



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 13 486 T2** 2007.01.11

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 570 594 B1**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H04B 10/17** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 13 486.2**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/BR02/00174**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 780 992.0**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2004/051892**

(86) PCT-Anmeldetag: **05.12.2002**

(87) Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: **17.06.2004**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **07.09.2005**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **26.07.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **11.01.2007**

(73) Patentinhaber:  
**Ericsson Telecomunicacoes S.A., Sao Paulo, BR**

(72) Erfinder:  
**GOMES, Anderson, CEP-50730-670 Recife, PE, BR; FLORIDIA, Claudio, CEP-51130-320 Recife, PE, BR; SUNDHEIMER, Michael, CEP-51020-260 Recife, PE, BR; DE BARROS, Regina, Miriam, CEP-13104-116 Campinas, SP, BR; ROSOLEM, Batista, Joao, CEP-13013-002 Campinas, SP, BR**

(74) Vertreter:  
**HOFFMANN & EITL, 81925 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE, SI, SK, TR**

(54) Bezeichnung: **DAUERSTRICH GEPUMPTER PARALLELE FASEROPTISCHE PARAMETRISCHE VERSTÄRKER**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

## Technisches Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft im Allgemeinen faseroptische Verstärker und insbesondere parametrische Verstärker mit unterdrücktem Übersprechen.

## Hintergrund der Erfindung

**[0002]** Verschiedene Datenkommunikationsarten werden heutzutage immer häufiger. Diese Entwicklung erfordert mehr Bandbreite, welche zur Kommunikation zur Verfügung steht. Die Kapazität von verschiedenen Typen von Telekommunikationssystemen hat in den letzten zehn Jahren enorm zugenommen. Ein zunehmender Teil der Kapazität wird durch optische Fasern bereitgestellt, welche im Vergleich zu gewöhnlichen Drähten Bandbreitenvergrößerungen von mehreren Größenordnungen bieten.

**[0003]** Die Bandbreite von optischen Fasern wird in effizienter Weise durch das Anwenden von Wellenlängentrennungs-Multiplex- (WDM, Wavelength Division Multiplexing) Verfahren genutzt. Viele Kanäle, welche eine Vielzahl von geringfügig unterschiedlichen Wellenlängen nutzen, können gleichzeitig in einer und derselben optischen Faser transportiert werden, ohne sich gegenseitig zu beeinträchtigen. In den letzten Jahren sind Dichte Wellenlängentrennungs-Multiplex- (DWDM, Dense Wavelegh Division Multiplexing) Verfahren entwickelt worden, welche die Nutzung des Frequenzumfangs einen weiteren Schritt vorangebracht haben. Das nutzbare Spektrum wird in unterschiedliche Bänder unterteilt, ein S-Band (Kurzband), welches sich von 1460 nm bis 1530 nm erstreckt, ein C-Band (Konventionelles Band), welches sich von 1525,6 nm bis 1562,5 nm erstreckt und ein L-Band (Langes Band), welches sich von 1569,4 bis 1612,8 nm erstreckt.

**[0004]** Ein Hauptproblem in der optischen Kommunikation ist die Abschwächung von optischen Signalen aufgrund von inhärenten Faserverlusten. Optische Signale werden, nachdem sie über einige Entfernung transportiert worden sind, abgeschwächt und müssen auf die eine oder andere Weise wiederhergestellt werden. Durch die Einführung von optischen Verstärkern wird jeder Übergang in elektronische Signale unnötig. Die Verstärkung von Bändern mit breiter Wellenlänge, z. B. die vollständigen S-, C-, und L-Bänder, welche eine Anzahl von WDM-Kanälen tragen, ist jedoch nicht ganz einfach. Mehrere verschiedene Verstärker-Ansätze sind in dem Stand der Technik dargestellt.

**[0005]** Mit seltenen Erden dotierte, optische Faserverstärker sind eine Klasse von weitverbreiteten optischen Verstärkern. Sie zeigen geringes Rauschen,

sie können über ziemlich große Bandbreiten betrieben werden und zeigen vernachlässigbares Übersprechen. Der operative Wellenlängenbereich hängt jedoch von den dotierenden Ionen ab.

**[0006]** Optische Verstärker sind auch durch die Stimulierte Raman Streuung (SRS, Stimulated Raman Scattering) auf Raman-Effekte gestützt worden. SRS ist ein nichtlinearer Prozess, in welchem neue Frequenzen durch Energieübertragung zwischen einer optischen Welle und dem Medium, aufgrund der Anregung eines optischen Phonon, erzeugt werden. Da es ein nichtresonanter Prozess ist, wird die Verstärkung bei jeder Wellenlänge verfügbar gemacht. Im Fall von Silica hat diese Frequenzverschiebung ihr Maximum etwa 13 THz von der Pumpfrequenz. Die nach unten verschobene Frequenz ist als Stokes-verschobene Frequenz bekannt. Die Raman-Verstärkung erstreckt sich über etwa 40 THz, die für Anwendungszwecke nutzbare Bandbreite ist jedoch kleiner als diese.

**[0007]** Ein dritter Typ von optischen Verstärkern ist ein faseroptisch-parametrischer Verstärker (FOPA, Fiber Optical Parametric Amplifier). Dieser Typ von Verstärkern ist in den letzten Jahren intensiv untersucht worden, aufgrund ihrer potentiellen Nutzung für Verstärkung und Wellenlängenkonversion in Übermittlungssystemen für Dichtes Wellenlängentrennungs-Multiplexen (DWDM). Da das Verstärkungsband von der Konstruktion der genutzten Faser abhängt, haben sie Interesse erweckt und können auf diese Weise außerhalb des konventionellen selteneren Fensterbandes gebracht werden. Dies wird die Nutzung des gesamten verlustarmen Fensters aus Silicaverbundfaser erlauben. Faseroptisch-parametrische Verstärker sind in der Lage in jedem der Telekommunikationsbänder (S-C-L) zu arbeiten, in Abhängigkeit von der Pumpwellenlänge und der Null-Dispersionswellenlänge, welche im Prinzip von 1300 nm bis 1600 nm passend zugeschnitten werden kann.

**[0008]** Ein faseroptisch-parametrischer Verstärker arbeitet auf der Grundlage des nichtlinearen Prozesses der Wellenmischung, wobei eine Pumpquelle bei einer vorgegebenen Wellenlänge, nahe der Null-Dispersionswellenlänge einer optischen Faser, zur Erzeugung von Leerlauf- und Signalbändern aus Selbstauschen heraus führt. Falls ein von außen injiziertes Signal gleichzeitig angewendet wird, kann es in jedem des Signal- oder Leerlaufbandes verstärkt werden, welche bezüglich der Pumpwellenlänge grundsätzlich symmetrisch lokalisiert sind.

**[0009]** Faseroptisch-parametrische Verstärker sind üblicherweise für ihre geringe Effizienz bekannt, was bedeutet, dass sehr hohe Laserpumpenergie notwendig wäre. Die Verstärkung eines faseroptisch-parametrischen Verstärkers hängt generell von drei Pa-

rametern ab; dem nichtlinearen Koeffizienten  $\gamma$ , der Länge  $L$  der Faser, welche als ein Verstärkungsmedium genutzt wird, und der Pumpenergie  $P_p$ . Ein geringer nichtlinearer Koeffizient erfordert die Nutzung einer hohen Pumpenergie oder einer langen Faserlänge. In jüngster Zeit sind jedoch optische Fasern, welche höhere nichtlineare Koeffizienten aufweisen, auch kommerziell verfügbar geworden.

**[0010]** US 6.052.218 offenbart eine optisch-parametrische Hochhelligkeits-Verstärkerreihe, welche energieskalierbare optisch-parametrische Verstärker nutzt, die eine Hochhelligkeitsausgabe zur Verfügung stellt. Die Skalierbarkeit in der Energie wird unter Nutzung einer Reihe von parallelen Kristallverstärkern erreicht, um hohe Laserenergien hand zu haben. Hohe Helligkeit wird unter Nutzung eines optischen Phasenkonjugators erlangt, um den Phasenanfang der Reihe kohärent zu erhalten.

**[0011]** Ein relativ großes Problem bei faseroptisch-parametrischen Verstärkern ist, dass das Verstärkungsprinzip Übersprechen ansteigen lässt. Optische Signale mit einer Wellenlänge werden während des Verstärkungsprozesses bei anderen Wellenlängen, aufgrund von einer Vier-Wellen-Mischung (FWM, Four-Wave mixing), "falsche" Signale ansteigen lassen. In DWDM-Systemen kann solch ein Übersprechen im Allgemeinen nicht akzeptiert werden.

#### Stand der Technik

**[0012]** In US 6.239.903 werden optisch-parametrische Verstärker in Reihe mit Raman-Verstärkern genutzt, um die Verstärkung zu erweitern. Ein ähnlicher Ansatz wird in M. C. Ho, K. Uesaka, M. E. Marhic, Y. Akasaka und L. G. Kazovsky, "200-nm-Bandwidth Fiber Optical Amplifier Combined Parametric and Raman Gain", IEEE J. Lightwave Technol. 19, 977–979 (2001) gezeigt. In US 6,049,417 (äquivalent zu EP 0 883 218) werden parallele Sub-Bänder durch die Nutzung von unterschiedlichen Typen von seltenerden optischen Verstärkern verstärkt. In US 6.317.254 wird ein parallel-optischer Faserverstärker offengelegt, welcher eine parallele EDFA-Konfiguration aufweist, in welcher umgekehrte ASE als eine sekundäre Pumpenquelle wieder genutzt wird. In US 5.452.116 werden parallel-optische Sub-Bandverstärker in Reihe mit einzelnen Voll-Bandverstärkern genutzt, um ungleichmäßige Verstärkungseigenschaften zu kompensieren. In J. Hansryd und P. Andrekson, "Broad-band continuous-wave-pumped fiber optical parametric amplifier with 49-dB gain and wavelength-conversion efficiency", IEEE Photon Technol. Lett. 13, 194–196 (2001) wird die Multisegment-Faserkonstruktion genutzt, um eine relativ große Bandbreite und parametrische Hochverstärkungs-Verstärker zu erreichen. Doppelte Pumpenordnungen sind ebenso angewendet worden; siehe

z. B. C. J. McKinstrie, S. Radic und A. R. Chraplyvy, "Parametric amplifiers driven by two pump waves", IEEE Select. Topics Quantum Electron. 8, 538–547 (2002).

