



CONFÉDÉRATION SUISSE
OFFICE FÉDÉRAL DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

⑪ CH 668 145 A5

⑤① Int. Cl.⁴: H 01 L 21/20
H 01 L 31/00

Brevet d'invention délivré pour la Suisse et le Liechtenstein
Traité sur les brevets, du 22 décembre 1978, entre la Suisse et le Liechtenstein

⑫ FASCICULE DU BREVET A5

②① Numéro de la demande: 3868/86

②② Date de dépôt: 26.09.1986

②④ Brevet délivré le: 30.11.1988

④⑤ Fascicule du brevet
publié le: 30.11.1988

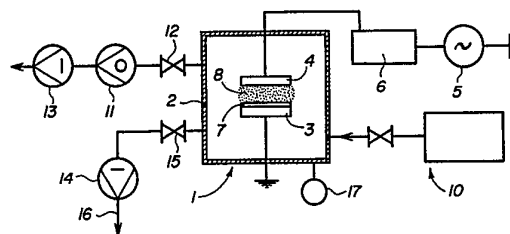
⑦③ Titulaire(s):
Institut de Microtechnique de l'Université de
Neuchâtel, Neuchâtel

⑦② Inventeur(s):
Curtins, Hermann, Gampelen

⑦④ Mandataire:
Cabinet Roland Nithardt, Yverdon

⑤④ Procédé et installation de dépôt de silicium amorphe hydrogéné sur un substrat dans une enceinte à plasma.

⑤⑦ L'installation comporte une enceinte (2) à plasma renfermant deux électrodes (3 et 4) couplées à un générateur à hautes fréquences (5), le substrat (7) étant monté sur l'une des électrodes. Un gaz contenant au moins un composé de silicium est introduit dans l'enceinte et un plasma (8) est créé par une radiofréquence entre les électrodes. L'invention vise à obtenir une grande vitesse de dépôt de silicium amorphe sur le substrat, en même temps qu'un petit nombre de défauts dans le film déposé. On atteint ce but en choisissant, pour le rapport f/d entre la fréquence et la distance séparant les électrodes, une valeur optimale comprise entre 30 et 100 MHz/cm, la fréquence étant comprise entre 30 et 150 MHz. Pour la fréquence optimale, la vitesse de dépôt est maximale et le nombre de défauts est minimal. Ce procédé est utilisable pour le dépôt de silicium amorphe hydrogéné ou de l'un de ses alliages à partir de différents gaz ou mélanges de gaz, ainsi que pour produire des couches dopées.



REVENDICATIONS

1. Procédé de dépôt de silicium amorphe hydrogéné ou d'un alliage de silicium amorphe hydrogéné sur un substrat (7) dans une enceinte à plasma (2) contenant au moins une paire d'électrodes (3 et 4) couplée à un générateur électrique à haute fréquence (5), dans lequel on relie le substrat à une électrode, le substrat étant placé à une distance d de l'autre électrode, on introduit dans l'enceinte un gaz contenant au moins un composé de silicium, et l'on applique aux électrodes une puissance électrique de haute fréquence f pour produire un plasma entre les électrodes, caractérisé en ce que la fréquence f est comprise entre 30 et 150 MHz, et en ce que le rapport f/d entre la fréquence et la distance est compris entre 30 et 100 MHz/cm.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la distance d est comprise entre 1 et 3 cm.
3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que le rapport f/d est compris entre 30 et 80 MHz/cm.
4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la fréquence f est comprise entre 30 et 100 MHz et la distance d est comprise entre 1 et 2,5 cm.
5. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le rapport entre la puissance électrique P dissipée dans le plasma et mesurée aux bornes des deux électrodes et le volume V du plasma se trouvant entre les deux électrodes est compris entre 0,02 et 0,2 W/cm³.
6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que le rapport P/V est compris entre 0,04 et 0,15 W/cm³.
7. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on maintient dans l'enceinte, pendant le dépôt, une pression comprise entre 0,1 et 0,5 mbar.
8. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on maintient le substrat, pendant le dépôt, à une température comprise entre 220 et 300°C.
9. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le gaz introduit dans l'enceinte comprend une ou plusieurs des substances suivantes: silane, disilane et/ou des silanes d'ordre supérieur, tétrafluorure de silicium, hydrogène.
10. Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que ledit gaz comprend une ou plusieurs des substances suivantes: germane, tétrafluorure de germanium.
11. Procédé selon la revendication 9 ou 10, caractérisé en ce que ledit gaz comprend une ou plusieurs des substances suivantes: méthane, tétrafluorure de carbone.
12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 11, caractérisé en ce que ledit gaz comprend une ou plusieurs des substances suivantes: azote, ammoniac.
13. Procédé selon l'une quelconque des revendications 9 à 12, caractérisé en ce que ledit gaz comprend une ou plusieurs des substances suivantes: phosphine, diborane.
14. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'on effectue dans l'enceinte, avant l'introduction du gaz contenant au moins un composé de silicium, un conditionnement préalable du substrat dans lequel on chauffe le substrat à une température comprise entre 230 et 300°C, on l'expose à un plasma d'hydrogène produit par haute fréquence entre les électrodes, puis on évacue l'hydrogène de l'enceinte.
15. Installation pour la mise en œuvre du procédé selon la revendication 1, comportant un générateur de radiofréquences (5), un réacteur à plasma (1) pourvu d'une enceinte (2) renfermant deux électrodes (3 et 4) couplées au générateur par l'intermédiaire d'un réseau d'adaptation (6), des moyens (10) pour introduire des gaz dans l'enceinte et des moyens (11 à 15) pour extraire les gaz de l'enceinte, l'une des deux électrodes étant pourvue d'un support pour le substrat (7), et l'autre électrode étant disposée à une distance d en face du substrat, caractérisée en ce que la fréquence f délivrée par le générateur est comprise

