

⑫

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

⑳ Numéro de dépôt: 84401014.0

⑤① Int. Cl.³: **H 01 J 27/18**

㉑ Date de dépôt: 17.05.84

③① Priorité: 20.05.83 FR 8308401

④③ Date de publication de la demande:
05.12.84 Bulletin 84/49

⑧④ Etats contractants désignés:
BE DE GB NL SE

⑦① Demandeur: **COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE**
Etablissement de Caractère Scientifique Technique et
Industriel
31/33, rue de la Fédération
F-75015 Paris(FR)

⑦② Inventeur: **Delaunay, Marc**
38, Avenue Jeanne d'Arc
F-38100 Grenoble(FR)

⑦② Inventeur: **Gualandris, René**
14, Avenue Malherbe
F-38100 Grenoble(FR)

⑦② Inventeur: **Geller, Richard**
4, Place Grenette
F-38000 Grenoble(FR)

⑦② Inventeur: **Jaquot, Claude**
40, Rue Saint Robert
F-38120 Saint Egreve(FR)

⑦② Inventeur: **Ludwig, Paul**
1 Bis, Chemin Vulcaïn
F-38000 Grenoble(FR)

⑦② Inventeur: **Mathonnet, Jean-Marc**
14, rue George Sand
F-38100 Grenoble(FR)

⑦② Inventeur: **Rocco, Jean-Claude**
Bouveyres
F-38640 Claix(FR)

⑦② Inventeur: **Sermet, Pierre**
6, Place Jean Moulin
F-38000 Grenoble(FR)

⑦② Inventeur: **Zadworny, Francois**
8, Avenue Charles de Foucauld
F-38700 Corenc(FR)

⑦② Inventeur: **Bourg, Francois**
22, rue du Bois Meutel
F-38400 Saint Martin d'Herès(FR)

⑦④ Mandataire: **Mongrédién, André et al,**
c/o BREVATOME 25, rue de Ponthieu
F-75008 Paris(FR)

⑤④ Source d'ions à résonance cyclotronique des électrons.

⑥⑦ Source d'ions à résonance cyclotronique des électrons dans laquelle un plasma est confiné dans une configuration magnétique comportant un premier groupe de bobines (11), situé dans le plan défini par la fenêtre étanche (13) d'un injecteur (8) hyperfréquence et entourant celui-ci, fournissant le champ magnétique créant et confinant un plasma (10) et un deuxième groupe de bobines (12), alimenté en contre-champ par rapport au premier groupe, entourant un système d'extraction (14) des ions. L'extraction des ions est effectuée dans un champ magnétique nettement inférieur à celui correspondant à la résonance cyclotronique. Ladite source d'ions trouve de nombreuses applications dans les domaines "vaporisation" des couches minces, micro-gravures, implantation ionique, accélérateurs ... etc.

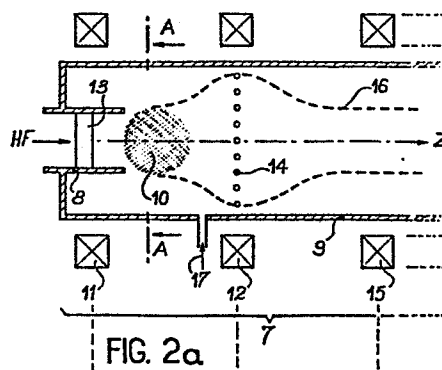


FIG. 2a

Source d'ions à résonance cyclotronique des électrons.

La présente invention a pour objet une source d'ions à résonance cyclotronique des électrons. Elle trouve de nombreuses applications, en fonction des différentes valeurs de la gamme de l'énergie cinétique des ions extraits, dans les domaines : vaporisation (sputtering) des couches minces, microgravure, implantation ionique, chauffage par neutrons rapides du plasma des réacteurs à fusion, accélérateurs tandems, synchrocyclotron, ... etc.

