



(10) **DE 101 24 983 B4** 2013.04.18

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **101 24 983.7**
(22) Anmeldetag: **22.05.2001**
(43) Offenlegungstag: **07.03.2002**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **18.04.2013**

(51) Int Cl.: **H01S 3/23 (2006.01)**
H01S 3/067 (2006.01)
H01S 3/109 (2006.01)
H01S 3/30 (2012.01)
H01S 3/11 (2012.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(30) Unionspriorität:
09/576,772 **23.05.2000** **US**

(62) Teilung in:
101 65 106.6

(73) Patentinhaber:
IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US

(74) Vertreter:
BOEHMERT & BOEHMERT, 28209, Bremen, DE

(72) Erfinder:
Fermann, Martin E., Dr., Ann Arbor, Mich., US;
Galvanauskas, Almantas, Dr., Ann Arbor, Mich.,
US; Harter, Donald J., Dr., Ann Arbor, Mich., US

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

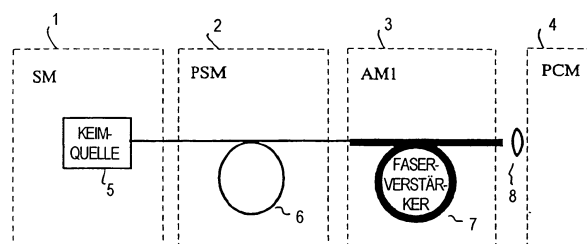
DE	195 12 160	A1
DE	195 31 059	A1
DE	198 02 845	A1
DE	199 42 954	A1
US	5 933 271	A
US	6 034 975	A
US	5 802 236	A

**M.Fermann, u. a., "High-Power Compact
Ultrafast Fiber Lasers". In: Proc. SPIE Vol. 3942,
S. 194-200, 26. Jan. 2000**

**M.Fermann, u. a., "Ultrawide tunable Er soliton
fiber laser amplified in Yb-doped fiber". In: Optics
Letters, Vol. 24, No. 20, S. 1428-1430, 15. Okt.
1999**

(54) Bezeichnung: **Modulare hochenergetische breit abstimbare ultraschnelle Faserquelle**

(57) Hauptanspruch: Ein faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem, welches Ausgangsimpulse im Wellenlängenbereich zwischen 1–1,15 µm erzeugt, mit:
einer Keimquelle (1), die einen passiv modengekoppelten Yb-Faserlaser umfasst;
einem Yb-Faserverstärker (3a) zur Verstärkung einer Ausgabe des Faserlasers;
einer Faserimpulsdehnungseinrichtung (2), die die Impulse von der Keimquelle empfängt, die Impulse zeitlich dispersiv dehnt und die gedehnten Impulse an den Faserverstärker ausgibt, wobei die Faserimpulsdehnungseinrichtung (2) zumindest eines von einem Bragg-Faser-Gitter und einem Faser-Transmissionsgitter umfasst;
einem optischen Modulator (52), der zwischen dem passiv modengekoppelten Faserlaser und dem Yb-Verstärker angeordnet ist, wobei der Modulator steuerbar ist, um die Wiederholungsrate von Impulsen, die von dem modengekoppelten Faserlaser ausgehen, zu reduzieren und um die verfügbare Impulsenergie von Impulsen, die mit dem Yb-Verstärker verstärkt werden, zu erhöhen;
einer Impuls-Verdichtungseinrichtung (4), der die verstärkten gedehnten...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft wellenlängenabstimmbare, kompakte, modulare und effiziente Quellen von ultrakurzen Hochleistungslaserimpulsen, die ein wesentlicher Bestandteil bei der kommerziellen Verwendung der ultraschnellen Lasertechnologie sind.

[0002] Faserlaser sind schon seit langem für die Bereitstellung eines effektiven Mediums für die Erzeugung von ultrakurzen Impulsen bekannt, obwohl bisher derartige Systeme hauptsächlich auf einer Impulsverstärkung mit dynamischer Wellenlängenveränderung (nachstehend mit "Chirp" bzw. "gechirpt" bezeichnet) basierten, welche gechirpte Bragg-Gitter verwenden, wobei begrenzte Optionen für die Wellenlängenabstimmung und Begrenzungen bei der minimal erzielbaren Impulsbreite vorlagen (A. Galvanauskas und M. E. Fermann: „Optical Pulse Amplification Using Chirped Bragg Gratings“, US-Patentschrift Nr. 5,499,134). Gechirpte Bragg-Gitter wurden in der Tat zu breit verfügbaren Vorrichtungen entwickelt und der Chirp innerhalb der Bragg-Gitter kann linear oder selbst nichtlinear für die Kompensierung einer beliebigen Dispersionsgrößenordnung in einem gechirpten Impulsverstärkungssystem entworfen werden (A. Galvanauskas et al.: „Hybrid Short-Pulse Amplifiers with Phase-Mismatch Compensated Pulse Stretchers and Compressors“, US-Patentschrift Nr. 5,847,863), was für die Erzeugung von bandbreitenbegrenzten Impulsen wichtig ist, d. h. den kürzest möglichen Impulsen für eine gegebene spektrale Impulsbandbreite.

[0003] Für die Maximierung der Leistungs- und Energiebegrenzungen von optischen Fasern ist die Verwendung einer gechirpten Impulsverstärkung zweifellos wünschenswert, obwohl gleichzeitig das Verlangen nach Systemintegration (Bragg-Gitter müssen eher reflektierend als transmittierend betrieben werden, damit die höchstmögliche Dispersion bereitgestellt wird) die Verwendung derartiger Standardchirpimpulsverstärkungssysteme unpraktisch gestaltet. Als Alternative zu gechirpter Impulsverstärkung wurde die Verstärkung von Hochleistungsimpulsen in Multimodenfaserverstärkern angeregt (M. E. Fermann und D. Harter: „Single-mode Amplifiers and Compressors Based on Multi-mode Fibers“, US-Patentschrift Nr. 5,818,630). Als noch eine weitere Alternative zu gechirpter Impulsverstärkung wurde die Verwendung von Solitonenramandehnung in Faserverstärkern oder allgemein die Verwendung einer Impulsdehnung innerhalb nichtlinearer Faserverstärker vorgeschlagen (M. E. Fermann, A. Galvanauskas und D. Harter: „Apparatus and Method for the Generation of High-power Femtosecond Pulses from a Fiber Amplifier“, US-Patentschrift Nr. 5,880,877).

[0004] Offenbar kann die Verwendung von Multimodenfasern mit gechirpter Impulsverstärkung und

Solitonenramandehnung zur weiteren Verbesserung der Leistungsfähigkeit derartiger Systeme kombiniert werden. Bis jetzt wurden jedoch keine Verfahren zur Steuerung der Impulsform für eine weitere Optimierung der Gesamtsystemleistungsfähigkeit beschrieben. Die Verwendung von Selbstphasenmodulation in dem Dehnungsteil derartiger gechirpter Impulsverstärkungssysteme wurde gleichfalls nicht angeregt.

[0005] Darüber hinaus kann als Kompromiss zwischen der Systemkompaktheit und der Hochenergiebefähigung die Verwendung einer Faserdispersionsverzögerungsleitung in Verbindung mit einer optischen Volumenverdichtungseinrichtung vorteilhaft sein, wobei zumindest eine Teilintegration eines Hochenergiefaserlasersystems bereitgestellt wird (M. E. Fermann, A. Galvanauskas und D. Harter: „All fiber source of 100 nJ sub-picosecond pulses“, Applied Physics Letters, Band 64, 1994, Seiten 1315–1317). Bis jetzt wurden jedoch keine effektiven Verfahren zur Steuerung der Dispersion dritter und vierter Ordnung in derartigen Dehnungseinrichtungs- und Verdichtungseinrichtungsverbindungen für die Rückverdichtung der Impulse auf annähernd ihre Bandbreitengrenze entwickelt.

[0006] Als Alternative zur gechirpten Impulsverstärkung wurde ebenfalls vormals angeregt, dass eine effiziente Impulsverdichtung erhalten werden kann, indem quarzglasbasierte Einzelmoden-Erbiumverstärker mit einer positiven Hochverstärkungsdispersion (nicht-Solitonen-unterstützend) in Verbindung mit Bulk-Prismaverdichtungseinrichtungen verwendet werden (K. Tamura und M. Nakazawa: „Pulse Compression by Nonlinear Pulse Evolution with Reduced Optical Wave Breaking in Erbium-Doped Fiber Amplifiers“, Optical Letters, Band 21, Seite 68 (1996)). Die Verwendung dieser Technik in Verbindung mit quarzglasbasierten Erbiumverstärkern ist jedoch problematisch, weil das Erfordernis für positive Dispersion die Faserkerngröße auf etwa 5 µm begrenzt, andernfalls dominiert die negative Materialdispersion über die positive Wellenleiterdispersion, wodurch eine negative Gesamtfaserdispersion erzeugt wird. Quarzglasbasierte Multimodenfasern weisen gleichfalls eine negative Dispersion bei Erbiumverstärkerwellenlängen auf, was ihre Verwendung bei effizienter Impulsverdichtung verhindert. Somit reduziert die begrenzte Kerngröße von Erbiumverstärkern mit positiver Dispersion in großem Ausmaß die erzielbare Impulsenergie.

[0007] Darüber hinaus zeigten Tamura et al. nicht, wie eine zusätzliche Spektralaufweitung und Impulsverstärkung nach diesem einen Erbiumverstärker erzeugt wird. Gleichfalls wurde durch Tamura et al. nicht gelehrt, wie die Leistungsfähigkeit der Prismaimpulsverdichtungseinrichtung für die Kompensierung der Dispersion des Erbiumverstärkers optimiert wird.

[0008] Als weitere Alternative zur gechirpten Impulsverstärkung wurde die Verwendung einer nicht verstärkenden optischen Faser in Verbindung mit einer Bulk-Gitterverdichtungseinrichtung angeregt (D. Grischkowsky et al. und J. Kafka et al., US-Patentschrift Nr. 4,750,809). Da jedoch bei einem derartigen System keine Verstärkung existiert, müssen hohe Impulsenergien in das nichtlineare optische Element für den Erhalt einer hohen Ausgangsleistung gekoppelt werden, was die Spitzenleistungsfähigkeit des Systems in großem Ausmaße reduziert. Darüber hinaus wurde keine Einrichtung zur Kompensierung der Dispersion höherer Ordnung in einer derartigen optischen Anordnung beschrieben, was die Praktikabilität dieses Ansatzes sehr begrenzt. Ohne Steuerung der Impulsgestalt bei der Eingabe in ein derartiges System kann zusätzlich die spektrale Aufweitung mit einem linearen Chirp lediglich für sehr begrenzte Eingangsleistungen erhalten werden. Die Steuerung der Eingangsimpulsgestalt wurde durch Kafka et al. nicht beschrieben. Für den Erhalt der kürzest möglichen Impulse in Verbindung mit einer Bulk-Gitterverdichtungseinrichtung ist gleichfalls die Steuerung der Dispersion der zweiten und dritten Ordnung in einem derartigen nichtlinearen optischen Element erforderlich, was ebenfalls durch Kafka et al. nicht beschrieben wurde.

[0009] Eine Kompensation für die chromatische Dispersion in einem (Niederleistungs-)Lichtwellensignal unter Verwendung der chromatischen Dispersion in einem anderen (dispersionskompensierenden) Wellenleiterelement wurde zur Optimierung der Leistungsfähigkeit von Telekommunikationssystemen eingeführt (C. D. Poole, „Apparatus of compensating chromatic dispersion in optical fibers“, US-Patentschrift Nr. 5,185,827). Die durch ein dispersionskompensierendes Wellenleiterelement für Hochleistungsimpulsquellen eingeführte Selbstphasenmodulation verhindert jedoch deren effektive Verwendung. Darüber hinaus arbeitet das durch Poole beschriebene System lediglich in Verbindung mit Modenumwandlungseinrichtungen und/oder seltene-Erden-dotierten Fasern, entweder für die selektive Absorption einer Raummode einer höheren Ordnung in dem dispersionskompensierenden Wellenleiterelement oder für die selektive Verstärkung der Grundmode in dem dispersionskompensierenden Wellenleiterelement. Für die Kompensierung der Dispersion von optischen Hochleistungsimpulsen in Gegenwart der Selbstphasenmodulation wurde keine Einrichtung gelehrt und für die Implementierung eines dispersionskompensierenden Wellenleiters ohne Modenumwandlungseinrichtung wurde keine Einrichtung angeregt.

[0010] Als Alternative zu der Verwendung von Modenumwandlungseinrichtungen und Moden höherer Ordnung sind Fasern mit W-förmigen Brechungsindexprofilen bekannt (B. J. Ainslie und C. R. Day: „A

review of single-mode fibers with modified dispersion characteristics“, Journal of Lightwave Technology, Band LT-4, Nr. 8, Seiten 967–979, 1988). Die Verwendung derartiger Faserentwürfe bei Hochleistungsfaserchirpimpulsverstärkungssystemen wurde jedoch nicht beschrieben.

[0011] Zur Maximierung der Effizienz von ultraschnellen Faserverstärkern wurde die Verwendung von Yttriumfaserverstärkern angeregt (D. T. Walton, J. Nees und G. Mourou: „Broad-bandwidth pulse amplification to the 10 μ J level in an ytterbium-doped germanosilicate fiber“, Optical Letters, Band 21 (14), Seiten 1061 (1996)), obwohl die Arbeit von Walton et al. einen Argonlaser-gepumpten Ti:Saphir-Laser zur Anregung der Ytterbium-dotierten Fasern sowie einen phasengekoppelten Ti:Saphir-Laser als Quelle der Signalimpulse verwendete, was äußerst ineffizient und zweifellos inkompatibel mit einem kompakten Aufbau ist. Darüber hinaus wurden keine Einrichtungen zur Steuerung der Phase der optischen Impulse bei dem Verstärkungsvorgang angeregt, d. h. 100 fs Impulse von dem Ti:Saphir-Laser wurden unmittelbar mit dem Ytterbiumverstärker durch eine 1,6 km lange Einzelmodenfaserdispersionsverzögerungsleitung gekoppelt, welche aufgrund von Dispersion der höheren Ordnung große Phasenstörungen erzeugt, was die Anwendbarkeit des Systems auf ultraschnelle Anwendungen stark begrenzt. Zur Induktion einer hochqualitativen parabolischen Hochleistungsimpulsausbildung innerhalb des Ytterbiumverstärkers wären eher Keimimpulse in dem Bereich von 200 bis 400 fs für eine Ytterbiumverstärkerlänge von ein paar Metern vorzuziehen. Die Verwendung eines ytterbiumdotierten Einzelmodenfaserverstärkers durch Walton et al. beschränkte zudem stark die Energie- und Leistungsgrenzen des Ytterbiumverstärkers. Die Verwendung einer ytterbiumdotierten Multimodenfaser wurde in der US-Anmeldung Nr. 09/317221 angeregt, obwohl eine zu Ytterbiumverstärkern kompatible kompakte ultraschnelle Impulsquelle schwer fassbar blieb.

[0012] Ein in breitem Ausmaße abstimmbarer gepulster Ytterbiumfaserlaser wurde jüngst unter Einbeziehung eines aktiven optischen Modulationsschemas beschrieben (J. Porta et al.: „Environmentally stable picosecond ytterbium fiber laser with a broad tuning range“, Optics Letters, Band 23, Seiten 615–617 (1998)). Obwohl dieser Faserlaser einen Abstimmungsbereich annähernd innerhalb der Verstärkungsbandbreite von Ytterbium bot, ist die Anwendung des Lasers auf ultraschnelle optische Einrichtungen aufgrund der durch den Laser erzeugten relativ langen Impulse begrenzt. Allgemein erzeugen aktiv phasengekoppelte Laser längere Impulse als passiv phasengekoppelte Laser und bei dem vorliegenden Fall betrug die erzeugte Impulsbandbreite lediglich 0,25 nm mit einer minimalen Impulsbreite von 5 ps.

[0013] In einem breiten Wellenlängenbereich abstimmbare Faserlaserquellen wurden jüngst unter Verwendung der Ramanverschiebung in Verbindung mit einer Frequenzumwandlung in einem nichtlinearen Kristall beschrieben (vgl. M. E. Fermann et al., US-Patentschrift Nr. 5,880,877 sowie N. Nizhizawa und T. Goto: „Simultaneous Generation of Wavelength Tunable Two-Colored Femtosecond Soliton Pulses Using Optical Fibers“, *Photonics Technical Letters*, Band 11 (4), Seiten 421–423). Im Wesentlichen rauminvariante Faserramanverschiebungseinrichtungen wurden angeregt, was zu einer begrenzten Wellenlängenabstimmbarkeit von 300 bis 400 nm führte (vgl. Nizhizawa et al.). Darüber hinaus war kein Verfahren zur Minimierung des Rauschens eines derartigen hoch nichtlinearen Systems auf der Grundlage der sukzessiven Anwendung von Ramanverschiebung und nichtlinearer Frequenzumwandlung in einem nichtlinearen optischen Kristall bekannt. Ferner beruht das durch Nizhizawa et al. beschriebene System auf einem relativ komplexen polarisationsgesteuerten Niederleistungserbiumfaseroszillator, der in einem zusätzlichen polarisationsgesteuerten Erbiumfaserverstärker zum Anregen der Ramanverschiebungseinrichtung verstärkt wird. Darüber hinaus wurde kein Verfahren beschrieben, das die Ramanverschiebung der Frequenzverdoppelten Ausgabe eines Erbiumfaserlasers erlauben würde.

[0014] Eine mit den Impulsen von einem Hochleistungsfaseroszillator oder den frequenzumgewandelten Impulsen von einem Hochleistungsfaseroszillator unmittelbar gekeimte Ramanverschiebungseinrichtung wäre zweifellos zu bevorzugen. Derartige Faseroszillatoren wurden jüngst unter der Verwendung von optischem Multimodenfasern beschrieben (M. E. Fermann: „Technique for mode-locking of multi-mode fibers and the construction of compact high-power fiber laser pulse sources“, US-Seriennummer 09/199,728). Bis jetzt wurden jedoch keine Verfahren für die Frequenzumwandlung derartiger Oszillatoren mit einer 25 nachfolgenden Verwendung der Ramanverschiebung vorgestellt.

[0015] Im Artikel „High-power compact ultrafast fiber lasers“ von M. E. Fermann, M. L. Stock, A. Galvanauskas und D. J. Harter, *Proceedings of SPIE*, vol. 3942 (2000), S. 194–200, ist eine kompakte ultraschnelle Hochleistungsimpulsquelle beschrieben, die auf einem optischen Faserlaser basiert. Die Impulsquelle umfasst einen Yb-Faserverstärker mit einem frequenzverschobenen passiv modengekoppelten Er-Faserlaser als Keimquelle.

[0016] Aus dem Artikel „Ultrawide tunable Er soliton fiber laser amplified in Yb-doped fiber“ von M. E. Fermann, A. Galvanauskas, M. L. Stock, K. K. Wong, und D. Harter in *Optics Letters*, vol. 24, no. 20, S. 1428–1430, ist ein Raman-verschobener und frequenzverdoppelter Er-Faser-Hochleistungs-Solitonenlaser be-

kannt, der als Keimquelle für einen Hochleistungs-Yb-Faser-Femtosekundenverstärker dient.

