

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle
Bureau international(10) Numéro de publication internationale
WO 2012/010387 A1(43) Date de la publication internationale
26 janvier 2012 (26.01.2012)

- (51) Classification internationale des brevets :
H05H 7/02 (2006.01) H05H 13/00 (2006.01)
H05H 7/18 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2011/060835
- (22) Date de dépôt international :
28 juin 2011 (28.06.2011)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
10170531.7 22 juillet 2010 (22.07.2010) EP
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : ION BEAM APPLICATIONS [BE/BE]; chemin du Cyclotron 3, B-1348 Louvain-la-Neuve (BE).
- (72) Inventeur; et
- (75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : ABS, Michel [BE/BE]; rue Hautebise 37, B-5032 Bossiere (BE).
- (74) Mandataires : DE GROOTE, Christophe et al.; Pecher Consultants sprl, Centre Monnet, Avenue Jean Monnet 1, B-1348 Louvain-la-Neuve (BE).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title : CYCLOTRON ABLE TO ACCELERATE AT LEAST TWO TYPES OF PARTICLE

(54) Titre : CYCLOTRON APTE À ACCÉLÉRER AU MOINS DEUX TYPES DE PARTICULES

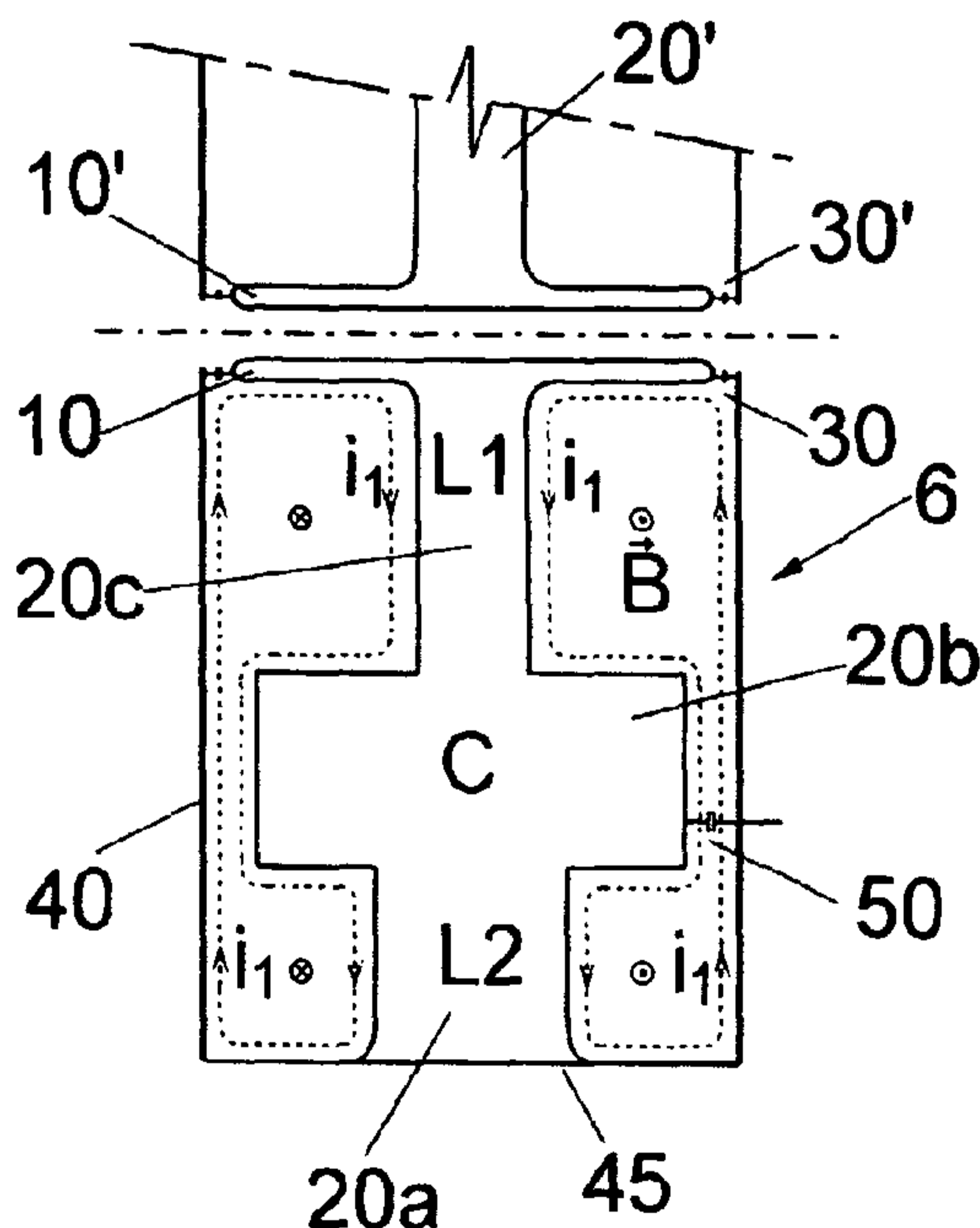


Fig. 2a

(57) Abstract : The present invention relates to a dual-frequency resonant cavity (6) for a cyclotron, which cavity comprises a dee (10), a pillar (20) and a conductive chamber (40) surrounding said pillar and said dee, one end of the pillar being rigidly connected to the base of the conductive chamber and an opposite end of said pillar (20) supporting the dee (10). The conductive chamber and the pillar form a transmission line comprising at least three portions (20a, 20b, 20c) each having a characteristic impedance (Z_{c1} , Z_{c2} , Z_{c3}). The characteristic impedance Z_{c2} of the intermediate portion (20b) is substantially lower than the characteristic impedances Z_{c1} and Z_{c3} of the two other portions (20a, 20b), making it possible for the cavity to resonate in two modes so as to produce two separate frequencies without having to use moveable elements such as for example sliding short-circuits or moveable plates. The present invention also relates to a method for designing such a resonant cavity, based on the use of electromagnetic and radiofrequency simulation tools.

(57) Abrégé : La présente invention concerne 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

[Suite sur la page suivante]

WO 2012/010387 A1 

LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, **Publiée :**
SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, — *avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))*
GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

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, 20c), 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. La présente invention concerne également une méthode de conception d'une telle cavité résonante, basée sur l'utilisation d'outils de simulation électromagnétique et radiofréquence.

CYCLOTRON APTE À ACCÉLÉRER AU MOINS DEUX TYPES DE PARTICULES

DOMAINE TECHNIQUE

5 [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
10 alpha (rapport q/m égal à ½) ou des deutons (rapport q/m également égal à ½).

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
15 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
20 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:

25

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

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

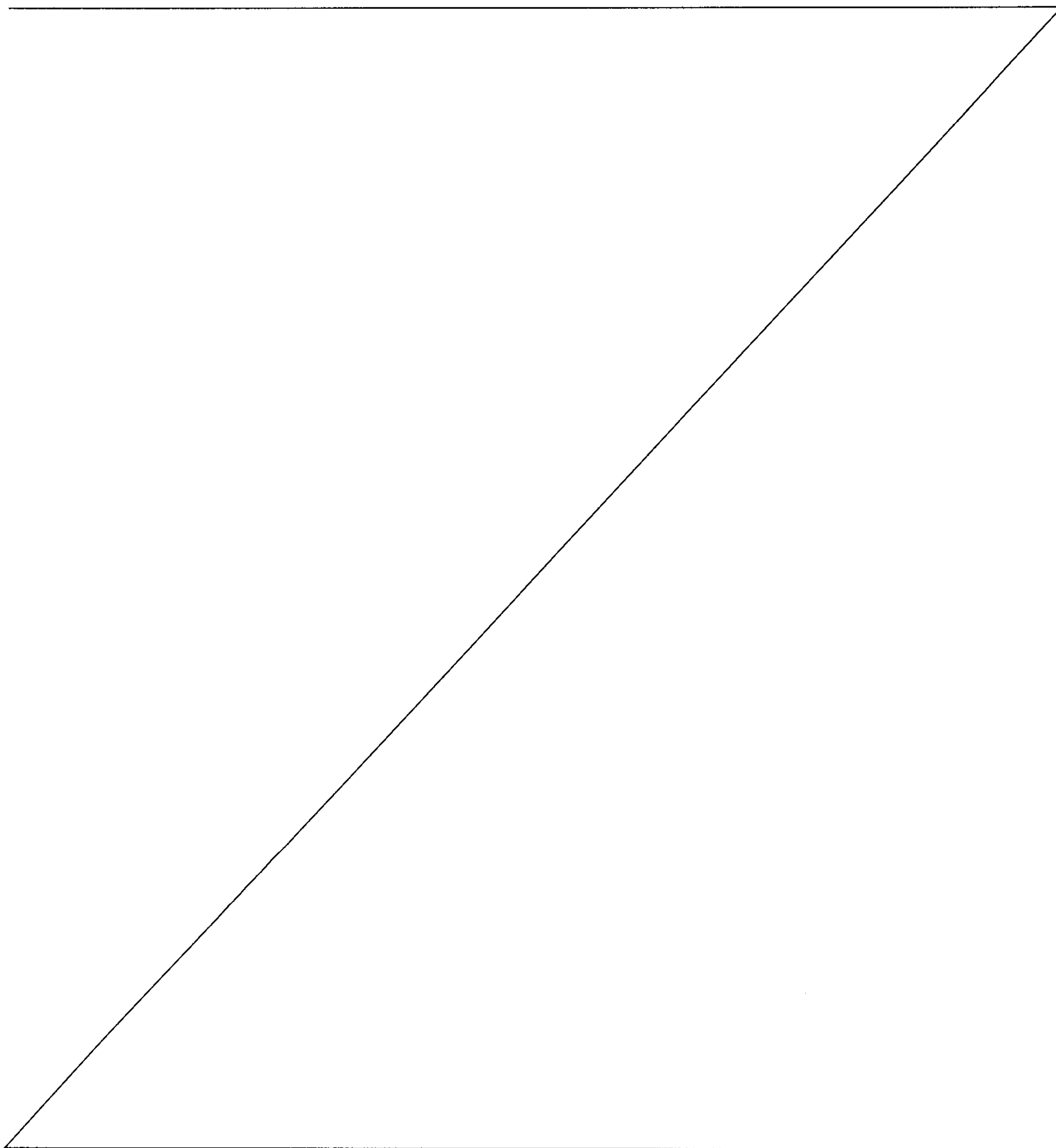
plusieurs oscillations de la tension RF se produisent alors que les particules circulent encore à l'intérieur du dé.

