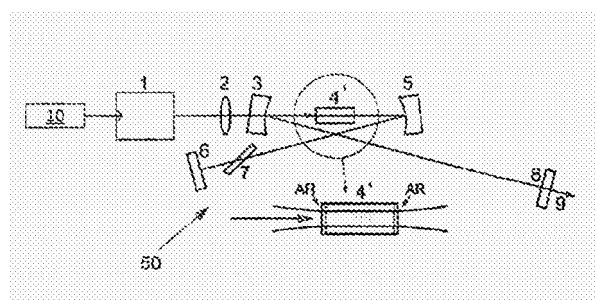


**(11) CH 711 206 B1**

(51) Int. Cl.: **H01S** 3/109 (2006.01)  
**H01S** 3/098 (2006.01)  
**H01S** 3/08 (2006.01)  
**H01S** 3/16 (2006.01)

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTSCHRIFT



## Beschreibung

### Gebiet der Offenbarung

**[0001]** Diese Offenbarung betrifft selbststartende Kerr-Linsen-modengekoppelte Festkörperlaser im Mittel-IR.

**[0002]** Insbesondere betrifft die Offenbarung einen Kerr-Linsen-modengekoppelten Laser, der betriebsfähig ist, Pikosekunden- und Femtosekundenpulse über einen Spektralbereich von 1,8–8  $\mu\text{m}$  zu emittieren und der mit einem normal geschnittenen Gain-Medium konfiguriert ist, das aus polykristallinen Materialien aus Gruppe II-VI, die mit Übergangsmetallionen dotiert sind, ausgewählt ist.

### Stand der Technik

**[0003]** Gepulste Laser werden für Anwendungen in verschiedenen Gebieten verwendet, wie etwa optische Signalverarbeitung, Laserchirurgie, Biomedizin, optische Diagnostik, Zwei-Photon-Mikroskopie, optisches Abtasten, optische Reflektometrie, Materialverarbeitung usw. Es gibt drei Hauptklassen von gepulsten Lasern, namentlich gütegeschaltete Laser, Gain-geschaltete Laser und modengekoppelte Laser, wobei die Letzteren von besonderem Interesse für diese Offenbarung sind.

**[0004]** Der modengekoppelte Laser weist mehrere Longitudinalmoden auf, die mit ihren jeweiligen Phasen miteinander gekoppelt gleichzeitig oszillieren, was das Erzeugen von gleichmässig beabstandeten kurzen und ultrakurzen Pulsen ermöglicht. Die feste Phasenbeziehung wird durch einen Modenkopplungsmechanismus hergestellt, der in der Lage ist, die Phasen der Lasermode zu synchronisieren, so dass die Phasendifferenzen zwischen allen Lasermode konstant verbleiben. Diese optisch phasengekoppelten Moden interferieren miteinander, so dass sie kurze optische Pulse bilden.

**[0005]** Ein Kerr-Linsen-Verfahren (Kerr-Fokussierung, Selbstfokussierung), ferner als Kerr-Linsen-Modenkopplung (KLM – Kerr-Lens Mode-locking) bezeichnet, ist einer der ultraschnellen Modenkopplungsmechanismen, die auf Phänomenen basieren, die für Materialien der Gruppen II–VI und andere optische Materialien (z.B. Ti-S), die mit Übergangsmetallionen dotiert sind, intrinsisch sind. Die KLM ist ein Mechanismus, in dem ein Puls, der in einer Laserkavität, die ein Gain-Medium und ein Kerr-Medium enthält, aufgebaut wird, nicht nur Selbstphasenmodulation, sondern auch Selbstfokussierung erfährt. Während die KLM ein nicht sättigbarer Absorber ist, geben die nichtlinearen optischen Eigenschaften, wie etwa der Kerr-Effekt, einen künstlichen «sättigbarer-Absorber»-Effekt, der eine Reaktionszeit aufweist, die viel schneller ist als ein beliebiger intrinsischer sättigbarer Absorber.

**[0006]** Typischerweise beinhaltet das in den KLM-basierten Lasern verwendete Gain-Medium Titan:Saphir Ti:S, das ausserordentlich gute thermisch-optische Eigenschaften aufweist. Bekannterweise überwiegen die Einfachheit und die Vorteile des Resonators mit Brewster-montiertem Gain-Medium, wie etwa meistens für Ti:S, die Nachteile, die mit seiner Montierung einhergehen.

