



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2006 023 601 A1 2007.11.22**

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2006 023 601.7**

(22) Anmeldetag: **19.05.2006**

(43) Offenlegungstag: **22.11.2007**

(51) Int Cl.⁸: **H01S 3/30 (2006.01)**

H01S 3/13 (2006.01)

G04F 5/14 (2006.01)

G01N 21/64 (2006.01)

(71) Anmelder:
Menlo Systems GmbH, 82152 Planegg, DE

(74) Vertreter:
Maatz-Jansen, G., Dipl.-Phys., Pat.-Anw., 80538 München

(72) Erfinder:
Adel, Peter, Dr., 80638 München, DE; Fischer, Marc, Dr., 80636 München, DE; Mei, Michael, Dr., 81477 München, DE; Holzwarth, Ronald, Dr., 80803 München, DE

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

DE10 2004 009068 A1

US2005/02 38 070 A1

US2004/02 13 302 A1

US2004/00 57 682 A1

US2003/00 43 451 A1

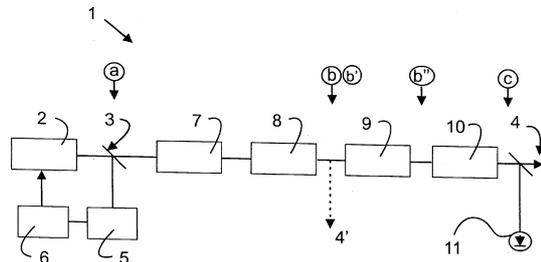
Kobtsev S., Smirnov S., "Coherent properties of super-continuum containing clearly defined solitons", In: Optics Express, Vol. 14, No. 9, 01. Mai 2006, S. 3968-3980;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Lasersystem**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Lasersystem (1) mit einem Frequenzkammgenerator (2) zum Erzeugen eines Frequenzkamms optischer Frequenzen mit einer Offset-Frequenz (f_0) und einer Vielzahl äquidistanter Moden (f_n), wobei das Lasersystem (1) vorzugsweise ferner wenigstens einen Stabilisator (5) zum Stabilisieren des Frequenzkamms auf eine bestimmte Offset-Frequenz (f_0) und/oder einen bestimmten Modenabstand (Δf) aufweist. Das Lasersystem zeichnet sich dadurch aus, dass ein optischer Verstärker (1) zum Verstärken des aus dem Frequenzkammgenerator (2) ausgekoppelten Frequenzkammes vorgesehen ist dass der Verstärkungsfaktor des Verstärkers (7) variabel ist, und dass dem Verstärker (7) ein Raman-Medium (8) zum Erzeugen einer Raman-Verschiebung des Frequenzkammes nachgeordnet ist.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Lasersystem gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0002] Ein solches Lasersystem beinhaltet als wesentliches Bestandteil einen Frequenzkammgenerator, wie er aus der DE 199 11 193 A1, der dazu parallelen EP 1 161 782 B1 oder der DE 100 44 404 C2 bekannt ist. Als Frequenzkammgenerator ist dort jeweils ein Kurzpuls- oder Ultrakurzpuls-Oszillator vorgesehen, d.h. ein modengekoppelter Laser mit Pulsdauern im Bereich von Femto- (fs) bis zu Nanosekunden (ns). Führt man eine Fourier-Transformation vom Zeitraum in den Frequenzraum durch, entspricht der Folge von Laserpulsen im Frequenzraum ein „Frequenzkamm“. Er setzt sich zusammen aus einer Vielzahl von scharfen δ -ähnlichen Funktionen bei verschiedenen diskreten Frequenzen, Moden f_n genannt. Benachbarte Moden haben voneinander einen Abstand Δf , der genau der Pulswiederholrate (= Repetitionsrate) des Oszillators entspricht und der daher durch die optische Weglänge der Pulse im Oszillator bestimmt ist.

[0003] Allerdings liegen die Moden des Frequenzkamms im Normalfall nicht exakt bei einem ganzzahligen Vielfachen von Δf , sondern der gesamte Frequenzkamm ist um eine so genannte Offset-Frequenz f_0 verschoben. Rechnerisch lässt sich der Frequenzkamm daher beschreiben als $f_n = f_0 + n \Delta f$. Die Ursache für die Offset-Frequenz f_0 besteht darin, dass sich die Gruppengeschwindigkeit für die im Oszillator umlaufenden Pulse, die die Repetitionsrate und damit den Modenabstand Δf bestimmt, von der Phasengeschwindigkeit der einzelnen Moden unterscheidet.

[0004] In der DE 199 11 193 A1, der EP 1 161 782 B1 und der DE 100 44 404 C2 sind Verfahren beschrieben, wie die beiden Freiheitsgrade des Frequenzkamms, d.h. die Offset-Frequenz f_0 und der Modenabstand Δf , auf feste Werte fixiert bzw. eingestellt werden können. Zu diesem Zweck ist je ein Stabilisator oder Regelkreis vorgesehen. Ein erster Stabilisator betrifft den Modenabstand. Als Messwert für diesen Stabilisator kann die (ggf. in besser erfassbare Bereiche geteilte oder multiplizierte) Pulswiederholrate dienen, die – wie erläutert – dem Modenabstand entspricht. Eine Auswerte- und Vergleichseinheit vergleicht den gemessenen Wert mit einem vorgegebenen Referenzwert für die Pulswiederholrate. Um den Modenabstand zu verändern oder um ihn bei festgestellter Abweichung auf den vorgegebenen Referenzwert einzustellen, steuert der Stabilisator ein Stellglied an, das die optische Weglänge des Oszillators und damit die Pulswiederholrate ändert. Beispielsweise kann das Stellglied ein Linearantrieb oder ein Piezoaktuator für einen Resonatormirrorspiegel des Oszillators sein.

[0005] Ein zweiter Stabilisator regelt die Offset-Frequenz f_0 auf einen bestimmten Wert. Zu diesem Zweck wird z.B. eine bestimmte Mode f_n des Frequenzkamms auf einem Detektor (z.B. einer Photodiode oder einem Photomultiplier) entweder mit einer externen, exakt bekannten Referenzfrequenz (z.B. von einem Dauerstrich-Laser) oder mit einer frequenzkonvertierten zweiten Mode aus dem gleichen Frequenzkamm überlagert. Die Überlagerung erzeugt auf dem Detektor eine Schwebungsfrequenz im Radiofrequenzbereich. Eine Auswerte- und Vergleichseinheit vergleicht die Schwebungsfrequenz mit einer vorgegebenen, ggf. variabel einstellbaren Referenzfrequenz. Stellt sich dabei eine Abweichung heraus, steuert der zweite Stabilisator ein Stellglied, das die lineare Dispersion im Oszillator verändert. Geschehen kann dies beispielsweise, indem ein Resonatormirrorspiegel in einem von den Moden räumlich getrennt durchlaufenen Resonatorzweig leicht verkippt wird, um die optische Weglänge des Oszillators frequenzabhängig zu ändern. Alternativ könnte die Pumpleistung für den Oszillator verändert oder ein dispersives Element wie ein Prismenpaar oder eine transparente, kippbare Platte in den Strahlengang des Oszillators eingeführt und in seiner Lage verändert werden.

