au substrat; son emploi est limité par les formes géométriques (ex: on ne peut pas réaliser des couches en forme de couronne).

-Le masquage direct par photogravure ne se fait^{qu'} à la fin de l'évaporation; le dépôt se fait donc sur toute la surface du substrat- Cette méthode est employée pour les couches en Al, SiO₂, SnO₂, Al₂O₃- SiO₂...

-Le masquage photographique "in situ" se fait avant le dépôt. La laque photosensible est déposée sur le substrat, puis soumise à l'exposition aux U.V. et au traitement de révélation; on procède à l'évaporation et une fois le dépôt fini, on enlève la résine polymérisée et la couche déposée sur elle. Cette technique est utilisée pour la réalisation des couches en or et en chrome.

-Le masquage métallique " in situ" se fait aussi avant le dépôt- Cette technique consiste à déposer une couche métallique sur toute la surface du substrat et à réaliser un masque par la méthode de photogravure (dépôt d'une résine) polymérisation, révélation, attaque de la couche métallique et mise à nu du métal restant)- L'évaporation de la couche mince se fait alors sur toute la surface du substrat masqué et le restant de la couche métallique initiale est attaqué et enlevé ainsi que le matériau déposé dessus- Les résistances en NiCr sont réalisées par cette technique.

III- DIFFERENTES METHODES DE MESURE DE L'EPAISSEUR DES COUCHES MINCES.

Le contrôle de l'épaisseur des couches minces nécessite une mesure non destructive, pendant la formation même de la couche. La méthode de mesure qui sera utilisée doit pouvoir s'appliquer à n'importe quel matériau de dépôt parmi ceux utilisés pour la réalisation des couches minces et aussi pour n'importe quel support de la couche. Nous devons pouvoir mesurer par cette méthode les épaisseurs de couches allant de quelques Å à quelques μm .

Dans cette partie de l'étude, nous exposerons quelques méthodes pouvant être employées pour la mesure de l'épaisseur des revêtements de surface nous nous attacherons surtout aux principes des différentes méthodes et à leurs conditions d'emploi, ce qui nous fixera sur le choix de la méthode de mesure. [VII], [VIII], [IX], [X].

3. I- METHODES RADIOLOGIQUES

3. I. I- Principe

La matière a la propriété d'absorber des rayonnements ionisants; cette propriété est indépendante de son état physico-chimique.

Pour les rayons α , γ , et β , la loi d'absorption est: $\text{Log}\left(\frac{I}{I_0}\right) = -Kx$

avec: I_0 : intensité initiale de la source de rayonnement

I : intensité émergente après interposition; entre le système de détection et la source, d'un matériau d'épaisseur x et de coefficient d'absorption K .

Le parcours moyen pendant lequel l'intensité initiale ne subit aucune interaction avec le milieu qu'elle traverse est: $\lambda = 1/K$

Soit λ_2 l'épaisseur de demi absorption, c'est à dire l'épaisseur permettant de réduire de moitié l'intensité initiale de rayonnement.

On a :

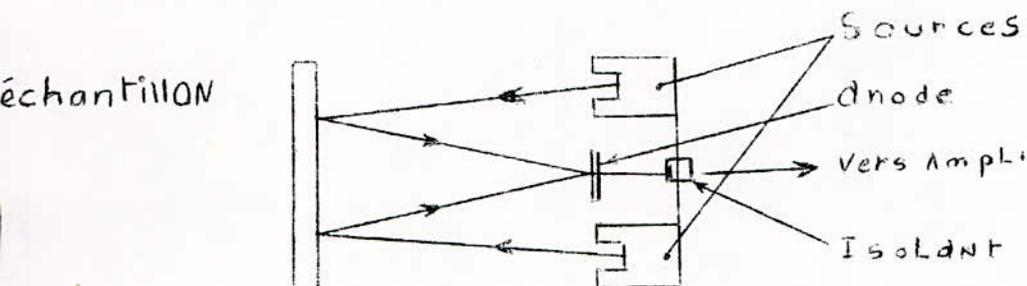
$$I = I_0 2^{-x/\lambda_2}$$

3. I. 2- Méthodes par transmission

Elles consistent à mesurer le rapport ou la différence entre l'intensité du rayonnement de l'émetteur, en l'absence de matériau absorbant et l'intensité après interposition de ce dernier. Ces méthodes nécessitent d'avoir accès aux deux cotés de la couche et elles sont limitées vers les faibles épaisseurs.

3. 1.3- Méthodes par réflexion et par rétrodiffusion

Ces méthodes utilisent la propriété qu'ont les rayons β de se réfléchir sur le milieu qu'ils irradient .



La nombre d'électrons recueillis par l'anode dépend de l'énergie de rayonnement, de l'épaisseur de la couche irradiée et du nombre atomique Z du matériau constituant la couche. Le nombre atomique Z_{Support} doit être suffisamment différent de celui du dépôt. Il faut :

$$0,7 \leq Z_s / Z \leq 1,5 \text{ et } Z_s - Z \geq 3$$

Notons que ces méthodes donnent une mesure peu précise.

3. 2- METHODES PAR COURANTS DE FOUCAULT

3. 2.1- Principe

Les courants induits sont régis par la loi de FARADAY.

Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique, il est le siège d'un courant si le circuit est fermé; si le circuit est ouvert, il apparait entre ses extrémités une f.e.m. $u = \mu \frac{d}{dt} (HS \cos \theta)$

μ : perméabilité du milieu

H: champ magnétique

S: surface du circuit

θ : orientation du circuit par rapport au champ

Dans le cas d'un champ alternatif, une bobine de N spires de surface S, donnera un flux alternatif de pulsation ω : $\phi = \mu_r NSh = \mu_r NSH_m \sin \omega t$

avec $\mu_r = \mu / \mu_0$

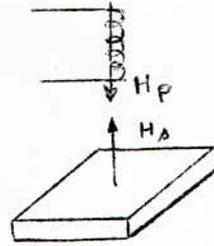
La f.c.m induite dans une bobine secondaire est: $e = - \frac{d\phi}{dt} = -\mu_r \omega NSH_m \cos \omega t$

Cette équation obéit à la loi de LENZ

Dans le cas d'une couche conductrice d'épaisseur non nulle, le flux d'induction se trouve modifié par variation de l'induction ou par déplacement de cette couche, les courants d'induction portent alors le nom de courants de FOUCAULT.

H_p : champ primaire dans l'enroulement,
en l'absence de l'objet.

H_s : champ secondaire créé par les courants de FOUCAULT dans l'objet contrôlé.



Pour la mesure de l'épaisseur, on évalue la profondeur de pénétration des courants de FOUCAULT, qui est donnée par:

$$P = K \left(\frac{I}{\mu_r f \sigma} \right)^{1/2}$$

avec : σ : conductivité de la couche

μ_r : perméabilité relative du matériau conducteur

f : fréquence du champ

K : coefficient

La profondeur de pénétration du champ est définie comme celle pour laquelle la valeur de ce champ a diminué par rapport à sa valeur en surface suivant le rapport $1/e$. On fait intervenir une fréquence limite telle que:

$$f_1 = \frac{0,2534}{\sigma \mu_r L e}$$

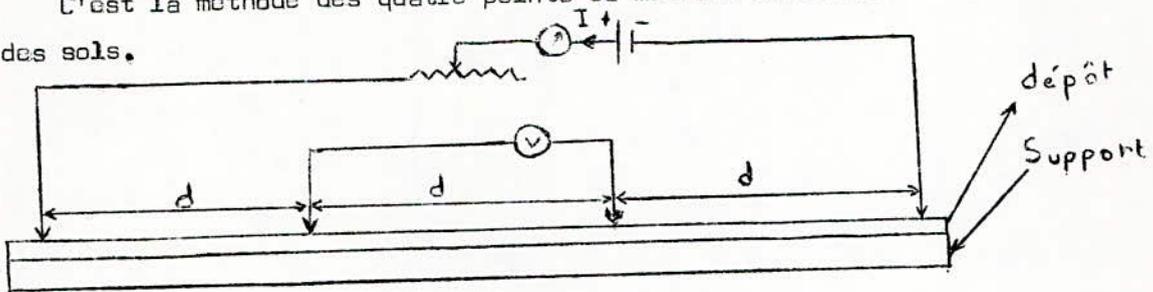
e : épaisseur de la couche (en μm)

L : distance entre l'enroulement primaire et l'objet (en cm)

La mesure ne sera possible que si le dépôt est isolant et le support conducteur amagnétique ou si le dépôt est conducteur amagnétique et le support isolant.

3.3- METHODE RHEOMETRIQUE

C'est la méthode des quatre points ou méthode de mesure des résistivités des sols.



Cette méthode ne pourra s'appliquer que pour un dépôt conducteur et un support isolant. On fait circuler un courant réglé entre les points extrêmes et on mesure la d.d.p entre les deux points intérieurs. Des lignes de courant et des lignes équipotentielles s'établissent entre les deux extrêmes et aux deux points internes, respectivement.

La formule suivante donne l'épaisseur e du dépôt:

$$K = \frac{2 \pi d V}{\rho I} = I + M \frac{d^2}{e^2 \cdot 2} \quad \text{UHLIR}$$

M: étant une fonction calculée et tabulée par

ρ : résistivité du dépôt

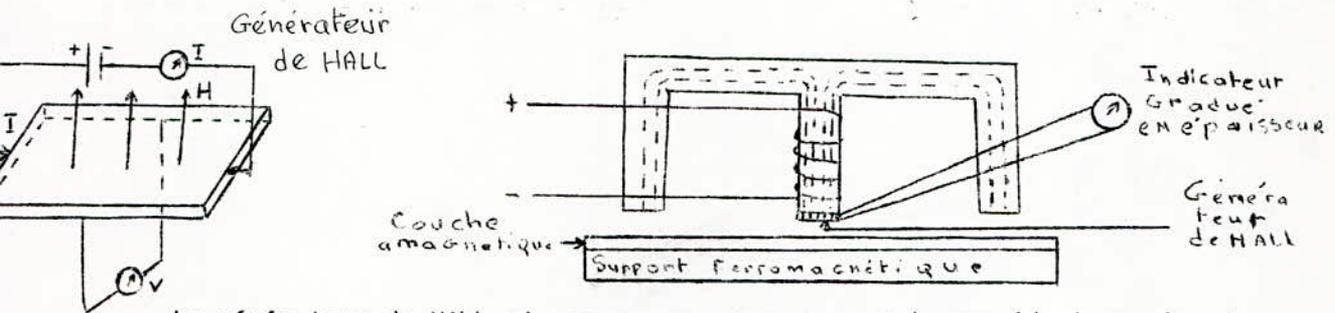
4- METHODES MAGNETIQUE ET ELECTROMAGNETIQUE

Ces méthodes mettent en oeuvre un generateur de HALL:

Si une paroi conductrice est parcourue suivant une direction parallèle aux faces par un courant d'intensité I et soumise, perpendiculaire à ses faces à un champ magnétique H, on peut, sur une direction différente de celle du courant I, par exemple celle qui lui est perpendiculaire, recueillir une d.d.p V, telle que: $V = R_H (IH)/e$

R_H : coefficient de HALL

e : épaisseur de la couche



Le générateur de HALL mis en oeuvre avec une sonde possédant un aimant permanent, permet la mesure des couches amagnétiques sur un support ferromagnétique ou des couches isolantes sur un support ferromagnétique. Le principe de cette méthode consiste à mesurer la force nécessaire pour arracher un aimant permanent de la surface de la couche .

5- APPAREILS A TRANSDUCTEURS INDUCTIFS

La mesure de l'épaisseur se fait ici pour des couches non magnétiques déposées sur un support magnétique.

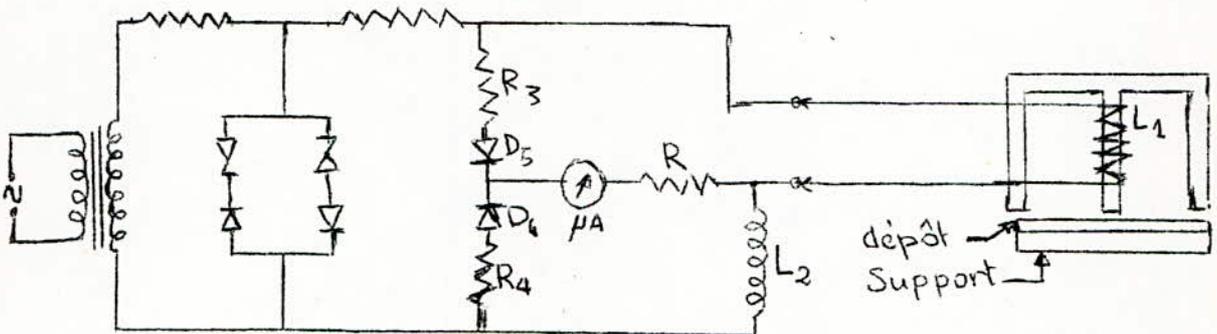
L'appareil de mesure comportera :

- un transducteur constitué par une bobine d'inductance L_1 enroulée sur cadre de ferrite .

- un pont constitué de deux résistances et de deux inductances dont l'une est le transducteur

- un microampèremètre qui donnera le courant lorsque le pont est déséquilibré.

- l'alimentation du pont .



LE transducteur est sensible à l'approche d'un objet magnétique (ici à l'approche du support). La valeur de la self L_1 variera et le pont sera déséquilibré, ce qui donnera un signal dans la diagonale du pont. L'étalonnage du microampèremètre se fera en μm , ce qui donnera une lecture directe.

3.6-APPAREIL A TRANSDUCTEUR PIEZOELECTRIQUE

La mesure ne pourra se faire ici que pendant le processus de dépôt. Une lame de quartz est disposée à côté du substrat et le dépôt se fera en même temps sur la lame de quartz et sur le substrat.

Un cristal de quartz a une fréquence de résonance bien définie qui dépend de sa coupe et de ses dimensions géométriques, donc de sa masse et aussi de la masse du matériau déposé sur une de ses faces; cette fréquence dépendra donc de l'épaisseur de la couche déposée.

L'épaisseur de la couche sera donc exprimée en une variation de fréquence Δf qui pourra se mesurer en incorporant le quartz dans un circuit oscillateur qui donnera un signal de même fréquence que celle du quartz.

L'épaisseur pourra s'obtenir de deux manières :

- 1) Soit en mesurant la fréquence de l'oscillateur à l'aide d'un fréquence-mètre et en déduisant la variation de fréquence (méthode peu précise); nous aurons alors dans l'appareillage de mesure: un oscillateur, un amplificateur et un fréquence-mètre (fig.1).
- 2) Soit en ayant accès à la variation de fréquence, directement. Pour cela nous disposerons d'un oscillateur de référence qui donnera un signal de fréquence fixe f_0 et qui sera amplifié, de l'oscillateur de contrôle donnant un signal de fréquence f variable en fonction de l'épaisseur, signal qui sera amplifié; nous injecterons ces deux signaux dans un étage mélangeur et après filtrage nous obtiendrons un signal de fréquence $F = |f - f_0|$; cette deuxième méthode permet une lecture sur fréquence-mètre bien plus précise que la première (fig.2).

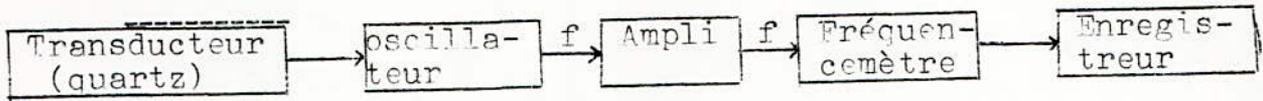


Fig.1

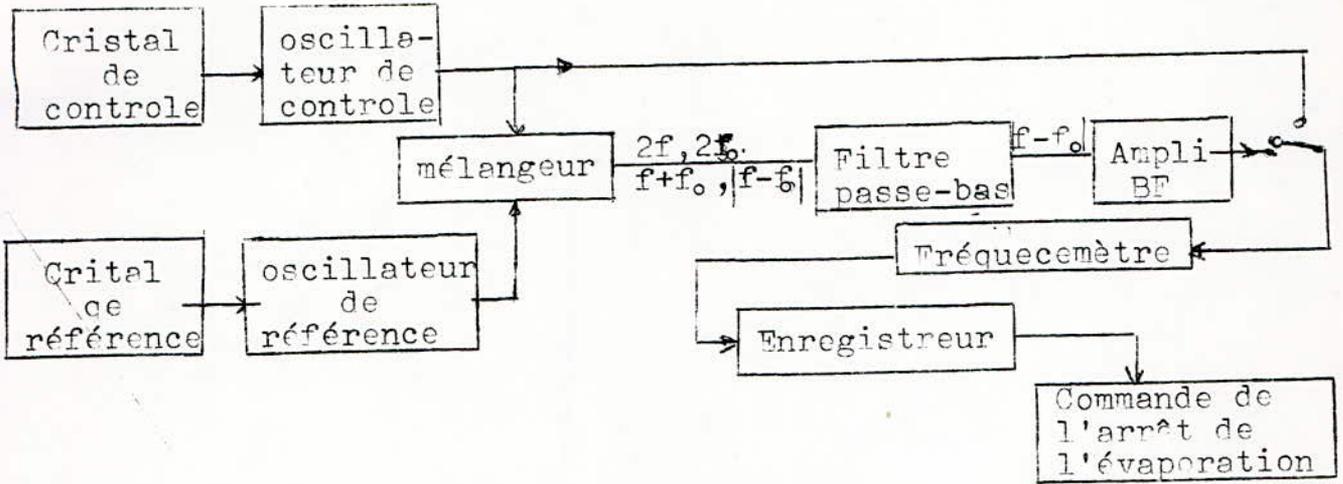


Fig.2

L'utilisation de l'appareil à transducteur piézoélectrique permet de suivre le processus du dépôt de la couche grâce au fréquencesmètre et à l'enregistreur qui donnera la courbe de variation de l'épaisseur du dépôt. Le contrôle du processus de dépôt pourra être rendu automatique en commandant l'arrêt du chauffage du matériau évaporé et le déclenchement d'un masque qui viendra se placer entre le substrat et la source. Cette méthode permettra donc d'arrêter l'évaporation une fois l'épaisseur voulue atteinte.

