(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

PARIS

(11) **N° de publication :** **2 756 993**
(à n'utiliser que pour les commandes de reproduction)

(21) **N° d'enregistrement national :** **97 15562**

(51) Int Cl[6] : **H 04 B 10/17**

(12) DEMANDE DE BREVET D'INVENTION A1

(22) **Date de dépôt** : 09.12.97.

(30) **Priorité** : 10.12.96 JP 32996096.

(43) **Date de la mise à disposition du public de la demande :** 12.06.98 Bulletin 98/24.

(56) **Liste des documents cités dans le rapport de recherche préliminaire :** *Ce dernier n'a pas été établi à la date de publication de la demande.*

(60) **Références à d'autres documents nationaux apparentés :**

(71) **Demandeur(s) :** *KOKUSAI DENSHIN DENWA KABUSHIKI KAISHA KABUSHIKI KAISHA* — JP.

(72) **Inventeur(s) :** YAMAMOTO SHU, EDAGAWA NOBORU, TAGA HIDENORI et AKIBA SHIGEYUKI.

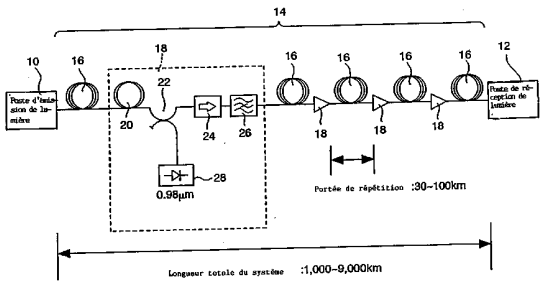
(73) **Titulaire(s) :** .

(74) **Mandataire :** CABINET LAVOIX.

(54) SYSTEME DE TRANSMISSION A AMPLIFICATION/REPETITION OPTIQUE ET AMPLIFICATEUR OPTIQUE.

(57) Un tel système de transmission comprend des moyens de transmission à fibres optiques (14, 16) possédant une surface en coupe transversale efficace accrue par rapport à une valeur usuelle, et des moyens d'amplification/de répétition optique (18) excités à au moins une longueur d'onde d'excitation inférieure à une longueur d'onde d'excitation usuelle pour répéter et amplifier un signal optique transmis par la ligne de transmission (14) comprenant les fibres optiques (16) et les moyens (18) entre des postes d'émission et de réception de lumière (10, 12).

Application notamment à des systèmes de transmission par fibres optiques à large bande sur de très longues distances.



FR 2 756 993 - A1

L'invention concerne un système de transmission à amplification/répétition optique et un amplificateur optique, et plus particulièrement de telles unités permettant une transmission par fibres optiques, à large bande et sur une très grande distance.

Des systèmes de câbles optiques sous-marins doivent transmettre des signaux optiques sur des distances supérieures à des milliers de kilomètres et par conséquent Ces systèmes utilisent de façon typique des répéteurs d'amplification optique situés à des intervalles de répétition prédéterminés pour amplifier optiquement des signaux optiques atténués.

Les coeurs des fibres optiques habituellement utilisées pour la transmission ont des diamètres de 8 à 8,5 mm (avec des surfaces en coupe transversale efficaces d'environ 50 à 55 mm^2) et comme répéteurs d'amplification optique on utilise des fibres optiques dopées à l'erbium et pompées à 1,48 mm. En combinant ces éléments, on utilise habituellement dans la pratique une transmission de 5 gigabits/s sur 9000 km, comme un câble optique sous-marin TPC-5 reliant le Japon aux Etats-Unis d'Amérique.

La capacité de transmission peut être accrue par le nombre de longueurs d'onde moyennant l'utilisation simultanée de technologies de multiplexage à division des longueurs d'onde. Par exemple, bien que cela dépende de la distance de transmission, il a été établi que des systèmes NRZ peuvent multiplexer cinq à vingt longueurs d'onde et que des systèmes optiques dits "soliton" peuvent multiplexer cinq à huit longueurs d'onde.

Des fibres optiques dopées à l'erbium possèdent des niveaux d'absorption dans la bande de 1,48 mm et dans la bande de 0,9 mm. Cependant des lasers à semiconducteurs pour 0,98 mm

se sont avérés peu fiables pour être utilisés pour la transmission. En outre, lorsqu'on réalise un pompage de telles fibres optiques avec 0,98 mm, on ne peut pas régler des signaux optimum de sortie de l'amplificateur à un niveau élevé, tenant compte des effets non linéaires, par rapport à un pompage avec 1,48 mm. C'est pourquoi on a utilisé dans la pratique la bande de 1,48 mm.

Cependant, des signaux doivent être répétés et transmis par exemple sur 9000 km pour établir une liaison directe entre le Japon et les Etats-Unis d'Amérique, et sur 11 000 km pour établir une liaison directe entre les Etats-Unis d'Amérique et la Chine. Pour obtenir une capacité de transmission de 100 gigabits/s globalement en multiplexant 20 longueurs d'onde de signaux optiques à 5 gigabits/s, il est difficile d'obtenir la transmission avec amplification/ répétition optique sur 9000 km ou plus au moyen de combinaisons de câbles à fibres optiques et d'amplificateurs optiques existants.

En supposant que les fibres optiques de transmission possèdent la même perte de transmission, il est nécessaire d'augmenter la puissance des signaux de sortie optique délivrés par des répéteurs d'amplification optique ou de réduire fortement la quantité de bruit d'amplificateurs optiques, de manière à accroître la distance de transmission. Cependant, un accroissement de la puissance de signaux optiques s'accompagne d'une altération de la caractéristique de transmission en raison d'effets non linéaires de fibres de transmission optique; et les bandes attendues ne peuvent pas être garanties. C'est pourquoi il est difficile de réduire le bruit avec des fibres optiques dopées à l'erbium et pompées par une lumière laser de 1,48 mm.

C'est pourquoi un but de l'invention est de fournir un système de transmission à amplification/répétition optique et un amplificateur optique permettant une transmission optique d'une large bande sur une très grande distance dépassant

9000 km.

Un autre but de l'invention est de fournir un amplificateur optique présentant à la fois une haute fiabilité et une caractéristique de faible bruit.

Selon un aspect de l'invention, ce problème est résolu par un système de transmission d'amplification/répétition optique, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de transmission à fibres optiques possédant une surface en coupe transversale efficace plus étendue que la surface ordinaire, et des moyens d'amplification/de répétition optique excités pour au moins une longueur d'onde d'excitation inférieure à la longueur d'onde d'excitation usuelle pour la répétition et l'amplification d'un signal optique transmis par l'intermédiaire desdits moyens de transmission à fibres optiques.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ladite surface en coupe transversale efficace desdits moyens de transmission à fibres optiques est égale à environ 80 mm^2 ou plus.