[0006] Mit den in der DE 199 11 193 A1, der EP 1 161 782 B1 oder der DE 100 44 404 C2 beschriebenen Mitteln wird insgesamt ein vollständig stabilisierter Frequenzkamm erzeugt, dessen einzelne Moden bei exakt bekannten Frequenzen liegen und zueinander kohärent sind. Hinsichtlich der detaillierten Beschreibung dieser Mittel wird auf die drei genannten Dokumente verwiesen. Besonders wichtig ist dabei die Kohärenz des Frequenzkamms. Anders ausgedrückt ergibt sich eine feste Phasenbeziehung zwischen den einzelnen Moden des Frequenzkamms. Dies ist z.B. bei der Verwendung von gütegeschalteten Lasern nicht gegeben. Weiter sind viele nichtlineare Prozesse insbesondere in Fasern bekannt, die zum Verlust der Kohärenzeigenschaften führen.

[0007] Der stabilisierte Frequenzkamm hat Eigenschaften, die eine Vielzahl einzigartiger Anwendungen ermöglichen. Da die Position seiner Moden im Frequenzraum absolut festgelegt ist, können einzelne Moden als Frequenzstandard oder zur exakten Messung einer unbekanntenen, externen optischen Frequenz dienen. Außerdem ist es möglich, einzelne oder auch mehrere Moden zur Spektroskopie zu verwenden.

[0008] Der Einsatzbereich des stabilisierten Frequenzkamms wird jedoch dadurch beschränkt, dass nur eine endliche Anzahl der Moden eine gewisse Mindest-Amplitude überschreitet. Welche Moden dies sind, hängt vom Lasermedium des Oszillators ab. Wird als Oszillator beispielsweise ein Faserlaser mit einer Erbium-dotierten Faser verwendet, liegt sei-

ne Ausgangswellenlänge bei etwa 1550 nm. Je kürzer die vom Oszillator abgegebenen Pulse, desto größer ist ihr Spektrum. Bei fs-Pulsen beträgt die Halbwertsbreite (FWHM) des Spektrums einige Nanometer bis einige 10nm oder sogar einige 100nm bei sub-10fs-Pulsen.

[0009] Äußerst interessant wäre es, einen stabilisierten Frequenzkamm mit seinen vollen Kohärenzeigenschaften nicht nur bei 1550 nm, sondern auch bei einer möglichst großen Bandbreite anderer Spektralbereiche mit hoher spektraler Leistungsdichte zur Verfügung zu haben, um auch in diesen anderen Spektralbereichen exakte Frequenzmessungen oder Spektroskopie durchführen zu können.

[0010] Verfahren, mit denen die Zentralwellenlänge kurzer Laserpulse verändert werden soll, sind aus der EP 1 118 904 A1 oder der US 6,014,249 bekannt. Allerdings bezieht sich keines dieser Dokumente auf einen Frequenzkamm. Würden bei den dort beschriebenen nichtlinearen Prozessen jedoch die Kohärenzeigenschaften des Kamms und/oder die Information über die Offset-Frequenz verloren gehen, wäre die Lage der Moden nicht mehr exakt bekannt, so dass der Frequenzkamm für hochgenaue Messungen wertlos würde. Die exakte Kenntnis der Lage einer Mode ist jedoch weder bei der EP 1 118 904 A1, noch bei der US 6,014,249 ein angestrebtes Ziel.

[0011] Vor Kurzem wurde ein erstes Verfahren zum Übertragen eines stabilisierten Frequenzkamms vom infraroten in den sichtbaren Spektralbereich vorgeschlagen. Dabei wird die Frequenz der aus dem Oszillator erhaltenen, stabilisierten Frequenzkamm-Moden in einem Verdoppler-Kristall verdoppelt und so die Zentralwellenlänge von 1560 nm auf 780 nm halbiert. Anschließend durchläuft der Frequenzkamm eine Photonische Kristallfaser (photonic crystal fibre, PCF, auch mikrostrukturierte Faser), die den Frequenzkamm auf über eine Oktave verbreitert. Der Kamm umfasst hinter der Faser also eine Frequenz f und auch die doppelte Frequenz $2f$. Bei der spektralen Verbreiterung sinkt jedoch die mittlere Leistung der Folge von Frequenzkämmen von zum Beispiel ca. 100 mW auf ca. 50 mW. Zudem verteilt sich diese geringere Leistung nun auf einen sehr breiten Spektralbereich von bis zu 400 oder 500 nm Breite. Die spektrale Leistungsdichte, d.h. die Leistung für eine einzelne Wellenlänge oder Frequenz, zeigt außerdem eine ausgeprägte Strukturierung und ist dabei an einigen Stellen so gering, dass eine Messung einer unbekanntem externen Referenzfrequenz nicht mehr möglich ist.

[0012] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein System vorzusehen, mit dem ein Frequenzkamm unter vollständigem Erhalt seiner Kohärenzeigenschaften und mit ausreichend hoher Leistung insbesondere durchstimmbare auf andere Frequenzen

übertragen werden kann.

[0013] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Lasersystem mit den Merkmalen des Anspruchs 1. Vorteilhaftige Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0014] Das erfindungsgemäße Lasersystem zeichnet sich gemäß Anspruch 1 dadurch aus, dass ein optischer Verstärker zum Verstärken des aus dem Frequenzkammgenerator ausgekoppelten Frequenzkamms vorgesehen ist, dass der Verstärkungsfaktor des Verstärkers variabel ist, und dass dem Verstärker ein Raman-Medium zum Erzeugen einer Raman-Verschiebung des Frequenzkamms nachgeordnet ist. Überraschenderweise hat sich bei entsprechenden Messungen herausgestellt, dass ein optischer Verstärker und ein Raman-Medium die Kohärenzeigenschaften des Frequenzkamms nicht negativ beeinflussen. Insbesondere hinsichtlich des Raman-Mediums konnte dies nicht erwartet werden, da es sich bei der Raman-Verschiebung um „inelastische“ Lichtstreuung handelt, bei der durchaus die Kohärenz der Moden oder die Information über die Offset-Frequenz hätten verloren gehen können, und es darüber hinaus in Fasern noch andere nichtlineare Effekte gibt, von denen bekannt ist, dass sie die Kohärenz zerstören, wie z.B. modulation instability oder Brillouin-Streuung.

[0015] Mit der Raman-Verschiebung schafft es das erfindungsgemäße Lasersystem, den Frequenzkamm auf andere Frequenzbereiche zu verschieben. Je nach Wahl und Konfiguration des Raman-Mediums kann es sich bei der Raman-Verschiebung um einen Stokes-Prozess handeln, bei dem die Moden des Kamms zu niedrigeren Frequenzen verschoben werden, oder um einen Anti-Stokes-Prozess, bei dem die Moden des Kamms zu höheren Frequenzen verschoben werden.