3.7- METHODE ELLIPSOMETRIQUE:

L'ellipsométrie est une technique qui convient essentiellement à la détermination des propriétés optiques d'une surface réfléchissante ou d'une couche. Cette technique conviendra donc à la mesure de l'épaisseur des couches sur substrat. Ceci se fera grâce à la détermination de l'ellipticité; après réflexion sur la surface, de la lumière qui initialement, est polarisée plane.

3.7-I Principe de la méthode

Nous distinguerons ici les milieux non absorbant des absorbants .

-Cas d'un milieu non absorbant

Les équations de base se rapportant à la méthode peuvent être obtenues par la théorie classique des ondes électromagnétiques (dans ce cas il s'agira des ondes lumineuses).

Les deux milieux (échantillon et milieu environnant) doivent être isotropes

et homogènes. Nous prendrons un film avec une lumière incidente dont le plan de polarisation n'est ni parallèle, ni perpendiculaire au plan d'incidence; nous choisirons l'angle égal à 45° du plan d'incidence, et le rapport d'amplitude des composantes parallèles et perpendiculaires du rayon incident est alors égal à l'unité.

La réflexion produit une différence de phase entre les composantes parallèles et perpendiculaires de la lumière incidente et change le rapport des amplitudes.

Les coefficients sont donnés par : les coefficients de réflexion de FRESNEL.

$$(1) \quad r_{01//} = \frac{n_0 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_0}{n_0 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_0} \quad (1); \quad r_{01\perp} = \frac{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + n_1 \cos \theta_1} \quad (2)$$

pour la lumière allant du milieu (0) au milieu (1), ayant des angles d'incidence et de refraction θ_0 et θ_1 respectivement, et pour des indices de refraction n_0 et n_1 des deux milieux respectivement.

Des expressions similaires sont obtenues pour les coefficients de transmission. L'équation de base de l'ellipsométrie est: $(r_{//})/(r_{\perp}) = \tan \Psi \cdot e^{j\Delta}$ où Ψ et Δ sont des angles déterminés par les lectures du polariseur et de l'analyseur de l'instrument. Pour une couche de surface non absorbante d'indice de refraction n_1 sur un substrat d'indice n_2 , les coefficients de FRESNEL sont:

$$r_{//} = \frac{r_{01//} + r_{12//} \cdot e^D}{1 + r_{01//} \cdot r_{12//} \cdot e^D} \quad (3); \quad r_{\perp} = \frac{r_{01\perp} + r_{12\perp} \cdot e^D}{1 + r_{01\perp} \cdot r_{12\perp} \cdot e^D} \quad (4)$$

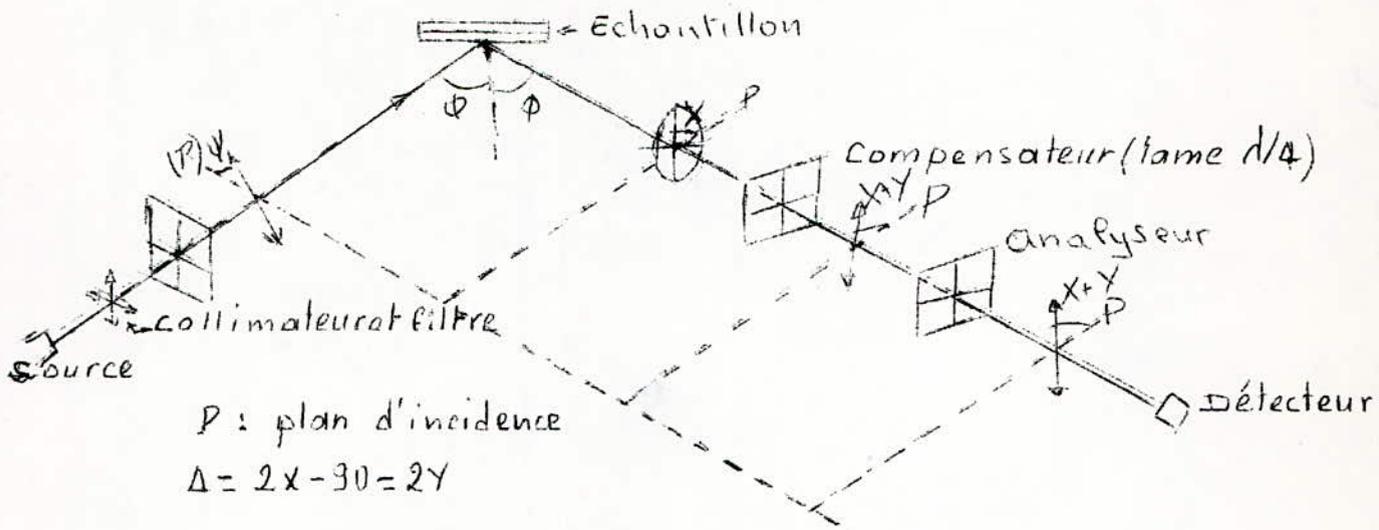
$$\text{où } D = 4.3,14 \cdot n_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot e / \lambda \quad (5);$$

e : étant l'épaisseur de la couche et λ , la longueur d'onde de la lumière utilisée.

- Cas d'un milieu absorbant

Pour un milieu absorbant l'indice de refraction complexe $N = n - jk$, remplace l'indice de refraction n ; de même pour les coefficients de FRESNEL, ils deviennent complexes et D devient $D = j.4.3,14 \cdot N_1 \cdot \cos \theta_1 \cdot e / \lambda$

3.7.2- Schéma du dispositif



3.7.3- Application à la mesure d'épaisseurs

Pour les couches non absorbantes, l'équation de l'ellipsométrie est:

$$r_{//}/r_{\perp} = \text{tg} \psi \cdot e^{j\Delta} = \text{tg} \psi \cdot \cos \Delta \quad (\text{car } r_{//} \text{ et } r_{\perp} \text{ sont réels})$$

$$D = 4\pi n_1 \cos \beta \cdot e / \lambda$$

Les angles ψ et Δ sont déterminés par les lectures du polariseur et de l'analyseur; ce qui permet de connaître le rapport $r_{//}/r_{\perp}$, et grâce aux équations (1) et (2), ainsi que (3) et (4), on aura la valeur de D , donc celle de l'épaisseur e de la couche.

Dans le cas de couches absorbantes, des difficultés apparaissent car l'indice de réfraction est complexe: $N = n - jk$. Pour surmonter ces difficultés, Mc. CRACKIN et COLSON suggèrent que les parties réelle et imaginaire de l'indice du film soient obtenues par augmentation du nombre de lectures de l'ellipsomètre; pour cela, nous avons quatre méthodes:

- 1) Utiliser des films d'épaisseurs inconnues mais différentes (avec un même indice de réfraction)
- 2) Utiliser un seul film avec un milieu environnant différent, d'indice de réfraction connu.
- 3) Utiliser un seul film ou une série de films de même indice de réfraction, ou des substrats variés d'indice de réfraction connu.
- 4) Utiliser un seul film à différents angles d'incidence.

Nous pouvons utiliser une autre méthode en partant de l'équation de base de l'ellipsométrie:

$$r_{//}/r_{\perp} = \text{tg} \psi e^{j\Delta} = \left[\frac{r_{//}}{r_{\perp}} \right]_0 e^{j(d_{//} - d_{\perp})} = F(n, k, e) e^{jG(n, k, e)}$$

$$\implies \begin{cases} \text{tg} \psi = F(n, k, e) \\ \Delta = G(n, k, e) \end{cases}$$

quand $k = 0$, les deux dernières équations suffisent à la détermination de l'épaisseur.

Nous avons de même: $|r|^2 = |r_{//}|^2 \cdot \sin^2 \alpha + |r_{\perp}|^2 \cos^2 \alpha$

où α est l'azimuth du vecteur électrique du rayon incident, qui est pris égal à $45^\circ \implies |r|^2 = \frac{1}{2} (|r_{//}|^2 + |r_{\perp}|^2)$

Nous obtenons: $|r|^2 = H(n, k, e)$

Sur le détecteur, nous aurons l'intensité lumineuse: $I = A \cdot I_i \cdot |r|^2$

où I_i est I sont les intensités des rayons incident et réfléchi respectivement et A , le coefficient d'atténuation.

Avec les trois équations: $I = A \cdot I_i \cdot |r|^2$; $\text{tg } \psi = F(n, k, e)$; $\Delta = G(n, k, e)$ nous pourrions déterminer l'épaisseur de la couche.

La méthode ellipsométrique peut être utilisée aussi pour contrôler les couches variables en déterminant la variation du coefficient de réflexion:

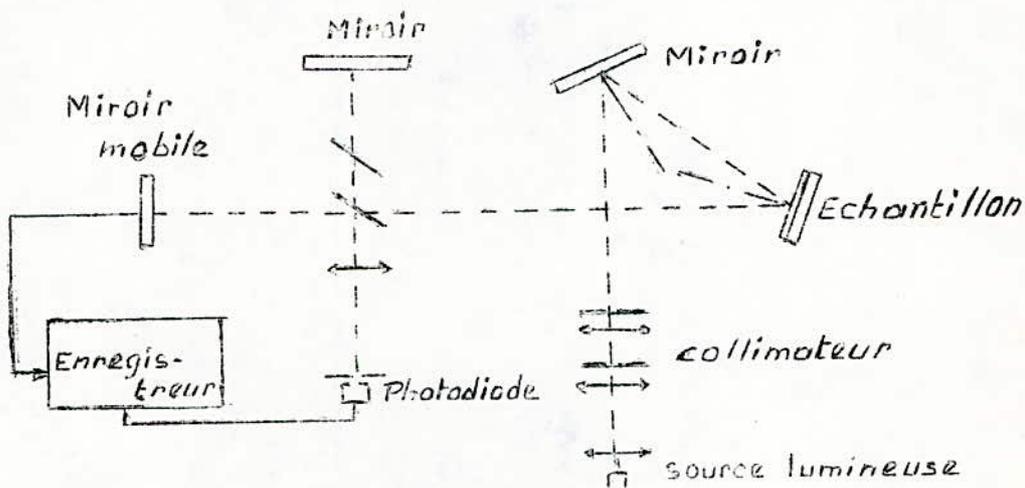
$$\frac{d|r|}{|r|} = \frac{dI}{I}$$

Ce résultat peut être obtenu par la rotation du polariseur ou de l'analyseur de 90° .

3.8- METHODE INTERFEROMETRIQUE

Cette méthode est basée sur l'épaisseur des franges optiques polychromatiques. Elle convient pour les couches minces diélectriques telles que couches de SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 et HgO_2 .

3.8.1- Schéma du dispositif de mesure



3.8.2- Principe de la méthode

Un rayon de lumière blanche collimaté est dévié par un miroir sur la surface du film, presque sous incidence normale, où il se forme de multiples réflexions. A une telle incidence, la réflexion sur les deux faces de l'échantillon (air-film et film-substrat) est faible comparée à l'unité; les deux

premiers rayons réfléchis auront presque même intensité alors que les réflexions supérieures seront négligeables.

La lumière réfléchie du film pénètre dans un interféromètre de MICHELSON et excite une photodiode dont la sortie est soit connectée à un enregistreur soit alimentant un mini-calculateur .

Pour une source monochromatique, la lumière entrant dans l'interféromètre peut être considérée comme composée de deux rayons ayant une différence de phase: $\Delta = 4.\pi.n.e.\cos\theta/\lambda$

où n est l'indice de réfraction du film, e son épaisseur, θ l'angle de réfraction, et λ la longueur d'onde de la lumière utilisée.

La forme de la frange à la sortie de l'interféromètre est alors exprimée par:

$$I = I_{\max} \cdot \cos^2 \frac{\Delta}{2} \cdot \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

Avec δ = différence de phase entre les bras de l'interféromètre .

Dans le cas d'une source polychromatique, on considère que le spectre de fréquence est continu et compris entre deux valeurs: f_1 et f_2 .

L'interférogramme du détecteur sera alors obtenu en sommant l'équation précédente, qui n'est valable que pour une seule fréquence, sur le spectre d'entrée, c'est à dire de f_1 à f_2 .

Cet interférogramme sera donc proportionnel à l'intégrale:

$$T = \int_{f_1}^{f_2} \cos^2 \frac{\Delta}{2} \cdot \cos^2 \frac{\delta}{2} \cdot df = \left(f_2 - f_1 \right) + \frac{1}{a} (\sin af_2 - \sin af_1) \\ + \frac{1}{b} (\sin bf_2 - \sin bf_1) + \frac{1}{2(a+b)} (\sin(a+b)f_2 - \sin(a+b)f_1) \\ + \frac{1}{2(a-b)} (\sin(a-b)f_2 - \sin(a-b)f_1)$$

avec $a = \frac{4.\pi.L}{c}$ et $b = \frac{4.\pi.n.e.\cos\theta}{c}$

c étant la célérité de la lumière et L, la distance parcourue par le miroir mobile de sa position zéro jusqu'à la position pour laquelle la différence de phase est δ :

La fonction T a trois sommets: points: $L = 0$ et $L = \pm n.e.\cos\theta$

3.8.3- Mesure de l'épaisseur

Avant la formation des différentes couches, on recueille l'interférogramme de chaque substrat. (substrat seul sans la couche) grâce à l'enregistreur. On relève ensuite l'interférogramme pour tout l'échantillon : substrat + couche. On procédera après, à l'extraction de l'interférogramme de la couche seule en soustrayant celui du matériau formé par substrat + couche de celui du substrat seul. La lecture de l'épaisseur de la couche se effectuera directement au sommet de l'interférogramme de la couche seule, donné par l'enregistreur en fonction de L, car à ce sommet on a: $L = n.e.\cos\theta$
L'épaisseur est donc: $e = n.\cos\theta/L$

La connaissance de l'épaisseur suppose celle de l'indice de réfraction du film qui peut être mesuré une fois pour toute pour chaque matériau constituant le film grâce à la méthode d'ABELES.

IV - CHOIX DE LA METHODE DE MESURE

Pour fixer notre choix sur la méthode de mesure de l'épaisseur des couches minces, nous devons tout d'abord fixer les contraintes de la mesure, à savoir:

- la faible valeur de l'épaisseur à mesurer: elle est de l'ordre du micron (0 à $2\mu\text{m}$)
- La précision de la mesure doit être bonne: 1 à 2%
- la méthode de mesure doit être non destructive
- le dispositif de mesure doit aussi servir au contrôle du dépôt, ce qui suppose que la mesure doit se faire pendant la formation de la couche.
- il faudra que la mesure puisse se faire pour n'importe quel matériau de dépôt, et aussi pour n'importe quel matériau constituant le substrat.

Le choix de la méthode se fera donc en fonction de ces paramètres; celles-ci devront satisfaire à toutes les exigences de la mesure. Afin de faire notre sélection, nous procéderons par élimination en reprenant chacune des méthodes citées précédemment, pour en tirer leurs avantages et inconvénients.

4.I. Méthodes radiologiques

Parmi les méthodes radiologiques, nous avons vu que seule la méthode par réflexion et rétrodiffusion β , appelée aussi méthode à jauges à rayonnement β , convient à la mesure de l'épaisseur des dépôts.

Cette méthode est non destructive et, théoriquement, la mesure pourrait se faire pendant la formation du dépôt, mais alors le dispositif de mesure devrait être placé à l'intérieur de la cloche d'évaporation, ce qui serait fort encombrant. La plage de mesure s'étale en général de 0 à $50\mu\text{m}$ mais la précision laisse à désirer car elle est de 10% environ. Le champ d'application de la méthode est peu restreint, vu que les matériaux de dépôt et de support peuvent être quelconques, avec la restriction cependant que leurs nombres atomiques soient suffisamment différents l'un de l'autre.

A cause de la mauvaise précision et surtout de l'inadaptation de l'appareil de mesure au dispositif d'évaporation cette méthode sera rejetée.

