

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 572 875

②1 N° d'enregistrement national :

84 16891

⑤1 Int Cl⁴ : H 05 B 33/20, 33/18; H 01 L 33/00; H 01 S 3/18.

①2

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 6 novembre 1984.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 19 du 9 mai 1986.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : *CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS) et ETAT FRANCAIS REPRESENTÉ PAR LE MINISTRE DES PTT (CENTRE NATIONAL D'ETUDES DES TELECOMMUNICATIONS).* — FR.

⑦2 Inventeur(s) : Claude Naud, Gérard Guillot, Benoît Deveaud et Bernard Clerjaud.

⑦3 Titulaire(s) :

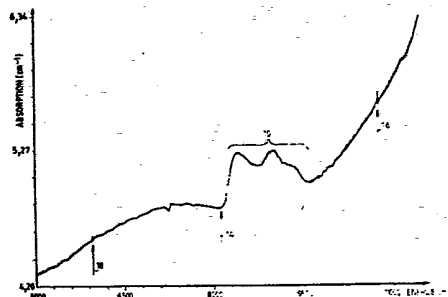
⑦4 Mandataire(s) : Cabinet Netter.

⑤4 Dispositif électro-optique à semi-conducteur et procédé d'émission de lumière.

⑤7 La présente invention concerne un dispositif électro-optique destiné à émettre un rayonnement lumineux à partir d'un milieu semi-conducteur soumis à une excitation d'énergie contrôlée.

Le milieu semi-conducteur est un alliage semi-conducteur III-V, binaire, ternaire ou quaternaire, formé d'au moins un élément de la colonne III et d'au moins un élément de la colonne V de la Classification Périodique, et dopé au Vanadium ou au Titane.

Le dispositif peut être réalisé plus particulièrement sous forme d'une diode électroluminescente ou d'un laser.



FR 2 572 875 - A1

D

Dispositif électro-optique à semi-conducteur et procédé d'émission de lumière.

La présente invention concerne les dispositifs électro-optiques destinés à émettre un rayonnement lumineux à partir d'un milieu semi-conducteur soumis à une excitation d'énergie contrôlée.

5

Les dispositifs électro-optiques à semi-conducteurs, tels que les diodes électroluminescentes, les lasers à semi-conducteur, etc, ont pris un essor considérable au cours des dernières années. Ceci est le cas en particulier des lasers utilisables

10 dans les télécommunications par fibres optiques.

L'un des problèmes qui se pose est de mettre au point des lasers propres à émettre dans la gamme de transparence des fibres optiques utilisées. Ainsi, l'utilisation de fibres optiques à base de silice nécessite des lasers émettant dans l'infrarouge dans la gamme de longueurs d'ondes de 1,3 μm à 1,7 μm .

20 Les premiers lasers à semi-conducteur ont été réalisés avec des échantillons d'arséniure de gallium GaAs. Toutefois, les conditions d'obtention de l'effet laser étaient alors particulièrement draconiennes puisque cet effet ne pouvait être obtenu qu'à très basse température en régime d'impulsions à très faible taux de répétition.

Le fonctionnement des lasers GaAs en régime continu et à température ambiante a pu ensuite être obtenu mais au prix de structures complexes et hétérogènes que l'on appelle encore "hétérojonctions".

5

Outre le fait que les lasers GaAs présentent une structure complexe, il faut noter qu'ils ont pour inconvénient majeur de ne pas émettre dans la gamme de transparence des fibres optiques ($1,3 \mu\text{m}$ à $1,7 \mu\text{m}$). En effet, les lasers GaAs classiques émettent à une longueur d'onde d'environ $0,9 \mu\text{m}$ qui correspond à l'émission de bord de bande du matériau, c'est-à-dire à la transition de la bande interdite située entre la bande de conduction et la bande de valence.

15 On sait également réaliser des lasers quaternaires GaInAsP émettant aux environs de $1,5 \mu\text{m}$, mais le matériau semi-conducteur doit être associé à un substrat tel qu'un substrat InP.

La présente invention permet de réaliser un laser émettant
20 aux environs de $1,5 \mu\text{m}$ avec un matériau dont la longueur d'onde correspondant à la transition bande de conduction - bande de valence est inférieure, typiquement de $0,87 \mu\text{m}$ pour GaAs.

25 On peut ainsi obtenir l'effet laser avec un tel matériau sans être contraint d'utiliser l'émission de bord de la bande interdite.

L'invention repose sur la découverte surprenante qu'un
30 milieu semi-conducteur dopé, en lui-même connu et utilisé jusqu'à présent comme substrat, pouvait être utilisé comme dispositif électro-optique dans des conditions d'excitation d'énergie contrôlée. Un tel dispositif électro-optique peut être réalisé aussi bien sous la forme d'un laser que d'une
35 diode électroluminescente.

Le milieu semi-conducteur, qui est à la base de l'invention,

est un alliage semi-conducteur binaire, ternaire ou quaternaire dopé, à savoir un alliage semi-conducteur III-V formé d'au moins un élément de la colonne III et d'au moins un élément de la colonne V de la Classification Périodique,
 5 et dopé au Vanadium, ou au Titane.

L'élément de la colonne III est avantageusement le Gallium ou l'Indium, ou éventuellement l'Aluminium et celui de la colonne V l'Arsenic ou le Phosphore.

10

Les alliages semi-conducteurs préférés selon l'invention sont les alliages binaires GaP, GaAs et InP, avec une préférence particulière pour GaAs, tout au moins pour l'application au laser.

15

Pour les alliages ternaires, on peut mentionner $Ga_{1-x}Al_xAs$ et $GaAs_{1-x}P_x$ et pour les alliages quaternaires on peut mentionner $Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}P_y$.

20

On a pu constater que l'émission lumineuse obtenue avec le dispositif électro-optique de l'invention est une émission luminescente correspondant à une émission interne du Vanadium sous forme de V^{3+} , laquelle correspond à une longueur d'onde comprise entre 1,5 et 1,8 μm selon le matériau utilisé.

25

Dans le cas où le dopant est le Titane, il s'agit d'une émission interne du Titane sous forme Ti^{2+} .

La transition responsable de cette émission luminescente n'est pas encore entièrement comprise. Il semble qu'il s'agisse d'une transition $1E$ ou $3T_2 \longrightarrow 3A_2$ selon la notation de Mulliken.

30

Ainsi, au lieu d'utiliser une émission de bande à bande (transition bande de conduction-bande de valence), comme
 35 on le faisait antérieurement, on utilise, selon l'invention, une émission interne au dopant Vanadium ou Titane.

Le dopant Vanadium ou Titane est prévu de préférence dans une concentration de 10^{14} à 10^{17} atomes par cm^3 de l'alliage semi-conducteur non dopé. L'alliage semi-conducteur doit être d'une pureté telle qu'il contienne moins de 10^{16} atomes d'impuretés indésirées par cm^3 .

