

12

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 07.12.01.

30 Priorité :

43 Date de mise à la disposition du public de la demande : 13.06.03 Bulletin 03/24.

56 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule*

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE CNRS Etablissement public à caractère scientifique et technologique — FR.

72 Inventeur(s) : LACOSTE ANA, PELLETIER JACQUES et MARIE ARNAL YVES ALBAN.

73 Titulaire(s) :

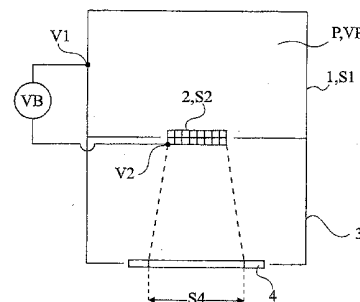
74 Mandataire(s) : CABINET MICHEL DE BEAUMONT.

54 SOURCE D'ELECTRONS.

57 L'invention concerne une source fournissant un faisceau d'électrons d'énergie réglable, comprenant une chambre à plasma (P) constituée d'une enceinte (1) ayant une surface interne d'une première valeur (S₁) et d'une grille d'extraction (2) ayant une surface d'une seconde valeur (S₂), le potentiel de la grille étant différent de celui de l'enceinte et étant réglable, caractérisée en ce que le plasma est excité et confiné dans des structures magnétiques multipolaires ou multidipolaires, le rapport de la seconde valeur (S₂) sur la première valeur (S₁) étant proche de:

$$D = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} \exp(-1/2)$$

où: β est le taux d'électrons du plasma P,
 m_e la masse de l'électron, et
 m_i est la masse des ions chargés positivement.



SOURCE D'ÉLECTRONS

La présente invention concerne le domaine des sources d'électrons. Plus particulièrement, la présente invention concerne la production de faisceaux étendus d'électrons destinés à être injectés dans un plasma, sous vide, ou dans toute atmosphère gazeuse réactive à pression réduite.

Lors de la fabrication de circuits dans des dispositifs semiconducteurs, certaines étapes de dépôt ou de gravure réalisées dans des gaz ionisés recourent à des sources d'électrons. En effet, il peut s'avérer, par exemple, nécessaire de polariser négativement la surface d'un substrat en la bombardant par un faisceau d'électrons. Une source d'électrons peut encore être nécessaire pour générer un plasma, pour accroître le taux d'ionisation d'un plasma ou encore pour accélérer les ions d'un plasma dans lequel est placé un substrat. Par ailleurs, on souhaite utiliser des énergies de faisceaux d'électrons différentes selon l'application considérée. Par exemple, il peut être nécessaire de disposer d'un faisceau d'électrons d'une énergie de l'ordre de 100 eV pour permettre une érosion (gravure) d'un substrat.

On dispose déjà de sources d'électrons de type ponctuel telles qu'une cathode émissive chauffée. Toutefois, de telles sources présentent l'inconvénient de fournir des

faisceaux de très faible section. La surface de traitement maximale possible est donc très limitée. De plus, ces sources sont peu utilisables dans les applications considérées, les gaz (plasma) en cause risquant de réagir avec l'électrode.

5 La partie 5.5.2 "Electron beam characteristics of miniaturized ECR plasma cathodes" de l'ouvrage "Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas" de R. Geller, publié par l'Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia (pages 352-353) décrit des sources d'électrons dans lesquelles
10 des électrons sont extraits d'un plasma. Toutefois, de telles sources ne peuvent constituer des sources de grande surface. En effet, pour pouvoir accroître la surface d'extraction d'électrons d'un plasma, on est amené à accroître le volume du plasma. Alors, obtenir le champ électromagnétique nécessaire
15 pour exciter le plasma à la résonance cyclotronique impose la production d'un champ magnétique continu axial d'intensité excessivement élevée. La production d'un tel champ magnétique, destiné à confiner la trajectoire des électrons extraits autour des lignes de champ magnétique impose le recours à des
20 installations particulièrement complexes, encombrantes et coûteuses. De plus, la présence d'un champ magnétique continu axial peut poser problème dans certaines applications. Ceci limite la surface d'extraction à quelques millimètres carrés. En outre, les sources d'électrons de ce type produisent des faisceaux
25 d'électrons d'une intensité limitée à l'ordre de la centaine de milliampères. Par ailleurs, la densité de courant présente une variation de caractère exponentiel avec l'énergie d'extraction du faisceau. Il est donc impossible d'extraire sur une surface étendue un faisceau d'électrons d'une densité de courant qui
30 reste sensiblement stable quand le potentiel d'extraction du faisceau est modifié. De plus, celui-ci est au plus de l'ordre de la centaine de volts.