[0016] Ein großer Vorteil des erfindungsgemäßen Lasersystems liegt darin, dass es sich ggf. den „soliton self-frequency shift“ zu Nutze machen kann, der in „Discovery of the soliton self-frequency shift“, Mitschke und Mollenauer, Optics Letters Vol. 11 No. 10, 1986, beschrieben ist. Bei diesem Prozess ist das Ausmaß der Raman-Verschiebung proportional zu der Leistung der in das Raman-Medium eingestrahlten Laserpulse. Im erfindungsgemäßen System erlaubt der Verstärker eine Variation seines Verstärkungsfaktors. Je größer der Verstärkungsfaktor, desto größer ist die anschließende Raman-Verschiebung. Über den Verstärkungsfaktor des Verstärkers kann daher auf einfache Weise die Lage des Maximums des Frequenzkamms stufenlos verändert und sehr schnell und präzise eingestellt werden. Darüber hinaus hat der Verstärker den zusätzlichen Vorteil, dass die Leistung der zur Verfügung gestellten Strahlung zunimmt. Da die Frequenzverschiebung zudem

ohne eine enorme spektrale Verbreiterung wie in einer Photonischen Kristallfaser erfolgt, steht am Ausgang des Lasersystems ein Frequenzkamm mit einer sehr hohen spektralen Leistungsdichte zur Verfügung, die sich hervorragend für hochgenaue, äußerst rauscharme Frequenzmessungen eignet. Dies ist insbesondere vorteilhaft, wenn durchstimmbare cw-Laserquellen hochpräzise vermessen werden sollen.

[0017] In ersten Experimenten zur vorliegenden Erfindung wurde als Frequenzkammgenerator ein Diodenlaser-gepumpter Faserlaser mit einer Erbium-dotierten Faser und einer Ausgangswellenlänge bei etwa 1560 nm eingesetzt. Mit einem optischen Verstärker und einem sich daran anschließenden Raman-Medium konnte die Zentralwellenlänge des Frequenzkamms unter vollständigem Erhalt der Kohärenzeigenschaften von ca. 1550 nm bis hin zu 2,0 μm und sogar bis zu 2,2 μm verschoben werden, d.h. um mehr als 40%. Nach oben (also zu längeren Wellenlängen) wird das Ausmaß der Raman-Verschiebung offenbar nur durch die Transmission der verwendeten Optiken begrenzt, insbesondere der verwendeten Glasfasern.

[0018] Die Vorzüge des erfindungsgemäßen Lasersystems kommen besonders dann zur Geltung, wenn es wenigstens einen Stabilisator zum Stabilisieren des Frequenzkamms auf eine bestimmte Offset-Frequenz (f_0) und/oder einen bestimmten Modenabstand (Δf) aufweist, weil dann die Moden des Kamms absolut festgelegt und bekannt sind, und weil diese Kenntnis durch den vollständigen Erhalt der Kohärenz auch auf die Moden des spektral verschobenen Kamms übertragen wird.

[0019] Bevorzugt umfasst der optische Verstärker eine optisch gepumpte, mit Erbium und/oder Ytterbium dotierte optische Faser. Ein solcher Verstärker ist kompakt, robust und gut in seinem Verstärkungsfaktor regelbar.

[0020] Als Pumpquelle für den Verstärker kann ein (oder mehrere) Diodenlaser vorgesehen sein. Sie haben eine lange Lebensdauer und sind entsprechend wartungsarm.

[0021] Ist als Pumpquelle für den Verstärker ein Diodenlaser vorgesehen, kann der Verstärkungsfaktor des Verstärkers in einfacher Weise über die Stromstärke am Diodenlaser einstellbar sein. Die Einstellung des Verstärkungsfaktors kann dabei insbesondere stufenlos erfolgen.

[0022] In einer günstigen Variante der Erfindung ist mittels des Verstärkers bereits vor dem Raman-Medium eine erste Raman-Verschiebung des Frequenzkamms erzeugbar. Durch die zweifache Raman-Verschiebung (im Verstärker und im Ra-

man-Medium) kann das Ausmaß der gesamten Frequenzverschiebung vergrößert werden. Der Beitrag des Verstärkers zur Raman-Verschiebung kann dabei beispielsweise in der Größenordnung von 10 bis 30 nm liegen.

[0023] Vorzugsweise umfasst das Raman-Medium eine optische Faser, insbesondere eine polarisationserhaltende Faser. Die Faser hat den Vorteil, dass sie sich raumsparend im Lasersystem unterbringen lässt. Darüber hinaus ist die mit ihr erzeugte Raman-Verschiebung proportional zur Länge der Faser. Daher kann über die Länge der Faser eine Grobabstimmung der Raman-Verschiebung vorgenommen werden, während die Feinabstimmung anhand des Verstärkungsfaktors des Verstärkers erfolgt.

[0024] Besonders zweckmäßig ist es, wenn das Raman-Medium bzw. eine dafür verwendete optische Faser durch eine Spleißverbindung mit einer optischen Faser des Verstärkers verbunden ist. Da das Anspießen bereits vor dem Einbau der Elemente in das Lasersystem erfolgt, müssen der Verstärker und das Raman-Medium im Lasersystem nicht mehr zueinanderjustiert werden. Auch im Betrieb des Lasersystems können sie auf diese Weise nie ihre Ausrichtung relativ zueinander verlieren, so dass der Wartungsaufwand für das Lasersystem geringer wird.

[0025] Besondere Vorteile entfaltet das erfindungsgemäße Lasersystem in einer Variante, bei der dem Raman-Medium ein frequenzabhängiger Abschwächer nachgeordnet ist. Dies mag zunächst nachteilig erscheinen, da für die meisten Anwendungen eine möglichst hohe Ausgangsleistung gewollt ist. – Wie erläutert, kann im erfindungsgemäßen Lasersystem das Ausmaß der Raman-Verschiebung des Frequenzkamms über eine Variation der Verstärkerleistung verändert werden. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Ausgangsleistung des Systems um so höher ist, je größer die Zentralwellenlänge des Kamms ist. Für einige Anwendungen könnte es nun jedoch vorteilhaft sein, wenn die Ausgangsleistung des Lasersystems zumindest weitgehend unabhängig von der Zentralwellenlänge des Kamms wäre. Vor allem bei einer Untersuchung empfindlicher, z.B. biologischer Proben mit dem Frequenzkamm könnte die Probe nachteilig beeinflusst oder sogar zerstört werden, wenn die eingestrahelte Lichtleistung zu stark zunimmt. Auch in einem Anwendungsfall, bei dem die Zentralwellenlänge einmal oder mehrfach nacheinander rampenartig vergrößert oder verringert wird, d.h. bei einem „Scannen“ über das erfassbare Spektrum, kann ein ggf. periodisches Schwanken der Laserleistung unerwünscht sein.

[0026] Mit einem frequenzabhängigen Abschwächer kann eine Änderung der Ausgangsleistung unterdrückt werden. Vorteilhaft ist es dabei vor allem, wenn der Abschwächungsgrad des Abschwächers

zu niedrigeren Frequenzen hin zunimmt, und wenn darüber hinaus die Änderung der Abschwächung pro Frequenzintervall möglichst gut mit der Änderung der Laserleistung vor dem Abschwächer korreliert ist. Steigt beispielsweise die Laserleistung vor dem Abschwächer linear mit abnehmender Frequenz, wäre es günstig, wenn auch der Abschwächungsgrad des Abschwächers mit abnehmender Frequenz linear zunimmt. Auf diese Weise kann die Ausgangsleistung des Lasersystems stabilisiert werden.