Le milieu semi-conducteur de l'invention peut être un matériau massif, polycristallin, ou monocristallin, ou encore une couche épitaxiée sur un substrat constitué d'un alliage adapté pour établir un accord de maille des réseaux avec la couche épitaxiée.

L'invention prévoit en outre que le dispositif comporte des moyens pour exciter l'alliage semi-conducteur dopé avec une énergie contrôlée qui peut être supérieure ou inférieure à l'énergie de transition entre la bande de valence et la bande de conduction de l'alliage semi-conducteur non dopé.

Bien que le phénomène ne puisse être complètement expliqué, il apparaît qu'il se produit alors un transfert d'énergie entre les bandes d'énergie de l'alliage semi-conducteur et les niveaux d'énergie du dopant dont certains se trouvent localisés dans la bande interdite de l'alliage semi-conducteur.

Dans une première variante de réalisation de l'invention, dans laquelle l'alliage dopé comporte une transition fortement absorbante propre à induire une transition radiative génératrice de ladite émission lumineuse, par l'intermédiaire d'une transition non radiative, le dispositif est alors agencé pour émettre un rayonnement lumineux cohérent à partir de ladite transmission radiative.

Les moyens d'excitation prévus dans le cadre de cette variante peuvent comprendre des moyens de pompage optique à l'aide de photons dont les longueurs d'onde sont associées à des énergies inférieures à l'énergie de transition entre

la bande de valence et la bande de conduction de l'alliage semi-conducteur.

On peut également réaliser le pompage optique à l'aide de
5 photons dont les longueurs d'onde sont associées à des énergies supérieures ou égales à l'énergie de transition entre la bande de valence et la bande de conduction de l'alliage semi-conducteur.

10 Pour ce faire, une solution consiste à prévoir que les moyens de pompage optique comprennent un laser à semi-conducteur dont le matériau actif est l'alliage de base non dopé. Dans ce cas, l'énergie de pompage est alors égale à l'énergie de transition précitée.

15 Dans une seconde variante de réalisation de l'invention, le dispositif est agencé sous la forme d'une diode électroluminescente et des moyens d'excitation précités comprennent des moyens pour injecter dans l'alliage semi-conducteur dopé
20 des électrons possédant l'énergie précitée.

Il est également prévu, dans une troisième variante de réalisation de l'invention, que le dispositif soit agencé lui-même sous forme de laser à semi-conducteur, réalisant
25 ainsi un "pompage électrique".

L'invention, sous un autre aspect, concerne un procédé d'émission de lumière, selon lequel on excite un milieu semi-conducteur, constitué par un alliage semi-conducteur
30 III-V, binaire, ternaire ou quaternaire, formé d'au moins un élément de la colonne III et d'au moins un élément de la colonne V de la Classification Périodique, et dopé au Vanadium ou au Titane, par une excitation d'énergie contrôlée supérieure au seuil de l'une des deux transitions fortement
35 absorbantes dont est capable ledit milieu. L'invention s'étend également aux différentes variantes de mise en oeuvre de ce procédé.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description détaillée qui suit et qui se réfère aux dessins annexés, sur lesquels :

- 5 - la figure 1 représente un spectre d'absorption d'un alliage GaAs dopé au Vanadium;
- la figure 2 représente un autre spectre d'absorption établi avec le même milieu semi-conducteur que dans la
10 figure 1, mais avec une sensibilité plus élevée dans la région de la luminescence;
- la figure 3 représente un spectre d'émission obtenu avec le même milieu semi-conducteur que dans les figures 1 et 2;
- 15 - la figure 4 représente un spectre d'excitation de luminescence établi pour le même milieu semi-conducteur que pour les figures 1 à 3;
- 20 - la figure 5 est un diagramme représentant les variations des principaux niveaux d'énergie de V^{3+} dans la configuration $3d^2$ dans un champ cristallin de symétrie T_d ;
- la figure 6 représente schématiquement un diagramme montrant la disposition relative des bandes d'énergie de
25 l'alliage GaAs et des principaux niveaux d'énergie du dopant Vanadium sous forme V^{3+} ;
- la figure 7 représente schématiquement un laser à semi-
30 conducteur pompé optiquement selon l'invention; et
- la figure 8 représente schématiquement un dispositif émetteur de lumière réalisé selon l'invention.
- 35 Les alliages semi-conducteurs III-V qui sont à la base de l'invention sont des matériaux connus en eux-mêmes.

En particulier, l'arséniure de gallium dopé au vanadium est disponible commercialement auprès de la firme Wacker Chemitronic (République Fédérale d'Allemagne).

5 Ce milieu semi-conducteur connu a toutefois été utilisé jusqu'à présent comme substrat pour des composants électroniques où ce milieu ne met alors en jeu que des signaux électriques.

10 Ce milieu semi-conducteur, qui s'est avéré particulièrement intéressant en raison de sa bonne stabilité thermique, a fait l'objet de différentes études, mais le rôle du dopant Vanadium qui n'a pas encore pu être véritablement compris, fait l'objet d'importantes controverses.

15 La littérature sur ce point peut être divisée grossièrement en deux classes principales, à savoir l'une qui considère que le vanadium introduit un niveau d'énergie au milieu de la bande interdite comprise entre la bande de valence et
20 la bande de conduction de GaAs et l'autre qui localise le niveau accepteur à environ 0,2 eV en dessous de la bande de conduction. Le fait que les milieux soumis à l'étude aient été de deux sources différentes - l'une de résistivité élevée, l'autre de type n - ne peut suffire à expliquer ces
25 différences d'interprétation.

Ces études menées par les Demandeurs ont porté d'une part sur un matériau de base Wacker, d'autre part sur un matériau de type n, pris en deux lots d'échantillons de résistivités
30 très différentes.

Le milieu semi-conducteur étudié de type n a été tiré par la méthode dite de Bridgman horizontale et a été dopé dans le bain à raison de 150 mg de vanadium pour 400 g de GaAs. On a
35 trouvé que ce lingot était de type n, pratiquement sur toute sa longueur, la concentration en dopant étant d'environ de 2×10^{16} atomes de vanadium par cm^3 de l'alliage semi-

conducteur.

L'étude entreprise a porté à la fois sur des échantillons
issus de la partie de type n et de la partie de queue du
5 lingot, qui était fortement résistive.

Les études menées par les Demandeurs ont montré que le
spectre d'absorption est semblable pour les échantillons
Wacker et les échantillons n fortement résistifs, et ce
10 quelle que soit la source utilisée. Les figures 1 et 2
donnent cette forme globale à la température de 6K, pour
les échantillons fortement résistifs.

Les échantillons n fortement conducteurs ont un spectre
15 d'absorption différent (résistivités inférieures à 1000 Ωcm).