entre 30 et 150 MHz, et en ce que le rapport f/d est compris entre 30 et 100 MHz/cm.

16. Installation selon la revendication 15, caractérisée en ce que l'une (4) des électrodes est entourée latéralement par un écran conducteur (35) espacé de l'électrode, cet écran étant au même potentiel que l'autre électrode (3).

17. Installation selon la revendication 16, caractérisée en ce que ce potentiel commun est le potentiel de la terre.

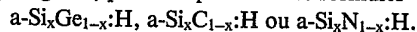
18. Installation selon la revendication 16, caractérisée en ce que l'écran (35) est séparé de l'électrode qu'il entoure par une gaine (36) en matière diélectrique.

19. Installation selon la revendication 18, caractérisée en ce que ladite gaine (36) est en matière céramique.

DESCRIPTION

La présente invention concerne un procédé de dépôt de silicium amorphe hydrogéné ou d'un alliage de silicium amorphe hydrogéné sur un substrat, dans une enceinte à plasma contenant au moins une paire d'électrodes couplée à un générateur électrique à haute fréquence, dans lequel on relie le substrat à une électrode, le substrat étant placé à une distance d de l'autre électrode, on introduit dans l'enceinte un gaz contenant au moins un composé de silicium et l'on applique aux électrodes une puissance électrique de haute fréquence f pour produire un plasma entre les électrodes. L'invention concerne également une installation pour la mise en œuvre de ce procédé.

Le dépôt de silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) dans un réacteur à plasma est pratiqué couramment, par exemple à partir de composés du type silane (SiH₄, Si₂H₆, etc....), pour réaliser des éléments de photodétecteurs ou de cellules photovoltaïques. On dépose également des couches amorphes d'alliages de silicium hydrogénés, par exemple selon les formules



En application industrielle, on vise avant tout à obtenir une qualité suffisante du produit, en particulier un nombre limité de défauts par unité de volume, avec une vitesse de dépôt aussi grande que possible, donc un coût modéré. La plupart du temps, le plasma est produit par des décharges en radiofréquence (RF) entre deux électrodes dont l'une porte le substrat, le plasma étant ainsi couplé capacitivement à un générateur de haute fréquence.

Les paramètres intervenant sur le processus de dépôt sont nombreux et englobent notamment: la distance entre les électrodes, la température du substrat, le mélange gazeux utilisé, la pression et le débit d'introduction du gaz dans l'enceinte, la puissance et la fréquence de décharge en RF. En outre, il importe de confiner le plasma autant que possible dans la zone située entre les deux électrodes, ce qui peut se faire notamment grâce à un choix approprié des paramètres suivants: pression, distance entre électrodes, puissance RF. Pour obtenir une vitesse de dépôt élevée, il convient d'augmenter principalement la concentration du plasma et/ou la densité de puissance RF par unité de surface du substrat. Toutefois, l'augmentation de ces paramètres s'est heurtée jusqu'à maintenant à des limites dues à l'augmentation du taux de défauts dans le film déposé, c'est-à-dire du nombre de défauts par unité de volume, en particulier à cause d'un phénomène de polymérisation dans la phase gazeuse, de sorte que les meilleures vitesses de dépôt obtenues actuellement au stade industriel ne dépassent en général pas 0,4 nm/s (4 Å/s) pour un taux de défauts N_d de l'ordre de $1-5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$, mesuré par la méthode PDS (Photothermal Deflection Spectroscopy). Ainsi, le dépôt d'un film ayant par exemple une épaisseur de 500 nm demande plusieurs dizaines de minutes.

Un exemple des tentatives pour la vitesse de dépôt est donné

dans T. Hamasaki et al, Appl. Phys. Letters 44 (6) 1984, p. 600-602. Dans ce cas, un confinement du plasma par un grillage entourant la zone des électrodes et mis à terre a permis d'obtenir des vitesses de dépôt de l'ordre de 4 à 5 nm/s (40 à 50 Å/s) en utilisant du gaz de silane (SiH_4) pur et une fréquence standard de 9 MHz. Cependant, à part les conductivités dans l'obscurité et à la lumière, les auteurs ne donnent pas d'indications précises sur la qualité de dépôt obtenu et on peut s'attendre à une valeur de N_s relativement élevée.