#### Zusammenfassung

**[0013]** Ein häufiges Problem bei parametrischen Verstärkerlösungen, nach dem Stand der Technik, ist, nach den vorangegangenen Diskussionen, potentiell Übersprechen von vier-Wellengemischten Produkten. Darüber hinaus gibt es einen generellen Mangel von Flachheit der verfügbaren Verstärkungsbandbreite, was zusätzliche abflachende Vorrichtungen erfordert. Desweiteren besteht im Allgemeinen ebenso der Wunsch nach einer erhöhten Bandbreite.

**[0014]** Ein Ziel der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine parametrische Verstärkervorrichtung und ein Verfahren mit verbesserter Unterdrückung von Übersprechen zur Verfügung zu stellen. Ein weiteres Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, eine parametrische Verstärkervorrichtung und ein Verfahren zur Verfügung zu stellen, welche Verstärkung in einem weiten Frequenzband bieten. Außerdem ist es ein weiteres Ziel der vorliegenden Erfindung, eine parametrische Verstärkervorrichtung und ein Verfahren zur Verfügung zu stellen, welche eine, z. B. für Wellenlängentrennungs-Multiplex-Anwendungen, ausreichende Verstärkungsflachheit haben. Zusätzliche Ziele sind hohe Verstärkungen zu produzieren, vorzugsweise über 20 dB über breite Bandbreiten. Die Verstärker sollten vorzugsweise ebenso in jedem spektralen Bereich, innerhalb des verlustarmen Bandes von optischen Fasern, betrieben werden können.

**[0015]** Die obigen Ziele werden durch Vorrichtungen, Systeme und Verfahren gemäß den hier enthaltenen Patentansprüchen erreicht. Generell wird eine Anzahl von nichtlinearen optischen Fasern in einer parallelen Konfiguration konfiguriert. Die Fasern werden mit optischen Pumpen gepumpt, welche für jede Faser eine geringfügig längere Wellenlänge als die Null-Dispersionswellenlänge aufweisen. Indem optischen Signalen innerhalb eines bestimmten Wellenlängenintervalls gestattet wird in unterschiedliche Fasern ein- und auszutreten, können parametrische Verstärkungen erreicht werden. Durch das Auswählen der gestatteten Wellenlängenintervalle, welche vorzugsweise bei einem Hochverstärkungsteil des verstärkten Spektrums lokalisiert sind, so dass die Pumpwellenlänge außerhalb des Intervalls gelegen ist, wird Übersprechen aufgrund von konjugierten Signalen bezüglich der Pumpwellenlängen unterdrückt werden.

**[0016]** Die nichtlinearen Fasern können durch getrennte Laserpumpen gepumpt werden, oder zwei oder mehrere der nichtlinearen Fasern können, in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Fasereigen-

schaften, durch die selbe Pumpe gepumpt werden. Durch Auslegen der Fasereigenschaften, so wie der Null-Dispersionswellenlänge, des Dispersionskoeffizienten zweiter Ordnung und des Dispersionskoeffizienten vierter Ordnung, können nützliche Verstärkungseigenschaften in unterschiedlichen Wellenlängenintervallen erreicht werden. Durch das Kombinieren einer Anzahl von so ausgelegten Sub-Bandverstärkern, kann übersprechen-unterdrückte parametrische Verstärkung erreicht werden. Die Verstärker werden vorzugsweise in WDM- oder DWDM-Systemen genutzt.

**[0017]** Mit der vorliegenden Erfindung wird nahezu jedes Übersprechen, aufgrund von konjugierter Erzeugung, unterdrückt. Desweiteren werden hohe Verstärkungen innerhalb eines Breitbandspektrums erreicht, welches sich von etwa 1250 nm bis etwa 1650 nm erstreckt und auf diese Weise das S-C-L Band abdeckt. Unter geeigneten Bedingungen sind diese erzeugten Bänder flach genug, so dass keine zusätzliche abflachende Vorrichtung erforderlich ist.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0018]** Die Erfindung, zusammen mit weiteren Zielen und deren Vorteile, kann am besten in Bezug auf die folgenden Beschreibungen, zusammen mit den begleitenden Zeichnungen verstanden werden, in welchen:

**[0019]** [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung einer Ausführungsform einer optischen Verstärkervorrichtung, nach der vorliegenden Erfindung ist;

**[0020]** [Fig. 2A](#) ein Diagramm ist, welches ein ideales Verstärkerspektrum einer parametrischen Verstärkung in einer der nichtlinearen Fasern von [Fig. 1](#) darstellt;

**[0021]** [Fig. 2B](#) ein Diagramm ist, welches ein ideales Verstärkerspektrum einer parametrischen Verstärkung in einer anderen der nichtlinearen Fasern von [Fig. 1](#) darstellt;

**[0022]** [Fig. 2C](#) ein Diagramm ist, welches ein ideales Verstärkerspektrum einer parametrischen Verstärkung in dem kombinierten Signal in der optischen Ausgabe von [Fig. 1](#) darstellt;

**[0023]** [Fig. 3](#) eine schematische Darstellung einer anderen Ausführungsform einer optischen Verstärkervorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung ist;

**[0024]** [Fig. 4](#) ein Diagramm ist, welches ein ideales Verstärkerspektrum einer parametrischen Verstärkung in der Ausführungsform von [Fig. 3](#) ist;

**[0025]** [Fig. 5](#) eine schematische Darstellung von noch einer anderen Ausführungsform einer optischen

Verstärkervorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung ist;

**[0026]** [Fig. 6](#) ein Diagramm ist, welches ein ideales Verstärkerspektrum von parametrischer Verstärkung in der Ausführungsform von [Fig. 5](#) darstellt;

**[0027]** [Fig. 7](#) ein Diagramm ist, welches ein ideales Verstärkerspektrum von parametrischer Verstärkung in einer zehn-zweigigen Vorrichtung, gemäß der vorliegenden Erfindung veranschaulicht;

**[0028]** [Fig. 8](#) ein Diagramm ist, welches das Verstärkerspektrum einer parametrischen Verstärkung in nichtlinearen optischen Fasern mit welche unterschiedlichen Dispersionskoeffizienten zweiter und vierter Ordnung veranschaulicht;

**[0029]** [Fig. 9](#) eine schematische Darstellung einer hybriden Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist, welche eine Kombination mit anderen Verstärkungsverfahren nutzt;

**[0030]** [Fig. 10](#) ein Flussdiagramm einer Ausführungsform eines Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung ist; und

**[0031]** [Fig. 11](#) ein Blockschema eines optischen Systems ist, in welchem Verstärkervorrichtungen nach der vorliegenden Erfindung vorzugsweise genutzt werden.

#### Detaillierte Beschreibung

**[0032]** In der vorliegenden Erfindung wird eine neue, eine parallele Konfiguration anwendende Anordnung demonstriert, welche es ermöglicht, Übersprechen zu verringern. Dieselbe Anordnung kann weiter genutzt werden, um die nutzbare Bandbreite zu erweitern. Selbst wenn kommerziell verfügbare optische Fasern mit der höchsten durch sie erlaubten Nichtlinearität genutzt werden, wird gezeigt werden, dass mit der vorliegenden Anordnung eine noch größere Bandbreite möglich ist.

**[0033]** Die grundlegende Funktionsweise von faser-optisch-parametrischen Verstärkern ist in dem Stand der Technik bekannt. Es wird eine optische Faser genutzt, welche nichtlineare Eigenschaften aufweist. Aufgrund von Vier-Wellen-Mischung, kann ein optisches Hochintensitäts-Signal in optische Signale übertragen werden, welche eine unterschiedliche Wellenlänge aufweisen. Falls eine spezifische Frequenz in einer nichtlinearen optischen Faser angewendet wird, können die Seitenband-Frequenzen unter passenden Umständen aus Rauschen aufgebaut werden. Die optimale Betriebsbedingung tritt auf, wenn die Pumpwellenlänge geringfügig länger als die Null-Dispersionswellenlänge der nichtlinearen Faser ist. Verstärkungsspektren sind bezüglich der Pumpe,

welche ein Signal und ein Leerlaufband bietet, annähernd symmetrisch.

**[0034]** Für ein tieferes Verständnis der grundlegenden physischen Prinzipien, wird Bezug genommen auf: G. P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics", 2nd ed., Academic Press, San Diego, 1995, Seiten 404–435, und J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund, J. Li und P.-O. Hedekvist, "Fiberbased optical parametric amplifiers and their applications", IEEE Select. Topics Quantum Electron. 8, 506–520 (2002).

**[0035]** Die Erzeugung des Leerlaufs kann jedoch zu Vier-Wellen-Mischung-(FWM) Übersprechen mit Kanälen im Leerlaufband führen. Dieses spezielle Übersprechen entsteht aus der Schaffung von konjugierten Signalen bezüglich der Pumpwellenlänge und ist ein großer Spender für das gesamte Übersprechen in parametrischen Verstärkern. Der Ursprung des konjugierten Signal-Übersprechens wird in den nichtlinearen Effekten in der optischen Faser gefunden und ist auf diese Weise einzigartig für parametrische Verstärker. Die Hervorbringung von Übersprech-Signalen begrenzt die nutzbare Bandbreite in einem typischen Fall für die Hälfte des gesamten Verstärkungsspektrums. Dies setzt auch eine Begrenzung für die praktische Nutzung von faseroptisch-parametrischen Verstärkern nach dem Stand der Technik fest, da das Signalband in der Praxis nur von 15 bis 25 nm in Betrieb ist. Wenn man jedoch eine parallele Geometrie nutzt, so wie die unten beschriebene, ist man in der Lage, Übersprechen in speziell konjugierten Signalen, bezüglich der optischen Pumpwellenlänge, zu verringern. Als ein weiterer Vorteil kann das nutzbare Betriebsband verstärkt werden und ein flaches Verstärkungsspektrum hervorgebracht werden.

**[0036]** In [Fig. 1](#) wird eine Ausführungsform einer optischen Verstärkervorrichtung, nach der vorliegenden Erfindung, dargestellt. Es wird angenommen, dass ein optischer Eingang **10**, z. B. eine eingehende optische Faser eine Anzahl von optischen Signalen unterschiedlicher Wellenlänge transportiert. Die optischen Signale werden in einem optischen Demultiplexer **14** in zwei Sub-Bänder aufgeteilt. Die Sub-Bänder sind ungeteilt, z. B. haben sie keine überlappenden Teile. Signale von einem Sub-Band werden in einen ersten Zweig geleitet, welcher eine nichtlineare optische Faser **12A** aufweist, und Signale von dem anderen Sub-Band werden in einen zweiten Zweig geleitet, welcher eine nichtlineare Faser **12B** aufweist.