Dans la suite, on désignera par "matériaux retenus" le maté-
riau Wacker et le matériau de type n fortement résistif.

20 Les études faites en absorption, luminescence, excitation
de luminescence, RPE (Résonance paramagnétique électronique)
et DLTS (spectroscopie transitoire de niveau profond) ont
alors montré qu'il existe dans GaAs un niveau accepteur
localisé à 0,2 eV au-dessous de la bande de conduction et
25 un niveau donneur localisé à 0,17 eV au-dessus de la bande
de valence, ce dernier niveau étant probablement le niveau 3A2.

La figure 1 représente les variations de l'absorption, expri-
mée en cm^{-1} , en fonction de l'énergie appliquée exprimée
30 également en cm^{-1} .

Ce spectre montre une bande d'absorption principale, dési-
gnée sous la référence générale 10, correspondant à une
énergie appliquée d'environ 1,0 à 1,2 eV (8060 à 9672 cm^{-1}).
35 Cette bande principale 10 présente une forme analogue à celle
de la bande principale, désignée sous la référence 12,
du spectre d'excitation de la luminescence représenté à

la figure 4.

La raie zéro phonon associée à la bande principale 12 est désignée par la flèche 14 sur la figure 1. Cette raie zéro
5 phonon a une largeur correspondant à 3 cm^{-1} et est située à une énergie correspondant à $8131 \pm 0,3 \text{ cm}^{-1}$.

Une raie étroite identifiée par la flèche 16 et correspondant à une énergie de $10773 \pm 0,3 \text{ cm}^{-1}$ a également pu être
10 observée sur tous les échantillons. Cette raie étroite, dont l'intensité est reliée à celle des autres raies, a une largeur correspondant à $0,5 \text{ cm}^{-1}$.

La région de la luminescence du spectre d'absorption
15 de la figure 1 correspond à un intervalle d'énergie d'environ 5957 à 5968 cm^{-1} .

Cette région, identifiée par la flèche 18 sur la figure 1,
20 apparaît en détail sur la figure 2 qui montre le même spectre établi avec une plus grande sensibilité.

L'examen de ce spectre montre une raie 20 à basse énergie, à savoir $5957,85 \pm 0,3 \text{ cm}^{-1}$, et un composant à haute énergie qui se dédouble en deux raies 22 et 24 situées respecti-
25 vement à $5968,05 \text{ cm}^{-1}$ et $5968,25 \pm 0,3 \text{ cm}^{-1}$. On peut remarquer que ces raies sont extrêmement étroites ($0,1 \text{ cm}^{-1}$) et que les raies dédoublées 22 et 24 sont séparées par un intervalle correspondant à $0,2 \text{ cm}^{-1}$.

30 Ces raies coïncident exactement avec les raies zéro phonon de luminescence, désignées 26 et 28, sur le spectre de photoluminescence représenté sur la figure 3. Ce spectre qui montre l'intensité d'émission exprimée en unités arbitrai-
35 res, en fonction de l'énergie ou de la longueur d'onde, a été obtenu à une température de 10 K sous excitation par un laser YAG.

Le spectre montre également des répliques assistées par phonon 26' et 28' des raies 26 et 28.

Les résultats expérimentaux permettent d'aboutir à deux
5 enseignements principaux :

(1) les transitions correspondant aux raies 20, 22 et 24 de la figure 2 sont extrêmement intenses en émission et très faibles en absorption;

10

(2) les largeurs des raies zéro phonon sont extrêmement différentes en fonction de la transition, les raies de faible énergie étant remarquablement étroites.

15 L'explication avancée par les Demandeurs est que la caractéristique (1) montre que la transition radiative est interdite et qu'il n'y a pas de canaux non radiatifs, sinon la transition serait aussi très faible en émission : ceci peut donc suggérer une transition interdite par spin.

20

Le fait, d'autre part, que les largeurs des raies sont inhomogènes, semble signifier qu'elles sont gouvernées par les contraintes internes des cristaux.

25 La caractéristique (2) montre que la réponse des différentes raies zéro phonon aux contraintes internes des cristaux est extrêmement différente, les raies de faible énergie semblant très peu sensibles aux contraintes.

30 Le diagramme de Tanabe-Sugano de la figure 5 montre les variations des principaux niveaux d'énergie de V^{3+} dans la configuration $3d^2$ dans un champ cristallin de symétrie T_d en fonction des contraintes, les niveaux étant désignés conformément à la notation de Mulliken. On peut voir d'après
35 ce diagramme que le niveau $1E(1D)$ est pratiquement parallèle au niveau fondamental $3A_2$.

En conséquence, l'énergie de transition $3A2(3F) \longleftrightarrow 1E(1D)$ est très peu sensible aux distorsions ou contraintes symétriques, de même que pour l'énergie de transition $3A2 \longleftrightarrow 1E + 3T2$.

5

En revanche, la transition autorisée $3A2(3F) \longleftrightarrow 3T1(3F)$ doit être très sensible à de telles contraintes du fait que la pente du niveau $4T1$ dans le diagramme de la figure 5 est assez accentuée. Il en est de même de la transition.

10 $3A2 \longleftrightarrow 3T1 + 1A1$.

Il faut également noter que le niveau $1A1(1G)$ présente une faible pente sur ce diagramme et que la transition $3A2(3F) \longleftrightarrow 1A1(1G)$ devrait donc correspondre à une raie

15 de faible largeur.

Le diagramme de Tanabe-Sugano de V^{2+} ne permet pas une telle analyse.

20 Ces différents résultats ont conduit les Demandeurs à attribuer la transition de 5958 cm^{-1} à une transition $3A2(3F) \longleftrightarrow X$ interdite (où X est un mélange des niveaux $3T2$ et $1E$), la bande principale avec la raie zéro phonon à 8131 cm^{-1} à une transition $3A2(3F) \longleftrightarrow Y$

25 (où Y est un mélange des niveaux $3T1$ et $1A1$ et la raie étroite à 10773 cm^{-1} à la transition $3A2(3F) \longleftrightarrow 1A1(1G)$ de V^{3+} sur un site gallium.

L'existence de deux raies à $5968,05 \text{ cm}^{-1}$ et $5968,25 \text{ cm}^{-1}$

30 peut être interprétée suivant le même schéma comme un dédoublement du niveau $1E$ en deux niveaux $1A1$ et $1A2$.

L'interprétation avancée par les Demandeurs a pu être vérifiée en mesurant la durée de la luminescence. A $4,2 \text{ K}$,

35 cette durée de vie est de $0,15 \text{ ms}$ à un facteur 2 près pour tous les matériaux. Cette durée relativement longue confirme le caractère à interdiction par spin de la transition

émettrice, les durées de vies pour des transitions autorisées par spin étant généralement extrêmement plus faibles. Ceci montre également que GaAs favorise l'effet laser.