**[0007]** Im Gegensatz zu dem standardmässigen Ti:S-Einkristallmedium bieten übergangsmetall-dotierte (Übergangsmetall: TM – Transition Metal) II-VI-Materialien in der Form von Einkristallen und insbesondere Polykristallen einzigartige Möglichkeiten zur Erzeugung von ultrakurzen Laserpulsen im Mittel-IR-Bereich (2–8  $\mu\text{m}$ ), was zu dem Umfang von Ti:S (0,7–1,1  $\mu\text{m}$ ) ergänzend ist. Nichtbeschränkende Beispiele von geeigneten kristallinen Materialien, die in einem Mittel-IR-Wellenlängenbereich arbeiten, können Zinkselenid («ZnSe»), Zinksulfid («ZnS»), CdZnSe, CdZnTe und viele andere beinhalten, die eine Bandbreite aufzeigen, die den Spektralbereich von 1,8–8 Mikrometer selektiv abdeckt.

**[0008]** Aus verschiedenen Gründen haben jene Materialien schlechte thermisch-optische Eigenschaften und zeigen eine starke Ungleichmässigkeit der thermisch-optischen Effekte, wenn sie in einer Brewster-Konfiguration platziert sind. Als Ergebnis überschreitet die Ausgabeleistung der TM:II-VI-Laser mit Brewster-Montierung nicht einige Watt. Weiterhin ist die Effizienz eines solchen Lasers aufgrund der Notwendigkeit, ein relativ dünnes Gain-Medium mit relativ geringer Pumpabsorption zu verwenden, begrenzt.

**[0009]** Fig. 1 zeigt ein funktionierendes Beispiel für eines von möglichen Schaubildern eines polykristallinen  $\text{Cr}^{2+}$ :ZnSe/ZnS-KLM-Lasers. Die Ausgabe eines linear polarisierten Er-dotierten Faserverstärkers (EDFA – Er-Doped Fiber Amplifier), der von einem schmalbandigen 1550-nm-Halbleiterlaser mit geringem Rauschen «geseedet» wird, wird in einen standardmässigen astigmatismuskorrigierten asymmetrischen Z-förmigen Resonator eingekoppelt, der aus zwei gekrümmten hochreflektierenden (HR) Spiegeln, einem ebenen HR-Spiegel und einem ebenen Ausgabeauskoppler (OC – Output Coupler,  $R = 99\%$ ) besteht. Astigmatismus bedeutet, dass sich der Strahlfokus für sagittale (die Ebene senkrecht zu der Hauptebene der Kavität) und tangential (d.h. parallel zur Hauptebene) Ebenen nicht bei der gleichen Position befinden. Ausserdem sind die Stabilitätsbereiche der Kavität für verschiedene Ebenen unterschiedlich und die Ausgabe ist elliptisch. Diese Phänomene erfordern eine Kompensation.

**[0010]** In der Vorrichtung aus Fig. 1 beträgt die Länge der Laserkavität etwa 94 cm. Das KLM-Regime wird unter Verwendung von zwei Arten des Laser(Gain)-Mediums erhalten: polykristallines  $\text{Cr}^{2+}$ :ZnS (2,0 mm dick, 43% Niedersignaltransmission bei 1550 nm) und polykristallines  $\text{Cr}^{2+}$ :ZnSe (2,4 mm dick, 15% Transmission). Gain-Elemente sind planparallel poliert, nichtbeschichtet und auf einen Kupferkühlkörper ohne erzwungene Kühlung Brewster-montiert. Damit eine optische Kavität einen Puls aufrechterhalten kann, müssen die zeitliche Form und die Pulsdauer stabil verbleiben, während er durch die Kavität zirkuliert. Als Ergebnis wird der Puls aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex de-

formiert, während er sie durchläuft, und benötigt Kompensation. Während die in der gezeigten Konfiguration verwendeten Kavitätsspiegel nichtdispersiv sind, sind das Gain-Medium und andere wahlweise Komponenten dispersiv. Die Dispersionskompensation ist unter Verwendung einer Kombination von einer Brewster-montierten Quarzplatte (2 mm dick) und einer YAG-Platte (4 mm dick) implementiert. Die Gruppenlaufzeitdispersion des Resonators beträgt bei 2400 nm, nahe der zentralen Laserwellenlänge, etwa  $-1000 \text{ fs}^2$ .

**[0011]** Der Laser wird für eine maximale CW-Ausgabeleistung optimiert und dann wird der Abstand zwischen den gekrümmten Spiegeln feinjustiert, so dass ein KLM-Regime erhalten wird. Die modengekoppelte Laseroszillation wird durch die OC-Translation initiiert.

**[0012]** Mehrstündige ununterbrochene Ein-Puls-Oszillationen werden in  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  bei 1 W Pumpleistung und 60 mW Laserausgabeleistung beobachtet. Weitere Erhöhung der Pumpleistung führt zu Mehrfachpulsen und häufigen Unterbrechungen der Modenkopplung. Maximale Stabilität des  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -KLM-Lasers wird bei 1,25 W Pumpleistung und 30 mW Ausgabelleistung erreicht (1–2 Stunden von ununterbrochenen Ein-Puls-Oszillationen).