[0027] Denkbar wäre es, dass der Abschwächer ein „aktives“ Element ist, dessen Abschwächungsgrad mittels eines Stellgliedes bei einer Änderung des Verstärkungsfaktors des Verstärkers synchron verändert wird. Allerdings ist dazu ein erheblicher Regelungsaufwand notwendig, und ohne eine sehr genaue Synchronisation sind Schwankungen in der Ausgangsleistung immer noch möglich. Besser ist es daher, wenn der Abschwächer ein „passives“ Element ist, d.h. ohne ein ansteuerbares Stellglied auskommt. Sein Abschwächungsverhalten sollte dann in Anpassung an den vorgeschalteten Verstärker bereits vorab so festgelegt sein, dass eine Änderung der Ausgangsleistung auf Grund einer Änderung des Verstärkungsfaktors und einer dadurch bedingten Frequenzverschiebung möglichst gut kompensiert wird. Auf diese Weise bleibt die Ausgangsleistung immer konstant, auch wenn der Frequenzkamm verschoben wird. Falls dies gewünscht wird, könnte der Abschwächer selbstverständlich auch so eingestellt werden, dass die Ausgangsleistung des Lasersystems nicht konstant bleibt, sondern sich mit einer festgelegten Rate pro Frequenzintervall der Raman-Verschiebung ändert.

[0028] Ein einfaches Ausführungsbeispiel für einen „passiven“ Abschwächer kann dadurch realisiert werden, dass der Abschwächer einen Spiegel umfasst, dessen Reflexions- oder Transmissionsgrad – je nach Ausrichtung des Spiegels – zu niedrigen Frequenzen hin zu- oder abnimmt. Es könnte sich dabei um einen entsprechend beschichteten, z.B. dichroitischen Spiegel handeln.

[0029] Ein anderes Ausführungsbeispiel für einen „passiven“ Abschwächer kann dadurch realisiert werden, dass der Abschwächer eine optische Faser umfasst, in der frequenzabhängige Verluste auftreten. Dieses Ausführungsbeispiel hat unter anderem den Vorteil, dass es sich noch einfacher herstellen lässt und dass die Justage vereinfacht wird.

[0030] Die frequenzabhängigen Verluste in der optischen Faser könnten dadurch erzeugt werden, dass in der Faser entsprechende Absorber eingelagert sind. Absorption hätte jedoch den Nachteil, dass die Temperatur der Faser zunehmen würde. Einfacher und besser ist eine Variante, bei der die Faser mit einem vergleichsweise kleinen Krümmungsradius ge-

wickelt angeordnet ist. In den Krümmungsbereichen werden höhere Frequenzkomponenten besser in der Faser geführt, während für niedrigere Frequenzkomponenten die Verluste zunehmen. Da die Verluste nicht über Absorption erzeugt werden, nimmt die Temperatur der Faser bei dieser Variante nicht zu.

[0031] Je nach der gewünschten Stärke der Abschwächung und nach der Charakteristik der Einheit von Verstärker und Raman-Medium könnte der Krümmungsradius der optischen Faser wenigstens abschnittsweise 15 bis 100 mm betragen, insbesondere 25 bis 40 mm. Die Länge der Faser könnte z.B. zwischen 0,5 und 50 Metern liegen.

[0032] Besonders günstig ist eine Ausführungsform, bei der der Abschwächungsgrad des Abschwächers pro Frequenzintervall veränderbar ist, um das Abschwächungsverhalten an andere Umgebungsbedingungen oder andere experimentelle Anforderungen anpassen zu können.

[0033] Beispielsweise könnte dazu der Krümmungsradius der optischen Faser variabel einstellbar sein. Realisiert werden könnte dies durch eine aus mehreren Zylindersegmenten zusammengesetzten, zylindrischen Spule, auf die die Faser aufgewickelt ist. Werden die Zylindersegmente radial bezüglich der Zylinderachse nach außen gefahren, vergrößert sich der Krümmungsradius der Faser. Werden umgekehrt die Zylindersegmente radial bezüglich der Zylinderachse nach innen gefahren, und steht die Faser gleichzeitig unter einer gewissen Vorspannung, so verringert sich der Krümmungsradius der Faser und die Änderung des Abschwächungsgrades pro Frequenzintervall nimmt zu. Eine andere Ausführungsform stellt das Einbringen eines kreisförmig aufgewickelten Fasersegmentes zwischen 2 Backen dar. Werden die Backen aufeinander zu gefahren, wird der Kreis zu einer Ellipse verformt, was mit einer streckenweisen Änderung des Biegungsradius einher geht.

[0034] Ist der Abschwächer durch eine optische Faser realisiert, so ist diese Faser vorzugsweise durch eine Spleißverbindung mit einer optischen Faser des Raman-Mediums verbunden. Da das Anspleißen bereits vor dem Einbau der Elemente in das Lasersystem erfolgt, müssen der Abschwächer und das Raman-Medium im Lasersystem nicht mehr zueinander justiert werden. Auch im Betrieb des Lasersystems können sie auf diese Weise nie ihre Ausrichtung relativ zueinander verlieren, so dass der Wartungsaufwand für das Lasersystem geringer wird. Besonders einfach und wartungsarm wird das Lasersystem, wenn sowohl der Verstärker und das Raman-Medium, als auch das Raman-Medium und der Abschwächer über Spleißverbindungen miteinander verbunden sind.

[0035] Um weitere Frequenzbereiche für den Frequenzkamm zu erschließen, könnte dem Raman-Medium und/oder ggf. dem Abschwächer eine Frequenzkonversionsstufe, z.B. ein Frequenzverdoppler, nachgeordnet sein. Mit seiner Hilfe könnte der Frequenzkamm auf eine Zentralwellenlänge zwischen ca. 800 und 1100 nm verschoben werden, wobei weiterhin alle Kohärenzeigenschaften des Kamms erhalten bleiben. Als Frequenzverdoppler eignen sich z.B. ein BBO-Kristall (Beta-Barium-Borat) oder ein periodisch gepolter Lithium-Niobat-Kristall (PPLN). Die Bereiche unterschiedlicher Polung Kristall (PPLN). Die Bereiche unterschiedlicher Polung können im Kristall in Form paralleler Schichten oder fächerförmig angeordnet sein.

[0036] Bevorzugte Werte für die Repetitionsrate des Frequenzkammgenerators betragen zwischen 80 und 500 MHz, vorzugsweise zwischen 150 und 300 MHz oder noch höher. Eine hohe Repetitionsrate, die sich mit einem „kurzen“ Resonator des Oszillators realisieren lässt, hat den Vorteil, dass der Modenabstand Δf groß wird und sich die einzelnen Moden spektral gut voneinander trennen lassen. Sie hat jedoch auch noch einen weiteren Vorteil. Bei Pulsenergien von 0.1 bis 0.2 Nanojoule (nJ) ist die Verstärkung im optischen Verstärker besonders effizient. Bei Pulsenergien von 1 bis 3 Nanojoule (nJ) ist die Ramanverschiebung besonders effizient. Eine hohe Repetitionsrate erlaubt es, unter Beibehaltung der moderaten Pulsenergien und somit einer effizienten Verstärkung und Verschiebung die mittlere Ausgangsleistung des Lasersystems zu erhöhen.

