

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

⑭ Date de dépôt : 27.12.90.

⑮ Priorité :

⑰ Date de la mise à disposition du public de la demande : 13.08.93 Bulletin 93/32.

⑱ Liste des documents cités dans le rapport de recherche : *Le rapport de recherche n'a pas été établi à la date de publication de la demande.*

⑲ Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑴ Demandeur(s) : *Société dite : THOMSON-CSF Société Anonyme — FR.*

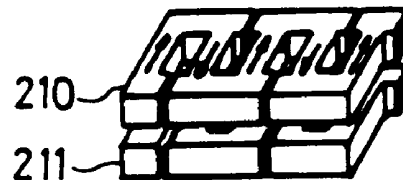
⑵ Inventeur(s) : Leboutet Hubert et Simon Michel.

⑶ Titulaire(s) :

⑷ Mandataire : Beylot Jacques Thomson-CSF SCPI.

⑸ Onduleur pour la génération d'énergie lumineuse à partir d'un faisceau d'électrons.

⑹ L'invention concerne un onduleur, c'est à dire un dispositif engendrant une succession de champs magnétiques transverses alternativement polarisés le long du parcours d'un faisceau d'électrons et permettant, dans un Laser à Electron Libre, la conversion directe d'une partie de l'énergie d'un faisceau d'électrons relativistes en énergie lumineuse. Elle est relative à un onduleur comportant un circuit de magnétisation constitué d'un conducteur électrique (210, 211) qui décrit des méandres le long du parcours du faisceau d'électrons et qui est parcouru par un fort courant d'excitation, et un circuit de refroidissement qui évacue l'énergie thermique dissipée par le courant d'excitation dans les méandres du conducteur électrique. Avantageusement, le conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation présente deux parties (210, 211) superposées décrivant des méandres à contour rectangulaire à profil en II et le circuit de refroidissement est constitué d'un réseau de tubulures à circulation de fluide.



ONDULEUR POUR LA GENERATION D'ENERGIE  
LUMINEUSE A PARTIR D'UN FAISCEAU D'ELECTRONS

L'invention concerne des dispositifs appelés onduleurs, qui permettent, dans les Lasers à Electron Libre (LEL), la conversion directe d'une partie de l'énergie d'un faisceau d'électrons relativistes en énergie lumineuse.

5 Un Laser à Electron Libre est constitué, comme représenté à la figure 1, par :

- une source d'électrons à haute énergie qui est formée d'un canon à électrons 1 suivi d'un accélérateur linéaire 2 radiofréquence ou à induction et qui émet des bouffées d'électrons accélérés ;

10

- un premier système de déviation magnétique 3 permettant d'infléchir la trajectoire des électrons accélérés vers une cavité optique accordée 4 de Laser ;

- ladite cavité optique accordée 4 de Laser avec ses miroirs 5 et 6, et sa fenêtre optique 7 de sortie des ondes lumineuses ;

15

- un onduleur 8 qui est disposé dans la partie médiane de la cavité optique 4 sur le parcours du faisceau d'électrons accélérés et qui engendre un champ magnétique transverse alternativement polarisé Nord-Sud, Sud-Nord le long de la direction de propagation du faisceau d'électrons et

20

- un deuxième système de déviation magnétique 9 permettant d'infléchir la trajectoire du faisceau d'électrons après son passage dans la cavité optique 4 pour qu'il s'en échappe latéralement par rapport à la fenêtre optique 7 de

25

sortie des ondes lumineuses.

Le principe de fonctionnement du Laser à Electron Libre est basé sur le rayonnement de freinage qui résulte du fait que tout électron subissant une accélération ou une

décélération rayonne de l'énergie électromagnétique et sur le raccourcissement relativiste de la longueur d'onde.

Dans l'onduleur, les électrons traversant une succession de champs magnétiques transverses alternativement polarisés subissent, comme représenté à la figure 2, des déflexions de petites amplitudes, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, et rayonnent de l'énergie lumineuse dans la direction de propagation du faisceau. Dans des conditions proches du synchronisme entre l'oscillation forcée des électrons et l'onde lumineuse, il y a échange d'énergie des électrons à l'onde lumineuse et déclenchement d'un phénomène Laser dans la cavité optique.

La longueur d'onde de l'émission lumineuse peut s'écrire :

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{ond}}}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$$

$\lambda_{\text{ond}}$  est le pas magnétique ou pas de l'onduleur est égal à :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$v$  étant la vitesse des électrons et  $c$  la vitesse de la lumière

$K$  est égal à :

$$K = 0,94 \lambda_{\text{ond}} B_0$$

$B_0$  étant la valeur de l'induction magnétique produite par l'onduleur.

On remarque que la longueur d'onde de l'émission lumineuse est d'autant plus courte que le pas magnétique de l'onduleur  $\lambda_{\text{ond}}$  est petit.

Des onduleurs utilisant ce principe physique on déjà fait l'objet de diverses réalisations mettant en oeuvre des structures à aimants permanents, aimants électromagnétiques ou hybrides avec un circuit magnétique inséré entre deux blocs d'aimants. Toutes ces structures utilisent des matériaux

magnétiques qui présentent des effets de saturation limitant la valeur du champ magnétique réalisable.

La présente invention a pour but de repousser une telle limitation en évitant l'emploi de matériaux magnétiques.

5 Elle a pour objet un onduleur pour la génération d'énergie lumineuse à partir d'un faisceau d'électrons comportant un circuit de magnétisation constitué d'un conducteur électrique qui décrit des méandres sur le parcours du faisceau d'électrons et qui est parcouru par un fort courant d'excitation, et un circuit de refroidissement qui évacue 10 l'énergie thermique dissipée par le courant d'excitation dans les méandres du conducteur électrique du circuit de magnétisation.

Le conducteur électrique du circuit de magnétisation 15 peut décrire des méandres à contour triangulaire, rectangulaire en U ou en  $\Pi$ , ou arrondi. Il peut être en une partie ou en deux parties isolées ou non. Lorsqu'il est en une seule partie, il est centré sur l'axe des trajectoires du faisceau d'électrons et percé, longitudinalement de trous alignés laissant un passage au 20 faisceau d'électrons, ce passage étant, éventuellement entouré d'une enveloppe métallique perméable au champ magnétique. Lorsqu'il est en deux parties, celles-ci sont placées de part et d'autre des trajectoires du faisceau d'électrons et parcourues par des courants de forte intensité circulant dans le même sens.

25 Le circuit de refroidissement est avantageusement constitué d'un réseau de tubulures qui viennent en contact intime avec les bords extérieurs des méandres du conducteur électrique du circuit de magnétisation et dans lesquelles circule un fluide de refroidissement.

30 Cette structure de circuit de magnétisation peut supporter un très fort courant d'excitation et permet d'obtenir des champs magnétiques transverses alternativement polarisés très intenses.

Elle a l'intérêt de ne pas présenter de champ magnétique rémanent en l'absence de circulation de courant d'excitation.

5 Elle permet en outre une miniaturisation du pas magnétique de l'onduleur et par conséquent une augmentation de la fréquence du rayonnement lumineux par rapport aux solutions connues pour un niveau identique d'énergie des électrons.

10 De plus, il est possible d'ajuster la forme et le niveau des champs magnétiques induits grâce à des dérivations du courant judicieusement réparties le long du conducteur électrique du circuit de magnétisation qui permettent un contrôle fin du courant circulant dans l'onduleur.

15 Cette structure se prête également à une configuration à pas variable ou à champs variables permettant d'obtenir un fort rendement pour un faible encombrement.

20 Elle permet un contrôle précis des valeurs des champs magnétiques transverses et même, éventuellement, de faire varier les champs magnétiques transverses au cours du temps, lors du passage dans l'onduleur des paquets d'électrons accélérés délivrés par l'accélérateur linéaire.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront ci-après de divers modes de réalisation donnés à titre d'exemples. Cette description sera faite en regard du dessins dans lequel :

25 - une figure 1 précitée représente un schéma de principe d'un Laser à Electron Libre ;

30 - une figure 2 précitée illustre les ondulations de trajectoire provoquées sur un faisceau d'électrons par une succession de champs magnétiques transverses alternativement Nord-Sud et Sud-Nord;

- une figure 3 représente, de manière très schématique, une façon d'engendrer selon un axe une succession de champs magnétiques transverses alternativement Nord-Sud et Sud-Nord au moyen d'une superposition de deux nappes

identiques de courants transverses d'excitation de sens alternés;

5 - des figures 4a, b, c, d, e, f, g et h représentent en perspective, différentes formes possibles pour le conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation d'un onduleur selon l'invention ;

- une figure 5 représente, en perspective, de manière schématique, l'assemblage électrique d'un conducteur électrique à méandres en deux parties superposées ;

10 - une figure 6 représente, une coupe longitudinale partielle d'un onduleur selon l'invention ;

- une figure 7 représente, une coupe en section droite de l'onduleur représenté à la figure précédente ;

15 - des figures 8 et 9 représentent, en coupe transversale et en vue partielle de dessus, une variante du conducteur à méandres et d'un circuit de refroidissement ;

- des figures 10a, b, c montrent des sections de tubes employés dans le circuit de refroidissement illustré aux figures 8 et 9 ;

20 - des figures 11 et 12 détaillent, en coupes longitudinale et transversale, une forme possible de contact entre une tubulure du circuit de refroidissement et l'extrémité d'un méandre du conducteur à méandres ;

25 - des figures 13 et 14 représentent, en coupe transversale et en vue partielle de dessus, une autre variante du conducteur à méandres et d'un circuit de refroidissement ;

30 - des figures 15a, b, c, d détaillent, en coupe, des formes possibles de contact entre une tubulure du circuit de refroidissement et l'extrémité d'un méandre du conducteur à méandres, et

- des figures 16 et 17, 18 et 19, 20 et 21, 22 et 23, 24 et 25 représentent, en coupe transversale et en vue partielle de dessus, diverses autres variantes du conducteur à méandres et du circuit de refroidissement.

