ROYAUME DE BELGIQUE

MINISTERE DES AFFAIRES ECONOMIQUES

BREVET D'INVENTION

NUMERO DE PUBLICATION : 1005864A5

NUMERO DE DEPOT : 09200958

Classif. Internat. : H05H

Date de délivrance le : 22 Février 1994

Le Ministre des Affaires Economiques,

Vu la Convention de Paris du 20 Mars 1883 pour la Protection de la propriété industrielle;

Vu la loi du 28 Mars 1984 sur les brevets d'invention, notamment l'article 22;

Vu l' arrêté royal du 2 Décembre 1986 relatif à la demande, à la délivrance et au maintien en vigueur des brevets d'invention, notamment l'article 28;

Vu le procès verbal dressé le 05 Novembre 1992 à 10H15 à l 'Office de la Propriété Industrielle

ARRETE:

ARTICLE 1.- Il est délivré à : COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE
rue de la Fédération 31/33, F-75015 PARIS(FRANCE)

représenté(e)(s) par : VAN MALDEREN Michel, OFFICE VAN MALDEREN, Place Reine Fabiola 6/1 - B 1080 BRUXELLES.

un brevet d' invention d' une durée de 20 ans, sous réserve du paiement des taxes annuelles, pour : ACCELERATEUR D'ELECTRONS A CAVITE RESONANTE.

INVENTEUR(S) : Etievant Claude, rue Saint Charles 44, F-7800 Versailles (FR);Roche Michel, rue de Saulx-Tavannes 12, F-2100 Dijon (FR)

PRIORITE(S) 28.11.91 FR FRA 9114709

ARTICLE 2.- Ce brevet est délivré sans examen préalable de la brevetabilité de l'invention, sans garantie du mérite de l'invention ou de l'exactitude de la description de celle-ci et aux risques et périls du(des) demandeurs(s).

Bruxelles, le 22 Février 1994
PAR DELEGATION SPECIALE :

WUYTS L
Directeur

ACCELERATEUR D'ELECTRONS A CAVITE RESONANTE

DESCRIPTION

La présente invention concerne un accélérateur d'électrons à cavité résonante.

Elle trouve des applications dans l'irradiation de substances diverses tels que les produits agro-alimentaires, soit directement par les électrons, soit par des rayons X obtenus par conversion sur une cible en métal lourd.

On connaît déjà un accélérateur d'électrons à cavité résonante par les documents (1) à (3) qui, comme les autres documents cités par la suite, sont mentionnés à la fin de la présente description.

Un exemple de réalisation de cet accélérateur connu, appelé "Rhodotron" (marque déposée), est schématiquement représenté en coupe longitudinale sur la figure 1 et en coupe transversale sur la figure 2.

Il comprend une source de haute fréquence SHF, une source d'électrons K, une cavité coaxiale CC ainsi que deux déflecteurs d'électrons D1 et D2.

La cavité coaxiale CC est formée d'un conducteur cylindrique extérieur 10 et d'un conducteur cylindrique intérieur 20 ainsi que de deux flasques 31 et 32.

Cette cavité possède un axe A et un plan médian Pm qui est perpendiculaire à l'axe A.

Parmi tous les modes de résonance possibles d'une telle cavité, il en est un, dit fondamental, de type transverse électrique, pour lequel le champ électrique E est purement radial dans le plan médian et décroît de part et d'autre de ce plan pour s'annuler sur les flasques 31 et 32.

Inversement, le champ magnétique H est

maximum le long des flasques et s'annule dans le plan médian en changeant de sens.

La cavité CC est alimentée par la source de haute fréquence SHF, par une boucle 34.

La source d'électrons K émet un faisceau d'électrons Fe qui est contenu dans un plan perpendiculaire à l'axe de la cavité coaxiale CC, le plan Pm dans l'exemple représenté sur la figure 2.

Ce plan rencontre cet axe en un point O.

Le faisceau d'électrons Fe pénètre dans la cavité CC par une ouverture 11.

Il traverse la cavité CC selon un premier diamètre d1 du conducteur extérieur 10.

Le conducteur intérieur 20 est percé de deux ouvertures 21 et 22 qui sont diamétralement opposées et qui sont successivement traversées par le faisceau.

Le faisceau d'électrons est accéléré par le champ électrique si des conditions de phase et de fréquence sont satisfaites (ce champ électrique doit rester de sens opposé à la vitesse des électrons).

Le faisceau accéléré sort de la cavité coaxiale CC par une ouverture 12 qui est diamétralement opposée à l'ouverture 11.

Il est ensuite défléchi par le déflecteur D1.

Le faisceau est réintroduit dans la cavité CC par une ouverture 13.

Il emprunte alors un second diamètre d2 et subit dans la cavité coaxiale CC une seconde accélération.

Il ressort par une ouverture 14 qui est diamétralement opposée à l'ouverture 13.

A sa sortie, le faisceau est à nouveau défléchi par le déflecteur d2 puis réintroduit dans la cavité coaxiale CC par une ouverture 15.

Il emprunte alors un troisième diamètre d3 et

subit une troisième accélération puis ressort de la cavité coaxiale CC par une ouverture 16 diamétralement opposée à l'ouverture 15.

En fait, le Rhodotron (marque déposée) peut être conçu de façon que le faisceau d'électrons qu'il accélère rentre et sorte un plus grand nombre de fois de la cavité coaxiale CC.

Sur la figure 3, on a représenté schématiquement un exemple de réalisation de la source de haute fréquence SHF qui permet d'alimenter la cavité CC en énergie électromagnétique de haute fréquence.

La source SHF de la figure 3 comprend :

- un tube oscillateur de puissance 36,
- un oscillateur pilote 38 qui émet un signal de haute fréquence pour commander la grille du tube 36 après avoir été amplifié par un amplificateur 40,
- une cavité résonante 42 à laquelle est couplée la plaque du tube 36,
- une autre cavité résonante 44 qui est prévue pour adapter l'impédance de la source SHF à une ligne de transmission 46 qui permet de coupler la source SHF à la cavité coaxiale CC par l'intermédiaire de la boucle de couplage 34.

Une telle source SHF est assez complexe et coûteuse et pose des problèmes de fiabilité.

La présente invention a pour but de remédier à ces inconvénients.

Pour ce faire, la présente invention propose un accélérateur d'électrons à cavité résonante dans lequel on utilise un faisceau d'électrons pour alimenter la cavité résonante en énergie électromagnétique, ce faisceau d'électrons étant injecté à des instants convenables dans la cavité de façon à lui céder son énergie.

De façon précise, la présente invention a

pour objet un accélérateur d'électrons, destiné à accélérer un premier faisceau d'électrons et comprenant :

- au moins une cavité résonante et
- des moyens d'alimentation de cette cavité en champ électromagnétique, à une fréquence de résonance de la cavité,

cet accélérateur étant caractérisé en ce que les moyens d'alimentation de la cavité comprennent des moyens de formation d'un deuxième faisceau d'électrons et d'injection de ce deuxième faisceau dans la cavité, sous forme d'impulsions, aux instants où la cavité fonctionne en décélération pour les électrons du deuxième faisceau, et en ce que l'accélérateur comprend en outre des moyens de formation du premier faisceau et d'injection de ce premier faisceau dans la cavité, sous forme d'impulsions, en opposition de phase par rapport au deuxième faisceau et suivant une trajectoire distincte de celle du deuxième faisceau.

Ainsi, dans l'accélérateur objet de l'invention, la cavité résonante est entretenue uniquement par l'énergie prélevée au deuxième faisceau d'électrons, ou faisceau générateur, et le fonctionnement de l'accélérateur ne nécessite aucune source d'alimentation en puissance HF, contrairement au Rhodotron (marque déposée) représenté sur les figures 1 et 2.

La présente invention permet :

- une augmentation du rendement de l'accélérateur,
- une simplification de celui-ci et une amélioration de sa fiabilité, et
- une réduction importante des investissements.

Tout ceci est d'autant plus intéressant que

la puissance demandée à l'accélérateur est élevée.

Bien entendu, l'accélérateur objet de l'invention est prévu pour donner au premier faisceau, lorsque celui-ci sort de l'accélérateur, une énergie supérieure à celle que possède le faisceau générateur à son entrée dans cet accélérateur.

On précise de plus que, pour que l'accélérateur fonctionne, il faut tout d'abord remplir la cavité résonante d'énergie électromagnétique au moyen du faisceau générateur mais que ce remplissage a en fait lieu en un temps très court, de l'ordre d'une fraction de milliseconde.

De préférence, la durée des impulsions des premier et deuxième faisceaux d'électrons, lors de l'injection de ceux-ci, est au plus égale à environ le dixième de la période du champ électromagnétique.

Comme on le verra mieux par la suite, de telles impulsions étroites sont préférées pour des questions de phase par rapport au champ électromagnétique règnant dans la cavité car il existe une phase optimale pour avoir une bonne décélération du faisceau générateur et une bonne accélération du premier faisceau que l'on veut accélérer.

De préférence également, l'énergie des électrons du deuxième faisceau, lors de l'injection de celui-ci, est supérieure au seuil d'énergie en deça duquel ces électrons restent piégés dans la cavité.

On évite ainsi la formation d'un plasma perturbateur dans la cavité résonante.