**[0013]** Fig. 2 vergleicht die Emissionsspektren und Autokorrelationsspuren, die für  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ - und  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -Laser in dem KLM-Regime erhalten wurden. Die Messungen wurden für Ein-Puls-Oszillationen mit einer Pulswiederholrate von 160 MHz ausgeführt. Die Ausgabe des  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ -Lasers ist durch eine  $\text{sech}^2$ -Transformation beschränkt: eine Pulsdauer von 125 fs wurde von einer Autokorrelationsspur unter Annahme eines  $\text{sech}^2$ -Profils abgeleitet und eine Pulsdauer von 126 fs wurde aus dem Emissionsspektrum unter einer Annahme für das Zeit-Bandbreiten-Produkt von  $\Delta t \Delta \nu = 0,315$  berechnet. Andererseits enthüllt die Form der Autokorrelationsspur für einen  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -Laser Pulse mit Chirp. Ein Emissionsspektrum des Lasers ist verzerrt und daher ist das Zeit-Bandbreite-Produkt erhöht. Die Pulsdauer eines  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -Lasers wird grob auf innerhalb eines Bereichs von 100–130 fs liegend geschätzt.

**[0014]** Fig. 3 veranschaulicht eine eher vereinfachte Kavitätsgestaltung des bekannten KLM-Lasers. Speziell emittiert eine optische Pumpquelle 1, die von einem Seed-Laser 10 gepumpt wird, den (in Grün gezeigten) Pumpstrahl, der während der Propagation durch ein System von pumpstrahlfokussierenden und -formenden optischen Elementen 2, das Linsen und Spiegel beinhalten kann, fokussiert wird. Der fokussierte und geformte Strahl wird dann durch einen konkaven dielektrisch beschichteten Umlenkspiegel 3 mit hohem Reflexionsgrad bei einer Laserwellenlänge und hoher Transmission bei einer Pumpwellenlänge in die optische Kavität eingekoppelt. Nachdem er weiter durch ein Gain-Medium 4 propagiert, trifft ein (in Rot gezeigter) Laserstrahl mit einer gewünschten Wellenlänge auf einen konkaven dielektrisch beschichteten Umlenkspiegel 5 mit hohem Reflexionsgrad bei einer Laserwellenlänge und optional hoher Transmission bei einer Pumpwellenlänge auf. Von Spiegel 5 reflektiert, fällt der Laserstrahl auf einen ebenen Spiegel 6 mit hohem Reflexionsgrad bei der Laserwellenlänge, der dielektrisch oder metallbeschichtet ist, ein. Optional befindet sich eine Dispersionskompensationskomponente 7, wie etwa eine planparallele Platte, die in dem Laserresonator im Brewster-Winkel montiert ist, in dem Kavitätsarm zwischen Spiegel 5 und 6. Nach einer Rückreflexion von Spiegel 6 fällt der Laserstrahl auf Spiegel 5 ein und propagiert durch Gain-Medium 4, um auf Spiegel 3 aufzutreffen. Schliesslich wird der Laserstrahl aus der Kavität durch einen Ausgabekoppler «OC» (Output Coupler) 8 als ein Ausgabestrahls 9 ausgekoppelt. Der Pfad des Laserstrahls ist in Rot gezeigt, während der Pumpstrahl grün ist.

**[0015]** Die Brewster-Montierung des Gain-Mediums, wie in Fig. 1 und 3 gezeigt, wird in den KLM-Lasern überwiegend aufgrund ihrer mehreren Vorteile verwendet. Erstens wird Licht mit einer bestimmten p-Polarisation bei einem Brewster-Einfallswinkel durch eine Oberfläche perfekt ohne Reflexion transmittiert, was dementsprechend spezielle und teure Antireflexionsbeschichtungen unnötig macht. Zweitens fungiert das Gain-Medium als ein Polarisator, was die Verwendung von zusätzlichen Polarisatoren unnötig macht. Drittens ermöglicht die Brewster-Montierung des Gain-Elements und eine spezielle Wahl der Resonatorparameter eine Kompensation des Astigmatismus des Laserstrahls, der innerhalb des Resonators propagiert, und des Ausgabestrahls (Astigmatismus wird durch nichtnormalen Einfall von Licht auf gekrümmte Spiegeloberflächen verursacht). Der Astigmatismus des Resonators kann die Leistungsfähigkeit des Lasers reduzieren (z.B. die Qualität des Ausgabestrahls). In manchen störungsanfälligen Situationen, wie etwa Kerr-Linsen-Modenkopplung, kann der Astigmatismus sogar den korrekten Laserbetrieb behindern.

