



⑫ **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

④⑤ Date de publication du fascicule du brevet :
23.09.92 Bulletin 92/39

⑤① Int. Cl.⁵ : **H05H 7/00, H05H 9/00**

②① Numéro de dépôt : **89400963.8**

②② Date de dépôt : **07.04.89**

⑤④ **Accélérateur linéaire muni de cavités autofocalisantes à fort taux de capture électronique pour des tensions d'injection modérées.**

③① Priorité : **08.04.88 FR 8804707**

⑦③ Titulaire : **CGR MEV**
551, rue de la minière, BP 34
F-78530 Buc (FR)

④③ Date de publication de la demande :
11.10.89 Bulletin 89/41

⑦② Inventeur : **Tronc, Dominique**
CABINET BALLOT-SCHMIT 84, Avenue Kléber
F-75116 Paris (FR)

④⑤ Mention de la délivrance du brevet :
23.09.92 Bulletin 92/39

⑦④ Mandataire : **Ballot, Paul Denis Jacques et al**
Cabinet Ballot-Schmit, 7, rue le Sueur
F-75116 Paris (FR)

⑧④ Etats contractants désignés :
CH DE GB LI NL SE

⑤⑥ Documents cités :
EP-A- 0 136 216
FR-A- 2 587 164
US-A- 3 769 599

EP 0 336 850 B1

Il est rappelé que : Dans un délai de neuf mois à compter de la date de publication de la mention de la délivrance du brevet européen toute personne peut faire opposition au brevet européen délivré, auprès de l'Office européen des brevets. L'opposition doit être formée par écrit et motivée. Elle n'est réputée formée qu'après paiement de la taxe d'opposition (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

La présente invention a pour objet une cavité autofocalisante à fort taux de capture électronique pour des tensions d'injection modérées. Elle trouve plus particulièrement son application dans le domaine des accélérateurs linéaires, notamment du type de ceux utilisés dans le contrôle industriel, ou dans le domaine médical, pour lesquels elle contribue à améliorer la fiabilité et le rendement d'utilisation.

Un accélérateur linéaire comporte essentiellement un canon pour injecter des particules chargées (la plupart du temps des électrons), auquel est raccordé, en aval, une structure accélératrice munie d'un ensemble de cavités alignées les une derrière les autres. Les cavités sont alimentées par un signal hyperfréquence de puissance. Le canon, par exemple lorsqu'il s'agit d'électrons, comporte classiquement une cathode placée en vis à vis d'une anode trouée. Sous l'effet du champ électrique produit par la haute tension appliquée entre la cathode et l'anode, des électrons sont arrachés de la cathode. Ils prennent de la vitesse avant d'arriver sur l'anode et s'échappent du canon par le trou de l'anode. La structure accélératrice placée en aval du canon doit alors soumettre ces électrons à plusieurs effets.

Elle doit principalement capturer le plus possible de ces électrons injectés. Elle doit aussi les regrouper de manière à ce qu'ils subissent, en franchissant les cavités accélératrices, des modifications homogènes de leur énergie cinétique. Elle doit les focaliser pour donner plus de quantité de mouvement à un paquet d'électrons regroupés au moment d'un impact sur une cible. Et enfin elle doit les accélérer suffisamment de manière à leur conférer l'énergie nécessaire.

En vue d'améliorer la focalisation il a d'abord été imaginé d'éviter une défocalisation du faisceau d'électrons à accélérer, au sortir de la première cavité. En effet au sortir de la première cavité les électrons ne sont pas encore bien accélérés et leurs énergies sont inférieures à 1 Mev, même si leurs vitesses sont déjà proches de celle de la lumière. Il en résulte que la masse de ces électrons est comparable à leur masse à l'arrêt. On dit de ces électrons qu'ils sont alors très mobiles dans le faisceau.

Pour éviter la divergence que les électrons mobiles sont amenés à subir on a proposé, dans EP-A- 0 136 216, déposée par le même Demandeur, d'allonger la première cavité. En effet les cavités successives d'un accélérateur, résonnant entre elles par exemple selon un mode π , présentent des champs électromagnétiques hyperfréquences de phases inversées dans des cavités successives. Ainsi un paquet d'électrons regroupés rencontre dans une cavité un champ électrique fort au moment où, dans les cavités adjacentes, le champ électrique est fort mais de sens inverse. Les longueurs des cavités sont telles que ce paquet d'électrons quitte une cavité au moment où le

champ électrique s'annule partout. Ce paquet d'électrons entre alors dans la cavité suivante au moment où s'installe une phase convenable du signal hyperfréquence dans cette cavité. Au besoin des espaces de glissement peuvent être placés entre les cavités pour favoriser ce synchronisme de phase. Le paquet d'électrons est également accéléré dans cette cavité suivante.