Selon un mode de réalisation particulier de l'accélérateur objet de l'invention, les moyens de formation et d'injection des premier et deuxième faisceaux d'électrons comprennent des tubes accélérateurs électrostatiques et au moins un générateur de haute tension pour pré-accélérer le

premier faisceau et accélérer le deuxième faisceau .

Ce générateur de haute tension peut être une source de haute tension à multiplication électronique de tension du type Greinacher.

Selon un premier mode de réalisation particulier de l'accélérateur objet de l'invention, la cavité résonante comprend un conducteur cylindrique extérieur et un conducteur cylindrique intérieur qui sont coaxiaux et percés d'ouvertures pour introduire dans la cavité et extraire de celle-ci le premier et le deuxième faisceaux d'électrons et l'accélérateur comprend en outre au moins un déflecteur d'électrons apte à dévier un faisceau d'électrons ayant traversé la cavité selon un diamètre et à réinjecter ce faisceau d'électrons dans la cavité selon un autre diamètre.

On utilise alors une cavité résonante du genre de celle d'un Rhodotron (marque déposée).

Dans ce cas, selon une réalisation particulière, le conducteur cylindrique extérieur peut être percé d'une ouverture pour introduire le deuxième faisceau d'électrons dans la cavité, le conducteur cylindrique intérieur étant alors percé d'une ouverture qui est disposée en regard de l'ouverture du conducteur cylindrique extérieur, l'accélérateur comprenant en outre des moyens de réception du deuxième faisceau d'électrons qui sont disposés à l'intérieur du conducteur cylindrique intérieur et en regard de l'ouverture de celui-ci.

Alors, le faisceau générateur ne traverse pas la cavité résonante de part en part mais fait ce que l'on peut appeler un "demi-passage" dans cette cavité puisque des moyens sont prévus pour le recevoir à l'intérieur du conducteur intérieur de cette cavité.

Selon un mode de réalisation avantageux de l'accélérateur objet de l'invention, utilisant les

conducteurs cylindriques coaxiaux et les tubes accélérateurs électrostatiques, ces tubes accélérateurs sont placés en regard d'ouvertures du conducteur cylindrique extérieur qui sont voisines l'une de l'autre.

Il est alors possible d'utiliser un seul générateur de haute tension pour ces deux tubes accélérateurs, ce qui réduit le coût de l'accélérateur.

Dans ce cas, l'accélérateur peut comprendre en outre une enceinte étanche dans laquelle sont placés les tubes accélérateurs électrostatiques et le générateur de haute tension et qui est pressurisée par un gaz formant un diélectrique.

Selon un deuxième mode de réalisation particulier de l'accélérateur objet de l'invention, cet accélérateur comprend une structure accélératrice linéaire à au moins une cavité résonante et le premier faisceau d'électrons et le deuxième faisceau d'électrons sont injectés dans la structure respectivement par une extrémité de cette structure et par l'autre extrémité de celle-ci.

Selon un troisième mode de réalisation particulier, la cavité résonante comprend un conducteur cylindrique intérieur et un conducteur cylindrique extérieur qui sont coaxiaux, le conducteur cylindrique extérieur est percé de deux ouvertures diamétralement opposées, le conducteur cylindrique intérieur est également percé de deux ouvertures diamétralement opposées et alignées avec les ouvertures du conducteur cylindrique extérieur et le premier faisceau d'électrons et le deuxième faisceau d'électrons sont injectés dans la cavité respectivement par l'une des ouvertures du conducteur extérieur et par l'autre ouverture de celui-ci.

La présente invention sera mieux comprise à

09200958

la lecture de la description d'exemples de réalisation donnés ci-après, à titre purement indicatif et nullement limitatif, en référence aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique en coupe longitudinale d'un accélérateur à cavité résonante connu et a déjà été décrite,
- la figure 2 est une vue en coupe transversale de l'accélérateur de la figure 1 et a déjà été décrite,
- la figure 3 est une vue schématique d'une source de haute fréquence connue, permettant d'alimenter en énergie électromagnétique la cavité résonante de l'accélérateur des figures 1 et 2 et a déjà été décrite,
- la figure 4 est une vue schématique d'un mode de réalisation particulier de l'accélérateur objet de l'invention, utilisant une cavité résonante à conducteurs cylindriques coaxiaux,
- la figure 5 est une vue en coupe longitudinale schématique de la cavité de la figure 4,
- la figure 6 est un graphique expliquant les conditions de phase à obtenir pour le fonctionnement de l'accélérateur représenté sur la figure 4,
- la figure 7 montre des impulsions de courant correspondant au faisceau générateur, qui permet d'alimenter en énergie électromagnétique la cavité de l'accélérateur de la figure 4,
- la figure 8 illustre schématiquement un mode de réalisation particulier de l'invention, dans lequel ce faisceau ne fait qu'un "demi-passage" dans cette cavité,
- la figure 9 illustre schématiquement un autre mode de réalisation particulier dans lequel le faisceau générateur traverse plus d'une fois cette

cavité,

- la figure 10 illustre schématiquement un autre mode de réalisation particulier de l'invention, utilisant une structure linéaire à au moins une cavité résonante, et

- la figure 11 est une vue schématique d'un autre mode de réalisation particulier utilisant une cavité qui est du genre de celle d'un Rhodotron (marque déposée) et dans laquelle le faisceau générateur ne fait qu'un seul passage.

L'accélérateur conforme à l'invention, qui est schématiquement représenté sur la figure 4, comprend une cavité résonante 48 du genre de celle d'un Rhodotron (marque déposée) dont des exemples sont donnés dans les documents (1) et (2) ainsi que sur les figures 1 et 2.

Ainsi la cavité 48 comprend un conducteur cylindrique extérieur 50 et un conducteur cylindrique intérieur 52 qui sont coaxiaux.

L'accélérateur de la figure 4 comprend également :

- des moyens 54 pour former et injecter dans la cavité 48 un faisceau d'électrons 56 que l'on veut accélérer avec l'accélérateur de la figure 4, et

- des moyens 58 pour former et injecter dans la cavité 48 un faisceau d'électron 60, ou faisceau générateur, destiné à perdre une partie de son énergie dans la cavité 48 afin d'alimenter cette dernière en énergie électromagnétique.

Comme pour la cavité d'un Rhodotron (marque déposée), les conducteurs extérieur 50 et intérieur 52 sont percés d'ouvertures diamétralement opposées, permettant aux faisceaux 56 et 60 de traverser la cavité 48.

L'accélérateur comprend aussi des déflecteurs

d'électrons 62 permettant la recirculation du faisceau 56, comme dans un Rhodotron (marque déposée).

Dans l'exemple représenté sur la figure 4, le faisceau 56, que l'on veut accélérer, traverse donc plusieurs fois la cavité 58 et fait ainsi plusieurs passages dans cette dernière en formant une rosace.

Dans cet exemple, le faisceau générateur 60 ne traverse qu'une fois la cavité 48, faisant ainsi un seul passage dans cette cavité.

On voit sur la figure 4 l'ouverture 64 du conducteur extérieur 50 par laquelle sort le faisceau accéléré 56 qui est alors utilisable pour l'application souhaitée.

On reviendra par la suite sur la production des faisceaux d'électrons 56 et 60.

On fait dans ce qui suit diverses considérations sur l'accélération et sur la décélération de paquets d'électrons dans la cavité 48.

Le mode "radial" de résonance de la cavité 48 fait seulement intervenir un champ électrique radial Er et un champ magnétique azimutal Ha.

Ces champs Er et Ha sont donnés par les formules suivantes :

$$Er = (V/r).\cos(z.pi/L).\cos(2pi.F.t)$$

$$Ha = (V/r).(2L.Mo.F)^{-1}.\sin(z.pi/L).\sin(2pi.F.t)$$

dans lesquelles :

pi représente le nombre bien connu valant environ 3,14,

V est une constante ayant la dimension d'un potentiel,

t représente le temps,

F représente la fréquence de résonance de la cavité,

Mo est égal à $4pi.10^{-7}$,

z représente une abscisse comptée sur l'axe de la

cavité,

L représente la longueur de la cavité, comptée suivant l'axe de celle-ci, et

r représente une abscisse comptée sur un axe transversal perpendiculaire à l'axe de la cavité.

Le nombre z est compris entre -L/2 et +L/2.

Comme on le voit sur la figure 5 où 0 représente le centre de la cavité, en parcourant l'axe sur lequel est comptée l'abscisse r, celle-ci passe d'une valeur minimale -r2 sur le conducteur extérieur à une valeur -r1 sur le conducteur intérieur puis à la valeur r1 sur le conducteur intérieur et enfin à la valeur r2 sur le conducteur extérieur.

La cavité 48 a une longueur d'onde de résonance égale à 2L.

La valeur moyenne Wm de l'énergie emmagasinée dans la cavité sur une période F^{-1} est donnée par la formule suivante :

$$Wm = (pi/2)Eo.V^{2}.L.ln(r2/r1)$$

où Eo représente la constante diélectrique du vide.

Supposons qu'un paquet d'électrons pénètre dans la cavité 48, dans le plan médian de celle-ci, suivant un diamètre et avec une phase donnée (par rapport au champ électromagnétique présent dans la cavité).

