(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) Numéro de publication: **0 136 216**
B1

(12) # FASCICULE DE BREVET EUROPÉEN

(45) Date de publication du fascicule du brevet: **08.06.88**

(51) Int. Cl.⁴: **H 05 H 7/00**

(21) Numéro de dépôt: **84401699.8**

(22) Date de dépôt: **21.08.84**

(54) **Structure accélératrice linéaire autofocalisante de particules chargées.**

(30) Priorité: **02.09.83 FR 8314090**

(43) Date de publication de la demande:
03.04.85 Bulletin 85/14

(45) Mention de la délivrance du brevet:
08.06.88 Bulletin 88/23

(84) Etats contractants désignés:
DE GB NL

(56) Documents cité:
US-A-2 770 775
US-A-4 211 954

(73) Titulaire: **C.G.R. MeV, Route de Guyancourt, F-78530 Buc (FR)**

(72) Inventeur: **Tronc, Dominique, THOMSON- CSF SCPI 173, bld Haussmann, F-75379 Paris Cedex 08 (FR)**

(74) Mandataire: **Grynwald, Albert, THOMSON- CSF SCPI 19, avenue de Messine, F-75008 Paris (FR)**

EP 0 136 216 B1

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

LIBER, STOCKHOLM 1988

Description

L'invention concerne une structure accélératrice linéaire autofocalisante de particules chargées, destinée à équiper un accélérateur linéaire d'électrons.

Des accélérateurs linéaires de particules chargées sont utilisés dans de nombreux domaines tels que, scientifiques, médicaux, et même industriels. Selon leur application, ces accélérateurs produisent des faisceaux de particules, d'électrons par exemple, ayant des énergies souvent comprises entre un et plusieurs dizaines de MeV.

La puissance électrique consommée par ces accélérateurs est considérable, elle peut atteindre par exemple 130 Kw dont seulement 20 Kw se retrouvent dans le faisceau accéléré; aussi le rendement global d'un tel accélérateur a une répercussion directe et importante sur le coût d'utilisation de cet accélérateur, et une amélioration de son rendement par l'optimisation des éléments qui le constitue, est un souci constant des spécialistes, l'amélioration du rendement étant également souvent liée à l'amélioration des qualités du faisceau obtenu.

Les structures accélératrices linéaires d'électrons sont généralement formées par une succession de cavités résonantes, dont les dimensions sont liées à la fréquence d'une onde électromagnétique injectée dans la structure pour accélérer les électrons, et à la vitesse des électrons (voir par exemple, US-A-2 770 755 ou US-A-4 211 954).

Traditionnellement, les structures accélératrices sont optimisées en ce qui concerne la dynamique longitudinale on choisit les longueurs des cavités résonantes, qui constituent des cavités accélératrices, de façon à accélérer constamment dans chacune d'elles les électrons.

La partie accélératrice de l'onde électromagnétique est au maximum égale à sa demie période, et pour bénéficier d'un maximum d'énergie cédée par cette onde aux électrons, c'est-à-dire d'une valeur élevée du coefficient dit "d'angle de transit", ces cavités ont couramment une longueur $\underline{l}$ sensiblement égale au produit du quart au tiers de la longueur λo de l'onde électromagnétique par la vitesse relative β des électrons, selon la relation suivante:

$$\underline{l} \simeq \beta \frac{\lambda o}{\underline{n}};$$

où β est le quotient de la vitesse V moyenne des électrons par la vitesse C de la lumière ($\beta = \frac{V}{C}$), et $\underline{n}$ est compris entre 3 et 4. Cette longueur, définie dans le cadre du calcul d'une cavité classique, est appelée longueur accélératrice.

Ainsi par exemple, dans le cas d'une structure accélératrice fonctionnant à 3000 MHZ, soit une longueur d'onde λo égale à 100 mm et pour β = 0,5, les cavités accélératrices ont une longueur de l'ordre de 12 à 16 mm environ, augmentant progressivement pour atteindre 25 à 33 mm lorsque $\beta = 1$.

Cette approche traditionnelle où l'optimisation est limitée à la dynamique longitudinale, est imparfaite notamment par ce qu'elle ne prend pas en compte un effet de défocalisation radiale du faisceau le long de la structure accélératrice, cet effet s'affirmant particulièrement dans la première partie de cette structure où l'énergie des électrons est encore faible.

Cette défocalisation du faisceau est généralement compensée en ajoutant des solénoïdes disposés concentriquement autour de la structure accélératrice, pour créer un champ magnétique correcteur, ce qui augmente le coût et la complexité.