Dans la demande de brevet français précitée on dérègle ce synchronisme, du moins à la sortie de la première cavité. Sur le plan pratique les cavités sont des volumes dans lesquels des champs électromagnétiques hyperfréquences sont tels qu'un champ électrique règne au voisinage d'axes de ces cavités, axes qu'empruntent les électrons en franchissant ces cavités. Elles sont munies d'un trou d'entrée pour recevoir les particules injectées et d'un trou de sortie en vis à vis pour les laisser sortir. Les trous d'entrée et de sortie présentent classiquement des projections vers l'intérieur de la cavité. Ces projections qui entourent ces trous sont appelées nez de cavité. Les parois des cavités sont bien entendu métalliques. Les lignes du champ électrique au voisinage des trous ne peuvent pas être en tous points parallèles à l'axe de la cavité entre son trou d'entrée et son trou de sortie. En effet ces lignes de champ sont bien obligées de se refermer sur les nez de cavités. Si le champ électrique, au moment où le paquet d'électrons sort de la cavité, est encore intense et globalement orienté vers la cavité suivante (si en définitive la condition de synchronisme est respectée ou plutôt si on optimise le gain d'énergie des électrons) ces lignes de champ sont alors, à proximité du trou de sortie, divergentes. Comme les électrons sont à ce moment très mobiles, ils subissent fortement cet effet de divergence. Le faisceau est défocalisé.

Par contre si on allonge cette première cavité en maintenant identique les amplitudes et fréquences du champ électrique, la phase de ce champ électrique va s'inverser au moment même ou avant que le paquet d'électrons n'ait franchi le trou de sortie. En conséquence les lignes de champ électrique qui résultent de cette inversion après annulation sont alors globalement, à cet instant, orientées vers l'entrée de la cavité. Ceci a pour effet un ralentissement du paquet d'électrons ce qui est gênant. Mais ceci a aussi surtout pour effet, du fait de la composante radiale orientée dans le bon sens de ce champ électrique inversé, une reconcentration radiale des électrons émis. Il convient ensuite de régler l'augmentation de longueur de la première cavité pour que le gain sur la focalisation ne soit pas trop pénalisant sur la perte en énergie cinétique. On a pu ainsi déterminer dans cette demande de brevet que la longueur L_1 de la première cavité accélératrice de l'accélérateur linéaire devait être telle que :

$$L_1 = k' \beta \lambda_0.$$

Dans cette formule k' est un coefficient préconisé

comme devant prendre la valeur 0,5; β est le rapport de la vitesse moyenne des électrons à la vitesse de propagation de la lumière et λ_0 est la longueur d'onde de l'onde hyperfréquence créée.

L'inconvénient présenté par cette technique se manifeste sur le taux de capture. En effet du fait du ralentissement ainsi provoqué, des électrons injectés par le canon (les derniers électrons injectés d'un paquet) arrivent vraiment trop tard par rapport à l'inversion de phase du champ électrique dans la première cavité. De sorte qu'ils sont renvoyés vers le canon et qu'ils sont récupérés par l'anode. En conséquence le rendement de l'accélérateur baisse. Pour obtenir malgré tout le débit suffisant on peut être tenté d'utiliser un canon qui débite plus. Par exemple on chauffe plus fortement la cathode du canon émetteur. Cette technique présente un inconvénient majeur liée à la technologie des cathodes. Utilisés dans ces conditions les canons n'ont pas une longue durée de vie.

Dans FR-A- 2 587 164 déposée également par le même Demandeur on a présenté un dispositif de pré-groupement et d'accélération d'électrons dans lequel le taux de capture pouvait être porté à une valeur proche de 100 %. Pour l'essentiel dans cette invention on a pu déterminer qu'il suffisait, pour augmenter le taux de capture, d'imposer un champ électrique dans la première cavité suffisamment faible pour ne pas interdire à des électrons venant du canon d'atteindre la sortie de la première cavité. En pratique ceci conduit à imposer une valeur de ce champ électrique plus faible que celle imposée dans la seconde cavité. En pratique le rapport de ces champs électriques est de l'ordre de deux. En quelque sorte, au moment de l'inversion de phase le champ électrique à l'entrée de la première cavité n'empêche plus les électrons de la traverser tandis que le champ électrique à la sortie de la première cavité se présente comme une barrière de potentiel à franchir par des électrons qui seraient en cours de leur retour vers la cathode (ayant par exemple été réfléchis à l'entrée de la deuxième cavité à champ plus intense). La hauteur de la barrière est déterminée d'une part par la phase de l'onde hyperfréquence dans la première cavité au moment où les électrons retardataires franchissent le trou de sortie de cette première cavité. Cette barrière de potentiel est aussi intrinsèquement d'autre part dépendante de l'amplitude de l'onde hyperfréquence elle même. On conçoit alors aisément qu'en baissant la valeur de cette amplitude on baisse également la hauteur de cette barrière de potentiel. C'est cet effet technique qui a fait l'objet de la deuxième demande de brevet précitée.