**[0037]** Die erste und zweite nichtlineare optische Faser **12A** und **12B** weisen in der vorliegenden Ausführungsform im Wesentlichen dieselben Eigenschaften auf, z. B. hinsichtlich Nichtlinearität oder Dispersion. Eine optische Pumpe, in dieser Ausführungsform eine Laserpumpe **18**, ist aufgebaut zum Beliefern der beiden nichtlinearen optischen Fasern

**12A** und **12B** mit monochromatischem Licht, welches eine Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  aufweist. Die Laserpumpe **18** ist vorzugsweise einstellbar, um feine Einstellungen der Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  zu ermöglichen. Eine Verbindungsbreite von etwa 0,1 nm wird bevorzugt, da Brillouin-Streueffekte dann vermieden werden. Die optischen Fasern **12A** und **12B** sind nichtlinear, d.h. sie bieten einen  $\gamma$  Wert (Nichtlinearitätskoeffizient) größer als Null, vorzugsweise erheblich größer. Die optischen Fasern **12A** und **12B** haben weiter eine Null-Dispersionswellenlänge  $\lambda_0$ , welche geringfügig kürzer als die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  ist.

**[0038]** Die nichtlinearen optischen Fasern **12A** und **12B** sind weiter an einen optischen Multiplexer **16** angeschlossen, welcher die Signale von den nichtlinearen optischen Fasern **12A** und **12B** in eine optische Ausgabe **20**, z. B. eine ausgehende optische Faser, vereint oder multiplext. Der optische Multiplexer **16** ist eine "Spiegel"-Vorrichtung für den optischen Demultiplexer **14** in dem Sinne, dass nur Signale, welche im ersten Sub-Band erscheinen, von der ersten nichtlinearen Faser **12A** zugelassen werden, und dass nur Signale, welche im zweiten Sub-Band erscheinen, von der zweiten nichtlinearen Faser **12B** zugelassen werden.

**[0039]** [Fig. 2A](#) ist ein Diagramm, welches ein idealisiertes optisches Spektrum **100** darstellt, welches von einem faseroptisch-parametrischen Verstärker erreicht wird, z. B. einer nichtlinearen, durch eine Laserpumpe von geeigneter Wellenlänge belieferten Faser. Die Verstärkung bietet zwei Bänder, ein Signalband **102** mit kürzeren Wellenlängen als die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  und ein Leerlaufband **104** mit längeren Wellenlängen als die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$ . Das Leerlaufband **104** ist im Wesentlichen ein Spiegelband des Signalbands **102** bezüglich der Pumpwellenlänge  $\lambda_p$ . Man kann auch bemerken, dass die Null-Dispersionswellenlänge  $\lambda_0$  um einiges kürzer als die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  ist. Optische Signale **106** werden im Signalband zur Verfügung gestellt und dementsprechend verstärkt. Aufgrund von FWM-Effekten treten jedoch auch Übersprech-Signale **108** in einem Leerlaufband **104** auf. Diese Übersprech-Signale sind konjugierte Signale von optischen Signalen **106**, bezüglich der Pumpwellenlänge  $\lambda_p$ . In der vorliegenden Ausführungsform war die Null-Dispersionswellenlänge  $\lambda_0$  1545 nm und die Pumpwellenlänge so gewählt, dass der Dispersionskoeffizient zweiter Ordnung  $\beta_2$  gleich  $-0,035 \text{ ps}^2/\text{km}$  ist.

**[0040]** Falls nur optische Signale **106** in einem Sub-Band  $\Delta\lambda_1$  zugelassen werden, wobei das Sub-Band  $\Delta\lambda_1$  auf eine Seite der Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  begrenzt ist, werden alle Übersprech-Signale **108**, welche konjugierte Signale der optischen Signale **106** bezüglich des Pumpsignals sind, auf der anderen Seite der Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  erscheinen. In [Fig. 2A](#) ist das Sub-Band  $\Delta\lambda_1$  ein Sub-Band, welches

sich über ein Wellenlängenintervall erstreckt, welches die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  als eine obere Begrenzung aufweist. Die Übersprech-Signale **108** erscheinen dann als ein Sub-Band  $\Delta\lambda_2$ , welches sich über ein Wellenlängenintervall erstreckt, welches die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  als eine untere Begrenzung aufweist. Um Übersprechen zu unterdrücken, muss die Pumpwellenlänge außerhalb jedes Sub-Bands gelegen sein, welches zugelassen wird, durch den parametrischen Verstärker in diesem speziellen Zweig verstärkt zu werden.

**[0041]** Bei der Untersuchung von **Fig. 2A**, mit Konfiguration von **Fig. 1** im Gedächtnis, kann die in **Fig. 2A** beschriebene Situation mit der ersten nichtlinearen optischen Faser **12A** übereinstimmen. Optische Signale **106** im Sub-Band  $\Delta\lambda_1$  sind die einzigen, welche zugelassen werden, in die erste nichtlineare optische Faser **12A** einzutreten. Ebenso sind optische Signale im Sub-Band  $\Delta\lambda_1$  auch die einzigen, welche zugelassen werden, vom ersten Zweig übertragen zu werden, z. B. von der ersten nichtlinearen Faser **12A** in die optische Ausgangsfaser **20**. Dies bedeutet, dass die Übersprech-Signale **108** daran gehindert werden, in die Ausgangsfaser **20** einzutreten. Der Beitrag von der ersten nichtlinearen optischen Faser **12A** an das Signal in der Ausgangsfaser **20** wird dann mit dem schraffierten Teil in **Fig. 2A** übereinstimmen.

**[0042]** **Fig. 2B** stellt eine übereinstimmende Situation im zweiten Zweig, z. B. in der zweiten nichtlinearen optischen Faser **12B**, dar. Hier werden optische Signale **112** im Sub-Band  $\Delta\lambda_2$  zugelassen einzutreten. Die optischen Signale **112** werden im Leerlaufband **104** verstärkt und lassen die Übersprech-Signale **114** im Signalband **102** ansteigen. Da nur optische Signale innerhalb des Sub-Bands  $\Delta\lambda_2$  zugelassen werden, von der nichtlinearen optischen Faser **12B** in die Ausgangsfaser **20** übertragen zu werden, werden die Übersprechsignale **114** unterdrückt.

**[0043]** **Fig. 2C** stellt das ideale optische Spektrum in der Ausgangsfaser **20** dar. Wie leicht zu bemerken ist, ist der Ausgang der parallelen Verstärkerkonfiguration eine Kombination der zwei Spektren von **Fig. 2A** und **Fig. 2B**, welche durch Übersprech-Signale weniger beeinflusst ist. Die Bandbreite 1532 nm bis 1555 nm ist des Weiteren verdoppelt, verglichen mit, nach dem Stand der Technik typischen, parametrischen Verstärkern. Man sollte im Gedächtnis behalten, dass etwas Übersprechen immer noch vorhanden ist, da Übersprechen auch aus der Interaktion zwischen z. B. zwei Signalwellenlängen in demselben Sub-Band erscheint. Es sind jedoch konjugierte Signale bezüglich der Pumpwellenlänge, aufgrund der hohen Dichte der Pumpwellenlänge, ein großer Beitrag zum Gesamt-Übersprechen in parametrischen Verstärkersystemen.

**[0044]** Die Verstärkung von **Fig. 2C** variiert signifikant über der Bandbreite, was auch in bestimmten Anwendungen ziemlich störend ist. Verstärkungsabflachende Vorrichtungen (nicht gezeigt) können angewendet werden um ein noch ebeneres Verstärkungsspektrum zur Verfügung zu stellen. In vielen Anwendungen werden auch noch höhere Bandbreiten, als die in **Fig. 2C** erreichte, erforderlich.

**[0045]** In **Fig. 3** wird eine weitere Entwicklung des grundlegenden Prinzips von **Fig. 1** als eine andere Ausführungsform gemäß der vorliegenden Erfindung dargestellt. Zuerst sind in dieser Ausführungsform drei nichtlineare optische Fasern **12A**, **12B** und **12C** vorhanden. Der optische Demultiplexer **14** und der optische Multiplexer **16** sind dementsprechend angepasst, um die eingehenden optischen Signale in drei Sub-Bänder aufzuteilen. Alle nichtlinearen optischen Fasern **12A–C** werden in dieser Ausführungsform mit derselben Laserpumpe **18** gepumpt. Als ein veranschaulichendes Beispiel wird die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  auf 1450 nm festgesetzt. Im Gegensatz zur Situation in **Fig. 1** weisen die unterschiedlichen nichtlinearen optischen Fasern **12A–C** unterschiedliche optische Eigenschaften auf.

**[0046]** In **Fig. 4** stellt ein Diagramm vorhergesagte Verstärkungseigenschaften von Leerlaufbändern für die drei nichtlinearen optischen Fasern **12A–C** von **Fig. 3** dar. Die Kurve **120** stimmt mit der ersten nichtlinearen optischen Faser **12A** überein, welche in diesem speziellen Beispiel einen  $\beta_2$ -Parameter von  $-0,060 \text{ ps}^2/\text{km}$  aufweist. Die Kurve **122** stimmt mit der zweiten nichtlinearen optischen Faser **12B** überein, welche in diesem speziellen Beispiel einen  $\beta_2$ -Parameter von  $-0,020 \text{ ps}^2/\text{km}$  aufweist. Die Kurve **124** stimmt mit der dritten nichtlinearen optischen Faser **12C** überein, welche in diesem speziellen Beispiel einen  $\beta_2$ -Parameter von  $-0,008 \text{ ps}^2/\text{km}$  aufweist. Auch hier ist die Null-Dispersionswellenlänge  $\lambda_0$  für die unterschiedlichen Zweige unterschiedlich. Der optische Demultiplexer **14** und der optische Demultiplexer **16** sind aufgebaut, um Signale innerhalb eines ersten Wellenlängenbands  $\Delta\lambda_3$  zuzulassen in die erste nichtlineare optische Faser **12A** ein- und auszutreten. Ebenso werden Signale eines zweiten Wellenlängenbandes  $\Delta\lambda_4$  in die zweite nichtlineare optische Faser **12B** zugelassen und schließlich werden Signale eines dritten Wellenlängenbandes  $\Delta\lambda_5$  in die dritte nichtlineare optische Faser **12C** zugelassen. In jeder nichtlinearen optischen Faser **12A–C** wird die Verstärkung eines entsprechenden Sub-Bands ausgeführt und die übersprech-verringerten Signale werden schließlich in der Ausgangsfaser **20** kombiniert.