La présente invention concerne une structure accélératrice de particules chargées autofocalisante, dans laquelle l'effet de défocalisation du faisceau est évité par l'annulation de l'une de ses causes, contrairement aux structures selon l'art antérieur où cet effet est seulement compensé.

Dans la structure accélératrice selon l'invention, ceci est obtenu grâce à un agencement simple et peu coûteux de l'unique ou de la première cavité accélératrice de cette structure, et particulièrement applicable dans le cas où, dans cette cavité, le trou de sortie du faisceau a un diamètre inférieur à la longueur accélératrice précédemment mentionnée; cet agencement est remarquable en ce qu'il permet, dans ce dernier cas, de tenir compte de ce que la composante radiale du champ électrique dans la cavité accélératrice constitue une des causes principales de la divergence de particules chargées périphériques du faisceau, et que cette composante radiale est localisée à proximité des faces d'entrée et de sortie de la cavité et a des effets contraires à l'entrée et à la sortie de cette cavite.

Selon l'invention, un procédé d'utilisation d'une structure accélératrice linéaire autofocalisante de particules chargées, comportant une première cavité accélératrice d'une succession de cavités accélératrices permettant d'accélérer un faisceau de particules chargées sous l'effet d'une onde électromagnétique de fréquence F injectée dans ladite structure, l'axe de ladite première cavité étant confondu avec l'axe longitudinal de ladite structure et l'axe dudit faisceau, et comportant une face d'entrée et une face de sortie munies respectivement pour le passage dudit faisceau d'un trou d'entrée et d'un trou de sortie ayant un rayon $\underline{r}$ donné, caractérisé en ce que les caractéristiques de l'onde électromagnétique sont choisies de manière telle que la distance séparant les faces d'entrée et de sortie de ladite première cavité comprenne une longueur accélératrice L_1 plus une longueur supplémentaire L_2 destinée à retarder l'instant d'arrivée des particules à la face de sortie, la longueur supplémentaire L_2 étant liée à la longueur accélératrice L_1 par la relation $L_2 = L_1 \times K$, K désignant un coefficient compris entre 0,5 et

1, et au rayon r du trou de sortie par la relation $L_2 \geqslant 2r$.

Nous entendons par longueur accélératrice, une longueur sur laquelle les électrons sont accélérés ainsi qu'il a été explique ci-dessus, cette longueur accélératrice étant définie par la relation qui suit:

- longueur accélératrice = $\beta \frac{\lambda o}{n}$, où:

- $\beta = \frac{V}{C}$;

- n 3 à 4.

Du fait de la longueur supplémentaire entre la face d'entrée et la face de sortie de cette première cavité de la structure accélératrice selon l'invention, les particules ne sont pas soumises à l'action défocalisante de la composante radiale localisée près de la face de sortie, cette composante radiale étant soit en cours de disparition, soit même devenue focalisante; le seul inconvénient mineur consiste en une légère décélération de ces particules, avant qu'elles n'aient franchi le trou de sortie.

L'invention sera mieux comprise à la lumière de la description qui va suivre d'un mode de réalisation d'une structure accélératrice selon son principe, faite en référence aux dessins annexés dans lesquels:

- la figure 1 est une vue schématique partielle en coupe de la structure accélératrice selon l'invention;
- la figure 2 illustre l'onde electromagnétique injectée dans cette structure;
- la figure 3 illustre la trajectoire d'un électron accéléré.

La figure 1 montre partiellement une structure accélératrice linéaire 1 conforme à l'invention, comportant une première cavité accélératrice CA suivie de n cavités accélératrices C_1, ..., C_n, n étant dans l'exemple décrit égal à 2. On n'a pas fait figurer d'éventuelles cellules dites de couplage, lesquelles constituent des éléments classiques disposés entre les cavités C_1, ..., C_n d'une manière connue.

La structure 1 comporte un axe longitudinal Z, confondu avec l'axe de la première cavité CA, et qui constitue également l'axe d'un faisceau de particules (non représenté) se propageant dans le sens de la flèche 2; ce faisceau de particules est accéléré grâce à l'énergie d'une onde électromagnétique (non représentée sur la figure 1) injectée de manière classique dans la structure 1 par un trou de couplage 4.