La présente invention vise à proposer une source d'électrons qui présente au moins certaines des caractéristiques
35 suivantes :

- utilisable pour différents domaines d'application,
- propre à fournir un faisceau dont la densité de courant d'électrons soit la plus élevée possible,
- relativement stable quand on fait varier l'énergie du faisceau,
- énergie du faisceau contrôlable dans une large plage,
- surface la plus étendue possible, par exemple de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres de diamètre, ou plus,
- exempte des problèmes des sources connues, et notamment ne présentant pas de champ magnétique axial au niveau ou en aval de l'extraction.

Pour atteindre ces objets, la présente invention prévoit une source fournissant un faisceau d'électrons d'énergie réglable, comprenant une chambre à plasma constituée d'une enceinte ayant une surface interne d'une première valeur et d'une grille d'extraction ayant une surface d'une seconde valeur, le potentiel de la grille étant différent de celui de l'enceinte et étant réglable, caractérisée en ce que le plasma est excité et confiné dans des structures magnétiques multipolaires ou multidipolaires, le rapport de la seconde valeur sur la première valeur étant proche de la limite supérieure suivante :

$$D = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} \exp(-1/2),$$

où : β est le taux d'électrons du plasma P,
 m_e la masse de l'électron, et
 m_i est la masse des ions chargés positivement,
d'où il résulte que la densité de courant d'électrons du faisceau extrait est sensiblement stable quand la différence de potentiel grille-enceinte varie.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, le plasma est excité et confiné par des micro-ondes à la résonance cyclotronique électronique distribuée.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, le rapport entre la seconde valeur et la première valeur est choisi entre $D/10$ et D .

5 Selon un mode de réalisation de la présente invention, le rapport entre la seconde valeur et la première valeur est choisi entre $D/2$ et D .

Selon un mode de réalisation de la présente invention, la grille est divisée en une pluralité de portions de grille élémentaires.

10 Selon un mode de réalisation de la présente invention, diverses portions de grille sont groupées et mises à des potentiels distincts.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, la source est suivie d'une enceinte de post-accélération.

15 Selon un mode de réalisation de la présente invention, la grille est formée de tubes parallèles dans lesquels circule un fluide de refroidissement.

Ces objets, caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres de la présente invention seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

la figure 1 illustre schématiquement une chambre à plasma d'extraction de particules chargées ;

25 la figure 2 illustre les courants électronique et ionique au niveau d'une surface d'une chambre selon la figure 1 ; et

la figure 3 illustre schématiquement une variante de source d'électrons selon l'invention.

30 Selon la présente invention, on utilise comme source d'électrons une chambre à plasma utilisant des structures d'excitation et de confinement utilisant des structures magnétiques multipolaires ou multidipolaires à la résonance cyclotronique électronique distribuée telles que décrites, par exemple, dans les demandes de brevet français N°85/08836, 93/02414, 35 94/13499 et 99/10291.

De tels dispositifs d'excitation de plasma à basse pression permettent avantageusement d'accroître la surface d'extraction d'un faisceau d'électrons sans imposer de grands volumes de champ magnétique et d'éviter la présence de champ magnétique au niveau et en aval de l'extraction.

La figure 1 illustre schématiquement et partiellement un mode de réalisation particulier de l'invention. Une chambre de confinement d'un plasma P est constituée d'une enceinte 1 de surface interne S_1 et d'une grille d'extraction 2 de surface S_2 . La grille 2, isolée de l'enceinte 1, est polarisée par une tension V_B au potentiel V_2 par rapport à cette enceinte. La tension V_B est réglable par un utilisateur. On souhaite extraire du plasma P des électrons. Le potentiel V_2 de la grille 2 doit donc être supérieur au potentiel V_1 de l'enceinte 1, c'est-à-dire que la tension V_B est positive ($V_B = (V_2 - V_1) > 0$). Les structures d'excitation magnétique multipolaires ou multidipolaires ne sont pas représentées en figure 1. Il s'agira, par exemple, de structures similaires à celles décrites dans les demandes de brevet français susmentionnées.