[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 1a. 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 30 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:

- 5 • 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:

- 10 • 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 $q/m=1$
- 15 • un meilleur isochronisme.

[0007] La mise en œuvre 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 Resonance 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 :

- 5
- 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

10

 - 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

15

 - 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.

20

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

25

- 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

30

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, caractérisée en ce qu'une capacité linéique d'une portion intermédiaire de ladite ligne de transmission située entre lesdites extrémités du pilier est plus grande qu'une capacité linéique des autres portions de ladite ligne de transmission.

10 Lorsqu'on dit que qu'une extrémité opposée du pilier est solidaire d'une base de l'enceinte conductrice, il faut comprendre que ladite extrémité opposée du pilier est mécaniquement fixée et électriquement reliée de manière fixe à la base de l'enceinte. Le pilier présente ainsi une longueur physique fixe entre ses deux extrémités.

15 Étant donné que l'enceinte conductrice a également une longueur physique fixe, la ligne de transmission formée par l'enceinte et le pilier possède une longueur fixe et donc une inductance fixe.

Une telle configuration permet de faire résonner la cavité selon deux modes différents, par exemple un mode $\frac{\lambda}{4}$ et un mode $\frac{3\lambda}{4}$, produisant ainsi deux fréquences

20 RF 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.

[0011] De préférence, la capacité linéique de la portion intermédiaire de la ligne de transmission est plus grande que deux fois la capacité linéique d'une autre portion 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 d'une autre portion de ladite ligne de transmission.

[0012] 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.

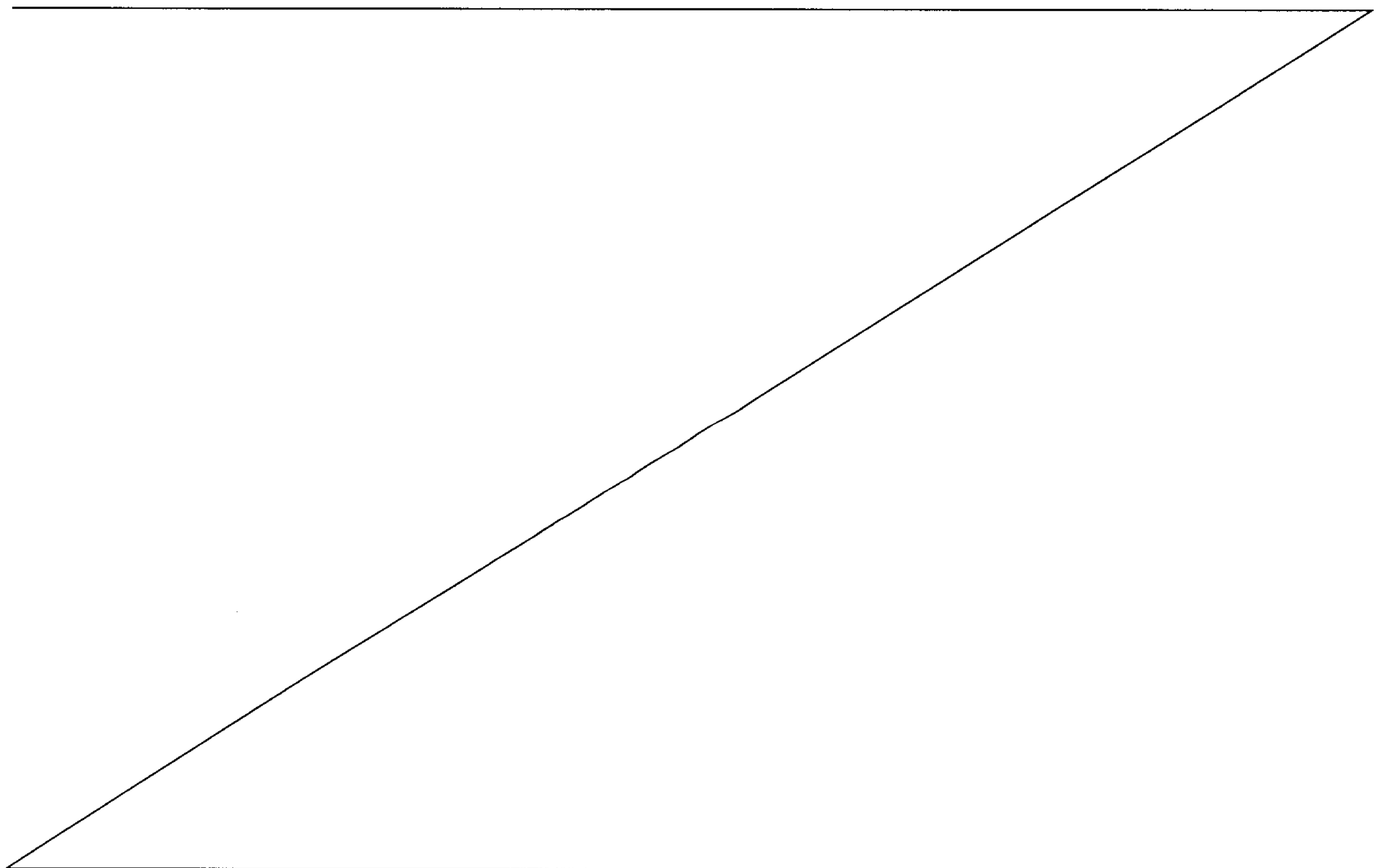
[0013] De manière encore plus préférée, le pilier comporte plusieurs cylindres superposés, un de ces cylindres correspondant à ladite portion intermédiaire de la ligne de transmission et possédant un diamètre moyen substantiellement supérieur au diamètre moyen d'un des autres cylindres. Alternativement 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 d'un 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 équipotentiels du champ électrique depuis le pilier.

[0014] Selon un second aspect, l'invention concerne une méthode de conception d'une cavité résonante bi-fréquence telle que décrite dans la présente demande, la méthode de conception comprenant les étapes suivantes :

- calculer 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;

- calculer l'impédance caractéristique pour différents diamètres de pilier;
- déterminer un diamètre extérieur moyen équivalent de l'enceinte conductrice;
- 5 - procéder à une simulation électromagnétique 2D de la cavité en s'appuyant sur les dimensions trouvées précédemment et déterminer le diamètre d'un dé équivalent, de forme circulaire, produisant la même fréquence de résonance que ladite cavité dont le pilier et l'enceinte conductrice présentent une section constante;
- 10 - calculer des paramètres intrinsèques de la cavité et comparer lesdits paramètres intrinsèques avec des valeurs mesurées; et
- caractériser, à l'aide d'une simulation radiofréquence, différentes portions de ligne constituant le pilier d'une cavité dont on exploite deux modes résonants produisant deux fréquences distinctes.



6a

[0015] Ces aspects ainsi que d'autres aspects de l'invention seront clarifiés dans la description détaillée de modes de réalisation particuliers de l'invention.

5 BRÈVE DESCRIPTION DES FIGURES

[0016] 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.