L'interaction de ces électrons avec ce champ apporte à la cavité, au cours d'un passage, une quantité d'énergie dW.

Si à chaque période F^{-1} du champ on injecte, avec la même phase d'entrée, un paquet identique d'électrons, on fournit au champ électromagnétique de la cavité une puissance "génératrice" dont la valeur moyenne sur une période F^{-1} est notée Pg.

09200958

Le bilan de la puissance moyenne gagnée par la cavité pendant cette période s'écrit donc :

$$dWm/dt = Pg - Pj = Pg - (2pi.F/Q)Wm$$

où Pj représente les pertes de la cavité par effet Joule dans les parois de cette cavité et Q représente le coefficient de surtension qui est calculable en fonction de : L, r1, r2 et l'épaisseur de peau du métal constitutif de ces parois à la fréquence F.

On donnera plus loin la valeur de Pg.

On considère maintenant un électron qui traverse la cavité 48 suivant un diamètre de celle-ci, dans le plan médian de cette cavité, des ouvertures étant prévues à cet effet sur les conducteurs 50 et 52 de cette cavité (voir figure 5).

L'électron passe successivement par les points A, B, C et D dont les abscisses valent respectivement -r2, -r1, r1 et r2 sur l'axe des r.

On peut écrire le système d'équations suivant :

$$g(g^2-1)^{-1/2}.dg/dt=-|e|V(mo.c)^{-1}.r^{-1}.\cos(2pi.F.t)$$

$$v = dr/dt = c(g^2-1)^{1/2}.g^{-1}$$

$$g = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

Dans ce système :

$|e|$ représente la valeur absolue de la charge de l'électron,

mo représente la masse au repos de l'électron, et

c représente la vitesse de la lumière dans le vide.

Ce système d'équation permet d'évaluer l'énergie de l'électron dans les intervalles AB et CD.

Lorsque l'électron reste relativiste pendant tout le parcours de A à D, on peut exprimer la variation Dg de l'énergie de l'électron au cours du trajet AD par la formule suivante :

$$Dg = gD - gA = 2|e|.V.(mo.c^{2})^{-1}.IAB.\sin\phi o$$

Pour établir cette formule, on considère la phase ϕ du champ électromagnétique à un instant t et la phase ϕo de ce champ électromagnétique à l'instant to où l'électron passe en O.

Les phases ϕ et ϕo sont données par les formules suivantes :

$$\phi = 2pi.F.(t - to)$$

$$\phi o = 2pi.F.to$$

Dans la formule donnée plus haut, gD et gA représentent respectivement l'énergie de l'électron en D et l'énergie de l'électron en A.

IAB est l'intégrale de la fonction $(\sin\phi).\phi^{-1}$ entre les valeurs ϕA et ϕB.

Ces valeurs correspondent respectivement à la valeur de la phase ϕ lorsque l'électron passe en A et à la valeur de cette phase ϕ lorsque cet électron passe en B.

L'expression de la variation d'énergie Dg est commode pour discuter physiquement le processus de décélération ou d'accélération de l'électron.

On voit donc que l'échange d'énergie entre un électron traversant la cavité 48 et le champ électromagnétique s'exprime par une fonction de transfert d'énergie Dg qui peut être soit positive soit

négative soit nulle, selon la phase ϕo.

Lorsque Dg est positive, l'électron est accéléré et prend de l'énergie à la cavité.

Lorsque Dg est négatif, l'électron est ralenti et fournit de l'énergie électromagnétique à la cavité 48.

Cette fonction de transfert d'énergie est donnée plus haut lorsque v est proche de c mais doit être calculée numériquement à partir du système d'équations donné plus haut lorsque v diffère notablement de c.

Le gain maximum d'énergie de l'électron s'obtient à partir de la formule donnant Dg en remplaçant ϕo par :

$$pi/2 + 2K.pi$$

valeur dans laquelle K est un nombre entier positif, négatif ou nul.

La perte maximale d'énergie de l'électron s'obtient à partir de la formule donnant Dg en donnant à ϕo la valeur suivante :

$$3\ pi/2 + 2K.pi$$

Le maximum $|Dg|max$ de la valeur absolue de Dg est alors donné par la formule suivante :

$$|Dg|max = 2|e|.V.IAB.(mo.c^2)^{-1}$$

Sur la figure 6, on a représenté l'énergie gD de l'électron à sa sortie de la cavité 48, en fonction de la phase ϕo.

On voit que sous certaines conditions, l'électron peut perdre toute son énergie initiale et ne

09200953

pas sortir de la cavité après son premier passage.

Ce serait le cas si gA était inférieur ou égal à |Dg|max.

Dans la pratique, on cherche à éviter cette situation et l'on injecte les électrons du faisceau générateur 60, dans la cavité 48, avec une énergie initiale gA supérieure à ce seuil |Dg|max, faute de quoi ces électrons s'accumuleraient dans la cavité et un plasma perturbateur se formerait dans cette dernière.

On considère maintenant le cas réel où l'on injecte dans la cavité 48 non pas un seul électron mais un paquet d'électrons avec une largeur de phase $\pm d\phi$ et l'on se place au voisinage de :

$$\phi o = 3pi/2 + 2K.pi$$

Alors les électrons sortent de la cavité en D avec une énergie comprise dans l'intervalle :

$$(gDmin,\ gDmin + dg)$$

La quantité dg est peu différente de :

$$|e|.V.IAB.(mo.c^2)^{-1}.(d\phi)^2$$

Dans le cas où le faisceau générateur ne fait qu'un passage dans la cavité, si l'on veut que les électrons ainsi injectés cèdent la quasi-totalité de leur énergie et ressortent avec une faible dispersion d'énergie, il faut que gA soit légèrement supérieur à :

$$2|e|.V.IAB.(mo.c^2)^{-1}$$

et que $d\phi$ soit peu différent de :

$(dg/gA)^{1/2}$.

On va maintenant calculer la puissance Pg mentionnée plus haut ou, ce qui revient au même, la puissance perdue par un faisceau d'électrons traversant la cavité de A en D.

On considère un faisceau d'électrons constitué d'une suite d'impulsions de courant i dont le courant-crête est noté ic et dont la largeur est notée T (voir la figure 7).

Chaque impulsion est séparée de la précédente par un temps égal à F^{-1}.

On peut alors déterminer l'énergie totale perdue par les électrons d'une impulsion complète puis déterminer la puissance Pg.

Pour ce faire, on remarque qu'il y a F impulsions identiques par unité de temps et on tient compte du fait que la phase ϕo correspondant au ralentissement maximum du faisceau générateur est égale à :

$$\phi o = -pi/2 + 2K.pi$$

On obtient alors :

$$Pg = (2.ic/pi).(V.IAB.mo^{-1}.c^{-2}).\sin(pi.F.T)$$

On peut alors écrire :

$$Pg = 2<i>.V.IAB.(mo.c^{2})^{-1}$$

où <i> représente le courant moyen transporté par le faisceau générateur.

On revient maintenant à l'accélérateur

représenté sur la figure 4.

On précise que le faisceau générateur 60 est une suite de paquets d'électrons émis à intervalles de temps réguliers F^{-1}.

Typiquement, F est compris entre 100 et 200 MHz.

La durée T de ces impulsions est courte devant F^{-1} et ne dépasse pas $10^{-1}.F^{-1}$.

L'émission des impulsions du faisceau générateur est calée en phase par rapport au champ électromagnétique de haute fréquence de la cavité 48, de façon à respecter la valeur ϕ_0 correspondant au ralentissement maximum des paquets d'électrons.

Les moyens 58 de formation et d'injection du faisceau 60 comprennent une cathode 66, une grille de commande 68 et un tube accélérateur-électrostatique 70 permettant d'accélérer ce faisceau générateur 60.

La formation des paquets d'électrons est assurée par la cathode 66 et la grille de commande 68 qui est synchronisée avec le champ de haute fréquence de la cavité 48.

Le faisceau 56 que l'on veut accélérer est constitué de paquets d'électrons qui sont séparés les uns des autres par un temps F^{-1} et dont la durée T est courte par rapport à F^{-1}, T ne dépassant pas $10^{-1}.F^{-1}$.

Les moyens 54 de formation et d'injection du faisceau 56 comprennent une cathode 72 qui émet les électrons du faisceau 56, une grille 74 qui commande la durée d'émission des paquets d'électrons et un tube accélérateur électrostatique 76.

Ce dernier sert à pré-accélérer le faisceau 56 qui est ensuite injecté dans la cavité 48 pour y être accéléré.

La phase d'émission des paquets d'électrons du faisceau 56 doit être parfaitement calée sur la

valeur conduisant à l'accélération maximum des électrons dans la cavité 48.

A ce sujet, on précise que l'accélérateur comprend, dans la cavité 48, une sonde HF, par exemple constituée par une boucle de mesure 78 qui mesure le champ électromagnétique dans la cavité.

L'accélérateur de la figure 4 comprend aussi un amplificateur 80 qui amplifie le signal issu de cette sonde et qui envoie des impulsions de commande synchrones avec les oscillations de la cavité et prévues pour déclencher l'émission des paquets d'électrons de chaque faisceau avec un déphasage approprié, tel que défini plus haut, entre ces deux émissions.