Le faisceau d'électrons ainsi produit pénètre par la grille 2 dans une enceinte 3 de confinement d'une atmosphère (gaz, gaz ionisé ou plasma) de traitement d'un élément à traiter 4, tel qu'un substrat semiconducteur. Le faisceau issu de la grille 2 pénètre dans l'enceinte 3 et permet de traiter et/ou de polariser négativement une surface S_4 du substrat 4.

La figure 2 illustre la variation théorique des courants correspondant aux particules extraites du plasma P en fonction de la valeur de la tension d'extraction V_B . On considère comme positif un courant d'électrons I_e et comme négatif un courant d'ions positifs I_i . Plus particulièrement, il est connu, par exemple de la demande de brevet français N° 9504729 au nom du CNRS, que les courants d'électrons I_e et d'ions positifs I_i qui peuvent être extraits du plasma P dépendent de la différence $U = V_B - V_p$, où V_p est le potentiel du plasma P. Quand U est négatif et compris entre V_f et zéro, le courant d'électrons I_e

croît selon une loi exponentielle jusqu'à une valeur maximale de saturation I_{esat} . Quand U est positif, c'est-à-dire quand le potentiel de polarisation V_B dépasse le potentiel du plasma V_p , le courant d'électrons extrait demeure constant à la valeur maximale de saturation I_{esat} . Par contre, le courant d'ions positifs I_i extrait demeure sensiblement constant tant que U est négatif. Quand U est positif, le courant d'ions I_i devient nul. La figure 2 illustre également en pointillés le courant réel I_r , c'est-à-dire la somme algébrique des courants d'électrons I_e et d'ions positifs I_i . On appelle potentiel flottant V_f , la valeur de U pour laquelle le courant d'électrons I_e est égal au courant d'ions positifs I_i , c'est-à-dire pour laquelle le courant réel I_r est nul.

A priori, pour obtenir une source telle que définie précédemment, il suffirait d'appliquer une tension V_B suffisamment forte pour se trouver dans le domaine de saturation à droite de la courbe de la figure 2. En pratique, il faut tenir compte d'un ajustement les uns par rapport aux autres du potentiel V_p du plasma P et des potentiels V_1 de l'enceinte 1 et V_2 de la grille 2. En effet, un tel auto-ajustement permet de garantir à tout instant la neutralité du plasma P. Pour conserver le principe de neutralité, il faut qu'à tout instant le courant d'ions positifs sur l'ensemble des surfaces d'électrodes compense exactement le courant d'électrons sur cet ensemble des surfaces.

Pour atteindre la saturation I_{esat} sur la grille 2, la caractéristique de la figure 2 montre qu'il faut que l'ajustement s'effectue de telle sorte que le potentiel V_2 de la grille 2 soit supérieur au potentiel V_p . De même, pour respecter le principe de neutralité, c'est-à-dire pour que la surface S_1 de l'enceinte 1 puisse absorber le courant d'ions compensant ce courant de saturation I_{esat} , il faut que le potentiel V_1 de l'enceinte 1 soit inférieur au potentiel V_f . La surface S_1 reçoit alors à la fois un courant de saturation ionique et un courant électronique comme l'illustre la figure 2.

En régime permanent, le courant électronique à saturation vers la grille 2 est donné par la relation suivante :

$$I_2 = I_{\text{esat}} = -e \beta n S_2 \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}},$$

où : $-e$ est la charge de l'électron,

5 β est le taux d'électrons du plasma P,

n la densité d'ions du plasma P,

S_2 la surface de la grille 2,

k_B la constante de Boltzmann,

T_e la température de l'électron dans le faisceau, et

10 m_e la masse de l'électron.

Le courant collecté par l'enceinte 1 est la somme d'un courant de saturation d'ions positifs et d'un courant électronique et s'exprime de la façon suivante :

$$I_1 = enS_1 \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}} \exp(-1/2) - e\beta nS_1 \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} \exp\left[\frac{e(V_1 - V_P)}{k_B T_e}\right],$$

15 où m_i est la masse des ions chargés positivement.