[0017] La figure 1a représente une coupe d'une cavité résonante asymétrique d'un cyclotron de l'art antérieur ;

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

15 [0019] La figure 1c représente un schéma électrique équivalent simplifié de la cavité résonante de la figure 1a ou 1b ;

[0020] 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 ;

20 [0021] 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 $\frac{3\pi}{4}$;

[0022] La figure 2c représente un schéma électrique équivalent simplifié de la cavité résonante de la figure 2a ;

25 [0023] 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 ;

30 [0024] 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 $\frac{3\pi}{4}$;

[0025] La figure 3c représente un schéma électrique équivalent simplifié de la cavité résonante de la figure 3a ;

[0026] La figure 4a représente une forme géométrique réelle et une répartition des équipotentiels d'un champ électrique statique d'une
5 cavité de l'art antérieur ;

[0027] 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 ;

[0028] La figure 5 représente un graphe illustrant la puissance
10 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 ;

[0029] La figure 6a représente un diagramme d'impédance d'un pilier dans un mode de réalisation de l'invention ;

15 [0030] 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 ;

[0031] La figure 7 représente une coupe d'un cyclotron bi-fréquence équipé de quatre cavités selon l'invention ;

20 [0032] 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

25

[0033] 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
30 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
 5 opposées étant respectivement connectées mécaniquement et
 électriquement de manière fixe aux bases 45 et 45' des enceintes
 conductrices 40 et 40' pour y constituer un court-circuit du point de vue
 radiofréquence. L'extrémité d'un pilier sera par exemple soudée, vissée ou
 boulonnée à la base de son enceinte conductrice. Alternativement, le pilier
 10 et la base de son enceinte conductrice pourront par exemple ne former
 qu'une seule pièce. Chaque pilier présente donc une longueur fixe entre ses
 deux extrémités.

Les différentes portions du pilier sont superposées et de préférence alignées
 suivant un même axe. Lesdites portions sont constituées, dans cet exemple,
 15 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
 20 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
 25 fonctionnement de la cavité (qui se situe dans les mégahertz).

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

30 [0034] 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.

[0035] 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.

[0036] 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.

[0037] 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.

30

[0038] 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
5 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
10 comportant un rétrécissement intermédiaire et un pilier comportant un élargissement intermédiaire, comme illustré par exemple aux figures 6b et 7, ou toute autre combinaison.

[0039] Une méthode de calcul permettant la conception et le
15 dimensionnement d'une structure d'une cavité selon l'invention est fournie ci-après.

[0040] Préalablement au calcul de la cavité bi-fréquence suivant l'invention, une modélisation d'une cavité connue telle que décrite dans le
20 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 :

25

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 ;
- 30 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 .

[0041] Détails de l'étape 1

10 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.

15 La figure 4a montre par exemple la répartition des équipotentiels 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.

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

20

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

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

Ensuite, en combinant les deux expressions suivantes:

25

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

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

30

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

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

[0042] Détails de l'étape 2

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

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

[0043] Détails de l'étape 3

15 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 :

$$D = d \cdot e^{\left(\frac{Z_c}{50}\right)}$$

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

25 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 $D = 400\text{mm}$ (+/- 3mm sont alloués à l'épaisseur de cuivre de l'enceinte conductrice).

[0044] Détails de l'étape 4

30 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.

- 5 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).

[0045] Détails de l'étape 5

- 10 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. 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
- 15 facteur de qualité Q est de 10600.
- Ces valeurs serviront de points de repère pour les étapes ultérieures.

- [0046]** Les valeurs numériques obtenues lors de ces cinq premières étapes permettent ensuite le calcul de la structure d'une cavité bi-
- 20 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
- 25 d'adapter ce qu'il est nécessaire d'adapter à ces étapes suivantes pour d'autres fréquences et/ou d'autres rapports de fréquence.

- [0047]** La forme d'une cavité bi-fréquence selon l'invention est déterminée par plusieurs composants physiques dont les caractéristiques
- 30 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 ;
- 5 - l'impédance caractéristique et la longueur de la ligne 20a.

[0048] 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 66 MHz) 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.

[0049] Une multitude de solutions existent. Cependant certains critères techniques ont guidés la conception d'une cavité plus préférée selon l'invention :

30

- 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.

[0050] 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.

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).

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.

[0051] 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
5 une seule a été annotée pour la clarté et la compréhension.

[0052] 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
10 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.

[0053] Lors de son fonctionnement, la fréquence de résonance de la
15 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
20 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
25 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
30 variation de 12,6 KHz/pF à 33 MHz et une variation de 12,2 KHz/pF à 66 MHz.

[0054] 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.

15

[0055] 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. 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.

25 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
30 de ces éléments.

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 (20) et ledit dé (10), une extrémité dudit pilier (20) supportant le dé (10), l'enceinte conductrice (40) 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 qu'une capacité linéique d'une portion intermédiaire (20b) de ladite ligne de transmission située entre lesdites extrémités du pilier (20) est plus grande qu'une 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 quelconque revendications 1 à 3, caractérisée en ce qu'une impédance caractéristique (Z_{c2}) de la portion intermédiaire (20b) et des 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 double.

5. Cavité résonante selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que le pilier (20) comporte plusieurs cylindres superposés (20a, 20b, 20c), un de ces cylindres superposés (20b) correspondant à ladite portion intermédiaire (20b) de la ligne de transmission et possédant un diamètre moyen supérieur au diamètre moyen des autres cylindres superposés (20a, 20c).
6. Cavité résonante selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisée en ce que l'enceinte conductrice (40) comporte plusieurs cylindres creux superposés, un de ces cylindres creux superposés correspondant à ladite portion intermédiaire (20b) de la ligne de transmission et possédant un diamètre moyen inférieur au diamètre moyen des autres cylindres creux superposés.
7. Cavité résonante selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, 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 (20) et au niveau de la portion intermédiaire (20b) de la ligne de transmission.
8. Méthode de conception d'une cavité résonante bi-fréquence suivant l'une quelconque des revendications 1 à 7, la méthode de conception comprenant les étapes suivantes :
- calculer 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;
 - calculer l'impédance caractéristique pour différents diamètres de pilier;
 - déterminer un diamètre extérieur moyen équivalent de l'enceinte conductrice;

- 5 - procéder à une simulation électromagnétique 2D de la cavité en s'appuyant sur les dimensions trouvées précédemment et déterminer le diamètre d'un dé équivalent, de forme circulaire, produisant la même fréquence de résonance que ladite cavité dont le pilier et l'enceinte conductrice présentent une section constante;
- calculer des paramètres intrinsèques de la cavité et comparer lesdits paramètres intrinsèques avec des valeurs mesurées; et
- 10 - caractériser, à l'aide d'une simulation radiofréquence, 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 résonante bi-fréquence suivant la revendication 8, comprenant en outre une étape de procéder à une optimisation finale de la cavité bi-fréquence par simulation électromagnétique 2D.

15 10. Méthode de conception d'une cavité résonante bi-fréquence suivant la revendication 8 ou 9, dans laquelle les paramètres intrinsèques de la cavité incluent un facteur de qualité Q , une énergie stockée et une puissance dissipée.