**[0047]** Das Ergebnis von solch einer Verstärkung wird aus dem Diagramm von **Fig. 4** klar. Über eine Bandbreite, welche sich von etwa 1470 nm bis etwa 1550 nm erstreckt, d.h. ein Intervall von 80 nm, variiert die Verstärkung nur zwischen  $G_L$  und  $G_U$ , was ei-

ner Verstärkungsvariation von nur  $\pm 4\%$  entspricht. Hier wäre zu beachten, dass die ausgewählten Sub-Bänder sich nicht über den ganzen Weg zur Pumpfrequenz hinunter erstrecken, sondern nur den Hochverstärkungsteil der Verstärkungskurve nutzen. Das wichtige Merkmal ist jedoch, dass das Sub-Band nicht die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  beinhalten sollte. Es wird angenommen, dass in den meisten Anwendungen das Sub-Band sehr gut getrennt von der Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  gelegen sein wird.

**[0048]** In [Fig. 5](#) wird noch eine andere Ausführungsform nach der vorliegenden Erfindung dargestellt. Auch in dieser Ausführungsform sind drei optische Fasern **12A**, **12B** und **12C** vorhanden. Der optische Demultiplexer **14** und der optische Multiplexer **16** sind dementsprechend angepasst, um die eingehenden optischen Signale in drei Sub-Bänder aufzuteilen. In dieser Ausführungsform wird jede der nichtlinearen optischen Fasern **12A–C** mit einer getrennten Laserpumpe **18A–C** gepumpt. Als ein veranschaulichendes Beispiel wird die Pumpwellenlänge  $\lambda_p$  für die erste Faser auf 1450 nm, für die zweite Faser auf 1470 nm und für die dritte Faser auf 1490 nm festgesetzt. In Übereinstimmung mit der Situation in [Fig. 3](#) weisen die unterschiedlichen nichtlinearen optischen Fasern **12A–C** unterschiedliche optische Eigenschaften auf.

**[0049]** In [Fig. 6](#) stellt ein Diagramm vorhergesagte Verstärkungseigenschaften von Leerlaufbändern für die drei nichtlinearen optischen Fasern **12A–C** von [Fig. 5](#) dar. Alle Fasern in diesem veranschaulichenden Beispiel weisen einen  $\beta_2$ -Parameter von  $-0,020 \text{ ps}^2/\text{km}$  auf. Die Kurve **126** entspricht der ersten nichtlinearen optischen Faser **12A**. Die Kurve **128** entspricht der zweiten nichtlinearen optischen Faser **12B**. Die Kurve **130** entspricht der dritten nichtlinearen optischen Faser **12C**. Hier kann angemerkt werden, dass die Null-Dispersionswellenlänge  $\lambda_0$  für die unterschiedlichen Zweige unterschiedlich ist, folgend der Pumpwellenlänge  $\lambda_p$ . Die Null-Dispersionswellenlänge  $\lambda_0$  ist in der ersten nichtlinearen Faser **12A** am kürzesten und in der dritten nichtlinearen Faser **12C** am längsten. Der optische Multiplexer **14** und der optische Demultiplexer **16** sind aufgebaut, um zuzulassen, dass Signale innerhalb eines ersten Wellenlängenbandes  $\Delta\lambda_6$  in die erste nichtlineare optische Faser **12A** ein- und austreten. Ebenso werden Signale eines zweiten Wellenlängenbandes  $\Delta\lambda_7$  in die zweite nichtlineare optische Faser **12B** zugelassen und schließlich werden Signale eines dritten Wellenlängenbandes  $\Delta\lambda_8$  in die dritte nichtlineare optische Faser **12C** zugelassen. In jeder nichtlinearen optischen Faser **12A–C** wird die Verstärkung eines entsprechenden Sub-Bands durchgeführt und die über-sprech-verringerten Signale werden schließlich in der Ausgangsfaser **20** kombiniert.

**[0050]** Das Ergebnis von solch einer Verstärkung

wird aus dem Diagramm von [Fig. 6](#) klar. Über eine Bandbreite, welche sich von etwa 1487 nm bis etwa 1553 nm erstreckt, d.h. über ein Intervall von 66 nm ist die Verstärkung fast konstant ( $\pm 2\%$ ).

**[0051]** Im Licht der obigen Ausführungsformen kann jeder Fachmann erkennen, dass verschiedene Kombinationen und Alternativen möglich sind. Zuallererst kann fast jede Anzahl von Zweigen, d.h. nichtlineare optische Fasern, genutzt werden, was die Möglichkeiten die Bandbreite auszudehnen steigert und die gesamten Verstärkungseigenschaften verbessert. Jede nichtlineare optische Faser kann mit einer eigenen Pumpe oder einer, für eine oder mehrere andere nichtlineare optische Fasern gemeinsamen Pumpe gepumpt werden. Die optische Faser in jedem Zweig, welcher parametrische Verstärkung nutzt, weist dispersive und nichtlineare Eigenschaften auf, welche an die genutzte Pumpwellenlänge und den speziellen, durch den optischen Multiplexer ausgewählten Wellenlängenintervall angepasst sind. In jeder nichtlinearen optischen Faser wird entweder das Signalband oder das Leerlaufband genutzt, jedoch nicht beide in derselben Faser. Es können jedoch gleichzeitig das Signalband in einer Faser und das Leerlaufband in einer anderen Faser genutzt werden.

**[0052]** In [Fig. 7](#) wird ein Verstärkungsdiagramm dargestellt, welches einem theoretischen 10-zweigigen Aufbau entspricht. Hier pumpen 5 Laserpumpen jeweils zwei Zweige. In jedem solcher Paare nutzt ein Zweig das Signalband und der andere nutzt das Leerlaufband. Auf diese Weise kann eine nutzbare Bandbreite von 240 nm mit fast überhaupt keiner Verstärkungsvariation zur Verfügung gestellt werden. Dies entspricht fast der zehnfachen der normalen Bandbreite eines Verstärkers, welcher auf Seltenerden-Dotierung basiert.

**[0053]** Die Prinzipien der vorliegenden Erfindung sind auch experimentell demonstriert worden. Zwei unterschiedliche dispersionsverschobene Fasern (DSF, Dispersion Shifted Fibers) mit jeweils Null-Dispersion bei 1545 nm bzw. 1556 nm werden unter der Nutzung von zwei Erbium dotierten Faserringlasern gepumpt. Die Pumplaser wiesen jeweils Wellenlängen von 1546,6 bzw. 1558,6 nm auf. Diese Laser waren einstellbar und wiesen eine Verbindungsbreite von etwa 0,4 nm auf. Das zu verstärkende optische Signal wurde mit einem einstellbaren externen Hohlraumdiodenlaser erzeugt. Das Signal wurde in eine oder die andere Faser gekoppelt, in Abhängigkeit von der Wellenlänge durch ein Breitband-WDM, welches in umgekehrter Richtung (als Demultiplexer) genutzt wird; mit dem ersten Fenster oder Sub-Band von 1525 nm bis 1540 nm und dem zweiten Fenster über 1540 nm. An diesem Punkt werden Signal und Pumpe gleichzeitig in den geeigneten DSF gekoppelt. Die Signale von den beiden Fasern werden über ein anderes Breitband-WDM der selben Art (genutzt als ein

Multiplexer) kombiniert und an einen optischen Spektralanalyzer angeschlossen.

**[0054]** Die experimentellen Ergebnisse ergaben, dass die ganze nutzbare Bandbreite mit Verstärkung über 12 dB etwa 27 nm war, welche von derselben Ordnung wie übliche Erbium dotierte Verstärker ist. Das gesamte System wurde unter Nutzung von nur standard-dispersionsverschobenen Fasern und serienmäßigen optischen Komponenten aufgebaut.

**[0055]** Wenn man die Vorzüge der vorliegenden Erfindung bewertet, kann man erkennen, dass die Ausführung stark von der aktuellen Auswahl von Fasereigenschaften, Pumpwellenlängen und Pumpleistungen abhängig ist. Durch das Auslegen der Parameter der Faser, z. B. den nichtlinearen Koeffizienten  $\gamma$  oder Dispersionsverhältnissen, können geeignete Verstärkungsantworten erreicht werden. Am häufigsten weisen genutzte Fasern nichtlineare Koeffizienten  $\gamma$  von bis zu  $2W^{-1}km^{-1}$ . Optische Fasern mit nichtlinearen Koeffizienten von  $2W^{-1}km^{-1}$  sind jedoch heute nicht unüblich. Da die gesamte Verstärkung stark von der Pumpleistung, der Faserlänge und dem nichtlinearen Koeffizienten abhängt, sind nichtlineare Koeffizienten  $\gamma$  über  $10W^{-1}km^{-1}$  vorzuziehen.

**[0056]** Dispersionsverhältnisse, so wie Null-Dispersionswellenlänge  $\lambda_0$  und Dispersionskoeffizienten zweiter Ordnung  $\beta_2$  können während der Herstellung von optischen Fasern variiert werden, um jede nichtlineare Faser so einzustellen, um für einen spezifischen Wellenlängenbereich geeignet zu sein. Es wird auch festgestellt, dass selbst der Dispersionskoeffizient vierter Ordnung  $\beta_4$  zum Auslegen geeigneter Fasereigenschaften nutzbar ist. In **Fig. 8** wird eine Reihe von Verstärkungsspektren mit variierendem  $\beta_4$ -Parameter dargestellt. Der  $\beta_4$  variiert hier von  $1,0 \cdot 10^{-4} ps^4 km^{-1}$  bis  $5,0 \cdot 10^{-3} ps^4 km^{-1}$  mit einer festgesetzten Fasernichtlinearität von  $\gamma = 15 km^{-1} \cdot P_p$  und einer Faserlänge  $L = 0,20 km$  ( $\beta_2$  variiert auch von  $-0,0316$  bis  $-0,224 ps^2/km$ ). Ein niedrigerer  $\beta_4$ -Wert ergibt im Allgemeinen eine flachere und breitere Verstärkungskurve, siehe Kurve **132**. Ein höherer  $\beta_4$ -Wert ergibt im Allgemeinen eine engere Verstärkungskurve, siehe Kurve **134**. Bei einem Vergleich von **Fig. 8** mit **Fig. 4** wird klar, dass die Verstärkungsvariation über die gesamte Bandbreite des FOPA sich Null annähern kann, ohne die Notwendigkeit für zusätzliche Abflachungsvorrichtungen. Auf diese Weise sind die Kombinationsmöglichkeiten nahezu unbegrenzt und weitere Entwicklungen von optischen Glasfaserkonstruktionen steigern die Möglichkeiten. Mit passenden Faserkonstruktionen sollte der Anwendungsbereich eines gesamten Wellenlängenbands von 1250–1650 nm möglich sein.

