

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) N° de publication :

(A n'utiliser que pour les
commandes de reproduction).

2 480 509

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

(21)

N° 80 08279

(54) Dispositif à ondes magnétostatiques de volume.

(51) Classification internationale (Int. Cl. 3). H 01 P 5/00, 1/00.

(22) Date de dépôt 14 avril 1980.

(33) (32) (31) Priorité revendiquée :

(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande B.O.P.I. — « Listes » n° 42 du 16-10-1981.

(71) Déposant : Société dite : THOMSON-CSF, société anonyme, résidant en France.

(72) Invention de : Gérard Volluet et Pierre Hartemann.

(73) Titulaire : *Idem* (71)

(74) Mandataire : Thomson-CSF, SCPI,
173, bd Haussmann, 75360 Paris Cedex 08.

La présente invention se rapporte aux dispositifs à ondes magnétostatiques de volume. Les ondes magnétostatiques peuvent se propager dans une plaquette de matériau ferrimagnétique soumise à un champ magnétique de polarisation. Ces ondes sont des ondes de surface directives, lorsque le 5 champ magnétique de polarisation est parallèle aux faces principales de la plaquette et lorsque la direction de propagation est normale par rapport à ce champ. La direction de propagation est fixée par l'orientation d'un microruban conducteur amené en contact avec la surface de la plaquette. En faisant circuler un courant alternatif à très haute fréquence dans ce microruban, 10 des ondes magnétostatiques sont excitées. De même, ce microruban peut jouer le rôle de transducteur récepteur, c'est à dire convertir l'énergie des ondes magnétostatiques en énergie électrique. Dans le cas du fonctionnement en ondes magnétostatiques de surface, le microruban se comporte comme un transducteur unidirectionnel de sorte que l'échange d'énergie 15 entre deux microrubans placés en vis à vis peut avoir lieu avec des pertes relativement faibles. Cependant, à une fréquence de 3 GHz, le niveau de saturation en puissance des ondes magnétostatiques de surface est situé 20 dB en dessous du niveau de saturation en puissance des ondes magnétostatiques de volume.

20 En ce qui concerne les ondes magnétostatiques de volume, l'effet transducteur obtenu au moyen d'un microruban est essentiellement bidirectionnel. Les ondes magnétostatiques de volume sont directives ou contradirectives, selon que le champ magnétique d'excitation est perpendiculaire à la surface de la plaquette ou dirigé selon la direction de propagation. La 25 vitesse de groupe est de même sens que la vitesse de phase, lorsqu'il s'agit d'ondes directives. Ces vitesses sont opposées lorsque les ondes sont contradirectives. Selon la surface de la plaquette, les ondes magnétostatiques de volume directives se propagent de façon quasi isotrope, mais ce n'est le cas ni des ondes magnétostatiques de volume contradirectives, ni des 30 ondes magnétostatiques de surface.

Le fonctionnement bidirectionnel des microrubans servant à émettre et à recevoir les ondes magnétostatiques de volume a pour inconvénient de réduire de 6 dB la puissance électrique susceptible d'être échangée entre deux microrubans. L'énergie rayonnée inutilement peut en outre occasionner des réflexions gênantes qu'il est nécessaire d'atténuer par un traitement approprié des bords de la plaquette.

Il est possible d'associer à un microruban, un coupleur en U pour obtenir un fonctionnement unidirectionnel, mais cette solution entraîne un allongement de la plaquette en matériau ferrimagnétique et peut limiter la 10 bande de fréquences utilisable.

L'invention a pour objet un dispositif à ondes magnétostatiques de volume comportant à la surface d'une plaquette de matériau ferrimagnétique au moins un transducteur à microruban, caractérisée en ce que ce transducteur comporte un ensemble d'éléments conducteurs filamentaires de 15 même écartement et de même longueur ; les bornes de ce transducteur étant reliées électriquement aux éléments conducteurs de cet ensemble par un circuit transformateur polyphasé ; les amplitudes complexes des courants circulant dans ces éléments conducteurs ayant le même module et des arguments en progression arithmétique dont la raison est égale au déphasage 20 d'une onde magnétostatique de volume franchissant cet écartement dans le sens de propagation choisi.