Dans le dessin, les mêmes éléments ont été indexés sur les différentes figures par les mêmes références.

Comme le montre la figure 3, on peut obtenir une succession de champs magnétiques transverses alternativement polarisés Nord-Sud et Sud-Nord, le long d'une direction 5 représentant le parcours d'un faisceau d'électrons, en disposant au-dessus et au-dessous de cette direction deux nappes identiques de courants 11, 12, 13, 14 et 21, 22, 23, 24 de direction transverse et de sens alternés. Conformément à 10 l'invention, ces deux nappes de courants sont obtenues au moyen d'un conducteur électrique décrivant des méandres de part et d'autre du parcours du faisceau d'électrons dans la cavité optique. Ce conducteur électrique qui constitue le circuit de magnétisation de l'onduleur peut prendre diverses 15 formes. Il peut être d'une seule partie comme représenté en 200, 204, 208, 212 aux figures 4a, c, e, g. Il est alors percé longitudinalement de trous alignés 201, 205, 209, 213 laissant un passage au faisceau d'électrons transitant dans la cavité optique. Il peut également être en deux parties de même forme, 20 superposées avec un espace intercalaire dans lequel passe le faisceau d'électrons transitant dans la cavité optique comme montré en 202, 203 ; 206, 207 ; 210, 211 ; 214, 215 aux figures 4b, d, f, h. Il décrit des méandres qui peuvent être soit à contour triangulaire comme représenté en 200, 202, 203 aux 25 figures 4a et 4b, soit à contour rectangulaire en U comme représenté en 204, 206, 207 aux figures 4c et 4d ou en ¶ comme représenté en 208, 210, 211 aux figures 4e et 4f, soit à contour arrondi comme représenté en 212, 214, 215 aux figures 4g et 4h.

Une forme préférée pour le conducteur électrique du 30 circuit de magnétisation de l'onduleur est celle de la figure 4f où celui-ci se présente en deux parties superposées 210, 211 décrivant des méandres à contour rectangulaire en ¶. La figure 5 représente l'assemblage électrique des deux parties 31, 32 d'un tel conducteur qui sont disposées l'une 31 au-dessus et l'autre 32 au-dessous du parcours du faisceau d'électrons dans

la cavité optique. Les liaisons électriques entre ces deux parties 31, 32 sont organisées de manière à faire circuler le même courant d'excitation dans le même sens dans chacune d'entre elles. L'arrivée du courant d'excitation se fait par une

5 barre conductrice 33 fixée à une patte latérale conductrice 34 formant une première extrémité de la partie 31 du conducteur à méandres disposée dans l'axe et au-dessus du parcours du faisceau d'électrons. Le courant d'excitation parcourt cette

10 autre patte latérale conductrice 35 disposée du même côté. Cette patte latérale 35 est fixée à une barre conductrice 36 d'interconnexion entre les deux parties 31 et 32 du conducteur à méandres qui revient en direction de la première extrémité de la

15 dernière, une autre patte latérale 37 formant une première extrémité de la partie 32 du conducteur à méandres disposée dans l'axe et au-dessous du parcours du faisceau d'électrons. Le courant d'excitation revient par la barre conductrice d'interconnexion 36 en direction de la première extrémité de la

20 partie 32 puis parcourt cette partie 32 dans le même sens que la partie 31 et en sort par une deuxième extrémité qui forme une patte latérale conductrice 38 dépassant du côté opposé aux autres pattes latérales conductrices 34, 35, 37 et qui est raccordée à une barre conductrice 39 de départ de courant

25 longeant les deux parties 31, 32 du conducteur à méandres. La barre conductrice d'interconnexion 36 et la barre conductrice 39 de départ de courant qui sont disposées latéralement, de part et d'autre des deux parties superposées 31 et 32 du conducteur à méandres, sont placées à la hauteur de l'espace séparant les

30 deux parties 31, 32 du conducteur à méandres, au niveau du parcours du faisceau d'électrons, de manière à réaliser une correction de champ magnétique le long de l'axe du faisceau d'électrons.

Les figures 6 et 7 illustrent la structure d'un onduleur ayant un circuit de magnétisation formé d'un

conducteur à méandres en deux parties superposées 31, 32  
assemblées électriquement en série comme dans la figure 5 et  
équipées d'un circuit de refroidissement.

5 Les deux parties superposées 31, 32 du conducteur à  
méandres sont réalisées en un métal excellent conducteur  
électrique comme par exemple du cuivre, de l'argent, de  
l'aluminium ou du molybdène.

10 La tenue mécanique aux efforts engendrés par le  
passage du courant dans les méandres est réalisée en insérant  
des cales 40 en matériau isolant dans les fentes constituant les  
espaces entre deux méandres. Ces cales 40 sont réalisées par  
exemple avec du nitrure de bore, de la céramique ou un métal  
pur ou alliage fortement oxydé en surface dont l'oxyde est non  
conducteur tel que de l'aluminium ou un alliage d'aluminium  
15 anodisé.

Les deux parties superposées 31, 32 du conducteur à  
méandres sont séparées par des entretoises isolantes 41, 42 de  
façon à laisser entre elles un espace libre 43 pour la  
circulation du faisceau d'électrons. Ces entretoises isolantes  
20 41, 42 peuvent être réalisées en un même matériau que les cales  
isolantes 40 par exemple en aluminium ou en alliage d'aluminium  
oxydé sur les deux faces de contact. Deux feuilles métalliques  
perméables aux champs magnétiques sont insérées entre les  
parties 31, 32 du conducteur à méandres et les entretoises 41,  
25 42 afin de réaliser un écran et d'éviter les problèmes éventuels  
de champ de sillage. Ces feuilles sont isolées électriquement  
sur leur face en contact avec les parties 31, 32 du conducteur à  
méandres.

30 Les deux parties superposées 31, 32 du conducteur à  
méandres sont maintenues en place par deux jeux de barres 44,  
45 et 46, 47 boulonnées entre elles, qui les pincent en appui  
sur les entretoises 41, 42.

On distingue, de chaque côté des deux parties 31, 32  
du conducteur à méandres, au niveau de leur espace intercalaire  
la barre d'interconnexion électrique 36 fixée à la patte

latérale 35 et la barre conductrice de départ du courant d'excitation 39 fixée à la patte latérale 38. Ces deux barres sont creuses pour permettre la circulation d'un fluide de refroidissement.

5 Les deux parties 31, 32 du conducteur à méandres qui peuvent être parcourues par un courant d'excitation de plusieurs kiloampères sont équipées d'un circuit de refroidissement. Celui-ci comporte une conduite d'amenée 50 de fluide de refroidissement disposée dans l'axe et au-dessus des deux  
10 parties 31, 32 du conducteur à méandres et de leurs barres de maintien 44, 46, une conduite d'évacuation 51 de fluide de refroidissement disposée dans l'axe et au-dessous des deux parties 31, 32 du conducteur à méandres et de leurs barres de maintien 45, 47, et divers serpentins allant de la conduite  
15 d'amenée 50 à la conduite d'évacuation 51 en passant au contact des pièces à refroidir.

Deux serpentins 52, 53 enroulés au pas des méandres, l'un 52 autour de la barre de maintien 44, l'autre autour de la barre de maintien 46, viennent en contact avec la surface  
20 supérieure de chacune des extrémités de chaque méandre de la partie supérieure 31 du conducteur à méandres. Deux autres serpentins 54, 55 enroulés au pas des méandres, l'un 54 autour de la barre de maintien 45, l'autre 55 autour de la barre de maintien 47, viennent en contact avec la surface inférieure de  
25 chacune des extrémités de chaque méandre de la partie inférieure 32 du conducteur à méandres. Les contacts entre ces serpentins 52, 53, 54, 55 et les extrémités des méandres des parties supérieure 31 et inférieure 32 du conducteur à méandres se font au fond de rainures creusées dans les extrémités des  
30 méandres au droit des faces d'appui des barres de maintien 44, 45, 46, 47.

Le volume intérieur creux de la barre d'interconnexion 36 est parcouru par du fluide de refroidissement grâce à une canalisation 56 qui le relie à la conduite d'amenée 50, et grâce à une canalisation 57 qui le relie à la conduite d'évacuation

51. De même, le volume intérieur creux de la barre 39 de départ du courant d'excitation est relié à la conduite d'amenée 50 par une canalisation 58 et à la conduite d'évacuation 51 par une canalisation 59.

5 Les tubes du circuit de refroidissement sont réalisés en un matériau dont la résistivité électrique est très fortement supérieure à celle des parties 31, 32 du conducteur à méandres, de la barre d'interconnexion 36 et de la barre 39 de départ du courant afin de minimiser les courants de shunt. Ils peuvent  
10 être par exemple en acier inoxydable, en titane ou en alliage fer-nickel-cobalt. Ils peuvent être brasés, soudés ou collés l'important étant d'assurer le meilleur transfert thermique possible en minimisant les courants de shunt.

L'ensemble des deux parties 31, 32 du conducteur à  
15 méandres, de leurs barres de maintien 44, 45, 46, 47 et des tubulures du circuit de refroidissement est placé dans une boîte à vide présentant une paroi cylindrique 60 fermée par un couvercle 61 à chacune de ses extrémités.

Les connexions électriques traversent le couvercle 61  
20 de la boîte à vide par des passages étanches électriquement isolés, par exemple à l'aide de manchons en céramique, pour être raccordées aux câbles 62 d'un générateur de courant d'excitation.

Les conduites 50 et 51 d'amenée et d'évacuation du  
25 fluide de refroidissement traversent l'enceinte à vide 60 par le couvercle 61 au travers de passages étanches électriquement isolés par exemple par des manchons en céramique.