Alors, pour respecter la condition de neutralité du plasma il faut $I_1 + I_2 = 0$, ce qui conduit à la relation suivante :

$$V_P - V_1 = -\frac{k_B T_e}{e} \ln \left[\frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} \exp(-1/2) - \frac{S_2}{S_1} \right].$$

20 En outre, l'ajustement automatique des potentiels doit s'effectuer de telle sorte que cette différence soit positive. Il faut donc que le rapport des surfaces soit tel que :

$$\frac{S_2}{S_1} < \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} \exp(-1/2).$$

Par souci de simplification pour la suite de l'exposé, on appellera D la limite optimale ainsi définie, c'est-à-dire :

$$D = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} \exp(-1/2) \cong \frac{1,5}{\beta} \sqrt{\frac{m_e}{m_i}}$$

30 Cette condition étant respectée, la surface S_1 prend un potentiel V_1 proche du potentiel flottant V_f , le potentiel V_2 de la surface S_2 prend une valeur positive par rapport au potentiel plasma V_P et reçoit une densité de courant électronique égale à la densité de courant de saturation

électronique. L'énergie des électrons du faisceau sortant de la grille 2 est alors de l'ordre de l'énergie d'extraction eV_B , en supposant l'énergie thermique des électrons $k_B T_e$ négligeable devant V_B . L'énergie du faisceau dépend donc seulement de la
5 différence de potentiel V_B appliquée par l'utilisateur entre la grille 2 et l'enceinte 1.

Si on dépasse la limite supérieure ainsi définie, la source obtenue présente une surface étendue mais la densité du courant électronique du faisceau extrait n'est plus sensiblement
10 stable par rapport à l'énergie d'extraction et varie de façon exponentielle avec l'énergie d'extraction.

Selon la présente invention, il est par contre possible d'obtenir un faisceau d'une section étendue d'intensité sensiblement constante (I_{esat}) et d'énergie contrôlée et variable
15 (eV_B). Plus précisément, il est possible de faire varier à la sortie de la chambre d'extraction l'énergie des électrons dans une plage allant de quelques eV à quelques centaines d'eV, au lieu d'une dizaine d'eV avec les dispositifs antérieurs. Ce résultat est obtenu sans modifier le niveau du courant
20 électronique extrait. Celui-ci dépend de la densité du plasma et peut atteindre des densités de courant de quelques dizaines à quelques centaines de mA/cm².

Selon l'invention, le courant est sensiblement stable, c'est-à-dire que sa variation en fonction de la tension
25 d'extraction U n'a pas de caractère exponentiel (de type e^U), mais est de type U^α avec $\alpha < 1/2$, par exemple selon une loi en \sqrt{U} .

Selon l'invention, il est également possible d'optimiser la surface d'extraction S_2 . Cette surface S_2 est choisie de
30 façon que le rapport S_2/S_1 de la surface d'extraction sur la surface interne de l'enceinte 1 de la chambre soit inférieur à la limite D mais aussi proche que possible de celle-ci.

Pour augmenter la surface S_4 que l'on peut traiter, on peut fractionner la grille comme cela est illustré en figure 3,
35 la somme des surfaces $S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2n}$ des portions de grille

correspondant à la surface S_2 susmentionnée. En effet, par un effet de dispersion des faisceaux, la surface traitée est supérieure à la surface d'extraction. Les ouvertures sont formées à proximité les unes des autres de sorte que les faisceaux se dispersent en se recouvrant partiellement au niveau de l'élément 5 4, de telle façon que la surface S_4 soit bombardée de façon continue. Toutes les portions de grille peuvent être polarisées à un même potentiel V_B . On pourra aussi choisir de grouper les portions de grilles en ensembles polarisés à des potentiels 10 distincts.