L'invention sera mieux comprise au moyen de la description ci-après et des figures annexées, parmi lesquelles :

La figure 1 est une vue isométrique d'un dispositif transducteur à 25 ondes magnétostatiques de volume de type connu ;

La figure 2 est un diagramme explicatif ;

Les figures 3 et 4 représentent des dispositifs à ondes magnétostatiques de volume selon l'invention ;

La figure 5 représente une jonction hybride à 3 dB ;

La figure 6 représente un dispositif à ondes magnétostatiques de volume mettant en oeuvre des transducteurs unidirectionnels et un transducteur bidirectionnel ;

La figure 7 représente un oscillateur accordable à ondes magnétostatiques de volume ;

Les figures 8, 9 et 10 sont des schémas explicatifs.

- Sur la figure 1, on peut voir un dispositif à ondes magnétostatiques de volume équipé d'un transducteur en forme de microruban 13. Une plaquette de matériau ferrimagnétique est réalisée en déposant par épitaxie sur un substrat 10 de grenat de galodinium et gallium (GGG) une couche 12 de grenat d'yttrium et de fer (YIG) ayant une épaisseur s de quelques dizaines de microns. Ce matériau possède une raie de résonance ferrimagnétique dont la largeur ne dépasse pas une fraction d'Oersted. Il en résulte des pertes de propagation de l'ordre de 38 dB/ μ s en bande X ($\Delta H = 0,5$ Oersted).
- 5 Pour exciter ou recueillir les ondes magnétostatiques de volume, on fait appel au microruban 13 qui se présente sous la forme d'un élément filamentaire conducteur de largeur b . Le microruban 13 peut être constitué par une métallisation de la face supérieure de la couche 12 ou par une métallisation effectuée sur une lamelle diélectrique qui vient coiffer la
- 10 couche 12. L'une des extrémités du microruban 13 est reliée à la masse G et l'autre extrémité constitue une borne d'entrée. En faisant circuler dans le microruban 13 un courant i à très haute fréquence, des ondes magnétostatiques de volume de nombre d'onde k sont rayonnées selon les deux directions de l'axe de propagation XX. Ces ondes de volume sont du type contradictif, lorsqu'on applique à la couche 12 le champ magnétique de polarisation H_a représenté en trait plein. Ce champ est orienté suivant l'axe XX et est par conséquent contenu dans le plan de la couche 12. Les ondes magnétostatiques de volume sont directives lorsque le champ magnétique de polarisation \vec{H}_a est orienté suivant la normale n à la couche 12 (flèche en pointillé).
- 15 20 25 Les ondes magnétostatiques de volume directives présentent l'avantage de se propager dans la couche 12 avec une vitesse qui ne dépend pratiquement pas de l'orientation donnée à l'axe XX perpendiculaire au microruban 13.

La figure 2 illustre les propriétés de propagation des ondes magnétostatiques de volume. On a porté en abscisse le nombre d'onde k égal au rapport de la pulsation ω à la vitesse de phase v_ψ des ondes. Le domaine d'existence des ondes se situe entre les deux lignes pointillées d'ordonnées ω_m et ω_M . La pulsation minimale ω_m est définie par la relation suivante :

$$\omega_m = \gamma \cdot H_i \quad (1)$$

La pulsation maximale est donnée par la relation :

$$\omega_M = \gamma \sqrt{H_i(H_i + 4\pi M)} \quad (2)$$

où γ est le rapport gyromagnétique égal à 2,8 MHz/Oe dans le cas du YIG

5 $4\pi M$ est l'aimantation à saturation égale à 1760 Oe dans le cas du YIG

H_i le champ interne, qui diffère du champ de polarisation H_a en raison de l'effet démagnétisant de la couche 12.

La courbe FW se rapporte aux ondes magnétostatiques de volume 10 directives ; elle indique l'évolution de la pulsation ω en fonction du nombre d'onde k pour une valeur donnée du champ H_a . La courbe BW indique l'évolution qui caractérise les ondes magnétostatiques de volume contradictives. La pente des courbes BW et FW donne la valeur de la vitesse de groupe des ondes magnétostatiques de volume ; le signe de cette pente 15 justifie la terminologie utilisée "directive" et "contradirective" (en anglais "FORWARD" et "BACKWARD").