L'accélérateur de la figure 4 comprend également un collecteur d'électrons 82 prévu pour collecter les électrons du faisceau générateur après le passage de ceux-ci dans la cavité 48.

Le collecteur 82 peut être précédé par un tube décélérateur 84 comme on le voit sur la figure 4, pour freiner les électrons avant qu'ils soient collectés.

Ceci permet de récupérer l'énergie résiduelle des électrons et de l'utiliser sous forme de puissance électrique en vue d'améliorer le rendement énergétique de l'installation.

Dans l'exemple représenté sur la figure 4, les tubes accélérateurs 70 et 76 sont avantageusement placés sur deux ouvertures voisines de la cavité 48.

Une telle disposition permet d'utiliser le même générateur de haute tension 86 pour accélérer le faisceau générateur 60 et pré-accélérer le faisceau 56.

Le générateur 86 peut être une source de haute tension à multiplication électronique de tension du type Greinacher.

Cette source de haute tension est par exemple du genre de celle qui est décrite dans le document (4).

En général, la haute tension appliquée sur les deux tubes accélérateurs 70 et 76 est de l'ordre de plusieurs centaines de kV, voire de l'ordre de 1MV.

Dans ce cas, on place ces tubes 70 et 76 ainsi que tout l'appareillage électronique de haute tension dans une enceinte étanche 88 qui est pressurisée par du SF_6 gazeux, afin d'empêcher des claquages électriques de se produire.

Généralement, le collecteur 82 et le tube 84 ne sont pas protégés par une telle atmosphère de SF_6.

Cependant, si l'on veut récupérer avec un bon rendement l'énergie des électrons du faisceau générateur sortant, il est nécessaire de polariser les électrodes de freinage à des tensions qui peuvent nécessiter une telle protection.

Alors, on place également le collecteur 82 et le tube 84 dans une enceinte étanche 90 ainsi pressurisée.

On précise que la production d'impulsions suffisamment courtes et convenablement synchronisées au niveau de l'injection dans les tubes accélérateurs 70 et 76 est rendue possible grâce au système cathode/grille semblable à ceux qui sont décrits dans les documents (5) et (6).

Typiquement, les systèmes cathode/grille Eimac Y646B ou Eimac Y796 permettent de commander l'émission de courants-crêtes de 2A, pour des impulsions de durée inférieure à 10^{-9} s.

Dans une variante de réalisation de l'accélérateur objet de l'invention, qui est schématiquement et partiellement représentée sur la figure 8, le faisceau générateur 60 ne traverse la cavité 48 que suivant un demi-diamètre de celle-ci.

Une telle disposition a l'intérêt de diviser par deux la haute tension de l'accélérateur électrostatique prévu pour former le faisceau 60.

Alors, pour un accélérateur conforme à l'invention, communiquant 1MeV par passage des électrons que l'on veut accélérer dans la cavité, il suffit d'injecter un faisceau générateur dont l'énergie est de l'ordre de 500 KeV.

Comme on le voit sur la figure 8, des moyens de récupération du faisceau 60, constitués par un tube décélérateur 94 suivi par un collecteur d'électrons 96, sont alors logés à l'intérieur du conducteur cylindrique 52.

Cependant, pour que ces moyens de récupération de faisceau n'interceptent pas les trajectoires du faisceau que l'on veut accélérer, il faut alors injecter le faisceau générateur 60 en dehors du plan médian de la cavité qui est alors réservé au faisceau que l'on veut accélérer.

Le faisceau générateur est ralenti sensiblement de la même façon que celle décrite plus haut.

Toutefois, le champ magnétique Ha engendre une force supplémentaire qui est généralement faible si l'injection du faisceau générateur n'a pas lieu trop loin du plan médian de la cavité 48.

La force supplémentaire entraîne un déplacement, suivant z, du point de sortie des électrons du faisceau générateur.

Il faut tenir compte de ce déplacement suivant z dans le positionnement du trou de sortie du faisceau générateur.

Ce qui a été dit plus haut à propos de l'accélérateur de la figure 4 s'applique également à un accélérateur conforme à l'invention du genre de celui

qui est schématiquement et partiellement représenté sur la figure 9.

Dans l'exemple représenté sur cette figure 9, on considère une cavité coaxiale 98 du genre de celle d'un Rhodotron (marque déposée), fonctionnant à 1MeV par passage.

Un faisceau générateur 60 est injecté à 4 MeV et subit quatre passages décélérateurs qui alimentent la cavité 98 en énergie électromagnétique, le faisceau 60 étant récupéré par des moyens appropriés 100 à sa sortie de la cavité 98.

Le faisceau 56 que l'on veut accélérer pénètre à 4MeV dans la cavité 98 et en sort après cinq passages avec une énergie de 9MeV.

Plus généralement, on peut concevoir des accélérateurs conformes à la présente invention dans lesquels le faisceau générateur fait N1 passages dans la cavité coaxiale tandis que le faisceau que l'on veut accélérer fait N2 passages dans cette cavité, N2 étant supérieur ou égal à N1.

Dans les exemples précédemment décrits, on notera que la cavité résonante joue le rôle d'un "transformateur" qui fait intervenir un faisceau générateur généralement de forte intensité et de faible énergie, ainsi qu'un faisceau à accélérer qui est généralement d'intensité plus faible mais d'énergie de sortie plus élevée.

Ces deux faisceaux se distinguent par les phases respectives de leurs paquets d'électrons, qui sont décalées de pi.

Il n'y a pas de transfert intégral de la puissance transportée par l'un des faisceaux dans la puissance de l'autre faisceau car le système présente des pertes :

- pertes par effet Joule dans la cavité,

- pertes d'électrons des faisceaux sur les parois de celle-ci et

- pertes d'énergie lors de la récupération du faisceau générateur.

On notera toutefois que l'accélération et la décélération électrostatiques sont des opérations qui se font avec des rendements très élevés.

A ce sujet on pourra consulter le document (7) dans lequel des rendements de récupération dépassant 99,5% sont mentionnés.

La présente invention peut être mise en oeuvre avec d'autres cavités résonantes que celle qui est utilisée dans un Rhodotron (marque déposée).

Cependant, il convient que la structure de la cavité utilisée permette le passage du faisceau générateur.

De plus, comme il est préférable que les impulsions d'électrons de ce faisceau générateur aient une durée très inférieure à la période correspondant à la fréquence de résonance de la cavité, ceci sera d'autant plus facile à réaliser que la fréquence de résonance de cette cavité sera faible.

A titre d'exemple, une cavité dont la fréquence de résonance est inférieure à 200 MHz environ convient.

On peut par exemple réaliser un accélérateur conforme à l'invention en utilisant au moins une cavité accélératrice du genre de celles qui sont utilisées dans les accélérateurs linéaires (Linac).

Ceci est illustré par la figure 10 où un accélérateur conforme à l'invention est représenté schématiquement.

Cet accélérateur comprend donc une structure accélératrice linéaire 102 à au moins une cavité résonante, des moyens 104 pour produire et injecter le

09200958

faisceau 56 que l'on veut accélérer et des moyens 106 pour produire et injecter le faisceau générateur 60.

Dans l'exemple représenté, le faisceau 56 est injecté par une extrémité de la structure 102 et fait plusieurs passages dans cette structure au cours desquels son énergie augmente tandis que le faisceau générateur 60 est injecté par l'autre extrémité de la structure et fait un seul passage dans la structure après quoi il est collecté par des moyens appropriés 108.

De plus, l'accélérateur de la figure 10 comprend, de part et d'autre de la structure 102, des déflecteurs magnétiques 110 et 112 qui assurent la déflexion du faisceau 56 pour qu'il puisse effectuer ses passages à travers la structure 102.

Les déflecteurs 110 et 112 assurent également la déflexion du faisceau 60 afin qu'il puisse être injecté dans la structure puis une autre déflexion de ce faisceau 60 à sa sortie de la structure 102, pour l'envoyer dans les moyens de collection 108.

Sur la figure 11, on a représenté schématiquement un autre accélérateur conforme à l'invention, comprenant une cavité coaxiale 114 du genre de celle qui est utilisée dans une Rhodotron (marque déposée).

On utilise seulement quatre perçages 116 de cette cavité, à savoir deux perçages diamétralement opposés sur le conducteur intérieur et deux perçages diamétralement opposés sur le conducteur extérieur, ces quatre perçages étant alignés.

On définit ainsi un diamètre de la cavité qui est emprunté par le faisceau générateur 60 et par le faisceau 56 que l'on veut accélérer.

Le faisceau générateur 60, issu des moyens 106 de production et d'injection, ne fait qu'un seul

passage dans la cavité 114 suivant ce diamètre et, à la sortie de cette cavité, est collecté par les moyens appropriés 108.

Comme on le voit sur la figure 11, le faisceau 56, issu des moyens de production et d'injection 104, fait plusieurs passages successifs dans la cavité 114 toujours suivant ce diamètre.

Comme on le voit sur la figure 11, le faisceau 60 est injecté à une extrémité dudit diamètre tandis que le faisceau 56 est injecté à l'autre extrémité de ce diamètre.