Une plaque électriquement isolante 63 est plaquée à  
l'intérieur de la boîte à vide, contre chaque couvercle 61 pour  
éviter que les couvercles ne soient le siège de courants de  
30 shunt.

Un trou de pompage est aménagé dans la boîte à vide, sur le couvercle non représenté qui est opposé à celui 61 supportant les entrée et sortie des conduites d'amenée et d'évacuation 50, 51 du fluide de refroidissement.

D'autres formes sont envisageables pour le conducteur à méandres et son circuit de refroidissement.

Les figures 8 et 9 illustrent, en coupe transversale et en vue de dessus partiellement coupée, un conducteur à méandres en deux parties superposées 70, 71 équipé d'un circuit de refroidissement constitué d'un unique serpentín 72 en forme d'hélice aplatie qui entoure les deux parties 70, 71 du conducteur à méandres et vient en contact latéralement avec les extrémités des méandres des deux parties 70, 71. Comme le serpentín 72 constitue un shunt de faible longueur entre les deux parties 70, 71 du conducteur à méandre, au niveau de chacun de ses méandres, il est préférable que ces deux parties 70, 71 soient montées électriquement en parallèle et non pas en série comme dans la réalisation précédente illustrée aux figures 5, 6 et 7.

La figure 8 qui est une coupe selon la ligne VIII-VIII de la figure 9 montre l'aplatissement de l'hélice décrite par le serpentín 72 et détaille le contact latéral de ce serpentín à l'extrémité de chaque méandre avec les parties 70, 71 du conducteur à méandres. Pour avoir un meilleur contact, la surface extérieure du serpentín 72 en regard de l'extrémité d'un méandre peut être aplatie, soit qu'elle le soit naturellement, le tube constituant le serpentín 72 étant à section extérieure carrée et à section intérieure ronde ou carrée comme cela est représenté aux figures 10a, 10b, ou à section extérieure ronde creusée d'un méplat comme cela est représenté à la figure 10c, soit qu'elle le soit par écrasement partiel comme cela est représenté aux figures 11 et 12.

La figure 9 qui est une coupe selon la ligne IX-IX de la figure 8 détaille la forme des deux parties du conducteur à méandres 70, 71 disposées en-dessous et au-dessus d'un conduit 69 de même axe entourant les trajectoires du faisceau d'électrons. Ces deux parties 70, 71 ont la forme d'une barre à section rectangulaire dans laquelle des méandres sont découpés au moyen de deux réseaux de fentes 73, 74, décalées et

pratiquées transversalement le long des deux parois latérales opposées. Chaque fente est ensuite obturée en partie par une cale électriquement isolante 75 pour la tenue mécanique aux efforts.

5 Les figures 13 et 14 illustrent, en coupe transversale et en vue de dessus partiellement coupée, un conducteur à méandres en deux parties superposées 76, 77 équipé d'un circuit de refroidissement comportant des morceaux de tube 78, 79 repliés en épingle selon la forme d'un U venant latéralement, 10 par leurs branches au contact des extrémités de chaque méandre. Ces morceaux de tube 78, 79 repliés en épingle sont placés à cheval sur les deux parties superposées 76, 77 du conducteur à méandres, traversent les extrémités de chaque méandre et sont raccordés à leurs extrémités, à deux nourrices, 15 l'une 80 d'amenée d'un fluide de refroidissement, l'autre 81 d'évacuation de fluide de refroidissement qui longent par dessous les deux parties superposées 76, 77 du conducteur à méandres. Comme précédemment, les deux parties 76, 77 du conducteur à méandre sont, de préférence montées 20 électriquement en parallèle car les épingles 78, 79 constituent à chaque méandre des shunts de faible longueur.

La figure 13 qui est une coupe selon la ligne XIII-XIII de la figure 14 montre le profil en U des épingles 78, 79 qui sont enfilées et soudées dans des trous pratiqués aux 25 extrémités de chaque méandre dans les parties 76, 77 du conducteur à méandres.

La figure 14 qui est une coupe selon la ligne XIV-XIV de la figure 13 détaille la forme des deux parties 76, 77 du 30 conducteur à méandres disposées en-dessous et au-dessus d'un conduit 82 de même axe entourant les trajectoires du faisceau d'électrons. Comme précédemment, ces deux parties 76, 77 ont la forme d'une barre à section rectangulaire dans laquelle des méandres sont découpés au moyen de deux réseaux de fentes 83, 84 décalées et pratiquées transversalement le long des parois latérales opposées. Ces fentes sont obturées partiellement par

des cales électriquement isolantes 85 assurant la tenue mécanique.

Ce mode de réalisation du circuit de refroidissement permet une forte dissipation thermique car le fluide de  
5 refroidissement n'accomplit qu'un faible parcours dans les épingles de dérivation 78, 79 entre les nourrices 80, 81 d'amenée et d'évacuation pour parvenir au voisinage des surfaces à refroidir du conducteur à méandres.

En variante, les épingles de tubulure 78, 79 peuvent  
10 ne pas traverser les extrémités des méandres des parties 75, 76 du conducteur à méandres par des trous comme illustré par le détail de la figure 15a, mais seulement venir au contact de la paroi extérieure d'un méandre soit au fond d'une rainure comme illustré par le détail de la figure 15b soit simplement en  
15 surface comme illustré par le détail de la figure 15c, en étant localement écrasées pour augmenter les surfaces en contact comme représenté par le détail de la figure 15d.

Les figures 16 et 17 illustrent, en coupe transversale et en vue de dessus partiellement coupée, un conducteur à  
20 méandres en deux parties superposées 90, 91 équipé d'un circuit de refroidissement comportant deux ensembles de tubes de piquage droits 92, 93 qui traversent verticalement les deux parties 90, 91 du conducteur à méandres, à chaque extrémité de méandre, et qui relie deux nourrices 94, 95 d'amenée de  
25 liquide de refroidissement à deux nourrices 96, 97 d'évacuation de liquide de refroidissement.

Ici encore, les deux parties 90, 91 du conducteur à méandres sont électriquement montées en parallèle car les tubes de piquage 92, 93, constituent à chaque extrémité de méandre  
30 des shunts de faible longueur.

La figure 16 qui est une coupe selon la ligne XVI-XVI de la figure 17 illustre la faible longueur des tubes de piquage qui permet une dissipation thermique encore plus forte que dans le mode de réalisation précédent représenté aux figures 13, 14.

La figure 17 qui est une coupe selon la ligne XVII-XVII de la figure 16 détaille la forme des deux parties 90, 91 du conducteur à méandres disposées en-dessous et au-dessus d'un conduit 98 de même axe entourant les trajectoires du faisceau d'électrons. Comme dans les deux exemples précédents, ces deux parties 90, 91 ont la forme d'une barre à section rectangulaire dans laquelle des méandres sont découpés au moyens de deux réseaux de fentes transversales 99, 100 creusés dans les deux parois latérales opposées. Des cales électriquement isolantes 101 obturent partiellement ces fentes pour assurer la tenue mécanique.

Les tubes de piquage 92, 93 tels qu'ils sont représentés aux figures 16 et 17 traversent par des trous les extrémités des méandres des parties 90, 91 du conducteur à méandres. Cependant ils peuvent également, comme les épingles de tubulure de l'exemple précédent, ne venir qu'au contact des parois latérales extérieures des méandres, soit au fond d'une rainure, soit simplement en surface en étant éventuellement écrasés localement pour augmenter les surfaces en contact.

Les figures 18 et 19 illustrent, en coupe transversale et en vue partielle de-dessus, un conducteur à méandres en deux parties superposées 105, 106 équipé d'un circuit de refroidissement constitué d'un unique serpentin 107 en forme d'hélice circulaire. Ce serpentin 107 entoure les deux parties 105, 106 du conducteur à méandres et vient en contact latéralement avec les extrémités des méandres des deux parties 105, 106. Comme il constitue un shunt de faible longueur entre les deux parties du conducteur à méandres, à l'extrémité de chaque méandre, il est encore préférable de monter électriquement en parallèle les deux parties 105 et 106 du conducteur à méandres.

La figure 18 qui est une coupe selon la ligne brisée XVIII-XVIII de la figure 19 montre la simplicité de réalisation du serpentin 107 en forme d'une simple hélice circulaire et de

son assemblage avec les deux parties 105, 106 du conducteur à méandres.

La figure 19 détaille la forme des deux parties 105, 106 du conducteur à méandres disposées en dessous et au dessus  
5 d'un conduit 108 de même axe entourant les trajectoires du faisceau d'électrons. Ces deux parties 105 et 106 sont constituées chacune d'une barre à section rectangulaire dans laquelle les méandres sont découpés au moyen de deux réseaux  
10 de fentes 109, 110 décalées, pratiquées transversalement le long des deux parois latérales opposées. Ces fentes ont une forme particulière. Elles présentent deux parties rectilignes 111, 112 disposées dans le prolongement l'une de l'autre avec des orientations différentes. Un début de fente en biais 111 permet de pencher les extrémités des méandres de manière à permettre à  
15 l'hélice du serpent 107 du circuit de refroidissement d'adopter un pas régulier tandis qu'une fin de fente 112 perpendiculaire à l'axe du conduit 108 du faisceau d'électrons permet de créer au droit de celui-ci des courants réellement transversaux. Les débuts 111 des fentes sont obturés par des  
20 cales électriquement isolantes 113 qui assurent la tenue mécanique aux efforts.

Les figures 20 et 21 illustrent, en coupe transversale et en vue partielle de dessus, un conducteur à méandres en deux parties superposées 115, 116 équipé d'un circuit de  
25 refroidissement comportant des arceaux tubulaires 117, 118 qui viennent par leur sommet alternativement au contact des surfaces supérieure et inférieure des méandres et qui sont raccordés en bout à deux nourrices, l'une 119 d'amenée de fluide de refroidissement, l'autre 120 d'évacuation de fluide de  
30 refroidissement longeant par dessous les deux parties superposées 115, 116 du conducteur à méandres.