10 Dans les sources d'ions à résonance cyclotronique électronique, les ions sont formés en ionisant fortement un gaz ou une vapeur d'un matériau solide, contenu dans une cavité hyperfréquence, grâce à l'action conjuguée d'un champ électromagnétique de haute fréquence, 15 établi dans la cavité, et d'un champ magnétique résultant régnant dans ladite cavité. Le champ magnétique présente une amplitude B_r satisfaisant à la condition de résonance cyclotronique électronique, $B_r = f \cdot 2\pi \frac{m}{e}$ où m est la masse des électrons, e sa charge et f la fréquence du 20 champ électromagnétique. Cette résonance permet d'accélérer fortement les électrons formés qui, par impact sur les atomes neutres du gaz ou de la vapeur, permettent d'ioniser fortement ces derniers.

Le fonctionnement d'une source à résonance cyclotronique a notamment été décrit dans le brevet américain n° 4 417 178 déposé au nom du demandeur.

Jusqu'à présent, les réalisations des sources d'ions à résonance cyclotronique des électrons, comme par exemple celle décrite par R. Geller, C. Jacquot et 30 P. Sermet dans les "Proceedings of the Symposium on ions sources and formation of ion beams", Berkeley (Oct. 1974) et par F. Bourg, R. Geller, B. Jacquot, T. Lamy, M. Pontonnier et J. C. Rocco dans "Nuclear Instruments & Methods" North-Holland Publishing Company 196 (1982) pp. 35 325-329 sont basées sur l'établissement d'un confinement

du plasma à l'aide d'une configuration magnétique en miroir. Dans la réalisation selon la première référence, la configuration magnétique en miroir est obtenue par l'intermédiaire de trois groupes de bobines.

5 La figure 1 représente un diagramme, montrant la courbe du champ magnétique en fonction de la distance suivant l'axe central de la source d'ions selon l'art antérieur en superposition avec une représentation schématique de l'emplacement des éléments principaux
10 constituant cette source.

 Comme le montre la figure 1, la courbe du champ magnétique 1 fournie par l'ensemble des bobines a deux maxima aux endroits du premier groupe 2 et du troisième groupe 4 de bobines et un minimum entre
15 ces deux maxima à l'endroit du deuxième groupe 3 de bobines, ce dernier groupe étant alimenté en contre-champ.

 Les valeurs maximales sont plus grandes
20 que la valeur B_r de l'induction magnétique correspondant à la résonance cyclotronique, cette résonance étant atteinte entre les deux maxima.

 Le plasma est donc créé et confiné dans la zone de la source d'ions, qui se trouve entre lesdits
25 maxima du champ magnétique.

 Les valeurs maximale et minimale de l'induction magnétique de cette source d'ions, prise pour l'exemple, sont 4 200 et 3 200 Gauss respectivement.

 La résonance cyclotronique des électrons s'effectue à 3 600 Gauss, la fréquence de l'onde
30 haute fréquence injectée étant fixée à environ 10 GHz.

 Les ions créés dans le plasma sont enfin extraits par un système d'extraction 5, constitué d'électrodes, qui se trouvent en aval du deuxième
35 maximum du champ magnétique. En outre, si, comme dans l'exemple décrit ci-dessus, le système d'extraction

des ions est placé en aval du deuxième maximum du champ magnétique, et si celui-ci est diminué, le courant d'ions émis par la source diminue proportionnellement.

5 Pour obtenir un courant d'ions intense, on extrait donc les ions dans un champ magnétique de même ordre de grandeur que le champ de la résonance cyclotronique.

10 Si le faisceau d'ions est émis dans le champ magnétique créé par l'ensemble de bobines et si le champ magnétique est annulé brusquement en aval de la deuxième bobine de la source d'ions, les ions prennent de l'énergie transversale et le faisceau d'ions diverge, donc ses qualités optiques sont détruites. Cet effet est
15 décrit dans le théorème de Bush.

Pour conserver les qualités optiques du faisceau en aval de la source d'ions, il faut alors maintenir constant le champ magnétique dans tout l'espace de glissement du faisceau d'ions jusqu'à l'endroit de son
20 application ou de la transformation des ions en particules neutres. Pour l'exemple décrit ci-dessus, le champ à maintenir constant correspond à une induction de 3 600 Gauss environ, l'énergie électrique consommée par les bobines 6 créant ce champ magnétique est de
25 l'ordre de 1 Mégawatt.

Dans le cas d'utilisation des ions à basse énergie (inférieure à 1 keV) le système d'extraction ne permet pas d'extraire les fortes densités. Pour
30 augmenter cette dernière, on peut comprimer le faisceau d'ions en aval de la source d'ions.