[0017] US 5 802 236 A offenbart einen Artikel, umfassend eine mikrostrukturierte optische Faser mit einer axialen Richtung und einem Querschnitt senkrecht zur axialen Richtung, wobei die optische Faser einen Kernbereich aufweist, der von einem Mantelbereich umgeben ist, der eine Vielzahl voneinander beabstandeter Mantelmerkmale aufweist, die in der axialen Richtung gestreckt sind und in einem ersten Mantelmaterial angeordnet sind, wobei der Kernbereich einen effektiven Durchmesser D_0 und einen effektiven Brechungsindex M_0 aufweist, wobei die Mantelmerkmale einen Brechungsindex aufweisen, der sich vom Brechungsindex des ersten Mantelmaterials unterscheidet und wobei der Mantelbereich einen effektiven Brechungsindex aufweist, der geringer ist als M_0 .

[0018] US 5 933 271 A offenbart ein stufenförmiges optisches Verstärkersystem mit zumindest zwei optischen Verstärkungsstufen, das eine Injektionsquelle, die ein gepulstes Injektionssignal für eine Verstärkung liefert, eine erste Pumpquelle, die ein erstes Pumpsignal liefert, ein erstes Verstärkungsmedium, das als Eingang die Signale empfängt, wobei das gepulste Injektionssignal auf ein erstes Leistungs- und Energieniveau verstärkt wird, ein zweites Verstärkungsmedium, das optisch mit dem ersten Verstärkungsmedium gekoppelt ist, um als Eingang das auf das erste Niveau verstärkte gepulste Injektionssignal zu empfangen, eine zweite Pumpquelle umfasst, die ein zweites Pumpsignal für einen Eingang zum zweiten Verstärkungsmedium zusammen mit dem auf das erste Niveau verstärkten gepulsten Injektionssignal liefert, wobei zumindest eine der Pumpquellen gepulst ist, wobei die Pulspositionen der gepulsten optischen Injektionssignale mit den Pulspositionen des gepulsten Pumpsignals synchronisiert sind.

[0019] DE 198 02 845 A1 offenbart eine Vorrichtung zur Erzeugung von optischen Hochleistungsimpulsen, gekennzeichnet durch eine optische Quelle zur Erzeugung von Signallicht, einen nichtlinearen Verstärker mit einer nichtlinearen Phasenverzögerung, der das durch die optische Quelle erzeugte Signallicht empfängt und einen Frequenzwandler, der aus dem nichtlinearen Verstärker ausgegebene optische Impulse empfängt, wobei der Frequenzwandler die optischen Hochleistungsimpulse an dessen Ausgang erzeugt.

[0020] DE 195 31 059 A1 offenbart ein Gerät zum Verstärken eines optischen Impulses, umfassend Erzeugungseinrichtungen zum Erzeugen eines optischen Impulses, Ausdehnungseinrichtungen, die optisch mit den Erzeugungseinrichtungen verbunden sind, zum Reduzieren der Spitzenamplitude des op-

tischen Pulses und zum Erhöhen der Dauer des optischen Pulses, Verstärkungseinrichtungen, die optisch mit der Ausdehnungseinrichtung verbunden sind, zum Erhöhen der Amplitude des optischen Impulses, nachdem der optische Impuls von der Ausdehnungseinrichtung ausgegeben worden ist, und Einrichtungen zum Wiederkomprimieren, die optisch mit der Verstärkungseinrichtung verbunden sind, zum Verringern der Dauer des optischen Impulses, nachdem der optische Impuls von der Verstärkungseinrichtung ausgegeben worden ist, worin die Ausdehnungseinrichtung und/oder die Wieder-Kompressionseinrichtung ein Chirp-moduliertes Bragg-Gitter umfasst.

[0021] DE 195 12 160 A1 offenbart ein Gerät zur Erzeugung von gepulster Energie mit hoher Spitzenleistung, umfassend Einrichtungen zum Erzeugen eines abstimmbaren und komprimierbaren Energieimpulses mit mehreren Wellenlängenbändern durch Abstimmen einer Emissionswellenlänge des Energieimpulses, wobei die Dauer des Energieimpulses durch Überlappen der Wellenlängenbänder komprimierbar ist, und Einrichtungen zum Erhöhen der Spitzenleistung des Energieimpulses, wobei die Einrichtung zum Erhöhen der Spitzenleistung umfasst: Einrichtungen zum Verstärken des Energieimpulses in mehreren Stufen der Verstärkung unter Erzeugung eines verstärkten Energieimpulses und Einrichtungen zum Unterdrücken der spontanen Emission zwischen mindestens zwei Stufen der Verstärkungseinrichtung.

[0022] US 6 034 975 A offenbart eine optische Kavität für einen modegekoppelten Kurzpulsfaserlaser, umfassend erste und zweite Reflektoren, die jeweils zumindest teilweise reflektieren und entsprechend ein erstes und ein zweites Ende der Kavität definieren; eine Faser mit einem Gain-Medium, das zwischen dem ersten und zweiten Ende der Kavität angeordnet ist, einen Pumpsignalinjektor, der angeschlossen ist, um Pumplicht in die Faser zum ersten Ende der Kavität einzuführen, wobei das Pumplicht das Gain-Medium anregt, um ein Lasersignal zu erzeugen, einen sättigbaren Absorber in der Nähe des ersten Endes der Kavität, wobei der sättigbare Absorber ein Modenkoppeln des Lasersignals induziert, und einen Ausgangskoppler in der Nähe des zweiten Endes der Kavität, der einen Teil des Lasersignals in der Form kurzer Ausgangspulse auskoppelt.

[0023] DE 199 42 954 A1 offenbart einen modenkoppelnden Laser mit einem Verstärkungsmedium, ersten und zweiten Reflektoren, die an gegenüberliegenden Enden des Verstärkungsmediums zur Ausbildung eines optischen Resonators angeordnet sind, einem dritten Reflektor, der innerhalb des Resonators angeordnet ist und von dem ersten Reflektor zur Ausbildung eines Fabry-Perot-Etalons beanstandet ist, welches sich bei der Laserfrequenz annähernd in Resonanz befindet, und einem sättigbaren Absorber

mit nichtlinearen Absorptionseigenschaften, der modegekoppelte Laserimpulse induziert, wobei der Absorber innerhalb des Fabry-Perot-Etalons angeordnet ist.

[0024] Demzufolge liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein modulares, kompaktes, in einem breiten Bereich abstimmbares, mit hoher Spitzen- und hoher Durchschnittsleistung sowie niedrigem Rauschen versehenes ultraschnelles Faserverstärkungslasersystem einzuführen.

[0025] Zudem wird erfindungsgemäß die Modularität des Systems sichergestellt, indem eine Vielzahl von leicht untereinander austauschbaren optischen Systemen, wie etwa 1) Kurzpulskeimquellen, 2) breite Bandbreitenfaserverstärker, 3) dispersive Impulsdehnungselemente, 4) dispersive Impulsverdichtungselemente, 5) nichtlineare Frequenzumwandlungselemente und 6) optische Komponenten für die Faserzuleitung verwendet werden. Zusätzlich kann jedes der angeregten Module eine Untergruppe von untereinander austauschbaren optischen Systemen umfassen.

[0026] Ferner wird erfindungsgemäß die Kompaktheit des Systems sichergestellt, indem durch Diodenlaser direkt oder indirekt gepumpte effiziente Faserverstärker sowie integrierte Dispersionsverzögerungsleitungen verwendet werden. Die Befähigung zu hohen Spitzenleistungen der Faserverstärker wird durch die Verwendung von parabolischen oder anderen optimierten Impulsformen stark ausgeweitet. In Verbindung mit Selbstphasenmodulation erlauben parabolische Impulse die Erzeugung von Impulsen mit hoher Spitzenleistung und großer Bandbreite sowie eine gut steuerbare dispersive Impulsdehnung. Parabolische Impulse mit hoher Leistung werden in Einzel- oder Multimodenfaserverstärkern mit hoher Verstärkung erzeugt, die bei Wellenlängen arbeiten, bei denen die Fasermaterialdispersion positiv ist.

[0027] Parabolische Impulse können entlang wesentlicher Faserlängen selbst in der Gegenwart einer Selbstphasenmodulation oder von allgemeinen optischen Nicht-Linearitäten in der Art des Kerr-Effektes zugeführt oder übertragen werden, während lediglich ein im Wesentlichen linearer Impulschirp in Kauf genommen wird. Am Ende derartiger Faserzuleitungs- oder Faserübertragungsleitungen können die Impulse näherungsweise an ihre Bandbreitengrenze verdichtet werden.

[0028] Zudem wird die Hochenergiebefähigung der Faserverstärker durch die Verwendung einer geschirpten Impulsverstärkung in Verbindung mit parabolischen Impulsen oder anderen optimierten Impulsgestalten stark ausgedehnt, welche die Tolerierung eines großen Ausmaßes an Selbstphasenmodulation ohne Degradation der Impulsqualität erlauben.

Hochintegrierte gechirpte Impulsverstärkungssysteme werden ohne einen Kompromiss bei der Hochenergiebefähigung der optischen Fasern durch die Verwendung von faserbasierten Impulsdehnungseinrichtungen in Verbindung mit optischen Bulk-Impulsverdichtungseinrichtungen (oder Bragg-Gittern mit niedriger Nichtlinearität) oder periodisch gepolten nichtlinearen Kristallen aufgebaut, welche die Impulsverdichtung mit Frequenzumwandlung kombinieren.

[0029] Die Dispersion bei der Faserimpulsdehnungseinrichtung und bei der optischen Bulk-Verdichtungseinrichtung wird auf die vierte Ordnung bei der Phase angepasst, indem Faserimpulsdehnungseinrichtungen mit einer einstellbaren Dispersion der zweiten, dritten und vierten Ordnung implementiert werden. Eine einstellbare Dispersion höherer Ordnung kann durch die Verwendung von Einzelmodenfasern mit hoher numerischer Apertur und optimierten Brechungsindexprofilen an sich oder durch die Verwendung von Standardstufenindexfasern mit hoher numerischer Apertur in Verbindung mit linearen Chirpfasergittern erhalten werden. Alternativ kann die Dispersion höherer Ordnung durch Verwendung der Dispersionseigenschaften der Mode höherer Ordnung bei einer Faser für die Ausbreitung einiger Moden mit hoher numerischer Apertur gesteuert werden, indem nichtlineare Chirpfasergitter oder lineare Chirpfasergitter in Verbindung mit transmittierenden Fasergittern verwendet werden. Eine einstellbare Dispersion der vierten Ordnung kann durch die Steuerung des Chirps bei Faser-Bragg-Gittern und transmittierenden Fasergittern und durch die Verwendung von Fasern mit unterschiedlichen Verhältnissen der Dispersion der zweiten, dritten und vierten Ordnung erhalten werden. Eine Steuerung der Dispersion höherer Ordnung kann gleichfalls durch die Verwendung von periodisch gepolten nichtlinearen Kristallen erhalten werden.

[0030] Die Faserverstärker werden durch Kurzpuls-laserquellen gekeimt, vorzugsweise in der Gestalt von Kurzpulsfaserquellen. Im Falle von Ytterbiumfaserverstärkern können Kurzpuls-Erbiumfaserlaserquellen mit Ramanverschiebung und Frequenzverdopplung als breit abstimmbare Keimquellen implementiert werden. Zur Minimierung des Rauschens bei Frequenzumwandlung von dem 1,5 μm zu dem 1,0 μm -Bereich kann eine selbstbegrenzende Ramanverschiebung der Erbiumfaserlaserimpulsquelle verwendet werden. Alternativ kann das Rauschen bei dem nichtlinearen Frequenzumwandlungsvorgang durch Implementierung einer selbstbegrenzenden Frequenzverdopplung minimiert werden, wobei die zentrale Wellenlänge der Abstimmungskurve des Verdopplungskristalls kürzer als die zentrale Wellenlänge der Impulse mit Ramanverschiebung ist.

[0031] Der Vorgang der Ramanverschiebung und Frequenzverdopplung kann ebenfalls umgekehrt

werden, wobei bei einem Erbiumfaserlaser zunächst eine Frequenzverdopplung und nachfolgend eine Ramanverschiebung in einer optimierten Faser durchgeführt wird, wobei eine Solitonen-unterstützte Dispersion für Wellenlängen um die 800 nm und höher zur Erzeugung einer Keimquelle für den 1 μm -Wellenlängenbereich bereitgestellt wird.

[0032] Als alternative Keimquelle mit geringer Komplexität für einen Ytterbiumverstärker kann ein phasengekoppelter Ytterbiumfaserlaser verwendet werden. Der Faserlaser kann zur Erzeugung von stark gechirpten Impulsen entworfen werden und ein optisches Filter kann für die Auswahl von nahezu bandbreitenbegrenzten Keimimpulsen für den Ytterbiumverstärker eingebaut werden.

[0033] Da parabolische Impulse entlang der wesentlichen Faserlänge übertragen werden können, können sie ebenso bei optischen Faserkommunikationssystemen verwendet werden. Dabei können solche parabolischen Impulse übertragen werden, die durch eine externe Impulsquelle erzeugt werden. Alternativ können parabolische Impulse ebenso bei dem Übertragungsvorgang erzeugt werden. In letzterem Fall wird der schädliche Effekt von optischen Nichtlinearitäten bei dem Übertragungssystem im Allgemeinen durch die Implementierung von langen verteilten optischen Verstärkern mit positiver Dispersion minimiert. Derartige Verstärker können Längen von zumindest 10 km und eine Verstärkung von weniger als 10 dB/km aufweisen. Die Gesamtverstärkung pro Verstärker sollte 10 dB überschreiten, damit der Beginn der Ausbildung von parabolischen Impulsen für eine Minimierung des schädlichen Effekts von optischen Nichtlinearitäten ausgenutzt wird. Eine Chirpkompensierung entlang der Übertragungsleitungen kann bequem unter Verwendung von gechirpten Faserbragg-Gittern entlang der Faserübertragungsleitung implementiert werden, sowie auch am Ende der Übertragungsleitung. Optische Bandbreitenfilter können zudem für eine Bandbreitensteuerung der übertragenen Impulse implementiert werden.

[0034] Wellenlängenabstimmbare Impulsquellen auf der Grundlage der Ramanverschiebung von kurzen Impulsen in optischen Fasern sind für viele Anwendungen an sich hilfreich, beispielsweise bei der Spektroskopie. Eine sehr attraktive Vorrichtung kann jedoch durch die Verwendung der Ramanverschiebung bei dem Aufbau von wellenlängenabstimmbaren Faser-Ramanverstärkern für Telekommunikationssysteme aufgebaut werden. Bei diesem wellenlängenabstimmbaren System stellen ramanverschobene Pumpimpulse eine Ramanverstärkung für einen abstimmbaren Wellenlängenbereich bereit, der bezüglich der Pumpimpulse rot-verschoben ist. Darüber hinaus kann die Gestalt des Ramanverstärkungsspektrums durch Modulation der ramanverschobenen Pumpimpulse gesteuert werden.

[0035] Die Erfindung wird nachstehend unter Bezugnahme auf die beiliegende Zeichnung näher beschrieben. Es zeigen:

[0036] [Fig. 1](#) eine Darstellung eines erfindungsgemäßen modularen kompakten abstimmbaren Systems zur Erzeugung von ultrakurzen Laserimpulsen mit hoher Spitzen- und hoher Durchschnittsleistung;

[0037] [Fig. 2](#) eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Keimmoduls (SM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0038] [Fig. 3](#) eine graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der durchschnittlichen frequenzverdoppelten Leistung und der Wellenlänge, die bei einem gegebenen Eingangsleistungsbereich gemäß einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ausgegeben werden;

[0039] [Fig. 4](#) eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Impulsverdichtungsmoduls (PCM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0040] [Fig. 5](#) eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Impulsdehnungsmoduls (PSM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0041] [Fig. 6](#) eine Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Keimmoduls (SM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0042] [Fig. 7](#) eine Darstellung eines dritten Ausführungsbeispiels eines Keimmoduls (SM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0043] [Fig. 8](#) eine Darstellung eines vierten Ausführungsbeispiels eines Keimmoduls (SM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0044] [Fig. 9](#) eine Darstellung eines fünften Ausführungsbeispiels eines Keimmoduls (SM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0045] [Fig. 10](#) eine Darstellung eines erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiels, bei dem ein Faserzuleitungsmodul (FDM) dem in [Fig. 1](#) gezeigten erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiel hinzugefügt wurde;

[0046] [Fig. 11](#) eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Faserzuleitungsmoduls (FDM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0047] [Fig. 12](#) eine Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Impulsdehnungsmoduls (PSM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0048] [Fig. 13](#) eine Darstellung eines dritten Ausführungsbeispiels eines Impulsdehnungsmoduls (PSM) zur erfindungsgemäßen Verwendung;

[0049] [Fig. 14](#) eine Darstellung eines erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiels, bei dem Impulsauswahlelemente und zusätzliche Verstärkungsstufen hinzugefügt sind;

[0050] [Fig. 15](#) eine Darstellung eines weiteren erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiels, bei dem ein Faserverstärker mit zumindest einem Hin- und einem Rückpass in Verbindung mit optischen Modulatoren wie etwa Impulsauswahlelementen betrieben wird;

[0051] [Fig. 16](#) eine Darstellung eines weiteren erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiels in dem Kontext eines optischen Kommunikationssystems; und

[0052] [Fig. 17](#) eine Darstellung eines weiteren erfindungsgemäßen Ausführungsbeispiels in dem Kontext eines wellenlängenabstimmbaren Ramanverstärkers für Telekommunikationseinrichtungen.

[0053] Eine verallgemeinerte Darstellung des erfindungsgemäßen Systems ist in [Fig. 1](#) gezeigt. Die in einer Laserkeimquelle **1** (Keimmodul; SM) erzeugten Impulse werden in ein Impulsdehnungsmodul **2** (PSM) eingekoppelt, wo sie zeitlich dispersiv gedehnt werden. Die gedehnten Impulse werden nacheinander in die Grundmode eines mantelgepumpten Ytterbiumfaserverstärkers **3** (Verstärkermodul, AM1) eingekoppelt, wo die Impulse zumindest um einen Faktor 10 verstärkt werden. Schließlich werden die Impulse in ein Impulsverdichtungsmodul **4** (PCM) eingekoppelt, wo sie annähernd auf die Bandbreitengrenze zeitlich verdichtet werden.

[0054] Das in [Fig. 1](#) gezeigte Ausführungsbeispiel ist modular und besteht aus vier Untersystemen; dem SM **1**, PSM **2**, AM1 **3** und PCM **4**. Die Untersysteme können unabhängig sowie in verschiedenen Konfigurationen verwendet werden, wie es bei den alternativen Ausführungsbeispielen beschrieben wird.

[0055] Nachstehend wird die Beschreibung auf das SM-PSM-AM1-PCM-System beschränkt. Das SM **1** umfasst vorzugsweise eine Femtosekundenimpulsquelle (Keimquelle **5**). Das PSM umfasst vorzugsweise eine Faser **6** einer gewissen Länge, wobei die Kopplung zwischen dem SM und dem PSM vorzugsweise durch Schmelzspießen erhalten wird. Die Ausgabe des PSM wird vorzugsweise in die Grundmode des Ytterbiumverstärkers **7** innerhalb des AM1-Moduls **3** injiziert. Eine Kopplung kann entweder durch Schmelzspießen, eine Faserkopplungseinrichtung oder eine optische Bulk-Abbildungseinrichtung zwischen dem PSM **2** und dem Faserverstärker **7** durchgeführt werden. Alle Fasern werden vorzugsweise polarisationsbewahrend ausgewählt. Das

PCM 4 besteht vorzugsweise aus einer dispersiven Verzögerungsleitung, die aus Kompaktheitsgründen aus einem oder zwei optischen Bulk-Beugungsgittern aufgebaut ist. Alternativ kann eine Anzahl von optischen Bulk-Prismen und Bragg-Gittern innerhalb des PCM 4 verwendet werden. Die Kopplung in das PCM 4 kann durch ein optisches Bulklinsensystem durchgeführt werden, wie es durch die einzelne Linse 8 in Fig. 1 dargestellt ist. Falls das PCM ein Faser-Bragg-Gitter enthält, kann ein Faserschweineschwanz für die Kopplung in das PCM verwendet werden.