Le domaine d'existence des ondes de volume est tel que :

$$\omega_m \leq 2\pi f \leq \omega_M \quad (3)$$

où f est la fréquence du courant i .

20 Ce domaine peut être davantage limité par la largeur b du microruban
13. En effet, les ondes magnétostatiques de volume sont excitables jusqu'à une longueur d'onde $\lambda > b$.

Sur la figure 3, on peut voir un premier exemple de réalisation d'un dispositif à ondes magnétostatiques de volume à rayonnement unidirectionnel. La couche ferrimagnétique 12 porte deux conducteurs filamentaires 5 et 6 écartés d'une distance d . Un transformateur polyphasé 14 à quatre voies 1, 2, 3, 4 est relié par ses voies 3 et 4 aux conducteurs filamentaires 5 et 6. Ce transformateur 14 est dans l'exemple considéré une jonction hybride à 3 dB qui délivre sur ses voies 3 et 4 des courants i_3 et i_4 en quadrature de phase 25 et d'égales amplitudes. Une charge adaptée L sert de terminaison à la voie 2 afin d'absorber l'énergie qui se présente sur cette voie lorsque les conducteurs 5 et 6 sont désadaptés en impédance par rapport aux impédances propres des voies 3 et 4. L'excitation des ondes magnétostatiques de volume 30 se fait en alimentant la voie 1 où circule le courant i_1 . Lorsque les

conditions d'adaptation sont réalisées, le courant i_1 a une amplitude 3 dB supérieure à celle du courant i_3 et le courant i_4 est par exemple en retard de phase de 90° sur le courant i_3 . Les courants i_3 et i_4 circulent dans les conducteurs 5 et 6 et leur retour s'effectue via le plan de masse G.

5 L'émission d'ondes magnétostatiques de volume par le ruban transducteur 5 est bidirectionnelle suivant un axe perpendiculaire à ce ruban. Les courbes sinusoïdales 8 partant du transducteur 5 représentent les fractions d'ondes rayonnées. En ce qui concerne le ruban transducteur 6, les fractions d'ondes rayonnées sont déphasées de -90° de sorte qu'elles sont représentées 10 par des courbes cosinusoïdales 7. Bien entendu, tout ceci suppose une excitation sinusoïdale de la voie 1. Sur la figure 3, on voit que la distance d est choisie de façon que les deux fractions d'ondes 7 et 8 s'additionnent à droite pour former une onde rayonnée 9, alors qu'elles s'annulent à gauche des rubans 5 et 6. Le rayonnement unidirectionnel de l'ensemble transducteur de la figure 3 est donc obtenu à la condition que :

$$d = n \cdot \lambda_n + \frac{\lambda_n}{4} \quad (4)$$

où λ_n est la longueur d'onde des ondes magnétostatiques de volume et n un nombre entier positif ou nul.

La relation (4) peut se mettre sous la forme :

20

$$\lambda_n = \frac{4d}{4n+1} \quad (5)$$

25

Les relations (4) et (5) s'appliquent aussi bien à l'émission vers la droite qu'à la réception des ondes magnétostatiques de volume provenant de la droite. La croix figurant à droite des rubans 5 et 6 signale le côté inactif de l'ensemble représenté sur la figure 3.

30

Sur la figure 4, on peut voir une variante de réalisation qui ne diffère de la réalisation de la figure 3 que par l'inversion de sens du rayonnement unidirectionnel. La distance d' séparant les rubans 5 et 6 est donnée par la relation :

$$d' = m \lambda_m + \frac{3}{4} \lambda_m \quad (6).$$

Elle peut se mettre sous la forme :

$$\lambda_m = \frac{4 d'}{4m + 3} \quad (7)$$

où λ_m est la longueur d'onde des ondes magnétostatiques de volume et m un nombre entier positif ou nul.

5 Si l'on permute les connexions entre la jonction hybride 14 et les ensembles de rubans 5 et 6, on peut définir deux autres configurations possibles. On peut également envisager d'intercaler dans une des liaisons reliant par exemple la voie 4 au ruban 6, un commutateur de phase donnant les déphasages 0 et 180°. Suivant l'état du commutateur, le rayonnement
10 unidirectionnel se produit dans l'un ou l'autre sens.