L'objet de la présente invention consiste à fournir des moyens simples et efficaces permettant de perfectionner des procédés connus du type indiqué plus haut, de manière à augmenter la vitesse de dépôt sans augmenter le nombre des défauts, ou même en le réduisant par rapport aux dépôts obtenus par les procédés classiques.

L'idée de base de la présente invention consiste à rechercher une augmentation de vitesse de dépôt en appliquant aux électrodes une radiofréquence plus élevée que celle qu'on a utilisée jusqu'à maintenant. La plupart des recherches faites sur le dépôt de silicium amorphe hydrogéné se sont faites avec une fréquence de 13,56 MHz parce qu'il s'agit d'une fréquence industrielle, ne produisant pas de perturbations majeures sur les communications radio, et que les appareils utilisant cette fréquence sont largement répandus. En outre, une augmentation de la fréquence dans l'enceinte à plasma tend à produire des décharges parasites entre une électrode et son support ou l'enceinte, de sorte qu'on a en général évité les fréquences plus élevées. Enfin, la plupart de chercheurs ont estimé jusqu'à maintenant qu'il n'était pas opportun d'utiliser une fréquence sensiblement supérieure à celle du plasma, c'est-à-dire la fréquence d'oscillation des ions, qui est de l'ordre de 1 à 8 MHz. Au contraire, les recherches qui sont à la base de l'invention montrent qu'on peut atteindre les résultats très avantageux en appliquant aux électrodes une fréquence relativement élevée, en combinaison avec une géométrie particulière du réacteur.

Selon un premier aspect, l'invention concerne un procédé du type indiqué en préambule, caractérisé en ce que la fréquence f est comprise entre 30 et 150 MHz, et en ce que le rapport f/d entre la fréquence f et la distance d est compris entre 30 et 100 MHz/cm. De préférence, la distance d est comprise entre 1 et 3 cm.

Dans les formes de réalisation particulièrement avantageuses du procédé, le rapport f/d est compris entre 30 et 80 MHz/cm. De plus, la fréquence f est comprise entre 30 et 100 MHz, et la distance d est comprise entre 1 et 2,5 cm. En ce qui concerne la puissance électrique injectée P , c'est-à-dire la puissance dissipée dans le plasma et mesurée aux bornes des deux électrodes, le rapport entre cette puissance et le volume V du plasma se trouvant entre les deux électrodes est compris entre 0,02 et 0,2 W/cm³ et de préférence entre 0,04 et 0,15 W/cm³. En outre, pendant la phase de dépôt, on maintient dans l'enceinte une pression comprise de préférence entre 0,1 et 0,5 mbar et l'on maintient le substrat à une température comprise de préférence entre 220 et 300°C.

Le gaz introduit dans l'enceinte peut comprendre une ou plusieurs des substances suivantes: silane (SiH_4), disilane (Si_2H_6) et/ou des silanes d'ordre supérieur, tétrafluorure de silicium (SiF_4), hydrogène (H_2). En plus des composés de silicium, le gaz peut comprendre une ou plusieurs substances supplémentaires destinées à déposer un film amorphe contenant un alliage de silicium et d'une autre substance et/ou modifier ou doper le film déposé. Un premier groupe de ces substances comprend le germane (GeH_4) et le tétrafluorure de germanium (GeF_4). Un second groupe comprend le méthane (CH_4) et le tétrafluorure de carbone (CF_4). Un troisième groupe comprend l'azote (N_2) et l'ammoniac (NH_3). Un quatrième groupe comprend la phosphine (PH_3) et le diborane (B_2H_6). Des substances choisies dans

plusieurs de ces groupes peuvent aussi être présentes simultanément dans l'enceinte.

Avant d'introduire dans l'enceinte le ou les composés gazeux de silicium, on effectue généralement dans cette enceinte un conditionnement préalable du substrat, dans lequel on chauffe le substrat à une température comprise entre 230 et 300°C, on l'expose à un plasma d'hydrogène produit par décharge en haute fréquence entre les électrodes, puis on évacue l'hydrogène de la chambre.

La présente invention et ses avantages ressortiront mieux de la description d'un exemple de réalisation, donnée ci-dessous en référence aux dessins annexés, dans lesquels:

la fig. 1 est un schéma simplifié d'une installation pour le dépôt de silicium amorphe hydrogéné sur un substrat dans un

réacteur à plasma,

la fig. 2 est une vue schématique en coupe longitudinale du réacteur,

la fig. 3 représente, sous forme de diagrammes schématiques, des vitesses de dépôt r et des taux de défauts N_s obtenus pour différentes fréquences f et différentes distances d entre électrodes, dans une installation selon les figures 1 et 2,

la fig. 4 est un diagramme similaire à la fig. 3, pour une distance d donnée, et

la fig. 5 est une vue schématique en coupe longitudinale, montrant la forme de la zone où apparaît le plasma pour différentes fréquences.