[0056] Als Beispiel für eine Femtosekundenlaserkeimquelle ist ein ramanverschiebender Frequenzverdopplungs-Erbiumfaserlaser innerhalb eines SM 1b in Fig. 2 gezeigt. Der Femtosekundenfaserlaser 9 kann eine kommerzielle Hochenergiesolitonenquelle (IMRA America, Inc., Femtolite B-60™) sein, der ungefähr 200 Femtosekundenimpulse bei einer Wellenlänge von 1,57 μm und einer Impulsenergie von 1 nJ bei einer Wiederholungsrate von 50 MHz bereitstellt.

[0057] Bei diesem speziellen Beispiel wurde eine aus 30 und 3 Meter langen Quarzglas-Ramanfasern (Einzelmode bei 1,56 μm) mit Kerndurchmessern mit 6 bzw. 4 μm bestehende Zwei-Stufen-Ramanverschiebungseinrichtung 10 implementiert. Aufgrund des Beginns der infraroten Absorptionskante für Quarzglas bei 2,0 μm ist die Erhöhung der Abgriff-rate zu dem Ende der Ramanverschiebungseinrichtung 10 hin vorteilhaft. Bei dem vorliegenden Beispiel wurden Umwandlungseffizienzen von bis zu 25% von 1,57 μm bis 2,10 μm erhalten. Durch die Verwendung einer größeren Faseranzahl mit langsam veränderlichem Kerndurchmesser oder durch die Implementierung einer einzeln abgegriffenen Faser mit langsam veränderlichem Kerndurchmesser können sogar noch bessere Umwandlungseffizienzen erhalten werden.

[0058] Die Frequenzumwandlung der ramanverschobenen Impulse in den 1,05 μm -Bereich kann durch die Länge eines periodisch gepolten LiNbO₃-Kristalls 11 mit zweckmäßig ausgewählter Polungsperiode durchgeführt werden. (Obwohl in der gesamten vorliegenden Beschreibung das bevorzugte Material für Frequenzumwandlung mit PPLN angegeben ist, ist es ersichtlich, dass andere periodisch gepolte ferroelektrische optische Materialien wie etwa PP Lithiumtantalat, PP MgO:LiNbO₃, PP KTP oder andere periodisch gepolte Kristalle der KTP isomorphen Familie vorteilhaft verwendet werden können.) Die Kopplung mit dem PPLN-Kristall 11 tritt durch die Verwendung eines Linsensystems auf, welches in Fig. 2 durch Linsen 12 dargestellt ist. Die Ausgabe des PPLN-Kristalls 11 wird durch Linsen 12 in eine Ausgabefaser 13 gekoppelt. Umwandlungseffizienzen von bis zu 16% können für die Frequenzverdopplung von 2,1 μm erhalten werden, was zu einer Impulsenergie von bis zu 40 pJ in dem 1 μm -

Wellenlängenbereich führt. Die spektrale Breite der Frequenz-umgewandelten Impulse kann durch eine zweckmäßige Wahl der Länge des PPLN-Kristalls 11 ausgewählt werden; ein 13 mm langer PPLN-Kristall erzeugt beispielsweise eine Bandbreite von 2 nm in dem 1,05 μm -Bereich, entsprechend einer Impulsbreite von etwa 800 fs. Die erzeugte Impulsbreite ist annähernd proportional zu der PPLN-Kristalllänge, d. h. ein frequenzumgewandelter Impuls mit einer 400 fs-Impulsbreite erfordert eine PPLN-Länge von 6,5 mm. Diese Impulsbreitenskalierung kann fortgesetzt werden, bis die frequenzumgewandelte Impulsbreite etwa 100 fs erreicht, wobei die begrenzte Impulsbreite von 100 fs der ramanverschobenen Impulse eine weitere Impulsbreitenreduktion begrenzt.

[0059] Wenn die frequenzumgewandelte Impulsbreite im Wesentlichen länger als die Impulsbreite der ramanverschobenen Impulse ist, kann zudem die breite Bandbreite der Ramanimpulse ausgenutzt werden, um eine Wellenlängenabstimmung der frequenzumgewandelten Impulse zu erlauben, d. h. eine effiziente Frequenzumwandlung kann für Impulse im Frequenzbereich von $2(\omega_l - \delta\omega)$ bis $2(\omega_l + \delta\omega)$ erhalten werden, wobei $2\delta\omega$ die Spektralbreite bei dem halben Maximalwert des Spektrums der ramanverschobenen Impulse ist. Kontinuierliche Wellenlängenabstimmung wird dabei einfach durch die Abstimmung der Temperatur des Frequenzumwandlungskristalls 11 durchgeführt.

[0060] Das verstärkte Rauschen der Kombination aus Ramanverschiebungseinrichtung und PPLN-Kristall wird wie folgt minimiert. Die selbstbegrenzende Ramanverschiebung der Erbiumfaserlaserimpulsquelle kann durch Ausdehnung der Ramanverschiebung auf mehr als 2 μm in quarzglasbasierten optischen Fasern verwendet werden. Für Wellenlängen über 2 μm beginnt die Infrarotabsorptionskante von Quarzglas die Impulse signifikant abzuschwächen, was zu einer Begrenzung der Ramanverschiebung und einer Reduktion bei den Amplitudenschwankungen führt, d. h. irgendein Anstieg bei der Impulsenergie bei 1,5 μm neigt zu einer Übertragung auf eine größere Ramanverschiebung und somit zu einer größeren Absorption in dem 2 μm -Wellenlängenbereich, was somit die Amplitude der ramanverschobenen Impulse in diesem Bereich stabilisiert.

[0061] Alternativ kann das Rauschen des nichtlinearen Frequenzumwandlungsvorgangs durch die Implementierung einer selbstbegrenzenden Frequenzverdopplung minimiert werden, wobei die zentrale Wellenlänge der Abstimmungskurve des Verdopplungskristalls kürzer als die zentrale Wellenlänge der ramanverschobenen Impulse ist. Abermals überträgt sich eine beliebige Erhöhung bei der Impulsenergie in dem 1,5 μm -Bereich in eine größere Ramanverschiebung, wobei eine reduzierte Frequenzumwandlungseffizienz erzeugt wird, womit die Amplitude der

frequenzverdoppelten Impulse stabilisiert wird. Daher kann eine konstante frequenzumgewandelte Leistung für eine große Variation bei der Eingangsleistung erhalten werden.

[0062] Dies ist in [Fig. 3](#) dargestellt, wo die durchschnittliche frequenzumgewandelte Leistung in dem 1 μm -Wellenlängenbereich als Funktion der durchschnittlichen Eingangsleistung bei 1,56 μm gezeigt ist. Eine selbstbegrenzende Frequenzverdopplung stellt außerdem sicher, dass die frequenzverschobene Wellenlänge in dem 1 μm -Wellenlängenbereich unabhängig von der durchschnittlichen Eingangsleistung in dem 1,56 μm -Wellenlängenbereich ist, wie es in [Fig. 3](#) gezeigt ist.

[0063] Für das PSM 2 existieren mehrere Optionen. Wenn eine Länge einer Faser 6 (Dehnungsfaser) als PSM gemäß [Fig. 1](#) verwendet wird, kann eine zweckmäßige dispersive Verzögerungsleitung sodann in dem PCM 4 für den Erhalt von nahezu bandbreitenbegrenzten Impulsen aus dem System verwendet werden. Wenn jedoch die dispersive Verzögerungsleitung in dem PCM 4 aus Bulk-Beugungsgittern 14 gemäß [Fig. 4](#) besteht, erwächst ein mögliches Problem. Das Verhältnis von $|3./2.|-$ Ordnung der Dispersion ist typischerweise 1 bis 30-mal größer in beugungsgitterbasierten dispersiven Verzögerungsleitungen im Vergleich zu dem Verhältnis von $|3./2.|-$ Ordnung der Dispersion in typischen optischen Stufenindexfasern, die in dem 1 μm -Wellenlängenbereich arbeiten. Für Standardstufenindexfasern mit niedrigen numerischen Aperturen, die in dem 1 μm -Wellenlängenbereich arbeiten, ist darüber hinaus das Vorzeichen der Dispersion der dritten Ordnung in der Faser dasselbe, wie in einer gitterbasierten dispersiven Verzögerungsleitung. Somit vermag eine Faserdehnungseinrichtung in Verbindung mit einer gitterbasierten Dehnungseinrichtung die Dispersion der dritten und höherer Ordnungen in dem System typischerweise nicht zu kompensieren.

[0064] Für eine Impulsdehnung um mehr als den Faktor 10 wird die Steuerung der Dispersion der dritten Ordnung und höherer Ordnungen wichtig für eine optimale Impulsverdichtung in dem PCM 4. Zur Lösung dieses Problems kann die Dehnungsfaser 6 in dem PSM 2 mit einer Länge von Fasern mit W-förmigen Multimantelbrechungsindexprofilen ersetzt werden, d. h. mit "W-Fasern" (B. J. Ainslie et al.) oder Holey-Fasern (T. M. Monroe et al.: „Holey Optical Fibers: An Efficient Modal Model", Journal of Lightwave Technology, Band 17 (6), Seiten 1093–1102). Sowohl W-Fasern als auch Holey-Fasern erlauben einstellbare Werte für die Dispersion der zweiten, dritten und höherer Ordnung. Aufgrund der in W- und Holey-Fasern möglichen geringen Kerngröße sind größere Werte für die Dispersion der dritten Ordnung als bei Standardeinzelmodenfasern erhältlich. Die Implementierung ist ähnlich zu der in [Fig. 1](#) gezeigten und

nicht separat dargestellt. Der Vorteil derartiger Systeme ist, dass das PSM bei der Übertragung rein arbeiten kann, d. h. es vermeidet die Verwendung von in Reflexion arbeitenden streuenden Bragg-Gittern, und es kann in das und aus dem System für verschiedene Systemkonfigurationen gespleißt werden.

[0065] Eine alternatives PSM 2 mit einstellbaren Werten für die Dispersion der zweiten, dritten und vierten Ordnung ist in [Fig. 5](#) gezeigt. Das PSM 2a basiert auf dem Prinzip, dass bekannte optische Stufenindexfasern eine Dispersion entweder der positiven nullten oder negativen dritten Ordnung erzeugen können. Die größte Menge Dispersion der dritten Ordnung in einer Faser wird unter Verwendung ihrer ersten Mode höherer Ordnung erzeugt, der LP_{11} -Mode in der Nähe der Grenzwellenlänge. Gemäß [Fig. 5](#) wird die Dispersion der vierten und dritten Ordnung des PSM 20a unter Verwendung von drei Abschnitten 15, 16, 17 einer Impulsdehnungsfaser eingestellt. Die erste Dehnungsfaser 15 kann eine Länge einer Faser mit null Dispersion der dritten Ordnung und einer zweckmäßigen Dispersion der vierten Ordnung sein. Die erste Dehnungsfaser 15 wird sodann in die zweite Dehnungsfaser 16 gespleißt, welche zur Kompensierung der Dispersion der dritten Ordnung der Gitterverdichtungseinrichtung sowie des gesamten Chirpimpulsverstärkungssystems ausgewählt ist. Um aus der Dispersion der hohen dritten Ordnung der LP_{11} -Mode Vorteil zu nehmen, wird die erste Dehnungsfaser 15 in die zweite Dehnungsfaser 16 unter Verschiebung ihrer jeweiligen Faserzentren gespleißt, was zu einer vorherrschenden Anregung der LP_{11} -Mode in der zweiten Dehnungsfaser 16 führt. Zur Maximierung des Ausmaßes der Dispersion der dritten Ordnung in der zweiten Dehnungsfaser 16 wird eine Faser mit einer hohen numerischen Apertur $NA > 0,20$ bevorzugt. Am Ende der zweiten Dehnungsfaser 16 wird eine ähnliche Spleißungstechnik zur Rückübertragung der LP_{11} -Mode in die Grundmode der dritten Dehnungsfaser 17 verwendet. Durch eine zweckmäßige Auswahl der Fasern kann die Dispersion der vierten Ordnung der gesamten Verstärkungsverdichtungseinrichtung minimiert werden. Die dritte Dehnungsfaser 17 kann bei vernachlässigbarer Dispersion kurz sein.

[0066] Der Übertragungsverlust der gesamten Faserdehnungsanordnung beträgt zumindest 25% aufgrund des unvermeidlichen Verlustes von 50% oder größer, der durch die Übertragung von Leistung von der LP_{11} -Mode zu der LP_{01} -Mode ohne Verwendung von optischen Modenumwandlern zugezogen wird. Eine etwaige Restenergie in der LP_{01} -Mode in der zweiten Dehnungsfaser kann gemäß [Fig. 5](#) mit einem optionalen Reflexionsfasergitter 18 reflektiert werden. Aufgrund der großen Differenz bei dem effektiven Index zwischen der Grundmode und der Mode der nächsthöheren Ordnung variiert die Gitterresonanzwellenlänge zwischen 10 bis 40 nm zwischen

den zwei Moden, was ein selektives Verwerfen einer Mode gegenüber der anderen für Impulse mit spektralen Breiten zwischen 10 bis 40 nm erlaubt.

[0067] Der Energieverlust der Faserdehnungsanordnung wird unbedeutend, wenn die dritte Dehnungsfaser **17** durch einen Ytterbiumverstärker ersetzt wird. Diese Implementierung ist nicht getrennt gezeigt.

[0068] Wenn die Dispersion der vierten Ordnung unbedeutend ist, kann die erste Dehnungsfaser **15** weggelassen werden. Dispersion der vierten Ordnung kann außerdem unter Verwendung einer ersten Dehnungsfaser mit einer Dispersion der dritten Ordnung ungleich Null kompensiert werden, solange das Verhältnis der Dispersion der dritten und vierten Ordnung zwischen der ersten und zweiten Dehnungsfaser verschieden ist.

[0069] Die ytterbiumdotierte Faser innerhalb des AM1 **3** kann ein Ytterbiumdotierungsniveau von 2,5 Mol-% und eine Länge von 5 m aufweisen. Sowohl die ytterbiumdotierte Einzelmodenfaser als auch die ytterbiumdotierte Multimodenfaser können verwendet werden, wobei der Kerndurchmesser der Faser zwischen 1 bis 50 μm variieren kann; wenngleich im Falle einer Multimodenfaser die Grundmode angeregt werden sollte, damit die räumliche Qualität des Ausgangsstrahls optimiert wird. In Abhängigkeit von dem Ausmaß der erforderlichen Verstärkung können verschiedene Längen der Ytterbium-dotierten Fasern verwendet werden. Zur Erzeugung der höchstmöglichen Impulsenergien können bis zu 1 m kurze Ytterbiumfaserlängen implementiert werden.

[0070] Eine Impulsverdichtung wird in dem PCM **4** durchgeführt. Das PCM **4** kann bekannte optische Bulk-Komponenten (wie etwa das in [Fig. 4](#) gezeigte Bulk-Beugungsgitterpaar), eine einzelne Gitterverdichtungseinrichtung oder eine Anzahl von Dispersionsprismen oder -grismen oder beliebige andere dispersive Verzögerungsleitungen enthalten.

[0071] Alternativ kann eine Faser oder ein Bulk-Bragg-Gitter oder ein gechirpter periodisch gepolter Kristall verwendet werden. Der gechirpte, periodisch gepolte Kristall kombiniert die Funktionen der Impulsverdichtung und der Frequenzverdopplung (A. Galvanauskas et al.: „Use of chirped quasi-phase matched materials in chirped pulse amplification systems“, US-Anmeldungsnummer 08/822967) und arbeitet bei Übertragung, wodurch ein einheitlich kompaktes System bereitgestellt wird.

[0072] Andere erfindungsgemäße Abwandlungen und Variationen sind dem Fachmann aus der vorstehenden Offenbarung und Lehre ersichtlich.

[0073] Insbesondere kann das SM **1** als eigenständige Einheit zur Erzeugung von nahezu bandbreitenbegrenzten Femtosekundenimpulsen im Frequenzbereich von 1,52 bis 2,2 μm verwendet werden, und nach einer Frequenzumwandlung in einem nichtlinearen Kristall auch in dem Frequenzbereich von 760 nm bis 1,1 μm . Der Frequenzbereich kann weiter ausgedehnt werden, indem eine Fluorid-Ramanverschiebungsfaser oder andere optische Fasern mit längeren Infrarotabsorptionskanten als Quarzglas verwendet werden. Unter Verwendung dieser Technik können Wellenlängen bis zu etwa 3 bis 5 μm erreicht werden. In Verbindung mit Frequenzverdopplung kann eine kontinuierliche Abstimmung von 760 nm bis 5000 nm erzielt werden. Die Impulsleistung in dem 2 μm -Bereich kann unter Verwendung von einer thulium- oder holmiumdotierten Faser weiter verbessert werden. Mit derartigen Verstärkungseinrichtungen können nahezu bandbreitenbegrenzte Raman-Solitonimpulse mit Impulsenergien oberhalb 10 nJ in Einzelmodenfasern in dem 2 μm -Wellenlängenbereich erreicht werden. Nach einer Frequenzverdopplung können Femtosekundenimpulse mit Energien von einigen nJ in dem 1 μm -Bereich ohne Verwendung irgendwelcher Dispersionsimpulsverdichtungseinrichtungen erhalten werden. Derartige Impulse können als Hochenergiekeimpulse für Multimodenytterbiumverstärker mit großen Kernen verwendet werden, welche höhere Keimpulsenergien als Einzelmoden-Ytterbiumverstärker zur Unterdrückung der verstärkten spontanen Emission erfordern.

[0074] Als ein Beispiel für eine ultrabreit abstimmbare Faserquelle, die eine Erbiumfaserlaserimpulsquelle **19** mit einer Quarzglas-Ramanverschiebungseinrichtung **20** kombiniert, sind eine thuliumdotierte Verstärkungseinrichtung **21** und eine zweite fluoridglasbasierte Ramanverschiebungseinrichtung **22** in dem SM **1c** von [Fig. 6](#) gezeigt. Eine optionale Frequenzverdopplungseinrichtung ist nicht gezeigt; für eine optimale Stabilität sollten alle Fasern polarisationserhaltend sein. Als weitere Alternative für die Erbiumfaserlaserimpulsquelle kann eine Kombination aus einer Diodenlaserimpulsquelle mit einer Erbiumverstärkungseinrichtung verwendet werden; dies ist nicht gesondert gezeigt.

[0075] Als noch weitere Alternative für ein SM ist ein SM **1d** in [Fig. 7](#) gezeigt und enthält einen passiv phasengekoppelten Frequenzverdopplungshochleistungserbium- oder Erbium/Ytterbium-Faseroszillator **23** in Verbindung mit einer Länge einer Ramanverschiebungs-Holey-Faser **24**. Dabei werden die Impulse von dem in dem 1,55 μm -Wellenlängenbereich arbeitenden Oszillator **23** zunächst unter Verwendung einer Frequenzverdopplungseinrichtung **25** und einem Linsensystem **26** frequenzverdoppelt und nachfolgend werden die frequenzverdoppelten Impulse in einer Länge einer Holey-Faser **24** ramanverschoben, die solitonenergieunterstützende Dispersion für Wellen-

längen oberhalb 750 nm oder zumindest oberhalb 810 nm bereitstellt. Durch Verstärkung der ramanverschobenen Impulse in dem 1 μm -Wellenlängenbereich oder in dem 1,3 oder 1,5 oder 2 μm -Wellenlängenbereich oder durch die Auswahl verschiedener Entwürfe von Ramanverschiebungsfasern kann eine in dem Wellenlängenbereich von etwa 750 nm bis 5000 nm arbeitende kontinuierlich abstimmbare Quelle aufgebaut werden. Der Entwurf einer derartigen Quelle mit einer Anzahl angefügter Verstärkungseinrichtungen **27** ist in [Fig. 7](#) ebenfalls gezeigt.