De cette manière tous les électrons franchissent la barrière de potentiel. Là encore on détermine un compromis sur les rapports des amplitudes des champs dans la première et la deuxième cavité. Dans la demande de brevet en question on précise par ailleurs que, de préférence, le rapport de ces amplitudes

sera compris entre 1,5 et 3 pour un canon à électrons émettant des électrons avec une haute tension de 80 Kv, et pour une onde hyperfréquence en bande S résonnant à 3 GHz. Selon l'enseignement de cette demande de brevet il est nécessaire de satisfaire à la relation suivante :

$$E_1 \cdot L_1 \cdot T_1 \leq 1,5 V_0$$

Dans cette formule V_0 est l'énergie des électrons à l'entrée de la première cavité (la valeur numérique V_0 , exprimée en eV, est égale à celle de la haute tension d'injection exprimée en V), E_1 est l'amplitude du champ électrique moyen dans cette cavité, et T_1 est un facteur d'angle de transit moyen représentant le rapport entre l'énergie réellement acquise par les électrons et l'énergie qui serait acquise par ces derniers si le synchronisme entre le champ électrique et les électrons était respecté en tout point de la cavité. On sait que le facteur d'angle de transit moyen est lié au déphasage θ de l'onde électromagnétique entre l'entrée et la sortie par la relation suivante :

$$T_1 = \sin(\theta/2)/(\theta/2).$$

En pratique avec un déphasage moyen entre l'entrée et la sortie de la première cavité de l'ordre de π radian T_1 vaut environ 0,64.

La combinaison des deux solutions préconisées est en théorie possible. Elle consisterait à utiliser une première cavité plus longue qu'une première cavité normale pour la synchronisation, et à alimenter cette cavité de façon à créer un champ électrique plus faible que celui régnant dans la seconde cavité. Sur le plan pratique on sait, en agissant sur la dimension du trou de couplage de la première cavité à la deuxième cavité, modifier le coefficient de couplage électromagnétique entre ces deux cavités de telle façon que le champ électrique dans la première cavité, induit par un champ électrique existant dans la deuxième cavité (éventuellement lui même induit par un champ créé dans une troisième cavité), soit plus faible que le champ dans la deuxième cavité.

En pratique la combinaison de ces deux effets techniques n'est possible que si on se situe dans une gamme de tension très élevée des canons à électrons même pour un rapport des champs égal par exemple à deux. Par exemple il faut au minimum une tension canon de 80 kV dans l'exemple décrit dans la deuxième demande de brevet précitée. Si par contre on veut utiliser, notamment pour des questions d'encombrement (permettant finalement de réduire le diamètre du faisceau) et de coût, des canons à électrons à tension modérée, par exemple 40 kV, l'application des formules précédentes entraîne que le champ électrique qui doit régner dans la première cavité doit être limité à une valeur faible. Dans un exemple on a pu montrer que ce champ électrique devait être limité à 4,5 MV/mètre alors que le champ électrique dans la deuxième cavité était de l'ordre de 20 MV/m.

Or il se trouve que lorsque des cavités sont couplées avec des champs électriques aussi différents le

couplage est instable. Il en résulte que la constance des 4,5 MV/mètres dans la première cavité ne peut être respectée. Le champ électrique fluctue. Les conditions de réglage sont délicates et peu fiables.

En outre l'énergie électromagnétique hyperfréquence stockée dans la première cavité est proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique et décroît donc plus vite que ce dernier. Les électrons des premiers micro paquets qui arrivent dans la cavité à faible champ pompent alors toute l'énergie électromagnétique stockée, de sorte que les électrons des derniers micro paquets ne sont plus soumis à un quelconque champ dans le premier volume. Et là l'accélérateur ne fonctionne pas.

L'optimum qui aurait pu alors être obtenu en associant les deux effets techniques ne se produit plus.

L'invention a pour objet de remédier à ces inconvénients en créant une structure accélératrice autofocalisante, c'est-à-dire utilisant l'effet d'autofocalisation de la première demande de brevet citée, et à fort taux de capture électronique, c'est-à-dire utilisant l'effet technique de la deuxième demande de brevet citée, mais pour des tensions d'injection modérées. L'idée essentielle de l'invention consiste à jouer sur la forme de la première cavité de manière à ce que le champ électrique dans cette cavité se développe nettement dissymétriquement par rapport au milieu de cette cavité. En quelque sorte on optimise la forme du module du champ après avoir déterminé son extension selon l'axe et l'amplitude de son maximum.

