

①2 DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 05.10.92.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la demande : 08.04.94 Bulletin 94/14.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du présent fascicule.*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : *Organisation Intergouvernementale dite: AGENCE SPATIALE EUROPEENNE — FR.*

⑦2 Inventeur(s) : *Perryman, Michael Anthony Charles, Peacock Antony et Foden, Clare Louise.*

⑦3 Titulaire(s) :

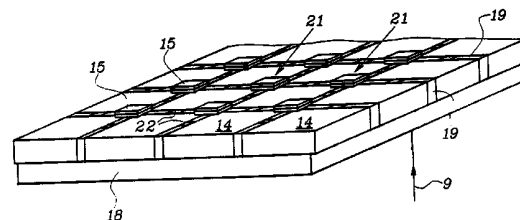
⑦4 Mandataire : *Cabinet Ores.*

⑤4 Cellule de détection, détecteur, capteur et spectroscope.

⑤7 La présente invention se rapporte principalement à une cellule de détection, à un détecteur matriciel mettant en oeuvre de telles cellules, à un capteur comportant un tel détecteur et à un spectroscope comportant un tel capteur.

L'invention a pour objet une cellule de détection de photons comportant un élément supraconducteur notamment en niobium sensible aux photons (9) du rayonnement à détecter ou à des phonons engendrés par un tel photon (9), notamment par séparation des paires de Cooper en quasi particules et une jonction supraconductrice à effet tunnel (15) comprenant une électrode supraconductrice, caractérisée en ce qu'elle est délimitée par une pluralité de jonctions supraconductrices à effet tunnel (15) espacées, réparties à la périphérie de la cellule (21).

Le dispositif selon la présente invention s'applique au comptage de photons, et donc principalement à l'acquisition et au traitement de l'information provenant de sources de rayonnement faibles.



CELLULE DE DETECTION, DETECTEUR, CAPTEUR ET SPECTROSCOPE

5 La présente invention se rapporte principalement à une cellule de détection, à un détecteur matriciel mettant en oeuvre de telles cellules, à un capteur comportant un tel détecteur et à un spectroscopie comportant un tel capteur.

10 Il est connu de réaliser le comptage de photons appartenant à la bande des rayons X, c'est-à-dire la détection des photons X individuels, mettant en oeuvre une jonction de deux électrodes supraconductrices en niobium superposées, séparées par une barrière en Al-Al O_x-Al. Ces dispositifs décrits dans N. Rando, A. Peacock, A. van Dordrecht, C. Foden, R. Engelhardt, B.G. Taylor, P. Garé, J. Lumley et C. Pereira, Nucl. Instr. Meth. in
15 Phys. Res. A 313 (1992) 173, ont un rendement quantique faible compris entre 5 et 25 %. Ces dispositifs ne sont pas du tout sensibles aux photons de plus basse énergie individuels, comme par exemple les photons visibles ou ultraviolets.

20 La structure de tels dispositifs sera brièvement décrite en référence à la figure 1.

D'autre part, le comptage de photons visibles ou ultraviolets a été réalisé avec, par exemple, des amplificateurs de lumière à micro-canaux. Ces dispositifs ont un rendement quantique faible et ne sont, de plus, efficaces que dans des bandes passantes relativement étroites.

25 Les dispositifs de bandage de photons à amplificateur de lumière ont une faible résolution temporelle et ne présentent aucune résolution spectrale.

M. Kurakado, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A 314 (1992) 252 et Journal of Applied Physics, vol.59, no.11, p. 3807-14 décrivent un
30 détecteur optique analogique à supraconducteur. Contrairement au dispositif de comptage de photons, un détecteur analogique permet de mesurer les effets résultant des interactions collectives entre la partie sensible du détecteur et un grand nombre de photons optiques.

35 Ce type de détecteur ne peut donc avoir aucune résolution temporelle quant à l'arrivée des divers photons individuels. De même, il est impossible de connaître l'énergie de chaque photon (pas de résolution spectrale).

C'est par conséquent un but de la présente invention d'offrir une cellule de comptage de photons dans une large bande et notamment dans une bande s'étendant du rouge à l'ultraviolet.

5 C'est également un but de la présente invention d'offrir une cellule de comptage de photons présentant une grande efficacité quantique.

C'est aussi un but de la présente invention d'offrir une cellule de comptage de photons présentant une grande résolution temporelle.

10 C'est également un but de la présente invention d'offrir une cellule de comptage de photons présentant une résolution spectrale.

C'est aussi un but de la présente invention d'offrir un détecteur comportant au moins une, de préférence une pluralité de telles cellules.

C'est également un but de la présente invention d'offrir un tel détecteur comportant une matrice de telles cellules présentant une résolution spatiale.

15 C'est aussi un but de la présente invention d'offrir un capteur comportant un tel détecteur présentant un rapport signal/bruit élevé.

C'est également un but de la présente invention d'offrir un spectroscope très sensible comportant un tel capteur.

20 C'est aussi un but de la présente invention d'offrir un interféromètre sensible permettant de recueillir des données précises sur des corps célestes, la précision des données recueillies n'étant pas perturbée par l'agitation des couches de l'atmosphère (détection cohérente en deux points distants).

25 Ces buts seront atteints en mettant en oeuvre une cellule de détection comportant un élément sensible supraconducteur dont la surface est importante par rapport à la surface d'une ou, avantageusement, des jonction(s) de détection à effet tunnel.

30 Avantageusement, des canaux supraconducteurs, ayant une bande interdite de 2Δ , moins large que celle de l'élément sensible, canalisent des quasi particules à détecter vers les jonctions de détection.

35 L'invention a principalement pour objet une cellule de détection de photons comportant un élément supraconducteur notamment en niobium sensible aux photons du rayonnement à détecter ou à des phonons engendrés par un tel photon, notamment par séparation des paires de Cooper en quasi particules et une jonction supraconductrice à effet tunnel comprenant une électrode supraconductrice, caractérisée en ce qu'elle est délimitée par

une pluralité de jonctions supraconductrices à effet tunnel espacées, réparties à la périphérie de la cellule.

L'invention a également pour objet une cellule, caractérisée en ce qu'elle comporte à la périphérie, des parois aboutissant aux jonctions supraconductrices à effet tunnel, en un matériau supraconducteur, notamment en Al, dont la largeur de la bande interdite du spectre d'excitation $2 \Delta_2$ est inférieure à la largeur $2 \Delta_1$ de la bande interdite du spectre d'excitation du matériau de l'élément sensible, de façon à ce que lesdites parois forment des canaux pour canaliser les quasi particules vers les jonctions supraconductrices à effet tunnel et que le nombre de quasi particules augmente après le passage d'une quasi particule de l'élément sensible dans une paroi.

L'invention a également pour objet une cellule, caractérisée en ce que les parois comportent des discontinuités, de préférence à mi-distance entre deux jonctions supraconductrices à effet tunnel adjacentes.

L'invention a également pour objet une cellule, caractérisée en ce que l'élément sensible a une faible épaisseur et est déposé sur un substrat transparent au rayonnement électromagnétique à capter.

L'invention a également pour objet une cellule, caractérisée en ce qu'elle comporte une couche de faible épaisseur absorbant le rayonnement à capter, ladite couche étant disposée entre le support et l'élément sensible.

L'invention a également pour objet un détecteur, caractérisé en ce qu'il comporte une pluralité de cellules selon l'invention, notamment un détecteur linéaire comportant des cellules alignées selon un axe ou un détecteur matriciel comportant des cellules alignées selon des lignes et des colonnes.

L'invention a également pour objet un capteur comportant une cellule, ou un détecteur, caractérisé en ce qu'il comporte un amplificateur à faible bruit connecté à chaque jonction supraconductrice à effet tunnel pour amplifier le courant des quasi particules passant par effet tunnel à travers la jonction.

L'invention a également pour objet un capteur, caractérisé en ce qu'il comporte des convertisseurs analogiques numériques assurant la numérisation des signaux délivrés par les amplificateurs et des moyens de traitement et/ou de stockage du signal numérisé.

L'invention a également pour objet un capteur, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de codage délivrant pour chaque valeur numérique l'intensité du signal délivré par un amplificateur, une information concernant la position de la jonction supraconductrice à effet tunnel
5 concernée, le temps de réception et la valeur de l'intensité de courant amplifiée.

L'invention a également pour objet un spectroscope, caractérisé en ce qu'il comporte un capteur selon l'invention.

L'invention sera mieux comprise au moyen de la description
10 ci-après et des figures annexées données comme des exemples non limitatifs, et sur lesquelles :

- la figure 1 est une coupe verticale d'un détecteur de type connu ;
- les figures 2 à 6 sont des schémas illustrant, de façon
15 intuitive, les interactions intervenant dans le dispositif selon la présente invention ;
- la figure 7 est une coupe verticale d'un premier exemple de réalisation d'un détecteur selon la présente invention ;
- la figure 8 est une coupe verticale d'un deuxième exemple
20 de réalisation d'un détecteur selon la présente invention ;
- la figure 9 est une coupe verticale d'un troisième exemple de réalisation d'un détecteur selon la présente invention ;
- la figure 10 est une coupe verticale de l'exemple préféré de
réalisation d'un détecteur selon la présente invention ;
- 25 - la figure 11 est une coupe verticale d'un cinquième exemple de réalisation d'un détecteur selon la présente invention ;
- la figure 12 est une vue en perspective du détecteur de la figure 10 ;
- la figure 13 est un schéma d'un exemple de réalisation d'un
30 capteur selon la présente invention ;
- la figure 14 est un schéma d'un exemple de réalisation d'un spectroscope selon la présente invention ;
- la figure 15 est un schéma d'un exemple de réalisation d'un interféromètre selon la présente invention.