Pour comprimer le faisceau d'ions, il faut augmenter le champ magnétique proportionnellement.

L'augmentation de la densité du courant d'ions est donc limitée par les problèmes techniques

qui se posent, concernant la production des champs magnétiques de cet ordre de grandeur.

En résumé, les sources d'ions selon l'état de la technique présentent les inconvénients principaux suivants :

- très haute consommation d'énergie de la configuration magnétique,
- l'augmentation de la densité du courant d'ions à faible énergie cinétique est problématique à cause de la nécessité d'un champ magnétique élevé.

La présente invention a pour but de remédier à ces inconvénients. Pour cela, elle prévoit une modification de la configuration magnétique de confinement du plasma dans une source d'ions à résonance cyclotronique des électrons, qui permet l'extraction des ions dans un champ magnétique nettement inférieur à celui des sources d'ions de l'art antérieur.

La présente invention a précisément pour objet une source d'ions à résonance cyclotronique des électrons comportant un système d'injection d'une puissance hyperfréquence dans un récipient contenant un gaz ou une vapeur d'un matériau destiné à former un plasma, celui-ci est créé et confiné dans une configuration magnétique, et un système d'extraction des ions cette source se caractérisant en ce que la configuration magnétique est constituée par deux groupes de bobines, le premier groupe, situé dans le plan défini par le fenêtre étanche de l'injecteur hyperfréquence et entourant celui-ci, fournissant le champ magnétique confinant le plasma, et le deuxième groupe, alimenté en contre-champ par rapport au premier groupe, entourant le système d'extraction des ions.

Selon un mode préféré de réalisation de la source d'ions, un troisième groupe de bobines, monté en aval du système d'extraction des ions et alimenté dans le

même sens que le premier groupe, fournit un champ magnétique supérieur à celui du système d'extraction pour comprimer le faisceau d'ions extraits.

5 Selon une autre caractéristique, le champ magnétique fourni par l'ensemble des groupes de bobines a une valeur maximale, supérieure à celle de la résonance cyclotronique à l'endroit du premier groupe de bobines, et le champ magnétique décroît jusqu'à une valeur minimale à l'endroit du deuxième groupe de bobines en
10 passant par la valeur de l'induction magnétique B_r correspondant à la résonance cyclotronique entre ces deux groupes de bobines.

Selon un autre mode de réalisation d'une source d'ions, la position du système d'extraction
15 dans la source est choisie telle que le champ magnétique faible à l'endroit de l'extraction est fourni seulement par le premier groupe de bobines.

Selon encore un autre mode de réalisation d'une source d'ions, le système d'injection hyper-
20 fréquence est constitué par plusieurs injecteurs hyperfréquence et chacun de ces injecteurs est entouré par un groupe de bobines, ceux-ci étant situés dans les plans définis par les fenêtres étanches de chaque injecteur.

25 Selon une autre caractéristique, la configuration magnétique du confinement du plasma comprend en supplément une configuration magnétique multipolaire constituée par des aimants permanents.

30 Selon une autre caractéristique, le champ magnétique correspondant à la résonance cyclotronique est atteint à une distance de l'ordre de quelques centimètres en aval de la jonction entre l'injecteur hyper fréquence et la cavité de la source d'ions.

35 Selon une autre caractéristique, l'injection du gaz est effectuée en amont du système d'extraction des ions et en son voisinage.

Selon une autre caractéristique, le système d'extraction des ions est constitué par une seule électrode.

Selon un mode de réalisation de la source
5 de l'invention, le gaz destiné à former un plasma est du deutérium et le champ magnétique minimal à l'endroit du deuxième groupe de bobines est de l'ordre de quelques centaines de Gauss.

Les caractéristiques de l'invention res-
10 tirent mieux à l'aide de la description qui va suivre, donnée à titre explicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1, déjà décrite, représente un diagramme montrant la courbe du champ magnétique en
15 fonction de la distance suivant l'axe central de la source d'ions selon l'art antérieur en superposition avec une représentation schématique de l'emplacement de quelques éléments principaux constituant cette source,

- la figure 2a représente schématiquement,
20 une source d'ions à résonance cyclotronique des électrons selon l'invention en coupe dans le plan comprenant l'axe central de la source.