Pour simplifier, cette première cavité comporte une première partie dans laquelle le champ est faible suivie en aval d'une deuxième partie dans laquelle le champ est fort. Dans la première partie les électrons sont modérément accélérés, ils sont surtout regroupés. Les électrons retardataires étant soumis à des phases de champ globalement plus favorables que les électrons arrivés les premiers rattrapent ces premiers électrons. Au moment de leur entrée dans la deuxième partie de la première cavité les électrons suffisamment regroupés sont alors accélérés sur la plus grande part de cette deuxième partie de la première cavité. Puis, au moment où ils sont ainsi regroupés et accélérés, le champ électrique s'annule et enfin s'inverse. Avant qu'ils ne franchissent le trou de sortie de cette première cavité, ils sont alors légèrement ralentis (ce qui est un peu défavorable), mais surtout favorablement autofocalisés par la composante radiale du champ électrique inversé à la sortie de la première cavité.

Cependant la dissymétrie du champ interdit une forte décélération et donc une forte force focalisante. Dans la deuxième cavité et éventuellement dans une troisième cavité qui constituent le reste de l'accélérateur, les électrons subissent ensuite des effets connus accélérateurs et produits par ces cavités. Mais de plus on joue sur la position de la montée du champ dans la deuxième cavité pour ajouter un effet

radialement focalisant. Ceci était difficile dans l'état de la technique car le gain moyen d'énergie dans la première cellule était globalement plus fort et conduisait à des paquets plus rigides. On obtient alors la totalité des effets recherchés. Le groupement se produit dans la première partie de la première cavité, la capture à 100 % est provoquée par le champ accélérateur important de la deuxième partie de la première cavité qui s'exerce sur un regroupement en cours, et l'autofocalisation est obtenue par l'absence de défocalisation en sortie de la première cavité (et même une légère focalisation) combinée à la focalisation intense obtenue à l'entrée de la deuxième cavité. On remarque que ces trois effets se produisent dans deux cavités couplées successives.

En conséquence l'invention a pour objet un dispositif accélérateur de particules chargées comportant

- un canon pour injecter des particules,
- un arrangement de cavités accélératrices hyperfréquences situé en aval du canon, cet arrangement comportant dans le sens de l'injection, au moins une première puis une deuxième cavité, la longueur de la première cavité étant suffisante pour éviter toute défocalisation ou même pour provoquer un phénomène d'autofocalisation des particules avant leur sortie de cette première cavité,
- et de ce dispositif comportant en outre des moyens pour que le champ électrique hyperfréquence développé dans la première cavité soit inférieur au champ électrique hyperfréquence développé dans la deuxième cavité, et caractérisé en ce qu'il comporte
- des moyens pour imposer dans la première cavité une loi de champ électrique à profil dissymétrique par rapport à un plan moyen de cette première cavité, la valeur moyenne du champ dans une première partie de la première cavité étant inférieure à la valeur moyenne du champ dans une deuxième partie située en aval de cette première partie de cette première cavité.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui suit et à l'examen des figures qui l'accompagnent. Celles-ci ne sont données qu'à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention. Les figures montrent :

- figure 1 : un dispositif accélérateur linéaire conforme à l'invention;
 - figure 2 : des représentations de distributions de champ électrique réelles et idéales pour bien mettre en oeuvre l'effet de l'invention.
 - figure 3 : le trajet d'électrons critiques dans la première cavité;
 - figures 4, 5, et 6 : des représentations schématiques et en perspectives d'exemples de réalisations de la première cavité du dispositif de la figure 1.
- La figure 1 représente un dispositif accélérateur

de particules chargées conforme à l'invention. Les particules chargées sont ici essentiellement des électrons produits par un canon 1 comportant une cathode émissive 2 et une anode 3 creuse muni d'un trou 4 par lesquels les électrons émis peuvent être injectés dans un arrangement 5 de cellules accélératrices situées en aval. L'arrangement 5 comporte, dans le sens de l'injection, aligné selon un axe 6 d'accélération, un certain nombre de cavités accélératrices hyperfréquence. Les cavités sont situées en aval du canon, elles sont soumises à un champ électromagnétique hyperfréquence produit par une source non représentée appliquée, par exemple, par un couplage 7 de type radial dans l'une des cavités. L'alimentation en énergie électromagnétique hyperfréquence des cavités peut se faire par couplage entre les cavités au moyen d'iris tel que 8 et 9. Notamment ce couplage peut être magnétique. Ces iris sont situés par exemple respectivement entre une première cavité 10 et une seconde cavité 11, et entre cette deuxième cavité 11 et une troisième cavité 12. La cavité 12 reçoit l'énergie hyperfréquence. D'autres cavités telles que 13 peuvent encore être placées en aval : leur nombre et leur fonction dépendent de l'énergie requise pour le faisceau de particules accélérées au sortir de l'accélérateur.