Lorsque d ou d' est petite, l'unidirectionnalité peut être acquise dans une large bande de fréquence si le transformateur polyphasé 14 permet ce mode de fonctionnement en bande large. Les distances d et d' ne doivent cependant pas être réduites au point de susciter des interactions fortes
15 15 entre les deux microrubans, car elles pourraient perturber le fonctionnement unidirectionnel de l'ensemble transducteur.

A titre d'exemple non limitatif, on a réalisé une ligne à retard à ondes magnétostatiques de volume directives en formant à la surface d'un substrat en alumine des transducteurs à deux rubans tels que représentés sur les
20 figures 3 et 4. L'autre face du substrat en alumine était complètement métallisée pour jouer le rôle de plan de masse. Les microrubans délimités par photolithographie avaient une largeur b de 35 μm et une longueur de 4 mm. La distance d les séparant était pour chaque ensemble de 200 μm . La distance de propagation était de 6 mm entre les rubans reliés aux voies non
25 déphasées. Deux coupleurs hybrides ont été utilisés, l'un à l'émission, l'autre à la réception. Une couche de grenat d'yttrium fer de 20,5 μm d'épaisseur est formée par hétéroépitaxie en phase liquide sur un substrat de grenat de galodinium et de gallium ayant une épaisseur de 500 μm . La couche épitaxiée est amenée en contact avec la face gravée de la plaquette d'alumine, afin de
30 recouvrir les rubans conducteurs des deux ensembles transducteurs. Les liaisons d'une des deux jonctions hybrides sont permutées, afin d'assurer l'échange des ondes magnétostatiques de volume. Un champ magnétique extérieur est appliqué perpendiculairement à la couche épitaxiée afin de fixer un domaine de fréquence approprié à la propagation des ondes

magnétostatiques de volume directives. A une fréquence de 2,12 GHz qui correspond à une longueur d'onde λ_n de $800 \mu\text{m}$, on a mesuré des pertes d'insertion ne dépassant pas 10 dB (avec $n=0$ et en utilisant la relation (5)). Le même dispositif présente une directivité de l'ordre de 30 dB à 2,1 GHz et 5 la bande passante est de 340 MHz à 10 dB. En inversant le sens de l'échange des ondes magnétostatiques de volume, on obtient une perte d'insertion d'environ 14dB à 2,4 GHz, avec une bande passante similaire.

Sur la figure 5, on peut voir un coupleur directionnel à 3 dB particulièrement indiqué pour constituer le transformateur polyphasé 14. 10 Ce coupleur connu sous le nom de coupleur de Lange est réalisé à la surface d'une plaquette diélectrique 15 dont la face dorsale est complètement métallisée. Les métallisations visibles sur la figure 5 comprennent les quatre voies 1, 2, 3 et 4 et un ensemble de microbandes interdigitées qui réalisent 15 sur une distance voisine de $\lambda_{EM}/4$ un couplage serré entre les voies. La voie 1 est reliée à la voie 4 par un conducteur 22 encadré par deux conducteurs 17 et 20 respectivement reliés aux voies 2 et 3. Des conducteurs plus courts 16 et 21 sont reliés aux voies 1 et 4 pour améliorer le couplage. Des connexions de pontage 18, 19, 23 et 24 parachèvent la structure du coupleur. Ces dernières connexions sont rapportées après photolithographie par soudage 20 de fils par thermocompression. La longueur d'onde λ_{EM} est celle des ondes électromagnétiques transmises par le coupleur.

La figure 6 représente une variante de réalisation d'une ligne à retard mettant en oeuvre un transducteur bidirectionnel 13 encadré par deux transducteurs unidirectionnels selon l'invention. L'ensemble transducteur 5, 25 6, 25 émet des ondes magnétostatiques de volume de nombre d'onde k_1 qui sont captées par le transducteur 13. L'ensemble transducteur 5, 6, 26 émet des ondes magnétostatiques de nombre d'onde k_2 vers le transducteur 13. Un échange s'établit entre chacune des entrées E_1 et E_2 et la sortie commune S. De nombreux dispositifs à ondes magnétostatiques de volume peuvent être 30 déduits des exemples qui précèdent. Parmi ceux-ci, on peut citer les lignes à retard, les filtres, les déphasateurs, les discriminateurs, les lignes dispersives et les oscillateurs accordables.

