



(11) **EP 2 410 823 B1**

(12) **FASCICULE DE BREVET EUROPEEN**

(45) Date de publication et mention
de la délivrance du brevet:
28.11.2012 Bulletin 2012/48

(51) Int Cl.:
H05H 7/02 (2006.01) **H05H 7/18** (2006.01)
H05H 13/00 (2006.01)

(21) Numéro de dépôt: **10170531.7**

(22) Date de dépôt: **22.07.2010**

(54) **Cyclotron apte à accélérer au moins deux types de particules**

Zyklotron, das in der Lage ist, mindestens zwei Teilchentypen zu beschleunigen

Cyclotron for accelerating at least two kinds of particles

(84) Etats contractants désignés:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO SE SI SK SM TR**

(43) Date de publication de la demande:
25.01.2012 Bulletin 2012/04

(73) Titulaire: **Ion Beam Applications
1348 Louvain-la-Neuve (BE)**

(72) Inventeur: **Abs, Michel
BE-5032 Bossière (BE)**

(74) Mandataire: **De Groote, Christophe
Pecher & de Groote sprl
Centre Monnet
Avenue Jean Monnet, 1
1348 Louvain-la-Neuve (BE)**

(56) Documents cités:
**WO-A1-86/06924 JP-A- 63 307 699
US-A- 4 345 210**

- **M.EICHE ET AL.:** "Dual Frequency Resonator System for a Compact Cyclotron", PROC. XIII INTERN. CONF. ON CYCLOTRONS AND THEIR APPLICATIONS, CYCLOTRON 92', 6 juillet 1992 (1992-07-06), - 10 juillet 1992 (1992-07-10), pages 1-4, XP002615079, Singapore
- **LANZ P ET AL:** "A dual frequency resonator", PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE, PROCEEDINGS OF THE 1993 WASHINGTON, DC, USA, 17 mai 1993 (1993-05-17), - 20 mai 1993 (1993-05-20), pages 1151-1153, XP010112800, DOI: 10.1109/PAC.1993.308659 ISBN: 978-0-7803-1203-6

EP 2 410 823 B1

Il est rappelé que: Dans un délai de neuf mois à compter de la publication de la mention de la délivrance du brevet européen au Bulletin européen des brevets, toute personne peut faire opposition à ce brevet auprès de l'Office européen des brevets, conformément au règlement d'exécution. L'opposition n'est réputée formée qu'après le paiement de la taxe d'opposition. (Art. 99(1) Convention sur le brevet européen).

Description

DOMAINE TECHNIQUE

[0001] La présente invention se rapporte au domaine des cyclotrons, et en particulier aux cyclotrons capables d'accélérer plusieurs types de particules chargées présentant des rapports charge(q)/masse(m) différents, tels que par exemple des protons (rapport q/m égal à 1), des particules alpha (rapport q/m égal à 1/2) ou des deutons (rapport q/m également égal à 1/2).

DESCRIPTION DE L'ART ANTÉRIEUR

[0002] On connaît par le document WO8606924 un cyclotron. En référence à la figure 2 de ce document, un tel cyclotron comporte des électrodes d'accélération 28, communément appelées dés, couplées chacune à un pilier vertical 29 aussi appelé stem. Ledit dé 28 et ledit pilier 29 sont entourés d'une enceinte conductrice qui, ensemble, constituent une cavité résonante.

[0003] Les cavités résonantes sont généralement excitées par une source de puissance RF et le passage successif des particules chargées dans le gap accélérateur constitué des dés et des secteurs portés à des potentiels différents produit l'accélération des dites particules. La fréquence de la tension RF appliquée doit être égale à la « fréquence cyclotron » exprimée par l'équation suivante:

$$f_{RFcyc} = \frac{q \cdot \vec{B}}{2 \cdot \pi \cdot m}$$

où q est la charge de la particule à accélérer, m sa masse et $\vec{B}$ le champ magnétique principal, normal au plan médian de circulation des particules. Un cyclotron peut également fonctionner en mode harmonique : dans ce cas plusieurs oscillations de la tension RF se produisent alors que les particules circulent encore à l'intérieur du dé.

[0004] Dans le cas de ces cavités connues, on est en présence d'un résonateur $\frac{\lambda}{4}$ chargé par la capacité de dé à

une extrémité, son autre extrémité étant court-circuitée. Le pilier forme une ligne de transmission axiale se comportant essentiellement comme une inductance destinée à compenser l'impédance capacitive du dé afin de minimiser la puissance RF réactive. En fonction de la configuration du cyclotron, les cavités sont disposées asymétriquement ou symétriquement par rapport au plan médian de circulation des particules. Dans le cas d'une topologie asymétrique (figure 1a de la présente demande), les deux plaques constituant le dé sont mécaniquement et électriquement solidaires et constituent un seul ensemble porté par le pilier. Dans le cas d'une topologie symétrique (figure 1b de la présente demande), les piliers inférieur et supérieur supportent respectivement le demi-dé inférieur et le demi-dé supérieur. Ces derniers sont reliés électriquement entre eux en quelques endroits de leur périmètre dès que le cyclotron est fermé.

[0005] Le dé fait partie d'une cavité résonante 5 tel que représentée schématiquement à la figure 1 a. Cette cavité comporte le dé proprement dit 10, un pilier cylindrique vertical 20 et une enceinte conductrice 40. La figure 1c représente un schéma électrique équivalent de la cavité, dans lequel l'inductance L représente le pilier 20 et la capacité C est celle formée au niveau de l'espace compris entre le dé 10 et l'enceinte conductrice 40. La fréquence de résonance propre d'un tel circuit LC parallèle est donnée par l'expression :

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

[0006] Afin de pouvoir accélérer plusieurs types de particules de rapports q/m différents dans un même cyclotron, le champ $\vec{B}$ étant déterminé, plusieurs solutions se présentent :

- a) utiliser des modes harmoniques différents tout en conservant la fréquence RF identique
- b) utiliser le même mode harmonique tout en variant la fréquence RF

La première solution comporte les désavantages suivants:

- une complexité accrue de la région centrale du cyclotron
- à haut courant, des pertes de faisceau à l'intérieur de la machine provoquant l'activation de pièces mécaniques.

En revanche, la seconde solution présente les avantages suivants:

- un même centrage des particules de masse différentes qui suivront donc une trajectoire similaire, au moins dans les premiers tours à basse énergie
- moins de pertes de faisceau réduisant ainsi l'activation des pièces mécaniques situées à proximité de la trajectoire du faisceau
- un meilleur gain par tour pour les particules de rapport $q/m=1$
- un meilleur isochronisme.

[0007] La mise en oeuvre de cette seconde solution impose de pouvoir modifier la fréquence de résonance de la cavité constituée par le dé, le pilier et l'enceinte conductrice. De telles solutions ont été proposées par M. Eiche et al. (« Dual Frequency resonator system for a compact cyclotron », Proc. XIII Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, (World Scientific, Singapore, 1992, p. 515), par P. Lanz et al. ("A dual Frequency Resonator", Proceedings of the 1993 IEEE Particle Accelerator Conference, 17-20 May 1993, Washington, DC ; 15th IEEE Particle Accelerator Conference, p.1151), et par Miura Iwao et al. (« Accelerating Résonance Cavity », JP07-066877B, 1995).

Les deux premiers auteurs réalisent le changement de fréquence RF à l'aide de courts-circuits glissants, actionnés à l'aide de pistons, destinés à modifier la longueur du résonateur. Le dernier auteur procède au changement de fréquence RF grâce à des plaques mobiles pivotant de 90° qui modifient la capacité des électrodes et donc la fréquence de résonance.