4.2. Méthode par courants de Foucault

La méthode utilisant les courants de Foucault est non destructive, et la mesure peut s'effectuer pendant le processus de dépôt, car un dispositif de mesure peut être conçu de façon à qu'il soit peu encombrant et puisse être placé dans l'enceinte d'évaporation. L'appareil pourra mesurer des épaisseurs allant de 0 à 300 μm , mais avec précision assez faible (environ 10%). Les limitations de cette méthode se situent surtout dans son champ d'application car la mesure n'est possible que dans deux cas:

- Dépôt isolant sur support conducteur ~~non~~ amagnétique
 - Dépôt conducteur amagnétique sur support isolant
- A cause de ces limitations et de la mauvaise précision, cette méthode ne sera pas employée.

4.3. Méthode rhéométrique

Cette méthode est à rejeter dès ~~de~~ l'abord, car elle ne peut en aucun cas donner la valeur de l'épaisseur pendant sa formation, elle présente en plus des limitations puisqu'il faut que la couche soit conductrice et le substrat isolant.

4.4. Méthode magnétique et électromagnétique

Cette méthode utilise pour la mesure un générateur de Hall. Comme la première méthode, elle présente des encombrements lors de la mesure et la précision ^{est} mauvaise (10%); la mesure n'est possible que pour un dépôt non magnétique sur un support ferro magnétique. Elle n'est pas utilisée pour le contrôle de l'épaisseur des couches minces.

4.5. Appareil ~~à~~ transducteur inductif

Cet ~~est~~ appareil permet des mesures d'épaisseur allant de 0 à 100 μm avec une assez bonne précision (4%). Les problèmes d'encombrement qu'il poserait dans le cas où il serait appelé à être disposé à l'intérieur de la cloche

d'évaporation, sont surmontables. Ce qui limite son utilisation c'est le fait que la mesure ne pourra se faire que pour un dépôt amagnétique sur un support magnétique, pour cela la méthode sera mise de côté.

4.6. Méthode ellipsométrique

L'ellipsométrie~~est~~ est une technique qui convient pour le contrôle de l'épaisseur des couches minces grâce à sa grande sensibilité, en effet une couche de quelques Å peut être détectée par cette technique. Les mesures se font avec une bonne précision. Cependant la structure de l'instrument ne se présente pas à un contrôle continu de la couche pendant l'évaporation, et un autre inconvénient vient du fait que les mesures sont différentes suivant ~~le film~~ que le film est un matériau absorbant ou non.

4.7. Méthode interférométrique

Cette méthode convient pour les mesures de faibles épaisseurs (quelques Å à quelques μm); elle a de plus à son avantage une bonne précision (1 à 2%).

Ses inconvénients viennent du fait qu'elle ne pourra être utilisée pendant le processus de dépôt, qu'elle ne permet de mesurer que des épaisseurs de couches minces diélectriques.

4.8. Appareil à transducteur piézoélectrique

L'intérêt essentiel de la méthode utilisant un cristal de quartz comme transducteur vient du fait que l'épaisseur de la couche est traduite en une variation de fréquence laquelle comme on le sait peut se mesurer avec une très bonne précision, et que la mesure se fait d'une façon continue pendant le processus de dépôt car il est facile de disposer une lame de quartz dans l'enceinte d'évaporation et cela ne posera aucun problème d'encombrement.

L'instrument pourra mesurer des épaisseurs allant de 0 à quelques μm ; il donnera une précision de 1 à 2%.
La mesure pourra se faire pour n'importe quel matériau constituant la couche et pour n'importe quel matériau formant le substrat.

L'appareil sera donc précis, simple, non encombrant et permettra de commander l'arrêt de l'évaporation une fois atteinte l'épaisseur désirée.

Un autre intérêt que présente cet appareil, c'est qu'il est utilisable pour toutes les méthodes de dépôt mis à part le dépôt par électrolyse ~~xxx~~ et le dépôt par électroless. En résumé, l'appareil à transducteur piézoélectrique a tous les avantages à son actif, et ce sera l'appareil que nous adopterons pour le contrôle de l'épaisseur des couches minces.

4.9. Mesure des épaisseurs des couches déposées par électrolyse et par voie chimique

Pour ces deux méthodes de dépôt qui concernent uniquement les couches métalliques, l'épaisseur du film sera déterminée par de simples calculs et non grâce à un appareil de mesure (néanmoins un instrument permettant de mesurer avec précision le temps de dépôt pourra être prévu).

La masse de matière déposée sur le substrat est:

$$m = \frac{M \cdot It}{96493 \cdot z}$$

M = masse molaire du matériau déposé

z = valence de ce corps

I = intensité du courant qui passe dans la cuve

t = durée du dépôt

5.1- INTRODUCTION

L'appareil de mesure adopté est le contrôleur à cristal de qui sera l'objet d'une étude particulière. Nous avons vu qu'il est constitué d'un transducteur piézoélectrique et d'un système électronique de mesure de fréquence.

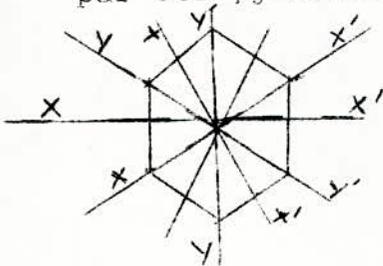
Dans ce chapitre nous exposerons quelques notions sur le transducteur utilisé, nous déterminerons l'épaisseur de la couche en fonction de la grandeur accessible à la mesure, ici ce sera la fréquence, puis nous ferons une description de l'appareil de mesure.

5.2- NOTIONS SUR LE CRISTAL DE QUARTZ [VI]

UN cristal de quartz convenablement taillé est piézoélectrique, c'est à dire que toute déformation mécanique du cristal provoque l'apparition de charges électriques sur sa surface. Inversement un cristal soumis à un champ électrique se déforme mécaniquement en s'allongeant ou en se raccourcissant (selon le sens de la d.d.p. appliquée) dans la direction de l'axe électrique. Ce phénomène de piézoélectricité est la base des résonateurs à quartz.

5.2.1- Aspects mécaniques et électriques du cristal de quartz

Le quartz cristallise sous la forme d'un prisme à section hexagonale régulière terminé à l'une ou aux deux extrémités par des pyramides à base hexagonale.



Nous distinguons trois groupes d'axes: ZZ': axe optique, YY': axe mécanique, et XX': axe électrique.

Les lames de quartz utilisées dans les résonateurs piézoélectriques peuvent être taillées suivant différentes directions:

- Suivant un axe YY': l'effet piézo se manifeste selon la perpendiculaire à cet axe, c'est une coupe X ou de CURIE.
- Parallèlement à un axe XX': l'effet piézo se manifeste selon l'axe YY': c'est une coupe Y.
- Suivant différents angles par rapport aux trois axes; selon la valeur de l'angle la coupe est appelée: AC, AT, BT; CT, ET, BC, J, M, N...

Un résonateur est constitué par une lame de quartz taillée suivant l'une des coupes évoquées ci-dessus et soumise à un champ électrique au moyen de deux électrodes. Les différents modes de vibration mécanique de la lame sont: le cisaillement en épaisseur, le cisaillement en surface, l'extension, la flexion.

-Caractéristiques des différentes coupes-

coupe	domaine d'utilisation (KHz)	constante d'onde N (KHz.mm)	mode de vibration	forme du cristal	coeff. de températ.
AT	300 à 1500	1662	cisail. épaisseur	carré rectangle disque	$\pm 3 \cdot 10^{-6}$
BT	3000 à 30000	2560	" "	" "	"
CT	120 à 250	3100	cisail. surface	carré	$\pm 2 \cdot 10^{-6}$
DT	80 à 300	2080	" "	"	"
GT	80 à 500	3300	extension	rectangle	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$
MT	50 à 100	variable	" "	"	"
NT	4 à 50	variable	flexion		"

5:2.2- Vibrations des cristaux de quartz

L'équation fondamentale en absence d'atténuation est:

$$c = (q/\rho)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

où c est la vitesse de l'onde, q le coefficient de raideur, qui prend différentes formes pour différents types de vibration et ρ la densité. La résolution du problème se fera en trouvant l'expression de q suivant le type de vibration.

Pour une lame parallélépipédique de dimensions X, Y, Z, la propagation de l'onde se faisant dans la direction Z, la vitesse et la fréquence des vibrations libres non atténuées sont;

$$\begin{cases} c = f_h \lambda = 2Zf_h/h \\ f_h = hc/(2Z) = h(q/\rho)^{\frac{1}{2}}/(2Z) \end{cases} \quad (2)$$

h est ici l'ordre de l'harmonique.

Cas de vibrations le long de l'épaisseur de lame de quartz: La théorie générale de la propagation d'ondes dans un milieu anisotrope a été développée par GREEN. Il a montré que pour chaque direction de propagation, il y a en général trois types possibles d'ondes, chacun avec une vitesse propre, les trois directions de vibrations étant perpendiculaires entre elles. Appelons l, m, n, les cosinus directeurs de la normale à la surface d'onde et s, la distance de cette surface à une origine arbitraire. Nous avons: $s = lx + my + nz$ (3)

Le déplacement de ce point sur la surface à partir de sa position normale est ξ ayant les composantes u, v, w et des cosinus directeurs α, β, γ tels que; $\xi = \alpha u + \beta v + \gamma w$ (4)

Les équations générales du mouvement en absence d'atténuation sont:

$$(5) \quad \begin{cases} -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial X_x}{\partial x} + \frac{\partial X_y}{\partial y} + \frac{\partial X_z}{\partial z} \\ -\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial Y_x}{\partial x} + \frac{\partial Y_y}{\partial y} + \frac{\partial Y_z}{\partial z} \\ -\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial Z_x}{\partial x} + \frac{\partial Z_y}{\partial y} + \frac{\partial Z_z}{\partial z} \end{cases}$$

et en introduisant les modules T_{ij} qui sont fonction des constantes élastiques C_{hk} et de l, m, n:

$$(6) \quad \begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = T_{11} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + T_{12} \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + T_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = T_{21} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + T_{22} \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + T_{23} \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = T_{31} \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + T_{32} \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + T_{33} \frac{\partial^2 w}{\partial s^2} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} T_{12} = T_{21} \\ T_{13} = T_{31} \\ T_{23} = T_{32} \end{cases}$$

Les équations suivantes donnent les relations entre la raideur q, les cosinus directeurs et les coefficients T_{ij} :

$$(7) \quad \begin{cases} \alpha T_{11} + \beta T_{12} + \gamma T_{13} = \alpha q \\ \alpha T_{12} + \beta T_{22} + \gamma T_{23} = \beta q \\ \alpha T_{13} + \beta T_{23} + \gamma T_{33} = \gamma q \end{cases}$$

La valeur de q dérive du système ci-dessus. Il y a trois valeurs possibles de q; ce sont les racines q_1, q_2, q_3 de l'équation cubique suivante:

$$\begin{vmatrix} T_{11} - q & T_{12} & T_{13} \\ T_{12} & T_{22} - q & T_{23} \\ T_{13} & T_{23} & T_{33} - q \end{vmatrix} = 0 \quad (8)$$

A chacune des racines correspond un couple de valeurs pour α, β, γ et une direction pour le déplacement ξ .

Quand les ondes planes correspondent à l'une des racines de (8) sont propagées à la fréquence de résonance dans un cristal à faces parallèles de surface infinie, dans la direction de la

normale à la lame, une condition satisfaisant aux surfaces est que: $\frac{\partial \xi}{\partial x} = 0$

L'une des trois racines de (8), q_m , peut être utilisée dans l'équation fondamentale de l'onde:

$$(9) \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = q_m \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

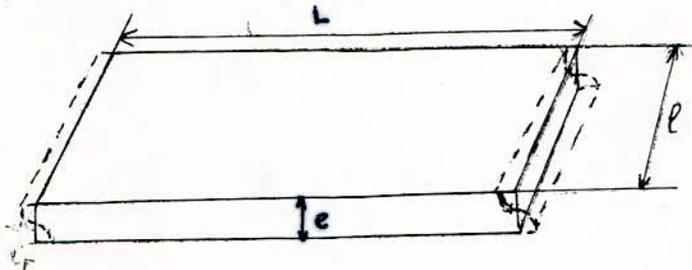
d'où découle, pour les fréquences normales de la lame à faces parallèles, pour des vibrations se propageant suivant la direction de l'épaisseur e , la formule:

$$f_{hm} = \frac{1}{2} h (q_m / \rho)^{\frac{1}{2}} / e \quad (10) \text{ où } h \text{ est l'ordre de l'harmonique}$$

Pour la fréquence fondamentale: $f_m = \frac{1}{2} (q_m / \rho)^{\frac{1}{2}} / e \quad (11)$

Pour un cristal d'épaisseur e , de longueur L et de largeur l , on a: $\rho = M / (L.l.e) = M / (A.e)$

M étant la masse du quartz et $A = L.l$, l'aire d'une face du cristal.



L'équation fondamentale de vibration à la fréquence fondamentale, se propageant dans la direction de l'épaisseur de la lame plane à faces parallèles est:

$$f = \frac{1}{2} (q \cdot \rho)^{\frac{1}{2}} / (e \cdot \rho) \Rightarrow f = \frac{1}{2} A (\rho \cdot q)^{\frac{1}{2}} / M \quad (12)$$

où q est le coefficient de raideur et f , la fréquence fondamentale d'oscillation.

5.3- DETERMINATION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE

Nous avons vu que cette méthode permet de déterminer l'épaisseur de la couche pendant le processus de dépôt. Pour cela le cristal de quartz sera placé dans l'enceinte d'évaporation, à côté du substrat. Le dépôt se formera en même temps sur le substrat et sur le quartz, pour cela, la lame de quartz doit être mise à nu. Nous aurons donc un film du matériau évaporé, d'épaisseur e_d sur une face de la lame de quartz.

Nous avons vu précédemment qu'un cristal de quartz a une fréquence de résonance bien définie qui dépend de sa coupe et de ses dimensions géométriques: $f = \frac{1}{2} A (\rho \cdot q)^{\frac{1}{2}} / M \quad (12)$

Une différentiation de formule (12) par rapport à la masse M donne:

$$\frac{df}{dM} = - \frac{A(\rho \cdot d)^{\frac{1}{2}}}{2M^2} = - \frac{f}{M} \implies \boxed{\frac{df}{f} = - \frac{dM}{M}} \quad (13)$$

La dérivée de la fréquence de résonance du cristal est donc proportionnelle à la variation dM de sa masse. Une couche de matière étrangère au cristal influence la fréquence propre de celui-ci par sa masse comme si nous avions une variation de la masse propre au cristal; ceci n'est cependant valable que si la couche déposée est très fine.

La variation de la fréquence de résonance du cristal est donc proportionnelle à la masse déposée sur une de ses faces: M_d .

$$\boxed{\frac{df}{f} = - \frac{M_d}{M}} \quad (14)$$

La couche de masse M_d , d'épaisseur e_d , de densité volumique ρ_d , est déposée sur toute la surface d'une face de la lame de quartz; on a donc:

$$M_d = A \cdot \rho_d \cdot e_d \quad (15) \implies \frac{df}{f} = - \frac{A \cdot \rho_d \cdot e_d}{M}$$

$$\text{et } M = A \cdot \rho \cdot e \implies \frac{df}{f} = - \frac{A \cdot \rho_d \cdot e_d}{A \cdot \rho \cdot e} \implies \boxed{e_d = - \frac{\rho \cdot e \cdot df}{\rho_d \cdot f}}$$

e est l'épaisseur du cristal.

L'épaisseur de la couche est donc proportionnelle à la variation de fréquence Δf . Quand l'épaisseur augmente, la fréquence de résonance, diminuera.

$$\boxed{e_d = \frac{\rho \cdot e}{\rho_d \cdot f} \cdot \Delta f} \quad (16)$$

La sensibilité du transducteur est:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta e} = \frac{\Delta f}{e_d} = \frac{\rho_d \cdot f}{\rho \cdot e} \implies \boxed{S = \frac{\rho_d}{\rho \cdot N} \cdot f^2} \quad (18)$$

$N = e \cdot f$ est la constante de fréquence ou constante d'onde; c'est une caractéristique de la coupe du cristal.

La sensibilité S est proportionnelle à f^2 , pour des quartz de même taille.

5.4- CHOIX DU CAPTEUR PIEZOELECTRIQUE A UTILISER

Le choix du quartz à utiliser dans l'appareil de mesure sera fixé par les contraintes suivantes:

- Le cristal doit avoir une bonne stabilité thermique car il sera placé à l'intérieur de l'enceinte d'évaporation.
- Bonne stabilité aux contraintes mécaniques car le choc des particules qui se déposent sur le quartz influence sur la fréquence des oscillations.
- Bonne stabilité au vieillissement.
- Nécessité d'une bonne sensibilité.
- Bonne précision.

La sensibilité doit être aussi linéaire que possible lors de la formation de la couche.

5.4.1- Stabilité thermique

La stabilité thermique d'un cristal de quartz est caractérisée par le coefficient de température qui est défini comme suite:

$$\theta = \frac{f_2 - f_1}{f_1(T_2 - T_1)} = \frac{\Delta f}{f(T_2 - T_1)}$$

f_1 et f_2 étant les fréquences de résonance du cristal aux températures T_1 et T_2 , respectivement.

Pour la plupart des coupes, on a: $\frac{\Delta f}{f} = k(T_0 - T)^2$, k étant une constante.