- la figure 2b représente, en diagramme
25 le profil du champ magnétique en fonction de la distance suivant l'axe central d'une source d'ions conforme à l'invention,

- la figure 3 représente schématiquement en
30 coupe transversale suivant les flèches de la figure 2, la configuration hexapolaire du confinement magnétique supplémentaire du plasma.

La figure 2a représente schématiquement et
d'une manière simplifiée, un exemple d'une réalisation
d'une source d'ions à résonance cyclotronique des
électrons en coupe transversale, comprenant l'axe
35 central de la source.

Dans une cavité 9 sous vide, de forme cylindrique de révolution par exemple, l'une des extrémités porte un injecteur 8 d'une puissance hyperfréquence et l'autre extrémité est reliée à l'endroit
5 d'utilisation des ions. Il est à noter que la cavité 9 peut avoir une forme quelconque suivant le caractère de la source d'ions. Notamment, le système d'injection d'une puissance hyperfréquence 8 peut être constitué par plusieurs injecteurs hyperfréquence. On introduit en 17
10 un gaz ou une vapeur destiné à former un plasma sous une pression faible de quelques 10^{-3} Torr en amont du système d'extraction des ions et en son voisinage.

On applique un champ magnétique statique axial par l'intermédiaire de bobines qui entourent
15 la cavité. Il est aussi envisageable d'utiliser des aimants permanents entourant la cavité pour fournir le champ magnétique de confinement.

Si la pulsation du champ hyperfréquence ω est égale à la pulsation de résonance cyclotronique
20 des électrons dans le champ magnétique, le plasma est alors créé.

Dans un autre mode de réalisation d'une source d'ions, le plasma est créé à un autre endroit et injecté ensuite dans la cavité 9. Le plasma
25 est confiné dans la configuration magnétique obtenue par l'intermédiaire de deux groupes de bobines 11, 12.

Le premier groupe de bobines 11 est situé dans le plan défini par la fenêtre étanche 13 de
30 l'injecteur hyperfréquence 8 et entoure celle-ci.

Le deuxième groupe de bobines 12 est placé à une distance prédéterminée en aval du premier groupe de bobines et est alimenté en contre-champ par rapport au premier groupe.

Comme le montre la figure 2b, l'ensemble de ces deux groupes de bobines fournit un champ magnétique qui a une valeur maximale à l'endroit du premier groupe de bobines 11. Cette valeur est choisie supérieure à la valeur B_r , correspondant à la résonance cyclotronique des électrons.

Le champ magnétique décroît jusqu'à une valeur minimale à l'endroit du deuxième groupe de bobines 12.

10 En passant, le champ magnétique atteint la valeur du champ magnétique B_r correspondant à la résonance cyclotronique. On peut aussi choisir la distance entre le premier groupe de bobines et le système d'extraction telle que le champ magnétique à 15 l'endroit de l'extraction est fourni seulement par le premier groupe de bobines.

Le profil du champ magnétique est choisi tel que la résonance cyclotronique des électrons s'effectue à quelques centimètres en aval de la jonction 20 entre l'injecteur de la puissance hyperfréquence et la cavité.

D'une part, la zone de résonance se trouve suffisamment loin de la fenêtre 13 pour que le plasma 10 créé à cet endroit ne diffuse guère vers celle-ci et 25 donc ne risque pas de la détériorer.

D'autre part, la résonance est suffisamment loin des parois de la cavité pour que la densité de plasma ne soit pas diminuée.

Le nombre de bobines formant un groupe dépend 30 du champ magnétique à fournir.

Dans un mode préféré de la réalisation du confinement magnétique du plasma, on installe en supplément entre le premier 11 et le deuxième 12 groupes de bobines une configuration magnétique multipolaire.

La figure 3 montre schématiquement en coupe transversale suivant la coupe A-A de la figure 2a, une configuration hexapolaire du confinement magnétique supplémentaire. Le plasma 10 est confiné par les
5 lignes de force du champ magnétique créé par des aimants permanents 18 répartis en couronne autour de la partie cylindrique de la cavité qui entoure le plasma et dont les polarités sont alternées.

Dans le cas où le gaz destiné à former un
10 plasma est du deutérium, la fréquence de la pulsation du champ hyperfréquence étant d'environ 10 GHz, la résonance cyclotronique des électrons se produit pour une induction $B_r = 3\ 600$ Gauss.

