



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 601 31 800 T2 2008.12.04**

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) EP 1 148 666 B1

(21) Deutsches Aktenzeichen: 601 31 800.5

(96) Europäisches Aktenzeichen: 01 303 340.2

(96) Europäischer Anmeldetag: 09.04.2001

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: 24.10.2001

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: 12.12.2007

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 04.12.2008

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

**H04J 14/08 (2006.01)**

**H01S 3/30 (2006.01)**

(30) Unionspriorität:

**552772 20.04.2000 US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, FR, GB**

(73) Patentinhaber:

**Lucent Technologies Inc., Murray Hill, N.J., US**

(72) Erfinder:

**Grant, Andrew R., Matawan, New Jersey 07747, US; Mamyshev, Pavel Viktorovich, Morganville, New Jersey 07751, US; Mollenauer, Linn Frederick, Colts Neck, New Jersey 07722, US**

(74) Vertreter:

**derzeit kein Vertreter bestellt**

(54) Bezeichnung: **Zeitmultiplexierte Pumpwellenlängen und daraus resultierende ultrabreitbandige gleichmässige rückwärts gepumpte Ramanverstärkung**

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 eingelebt, 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****Gebiet der Erfindung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft allgemein das Gebiet der optischen Nachrichtentechnik und insbesondere ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Erzeugen einer glatten Raman-Verstärkung über sehr lange Bänder hinweg.

**Hintergrund der Erfindung**

**[0002]** Frühe Vorschläge zu einer rein optischen Übertragung (siehe z. B.: A. Hasegawa: "Numerical study of optical soliton transmission amplified periodically by the stimulated Raman process", Appl. Opt., 23, 1095 (1984); L. F. Mollenauer, J. P. Gordon und M. N. Islam: "Soliton propagation in long fibers with periodically compensated loss", IEEE J Quantum Electronics QE-22, 157 (1986)) beruhten auf der Nutzung der Verstärkung aus dem Raman-Effekt, um Strecken von Übertragungsfasern in ihre eigenen Verstärker umzuwandeln. Das Schema bot viele grundlegende Vorteile und wurde tatsächlich für die erste Demonstration einer rein optischen Langstreckenübertragung mit Erfolg angewendet, wie nachträglich von L. F. Mollenauer und K. Smith in einem Artikel mit dem Titel: "Demonstration of soliton transmission over more than 4000 km in fiber with loss periodically compensated by Raman gain", der in Opt. Lett. 13, 675 (1988), erschien, berichtet wurde.

**[0003]** Dessen ungeachtet wurde mit dem Aufkommen der Erbium-Faserverstärker in den späten 1980ern die Raman-Verstärkung zeitweise uninteressant, hauptsächlich wegen der erforderlichen Pumpleistungen. Das heißt, im Kontext einer Einkanalübertragung, bei der die Signalleistungen selten mehr als ein oder zwei Milliwatt betragen, erschien die mehreren hundert Watt Schwellenleistung, die für eine positive Netto-Raman-Verstärkung erforderlich sind, übermäßig hoch und – zu diesem Zeitpunkt – unpraktikabel. Mit dem jüngsten Aufkommen des dichten WDM (wobei Nettosignalpegel leicht einhundert mW oder mehr erreichen können) und mit der gleichzeitigen kommerziellen Verfügbarkeit von Halbleiter-Pumplasern mit einer Ausgangsleistung von einigen hundert mW hat sich jedoch die Auffassung geändert. Nun wird die Raman-Verstärkung wegen ihres Vermögens, Rausch-/Nichtlinearitäts-Nachteile zu überwinden, und wegen der Tatsache, dass die Lage und die Ausdehnung des Verstärkungsbands nur von den verfügbaren Pumpwellenlängen abhängen, hoch geschätzt. Ein weiterer äußerst wichtiger Vorteil einer Raman-Verstärkung für dichtes WDM beruht darauf, dass im völligen Gegensatz zu Erbium-Verstärkern die Gestalt des Raman-Verstärkungsbands von Pumpen- und Signalpegeln im Wesentlichen unabhängig ist.

**[0004]** Auf Grund ihrer Bedeutung für optische Übertragungssysteme werden Verfahren und Vorrichtungen, welche die Erzeugung und Nutzung der Raman-Verstärkung erleichtern, und ein kontinuierlicher Weg, um die Erforschung anzugehen, angestrebt.

**Zusammenfassung der Erfindung**

**[0005]** Es sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Erzeugen einer glatten Verstärkung über sehr breiten Verstärkungsbändern unter Verwendung einer rückwärts gepumpten Raman-Verstärkung entwickelt worden. Das Verfahren ermöglicht eine dynamische Verstärkungsregelung durch einfache elektronische Mittel.

**[0006]** Das Verfahren umfasst das Zeitmultiplexen kombinierter Pumpwellenlängen, um breite Raman-Verstärkungsbänder zu erzielen. Das Verfahren, das ursprünglich als eine Methode, um zu verhindern, dass sich die verschiedenen Pumpwellenlängen gegenseitig beeinflussen, konzipiert war, hat sich als mehrere weitere, sehr große und wichtige Vorteile aufweisend, insbesondere in einer bevorzugten gewobbelten Ausführungsform, herausgestellt.

**[0007]** Speziell das gewobbelte Verfahren erzielt eine außerordentlich glatte Verstärkung (Variation kleiner als 0,05%) über Verstärkungsbändern von mindestens 8 THz Breite, während es gleichzeitig große Unterschiede bei der Einstellung der Gestalt des Verstärkungsbands zulässt, was notwendig sein könnte, um verschiedene Systemmängel zu unterdrücken. Vorteilhaft können all diese Bedingungen innerhalb von Mikrosekunden mit einer bekannten, einfachen, rein elektronischen Steuerung festgesetzt und verändert werden.