35 Sur les figures 2 à 15, l'on a utilisé les mêmes références pour désigner les mêmes éléments.

Pour des raisons de clarté, sur les figures 7 à 11, l'échelle verticale n'a pas été respectée. Egalement, la séparation entre les jonctions 15 a été donnée à titre d'exemple non limitatif.

5 Nous allons maintenant, en référence à la figure 1, décrire brièvement la structure d'un capteur de type connu, en référence aux figures 2 à 6, indiquer intuitivement les interactions mises en oeuvre dans le dispositif selon la présente invention, en référence aux figures 7 à 12, et décrire des exemples de structures susceptibles d'être mises en oeuvre dans le détecteur selon la présente invention. Nous allons expliquer la théorie du
10 fonctionnement du dispositif selon la présente invention, et en référence aux figures 13 à 15, donner des exemples d'application du dispositif selon la présente invention.

Sur la figure 1, l'on peut voir un détecteur de type connu comportant une première électrode 2 en niobium épitaxiée sur un support 1 en
15 saphir formant une fenêtre d'entrée transparente aux rayons X. Une barrière 3 constituée par une couche d'aluminium, une couche d'oxyde d'aluminium (AlO_x) et une couche d'aluminium est interposée entre la première électrode 2 et une deuxième électrode 4 réalisée en niobium polycristallin. Une première électrode de connexion 5 en niobium est reliée à la deuxième électrode 4, tout
20 en étant isolée de la première électrode 2 par une couche isolante 6 en AlO_x . Une seconde électrode de connexion 7, en niobium, est reliée à la première électrode 2.

Une jonction supraconductrice à effet tunnel (Superconducting Tunnel Junction ou STJ en terminologie anglo-saxonne) est établie à travers
25 la barrière 3 entre la première électrode 2 et la deuxième électrode 4 sur la majeure partie de la surface du détecteur.

Sur les figures 2 à 6, l'on peut voir, schématisées, quelques interactions intervenant dans un détecteur selon la présente invention. Sur la
30 partie gauche des figures 2 à 6, l'on a illustré les éléments interagissants et dans la partie droite, l'on a illustré le résultat de l'interaction.

La théorie microscopique quantique BCS, due à Bardeen, Cooper et Schrieffer, décrit comment les électrons 7, qui sont des Fermions (spin $1/2$), minimisent leur énergie en s'associant deux à deux pour former des paires de Cooper 8 qui sont des bosons (spin entier). Cet état ordonné résulte
35 de l'existence, dans un supraconducteur, d'une attraction entre électrons, par l'intermédiaire des vibrations du réseau atomique. Cette attraction est

supérieure aux forces de répulsion électrostatiques entre deux électrons de même charge.

Sur la figure 2, l'on peut voir l'interaction entre un photon 9 et une paire de Cooper 8. Lorsque l'énergie du photon 9 est supérieure à la largeur de la bande interdite 2Δ du spectre d'excitation du supraconducteur, il existe une probabilité d'interaction entre le photon 9 et une paire de Cooper dont résulte la génération de deux quasi particules 7' correspondant aux électrons ainsi que des phonons 10 formant les quantum d'énergie du champ de vibration mécanique dus à l'agitation des atomes dans le réseau supraconducteur.

Aux très basses températures, par exemple inférieures à $0,1 T_C$ (T_C étant la température critique du supraconducteur), la probabilité de rencontrer un phonon 10 d'énergie égale ou supérieure à 2Δ est quasiment nulle. Ainsi, l'on peut dire que tous les phonons ayant une énergie supérieure ou égale à 2Δ proviennent de l'interaction entre le photon 9 et une paire de Cooper 8 (correspond donc à la détection de l'arrivée d'un photon).

Les phonons dont l'énergie est inférieure à 2Δ , provenant directement de l'interaction entre les photons 9 et la paire de Cooper 8 ou obtenus par relaxation, ne participent pas à la détection de photons individuels, objets de la présente invention. Par contre, comme l'on peut le voir sur la figure 3, un phonon 10 d'énergie supérieure ou égale à 2Δ peut briser une paire de Cooper 8 pour générer deux électrons 7' ainsi que d'autres phonons 10 de plus basse énergie. L'on assiste ainsi à une génération et à une propagation des quasi particules 7' qui, d'une part, augmentent le rendement quantique du détecteur selon l'invention (probabilité de détecter un photon 9 qui a interagi avec une paire de Cooper) ; d'autre part, l'on peut déduire l'énergie du photon incident 9 à partir du nombre de quasi particules 7' qui ont traversé par effet du tunnel la ou les jonction(s) supraconductrice(s).

Sur la figure 4, l'on peut voir l'interaction entre un photon 9 et la matière 11, par exemple avec le réseau supraconducteur ou avec une couche absorbante déposée à sa surface, notamment une couche de cuivre. L'absorption du photon 9 par la matière 11 conduit à l'apparition de phonons 10 qui vont pouvoir briser les paires de Cooper 8 selon les schémas illustrés sur la figure 3.

Comme l'on peut le voir sur la figure 5, la relaxation d'un phonon 10 de plus haute énergie peut déboucher sur la génération de

phonons 10 de plus basse énergie. Il est à noter que les phonons 10, dont l'énergie est inférieure à la largeur 2Δ de la bande interdite du spectre d'excitation du réseau supraconducteur, ne peuvent pas briser les paires de Cooper 8.

5 Sur la figure 6, l'on peut voir le passage d'une quasi particule 7' entre un premier supraconducteur 12, par exemple du niobium, ayant une première largeur de bande interdite $2 \Delta_1$, vers un second matériau supraconducteur 13, par exemple de l'aluminium ayant une seconde largeur $2 \Delta_2$ de la bande interdite du spectre d'excitation, inférieure à $2 \Delta_1$. Le
10 passage de la quasi particule 7' entre les milieux 12 et les milieux 13 génère un phonon 10 qui, par le mécanisme illustré sur la figure 3, va générer d'autres quasi particules 7' en brisant d'autres paires de Cooper 8. Par exemple, le passage du niobium, dont Δ est égal à 1,5 meV (1 eV est égal à $1,602 \cdot 10^{-19}$ J), vers l'aluminium, dont Δ est égal à 0,3 meV, correspond à la
15 multiplication du nombre des quasi particules 7' par un facteur égal à 4,5.

Sur les figures 7 à 11, l'on peut voir divers exemples de réalisation de structure de cellules ou de détecteurs selon la présente invention.

20 Sur la figure 7, l'on peut voir un élément sensible supraconducteur 14 dans lequel des cellules spatiales ont été définies par des jonctions supraconductrices à effet tunnel 15 comprenant une barrière isolante de faible épaisseur 16 et une électrode supraconductrice 17. Dans cet exemple de réalisation, l'élément sensible 14 a une épaisseur et une rigidité suffisantes pour constituer la structure mécanique de cellules et/ou du
25 détecteur ou repose sur un substrat situé sur la face arrière du détecteur (non représenté). L'élément sensible peut donner un support soit au-dessus, soit en-dessous des jonctions.

30 Au contraire, dans l'exemple illustré sur la figure 8 l'élément sensible 14 a été déposé sur un substrat 18 rigide transparent au rayonnement de la bande de fréquence dans laquelle l'on veut pouvoir détecter les photons. Le substrat 18 doit être compatible avec les matériaux de l'élément 14 y compris aux très basses températures nécessaires à l'établissement de la supraconductivité.

35 Dans le cas de l'élément sensible en niobium, l'on peut, par exemple, utiliser du saphir pour la détection des photons visibles. L'on peut

mettre en oeuvre un support 18 en saphir tandis que pour une détection devant s'étendre dans l'ultra-violet, l'on met en oeuvre du MgF_2 .

Sur la figure 9, qui se réfère à un grand espacement des jonctions, l'on peut voir un détecteur selon la présente invention comportant des parois 19 matérialisant la limite entre les cellules de détection et formant des canaux canalisant les quasi particules 7' vers les jonctions supraconductrices à effet tunnel 15. Pour favoriser la multiplication des quasi particules 7' et empêcher leurs migrations vers l'élément sensible 14, comme illustré sur la figure 6, les parois 19 sont réalisées dans un matériau supraconducteur dont la largeur de la bande interdite du spectre d'excitation est plus faible que la largeur de la bande interdite de l'élément supraconducteur sensible 14.

Dans le cas où l'élément sensible 14 est réalisé en niobium, les parois 19 sont avantageusement réalisées en aluminium.

Sur la figure 10, l'on peut voir l'exemple préféré de réalisation du dispositif selon la présente invention comportant une structure de la figure 9 qui a été déposée sur un substrat 18.

Sur la figure 11, l'on peut voir une structure comportant, entre le substrat 18 et l'élément sensible 14, une couche absorbante réalisée, par exemple, en cuivre. La couche de cuivre assure la thermalisation de photons 9, c'est-à-dire leur absorption et leur conversion en phonons 10 selon le principe illustré sur la figure 4.

Le dispositif de la figure 11 présente une résolution temporelle très élevée.

La cellule de détection et le détecteur selon la présente invention ont une efficacité quantique proche de 1 lorsqu'un photon est absorbé par l'élément sensible 14 ou par la couche absorbante 20. Lorsqu'un photon est absorbé par une paroi 19, l'efficacité quantique est toujours proche de 1, mais l'on aura une quantité plus élevée de quasi particules, et la réponse est limitée à une seule jonction.