La valeur maximale de l'induction B_{max} à
15 l'endroit du premier groupe des bobines est choisie de préférence aux environs de 4 000 Gauss et la valeur à l'endroit du deuxième groupe des bobines est de préférence de l'ordre de quelques centaines de Gauss.

Le système d'extraction des ions 14 est
20 installé à l'intérieur des bobines formant le deuxième groupe .

Il est à noter que dans la source conforme à l'invention, cette valeur de l'induction magnétique à l'endroit du système d'extraction est inférieure
25 à 10 % de la valeur de l'induction B_r correspondant à la résonance cyclotronique.

Le système d'extraction peut être réalisé sous forme d'une seule électrode.

Des essais avec une source d'ions selon
30 l'invention ayant un tel positionnement du système d'extraction 14 ont montré qu'en contraste avec les expériences réalisées avec les sources d'ions selon l'art antérieur, où le système d'extraction 5 (Fig. 1) des ions est placé en aval d'un deuxième maximum
35 du champ magnétique d'un confinement du plasma, le

courant d'ions extraits n'est pas proportionnel à la valeur d'induction magnétique à l'endroit d'extraction.

Dans des conditions comparables, le courant
5 d'ions émis par la source d'ions selon l'invention est double par rapport à celui d'une source conventionnelle.

Si on augmente la puissance hyperfréquence par unité de volume, le courant d'ions augmente. On
10 peut alors extraire des courants d'ions plus grands, ou bien réduire les dimensions des cavités en largeur et en diamètre, ce qui entraîne l'utilisation des "minicavités", à condition que la résonance cyclotronique soit dans la cavité, à quelques centimètres
15 de la transition guide-cavité.

En outre, on constate que l'homogénéité radiale du faisceau extrait 16 est améliorée notablement, la stabilité du plasma 10 créé dans cette configuration magnétique selon l'invention est plus grande que celle
20 de l'art antérieur.

Le faisceau extrait de la source d'ions peut être comprimé, en aval des électrodes d'extraction, par l'application d'un champ magnétique supérieur à celui appliqué au système d'extraction 14. La densité du
25 courant d'ions augmente proportionnellement au champ magnétique appliqué.

La réalisation de ce champ magnétique est effectuée par l'intermédiaire d'un troisième groupe 15 de bobines, comme indiqué sur la figure 2. Le champ magnétique à l'endroit d'extraction des ions étant
30 très faible pour garder ou augmenter la qualité optique du faisceau d'ions en amont de la source d'ions, il suffit alors de prévoir des bobines destinées à fournir un champ magnétique nettement inférieur à
35 celui utilisé dans les sources selon l'art antérieur.

Pour des exemples donnés ci-dessus, la consommation d'énergie de ces bobines est réduite d'un facteur supérieur à dix ; il s'effectue donc une économie d'énergie importante.

5 Selon un autre aspect concernant la qualité optique du faisceau d'ions, on peut même annuler le champ magnétique bien avant l'endroit de son application, sans dégrader sa qualité optique.

10 L'effet décrit dans le théorème de Bush devient négligeable, car le champ magnétique est relativement faible.

15 Il en résulte une nouvelle économie d'énergie très importante côté aval de la source d'ions et l'encombrement est réduit grâce à la suppression de nombreuses bobines.

REVENDEICATIONS

1. Source d'ions à résonance cyclotronique des électrons (7) comportant un système d'injection (8) émettant une puissance hyperfréquence dans un récipient (9) contenant un gaz ou une vapeur d'un matériau
5 destiné à former un plasma (10), celui-ci étant créé et confiné dans une configuration magnétique, et un système d'extraction (14) des ions, caractérisé en ce que la configuration magnétique est constituée par deux groupes de bobines (11, 12), le premier groupe (11), situé dans le
10 plan défini par la fenêtre étanche (13) de l'injecteur (8) hyperfréquence et entoure celui-ci, fournissant le champ magnétique confinant le plasma, et le deuxième groupe (12), alimenté en contre-champ par rapport au premier groupe, entourant le système d'extraction (14)
15 des ions.

2. Source d'ions selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'un troisième groupe de bobines (15) monté en aval du système d'extraction des ions (14) est alimenté dans le même sens que le premier groupe,
20 fournit un champ magnétique supérieur à celui du système d'extraction pour comprimer le faisceau d'ions extraits (16).