Conformément à ce qui a été dit précédemment la première cavité 10 est légèrement plus longue que la longueur normale qu'elle devrait avoir si on voulait que tous les électrons la franchissent avant l'inversion de phase du champ hyperfréquence qui règne dans cette cavité 10. Sa longueur est par exemple du même ordre que celle évoquée dans la première demande de brevet précitée. Il se produit alors, à la sortie de cette première cavité, une refocalisation des électrons autour de l'axe 6. Par ailleurs l'iris 8 est dimensionné de telle façon que l'amplitude du champ électrique hyperfréquence qui règne dans la cavité 10, même là où il est le plus fort, est plus faible que l'amplitude du champ électrique qui règne dans la cavité 11. En pratique, conformément à ce qui a été dit précédemment, le rapport entre ces deux champs est de l'ordre de deux. On sait en calculant la surface de la section de l'iris 8 imposer des rapports d'amplitudes prédéterminés.

Selon l'invention, la première cavité présente essentiellement des moyens pour que le module du champ électrique dans cette première cavité ne soit pas symétrique par rapport à un plan moyen 14 de cette cavité. Par exemple un plan moyen 14 partage la cavité 10 longitudinalement en deux parties de longueurs sensiblement égales. En pratique la cavité comporte alors deux parties une première partie à gauche et une deuxième partie à droite de ce plan moyen. La partie à gauche 15 est de taille plus faible que la partie droite 16. La partie aval 16, quand elle est cylindrique circulaire, possède un diamètre 17 tel qu'il permet la résonance d'un mode TM_{01} du champ élec-

tromagnétique hyperfréquence dans cette cavité. Par contre la partie gauche 15 possède un diamètre 18 plus faible, par exemple moitié du diamètre 17, de manière à amortir cette résonance. Cette partie 15 constitue un guide à la coupure pour le mode de résonance établi dans la deuxième partie 16. En conséquence le champ électrique dans la première partie 15 est moins fort.

La figure 2 permet d'appréhender le phénomène physique mis en oeuvre dans l'invention. On a représenté sur cette figure les amplitudes E des champs électriques développés dans la première cavité 10 en fonction de l'abscisse d'un point dans cette cavité mesuré selon l'axe 6. Sur une courbe théorique idéale 19 représentée en tirets le champ électrique présente deux plateaux pour lesquels la valeur de l'amplitude vaut respectivement E_m et E_M . Les électrons injectés par le canon rencontrent d'abord la région 15 de la cavité 10 où le champ électrique a la valeur E_m . Ceci permet de regrouper longitudinalement les électrons sans les arrêter. En particulier les électrons arrivés les premiers peuvent être légèrement ralentis alors que les électrons arrivés les derniers sont légèrement accélérés de manière à regrouper ces électrons, de manière à constituer des paquets. Ce groupement est rendu aisé par l'énergie très modérée des électrons entrants. Ceci va dans le même sens que l'avantage recherché pour l'invention consistant à utiliser des canons à faible tension d'injection.

En effet comme tous les électrons vont lentement, on conçoit qu'il est plus facile de créer des importantes différences de vitesse entre ces électrons de manière à provoquer le regroupement attendu.

Il en résulte que tous ces électrons sont suffisamment regroupés au moment où ils entrent dans la deuxième partie 16 de la cavité 10. Dans cette deuxième partie règne un champ électrique fort. Les électrons y sont alors fortement accélérés. Il est intéressant de noter que dans ces conditions ils sont fortement accélérés mais de manière homogène du fait de leur regroupement préalable. Avant que les électrons n'aient franchi la sortie de la cavité 10 la phase du champ s'annule et même peut s'inverser et, pendant un très court instant, les électrons ne sont plus accélérés et même peuvent être ralentis pendant qu'ils sont alors refocalisés. On met ainsi en oeuvre l'effet technique décrit dans la première demande de brevet précitée. Cependant compte tenu, toutes proportions gardées, de la valeur modérée du champ électrique dans la deuxième partie de la première cavité ces électrons ont été suffisamment accélérés pendant leur traversée de cette deuxième partie pour franchir la barrière de potentiel constituée par l'inversion de phase.