L'installation représentée schématiquement sur la fig. 1 a une configuration générale connue. Elle comprend un réacteur à plasma 1 comportant, à l'intérieur d'une enceinte étanche 2, une première électrode 3 qui est raccordée à la terre et une seconde électrode 4 qui est raccordée à un générateur électrique de radiofréquences 5 par l'intermédiaire d'un réseau d'adaptation 6. Les électrodes 3 et 4 sont disposées l'une en face de l'autre, leur surfaces respectives étant essentiellement planes. Un substrat 7 en forme de plaque est fixé sur la première électrode 3 de manière que sa surface libre soit située à une distance d de la seconde électrode 4. Dans le circuit électrique alimenté par le générateur 5, les électrodes (y compris le substrat) forment ainsi un élément capacitif permettant de créer un plasma 8 par décharge électrique à haute fréquence entre les électrodes lorsqu'un gaz se trouve dans l'enceinte 2 dans des conditions appropriées. Dans le cas présent, le générateur 5 est prévu pour produire des radiofréquences comprises entre 1 et 200 MHz. Il faut remarquer que, dans une installation de ce genre, on pourrait disposer le substrat et les équipements correspondants sur la seconde électrode au lieu de la première, mais cette solution est généralement moins avantageuse pour des raisons d'isolation électrique.

De manière connue, l'installation comporte des moyens 10 pour introduire différents gaz (purs ou sous forme de mélanges) dans l'enceinte 2 du réacteur, et des moyens pour extraire les gaz de cette enceinte. Sur la fig. 1, on a représenté une pompe turbomoléculaire 11 dont le côté aspiration est raccordé à l'enceinte 2 par l'intermédiaire d'une vanne 12, la pompe 11 étant suivie d'une première pompe primaire 13. Une seconde pompe primaire 14 est raccordée à l'enceinte 2 par une vanne 15, la sortie de cette pompe étant branchée sur un circuit 16 d'évacuation des gaz. On a représenté également un pressiomètre 17 indiquant la pression dans l'enceinte 2. Par ailleurs, il est prévu divers moyens connus pour chauffer et pour refroidir les électrodes, le substrat et l'enceinte, mais ceux-ci ne sont pas représentés sur la fig. 1.

La fig. 2 montre plus en détails la disposition des électrodes 3 et 4 et du substrat 7 dans l'enceinte 2 du réacteur 1. L'enceinte 2 est un récipient fermé approximativement cubique, pourvu d'ouvertures 20 et 21 pour le montage des électrodes 3 et 4 et de plusieurs autres ouvertures pour d'autres composants tels que des tubulures (non représentées) d'introduction et

d'extraction des gaz. Des corps de chauffe 22 et 23 sont appliqués sur la surface extérieure de l'enceinte 2.

La première électrode 3, c'est-à-dire l'électrode qui est raccordée électriquement à la terre, est montée à l'extrémité d'un porte-électrode tubulaire 24 fixé à l'enceinte 2. Elle est équipée d'un support de substrat 25 qui est facilement interchangeable, d'une sonde de température 26, d'un corps de chauffe électrique 27 et d'un circuit de refroidissement à eau 28, utilisable pour refroidir l'électrode et le substrat à la fin du processus de dépôt.

Pour sa part, la seconde électrode 4, dite électrode active, est raccordée au générateur à haute fréquence au moyen d'une tige conductrice 30 et elle est montée à l'extrémité d'un porte-électrode tubulaire 31 par l'intermédiaire d'une monture isolante 32 qui définit en outre, au dos de l'électrode 4, une chambre de refroidissement 33 raccordée à un circuit d'eau 34. Un écran métallique 35, qui est raccordé électriquement à la terre, entoure latéralement l'électrode 4, dont il est séparé par un espace rempli d'une matière diélectrique constituant une gaine 36 qui empêche l'apparition de décharges sur les côtés de l'électrode 4. De préférence, cette gaine est en matière céramique réfractaire. L'écran 35 est fixé sur le porte-électrode 31 au moyen de vis de serrage 37, dans une position réglable longitudinalement. Bien entendu, soit l'une, soit l'autre des électrodes 3 et 4 peut être mise à la terre, ou même aucune d'elles. L'essentiel est que l'écran conducteur disposé autour d'une électrode soit au même potentiel que l'autre électrode.

Le fonctionnement de cette installation sera décrite ci-dessous par son utilisation pour la mise en œuvre du procédé selon l'invention. L'obtention d'un dépôt de silicium amorphe hydrogéné, sous forme d'un film sur un substrat, comprend généralement au moins les trois étapes suivantes:

- (A) préparation du substrat (nettoyage)
- (B) conditionnement du système (réacteur et substrat)
- (C) dépôt du film.