3. Source d'ions selon la revendication 1, caractérisée en ce que le champ magnétique fourni
25 par l'ensemble des groupes de bobines (11, 12) a une valeur maximale, supérieure à celle de la résonance cyclotronique, à l'endroit du premier groupe (11) de bobines et le champ magnétique décroît jusqu'à une valeur minimale à l'endroit du deuxième groupe (12)
30 de bobines en passant par la valeur de l'induction magnétique B_r correspondant à la résonance cyclotronique, entre les deux groupes (11, 12) de bobines.

4. Source d'ions selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisée en ce que la position du système d'extraction dans la source est choisie telle que le champ magnétique faible à l'endroit de l'extraction est fourni seulement par le premier groupe de bobines.

5. Source d'ions selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que le système d'injection hyperfréquence est constitué par plusieurs injecteurs (8) hyperfréquence et en ce que chacun de ces injecteurs est entouré par un groupe de bobines (11), ceux-ci étant situés dans les plans définis par les fenêtres étanches (13) de chaque injecteur (8).

6. Source d'ions selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisée en ce que la configuration magnétique du confinement du plasma comprend en supplément une configuration multipolaire constituée par des aimants permanents (18).

7. Source d'ions selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisée en ce que le champ magnétique correspondant à la résonance cyclotronique est atteint à une distance de l'ordre de quelques centimètres en aval de la jonction du système d'injection hyperfréquence (8) avec la cavité (9) de la source d'ions.

8. Source d'ions selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisée en ce que l'injection du gaz (17) est effectuée en amont du système d'extraction des ions et en son voisinage.

9. Source d'ions selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisée en ce que le système d'extraction (14) des ions est constitué par une seule électrode.

10. Source d'ions selon l'une quelconque
des revendications 1 à 9, caractérisée en ce que le
gaz destiné à former un plasma est du deutérium
et en ce que le champ magnétique à l'endroit du
5 deuxième groupe (12) de bobines est de l'ordre de
quelques centaines de Gauss.