[0076] Für eine optimale Ramanselbstfrequenzverschiebung sollte die Holey-Faserdispersion als Funktion der Wellenlänge optimiert werden. Der Absolutwert der Dispersion der dritten Ordnung der Holey-Faser sollte weniger oder gleich dem Absolutwert der Materialdispersion von Quarzglas der dritten Ordnung betragen. Dies ist für die Sicherstellung hilfreich, dass der Absolutwert der Dispersion der zweiten Ordnung über einen wesentlichen Abschnitt des Wellenlängenabstimmungsbereichs klein bleibt. Darüber hinaus sollte der Wert der Dispersion der zweiten Ordnung negativ sein und eine Dispersion der zweiten Ordnung von null sollte innerhalb von 300 nm Wellenlänge zu der Keimeingangswellenlänge liegen.

[0077] Als noch eine weitere Alternative für eine Keimquelle für eine Ytterbiumverstärkungseinrichtung kann die Anti-Stokes-Erzeugung in einer langen Anti-Stokes-Faser verwendet werden. Nach der Anti-Stokes-Erzeugung können zusätzliche lange Faserverstärkungseinrichtungen und Ramanverschiebungseinrichtungen für den Aufbau einer breit wellenlängenabstimmbaren Quelle verwendet werden. Die allgemeine Konfiguration ist ähnlich zu der in [Fig. 7](#) gezeigten, wobei die Frequenzverdopplungseinrichtung **25** weggelassen ist und die Ramanverschiebungseinrichtung **24** durch eine Anti-Stokes-Erzeugungseinrichtung ersetzt ist. Für die effektive Erzeugung von Licht in dem 1,05 μm -Wellenlängenbereich in einer Anti-Stokes-Erzeugungseinrichtung unter Verwendung einer bei 1,55 μm arbeitenden Erbiumfaserlaserkeimquelle ist beispielsweise eine Anti-Stokes-Erzeugungseinrichtung in Gestalt einer optischen Faser mit kleinem Kerndurchmesser und einem geringen Wert der Dispersion der dritten Ordnung optimal. Ein geringer Wert der Dispersion der dritten Ordnung ist dabei als ein Wert der Dispersion der dritten Ordnung definiert, der im Vergleich zu dem Wert der Dispersion der dritten Ordnung in einer Standardtelekommunikationsfaser für den 1,55 μm -Wellenlängenbereich kleiner ist. Darüber hinaus sollte der Wert der Dispersion der zweiten Ordnung in der Anti-Stokes-Faser negativ sein.

[0078] Als weitere alternative Keimquelle für eine Ytterbiumverstärkungseinrichtung kann ein passiv phasengekoppelter Ytterbium- oder Neodymfaserlaser innerhalb des SM verwendet werden.

Vorzugsweise kann ein in dem negativen Dispersionsbereich arbeitender Ytterbiumsolitonenoszillator verwendet werden. Für den Aufbau eines Ytterbiumsolitonenoszillators kann die negative Resonatordispersion in den Resonator durch ein zweckmäßig gechirptes Fasergitter **29** eingeführt werden, das mit der Ausgangsfaser **36** gemäß [Fig. 8](#) verbunden ist; alternativ kann eine negative Dispersionsfaser wie etwa eine Holey-Faser (T. Monroe et al.) in dem Ytterbiumsolitonenlaserresonator verwendet werden. Ein eine derartige Anordnung beinhaltendes SM ist als SM **1e** in [Fig. 8](#) gezeigt. Dabei kann die Ytterbiumfaser **30** polarisationserhaltend sein und ein Polarisator **31** kann für die Auswahl von Oszillation entlang einer Achse der Faser eingebaut sein (wobei die Kopplung mit Linsen **32** erreicht wird). Zur Vereinfachung kann die Ytterbiumfaser **30** von der in [Fig. 8](#) gezeigten Seite mantelgepumpt sein. Ein eine bekannte Einzelmodenfaser beinhaltender passiv phasengekoppelter Ytterbiumfaserlaser kann jedoch ebenfalls verwendet werden. Eine derartige Anordnung ist nicht gesondert gezeigt. In [Fig. 8](#) wird der SA **28** zur Induktion der Ausbildung von kurzen optischen Impulsen verwendet. Das Gitter **35** wird für die Dispersionssteuerung und als Intraresonatorspiegel verwendet. Die Pumpdiode **33** liefert Pumplicht durch eine V-Nut **34**.

[0079] Eine Anordnung, die eine Holey-Faser beinhaltet, kann zu dem in [Fig. 8](#) gezeigten System nahezu identisch sein, wobei eine zusätzliche Länge einer Holey-Faser irgendwo in den Resonator gespleißt wird. Im Falle des Einbaus einer Holey-Faser muss das Faser-Bragg-Gitter keine negative Dispersion aufweisen; gleichfalls kann das Bragg-Gitter mit einem dielektrischen Spiegel ersetzt werden.

[0080] Am geradlinigsten zu implementieren ist jedoch ein im positiven Dispersionsbereich arbeitender Ytterbiumoszillator, der keine besonderen Resonatorbestandteile, wie etwa Faser-Bragg-Gitter mit negativer Dispersion oder Holey-Fasern, für die Steuerung der Resonatordispersion benötigt. In Verbindung mit einer parabolischen Ytterbiumverstärkungseinrichtung (oder einer normalen Ytterbiumverstärkungseinrichtung) kann eine sehr kompakte Keimquelle für ein Hochleistungsytterbiumverstärkersystem erhalten werden. Ein derartiger Ytterbiumoszillator mit einer Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** ist in [Fig. 9](#) gezeigt, wobei die Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** vorzugsweise eine parabolische Ytterbiumverstärkungseinrichtung ist, wie vorstehend angeführt. Zu den in [Fig. 8](#) gezeigten identische Elemente sind identisch bezeichnet.

[0081] Das SM **1f** gemäß [Fig. 9](#) umfasst eine seitengepumpte Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** gemäß der Beschreibung bezüglich [Fig. 8](#), obwohl eine beliebige andere Pumpanordnung ebenfalls imple-

mentiert werden könnte. Die Ytterbiumfaser **44** wird als polarisationserhaltend angenommen und ein Polarisator **31** wird für die Auswahl eines einzelnen Polarisationszustands eingesetzt. Das Faser-Bragg-Gitter **37** weist eine im Vergleich zu der Verstärkungsbandbreite von Ytterbium kleine Reflektionsbandbreite auf und stellt die Oszillation von Impulsen mit einer im Vergleich zu der Verstärkungsbandbreite von Ytterbium kleinen Bandbreite sicher. Das Bragg-Gitter **37** kann gechirpt oder nicht gechirpt sein. Im Falle eines nicht gechirpten Bragg-Gitters sind die innerhalb des Ytterbiumoszillators oszillierenden Impulse positiv gechirpt. Eine Impulserzeugung oder passive Phasenkopplung innerhalb des Ytterbiumoszillators wird durch die sättigbare Absorptionseinrichtung **28** initiiert. Das optische Filter **39** ist optional und beschränkt ferner die Bandbreite der in die Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** gestarteten Impulse.

[0082] Für die Optimierung der Ausbildung von parabolischen Impulsen innerhalb der Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** innerhalb des SM **1f** sollten die Eingangsimpulse eine im Vergleich zu der Verstärkungsbandbreite von Ytterbium geringe Bandbreite aufweisen; außerdem sollte die Eingangsimpulsbreite zu der Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** im Vergleich zu der Ausgangsimpulsbreite gering sein und die Verstärkung der Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** sollte so groß wie möglich sein, d. h. größer als 10. Ebenso sollte die Verstärkungssättigung innerhalb der Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** klein sein.

[0083] Als Beispiel für eine parabolische Verstärkungseinrichtung kann eine 5 m lange Ytterbiumverstärkungseinrichtung verwendet werden. Eine parabolische Impulsausbildung wird unter Verwendung einer Keimquelle mit einer Impulsbreite von etwa 0,2 bis 1 ps und einer spektralen Bandbreite in der Größenordnung von 3 bis 8 nm sichergestellt. Die parabolische Impulsausbildung verbreitert die Bandbreite der Keimquelle auf etwa 20 bis 30 nm innerhalb der Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40**, wohingegen die Ausgangsimpulse auf etwa 2 bis 3 ps aufgeweitet sind. Da der Chirp innerhalb der parabolischen Impulse hoch linear ist, können nach Verdichtung Impulsbreiten in der Größenordnung von 100 fs erhalten werden. Während ultraschnelle Standardfestkörperverstärkungseinrichtungen eine nichtlineare Phasenverschiebung aus der Selbstphasenmodulation lediglich in der Größe von π tolerieren können (was weithin bekannt ist), kann eine parabolische Impulsfaserverstärkungseinrichtung eine nichtlineare Phasenverschiebung in der Größe von 10π und höher tolerieren. Zur Vereinfachung wird somit vorliegend auf eine Ytterbiumverstärkungseinrichtung mit großer Verstärkung als parabolische Verstärkungseinrichtung Bezug genommen. Parabolische Verstärkungseinrichtungen befolgen einfache Skalierungsgesetzmäßigkeiten und erlauben die Erzeugung von

parabolischen Impulsen mit 1 nm kleinen oder kleineren spektralen Bandbreiten durch eine zweckmäßige Erhöhung der Verstärkerlänge. Ein parabolischer Impuls mit einer spektralen Bandbreite von etwa 2 nm kann beispielsweise unter Verwendung einer parabolischen Verstärkerlänge von etwa 100 m erzeugt werden.

[0084] Da ein parabolischer Impuls große Selbstmodulationswerte und ein großes Ausmaß spektraler Aufwertung tolerieren kann, ohne einen Impulsabbruch auf sich zu ziehen, kann die Spitzenleistungskapazität einer parabolischen Verstärkungseinrichtung im Vergleich zu einer Standardverstärkungseinrichtung in großem Ausmaße verbessert werden. Dies kann wie folgt erklärt werden. Die durch Selbstphasenmodulation in einer optischen Faser der Länge L zugezogene zeitabhängige Phasenverzögerung $\Phi_{nl}(t)$ ist proportional zu der Spitzenleistung, d. h.

$$\Phi_{nl}(t) = \gamma P(t)L,$$

wobei $P(t)$ die zeitabhängige Spitzenleistung innerhalb des optischen Impulses ist. Die Frequenzmodulation ist durch die Ableitung der Phasenmodulation gegeben, d. h. $\delta\omega = \gamma L[\partial P(t)/\partial t]$. Für einen Impuls mit einem parabolischen Impulsprofil $P(t) = P_0[1 - (t/t_0)^2]$, wobei $(-t_0 < t < t_0)$, ist die Frequenzmodulation linear. Sodann kann gezeigt werden, dass tatsächlich das Impulsprofil auch parabolisch bleibt, womit die Ausbreitung von großen Spitzenleistungen mit lediglich einer resultierenden linearen Frequenzmodulation sowie die Erzeugung eines linearen Impulschirps erlaubt wird.

[0085] Die mit der Ytterbiumverstärkungseinrichtung **40** erzeugten gechirpten Impulse können unter Verwendung einer Beugungsgitterverdichtungseinrichtung gemäß **Fig. 4** verdichtet werden. Alternativ können ein gechirpter, periodisch gepolter Kristall **42** und Linsen **41** für die Impulsverdichtung verwendet werden, wie es auch in **Fig. 9** gezeigt ist. In Verbindung mit dem in **Fig. 9** gezeigten SM **1f** kann eine sehr kompakte eigenständige Quelle für Femtosekundenimpulse in dem grünen Spektralbereich um die 530 nm erhalten werden.

[0086] Zusätzlich zu dem in **Fig. 9** gezeigten passiv phasengekoppelten Ytterbiumfaserlaser **44** können ebenso alternative Quellen zum Keimen der Ytterbiumverstärkungseinrichtung verwendet werden. Diese alternativen Quellen können ramanverschobene Erbium- oder Erbium/Ytterbiumfaserlaser, frequenzverschobene Thulium- oder Holmiumfaserlaser und ebenso Diodenlaserimpulsquellen aufweisen. Diese alternativen Implementierungen sind nicht gesondert gezeigt.

[0087] In **Fig. 10** ist ein Faserzuleitungsmodul (FDM) **45** dem in **Fig. 1** gezeigten Basissystem hinzugefügt.

Das PSM 2 ist dabei weggelassen; zum Ausdehnen der Spitzenleistungskapazität des Verstärkungsmoduls kann jedoch ein PSM 2 eingefügt werden, falls erforderlich. Die in Fig. 10 gezeigte Ytterbiumverstärkungseinrichtung 7 kann sowohl in dem nicht parabolischen als auch dem parabolischen Bereich betrieben werden.

[0088] In seiner einfachsten Konfiguration besteht das FDM 45 aus einer Länge einer optischen Faser 46 (der Zuleitungsfaser). Für eine parabolische Verstärkungseinrichtung kann die Zuleitungsfaser 46 unmittelbar in die Ytterbiumverstärkungseinrichtung 7 gespleißt werden, ohne irgendeinen Verlust in der Impulsqualität auf sich zu laden. Aufgrund des parabolischen Impulsprofils wird eher selbst für ein großes Ausmaß an Selbstphasenmodulation ein annähernd linearer Chirp dem Impuls hinzugefügt, was eine weitere Impulsverdichtung mit dem PCM 4 erlaubt. Das PCM 4 kann mit dem FDM 45 integriert werden, indem eine Version kleiner Abmessung der Bulk-Beugungsgitterverdichtungseinrichtung 14 gemäß Fig. 4 in Verbindung mit einer Zuleitungsfaser verwendet wird. Dabei würde die Zuleitungsfaser in Verbindung mit einer zweckmäßigen Sammellinse den in Fig. 4 gezeigten Eingang ersetzen. Eine gesonderte Zeichnung einer derartigen Implementierung ist nicht gezeigt. Die Verwendung des PCM 4 ist jedoch optional und kann beispielsweise weggelassen werden, falls gechirpte Ausgangsimpulse von dem System erforderlich sind. In Verbindung mit einem PCM 4 bildet das in Fig. 10 beschriebene System eine Ableitung eines gechirpten Impulsverstärkungssystems, wobei Selbstphasenmodulation sowie Verstärkung hinzugefügt sind, während der Impuls zeitlich dispersiv aufgeweitet ist. Das Hinzufügen der Selbstphasenmodulation in bekannten gechirpten Impulsverstärkungssystemen führt typischerweise zu signifikanten Impulsstörungen nach der Impulsverdichtung. Die Verwendung von parabolischen Impulsen beseitigt diese Beschränkung.

[0089] Fortgeschrittene faseroptische Kommunikationssysteme können ebenso als gechirpte Impulsverstärkungssysteme interpretiert werden (vgl. beispielsweise D. J. Jones et al., IEICE Trans. Electron., E81-C, 180 (1998)). Ersichtlicherweise ist die Minimierung von Impulsstörungen durch parabolische Impulse in optischen Kommunikationssystemen gleich relevant.

[0090] Für den Erhalt von Impulsbreiten von weniger als 50 fs wird die Steuerung der Dispersion der dritten Ordnung und höherer Ordnungen in einem FDM oder in einem optionalen PSM signifikant. Die Steuerung der Dispersion höherer Ordnung mit einem PSM wurde vorstehend unter Bezugnahme auf die Fig. 1 und Fig. 5 beschrieben; die Steuerung der Dispersion höherer Ordnung in einem FDM ist sehr ähnlich und wird nachstehend beispielhaft anhand des

in Fig. 11 gezeigten Ausführungsbeispiels des FDM 45a beschrieben. Ebenso wie bei Fig. 1 kann die große Dispersion der dritten Ordnung einer W-Faser für die Kompensierung der Dispersion der dritten Ordnung eines Bulk-PCM 4 verwendet werden. Ebenso wie in Fig. 5 kann unter Verwendung von Fasern 15, 16, 17 mit verschiedenen Werten für die Dispersion höherer Ordnung in dem FDM die Dispersion höherer Ordnung des gesamten Systems unter Beinhaltung eines aus Bulk-Beugungsgittern bestehenden PCM 4 kompensiert werden.

[0091] Alternative Ausführungsbeispiele für PSMs sind in den Fig. 12 und Fig. 13 gezeigt, die ebenso von praktischem Wert sind, da sie die Verwendung von kommerziell erhältlichen linear gechirpten Faserbragg-Gittern in dem PSM erlauben, während sie die Dispersion höherer Ordnung eines gesamten gechirpten Impulsverstärkungssystems mit PSM wie auch mit PCM kompensieren. Als weitere Alternative können ebenso nichtlinear gechirpte Faserbragg-Gitter in dem PSM für die Kompensation in der Dispersion des PCM verwendet werden. Eine derartige Anordnung ist nicht gesondert gezeigt.

[0092] Zur Vermeidung der Verwendung von W-Fasern oder der LP_{11} -Mode in dem PSM ist ein alternatives Ausführungsbeispiel eines PSM gemäß Fig. 12 als PSM 2b gezeigt. Dabei wird ein negativ linear gechirptes Bragg-Gitter 47 in Verbindung mit einer Einzelmodendehnungsfaser 48 mit negativer Dispersion der dritten Ordnung und einer Zirkulationseinrichtung 49 verwendet. Die Einführung des negativ linear gechirpten Bragg-Gitters erhöht das Verhältnis von Dispersion der dritten Ordnung zur Dispersion der zweiten Ordnung in dem PSM 2b, was die Kompensation des hohen Wertes der Dispersion der dritten Ordnung in dem PCM 4 erlaubt, wenn eine Bulk-Beugungsgitterverdichtungseinrichtung verwendet wird. Das PSM 2b kann ebenso W-Fasern in Verbindung mit einem linear gechirpten Faserbragg-Gitter für eine weitere Verbesserung der Flexibilität des PSM enthalten.

[0093] Als weiteres Ausführungsbeispiel eines PSM für die Kompensierung der Dispersion höherer Ordnung ist die Anordnung gemäß Fig. 13 als PSM 2c gezeigt, wobei sie ein positiv linear gechirptes Faserbragg-Gitter 49, eine Zirkulationseinrichtung 50 und ein weiteres Fasertransmissionsgitter 51 aufweist. Dabei erzeugt das positiv linear gechirpte Faserbragg-Gitter 49 positive Dispersion der zweiten Ordnung und das andere Fasertransmissionsgitter 51 erzeugt ein zweckmäßiges Ausmaß an zusätzlicher Dispersion der zweiten, dritten und vierten Ordnung, damit die lineare Dispersion höherer Ordnung innerhalb des PCM kompensiert wird. Für den Erhalt von zweckmäßigen Werten der Dispersion dritter und vierter und möglicherweise selbst höherer Ordnung kann mehr als ein Fasertransmissionsgitter oder Faserbragg-Gitter verwendet werden.