[0008] Cette modification de la fréquence de résonance requiert une structure RF relativement complexe et onéreuse, à laquelle s'ajoutent des problèmes de fiabilité. En effet, les dispositifs de l'art antérieur présentent certains désavantages listés ci-après :

a. pour les courts-circuits mobiles :

- la taille du piston est en rapport avec celle du court-circuit car celui-ci exerce une force de friction non négligeable sur les parois du résonateur ;
- l'usure causée par les mouvements linéaires répétés du court-circuit lors des changements de fréquence. A terme, la dégradation de l'état de surface des contacts et/ou de la paroi sur laquelle ils glissent entraîne l'apparition de points plus résistifs qui dès lors qu'ils sont parcourus par des courants RF provoquent un échauffement localisé ;
- la destruction pure et simple du court-circuit lorsque la pression exercée par celui-ci sur les parois n'est plus suffisante. Le cas échéant, la résistance de contact étant devenue trop importante eu égard aux courants RF à transporter entraîne ainsi une élévation de température qui peut provoquer la fusion des contacts.

b. pour les plaques mobiles :

- l'axe de rotation des plaques nécessite la traversée de la partie sous vide du cyclotron afin d'assurer sa connexion sur le piston ou sur le moteur qui l'entraîne. Si ces derniers étaient contenus dans le vide, il faudrait néanmoins les alimenter électriquement ce qui nécessite quand même une traversée de câble vers l'extérieur.
- le facteur de qualité de la cavité dans la fréquence basse est assez mauvais dû aux courants RF importants passant dans cette capacité mobile. La stabilité en fréquence peut également être problématique.

RESUME DE L'INVENTION

[0009] La présente invention a pour but de résoudre au moins partiellement les difficultés précitées.

[0010] Selon un premier aspect, la présente invention concerne une cavité résonante pour l'accélération de particules chargées dans un cyclotron, comprenant un dé, un pilier et une enceinte conductrice englobant au moins partiellement ledit pilier et ledit dé, une extrémité dudit pilier supportant le dé, l'enceinte conductrice et le pilier formant ainsi une ligne de transmission, une extrémité opposée dudit pilier étant solidaire d'une base de l'enceinte conductrice, caractérisé en ce que la capacité linéique d'une portion intermédiaire de ladite ligne de transmission située entre lesdites extrémités du pilier est substantiellement plus grande que la capacité linéique des autres portions de ladite ligne de transmission.

[0011] Une telle configuration permet en effet de faire résonner la cavité selon deux modes produisant ainsi deux fréquences distinctes, sans devoir faire usage d'éléments mobiles tels que par exemple des courts-circuits glissants ou des plaques mobiles, ce qui résout bon nombre des problèmes évoqués précédemment.

[0012] De préférence, la capacité linéique de la portion intermédiaire de la ligne de transmission est plus grande que deux fois la capacité linéique des autres portions de ladite ligne de transmission. De manière plus préférée, la capacité linéique de la portion intermédiaire de la ligne de transmission est plus grande que dix fois la capacité linéique des autres portions de ladite ligne de transmission.

[0013] De manière encore plus préférée, l'impédance caractéristique de la portion intermédiaire et les impédances caractéristiques des autres portions de la ligne de transmission sont telles que la cavité est apte à résonner selon deux modes pour produire deux fréquences distinctes dans un rapport substantiellement double.

Par substantiellement double, il faut comprendre un rapport de fréquences se situant entre 1,7 et 2,3.

Une telle cavité permet en effet d'accélérer, dans un même cyclotron, des particules ayant des valeurs de q/m dans un rapport de deux, tel que par exemple des protons et des particules alpha ou des protons et des deutons.

[0014] De manière encore plus préférée, le pilier comporte plusieurs cylindres superposés, un de ces cylindres correspondant à ladite portion intermédiaire de la ligne de transmission et possédant un diamètre moyen substantiellement supérieur au diamètre moyen des autres cylindres. Alternativement ou conjointement, l'enceinte conductrice comporte plusieurs cylindres creux superposés, un de ces cylindres creux correspondant à ladite portion intermédiaire de la ligne de transmission et possédant un diamètre moyen substantiellement inférieur au diamètre moyen des autres cylindres creux. Une telle configuration cylindrique du pilier et/ou de l'enceinte conductrice permet en effet d'obtenir une bonne rigidité mécanique de l'ensemble, de faciliter sa construction et d'assurer une bonne répartition des équipotentielles du champ électrique depuis le pilier.

[0015] Selon un second aspect, l'invention concerne une méthode de conception d'une cavité résonante bi-fréquence telle que revendiquée.

[0016] Ces aspects ainsi que d'autres aspects de l'invention seront clarifiés dans la description détaillée de modes de réalisation particuliers de l'invention.

BRÈVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0017] Les figures sont données à titre indicatif et ne constituent pas de limitation de la présente invention. Par ailleurs, les proportions des dessins ne sont pas respectées. Des composants identiques ou analogues sont généralement désignés par les mêmes numéros de référence parmi l'ensemble des figures.

[0018] La figure 1a représente une coupe d'une cavité résonante asymétrique d'un cyclotron de l'art antérieur ;

[0019] La figure 1b représente une coupe d'une cavité résonante symétrique d'un cyclotron de l'art antérieur ;

[0020] La figure 1c représente un schéma électrique équivalent simplifié de la cavité résonante de la figure 1a ou 1b ;

[0021] La figure 2a représente schématiquement une coupe d'une cavité selon l'invention avec indication de la circulation du courant et du champ magnétique lors de la résonance à la fréquence basse ;

[0022] La figure 2b représente l'évolution de la tension et du courant le long du pilier lors du fonctionnement de la cavité de la figure 2a en mode $\frac{\lambda}{4}$;

[0023] La figure 2c représente un schéma électrique équivalent simplifié de la cavité résonante de la figure 2a ;

[0024] La figure 3a représente schématiquement une coupe d'une cavité résonante selon l'invention avec indication de la circulation des courants et des champs magnétiques lors de la résonance à la fréquence haute ;

[0025] La figure 3b représente l'évolution de la tension et du courant le long du pilier lors du fonctionnement de la cavité de la figure 3a en mode $\frac{3\lambda}{4}$;

[0026] La figure 3c représente un schéma électrique équivalent simplifié de la cavité résonante de la figure 3a ;

[0027] La figure 4a représente une forme géométrique réelle et une répartition des équipotentielles d'un champ électrique statique d'une cavité de l'art antérieur ;

[0028] La figure 4b schématise une cavité de l'art antérieur sous forme d'une ligne de transmission coaxiale dont l'impédance caractéristique est fonction des diamètres d et D ;

[0029] La figure 5 représente un graphe illustrant la puissance dissipée dans une cavité résonante suivant l'invention pour chacune des deux fréquences de résonance en fonction de la valeur de la capacité de la portion de ligne à basse impédance caractéristique ;

[0030] La figure 6a représente un diagramme d'impédance d'un pilier dans un mode de réalisation de l'invention ;

[0031] La figure 6b représente schématiquement une coupe de la cavité suivant l'invention, à mettre en rapport avec le diagramme d'impédance de la figure 6a ;

[0032] La figure 7 représente une coupe d'un cyclotron bi-fréquence équipé de quatre cavités selon l'invention ;

[0033] La figure 8 représente schématiquement un graphe montrant les deux fréquences distinctes dans un rapport double obtenues par balayage en fréquence d'une cavité selon l'invention.

DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE MODES DE RÉALISATION

[0034] La figure 2a représente schématiquement un exemple de réalisation d'une cavité bi-fréquence selon l'invention. Il s'agit ici d'une cavité symétrique par rapport au plan médian du cyclotron (représenté par une ligne pointillée mixte sur la figure), mais il est évident qu'une cavité asymétrique conviendrait également. La cavité 6 comporte deux demi-dés 10 et 10' reliés ensemble électriquement et entre lesquels circuleront les particules à accélérer, deux piliers comportant chacun trois portions 20a, 20b et 20c (20a', 20b' et 20c'), et deux enceintes conductrices 40 et 40' entourant le tout. Les enceintes ont une section transversale qui, dans cet exemple, est substantiellement constante sur la hauteur des piliers. Chaque pilier supporte respectivement un demi-dé à une extrémité, les extrémités opposées étant respectivement connectées électriquement aux bases 45 et 45' des enceintes conductrices 40 et 40' pour constituer un court-circuit du point de vue radiofréquence. Les différentes portions du pilier sont superposées et de préférence alignées suivant un même axe. Lesdites portions sont constituées, dans cet exemple, de tubes cylindriques de différents diamètres dont des exemples de dimensions seront donnés ci-après lorsque sera décrite une méthode de conception d'une cavité selon l'invention. Le diamètre de la portion intermédiaire 20b est substantiellement plus grand que le diamètre des deux autres portions 20a et 20c, de sorte que la capacité linéique (en Farad par mètre) de cette portion intermédiaire 20b est substantiellement plus grande que la capacité linéique des deux autres portions 20a et 20c. En conséquence, la portion intermédiaire 20b aura un comportement essentiellement capacitif alors que les autres portions 20a et 20c auront un comportement essentiellement inductif, dans la gamme de fréquences de fonctionnement de la cavité (qui se situe dans les mégahertz).

[0035] Un schéma électrique équivalent simplifié d'une telle cavité est présenté à la figure 2c.

[0036] Un premier type de fonctionnement est obtenu en excitant la cavité en mode $\frac{\lambda}{4}$ (λ étant la longueur d'onde), ce qui permet d'obtenir une première fréquence de résonance (ci-après « la fréquence de résonance basse », par exemple 33 MHz).

La figure 2b représente l'évolution de la tension (U_x) et du courant (I_x) dans ce mode en fonction d'une position axiale x le long du pilier. La tension est maximale au niveau du dé tandis que le courant correspondant y est nul ou très faible. Cela s'inverse lorsqu'on se ramène au pied du pilier. Cette configuration de tension convient particulièrement bien pour accélérer des particules évoluant dans le plan médian d'un cyclotron.

[0037] Le champ magnétique $\vec{B}$ est orienté identiquement de part et d'autre de la portion intermédiaire 20b (ci-après « la ligne à faible impédance 20b »). Le courant résultant I_1 de ce mode circule axialement et se répartit radialement autour du pilier tel que représenté à la figure 2a.

[0038] Un second type de fonctionnement est illustré à la figure 3a. La structure physique est identique à celle de la

figure 2a mais on excite le mode $\frac{3\lambda}{4}$, ce qui permet d'obtenir une deuxième fréquence de résonance (ci-après « la fréquence de résonance haute », par exemple 66 MHz), plus élevée que la première fréquence. La figure 3b représente l'évolution de la tension (U_x) et du courant (I_x) dans ce mode et, de manière identique au premier mode de résonance, la tension est toujours maximale au niveau du dé tandis que le courant correspondant y est nul ou très faible. Par ailleurs, le courant s'inverse en un point intermédiaire situé environ à mi-hauteur de la ligne faible impédance 20b, ce qui a pour effet de diviser l'effet capacitif de cette portion de ligne 20b en deux.

[0039] Compte tenu de ce qui précède, le champ magnétique $\vec{B}$ est en opposition de part et d'autre de ce point intermédiaire. La figure 3c représente un schéma électrique équivalent simplifié avec la circulation des courants i_2 et i_3 respectivement présents dans la partie supérieure et inférieure de la demi-cavité. Ils se répartissent radialement autour du pilier, en opposition par rapport à un plan horizontal virtuel partageant transversalement la ligne faible impédance 20b, dans lequel ils s'annulent.

[0040] Il apparaîtra évident pour l'homme du métier que bien d'autres configurations géométriques de la cavité sont possibles, du moment qu'une portion intermédiaire de la cavité présente une capacité linéique substantiellement supérieure à la capacité linéique des autres portions, de préférence supérieure à deux fois la capacité linéique des autres portions, de manière encore plus préférée supérieure à dix fois la capacité linéique des autres portions. On pourrait ainsi alternativement prévoir un pilier de section constante sur sa hauteur et une enceinte conductrice présentant une portion intermédiaire de section substantiellement plus petite que celle des autres portions. On pourrait aussi prévoir une combinaison de ces deux solutions, à savoir une enceinte comportant un rétrécissement intermédiaire et un pilier comportant un élargissement intermédiaire, comme illustré par exemple aux figures 6b et 7, ou toute autre combinaison.

[0041] Une méthode de calcul permettant la conception et le dimensionnement d'une structure d'une cavité selon l'invention est fournie ci-après.

[0042] Préalablement au calcul de la cavité bi-fréquence suivant l'invention, une modélisation d'une cavité connue telle que décrite dans le document WO8606924 - c'est-à-dire une cavité dont le pilier et l'enceinte conductrice présentent

une section constante - est réalisée suivant une méthode décrite ci-après afin de déterminer précisément le diamètre d'un dé équivalent, supposé circulaire, et l'impédance du pilier d'une telle cavité connue :

1. calcul de la capacité linéique du pilier d'une cavité dont le pilier et l'enceinte conductrice présentent une section constante, permettant de déduire l'impédance caractéristique de la ligne de transmission ainsi formée par ledit pilier et l'enceinte conductrice ;
2. calcul de l'impédance caractéristique pour différents diamètres de pilier ;
3. détermination du diamètre extérieur moyen équivalent de l'enceinte conductrice ;
4. simulation électromagnétique 2D de la cavité s'appuyant sur les dimensions trouvées précédemment et détermination du diamètre d'un dé équivalent, supposé circulaire, produisant la même fréquence de résonance que ladite cavité de l'art antérieur ;
5. calcul des paramètres intrinsèques de la cavité, tels que le facteur de qualité Q, la puissance dissipée, l'énergie stockée et comparaison des résultats avec des valeurs mesurées.

Détails de l'étape 1

[0043] On évalue l'impédance caractéristique du pilier connu, par exemple à l'aide du programme Tricomp de la société Field Precision LLC. Ce programme résout le champ électrique par la méthode des éléments finis.

La figure 4a montre par exemple la répartition des équipotentielles de champ électrique obtenues en appliquant une tension de 1 V sur un pilier connu de diamètre $d = 90$ mm, tandis que l'enceinte conductrice est au potentiel de la masse. On obtient une énergie stockée de 18,53 pJ/m.

[0044] On obtient ensuite la valeur de la capacité C à partir de l'expression :

$$E = \frac{C \cdot V^2}{2}$$

, ce qui donne $C = 37,06$ pF/m dans le cas de l'exemple.

[0045] Ensuite, en combinant les deux expressions suivantes:

$$Z_c = \sqrt{L/C} \text{ et } c_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \text{ avec } c_0 = \text{vitesse de la lumière,}$$

[0046] l'expression de l'impédance caractéristique Z_c peut se réécrire sous la forme :

$$Z_c = \frac{1}{C \cdot c_0}$$

, de laquelle on obtient une valeur de Z_c , qui vaut 90,1 ohms dans le cas de l'exemple.

Détails de l'étape 2

[0047] Le même calcul d'impédance caractéristique est effectué pour d'autres diamètres de pilier. On obtient ainsi par exemple les valeurs suivantes :

- pour $d = 100$ mm : $C = 39,88$ pF/m et $Z_c = 83,58$ ohms
- pour $d = 80$ mm : $C = 34,36$ pF/m, $Z_c = 97,01$ ohms

Détails de l'étape 3

[0048] L'enceinte conductrice connue n'ayant pas nécessairement une section circulaire (comme on le voit par exemple sur la figure 4a qui montre une section plus ou moins triangulaire pour l'exemple d'enceinte connue), on détermine ensuite un diamètre moyen équivalent D (voir figure 4b) de cette enceinte conductrice par l'expression suivante :

$$D = d \cdot e^{\left(\frac{Z_c}{60}\right)}$$

Pour l'exemple fourni, cela donne : $D = 404,02$ mm pour un diamètre de pilier de $d = 90$ mm.