**[0057]** Eine andere Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird in **Fig. 9** dargestellt. Hier werden zwei parallele Zweige von nichtlinearen optischen

Fasern mit einer gemeinsamen Pumpe gepumpt. Einer dieser Zweige verstärkt Signale innerhalb des Hochverstärkungsteils des Signalbands und der andere Zweig verstärkt Signale innerhalb des Hochverstärkungsteils des Leerlaufbands. Ein Wellenlängenband zwischen diesen Hochverstärkungsbändern ist jedoch durch diese Zweige nicht abgedeckt. Ein dritter Zweig versorgt dieses Wellenlängenband. In diesem Zweig wird eine andere optische Verstärkungstechnologie **19** angewendet, z. B. seltenerd-dotierter Verstärker, Raman-Verstärker etc.

**[0058]** In **Fig. 10** wird eine Ausführungsform einer Prozedur der vorliegenden Erfindung dargestellt. Die Prozedur beginnt in Schritt **200**. In Schritt **201** werden optische Signale in ein erstes Wellenlängenintervall und ein zweites Wellenlängenintervall gedemultiplext. In Schritt **202** werden Signale des ersten Wellenlängenintervalls zu einer ersten nichtlinearen optischen Faser geleitet. Parallel hierzu werden in Schritt **204** Signale des zweiten Wellenlängenintervalls zu einer zweiten nichtlinearen Faser geleitet. In Schritt **206** wird eine erste parametrische Verstärkung durch das Beliefern der nichtlinearen Faser mit Licht von einer Pumpe mit einer geeigneten Wellenlänge durchgeführt. Parallel hierzu wird in Schritt **208** eine zweite parametrische Verstärkung durchgeführt. Schließlich werden in Schritt **210** die verstärkten optischen Signale in ein abschließendes ausgehendes Signal gemultiplext. Die Prozedur wird in Schritt **212** beendet.

**[0059]** In **Fig. 11** wird ein generelles optisches Kommunikationssystem dargestellt, in welchem eine optische Verstärkervorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung vorteilhaft genutzt wird. Eine Anzahl von Knoten **56** kommunizieren durch doppelt-geschichtete Verbindungen **54** mit einem Mittelpunkt bzw. Hub **50**. Der Mittelpunkt **50** multiplext die unterschiedlichen Signale gemäß einem WDM-Schema und vorzugsweise gemäß DWDM auf eine optische Faser **52**, welche zwei Mittelpunkte bzw. Hubs miteinander verbindet. Während des Wegs werden die optischen Signale abgeschwächt und bei bestimmten Positionen entlang der optischen Faser **52**, müssen die optischen Signale durch optische Verstärkervorrichtungen **1** verstärkt werden, vorzugsweise gemäß der vorliegenden Erfindung. Jeder Fachmann versteht, dass die Anwendungen der Prinzipien der vorliegenden Erfindung, z. B. gegenüber Speichernetzstrukturen nicht begrenzt sind, sondern in allen anderen Typen von optischen Netzwerken arbeiten, z. B. auf der Grundlage von Ringnetzstrukturen, Punkt-zu-Punkt-Anschluss, Punkt-zu-Mehrfachpunkt-Anschlüssen. Es wird von Fachleuten verstanden werden, dass verschiedene weitere Modifikationen und Veränderungen an der vorliegenden Erfindung ohne Abweichung von deren Umfang gemacht werden können, der durch die beigefügten Patentansprüche definiert ist.

## Referenzen

- US 5.452.116; US 6.049.417; US 6.239.903;  
 M. C. Ho, K. Uesaka, M. E. Marhic, Y. Akasaka und L. G. Kazovsky, "200-nm-Bandwidth Fiber Optical Amplifier Combined Parametric and Raman Gain", IEEE J. Lightwave Technol. 19, 977–979 (2001);  
 J. Hansryd und P. Andrekson, "Broad-band continuous-wavepumped fiber optical parametric amplifier with 49-dB gain and wavelength-conversion efficiency", IEEE Photon Technol. Lett. 13, 194–196 (2001);  
 C. J. McKinstrie, S. Radic und A. R. Chraplyvy, "Parametric amplifiers driven by two pump waves", IEEE Select. Topics Quantum Electron. 8, 538–547 (2002).  
 G. P. Agrawal, "Nonlinear fiber optics" ("Nichtlineare Faseroptik"), 2nd ed., Academic Press, San Diego, 1995, Seiten. 404–435.  
 J. Hansryd, P. A. Andrekson, M. Westlund, J. Li und P.-O. Hedekvist, "Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications", IEEE Select. Topics Quantum Electron. 8, 506–520 (2002).

## Patentansprüche

1. Optische Verstärkervorrichtung (1) mit:  
 einem optischen Eingang (10);  
 einer ersten nichtlinearen optischen Faser (12A–C), die einen ersten Satz von Fasereigenschaftsparametern aufweist, mit einer ersten Null-Dispersionswellenlänge ( $\lambda_0$ );  
 einer zweiten nichtlinearen optischen Faser (12A–C), die einen zweiten Satz von Fasereigenschaftsparametern aufweist, mit einer zweiten Null-Dispersionswellenlänge ( $\lambda_0$ );  
 einem optischen Demultiplexer (14), der den optischen Eingang (10) und die erste und zweite nichtlineare optische Faser (12A–C) miteinander verbindet, und der optische Signale in einem ersten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1$ – $\Delta\lambda_8$ ) zur ersten nichtlinearen optischen Faser (12A–c) und optische Signale in einem zweiten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1$ – $\Delta\lambda_8$ ) zur zweiten nichtlinearen optischen Faser (12A–C) leitet;  
 mindestens eine optische Pumpe (18; 18A–C), die die erste und zweite nichtlineare optische Faser (12A–C) mit einer Strahlung, die eine Pumpwellenlänge ( $\lambda_p$ ) in der Nähe der entsprechenden Null-Dispersionswellenlänge ( $\lambda_0$ ) aufweist, pumpt;  
 wobei die erste nichtlineare optische Faser (12A–C) eine hohe parametrische Verstärkung in dem ersten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1$ – $\Delta\lambda_8$ ) und die zweite nichtlineare optische Faser (12A–C) eine hohe parametrische Verstärkung in dem zweiten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1$ – $\Delta\lambda_8$ ) ergibt;  
 einem optischen Ausgang (20); und  
 einem optischen Multiplexer (16) der die erste und zweite nichtlineare optische Faser (12A–C) und den optischen Ausgang (20) miteinander verbindet, und der optische Signale von der ersten und der zweiten nichtlinearen optischen Faser (12A–C) in dem optischen Ausgang (20) vereint;

einer Pumpwellenlänge ( $\lambda_p$ ), die der ersten nichtlinearen optischen Faser zugeführt wird und die außerhalb des ersten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1$ – $\Delta\lambda_8$ ) positioniert ist, und eine zweite Pumpwellenlänge ( $\lambda_p$ ), die der zweiten nichtlinearen optischen Faser (12A–C) zugeführt wird und die außerhalb des zweiten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1$ – $\Delta\lambda_8$ ) positioniert ist.

2. Optische Verstärkervorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1$ – $\Delta\lambda_8$ ) an einem Hochverstärkungsanteil einer Verstärkungsverteilung (100; 120, 122, 124; 126, 128, 130; 132, 134) der ersten parametrischen Verstärkung in der ersten nichtlinearen optischen Faser (12A–C) positioniert ist, und das zweite Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1$ – $\Delta\lambda_8$ ) an einem Hochverstärkungsanteil einer Verstärkungsverteilung (100; 120, 122, 124; 126, 128, 130; 132, 134) der parametrischen Verstärkung in der zweiten nichtlinearen optischen Faser (12A–C) positioniert ist.

3. Optische Verstärkervorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Satz von Glasfasereigenschaftsparametern unterschiedlich zum zweiten Satz von Glasfasereigenschaftsparametern ist.

4. Optische Verstärkervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die erste nichtlineare optische Faser (12A–C) und die zweite nichtlineare optische Faser (12A–C) mit einer gemeinsamen optischen Pumpe (18) gepumpt werden, wobei in erste und zweite nichtlineare optische Fasern (12A–C) mit der selben Pumpwellenlänge ( $\lambda_p$ ) gepumpt werden.

5. Optische Verstärkervorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die erste nichtlineare optische Faser (12A–B) einen Dispersionskoeffizienten zweiter Ordnung  $\beta_2$  aufweist, der unterschiedlich ist zum Dispersionskoeffizienten zweiter Ordnung  $\beta_2$  der zweiten nichtlinearen optischen Faser (12A–C) ist.

6. Optische Verstärkervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die erste nichtlineare optische Faser (12A–C) mit einer ersten optischen Pumpe (18A–C) und die zweite nichtlineare optische Faser (12A–C) mit einer zweiten optischen Pumpe (18A–C) gepumpt wird.

7. Optische Verstärkervorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die erste optische Pumpe (18A–C) eine andere Pumpfrequenz als die zweite optische Pumpe (18A–C) aufweist.

8. Optische Verstärkervorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die erste und zweite nichtlineare optische Faser (12A–C) im Wesentlichen den gleichen Dispersionskoeffizienten

zweiter Ordnung  $\beta_2$  aufweisen.

9. Optische Verstärkervorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die erste nichtlineare optische Faser (**12A-C**) eine Null-Dispersionswellenlänge ( $\lambda_0$ ) aufweist, die unterschiedlich zur Null-Dispersionswellenlänge ( $\lambda_0$ ) der zweiten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) ist.

10. Optische Verstärkervorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Satz von Fasereigenschaftsparametern im Wesentlichen der gleiche ist wie der zweite Satz von Fasereigenschaftsparametern.

11. Optische Verstärkervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Wellenlängenintervall mindestens einen Teil eines Signalbandes (**102**) der parametrischen Verstärkung der ersten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) abdeckt.