[0094] Für die Erhöhung der verstärkten Impulsenergie aus einer Ytterbiumverstärkungseinrichtung in den mJ-Bereich und jenseits davon können Impulsauswahlelemente und weitere Verstärkungsstufen implementiert werden, wie es in [Fig. 14](#) gezeigt ist. Dabei werden Impulsauswahleinrichtungen **52** zwischen dem PSM **2** und dem ersten Verstärkermodul AM1 **3a** sowie zwischen der ersten Verstärkerstufe AM1 **3a** und der zweiten Verstärkerstufe AM2 **3b** eingesetzt. Eine beliebige Anzahl von Verstärkungseinrichtungen und Impulsauswahleinrichtungen kann für den Erhalt der höchstmöglichen Ausgangsleistungen verwendet werden, wobei die finalen Verstärkerstufen vorzugsweise aus Multimodenfasern bestehen. Für den Erhalt einer beugungsbegrenzten Ausgabe ist die Grundmode in diesen Multimodenverstärkungseinrichtungen selektiv angeregt und unter Verwendung von gut bekannten Techniken geleitet (M. E. Fermann et al., US-Patentschrift Nr. 5, 818,630). Die Impulsauswahleinrichtungen **52** werden typischerweise so ausgewählt, dass sie aus optischen Modulatoren, wie etwa akustooptischen oder elektrooptischen Modulatoren, bestehen. Die Impulsauswahleinrichtungen **52** zählen die Wiederholrate der aus dem SM1 heraustretenden Impulse um einen gegebenen Wert herunter (beispielsweise von 50 MHz auf 5 KHz) und erlauben somit die Erzeugung von sehr hohen Impulsenergien, während die Durchschnittsleistung klein bleibt. Alternativ können direkt umschaltbare Halbleiterlaser ebenso zur Fixierung der Wiederholrate des Systems bei einem willkürlichen Wert verwendet werden. Ferner unterdrücken die in späteren Verstärkerstufen eingesetzten Impulsauswahleinrichtungen **52** ebenso den Aufbau einer verstärkten spontanen Emission in den Verstärkungseinrichtungen, wodurch eine Konzentration der Ausgangsleistung in hoch energetischen ultrakurzen Impulsen erlaubt wird. Die Verstärkungsstufen sind mit den vorstehend beschriebenen PSMs und PCM kompatibel, wobei die Dispersion des gesamten Systems für den Erhalt der kürzest möglichen Impulse am Systemausgang minimiert werden kann.

[0095] Das Verstärkermodul AM1 **3a** kann als Impulse mit einem parabolischen Spektrum erzeugende parabolische Verstärkungseinrichtung entworfen werden. Die parabolischen Impulse aus dem AM1 **3a** können gleichfalls in Impulse mit einem parabolischen Impulsspektrum in einer nachfolgenden langen Impulsgestaltungs- oder Impulsdehnungsfaser **53** transformiert werden, wie es ebenfalls in [Fig. 14](#) gezeigt ist, wobei die Wechselwirkung von Selbstphasenmodulation und positiver Dispersion diese Transformation durchführt. Dies kann aus dem Umstand verstanden werden, dass ein gechirpter Impuls mit einem parabolischen Impulsprofil sich asymptotisch in einen parabolischen Impuls mit einem parabolischen Spektrum in einer langen Faser entwickeln kann. Die parabolische Impulsgestalt maximiert das Ausmaß tolerierbarer Selbstphasenmodulation in

den nachfolgenden Verstärkungsstufen, die wiederum das Ausmaß der in dem PSM **2** und PCM **4** erforderlichen dispersiven Impulsdehnung und Impulsverdichtung minimieren. Gleichfalls erlauben parabolische Impulsgestalten die Tolerierung signifikanter Ausmaße von Selbstphasenmodulation in dem PSM **2** ohne signifikante Impulsstörungen.

[0096] Sobald die Impulse gedehnt sind, kann der abträgliche Einfluss der Selbstphasenmodulation in nachfolgenden Verstärkungseinrichtungen unter Verwendung von flachscheiteligen Impulsgestalten minimiert werden. Eine flachscheitelige Impulsgestalt kann durch Einsetzen eines optionalen Amplitudenfilters **54** gemäß [Fig. 14](#) vor dem letzten Verstärkermodul zur Erzeugung eines flachscheiteligen Impulsspektrums erzeugt werden. Ein flachscheiteliges Spektrum wird tatsächlich in einen flachscheiteligen Impuls nach einer hinreichenden Impulsdehnung transformiert, weil es einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen spektralem Inhalt und Zeitverzögerung nach hinreichender Impulsdehnung gibt. Es kann gezeigt werden, dass gerade Werte der Selbstphasenmodulation bis zu 10π für flachscheitelige Impulse toleriert werden können, ohne signifikante Impulsstörungen auf sich zu ziehen.

[0097] Ein Amplitudenfilter gemäß [Fig. 14](#) kann wiederum ebenfalls zur Steuerung des Ausmaßes der Dispersion höherer Ordnung in der Verstärkerekette für stark gechirpte Impulse in der Gegenwart von Selbstphasenmodulation verwendet werden, wenn die Neugestaltung des Impulsspektrums in der Verstärkereinrichtung vernachlässigt werden kann, d. h. außerhalb des Bereiches, in dem parabolische Impulse erzeugt werden. In diesem Fall erzeugt die Selbstphasenmodulation ein effektives Ausmaß von Dispersion höherer Ordnung gemäß:

$$\beta_n^{SPM} = \gamma P_0 L_{eff} \frac{d^n S(\omega)}{d\omega^n} \Big|_{\omega=0},$$

wobei P_0 die Spitzenleistung des Impulses und $S(\omega)$ das normalisierte Impulsspektrum bezeichnet. L_{eff} bezeichnet die effektive nichtlineare Länge $L_{eff} = [\exp(gL) - 1]/g$, wobei L die Verstärkerlänge und g die Verstärkung der Verstärkereinrichtung pro Einheitslänge bezeichnet. Somit kann durch eine genaue Steuerung des Spektrums von stark gechirpten Impulsen mit einem Amplitudenfilter gemäß [Fig. 14](#) ein beliebiges Ausmaß von Dispersion höherer Ordnung eingeführt werden, damit die Werte der Dispersion höherer Ordnung in einem gechirpten Impulsverstärkungssystem kompensiert werden. Für bis zu etwa 1 ns gedehnte 500 Femtosekundenimpulse kann tatsächlich gezeigt werden, dass eine Phasenverschiebung von etwa 10π zur Kompensation der Dispersion der dritten Ordnung einer aus Bulk-Gittern mit 1800 Rillen/mm bestehenden Bulk-Gitterverdichtungseinrichtung (gemäß [Fig. 4](#)) zur Kompensation hinreichend

ist. Attraktive gut steuerbare Amplitudenfilter sind beispielsweise Fasertransmissionsgitter, obwohl ein beliebiges Amplitudenfilter zur Steuerung des Impulsspektrums vor einer derartigen Dispersion höherer Ordnung induzierenden Verstärkungseinrichtung verwendet werden kann.

[0098] Als weiteres Ausführungsbeispiel für die Verbindung eines Verstärkungsmoduls mit einer Impulsauswahleinrichtung kann die in [Fig. 15](#) gezeigte Konfiguration verwendet werden. Da sehr hohe Energieimpulse Multimodenfasern mit großem Kern für ihre Verstärkung erfordern, kann die Steuerung der Grundmode in einer polarisationserhaltenden Einzelpassfaserverstärkungseinrichtung schwierig zu erreichen sein. Dabei kann die Verwendung einer hoch zentrumsymmetrischen, nicht polarisationserhaltenden Verstärkungseinrichtung für die Minimierung der Modenkopplung und für den Erhalt eines hochqualitativen Ausgangsstrahls bevorzugt sein. Für den Erhalt einer deterministischen, bezüglich der Umgebung stabilen Polarisationsausgabe von einer derartigen Verstärkungseinrichtung kann eine Doppelpasskonfiguration gemäß [Fig. 15](#) erforderlich sein. Dabei wird eine Einzelmodenfaser **55** als Raummodenfilter nach dem ersten Pass durch die Verstärkungseinrichtung **56** verwendet; alternativ kann dabei eine Apertur verwendet werden. Das Raummodenfilter **55** reinigt die Mode nach dem ersten Pass durch die Multimodenverstärkungseinrichtung **56** und unterdrückt zudem eine verstärkte spontane Emission in Moden der höheren Ordnung, welche zu einer Begrenzung der erzielbaren Verstärkung in einer Multimodenverstärkungseinrichtung neigen. Linsen **60** können für die Ein- und Auskopplung bezüglich einer Verstärkungseinrichtung **56**, eines Raummodenfilters **55** sowie Impulsauswahleinrichtungen **52a** und **52b** verwendet werden. Die Faraday-Rotationseinrichtung **57** stellt sicher, dass das sich rückwärts ausbreitende Licht orthogonal zu dem sich vorwärts ausbreitenden Licht polarisiert ist; das sich rückwärts ausbreitende Licht wird aus dem System bei der gezeigten Polarisationsstrahlenteilungseinrichtung **58** ausgekoppelt. Zur Optimierung der Systemeffizienz wird eine nahezu beugungsbegrenzte Quelle in die Grundmode der Multimodenfaser **56** am Eingang des Systems eingekoppelt, wobei eine Verstärkungsführung ebenso zur weiteren Verbesserung der Raumqualität des in der Multimodenfaser verstärkten Strahls verwendet werden kann. Für das Herunterzählen der Wiederholungsrate der von einem SM zugeleiteten Impulszüge und für die Unterdrückung einer verstärkten spontanen Emission in der Multimodenverstärkungseinrichtung kann eine erste optische Modulationseinrichtung **52a** nach dem ersten Pass durch die Multimodenverstärkungseinrichtung eingesetzt werden. Eine ideale Stelle ist unmittelbar vor dem Reflexionsspiegel **59**, wie es gezeigt ist. Folglich kann eine Doppelpassverstärkung bis zu 60 bis 70 dB in einer derartigen Konfiguration erhalten werden, wobei

die Anzahl von Verstärkungsstufen minimiert wird, die von verstärkten Keimimpulsen mit pJ-Energien bis zu dem mJ-Energiepegel erforderlich sind. Diese Verstärkerbauart ist mit den vorstehend beschriebenen SMs, PSMs und PCMs voll kompatibel, was die Erzeugung von Femtosekundenimpulsen mit Energien in dem mJ-Bereich erlaubt. Als weitere Alternative für den Aufbau eines Verstärkermoduls mit hoher Verstärkung kann ein Herunterzählen der Wiederholrate von einem durch ein SM zugeleiteten Impulszug ebenso mit einer zusätzlichen zweiten Modulationseinrichtung **52b** von einer Injektion in das vorliegende Verstärkermodul durchgeführt werden, wie es ebenso in [Fig. 15](#) gezeigt ist. Die Wiederholrate der Transmissionsfenster der ersten Modulationseinrichtung **52a** sollte sodann entweder kleiner oder gleich der Wiederholrate des Transmissionsfensters der zweiten Modulationseinrichtung **52b** sein. Eine derartige Konfiguration ist nicht gesondert gezeigt. [Fig. 15](#) teilt einige Ähnlichkeiten mit [Fig. 5](#) der US-Patentschrift Nr. 5,400,350.

[0099] Als weiteres erfindungsgemäßes alternatives Ausführungsbeispiel ist ein optisches Kommunikationssystem unter Verwendung der Ausbildung von parabolischen Impulsen in langen verteilten Verstärkungseinrichtungen **61** mit positiver Dispersion in [Fig. 16](#) gezeigt. Dispersionskompensationselemente **63** werden zwischen die Faseroptikverstärkungseinrichtungen eingesetzt. Optische Filter **62** werden zudem für die Optimierung des Impulsausbildungsvorgangs in den Verstärkungseinrichtungen implementiert. Die optischen Filter können auf optischen Etalons mit einem begrenzten freien Spektralbereich basieren, so dass sie eine spektralwiederholende Transmissionscharakteristik erzeugen, was die simultane Transmission von mehrfachen Wellenlängenkanälen erlaubt, wie es für das Wellenlängenmultiplexverfahren erforderlich ist.

[0100] Der Schlüsselvorteil ist die Verbindung von großen Verstärkungsausmaßen in langen Längen von Fasern mit positiver Dispersion, damit der durch optische Kerr-Nichtlinearitäten in das Fasertransmissionssystem eingeführte Chirp linearisiert wird. Daher werden allgemein die Transmissionscharakteristiken eines optischen Kommunikationssystems durch die Implementierung von (Nicht-Solitonen-unterstützenden) Verstärkungseinrichtungen mit positiver Dispersion verbessert. Derartige Verstärkungseinrichtungen können Längen von zumindest 10 km und eine Verstärkung von weniger als 10 dB/km aufweisen. Die Gesamtverstärkung pro Verstärkungseinrichtung kann 10 dB überschreiten, damit der Beginn der parabolischen Impulsausbildung für die Minimierung der schädlichen Wirkung von optischen Nichtlinearitäten ausgenutzt wird. Weitere Verbesserungen werden durch die Verwendung von Verstärkungseinrichtungen mit einer Verstärkung von weniger als 3 dB/km und einer Erhöhung der Gesamtlänge erhalten,

so dass die Gesamtverstärkung mehr als 20 dB beträgt. Eine weitere Verbesserung bei der Transmissionscharakteristik der Fasertransmissionsleitung wird durch die Minimierung des Ausmaßes der Kerr-Nichtlinearitäten in den Elementen mit negativer Dispersion der Fasertransmissionsleitung erhalten. Dies wird durch die Verwendung von gechirpten Fasergittern für die Elemente mit negativer Dispersion erreicht.

[0101] Zusätzlich zu der Ausbildung von parabolischen Impulsen innerhalb der Übertragungsleitung kann außerdem die Erzeugung der parabolischen Impulse in einer externen Quelle mit anschließender Injektion in eine nicht-Soliton-unterstützende Verstärkungsfasern vorteilhaft sein. Zur effektiven Verwendung eines derartigen Systems ist eine Übertragung mit positiver Dispersion und geringen Verlusten hilfreich, wie es durch Holey-Fasern ermöglicht wird. Entlang der Fasertransmissionsleitung und am Ende der Transmissionsleitung werden dispersionskompensierende Elemente implementiert. Eine derartige Systemimplementierung ist ähnlich zu der in [Fig. 16](#) gezeigten und somit nicht gesondert gezeigt.

[0102] Als weiteres erfindungsgemäßes Ausführungsbeispiel im Telekommunikationsbereich kann eine wellenlängenabstimmbare Ramanverstärkungseinrichtung unter Verwendung von ramanverschobenen Impulsen aufgebaut werden. Es ist bekannt, dass ein optisches Signal mit hoher Leistung bei einer gegebenen Pumpwellenlänge eine Ramanverstärkung bei einer Signalwellenlänge erzeugt, die bezüglich der Pumpwellenlänge rot verschoben ist. Tatsächlich ist es dieser auf die Pumpimpulse selbst wirkende Effekt, der für den Aufbau der vorliegend beschriebenen wellenlängenabstimmbaren Impulsquellen verwendet wird.

[0103] Ein allgemeiner Entwurf für eine wellenlängenabstimmbare Ramanverstärkungseinrichtung ist in [Fig. 17](#) gezeigt. Dabei werden kurze optische Impulse in einer Keimquelle **64** erzeugt. Die Keimimpulse werden durch eine Modulationseinrichtung **65** optisch moduliert und können ebenso in einer optischen Verstärkungseinrichtung **66** verstärkt werden. Die Keimimpulse werden sodann in eine Länge einer Ramanverschiebungsfaser **67** injiziert. Die Ramanverschiebungsfaser kann eine Länge einer Holey-Faser oder von anderer Gestalt sein. Die Zeitperiode zwischen den ramanverschobenen Impulsen kann unter Verwendung einer Impulsteilungseinrichtung (Pumpimpulsteilungseinrichtung) **68** gemäß [Fig. 17](#) reduziert werden. Diese Impulsteilungseinrichtung kann beispielsweise eine Anordnung von unausgewogenen Mach-Zehnder-Interferometern sein, obwohl eine beliebige Einrichtung zur Erzeugung eines Impulszuges aus einem einzelnen Impuls akzeptabel ist. Die zweckmäßig wellenlängenverschobenen, verstärkten und modulierten Keimimpulse umfassen die Pumpimpulse, die in die Ramanverstär-

kungsfasern **69** injiziert sind, und erzeugen eine optische Verstärkung bei einer Signalwellenlänge innerhalb der Ramanverstärkungseinrichtung gemäß [Fig. 17](#), wobei durch Einwirkung auf einen Signaleingang **70** ein Signalausgang **71** erzeugt wird.

[0104] Innerhalb der Ramanverstärkungsfasern breitet sich das optische Signal bei der Signalwellenlänge bezüglich der Pumpimpulse in der Ramanverstärkungseinrichtung gegenläufig aus. Auch können einige Signalwellenlängen gleichzeitig in die Ramanverstärkungseinrichtung unter Verwendung einer Signalkombinationseinrichtung injiziert werden, wodurch eine derartige Verstärkungseinrichtung mit optischem Wellenlängenmultiplex kompatibel wird. Pumpimpulse bei einer Wellenlänge von 1470 nm erzeugen beispielsweise eine Ramanverstärkung um den 1560 nm-Wellenlängenbereich in einer Quarzglasfasern. Zur Optimierung der Verstärkung der Ramanverstärkungseinrichtung kann eine Holey-Faser oder eine andere Faser mit einem relativ kleinen Faserkern Durchmesser verwendet werden.

[0105] Die Zentralwellenlänge der Wellenlänge, bei der die Ramanverstärkung erhalten wird, ist sodann durch die Abstimmung der Wellenlänge der Pumpimpulse abstimmbare. Eine Wellenlängenabstimmung der Pumpimpulse kann durch die Modulierung der Leistung sowie durch die Breite der Keimimpulse vor deren Injektion in die Ramanverschiebungsfaser **67** erreicht werden.

[0106] Darüber hinaus kann das Verstärkungsspektrum der Ramanverstärkungseinrichtung durch eine rasche Abstimmung der Wellenlänge der Pumpimpulse eingestellt werden, so dass die Signalimpulse einem effektiv abgewandelten Ramanverstärkungsspektrum unterliegen. Um sicher zu gehen, dass die effektive Ramanverstärkung zeitunabhängig ist, sollte die Geschwindigkeit der Abstimmung der Pumpimpulse, d. h. die Zeitperiode für die Abstimmung der Impulse über einen gewünschten Wellenlängenbereich, im Vergleich zu der Zeit, die es braucht, damit die Signalimpulse die Ramanverstärkungsfasern **69** durchlaufen, klein sein.

[0107] Somit ist es für Ramanverstärker für Telekommunikationssysteme vorteilhaft, eine breitere Spektralverstärkung zu erhalten, als es von einem einzelnen Impuls möglich ist. Es ist zudem vorteilhaft, die Verstärkung in WDM-Telekommunikationssystemen dynamisch verändern zu können, um das variierende Ausmaß der bei verschiedenen Wellenlängen übertragenen Daten zu kompensieren. Eine Möglichkeit zur Aufweitung der Spektralverstärkung ist die rasche Abstimmung der Pumpwellenlänge im Vergleich zu der Ausbreitungszeit durch die Kommunikationsfasern. Die Verstärkung kann dynamisch eingestellt werden, indem die Zeit variiert wird, in der der Pumpvorgang bei verschiedenen Wellenlängen

verbleibt. Eine alternative Maßnahme zur Einstellung des Verstärkungsspektrums ist die Verwendung einer Vielzahl von Pumpimpulsen in der Ramanverschiebungsfaser, wobei jede eine verschiedene Wellenlänge aufweist. Eine Modulation der relativen Impulsanzahl bei jeder Wellenlänge kann sodann das relative Verstärkungsprofil modifizieren.