La première cavité CA, de forme cylindrique, comporte une face d'entrée 3 et une face de sortie 5 normales à l'axe du faisceau Z, et écartées l'une de l'autre d'une distance D; la face d'entrée 3 est munie d'un trou d'entrée 7, la face de sortie 5 est munie d'un trou de sortie 8, ces deux trous étant centrés sur l'axe Z du faisceau. Le faisceau de particules, provenant par exemple, d'une manière connue, d'un canon à électrons suivi d'un élément de glissement (non représentés), pénètre dans la première cavité accélératrice CA par le trou d'entrée 7, et ressort de cette cavité CA par le trou de sortie 8, se propageant dans la structure 1 dans le sens montré par la flèche 2.

Compte tenu de la vitesse des particules, elles sont accélérées sur un trajet tel que par exemple la longueur accélératrice L_1 qui, dans l'invention correspond à une fraction de la distance D entre la face d'entrée 3 et la face sortie 5 de la première cavité CA; dans l'exemple non limitatif décrit, la longueur accélératrice L_1 correspond à une longueur sensiblement égale à la relation $\beta \frac{\lambda o}{n}$ ou : n = 3 à 4, λo est la longueur d'onde de l'onde électromagnétique, et où β correspond à la vitesse relative des électrons. Cette vitesse relative des électrons est calculée en prenant la moyenne entre la vitesse d'entrée dans la première cavité CA, et la vitesse maximum atteinte dans cette cavité à la sortie de la longueur accélératrice L_1. Il est à remarquer que certains électrons sont décélérés au tout début de leur trajectoire, ce dont on ne tient pas compte dans l'approximation de la longueur accélératrice L_1.

L'onde électromagnétique injectée dans la structure 1 détermine un champ électrique ayant une composante longitudinale E_z et des composantes radiales Er_1, Er_2, et la distribution et l'intensité de ces composantes radiales est influencée par la dimension des trous d'entrée et de sortie 7, 8. Aussi, dans l'exemple non limitatif de la description où les rayons r de ces trous sont égaux, on obtient une localisation des composantes radiales Er_1, Er_2, le rayon r des trous 7, 8 étant suffisamment faible par rapport à la longueur accélératrice L_1 pour que le rapport $\frac{2r}{L_1}$ soit inférieur à 1. De ce fait:

- une première composante radiale Er_1 est localisée à proximité de la face d'entrée 3 et a une action globalement convergente. Pour certains électrons, elle peut se décomposer en une action divergente suivie d'une action convergente;
- une seconde composante radiale Er_2 est localisée à proximité de la face de sortie 5, et a une action divergente sur les électrons.

Ainsi, en supposant que la distance D entre la face d'entrée 3 et la face de sortie 5 soit uniquement formée par la longueur accélératrice L_1, des particules périphériques (non représentées) ayant franchi cette distance D et parvenant à proximité du trou de sortie 8 et de la face de sortie 5, subiraient l'influence défocalisante de la composante radiale Er_2 du champ.

Au contraire, dans la structure 1 selon l'invention, ces mêmes particules chargées ayant franchi la première longueur accélératrice L_1, ne subissent pas l'influence de cette composante radiale Er_2 divergente, dont elles sont encore séparées par une longueur supplémentaire L_2; la distance D entre les faces d'entrée et de sortie étant formees par l'addition de ces deux longueurs $L_1 + L_2$, et la longueur supplémentaire

L_2 étant égale ou supérieure à deux fois le rayon r du trou de sortie 8 ($L_2 \geqslant 2$ r). Il est à noter que les trous d'entrée et de sortie 7, 8 comportent en général des becs, non représentés sur la figure 1 qui est schématique, et le rayon r représente un rayon approximatif moyen du trou de sortie 8.

La longueur supplémentaire L_2 est telle que l'onde électromagnétique est annulée, voire même inversée quand ces particules ont franchi la distance D, elles sortent de la première cavité CA par le trou de sortie 8 sans diverger; elles peuvent même, si la phase de l'onde électromagnétique est inversée, subir une action convergente et une faible décélération, la composante radiale étant alors inversée également. On note que cette longueur supplémentaire L_2, de la première cavité CA, favorise aussi l'action convergente à l'entrée de la cavité accélératrice suivante C_1 qui constitue la seconde cavité. Dans l'exemple non limitatif décrit, la distance D_1 entre la face de sortie 5 de la première cavité CA et le plan d'entrée 15 de la seconde cavité C_1 est inférieure à la longueur accélératrice L_1, et assure ainsi une convergence sensible à l'entrée de cette seconde cavité C_1, compte tenu du déphasage de l'onde électromagnétique entre cavités CA, C_1, C_2. Ainsi l'effet combiné de l'entrée de la première cavité CA, de la sortie de cette première cavité et de l'entrée de la seconde cavité C_1 est optimisé; ensuite le gain en énergie est tel que l'effet de la sortie de la seconde cavité C_1 est (presque) négligeable. Par souci de simplicité on ne parle pas de cet effet de convergence à l'entrée de la seconde cavité C_1 dans ce qui suit.