Une vue isométrique d'un oscillateur accordable est donnée par la figure 7.

Une plaquette d'alumine 15 porte sur l'une de ses faces principales une métallisation 27 jouant le rôle du plan de masse. Cette métallisation comporte deux portions remontantes qui relient à la masse 6 deux jeux de rubans conducteurs 5,6 disposés dans la zone ABCD de la face supérieure 28 de la plaquette 15. La face supérieure 28 porte en dehors de la zone ABCD deux coupleurs de Lange 1, 2, 3, 4 ayant leurs voies 2 reliées à des charges adaptées 29 et 30. Un circuit amplificateur à microondes 32 est relié par des connexions 33 et 34 aux voies 1 des deux coupleurs de Lange. La zone ABCD est recouverte par une couche de grenat d'yttrium et de fer 12 épitaxiée sur un substrat 10 de grenat de galodionium et de gallium. Pour la clarté du dessin, on a représenté l'ensemble ferrimagnétique écarté de la plaquette 15, mais cet ensemble repose en fait sur la face 28. On est donc en présence d'une ligne à retard à ondes magnétostatiques de volume qui met en oeuvre deux transducteurs unidirectionnels. Cette ligne à retard forme avec le circuit 32 une boucle qui oscille à une fréquence qui est fonction du retard des ondes magnétostatiques se propageant entre les rubans 5 dans la direction OX. L'axe ox appartient à un trièdre trirectangle dont l'axe oz est perpendiculaire à la couche 12 et dont l'axe oy a l'orientation des rubans 5 et 6.

20 L'accord en fréquence dépend d'un champ magnétique Ha créé dans la couche 12 par des moyens inducteurs 31. Le réglage de l'intensité du champ Ha permet de faire varier la fréquence de fonctionnement de l'oscillateur.

Le rayonnement unidirectionnel peut se généraliser à des transducteurs comportant plus de deux rubans conducteurs équidistants. On peut par exemple exciter un ensemble de quatre rubans conducteurs au moyen de courants téraphasés i_1, i_2, i_3 et i_4 tels que représentés sur la figure 8. Ces courants ont des amplitudes égales et leurs déphasages respectifs forment une progression arithmétique de raison égale à 90° . L'écartement des rubans conducteurs est choisi de telle façon qu'en parcourant cette distance l'onde magnétostatique de volume subisse un déphasage de 90° . Pour l'un des sens de propagation, les ondes magnétostatiques élémentaires peuvent engendrer dans un ruban récepteur des courants i'_1, i'_2, i'_3 et i'_4 ayant une résultante nulle comme le montre la figure 9. Pour l'autre sens de propagation, les ondes magnétostatiques élémentaires induisent des courants i''_1, i''_2, i''_3 et

i"₄ en concordance de phase comme le montre la figure 10. L'unidirectionnalité du rayonnement d'un ensemble de P rubans peut être assurée avec un transformateur polyphasé à P phases. Du point de vue simplicité, c'est le système diphasé qui est le plus avantageux, mais des systèmes plus complexes peuvent offrir des avantages spécifiques de l'application envisagée.

Sans s'écartez du domaine de la présente invention, on peut associer deux transducteurs unidirectionnels rayonnant dans le même sens avec un troisième transducteur utilisé comme récepteur. Cette configuration peut se déduire de la figure 6 en remplaçant le transducteur 13 par un transducteur 10 unidirectionnel. Les deux transducteurs qui se suivent et qui rayonnent dans le même sens sont découplés l'un par rapport à l'autre, bien qu'ils soient en mesure d'échanger des ondes magnétostatiques de volume avec le troisième transducteur.

REVENDICATIONS

1. Dispositif à ondes magnétostatiques de volume comportant à la surface d'une plaquette de matériau ferrimagnétique (10, 12) au moins un transducteur à microruban, caractérisé en ce que ce transducteur comporte un ensemble d'éléments conducteurs filamentaires (5, 6) de même écartement et de même longueur ; les bornes (1) de ce transducteur étant reliées électriquement aux éléments conducteurs (5, 6) de cet ensemble par un circuit transformateur polyphasé (1, 2, 3, 4) ; les amplitudes complexes des courants circulant dans ces éléments conducteurs (5, 6) ayant le même module et des arguments en progression arithmétique dont la raison est 5 égale au déphasage d'une onde magnétostatique de volume franchissant cet écartement dans le sens de propagation choisi (OX).