[0108] Im Einzelnen wird die in [Fig. 1](#) beschriebene Femtosekundenimpulsquelle in Ytterbiumverstärkungseinrichtungen zu hohen Leistungen verstärkt. Diese Impulse können sodann in den 1400 bis 1500 nm-Bereich durch eine Faser mit dem Null-Dispersionspunkt bei einer kürzeren Wellenlänge als dem Betriebspunkt der Femtosekundenimpulsquelle selbstfrequenz-ramanverschoben sein. Diese Faser könnte eine Holey-Faser sein. Damit eine Leistung im Watt-Niveau mit der Selbstfrequenzramanverschiebung in den 1400 bis 1500 nm-Bereich erzielt wird, wird die optimale Wiederholrate der Quelle bei höheren Frequenzen sein, wie etwa oberhalb 1 GHz. Eine Verstärkungsspektrumaufweitung und eine automatische Verstärkungssteuerung können unter Verwendung einer Vielzahl von Pumpwellenlängen erhalten werden, indem die Pumpwellenlänge abgestimmt wird, oder indem die Impulsamplitude von individuellen Impulsen bei dem Impulszug moduliert wird, damit verschiedene Ausmaße einer Ramanverschiebung erhalten werden.

[0109] Gemäß vorstehender Beschreibung ist ein modulares kompaktes und breit abstimmbares Lasersystem für die effiziente Erzeugung von Ultrakurzimpulsen mit hoher Spitzen- und hoher Durchschnittsleistung angegeben. Die Modularität ist durch die Implementierung von austauschbaren Verstärkerkomponenten sichergestellt. Die Systemkompaktheit ist durch die Verwendung von effizienten Faserverstärkungseinrichtungen sichergestellt, die direkt oder indirekt durch Diodenlaser gepumpt werden. Die Spitzenleistungshandhabungskapazität der Faserverstärkungseinrichtungen wird unter Verwendung von optimierten Impulsgestalten sowie durch Dispersion aufgeweiteter Impulse ausgedehnt. Die Aufweitung durch Dispersion wird durch Dispersionsimpulsdehnung in Gegenwart einer Selbstphasenmodulation und -verstärkung eingeführt, was zu der Ausbildung von parabolischen Impulsen von hoher Leistung führt. Zusätzlich wird eine Aufweitung durch Dispersion ebenfalls durch einfache Faserverzögerungsleitungen oder gechirpte Fasergitter eingeführt, was zu einem weiteren Anstieg der Energiehandhabungsbefähigung der Faserverstärkungseinrichtungen führt. Die Phase der Impulse in der Dispersionsverzögerungsleitung wird in die quadratische Ordnung durch die Verwendung von Fasern mit variierenden Ausmaßen von Wellenlängendispersion oder durch die Steuerung des Chirps der Fasergitter gesteuert. Nach der Verstärkung können die dispersiv gedehnten Impulse auf nahezu ihre Band-

breitengrenze durch die Implementierung einer weiteren Gruppe von Dispersionsverzögerungsleitungen zurückverdichtet werden. Zur Sicherstellung einer breiten Abstimmbarkeit des gesamten Systems kann eine Ramanverschiebung der kompakten Quellen für ultrakurze Impulse in Verbindung mit einer Frequenzumwandlung in nichtlinearen optischen Kristallen implementiert werden, oder es wird eine Anti-Stokes-Faser in Verbindung mit Faserverstärkungseinrichtungen und Ramanverschiebungseinrichtungen verwendet. Eine besonders kompakte Implementierung des gesamten Systems verwendet Faseroszillatoren in Verbindung mit Faserverstärkungseinrichtungen. Zusätzlich werden lange verteilte optische Verstärkungseinrichtungen mit positiver Dispersion für die Verbesserung der Transmissionscharakteristiken eines optischen Kommunikationssystems verwendet. Schließlich verwendet ein optisches Kommunikationssystem eine durch einen Zug von ramanverschobenen wellenlängenabstimmbaren Pumpimpulsen gepumpte Ramanverstärkungsfaser, damit dadurch ein optisches Signal verstärkt wird, das sich innerhalb der Ramanverstärkungsfaser bezüglich der Pumpimpulse gegenläufig ausbreitet.

Patentansprüche

1. Ein faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem, welches Ausgangsimpulse im Wellenlängenbereich zwischen 1–1,15 μm erzeugt, mit:
 - einer Keimquelle (1), die einen passiv modengekoppelten Yb-Faserlaser umfasst;
 - einem Yb-Faserverstärker (3a) zur Verstärkung einer Ausgabe des Faserlasers;
 - einer Faserimpulsdehnungseinrichtung (2), die die Impulse von der Keimquelle empfängt, die Impulse zeitlich dispersiv dehnt und die gedehnten Impulse an den Faserverstärker ausgibt, wobei die Faserimpulsdehnungseinrichtung (2) zumindest eines von einem Bragg-Faser-Gitter und einem Faser-Transmissionsgitter umfasst;
 - einem optischen Modulator (52), der zwischen dem passiv modengekoppelten Faserlaser und dem Yb-Verstärker angeordnet ist, wobei der Modulator steuerbar ist, um die Wiederholungsrate von Impulsen, die von dem modengekoppelten Faserlaser ausgegeben werden, zu reduzieren und um die verfügbare Impulsenergie von Impulsen, die mit dem Yb-Verstärker verstärkt werden, zu erhöhen;
 - einer Impuls-Verdichtungseinrichtung (4), der die verstärkten gedehnten Impulse eingegeben werden und die eingerichtet ist, sie auf ihre Bandbreitengrenze zu verdichten, wobei der passiv modengekoppelte Yb-Faserlaser polarisationserhaltend ist und
 - einer Mehrzahl von zusätzlichen Yb-Faserverstärkern (36), die zwischen der Impulsdehnungseinrichtung (2) und der Impulsverdichtungseinrichtung (4) angeordnet sind.

2. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach Anspruch 1, wobei der passiv modengekoppelte Faserlaser einzelmodenfähig ist.

3. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach Anspruch 1, wobei der passiv modengekoppelte Faserlaser mehrfach modenfähig ist.

4. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei die Keimquelle (1) Impulse erzeugt, die die Ausbildung parabolischer Impulse im Faserverstärker induzieren.

5. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei zumindest einer der Yb-Verstärker mantelgepumpt ist.

6. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, welches des weiteren einen nicht linearen Kristall umfasst, der den Ausgang der Keimquelle (1) frequenzverdoppelt.

7. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach Anspruch 6, wobei der nicht lineare Kristall ein periodisch gepoltes ferroelektrisches optisches Material umfasst, das aus der Gruppe gewählt ist, bestehend aus PPLN, PP-Lithiumtantalat, PPMgO:LiNbO₃, PP KTP, und einem periodisch gepolten Kristall der KTP-Isomorphenfamilie.

8. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 6 oder 7, wobei eine Länge des nicht linearen Kristalls gewählt wird, um die Impulslänge eines Ausgangsimpulses der Keimquelle zu steuern.

9. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 6 bis 8, wobei eine Wellenlänge eines Ausgangs des nicht linearen Kristalls durch Steuern einer Temperatur des nicht linearen Kristalls gesteuert wird.

10. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 9, des weiteren umfassend:

einen Koppler zwischen der Keimquelle und dem Faserverstärker, der die Keimquelle mit dem Faserverstärker koppelt und der des weiteren eine optische Faser mit einer Länge von weniger als 1 km umfasst.

11. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10, des weiteren umfassend:

eine optische Zuleitungsfaser (46), die mit dem Ausgang des Faserverstärkers (3a) gekoppelt ist.

12. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach Anspruch 11, wobei die optische Zuleitungsfaser (46) aus der Gruppe gewählt ist, bestehend aus:

einer Holey-Faser, einem Abschnitt einer Mehrfach-Moden-Faser und einem Abschnitt einer Mehrfach-Moden-Faser, der mit einem oder zwei Abschnitten einer einmodenfähigen Faser zusammengespleißt ist.

13. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) eine Faser mit einer Länge von weniger als 1 km umfasst.

14. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) eine Holey-Faser umfasst.

15. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) einen Abschnitt einer Faser für einige Moden umfasst.

16. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) einen Abschnitt einer Faser für einige Moden umfasst, die mit einem oder mehreren Abschnitten einer einmodenfähigen Faser zusammengespleißt ist.

17. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) eine einmodenfähige Faser mit einer Länge von weniger als 1 km umfasst.

18. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) eine Faser mit einem W-Brechungsindexprofil umfasst.

19. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 18, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) eine Faser mit einem Multimantelbrechungsindexprofil aufweist.

20. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 19, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) umfasst: einen Abschnitt mit einer negativen Dispersion der dritten Ordnung; und ein linear gechirptes Fasergitter mit einer negativen Dispersion der zweiten Ordnung.

21. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 20, wobei die Faser-Impulsdehnungseinrichtung (2) umfasst: ein linear gechirptes Fasergitter (49); und eines oder mehrere Fasertransmissionsgitter (51) mit auswählbaren Werten der Dispersion dritter und höherer Ordnung, so dass eine Dispersion höherer Ordnung in der Impulsverdichtungseinrichtung kompensiert wird.

22. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 21, umfassend:

einen mantelgepumpten Faserverstärker für Impulse, der die Impulse empfängt, verstärkt und ausgibt, wobei der Faserverstärker mit zumindest einem Vorwärts- und einem Rückwärtsdurchgang betrieben wird;

einen Pumplaser für die Bereitstellung von Laserenergie an den Faserverstärker; und

einen optischen Modulator, der zwischen dem einen Vorwärts- und einem Rückwärtsdurchgang des Verstärkers angeordnet ist.

Transmissionsgitter für die Einführung von Dispersion der dritten und vierten Ordnung umfasst, und eine Impulsverdichtungseinrichtung, die dem Verstärkerabschnitt nachfolgend angeordnet ist, damit die Dispersion der zweiten Ordnung kompensiert wird, und die eine Dispersion der dritten und vierten Ordnung aufweist, die diejenige durch die Dehnungseinrichtung eingeführte auslöscht.

Es folgen 17 Blatt Zeichnungen

23. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach einem der Ansprüche 1 bis 22, das des weiteren umfasst:

eine Vielzahl von zusätzlichen Faserverstärkern, wobei zumindest einer der Faserverstärker und die Vielzahl zusätzlicher Faserverstärker mit mindestens einem Vorwärts- und einem Rückwärtsdurchgang betrieben wird; und

einen Modenfilter für die bevorzugte Übertragung der Grundmode eines nach dem ersten Durchgang angeordneten Verstärkers durch den zumindest einen des Faserverstärkers und der Vielzahl von zusätzlichen Faserverstärkern, welcher mit zumindest einem Vorwärts- und einem Rückwärtsdurchgang betrieben wird.

24. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach Anspruch 4, umfassend:

eine Zuleitungsfaser;

eine gitterbasierte Impulsverdichtungseinrichtung; und

eine W-Faser für die Kompensation der Dispersion dritter Ordnung der Impulsverdichtungseinrichtung.

25. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach Anspruch 4, umfassend:

eine Faser-Impulsdehnungseinrichtung, die vor einem Verstärkungsabschnitt des Systems angeordnet ist und die zumindest ein eine negative Dispersion der dritten Ordnung erzeugendes Element umfasst; und

eine Impulsverdichtungseinrichtung, die dem Verstärkerabschnitt nachfolgend angeordnet ist, um die Dispersion der zweiten Ordnung zu kompensieren und die eine positive Dispersion der dritten Ordnung aufweist, die diejenige durch die Dehnungseinrichtung eingeführte auslöscht.

26. Faser-basiertes Chirped-Impuls-Verstärkungssystem nach Anspruch 4, umfassend:

eine Faser-Impulsdehnungseinrichtung, die vor dem Verstärkerabschnitt des Systems angeordnet ist und die zumindest ein eine positive Dispersion der zweiten Ordnung erzeugendes Element und zumindest eines von einem Bragg-Faser-Gitter und einem Faser-