Pour une coupe AT, la courbe de fréquence en fonction de la température est une fonction du 3^{ième} degré.

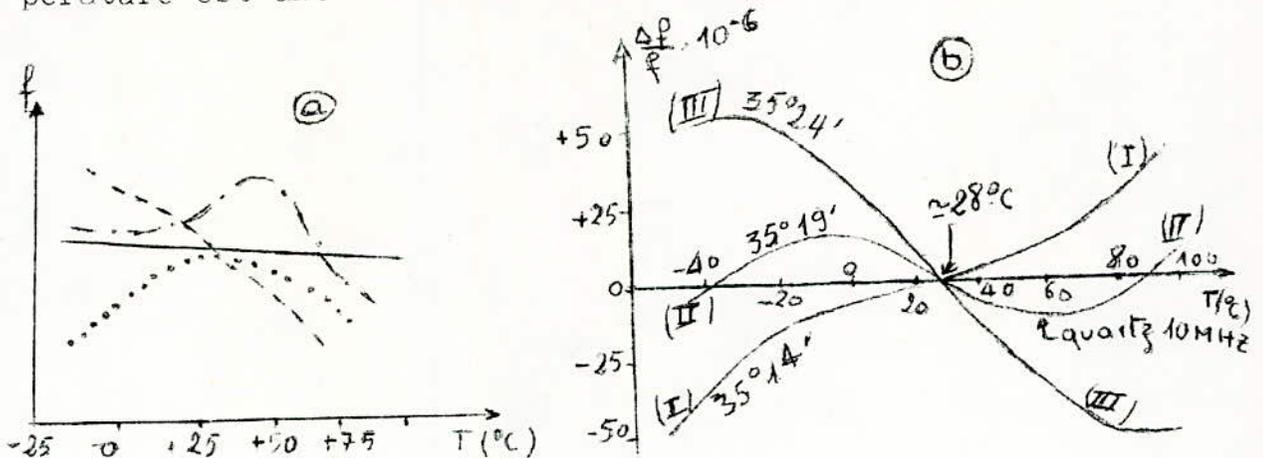


Fig. 5.1- Variation de la fréquence en fonction de la température: -a) pour différentes coupes; -b) pour les coupes AT

Les quartz de taille AT sont ceux qui prennent le meilleur coefficient de stabilité en température. Leur point de fonctionnement normal en température est situé à 28°C.

5.4.2- Stabilité aux contraintes mécaniques

Les cristaux de taille AT sont les plus indiqués pour la stabilité aux chocs. Nous pouvons dresser un bref tableau donnant le coefficient de stabilité aux contraintes mécaniques de certains quartz AT:

Fréquence	1 MHz	5 MHz	10 MHz
coefficient de stabilité aux chocs	$0,01 \cdot 10^{-6}$	$0,001 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
coefficient de stabilité aux vibrations	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$0,05 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Ce tableau indique que les coupes AT, les quartz ayant une fréquence d'oscillation d'environ 5MHz sont ceux qui se comportent le mieux.

5.4.3- Vieillessement

La variation de la fréquence d'un cristal en fonction du temps est relativement importante pendant les premières semaines de fonctionnement pour diminuer ensuite. Ce sont les cristaux de coupe AT prévus pour des fréquences comprises entre 1 et 5 MHz qui se comportent le mieux en vieillissement.

5.4.4- Sensibilité

La sensibilité du transducteur est donnée par: $S = \frac{\rho_d \cdot f^2}{\rho \cdot N}$

Il en découle qu'afin d'avoir une bonne sensibilité, c'est à dire que pour pouvoir détecter les faibles épaisseurs, le cristal doit avoir une faible constante d'onde N et aussi une fréquence d'oscillation assez haute.

Le tableau donnant les caractéristiques des différentes tailles des cristaux, indique que les quartz de coupe AT sont ceux qui ont la plus faible constante d'onde (N=1662 KHz.mm) avec une fréquence allant de 300 KHz à 15000 KHz.

Ce qui précède suffit pour fixer notre choix sur un quartz de coupe AT; il nous restera maintenant à déterminer sa fréquence.

Le figure 5.2 représente la courbe d'étalonnage de la sensibilité des quartz de taille AT allant de 1 à 10 MHz, pour un dépôt d'aluminium. L'exemple d'un dépôt d'aluminium a été choisi

car c'est le matériau le plus utilisé (connexions dans les circuits intégrés hybrides et monolithiques, électrodes des condensateurs dans les circuits hybrides). Pour cela tous les calculs qui suivront se feront pour un dépôt d'aluminium.

Si on utilise un quartz de 4 MHz, la courbe donnée $S=1\text{Hz} \cdot \text{Å}^{-1}$ c'est à dire que pour ce cristal, en début de dépôt, une épaisseur $e_d=1 \text{ Å}$ provoquerait une variation de fréquence $\Delta f= 1 \text{ Hz}$ et la fréquence du cristal deviendrait : $f=(4 \cdot 10^6 - 1) \text{ Hz}$

5.4.5- Précision du capteur

C'est la faculté, pour les quartz, de détecter une faible épaisseur de dépôt, pour une précision de la mesure de la fréquence donnée, c'est la précision permise par le circuit électronique utilisé pour la mesure de la fréquence.

La figure 5.3 nous renseigne sur la précision des cristaux de quartz AT de 1 à 10 MHz. On y trouve les courbes donnant l'épaisseur d'aluminium déposé, correspondant à différentes précisions de la mesure de la fréquence, en fonction de la fréquence.

Frenons comme exemple un cristal de 4 MHz, avec une précision de mesure de la fréquence de 10^{-7} , c'est à dire:

$$\frac{\Delta f}{f} = 10^{-7} \implies \Delta f = 0,4 \text{ Hz}$$

alors l'épaisseur du film déposé provoquant cette variation de fréquence est; $e_d = 0,4 \text{ Å}$

Ces courbes montrent que pour une précision de mesure de la fréquence donnée, un film plus mince peut être détecté si on emploie un cristal haute fréquence.

5.4.6- Linéarité de la sensibilité

Dans la formule donnant la sensibilité $S = \frac{f_d}{f_N} f^2$, f est la fréquence donnée par le cristal après le dépôt d'une couche d'épaisseur e_d , et non la fréquence f_0 d'oscillation du quartz sans le film, comme il a été fait sur la courbe de la figure 5.2. Il y a donc une déviation de la sensibilité; cette déviation entraîne des erreurs sur la mesure.

La figure 5.4 donne la déviation de la sensibilité D_s en % en fonction de l'épaisseur déposée pour des quartz de taille AT de différentes fréquences.

Dans le cas d'un cristal de 4 MHz, la déviation de la

sensibilité est presque nulle pour une épaisseur e_d inférieure à 10^3 \AA , puis augmente d'une façon parabolique pour être de 1% à $e_d = 2 \text{ \mu m}$.

Ces courbes montrent que pour une même épaisseur de dépôt, les cristaux HF donnent une plus grande déviation de la sensibilité que les cristaux de fréquence moins haute.

Une méthode d'arriver à la fréquence du cristal à utiliser est de se référer aux courbes de la figure 5.3 qui correspondent à la précision de l'équipement électronique à utiliser, correspondant au minimum détectable d'épaisseur requise; mais aussi faudra-t-il tenir des courbes qui donnent la non-linéarité de la sensibilité; elles montrent quelle épaisseur de dépôt peut être accumulée sur l'une des faces de la lame de quartz pour une précision donnée avant que le cristal ne demande à être nettoyé.

Du fait du compromis sensibilité - linéarité de la sensibilité, nous fixerons notre choix sur un cristal de 4 MHz qui donnera une sensibilité et une linéarité moyennes mais tout de même suffisantes, pour le contrôle des couches minces.

Sa sensibilité pour des dépôts d'aluminium est de $1 \text{ Hz} \cdot \text{Å}^{-1}$. La limite inférieure des épaisseurs mesurables n'est fonction que des qualités du dispositif électronique de mesure (dans le cas de l'aluminium et en utilisant un fréquencesmètre, nous pourrions facilement atteindre une fréquence de 1 Hz, donc une épaisseur de 1 \AA).

La limite supérieure est fixée, elle, par la linéarité du cristal; nous pourrions prendre par exemple une déviation de la sensibilité égale au maximum à 3%, ce qui donne d'après la figure 5.4, l'épaisseur maximum mesurable: $e_{d \text{ max}} = 6 \text{ \mu m}$. Le processus se terminera lorsque la variation de fréquence atteindra

$f = e_d \cdot s_0 = 60 \text{ KHz}$, ce qui correspond, si l'on tient compte de la non-linéarité à une épaisseur: $e_d' = \frac{\Delta f}{S} = \frac{\Delta f}{1,03 s_0}$
 $e_d' = \frac{\Delta f}{1,03} = 5,83 \text{ \mu m}$.

L'erreur relative sur l'épaisseur, due à la non linéarité du cristal sera: $\frac{\Delta e_d}{e_d} = \frac{e_d - e_d'}{e_d} = \frac{6 - 5,83}{6} = 2,9 \%$.

Cependant, les épaisseurs des couches minces ne dépassent pas souvent 2 \mu m dans le cas de l'aluminium, ce qui donne une variation de fréquence $\Delta f = 20 \text{ KHz}$, une non linéarité de 1%,

ETUDE DE LA PRECISION DU TRANSDUCTEUR

(cas d'un dépôt d'aluminium)

- L'épaisseur de la couche déposée est donnée par: $e_d = \frac{\Delta f}{S}$

S: sensibilité du cristal

Δf : variation de fréquence correspondant à une épaisseur de couche e_d

Soit $P_f = \frac{\Delta f}{f}$, la précision relative à la fréquence $\Rightarrow e_d = \frac{f P_f}{S}$

Nous pouvons tracer la courbe de l'épaisseur e_d en fonction de la fréquence f d'oscillation des quartz de coupe AT, pour différents P_f

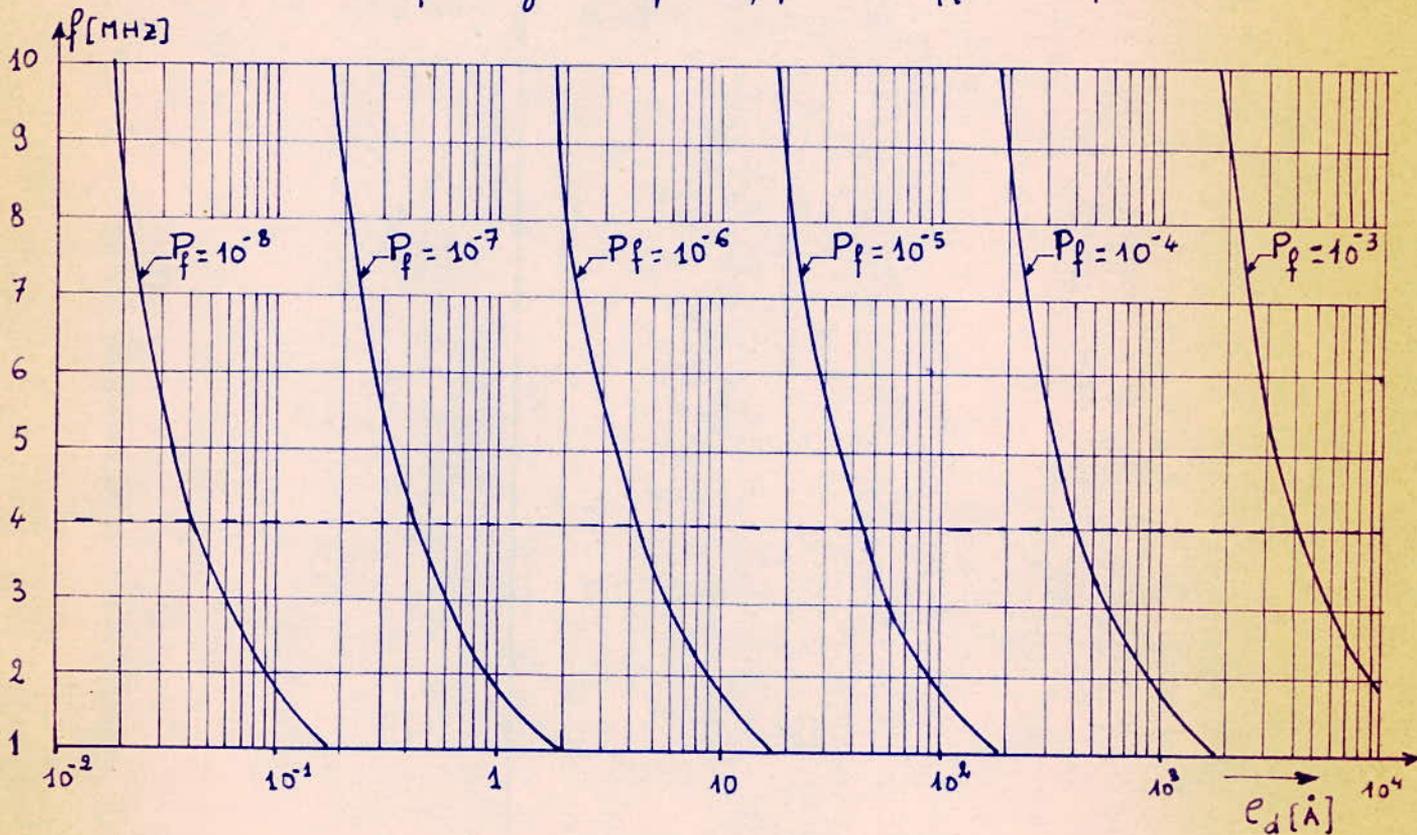


Fig. 5.3 -

ETUDE DE LA LINEARITE DE LA SENSIBILITE DES QUARTZ

La fig. 2. donne la sensibilité en fonction de la fréquence, mais nous n'avons pas tenu compte des variations de fréquence dues à l'épaisseur du dépôt; elle a été tracée pour une fréquence d'oscillation f_0 , fixe pour un quartz donné:

$$S_0 = \frac{f_d}{f \cdot N} f_0^2$$

Nous devons donc prendre en considération la variation de fréquence due à l'épaisseur du dépôt : $\Delta f = S_0 \cdot e_d$

La sensibilité sera alors : $S = \frac{f_d}{f \cdot N} f^2 = \frac{f_d}{f \cdot N} (f_0 + \Delta f)^2 = \frac{(f_0 + \Delta f)^2}{f_0^2} \cdot S_0$

De la fig. 2, nous pouvons déduire la courbe de déviation de la sensibilité D_s , en fonction de l'épaisseur de dépôt : $D_s = \frac{S}{S_0} - 1 = \left(\frac{f_0 + \Delta f}{f_0} \right)^2 - 1$

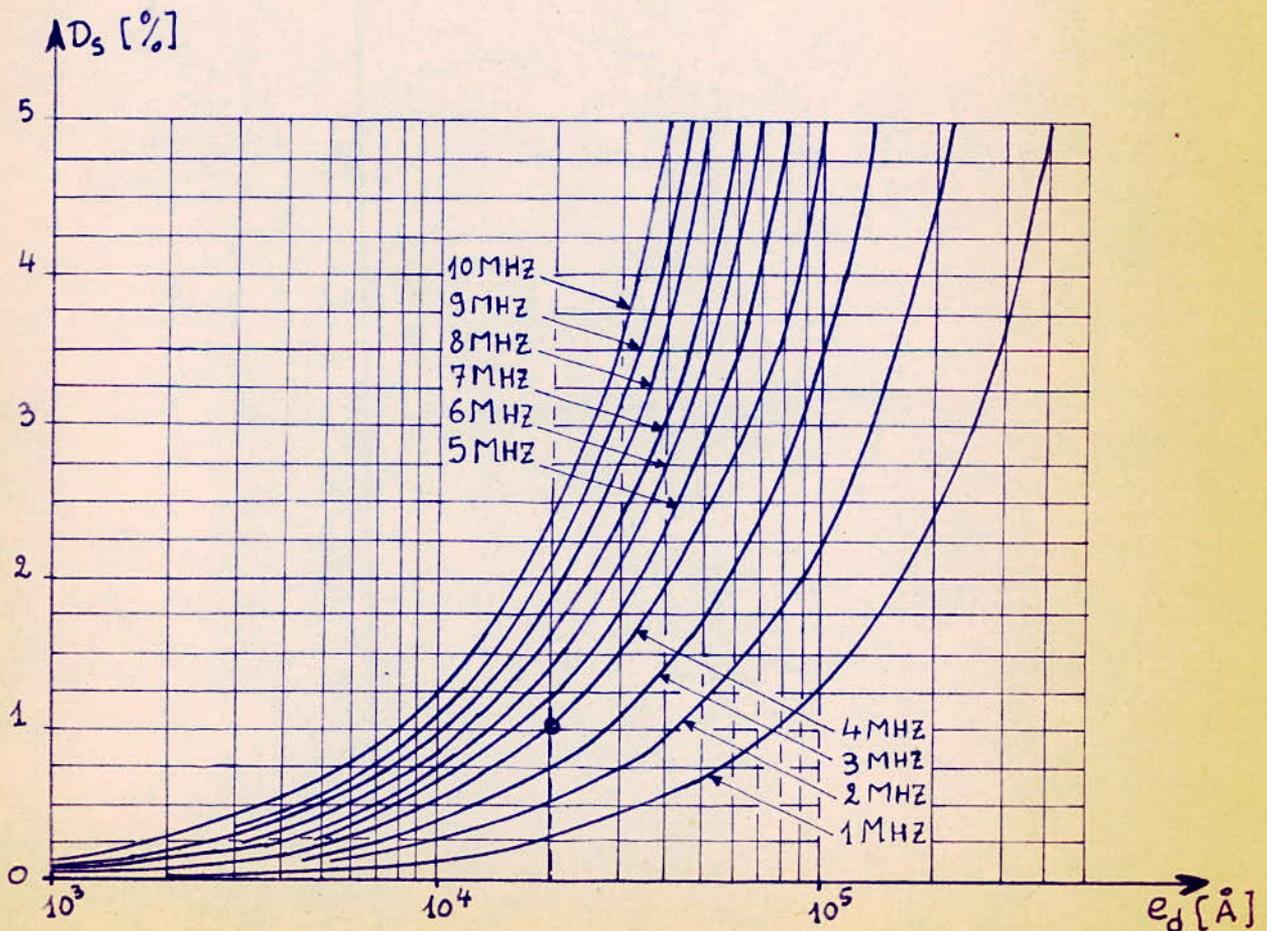


fig. 5.4. Déviation de la sensibilité de la linéarité en fonction de l'épaisseur de dépôt d'aluminium pour des quartz de coupe AT de diverses fréquences.

et aussi une erreur relative de mesure de 1%.