2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que ce transducteur comporte deux éléments conducteurs (5, 6) ; ce circuit transformateur polyphasé étant une jonction hybride à 3dB dont les voies de 10 sortie (3, 4) font circuler dans les éléments conducteurs (5, 6) des courants en quadrature de phase.

3. Dispositif selon la revendication 2, caractérisé en ce que cette jonction hybride est constituée par un coupleur à microbandes interdigitées assurant un couplage électromagnétique serré entre les voies d'entrée et de 15 sortie.

4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que les éléments conducteurs (5, 6) et le circuit transformateur polyphasé (1, 2, 3, 4) sont constituées par des métallisations déposées sur l'une des faces principales (28) d'une plaquette (15) de matériau diélectrique ; l'autre face principale de la plaquette (15) étant recouverte d'une métallisation (27) jouant le rôle de plan de masse ; la plaquette de matériau ferrimagnétique (10, 12) recouvrant une zone (ABCD) de la plaquette diélectrique (15) renfermant les éléments conducteurs (5, 6).

5. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que la plaquette de matériau ferrimagnétique est une couche de grenat d'yttrium et de fer (12) épitaxiée sur un substrat taillé dans un grenat

de galodinium et de gallium.

6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce qu'il comprend au moins deux transducteurs à rayonnement unidirectionnel.

5 7. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'il comprend en outre au moins un transducteur à rayonnement bidirectionnel (13).

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la plaquette ferrimagnétique est soumise à un champ magnétique de polarisation (H_a).

10 9. Dispositif selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens amplificateurs (32) reliés électriquement aux transducteurs à rayonnement unidirectionnels afin de constituer une boucle oscillatrice.

15 10. Dispositif selon la revendication 9, caractérisé en ce que des moyens d'accord (31) créent au sein de la plaquette ferrimagnétique (10, 12) un champ magnétique (H_A) d'intensité réglable.