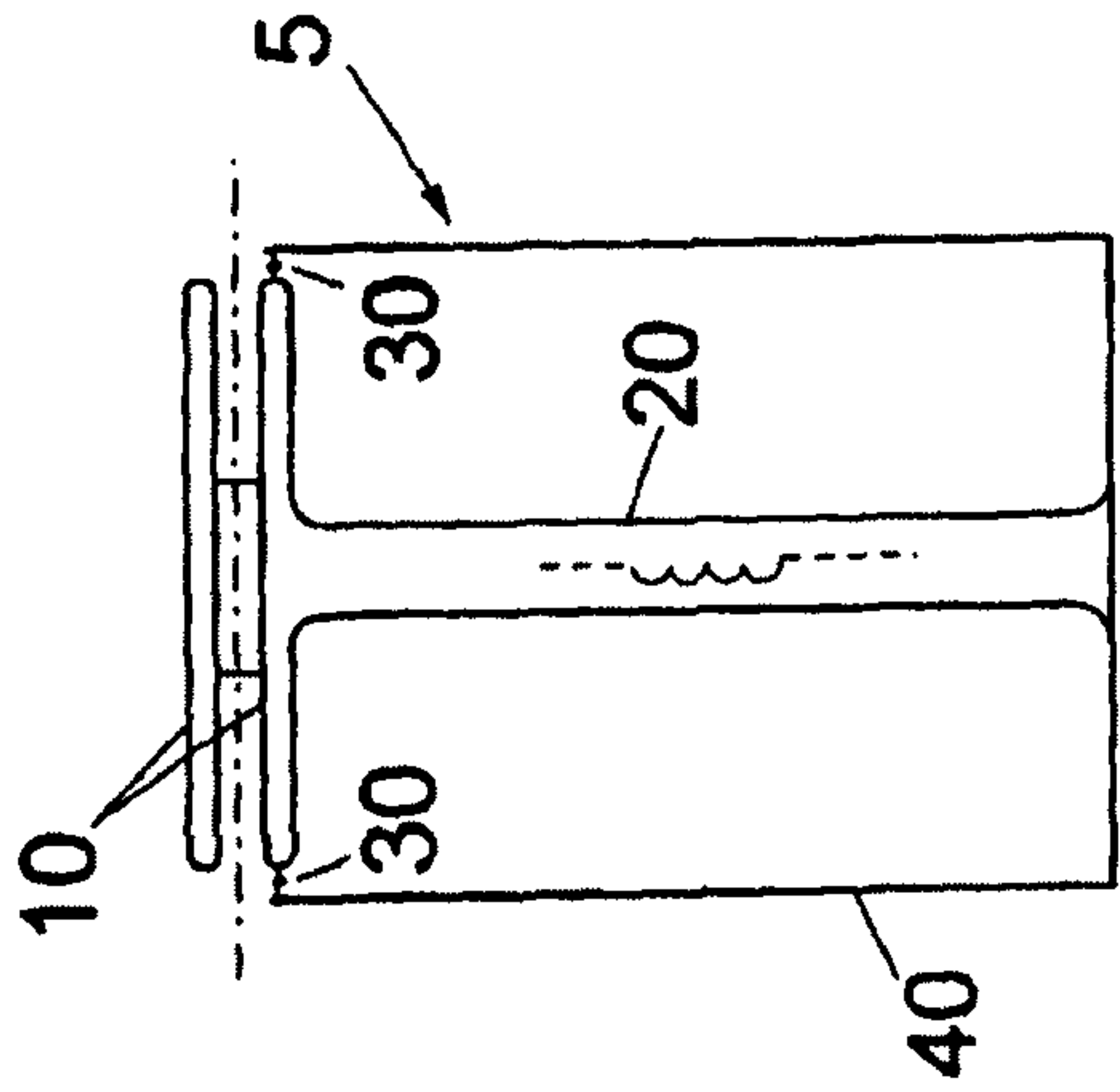


Fig. 1a
(Art Antérieur)

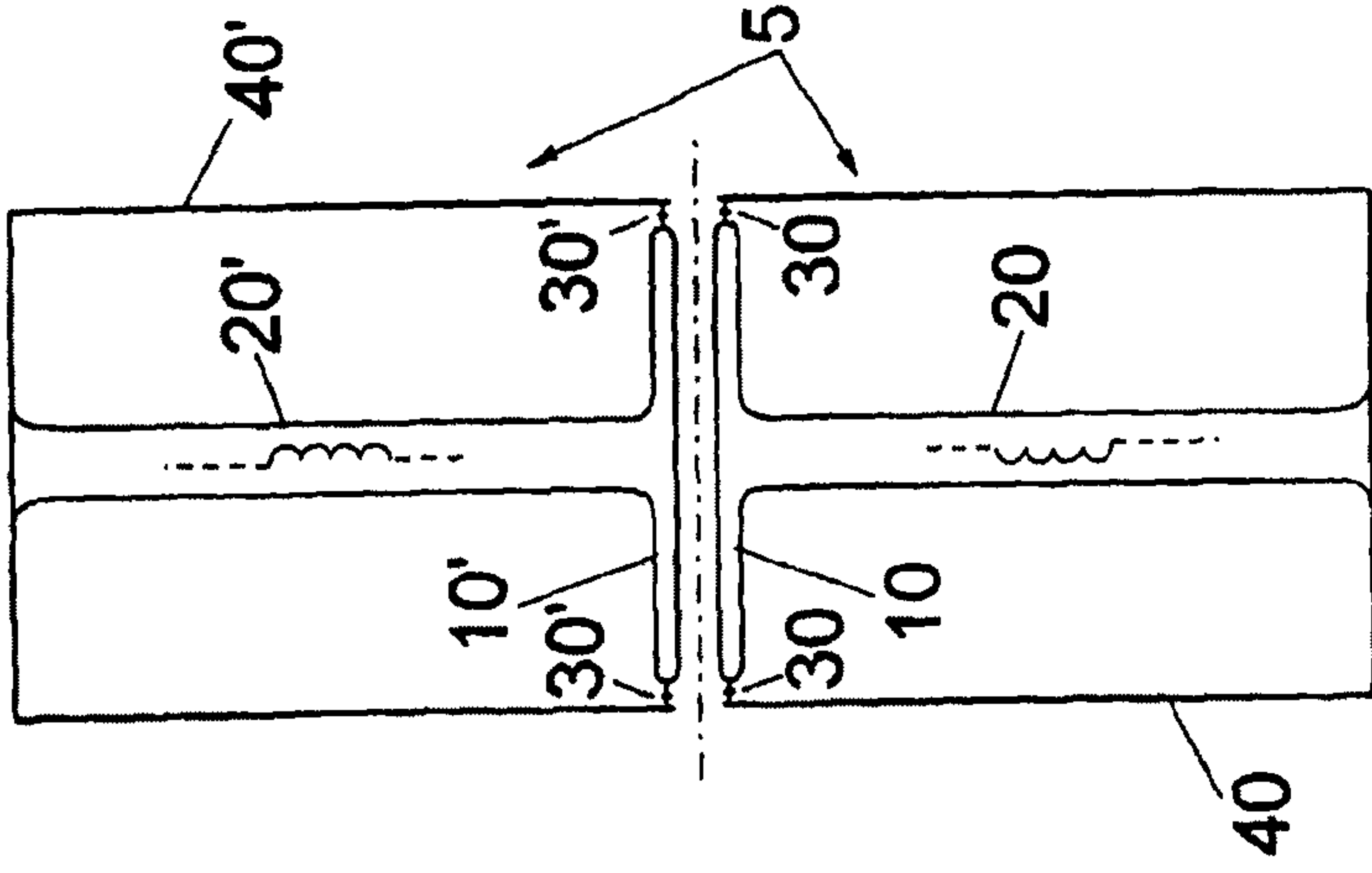


Fig. 1b
(Art Antérieur)

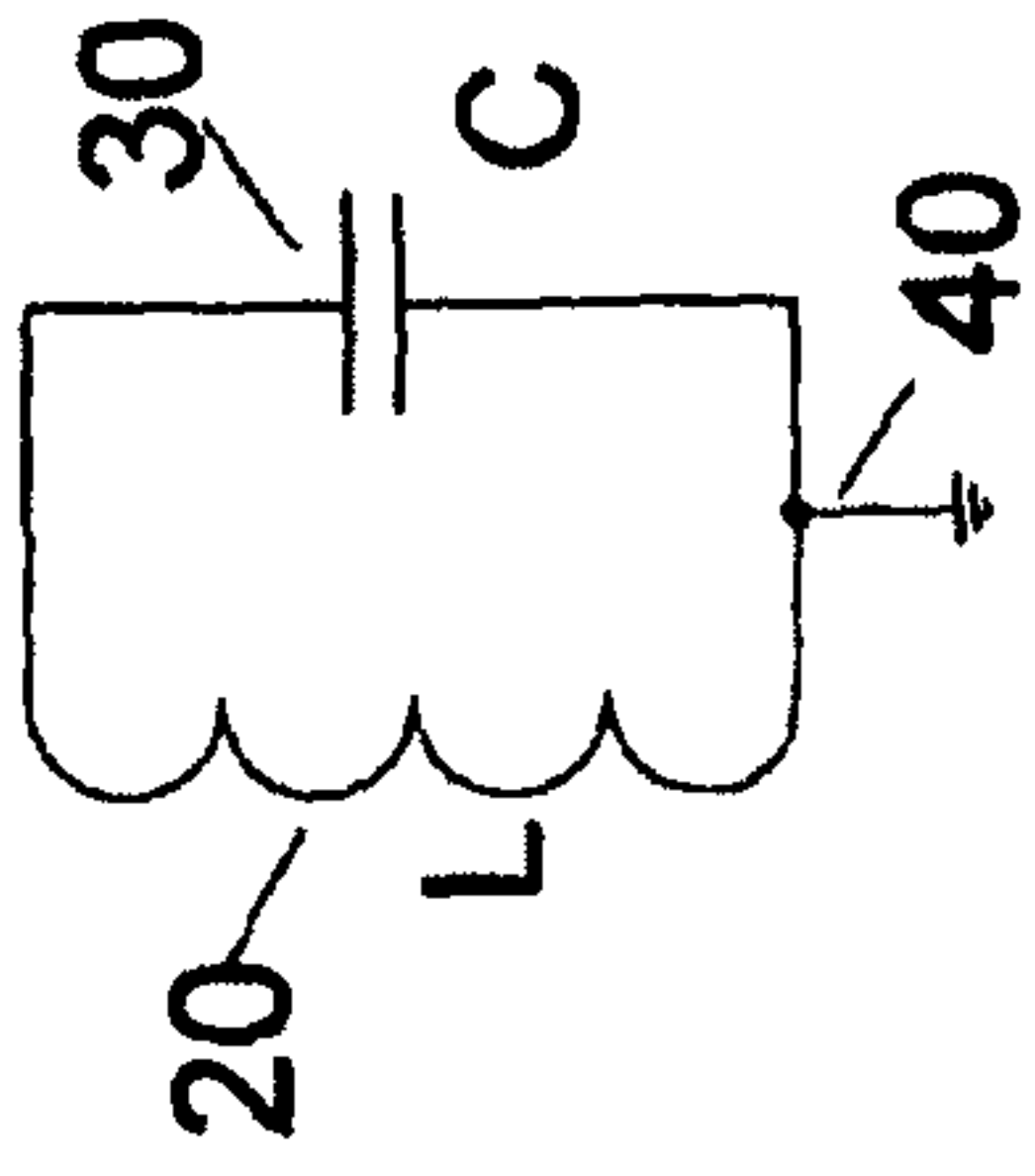


Fig. 1c
(Art Antérieur)