**Kurzbeschreibung der Zeichnungen**

**[0008]** [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung, die den Raman-Effekt veranschaulicht, und ein Diagramm, das die Raman-Verstärkung dargestellt;

[0009] [Fig. 2](#) ist ein Diagramm, das die Raman-Verstärkung für eine Lichtleitfaser mit verschobenem Dispersions-Nulldurchgang zeigt;

[0010] [Fig. 3](#) ist ein Diagramm, das die Pumpwellenlänge versus die Entfernung für eine Raman-Pumpe zeigt;

[0011] [Fig. 4](#) ist eine schematische Darstellung, die eine Anzahl von Pumpwellenlängen zeigt, die gemäß der vorliegenden Erfindung zusammen optisch multiplext werden;

[0012] [Fig. 5](#) ist ein Diagramm, das die Raman-Verstärkung (dB) versus die Wellenlänge zeigt;

[0013] [Fig. 6](#) ist eine schematische Darstellung, die eine alternative Einrichtung der vorliegenden Erfindung veranschaulicht;

[0014] [Fig. 7](#) ist ein Diagramm, welches das > 8 THz breite, glatte Verstärkungsband (von etwa 1530 bis 1595 nm) zeigt;

[0015] [Fig. 8](#) ist ein Diagramm, das eine gedehnte Darstellung des glatten Verstärkungsbereiches von [Fig. 7](#) zeigt;

[0016] [Fig. 9](#) ist ein Diagramm, das eine periodische Änderung der Pumpfrequenzen zeigt, die dazu geeignet ist, die in [Fig. 7](#) gezeigte Gewichtsfunktion zu erzeugen;

[0017] [Fig. 10](#) ist ein Diagramm, das ein beispielhaftes Wobbel-Verstärkungsspektrum gemäß der vorliegenden Erfindung zeigt; und

[0018] [Fig. 11](#) ist ein Diagramm, das die Raman-Verstärkung versus die Frequenz für eine verringerte Verstärkungsbandbreite gemäß der vorliegenden Erfindung zeigt.

#### Ausführliche Beschreibung der Erfindung

[0019] Als Hintergrundinformation ist in [Fig. 1](#) in schematischer Form eine Darstellung gezeigt, die den Raman-Effekt skizziert. Kurz und mit Bezug auf diese Figur: In Quarzglasfasern beginnt der Raman-Effekt mit einem durch Pumpen herbeigeführten Übergang aus einem Grundzustand **101** in einen Quasi-Zustand **102**, woraufhin eine Emission **103** von diesem Quasi-Zustand **102** aus folgt, wobei die Emission mit einem angeregten Zustand **104** des Gitters endet. Die Emission eines optischen Phonons **105** (die typisch innerhalb von ein paar Femtosekunden stattfindet) schließt dann die Rückkehr in den Grundzustand **101** ab.

[0020] Die optischen Übergänge sind eigentlich in starkem Maße nicht resonant mit den angeregten Elektronenniveaus, die in Quarzglas ungefähr 5 bis 6 eV über dem Grundzustand liegen. Folglich erlangen die optischen Übergänge ihre Stärke vor allem aus den Matrixelementen des sehr starken erlaubten Übergangs in den ersten Elektronenzustand.

[0021] Auf Grund der außerordentlich schnellen Relaxation ist die Besetzung des Endzustands der optischen Emission gewöhnlich durch das Gleichgewicht mit dem umgebenden Phononenbad bestimmt und folglich nahezu unabhängig von den Geschwindigkeiten des optischen Pumpens und der Lichthemission. Dieser Fakt ist die Ursache für die oben angeführte Unabhängigkeit der Gestalt des Raman-Verstärkungsbands von der Dynamik des optischen Pumpens.

[0022] Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Raman-Antwort, wie gerade beschrieben, im Wesentlichen "unverzögert" ist und demzufolge gewöhnlich ein schwerwiegendes Problem bei einer Abhängigkeit der Verstärkung von Signalmustern bei einem Vorwärtspumpen (Pumpe und Signal breiten sich in der gleichen Richtung aus) entstehen lässt. Gleichwohl entspricht der lange effektive Weg für eine Wechselwirkung zwischen Pumpe und Signal, der bei einem Rückwärts-Raman-Pumpen erhalten wird (ungefähr gleich dem Doppelten der Verlustlänge der Faser), typisch effektiven Integrationszeiten von einigen hundert Mikrosekunden. Dies ist so lang wie die Integrationszeiten von Erbium-Verstärkern, die bei hohen Pump- und Signalleistungspegeln betrieben werden, oder länger und ist mehr als lang genug, um das Problem der Musterabhängigkeit auch bei dem hier dargestellten Zeitmultiplexschema sowie gemäß der vorliegenden Erfindung zu lösen.

[0023] Der Raman-Effekt ist am größten, wenn die Pumpe und das Signal copolarisiert sind, und ist nahezu

null, wenn sie orthogonal polarisiert sind (siehe Einführung zu [Fig. 1](#)). Es gibt im Wesentlichen zwei Methoden, um diese Polarisationsabhängigkeit zu überwinden: Erstens, indem die Pumpe selbst unpolarisiert gemacht wird, und zweitens, indem nur ein Rückwärts-Raman-Pumpen verwendet wird.

**[0024]** Bei Letzterem rotieren die Stokes-Vektoren, welche die (sich in der Gegenrichtung zum Signal ausbreitende) Pumpe und das Signal repräsentieren, in Reaktion auf die gewöhnliche Doppelbrechung der Faser in entgegengesetzten Richtungen um die Poincaré-Sphäre, wodurch die relativen Polarisationszustände von Pumpe und Signal auf der Basis einer Wegmittelung umfassend gemittelt werden. Jedes Verfahren ist gewöhnlich an sich schon recht effektiv, aber wenn beide zusammen verwendet werden, verschwindet die messbare Polarisationsabhängigkeit der Raman-Verstärkung gewöhnlich vollständig.

**[0025]** Die Pump- und Signalphotonen beeinflussen einander gemäß dem folgenden Gleichungssystem:

$\frac{dp_s}{P_s} = \left( -\alpha_s + \frac{R}{A_{\text{eff}}} P_p \right) dz$	(1a)
$\frac{dp_p}{P_p} = \left( -\alpha_p + \frac{R}{A_{\text{eff}}} P_s \right) dz$	(1b)

wobei  $\alpha_p$  und  $P_p$  der Faser-Verlustkoeffizient bzw. die Leistung bei der Pumpwellenlänge sind und  $\alpha_s$  und  $P_s$  die entsprechenden Größen bei der Signalwellenlänge sind,  $A_{\text{eff}}$  die effektive Kernfläche der Faser ist und  $R$  der Raman-Verstärkungsfaktor ist. Am Peak des Raman-Verstärkungsbands ist für eine Pumpe und ein Signal, die copolarisiert sind, in einer Faser aus reinem Quarz  $R = 68 \text{ km}^{-1}/\text{W}/(\mu\text{m})^2$ , während  $R$  bei einer unpolarisierten Pumpe ungefähr die Hälfte dieses Wertes hat. Schließlich nimmt  $R$  mit zunehmendem Ge-Gehalt der Faser deutlich zu.