Selon une autre caractéristique de l'invention, lesdits moyens d'amplification/de répétition optique comprennent un milieu d'amplification optique ayant une pluralité de niveaux d'absorption appartenant à une bande de longueurs d'onde plus courte que la longueur d'onde dudit signal optique, et des moyens d'excitation pour exciter ledit milieu d'amplification optique à ladite longueur d'onde d'excitation, ladite longueur d'onde d'excitation correspondant à l'un desdits niveaux d'absorption présentant une énergie supérieure.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ledit milieu d'amplification optique comprend des fibres d'amplification optique dopées par de l'erbium.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ladite longueur d'onde d'excitation est dans la bande 0,98 mm.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ladite longueur d'onde d'excitation inclut une première longueur

d'onde de pompage et une seconde longueur d'onde de pompage;

lesdits moyens d'amplification/de répétition optique comprennent un milieu d'amplification optique ayant une pluralité de niveaux d'absorption appartenant à une bande de longueurs d'onde inférieures à la longueur d'onde dudit signal optique, des premiers moyens de pompage pour pomper ledit milieu d'amplification optique avec ladite première longueur d'onde de pompage, et des seconds moyens de pompage pour pomper ledit milieu d'amplification optique avec ladite seconde longueur d'onde de pompage;

ladite première longueur d'onde de pompage correspond à l'un desdits niveaux d'absorption possédant une énergie plus élevée; et

ladite seconde longueur d'onde de pompage est légèrement inférieure à une longueur d'onde correspondant à l'un desdits niveaux d'absorption possédant une énergie inférieure.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ledit milieu d'amplification optique comprend des fibres d'amplification optique dopées par de l'erbium.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ladite première longueur d'onde de pompage se situe dans la bande de 0,98 mm et que ladite seconde longueur d'onde de pompage se situe dans la bande de 1,45 mm.

Selon une autre caractéristique de l'invention, ledit signal optique possède une longueur d'onde dans la bande de 1,5 mm.

Selon un autre aspect de l'invention le système comporte des moyens de transmission à fibres optiques possédant une surface en coupe transversale efficace d'environ 80 mm^2 ou plus et des moyens d'amplification/de répétition optique pompés dans la bande de 0,98 mm pour la répétition et l'amplification d'un signal optique dans la bande de 1,5 mm, transmis par lesdits moyens de transmission à fibres optiques.

Selon un autre aspect de l'invention, le système comporte

des moyens de transmission à fibres optiques ayant une surface en coupe transversale efficace d'environ 80 mm2 ou plus, et des moyens d'amplification/de répétition optique pompés dans les bandes de 0,98 mm et de 1,45 mm pour répéter et amplifier un signal optique dans la bande de 1,5 mm, transmis par lesdits moyens de transmission à fibres optiques.

Selon un autre aspect, l'invention porte sur un amplificateur optique, caractérisé en ce qu'il comporte :

un milieu d'amplification optique possédant une pluralité de niveaux d'absorption appartenant à une bande de longueurs d'onde inférieure à la longueur d'onde d'un signal optique;

des premiers moyens de pompage servant à pomper ledit milieu d'amplification optique à ladite première longueur d'onde de pompage; et

des seconds moyens de pompage pour pomper ledit milieu d'amplification optique à une seconde longueur d'onde de pompage, ladite première longueur d'onde de pompage correspondant à l'un desdits niveaux d'absorption ayant une énergie supérieure et ladite seconde longueur d'onde de pompage étant légèrement inférieure à une longueur d'onde correspondant auxdits niveaux d'absorption ayant une énergie inférieure.

Selon une autre caractéristique, l'amplificateur comprend en outre des premiers moyens de couplage pour introduire une lumière de sortie provenant desdits premiers moyens de pompage dans ledit milieu d'amplification optique, et des seconds moyens de couplage pour introduire une lumière de sortie depuis lesdits seconds moyens de pompage dans ledit milieu d'amplification optique.

Selon une autre caractéristique, ledit milieu d'amplification optique comprend des fibres d'amplification optique dopées par de l'erbium.

Selon une caractéristique, ladite première longueur d'onde de pompage se situe dans la bande de 0,98 mm et que ladite seconde longueur d'onde de pompage se situe dans la

bande de 1,45 mm.

Selon une caractéristique, ledit signal optique possède une longueur d'onde située dans la bande de 1,5 mm.

Selon une autre forme de réalisation, l'invention porte sur un amplificateur optique, caractérisé en ce qu'il comporte :

un milieu d'amplification optique;

des moyens de pompage pour pomper ledit milieu d'amplification optique pour l'activer avec un bruit relativement faible, mais avec une fiabilité relativement faible; et

des moyens de pompage auxiliaires pour pomper ledit milieu d'amplification optique pour l'activer avec un bruit relativement élevé, mais avec une fiabilité relativement élevée.

Ainsi selon l'invention les signaux optiques transmis par les moyens de transmission à fibres optiques ayant une surface en coupe transversale efficace plus grande (par exemple 80 mm2) ou plus sont répétés et amplifiés par des moyens d'amplification/de répétition optique pompés avec une longueur d'onde de pompage plus faible (par exemple bande de 0,98 mm) que dans des systèmes usuels.

L'utilisation d'une longueur d'onde de pompage inférieure à une longueur d'onde de pompage usuelle conduit à un facteur de bruit plus faible et à un meilleur rapport signal/bruit, et d'une surface en coupe transversale efficace supérieure à la surface en coupe transversale efficace usuelle conduit à un effet non linéaire plus faible et à une altération réduite des impulsions optiques. Ces facteurs contribuent à fournir un facteur Q globalement élevé et par conséquent à fournir une transmission optique d'une grande capacité sur une très longue distance.

Dans un amplificateur optique selon l'invention on utilise principalement des premiers moyens de pompage, qui sont efficaces pour réduire le bruit tout en ayant une

fiabilité plus faible, et des seconds moyens de pompage ayant une fiabilité élevée, bien qu'inefficaces pour réduire le bruit en tant que moyens auxiliaires. Par conséquent on peut obtenir à la fois une fiabilité et une caractéristique de faible bruit.

D'autres caractéristiques et avantages de la présente invention ressortiront de la description donnée ci-après prise en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 est un schéma-bloc montrant l'agencement général d'un système selon l'invention;
- la figure 2 est un graphique représentant des relations du niveau de puissance optique du signal d'entrée avec le gain d'amplification et le facteur de bruit dans une fibre optique dopée à l'erbium;
- la figure 3 est un diagramme qui représente schématiquement des variations de la caractéristique du facteur Q en fonction de la puissance de sortie Pout du répéteur lorsque la longueur d'onde de pompage varie;
- la figure 4 est un diagramme qui représente schématiquement des variations de la caractéristique du facteur Q en fonction de la puissance de sortie Pout du répéteur lorsque la longueur d'onde de pompage et la surface en coupe transversale efficace Aeff varient;
- la figure 5 est un diagramme montrant les résultats d'une simulation comparative sur ordinateur d'un système existant et d'un système selon l'invention pour une transmission sur 9000 km avec une cadence de 100 gigabits/s (5 gigabits/s x 20 longueurs d'onde); et
- la figure 6 représente un schéma-bloc d'un autre agencement d'un répéteur d'amplification optique 18.