Fréquence basse

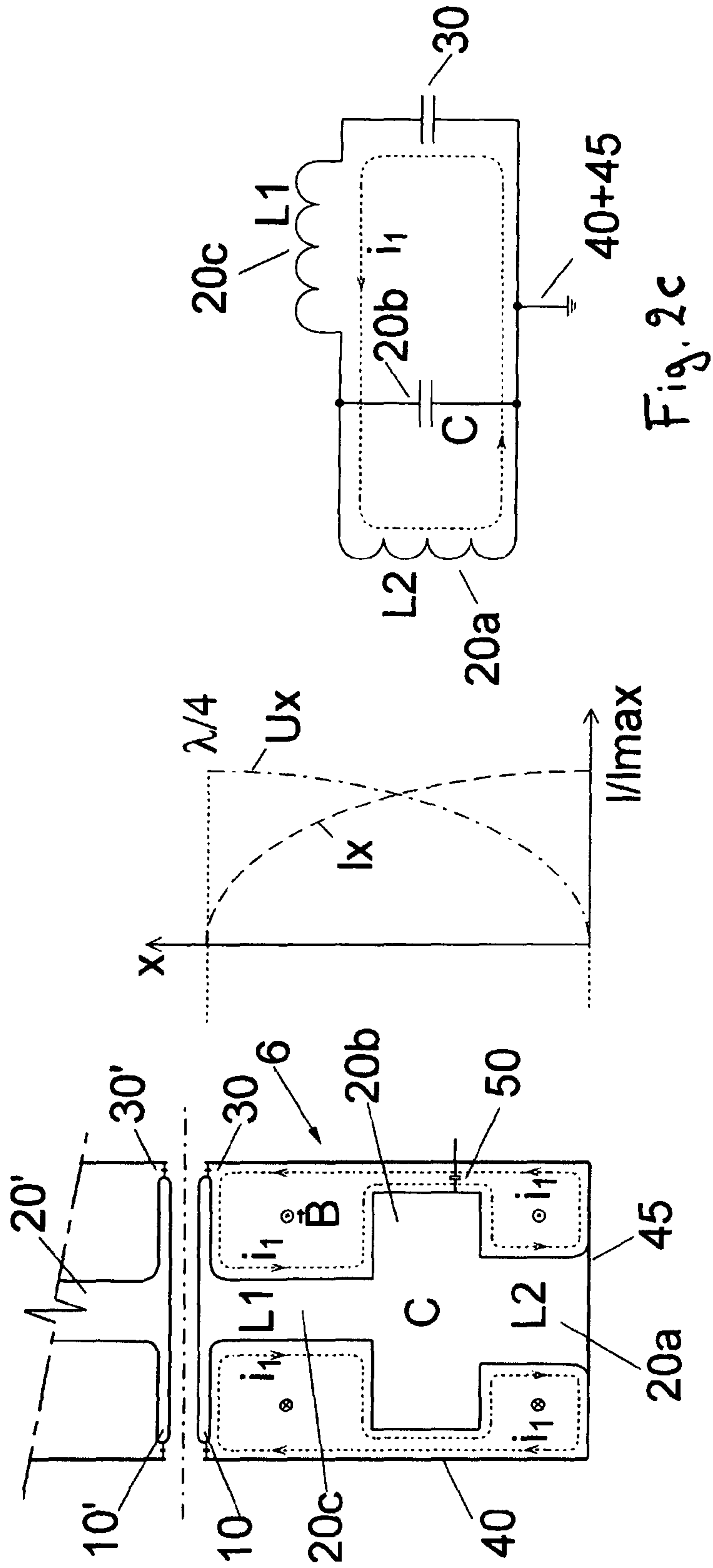


Fig. 2b

Fig. 2a

Fréquence haute

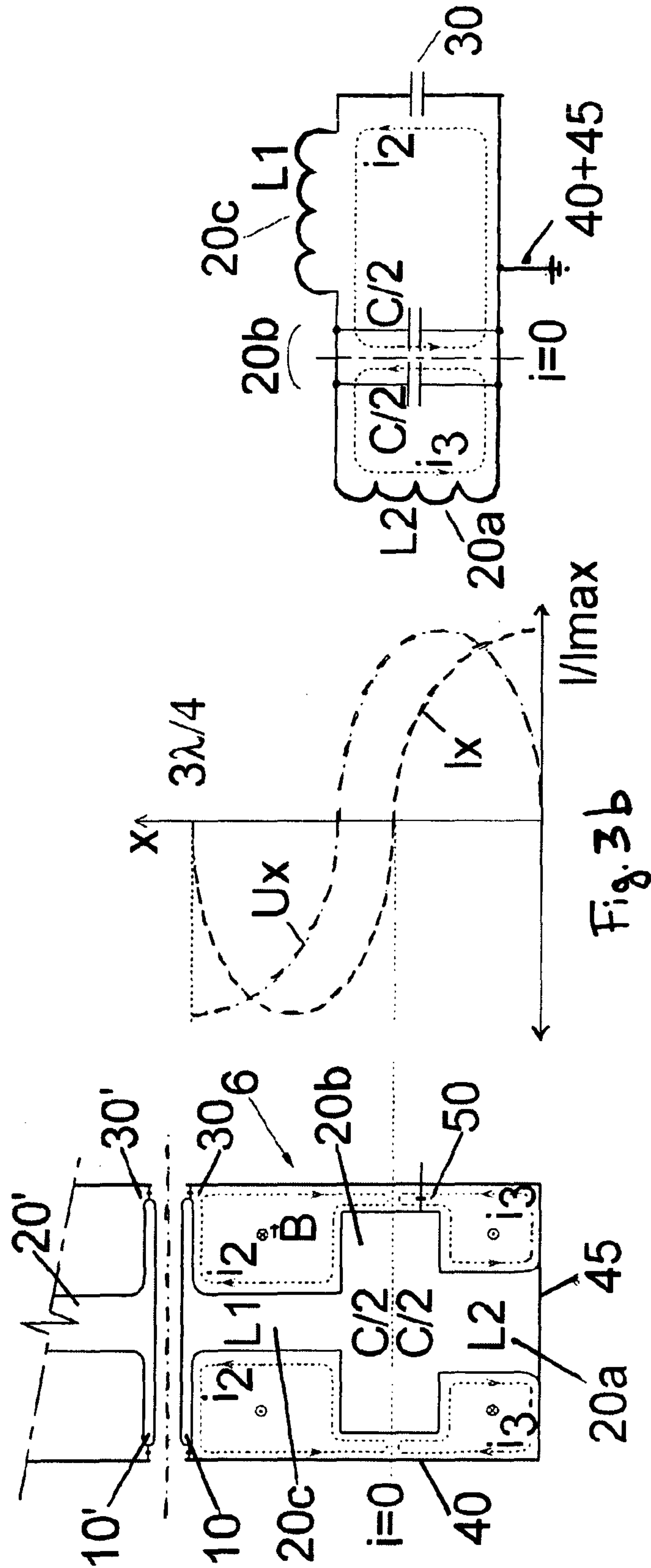