12. Optische Verstärkervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Wellenlängenintervall mindestens einen Teil eines Leerlaufbandes (**104**) der parametrischen Verstärkung der zweiten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) abdeckt.

13. Optische Verstärkervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, gekennzeichnet durch mindestens eine weitere optische Faser (**12A-C**), die zwischen dem optischen Demultiplexer (**14**) und dem optischen Multiplexer (**16**) angeschlossen ist, wobei jede optische Faser (**12A-C**) optische Signale innerhalb eines zugehörigen Wellenlängenbereiches ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) von dem optischen Demultiplexer (**14**) empfängt.

14. Optische Verstärkervorrichtung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine der mindestens einen weiteren optischen Faser (**12C**) mit einer nicht-parametrischen Verstärkung (**19**) ausgestattet ist.

15. Optische Verstärkervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine der nichtlinearen optischen Fasern (**12A-C**) einen Dispersionskoeffizienten vierter Ordnung  $\beta_4$  aufweist, der angepasst ist, ein Flachverstärkungsband innerhalb des zugeordneten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) auszubilden.

16. Optische Verstärkervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die erste und zweite nichtlineare optische Faser (**12A-C**) einen Nichtlinearitätskoeffizienten  $\gamma$  aufweist, der  $10 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$  übersteigen.

17. Optisches Glasfaserkommunikationssystem, mit einer optischen Verstärkervorrichtung (**1**) nach einem der Ansprüche 1 bis 16.

18. Optisches Glasfaserkommunikationssystem nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass das optische Glasfasersystem so aufgebaut ist, um Wellenlängen-Divisions-Multiplexing zu nutzen.

19. Optisches Glasfaserkommunikationssystem nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass das optische Glasfasersystem so aufgebaut ist, um dichtes Wellenlängen-Divisions-Multiplexing zu nutzen.

20. Verfahren zur optischen Verstärkung, mit den Schritten:

Richten (**202**) eines optischen Signals innerhalb eines ersten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) auf eine erste nichtlineare optische Faser (**12A-C**);

Richten (**204**) eines optischen Signals innerhalb eines zweiten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) auf eine zweite nichtlineare optische Faser (**12A-C**);

Ausführen (**206**) einer parametrischen Verstärkung durch Pumpen mit Strahlung einer ersten Pumpwellenlänge ( $\lambda_p$ ) in der ersten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**);

Ausführen (**208**) einer zweiten parametrischen Verstärkung durch Pumpen mit Strahlung einer zweiten Pumpwellenlänge ( $\lambda_p$ ) in der zweiten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**);

wobei die erste Pumpwellenlänge ( $\lambda_p$ ) außerhalb des ersten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) und die zweite Pumpwellenlänge ( $\lambda_p$ ) außerhalb des zweiten Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) positioniert ist; und

Multiplexen (**210**) eines verstärkten Signals von erster und zweiter nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**).

21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) an einem Hochverstärkungsanteil einer Verstärkungsverteilung (**100; 120, 122, 124; 126, 128, 130; 132, 134**) der ersten parametrischen Verstärkung positioniert ist, und das zweite Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) an einem Hochverstärkungsanteil einer Verstärkungsverteilung (**100; 120, 122, 124; 126, 128, 130; 132, 134**) der zweiten parametrischen Verstärkung positioniert ist.

22. Verfahren nach Anspruch 20 oder 22, gekennzeichnet durch den Schritt des Pumpens der ersten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) und der zweiten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) mit optischen Signalen, die im Wesentlichen die gleiche Wellenlänge aufweisen.

23. Verfahren nach Anspruch 22, gekennzeichnet durch den Schritt des Pumpens der ersten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) mit einem ersten

optischen Signal und Pumpen der zweiten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) mit einem zweiten optischen Signal, das eine Wellenlänge aufweist, die unterschiedlich zur Wellenlänge des ersten optischen Signals ist.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 23, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) mindestens einen Teil eines Signalbandes (**102**) der parametrischen Verstärkung der ersten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) abdeckt.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Wellenlängenintervall ( $\Delta\lambda_1-\Delta\lambda_8$ ) mindestens einen Teil eines Leerlaufbandes (**104**) der parametrischen Verstärkung der zweiten nichtlinearen optischen Faser (**12A-C**) abdeckt.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

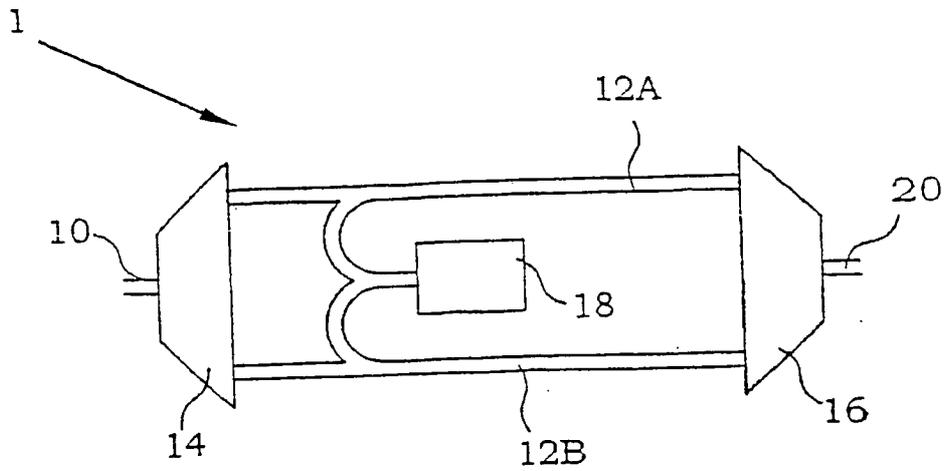


Fig. 1

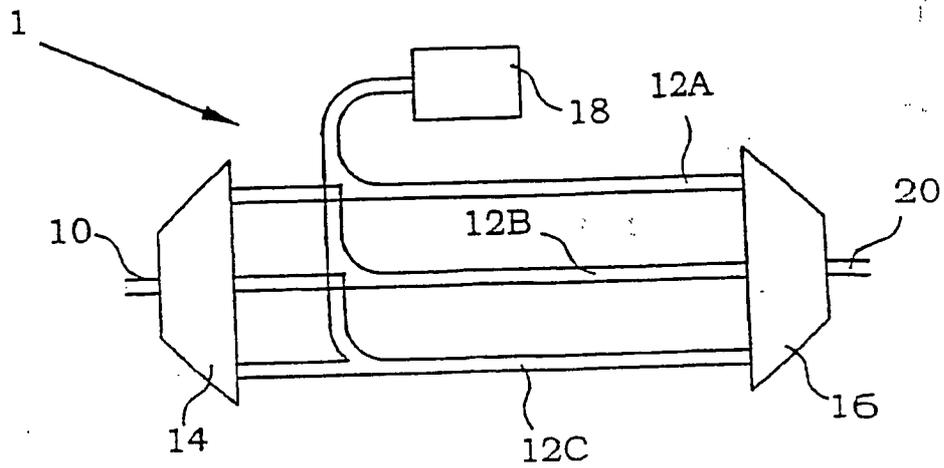


Fig. 3

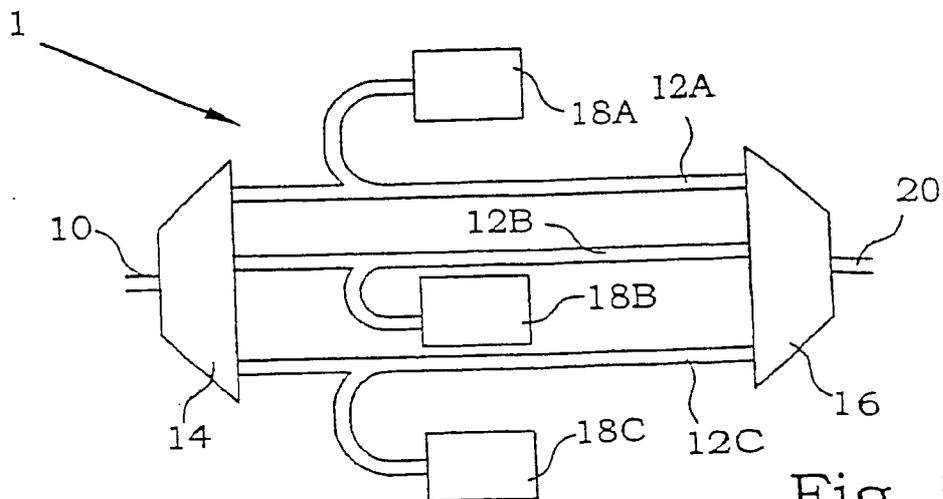
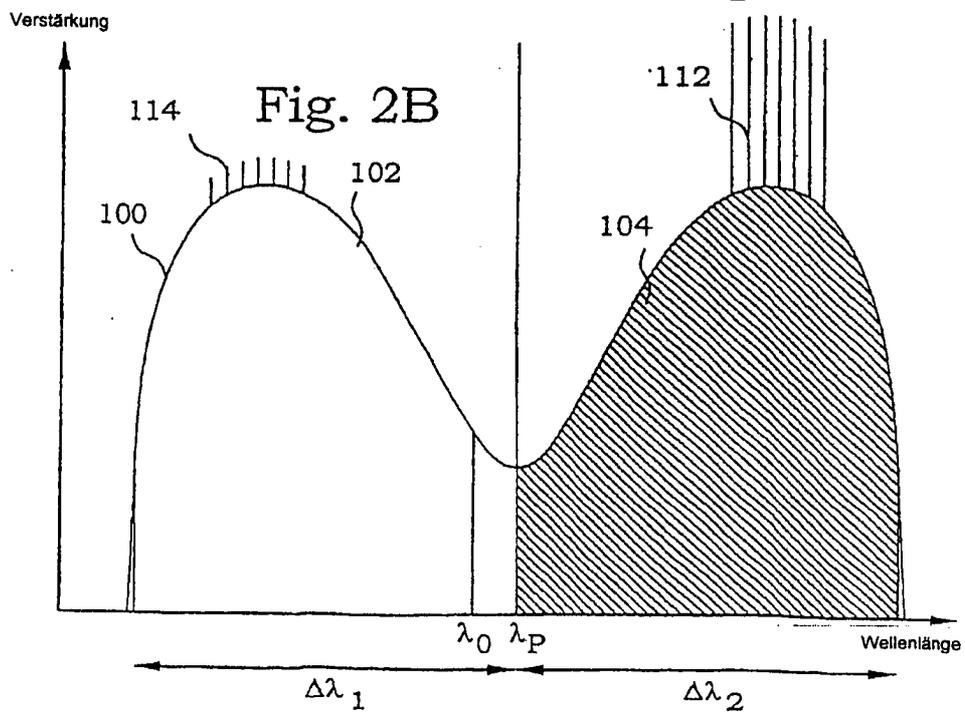
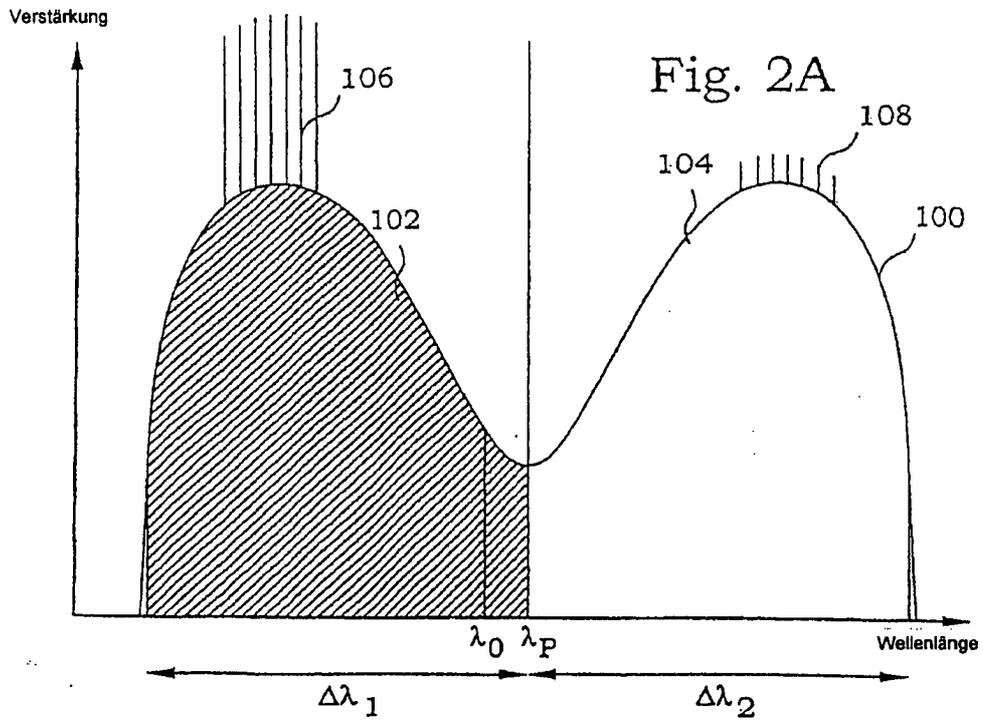