Un autre avantage de ce fractionnement de la surface d'extraction S_2 est de garantir un meilleur refroidissement de celle-ci. En effet, si on souhaite extraire un courant d'électrons d'une densité relativement importante I_{esat} , on observe un 15 dégagement d'énergie thermique relativement élevé au niveau de la grille. Or, il est plus facile de refroidir une pluralité de grilles élémentaires qu'une grille d'extraction continue, notamment car la surface séparant deux grilles élémentaires peut être utilisée comme radiateur ou refroidie par circulation de fluide. 20 Il est donc possible selon l'invention d'assurer un refroidissement efficace même pour des énergies d'extraction relativement élevées tout en garantissant une surface d'extraction étendue. Pour l'extraction à partir de plasmas de densités très élevées, il faudra prévoir un refroidissement direct de la grille, en la 25 réalisant à l'aide d'un faisceau de tubes parallèles d'un diamètre de l'ordre du mm espacés d'une distance de l'ordre du mm.

A titre d'exemple non-limitatif, si le plasma est un plasma d'argon de numéro atomique 40, $\beta=1$ et le rapport S_2/S_1 30 doit être inférieur à $D = 1,5/(1836.40)^{1/2}$, soit $1/180$. Dans un exemple pratique, on a pu confirmer le bon fonctionnement du système dans un cas particulier où la grille d'extraction avait un diamètre de 4 cm et où la chambre plasma était un cylindre de 20 cm de hauteur et de 25 cm de diamètre. On a alors $S_2 = 12,5$ 35 cm^2 et $S_1 = 2550 \text{ cm}^2$, le rapport S_2/S_1 vaut donc $1/204$ ce qui

remplit la condition requise. Le courant d'électrons qu'il était possible d'extraire du plasma était pratiquement de 0,5 ampère sous une tension d'extraction $V_2 - V_1$ de 60 V.

Bien entendu, la présente invention est susceptible de
5 diverses variantes et modifications qui apparaîtront à l'homme de l'art. En particulier, le plasma peut être formé à partir de gaz autres que l'argon, par exemple des gaz plus légers tels que l'hydrogène ou l'hélium.

En outre, l'homme de l'art saura compléter la source
10 d'électrons illustrée en figure 1 avec les dispositifs appropriés nécessaires à son fonctionnement, décrits par exemple dans la demande de brevet français N° 99/10291. De même, l'enceinte de traitement 3 peut être complétée de toute façon appropriée. On pourra par exemple prévoir entre la grille d'extraction 2 de la
15 source d'électrons et l'enceinte de traitement 3 une grille ou électrode de post-accélération.

REVENDEICATIONS

1. Source fournissant un faisceau d'électrons d'énergie réglable, comprenant une chambre à plasma (P) constituée d'une enceinte (1) ayant une surface interne d'une première valeur (S_1) et d'une grille d'extraction (2) ayant une surface d'une
 5 seconde valeur (S_2), le potentiel de la grille étant différent de celui de l'enceinte et étant réglable, caractérisée en ce que le plasma est excité et confiné dans des structures magnétiques multipolaires ou multidipolaires, le rapport de la seconde valeur (S_2) sur la première valeur (S_1) étant proche de la limite
 10 supérieure suivante :

$$D = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{m_i}} \exp(-1/2),$$

où : β est le taux d'électrons du plasma P,

m_e la masse de l'électron, et

m_i est la masse des ions chargés positivement,

15 d'où il résulte que la densité de courant d'électrons du faisceau extrait est sensiblement stable quand la différence de potentiel grille-enceinte varie.

2. Source selon la revendication 1, caractérisée en ce que le plasma est excité et confiné par des micro-ondes à la
 20 résonance cyclotronique électronique distribuée.

3. Source selon la revendication 1, caractérisée en ce que le rapport entre la seconde valeur (S_2) et la première valeur (S_1) est choisi entre $D/10$ et D .

4. Source selon la revendication 1, caractérisée en ce
 25 que le rapport entre la seconde valeur (S_2) et la première valeur (S_1) est choisi entre $D/2$ et D .

5. Source selon la revendication 1, caractérisée en ce que la grille est divisée en une pluralité de portions de grille élémentaires ($S_{21}, S_{22}, \dots, S_{2n}$).

30 6. Source selon la revendication 5, caractérisée en ce que diverses portions de grille sont groupées et mises à des potentiels distincts.