Anhängende Zeichnungen

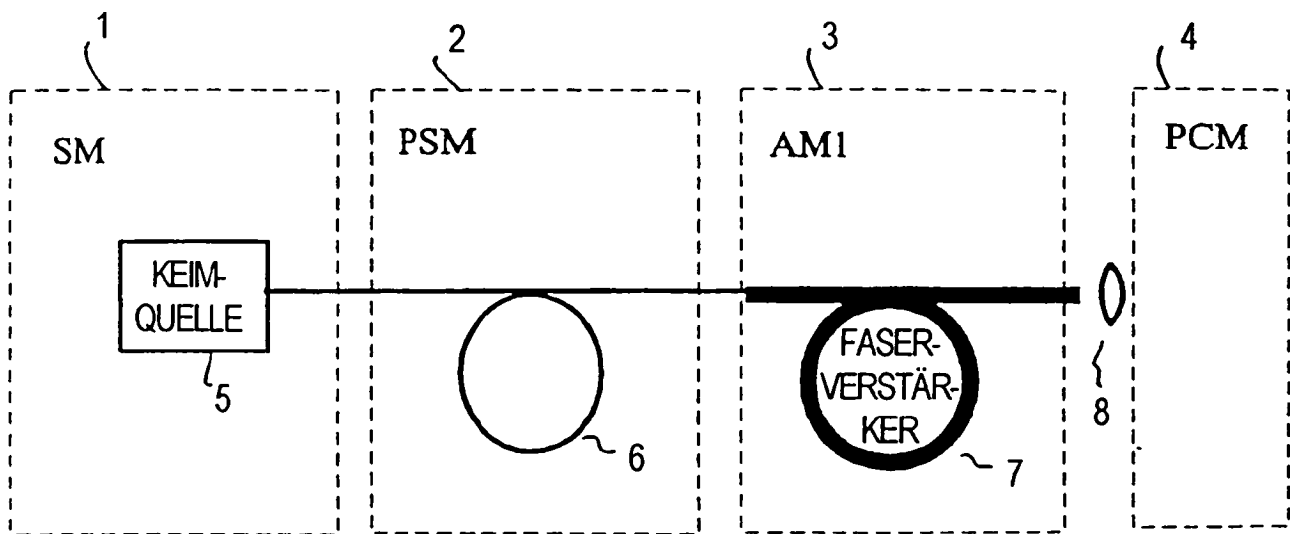


FIG. 1

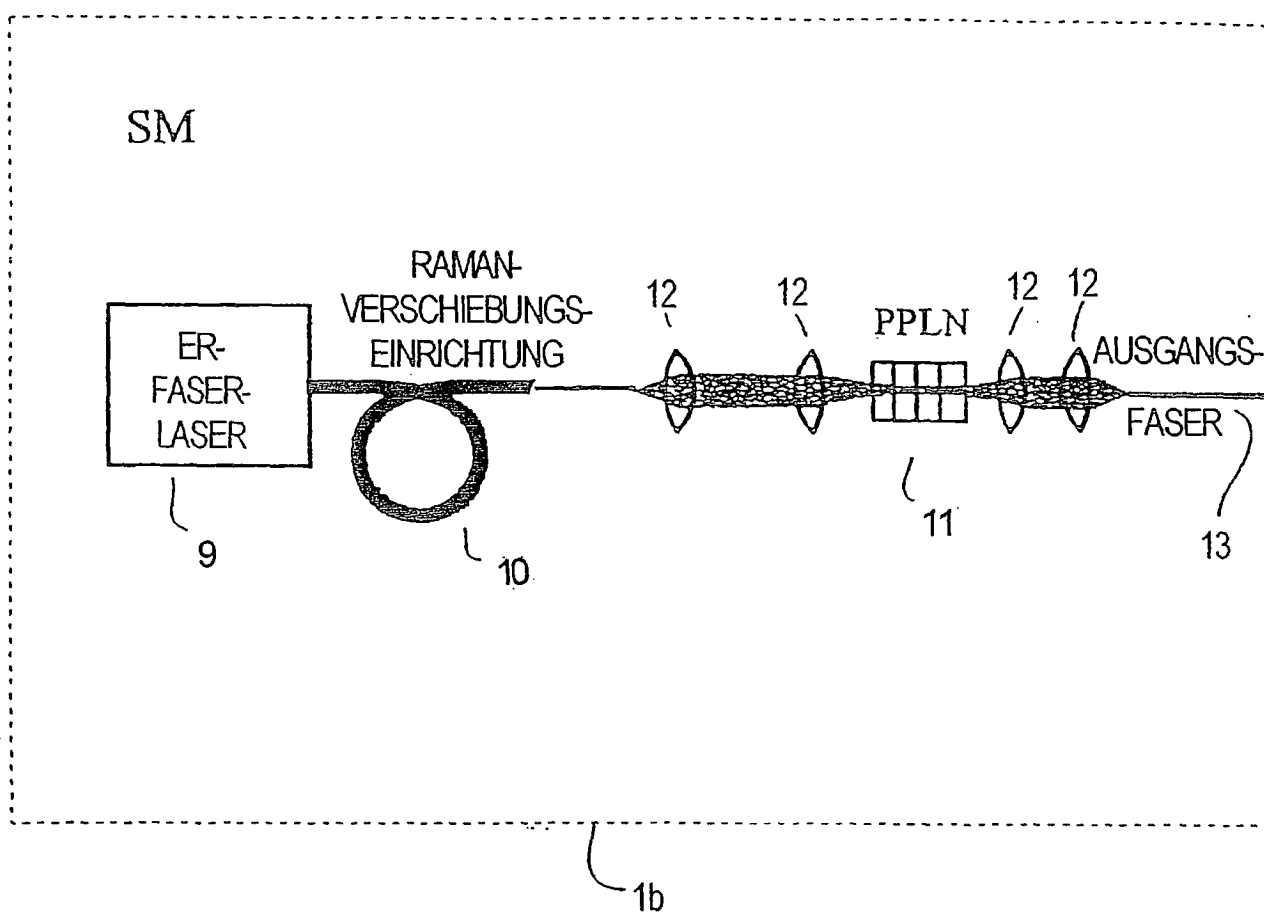


FIG. 2

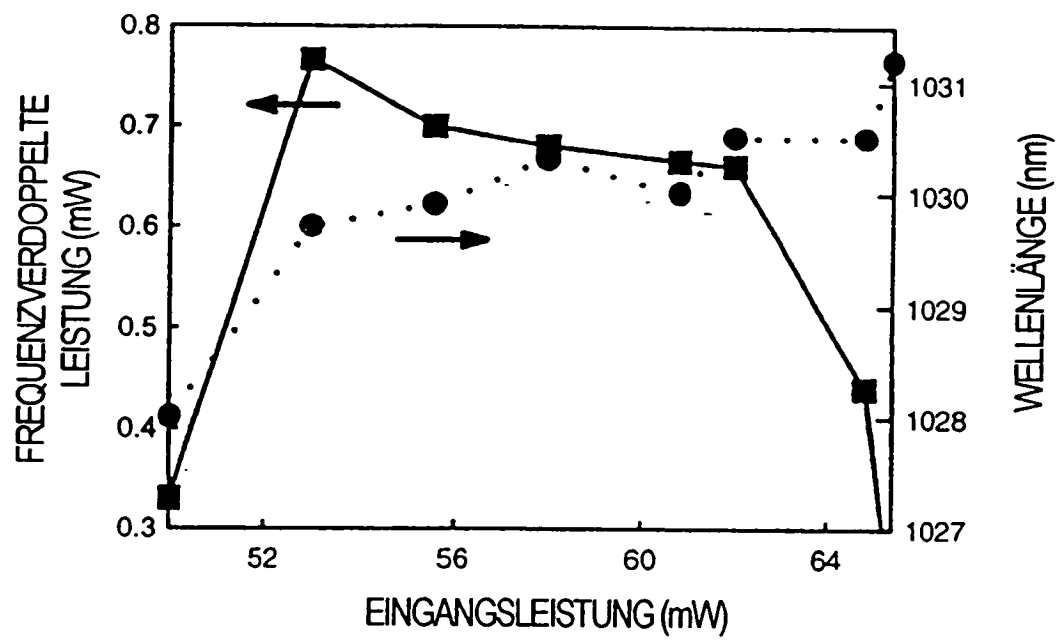


FIG. 3

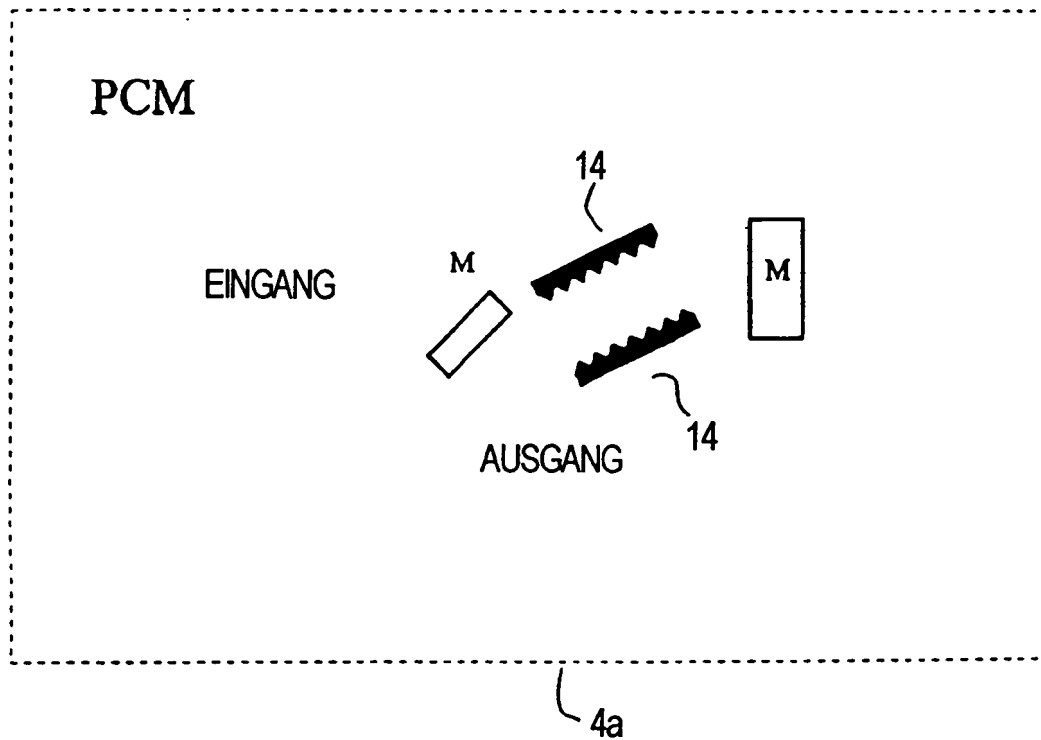


FIG. 4

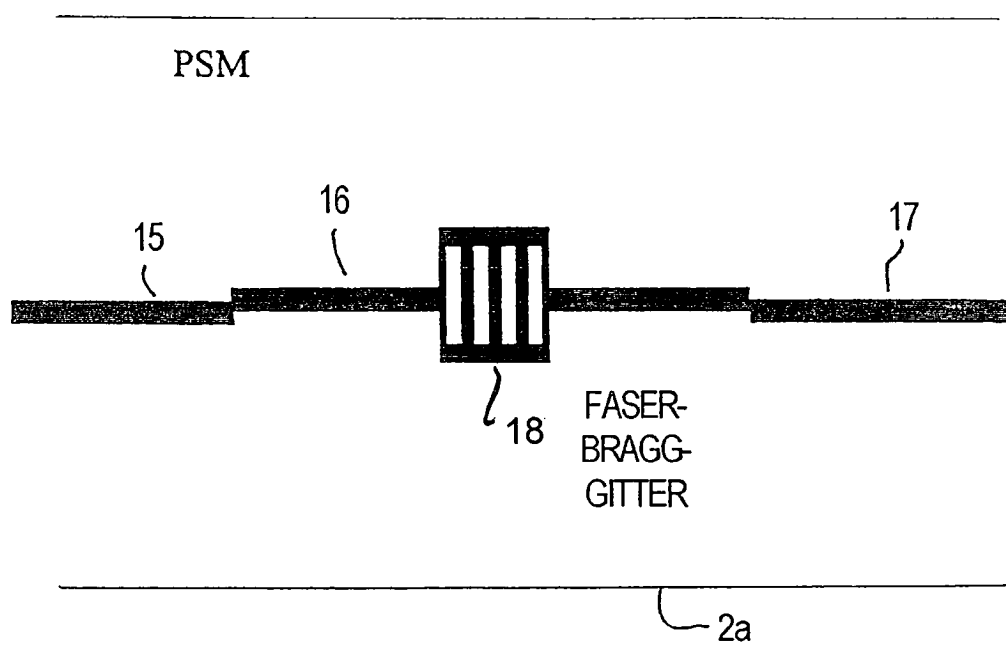


FIG. 5

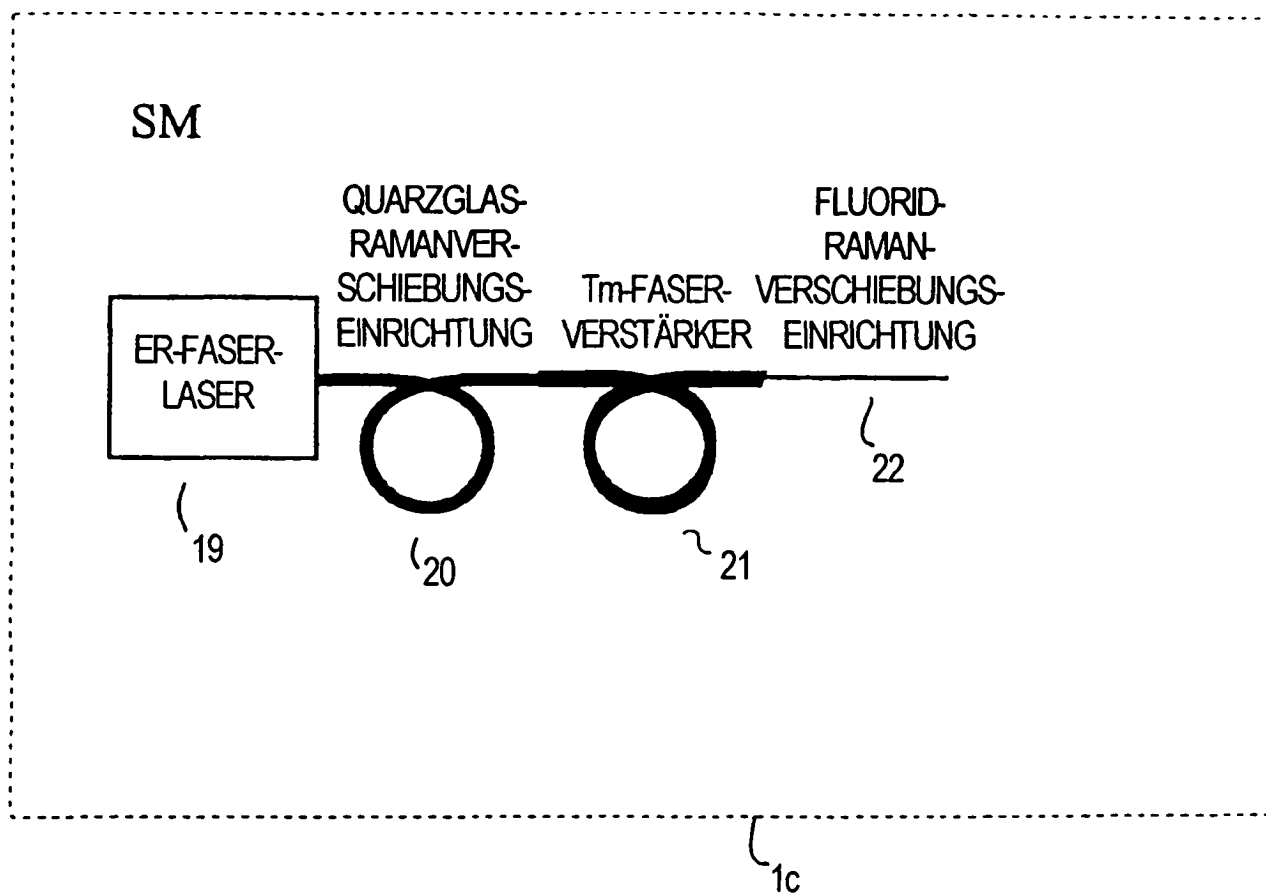


FIG. 6

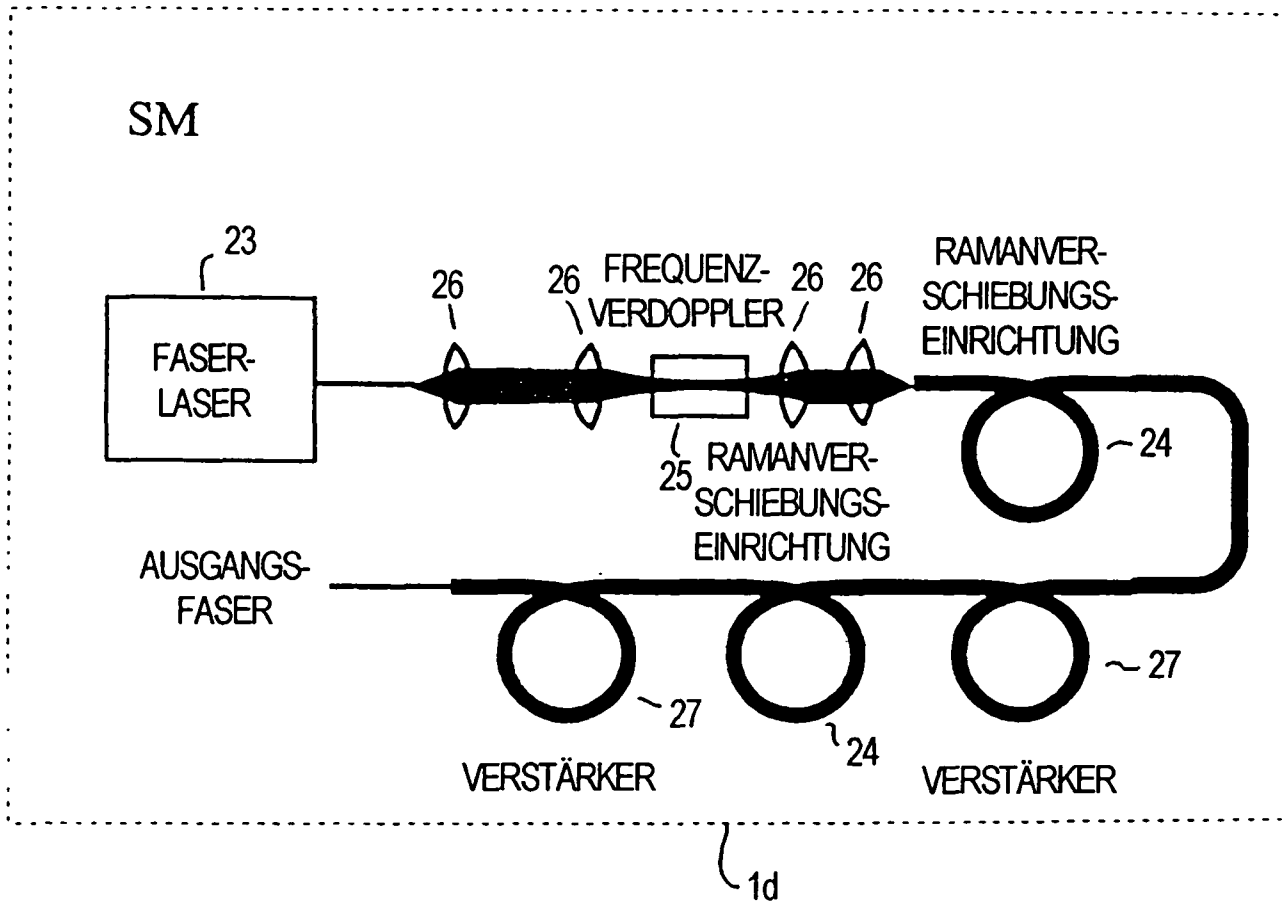


FIG. 7

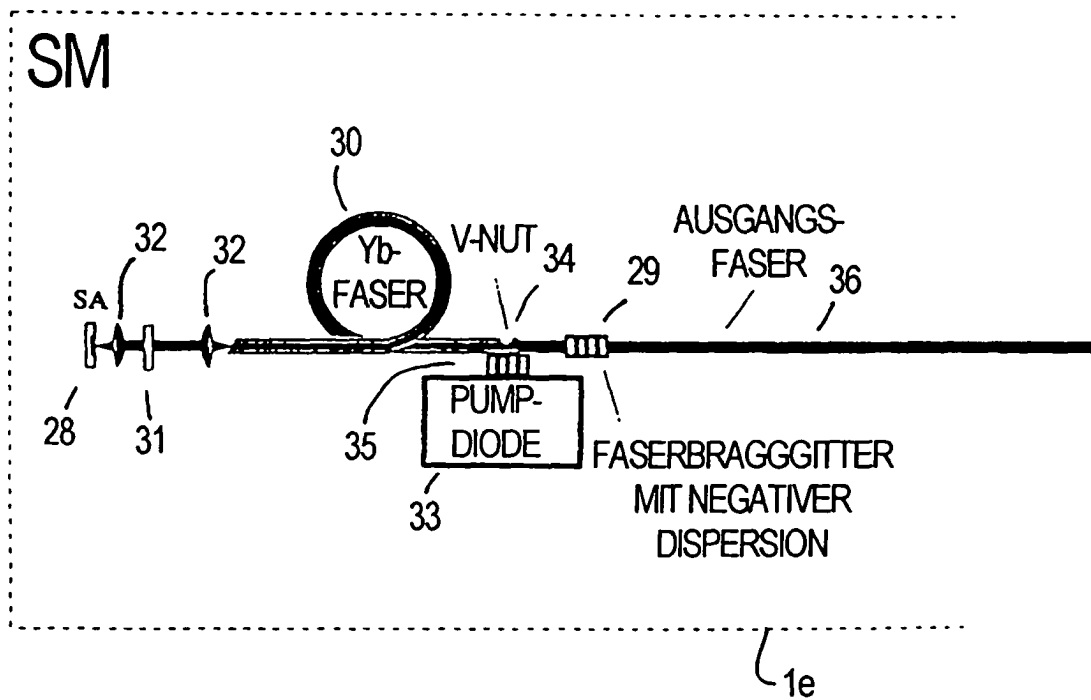


FIG. 8