- 5 D'autre part, les spectres d'excitation des bandes de luminescence typiques du vanadium étudiés précédemment ont été établis. Le spectre de la figure 4 représente la variation de l'émission, dont l'intensité I est exprimée en unités arbitraires, en fonction de l'énergie E d'excitation de
10 luminescence exprimée en eV.

Le spectre de la figure 4 montre la bande 12 déjà signalée précédemment. Il s'agit d'une très importante bande d'excitation intrinsèque centrée autour de 1,1 eV. Cette bande
15 d'excitation a un seuil à 1 eV et deux structures nettement visibles avec des maxima à 1,05 eV et 1,12 eV et une troisième moins nette à 1,16 eV. Elle possède exactement la même forme que la courbe d'absorption représentée sur la figure 1.

20

Le spectre montre en outre une bande 30 située à 1,5 eV.

- La bande 12 peut être ainsi attribuée à l'absorption interne de la transition $3A_2 \rightarrow 3T_1$ de V^{3+} tandis que la bande 30
25 peut être attribuée à l'absorption de la bande de valence à la bande de conduction de GaAs. Ceci montre la possibilité de réaliser un pompage électrique par injection de paires électron-trou.

- 30 D'après les résultats expérimentaux des Demandeurs, il apparaît que le Vanadium est à l'état V^{3+} , c'est-à-dire neutre, dans l'un et l'autre des "matériaux retenus" tels que définis plus haut, ce qui est contraire aux interprétations faites antérieurement. Ceci prouve donc que le Vanadium
35 n'agit pas comme accepteur dans le milieu de l'intervalle de la bande interdite de l'alliage semi-conducteur. On peut ainsi créer l'état de charge V^{3+} du Vanadium en l'introdui-

sant en quantité suffisante dans un matériau de type p, en particulier GaP, GaAs et InP.

5 Ce n'est donc pas le Vanadium qui rend le matériau semi-isolant. Dans InP, le Vanadium n'est pas accepteur car le niveau potentiellement accepteur se situe au-dessus de la bande de conduction.

10 Des résultats expérimentaux comparables ont été obtenus avec les autres alliages semi-conducteurs visés par l'invention et avec le Titane utilisé comme dopant à la place du Vanadium.

15 On se réfère maintenant au diagramme de la figure 6 (établi à la température de 6K) sur lequel BV, BI et BC désignent respectivement la bande de valence, la bande interdite et la bande de conduction de l'alliage semi-conducteur. Les niveaux d'énergie 3A2, X (mélange 3T2 et 1E) et Y (mélange 3T1 + 1A1) du dopant Vanadium sous forme V^{3+} sont également
20 représentés sur ce diagramme. L'émission lumineuse correspond à une émission interne du Vanadium sous forme V^{3+} . La transition responsable de cette émission est la transition $X \rightarrow 3A2$.

25 Pour déclencher l'émission lumineuse, on peut utiliser plusieurs procédés.

- On peut exciter le milieu semi-conducteur pour faire passer des électrons du niveau 3A2 au niveau Y (transition
30 fortement absorbante). Il se produit ensuite une désexcitation qui implique d'abord un passage d'électrons du niveau Y au niveau X : il s'agit d'une transition très autorisée selon un processus non radiatif à phonons (vibrations du réseau). Cette transition non radiative est suivie par une
35 transition radiative très interdite $X \rightarrow 3A2$ avec émission de photons. Les résultats expérimentaux ont montré que la durée de vie de l'état intermédiaire ou émetteur X est rela-

tivement longue (0,18 ms à 4K). Ceci suggère une transition interdite par spin.

Dans ce cas, l'énergie d'excitation est inférieure à l'énergie de transition entre la bande de valence et la bande de conduction. On peut utiliser avantageusement un laser YAG ou verre ou tout autre matériau dopé Néodyme.

- On peut encore exciter le milieu semi-conducteur avec une énergie supérieure ou égale à l'énergie de transition entre la bande de valence et la bande de conduction, cette énergie correspondant au maximum (bande 30) de la courbe d'excitation de la luminescence (figure 4). On utilise alors un laser à semi-conducteur tel que GaAs non dopé traditionnel, ou encore un flash, ou tout autre laser notamment à gaz, pourvu que la fréquence du laser soit supérieure ou égale à un seuil qui correspond à l'énergie de transition précitée.

- On peut également exciter le milieu semi-conducteur par injection de paires électron-trou dans ce milieu.

Avec les moyens d'excitation précités, on crée ainsi un transfert d'énergie entre les bandes de l'alliage semi-conducteur et le dopant Vanadium qui permet de l'amener dans un état excité sans que l'on soit obligé de réaliser des transitions internes à l'intérieur du dopant lui-même.

Le fait que le dopant Vanadium soit inclus dans une matrice qui est un semi-conducteur constitue aussi un avantage déterminant car, comme on vient de le voir précédemment, les paires électron-trou de l'alliage semi-conducteur sont responsables d'une excitation très efficace de la luminescence du Vanadium.

On peut ainsi réaliser un dispositif électro-optique selon l'invention en combinant au milieu semi-conducteur, tel que

défini précédemment, des moyens d'excitation propres à exciter l'alliage semi-conducteur dopé avec une énergie contrôlée qui peut être supérieure ou inférieure à l'énergie de transition entre la bande de valence et la bande de conduction de l'alliage semi-conducteur non dopé.

Le milieu semi-conducteur est connu en lui-même et peut être préparé suivant des procédés connus.

- 10 L'alliage semi-conducteur non dopé de départ doit être de grande pureté, c'est-à-dire qu'il doit contenir si possible moins de 10^{16} atomes d'impuretés indésirées par cm^3 . La concentration du dopant Vanadium qui sera ajouté à cet alliage doit être comprise entre 10^{14} et 10^{17} atomes de Vanadium par cm^3 de l'alliage semi-conducteur.

Le milieu peut être rendu de type n ou p par introduction d'impuretés donneur ou accepteur.

- 20 Le milieu semi-conducteur peut être un matériau massif polycristallin ou monocristallin, ou bien encore une couche épitaxiée sur un substrat constitué d'un alliage adapté de manière à obtenir un accord de maille des réseaux avec la couche épitaxiée.

- 25 Le matériau massif est préparé en faisant croître le matériau semi-conducteur en présence d'un germe monocristallin. La couche épitaxiée est produite par exemple par la technique d'épitaxie en phase liquide pour faire croître le cristal de l'alliage semi-conducteur, y compris le dopant Vanadium, sur un substrat formé du même alliage.

- 30 Ces procédés de fabrication sont bien connus de l'homme de l'art et il n'entre pas dans le cadre de l'invention de les décrire en détail dans cette demande.