La longueur supplémentaire L_2 est définie par la relation suivante: $L_2 = L_1.K$, où K est un coefficient compris entre 0,5 et 1.

Dans une réalisation de la structure accélératrice 1 conforme à l'invention, indiquée à titre d'exemple non limitatif, la première cavité accélératrice CA comporte des dimensions suivantes:

- un rayon R de la cavité CA est de 40 mm;
- la distance D entre la face d'entrée 3 et la face sortie 5 est de 25 mm; cette distance D étant constituée d'une longueur accélératrice L_1 de 15 mm, à laquelle s'ajoute la longueur supplémentaire L_2 de 10 mm;
- le rayon r du trou de sortie 8 est de 3 mm;
- la différence de potentiel entre la face d'entrée 3 et la face de sortie 5 est de l'ordre de 500 KV, et la fréquence de l'onde électromagnétique est de 3000 MHZ.

La distribution du champ électrique étant symétrique par rapport à l'axe Z du faisceau, elle n'est pas représentée dans la partie inférieure de la première cavité CA.

Cette distribution du champ électrique dans la première cavité accélératrice CA, correspond à l'existence dans cette dernière d'un champ accélérateur.

La figure 2 montre l'onde électromagnétique OE dont une demie période $\frac{P}{2}$ détermine ce champ accélérateur et dont la partie de l'onde OE comprise d'une part entre un instant to et l'instant t1, et d'autre part entre un instant t3 et un instant t4 détermine un champ décélérateur; l'instant t2 correspondant à la valeur crête de la demie période $\frac{P}{2}$ où le champ accélérateur Zo est maximum.

En prenant comme référence l'instant t2 où le champ accélérateur est maximum (Zo), des électrons peuvent arriver dans la première cavité accélératrice CA avec des phases d'arrivées Øo de valeurs quelconques. Mais pour éviter l'effet de défocalisation dû à la composante radiale Er_2 localisée près de la face de sortie 5, ces électrons devront franchir la distance D et parvenir à proximité de cette face de sortie, sensiblement à l'instant t3 où le champ accélérateur s'annule, grâce à la longueur supplémentaire L_2.

En prenant pour exemple un électron (non représenté) dont la phase d'arrivée Øo dans la première cavité CA est en avance de 170° par rapport à Zo ou instant t2: cet électron subit un champ décélérateur à proximité de la face d'entrée 3 jusqu'à l'instant t1 où l'onde OE s'inverse et où le champ devient accélérateur; l'action de la composante radiale Er_1, localisée près de la face d'entrée 3, est de ce fait d'abord divergente puis convergente quand le champ devient accélérateur, et son action est globalement convergente. Cet électron ralenti est rejoint par des électrons entrés dans la cavité CA après lui. Aussi l'agencement de la première cavité CA de la structure 1 selon l'invention permet d'éviter l'effet de défocatisation en sortie pour une large gamme de valeurs de phase d'arrivée Øo, par exemple comprises entre - 45° et - 190° par rapport à Zo ou l'instant t1.

La figure 3 illustre la trajectoire d'un électron périphérique du faisceau, et montre les composantes de champ Er, Ez vues à des instants différents, compte tenu de la vitesse finie de l'électron.

La cavité accélératrice est symbolisée par ses parois d'entrée et de sortie 3, 5. La courbe 10 montre la trajectoire d'un électron pénétrant dans la première cavité CA avec une phase d'arrivée Øo égale à - 170°, et à une distance d de l'axe Z du faisceau:

- à l'instant Øo le champ est décélérateur comme montré par la composante longitudinale E_z, et la composante radiale Er_1 est défocalisante;
- à l'instant Ø1 le champ est accélérateur (composante longitudinale E_z) et la composante radiale Er_1 est focalisante; il est à remarquer qu'à cet instant la trajectoire 10 est très proche de la face d'entrée 3, l'électron ayant subi préalablement une décélération, et s'est davantage écarté de l'axe Z du faisceau;
- a l'instant Ø3 le champ est nul, l'électron sort de la première cavité CA et tend à converger vers l'axe Z du faisceau.