Pour avoir toujours une bonne précision de mesure, le quartz doit être nettoyé après chaque dépôt, par attaque chimique afin d'éliminer la couche qui s'est formée sur l'une de ses faces; certaines couches peuvent être enlevées avec un acide, d'autres, comme ~~l'aluminium~~ l'aluminium à l'aide de la soude.

Nous devons aussi définir une durée de vie du quartz, tout particulièrement dans son emploi comme transducteur d'épaisseur de dépôt, car il se détériore très vite à cause des dépôts et des nettoyages répétés. C'est en quelque sorte un vieillissement artificiel. En général, le cristal n'est utilisé que pour quelques dizaines de mesures (10 à 20).

5.5- DESCRIPTION DE L'APPAREIL

La figure 5.5 montre le schéma bloc de l'appareillage utilisé pour la mesure de la fréquence du cristal.

Puisqu'il est nécessaire de ~~pour~~ détecter de faibles variations de fréquence, il est important que l'appareil soit stable. Les instabilités peuvent se produire à partir de l'oscillateur qui pilote le quartz de contrôle et de l'équipement utilisé pour mesurer la fréquence du cristal. Nous devons choisir un oscillateur de bonne stabilité. Une condition supplémentaire sera exigée de l'oscillateur de contrôle: c'est que l'opération soit satisfaisante dans le cas d'une longue connection cristal-oscillateur.

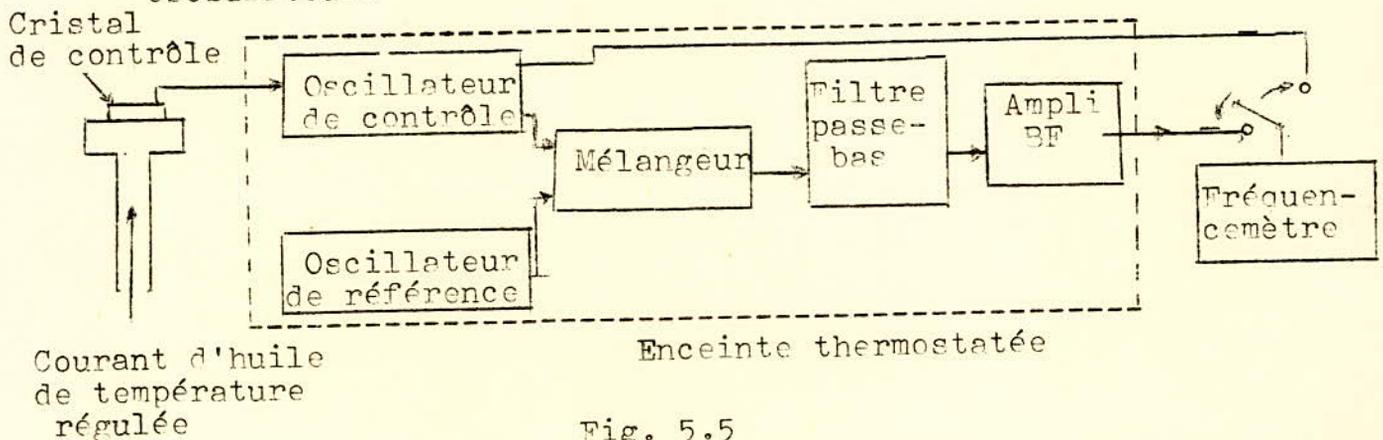


Fig. 5.5

Pour un fonctionnement précis, l'instrument doit être asservi en température et en plus on doit disposer d'une alimentation stabilisée. La mesure de la fréquence se fera par fréquence-mètre digital.

La fréquence délivrée par l'oscillateur de contrôle peut se mesurer directement, mais pour avoir une bonne précision, il faudra un fréquencemètre très précis, ce qui reviendra trop cher.

Une méthode indirecte mais satisfaisante est de coupler le cristal de contrôle à un cristal de référence, dont la fréquence restera fixe; pour avoir une bonne précision, il faudra prendre un cristal de référence qui oscille sur la même fréquence que le cristal de contrôle. Nous aurons, comme l'indique la figure 5.5, deux oscillateurs, qui délivrent des signaux de fréquence f variable (pour le cristal de contrôle) et f_0 fixe (pour le cristal de référence); ces deux signaux sont envoyés dans un circuit mélangeur, qui, suivi d'un filtre passe-bas, donne un signal BF de fréquence $F = f - f_0$. Le signal BF est amplifié puis injecté au fréquencemètre. Ainsi nous auront l'épaisseur du dépôt:

$$e_d = \frac{\Delta f}{S_0} = \frac{F}{S_0}$$

Dans le cas d'un dépôt d'aluminium; $e_d = \frac{F}{S_0}$ car $S_0 = 1 \text{ Hz} \cdot \text{Å}^{-1}$
pour le cristal utilisé. $\frac{[A]}{[Hz]}$

La précision de la mesure de cette différence de fréquence est d'autant plus grande que cette différence est faible. Une imprimante digitale peut être utilisée pour enregistrer la sortie du compteur formant le fréquencemètre; mais pour certaines applications, il peut être préférable d'utiliser un compteur à sortie analogique pour commander un stylet enregistreur.

L'appareil de mesure, le cristal de référence compris, devra être placé dans une enceinte thermostatée. La température de l'enceinte sera réglée autour de 28°C; ce qui permet de commander le cristal de référence à son point de fonctionnement normal qui de 28°C, comme c'est indiqué sur la figure 5.1. Cela est avantageux à la fois pour la stabilité du cristal et pour éviter la surchauffe des circuits oscillateurs.

Le cristal de contrôle sera fixé à un support, à l'intérieur duquel circulera de l'huile provenant d'un bain thermostaté dont la température sera réglée autour de 28°C, c'est à dire que le cristal sera commandé aux environs de sa température de fonctionnement.

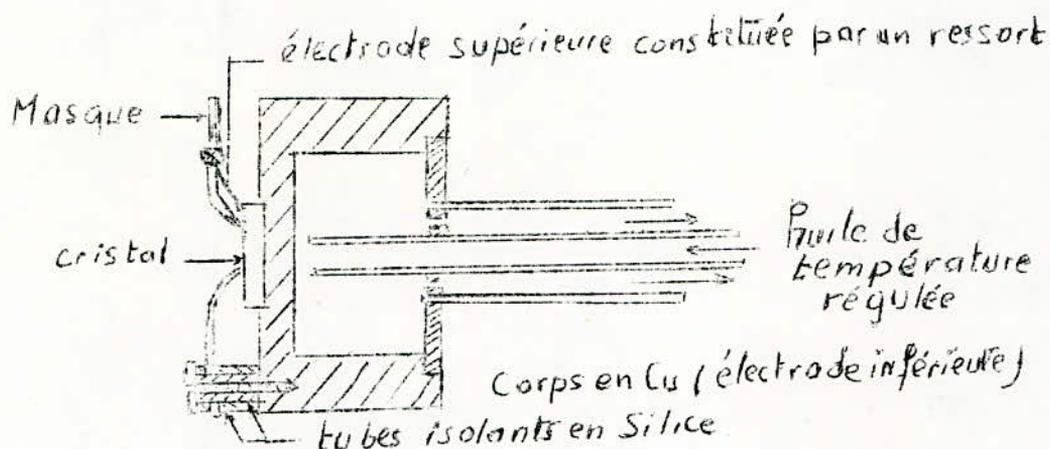


Fig. 5:6- Coupe transversale du support du cristal de contrôle

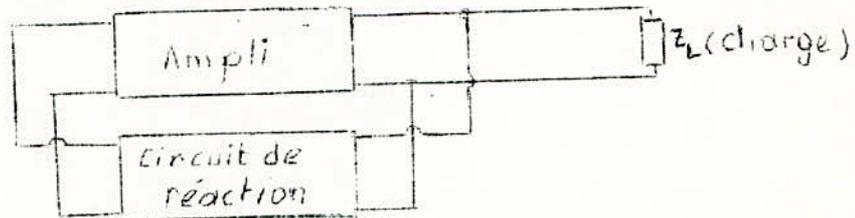
La figure 5.6, montre le schéma du support du cristal. Le corps principal en cuivre, connecté à une face du cristal, est mis à la masse. Le plateau supérieur, également en cuivre sert à la fois de bouclier aux radiations et de masque de dépôt; il est connecté à l'autre électrode du cristal et isolé du bâti par des tubes isolants en silice. Un câble coaxial d'impédance caractéristique $Z_c \approx 50 \Omega$ reliera le cristal au circuit de l'oscillateur; la fréquence du cristal restera stable tant que la longueur du câble ne dépasse pas 1m.

Le choix du matériau pour les électrodes du cristal dépend de l'application à laquelle est destiné l'instrument; trois matériaux peuvent convenir : Cr-Au, Al et Ni. Les électrodes en Au-Cr ont l'avantage d'être résistantes à la plupart des acides qui servent à nettoyer le cristal après le dépôt. Beaucoup de couches peuvent être enlevées de l'électrode en la laissant intacte. Les électrides d'aluminium sont particulièrement utiles dans l'étude de films inertes comme les polymères.

6.1- ETUDE DES OSCILLATEURS6.1.1- Condition nécessaire d'oscillation

a) Configuration de base

Un oscillateur est constitué par un circuit amplificateur bouclé par un circuit de réaction.

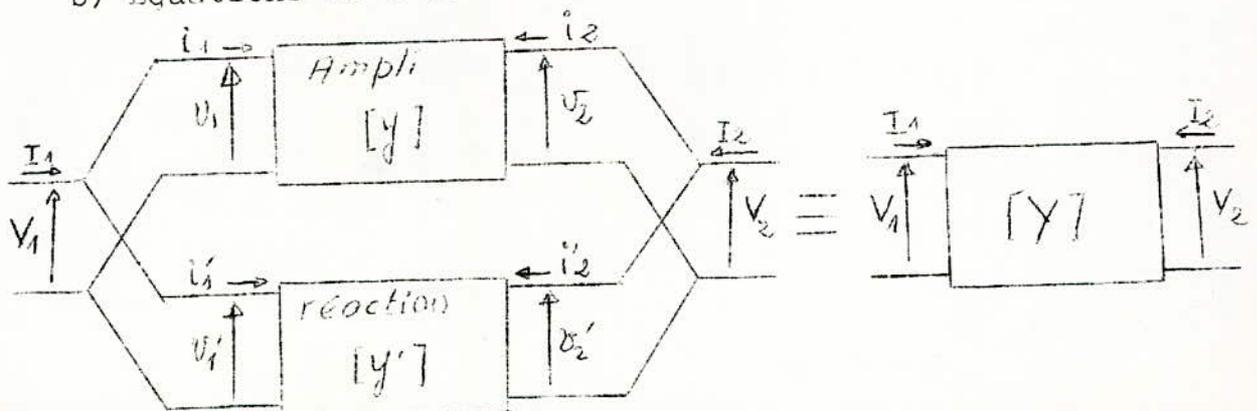


La première condition pour avoir des oscillations auto-entretenues dans un circuit est que le circuit actif permette un gain en puissance à la fréquence d'oscillation. Ce gain doit être suffisant pour compenser les pertes du circuit et donner un gain unité dans la boucle de réaction.

La deuxième condition nécessaire est que les déphasages introduits par le circuit actif et la boucle de réaction s'annulent pour l'ensemble.

Ces conditions permettront des oscillations entretenues, elles ne garantissent pas que les oscillations se produisent. Il ne suffit pas d'avoir un gain de boucle unité, ce gain doit être supérieur à l'unité, pour permettre le démarrage des oscillations. Nous avons ainsi les conditions nécessaires et suffisantes pour le démarrage des oscillations.

b) Equations de l'oscillateur



Nous prendrons comme caractéristiques, les matrices admittances $[y]$ pour l'amplificateur et la charge, $[y']$ pour le circuit de réaction et $[Y]$ pour l'ensemble.

Nous avons :

- pour l'ampli:

$$\begin{cases} i_1 = y_{11} \cdot v_1 + y_{12} \cdot v_2 \\ i_2 = y_{21} \cdot v_1 + y_{22} \cdot v_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

- pour le circuit de réaction:

$$\begin{cases} i'_1 = y'_{11} \cdot v'_1 + y'_{12} \cdot v'_2 \\ i'_2 = y'_{21} \cdot v'_1 + y'_{22} \cdot v'_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} i'_1 \\ i'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v'_1 \\ v'_2 \end{bmatrix}$$

- pour l'ensemble du circuit:

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2 \\ I_2 = Y_{21} \cdot V_1 + Y_{22} \cdot V_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

avec

$$\begin{aligned} I_1 &= i_1 + i'_1; \quad I_2 = i_2 + i'_2 \\ V_1 &= v_1 = v'_1; \quad V_2 = v_2 = v'_2 \end{aligned} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i'_1 \\ i'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y \\ y' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow [Y] = [y] + [y'] = [y + y']$$

De plus nous avons: $I_1 = I_2 = 0$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow \text{Det} [Y] = 0$$

Nous aurons ainsi l'équation caractéristique de l'oscillateur:

$$\text{Det}[Y] = (y_{11} + y'_{11})(y_{22} + y'_{22}) - (y_{12} + y'_{12})(y_{21} + y'_{21}) = 0$$

De cette équation découlent deux autres équations:

$\text{Re} \{ \text{Det}[Y] \} = 0$ qui donnera la fréquence d'oscillation

$\text{Im} \{ \text{Det}[Y] \} = 0$ qui donnera la condition d'oscillation ou condition d'entretien limite

Pour qu'il y ait effectivement oscillation, il faudra prendre:

$$\text{Im} \{ \text{Det}[Y] \} \geq 0$$

6.1.2- Le circuit actif

Le circuit actif a pour fonction principale de développer suffisamment de puissance de sortie à la fréquence de fonctionnement pour fournir la puissance requise à la charge, les pertes dans le circuit bouchon qui constitue le circuit de réaction et la puissance de commande du circuit actif lui-même.

Il doit donner naissance à une tension de bruit aussi faible que possible. Il doit avoir une fréquence de coupure supérieure à la fréquence de fonctionnement.

Pour les oscillateurs HF, comme c'est le cas ici, les parties imaginaires des paramètres du circuit actif ne sont en général pas faibles et il faut introduire ces paramètres sous leur forme complexe, dans l'équation caractéristique.

Le circuit actif sera, ici, formé d'un étage à transistor, vu que la puissance demandée à l'oscillateur est faible.

6.1.3- Le circuit de rétroaction

Dans le cas d'oscillateurs à quartz, le circuit bouchon est constitué par le quartz et par les éléments capacitifs.

Les paramètres essentiels du circuit bouchon sont: la fréquence de résonance, la sélectivité et l'impédance caractéristique.

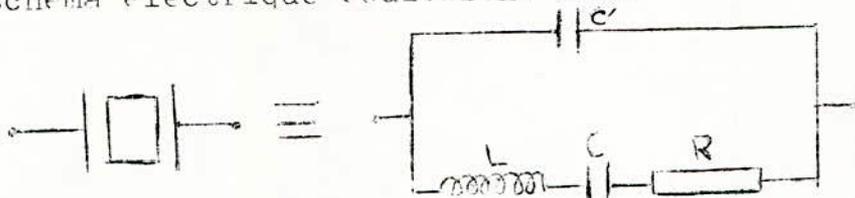
Le circuit bouchon:

- détermine la fréquence d'oscillation
- constitue le circuit de réaction
- détermine la stabilité de l'oscillateur
- est un facteur déterminant dans le rendement du circuit

Equivalent électrique du cristal de quartz

La vibration du quartz dépend de deux paramètres, inertie (masse du quartz) et élasticité. Un troisième paramètre peut être mis en jeu: l'amortissement dû aux frictions dans la structure du cristal.