**[0026]** Obwohl die genaue Form des Raman-Verstärkungsbands etwas von der Glaszusammensetzung abhängt, sind dennoch die in [Fig. 1](#) für nahezu reines Quarzglas und in [Fig. 2](#) für eine Faser mit verschobenem Dispersions-Nulldurchgang gezeigten Beispiele typisch; die Gestalt ist immer stark asymmetrisch, mit einer fast linearen Steigung zum Frequenzunterschied null und mit einem viel steileren Abfall auf der höherfrequenten Seite des Peaks. Bei Verwendung von multiplexten Pumpfrequenzen (oder -wellenlängen), um ein breiteres glattes Verstärkungsbild zu erzielen, wie demnächst erläutert wird, erzwingt gewöhnlich die Asymmetrie der Raman-Antwort eine eher unerwartete, stark ungleichmäßige Verteilung der relativen Leistungen der verschiedenen Pumpwellenlängen. Die erforderliche Verteilung, egal wie kompliziert, ist mit dem Verfahren, das hier beschrieben wird, besonders einfach und wirtschaftlich zu erzielen.

**[0027]** Ursprünglich war ein Aspekt der vorliegenden Erfindung als eine Methode eronnen worden, um ein grundlegendes Problem zu lösen, das sonst eher mit der Verwendung von mehreren Pumpwellenlängen einhergeht, nämlich die sehr starke und schädliche Wechselwirkung, die, vermittelt durch den Raman-Effekt, unter diesen erhalten werden kann. Als einfachstes Beispiel sei die Wechselwirkung zwischen genau zwei Pumpwellenlängen betrachtet, wobei diese Wechselwirkung aus dem Gleichungssystem (1) berechnet werden kann, indem die längere der zwei Pumpwellenlängen als das Signal aufgefasst wird.

**[0028]** Wie in [Fig. 3](#) veranschaulicht ist, nunmehr mit Bezug auf diese Figur, wird, da die Pumpwellenlängen die Faser gemeinsam durchlaufen, die Energie etwas schneller von der kürzeren auf die längere Wellenlänge übertragen. Folglich ist auf der Basis einer Wegmittelung die Verteilung der relativen Leistungen zwischen den zwei Pumpen von der anfänglichen (und vermutlich angestrebten) Verteilung sehr verschieden. Da es wichtig ist, dass die Raman-Verstärkung so gleichmäßig wie möglich über die Faserlänge verteilt ist, insoweit als der lineare Faserverlust dies zulassen wird, ist ferner ein "vorausgehendes Anheben" der Leistung der kürzeren Wellenlänge auch keine zufriedenstellende Lösung. Es sei jedoch angemerkt, dass die zwei Pumpwellenlängen zu verschiedenen Zeiten durch die Faser laufen können, wodurch eine Wechselwirkung vermieden wird. Solange die Geschwindigkeit, mit der Leistung zwischen den Wellenlängen hin und her geht, im Verhältnis zur effektiven Integrationszeit groß genug ist, wird die akkumulierte Signalverstärkung zeit-(und folglich muster-)unabhängig bleiben. Da, wie schon angemerkt wurde, die Integrationszeit bei einem Rückwärts-Raman-Pumpen gewöhnlich in der Größenordnung von mehreren hundert Mikrosekunden ist, darf die erforderliche Frequenz der Hin- und Her-Übertragung von Leistung nicht größer als etwa ein MHz oder höchstens einige MHz sein. Die für diesen Frequenzbereich erforderliche elektronische Ansteuerung der Laser lässt sich einfach, preiswert und unschwer ausführen.

**[0029]** Es gibt zwei Grundversionen des Zeitmultiplexschemas, das Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist. Bei der ersten, in [Fig. 4](#) schematisch dargestellt, wird eine Anzahl von Lasern **401(1)...401(N)** mit fester Wellenlänge optisch zusammen multiplext, wobei diese jedoch durch die Verwendung von entsprechend gepulsten Treiberströmen, die durch spannungsgesteuerte Gatter **402(1)...402(N)** bewirkt werden, jeweils zu verschiedenen Zeiten betrieben werden. Obwohl sie vom Konzept her einfach ist, liefert diese Version eine eingeschränkte Lösung für die Erlangung einer glatten Verstärkung (siehe [Fig. 5](#)), und die mehreren Laser und Multiplexer, die erforderlich sind, sind unzweckmäßig, teuer und würden gewöhnlich eine Menge Platz brauchen. Wie in [Fig. 4](#) gezeigt ist, schließen die optischen Signale **410**, die durch das optische System **425** laufen, das kombinierte, sich in der Gegenrichtung ausbreitende Raman-Pumpsignal **420** ein, das durch Kombinieren der Ausgangspumpen der Laser **401(1)...401(N)**, die durch Koppler **426(1)...426(N)** in das optische System **425** jeweils eingekoppelt werden, erzeugt wird.

**[0030]** In [Fig. 6](#) ist nun eine alternative Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gezeigt. Speziell schließen die optischen Signale **610**, die durch das optische System **625** laufen, ein sich in der Gegenrichtung ausbreitendes Raman-Pumpsignal **620** ein, das durch Koppler **626** in das optische System **625** eingekoppelt wird. Das Raman-Pumpsignal **620** wird vorteilhaft mittels eines einzigen Lasers **601(1)** oder alternativ mittels zweier Laser **601(N)**, deren Ausgabe durch den Polarisationskombinator **630** zusammen polarisationsmultiplext wird, erzeugt. Außerdem und gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird der Pumplaser bzw. werden die Pumplaser mit einer Gleichstrom-Treiberschaltung beeinflusst, wobei jedoch durch die Wirkung eines programmierbaren elektronischen Funktionsgebers **650** ihre Wellenlänge kontinuierlich und periodisch durchgescannt wird. Vorteilhaft kann die programmierbare Funktion, die der programmierbare elektronische Funktionsgeber erzeugt, in einer gewünschten Weise verändert werden, um das gewünschte glatte Verstärkungsband zu erhalten. Diese Version (die der Einfachheit halber fortan als "Wobbel-Wellenlängen-" oder "Wobbel-Frequenz"-Schema bezeichnet wird) bietet die zwei großen Vorteile der Einfachheit (und folglich Wirtschaftlichkeit) einerseits und einer Auflösung, die nur durch die Bandbreite der Wellenlängenscan-Treiberelektronik begrenzt ist, andererseits. Da diese Bandbreite unschwer im Bereich von vielen zehn oder sogar vielen hundert MHz sein könnte, während sie immer noch mit einer preiswerten Elektronik beherrscht wird, könnte die Auflösung immer viel besser als bei der ersten Version sein. Außerdem sei angemerkt, dass das schnelle Frequenzscannen gewöhnlich die Notwendigkeit von weiteren Formen einer Frequenzerweiterung des Lasers, um eine Brillouin-Rückstreuung der Pumpe zu vermeiden, umgeht.