On va expliquer ci-après les formes de réalisation de l'invention d'une manière détaillée en référence aux dessins.

La figure 1 est un schéma-bloc représentant schématiquement une forme de réalisation de l'invention. Le chiffre de

référence 10 désigne un poste d'émission de lumière, qui émet des signaux optiques à 1,55 mm, et le chiffre de référence 12 désigne un poste de réception de lumière qui est connecté au poste d'émission de lumière par une ligne de transmission à fibres optiques 14. La ligne de transmission à fibres optiques 14 comprend une pluralité de fibres optiques de transmission 16, 16, ... connectées de façon répétitive par des répéteurs d'amplification optique 18. Les fibres optiques de transmission 16 utilisées dans cette forme de réalisation sont des fibres optiques monomode, dont la surface en coupe transversale efficace est égale à 80 mm^2 ou plus.

Chacun des répéteurs d'amplification optique 18 comprend des fibres optiques 20 dopées à l'erbium pour le pompage à 0,98 mm, un coupleur WDM 22 servant à démultiplexer et multiplexer la lumière de 1,5 mm et la lumière de 0,98 mm (lumière de pompage), un isolateur optique 24 et un filtre d'égalisation de gain 26, qui sont branchés en série, et la lumière provenant d'un laser de pompage 28 pour l'oscillation laser dans la bande de 0,98 mm est envoyé par l'intermédiaire du coupleur WDM 22 à la fibre optique 20 dopée par de l'erbium. Le filtre d'égalisation de gain 26 égalise les gains de longueurs d'onde respectives de signaux optiques dans la bande de 1,55 mm.

La forme de réalisation est caractérisée en ce que la surface en coupe transversale efficace de la fibre optique de transmission 16 est aussi grande que 80 mm^2 ou plus par rapport à celle utilisée habituellement (environ 50 mm^2), et que la longueur d'onde utilisée en tant que source de lumière pour le pompage de la fibre d'amplification optique dans le répéteur d'amplification optique 18 se situe dans la bande très étroite de 0,98 mm par rapport aux longueurs d'onde classiques utilisées (dans la bande de 1,48 mm). Mais à d'autres égards, cette forme de réalisation possède fondamentalement le même agencement que la forme de réalisation

classique.

La figure 2 illustre de quelle manière le gain d'amplification et le facteur de bruit de la fibre optique dopée à l'erbium varient avec le niveau de puissance optique du signal d'entrée, lorsque la longueur d'onde de la source de lumière de pompage est égale respectivement à 0,98 mm et à 1,48 mm. Le gain possède les mêmes valeurs même pour des longueurs d'onde différentes de la source de lumière de pompage; cependant le facteur de bruit présente différentes valeurs pour différentes longueurs d'onde de la source de lumière de pompage. Par exemple, lorsque le niveau de puissance optique du signal d'entrée est 0 dBm, le facteur de bruit Nf égal à environ 6 dB pour la longueur d'onde de pompage de 1,48 mm et est égal à environ 4 dB pour la longueur d'onde de pompage de 0,98 mm. C'est-à-dire que le facteur de bruit Nf est amélioré de 2 dB, et cela signifie théoriquement qu'on peut accroître la distance dans le rapport 1,5.

En général, les qualités de lignes formées de fibres optiques sont estimées au moyen du facteur Q. Le facteur Q dépend exclusivement de la non-linéarité de la fibre optique de transmission 16 et de la lumière parasite produite par le répéteur d'amplification optique 18, et présente la caractéristique telle que représentée sur la figure 3, en portant les valeurs du facteur Q sur l'axe vertical et la puissance de sortie Pout du répéteur d'amplification optique 18 sur l'axe horizontal. En termes de non-linéarité de la fibre optique de transmission 16, le facteur Q diminue lorsque la puissance de sortie Pout du répéteur augmente comme cela est représenté par la courbe 30, et le degré de réduction devient important lorsque la valeur de la puissance de sortie Pout du répéteur devient élevée.

D'autre part, en ce qui concerne le bruit (à savoir le rapport signal/bruit (rapport S/N) ou le facteur de bruit Nf), étant donné qu'en général le rapport S/N s'améliore lorsque

la puissance de sortie Pout du répéteur augmente, le facteur Q augmente également directement en fonction de l'augmentation de la puissance de sortie Pout du répéteur. Cependant, en ce qui concerne la longueur d'onde de pompage du répéteur d'amplification optique 18 (longueur d'onde de sortie délivrée par le laser de pompage 28), les valeurs Q sont inférieures et le taux de variation en rapport avec la puissance de sortie Pout du répéteur est plus faible lorsque la longueur de pompage est égale à 1,4 mm au lieu d'être égale à 0,98 mm. La courbe 32S représente des valeurs obtenues lorsque la longueur d'onde de sortie du laser de pompage 28 (longueur d'onde de pompage) du répéteur d'amplification optique 18 est plus faible, à savoir 0,98 mm, et la courbe 32L représente des valeurs obtenues lorsque la longueur d'onde de pompage du répéteur d'amplification optique est égale à 1,48 mm, valeur utilisée habituellement.

Etant donné que le facteur Q présente un synergisme d'effets de non-linéarité et d'effets de bruit (à savoir le rapport S/N ou le facteur de bruit Nf), les caractéristiques de transmission sont optimales à proximité des points A et B lorsque la courbe 30 des effets non-linéaires croise les courbes 32S et 32L des rapports signal/bruit. Dans des systèmes classiques, on a choisi la puissance de sortie Pout du répéteur d'amplification optique, qui correspond au point A.

Lorsque, comme dans la présente forme de réalisation, on utilise la courte longueur de pompage, 0,98 mm, du répéteur d'amplification optique 18, le point d'intersection B des courbes 30 et 32S est le meilleur point. C'est-à-dire qu'au niveau du point B, le facteur Q présente une valeur supérieure à ce qu'elle est au niveau du point A et que l'on peut s'attendre à une meilleure caractéristique de transmission. Bien que les lasers à semiconducteurs pour 0,98 mm n'étaient habituellement pas pris en compte comme étant moins fiables,

avant de considérer leurs caractéristiques de bruit faible, la caractéristique de bruit faible a une grande importance dans la transmission optique actuelle de grande capacité et sur de longues distances. On estime que l'on peut résoudre le problème de la fiabilité grâce à des améliorations apportées par les technologies de fabrication des semiconducteurs.