1/4

FIG.1

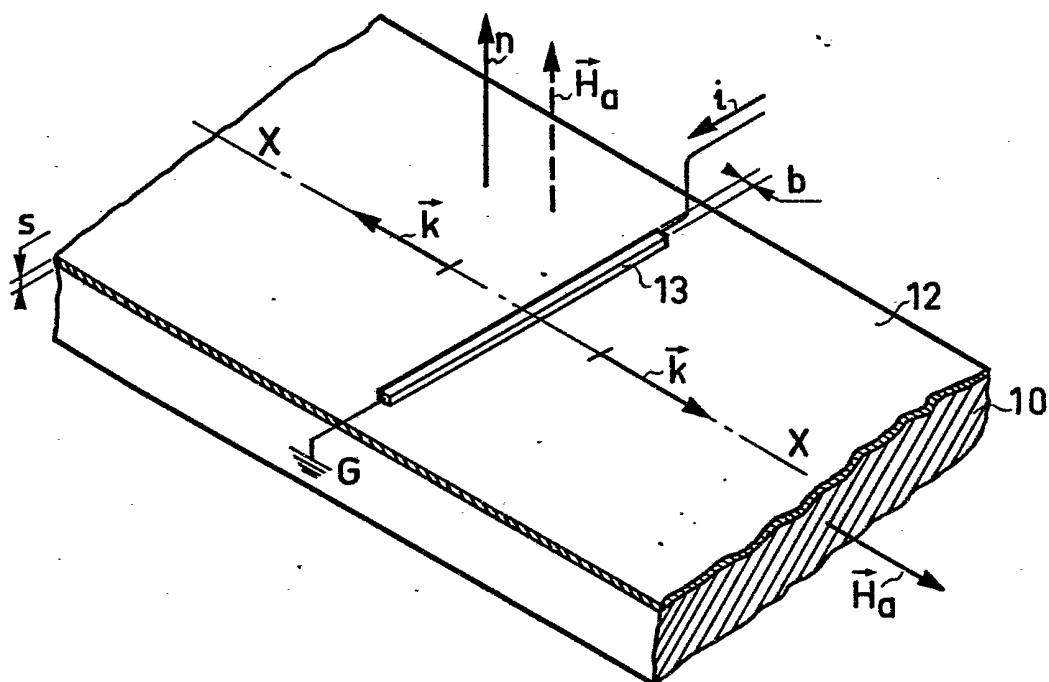
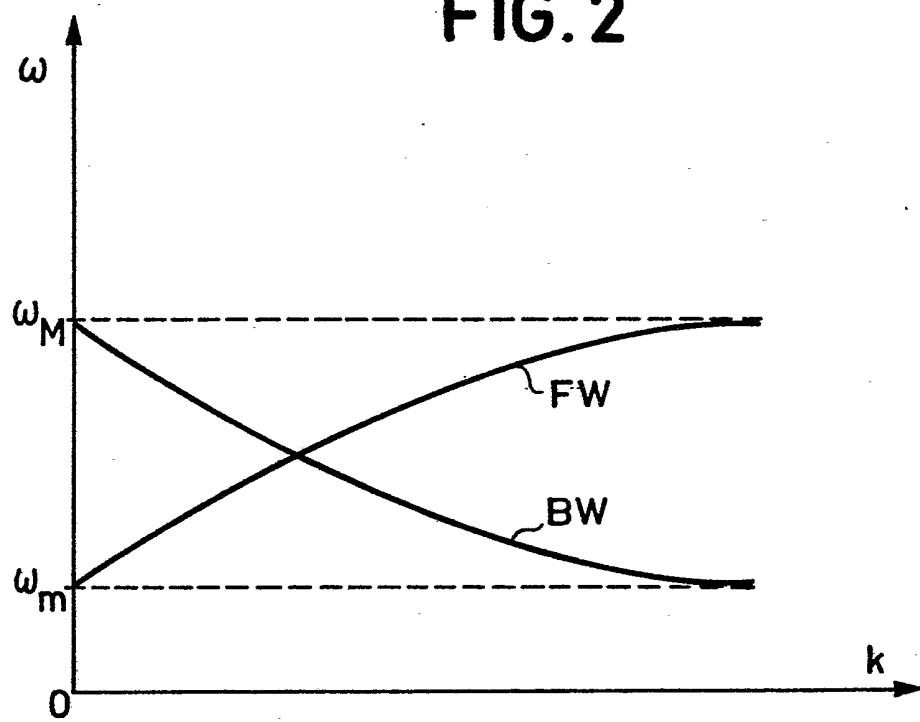


FIG. 2



2/4

FIG. 3

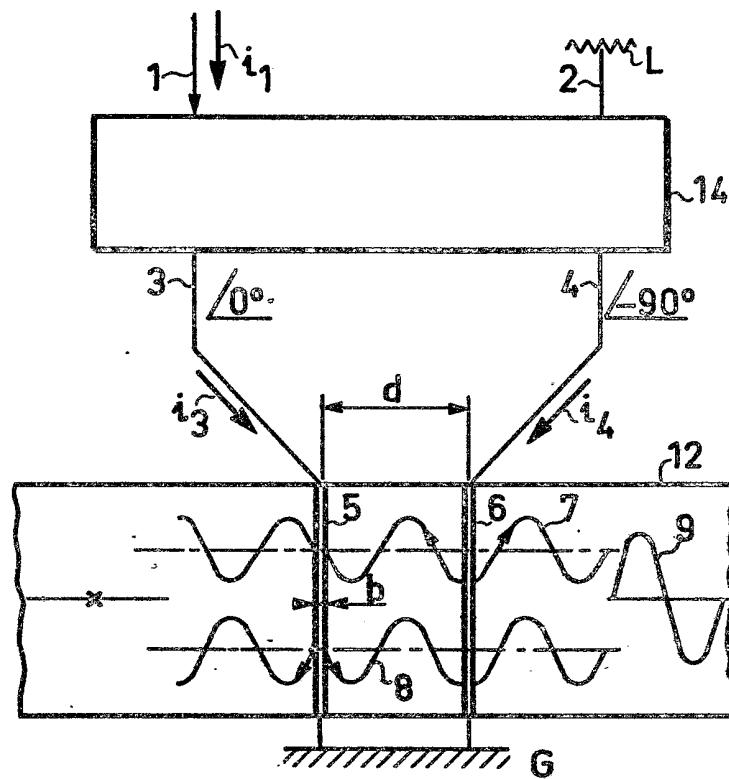
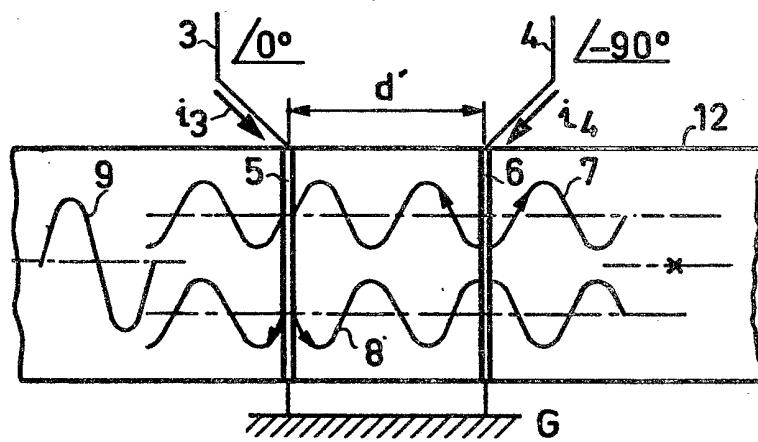