Dans une première variante de réalisation de l'invention,

le dispositif est agencé pour émettre un rayonnement lumineux cohérent à partir de la transition radiative $X \rightarrow 3A2$ (figure 6) en tirant profit du fait que le milieu semi-conducteur comporte une transition fortement absorbante
5 (3A2 $\rightarrow$ Y) propre à induire ladite transmission radiative ($X \rightarrow 3A2$) par l'intermédiaire d'une transition non radiative ($Y \rightarrow X$).

Pour cela, on excite le milieu semi-conducteur en l'éclairant par des photons dont l'énergie est au moins égale à
10 l'énergie de transition entre les niveaux 3A2 et Y.

Une solution commode pour réaliser cet éclairage est d'utiliser des moyens de pompage optique à l'aide de photons
15 dont les longueurs d'ondes sont associées à des énergies supérieures ou égales à l'énergie de transition définie précédemment.

Un dispositif réalisé de cette façon est représenté de façon
20 très schématique sur la figure 7. Il comprend un milieu semi-conducteur 32 conforme à l'invention à l'intérieur d'une cavité laser 34, de forme allongée, délimitée à ses extrémités par des miroirs 36 et 38 partiellement réfléchissants. Une source 40 propre à réaliser le pompage
25 optique du matériau est disposée latéralement par rapport à la cavité laser 34.

Cette source 40 émet des photons dont les longueurs d'ondes sont associées à des énergies propres à amener des électrons,
30 directement ou indirectement au niveau Y.

Bien que la source 40 puisse être constituée par toute source laser émettant dans la longueur d'onde appropriée, un des moyens commodes est d'utiliser un laser à semi-conducteur
35 dont le matériau actif est l'alliage de base non dopé. Ainsi, dans le cas d'un milieu semi-conducteur GaAs dopé au Vanadium, on aura tout avantage à utiliser une diode laser GaAs qui

émettra les photons ayant précisément la bonne énergie pour réaliser le pompage optique du milieu semi-conducteur.

Dans une deuxième variante, le dispositif de l'invention
5 est agencé sous la forme d'une diode électroluminescente et les moyens d'excitation définis plus haut sont des moyens pour injecter dans l'alliage semi-conducteur dopé des électrons possédant une énergie correspondant à l'énergie de transition entre la bande de valence et la
10 bande de conduction de l'alliage semi-conducteur non dopé.

Un exemple d'une telle diode est représenté schématiquement sur la figure 8.

15 Elle comprend un substrat 42 de GaAs sur lequel est disposée une couche 44 de GaAs dopé au Vanadium, laquelle reçoit une couche 46 d'un matériau p^+ ou n^+ . Deux électrodes 48 et 50 sont reliées respectivement au substrat 42 et à la couche 46. Une tension continue V ou des impulsions sont établies
20 entre les deux électrodes pour provoquer l'émission lumineuse recherchée.

Dans un premier exemple, le substrat 42 est de caractère n^+ , la couche 44 de caractère p et la couche 46 de caractè
25 re p^+ . Dans un deuxième exemple, le substrat est de caractère p^+ , la couche 44 de caractère p et la couche 46 de caractère n^+ .

Dans une variante de ceci, le dispositif de l'invention
30 est agencé lui-même sous forme de laser à semi-conducteur en réalisant ainsi ce que l'on appelle un pompage électrique. On réalise ainsi un dispositif électro-optique intégré où le milieu semi-conducteur de l'invention et la diode laser réalisée à partir du même alliage semi-conducteur, mais non
35 dopé, sont sur une même microstructure. Un tel dispositif peut être réalisé à partir de la diode décrite précédemment en utilisant les techniques actuelles à double hétérostructure.

La figure 8 l'illustre par des miroirs formant cavités, référencés 60 et 62. Ces miroirs peuvent être réalisés de toutes les manières connues de l'homme de l'art : miroirs externes ou définis par les faces latérales clivées du cristal, éventuellement revêtues d'un matériau convenable.

Les expériences entreprises par les Demandeurs ont montré que le dispositif de l'invention pouvait être agencé sous la forme d'un laser émettant aux longueurs d'ondes suivantes:

10

GaP : V 1,567 μm

GaAs : V 1,678 μm

InP : V 1,757 μm

15 Si l'on utilise du Titane comme dopant, on réalise des lasers émettant à une longueur d'onde un peu plus élevée, à savoir d'environ 2 μm .

20 Le dispositif électro-optique de l'invention peut être réalisé sous forme de diode électroluminescente ou sous forme de laser. Dans ce dernier cas, il trouve une application préférée dans le domaine des télécommunications par fibres optiques.

Revendications.

1. Dispositif électro-optique destiné à émettre un rayonnement lumineux à partir d'un milieu semi-conducteur soumis à
5 une excitation d'énergie contrôlée, caractérisé en ce que le milieu semi-conducteur est un alliage semi-conducteur III-V, binaire, ternaire ou quaternaire, formé d'au moins un élément de la colonne III et d'au moins un élément de la colonne V de la Classification Périodique, et dopé au
10 Vanadium ou au Titane.
2. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'alliage semi-conducteur est choisi parmi GaP, GaAs et InP et que le dopant est le Vanadium.
- 15 3. Dispositif selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'alliage semi-conducteur est GaAs et que le dopant est le Vanadium.
- 20 4. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que l'émission lumineuse est une émission luminescente correspondant à une émission interne du Vanadium sous forme V^{3+} , ou du Titane sous forme Ti^{2+} correspondant à une longueur d'onde comprise entre 1,5 μm
25 et 2 μm environ selon l'alliage et l'impureté utilisés.
5. Dispositif selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite transition est une transition $1E$ ou $3T_2 \rightarrow 3A_2$ selon la notation de Mulliken.
- 30 6. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le dopant Vanadium est prévu dans une concentration de 10^{14} à 10^{17} atomes par cm^3 de l'alliage semi-conducteur.
- 35 7. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que l'alliage semi-conducteur contient

moins de 10^{16} atomes d'impuretés indésirées par cm^3 .

8. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le milieu semi-conducteur est un
5 matériau massif, polycristallin ou monocristallin.

9. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que le milieu semi-conducteur est une couche épitaxiée sur un substrat constitué d'un alliage
10 adapté pour établir un accord de maille des réseaux avec la couche épitaxiée.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens pour exciter
15 l'alliage semi-conducteur dopé avec une énergie contrôlée.