**[0031]** Schließlich sei angemerkt, dass für jedes Schema das Ausmaß und die Gestalt des Raman-Verstärkungsbands unschwer und sehr schnell gesteuert werden können, und zwar durch ein einfaches Einstellen der zugehörigen elektronischen Wellenformen. Diese Einfachheit, die niedrigen Kosten und die Geschwindigkeit der Verstärkungsgestalt-Einstellung sollten mit den hohen Kosten, der Komplexität, der niedrigeren Geschwindigkeit und dem optischen Einfügungsverlust, die mit rein optischen Verstärkungsausgleichseinrichtungen verbunden sind, verglichen werden.

**[0032]** Für das vorliegende Wobbel-Verfahren ist ein effizienter Algorithmus entwickelt worden, der diejenige Gewichtsfunktion für ein gegebenes Band von Raman-Pumpfrequenzen bestimmt, die das glatteste und weitestmögliche Verstärkungsband liefern wird. Der Algorithmus verwendet das experimentell bestimmte Verstärkungsspektrum für nur eine Pumpfrequenz (wie etwa jenes, das in [Fig. 2](#) gezeigt ist). Er beginnt mit der Annahme des gewünschten glatten Abschnitts des gewünschten Verstärkungsspektrums und einer wohl begründeten Vermutung hinsichtlich der zugehörigen Flanken; die entsprechende Gewichtsfunktion wird anschließend durch Fourier-Transformation der Definitionsgleichung ermittelt. Diese Lösung wird dann durch Iteration verbessert, wobei die berechnete Pumpengewichtung verwendet wird, um bessere Werte für das Raman-Verstärkungsspektrum vorherzusagen. Obwohl oft nicht weniger als 50 bis 100 Iterationen erforderlich sind, benötigt das gesamte Verfahren auf einem schnellen PC weniger als eine Minute.

**[0033]** In [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#), auf die sich nun gleichzeitig bezogen wird, ist nur ein Beispiel für die Art der Ergebnisse gezeigt, die mit diesem Algorithmus erhalten werden können. Insbesondere zeigt [Fig. 7](#) das > 8 THz breite, glatte Verstärkungsband (von etwa 1530 bis 1595 nm) zusammen mit der erforderlichen Gewichtsfunktion für die Pumpwellenlängen, die zwischen den Grenzen von etwa 1515 bis 1410 nm zyklisch überstrichen bzw. gewobbelt werden. (Es ist zu beachten, dass dieses Verstärkungsband im Wesentlichen so breit wie das "C"-Band und das "L"-Band der viel komplizierteren und umständlicheren Erbium-Faserverstärker zusammen ist. Ferner ist zu beachten, dass das Band genug Raum für eine Übertragungskapazität von 3,2 Tbit/s bei einer spektralen Effizienz von 0,4 repräsentiert.)

**[0034]** [Fig. 8](#) ist eine gedehnte Darstellung des glatten Verstärkungsbereiches. Die Figur zeigt, dass die Weiligkeit der Verstärkung unter 0,01 dB (noch einmal: bei nominell 20 dB) oder unter 0,05% Schwankung über

dem Band gehalten werden kann. Außerdem wurde festgestellt, dass bei einer Herabsetzung des Pumpenwobbelns von dem oben angegebenen 105 nm-(15 THz-)Bereich auf 84 nm (12 THz), die Welligkeit der Verstärkung immer noch recht klein (< 0,02 dB) über dem 8 THz-Band ist; dies kann für die Verwirklichung mit einem geeigneten Laser wichtig sein.

**[0035]** [Fig. 9](#) zeigt die periodische Veränderung der Pumpfrequenzen, die erforderlich ist, um die in [Fig. 7](#) gezeigte Gewichtsfunktion zu erzeugen. Unter der Annahme, dass die ausgegebene Frequenz des Pumplasers mehr oder weniger linear mit der Spannung oder dem Strom zusammenhängt, die bzw. der verwendet wird, um ihn durchzustimmen bzw. einzustellen, braucht die Ansteuerelektronik nur eine Bandbreite aufzuweisen, die nicht größer als etwa 100-mal die Grundfrequenz der Ansteuerung ist, um die Ergebnisse von [Fig. 7](#) und [Fig. 8](#) genau zu reproduzieren. Folglich braucht bei diesem Beispiel, bei dem die angenommene Grundfrequenz der Ansteuerung 1 MHz beträgt, die Elektronik-Bandbreite nicht mehr als etwa 100 MHz zu betragen, wobei sich diese Anforderung sehr leicht erfüllen lässt.

**[0036]** Außerdem ist es selbstverständlich, dass die Gestalt des Verstärkungsbands nicht auf die völlig glatte Kurve von [Fig. 8](#) beschränkt ist. Das Wobbel-Verfahren ermöglicht ebenso weitere einfache Gestalten, wie etwa die in [Fig. 10](#) gezeigte lineare Steigung, die gebraucht werden könnten, um die Raman-Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Kanälen bei einem dichten WDM zu kompensieren. (Die Kanäle längerer Wellenlängen erfahren eine Verstärkung aus der Wechselwirkung mit den Kanälen kürzerer Wellenlängen.) Im Prinzip ist fast jede Verstärkungsbangestalt möglich, solange sie durch eine glatte und nicht zu schnell veränderliche Funktion dargestellt werden kann.

**[0037]** Die Anwendung der Wobbel-Technik erhöht die erforderliche Laserleistung deutlich über jene, die für eine schmalbandige Verstärkung mit einer Pumpe fester Frequenz erforderlich ist. Beispielsweise ist in dem Fall von [Fig. 7](#) dieser Faktor 1,87. Um ein Gefühl für die absoluten Pumpleistungen, die erforderlich sind, zu vermitteln, sei eine 80 km-Strecke einer Faser mit verschobenem Dispersions-Nulldurchgang (mit einer effektiven Kernfläche von etwa  $50 \mu\text{m}^2$ , wobei etwa 75% oder 12,5 dB ihres 16,8 dB-Streckenverlusts durch eine rückwärts gepumpte Raman-Verstärkung zu kompensieren sind) betrachtet. (Mehr als diesen Anteil zu kompensieren, kann Probleme durch die Rayleigh-Rückstreuung der Signale selbst bereiten.) In diesem Fall sind bei vernachlässigbaren Pegeln der Signalleistung 285 mW Pumpleistung für die schmalbandige Verstärkung erforderlich, aber um das hier angeführte glatte 8 THz-Verstärkungsband zu erzeugen, steigt diese Leistung auf 533 mW an. Wenn beträchtliche Signalleistungen beteiligt sind (wie in dem Fall eines dichten WDM), muss die Pumpleistung weiter erhöht werden, und zwar um einen Betrag, der etwas größer als die Gesamt signalleistung selbst ist.