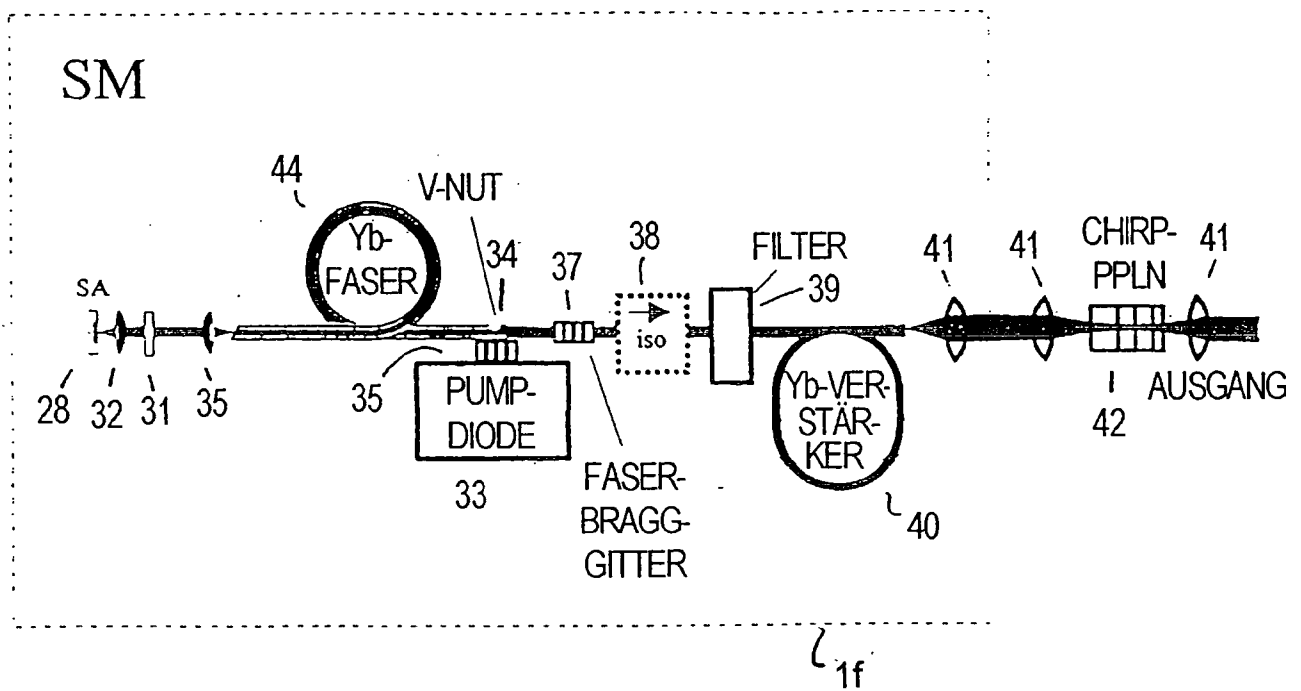


FIG. 9

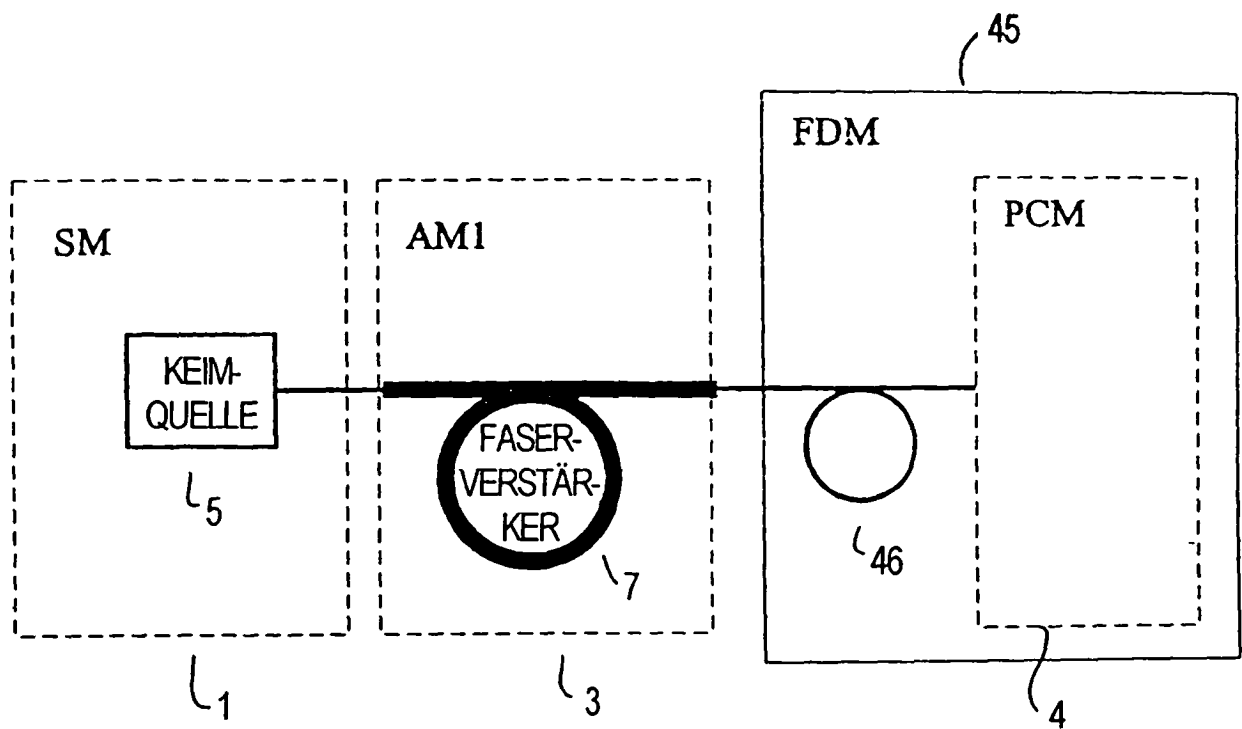


FIG. 10

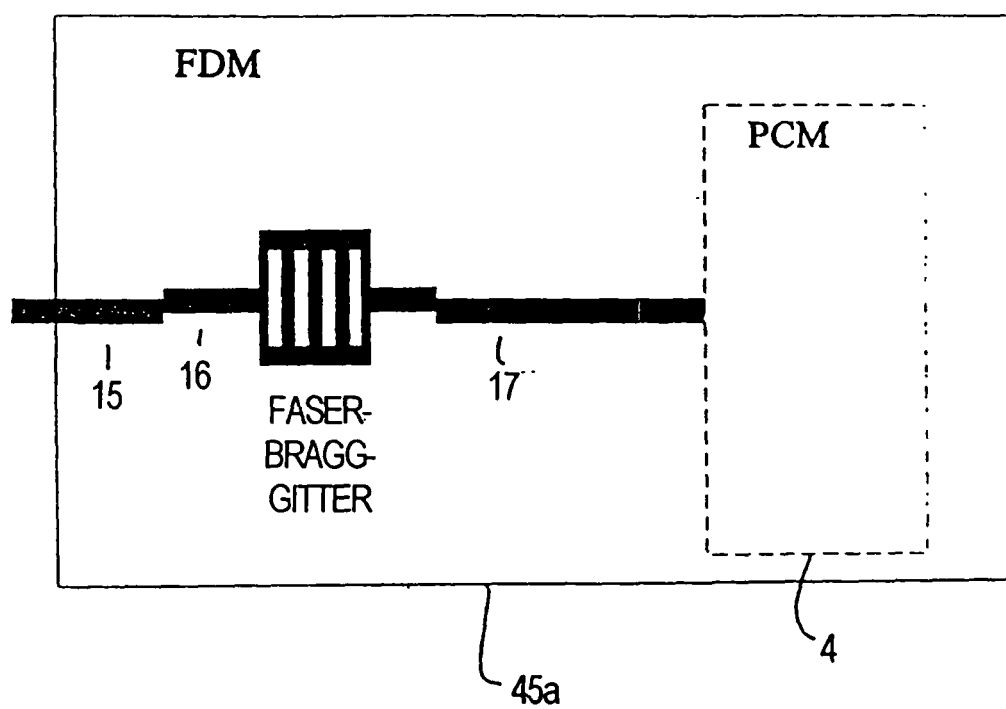


FIG. 11

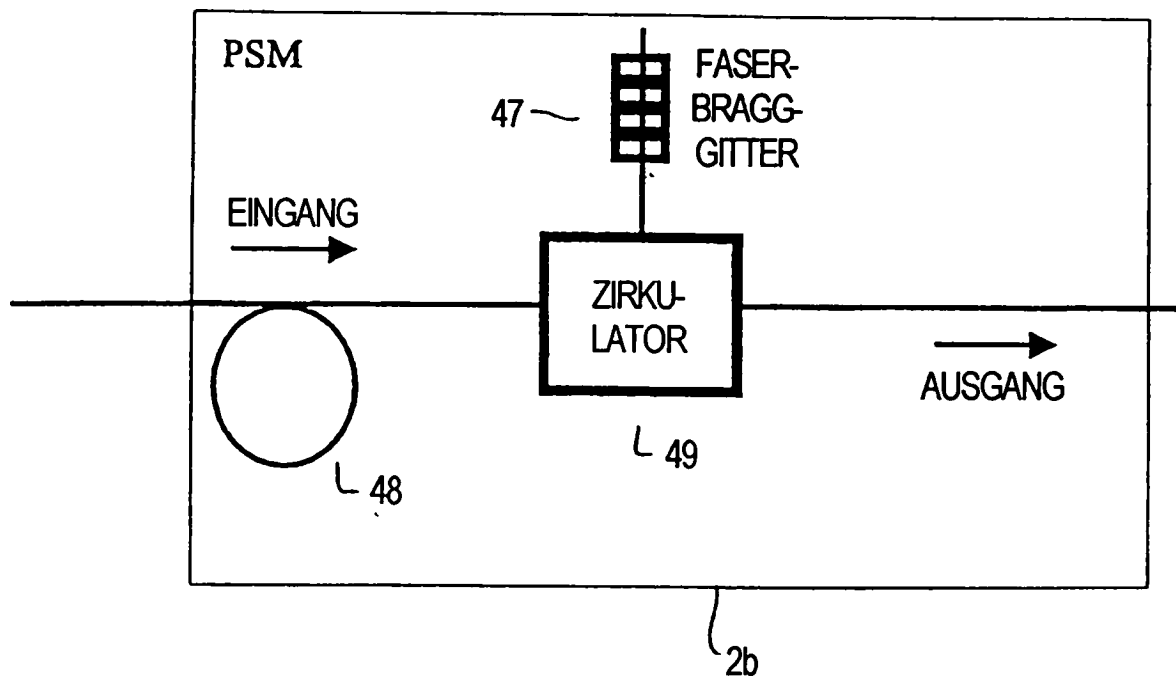


FIG. 12

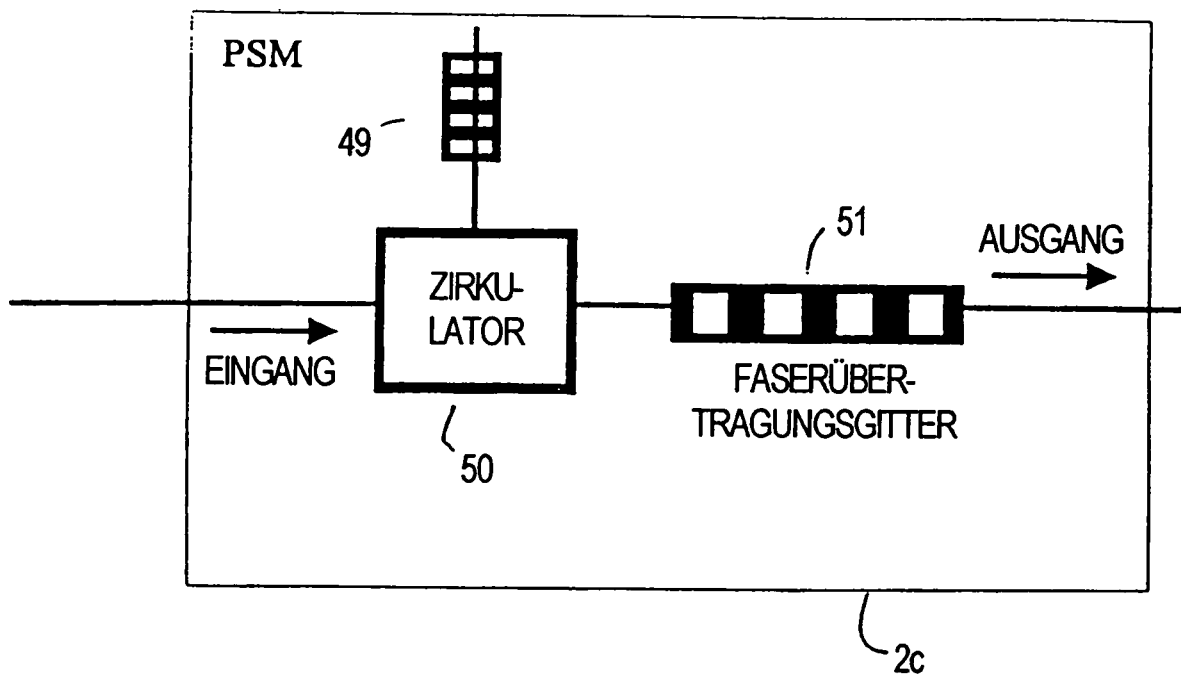


FIG. 13

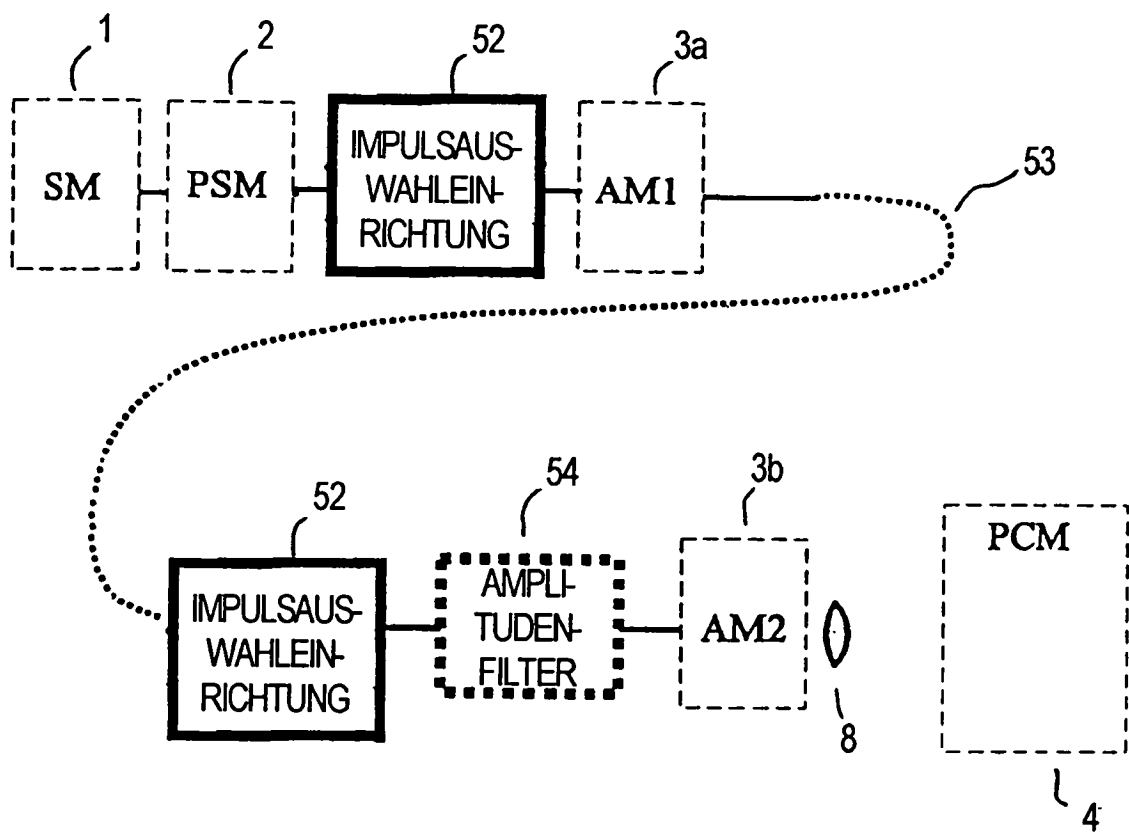


FIG. 14

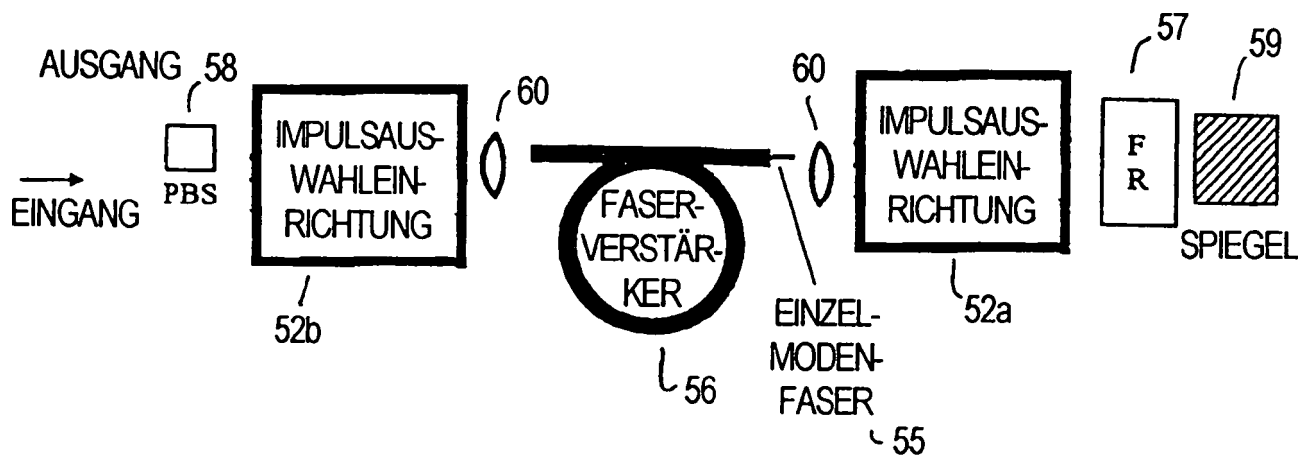


FIG. 15

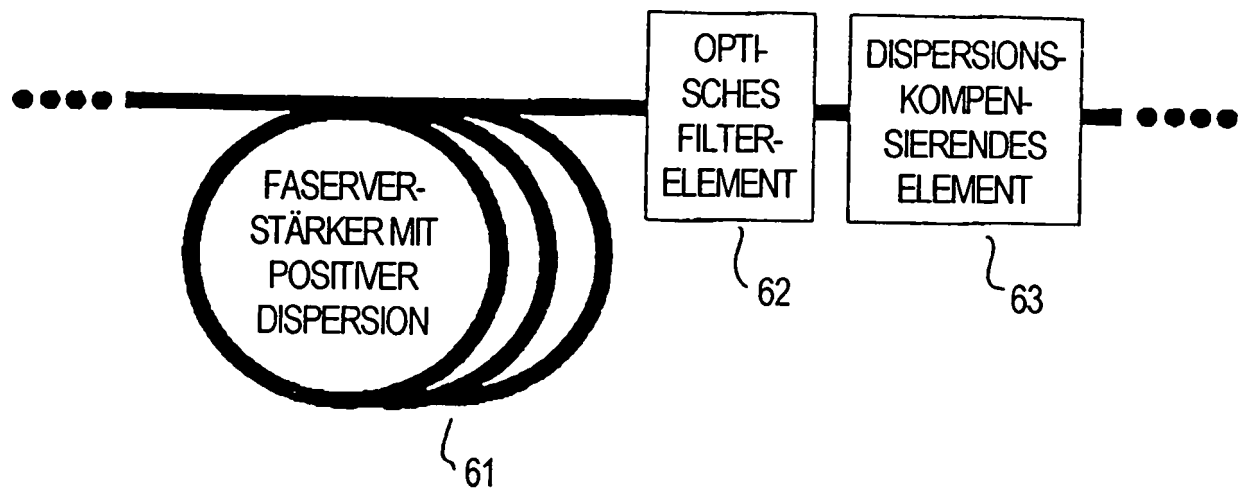


FIG. 16

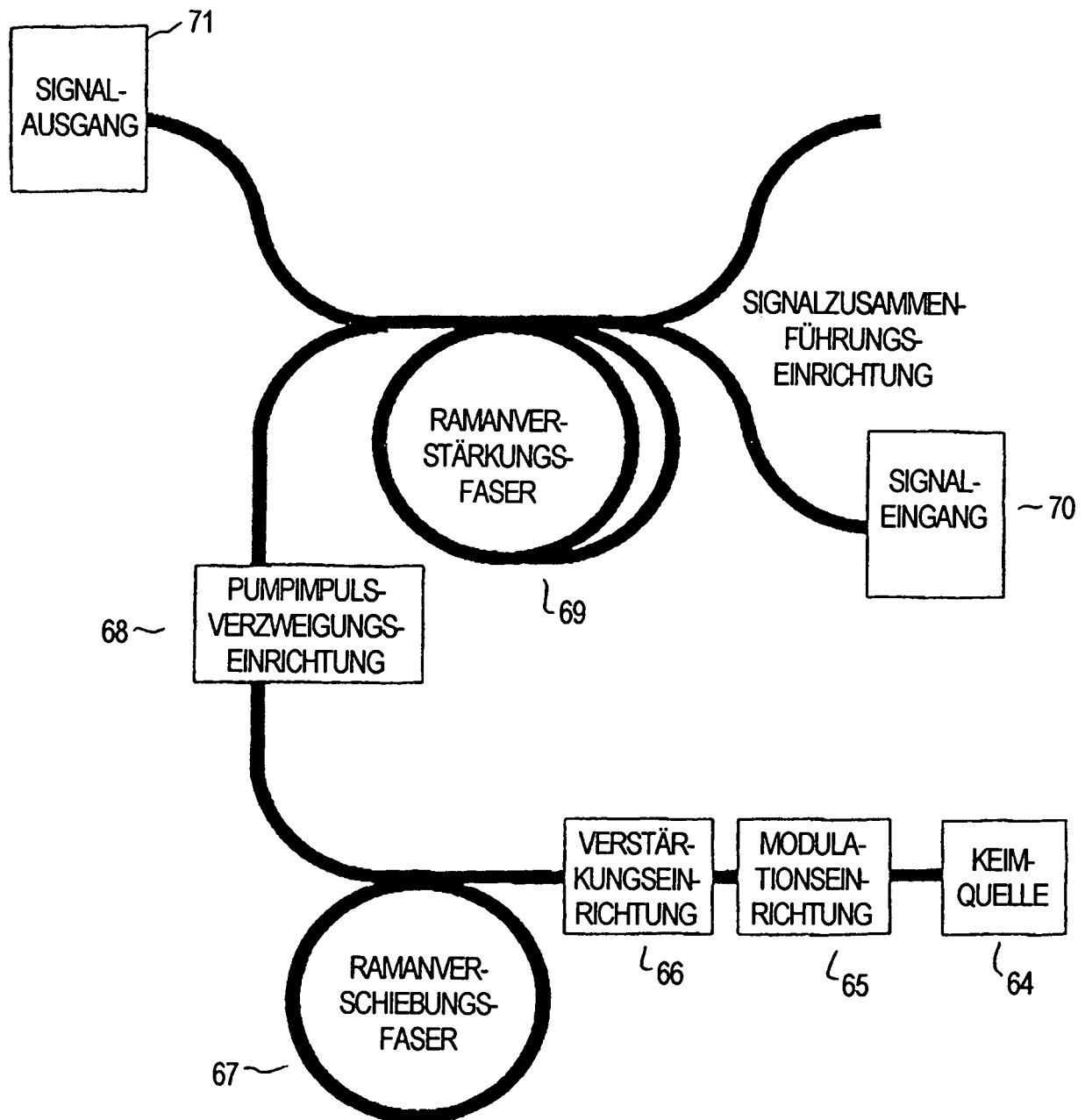


FIG. 17