Chaque arceau tubulaire 117, 118 ne vient en contact qu'avec l'une 115 ou 116 des parties du conducteur à méandres qui ne sont donc pas shuntées par de courtes longueurs de tube et qui peuvent alors être connectées électriquement en série.

La figure 20 montre le profil en U des arceaux tubulaires 117, 118 et leurs faibles longueurs de dérivation entre les deux nourrices qui permettent d'assurer une forte dissipation thermique.

5 La figure 21 détaille la forme des deux parties 116, 117 du conducteur à méandres disposées en dessous et au dessus d'un conduit 121 de même axe entourant les trajectoires du faisceau d'électrons. Comme dans divers exemples précédents, ces deux parties 115, 116 ont la forme d'une barre rectangulaire  
10 dans laquelle des méandres sont découpés au moyen de deux réseaux de fentes 122, 123 décalées et pratiquées transversalement le long des parois latérales opposées. Ces fentes sont obturées en partie par des cales électriquement isolantes 124 assurant la tenue mécanique.

15 Comme dans les exemples précédents, les arceaux de tube 117, 118 peuvent avoir diverses sections : une section extérieure carrée, ou ronde creusée d'un méplat ou encore simplement ronde mais déformée par un écrasement partiel à leur contact avec les parties 115, 116 du conducteur à méandres pour  
20 augmenter les surfaces en contact. Il est également envisageable que les contacts entre les arceaux de tube 117, 118 et les faces inférieure et supérieure des parties 115, 116 du conducteur à méandre se fassent au fond de rainures creusées dans lesdites faces.

25 Les figures 22 et 23 illustrent, en coupe transversale et en vue partielle de dessus, un conducteur à méandres en deux parties superposées 125, 126 équipé d'un circuit de refroidissement constitué de deux serpentins 127, 128 en forme d'hélice aplatie disposées latéralement de part et d'autre des  
30 deux parties superposées 125, 126 du conducteur à méandres.

La figure 23 détaille la forme des deux parties 125, 126 du conducteur à méandres disposées en dessous et au dessus d'un conduit 129 de même axe entourant les trajectoires du faisceau d'électrons. Ces deux parties 125, 126 sont constituées chacune d'une barre à section rectangulaire dans laquelle les

méandres sont découpés au moyen de deux réseaux de fentes 130, 131 décalées, pratiquées transversalement le long des deux parois latérales opposées. Ces fentes sont en deux parties rectilignes 132, 133 d'épaisseurs différentes, disposées dans le  
5 prolongement l'une de l'autre. La partie 133 la plus large constitue le fond d'une fente et délimite la section du conducteur au droit du conduit 129 du faisceau d'électrons. La partie 132 la plus étroite constitue le début d'une fente et délimite les extrémités de méandres. Ces deux réseaux de fentes  
10 130, 131 délimitent pour les deux parties 125, 126 du conducteur à méandres, des méandres à contour rectangulaire en ¶. Ils sont obturés en partie par des cales électriquement isolantes 134 assurant la tenue mécanique.

Les deux serpentins 127, 128 du circuit de  
15 refroidissement constituent aux extrémités des méandres, des shunts de faibles longueurs entre les deux parties 125, 126 du conducteur à méandres qui pour cette raison sont préférablement connectées électriquement en parallèle.

Ce mode de réalisation a l'avantage de la simplicité.

20 Les figures 24 et 25 illustrent, en coupe transversale et en vue partielle de dessus, un conducteur à méandres en deux parties superposées 140, 141 équipé d'un circuit de refroidissement comportant deux ensembles de tubes de piquage droits 142, 143 qui viennent les uns au contact des surfaces  
25 inférieures à méandres de la partie inférieure 140 du conducteur à méandres et les autres 143 au contact des surfaces supérieures des méandres de la partie supérieure 141 du conducteur des méandres. Chaque ensemble de tubes de piquage droits 142, 143 relie une nourrice 144, 145 d'amenée de liquide de  
30 refroidissement qui lui est propre à une nourrice 146, 147 d'évacuation de liquide de refroidissement qui lui est également propre. Les quatre nourrices 144, 145, 146, 147 sont disposées latéralement, de part et d'autre des parties superposées 140, 141 du conducteur à méandres.

Dans ce mode de réalisation, les deux parties superposées 140, 141 du conducteur à méandres peuvent être connectées électriquement en série car elles sont refroidies par deux parties distinctes du circuit de refroidissement.

5 Comme dans les exemples précédents, les tubes de piquage 142, 143 peuvent avoir diverses sections : une section extérieure carrée ou ronde creusée d'un méplat ou encore simplement ronde mais déformée par un écrasement partiel au droit des contacts avec les parties 140, 141 du conducteur à  
10 méandres pour augmenter les surfaces en contact. De même, les contacts entre les tubes de piquage 142, 143 et les faces inférieure et supérieure des parties 140, 141 du conducteur à méandres peuvent se faire au fond de rainures creusées plus ou moins profondément dans lesdites faces.

## R E V E N D I C A T I O N S

1. Onduleur pour la génération d'énergie lumineuse à partir d'un faisceau d'électrons caractérisé en ce qu'il comporte un circuit de magnétisation constitué d'un conducteur électrique (200, 204, 208, 212) qui décrit des méandres le long  
5 du parcours du faisceau d'électrons et qui est parcouru par un fort courant d'excitation, et un circuit de refroidissement qui évacue l'énergie thermique dissipée par le courant d'excitation dans les méandres du conducteur électrique.

2. Onduleur selon la revendication 1, caractérisé en  
10 ce que le conducteur électrique (200, 202, 203) du circuit de magnétisation forme des méandres à contour triangulaire.

3. Onduleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le conducteur électrique (204, 208) du circuit de magnétisation forme des méandres à contour rectangulaire.

15 4. Onduleur selon la revendication 3, caractérisé en ce que les méandres formés par le conducteur électrique (204, 206, 207) du circuit de magnétisation sont à contour rectangulaire à profil en U.

20 5. Onduleur selon la revendication 3, caractérisé en ce que les méandres formés par le conducteur électrique (208, 210, 211) du circuit de magnétisation sont à contour rectangulaire à profil en ¶.

25 6. Onduleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le conducteur électrique (212, 214, 215) du circuit de magnétisation forme des méandres aux extrémités arrondies.

7. Onduleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation est en une seule partie (200, 204, 208, 212) centrée sur le parcours du faisceau d'électrons et percée  
30 longitudinalement d'un alignement de trous (201, 205, 209, 213) laissant un passage au faisceau d'électrons.

8. Onduleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation est formé de deux parties distinctes (202, 203 ; 206, 207 ; 210, 211 ; 214, 215) disposées de part et d'autre le long du parcours du faisceau d'électrons.

9. Onduleur selon la revendication 8, caractérisé en ce que les deux parties du conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation sont connectées électriquement en parallèle.

10. Onduleur selon la revendication 8, caractérisé en ce que les deux parties (31, 32) du conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation sont connectées électriquement en série.

11. Onduleur selon la revendication 10, caractérisé en ce que les deux parties (31, 32) du conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation sont connectées électriquement en série au moyen d'une barre conductrice d'interconnexion (36) et d'une barre conductrice (39) de retour de courant qui sont disposées latéralement le long desdites parties (31, 32) au niveau et de part et d'autre du parcours du faisceau d'électrons.

12. Onduleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que des cales (40) électriquement isolantes sont insérées au moins en partie entre les méandres du conducteur électrique du circuit de magnétisation pour assurer la tenue mécanique aux efforts.

13. Onduleur selon la revendication 12, caractérisé en ce que lesdites cales (40) électriquement isolantes sont réalisées en un élément appartenant à un groupe de matériaux comportant du nitrure de bore, de la céramique, un métal pur ou un alliage métallique fortement oxydé en surface dont l'oxyde est non conducteur.

14. Onduleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation est réalisé en au moins un élément appartenant à

un groupe de matériaux comportant du cuivre, de l'argent, de l'aluminium et du molybdène.

15 5 15. Onduleur selon la revendication 1, caractérisé en ce que le circuit de refroidissement comporte un réseau de tubulures à circulation de fluide.

10 16. Onduleur selon la revendication 15, caractérisé en ce que le circuit de refroidissement comporte un serpentin (72, 107) entourant le conducteur électrique à méandres du circuit de magnétisation et venant au contact des extrémités de ces méandres.

17. Onduleur selon la revendication 16, caractérisé en ce que ledit serpentin (107) décrit une hélice circulaire.

18. Onduleur selon la revendication 16, caractérisé en ce que ledit serpentin (72) décrit une hélice circulaire aplatie.

15 19. Onduleur selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit circuit de refroidissement comporte deux serpents (127, 128) qui sont disposés latéralement de part et d'autre du conducteur électrique à méandres (125, 126) du circuit de magnétisation et qui viennent au contact des extrémités de ses méandres.

20 20. Onduleur selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit circuit de refroidissement comporte des conduites (80, 81) d'amenée et d'évacuation de fluide de refroidissement longeant le conducteur électrique à méandres (76, 77) et un ensemble de morceaux de tubes (78, 79) de dérivation qui relie la conduite (80) d'amenée à la conduite (81) d'évacuation et qui sont repliés en épingles selon la forme d'un U et placés à cheval sur le conducteur électrique à méandres (76, 77), leurs branches venant latéralement au contact des extrémités de chaque méandre.