En effectuant par ailleurs le même calcul avec les données obtenues à l'étape 2, on remarque que D ne varie quasi pas pour différents diamètres de pilier. On obtient en effet que $D = 402,69$ pour $d = 100$ mm, et que $D = 402,97$ pour $d = 80$ mm. Nous choisissons dans cet exemple la valeur de $D = 400$ mm (+/- 3mm sont alloués à l'épaisseur de cuivre de l'enceinte conductrice).

Détails de l'étape 4

[0049] Afin de déterminer le diamètre d'un dé équivalent, supposé circulaire, produisant la même fréquence de résonance que ladite cavité de l'art antérieur, on procède à une simulation électromagnétique 2D de la cavité s'appuyant sur les dimensions trouvées précédemment, par exemple au moyen du programme Wavesim de la société Field Precision LLC. On procède ainsi par approximations successives jusqu'à obtenir la bonne fréquence de résonance.

[0050] Dans le cas de l'exemple, on trouve un diamètre équivalent du dé de 378 mm pour une fréquence de résonance de $f_0 = 66$ MHz (mesurée sur la cavité réelle).

Détails de l'étape 5

[0051] On détermine ensuite les courants de surface dans la cavité de manière à évaluer la puissance dissipée et le facteur de qualité. Ceci peut par exemple aussi s'effectuer au moyen du programme Wavesim.

[0052] Pour une tension de 50 kV présente dans le gap accélérateur, la puissance dissipée dans une cavité connue selon l'exemple fourni est de 1300 W et le facteur de qualité Q est de 10600.

Ces valeurs serviront de points de repère pour les étapes ultérieures.

[0053] Les valeurs numériques obtenues lors de ces cinq premières étapes permettent ensuite le calcul de la structure d'une cavité bi-fréquence selon l'invention. Les étapes suivantes de la méthode de calcul selon l'invention concernent,

à titre d'exemple, une cavité selon les figures 2a et 3a et exploitant deux modes résonants : un premier mode à $\frac{\lambda}{4}$ pour

une fréquence basse d'environ 33 MHz et un second mode à $\frac{3\lambda}{4}$ pour une fréquence haute d'environ 66 MHz. Il sera

évident pour l'homme du métier d'adapter ce qu'il est nécessaire d'adapter à ces étapes suivantes pour d'autres fréquences et/ou d'autres rapports de fréquence.

[0054] La forme d'une cavité bi-fréquence selon l'invention est déterminée par plusieurs composants physiques dont les caractéristiques suivantes peuvent être obtenues, et de préférence optimisées, par exemple à l'aide du logiciel de simulation radiofréquence Genesys de la société Agilent :

- l'impédance caractéristique et la longueur de la ligne 20c ;
- l'impédance caractéristique et la longueur de la ligne faible impédance 20b, assimilable à un condensateur ;
- l'impédance caractéristique et la longueur de la ligne 20a.

[0055] Une fois ces éléments déterminés, on procède de préférence à une optimisation finale de la cavité bi-fréquence par simulation électromagnétique 2D, par exemple à l'aide du programme Wavesim. On y examine la variation de la fréquence de résonance en fonction de la variation des caractéristiques géométriques des différentes portions du pilier. En particulier, le point le plus délicat est l'optimisation de la ligne à faible impédance 20b. En effet, si sa capacité est choisie trop faible, la dissipation à la fréquence haute (p.ex. à 66MHz) est importante, de même que la tension développée à cet endroit, dans certains cas aussi importante que celle présente sur le dé. En augmentant la valeur de la capacité, la tension diminue de même que la puissance dissipée dans le bas de la cavité. En tenant compte de la valeur maximale admissible du champ électrique ainsi que de la valeur de la capacité permettant d'obtenir le rapport de fréquence souhaité, par exemple un rapport double (point référencé C_{min}), on détermine de préférence un point optimal C_{opt} pour lequel la puissance dissipée est quasi identique aux deux fréquences de résonance, comme l'illustre la figure 5.

[0056] Une multitude de solutions existent. Cependant certains critères techniques ont guidés la conception d'une cavité plus préférée selon l'invention :

- i. avoir un pilier de diamètre supérieur ou égale à 80 mm dans la portion 20c pour des raisons de rigidité mécanique ;
- ii. avoir une longueur totale du pilier la plus courte possible ;
- iii. prolonger la ligne faible impédance 20b hors de la culasse du cyclotron, permettant ainsi une injection de la puissance RF et un accord cavité optimum ;
- iv. permettre une puissance RF d'excitation des cavités aussi basse que possible, en particulier à la fréquence haute (p.ex. à 66 MHz), afin d'avoir une réserve pour l'accélération du faisceau de particules.

[0057] En appliquant la méthode ci-dessus, on obtient finalement les dimensions préférées suivantes pour le pilier :

- portion 20c (en deux parties) :

- première partie : diamètre = 80 mm, longueur = 520 mm, $Z_c = 96,5$ ohms ;
- deuxième partie : diamètre = 80 mm, longueur = 145 mm, $Z_c = 70$ ohms ;

- portion 20b : diamètre = 258 mm, longueur = 285 mm, $Z_c = 5$ ohm (portion à faible impédance)
- portion 20a : diamètre = 184 mm, longueur = 405 mm, $Z_c = 60$ ohms.

[0058] Ce résultat est illustré aux figures 6a et 6b, la figure 6a étant un diagramme d'impédances des différentes portions de ligne constituant le pilier et la figure 6b étant une vue schématique en coupe longitudinale d'une réalisation physique correspondante de l'exemple de cavité préférée selon l'invention (seule une moitié de la cavité est représentée).

[0059] La longueur totale de la cavité est de 1355 mm, dont 600 mm hors de la culasse 60 du cyclotron. Les fréquences de résonance basse et haute sont évaluées respectivement à 33,094 MHz et à 66,486 MHz. Les puissances dissipées sont de l'ordre de 2768 W à 33 MHz pour une tension de 25 kV et de 2699 W à 66 MHz pour une tension de 50 kV. Les facteurs de qualité sont de 6700 à 33 MHz et de 10000 à 66 MHz.

[0060] Une réalisation pratique d'une cavité selon l'invention et son implantation dans un cyclotron est illustrée à la figure 7. La coupe verticale de ce cyclotron permet de distinguer quatre cavités selon l'invention, dont une seule a été annotée pour la clarté et la compréhension.

[0061] Les fréquences de résonance de la cavité peuvent être vérifiées en effectuant un balayage en fréquence (« wobulation »). Cela fournit une courbe de variation de l'impédance en fonction de la fréquence laissant apparaître deux pics distincts. Selon l'exemple préféré fourni, on retrouve un pic à substantiellement 33 MHz et un deuxième pic à substantiellement 66 MHz, tel que montré schématiquement à la figure 8.

[0062] Lors de son fonctionnement, la fréquence de résonance de la cavité va dériver, principalement à cause de dérives thermiques modifiant ses dimensions. Suivant l'art antérieur il est connu de placer un condensateur d'accord motorisé et asservi dans le plan médian du cyclotron et destiné à ajuster la fréquence RF injectée dans la cavité. Cette configuration n'aurait toutefois que peu d'effet à la fréquence basse, par exemple à 33 MHz.

Selon une version préférée de l'invention, la cavité 6 comporte un condensateur d'accord 50 comprenant une électrode mobile reliée électriquement à l'enceinte conductrice 40 et placée en vis-à-vis du pilier et substantiellement au niveau de la portion intermédiaire 20b de la ligne de transmission. Ce condensateur d'accord 50 est visible sur la figure 7. Par simulation, on a en effet déterminé qu'un tel condensateur d'accord 50 placé à un tel endroit permet d'obtenir une amplitude de réglage très proche aux deux fréquences de résonance, à savoir, dans le cas d'une fréquence basse de 33 MHz et d'une fréquence haute de 66 MHz, une variation de 12,6 KHz/pF à 33 MHz et une variation de 12,2 KHz/pF à 66 MHz.