Récemment, on a considéré que les surfaces en coupe transversale efficaces Aeff de fibres optiques de transmission étaient importantes et on a étudié et établi des rapports sur les fibres optiques ayant des surfaces en coupe transversale efficaces Aeff de 80 mm^2 ou plus. Lorsque la surface en coupe transversale efficace Aeff augmente, la densité de puissance optique par surface unité et l'effet non-linéaire diminuent. C'est-à-dire que des formes d'ondes d'impulsions sont moins susceptibles d'être altérées et que l'on s'attend à obtenir une meilleure caractéristique de transmission qu'avec des surfaces en coupe transversale efficaces Aeff plus petites.

La figure 4 représente des caractéristiques, similaires à celles de la figure 3, obtenues lorsque la surface en coupe transversale efficace Aeff est égale à 80 mm^2 ou plus. Bien que la courbe 30 représente des caractéristiques d'effets non-linéaires dans le cas où la surface en coupe transversale Aeff est égale à environ 50 mm^2, la courbe 34 représente les caractéristiques d'effets non-linéaires dans le cas où la surface en coupe transversale efficace Aeff est égale à 80 mm^2 par exemple. Comme cela est représenté schématiquement par les courbes 30 et 34, le facteur Q est amélioré lorsque la surface en coupe transversale Aeff augmente.

C'est pourquoi, lorsqu'on utilise la courte longueur d'onde de pompage pour le répéteur d'amplification optique 18 et qu'on augmente la surface en coupe transversale efficace Aeff de la fibre optique de transmission 16, le point d'intersection C des courbes 34 et 32S est le meilleur point. La valeur Q correspondant au point d'intersection C est indubita-

blement supérieure aux valeurs Q correspondant aux points B et A. C'est-à-dire que la qualité de la ligne de transmission est meilleure. En outre, étant donné que la puissance de sortie Pout du répéteur correspondant au point C est supérieure à la puissance de sortie Pout du répéteur, correspondant au point B, la puissance de sortie Pout du répéteur peut être réglée à une valeur supérieure à la valeur obtenue au moyen d'un simple raccourcissement de la longueur d'onde de pompage du répéteur d'amplification optique, et le facteur Q prend une valeur élevée correspondante.

Comme le montrent également les figures 3 et 4, dans la gamme de longueurs d'onde de pompage courtes, l'inclinaison de la courbe du facteur Q en fonction de la puissance de sortie Pout du répéteur d'amplification optique est plus élevée. C'est pourquoi le déplacement du point d'intersection avec une surface en coupe transversale efficace Aeff plus grande augmente lorsque la longueur d'onde de pompage diminue. C'est-à-dire que plus la longueur d'onde de pompage diminue, plus les effets d'amélioration du facteur Q en rapport avec la surface en coupe transversale efficace Aeff augmentent.

Même si on utilise la longueur d'onde de pompage de 1,48 mm utilisée habituellement, le point d'intersection D des courbes 32L et 34 devient le point optimum lorsqu'on augmente la surface en coupe transversale efficace Aeff de la fibre optique de transmission, et on peut obtenir une valeur plus élevée du facteur Q par rapport à celle présente au point A. Cependant, étant donné que l'inclinaison de la courbe 32L est faible dans la gamme de grandes longueurs d'onde de pompage, les effets d'amélioration du facteur Q par accroissement de la surface en coupe transversale efficace Aeff sont faibles et il est impossible d'obtenir des valeurs du facteur Q suffisamment élevées pour réaliser une transmission sur une très longue distance dépassant 9000 km à une cadence de 100 gigabits/s.

La figure 5 représente une simulation sur ordinateur d'une transmission sur 9000 km de signaux, dont les longueurs d'onde sont multiplexées et qui contiennent vingt longueurs d'onde, à une cadence de 5 gigabits/s. Des carrés blancs sont les éléments de tracé correspondant à un système selon la forme de réalisation (utilisant des fibres optiques de transmission dont la surface en coupe transversale efficace est égale à 80 mm^2 et avec une longueur de pompage de 0,98 mm du répéteur d'amplification optique), tandis que des losanges blancs sont des marques de tracé d'un système classique (qui utilise des fibres optiques de transmission ayant une surface en coupe transversale efficace de 55 mm^2 et avec une longueur d'onde de 1,48 mm pour le pompage du répéteur d'amplification optique). On utilise 7 dBm comme puissance de sortie des répéteurs. En considérant la figure 5, on comprendra qu'on obtient un effet d'amélioration remarquable et que la forme de réalisation garantit un taux d'erreurs de code de 10^{-11} ou moins pour toutes les longueurs d'onde dans une transmission sur 9000 km.

On a décrit la forme de réalisation dans le cas de l'utilisation de 0,98 mm en tant que longueur de pompage et dans le cas de l'utilisation de fibres optiques de transmission 16 ayant une surface en coupe transversale efficace Aeff de 80 mm^2 ou plus. Cependant, ces limitations numériques ne sont pas absolues ni critiques. C'est-à-dire que le facteur Q peut être plus ou moins amélioré, et ce également avec d'autres valeurs légèrement différentes de ces valeurs, comme cela apparaît à l'évidence sur le diagramme schématique de la figure 4.

Des améliorations de technologies de croissance cristallographique améliorent la fiabilité des lasers à semiconducteurs pour la bande de 0,98 mm, parfaitement admissible pour une utilisation en transmission. Cependant, dans le répéteur d'amplification optique 18 représenté sur la figure 1, si le

laser de pompage 28 à 0,98 mm se détériore jusqu'à ce qu'aucune lumière de pompage ne soit envoyée aux fibres d'amplification optiques 20 dopées à l'erbium ou que seule une faible lumière de pompage leur soit envoyée, la lumière transmise est fortement atténuée dans les fibres optiques 20 dopées à l'erbium et éventuellement y est bloquée. Ci-après on va expliquer une autre version du répéteur d'amplification optique 18 réalisant à la fois une fiabilité dans la transmission sans interruption et fournissant une caractéristique de faible bruit par pompage dans la bande de 0,98 mm, en se référant au schéma-bloc de la figure 6 qui montre son agencement général.