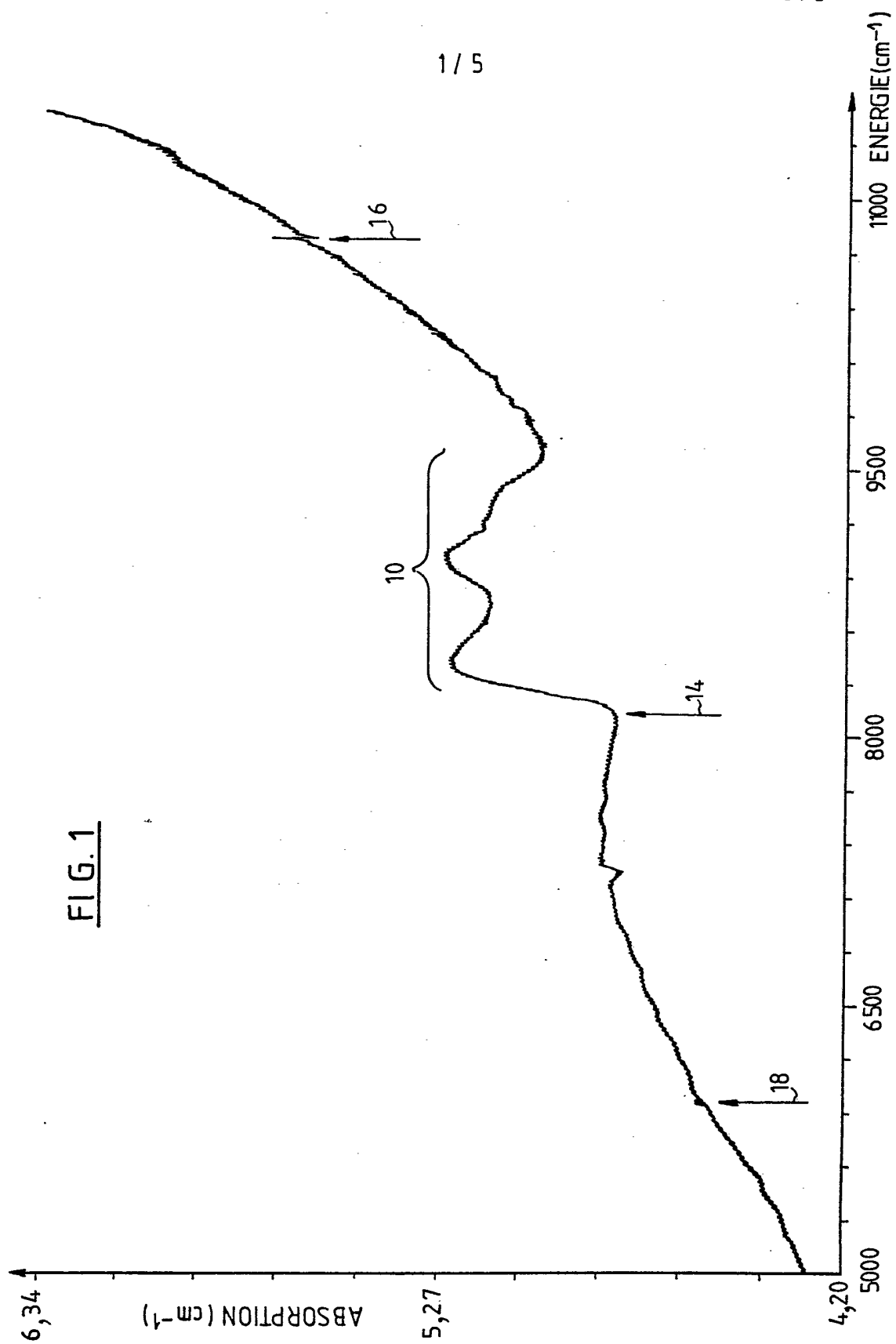
11. Dispositif selon la revendication 10, caractérisé en ce que ledit alliage dopé comporte une transition fortement absorbante propre à induire une transition radiative générale
20 ratrice de ladite émission lumineuse, par l'intermédiaire d'une transition non radiative et qu'il est agencé pour émettre un rayonnement lumineux cohérent à partir de ladite transition radiative.

12. Dispositif selon la revendication 11, caractérisé en ce que les moyens d'excitation comprennent des moyens de pompage optique à l'aide de photons, dont les longueurs d'ondes sont associées à des énergies inférieures à l'énergie de transition entre la bande de valence et la bande de
30 conduction de l'alliage semi-conducteur.

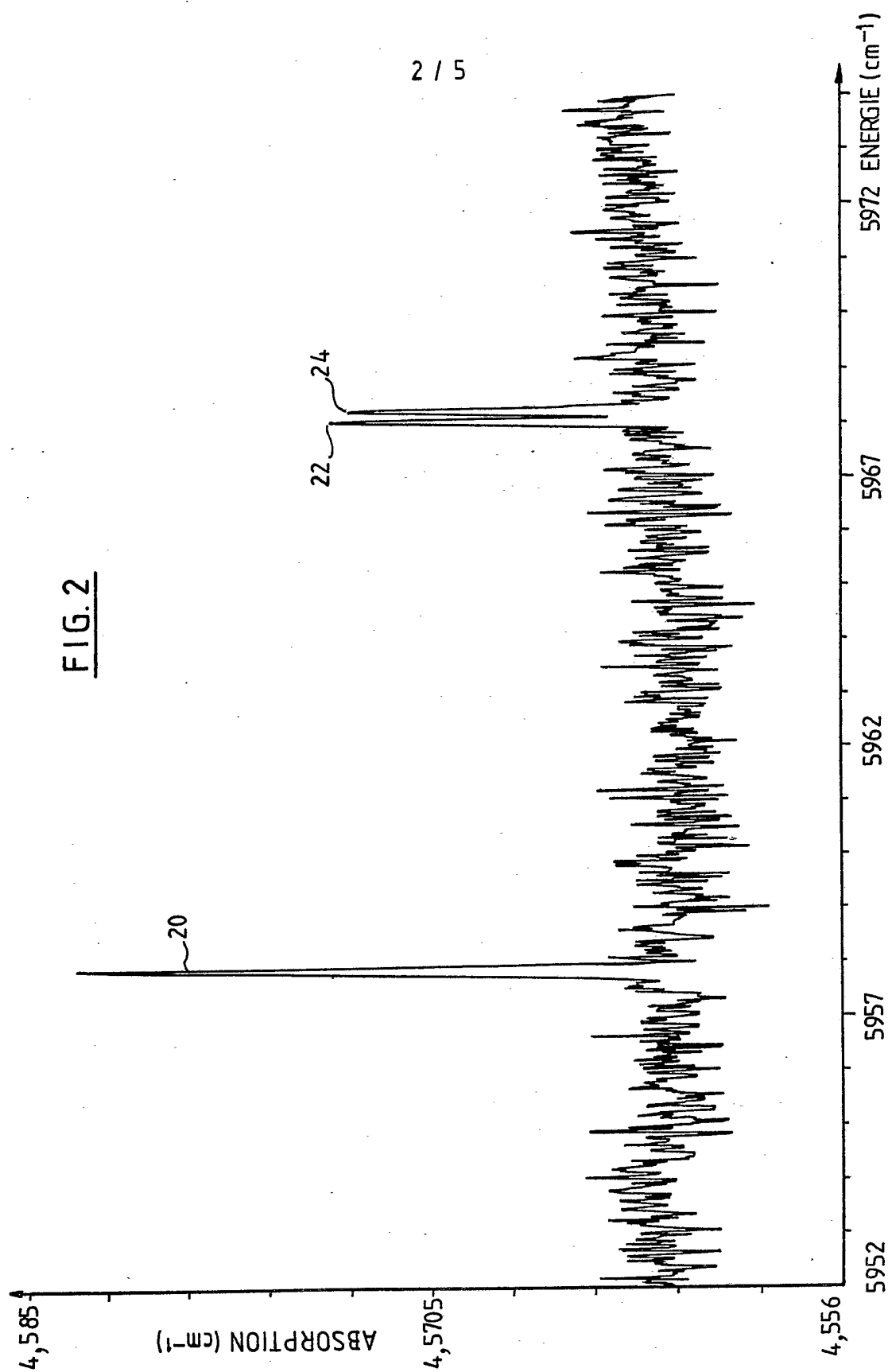
13. Dispositif selon la revendication 11, caractérisé en ce que les moyens d'excitation comprennent des moyens de pompage optique à l'aide de photons, dont les longueurs
35 d'ondes sont associées à des énergies supérieures ou égales à l'énergie de transition entre la bande de valence et la bande de conduction de l'alliage semi-conducteur.