En supposant que la distance D entre la face d'entrée 3 et la face de sortie 5 ait été constituée uniquement par la longueur accélératrice L_1, la face de sortie 5 aurait occupée la position de la

ligne 11 en traits pointillés et, le champ auquel aurait alors été soumis l'électron à sa sortie de la première cavité CA est représenté en traits pointillés par les composantes Er_2 et Ez; la trajectoire de l'électron aurait été modifiée selon la flèche 12 représentée en traits pointillés, laquelle tend à diverger de l'axe Z du faisceau.

Cette description montre que la structure accélératrice 1 conforme à l'invention, élimine l'effet de défocalisation des particules chargées périphériques du faisceau, à la sortie d'une cavite accélératrice. Cette élimination de l'effet de divergence est obtenue par un agencement simple, économique, qui permet d'augmenter le rendement d'un accélérateur linéaire de particules chargées.

Revendication

1. Procédé d'utilisation d'une structure accélératrice linéaire autofocalisante de particules chargées, comportant une première cavité accélératrice (CA) d'une succession de cavités accélératrices (CA, C_1, C_2) permettant d'accélérer un faisceau de particules chargées sous l'effet d'une onde électromagnétique (OE) de fréquence F injectée dans ladite structure (1), l'axe de ladite première cavité (CA) étant confondu avec l'axe longitudinal (Z) de ladite structure (1) et l'axe dudit faisceau, et comportant une face d'entrée (3) et une face de sortie (5) munies respectivement pour le passage dudit faisceau d'un trou d'entrée (7) et d'un trou de sortie (8) ayant un rayon $\underline{r}$ donné, caractérisé en ce que les caractéristiques de l'onde électromagnétique (OE) sont choisies de manière telle que la distance (D) séparant les faces d'entrée et de sortie (3,5) de ladite première cavité (CA) comprenne une longueur accélératrice L_1 plus une longueur supplémentaire L_2 destinée à retarder l'instant (Ø3) d'arrivée des particules à la face de sortie (5), la longueur supplémentaire L_2 étant liée à la longueur accélératrice L_1 par la relation $L_2 = L_1 \times K$, K désignant un coefficient compris entre 0,5 et 1, et au rayon $\underline{r}$ du trou de sortie (8) par la relation $L_2 \geqslant 2\,\underline{r}$.

Patentanspruch

Verfahren zur Benutzung einer selbstfokussierenden Linearbeschleunigungsstruktur für geladene Teilchen, mit einem ersten Beschleunigungshohlraum (CA) einer Reihenfolge von Beschleunigungshohlräumen (CA, C_1, C_2), die die Beschleunigung eines Bündels von geladenen Teilchen ermöglicht, unter der Wirkung einer elektromagnetischen Welle (OE) der Frequenz F, in die obengenannte Struktur eingespeist wird, wobei die Achse des ersten obengenannten Hohlraums (CA) mit der Längsachse (2) der obengenannten Struktur (1) und der Achse des obengenannten Bündels übereinstimmt, und eine Eintrittsfläche (3) sowie eine Austrittsfläche (5) aufweist, die jeweils mit einem Eintrittsloch (7) und mit einem Austrittsloch (8) eines vorbestimmten Radius (r) versehen ist, für den Durchgang des obengenannten Bündels, dadurch gekennzeichnet, daß die Kenndaten der elektromagnetischen Welle (OE) derart ausgewählt sind, daß der Abstand (D) zwischen der Eintritts- und der Austrittsfläche (3, 5) des obengenannten ersten Hohlraums eine Beschleunigungslänge (L_1) und eine zusätzliche Länge (L_2) umfaßt, die dazu bestimmt ist, den Ankunftzeitpunkt (Ø3) der Teilchen an der Austrittsfläche (5) zu verzögern, wobei die zusätzliche Länge (L_2) mit der Beschleunigungslänge (L_1) über die Relation $L_2 = L_1 \times K$, worin K ein Koeffizient zwischen 0,5 und 1 ist, und mit dem Radius (r) des Austrittsloch (8) über die Relation $L_2 \geqslant 2\underline{r}$, verknüpft ist.