**[0038]** Außerdem sei angemerkt, dass bei einigen Anwendungen, bei denen nicht die volle 8 THz-Bandbreite des vorhergehenden Beispiels erforderlich ist, eine verringerte Verstärkungsbandbreite eine entsprechende Verminderung bei der erforderlichen zyklischen Frequenzänderung und bei der Leistungsabgabe des Pumplasers ermöglicht. [Fig. 11](#) zeigt ein Beispiel für diese Verringerung auf eine 5 THz-Verstärkungsbandbreite, die nur eine zyklische Frequenzänderung von 10 THz bei den Pumplasern und einen Laserleistungsfaktor von nur 1,56 erfordert.

**[0039]** Vielleicht ist es die beste Vorgehensweise, um die Forderungen sowohl nach einer hohen Ausgangsleistung (typisch 0,5 W oder mehr, die in eine Faser eingekoppelt werden), als auch nach einem schnellen Frequenz-Durchstimmen des Pumplasers über einen weiten Bereich (80 nm oder mehr) zu erfüllen, die Kombination aus einem über einen weiten Bereich durchstimmbaren Niedrigenergie(Halbleiter-)Laser bewährter Bauart und, nachfolgend, einem (Halbleiter-)Wanderfeldverstärker zu verwenden. Für den durchstimmbaren Laser bietet sich insbesondere der "durchstimmbare, vertikalkoppler-gefilterte Laser" oder VCFL an, der von I. Kim u. a. in einem Artikel mit dem Titel: "Broadly tunable vertical-coupler filtered tensile-strained InGaAs/InGaAsP multiple quantum well laser" beschrieben wurde, der in Appl. Phys. Lett., Bd. 64, S. 2764ff (1994), erschien. Das Durchstimmen dieses Geräts beruht auf dem Fakt, dass eine verhältnismäßig kleine Änderung des Index des Halbleiters (durch einen Steuerstrom hervorgerufen) ohne weiteres die Phasenanpassungswellenlänge eines Gitters mit großer Gitterkonstanten über einen weiten Bereich, nämlich 80 nm oder mehr, verändern kann. Das eine große Gitterkonstante aufweisende Gitter wird verwendet, um die Rückenfläche des Lasers mit einem breitbandigen Spiegel zu koppeln, sodass eine signifikante Rückkopplung nur an der Phasenanpassungswellenlänge auftritt. Eine andere Möglichkeit könnte sein, ein Teil aus LiNbO<sub>3</sub> oder einem anderen geeigneten elektrooptischen Kristall zu verwenden, um ein über einen weiten Bereich durchstimmbares Lyot-Filter herzustellen, das in die Rückkopplungsschleife des Lasers einzusetzen ist.

**[0040]** Beispielsweise könnte, falls es sich als schwierig erweisen sollte, einen Pumplaser zu verwirklichen,

der eine hohe abgegebene Leistung beibehalten kann, während seine Frequenz über ein sehr breites Band (z. B. 80 nm oder mehr) zyklisch verändert wird, dem Problem durch Kombinieren der Verfahren von [Fig. 4](#) und [Fig. 6](#) abgeholfen werden. Insbesondere anhand von [Fig. 7](#) und [Fig. 11](#) lässt sich feststellen, dass die Pumpen-Gewichtsverteilungen gewöhnlich in zwei recht gut getrennte Bänder, nämlich ein schmaleres Band mit einer höheren Dichte, das den niedrigeren Frequenzbereich abdeckt, und ein breiteres Band mit einer niedrigeren Dichte, das die höheren Pumpfrequenzen abdeckt, unterteilen. Folglich könnten zwei gewoppelte Laser, wovon jeder speziell für den einen oder den anderen diese zwei stärker eingeschränkten Frequenzbereiche ausgelegt ist, die mittels eines WDM-Kopplers mit einem scharfen Übergang im Bereich der Frequenzlücke zusammen multiplext werden, einander in geeigneter Weise rechtzeitig abwechseln, um das Äquivalent einer insgesamt gewobbelten Frequenzverteilung zu schaffen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Pumpen eines optischen Systems, das wenigstens eine Raman-Pumpe enthält, wobei das Verfahren gekennzeichnet ist durch den folgenden Schritt:  
zeitliches Multiplexieren von Raman-Pumpwellenlängen in das optische System, um ein dichtes WDM-Signal zu verstärken.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Raman-Pumpwellenlängen eine endliche Menge diskreter Wellenlängen enthalten.
3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Raman-Pumpsignale sich verändernde Wellenlängen haben.
4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, wobei die Raman-Pumpwellenlängen durch das optische System in derselben Richtung laufen, in der ein optisches Signal durch das optische System läuft.
5. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, wobei die Raman-Pumpwellenlängen durch das optische System in einer Richtung laufen, die zu der Ausbreitungsrichtung eines optischen Signals, das durch das optische System läuft, entgegengesetzt ist.
6. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die ausgewählten Raman-Pumpwellenlängen eine endliche Menge diskreter Wellenlängen enthalten und andere ausgewählte Pumpwellenlängen sich verändern.
7. Verfahren nach Anspruch 1, 2, 3, 4, 5 oder 6, wobei das optische System wenigstens eine Raman-Pumpe enthält, die von der wenigstens einen Raman-Pumpe verschieden ist.
8. Verfahren nach Anspruch 2, wobei wenigstens eine der Raman-Pumpwellenlängen durch die wenigstens eine Raman-Pumpe erzeugt wird und eine weitere der Raman-Pumpwellenlängen durch die wenigstens eine weitere Raman-Pumpe erzeugt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die wenigstens eine Raman-Pumpe und die wenigstens eine weitere Raman-Pumpe optisch gekoppelt sind.
10. Verfahren nach Anspruch 7, wobei die wenigstens eine Raman-Pumpe und die wenigstens eine weitere Raman-Pumpe polarisationsgekoppelt sind.
11. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Wellenlängen der wenigstens einen Raman-Pumpe ein kontinuierliches Pumplaser-Überstreichmuster haben.
12. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Raman-Pumpwellenlängen durch eine elektronische Steuerung gesteuert werden.
13. Optisches System, das enthält:  
einen optischen Weg (**425, 625**);  
Mittel (**401, 601**) zum Erzeugen mehrerer optischer Raman-Pumpsignale;  
Mittel (**426, 626**) zum Koppeln der mehreren optischen Raman-Pumpsignale in den optischen Weg;  
wobei das optische System dadurch gekennzeichnet ist, dass:  
die mehreren optischen Raman-Pumpsignale zeitlich multiplexiert sind,  
die Raman-Pumpsignale unterschiedliche Wellenlängen haben und das optische System ausgelegt ist, um ein dichtes WDM-Signal zu verstärken.