Sur la figure 6, le chiffre de référence 40 désigne des fibres optiques dopées à l'erbium, qui sont optimisées pour le pompage à 0,98 mm et ont une extrémité raccordée à un coupleur 42 de multiplexage à division des longueurs d'onde 1,55 mm/0,98 mm, et l'extrémité opposée est connectée à un coupleur 44 de multiplexage à division des longueurs d'onde de 1,55 mm/1,45 mm. La lumière de sortie (lumière de pompage à 0,98 mm) délivrée par le laser de pompage 46 à 98 mm est couplée selon un couplage croisé dans le coupleur 42 de multiplexage à division des longueurs d'onde de 1,55 mm/0,98 mm et pénètre dans la fibre optique dopée à l'erbium. La lumière de sortie (lumière de pompage à 1,45 mm) délivrée par le laser de pompage 48 à 1,45 mm est couplée selon un couplage croisé dans le coupleur 44 de multiplexage à division des longueurs d'onde de 1,55 mm/1,45 mm et pénètre dans la fibre optique 40 dopée à l'erbium.

La lumière de transmission devant être amplifiée, par exemple un signal lumineux dans la bande de 1,55 mm, traverse le coupleur 42 de multiplexage des longueurs d'onde et pénètre dans la fibre optique 40 dopée à l'erbium. La fibre optique 40 dopée à l'erbium, qui est pompée par la lumière de sortie délivrée par les lasers 46 et 48, amplifie optiquement le

signal lumineux d'entrée, et la lumière de sortie amplifiée provenant de la fibre optique 40 traverse le coupleur 44 à multiplexage par division des longueurs d'onde et est envoyée à la ligne de transmission optique par l'intermédiaire d'un isolateur optique 50 et d'un filtre d'égalisation de gain 52. Le gain d'amplification de la fibre optique 40 dopée à l'erbium présente habituellement une caractéristique courbe modérée, et le filtre d'égalisation de gain 52 règle la caractéristique courbe d'amplification pour lui donner une forme plate de manière à égaliser sensiblement les intensités des lumières des signaux ayant les longueurs d'onde respectives.

Etant donné que la présente invention a principalement pour objet de réduire le bruit pour une transmission sur une très longue distance, la fibre optique 40 dopée à l'erbium est optimisée pour la bande à 0,98 mm, avec un bruit réduit. La faible fiabilité du laser de pompage 46 à 0,98 mm est compensée par l'utilisation additionnelle du laser de pompage 48 à 1,45 mm. Par conséquent, la forme de réalisation permet d'obtenir à la fois une caractéristique de faible bruit et une haute fiabilité.

Le pompage à 1,45 mm fournit un rendement de pompage inférieur à celui du pompage à 1,48 mm. Cependant, ceci n'affecte sensiblement pas de façon nuisible le pompage à 0,98 mm. C'est pourquoi, lorsque la fibre optique 40 dopée à l'erbium est pompée simultanément par les deux lasers de pompage 46, 48, le pompage à 0,98 mm fonctionne en tant que système pilote, et fournit une caractéristique à faible bruit. Dans une tentative réelle utilisant une fibre optique dopée à l'erbium d'une longueur de 20 m et son pompage par le laser à 0,98 mm à 50 mW et par le laser à 1,45 mm à 40 mW, les facteurs de bruit dans la gamme de 3,5 à 3,7 dB ont été atteints dans la bande de longueurs d'onde de signal de 1,540 nm à 1,560 nm. Ces valeurs sont sensiblement identiques

à la valeur obtenue moyennant l'utilisation du laser 46 à 0,98 mm seul.

Dans la forme de réalisation représentée sur la figure 6, si le laser de pompage 46 à 0,98 mm est altéré, alors on n'obtient aucune lumière de pompage de 0,98 mm ou seulement une telle lumière de pompage extrêmement faible. Dans ce cas, le pompage à 1,45 mm par le laser de pompage 48 à 1,45 mm disposé en aval joue le rôle pilote. Lorsque le pompage à 1,45 mm joue le rôle pilote, on ne peut pas s'attendre à obtenir la caractéristique de faible bruit fournie par le pompage à 0,98 mm, mais on obtient un taux d'amplification suffisamment élevé. Dans le système de transmission à répétition qui raccorde une pluralité d'amplificateurs optiques selon des étapes multiples, l'interruption de la lumière du signal dans le système est une panne grave. Cependant en ce qui concerne le facteur de bruit, une réduction du facteur de bruit dans une partie des amplificateurs optiques entraîne seulement une légère altération de l'ensemble des caractéristiques de transmission, et une telle faible altération peut être absorbée dans la marge caractéristique du système de transmission. Etant donné que le laser 48 de pompage à 1,45 mm possède une fiabilité équivalente à celle d'un laser de pompage à 1,48 mm existant, on obtient une fiabilité remarquablement élevée dans l'ensemble du système.

Dans la forme de réalisation représentée sur la figure 6, le laser 46 de pompage à 0,98 mm est positionné en avant de la fibre optique dopée à l'erbium, et le laser 48 de pompage à 1,45 mm est disposé en aval. De cette manière, la lumière de pompage à 1,45 mm, une longueur d'onde proche de la lumière du signal, se déplace en sens opposé de la lumière de signal, et la perturbation affectant la lumière de signal peut être atténuée.

Etant donné que des fibres optiques dopées à l'erbium, qui sont utilisées de façon typique en tant que moyens

d'amplification optique, possèdent des niveaux disponibles d'absorption (ou des niveaux d'énergie correspondants) de 1,48 mm et de 0,98 mm, dans la forme de réalisation représentée sur la figure 1 on utilise la bande de 0,98 mm tandis que dans la forme de réalisation représentée sur la figure 6 on utilise à la fois 0,98 mm et 1,45 mm. Dans le cas d'autres milieux d'amplification optique en général, les longueurs d'onde par niveaux d'absorption diffèrent de ces valeurs. La présente invention est applicable également à des systèmes utilisant un autre milieu d'amplification optique. Dans de telles applications, le milieu d'amplification optique peut être pompé moyennant l'utilisation d'une longueur d'onde correspondant à un niveau d'absorption plus élevé parmi une pluralité de niveaux d'absorption faisant partie d'une bande de longueurs d'onde inférieures à celles de la lumière de signal. Lorsqu'une lumière de pompage auxiliaire est requise, une longueur d'onde légèrement inférieure à celle correspondant à un niveau d'absorption inférieur peut être utilisée en tant que lumière de pompage auxiliaire.

Les spécialistes de cette technique comprendront aisément, à partir de la description précédente, que l'invention réalise un système de transmission à fibres optiques ayant une capacité totale de transmission de 100 gigabits/s ou plus sur une très longue distance dépassant 9000 km et que l'on peut obtenir une amplification optique qui fournit à la fois la fiabilité et une caractéristique de bruit faible.

REVENDICATIONS

1. Système de transmission à amplification/répétition optique, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de transmission à fibres optiques (14,16) possédant une surface en coupe transversale efficace plus étendue que la surface ordinaire, et des moyens d'amplification/de répétition optique (18) excités pour au moins une longueur d'onde d'excitation inférieure à la longueur d'onde d'excitation usuelle pour la répétition et l'amplification d'un signal optique transmis par l'intermédiaire desdits moyens de transmission à fibres optiques.