Le substrat peut être en verre, en métal, en matière synthétique ou autre. Les exemples cités ci-dessous se réfèrent à des substrats en verre de marque Dow Corning N° 7059 ou en verre revêtu d'un film métallique. Ces substrats ont une épaisseur de 0,8 mm. Dans l'étape A, le substrat est découpé aux dimensions appropriées (110 × 55 mm dans le cas présent), il est lavé dans plusieurs bains d'eau et de solutions alcooliques, puis il est monté sur un support interchangeable 25 pour être fixé à la première électrode 3.

Dans l'étape B, on fait le vide dans l'enceinte 2 du réacteur au moyen de la pompe 14 et ensuite des pompes 11 et 13 jusqu'à l'obtention d'une pression de $1-5 \times 10^{-6}$ mbar, puis on ferme la vanne 12 et l'on effectue un conditionnement à plasma d'hydrogène de la manière suivante. On chauffe l'enceinte au moyen des corps de chauffe 22 et 23 pendant environ une heure, de manière à obtenir une température superficielle d'environ 80°C. En même temps, on chauffe l'électrode 3 et le support de substrat 25 à une température comprise entre 230 et 300°C. On introduit alors dans l'enceinte un débit d'hydrogène de l'ordre de 20 à 50 cm³/s, que l'on fait circuler au moyen de la pompe primaire 14 dont la vitesse est réglée de façon à maintenir dans l'enceinte une pression comprise entre 0,1 et 0,5 mbar. Afin d'assurer un bon nettoyage du substrat et de l'enceinte, on produit un plasma par enclenchement du générateur à haute fréquence 5 pendant une durée de 10 à 60 minutes. Les conditions de pression, de puissance, etc. sont choisies de manière que le plasma soit présent dans toute l'enceinte, tout en étant évidemment particulièrement dense entre les deux électrodes. Après ce conditionnement, le débit de gaz est interrompu et l'enceinte est vidée au moyen des pompes 11 et 13 jusqu'à environ 10^{-6} mbar, tout en étant refroidie à environ

20°C. On ferme alors la vanne 12 et le système est prêt pour l'étape de dépôt proprement dit C.

Dans cette étape C, les moyens 10 d'alimentation en gaz sont branchés de manière à délivrer à l'intérieur de l'enceinte 2 un gaz pur ou un mélange de gaz contenant au moins un composé de silicium, par exemple un mélange de silane (SiH₄) et d'hydrogène (H₂). La vanne 15 est ouverte et la pompe primaire 14 est actionnée de manière à maintenir une pression absolue p déterminée dans l'enceinte. Dès que la pression est stabilisée, on enclenche le générateur 5 pour produire un plasma entre les deux électrodes, et plus précisément entre le substrat 7 et la seconde électrode 4. Il est important que le plasma soit plus ou moins confiné à la zone comprise entre les deux électrodes, grâce à un choix judicieux des paramètres tels que la pression p, la distance d et la densité de puissance électrique. Le rôle de la fréquence f sera discuté plus loin.

D'autre part, tous les paramètres intervenant dans cette étape doivent être choisis de manière que la qualité du film de silicium se déposant sur le substrat soit aussi bonne que possible. A cet titre, les expériences ayant servi de base à la présente invention ont montré que les valeurs avantageuses de ces paramètres sont les suivantes:

distance entre électrodes	d = 10-30 mm
température du substrat	t = 220-300°C
pression absolue	p = 0,1-0,5 mbar
mélange SiH ₄ dans H ₂	10-100% SiH ₄
débit total de gaz	10-100 cm ³ /min
densité de puissance électrique	P/V = 0,02-0,2 W/cm ³

Un aspect essentiel de la présente invention est le fait que la fréquence f appliquée aux électrodes joue un rôle très important sur la vitesse de dépôt r, c'est-à-dire la vitesse à laquelle s'accroît l'épaisseur du film déposé. La fig. 3 montre qualitativement que, pour une distance d donnée, il existe dans la gamme des radiofréquences une fréquence optimale pour laquelle la vitesse de dépôt r est maximale. De plus, on observe que le taux de défauts N_s du film est minimal justement pour cette fréquence optimale. En outre, on observe que, lors la distance d augmente, la fréquence optimale f_{opt} correspondante augmente aussi, de sorte qu'on peut écrire:

$$\frac{f_{\text{opt}}}{d} \cong 45 \text{ MHz/cm}$$

au moins dans la gamme allant jusqu'à f = 200 MHz. On remarque également que, lorsque la valeur de d augmente, la valeur maximale de la vitesse de dépôt diminue et le taux minimal de défauts augmente, c'est-à-dire que les meilleurs résultats sont obtenus avec de faibles distances d si la fréquence f est optimale. Toutefois, on sait que la valeur de d est limitée vers le bas par d'autres phénomènes. En pratique, une valeur d = 10 mm peut être considérée actuellement comme un minimum.