Claim

A method of using a linear autofocussing accelerating structure for charged particles, comprising a first accelerating cavity (CA) of a succession of accelerating cavities (CA, C_1 and C_2) making it possible to accelerate a beam of charged particles under the effect of an electromagnetic wave (OE) of a frequency F injected into the said structure (1), the axis of the said first cavity (CA) coinciding with the longitudinal axis (2) of the said structure (1) and of said beam, and comprising an entry face (3) and an exit face (5) for the passage of the said beam, respectively and having an entry hole (7) and an exit hole (8) the said beam and having a given radius $\underline{r}$ characterized in that the characteristics of the electromagnetic wave (OE) are selected in such a manner that the distance (D) separating the entry and exit faces (3 and 5) of the said first cavity (CA) comprises an accelerating length L_1 plus a supplementary length L_2 destined to retard the instant (Ø3) of arrival of the particles at the exit face (5), the supplementary length L_2 being related to the accelerating length L_1 by the formula $L_2 = L_1 \times K$, where K designates a coefficient comprised between 0.5 and 1, and related to the radius $\underline{r}$ of the exit hole (8) by the relation $L_2 \geqslant 2\,\underline{r}$.

FIG_1

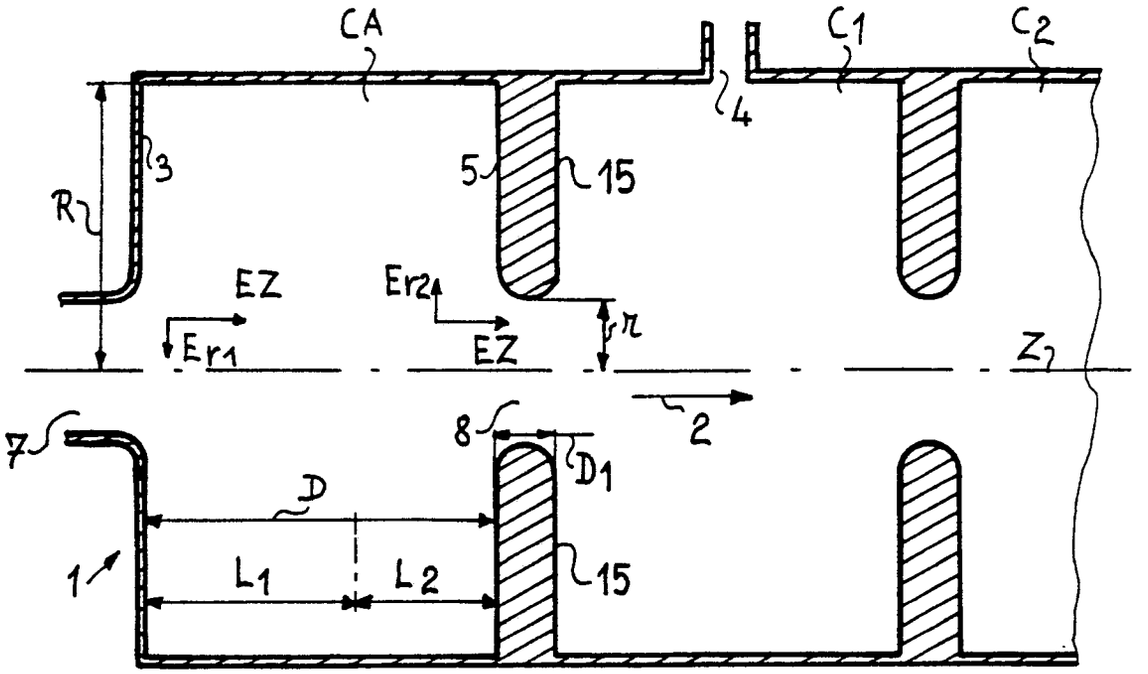


FIG_2

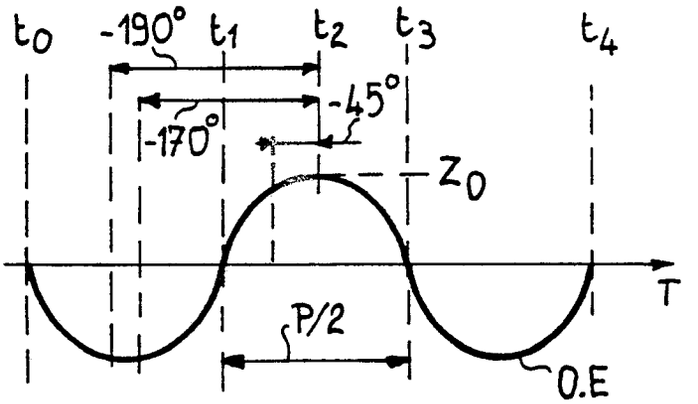


FIG_3