2. Système de transmission à amplification/répétition optique selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite surface en coupe transversale efficace desdits moyens de transmission à fibres optiques est égale à environ 80 mm^2 ou plus.

3. Système de transmission à amplification/répétition optique selon la revendication 1, caractérisé en ce que lesdits moyens d'amplification/de répétition optique (18) comprennent un milieu d'amplification optique ayant une pluralité de niveaux d'absorption appartenant à une bande de longueurs d'onde plus courte que la longueur d'onde dudit signal optique, et des moyens d'excitation pour exciter ledit milieu d'amplification optique à ladite longueur d'onde d'excitation, ladite longueur d'onde d'excitation correspondant à l'un desdits niveaux d'absorption présentant une énergie supérieure.

4. Système de transmission à amplification/répétition optique selon la revendication 3, caractérisé en ce que ledit milieu d'amplification optique comprend des fibres d'amplification optique (20) dopées par de l'erbium.

5. Système de transmission à amplification/répétition optique selon la revendication 4, caractérisé en ce que ladite

longueur d'onde d'excitation est dans la bande 0,98 mm.

6. Système de transmission à amplification/répétition optique selon la revendication 1, caractérisé en ce que :

ladite longueur d'onde d'excitation inclut une première longueur d'onde de pompage et une seconde longueur d'onde de pompage;

lesdits moyens d'amplification/de répétition optique (18) comprennent un milieu d'amplification optique ayant une pluralité de niveaux d'absorption appartenant à une bande de longueurs d'onde inférieures à la longueur d'onde dudit signal optique, des premiers moyens de pompage (46) pour pomper ledit milieu d'amplification optique avec ladite première longueur d'onde de pompage, et des seconds moyens de pompage (48) pour pomper ledit milieu d'amplification optique avec ladite seconde longueur d'onde de pompage;

ladite première longueur d'onde de pompage correspond à l'un desdits niveaux d'absorption possédant une énergie plus élevée; et

ladite seconde longueur d'onde de pompage est légèrement inférieure à une longueur d'onde correspondant à l'un desdits niveaux d'absorption possédant une énergie inférieure.

7. Système de transmission à amplification/répétition optique selon la revendication 6, dans lequel ledit milieu d'amplification optique comprend des fibres d'amplification optique (20) dopées par de l'erbium.

8. Système de transmission à amplification/répétition optique selon la revendication 7, caractérisé en ce que ladite première longueur d'onde de pompage se situe dans la bande de 0,98 mm et que ladite seconde longueur d'onde de pompage se situe dans la bande de 1,45 mm.

9. Système de transmission à amplification/répétition optique selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, caractérisé en ce que ledit signal optique possède une longueur d'onde dans la bande de 1,5 mm.

10. Système de transmission à amplification/répétition optique, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de transmission à fibres optiques (20) possédant une surface en coupe transversale efficace d'environ 80 mm^2 ou plus et des moyens d'amplification/de répétition optique pompés dans la bande de 0,98 mm pour la répétition et l'amplification d'un signal optique dans la bande de 1,5 mm, transmis par lesdits moyens de transmission à fibres optiques.

11. Système de transmission à amplification/répétition optique, caractérisé en ce qu'il comporte des moyens de transmission à fibres optiques (40) ayant une surface en coupe transversale efficace d'environ 80 mm2 ou plus, et des moyens d'amplification/de répétition optique pompés dans les bandes de 0,98 mm et de 1,45 mm pour répéter et amplifier un signal optique dans la bande de 1,5 mm, transmis par lesdits moyens de transmission à fibres optiques (40).

12. Amplificateur optique, caractérisé en ce qu'il comporte :

un milieu d'amplification optique possédant une pluralité de niveaux d'absorption appartenant à une bande de longueurs d'onde inférieure à la longueur d'onde d'un signal optique;

des premiers moyens de pompage (46) servant à pomper ledit milieu d'amplification optique à ladite première longueur d'onde de pompage; et

des seconds moyens de pompage (48) pour pomper ledit milieu d'amplification optique à une seconde longueur d'onde de pompage, ladite première longueur d'onde de pompage correspondant à l'un desdits niveaux d'absorption ayant une énergie supérieure et ladite seconde longueur d'onde de pompage étant légèrement inférieure à une longueur d'onde correspondant auxdits niveaux d'absorption ayant une énergie inférieure.

13. Amplificateur optique selon la revendication 12, comprenant en outre des premiers moyens de couplage pour

introduire une lumière de sortie provenant desdits premiers moyens de pompage dans ledit milieu d'amplification optique, et des seconds moyens de couplage pour introduire une lumière de sortie depuis lesdits seconds moyens de pompage dans ledit milieu d'amplification optique.

14. Amplificateur optique selon la revendication 12, caractérisé en ce que ledit milieu d'amplification optique comprend des fibres d'amplification optique dopées par de l'erbium.

15. Amplificateur optique selon la revendication 12, caractérisé en ce que ladite première longueur d'onde de pompage se situe dans la bande de 0,98 mm et que ladite seconde longueur d'onde de pompage se situe dans la bande de 1,45 mm.

16. Amplificateur optique selon la revendication 12, caractérisé en ce que ledit signal optique possède une longueur d'onde située dans la bande de 1,5 mm.

17. Amplificateur optique, caractérisé en ce qu'il comporte :

un milieu d'amplification optique;

des moyens de pompage pour pomper ledit milieu d'amplification optique pour l'activer avec un bruit relativement faible, mais avec une fiabilité relativement faible; et

des moyens de pompage auxiliaires pour pomper ledit milieu d'amplification optique pour l'activer avec un bruit relativement élevé, mais avec une fiabilité relativement élevée.