[0063] En résumé, l'invention peut également être décrite comme suit : une cavité résonante (6) bi-fréquence pour cyclotron qui comprend un dé (10), un pilier (20) et une enceinte conductrice (40) englobant ledit pilier et ledit dé, une extrémité du pilier étant solidaire de la base de l'enceinte conductrice et une extrémité opposée dudit pilier (20) supportant le dé (10). L'enceinte conductrice et le pilier forment une ligne de transmission comportant au moins trois portions (20a, 20b, 20c) ayant chacune une impédance caractéristique (Z_{c1} , Z_{c2} , Z_{c3}). L'impédance caractéristique Z_{c2} de la portion intermédiaire (20b) est substantiellement inférieure aux impédances caractéristiques Z_{c1} et Z_{c3} des deux autres portions (20a, 20b), ce qui permet de faire résonner la cavité selon deux modes afin de produire deux fréquences distinctes sans devoir faire usage d'éléments mobiles tels que par exemple des courts-circuits glissants ou des plaques mobiles.

[0064] La présente invention a été décrite en relation avec des modes de réalisations spécifiques, qui ont une valeur purement illustrative et ne doivent pas être considérés comme limitatifs. D'une manière générale, il apparaîtra évident pour l'homme du métier que la présente invention n'est pas limitée aux exemples illustrés et/ou décrits ci-dessus. L'invention comprend chacune des caractéristiques nouvelles ainsi que toutes leurs combinaisons. Cependant, ce sont les revendications qui déterminent l'étendue de sa protection. La présence de numéros de référence aux dessins ne peut pas être considérée comme limitative, y compris lorsque ces numéros sont indiqués dans les revendications.

L'usage des verbes « comprendre », « inclure », « comporter », ou toute autre variante, ainsi que de leur conjugaison, ne peut en aucune façon exclure la présence d'éléments autres que ceux mentionnés. L'usage de l'article indéfini « un »,

« une », ou de l'article défini « le », « la », ou « l' », pour introduire un élément n'exclut pas la présence d'une pluralité de ces éléments.

5 Revendications

1. Cavité résonante (6) pour l'accélération de particules chargées dans un cyclotron, comprenant un dé (10), un pilier (20) et une enceinte conductrice (40) englobant au moins partiellement ledit pilier et ledit dé, une extrémité dudit pilier (20) supportant le dé (10), l'enceinte conductrice et le pilier (20) formant ainsi une ligne de transmission, une extrémité opposée dudit pilier (20) étant solidaire d'une base (45) de l'enceinte conductrice (40), **caractérisée en ce que** la capacité linéique d'une portion intermédiaire (20b) de ladite ligne de transmission située entre lesdites extrémités du pilier est substantiellement plus grande que la capacité linéique des autres portions (20a, 20c) de ladite ligne de transmission.
2. Cavité résonante suivant la revendication 1, **caractérisée en ce que** la capacité linéique de la portion intermédiaire (20b) de la ligne de transmission est plus grande que deux fois la capacité linéique des autres portions (20a, 20c) de ladite ligne de transmission.
3. Cavité résonante suivant la revendication 2, **caractérisée en ce que** la capacité linéique de la portion intermédiaire (20b) de la ligne de transmission est plus grande que dix fois la capacité linéique des autres portions (20a, 20c) de ladite ligne de transmission.
4. Cavité résonante selon l'une des quelconques revendications précédentes **caractérisée en ce que** l'impédance caractéristique (Z_{c2}) de la portion intermédiaire (20b) et les impédances caractéristiques (Z_{c1} , Z_{c3}) des autres portions (20a, 20c) de la ligne de transmission sont telles que la cavité (6) est apte à résonner selon deux modes pour produire deux fréquences distinctes dans un rapport substantiellement double.
5. Cavité résonante selon l'une des quelconques revendications précédentes **caractérisée en ce que** le pilier (20) comporte plusieurs cylindres superposés (20a, 20b, 20c), un de ces cylindres (20b) correspondant à ladite portion intermédiaire (20b) de la ligne de transmission et possédant un diamètre moyen substantiellement supérieur au diamètre moyen des autres cylindres (20a, 20c).
6. Cavité résonante selon l'une des quelconques revendications précédentes **caractérisée en ce que** l'enceinte conductrice (40) comporte plusieurs cylindres creux superposés, un de ces cylindres creux correspondant à ladite portion intermédiaire (20b) de la ligne de transmission et possédant un diamètre moyen substantiellement inférieur au diamètre moyen des autres cylindres creux.
7. Cavité résonante selon l'une des quelconques revendications précédentes, **caractérisée en ce qu'elle** comporte en outre un condensateur d'accord (50) comprenant une électrode mobile reliée électriquement à l'enceinte conductrice (40) et placée en vis-à-vis du pilier et substantiellement au niveau de la portion intermédiaire (20b) de la ligne de transmission.
8. Méthode de conception d'une cavité résonnante bi-fréquence suivant l'une quelconque des revendications précédentes comprenant les étapes suivantes :
 - calcul de la capacité linéique du pilier d'une cavité dont le pilier et l'enceinte conductrice présentent une section constante, permettant de déduire l'impédance caractéristique de la ligne de transmission ainsi formée par ledit pilier et l'enceinte conductrice ;
 - calcul de l'impédance caractéristique pour différents diamètres de pilier ;
 - détermination du diamètre extérieur moyen équivalent de l'enceinte conductrice ;
 - simulation électromagnétique 2D de la cavité s'appuyant sur les dimensions trouvées précédemment et détermination du diamètre d'un dé équivalent, supposé circulaire, produisant la même fréquence de résonance que ladite cavité dont le pilier et l'enceinte conductrice présentent une section constante ;
 - calcul des paramètres intrinsèques de la cavité, tels que le facteur de qualité Q, la puissance dissipée, l'énergie stockée et comparaison des résultats avec des valeurs mesurées ;
 - caractérisation, à l'aide d'une simulation radiofréquence, des différentes portions de ligne constituant le pilier d'une cavité dont on exploite deux modes résonants produisant deux fréquences distinctes.

9. Méthode de conception d'une cavité résonnante bi-fréquence suivant la revendication 8, comprenant en outre une étape d'optimisation finale de la cavité bi-fréquence par simulation électromagnétique 2D.

5 Claims

1. Resonant cavity (6), for accelerating charged particles in a cyclotron, comprising a dee (10), a rod (20), and a conductive chamber (40) at least partially surrounding said rod and said dee, one end of said rod (20) supporting the dee (10), the conductive chamber and the rod (20) thus forming a transmission line, one opposite end of said rod (20) being securely fastened to a base (45) of the conductive chamber (40), **characterized in that** the capacitance per unit length of an intermediate portion (20b) of said transmission line located between said ends of the rod is substantially higher than the capacitance per unit length of the other portions (20a, 20c) of said transmission line.
2. Resonant cavity according to Claim 1, **characterized in that** the capacitance per unit length of the intermediate portion (20b) of the transmission line is twice as high as the capacitance per unit length of the other portions (20a, 20c) of said transmission line.
3. Resonant cavity according to Claim 2, **characterized in that** the capacitance per unit length of the intermediate portion (20b) of the transmission line is ten times higher than the capacitance per unit length of the other portions (20a, 20c) of said transmission line.
4. Resonant cavity according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the characteristic impedance (Z_{c2}) of the intermediate portion (20b) and the characteristic impedances (Z_{c1} , Z_{c3}) of the other portions (20a, 20c) of the transmission line are such that the cavity (6) is able to resonate in two modes so as to produce two separate frequencies, one being substantially double the other.
5. Resonant cavity according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the rod (20) comprises a number of superposed cylinders (20a, 20b, 20c), one of these cylinders (20b) corresponding to said intermediate portion (20b) of the transmission line and having an average diameter that is much larger than the average diameter of the other cylinders (20a, 20c).
6. Resonant cavity according to any one of the preceding claims, **characterized in that** the conductive chamber (40) comprises a number of superposed hollow cylinders, one of these hollow cylinders corresponding to said intermediate portion (20b) of the transmission line and having an average diameter substantially smaller than the average diameter of the other hollow cylinders.
7. Resonant cavity according to any one of the preceding claims, **characterized in that** it furthermore comprises a matching capacitor (50) comprising a moveable electrode electrically connected to the conductive chamber (40) and placed facing the rod and substantially level with the intermediate portion (20b) of the transmission line.
8. Method for designing a dual-frequency resonant cavity according to any one of the preceding claims, comprising the following steps:
 - calculating the capacitance per unit length of a cavity the rod and the conductive chamber of which have a constant cross section, allowing the characteristic impedance of the transmission line thus formed by said pillar and conductive chamber to be deduced;
 - calculating the characteristic impedance for various rod diameters;
 - determining the equivalent average outside diameter of the conductive chamber;
 - producing a 2D electromagnetic simulation of the cavity using the dimensions found beforehand and determining the diameter of an equivalent dee, hypothesized to be circular, producing the same resonant frequency as said cavity, the rod and the conductive chamber of which cavity have a constant cross section;
 - calculating the intrinsic parameters of the cavity, such as the quality factor Q, the power dissipated, the energy stored and comparing the results with measured values; and
 - characterizing, using a radiofrequency simulation, the various line portions forming the rod of a cavity, two resonant modes of which are used to produce two separate frequencies.
9. Method for designing a dual-frequency resonant cavity according to Claim 8, furthermore comprising a final step of optimizing the dual-frequency cavity using 2D electromagnetic simulation.