**[0016]** Die Brewster-Montierung des Gain-Mediums ist jedoch nicht ohne Nachteile. Wie in Fig. 3A veranschaulicht, beinhaltet die Brewster-Montierungsanordnung eine starke Ungleichmässigkeit des Laser- und Pumpstrahls innerhalb des Gain-Elements. Der optische Strahl wird in einer Richtung ausgedehnt und behält seine ursprüngliche Grösse in einer dazu senkrechten Richtung. Der Strahlausdehnungsfaktor innerhalb des Brewster-montierten optischen Materials gleicht dem Brechungsindex des Materials  $n$ . Dementsprechend führt die Brewster-Montierung (i) zu einer Verringerung der optischen Intensität innerhalb des Gain-Elements um einen Faktor von  $n$  und (ii) zu der Asymmetrie des Pump- und Laserstrahls, die zu einer nichtgleichmässigen Wärmefreisetzung innerhalb des gepumpten Kanals führt, und daher zu einer Ungleichmässigkeit verschiedener thermisch-optischer Effekte in dem Material.

**[0017]** Die Nachteile der Brewster-Montierung beschränken die Ausgabelleistung von etwa 1 W in den einkristallinen TM:II-VI-Materialien. Der KLM-Laserbetrieb mit der Ausgabelleistung von 30–60 mW wurde kürzlich in einem polykristallinen Material demonstriert, aber sie muss eindeutig erhöht werden, um die Notwendigkeiten zu erfüllen, die von vielen industriellen und wissenschaftlichen Anwendungen erfordert werden. Weitere Leistungsskalierung von KLM-TM:II-VI-Lasern mit einer herkömmlichen Resonatoranordnung stellt jedoch ein herausforderndes Problem dar. Ausserdem verhindern die oben offenbarten Nachteile eine Verkürzung der Pulsdauer. Wiederum benötigen viele Anwendungen Pulse, die kürzer

sind als die, die in dem gewünschten Frequenzbereich mit dem momentan kürzesten gemeldeten Rekordpuls von etwa 40 Femtosekunden momentan verfügbar sind.

**[0018]** Im Prinzip begrenzt die optische Dichte eines Brewster-montierten Gain-Mediums eine Pumpleistung und daher die Ausgabeleistung. So, wie die Dicke des Gain-Mediums zunimmt, was die Verwendung von höheren Pumpleistungen ermöglicht, nimmt der Grad des Astigmatismus zu, der notwendigerweise kompensiert werden sollte. Ansonsten sind, wie oben erwähnt, die KLM-basierten Laser hochempfindlich gegenüber Astigmatismusphänomenen und können im schlimmstmöglichen Fall aufhören, ordnungsgemäss zu arbeiten. Jedoch ist eine solche Kompensation weder einfach noch besonders effektiv.

**[0019]** Es besteht daher ein Bedarf für selbststartende Kerr-Linsen-modengekoppelte Hochleistungsfestkörperlaser im Mittel-IR mit einer optischen Kavität, die ein polykristallines nichtlineares Material beinhaltet, das aus Übergangsmetall(TM)-dotierten II-VI-Materialien ausgewählt ist und das in einem normalen Winkel in der Resonatorkavität montiert ist, so dass die Laserausgabeleistung, -effizienz und -pulsdauer in dem KLM-Regime signifikant erhöht werden.

**[0020]** Ein weiterer Bedarf besteht dementsprechend für die oben offenbarten KLM-Laser im Mittel-IR, die eine Konfiguration aufweisen, die in der Lage ist, bei hohen Pumpleistungen zu arbeiten, so dass ultrakurze Pulse mit hoher Leistung von bis zu mehreren Zehn Watt ausgegeben werden.

### Zusammenfassung der Erfindung

**[0021]** Die der Erfindung für eine Vorrichtung zugrundeliegende Aufgabe wird gelöst mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1. Ausführungsformen der Erfindung sind Gegenstand der von diesem Patentanspruch 1 abhängigen Patentansprüche 2 bis 11. Die der Erfindung für ein Verfahren zugrundeliegende Aufgabe wird gelöst mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 12. Ausführungsformen der Erfindung sind Gegenstand der von diesem Patentanspruch 12 abhängigen Patentansprüche 13 bis 15.