Fig. 1

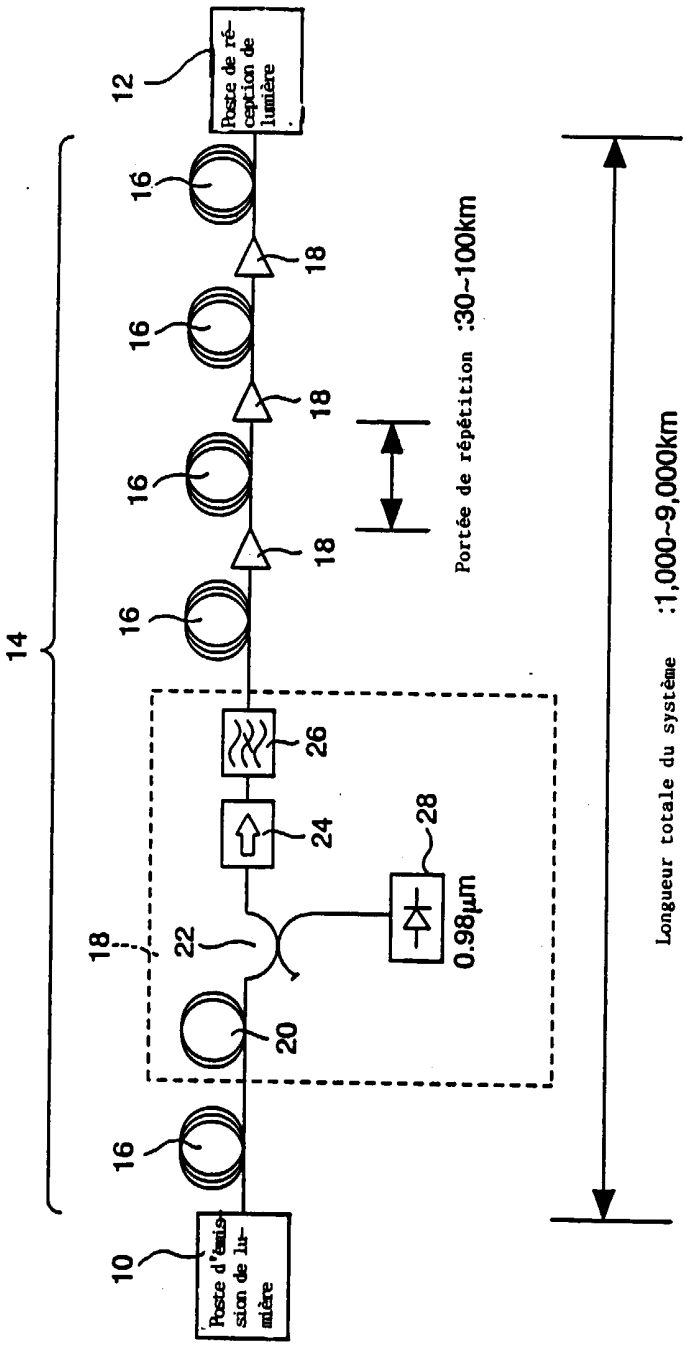

Poste d'émission de lumière
Poste de réception de lumière
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
0.98µm
Portée de répétition :30~100km
Longueur totale du système :1,000~9,000km

Fig. 2

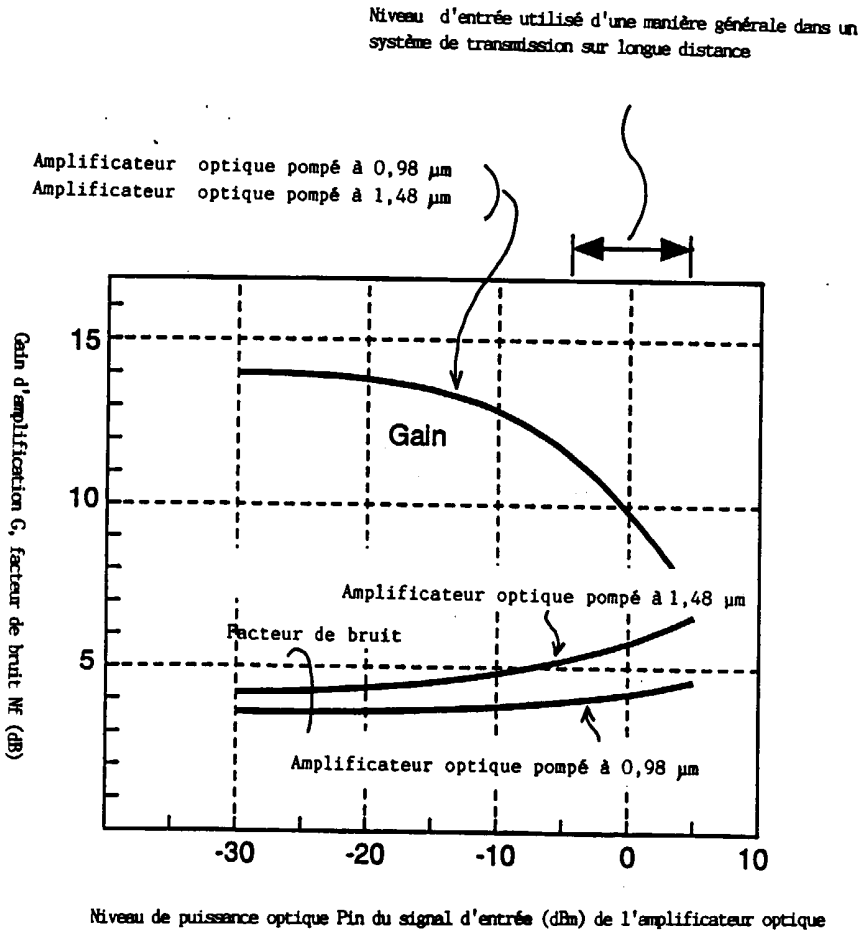

Niveau d'entrée utilisé d'une manière générale dans un système de transmission sur longue distance
Amplificateur optique pompé à 0,98 µm
Amplificateur optique pompé à 1,48 µm
Gain
Amplificateur optique pompé à 1,48 µm
Facteur de bruit
Amplificateur optique pompé à 0,98 µm
15
10
5
-30
-20
-10
0
10
Gain d'amplification G, facteur de bruit NF (dB)
Niveau de puissance optique Pin du signal d'entrée (dBm) de l'amplificateur optique

Fig. 3

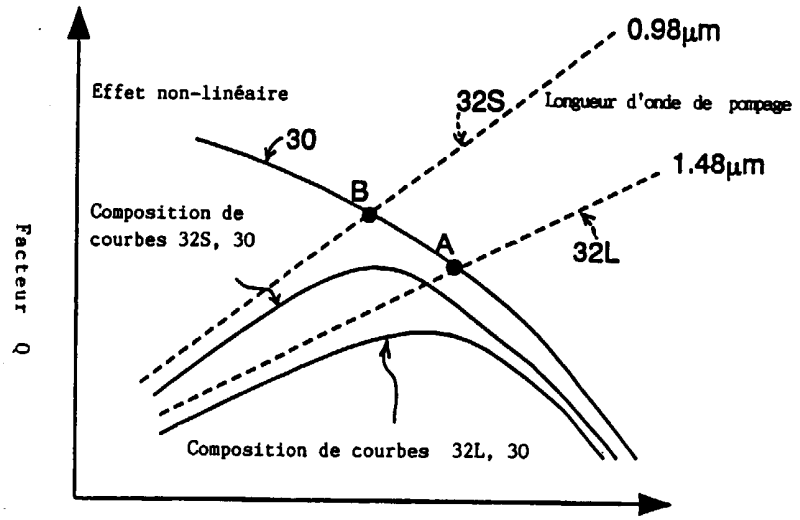

0.98µm
Effet non-linéaire
32S
Longueur d'onde de pompage
30
1.48µm
B
Composition de
courbes 32S, 30
A
32L
Facteur Q
Composition de courbes 32L, 30
Puissance de sortie Pout du récepteur