Ils aboutissent alors dans la seconde cavité 11 en aval où le phénomène d'accélération proprement dit est mis en oeuvre par la grande amplitude du champ électrique développé dans cette seconde cavité. En

pratique le champ électrique accélérateur moyen développé dans la seconde cavité est de l'ordre de 20 Mv/m, il est de l'ordre de 10 Mv/m dans la deuxième partie de la première cavité, et il est de l'ordre de 5 Mv/m dans la première partie de la première cavité. La description de l'invention, donnée ici en référence à un couplage en mode π , n'exclut pas que cette invention puisse, avec les transpositions d'usage, être applicable à un mode de couplage différent.

En fait ces valeurs E_m et E_M correspondent à des valeurs théoriques idéales que l'on est bien loin de pouvoir réaliser en pratique. En effet la réalisation du guide à la coupure telle qu'indiquée ci-dessus ne permet pas d'avoir une distribution du champ électrique en deux plateaux. Elle ne permet seulement d'avoir qu'une progression relativement régulière du module de champ électrique en fonction de l'abscisse selon l'axe 6. Néanmoins, par rapport au plan moyen 14, il est très net que le champ électrique présente une dissymétrie : la partie située à gauche ayant une valeur moyenne E_m la partie située à droite étant soumise à un champ électrique de valeur moyenne E_M . Et les effets techniques attendus se produisent, mais ils ne sont plus totalement différenciés. On comprend que le regroupement est plus particulièrement favorisé dans la première partie alors que l'accélération est plus particulièrement favorisée dans la deuxième partie. Par exemple la courbe réelle du champ oscille légèrement autour d'un contour représenté par un triangle ayant une rampe de montée relativement lente 20 et une décroissance brutale 21 à proximité de la sortie de la cavité 10.

L'intérêt de disposer d'un plateau de valeur constante E_M par rapport à une rampe 20 se trouve dans l'amplitude de la composante radiale du champ électrique dans une zone critique d'abscisse Z_c . Cette zone est une zone critique en ce sens qu'elle correspond à l'endroit critique de la cavité où certains des électrons ont leur minima d'énergie cinétique. En effet la composante radiale (défocalisante) du champ est proportionnelle à la dérivée, selon l'abscisse sur l'axe 6, du champ électrique. Moins ce champ électrique évolue (plus il est plat), moins il est défocalisant.

En pratique il faut s'arranger pour que la première partie, celle où le champ est plus faible soit au moins aussi longue que celle où le champ est plus fort. On recherche également une forme concave de la loi du module du champ selon l'axe permettant d'associer une prémodulation sensible dès le début de la cavité, à une variation modeste de l'amplitude près de Z_c .

La modification de la forme de la cavité 1 pour lui adjoindre l'évidement 15 peut entraîner une modification de la fréquence de résonance de cette cavité. On maintient cette fréquence constante en accroissant légèrement le rayon 17 par rapport à la valeur qu'il devrait normalement avoir si cette cavité était de type classique. On augmente ainsi l'inductance en compensant la réduction de capacitance liée à l'ad-

jonction de l'évidement constitué par la partie 15.

En l'absence de tout champ magnétique supplémentaire, appliqué extérieurement pour focaliser les électrons, on note un contrôle imparfait de certains électrons dits critiques. Ce contrôle imparfait retentit en une divergence radiale. On peut y remédier en optimisant plus finement la géométrie de la première cavité, et en appliquant un léger champ magnétique focalisateur. On peut mieux comprendre la forte influence d'un champ magnétique même léger en analysant le mouvement d'un électron critique fortement ralenti, ou même arrêté, partant en sens inverse, puis arrêté de nouveau pour repartir en sens direct : c'est le cas d'une oscillation longitudinale.

La figure 3 représente une telle oscillation longitudinale. Elle représente l'analyse du mouvement d'un électron critique (un des premiers arrivés dans la première partie de la première cavité). On y a décomposé les vitesses, selon leurs composantes longitudinales et radiales, en divers points de la trajectoire électronique. On a également représenté le champ électrique E en tenant compte de son évolution temporelle, d'abord ralentisseur et défocalisant, puis accélérateur et focalisant. La particule est arrêtée deux fois longitudinalement, elle a une vitesse radiale défavorable presque tout le temps, ce qui entraîne un grand éloignement de l'axe. Cependant, l'adjonction d'un champ magnétique même faible fait tourner azimuthalement les électrons ce qui permet le contrôle radial. Le champ magnétique constant orienté longitudinalement peut alors être appliqué par tout moyens connus de l'état de la technique. En particulier un aimant circulaire 40, montré seulement en partie sur la figure 1, peut être adjoint.