**[0022]** Der Kern der vorliegenden Erfindung ist in einem Kerr-Linsen-modengekoppelten Laser zu sehen, der mit einem Gain-Medium, wie etwa TM-dotierten II-VI-Materialien, konfiguriert ist, das in der optischen Kavität unter normalem Einfall zu einem Pumpstrahl montiert ist. Die Montierung unter normalem Einfall weist die folgenden wichtigen Merkmale und Vorteile auf:

- der Laser- und der Pumpstrahl verbleiben durch das Gain-Medium hindurch kreisförmig;
- die innerhalb des gepumpten Kanals freigesetzte Wärme und daher die verschiedenen thermisch-optischen Effekte in dem Material sind gleichförmig und axial symmetrisch;
- die optische Intensität innerhalb des Gain-Elements ist (im Vergleich zu einer herkömmlichen Brewster-Montierungsanordnung) um einen Faktor  $n$  erhöht, wobei dieser Faktor  $n$  dem Brechungsindex des Gain-Elements entspricht;
- verschiedene nichtlineare optische Effekte innerhalb des Gain-Elements sind aufgrund der höheren optischen Intensität erhöht;
- stärker ausgeprägte nichtlineare Effekte sind im KLM-Laserregime von Bedeutung, da der Kerr-Effekt einen nichtlinearen Ursprung aufweist;
- ein stärker ausgeprägter Kerr-Effekt in einem TM:II-VI-Medium kann die Kompensation des Astigmatismus des Resonators (zumindest teilweise) ermöglichen. Dementsprechend ermöglicht die Verwendung von TM:II-VI-Gain-Elementen unter normalem Einfall, die Anforderungen für die Kompensation eines Astigmatismus in dem Resonator eines KLM-Lasers (zu einem gewissen Grad) abzuschwächen.
- Montierung unter normalem Einfall erleichtert die Verwendung von Gain-Elementen mit grosser Länge und daher hoher Pumpabsorption ausserordentlich;
- hohe Pumpabsorption und hohe optische Intensität führen zu effizienterer Laserinteraktion und ermöglichen daher eine Flexibilität in der Auswahl der Ausgabeauskoppelparameter, so dass erhöhte Laserausgabeleistungen (bei einer gegebenen Pumpleistung) ermöglicht werden;
- gleichförmige thermisch-optische Effekte in dem Material ermöglichen die Erhöhung der Pumpleistung (im Vergleich zu einer herkömmlichen Brewster-Montierungsanordnung) und ermöglichen daher einen weiteren Anstieg der Laserausgabeleistung.

**[0023]** Alles Obige ist von besonderer Bedeutung für ein TM:II-VI-Lasermedium aufgrund von relativ schlechten thermisch-optischen Eigenschaften dieser Materialien und für TM:II-VI-basierte Laser, die im KLM-Regime arbeiten.

**[0024]** Gemäss der Erfindung ist der Kerr-Linsen-modengekoppelte («KLM») Laser der Erfindung mit einer Resonanzkavität und einem Gain-Medium konfiguriert, das aus polykristallinen übergangsmetall-dotierten II-VI-Materialien («TM:II-VI») ausgewählt ist. Das Gain-Medium befindet sich unter einem normalen Einfallswinkel zu einem Pumpstrahl und ist in der Resonanzkavität montiert, so dass Kerr-Linsen-Modenkopplung eingeführt wird, die ausreicht, so dass die Resonanzkavität einen gepulsten Laserstrahl mit einer Grundwellenlänge emittiert. Die Pulse des emittierten Laserstrahls mit der Grundwellenlänge variieren jeweils innerhalb eines Wellenlängenbereichs von 1,8–8 Mikrometer (« $\mu\text{m}$ »), weisen eine Pulsdauer in einem Zeitbereich gleich oder länger als 30–35 Femtosekunden («fs») und eine mittlere Ausgabeleistung in einem Leistungsbereich innerhalb von einem mW bis etwa 20 Watt («W») auf. Erfindungsgemäss schliesst der KLM eine linear polarisierte Faserlaserpumpquelle ein. Diese wird aus einer Erbium- oder Thulium-dotierten Monomodenfaser ausgewählt und ist betriebsfähig, einen Pumpstrahl zu emittieren, der mit einer Pumpwellenlänge unterschiedlich von der

Grundwellenlänge in das Gain-Medium eingekoppelt wird. Der Laser- und der Pumpstrahl verbleiben während einer Propagation durch das Gain-Medium kreisförmig.

**[0025]** Bei einer Ausführungsform der Erfindung ist der KLM-Laser mit dem Gain-Medium konfiguriert, das eine Phasenanpassungsbandbreite aufweist, die breit genug ist, um Emittieren des Ausgabelaserstrahls mit der halben Grundwellenlänge (SHG) innerhalb des gesamten Grundwellenlängenbereichs bereitzustellen.

**[0026]** Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist der KLM-Laser das Gain-Medium auf, das mit der Phasenanpassungsbandbreite konfiguriert ist, die ausreichend breit ist, um gleichzeitig, während der Pumpstrahl durch das Gain-Medium propagiert, Wellen der zweiten, dritten und vierten Harmonischen der Grundwellenlänge zu erzeugen.

**[0027]** Bei einer weiteren erfindungsgemässen Ausführungsform, welche eine beliebige Kombination der vorstehenden Ausführungsformen oder jede von diesen einzeln umfasst, weist der KLM-Laser ferner eine ebene Resonanzkavität auf.