Fig. 4

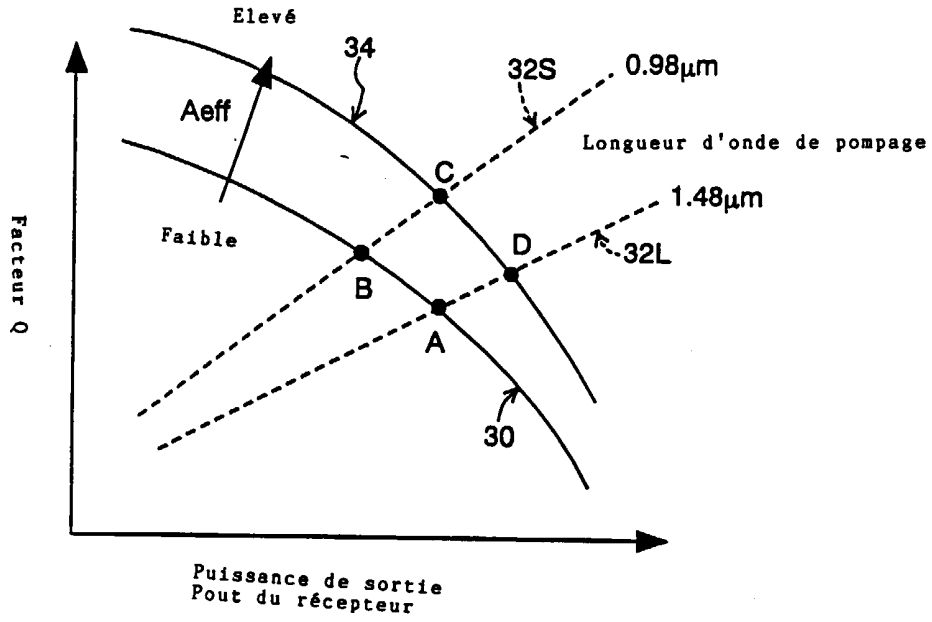

Elevé
34
32S
0.98µm
Aeff
Longueur d'onde de pompage
C
1.48µm
Faible
D
32L
B
A
30
Facteur Q
Puissance de sortie
Pout du récepteur

Fig. 5

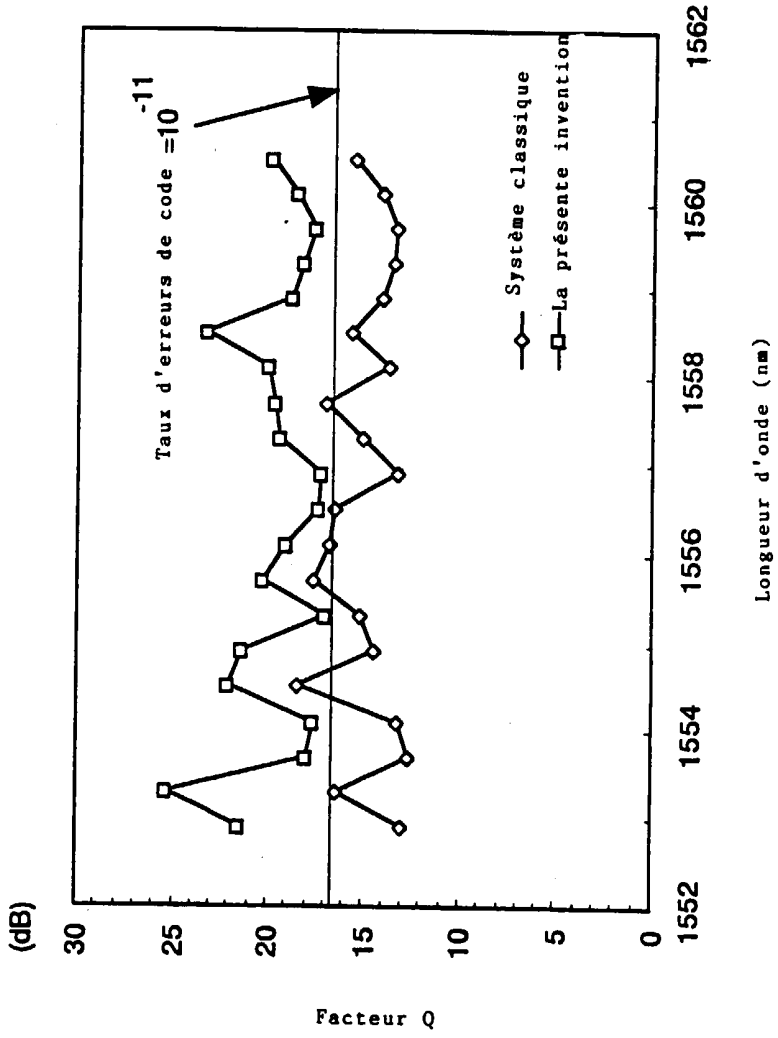
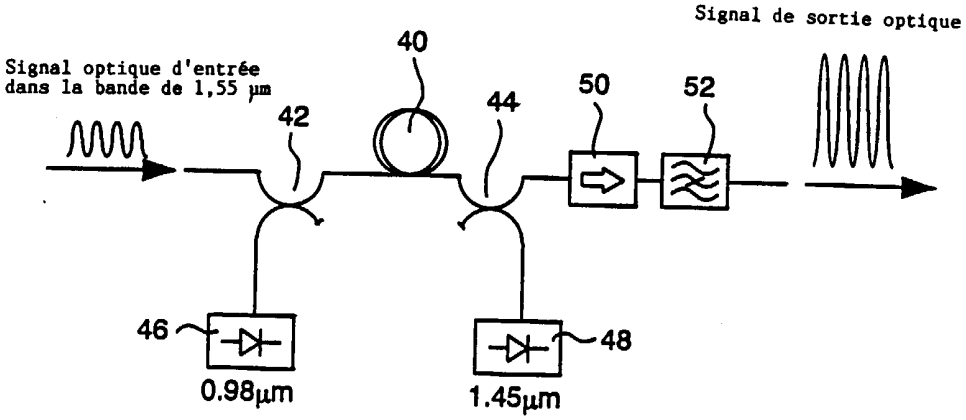

Taux d'erreurs de code =10^-11
Système classique
La présente invention
(dB)
30
25
20
15
10
5
0
1552
1554
1556
1558
1560
1562
Facteur Q
Longueur d'onde (nm)

Fig. 6


Signal de sortie optique
Signal optique d'entrée
dans la bande de 1,55 µm
40
42
44
50
52
46
48
0.98µm
1.45µm