Sur la figure 12, l'on peut voir, en perspective, l'exemple préféré de réalisation d'un détecteur selon la présente invention comportant une matrice de cellules carrées 21. Il est bien entendu que d'autres formes de cellules 21, comme par exemple des cellules triangulaires, hexagonales ou circulaires, ne sortent pas du cadre de la présente invention. De même, sans sortir du cadre de la présente invention, il est possible de réaliser un détecteur

ne comportant qu'une unique cellule comprenant une ou plusieurs jonction(s) supraconductrice(s) à effet tunnel.

Dans l'exemple de réalisation de la figure 12, chaque cellule 21 est délimitée par quatre jonctions supraconductrices à effet tunnel 15 et par quatre parois 19 aboutissant aux jonctions 15 et disposées en carré. Avantageusement, un intervalle 22 équidistant de deux jonctions 15 adjacentes est ménagé dans chaque paroi 19. Ainsi, une quasi particule pénétrant dans une paroi 19 est canalisée vers la jonction supraconductrice à effet tunnel la plus proche. La présence des parois 19 en aluminium permet, d'autre part, d'améliorer la résolution temporelle en limitant le temps compris entre l'absorption du photon et la détection du signal par un confinement des quasi particules, et donc une limitation du trajet de propagation des quasi particules.

La jonction 15 supraconductrice à effet tunnel est mitoyenne entre quatre cellules 21, alors qu'une paroi 19 est mitoyenne entre deux cellules 21.

Chaque jonction supraconductrice à effet tunnel 15 est connectée à un amplificateur à faible bruit pour amplifier le courant des quasi particules 7' passant par effet tunnel.

Dans une variante de réalisation, les amplificateurs sont directement diffusés dans une tranche de semi-conducteurs avec le même pas que les jonctions supraconductrices à effet tunnel 15, la tranche de semi-conducteurs étant mise en contact avec les jonctions supraconductrices à effet tunnel 15 de la structure de la figure 12.

Sur la figure 13, l'on peut voir un exemple de réalisation d'un capteur selon la présente invention comportant quatre cellules de détection 2111, 2112, 2121 et 2122. La cellule 2111 est délimitée par des jonctions supraconductrices à effet tunnel 1511, 1512, 1521 et 1522. La cellule de détection 2112 est délimitée par les jonctions supraconductrices à effet tunnel 1512, 1513, 1522 et 1523. La cellule de détection 2121 est délimitée par les jonctions supraconductrices à effet tunnel 1521, 1522, 1531 et 1532. La cellule de détection 2122 est délimitée par les jonctions supraconductrices à effet tunnel 1522, 1523, 1532 et 1533.

A chaque jonction supraconductrice à effet tunnel sont connectés, en série, un amplificateur à faible bruit 23, un convertisseur

analogique numérique 24 et des moyens 25 de codage et/ou de traitement de l'information.

Avantageusement, un comparateur à seuil 26 est interposé entre la sortie des convertisseurs analogiques numériques 24 et l'entrée des
5 moyens 25 de codage et/ou de traitement de l'information. Les moyens 25 comportent, avantageusement, un dispositif 27 de codage assurant l'association, à chaque signal de détection d'une valeur i de l'intensité ou de l'énergie proportionnelle au nombre des quasi particules détectées, le temps
10 de détection t et le numéro ou les coordonnées de la jonction supraconductrice à effet tunnel concernée. Les données codées sont transmises à une unité arithmétique et logique 28 pour le stockage dans une mémoire de masse 29 et/ou pour le traitement en ligne ou en différé, l'affichage des résultats sur un dispositif de visualisation 30, l'impression sur une imprimante 31 ou la transmission par une ligne de communication 32 à un
15 dispositif non représenté.

Dans une première variante de réalisation non illustrée, un dispositif de codage 27 est associé à chaque jonction supraconductrice à effet tunnel. Dans un tel cas, il est avantageux de connecter l'ensemble des dispositifs de codage 27 à une unité arithmétique et logique 28 par
20 l'intermédiaire d'un multiplexeur.

Dans une deuxième variante de réalisation illustrée sur la figure 13, les sorties des comparateurs à seuil 26 sont reliées par l'intermédiaire d'un multiplexeur 33 à un unique dispositif de codage 27.

Une horloge 34 de très grande précision assure la
25 synchronisation de l'échantillonnage et de la conversion du multiplexage et du codage.

Une interaction entre une cellule de détection, par exemple avec la cellule de détection 2111, génère un certain nombre de quasi particules, typiquement plusieurs milliers, dont une partie importante atteint les
30 quatre jonctions supraconductrices à effet tunnel 1511, 1512, 1521 et 1522. Les quasi particules passent par effet tunnel à travers ces jonctions pour fournir un signal qui est amplifié par les amplificateurs faible bruit 23 correspondants. A la sortie des amplificateurs 23 correspondant aux jonctions supraconductrices de la cellule 2111, l'on obtient un signal qui est une fonction
35 univoque du nombre de quasi particules détectées. A la sortie des autres amplificateurs 23, l'on retrouve un signal provenant, d'une part, des quasi

particules libres présentes dans le matériau, de très faibles à très basses températures, et d'autre part, constituant le bruit électronique de l'amplificateur 23. Au cas où la distance entre les jonctions est réduite, l'on pourrait faire la détection directement au niveau de ces jonctions.

5 Les signaux délivrés par les amplificateurs 23 sont échantillonnés et numérisés. Les comparateurs à seuil 26 éliminent les signaux trop faibles correspondant uniquement au bruit électronique des amplificateurs 23 et à la détection de paires de Cooper brisées, indépendamment de l'absorption d'un photon. Seuls les signaux
10 correspondant aux jonctions supraconductrices à effet tunnel 1511, 1512, 1521 et 1522 sont transmis par l'intermédiaire du multiplexeur 33 au dispositif de codage 27. Le dispositif de codage 27 génère quatre données, chacune comportant une identification de la jonction supraconductrice, le temps de détection et l'intensité du courant détecté. L'unité arithmétique et logique 28
15 détermine, à partir des coordonnées des jonctions supraconductrices à effet tunnel ayant transmis un signal, quelle(s) est(sont) la ou les cellule(s) de détection qui a(ont) interagi avec un photon incident. Elle effectue la sommation des intensités du signal reçu correspondant à la détection d'un même photon, par exemple l'on additionne les intensités des signaux
20 transmises à un temps t_0 par les jonctions supraconductrices à effet tunnel 1511, 1512, 1521 et 1522. L'unité arithmétique et logique en déduit les coordonnées spatiales de l'interaction entre les photons et le détecteur, le temps de l'interaction et l'énergie (et donc la longueur d'onde) du photon incident. Les résultats sont transmis, affichés et/ou stockés.
25 Avantageusement, l'unité arithmétique et logique 28 effectue un traitement statistique permettant de présenter les données recueillies dans un intervalle de temps donné.

Dans une variante de réalisation à très haute résolution spatiale, l'unité arithmétique et logique 28 tient compte de l'intensité du
30 courant à chaque jonction supraconductrice à effet tunnel pour déterminer par interpolation les coordonnées du point d'incidence à l'intérieur de la cellule ayant détecté le photon.

La détection simultanée de plusieurs photons est
35 extrêmement rare, dans le cas d'un dispositif ayant une très bonne résolution temporelle et pour des sources de lumière faibles, notamment lors du traitement de rayonnements visibles ou ultraviolets provenant de corps

célestes de faible magnitude. Dans le cas où cette détection est opérée par deux cellules non adjacentes, c'est-à-dire des cellules ne comportant pas de jonctions supraconductrices à effet tunnel communes, le traitement normal n'est pas perturbé.

5 Il est bien entendu que l'invention n'est nullement limitée à l'utilisation du niobium pour les éléments sensibles 14 et de l'aluminium pour les parois 19. Il est bien entendu que la présente invention n'est nullement limitée à la mise en oeuvre d'aluminium et de niobium, par exemple la mise en oeuvre de l'élément sensible en Sn permet d'obtenir plus de 3000 quasi
10 particules pour l'absorption d'un photon de 3 eV avec une résolution spectrale sensiblement égale à 8 nm. Nous allons donner ci-après quelques éléments permettant de calculer les performances de la cellule de détection ou du détecteur selon la présente invention, en fonction des matériaux supraconducteurs mis en oeuvre.

15 Dans les supraconducteurs, la présence de paires de Cooper 8 représente l'état fondamental, alors que la présence des quasi particules 7' correspondant à l'état excité. Le nombre de quasi particules 7' à une température T exprimée en K est proportionnel à $\exp(-\Delta/KT)$, K étant la constante de Boltzmann. A faible température, le nombre de quasi particules
20 7' est extrêmement faible par rapport au nombre de quasi particules générées lors de l'interaction d'une cellule avec un photon. Comme indiqué sur les figures 2, 3 et 5, la population des quasi particules 7' dépend de la population et de l'énergie des phonons 10. Dans la mesure où la bande interdite du spectre d'excitation 2Δ est inférieure à $\hbar \omega_D$, $\hbar \omega_D$ étant l'énergie de Debye.
25 Les phonons 10 peuvent dans un système en relaxation (et non pas en équilibre) avoir une énergie suffisante pour participer au passage entre une paire de Cooper 8 et deux quasi particules 7'. La population des phonons 10 dont l'énergie $\hbar \omega$ est supérieure à la bande interdite est couplée à la population des quasi particules. Les phonons de haute énergie sont produits
30 durant l'absorption d'un photon (figure 2) et durant la relaxation de quasi particules 7' de haute énergie. Les phonons, dont l'énergie est inférieure à la bande interdite, sont notamment produits lors de la recombinaison de deux quasi particules 7' en une paire de Cooper.