La fig. 4 montre plus en détail la répartition des valeurs expérimentales de la vitesse de dépôt r et du taux de défauts N_s obtenues dans la gamme des fréquences f = 30-150 MHz avec les paramètres suivants:

distance entre électrodes	d = 15 mm
température du substrat	T = 280°C
pression absolue	p = 0,28 mbar
gaz	100% SiH ₄
débit	20 cm ³ /min
densité de puissance	P = 0,1 W/cm ³

Les deux courbes r et N_s sont des courbes de corrélation. A titre de comparaison, on a également représenté sur cette figure

des valeurs typiques des vitesses de dépôt obtenues avec des plasma produits par tension continue (DC) et pour une fréquence de 13,56 MHz, ainsi que la dispersion des valeurs correspondantes fournies par la littérature. On remarque que, dans les conditions susmentionnées, la fréquence optimale est voisine de 70 MHz et permet d'obtenir des vitesses de dépôt r supérieures à 2,0 nm/s. En même temps, les valeurs de N_s déterminées par la méthode PDS se trouvent dans la gamme de $1-2 \times 10^{16}/\text{cm}^3$. Il faut rappeler que la qualité d'un film de silicium, déterminée d'après cette méthode, est considérée comme bonne si la valeur de N_s est inférieure à $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$.

L'existence d'une fréquence optimale peut être expliquée en ce qu'elle correspond à une valeur optimale de la conductivité σ_p du plasma, pour un ensemble donné de paramètres. Ce phénomène est illustré par la fig. 5, sur laquelle on a représenté en pointillé la zone où la présence du plasma se manifeste par une luminosité, pour différentes fréquences f , les autres paramètres étant maintenus constants, en particulier la puissance électrique appliquée. Sur les schémas respectifs (a), (b) et (c), la fréquence f et la conductivité σ_p sont respectivement inférieures, égales et supérieures aux valeurs optimales f_{opt} et $\sigma_{p,\text{opt}}$. Ainsi, en choisissant la fréquence adéquate, on peut se placer dans le cas (b) et obtenir alors un effet d'autoconfinement du plasma qui permet d'atteindre des performances particulièrement bonnes. Cette méthode peut aussi être mise à profit pour éviter l'utilisation d'un grillage autour de la zone du plasma.

Bien entendu, la fréquence optimale dépend non seulement des paramètres mentionnés plus haut, mais aussi de la composition du gaz ou mélange gazeux utilisé. À l'aide d'une observation visuelle du phénomène illustré par la fig. 5, on peut déterminer d'une manière approximative la fréquence optimale pour les conditions effectives régnant dans le réacteur à plasma. Par ailleurs, on peut également envisager de choisir délibérément une fréquence qui s'écarte de l'optimum de façon à régler la vitesse de dépôt à une valeur inférieure à l'optimum, par exemple pour la production d'une couche particulièrement mince pendant une durée donnée, imposée par des contraintes particulières de fabrication, ou pour adapter l'efficacité du dopage d'une couche à la valeur désirée. Il faut aussi noter qu'on peut utiliser des fréquences respectives différentes pour l'étape de conditionnement du système et l'étape de dépôt du film de silicium.