Patentansprüche

1. Hohlraumresonator (6) zur Beschleunigung von in ein Zyklotron geladenen Partikeln, der einen Mikrochip (10), eine Säule (20) und ein leitendes Gehäuse (40) enthält, das die Säule und den Mikrochip zumindest teilweise einschließt, wobei ein Ende der Säule (20) den Mikrochip (10) trägt, wobei das leitende Gehäuse und die Säule (20) so eine Übertragungsleitung formen, wobei ein entgegengesetztes Ende der Säule (20) fest mit einer Basis (45) des leitenden Gehäuses (40) verbunden ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leitungskapazität eines Zwischenabschnitts (20b) der Übertragungsleitung, der sich zwischen den Enden der Säule befindet, deutlich größer ist als die Leitungskapazität der anderen Abschnitte (20a, 20c) der Übertragungsleitung.
2. Hohlraumresonator nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leitungskapazität des Zwischenabschnitts (20b) der Übertragungsleitung größer als das Doppelte der Leitungskapazität der anderen Abschnitte (20a, 20c) der Übertragungsleitung ist.
3. Hohlraumresonator nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Leitungskapazität des Zwischenabschnitts (20b) der Übertragungsleitung größer als das Zehnfache der Leitungskapazität der anderen Abschnitte (20a, 20c) der Übertragungsleitung ist.
4. Hohlraumresonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Wellenwiderstand (Z_{c2}) des Zwischenabschnitts (20b) und die Wellenwiderstände (Z_{c1} , Z_{c3}) der anderen Abschnitte (20a, 20c) der Übertragungsleitung so sind, dass der Hohlraum (6) gemäß zwei Betriebsarten schwingen kann, um zwei unterschiedliche Frequenzen in einem im Wesentlichen doppelten Verhältnis zu erzeugen.
5. Hohlraumresonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Säule (20) mehrere übereinander angeordnete Zylinder (20a, 20b, 20c) aufweist, wobei einer dieser Zylinder (20b) dem Zwischenabschnitt (20b) der Übertragungsleitung entspricht und einen mittleren Durchmesser besitzt, der wesentlich größer als der mittlere Durchmesser der anderen Zylinder (20a, 20c) ist.
6. Hohlraumresonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das leitende Gehäuse (40) mehrere übereinander angeordnete Hohlzylinder aufweist, wobei einer dieser Hohlzylinder dem Zwischenabschnitt (20b) der Übertragungsleitung entspricht und einen mittleren Durchmesser besitzt, der wesentlich kleiner als der mittlere Durchmesser der anderen Hohlzylinder ist.
7. Hohlraumresonator nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** er außerdem einen Abstimmkondensator (50) aufweist, der eine bewegliche Elektrode enthält, die elektrisch mit dem leitenden Gehäuse (40) verbunden und der Säule gegenüber und im Wesentlichen im Bereich des Zwischenabschnitts (20b) der Übertragungsleitung angeordnet ist.
8. Gestaltungsverfahren eines Zweifrequenz-Hohlraumresonators nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das die folgenden Schritte enthält:
 - Berechnung der Leitungskapazität der Säule eines Hohlraums, dessen Säule und leitendes Gehäuse einen konstanten Querschnitt aufweisen, was es ermöglicht, den Wellenwiderstand der so von der Säule und dem Leiter geformten Übertragungsleitung zu bestimmen;
 - Berechnung des Wellenwiderstands für verschiedene Säulendurchmesser;
 - Bestimmung des äquivalenten mittleren Außendurchmessers des leitenden Gehäuses;
 - elektromagnetische 2D-Simulation des Hohlraums, die sich auf die vorher gefundenen Abmessungen stützt, und Bestimmung des als kreisförmig angenommenen Durchmessers eines äquivalenten Mikrochips, der die gleiche Resonanzfrequenz erzeugt wie der Hohlraum, dessen Säule und leitendes Gehäuse einen konstanten Querschnitt aufweisen;
 - Berechnung der intrinsischen Parameter des Hohlraums, wie des Qualitätsfaktors Q, der gestreuten Leistung, der gespeicherten Energie, und Vergleich der Ergebnisse mit gemessenen Werten;
 - Charakterisierung, mit Hilfe einer Radiofrequenzsimulation, der verschiedenen Leitungsabschnitte, die die Säule eines Hohlraums bilden, von dem zwei Schwingungsbetriebsarten genutzt werden, die zwei unterschiedliche Frequenzen erzeugen.
9. Gestaltungsverfahren eines Zweifrequenz-Hohlraumresonators nach Anspruch 8, das außerdem einen Schritt der Endoptimierung des Zweifrequenz-Hohlraums durch elektromagnetische 2D-Simulation enthält.