**[0028]** Bei einer weiteren erfindungsgemässen Ausführungsform, welche eine beliebige Kombination der vorstehenden Ausführungsformen oder jede von diesen einzeln umfasst, beinhaltet das Gain-Medium TM-dotierte binäre und ternäre II-VI-Materialien.

**[0029]** Bei einer weiteren erfindungsgemässen Ausführungsform, welche eine beliebige Kombination der vorstehenden Ausführungsformen oder jede von diesen einzeln umfasst, ist das Gain-Medium aus der folgenden Gruppe ausgewählt:  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnTe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdMnTe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdZnTe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSSe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{CdSe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{CdS}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnTe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{CdMnTe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{CdZnTe}$  und  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSSe}$  und eine Kombination von diesen.

**[0030]** Bei einer weiteren erfindungsgemässen Ausführungsform, welche eine beliebige Kombination der vorstehenden Ausführungsformen oder jede von diesen einzeln umfasst, setzt das Gain-Medium Wärme als Reaktion auf den eingekoppelten Pumpstrahl gleichmässig frei. Letztere erzeugt gleichförmige, axial symmetrische thermisch-optische Effekte innerhalb des gepumpten Gain-Mediums.

**[0031]** Bei einer weiteren erfindungsgemässen Ausführungsform, welche eine beliebige Kombination der vorstehenden Ausführungsformen oder jede von diesen einzeln umfasst, weist das Gain-Medium eine Bandbreite auf, die ausreichend breit ist, so dass der Ausgabelaserstrahl mit einer Summe der Pump- und Grundwellenlänge und/oder einer Differenz zwischen diesen erzeugt wird, und/oder einer Summe der Grundwellenlänge und einer zweiten, dritten und/oder vierten optischen Harmonischen der Grundfrequenz.

**[0032]** Bei einer weiteren erfindungsgemässen Ausführungsform, welche eine beliebige Kombination der vorstehenden Ausführungsformen oder jede von diesen einzeln umfasst, ist das Gain-Medium so konfiguriert, dass die optische Intensität innerhalb von diesem im Vergleich zu einer herkömmlichen Brewster-Montierungsanordnung um einen Faktor  $n$  des Brechungsindizes des Gain-Mediums erhöht ist.

**[0033]** Bei einer weiteren erfindungsgemässen Ausführungsform, welche eine beliebige Kombination der vorstehenden Ausführungsformen oder jede von diesen einzeln umfasst, ist das Gain-Medium so konfiguriert, dass es einen Astigmatismus der Resonanzkavität im Wesentlichen kompensiert.

**[0034]** Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist der KLM mit einer Resonanzkavität versehen, die durch wenigstens zwei angrenzende vorgelagerte und nachgelagerte dielektrisch beschichtete Umlenkspiegel definiert wird, die entlang eines Pfads des Pumpstrahls voneinander beabstandet sind und die das Gain-Medium flankieren. Jeder Spiegel ist mit einem hohen Reflexionsgrad bei der Grundwellenlänge und einer hohen Transmission bei der Pumpwellenlänge konfiguriert, wobei der nachgelagerte Umlenkspiegel konfiguriert ist, die Welle einer hohen Harmonischen wenigstens teilweise zu transmittieren.

**[0035]** Gemäss einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist der KLM-Laser, wie in jeder der vorhergehenden Ausführungsform oder einer beliebigen Kombination dieser Ausführungsformen offenbart, die Resonanzkavität auf, die einen bei der Grundwellenlänge teilweise transmittierenden Ausgabeauskoppler und wenigstens einen dem Ausgabeauskoppler vorgelagerten ebenen dichroitischen Spiegel beinhaltet. Die Kavität weist ferner wenigstens eine Zwischenplatte mit hoher Transmission bei der Grundwelle und Wellen hoher Harmonischen auf.

**[0036]** Gemäss einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist der KLM-Laser, wie in jeder der vorhergehenden Ausführungsform oder einer beliebigen Kombination dieser Ausführungsformen offenbart, die Resonanzkavität auf, die ein Dispersionskompensationselement beinhaltet, das als eine planparallele Platte oder ein planparalleles Prisma konfiguriert ist und das betriebsfähig ist, eine Dispersion zu beschränken. Dieses Kompensationselement ist in einem Brewster-Winkel montiert.

**[0037]** Gemäss einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist der KLM-Laser, wie in jeder der vorhergehenden Ausführungsform oder einer beliebigen Kombination dieser Ausführungsformen offenbart, die Resonanzkavität auf, die einen Brewster-montierten doppelbrechenden Auswahlfilter beinhaltet.