30 21. Onduleur selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit circuit de refroidissement comporte des conduites (119, 120) d'amenée et d'évacuation de fluide de refroidissement longeant le conducteur électrique à méandres (115, 116) et un ensemble d'arceaux tubulaires (117, 118) de dérivation qui

relient la conduite d'amenée (119) à la conduite d'évacuation (120) et qui viennent par leur sommet alternativement au contact des surfaces supérieure et inférieure des méandres.

5           22. Onduleur selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit circuit de refroidissement comporte deux conduites d'amenée (94, 95) et deux conduites (96, 97) d'évacuation de fluide de refroidissement longeant le conducteur électrique à méandres (90, 91) et deux ensembles de tubes de piquage droits (92, 93) qui relient chacun une conduite d'amenée à une  
10 conduite d'évacuation et qui viennent au contact, l'un des extrémités de méandre tournées vers l'un des côtés du conducteur électrique à méandres et l'autre des extrémités des méandres tournées vers l'autre côté.

15           23. Onduleur selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit circuit de refroidissement comporte deux conduites (144, 145) d'amenée et deux conduites (146, 147) d'évacuation de fluide de refroidissement longeant le conducteur électrique à méandres (140, 141) et deux ensembles de tubes de piquage droits (142, 143) qui relient chacun une conduite d'amenée à une  
20 conduite d'évacuation et qui viennent au contact des méandres du conducteur électrique à méandres (140, 141) l'un par dessus et l'autre par dessous.

25           24. Onduleur selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit circuit de refroidissement comporte deux conduites (50, 51) d'amenée et d'évacuation de fluide de refroidissement longeant le conducteur électrique à méandres (31, 32) et quatre serpentins (52, 53, 54, 55) enroulés au pas des méandres (31, 32), qui relient chacun la conduite d'amenée (50) à la conduite d'évacuation (51), qui sont disposés latéralement au dessus et  
30 en dessous du conducteur électrique à méandres (31, 32) et qui viennent en contact des surfaces supérieures et inférieures des extrémités des méandres.

25. Onduleur selon la revendication 15, caractérisé en ce que ledit circuit de refroidissement comporte des tubes réalisés en un élément appartenant à un groupe de matériaux

comportant l'acier inoxydable, le titane et des alliages fer-nickel-cobalt.