[0037] Neben dem Lasersystem an sich erfasst die Erfindung auch die Verwendung eines mit dem erfindungsgemäßen Lasersystem erzeugten Frequenzkamms zum Messen einer optischen Frequenz, zur Erzeugung optischer Referenzfrequenzen, als optisches Uhrwerk, sowie eine Verwendung des Frequenzkamms in der Telekommunikation oder in der Mikroskopie, insbesondere in der Fluoreszenzmikroskopie oder der Zweiphotonen-Mikroskopie.

[0038] Im Folgenden wird ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand einer Zeichnung näher erläutert. Im Einzelnen zeigen:

[0039] [Fig. 1](#) eine schematische Ansicht eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Lasersystems, und

[0040] [Fig. 2](#) eine Darstellung des Frequenzkamms an unterschiedlichen Stellen im erfindungsgemäßen Lasersystem.

[0041] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Ansicht eines erfindungsgemäßen Lasersystems **1**. Ausgangspunkt des Lasersystems **1** ist ein Frequenzkammgenerator **2** zum Erzeugen eines Frequenzkamms opti-

scher Frequenzen mit einer Offset-Frequenz f_0 und einer Vielzahl äquidistanter Moden $f_n = f_0 + n \Delta f$. Der Frequenzkammgenerator **2** oder Oszillator kann ein diodengepumpter Ultrakurzpuls-Faserlaser sein, z.B. ein Femtosekunden-Er⁺-Faserlaser mit einer Zentralwellenlänge von ca. 1550 nm. Die Repetitionsrate des Oszillators und damit der Modenabstand Δf kann z.B. auf etwa 100 MHz oder 200 MHz eingestellt sein. Der aus dem Frequenzkammgenerator **2** bei (a) ausgekoppelte Frequenzkamm ist schematisch in der ersten „Zeile“ in [Fig. 2](#) dargestellt. Er setzt sich zusammen aus den äquidistanten Moden, deren jeweilige Amplituden von einer Einhüllenden E bestimmt sind.

[0042] Ein Strahlteiler **3** teilt den Frequenzkamm in einen ersten Anteil, der später einem Ausgang **4** des Lasersystems **1** zugeführt werden soll, und einen zweiten Anteil, der einem oder mehreren Stabilisatoren **5** zugeführt wird. In der aus der DE 199 11 193 A1, der EP 1 161 782 B1 oder der DE 100 44 404 C2 bekannten Weise ist der Stabilisator **5** bzw. sind die Stabilisatoren **5** dazu eingerichtet, den Frequenzkamm auf eine bestimmte Offset-Frequenz f_0 und/oder einen bestimmten Modenabstand Δf zu stabilisieren, z.B. durch Vergleich mit einer externen, bekannten Referenzfrequenz. Dazu kann der Stabilisator **5** auch eine zusätzliche Verstärkung des optischen Signals und eine spektrale Verbreiterung in nichtlinearen Elementen auf eine optische Oktave enthalten, wie in DE 199 11 193 A1, EP 1 161 782 B1 und DE 100 44 404 C2 ausgeführt. Über ein oder mehrere Stellglieder **6** erfolgt eine Rückkopplung derart, dass der Frequenzkammgenerator **2** auf die gewünschte Offset-Frequenz f_0 und/oder den gewünschten Modenabstand Δf eingestellt wird. Zu Einzelheiten dieser absoluten Stabilisierung des Frequenzkamms wird auf die DE 199 11 193 A1, die EP 1 161 782 B1 und DE 100 44 404 C2 verwiesen.

[0043] Der für den Ausgang **4** des Lasersystems **1** bestimmte Anteil des Frequenzkamms tritt in einen optischen Verstärker **7** ein. Die Energie der einzelnen Laserpulse beträgt beim Eintritt in den Verstärker **7** etwa 0.1 nJ, weil bei solch einer Pulsenergie die Verstärkung besonders effizient ist. Bei einer Repetitionsrate von 100 MHz entspricht dies einer mittleren Laserleistung von 10 mW; bei einer Repetitionsrate von 200 MHz entspräche dies einer mittleren Laserleistung von 20 mW.

[0044] Als Verstärker **7** wird vorzugsweise eine durch einen Diodenlaser (nicht dargestellt) optisch gepumpte, mit Erbium- und/oder Ytterbium-Ionen dotierte optische Faser verwendet. Der Verstärkungsfaktor, um den die Amplituden des Frequenzkamms verstärkt werden, ist variabel einstellbar, indem die an dem oder den Diodenlasern angelegte Stromstärke verändert wird. Die Faser des Verstärkers **7** erzeugt eine erste Stokes-Raman-Verschiebung des

Frequenzkamms in der Größenordnung von 10 bis 20 nm.

[0045] Nach dem Verstärker **7** durchlaufen die Frequenzkämme ein Raman-Medium **8**, bei dem es sich um eine an die Faser des Verstärkers **7** angespleißte, polarisationserhaltende Faser handeln kann. Das Raman-Medium **8** erzeugt eine starke Stokes-Raman-Verschiebung des Frequenzkamms in der Größenordnung von 40 bis 600 nm, d.h. bis zu Wellenlängen von 2,0 μm oder sogar 2,2 μm . In der polarisationserhaltenden Faser bildet sich nach kurzer Wegstrecke ein Soliton. Der „self-frequency shift“ im Raman-Medium **8** führt zu einer Frequenzverschiebung des Solitons. Sie ist um so größer, je länger die Wegstrecke im Raman-Medium **8** ist und je höher die Amplituden des das Raman-Medium **8** durchlaufenden Frequenzkamms sind. Daher kann über die Länge der Faser eine Grobabstimmung der erzeugten Raman-Verschiebung vorgenommen werden, während die Feinabstimmung anhand des Verstärkungsfaktors des Verstärkers **7** erfolgt. Eine variable Abstimmung durch Verändern des Verstärkungsfaktors (z.B. mittels der Pumpleistung am Verstärker **7**) ist dabei über mehrere 100 nm möglich.

[0046] An dieser Stelle, d.h. unmittelbar hinter dem Raman-Medium **8**, könnte der verschobene, aber immer noch auf die ursprüngliche Offset-Frequenz f_0 und/oder den ursprünglichen Modenabstand Δf stabilisierte Frequenzkamm direkt einem Ausgang **4'** des Lasersystems **1** zugeführt werden. Damit steht ein Lasersystem **1** zur Verfügung, das im Frequenzraum durchstimmbare, stabilisierte Frequenzkämme erzeugen kann, deren Zentralwellenlängen bei vollem Erhalt der Kohärenz zwischen 1550 nm und 2,2 μm variabel sind.

[0047] In dem in [Fig. 1](#) dargestellten, bevorzugten Ausführungsbeispiel schließt sich an das Raman-Medium **8** jedoch ein (optionaler) Abschwächer **9** an, dessen Abschwächungsgrad frequenzabhängig ist und zu niedrigeren Frequenzen hin zunimmt. Im bevorzugten Ausführungsbeispiel handelt es sich beim Abschwächer **9** um eine an die Faser des Raman-Mediums **8** angespleißte optische Faser, die mit vergleichsweise kleinem Krümmungsradius von ca. 3 cm auf eine Spule aufgewickelt ist. Je niedriger die Frequenz einer Mode, desto höher sind ihre Verluste im Abschwächer **9**. Der frequenzabhängige Abschwächungsgrad des Abschwächers **9** ist über die Faserkrümmung genau so eingestellt, dass eine Raman-Verschiebung hervorrufoende Leistungssteigerung möglichst genau kompensiert wird, so dass unabhängig vom Ausmaß der Raman-Verschiebung hinter dem Abschwächer **9** stets eine konstante mittlere Leistung zur Verfügung steht. Durch eine kontinuierliche Änderung des Verstärkungsfaktors im Verstärker **7** könnte nun ein Frequenz-Scan durchgeführt werden, ohne dass sich die Ausgangsleistung

des Lasersystems **1** ändern würde.