14. Dispositif selon la revendication 13, caractérisé en ce que les moyens de pompage optique comprennent un laser à semi-conducteur dont le matériau actif est l'alliage de base non dopé.
- 5
15. Dispositif selon la revendication 14, caractérisé en ce que le laser à semi-conducteur est un laser à GaAs.
16. Dispositif selon la revendication 14, caractérisé en ce
- 10 que le laser à semi-conducteur est un laser à InP.
17. Dispositif selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il est agencé sous la forme d'une diode électroluminescente et que les moyens d'excitation comprennent des
- 15 moyens pour injecter dans l'alliage semi-conducteur dopé les électrons possédant ladite énergie.
18. Dispositif selon la revendication 13, caractérisé en ce qu'il est agencé lui-même sous forme de laser à semi-
- 20 conducteur.
19. Procédé d'émission de lumière, caractérisé en ce qu'on excite un milieu semi-conducteur, constitué par un alliage semi-conducteur III-V, binaire, ternaire ou quaternaire
- 25 formé d'au moins un élément de la colonne III et d'au moins un élément de la colonne V de la Classification Périodique, et dopé au Vanadium ou au Titane, par une excitation d'énergie contrôlée supérieure au seuil de l'une des deux transitions fortement absorbantes dont est capable ledit milieu.