Les figures 4 et 5 représentent en coupe schématiquement des variantes de réalisation de la première cavité. Sur la figure 4 la partie gauche de la cavité est nettement un évidement 22 pratiqué dans une cavité classique. Le diamètre de cette cavité classique doit être légèrement augmenté pour obtenir la même fréquence de résonance que celle de l'onde hyperfréquence injectée. Sur la figure 5 la partie gauche de la cavité 10, tout en ayant une surface de section plus faible que la partie droite (mesurée perpendiculairement à l'axe 6), est même séparée de cette dernière par un trou de couplage 23. Ce trou ce couplage doit être réalisé de telle façon qu'il n'occasionne aucun glissement de phase entre les ondes entretenues dans les deux parties de la cavité. Dans ce cas la figure 5 montre bien une cavité unique et non deux cavités couplées comme celles décrites dans les demandes de brevet précitées. La figure 6 représente en perspective l'allure préférée de la cavité représentée sur la figure 1. Dans ce cas il n'y a pas de trou de couplage 23. Les parties amont et aval de cette première cavité présentent chacune une longueur 24 et 25 sensiblement égales entre elles. Le rayon 26 de la partie de gauche est inférieur de moitié au rayon 27

de la partie de droite. La présence d'un nez de cavité 28 (figure 1) en sortie de cette première cavité a pour effet, un peu à la manière d'un effet de pointe, de provoquer une concentration des lignes de champ électrique dirigées sur ce nez. Ceci a globalement en

outre un effet focalisateur.

Du fait de l'allure globalement croissante du champ électrique à l'intérieur de la première cavité, quand on se déplace selon l'axe 6, il en résulte une défocalisation dont on a parlé plus haut. On peut provoquer une autofocalisation en ne laissant sortir les électrons qu'après que le champ électrique se soit inversé pour devenir ralentisseur et focalisateur. On peut surtout augmenter l'effet de convergence en n'autorisant la pénétration de ces électrons dans la cavité suivante 11 que lorsque le champ dans cette cavité est fortement convergent. En pratique il faut attendre que la phase de ce champ dans la cavité 11 ait pris un peu d'avance pour que l'amplitude instantanée de ce champ soit alors significative. Dans ce but on relie la première cavité 10 à la seconde cavité 11 par un espace de glissement 29 dont la longueur est suffisante pour retarder l'entrée du paquet d'électrons par rapport à l'évolution de la phase du signal hyperfréquence dans la deuxième cavité.

En pratique la longueur de l'espace de glissement 29 doit assurer une amplitude accélératrice à l'entrée de la deuxième cavité supérieure à la moitié de l'amplitude maximum. Ceci entraîne que l'espace 29 vaut sensiblement un huitième de longueur d'onde si on a juste annulé toute composante radiale défocalisante lorsque le faisceau sort de la première cavité. Cette valeur est tout à fait raisonnable et bien adaptée aux épaisseurs d'iris et de becs pratiquement utilisés.

En pratique avec l'invention on a ainsi pu obtenir des taux de capture de l'ordre de 75 % avec des canons à électrons de 40 KV, et ceci en améliorant le contrôle radial par rapport aux réalisations antérieures. Les densités de courant obtenues en section de faisceau accéléré ont été accrues par un facteur estimé à cinq.

Revendications

1- Dispositif accélérateur de particules chargées comportant

- un canon (1) pour injecter des particules,
- un arrangement (5) de cavités (10-13) accélératrices hyperfréquences situées en aval du canon, cet arrangement comportant, dans le sens (6) de l'injection, au moins une première (10) puis une deuxième (11) cavité, la longueur (L_1) de la première cavité étant suffisante pour éviter toute défocalisation ou même pour provoquer un phénomène d'autofocalisation des particules avant leur sortie de cette première cavité,
- et ce dispositif comportant en outre des moyens

(8, 9) pour que le champ électrique hyperfréquence développé dans la première cavité soit inférieur au champ électrique hyperfréquence développé dans la deuxième cavité, caractérisé en ce qu'il comporte,

– des moyens (17, 18) pour imposer dans la première cavité une loi de champ électrique à profil dissymétrique par rapport à un plan moyen (14) de cette première cavité, la valeur moyenne (E_m) du champ dans une première partie (15) de la première cavité étant inférieure à la valeur moyenne (E_M) du champ dans une deuxième partie (16) située en aval de cette première partie de cette première cavité.

2- Dispositif selon la revendication 1 caractérisé en ce que la longueur de la première partie (15) est plus grande que la longueur de la deuxième partie (16) de la première cavité.

3- Dispositif selon l'une quelconques des revendications 1 ou 2 caractérisé en ce que la surface (18) de la section de la première cavité dans la première partie est inférieure à la surface (17) de la section de la cavité dans la deuxième partie.

4- Dispositif selon l'une quelconques des revendications 1 à 3 caractérisé en ce que la première partie constitue un guide à la coupure pour un mode de résonance du champ dans la deuxième partie.