[0048] Als weiteres optionales Element kann im Lasersystem **1** ein als Frequenzkonversionsstufe ein Frequenzverdoppler **10** vorgesehen sein, durch den die Moden des Frequenzkamms frequenzverdoppelt werden. Der Verdoppler **10** kann mit oder ohne einen vorgeschalteten Abschwächer **9** vorgesehen werden. Beim Verdoppler kann es sich um einen BBO- oder einen PPLN-Kristall handeln, mit dem die Zentralwellenlänge der den Frequenzkamm bildenden Laserpulse in Abhängigkeit von der vorangegangenen Raman-Verschiebung auf ca. 800 nm bis 1100 nm halbiert wird. Bei der Frequenzverdopplung verdoppelt sich auch die Offset-Frequenz von f_0 auf $2f_0$. Eine rechnerisch zu erwartende Verdopplung des Modenabstands Δf tritt hingegen nicht auf; vielmehr bleiben der Modenabstand und damit gleichbedeutend auch die Repetitionsrate erhalten; die entsprechenden Moden des neuen Frequenzkamms werden durch Summenfrequenzbildung aus den Moden des ursprünglichen gebildet. Wenn der ursprüngliche Frequenzkamm auf eine Offset-Frequenz von f_0 stabilisiert war, ist der frequenzverdoppelte Kamm automatisch auf eine Offset-Frequenz von $2f_0$ stabilisiert, d.h. die Frequenzstabilität und damit die Kohärenz selbst gehen nicht verloren.

[0049] In diesem Fall kann besonders vorteilhaft der Abschwächer **9** so angepasst werden, dass er eine sich mit der Frequenz ändernde Effizienz der Harmonischengenerierung ausgleicht.

[0050] Des weiteren kann eine zweite Frequenzverdopplungsstufe vorgesehen werden, für die sinngemäß das gleiche gilt wie für die erste Stufe **10**. Alternativ kann auch eine andere Frequenzkonversionsstufe vorgesehen werden, die z.B. auf Summen- oder Differenzfrequenzerzeugung beruht.

[0051] Am Ausgang **4** des Lasersystems **1** steht nun ein zu längeren Wellenlängen oder (nach Frequenzverdopplung) in den sichtbaren oder nahinfraroten Spektralbereich verschobener Frequenzkamm zur Verfügung, der genau so kohärent und frequenzstabilisiert ist wie der im Frequenzgenerator erzeugte, ursprüngliche Frequenzkamm. Durch das Erschließen weiterer, neuer Spektralbereiche eröffnet das erfindungsgemäße Lasersystem **1** eine Vielzahl neuer Anwendungen. Die Strahlung am Ausgang **4** des Lasersystems kann mittels geeigneter Detektoren überwacht werden, beispielsweise mit Photodioden oder Photomultipliern **11**, einem Leistungsmesser oder einem (Gitter-)Spektrometer. Denkbar wäre auch eine Rückkopplung an den Frequenzkammgenerator **2** über einen geeigneten Regelkreis.

[0052] Die Verlagerung des Frequenzkamms ist in [Fig. 2](#) schematisch dargestellt. [Fig. 1](#) gibt an, an welchen Stellen im Lasersystem **1** die in [Fig. 2](#) darge-

stellten Frequenzkämme auftreten. – Die erste „Zeile“ in [Fig. 2](#) zeigt den aus dem Frequenzkammgenerator **2** bei (a) ausgekoppelten Frequenzkamm, der sich aus den äquidistanten Moden $f_n = f_0 + n \Delta f$ zusammensetzt, deren jeweilige Amplituden von einer Einhüllenden E bestimmt sind. Die höchste Amplitude hat der Kamm bei einer „Zentralfrequenz f_z “, die der Zentralwellenlänge (z.B. 1550 nm) entspricht.

[0053] Bei einem ersten, niedrigen Verstärkungsfaktor des Verstärkers **7**, der Situation (b), wird das Maximum der Einhüllenden E mittels des Raman-Mediums **8** zu einer niedrigeren Frequenz f_{R1} verschoben, wobei jedoch die Offset-Frequenz f_0 und der Modenabstand Δf erhalten bleiben. Bei einem größeren Verstärkungsfaktor, der strichliert dargestellten Situation (b'), vergrößert sich auch der Betrag der Raman-Verschiebung, so dass das Maximum der Einhüllenden E zu einer noch niedrigeren Frequenz f_{R2} verschoben wird. Wegen des größeren Verstärkungsfaktors erhöht sich jedoch gleichzeitig auch die Amplitude der Einhüllenden E .

[0054] Ist im Lasersystem **1** ein Abschwächer **9** vorhanden und ist sein frequenzabhängiger Abschwächungsgrad so eingestellt, dass ein zum Zweck einer größeren Raman-Verschiebung erzeugter Intensitätszuwachs gerade kompensiert wird, hat der Frequenzkamm nach dem Abschwächer die mit (b'') bezeichnete Einhüllende. Ihr Maximum nimmt diese neue Einhüllende ebenfalls etwa bei der Frequenz f_{R2} an, aber die Amplitude stimmt mit der Situation (b) bei geringerem Verstärkungsfaktor überein. Durch das aufeinander abgestimmte Zusammenspiel von Verstärker **1**, Raman-Medium **8** und Abschwächer **9** gelingt es also, den Frequenzkamm unter Beibehaltung seiner Amplitude durchstimmbare über einen ggf. weiten Frequenzbereich zu verschieben, d.h. unter Beibehaltung einer konstanten mittleren Laserleistung.

[0055] Verfügt das Lasersystem noch über einen Verdoppler **10**, wird der Frequenzkamm bzw. die Einhüllende je nach eingestelltem Verstärkungsfaktor des Verstärkers **7** zu einer neuen, höheren Zentralfrequenz $2f_{R1}$ bzw. $2f_{R2}$ verschoben. Diese Situation (c), die am Ausgang Abschwächer **9** oder Verdoppler **10** realisiert werden, oder auch nur mit einem dieser Elemente. Als Frequenzkammgenerator können andere, an sich bekannte Kurzpuls- oder Ultrakurzpuls-laser eingesetzt werden, z.B. ein Kerr-Linsenmodengekoppelter Titan-Saphir-Laser. Zudem kann wahlweise kein Stabilisator, ein oder auch mehrere Stabilisatoren **5** zum Stabilisieren der Freiheitsgrade des erzeugten Frequenzkamms vorgesehen sein. Für den optischen Verstärker **7** und das Raman-Medium **8** können ebenfalls eine Vielzahl geeigneter Elemente verwendet werden. Der Verstärker **7** sollte über Bedienelemente verfügen, mit denen der Verstärkungsfaktor manuell oder elektronisch verändert werden kann. Falls das Lasersystem **1** für eine be-

stimmte Anwendung konzipiert ist, bei der nur eine einzige, vorbestimmte Lage des Frequenzkamms benötigt wird, könnte der Verstärker **7** auch auf einen festen Verstärkungsfaktor fixiert sein, bei dem stets die gewünschte Raman-Verschiebung erzeugt wird. Der Verstärkungsfaktor wäre dann also nicht mehr variabel. Denkbar wäre es eventuell auch, eine Mode des am Ausgang **4** des Lasersystems **1** frequenzverdoppelten Kamms zum Zweck der Stabilisierung des Frequenzkammgenerators **2** in den Stabilisator **5** zu führen.