35 Soit τ_C , le temps de confinement des quasi particules dans un film supraconducteur.

τ_C est donné par :

$$\tau_c = e^2 N_{Ef} R_{nn} V \quad (1)$$

5 où e est la charge de l'électron,
 N_{Ef} est la densité des états à l'énergie de Fermi,
 R_{nn} est la résistance électrique normale de la barrière
isolante de la jonction supraconductrice à effet tunnel qui donne une indication
sur la probabilité du passage des quasi particules par effet tunnel, et
10 V est le volume du film supraconducteur.
 $1/\tau_C$ donne la fréquence de passages par effet tunnel des
quasi particules.

Dans la mesure où R_{nn} est proportionnel à $\exp(2b/A)$, b étant
l'épaisseur de la barrière isolante et A étant la surface de la jonction
15 supraconductrice à effet tunnel, τ_C dépend principalement du supraconducteur
mis en oeuvre, de son épaisseur et de l'épaisseur de l'isolant mais est
indépendant de la température T .

Soit T_C , la température critique du supraconducteur et T_0 une
température inférieure au dixième de T_C . Le nombre de quasi particules à la
20 température T_0 est proportionnel à $\exp(-\Delta(0)/kT_0)$, $\Delta(0)$ étant la moitié de la
bande interdite à la température de zéro absolu. L'absorption d'un photon
conduit à une augmentation de la population des quasi particules n' qui peut
être associée à une population équivalente à une population $N(T^*)$ à une
température T^* correspondant à la température effective des quasi particules.
25 La relaxation dépend donc de T^* qui change avec l'évolution de la population.
Le temps de recombinaison à faible température est donné par la formule de :

$$\tau_r(T^*) \simeq \tau_0 \left[\pi^{1/2} \left(\frac{2\Delta(0)}{kT_c} \right)^{5/2} \left(\frac{T^*}{T_c} \right)^{1/2} \exp - \left(\frac{\Delta(0)}{kT^*} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

30

où τ_0 est le temps de confinement à la température de zéro
absolu. Dans la mesure où τ_r est une fonction de la densité des quasi
particules, la relation entre l'énergie du photon absorbé et le nombre des quasi
35 particules n'est pas linéaire.

Le temps de passage d'une paire de Cooper τ_b en deux quasi particules $7'$ (figure 3), en tenant compte des recombinaisons possibles, est donné par la formule :

$$\tau_b(T^*) = \tau_{ph} \frac{\Delta(0)}{\Delta(T^*)} \frac{1}{(1 - 2f(\Delta(T^*)))} \quad (3)$$

où $f(\Delta(T))$ est la fonction de Fermi et le τ_{ph} est une constante. La diminution de la probabilité d'interaction avec la température est due au fait qu'aux températures plus élevées, il y a moins de paires de Cooper susceptibles d'être brisées.

Il est à noter que les phonons sont perdus en sortant des cellules supraconductrices. Ces pertes dépendent de la géométrie de la cellule de détection, des épaisseurs des films mis en jeu, de la taille des électrodes de connexion et des couplages acoustiques entre les divers éléments de la cellule de détection.

D'une manière générale, la relaxation d'un supraconducteur avec couplage des phonons et de la population des quasi particules est décrite dans S.B. Kaplan, C.C. Chi, D.N. Langenberg, J.J. Chang, S. Jafarey et D.J. Scalapino, Phys. Rev. B 14 (1976) 4854 et J.-J. Chang et D.J. Scalapino, Phys. Rev. B 15 (1977) 2651 et peut être décrite dans le système de deux équations couplées :

$$\begin{aligned} \frac{dN_{qp}}{dt} &= -\frac{N_{qp}}{\tau_c} - \frac{N_{qp}}{\tau_r(T^*)} + \frac{2N_{ph}}{\tau_b(T^*)} - \frac{N_{qp}}{\tau_d} \\ \frac{dN_{ph}}{dt} &= -\frac{N_{ph}}{\tau_b(T^*)} + \frac{N_{qp}}{2\tau_r(T^*)} - \frac{N_{ph}}{\tau_l} \end{aligned} \quad (4)$$

où N_{qp} est la densité des quasi particules,
 N_{ph} est la densité des phonons,
 τ_c est le temps de confinement des quasi particules,
 τ_r est le temps de recombinaison,
 τ_d est le temps de diffusion,
 τ_l est un temps caractéristique de la perte de phonons,
 τ_b est un temps caractéristique de la cassure d'une paire de Cooper.

Le courant I par effet tunnel est donné par la formule :

$$I = \frac{N_{qp}(T^*)(eV_b + \Delta)}{2N_E e R_{nn} ((eV_b + \Delta)^2 - \Delta^2)^{1/2}} \quad (5)$$

5

où V_b est la tension de polarisation,
 $0 < eV_b < 2 \Delta$.

Suite à l'absorption d'un photon, le nombre moyen N_0 de
 10 l'excès de porteurs de charges créés dans le supraconducteur est donné par :

$$N_0 = E/\epsilon \quad (6)$$

15 où $E = hv$ est l'énergie du photon incident et ϵ l'énergie
 moyenne nécessaire pour créer un porteur de charges. La résolution spectrale
 du détecteur, définie comme la largeur de la distribution de l'énergie captée
 provenant d'un rayonnement monochromatique à mi-hauteur par rapport à
 l'énergie maximale, est donnée par :

20

$$\Delta E = 2.35\sqrt{FE\epsilon} \quad (7)$$

où F est le facteur de Fano défini par :

25

$$\text{Var}(N_0) = FN_0. \quad (7')$$

Une solution approchée de l'équation 4 est donnée par :

30

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\tau_c^{-1}}{\tau_c^{-1} + \langle \tau_r^{-1} \rangle + \tau_d^{-1}} \quad (8)$$

35 où $\langle \tau^{-1} \rangle$ est une valeur moyenne dans le temps du temps de
 recombinaison réelle des paires de Cooper à partir des quasi particules 7'.

Exemple de réalisation : éléments photosensibles en niobium ayant une surface comprise entre 150 et 400 μm^2 , une épaisseur comprise entre 50 et 300 nm, τ_c compris entre 60 et 5000 ns (τ_c égal à 60 ns pour la plus faible valeur de la résistance $R_{\eta\eta}$ égale à 0,6 Ω) et le volume étant égal à 5 20 μm^3 . Il est probable que τ_c pourra être réduit à 10 ns par une réduction de la taille de la jonction. τ_c peut encore être réduit d'un facteur 2,5 qui correspond au rapport de valeur de N_{E_f} de Nb par rapport à Al. Dans du niobium massif à une température inférieure à 2 Kelvin, ϵ peut être estimé à 1,747 Δ et F à 0,22. L'on en tire que l'on peut espérer générer 1100 quasi 10 particules γ' pour un photon d'énergie égal à 3 eV. Il est à noter qu'il n'est pas du tout avantageux d'augmenter la surface ou l'épaisseur de l'élément sensible 14. Bien que cette augmentation conduise à une sensibilité plus élevée (probabilité d'interaction entre la matière et le rayonnement incident plus élevée), elle augmente la capacité, ce qui dégrade la résolution spectrale 15 tandis qu'une augmentation de l'épaisseur diminue l'intensité du courant pour un nombre de quasi particules donné. Dans la mesure où, pour des photons visibles ou des ultraviolets, la densité de charges générée dans le supraconducteur est faible et donc n'augmente que faiblement la probabilité de recombinaison des quasi particules γ' en paire de Cooper, il semble 20 particulièrement avantageux de recourir à des détecteurs matriciels comportant des cellules de détection de faible surface. La Demanderesse envisage la réalisation de cellules de 3 μm sur 3 μm et de 0,01 μm d'épaisseur.

Le rapport signal/bruit peut être amélioré en éliminant les 25 signaux dont l'évolution temporelle ne correspond pas à un signal provenant de l'absorption d'un photon.

Pour une telle épaisseur, il peut s'avérer avantageux d'utiliser une couche absorbante convertissant l'énergie d'un photon incident en phonons de haute énergie (figures 4 et 11).

30 La résolution énergétique peut être estimée à 0,1 eV correspondant à une résolution spectrale de 13 nm à 400 nm, dans le cas du niobium.

La résolution spatiale dépend de la taille des cellules de 35 détection dans le cas de présence des parois 19 et de la diffusion des quasi particules pendant le temps τ en cas d'absence de ces parois. La diffusion des quasi particules à un temps t est une fonction du trajet libre moyen λ_{qp} et de

la vitesse de Fermi v_F . Pour du niobium, l'on peut estimer que pour τ égal à 1 μs , l'on peut avoir une diffusion sur 1 mm. Pour un film mince, la diffusion des quasi particules doit obéir à l'équation de diffusion bidimensionnelle donnée par la formule :

$$5 \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{k} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (9)$$

qui doit satisfaire les conditions limites :

$$10 \quad \begin{aligned} u(0, y, t) = u(l, y, t) = u(x, 0, t) = u(x, l, t) &= 0 & t \geq 0 \\ u(x, y, 0) &= N\delta(x - x_0, y - y_0) & 0 \leq x_0 \leq l, \quad 0 \leq y_0 \leq l \end{aligned} \quad (10)$$

La solution peut être écrite sous la forme :

$$15 \quad \begin{aligned} u(x, y, t) &= N \sum_{r=1}^{\infty} \frac{2}{l} \sin\left(\frac{r\pi x_0}{l}\right) \sin\left(\frac{r\pi x}{l}\right) \exp\left(-\frac{r^2 \pi^2 k t}{l^2}\right) \\ &\times \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2}{l} \sin\left(\frac{s\pi y_0}{l}\right) \sin\left(\frac{s\pi y}{l}\right) \exp\left(-\frac{s^2 \pi^2 k t}{l^2}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

20

et le courant des quasi particules à travers la limite pour $x = x_b$ est donné par :

$$25 \quad \int_{y_1}^{y_2} \int_0^{\infty} \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=x_b} dt dy = \frac{4N}{\pi^2 k} \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{r}{s} \frac{1}{r^2 + s^2} \cos\left(\frac{r\pi x_b}{l}\right) \sin\left(\frac{r\pi x_0}{l}\right) \times \sin\left(\frac{s\pi y_0}{l}\right) \left[-\cos\left(\frac{s\pi y}{l}\right)\right]_{y_1}^{y_2} \quad (12)$$

30

L'on peut déterminer de même le flux de particules à la limite $y = y_b$.