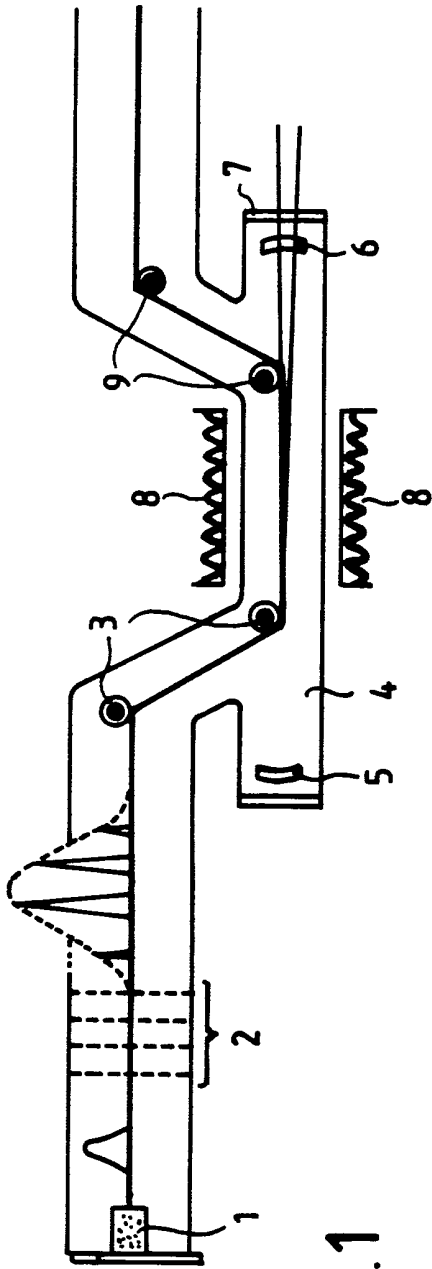


FIG. 1

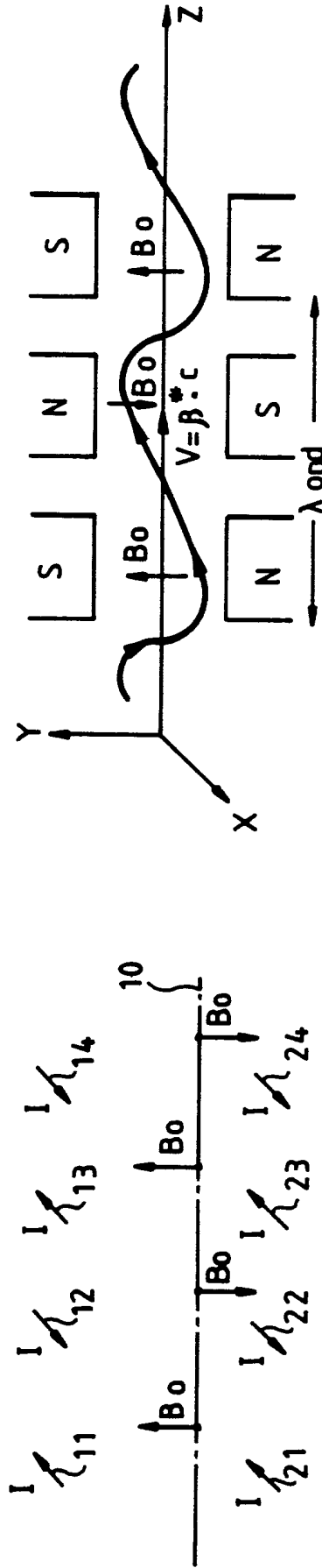


FIG. 2

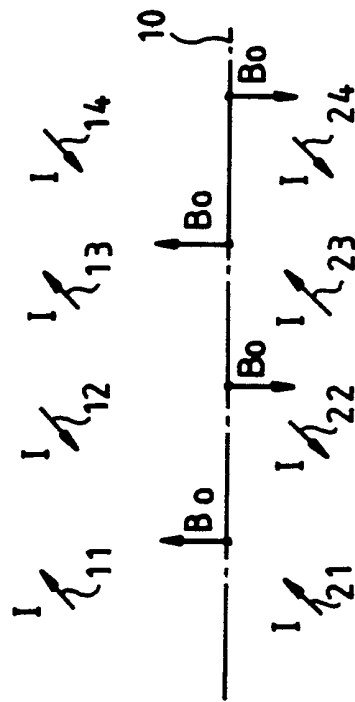


FIG. 3



FIG. 4a



FIG. 4b

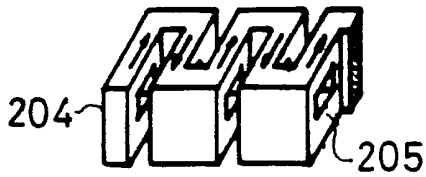


FIG. 4c

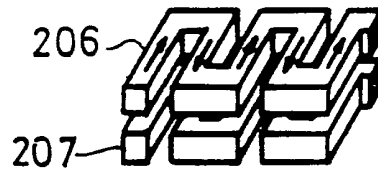


FIG. 4d

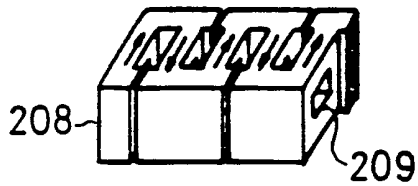


FIG. 4e

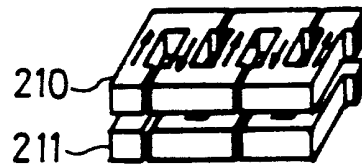


FIG. 4f

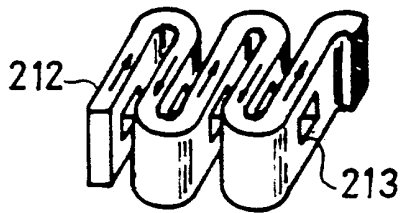


FIG. 4g