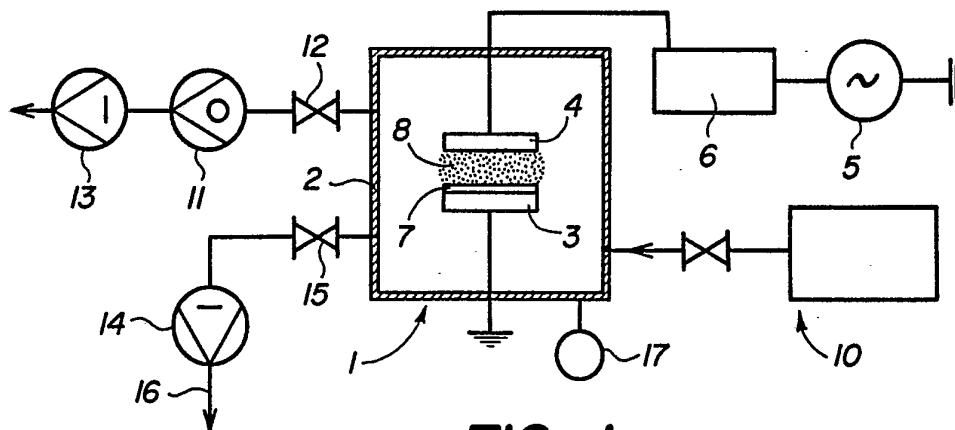


FIG. 1

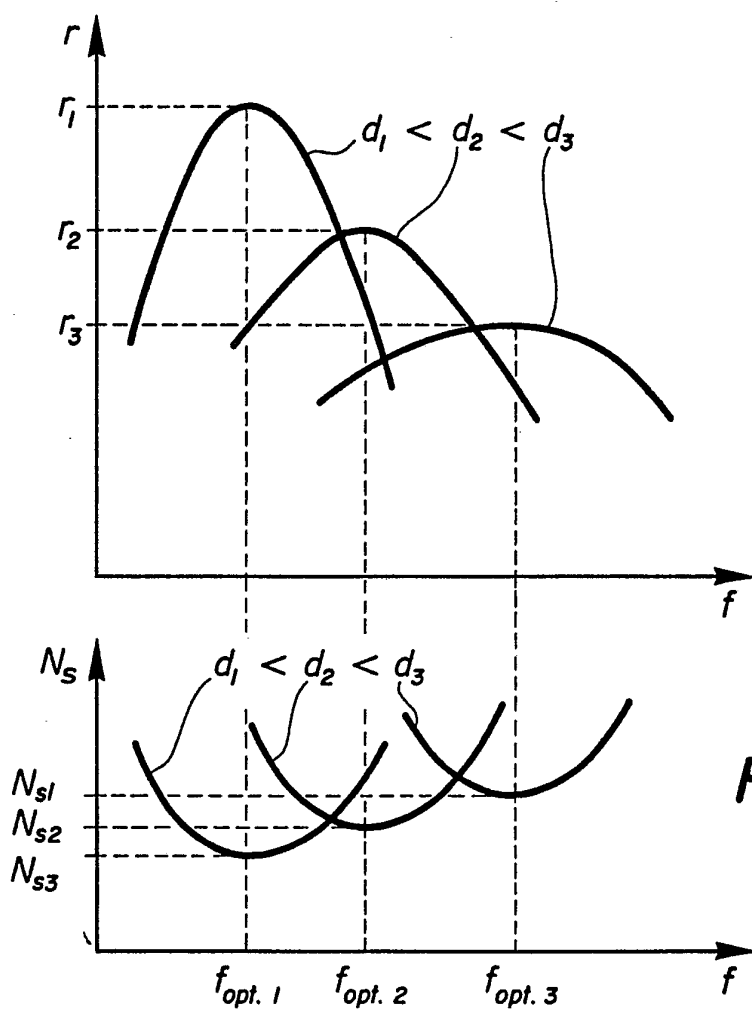


FIG. 3