14. System nach Anspruch 13, wobei die optischen Raman-Pumpsignale eine endliche Menge diskreter Wellenlängen enthalten.
15. System nach Anspruch 13, wobei die optischen Raman-Pumpsignale eine Menge sich verändernder Wellenlängen enthalten.
16. System nach Anspruch 13, wobei die optischen Raman-Pumpsignale in den optischen Weg in derselben Richtung gekoppelt werden, in der ein optisches Signal den optischen Weg durchläuft.
17. System nach Anspruch 13, wobei die optischen Raman-Pumpsignale in den optischen Weg in einer Richtung gekoppelt werden, die zu der Richtung, in der das optische Signal den optischen Weg durchläuft, entgegengesetzt ist.
18. System nach Anspruch 13, wobei ausgewählte Raman-Pumpwellenlängen eine endliche Menge diskreter Wellenlängen enthalten und andere ausgewählte Pump-Wellenlängen sich verändern.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

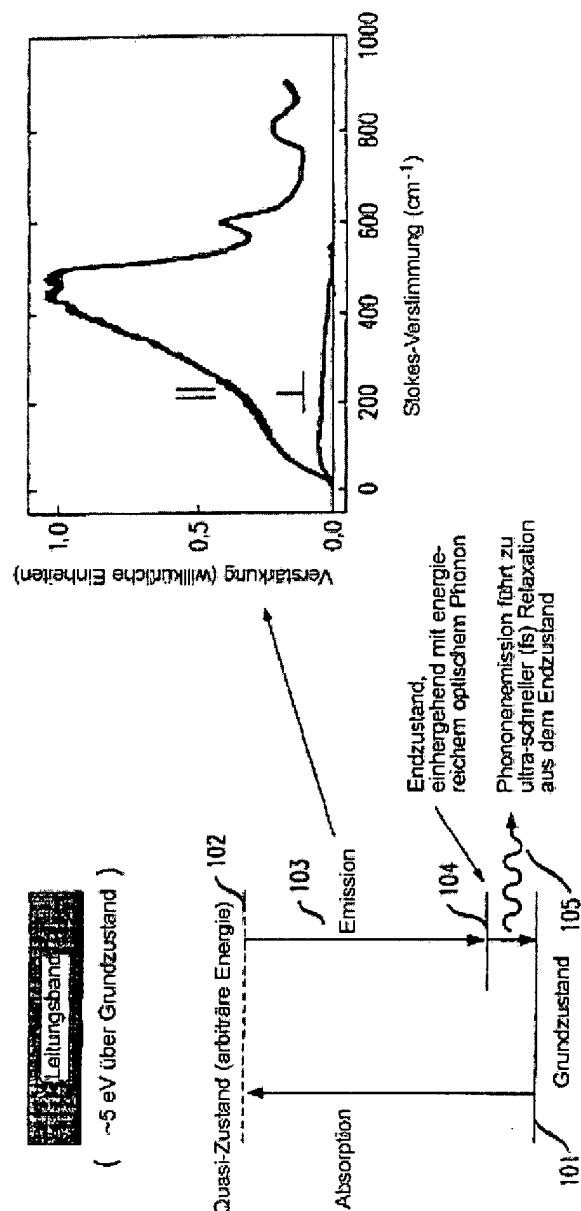