Le schéma électrique équivalent est:



- C' représente la capacité des électrodes à travers le quartz et les capacités des connexions
- R, L, C sont les éléments propres à la lame de quartz; L représente l'inertie du quartz, C l'élasticité et R , l'amortissement.

Exemple: Pour un quartz AT de 5MHz,

$$L = 9H ; C' = 4pF ; C'/C = 35000 ; R = 100 \text{ à } 160 \Omega$$

Le coefficient de surtension est: $Q = Lw/R = 1/RCw = 500 \text{ à } 2500$

Réponse du résonnateur à quartz

Plusieurs cas sont à considérer:

1- Le cristal est soumis à une vibration mécaniquement ou électriquement; et puis laissé à lui-même (avec les sorties en circuit ouvert). Pour trouver la fréquence de la vibration, on considère que la charge initiale a été placée dans le condensateur C. La décharge s'effectue dans la maille R, L, C, C'.

La fréquence de résonance est donnée par:

$$\omega_1^2 = 1/L'C_t - R^2/4L'^2 \approx \omega_0'^2 \text{ où } C_t = CC'/(C + C') ; \omega_0'^2 = 1/LC_t$$

2- Le cristal est excité comme dans le premier cas, mais vibre librement avec les sorties en court-circuit. La fréquence des vibrations amorties est:

$$\omega_2^2 = \omega_0^2 = 1/L'C - R^2/4L'^2 < \omega_1^2 ; \omega_0^2 \approx \omega_0'^2 = 1/LC$$

3- Les sorties sont connectées à un générateur de fréquence variable et d'impédance interne nulle. C'est le cas étudié théoriquement. Le circuit a deux degrés de liberté avec deux fréquences caractéristiques; ce sont les fréquences des résonances série et parallèle: f_0 et f'_0

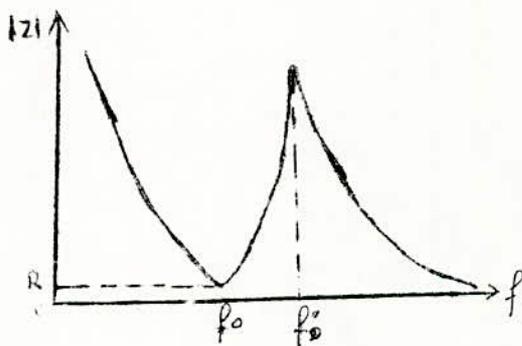
4- Habituellement, les sorties sont connectées à un circuit sur lequel réagit le résonnateur. Les caractéristiques du résonnateur en particulier les fréquences de résonance série et parallèle, restent les même que dans le cas (3).

Nous avons donc deux types de résonance:

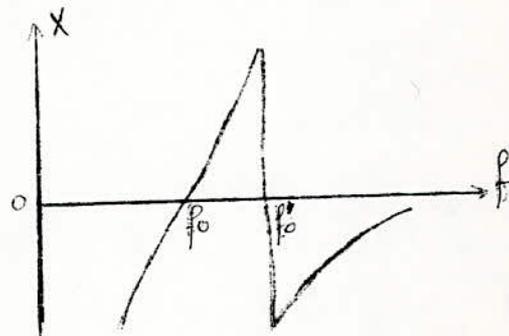
- La résonance série: $f_0 = 1 / 2\pi LC$

- La résonance parallèle: $f'_0 = 1 / 2\pi L \cdot CC' / (C + C')$

$$f'_0 = f_0 (1 + C/2C')$$



a) Impédance



b) Réactance

Fig. 6.1

6.1.4- Stabilité en fréquence de l'oscillateur

La stabilité en fréquence de l'oscillateur est l'expression de la dérive en fréquence par rapport à la valeur centrale. Elle est conditionnée d'une part par la stabilité propre du cristal de quartz et d'autre part par les caractéristiques du circuit.

Pour satisfaire aux conditions d'entretien, il faut que le déphasage total de la boucle ampli-réaction soit de 2. Une variation des éléments du circuit peut se produire, il s'en suit un déphasage indésirable; ce déphasage parasite doit être compensé par un déphasage équivalent et de sens opposé, produit grâce au déplacement du point de fonctionnement du cristal.

Soit $\Delta\phi_A$, un glissement de phase dans l'ampli; il doit lui correspondre un glissement de phase correctif $\Delta\phi_R$ dans la boucle de rétroaction; ce glissement correctif sera produit par le quartz:

$$\Delta\phi_A = -\Delta\phi_R \quad \Delta\phi_R = \frac{\Delta X}{R} = \frac{2\pi L \Delta f}{R} \implies \frac{\Delta f}{f} = \frac{R \Delta\phi_R}{2\pi L \cdot f^2} = \frac{\Delta\phi_R}{Q}$$

où R et L sont les éléments électriques équivalents du quartz. Le coefficient de surtention Q du quartz étant élevé, les légers glissements de phase dus aux variations des caractéristiques des composants dans l'ampli n'auront pratiquement pas d'influence sur la fréquence du signal délivré par l'oscillateur.

6.1.5- Méthode de calcul d'un oscillateur

La méthode d'étude pour les oscillateurs à transistor traite ces derniers d'une manière linéaire si les oscillations auto-entretenuës montrent un fonctionnement non linéaire.

Les différentes étapes de l'étude sont:

- Choisir un transistor capable de fournir le gain et la puissance à la fréquence de fonctionnement.
- Choisir suivant son emploi, la configuration de l'oscillateur
- Etudier le circuit continu de polarisation pour obtenir le point de fonctionnement statique et la stabilité désirée.
- Etudier le circuit déterminant la fréquence en résolvant l'équation caractéristique.
- Faire les réglages nécessaires dans le circuit de réaction et de polarisation pour obtenir un bon rendement.

6.1.6- Calcul des oscillateurs

a) Choix du transistor

Puisque nous ne désirons pas une forte puissance, un transistor du type 2N 2222 a été choisi pour le montage. C'est un transistor NPN au silicium. Sa fréquence de transition est $f_t = 250$ MHz, sa capacité base-collecteur est $C_{bc} = 8$ pF; sa puissance maximale de dissipation: $P_{dM} = 500$ mW à la température de travail. Par ailleurs, on a:

$$\begin{aligned} V_{ceM} &= 30 \text{ v} \\ I_{cM} &= 500 \text{ mA} \\ \beta &\approx 120 \end{aligned}$$

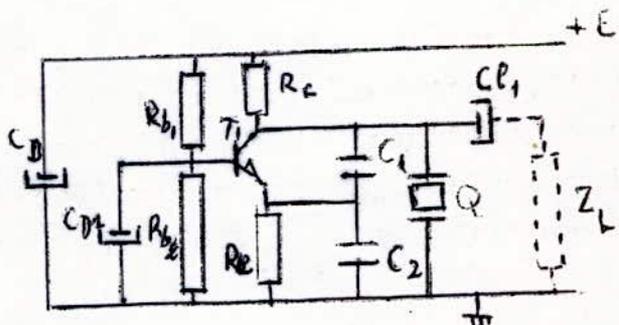
b) Choix du montage

Nous avons opté pour un oscillateur du type PIERCE, l'ampli étant monté en base commune afin d'avoir un gain suffisant à la fréquence de travail; en effet, la fréquence de coupure f_c en base commune est légèrement supérieure à la fréquence de transition f_t .

Schéma du montage

- T_1 : transistor 2N2222
- C_D : sert à shunter la HF, donc à la découpler de la source.
- C_{D1} : découplage du pont de base

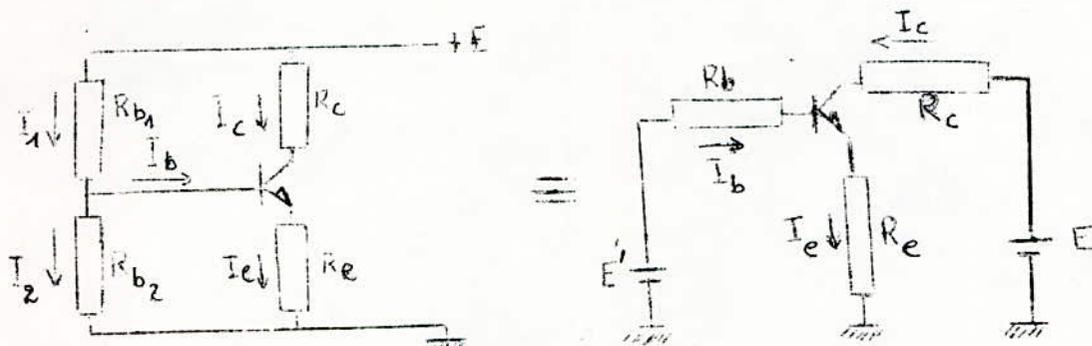
$$E = +12 \text{ v}$$



c) Etude du circuit de polarisation

La polarisation est du type couramment employé: elle est constituée d'un pont de base et, pour assurer une bonne

stabilité thermique



$$E' = E \cdot R_b / R_1 = E \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$R_b = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$

Etude de la stabilité thermique

$$E' = R_e I_e + R_b I_b + V_{be} \quad I_b = I_c / \beta - I_{cbo} / \alpha$$

$$E' = (R_e / \alpha + R_b / \beta) I_c - [(R_e + R_b) / \alpha] I_{cbo} + V_{be}$$

$$I_e = (I_c - I_{cbo}) / \alpha$$

$$(R_e / \alpha + R_b / \beta) I_c = E' + (R_e + R_b) I_{cbo} / \alpha - V_{be}$$

Pour un transistor au silicium, c'est la stabilité par rapport à V_{be} qui prédomine; le coefficient de stabilité est alors :

$$S = \frac{\partial I_c}{\partial V_{be}} = - \frac{1}{R_e / \alpha + R_b / \beta} = - \frac{\alpha}{R_e + (1 - \alpha) R_b}$$

soit : $S \approx - \frac{1}{R_e}$

Le point de repos a été fixé à :

$$\begin{cases} V_{ce} = 7,2 \text{ v} \\ I_{co} = 1 \text{ mA} \end{cases}$$

Par ailleurs, on a :

$$E = (R_c + R_e) I_{co} + V_{ceo} \implies R_c + R_e = 4,8 \text{ K}\Omega$$

Nous prenons $R_e = 3,3 \text{ K}\Omega$, valeur assurant un bon coefficient de stabilité thermique puisque :

$$S = - \frac{1}{R_e} = -3 \cdot 10^{-4}$$

Par conséquent : $R_c = 4,8 - 3,3 = 1,5 \text{ K}\Omega$

pour $\begin{cases} I_{co} = 1 \text{ mA} ; I_{bo} = 10 \mu\text{A} \\ V_{beo} = 0,65 \text{ V} ; V_{eM} = 3,3 \text{ V} \end{cases}$ nous avons : $V_{bM} = 3,95 \text{ V}$

On en déduit les résistances du pont de base :

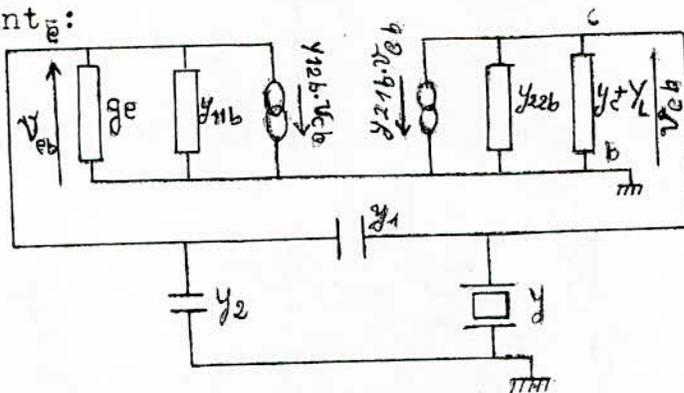
$$\begin{cases} R_{b1} = 19,5 \text{ K}\Omega \\ R_{b2} = 39 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

et

$$\begin{cases} R_c = 1,5 \text{ K}\Omega \\ R_e = 3,3 \text{ K}\Omega \end{cases}$$

d) Etude du montage en alternatif

Le schéma équivalent du montage en alternatif est le suivant :



Y_L est la charge; c'est l'admittance de l'étage suivant qui est le mélangeur (monté en émetteur commun)

Pour le quartz, l'admittance équivalente peut s'écrire:

$$y = g + jb \quad \text{où } g = 1/R$$

Pour la résonance série: $b = 0 \implies y = g$

Pour le circuit de réaction:

$$y'_{11} = y_1 + y_2 = j\omega(C_1 + C_2)$$

$$y'_{12} = y'_{21} = -y_1 = -j\omega C_1$$

$$y'_{22} = y_1 + y = g + j\omega C_1$$

Pour le circuit amplificateur:

$$y_{11} = g_e + y_{11b} \quad ; \quad g_e = 1/R_e$$

$$y_{12} = y_{12b}$$

$$y_{21} = y_{21b}$$

$$y_{22} = y_{22b} + y_L + g_c \quad ; \quad g_c = 1/R_c$$

Avec: $y_{11b} = 1/h_{11b} = (h_{21e} + 1)/h_{11e} \approx h_{21e}/h_{11e} = \beta/h_{11e}$

$$y_{12b} = -h_{12b}/h_{11b} = (h_{12e} - \Delta h_e)/h_{11e} \approx 0$$

$$y_{21b} = h_{21b}/h_{11b} = -h_{21e}/h_{11e} = -\beta/h_{11e}$$

$$y_{22b} = \Delta h_b/h_{11b} = \Delta h_e/h_{11e} \approx 0$$

L'équation caractéristique:

$$(y_{11} + y'_{11})(y_{22} + y'_{22}) - (y_{12} + y'_{12})(y_{21} + y'_{21}) = 0$$

donne:

$$(y_{11b} + g_e + j\omega(C_1 + C_2))(y_{22b} + y_L + g_c + g + j\omega C_1) - (y_{12b} - j\omega C_1)(y_{21b} - j\omega C_1) = 0$$

$$g_e = 1/R_e = 3 \cdot 10^{-4} \text{ S}; \quad g_c = 1/R_c = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ S}; \quad y_L = 4 \cdot 10^{-4} \text{ S}$$

Les parties imaginaires des paramètres admittance du transistor peuvent être négligées devant C_1 ou C_2 et on peut considérer ces paramètres comme réels.

$$\implies (h_{21e}/h_{11e} + g_e + j\omega(C_1 + C_2))(y_L + g_c + g + j\omega C_1) - j\omega C_1 (h_{21e}/h_{11e} + j\omega C_1) = 0$$

$$\implies (h_{21e}/h_{11e} + g_e)(y_L + g_c + g) - \omega^2 C_1 (C_1 + C_2) + \omega^2 C_1^2 +$$

$$+ j\omega((y_L + g_c + g)(C_1 + C_2) + (h_{21e}/h_{11e} + g_e)C_1 - h_{21e}C_1/h_{11e}) = 0$$

La fréquence des oscillations est donnée par:

$$\omega^2 C_1 C_2 = (h_{21e}/h_{11e} + g_e)(y_L + g_c + g)$$

La partie imaginaire de l'équation caractéristique doit être supérieure à zéro, pour qu'il y ait oscillations; ce qui est vérifié:

$$(y_L + g_c + g)(C_1 + C_2) + (h_{21e}/h_{11e} + g_e)C_1 \geq 0$$

Pour le transistor 2N2222, et au point de fonctionnement:

$$h_{21e} = \beta \approx 100 \quad \text{et} \quad h_{11e} = 2 \text{ k}\Omega \implies h_{21e}/h_{11e} \approx 5 \cdot 10^{-2} \text{ V}$$

$$\text{Pour le quartz: } R \approx 120 \Omega \implies g \approx 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

$$\implies \omega^2 C_1 C_2 = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ V}^2$$

$$\text{La fréquence délivrée est d'environ 4 MHz} \implies \omega^2 \approx 0,64 \cdot 10^{15} \text{ (rad/s)}^2$$

$$\text{Ce qui donne: } C_1 C_2 = 7,35 \cdot 10^{-19} \text{ F}^2$$

Pour le montage pratique, nous avons pris:

$C_1 = 330 \text{ pF}$	ce qui donne $C_1 C_2 = 7,2 \cdot 10^{-18} \text{ F}^2$
$C_2 = 2200 \text{ pF}$	

e) Calcul des capacités de découplage et de liaison

La capacité de découplage de la source, sert à shunter la HF vers masse. Nous avons pris: $C_D = 100 \text{ pF}$

Capacité de découplage du pont de base:

$$C_{D1} \geq (h_{11b} + R_b) / (2 f_m h_{11b} R_b)$$

f_m : fréquence minimum pour laquelle la cellule de base n'intervient pas. Nous fixons $f_m = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Hz}$

$$C_{D1} \geq 25 \text{ nF}$$

Nous avons pris une capacité: $C_{D1} = 2,2 \text{ }\mu\text{F}$

Capacité de liaison avec l'étage suivant:

$$C_{11} \geq 1/2 f_m (R_c + Z_L)$$

Nous avons pris également: $C_{11} = 2,2 \text{ }\mu\text{F}$

Pour le montage pratique, nous n'avons pu disposer de deux quartz de même fréquence, néanmoins, les deux quartz utilisés présentent des fréquences suffisamment proches l'une de l'autre.