7. Source selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle est suivie d'une enceinte de post-accélération.

8. Source selon la revendication 1 ou 5, caractérisée en ce que la grille est formée de tubes parallèles dans lesquels
5 circule un fluide de refroidissement.

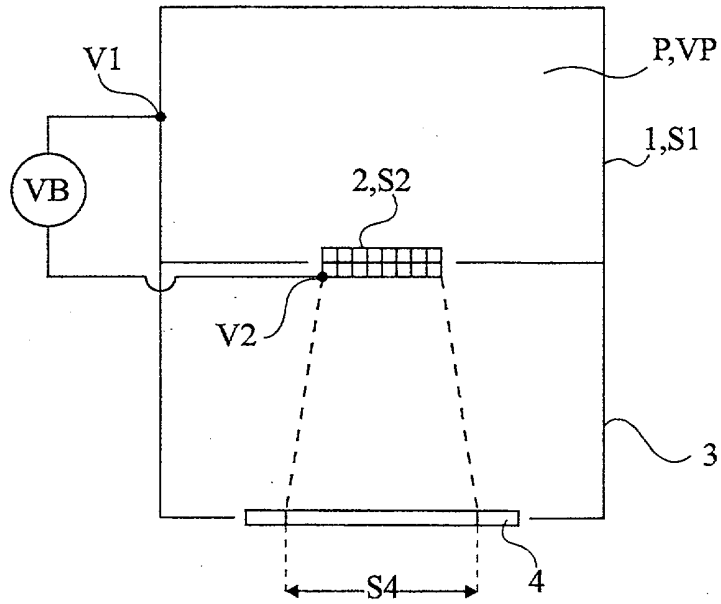


Fig 1

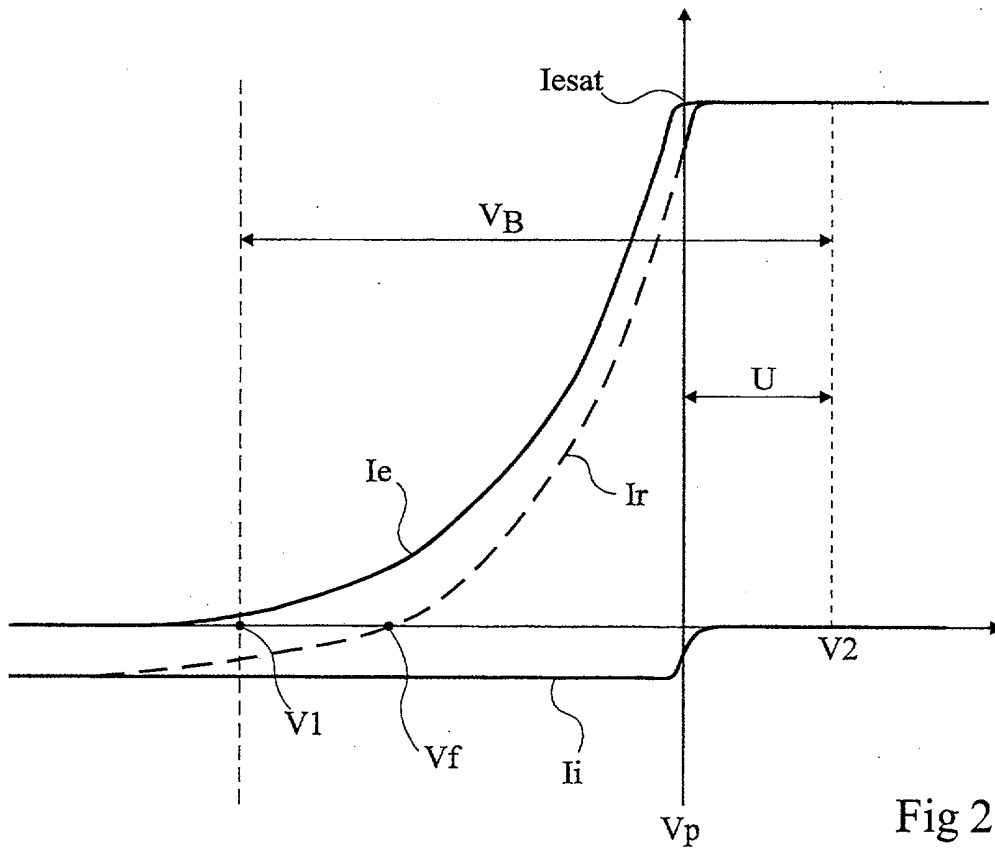


Fig 2

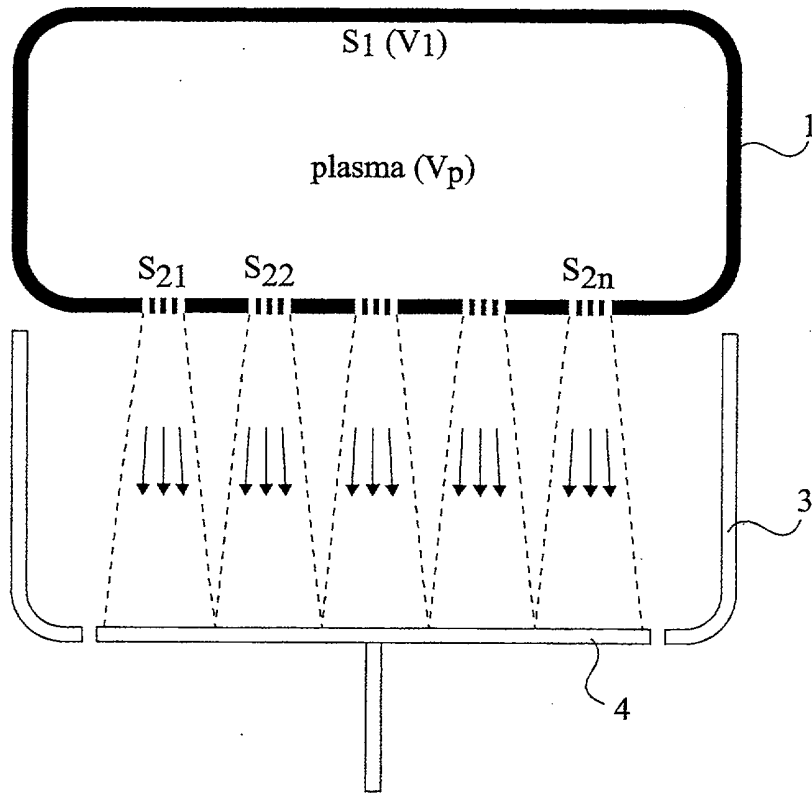


Fig 3

**RAPPORT DE RECHERCHE
PRÉLIMINAIRE**

établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FA 612399
FR 0115897

DOCUMENTS CONSIDÉRÉS COMME PERTINENTS		Revendication(s) concernée(s)	Classement attribué à l'invention par l'INPI
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes		
A	US 4 647 818 A (HAM MOOYOUNG) 3 mars 1987 (1987-03-03) * le document en entier * ---	1	H05H1/18 H01J27/18 H01J37/32
A	US 4 910 435 A (WAKALOPULOS GEORGE) 20 mars 1990 (1990-03-20) * abrégé; figures * ---	1	
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 017, no. 214 (E-1357), 27 avril 1993 (1993-04-27) & JP 04 351838 A (HITACHI LTD), 7 décembre 1992 (1992-12-07) * abrégé * -----	1	
			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHÉS (Int.CL.7)
			H01J
Date d'achèvement de la recherche		Examineur	
29 novembre 2002		Schaub, G	
<p>CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>			

1
EPO FORM 1503 12.99 (P04C14)

**ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE PRÉLIMINAIRE
RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET FRANÇAIS NO. FR 0115897 FA 612399**

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche préliminaire visé ci-dessus.
Les dits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 29-11-2002
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets, ni de l'Administration française

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4647818	A	03-03-1987	DE 3578020 D1	05-07-1990
			EP 0158970 A1	23-10-1985
			JP 61022547 A	31-01-1986
US 4910435	A	20-03-1990	DE 68926962 D1	19-09-1996
			DE 68926962 T2	20-02-1997
			EP 0428527 A1	29-05-1991
			JP 2821789 B2	05-11-1998
			JP 4501034 T	20-02-1992
			WO 9001250 A1	08-02-1990
JP 04351838	A	07-12-1992	AUCUN	