On voit également sur la figure 11 des déflecteurs magnétiques 118 et 120 qui sont disposés de part et d'autre de la cavité 114 et qui dévient le faisceau générateur 60 pour l'injection de celui-ci dans la cavité 114 et également à sa sortie de cette cavité, pour l'envoyer vers les moyens de collections 108.

Les déflecteurs 118 et 120 sont également prévus pour dévier le faisceau 56 afin de l'injecter dans la cavité 114 puis pour dévier ce faisceau 56 afin qu'il puisse effectuer ses passages successifs dans la cavité 114, l'énergie du faisceau 56 augmentant à chaque passage comme on le voit sur la figure 11.

Les documents cités dans la présente description sont les suivants :

(1) Demande de brevet français n°8707378 du 26 mai 1987, intitulée Accélérateur d'électrons à cavité coaxiale

(2) Demande de brevet français n°8910144 du 27 juillet 1989, intitulée Laser à électrons libres à

accélérateur d'électrons perfectionné

(3) De la physique des particules à l'agro-alimentaire, La Recherche, Décembre 1990, vol.21, p.1464

(4) Demande de brevet français n°8910653 du 8 août 1989, Accélérateur électrostatique d'électrons, invention de Michel ROCHE - voir aussi EP-A-0 412 896

(5) S.V. Benson et al., Status Report on the Stanford Mark III Infrared Free Electron Laser, 9è Conférence Internationale sur les lasers à électrons libres, Williamsburg, Septembre 1987

(6) J.C. Bourdon et al., Commissioning the CLIO Injection System, Nuclear Instruments and Methods in Physics and Research, A 304 (1991), p. 322 à 328

(7) L.R. Elias, Electrostatic accelerators for free electron lasers, Nuclear Instruments and Methods in Physics and Research, A287 (1990), p.79 à 86.

REVENDICATIONS

1. Accélérateur d'électrons, destiné à accélérer un premier faisceau d'électrons (56) et comprenant :

- au moins une cavité résonante (48; 98; 102; 114) et

- des moyens d'alimentation de cette cavité en champ électromagnétique, à une fréquence de résonance de la cavité,

cet accélérateur étant caractérisé en ce que les moyens d'alimentation de la cavité (48; 98; 102; 114) comprennent des moyens (58; 106) de formation d'un deuxième faisceau d'électrons (60) et d'injection de ce deuxième faisceau dans la cavité, sous forme d'impulsions, aux instants où la cavité fonctionne en décélération pour les électrons du deuxième faisceau (60), et en ce que l'accélérateur comprend en outre des moyens (54; 104) de formation du premier faisceau (56) et d'injection de ce premier faisceau dans la cavité, sous forme d'impulsions, en opposition de phase par rapport au deuxième faisceau (60) et suivant une trajectoire distincte de celle du deuxième faisceau (60).

2. Accélérateur selon la revendication 1, caractérisé en ce que la durée (T) des impulsions des premier (56) et deuxième (60) faisceaux d'électrons, lors de l'injection de ceux-ci, est au plus égale à environ le dixième de la période du champ électromagnétique.

3. Accélérateur selon l'une quelconque des revendications 1 et 2, caractérisé en ce que l'énergie des électrons du deuxième faisceau (60), lors de l'injection de celui-ci, est supérieure au seuil d'énergie en deça duquel ces électrons restent piégés

dans la cavité (48; 98; 102; 114).

4. Accélérateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les moyens de formation et d'injection des premier (56) et deuxième (60) faisceaux d'électrons comprennent des tubes accélérateurs électrostatiques (76, 70) et au moins un générateur de haute tension (86) pour pré-accélérer le premier faisceau (56) et accélérer le deuxième faisceau (60).

5. Accélérateur selon la revendication 4, caractérisé en ce que ce générateur de haute tension (86) est une source de haute tension à multiplication électronique de tension du type Greinacher.

6. Accélérateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la cavité résonante (48) comprend un conducteur cylindrique extérieur (50) et un conducteur cylindrique intérieur (52) qui sont coaxiaux et percés d'ouvertures pour introduire dans la cavité et extraire de celle-ci le premier et le deuxième faisceaux d'électrons et en ce que l'accélérateur comprend en outre au moins un déflecteur d'électrons (62) apte à dévier un faisceau d'électrons ayant traversé la cavité (48) selon un diamètre et à réinjecter ce faisceau d'électrons dans la cavité selon un autre diamètre.

7. Accélérateur selon la revendication 6, caractérisé en ce que le conducteur cylindrique extérieur (50) est percé d'une ouverture pour introduire le deuxième faisceau d'électrons (60) dans la cavité (48), en ce que le conducteur cylindrique intérieur (52) est percé d'une ouverture qui est disposée en regard de l'ouverture du conducteur cylindrique extérieur, et en ce que l'accélérateur comprend en outre des moyens (94, 96) de réception du deuxième faisceau d'électrons (60) qui sont disposés à

l'intérieur du conducteur cylindrique intérieur (52) et en regard de l'ouverture de celui-ci.

8. Accélérateur selon la revendication 4 et l'une quelconque des revendications 6 et 7, caractérisé en ce que les tubes accélérateurs électrostatiques (70, 76) sont placés en regard d'ouvertures du conducteur cylindrique extérieur (50) qui sont voisines l'une de l'autre.

9. Accélérateur selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une enceinte étanche (88) dans laquelle sont placés les tubes accélérateurs électrostatiques (70, 76) et le générateur de haute tension (86) et qui est pressurisée par un gaz formant un diélectrique.

10. Accélérateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'il comprend une structure accélératrice linéaire (102) à au moins une cavité résonante et en ce que le premier faisceau d'électrons (56) et le deuxième faisceau d'électrons (60) sont injectés dans la structure (102) respectivement par une extrémité de cette structure et par l'autre extrémité de celle-ci.

11. Accélérateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que la cavité résonante (114) comprend un conducteur cylindrique intérieur et un conducteur cylindrique extérieur qui sont coaxiaux, en ce que le conducteur cylindrique extérieur est percé de deux ouvertures diamétralement opposées (116), en ce que le conducteur cylindrique intérieur est également percé de deux ouvertures diamétralement opposées (116) et alignées avec les ouvertures du conducteur cylindrique extérieur et en ce que le premier faisceau d'électrons (56) et le deuxième faisceau d'électrons (60) sont injectés dans la cavité (114) respectivement par l'une des ouvertures du conducteur extérieur et par l'autre ouverture de celui-ci.

12. Accélérateur selon l'une quelconque des revendications 1 à 11, caractérisé en ce qu'il comprend en outre :

- une sonde haute fréquence (78) qui est placée dans la cavité résonante et qui mesure le champ électromagnétique dans cette cavité, et

- des moyens (80) capables d'engendrer des impulsions de commande des moyens de formation et d'injection des premier et deuxième faisceaux d'électrons (56, 60), à partir du signal fourni par la sonde haute fréquence (78).

FIG. 1

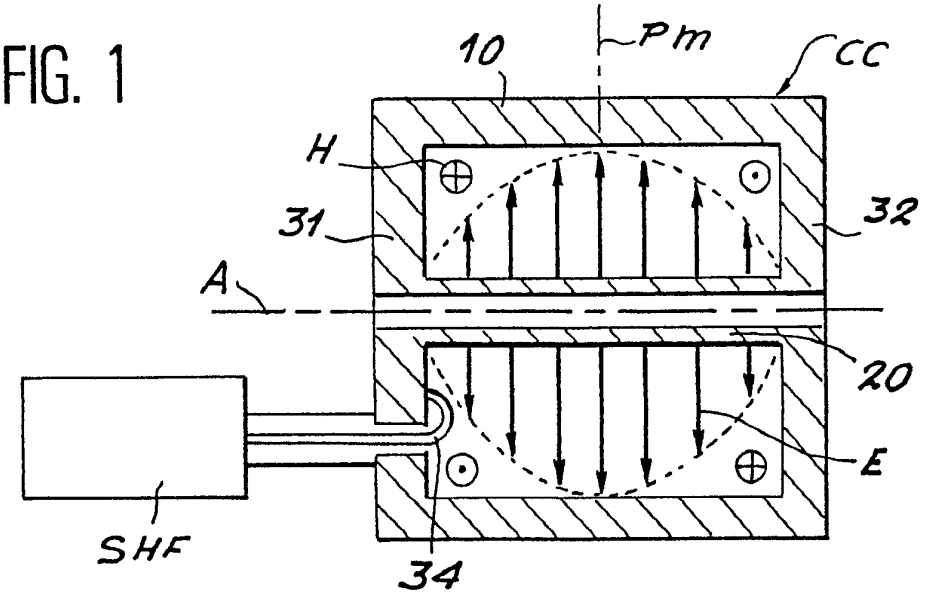
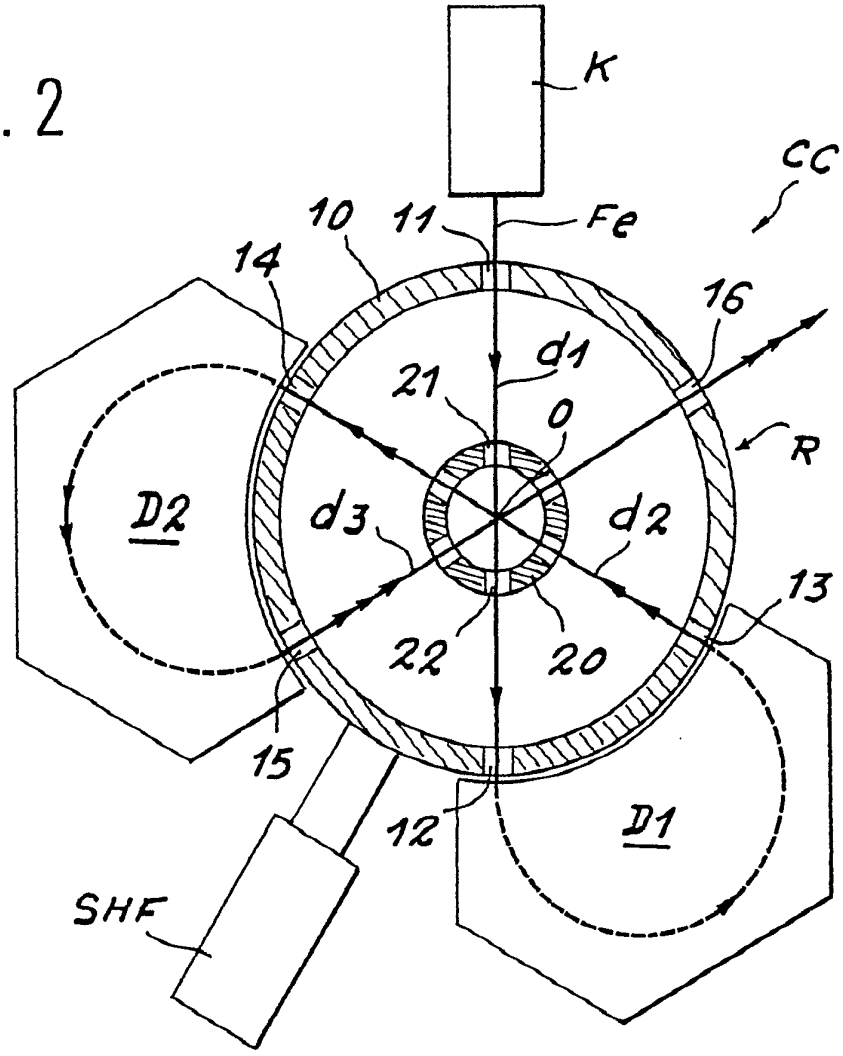