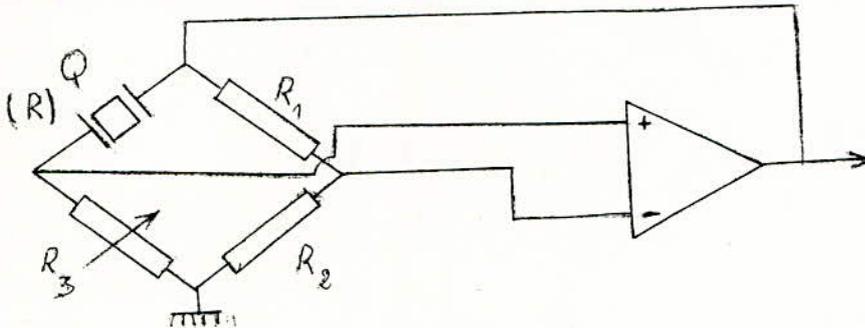
Pour le quartz de contrôle: $f_1 = 3,946 \text{ MHz}$

Pour le quartz de référence: $f = 3,929 \text{ MHz}$

La tension de sortie des oscillateurs est de 1,1 volt crête à crête, donc une tension efficace: 0,39 volts.

Remarque:

Un montage oscillateur qui convient très bien grâce à sa haute stabilité est l'oscillateur en pont de MEACHAM.



A la fréquence de résonance série du quartz, l'équivalent électrique de celui-ci se réduit à une résistance R.

Si le pont est équilibré à la fréquence de résonance, nous aurons: $R/R_3 = R_1/R_2$

L'ensemble ne fonctionne pas à l'équilibre parfait du pont: il n'y aurait aucune tension aux bornes de sa diagonale "mesure"; il faut un très léger déséquilibre pour qu'il y ait oscillation. La stabilité peut être définie en fonction du coefficient de surtension du quartz et du taux de déséquilibre du pont. Ce déséquilibre est réglable au moyen de R_3 que l'on ajuste pour obtenir la meilleure stabilité possible.

Nous pouvons remplacer les résistances R_1 et R_2 par des éléments non linéaires:

- résistance à coefficient de température positif (CTP) pour R_2 .
- résistance à coefficient de température négatif (CTN) pour R_1 , dont la valeur variera en fonction de la rétroaction appliquée au pont.

On maintiendra l'équilibre juste suffisant pour que l'oscillation s'entretienne: nous aurons ainsi un oscillateur stabilisé en tension de sortie et en fréquence puisque le taux de réaction réagit sur la stabilité en fréquence.

La caractéristique de l'amplificateur est que sa bande passante soit suffisante pour ne pas entraîner un déphasage trop important à la fréquence de résonance du cristal.

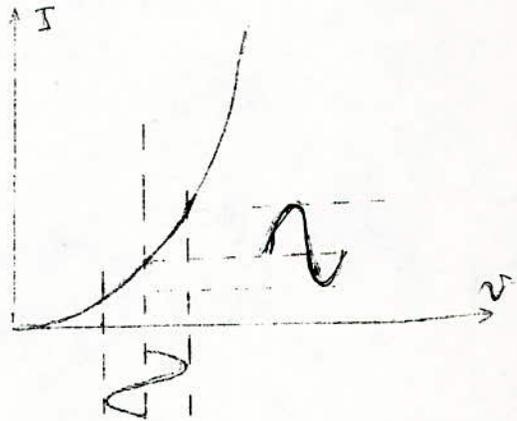
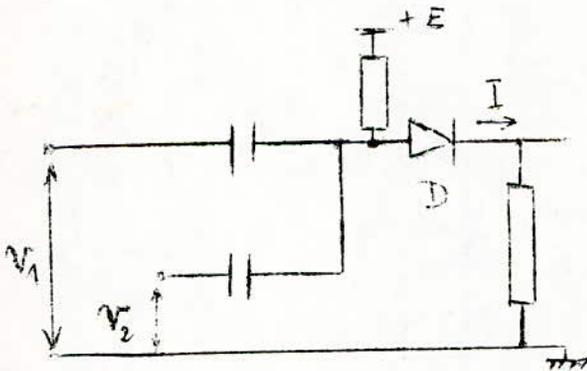
Les amplificateurs à entrée symétrique (ampli Op. ou vidéo) sont bien adaptés à ce montage.

Pour notre cas, un ampli Op. $\mu A715$ dont la bande passante est de 65 MHz et dont le gain en boucle ouverte est: $G = 45000$, conviendra bien. Le grand gain de l'amplificateur permet de travailler avec un déséquilibre très faible et des stabilités de 10^{-9} peuvent être atteintes.

6.2- ETUDE DU MELANGEUR (MIXER)

Mélangeur à diode

Le mélange des fréquences de deux signaux, consiste à injecter ces deux signaux à une diode polarisée dans sa région non linéaire. Un mélangeur est donc un circuit non linéaire.



Soient f_1 la fréquence du signal v_1 délivré par le premier oscillateur et f_2 , celle du signal v_2 délivré par le second. Ces deux signaux seront appliqués à la diode D qui est polarisée dans la région parabolique de sa caractéristique.

Nous avons:

$$i = av^2 \quad \text{où } a = \text{constante}$$

$$\implies i = a(v_1 + v_2)^2 \quad ; \quad v_1 = V_1 \cdot \cos \omega_1 t \quad ; \quad v_2 = V_2 \cdot \cos \omega_2 t$$

$$i = a(V_1^2 \cos^2 \omega_1 t + V_2^2 \cos^2 \omega_2 t + 2V_1 V_2 \cos \omega_1 t \cdot \cos \omega_2 t)$$

$$i = a(v_1^2 + v_2^2)/2 + a v_1 v_2 \cos(w_1 + w_2)t + a v_1 v_2 \cos(w_1 - w_2)t + (a v_1^2 \cos 2w_1 t)/2 + (a v_2^2 \cos 2w_2 t)/2$$

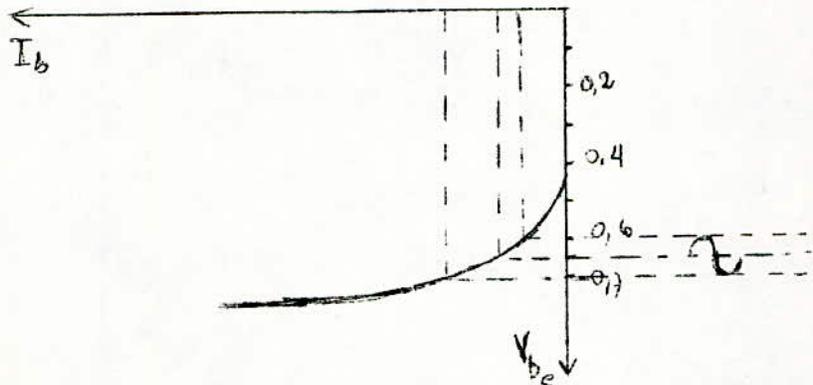
Nous recueillerons donc sur la charge un signal composé des harmoniques suivantes: $|w_1 - w_2|, w_1 + w_2, 2w_1, 2w_2$.

Mélangeur à transistor

Un mélangeur à transistor est équivalent à un mélangeur à diode suivi d'un amplificateur à transistor. Les transistors utilisés comme changeurs de fréquence doivent avoir les caractéristiques suivantes:

- une bonne caractéristique de diode: base-émetteur
- une faible capacité d'entrée d'émetteur
- un bon gain disponible en puissance à la fréquence du signal de sortie.

Le transistor utilisé est un 2N2622 dont la caractéristique base-émetteur est la suivante:



La polarisation du transistor a été choisie de telle sorte que l'on soit dans la région où la caractéristique base-émetteur est parabolique. Le point de fonctionnement statique est: $V_{be} = 0,65$. Le point de fonctionnement dynamique variera autour du point statique sans jamais dépasser la zone parabolique de la caractéristique, pour cela nous fixerons l'amplitude des signaux d'entrée à 100mV.

Calcul de la polarisation:

Nous avons pris: $E = 12 \text{ V}, V_{be} = 6,5 \text{ V}, I_b = 12 \mu\text{A}, I_c = 1,3 \text{ mA},$

$V_{ce} = 10,5 \text{ V}.$

Nous avons choisi: $R_c = 1 \text{ K}\Omega$, ce qui donne $R_e = 220 \Omega$
 et $R_1 = 9 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 80 \text{ K}\Omega$

Les valeurs pratiques sont:

$$R_e = 220 \Omega, R_c = 1 \text{ K}\Omega$$

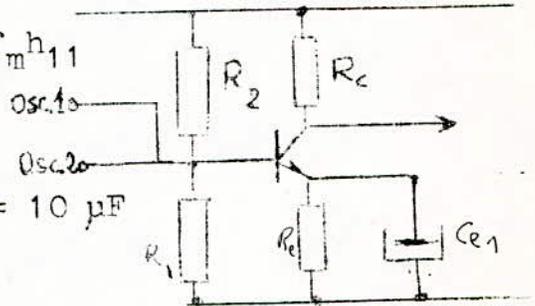
$$R_1 = 10 \text{ K}\Omega, R_2 = 82 \text{ K}\Omega$$

La capacité de découplage de la cellule émetteur est:

$$C_{e1} \approx (h_{11} + R_e) / 2 f_m h_{11} R_e \approx \beta / 2 f_m h_{11}$$

$$f_m = 10 \text{ KHz}, h_{11} = 2 \text{ K}\Omega, \beta = 100$$

$$C_{e1} \approx 0,1 \text{ nF}, \text{ nous avons pris } C_{e1} = 10 \mu\text{F}$$



6.3- ETUDE DU FILTRE PASSE-BAS

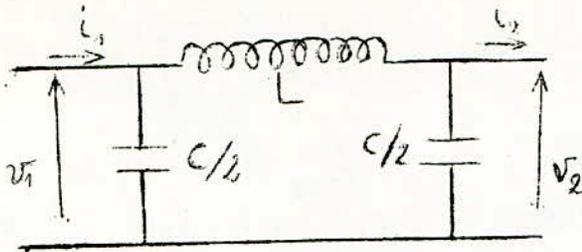
Le mélangeur délivre un signal contenant les harmoniques $(f_1 - f_2), (f_1 + f_2), 2f_1, 2f_2$. Il faudra faire un tri et éliminer tous les harmoniques mis à part la fréquence: $F = f_1 - f_2$, c'est la plus basse. De plus cette fréquence F , est appelée à changer lors du dépôt du matériau constituant la couche mince. Seul un circuit filtre passe-bas convient pour ce genre de filtrage. Nous avons vu que la fréquence F ne dépasse pas 70 à 80 KHz dans le cas de l' aluminium car l'épaisseur de la couche n'atteint que rarement $6 \mu\text{m}$. Le cas extrême que nous pouvons avoir est celui du dépôt de l'or dont la densité volumique est $d = 19,3 \text{ g/cm}^3$, ce qui correspond à une sensibilité :

$$S = \rho_{\text{Au}} \cdot f^2 / \rho_{\text{O}} \cdot N \approx 7 \text{ Hz.}\text{\AA}^{-1}$$

L'épaisseur la plus grande est $e_d = 2 \mu\text{m} \implies \Delta F = e_d \cdot S = F$

$F = 140 \text{ KHz}$ (valeur maximum de la fréquence du signal délivré par le filtre).

Nous avons pris une cellule simple LC, comme filtre passe-bas, car la surtension et l'atténuation important peu puisque les fréquences à éliminer sont très éloignées de la fréquence utile.



La matrice de transfert du quadripôle est:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma \\ \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad \text{où} \quad \begin{bmatrix} \gamma \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - w^2 LC/2 & jwL \\ jwC(1 - w^2 LC/4) & 1 - w^2 LC/2 \end{bmatrix}$$

La condition de filtrage est:

$$-1 \leq 1 - w^2 LC/2 \leq 1 \implies 0 \leq w^2 LC \leq 4 \implies 0 \leq w^2 / (4/LC) \leq 1$$

Posons: $w_r = 2 / LC$

la condition de filtrage devient: $w \leq w_r$

-pour $w \leq w_r$, la condition de filtrage est satisfaite: les signaux ne sont pas affaiblis.

-pour $w > w_r$, il y a affaiblissement.

Calcul de la self:

Nous avons fixé $L = 300 \mu\text{H}$, et pris un fil émaillé de $0,35 \text{ mm}$ de diamètre. L'enroulement est réalisé sur un mandrin de diamètre $1,46 \text{ cm}$ pour une longueur $l = 2,9 \text{ cm}$.

Nous avons: $k = 100 / (4 + 11.l/D)$ où l et D sont en cm

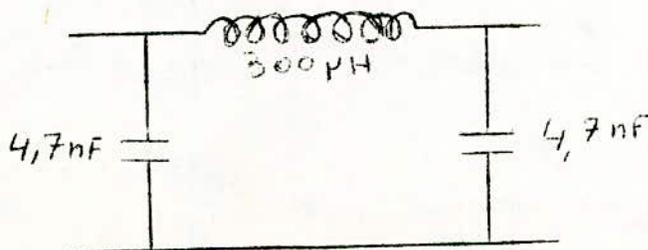
$$L = kn^2 D \quad L \text{ en nH}$$

avec $D = 1,5 \text{ cm}$, $l = 2,9 \text{ cm}$, et $n =$ nombre de spires

$$l/D = 1,93 \implies k \simeq 4 \implies n = 224 \text{ spires.}$$

En prenant:

$$C = 9,4 \text{ nF} \implies w_r = 2 / LC \implies f_r = 190 \text{ KHz}$$



6.4- ETUDE DE L'AMPLIFICATEUR

L'amplificateur se compose d'un seul étage, et la polarisation se fera en classe A. Le transistor utilisé est un 2N2222.

$E = +12 \text{ V}$

point de fonctionnement statique:

$V_{ce} = 6 \text{ V} ; I_c = 4 \text{ mA}$

$V_{be} = 0,7 \text{ V} ; I_b = 35 \mu\text{A}$

$R_c + R_e = 1,5 \text{ K}\Omega$

Nous avons pris:

$R_c = 1 \text{ K}\Omega , R_e = 470 \Omega$

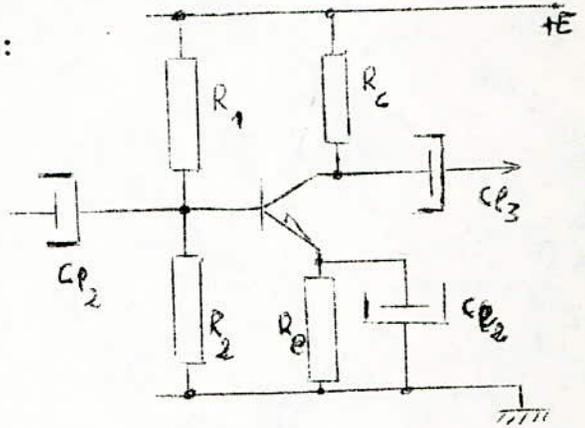
$R_1 = 25 \text{ K}\Omega , R_2 = 7,4 \text{ K}\Omega$

Les valeurs pratiques prises sont:

$R_1 = 27 \text{ K}\Omega , R_2 = 6,8 \text{ K}\Omega$

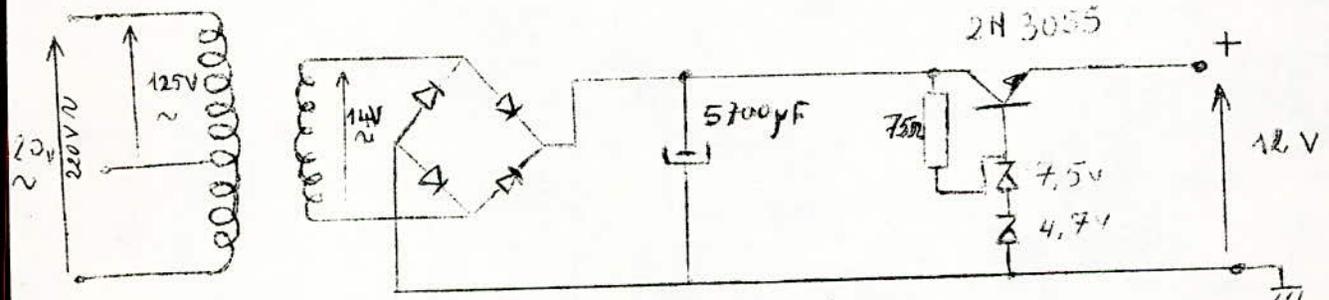
En définitive:

$R_c = 1 \text{ K}\Omega$	$R_1 = 27 \text{ K}\Omega$	$C_{11} = C_{e2} = 10 \mu\text{F}$
$R_e = 470 \Omega$	$R_2 = 6,8 \text{ K}\Omega$	$C_{13} = 50 \mu\text{F}$



6.5- ALIMENTATION

Schéma du montage:

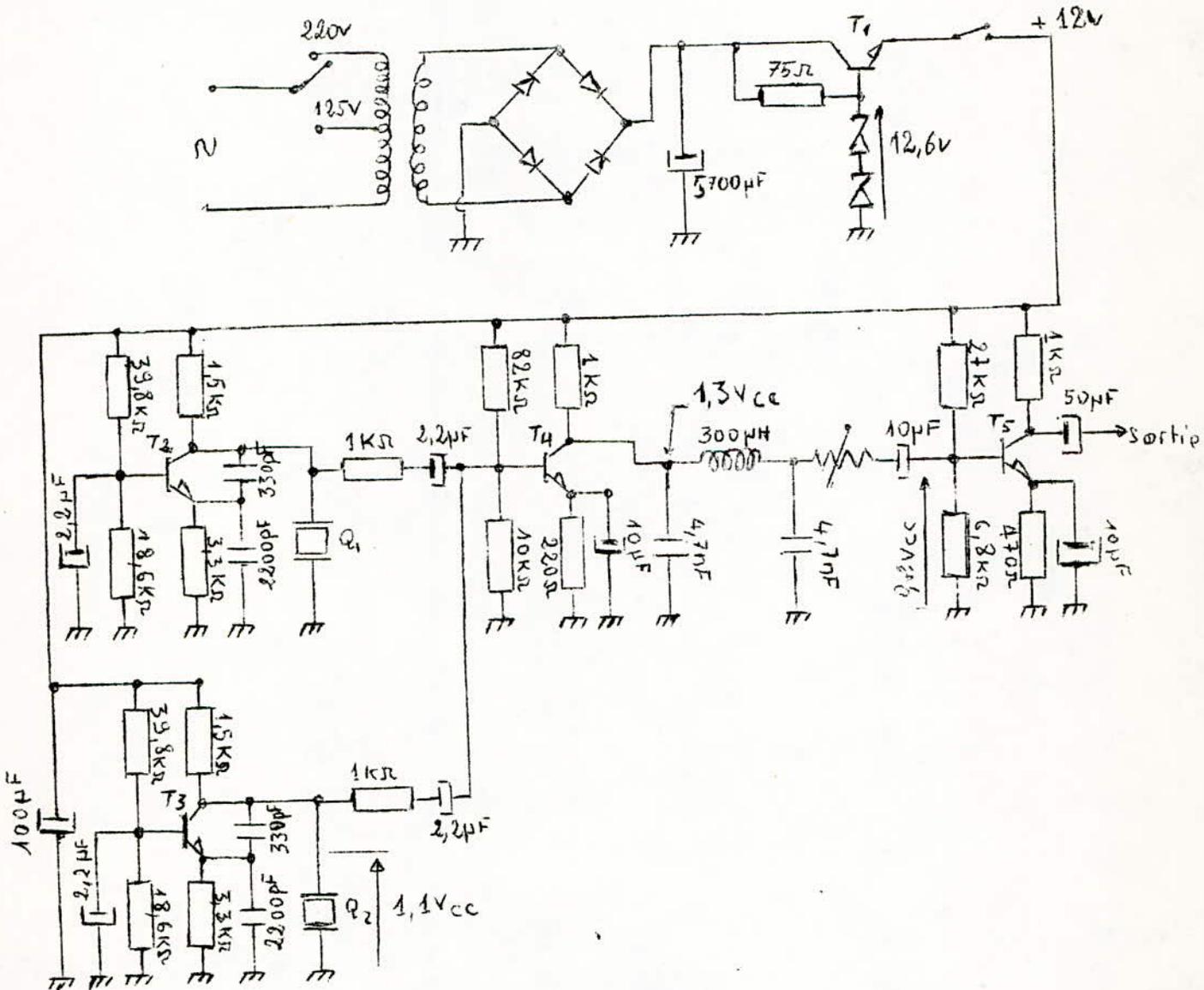


Caractéristiques de l'alimentation:

- elle a deux entrées possibles pour le secteur: 220 et 125 V
- tension au secondaire: 11,4 V_{eff}
- tension après filtrage: 14 V
- taux d'ondulation inférieur à 0,1 %
- tension aux bornes des deux diodes zener: 12,6 V
- transistor ballast utilisé: 2N3055, NPN, de puissance

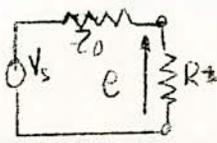
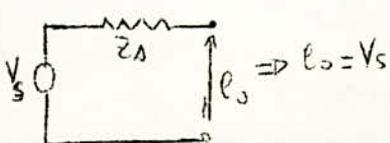
- tension base-émetteur du transistor: 0,6 V
- tension collecteur-émetteur: 2 V
- courant délivré sous 12 V: 20 mA

6.6- SCHEMA DU MONTAGE GLOBAL



La tension de sortie du montage est : $V_s = 6 V_{cc}$, avec une fréquence $F = 17,5 KHZ$ (pour une épaisseur $e_d = 0$)

Mesure de l'impédance de sortie :



Pour $e = \frac{V_s}{2}$, nous avons :

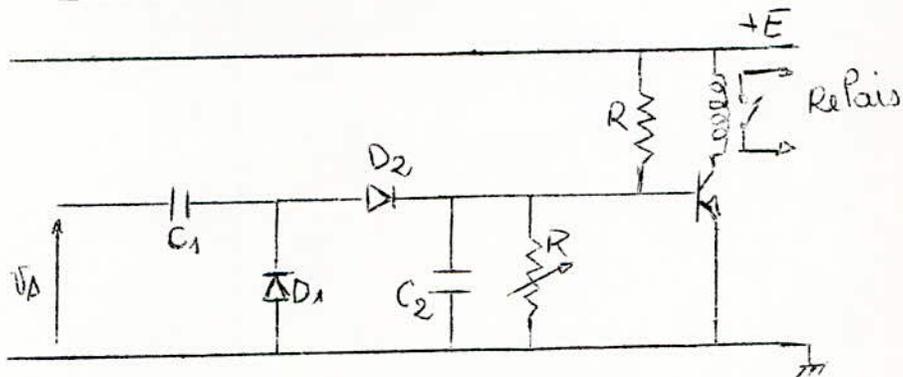
$$Z_0 = R = 650 \Omega$$

6.7-CIRCUIT DE COMMANDE DU PROCESSUS DE DÉPÔT

Le circuit de commande sert à déclencher l'arrêt de l'évaporation du matériau de dépôt, une fois atteinte l'épaisseur désirée. Il déclenchera l'arrêt du système de chauffage l'abaissement afin d'éviter l'évaporation par inertie. Dans le cas où l'on a accès au compteur qui donne la lecture de la fréquence le signal de commande sera recueilli à la sortie du compteur dans le cas où l'on utilise un fréquencemètre, ce signal proviendra du circuit de mesure, c'est-à-dire de la sortie de l'ampli B.F. et nous aurons donc un phénomène continu.

C'est ce dernier cas que l'on étudiera; plusieurs circuits peuvent être proposés.

6.7.1 Montage pompe à diodes



Le condensateur C se charge à travers D_1 lorsque v_s est minimum et se décharge à travers D_2 lorsque v_s est maximum.

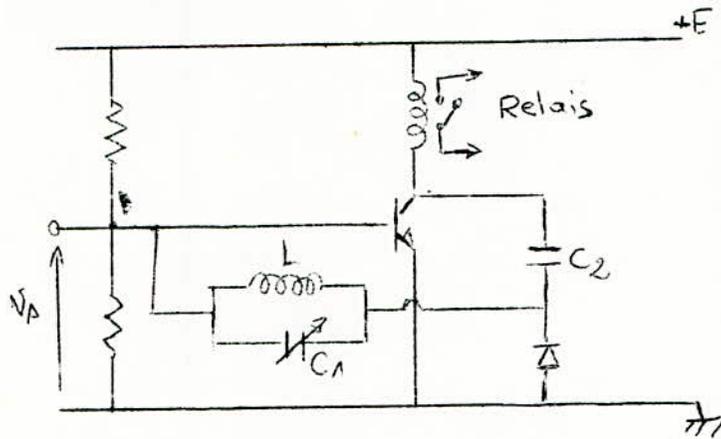
C_2 se décharge dans R, la tension v_1 est proportionnelle à la fréquence du signal. La résistance R, variable, détermine la fréquence pour laquelle le transistor se sature, faisant ainsi déclencher le relais B qui coupera le contact du circuit de chauffage et actionnera l'écran. Ce montage très simple s'avère peu sensible.

6.7.2 Circuit oscillant

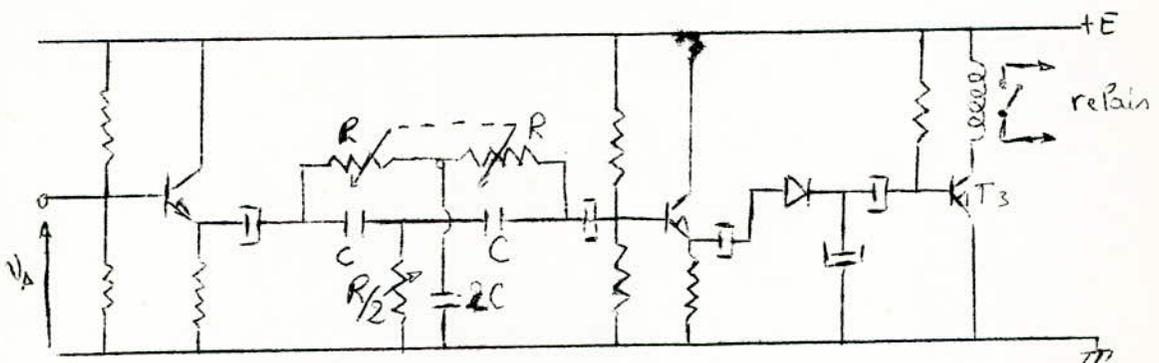
La polarisation du circuit est choisie de telle manière que la tension continue base-émetteur soit égale à 0,2v. Lorsque la fréquence du signal d'entrée est différente de $f_0 = 1/2\pi LC_1$

Les circuits oscillants présentent une faible impédance ,ce qui donne un taux de contre-réaction très fort, donc un signal faible à la sortie:le relais ne se déclenchera pas.

Lorsque $f=f_0$, le circuit oscillant présente une impédance très grande, donc un taux de contre-réaction pratiquement nul; on recueille sur le collecteur du transistor une tension alternative assez forte. Cette tension est transmise par C_2 à la diode qui la redresse. Le transistor sera donc saturé et le relais se déclenchera .



6.7.3 Circuit réjecteur

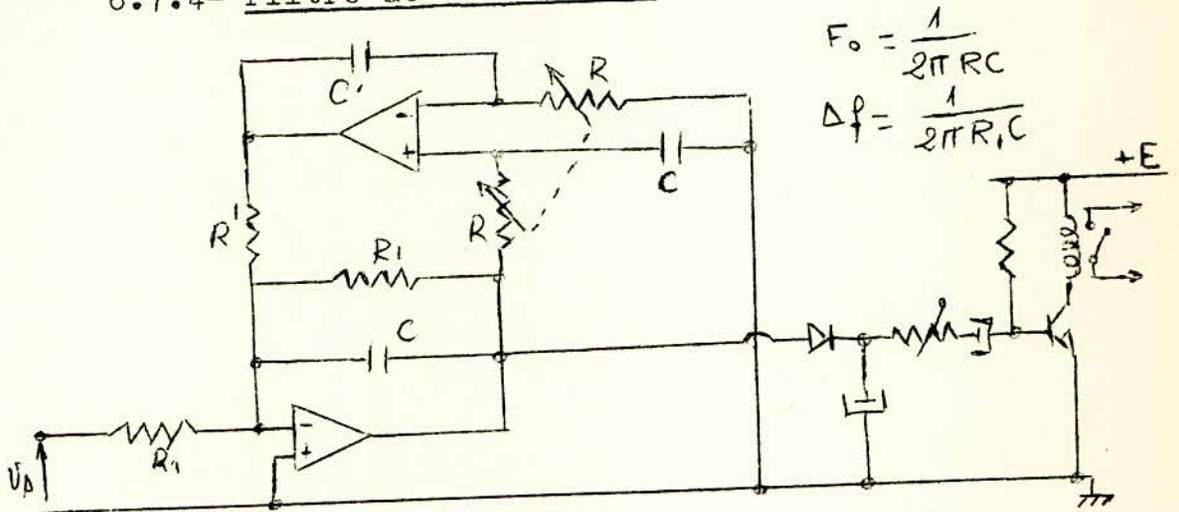


Le filtre rejecteur utilisé est un double T, il donnera une ^{tension} pratiquement nulle pour la fréquence F_0 voulue (donc pour l'épaisseur de dépôt voulue). Le réglage se fera à l'aide des résistances R ou des capacités C .

Les deux étages collecteur commun à l'entrée et à la sortie du filtre permettent de réaliser l'adaptation. Un étage pour redressement et filtrage permet d'attaquer l'étage de commutation. Pour la fréquence F_0 , le transistor T_3 sera bloqué.

Cela impose que le relais soit utilisé en position repos.

6.7.4- Filtre actif selectif



Parmi les montages exposés précédemment, celui-ci est le seul qui puisse assurer une commande précise et sensible; ceci grâce à la bande passante du filtre que l'on peut ajuster à une valeur aussi faible que l'on veut. Ici le relais ~~travaille~~ se déclenche en position travail. Ce montage nécessite l'emploi de deux amplis opérationnels .

Cette étude nous a montré que les circuits intégrés à couches minces peuvent être fabriqués avec un haut niveau de précision.

Nous avons vu qu'il était possible de réaliser un dispositif très sensible et capable d'une bonne précision; pour cela il est nécessaire de disposer de deux quartz de bonne qualité ayant des fréquences de résonance très voisines, ou mieux: confondues. L'appareil réalisé dans le cadre de ce projet comporte des limitations, surtout en ce qui concerne l'évaluation des faibles épaisseurs de couches, car nous n'avons pas pu disposer de deux quartz identiques, en l'occurrence, ceux que nous avons pu nous procurer ont des fréquences différent de 17,5 KHz, ce qui est malheureusement assez important. Par ailleurs l'élaboration d'un appareil destiné à un contrôle aussi précis, nécessite des mesures très soignées, avec un appareillage adéquat. En outre, les composants doivent être de bonne qualité. Il aurait été intéressant de disposer d'un système de dépôt de couches et d'un dispositif de fixation de la lame de quartz afin de faire des mesures et de comparer les résultats pratiques aux résultats théoriques. Le dispositif de fixation doit être perfectionné; la courbure de la surface à laquelle le quartz sera fixé peut par exemple apporter des altérations dans la fréquence de celui-ci.

Pour que la surface vibrante du cristal (sous l'effet du dépôt) soit bien définie, il faudra que le dépôt se fasse à travers un masque comportant une ouverture de diamètre connu. On devrait alors déterminer le diamètre optimal pour conserver une bonne sensibilité.

Puisque le cristal doit être utilisé sous vide, il peut s'avérer nécessaire d'examiner si des changements de fréquence, dus à la pression, peuvent se produire. Des variations de fréquences pourraient se produire également lorsque l'atmosphère à l'intérieur de l'enceinte d'évaporation contient

des gaz (azote, argon, ...). Ces études sur les changements de fréquence sont essentiellement de nature expérimentale.

Il importe de remarquer que la durée de vie du quartz utilisé comme capteur est faible et que ce quartz doit être nettoyé périodiquement et remplacé au bout d'une vingtaine d'opérations environ. Mais, le système est assez rentable puisque l'on peut former des couches de même nature sur plusieurs substrats au cours de la même opération.

Nous pourrions conclure enfin que le contrôleur peut être utilisé pour des mesures d'accroissement d'épaisseurs de films métalliques ou diélectriques, formés par évaporation sous vide ou par d'autres techniques; dans le cas d'un appareil perfectionné, à deux quartz identiques, son utilisation peut être étendue au niveau des phénomènes atomiques.

.
.
.

B I B L I O G R A P H I E

- [I] Raymond M. WARNER (MOTOROLA): Circuits intégrés, étude et réalisation.
- [II] R. BESSON : Technologie des composants électroniques; Editions RADIO (1971).
- [III] H. LILEN : Principes et applications des circuits intégrés linéaires.
- [IV] Electronique industrielle et micro-électronique (Juin 1973)
Les circuits hybrides à couches minces
- [V] В.Н. ПРАШТОЛЬЦ : РАЗВИТИЕ МЕТОДА КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ.
(МОСКВА 1970)
- [VI] W.G. CADY : Piezoelectricity New-York-Dover (1964)
- [VII] G. SAUERBREY / Z-Physic, 155-206, 22 (1959)
- [VIII] W.H. LAWSON : Versatile thin film thickness monitor of high accuracy; Journal of physics E scientific instruments (vol.44, 1967)
- [IX] J. RAIF; N. BEN-YOSEF ; MOSHE ORON : Journal of physics E scientific instruments (Janvier 1973, vol.6 N°1)
- [X] W.E.J. NEAL ; R.W. FANE / Journal of physics E , scientific instruments (Mai 1973 vol.6 N°5)
- [XI] INGENIEURS DE LA TEXAS INSTRUMENTS Inc. : Calcul des circuits à transistors (Dunod, Paris 1965)
- [XII] COLLOQUE INTERNATIONAL DE LA MICRO-ELECTRONIQUE AVANCEE :
(Paris, 6-10 Avril 1970)