35 L'on peut déterminer, à partir de l'équation 12, les valeurs des flux de particules à travers les limites données.

Cette distribution théorique a été comparée à un modèle de statistique de marche aléatoire, dite statistique de Monte-Carlo, qui montre une divergence de 2 % entre les deux modèles pour $N_0 = 1100$ conduisant à une résolution spatiale de 20 μm pour des jonctions supraconductrices à effet tunnel distantes de 1 mm. Ce calcul correspond à l'hypothèse que toutes les quasi particules γ arrivant à une jonction supraconductrice à effet tunnel sont détectées. Cette hypothèse correspond sensiblement à la vérité dans la mesure où pour les températures mises en oeuvre, l'on obtient une très faible probabilité de recombinaison de paires de Cooper. De même, dans ce calcul de résolution spatiale, l'on a négligé le courant par effet tunnel inverse (du dispositif d'amplification vers les parois 19).

Dans le tableau 1, l'on peut voir les caractéristiques pertinentes de quelques matériaux supraconducteurs à basse température susceptibles d'être mis en oeuvre dans une cellule de détection selon la présente invention.

Matière	T_c (K)	$\Delta(0)$ (meV)	τ_0 (ns)	τ_{ph} (ns)	v_F (10^6 m s^{-1})	N_{E_f} (10^{21} états $\text{eV}^{-1} \text{ cm}^{-3}$)
Nb	9.3	1.525	0.149	0.004	1.37	31.7
Pb	7.2	1.37	0.196	0.034	1.83	8.6
Ta	4.5	0.7	1.78	0.023	—	40.8
Sn	3.7	0.57	2.30	0.110	1.90	8.1
Al	1.2	0.17	438	0.242	2.03	12.2

25

TABLEAU I

Il est bien entendu que ce tableau n'a aucun caractère limitatif et que, notamment, il est possible, sans sortir du cadre de la présente invention, de mettre en oeuvre d'autres matériaux supraconducteurs et notamment des matériaux supraconducteurs dits "à haute température".

L'exemple préféré de réalisation du dispositif selon l'invention met en oeuvre trois matériaux pour, respectivement, l'élément sensible 14, les parois 19 et les jonctions supraconductrices à effet tunnel 15 ayant des largeurs de bande interdite 2Δ de plus en plus réduites pour favoriser le transfert des quasi particules γ .

35

Le dispositif selon la présente invention peut avantageusement être mis en oeuvre dans un spectroscope.

Dans un premier exemple de réalisation d'un spectroscope selon la présente invention, l'on met directement en oeuvre un capteur du type de celui illustré sur la figure 13 comportant avantageusement un important nombre de cellules 21.

La résolution spectrale du dispositif de la figure 13 provient directement de la résolution énergétique du détecteur selon la présente invention.

Sur la figure 14, l'on peut voir un second exemple de réalisation d'un spectroscope selon la présente invention comportant un détecteur 35, avantageusement linéaire, placé derrière un dispositif dispersant, par exemple un réseau de diffraction 36. La sortie des jonctions 15 est connectée de manière analogue à celle du dispositif de la figure 13, à une unité de stockage et/ou de traitement de l'information 25.

Le spectromètre de la figure 14 a une excellente résolution spectrale provenant d'une part de la présence du réseau de diffraction 36 et de la résolution spatiale du détecteur 35 et, d'autre part, de la résolution spectrale de ce détecteur.

Sur la figure 15, l'on peut voir un exemple d'interféromètre selon la présente invention permettant, notamment grâce à l'excellente résolution temporelle des détecteurs selon la présente invention, de recueillir le rayonnement cohérent des corps célestes. Ce rayonnement cohérent correspond à un rayonnement non perturbé par les turbulences atmosphériques (speckle en terminologie anglo-saxonne). Le dispositif comporte deux sous-ensembles 37 identiques comprenant chacun un télescope 38 de faible diamètre à la sortie duquel est placé un capteur selon la présente invention, par exemple le capteur illustré sur la figure 13. Les horloges 34 des sous-ensembles 37 fonctionnent de manière synchrone pendant l'acquisition des données. Ce synchronisme est obtenu soit par une synchronisation des horloges 34 entre elles, ou par une horloge mère, soit par une extrême précision de ces horloges, mettant par exemple en oeuvre des horloges atomiques.

Les sous-ensembles 37 d'un interféromètre de la figure 15 sont placés à une distance pouvant varier entre une centaine de mètres et quelques centaines de kilomètres ou plus. Les télescopes 38 des sous-

ensembles 37 sont pointés avec une très grande précision dans la même direction en site et en gisement. Lors du traitement des données recueillies par les sous-ensembles 37, l'on ne considère que l'information cohérente (interférence constructive) recueillie correspondant à l'information non perturbée par les turbulences atmosphériques.

De même, un capteur selon la présente invention peut être mis à la sortie d'un télescope classique pour permettre l'observation d'un astre de faible ou de très faible magnitude. La mise en oeuvre du dispositif selon la présente invention permet de recueillir des informations complémentaires par rapport au dispositif de type connu tout en réduisant le temps d'exposition, ce qui permet de réaliser plus d'observations avec un même télescope.

Le dispositif selon la présente invention s'applique au comptage de photons, et donc principalement à l'acquisition et au traitement de l'information provenant de sources de rayonnement faibles.

Bien que l'invention s'applique principalement à l'astronomie, elle peut également être mise en oeuvre pour des applications médicales (détection en lumière atténuée, tomographie, etc...), des acquisitions d'images dans l'atmosphère (détection cohérente, photographie, optiques adaptatives), des appareils de vision nocturne ou analogues.

REVENDEICATIONS

- 5 1. Cellule de détection de photons comportant un élément supraconducteur notamment en niobium sensible aux photons (9) du rayonnement à détecter ou à des phonons (10) engendrés par un tel photon (9), notamment par séparation des paires de Cooper (8) en quasi particules (7') et une jonction supraconductrice à effet tunnel (15) comprenant une électrode supraconductrice (17), caractérisée en ce qu'elle est délimitée par une pluralité de jonctions supraconductrices à effet tunnel (15) espacées, réparties à la périphérie de la cellule (21).
- 10 2. Cellule selon la revendication 1, caractérisée en ce qu'elle comporte à la périphérie, des parois (19) aboutissant aux jonctions supraconductrices à effet tunnel (15), en un matériau supraconducteur, notamment en Al, dont la largeur de la bande interdite du spectre d'excitation $2 \Delta_2$ est inférieure à la largeur $2 \Delta_1$ de la bande interdite du spectre d'excitation du matériau de l'élément sensible (14), de façon à ce que lesdites
15 parois (19) forment des canaux pour canaliser les quasi particules (7') vers les jonctions supraconductrices à effet tunnel (15) et que le nombre de quasi particules (7') augmente après le passage d'une quasi particule (7') de l'élément sensible (14) dans une paroi (19).
- 20 3. Cellule selon la revendication 2, caractérisée en ce que les parois (19) comportent des discontinuités (22), de préférence à mi-distance entre deux jonctions supraconductrices à effet tunnel (15) adjacentes.
- 25 4. Cellule selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que l'élément sensible (14) a une faible épaisseur et est déposé sur un substrat (18) transparent au rayonnement électromagnétique à capter.
- 30 5. Cellule selon la revendication 4, caractérisée en ce qu'elle comporte une couche (20) de faible épaisseur absorbant le rayonnement à capter, ladite couche (20) étant disposée entre le support (18) et l'élément sensible (14).
- 35 6. Détecteur, caractérisé en ce qu'il comporte une pluralité de cellules (21) selon l'une quelconque des revendications précédentes, notamment détecteur linéaire comportant des cellules (21) alignées selon un axe ou un détecteur matriciel comportant des cellules (21) alignées selon des lignes et des colonnes.

7. Capteur comportant une cellule selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, ou un détecteur selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'il comporte un amplificateur à faible bruit (23) connecté à chaque jonction supraconductrice à effet tunnel (15) pour amplifier le courant des quasi particules (7') passant par effet tunnel à travers la jonction (15).

8. Capteur selon la revendication 7, caractérisé en ce qu'il comporte des convertisseurs analogiques numériques (24) assurant la numérisation des signaux délivrés par les amplificateurs (23) et des moyens (25) de traitement et/ou de stockage du signal numérisé.

9. Capteur selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de codage (27) délivrant pour chaque valeur numérique l'intensité du signal délivré par un amplificateur (23), une information concernant la position de la jonction supraconductrice à effet tunnel (15) concernée, le temps de réception et la valeur de l'intensité de courant amplifiée.