**[0038]** Gemäss einer weiteren Ausführungsform der Erfindung weist der KLM-Laser, wie in jeder der vorhergehenden Ausführungsform oder einer beliebigen Kombination dieser Ausführungsformen offenbart, die Resonanzkavität auf, und ferner einen Linearversteller, der das Gain-Medium innerhalb der Resonanzkavität entlang einer Taille des Laserstrahls versetzt. Die Verschiebung des Gain-Mediums wird gesteuert, um die mittlere Leistung des Laserstrahls zwischen einer

primären Ausgabe des emittierten Laserstrahls mit der Grundwellenlänge und sekundären Ausgaben mit jeweiligen Wellen der zweiten, dritten und vierten Harmonischen umzuverteilen.

**[0039]** Bei einem erfindungsgemässen Verfahren zu einer Femtosekundenlaseremission in einem Kerr-Linsen-moden-gekoppelten («KLM») Laser stellt dieses Verfahren eine Resonanzkavität mit Mehrfachdurchgang bereit und beinhaltet ein Gain-Medium, das aus übergangsmetalldotierten II-VI («TM:II-VI»)-Materialien ausgewählt wird. Die Letzteren sind in einem normalen Einfallswinkel zu einem Pumpstrahl innerhalb der Resonanzkavität montiert. Die Kerr-Linse verursacht eine Modenkopplung der Resonanzkavität, so dass sie eine primäre Ausgabe der Laseremission einschliesslich eines Zuges von Ausgabepulsen mit einer Grundwellenlänge emittiert. Die Pulse variieren jeweils innerhalb eines Wellenlängenbereichs von 1,8–8 Mikrometer (« $\mu\text{m}$ »), weisen eine Pulsdauer in einem Zeitbereich gleich oder länger als 30–35 Femtosekunden («fs») und eine mittlere Ausgabeleistung in einem Leistungsbereich innerhalb von einem mW bis etwa 20 Watt («W») auf.

**[0040]** Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung für das Verfahren wird die Resonanzkavität ferner mit einer sekundären Ausgabe gleichzeitig zu der primären Ausgabe bereitgestellt. Die sekundäre Ausgabe liegt bei halber Wellenlänge der Grundwellenlänge vor.

**[0041]** Bei einer weiteren Ausführungsform stellt das Verfahren gemäss einer vorstehenden Ausführungsform und/oder einer Kombination der vorstehenden Ausführungsformen zusätzliche Ausgaben des Laserstrahls bei einer dritten und vierten Harmonischen der Grundwellenlänge gleichzeitig zu der primären und sekundären Ausgabe bereit.

**[0042]** Bei einer weiteren erfindungsgemässen Ausführungsform beinhaltet das Verfahren einer beliebigen der vorhergehenden Ausführungsformen oder einer beliebigen Kombination von diesen das Erzeugen eines Pumpstrahls mit einer Pumpwellenlänge unterschiedlich von der Grundwellenlänge und Einkoppeln des Pumpstrahls in das Gain-Medium.

**[0043]** Gemäss einer weiteren Ausführungsform stellt das Verfahren von jeder der vorhergehenden Ausführungsform oder einer beliebigen Kombination davon zusätzliche Ausgaben des Laserstrahls mit einer Summe der Pump- und Grundwellenlänge und einer Differenz zwischen diesen bereit, und einer Summe der Grundwellenlänge und Wellenlängen der zweiten, dritten und vierten optischen Harmonischen und einer Differenz von diesen.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0044]** Die obigen und andere Aspekte, Merkmale und Vorteile der Offenbarung werden aus den folgenden Zeichnungen leichter ersichtlich, in denen:

- Fig. 1 ein beispielhaftes Schaubild des bekannten KLM-Lasers nach dem Stand der Technik ist;
- Fig. 2 Emissionsspektren und Autokorrelationsspuren für den KLM-Laser aus Fig. 1 zeigt;
- Fig. 3 ein anderes beispielhaftes Schaubild des bekannten KLM-Lasers nach dem Stand der Technik ist;
- Fig. 3A die vergrösserte Einzelheit aus Fig. 3 ist, die die Strahlpropagation in einem Brewster-montierten Gain-Medium veranschaulicht;
- Fig. 4 ein optisches Schaubild einer Gestaltung des KLM-Resonators der Erfindung ist;
- Fig. 4A das vergrösserte Gain-Medium aus Fig. 2 ist;
- Fig. 4B eines von möglichen Schaubildern einer Gestaltung des offenbarten KLM-Lasers aus Fig. 4 ist;
- Fig. 5 ein gemessenes Laseremissionsspektrum des offenbarten KLM-Lasers ist, das mit einer theoretischen Kurve für ein transformationsbeschränktes Laseremissionsspektrum gefittet ist;
- Fig. 5A eine Autokorrelationsspur ist;
- Fig. 5B das Bild des Ausgabelaserstrahls ist, der von dem offenbarten KLM-Laser emittiert wird;
- Fig. 6 ein optisches Schaubild des optimierten KLM-Lasers der Erfindung ist;
- Fig. 7 gemessene Emissionsspektren des offenbarten KLM-Lasers aus Fig. 6 veranschaulicht, der mit jeweils unterschiedlichem Reflexionsgrad des Ausgabekopplers des Lasers konfiguriert ist;
- Fig. 8 Autokorrelationsspuren des KLM-Lasers aus Fig. 6 veranschaulicht, die den jeweiligen Emissionsspektren aus Fig. 7 entsprechen;