[0056] Ausgestaltungen sehen vor, dass das Band an der unteren Biegerolle über die gesamte Breite an dem Mittenbereich der unteren Biegerolle anliegen, die Außenkanten des Bandes mit der Kante des kegeligen Bereiches überlagern oder sich das Band nach außen über den kegeligen Bereich hinaus erstreckt und somit keinen Kontakt zur unteren Biegerolle aufweist.

[0057] Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

[0058] Der Erfindung liegt weiterhin die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren anzugeben, damit die oben genannten Nachteile vermieden und die Zeitabstände zum Wechsel der Biegerollen verlängert werden.

[0059] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass bei einem Verfahren zur Einstellung der erfindungsgemäßen Vorrichtung die obere Auslaufbiegerolle auf der unteren Biegerolle unter einer bestimmten Anpresskraft in Kontakt gebracht und der Biegespalt zu Null kalibriert wird, unter Verwendung des Coilbox-Elastizitätsmoduls.

[0060] Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

A.: Schliff der Biegerollen ändern

[0061] Die untere Biegerolle, die obere Einlaufbiegerolle und die obere Auslaufbiegerolle erhalten einen von der bekannten zylindrischen abweichende Schliffform.

B.: Spezielle Kalibrierung der Biegerollen/des Biegespaltes

[0062] Der Biegespalt, d.h. der Spalt zwischen oberer Auslaufbiegerolle und unterer Biegerolle, muss in Abhängigkeit der Banddicke eingestellt werden. Die Biegespalt.

Patentansprüche

1. Lasersystem (**1**) mit einem Frequenzkammgenerator (**2**) zum Erzeugen eines Frequenzkamms optischer Frequenzen mit einer Offset-Frequenz (f_0) und

einer Vielzahl äquidistanter Moden (f_n), **dadurch gekennzeichnet**, dass ein optischer Verstärker (7) zum Verstärken des aus dem Frequenzkammgenerator (2) ausgekoppelten Frequenzkammes vorgesehen ist, dass der Verstärkungsfaktor des Verstärkers (7) variabel ist, und dass dem Verstärker (7) ein Raman-Medium (8) zum Erzeugen einer Raman-Verschiebung des Frequenzkammes nachgeordnet ist.

2. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Lasersystem (1) ferner wenigstens einen Stabilisator (5) zum Stabilisieren des Frequenzkammes auf eine bestimmte Offset-Frequenz (f_0) und/oder einen bestimmten Modenabstand (Δf) aufweist.

3. Lasersystem nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Verstärker (7) eine optisch gepumpte, mit Erbium- und/oder Ytterbium dotierte optische Faser umfasst.

4. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als Pumpquelle für den Verstärker (7) ein Diodenlaser vorgesehen ist.

5. Lasersystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Verstärkungsfaktor des Verstärkers (7) über die Stromstärke am Diodenlaser einstellbar ist.

6. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mittels des Verstärkers (7) bereits vor dem Raman-Medium (8) eine erste Raman-Verschiebung des Frequenzkammes erzeugbar ist.

7. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Raman-Medium (8) eine optische Faser umfasst, insbesondere eine polarisationserhaltende Faser.

8. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Raman-Medium durch eine Spleißverbindung mit einer optischen Faser des Verstärkers (7) verbunden ist.

9. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass dem Raman-Medium (8) ein frequenzabhängiger Abschwächer (9) nachgeordnet ist.

10. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Abschwächungsgrad des Abschwächers (9) zu niedrigeren Frequenzen hin zunimmt, insbesondere mit einer linearen Zunahme.

11. Lasersystem nach einem der Ansprüche 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Ab-

schwächer (9) ein passives Element ist.

12. Lasersystem nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Abschwächer (9) einen Spiegel umfasst, dessen Reflexionsgrad zu niedrigen Frequenzen hin zu- oder abnimmt.

13. Lasersystem nach einem der Ansprüche 9 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Abschwächer (9) einen Spiegel umfasst, dessen Transmissionsgrad zu niedrigen Frequenzen hin zu- oder abnimmt.

14. Lasersystem nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Abschwächer (9) eine optische Faser umfasst.

15. Lasersystem nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Faser gekrümmt oder gewickelt angeordnet ist.

16. Lasersystem nach einem der Ansprüche 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Krümmungsradius der optischen Faser wenigstens abschnittsweise 15 bis 100 mm beträgt, insbesondere 25 bis 40 mm.

17. Lasersystem nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass der Abschwächungsgrad des Abschwächers (9) pro Frequenzintervall veränderbar ist.

18. Lasersystem nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Krümmungsradius der optischen Faser variabel einstellbar ist.

19. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Faser des Abschwächers (9) durch eine Spleißverbindung mit einer optischen Faser des Raman-Mediums (8) verbunden ist.

20. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass dem Raman-Medium (8) und/oder dem Abschwächer (9) eine Frequenzkonversionsstufe (10) nachgeordnet ist.

21. Lasersystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Repetitionsrate des Frequenzkammgenerators (2) zwischen 80 und 500 MHz beträgt, vorzugsweise zwischen 150 und 300 MHz.

22. Verwendung eines mit einem Lasersystem (1) nach einem der vorangehenden Ansprüche erzeugten Frequenzkammes zum Messen einer optischen Frequenz.

23. Verwendung eines mit einem Lasersystem

(1) nach einem der Ansprüche 1 bis 21 erzeugten Frequenzkammes zum Erzeugen einer optischen Referenzfrequenz.

24. Verwendung eines mit einem Lasersystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 21 erzeugten Frequenzkammes als Uhrwerk in einer optischen Uhr.

25. Verwendung eines mit einem Lasersystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 21 erzeugten Frequenzkammes zum Vergleich zweier optischer Frequenzen.

26. Verwendung eines mit einem Lasersystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 21 erzeugten Frequenzkammes in der Telekommunikation.