Fig. 3c

Fig. 3b

Fig. 3a

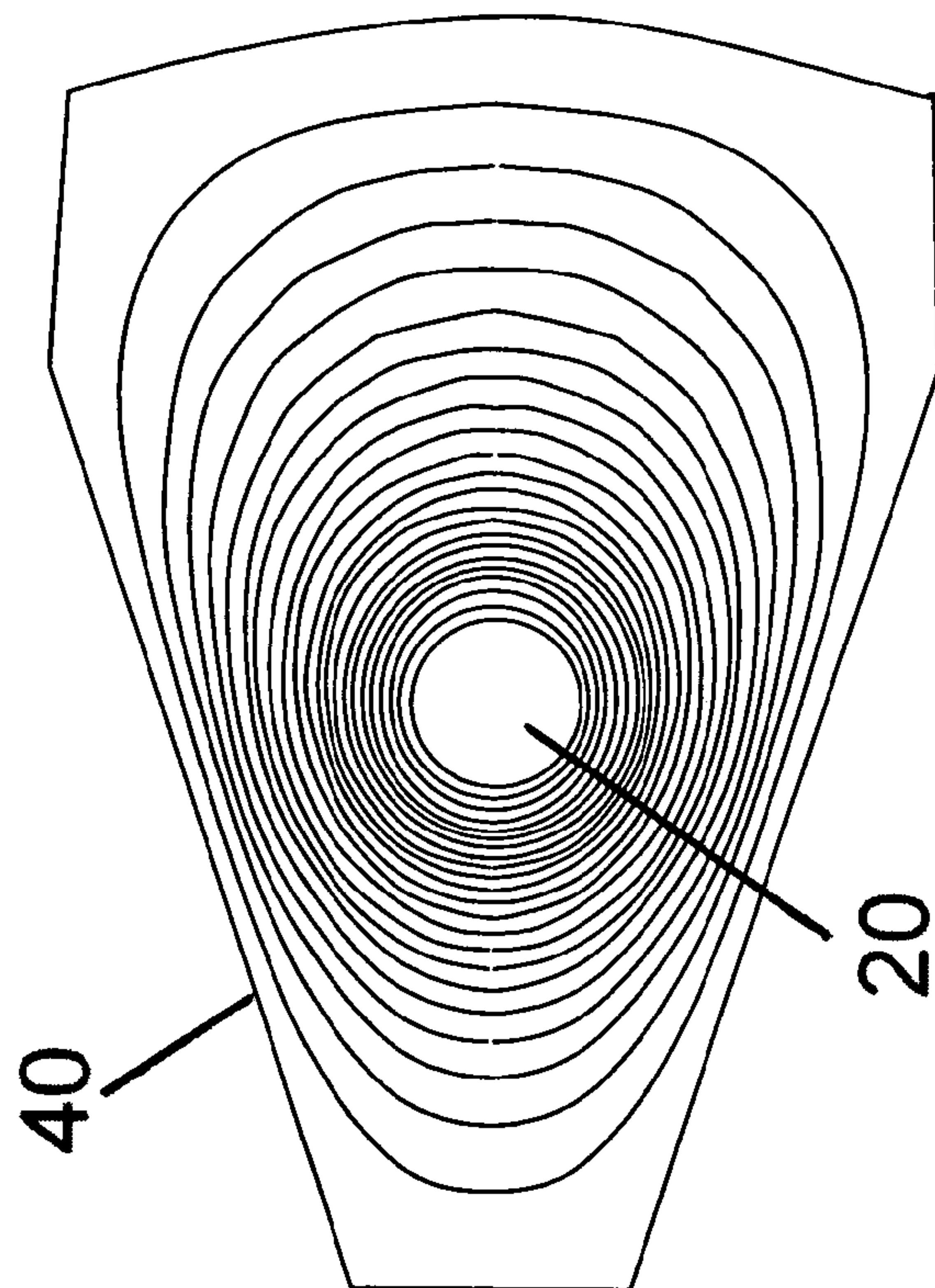


Fig. 4a

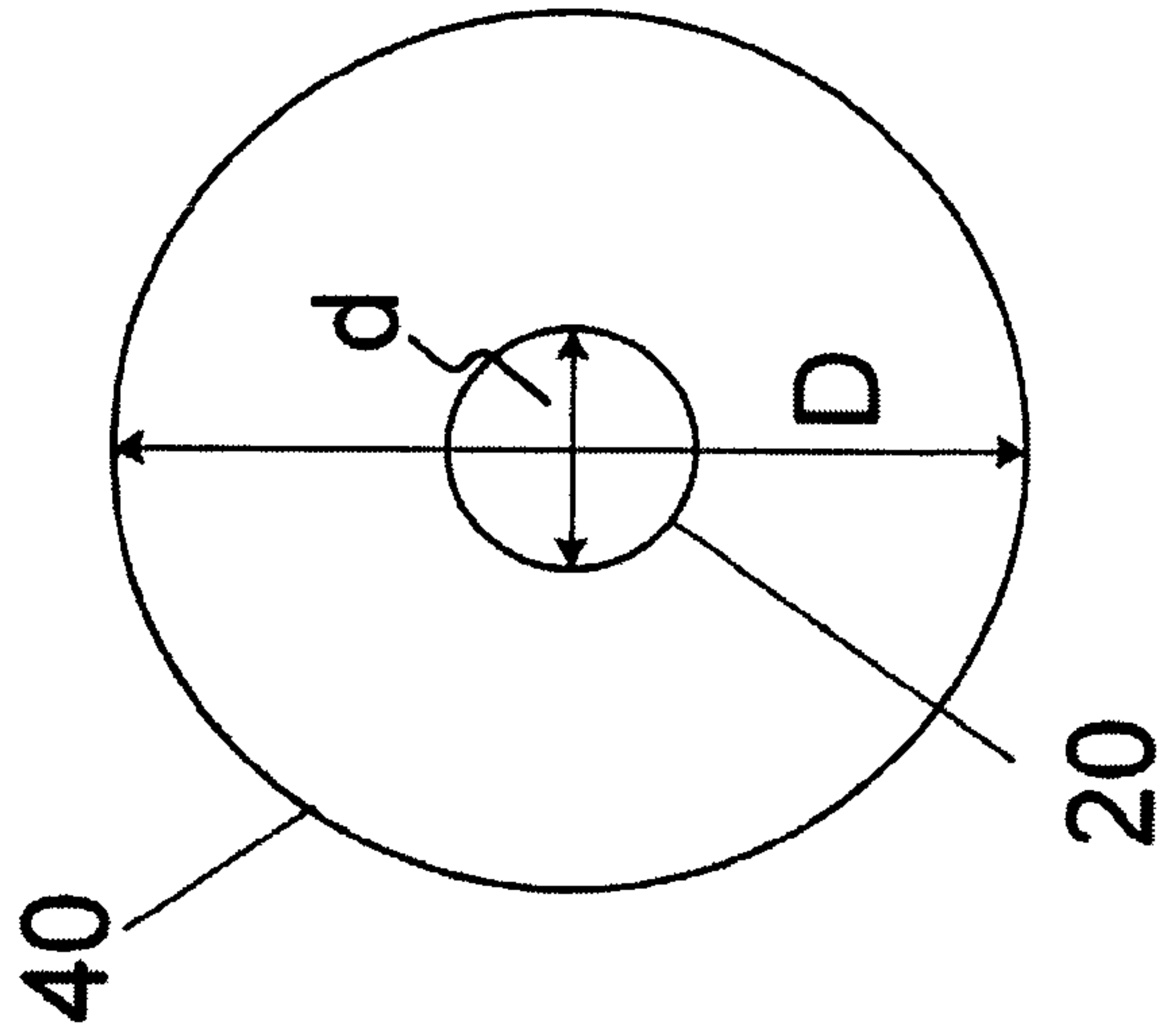