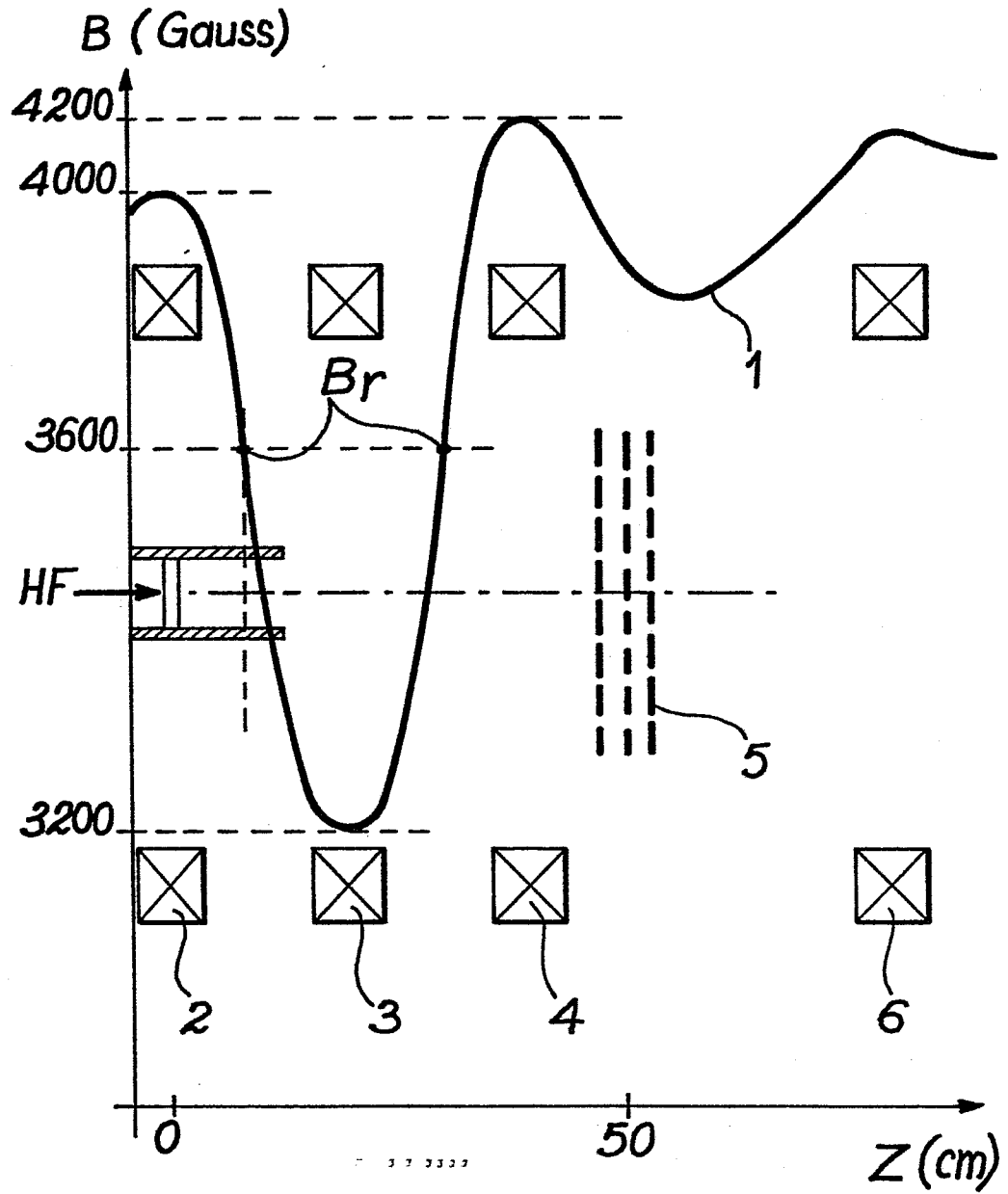
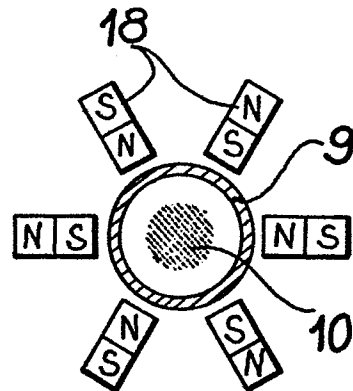
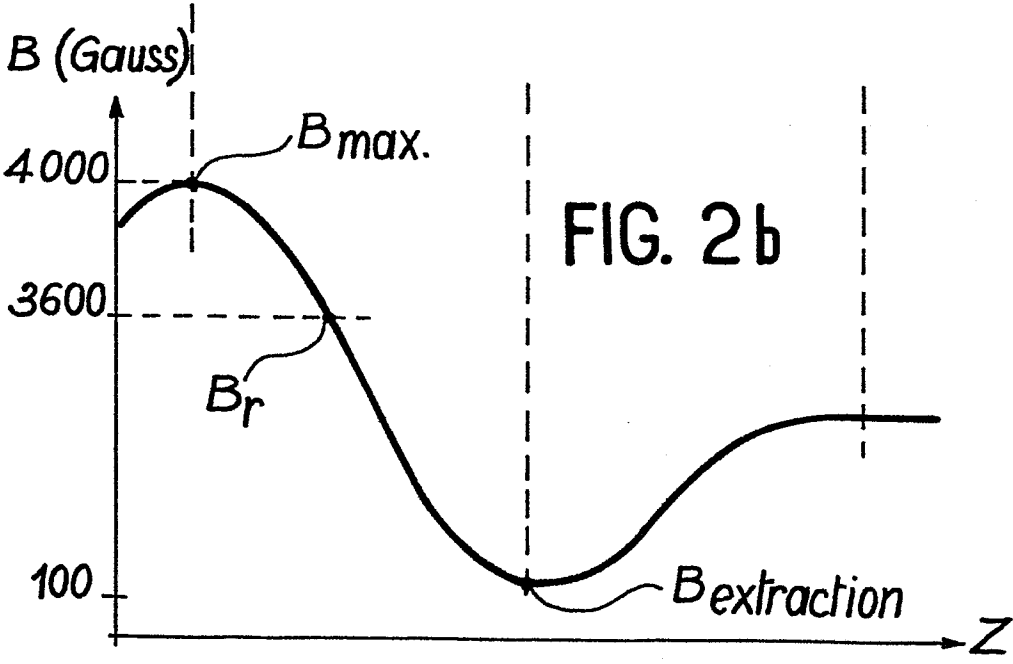
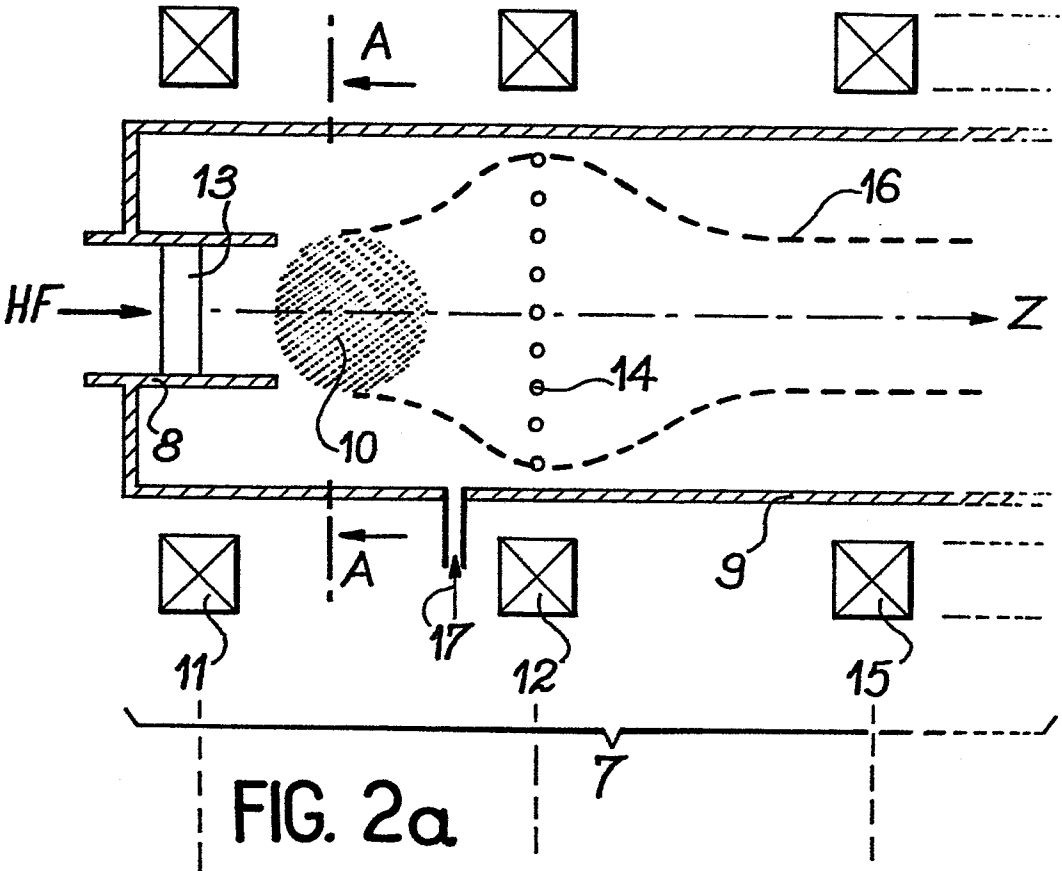


FIG. 1

FIG. 3







DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl. 3)
D,A	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH, vol. 196, no. 2/3, mai 1982, Amsterdam (NL) F. BOURG et al.: "Source d'ions multicharges minimafios. Nouvelles caractéristiques", pages 325-329 * Figures 1,2 *	1,2,6,7	H 01 J 27/18
A	--- NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS, vol. 127, 15 août 1975, North-Holland Publishing Company, Amsterdam (NL) P. BRIAND et al.: "Production and abundance measurements of multicharged xenon ions in ECR produced plasmas", pages 441-443 * Figure 1 *	1	
A	--- JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 11, no. 5, mai 1972, Tokyo (JP) Y. OKAMOTO et al.: "Some features of an electron cyclotron resonance plasma produced by means of a Lisitano-coil", pages 726-731 * Figures 1,2 *	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl. 3) H 01 J
Le présent rapport de recherche a été établi pour toutes les revendications			
Lieu de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 15-08-1984	Examineur GALANTI M.
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons	
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arriére-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		& : membre de la même famille, document correspondant	