10
Pm
CC
H
31
32
A
20
E
SHF
34

FIG. 2


K
CC
10
11
Fe
14
16
d1
21
0
R
D2
d3
d2
13
22
20
15
12
D1
SHF

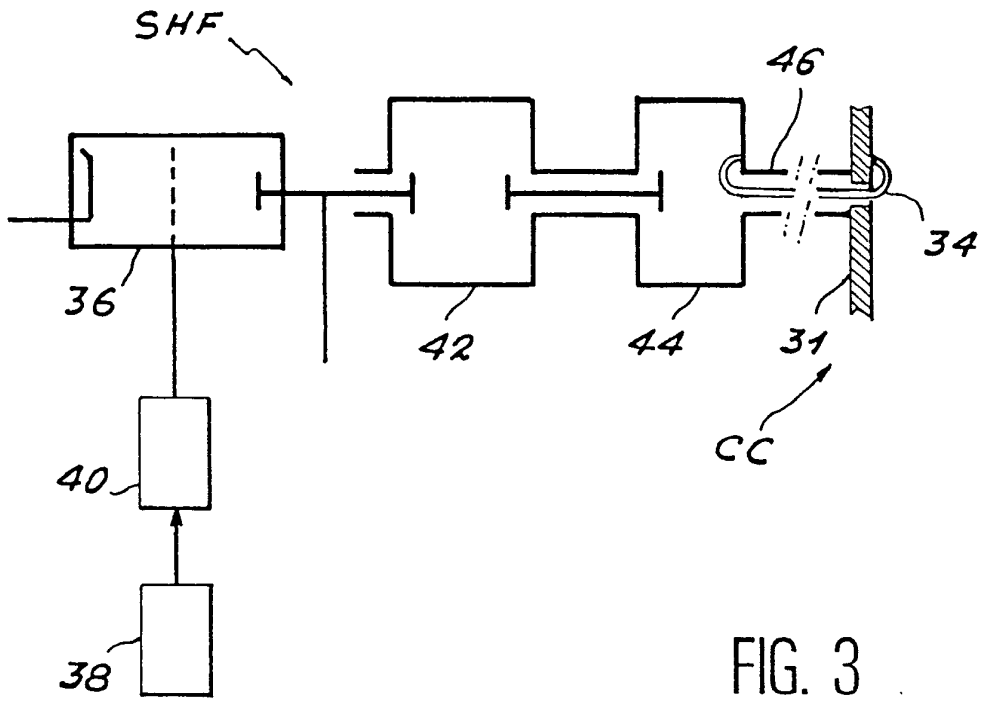


FIG. 3

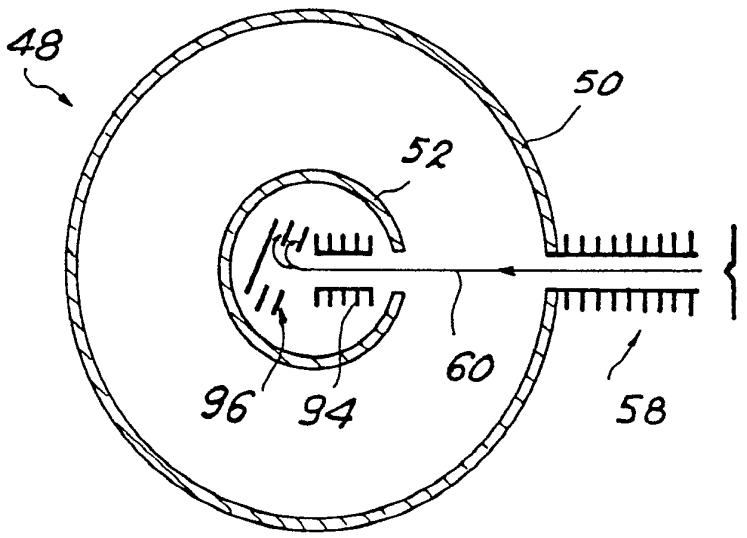
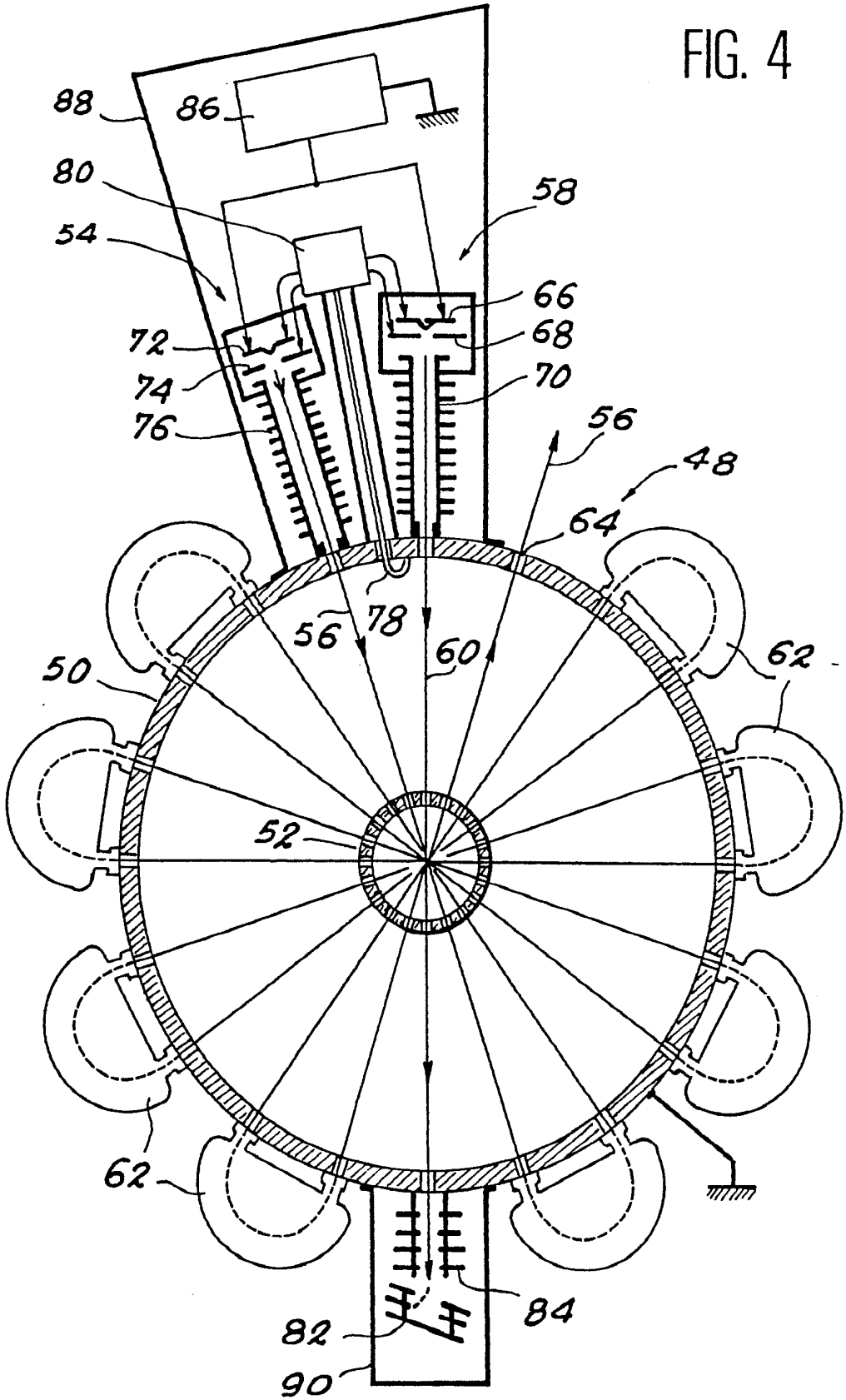