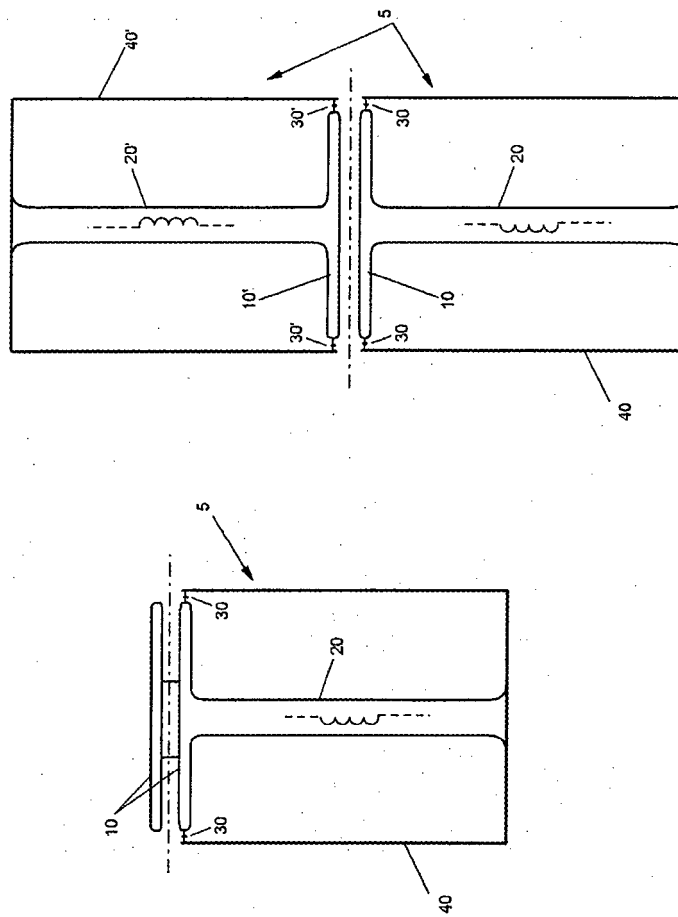


Fig. 1a

Fig. 1b

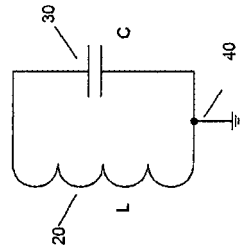


Fig. 1c

Fréquence basse

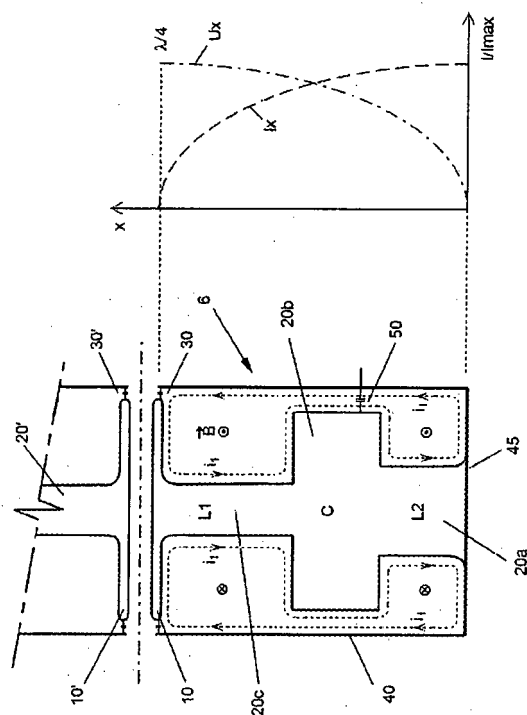


Fig. 2a

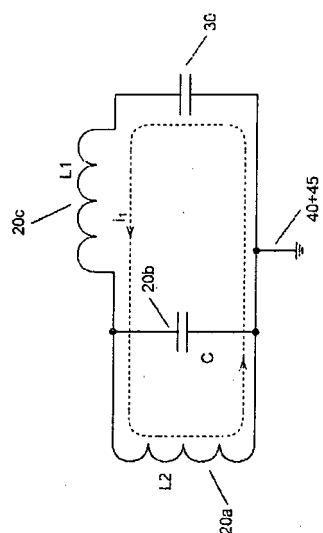


Fig. 2c

Fréquence haute

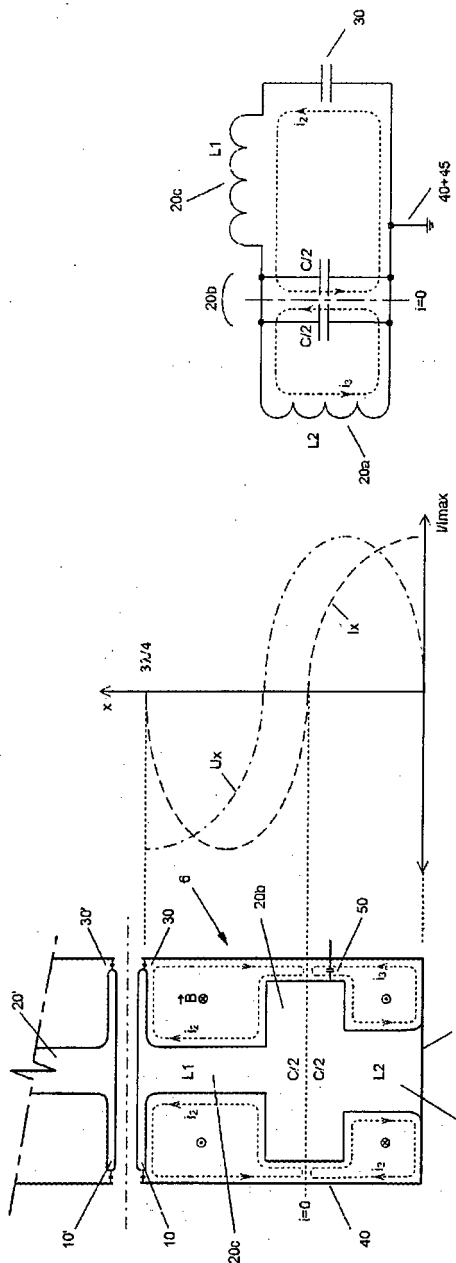


Fig. 3c

Fig. 3b

Fig. 3a

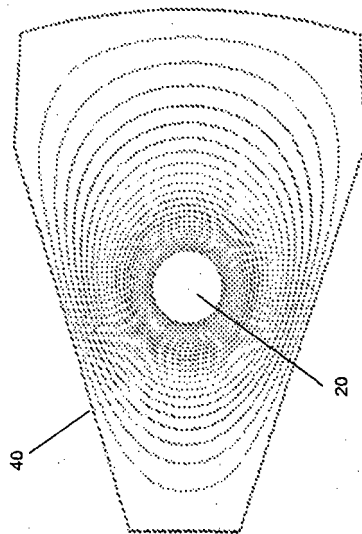


Fig. 4a

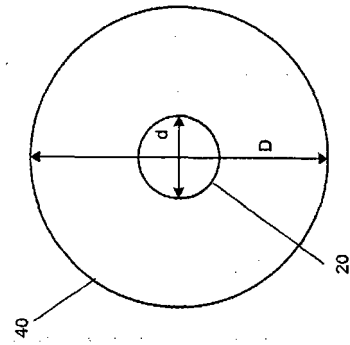


Fig. 4b

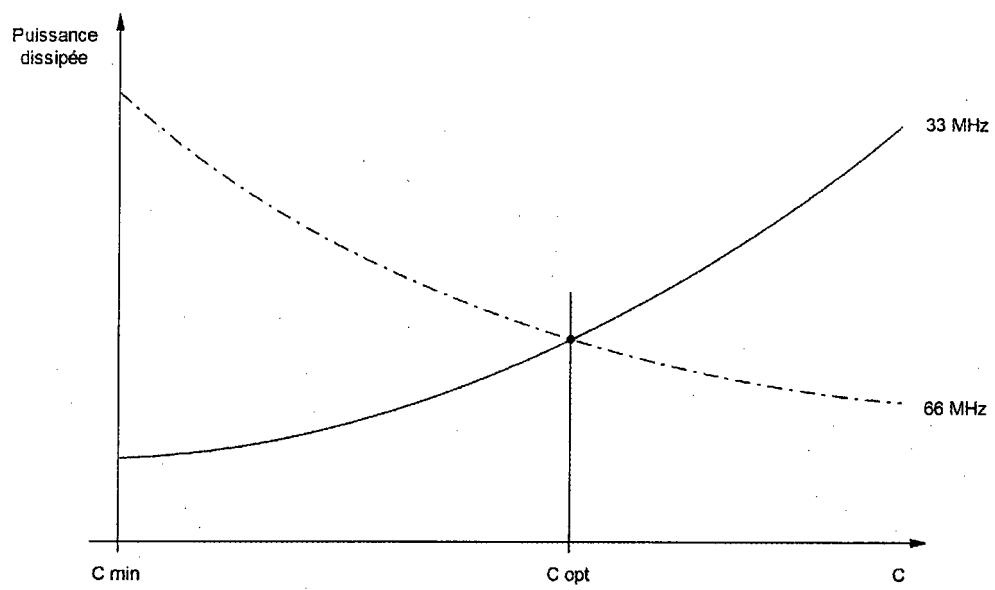


Fig. 5

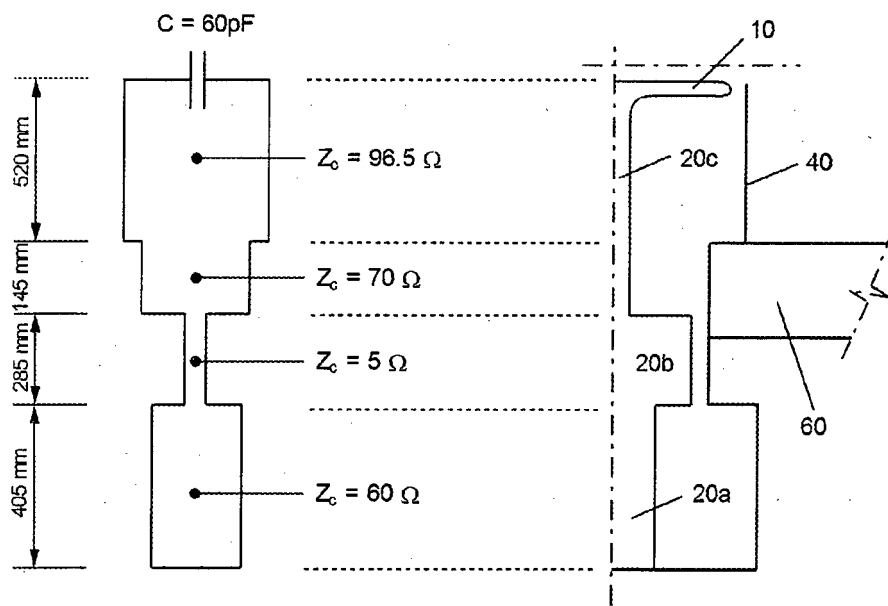


Fig. 6a

Fig. 6b

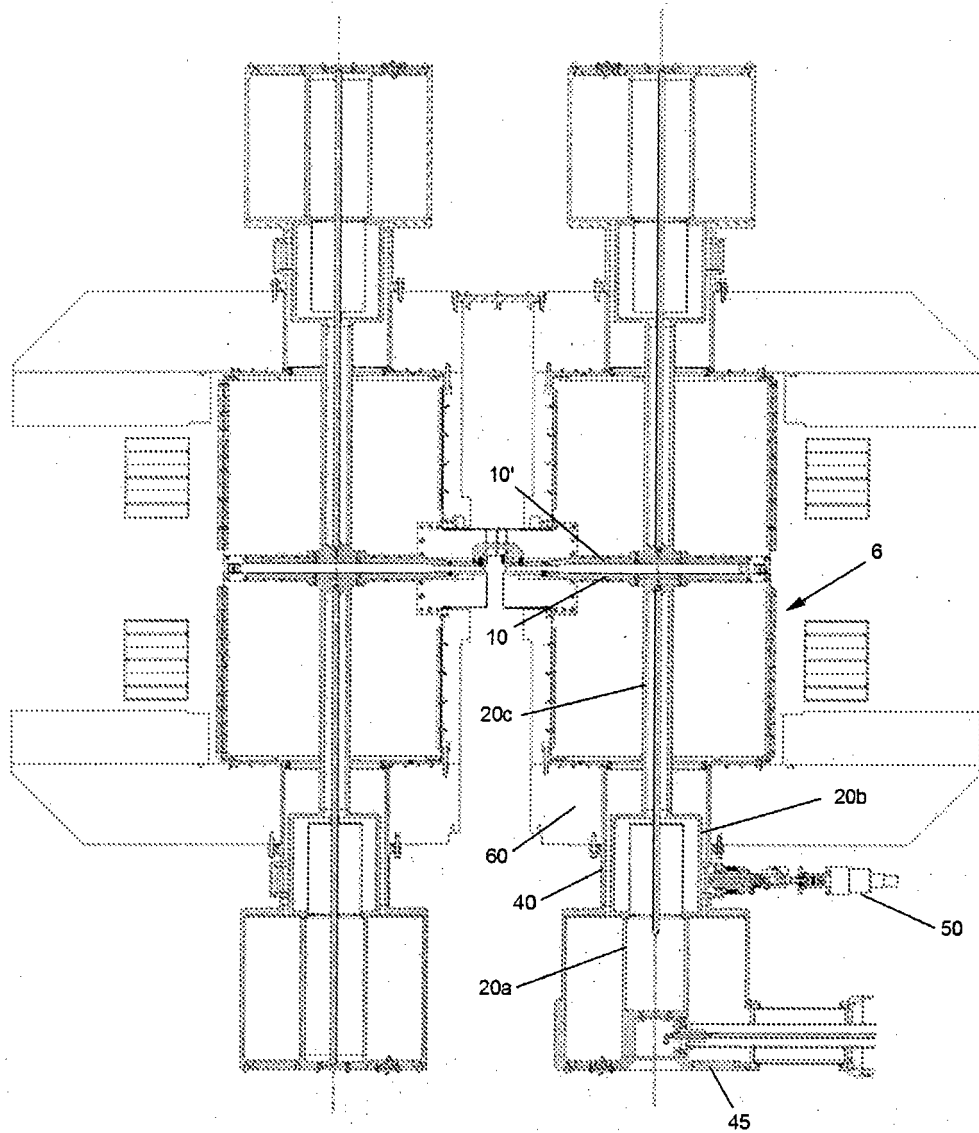


Fig. 7

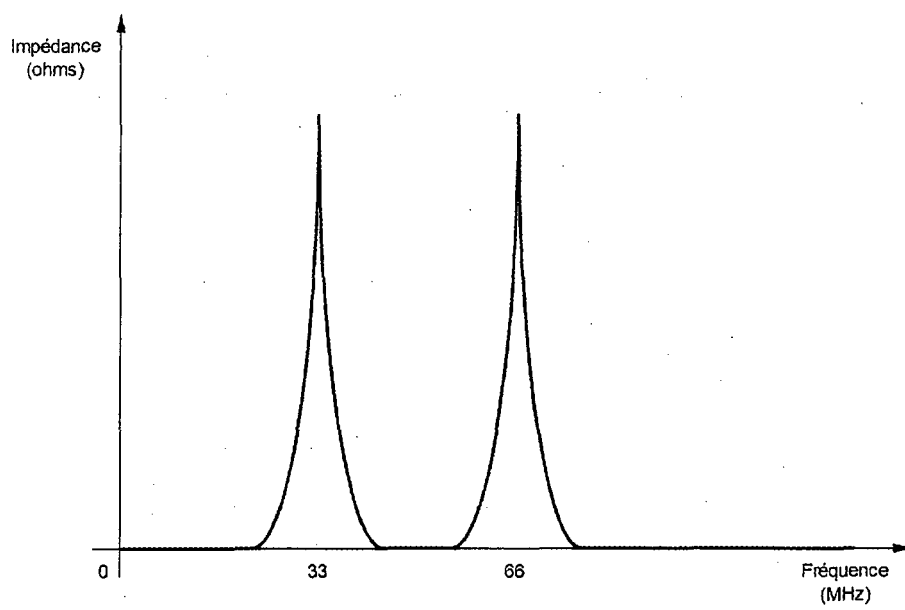


Fig. 8

RÉFÉRENCES CITÉES DANS LA DESCRIPTION

Cette liste de références citées par le demandeur vise uniquement à aider le lecteur et ne fait pas partie du document de brevet européen. Même si le plus grand soin a été accordé à sa conception, des erreurs ou des omissions ne peuvent être exclues et l'OEB décline toute responsabilité à cet égard.

Documents brevets cités dans la description

- WO 8606924 A [0002] [0042]
- JP 7066877 B [0007]

Littérature non-brevet citée dans la description

- Dual Frequency resonator system for a compact cyclotron. **M. EICHE et al.** Proc. XIII Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications. World Scientific, 1992, 515 [0007]
- A dual Frequency Resonator. **P. LANZ et al.** Proceedings of the 1993 IEEE Particle Accelerator Conference. IEEE Particle Accelerator Conference, 17 Mai 1993, 1151 [0007]
- **MIURA IWAO et al.** *Accelerating Résonance Cavity* [0007]