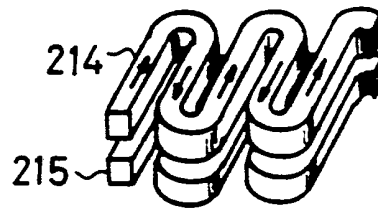


FIG. 4h

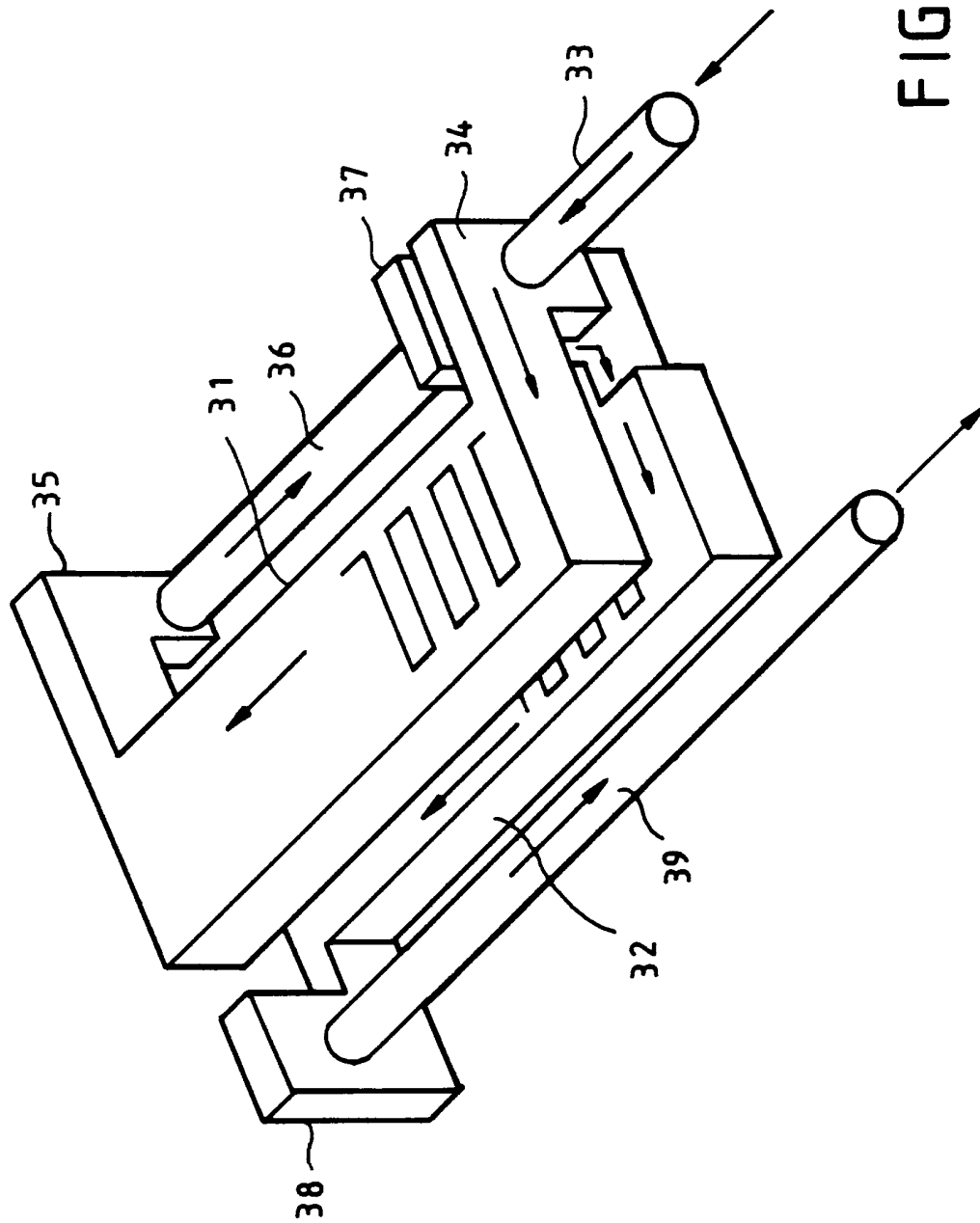





FIG. 5



FIG.10a   
 FIG.10c   
 FIG.10b 

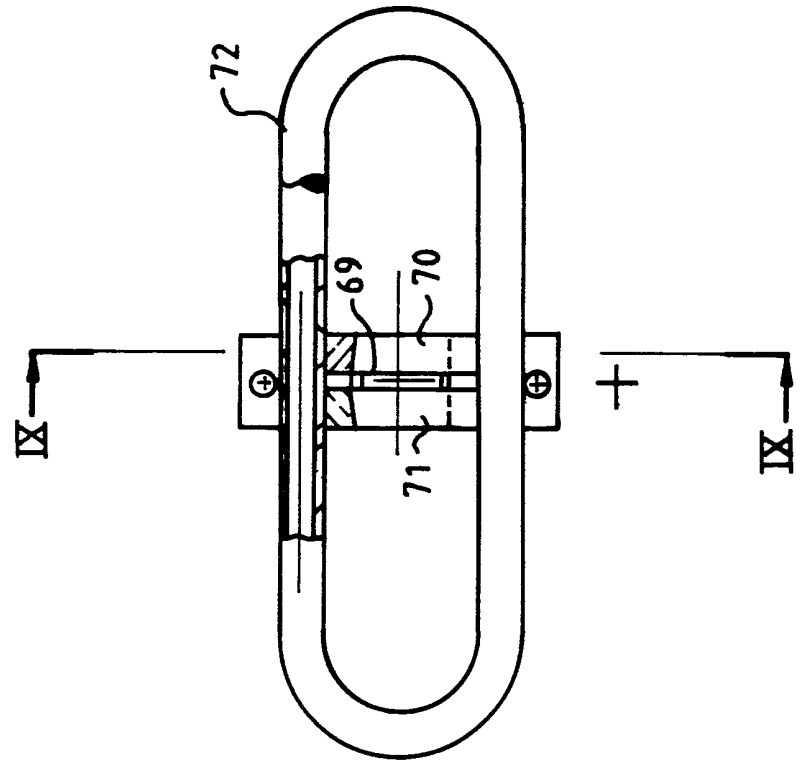


FIG. 8

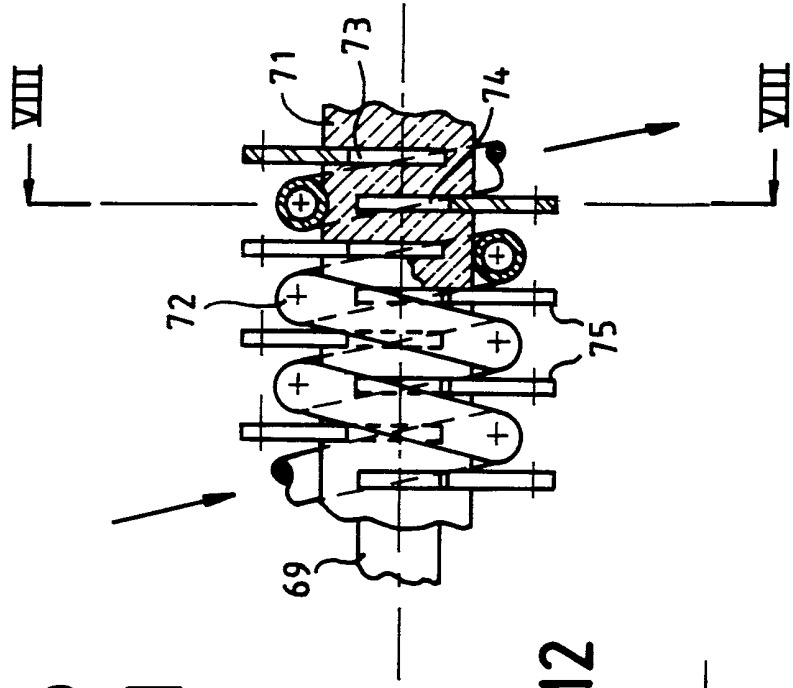


FIG.12

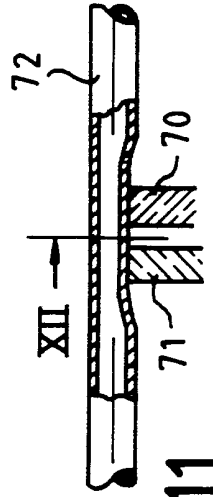


FIG.11

FIG. 9

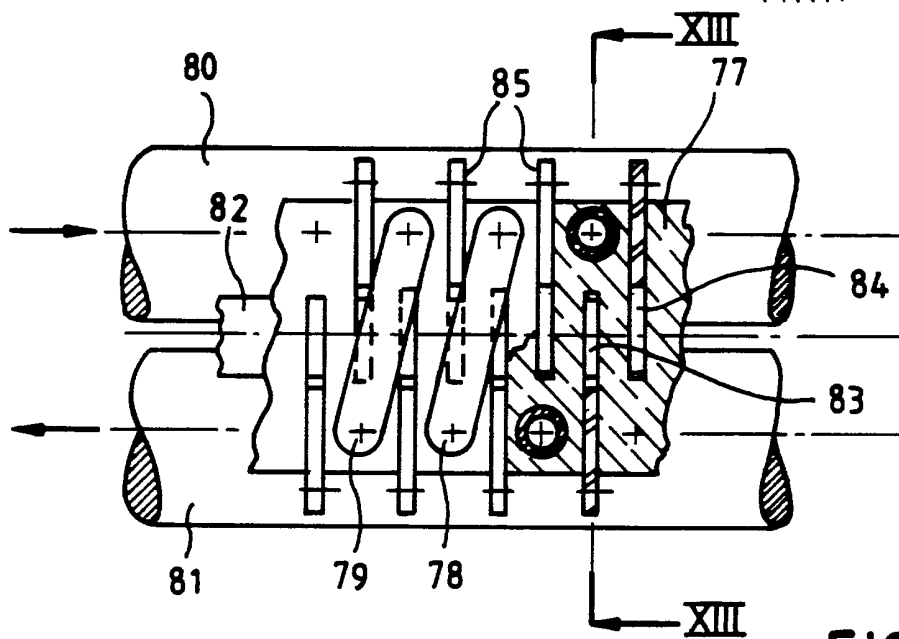
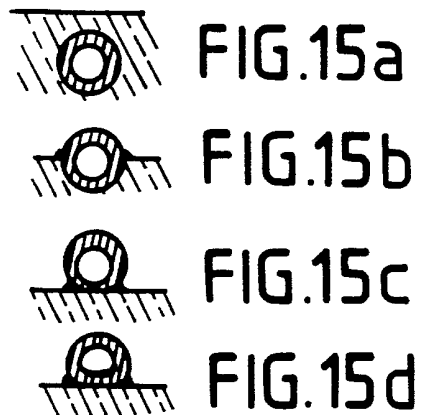
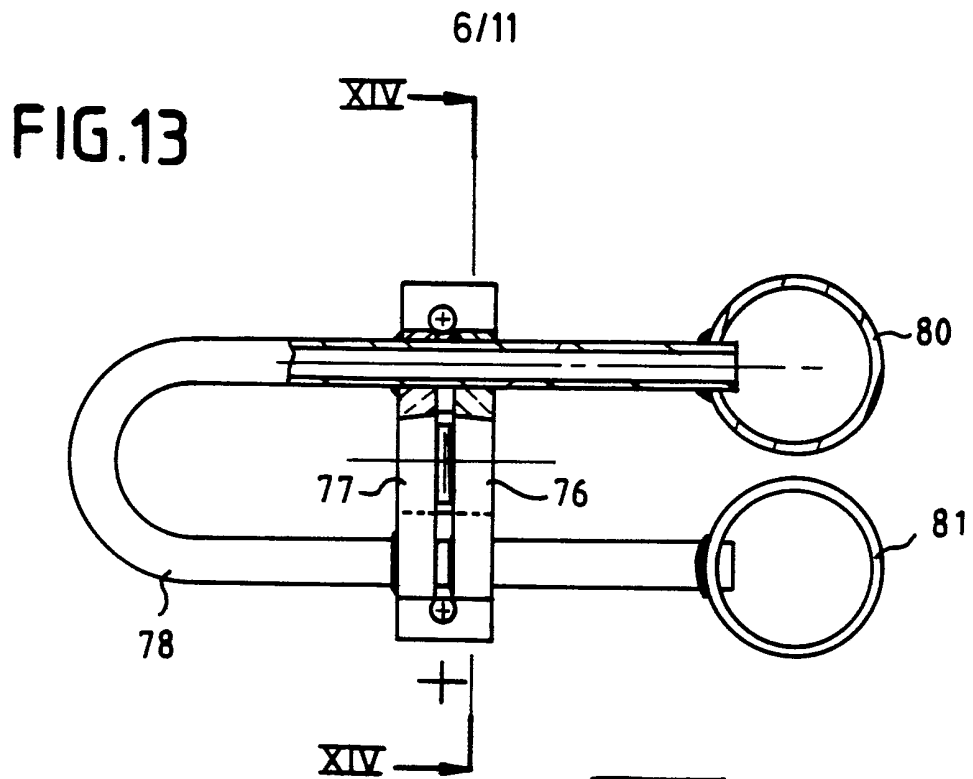