10. Spectroscopie, caractérisé en ce qu'il comporte un capteur selon la revendication 7, 8 ou 9.

1/5

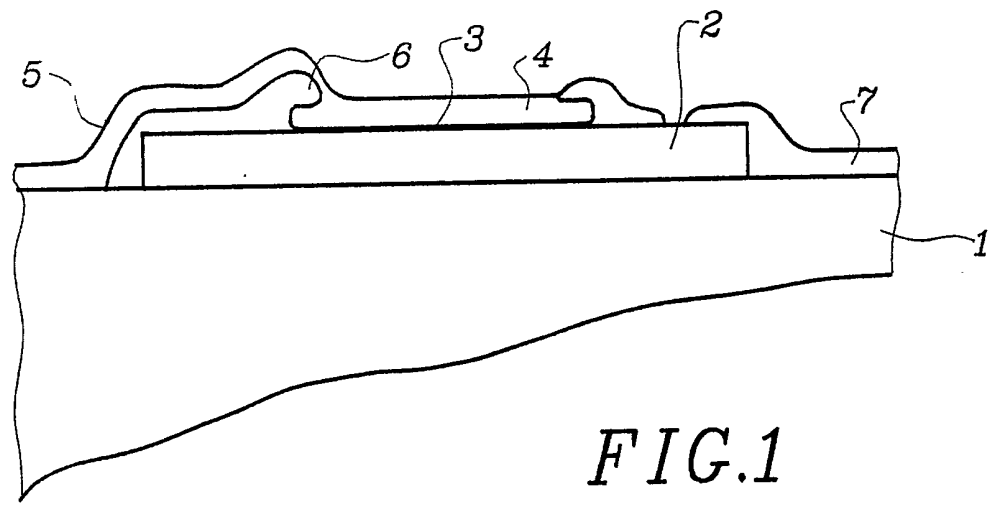


FIG. 1

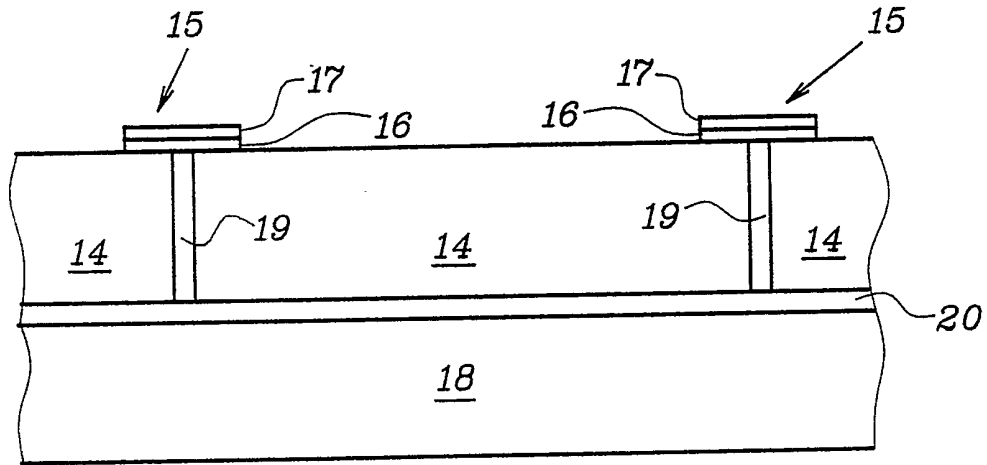


FIG. 11

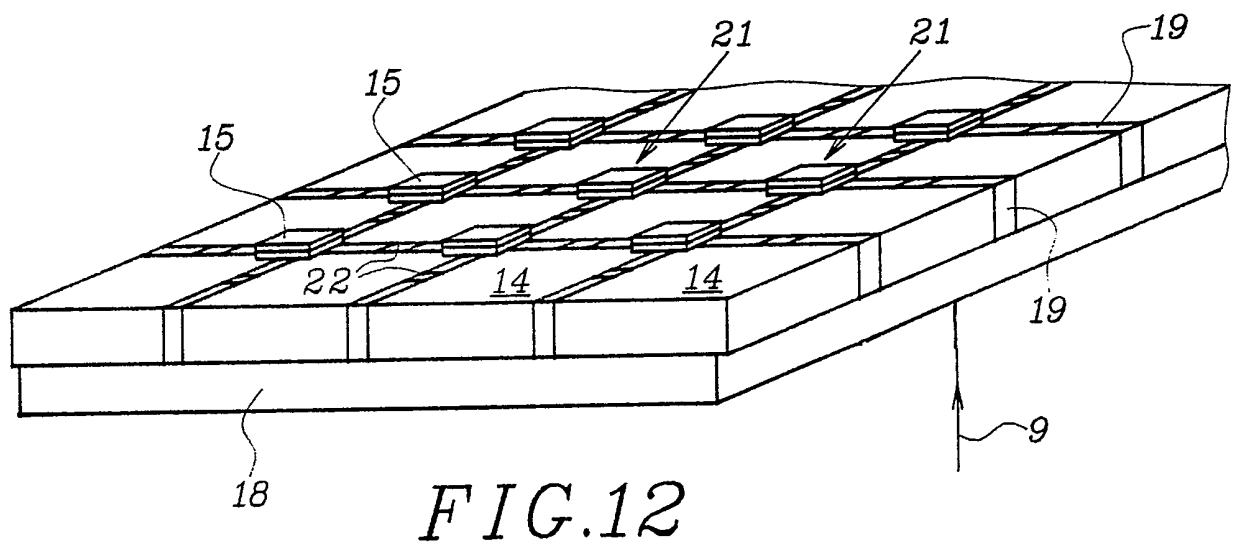
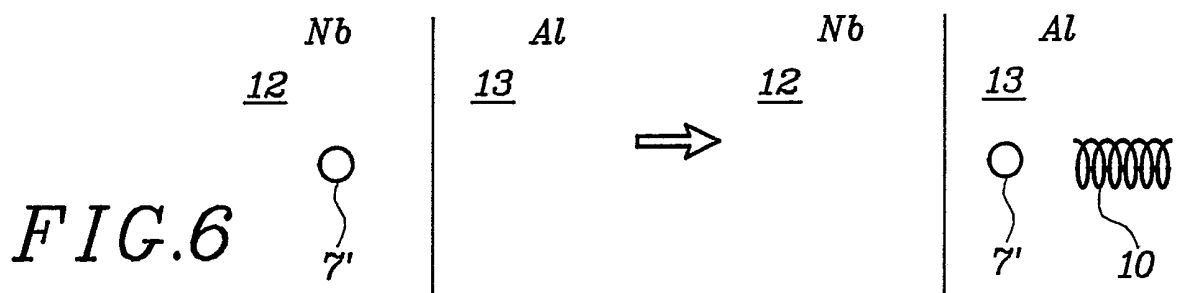
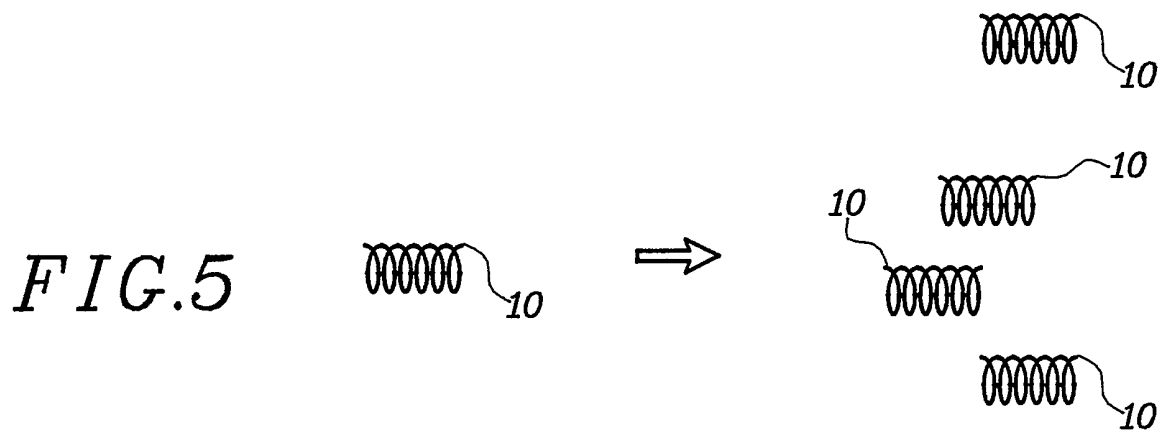
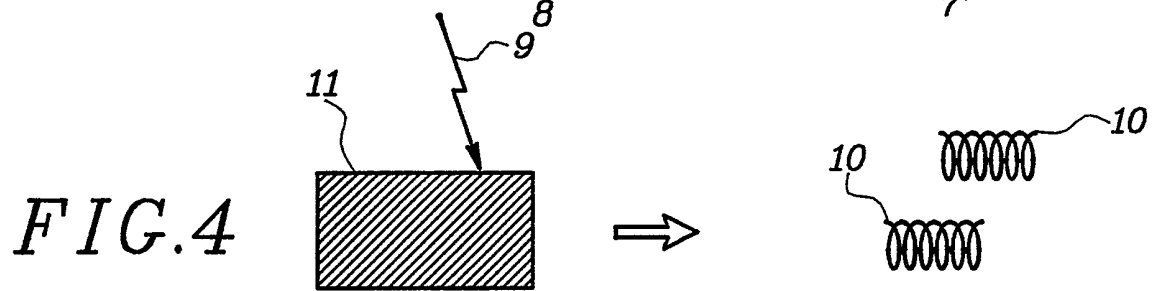
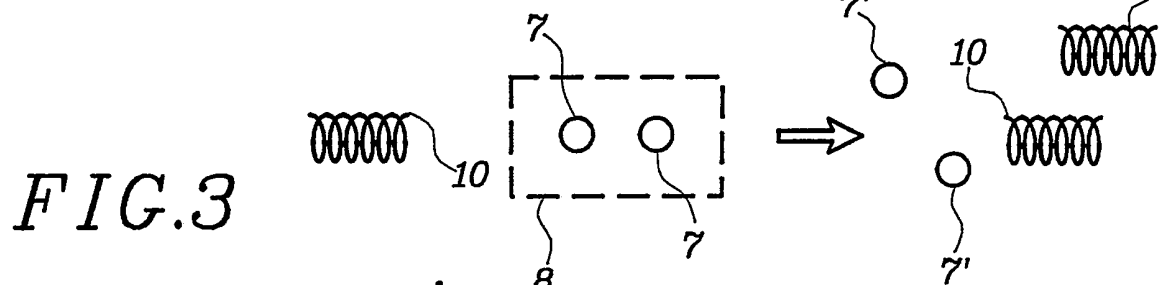
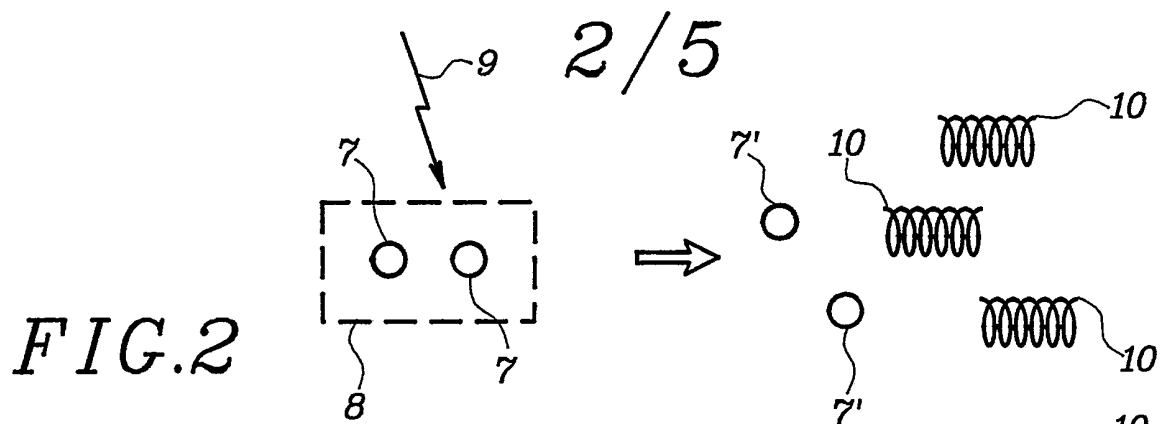