Fig. 4b

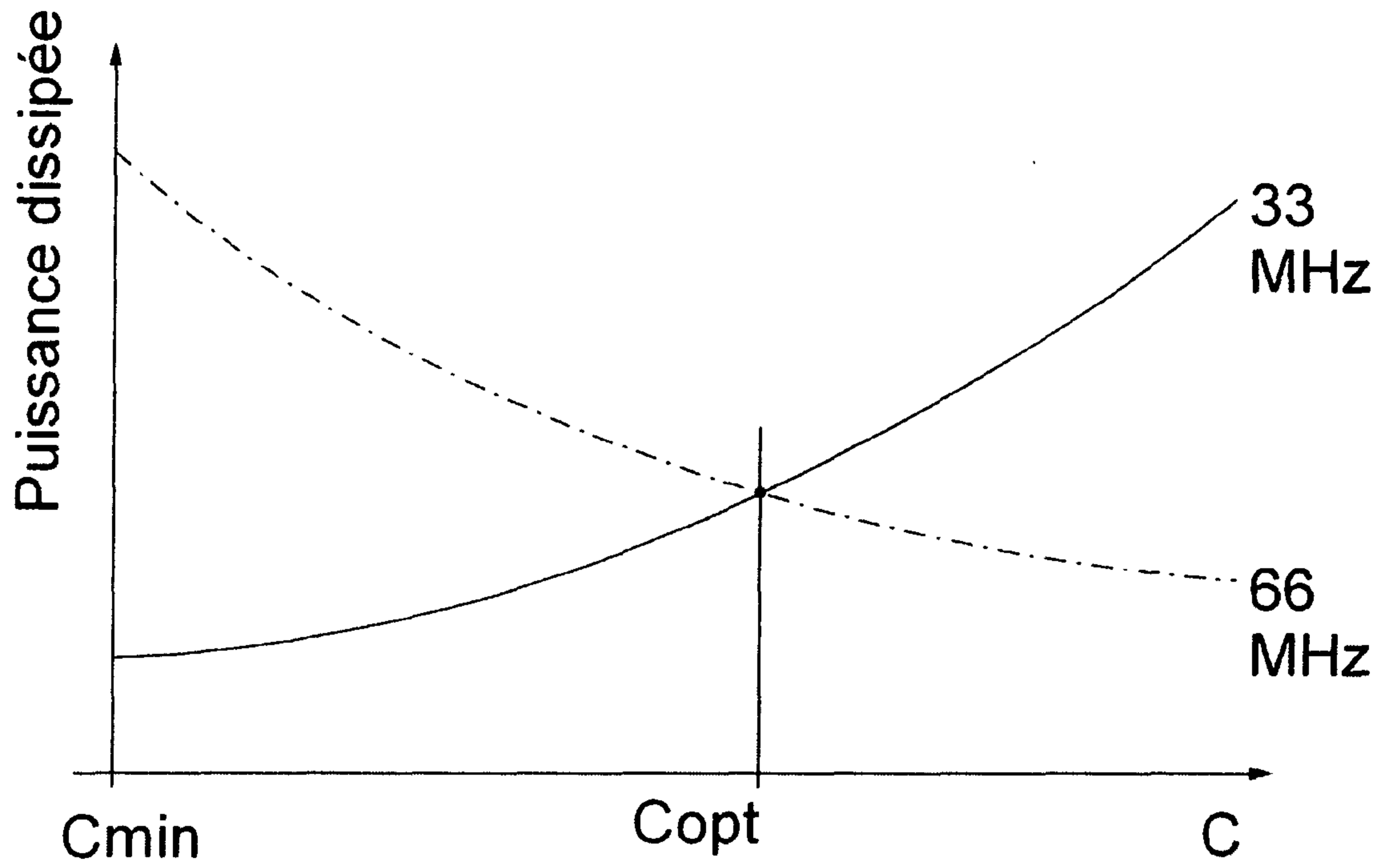


Fig. 5

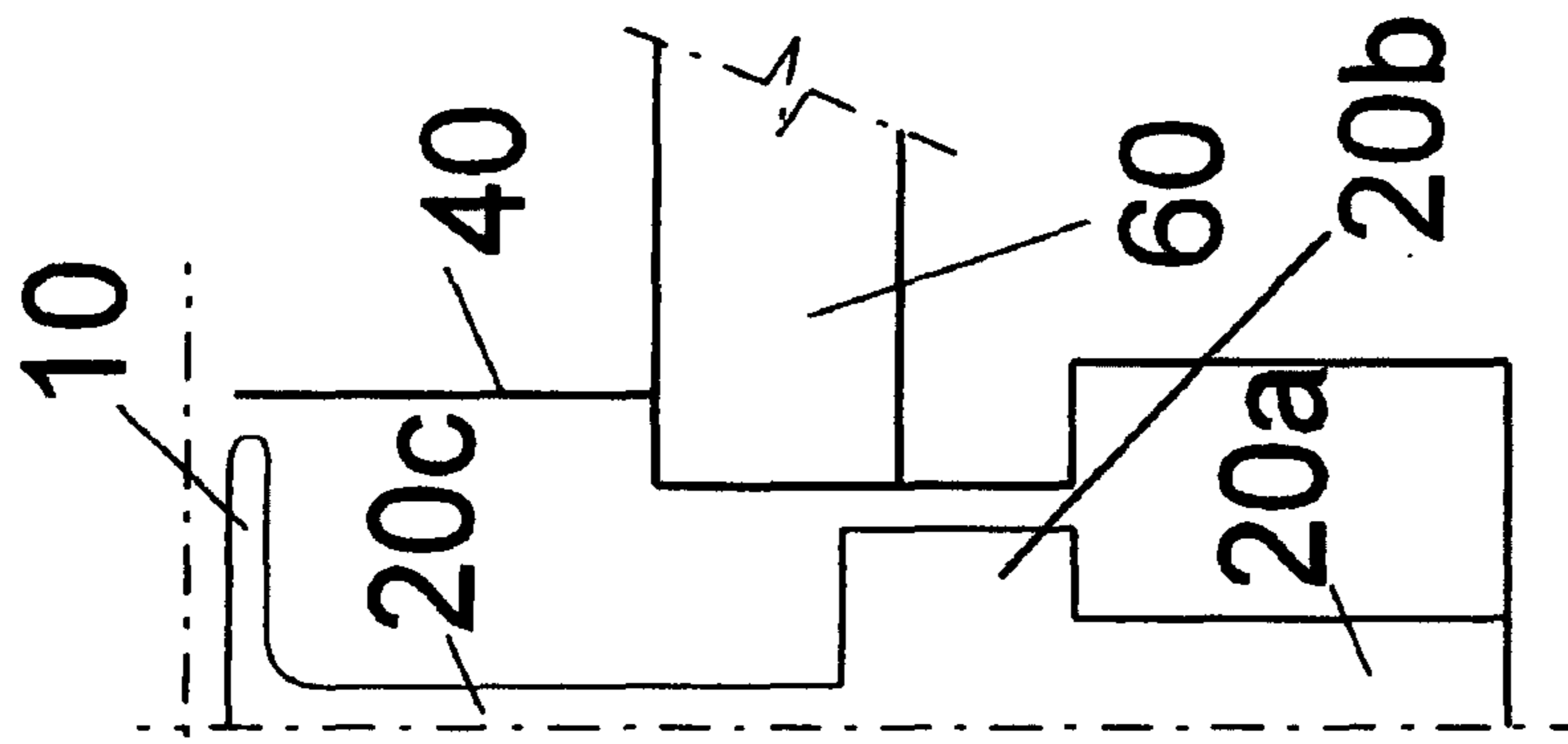


Fig. 6b

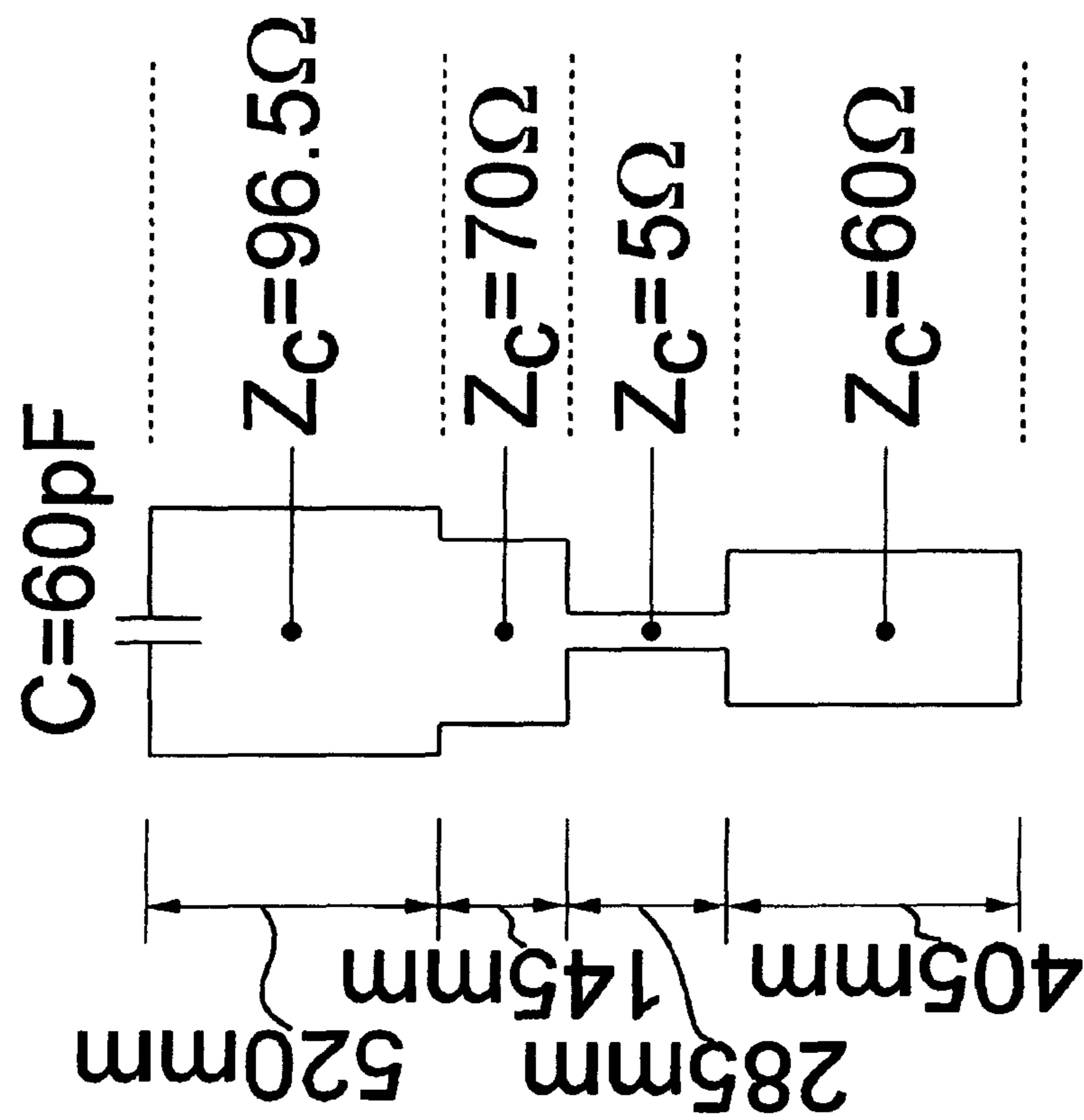