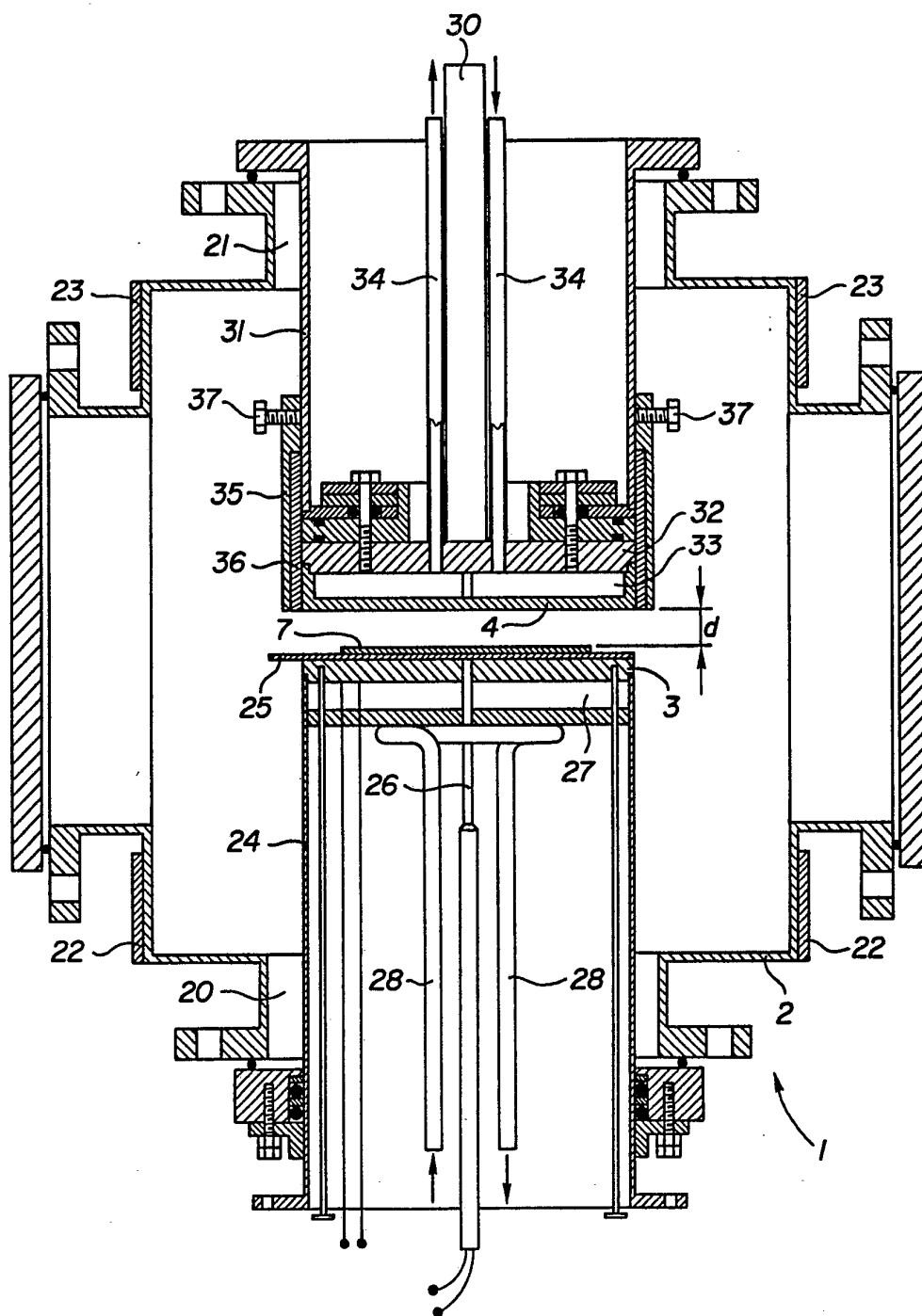


FIG. 2

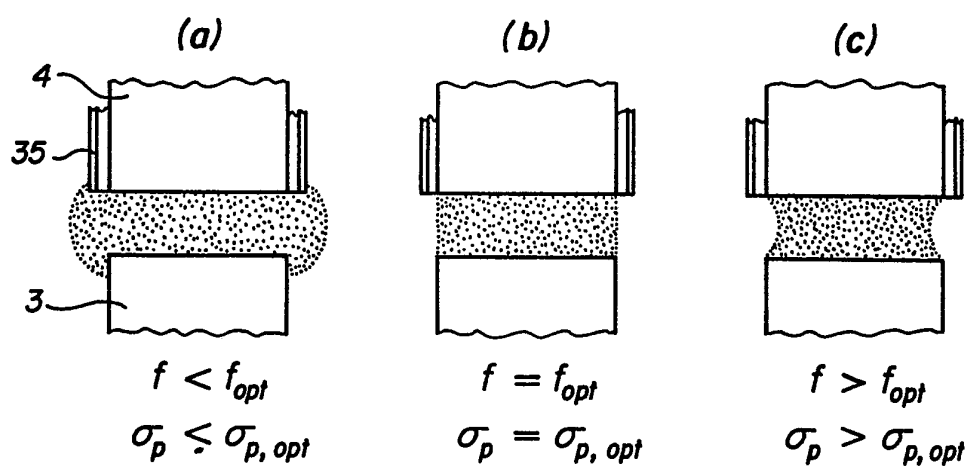
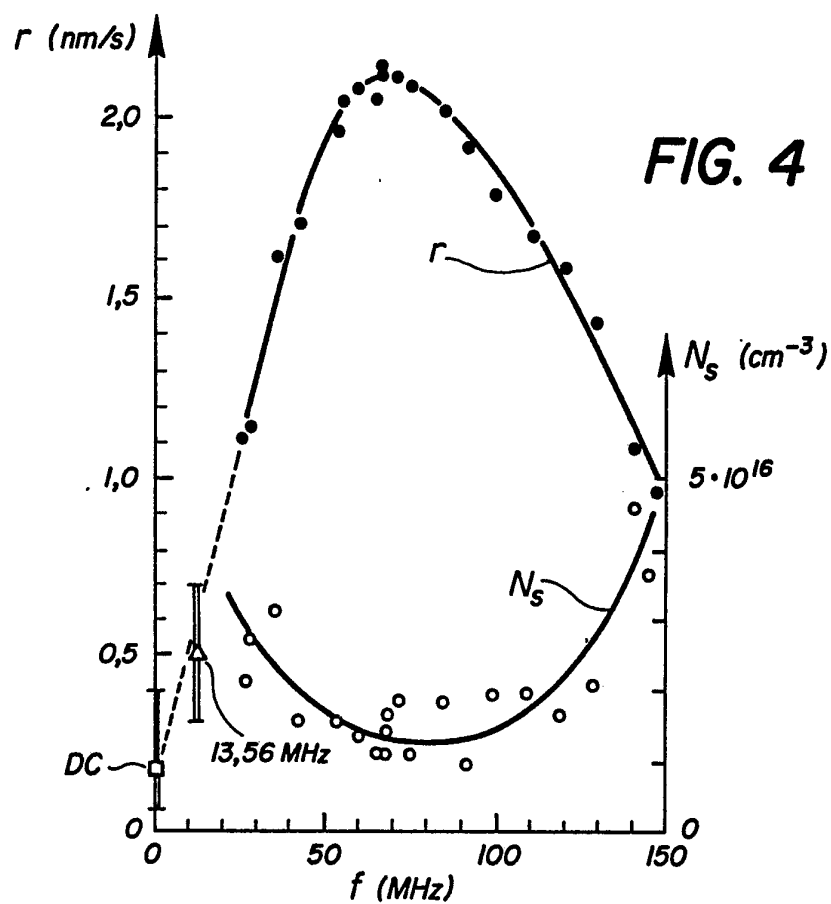


FIG. 5