FIG. 12



3/5

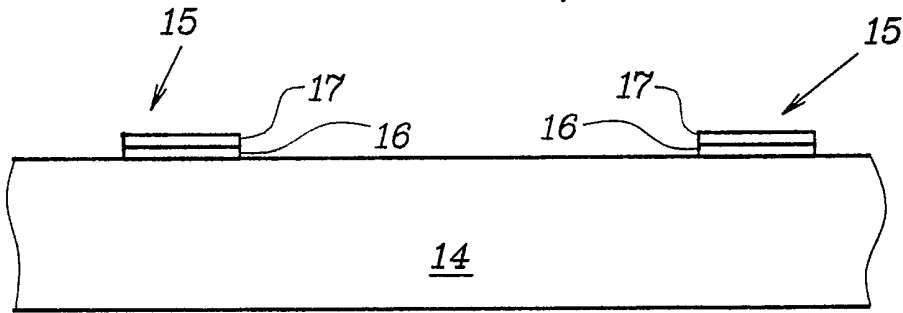


FIG. 7

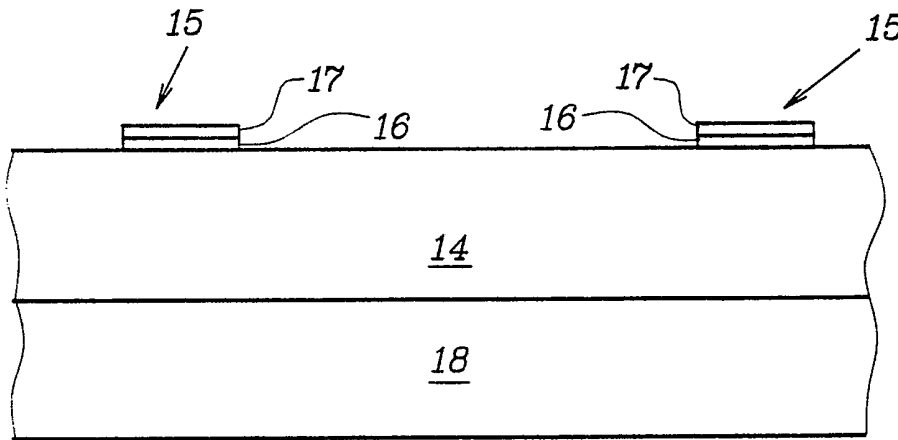


FIG. 8

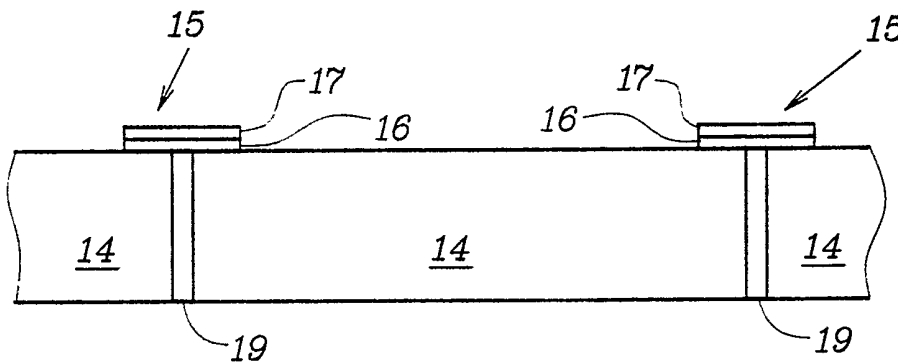


FIG. 9

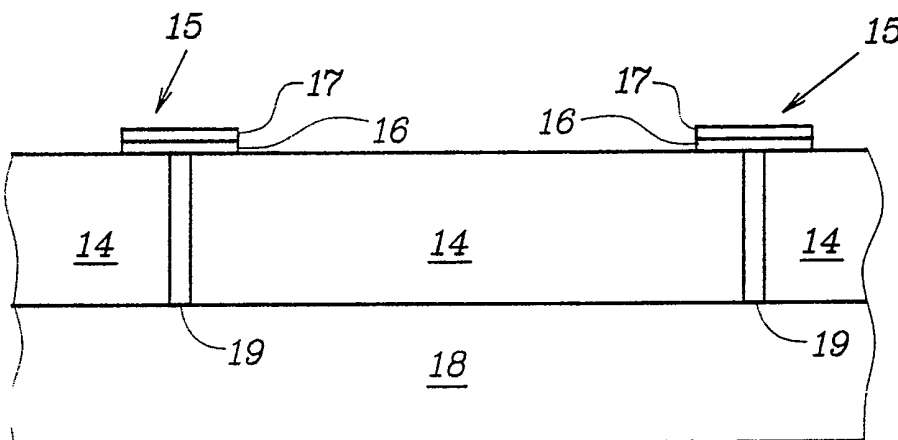


FIG. 10

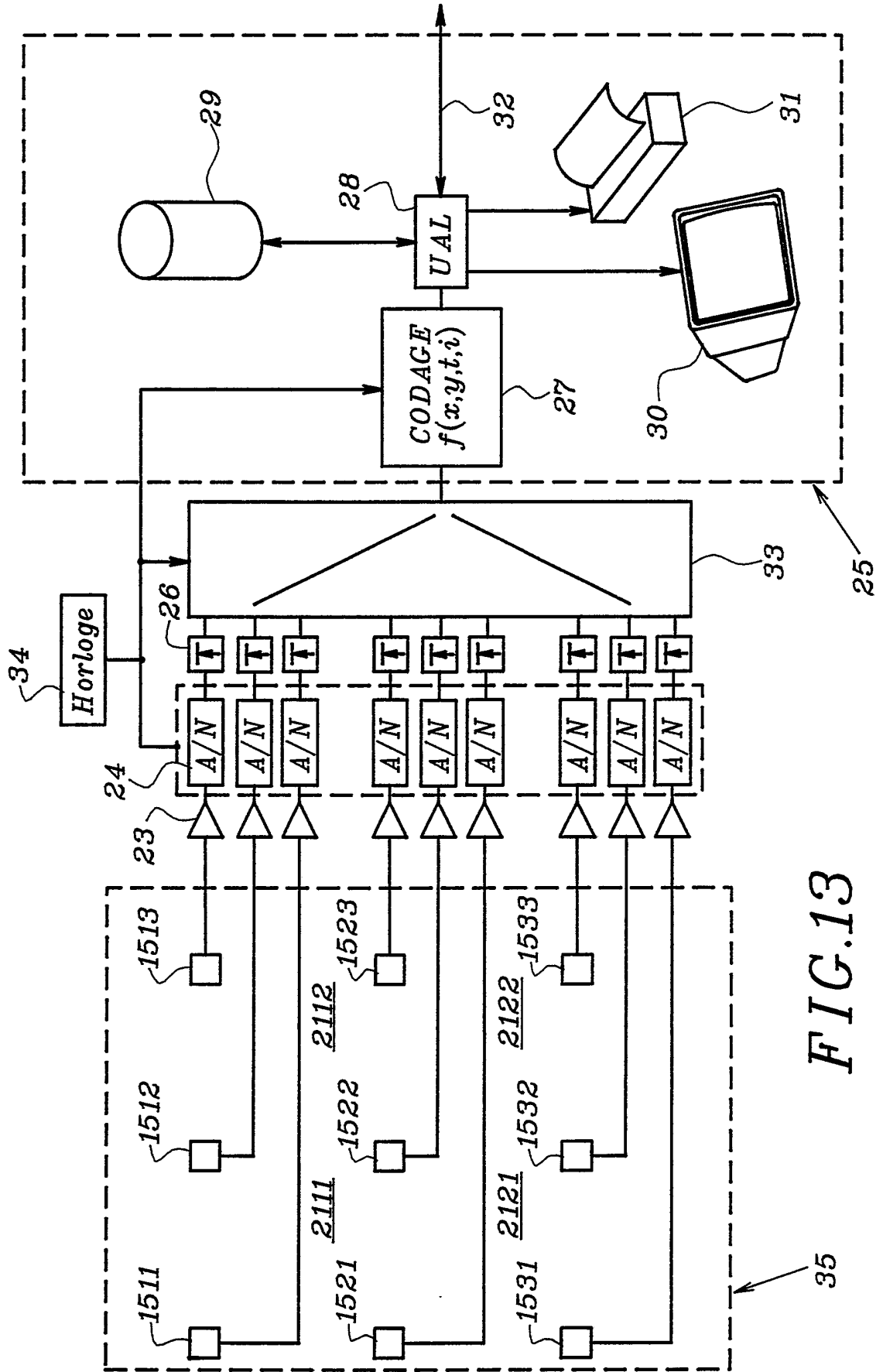


FIG. 13

5/5

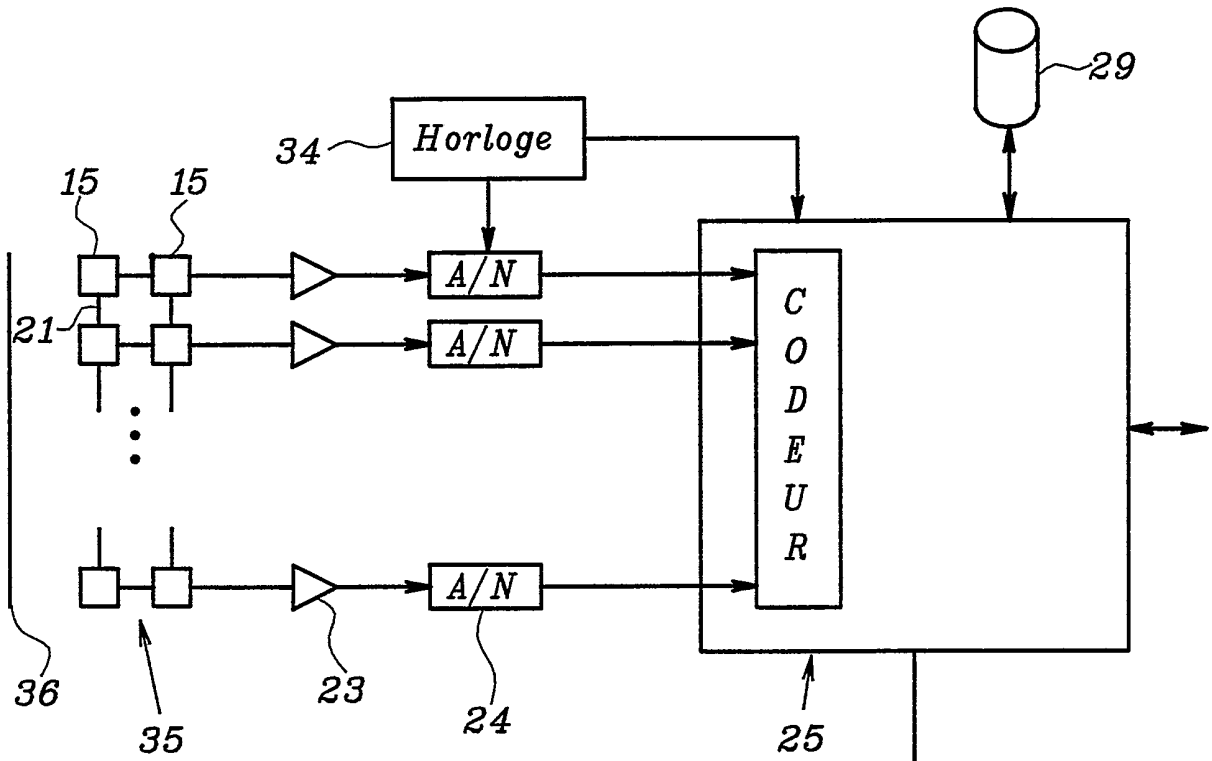


FIG. 14

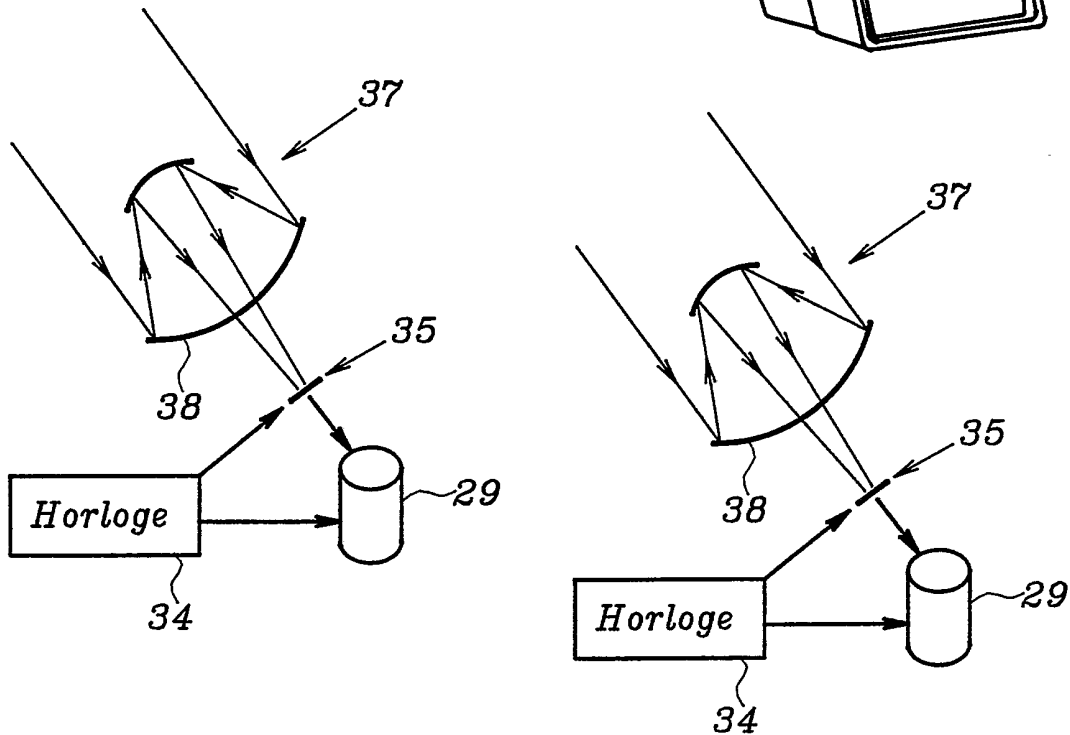


FIG. 15

INSTITUT NATIONAL
de la
PROPRIETE INDUSTRIELLE

RAPPORT DE RECHERCHE
établi sur la base des dernières revendications
déposées avant le commencement de la recherche

FR 9211753
FA 480473
Page 1

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
X	<p>NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH vol. A313, no. 1, 1 Mars 1992, AMSTERDAM, NL pages 173 - 195 Rando N. et al 'The properties of niobium superconducting tunneling junctions as X-ray detectors' * page 175, colonne 3 - page 176, colonne 4; figures 4,5 * * page 179; figure 8 * * page 184, alinéa 2 -alinéa 3; figure 12 * * page 187, alinéa 4 -alinéa 6 *</p>	1-2, 4-5, 7-10
X	<p>IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY vol. 3, no. 1, Mars 1993, NEW YORK, US pages 2080 - 2083 Rando N. et al 'Highly Collimated Photon Detection using Strongly Coupled Superconducting Tunnel Junctions' & APPLIED SUPERCONDUCTIVITY CONFERENCE, 23-28 August 1992, Chikago, US * page 2080, alinéa 7 -alinéa 8 * * page 2082, alinéa 8 - page 2083, alinéa 1 *</p>	1, 4-5, 10

X	<p>IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS vol. 25, no. 2, Mars 1989, NEW YORK, US pages 1351 - 1353 Gare P. et al 'The detection of 6 keV X-rays with Nb junctions' * page 1351, alinéa 1 * * page 1352, alinéa 1 -alinéa 2 *</p>	1-2, 4, 10

-/--		
Date d'achèvement de la recherche		Examineur
03 JUIN 1993		HAMMEL E.J.
<p>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>		

EPO FORM 1503 03.82 (P0413)

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	<p>NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH vol. A288, no. 2,3, 15 Mars 1990, AMSTERDAM, NL pages 541 - 548 Hebrank F. et al 'Nb-AlOx-Nb Tunnel Junctions as Detectors for Ionizing Radiation' * page 542, alinéa 3 - page 543, alinéa 1 *</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-10
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
Date d'achèvement de la recherche		Examinateur
03 JUIN 1993		HAMMEL E.J.
<p>CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES</p> <p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'au moins une revendication ou arrière-plan technologique général O : divulgation non-écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant</p>		

1

EPO FORM 1503 03.82 (P0413)