27. Verwendung eines mit einem Lasersystem (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 21 erzeugten Frequenzkammes in der Mikroskopie, insbesondere in der Fluoreszenzmikroskopie oder der Zweiphotonen-Mikroskopie.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

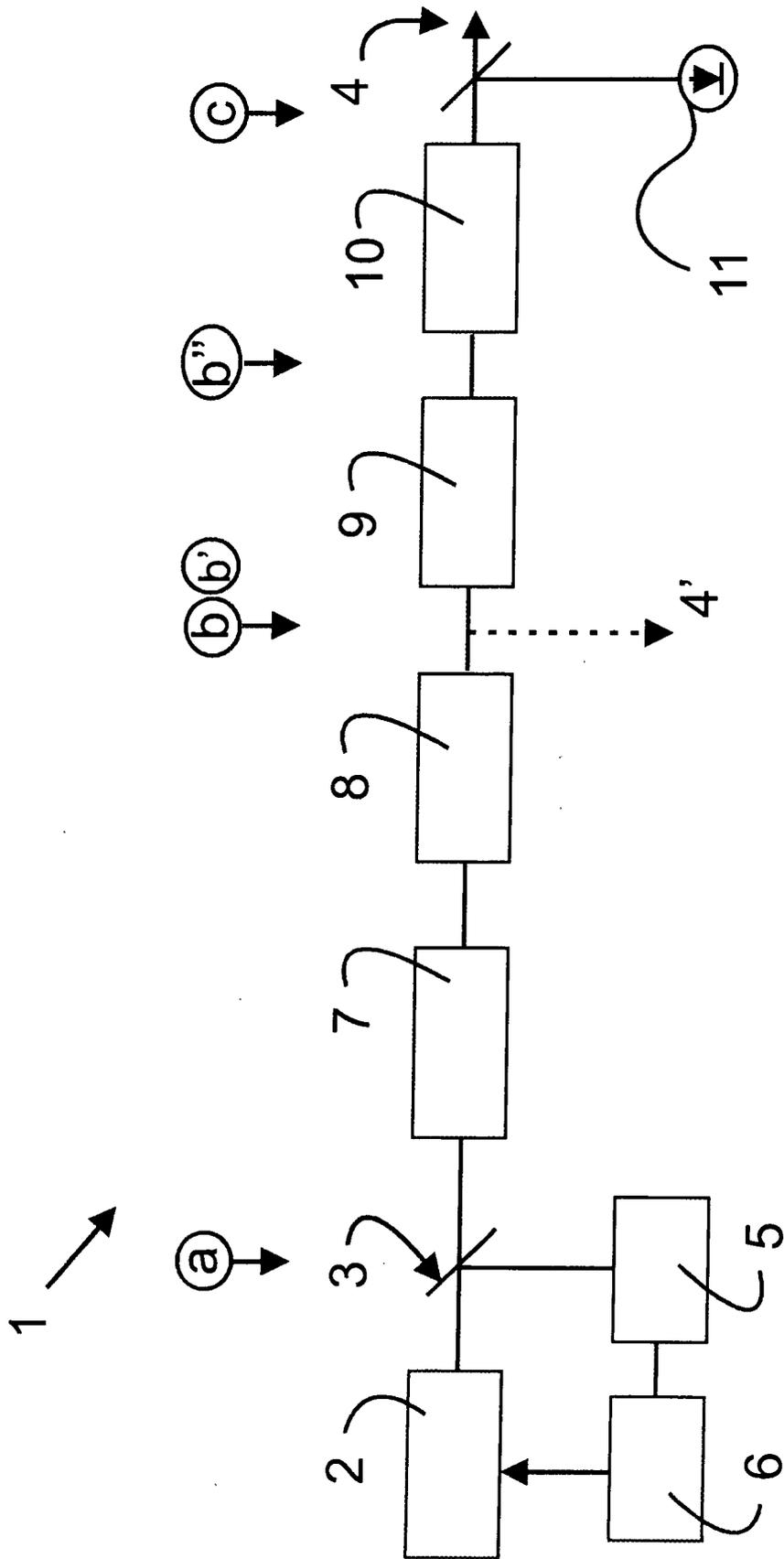


Fig. 1

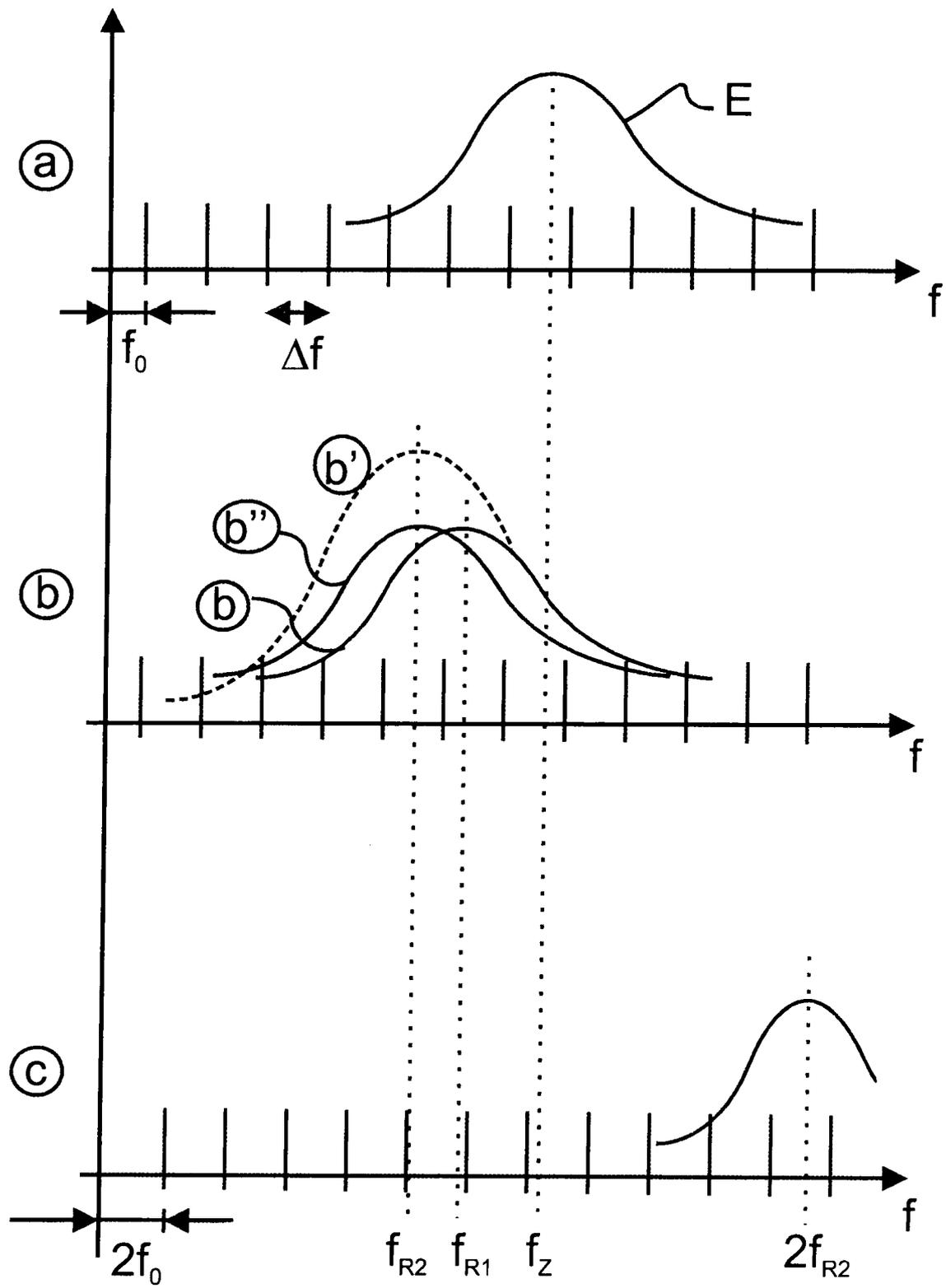


Fig. 2