FIG. 8

FIG. 4



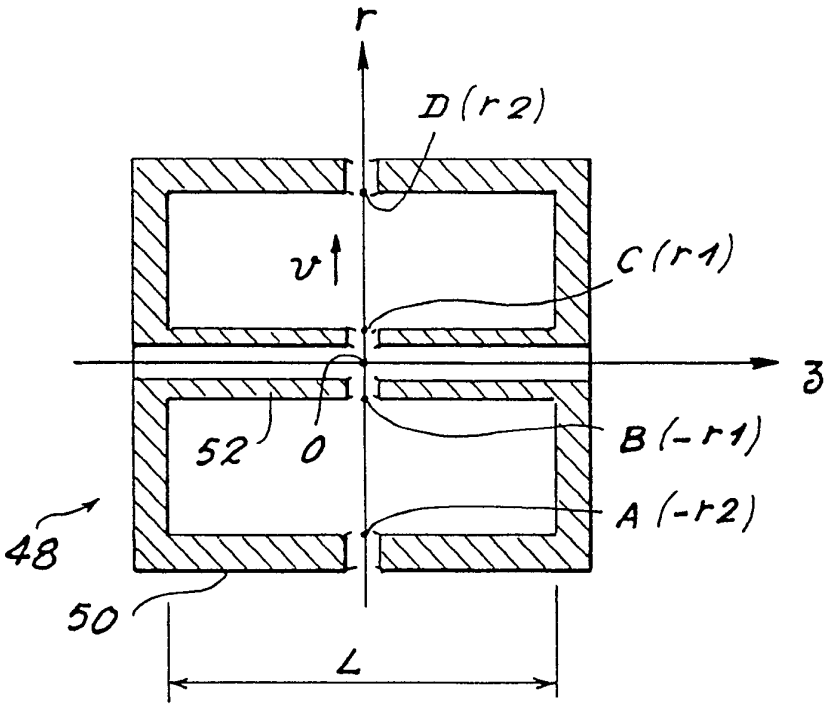


FIG. 5

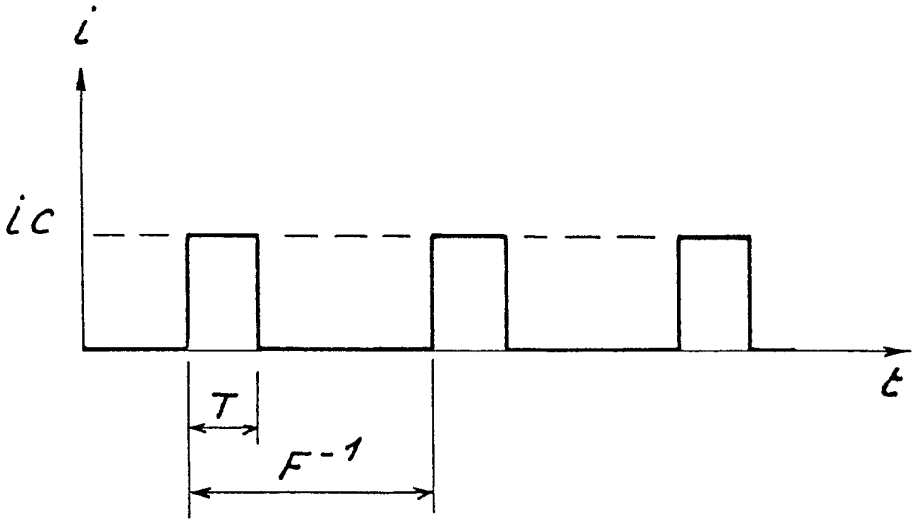


FIG. 7

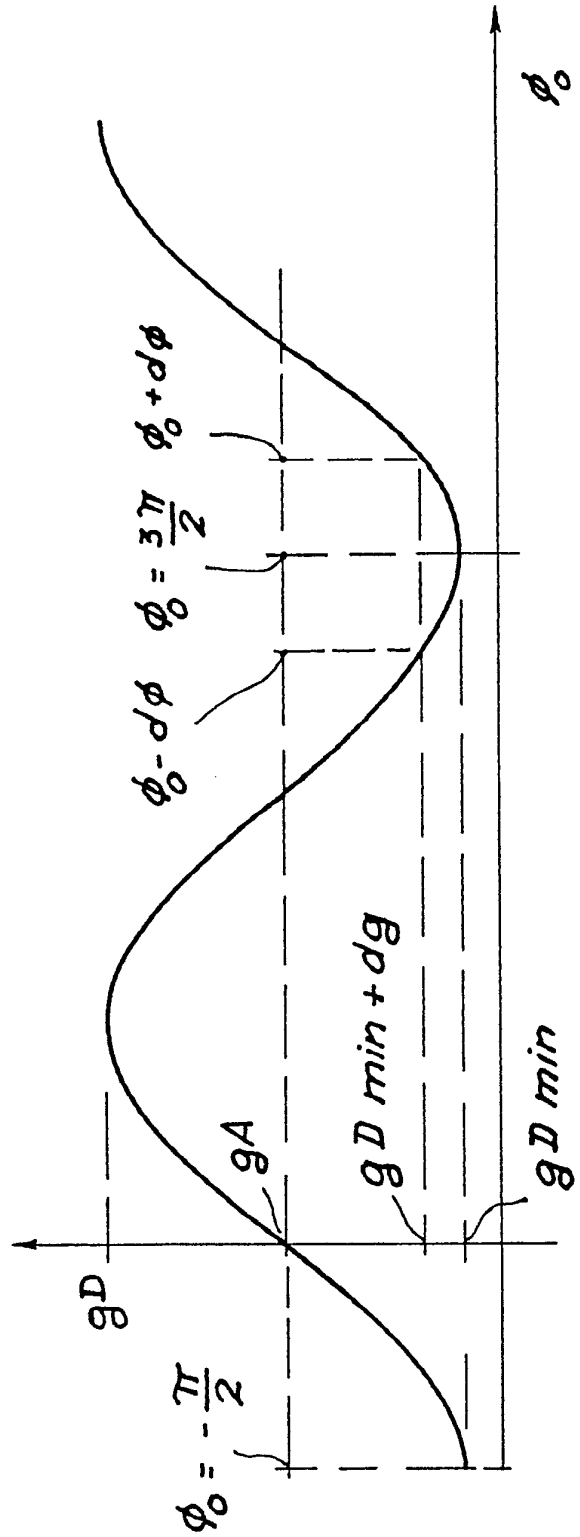

ϕ_o
$\phi_o + d\phi$
$\phi_o = \frac{3\pi}{2}$
$\phi_o - d\phi$
g_D
g_A
$g_{D\,min} + dg$
$g_{D\,min}$
$\phi_o = -\frac{\pi}{2}$