Fig. 5



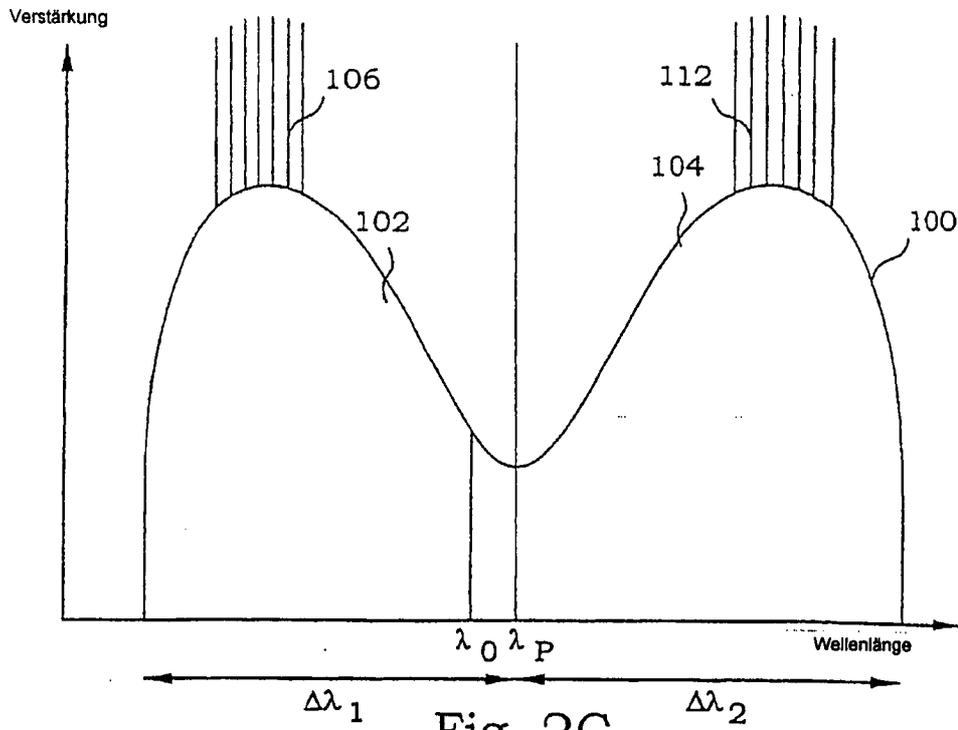


Fig. 2C

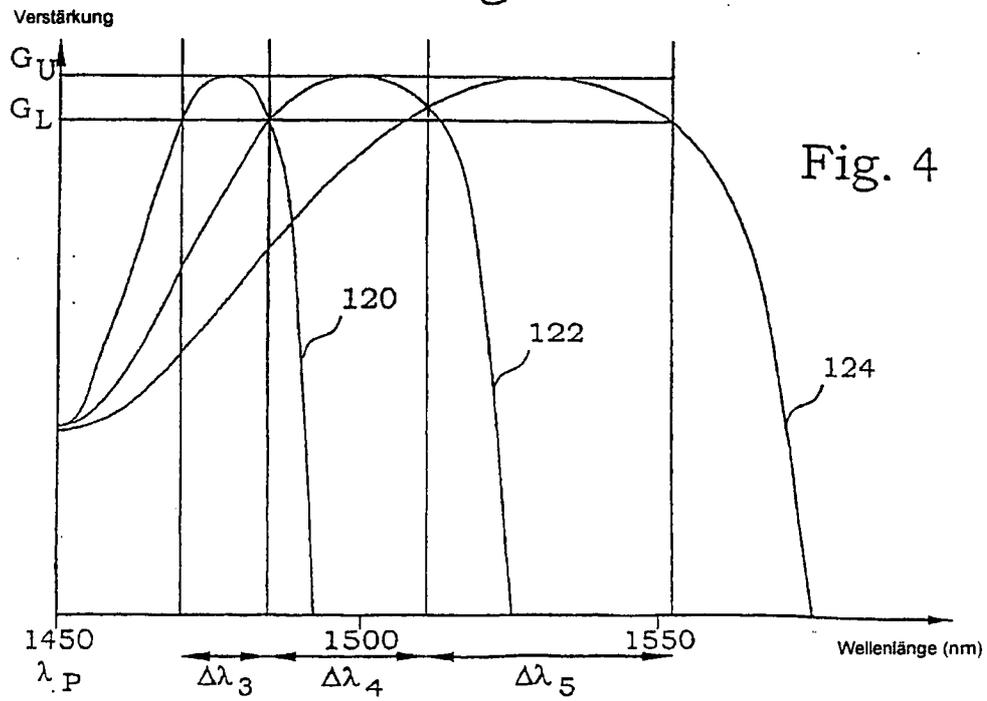
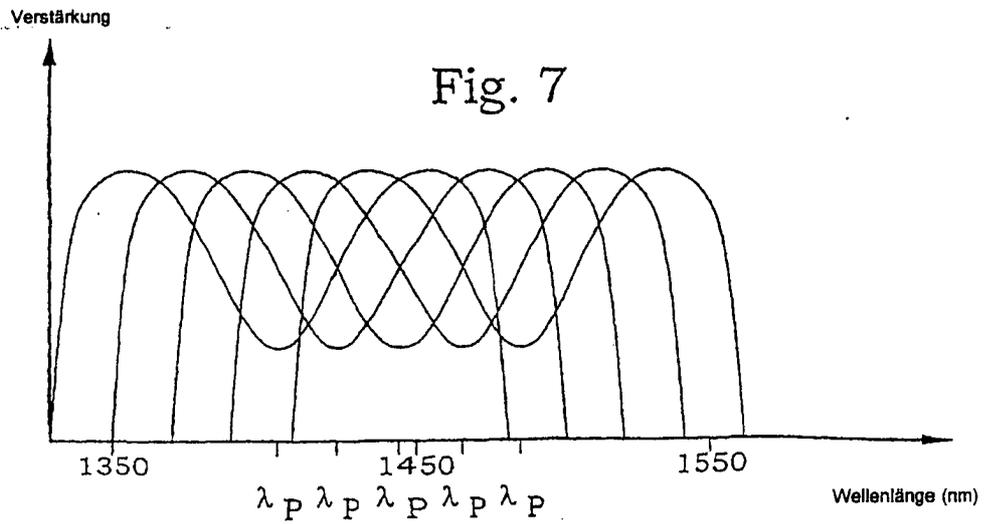
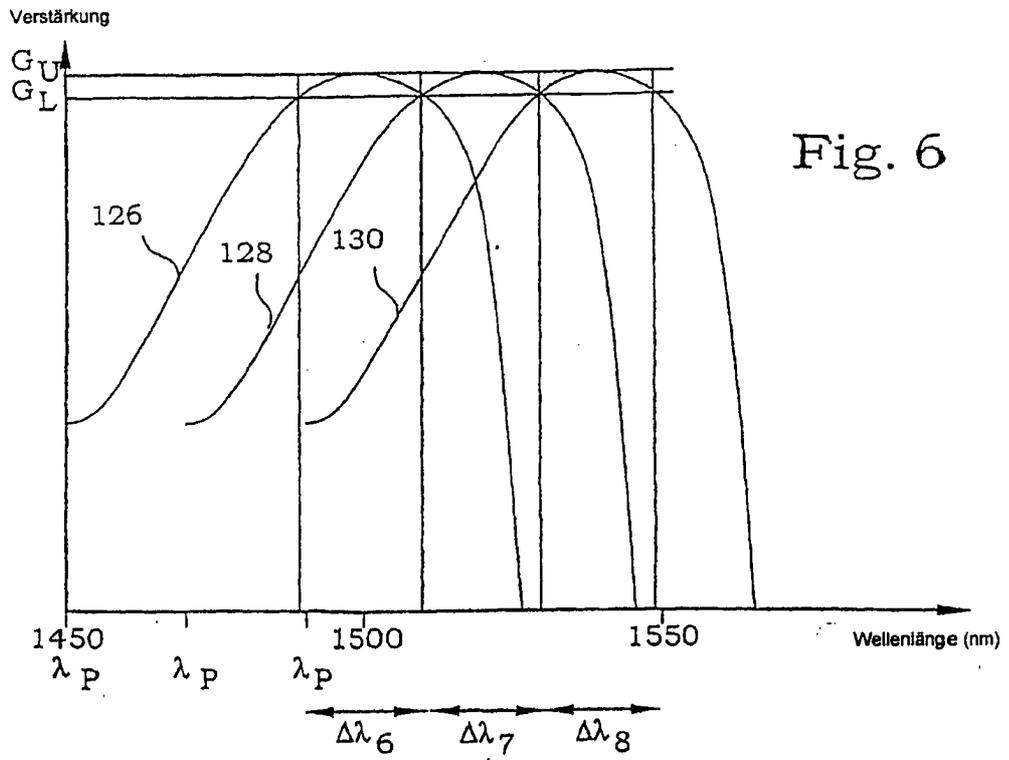
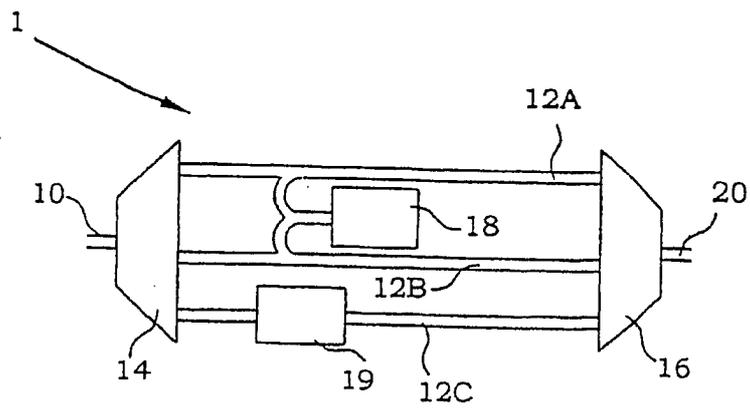
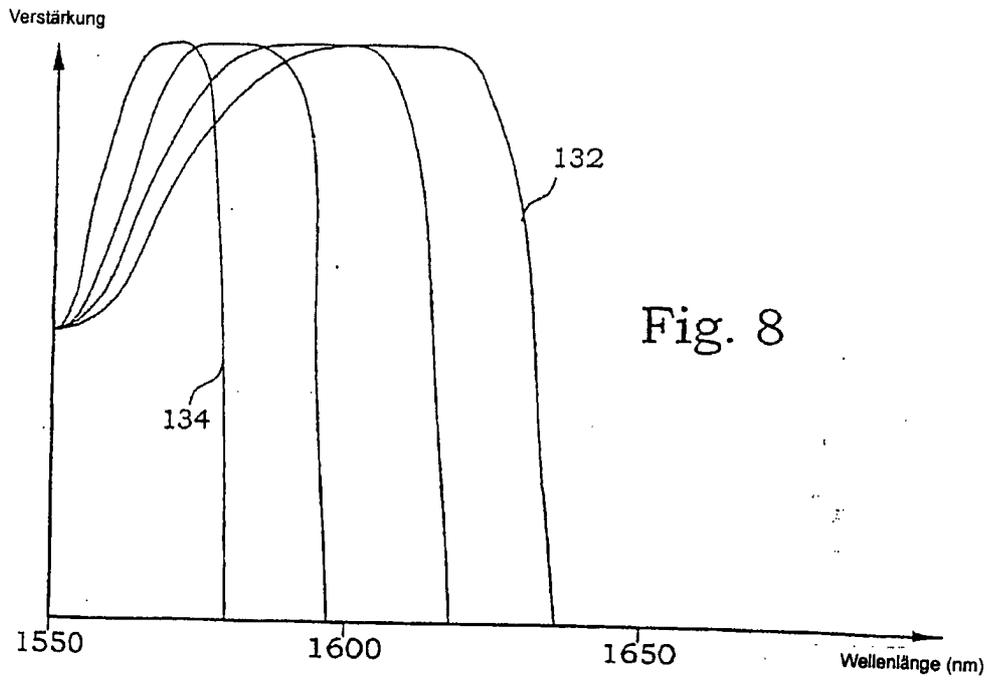