Fig. 6a

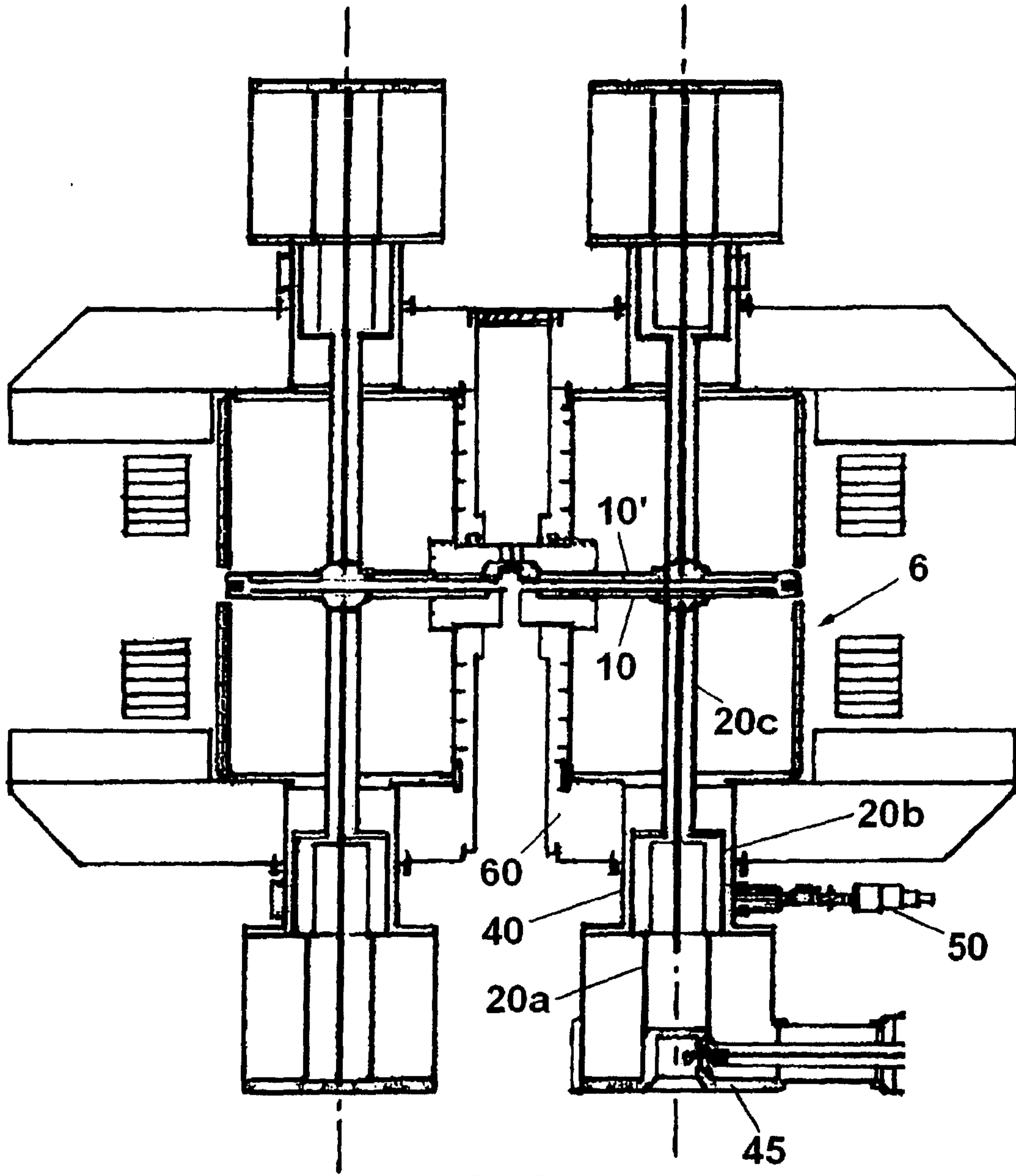


Fig.7

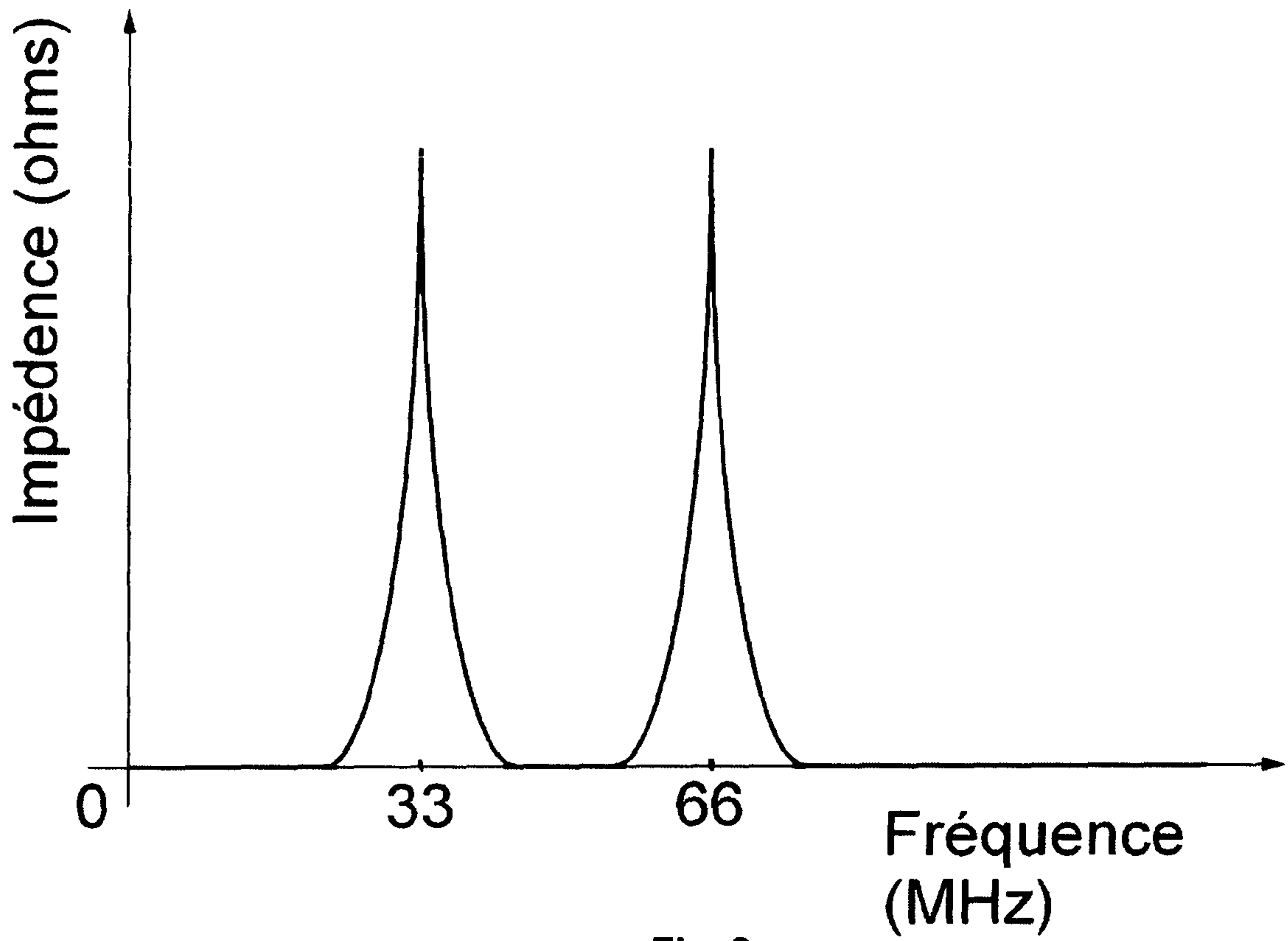


Fig. 8