Fig. 2

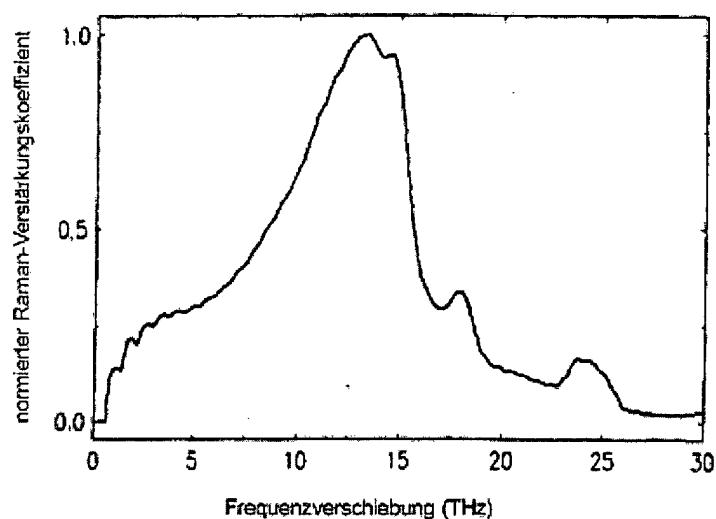


Fig. 3

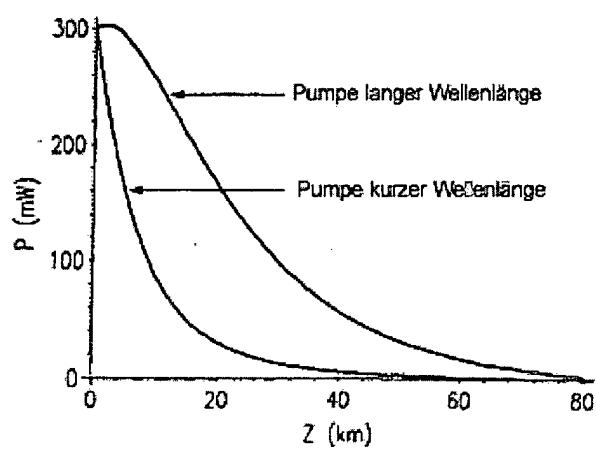


Fig. 4

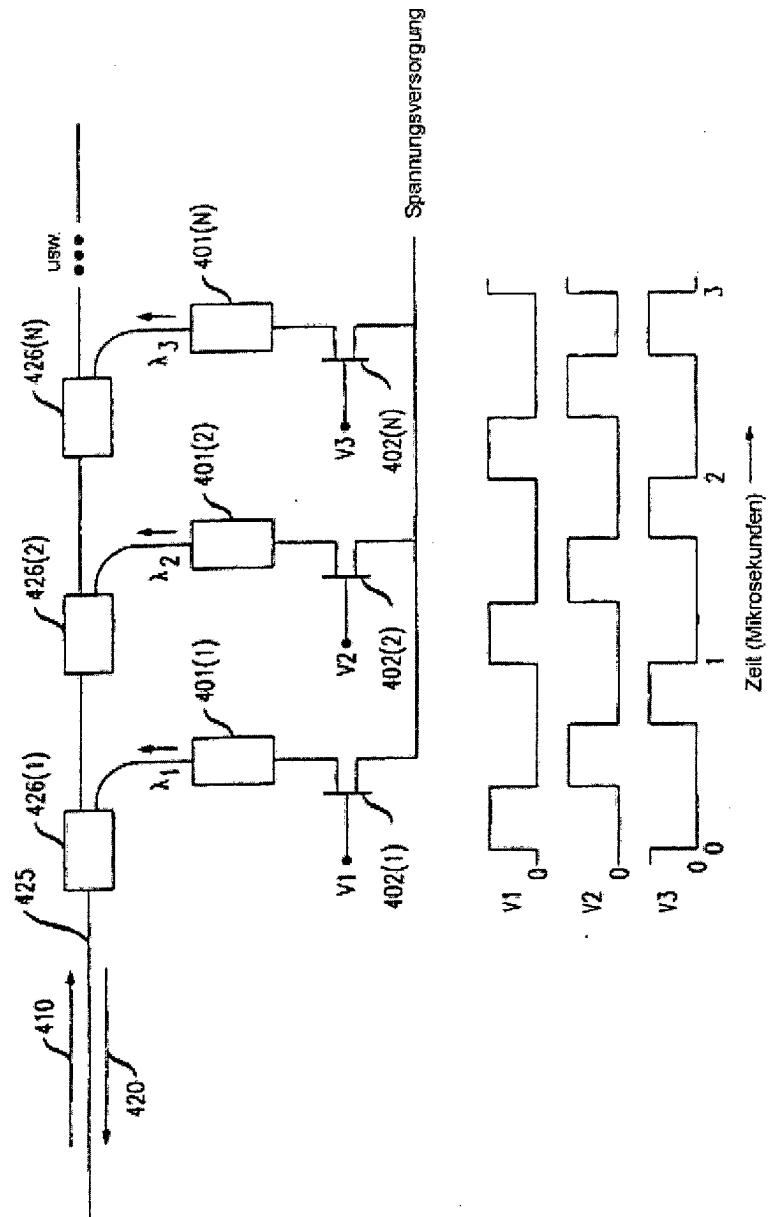


Fig. 5

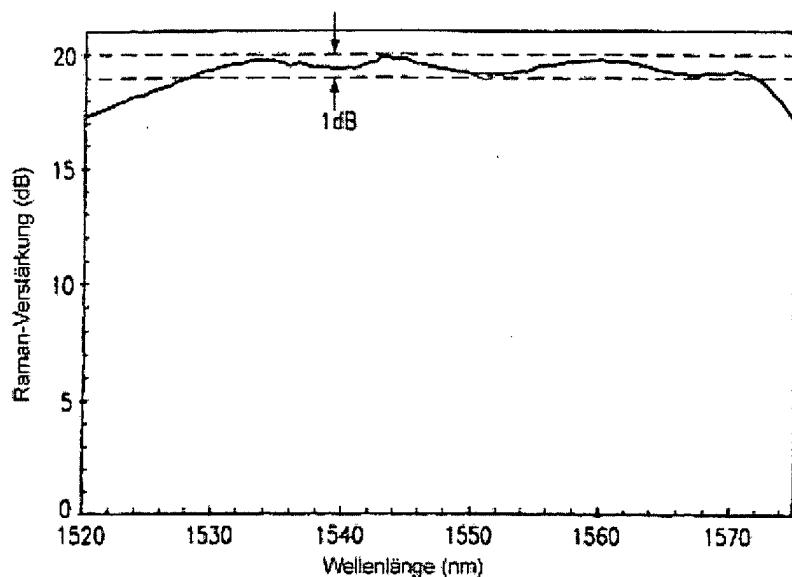


Fig. 7

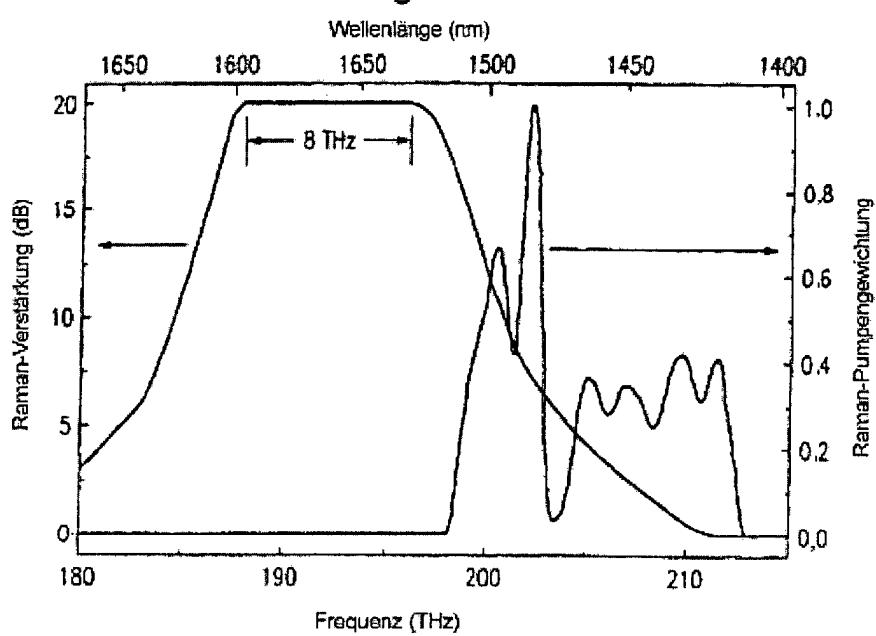


Fig. 6

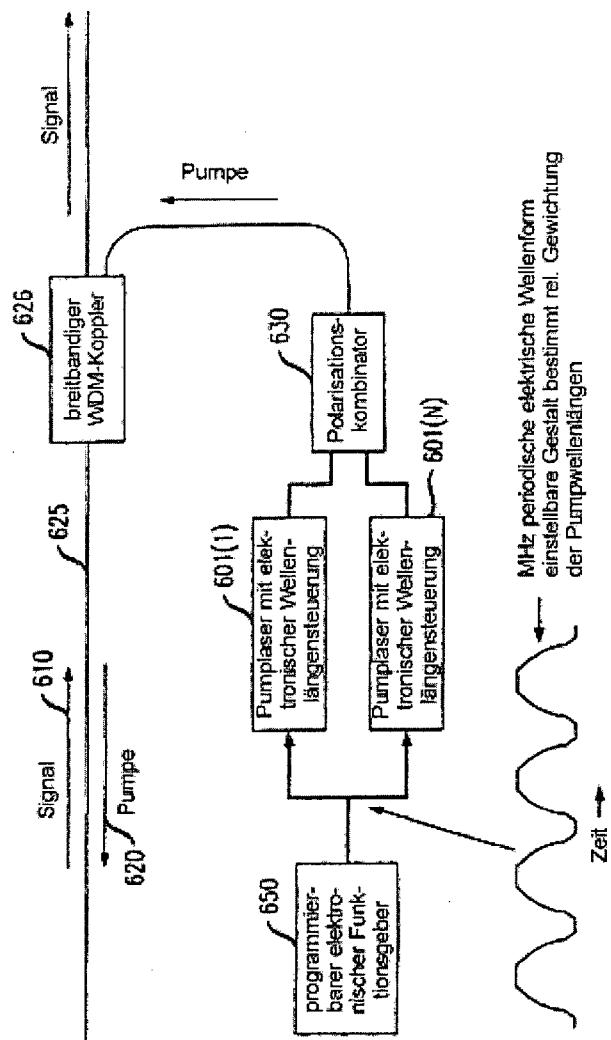


Fig. 8

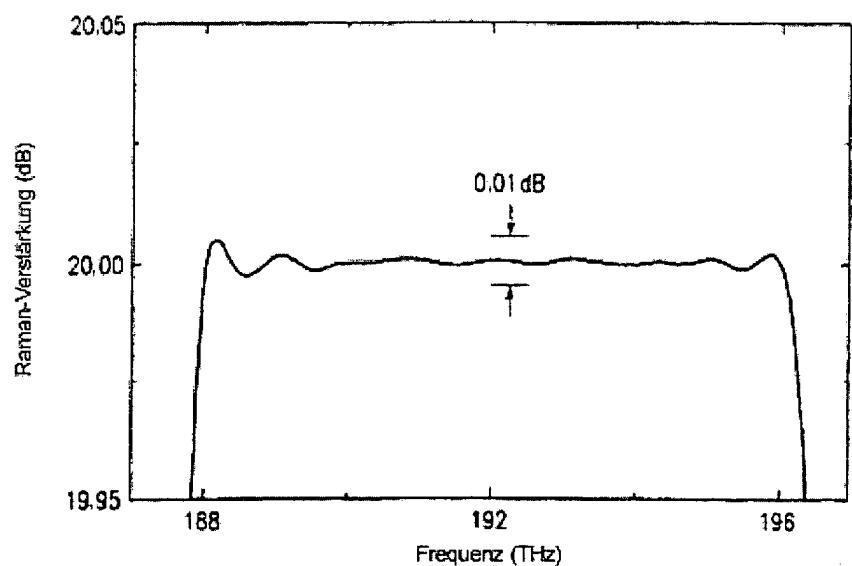


Fig. 9

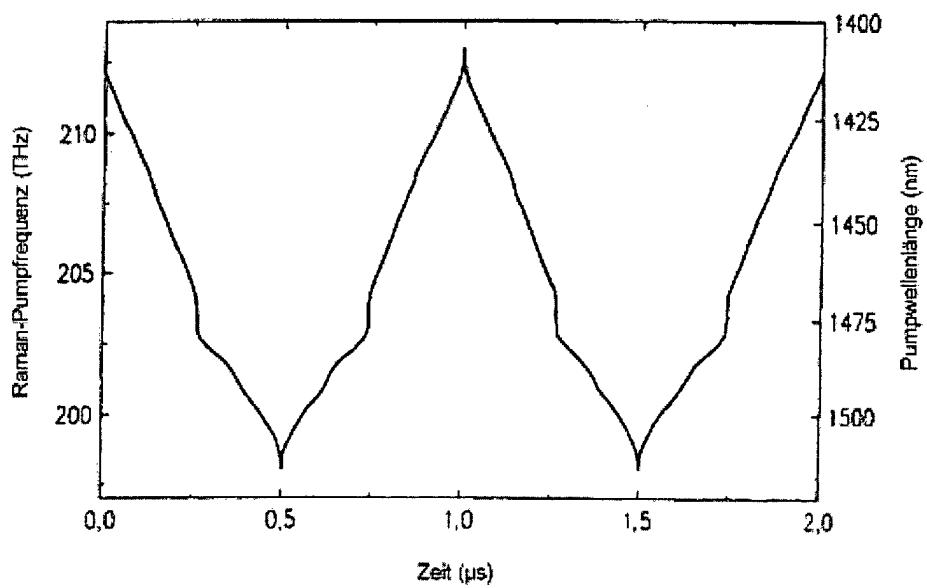


Fig. 10

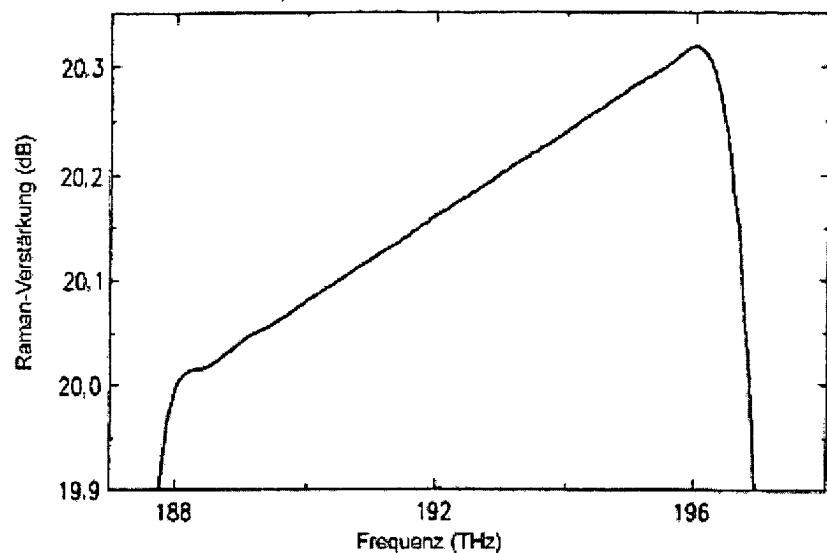


Fig. 11