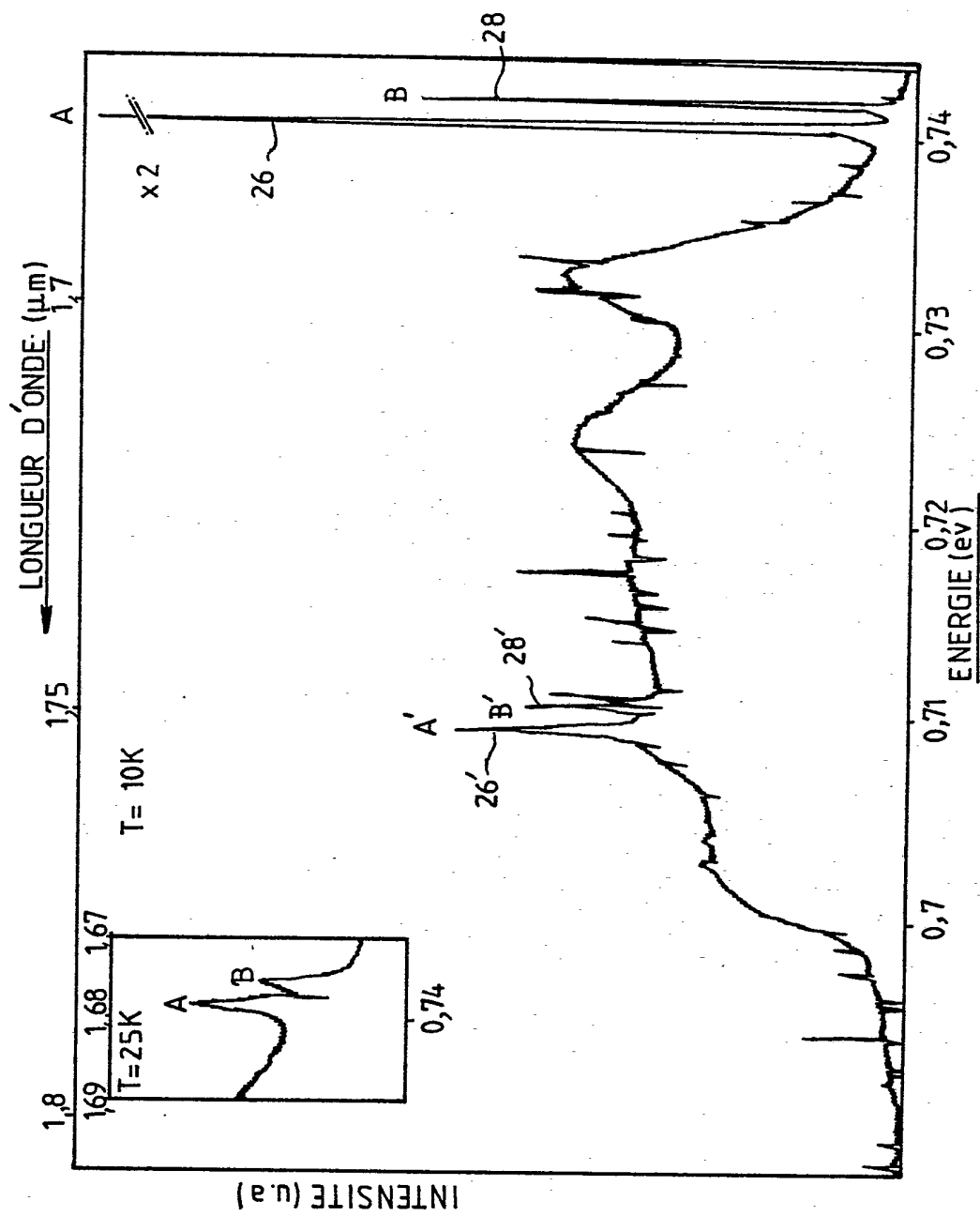
1 / 5

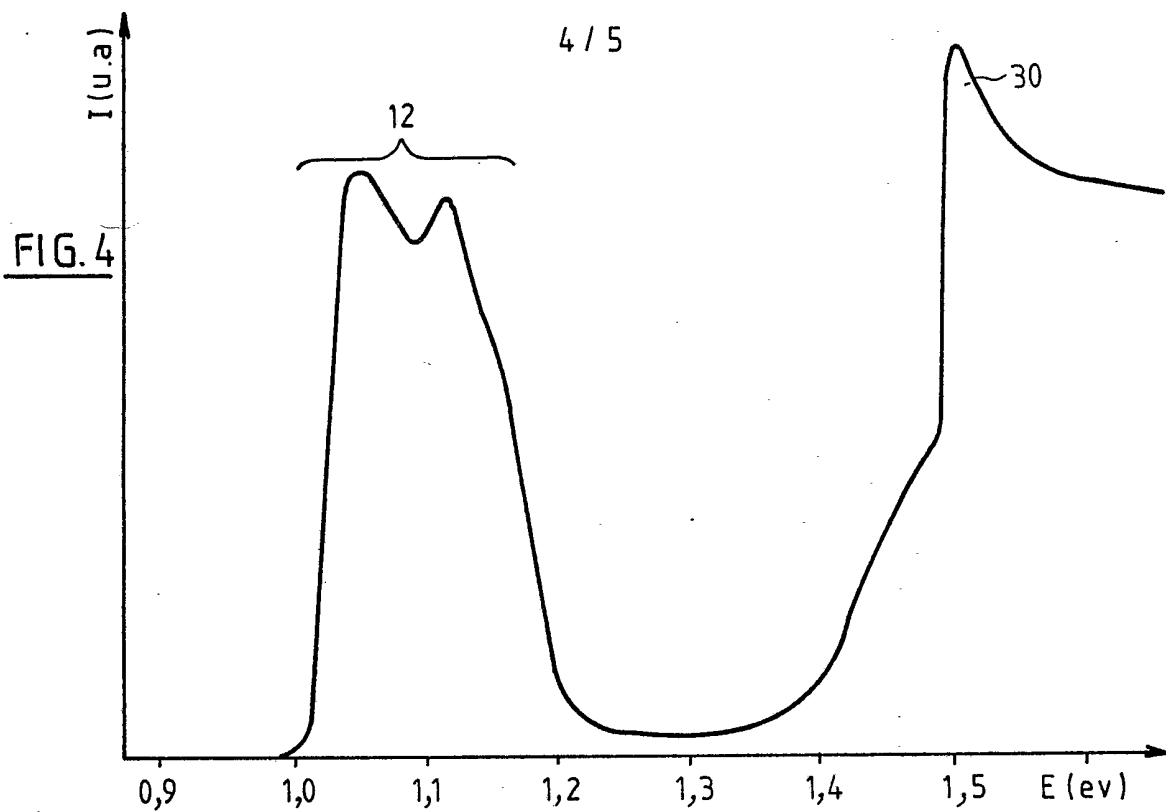
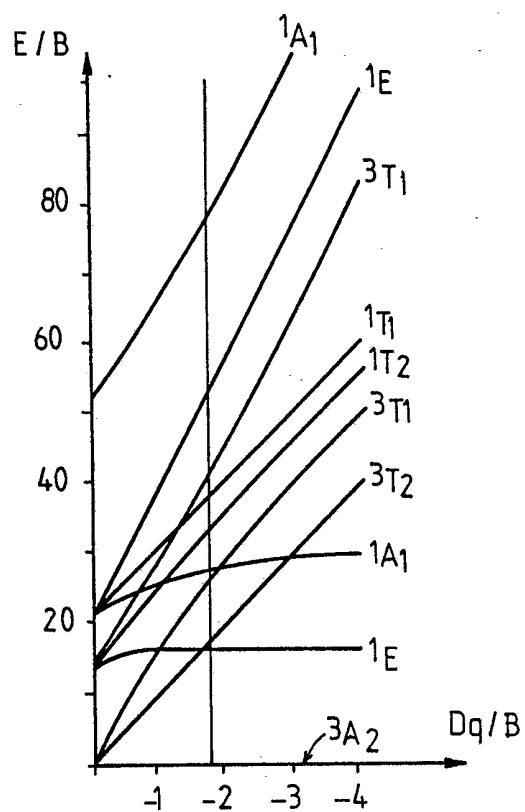


2 / 5

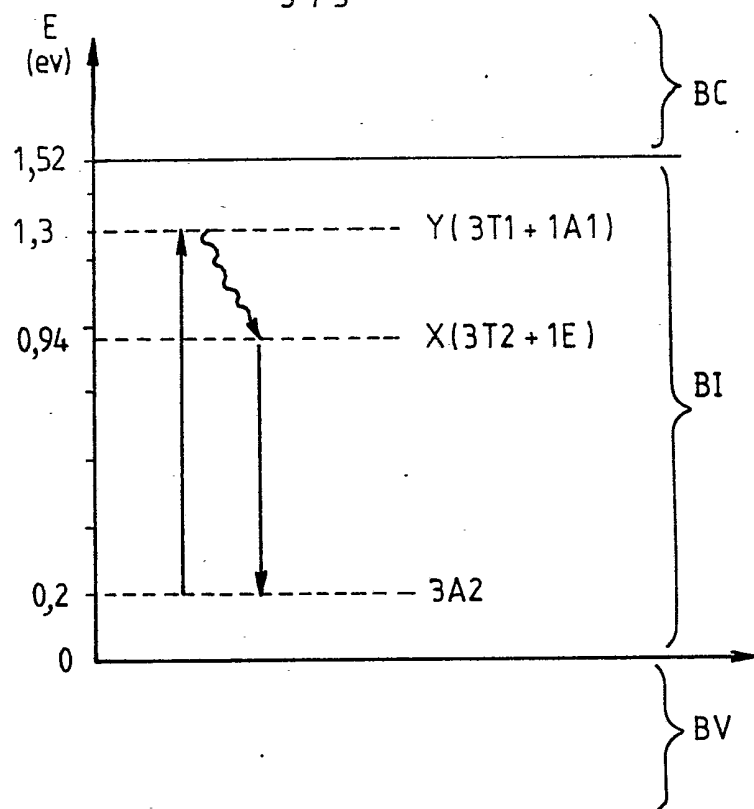
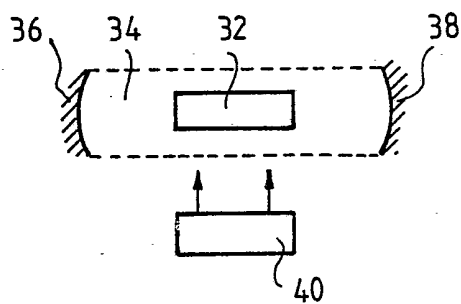


3 / 5

FIG. 3

FIG. 5

5 / 5

FIG. 6FIG. 7FIG. 8