5- Dispositif selon l'une quelconques des revendications 1 à 4 caractérisé en ce que les deux cavités (10, 11) sont séparées par un espace (8) de glissement plus long que le huitième de la longueur d'onde pour bénéficier, en mode de couplage π , d'une autofocalisation du champ à l'entrée de la deuxième cellule.

6- Dispositif selon l'une quelconques des revendications 1 à 5 caractérisé en ce que la première cavité (10) est munie en outre de moyens (40) magnétiques de focalisation.

Patentansprüche

1. Beschleunigungsapparat für geladene Teilchen
 - mit einer Kanone (1) zum Einführen der Teilchen,
 - einer Anordnung (5) mit vor der Kanone angeordneten Ultrahochfrequenz-Beschleunigungshohlräumen (10 bis 13), wobei die Anordnung in Richtung (6) der Einführung gesehen mindestens einen ersten (10) und dann einen zweiten (11) Hohlraum umfaßt, wobei die Länge (L_1) des ersten Hohlraumes ausreicht, um jegliche Entfokussierung zu vermeiden oder sogar um ein Phänomen der Selbstfokussierung der Teilchen zu veranlassen, ehe diese den ersten Hohlraum verlassen,
 - und wobei der Apparat weiterhin Einrichtungen

- gen (8 und 9) umfaßt, die bewirken, daß das im ersten Hohlraum entwickelte elektrische Ultrahochfrequenzfeld geringer ist als das im zweiten Hohlraum entwickelte elektrische Ultrahochfrequenzfeld, dadurch gekennzeichnet, daß er
- Einrichtungen (17 und 18) umfaßt, um im ersten Hohlraum eine in bezug auf eine mittlere Ebene (14) dieses ersten Hohlraumes unsymmetrischen profilierte Funktion des elektrischen Feldes einzurichten, wobei der Mittelwert (E_m) des Feldes in einer ersten Partie (15) des ersten Hohlraums geringer ist als der Mittelwert (E_m) des Feldes in einer zweiten nach dieser ersten Partie dieses ersten Hohlraumes gelegenen Partie (16).
2. Apparat nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Länge der ersten Partie (15) größer ist als die Länge der zweiten Partie (16) des ersten Hohlraumes.
 3. Apparat nach Anspruch 1 oder nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Fläche (18) des Querschnittes des ersten Hohlraumes in der ersten Partie geringer ist als die Fläche (17) des Querschnittes des Hohlraumes in der zweiten Partie.
 4. Apparat nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die erste Partie eine Schnittführung für einen Feldresonanzmodus in der zweiten Partie bildet.
 5. Apparat nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die zwei Hohlräume (10 und 11) durch einen Gleitraum (8) voneinander getrennt sind, der länger ist als ein achtel der Wellenlänge, um in dem π -Koppelungsmodus eine Selbstfokussierung des Feldes am Eingang der zweiten Zelle zu begünstigen.
 6. Apparat nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß der erste Hohlraum (10) weiterhin mit magnetischen Fokussiereinrichtungen (40) versehen ist.
- the length (L_1) of the first cavity being sufficient to avoid any de-focalization or even to bring about an auto-focalization phenomenon for the particles emerging from this first cavity;
- this accelerator also comprising means (8,9) to ensure that the hyper-frequent electrical field developed in the first cavity is below the hyperfrequent electric field developed in the second cavity;
- characterized in that it comprises
- means (17,18) to impose an electric field law by which the profile is asymmetrical in respect of median plane (14) of the said first cavity, the average value (E_m) of the field in a first part (15) of the first cavity being below the average value (E_m) of the field in a second part (16) situated downstream from the said first part of the first cavity.
2. Accelerator according to Claim 1, characterized in that the length of the first part (15) is greater than the length of the second part (16) of the first cavity.
 3. Accelerator according to either of Claims 1, 2, characterized in that the surface area (18) of the section of the first cavity in the first part is smaller than the surface area (17) of the section of the cavity in the second part.
 4. Accelerator according to either of Claims 1-3, characterized by in that the first part constitutes a guide for the cutting for a resonance mode of the field in the second part.
 5. Accelerator according to any one of Claims 1, characterized in that the two cavities (10, 11) are separated by a slide path (8) longer than one eighth of the wave length, in order to provide the advantage, in the coupling mode, of an auto-focalization of the field at the entry into the second cell.
 6. Accelerator according to either of Claims 1-5, characterized in that the first cavity (10) is equipped in addition with means for magnetic focalization.

Claims

1. Accelerator for charged particles, comprising
 - a gun (1) for injecting the particles;
 - an arrangement (5) of hyper-frequent accelerator cavities (10-13) situated downstream from the gun, this arrangement comprising, in the injection direction (6), at least a first (10) and then a second (11) cavity,