FIG. 4



3/4

FIG. 5

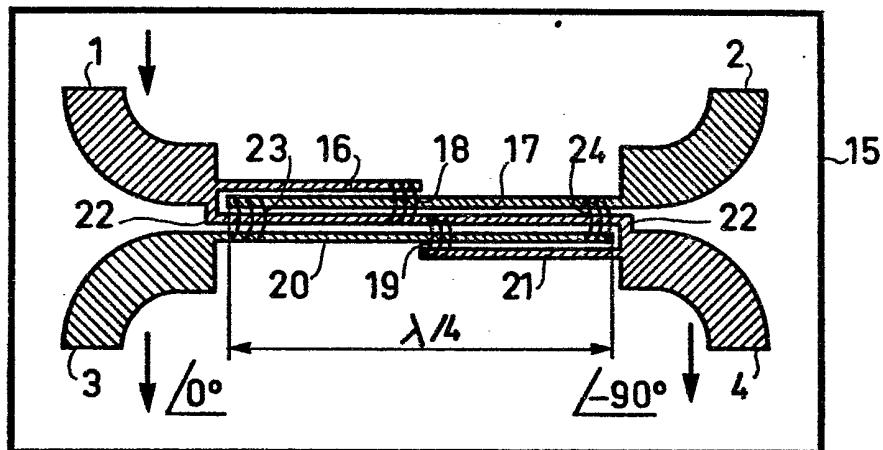


FIG. 6

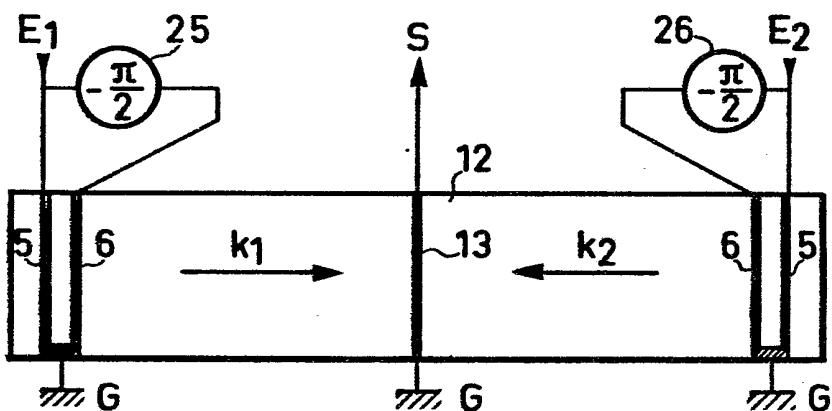


FIG. 8

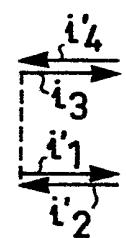
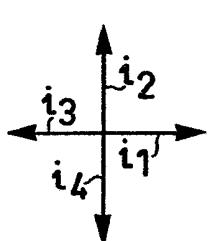


FIG. 9

FIG. 10



4/4