FIG.14

7/11

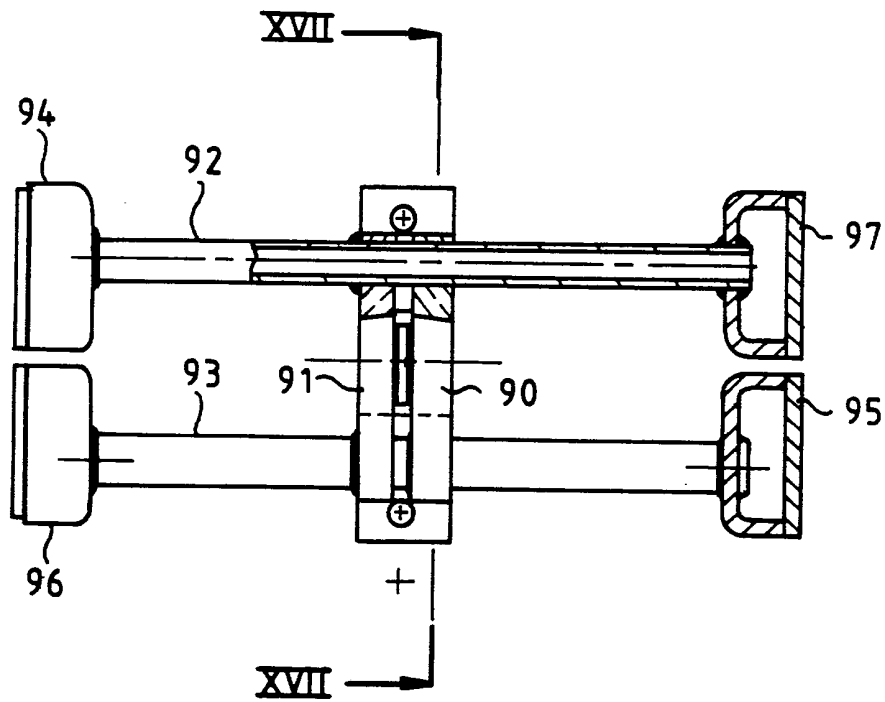


FIG. 16

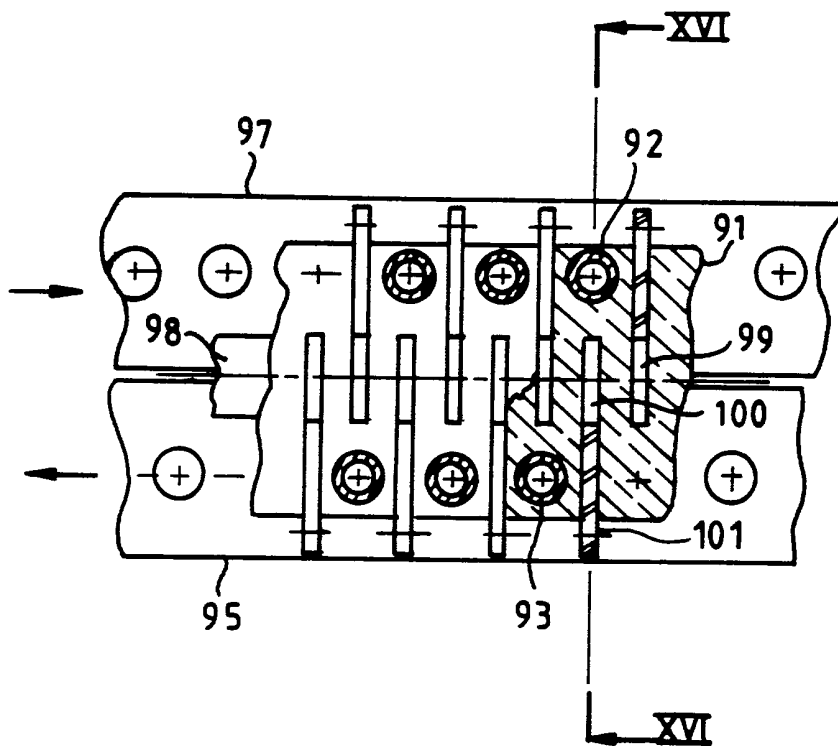


FIG. 17

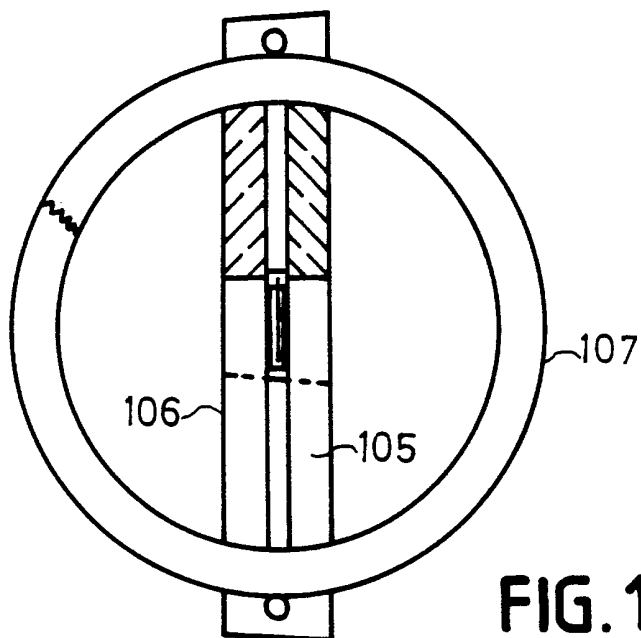


FIG. 18

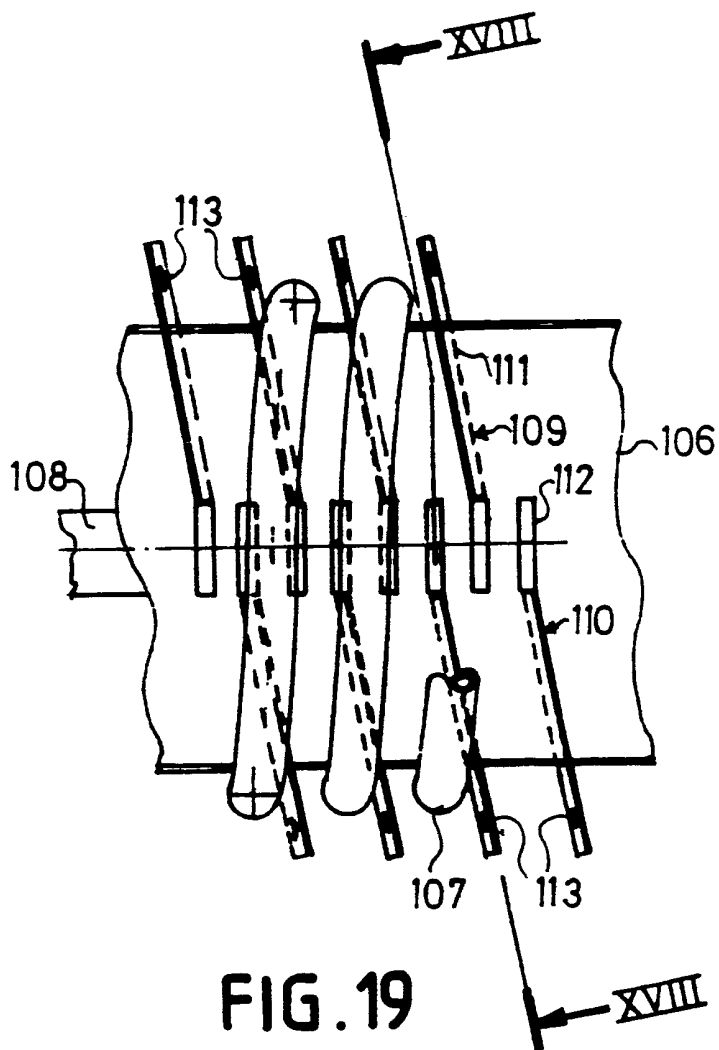


FIG. 19

9/11

FIG. 20

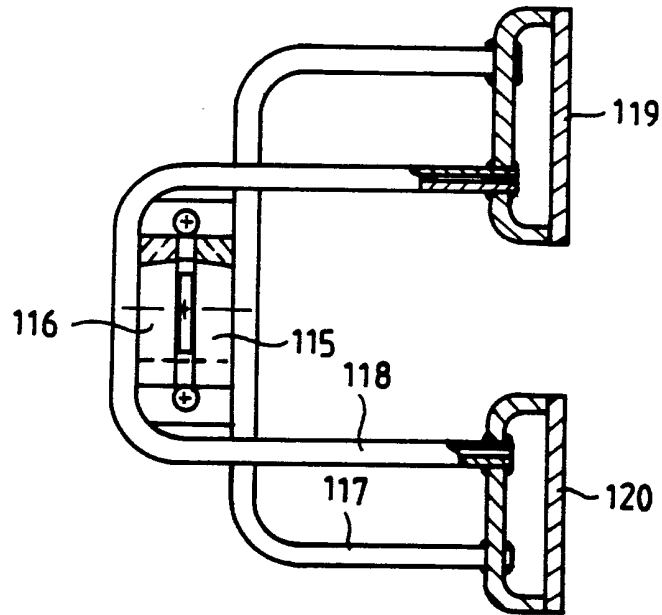
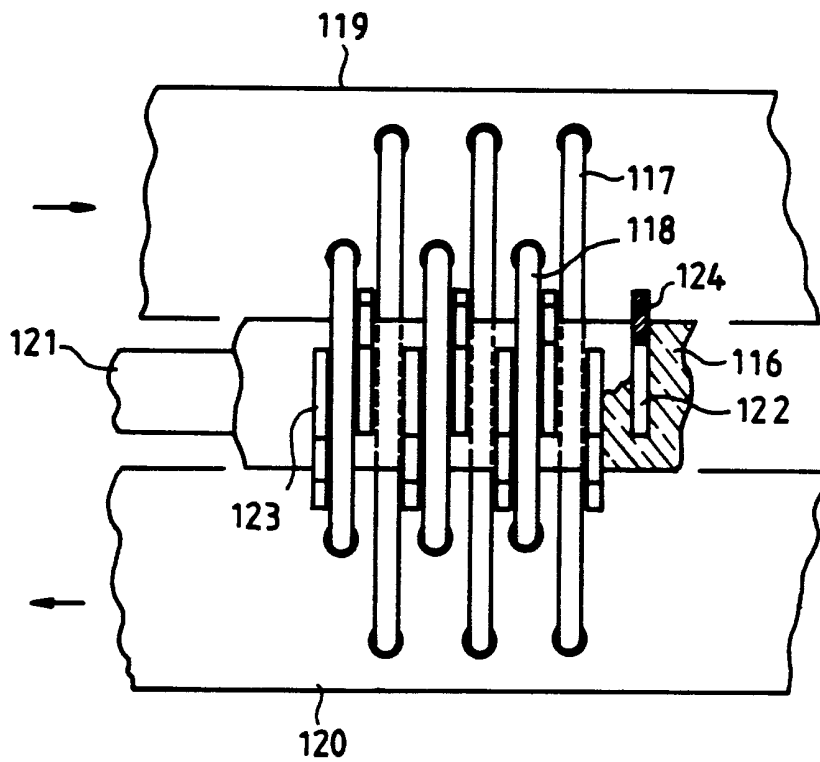


FIG. 21



D/11

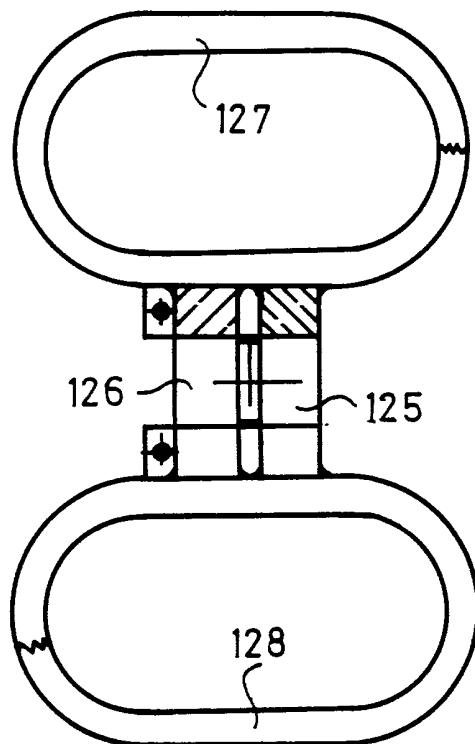


FIG. 22

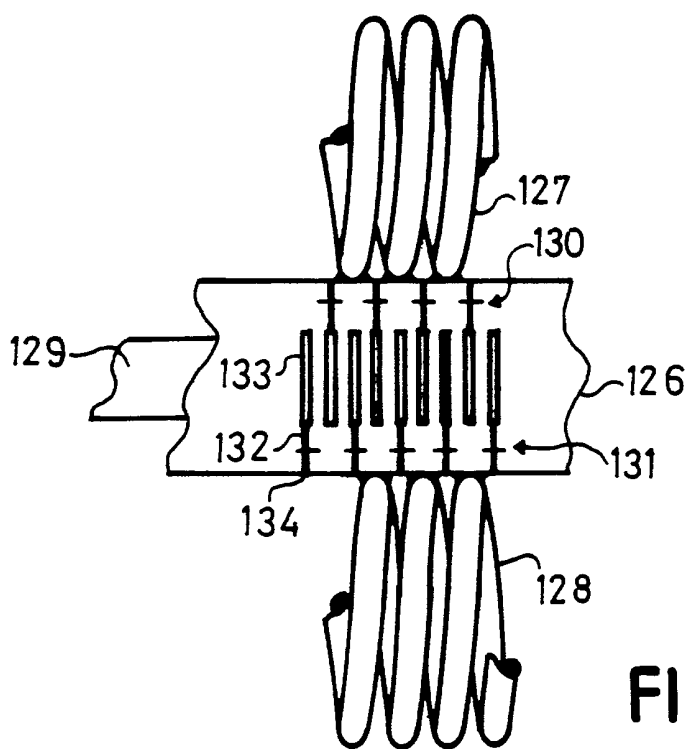


FIG. 23

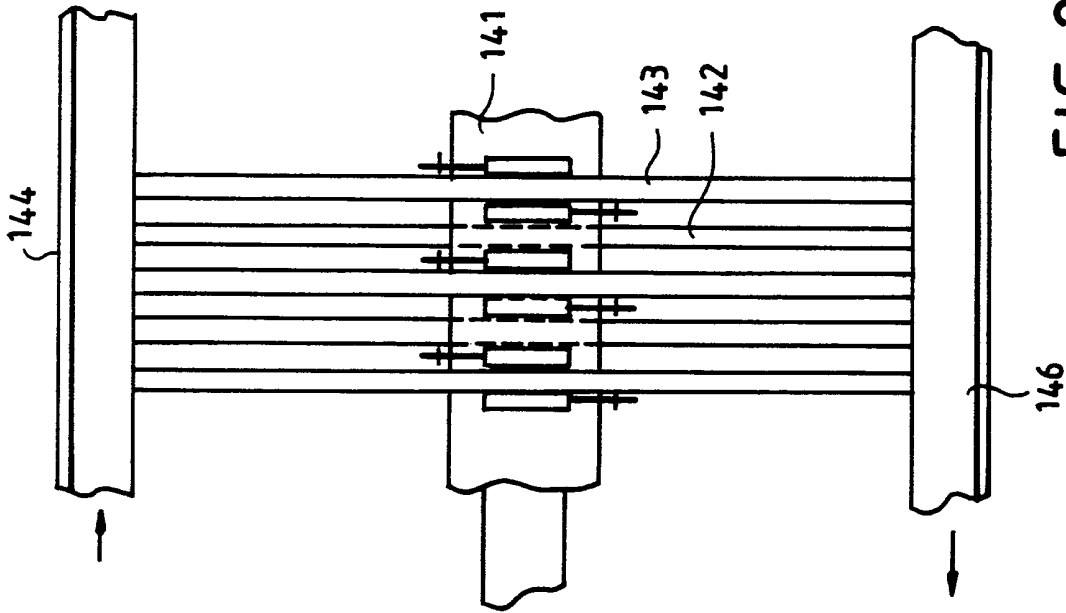


FIG. 25

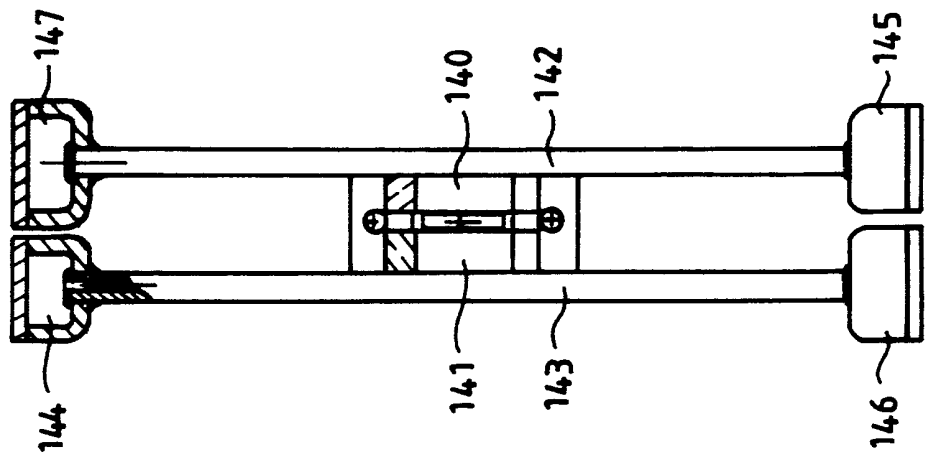


FIG. 24