Fig. 4





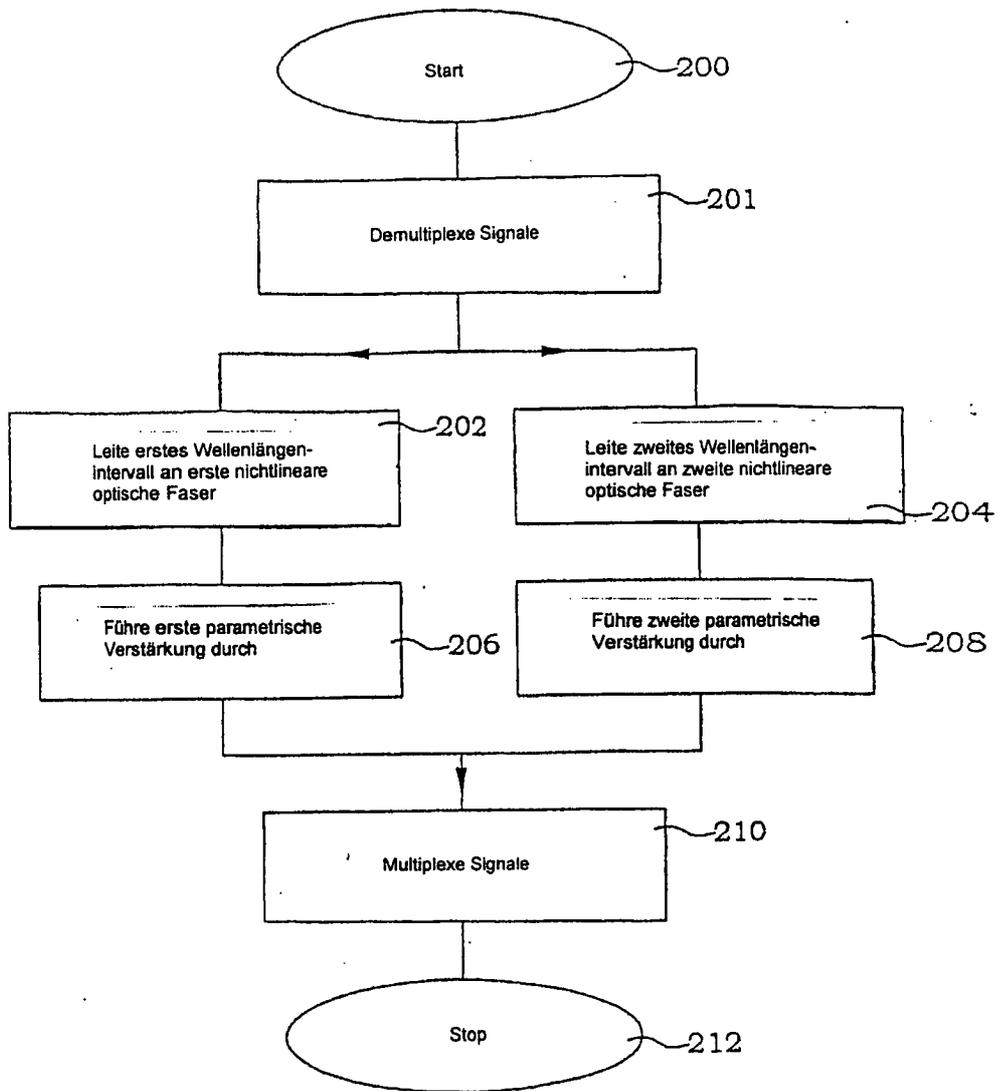


Fig. 10

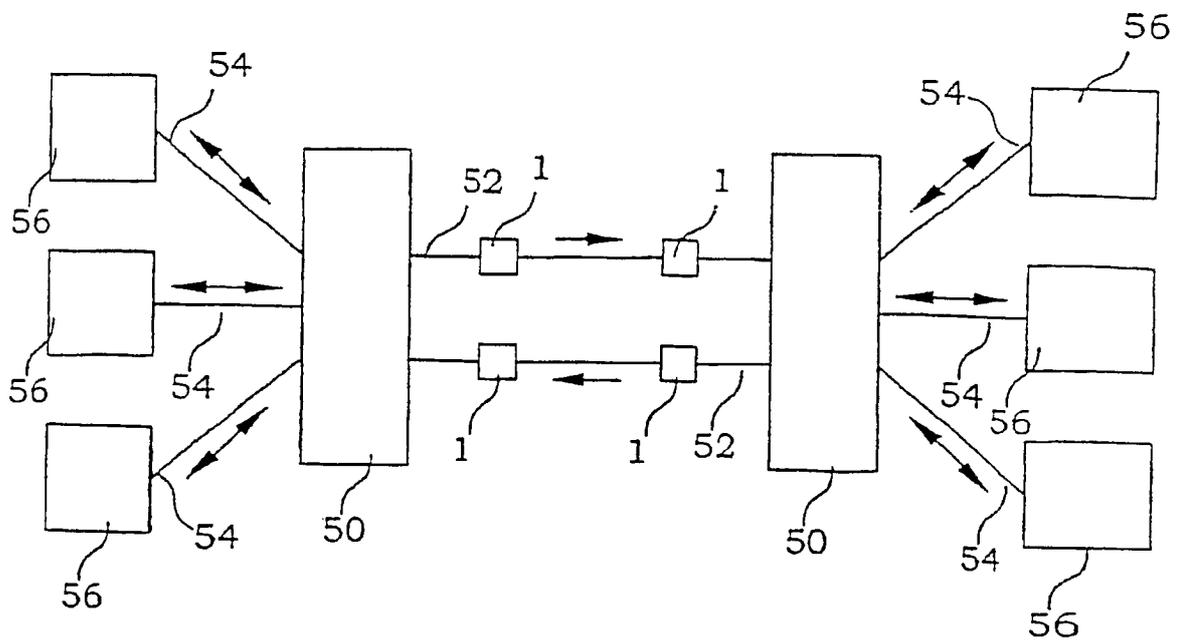


Fig. 11