FIG. 6

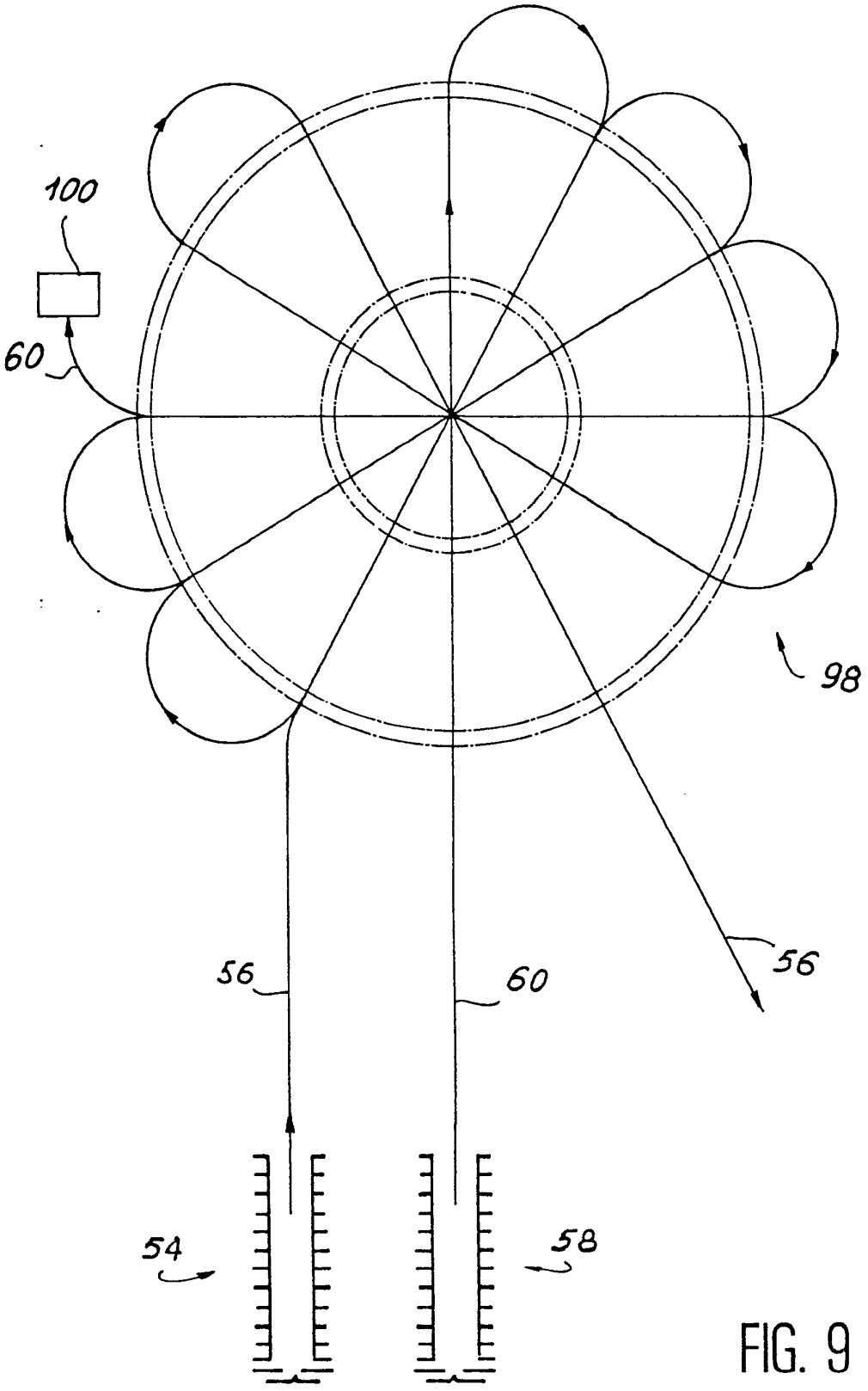


FIG. 9

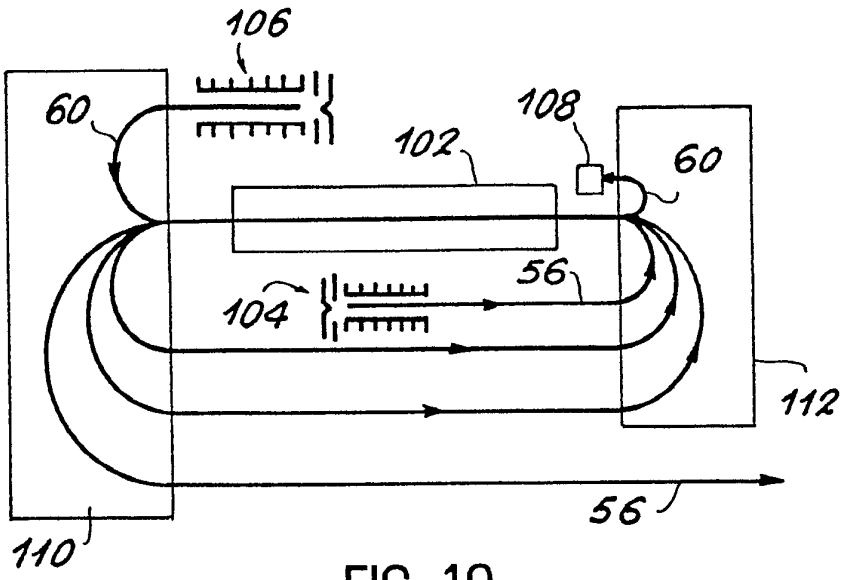

106
60
108
102
60
56
104
112
56
110

FIG. 10

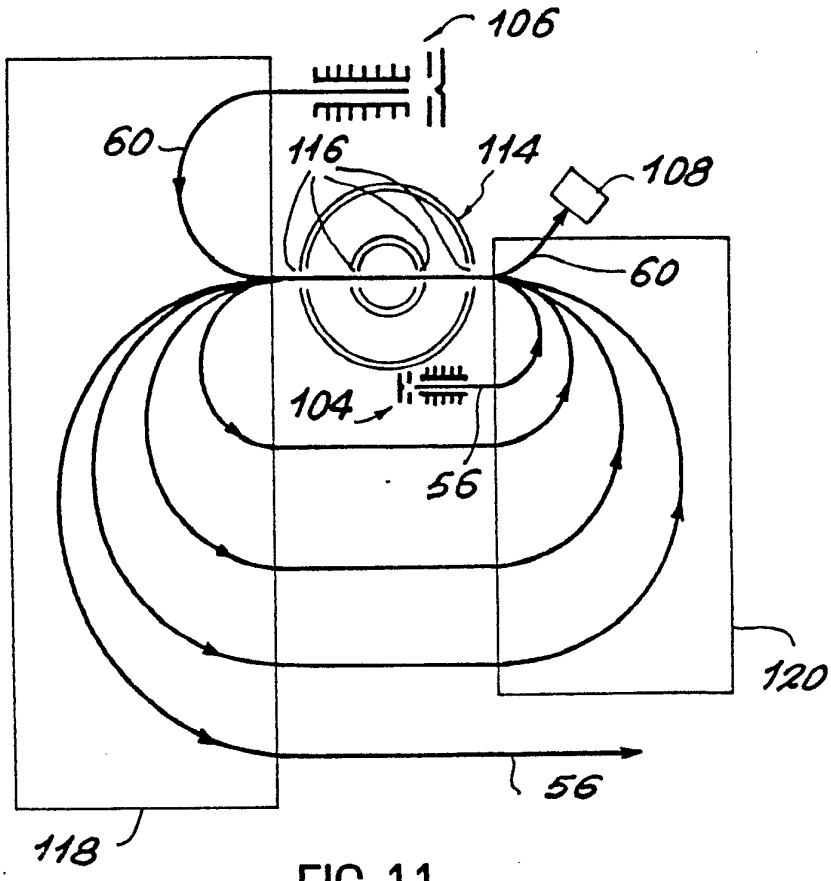

106
60
116
114
108
60
104
56
120
56
118

FIG. 11

Numero de la demande nationale

Office européen des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE

établi en vertu de l'article 21 § 1 et 2 de la loi belge sur les brevets d'invention du 28 mars 1984

BE 9200958
BO 4118

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.5)
A	EP-A-0 345 769 (HITACHI) * page 5, ligne 56 - page 6, ligne 49 * * figure 6 *	1	H05H7/06 H05H9/00 H05H7/18
A	NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH. vol. A298, no. 1/3, 1 Décembre 1990, AMSTERDAM NL pages 93 - 101 WEILAND ET AL. 'Status and future developments of the wake field transformer experiment' * page 93, alinéa 1.1 * * page 94, alinéa 2 *	1-2	
A	GB-A-2 065 363 (US DOE) * page 4, ligne 27 - ligne 40 * * figure 6 *	1	
D,A	EP-A-0 410 880 (CEA) * colonne 5, ligne 13 - colonne 6, ligne 36 * * figure 3 *	6-7	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
D,A	WO-A-8 809 597 (CEA) * page 5, ligne 18 - page 6, ligne 3 * * figure 3 *	6-7	H05H H01S

Date d'achèvement de la recherche	Examinateur
25 AOUT 1993	CAPOSTAGNO E.

CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES

- 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
- 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

& : membre de la même famille, document correspondant

1

EPO FORM 1503 03.82 (P0448)

ANNEXE AU RAPPORT DE RECHERCHE RELATIF A LA DEMANDE DE BREVET BELGE NO.

BE 9200958
BO 4118

La présente annexe indique les membres de la famille de brevets relatifs aux documents brevets cités dans le rapport de recherche visé ci-dessus.
Lesdits membres sont contenus au fichier informatique de l'Office européen des brevets à la date du 25/08/93
Les renseignements fournis sont donnés à titre indicatif et n'engagent pas la responsabilité de l'Office européen des brevets.

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)		Date de publication
EP-A-0345769	13-12-89	JP-A-	1311599	15-12-89
		US-A-	4998073	05-03-91
GB-A-2065363	24-06-81	US-A-	4323857	06-04-82
		CA-A-	1148242	14-06-83
		DE-A-	3046909	03-09-81
		FR-A,B	2472292	26-06-81
		JP-A-	56094681	31-07-81
EP-A-0410880	30-01-91	FR-A-	2650448	01-02-91
		JP-A-	3064983	20-03-91
		US-A-	5095486	10-03-92
WO-A-8809597	01-12-88	FR-A-	2616032	02-12-88
		AU-B-	613381	01-08-91
		AU-A-	1943788	21-12-88
		CA-A-	1306075	04-08-92
		DE-A-	3880681	03-06-93
		EP-A,B	0359774	28-03-90
		US-A-	5107221	21-04-92

EPO FORM P0463

Pour tout renseignement concernant cette annexe : voir Journal Officiel de l'Office européen des brevets, No.12/82