- Fig. 9 eine vergrösserte Ansicht des polykristallinen Übergangsmetall(«TM»)-TM:II-IV-Gain-Mediums des offenbaren KLM-Lasers ist;
- Fig. 10 ein noch anderes optisches Schaubild des KLM-Lasers der Erfindung ist;
- Fig. 11A vier Bilder des Ausgabestrahls des Lasers bei jeweiliger Grund-, Zweite-, Dritte- und Vierte-Harmonischen-Wellenlänge sind;
- Fig. 11B räumliche Profile der Ausgabe des KLM-Lasers der Erfindung bei einer Grundwellenlänge und einer zweiten Harmonischen sind, die mit einer Pyrokamera aufgenommen wurden;
- Fig. 11C eine Wellenform des KLM-Laserpulszuges ist, die bei der Wellenlänge der zweiten Harmonischen aufgenommen wurde;
- Fig. 12 ein weiteres optisches Schaubild des KLM-Lasers der Erfindung ist, der mit einem Mittel zum Steuern der Parameter des Lasers bereitgestellt ist;
- Fig. 12A die vergrösserte Ansicht des Gain-Mediums aus Fig. 12 ist;
- Fig. 13, 13A und 13B die steuerbare Erzeugung von Pulsen mit 68 fs und 84 fs durch den KLM-Laser der Erfindung veranschaulichen; und
- Fig. 14 die steuerbare Erzeugung eines Pulses mit 46 fs durch den KLM-Laser der Erfindung veranschaulicht.

### Ausführliche Beschreibung

**[0045]** Es wird nun ausführlich Bezug auf Ausführungsformen der Erfindung genommen. Wo immer möglich, werden gleiche oder ähnliche Ziffern in den Zeichnungen und der Beschreibung verwendet, um auf die gleichen oder ähnlichen Teile oder Schritte zu verweisen, die dem Stand der Technik und Konfigurationen der Erfindung gemein sind. Die Zeichnungen liegen in vereinfachter Form vor und sind nicht genau massstabsgetreu. Sofern nicht speziell angemerkt, soll den Wörtern und Ausdrücken in der Spezifikation und den Ansprüchen die für einen Fachmann in der Dioden- und Faserlasertechnik gewöhnliche und gewohnte Bedeutung gegeben werden. Das Wort «koppeln» und ähnliche Begriffe bezeichnen nicht notwendigerweise direkte und unmittelbare Verbindungen, sondern beinhalten auch mechanische und optische Verbindungen durch leeren Raum oder Zwischenelemente.

**[0046]** Fig. 4 veranschaulicht die beispielhafte Konfiguration des offenbaren KLM-Lasers 50 mit Gain-Medium 4' das in dem gezeigten Resonator unter normalem Einfall in der Ebene der Strahlpropagation montiert ist. Die verbleibenden Komponenten sind denen aus Fig. 3 ähnlich und beinhalten optische Pumpquelle 1, die von Quelle 10 «geseedet» wird und einen (in Grün gezeigten) Pumpstrahl emittiert. Die Pumpquelle 1 kann als ein standardmässiger linear polarisierter Transversalmonomoden(«SM»)-Er-dotierter-Faserlaser (EDFL) konfiguriert sein. Alternativ kann Quelle 10 auf einem Thulium(«Tm»)-dotierten SM-Faserlaser basieren.

**[0047]** Die Normaleinfallsmontierung des Gain-Mediums 4' ist entscheidend zum Erreichen hoher Ausgabelaserleistungen und -effizienz. Insbesondere ist ein polykristallines antireflexionsbeschichtetes Gain-Element 4' zwischen dielektrisch beschichtete Umlenkspiegel 3 und 5 gekoppelt. Während Gain-Element 4' als planparallel gezeigt ist, kann es auch keilförmig sein. Der Spiegel 3 ist bei einer Laserwellenlänge hochreflektierend und bei der Pumpwellenlänge hochtransmittierend, wobei Spiegel 5 mit hohem Reflexionsgrad bei der Laserwellenlänge und mit optionaler hoher Transmission bei der Pumpwellenlänge konfiguriert ist. Der Resonator kann eine Vielzahl von Konfigurationen aufweisen. Zum Beispiel veranschaulicht Fig. 4B den Resonator mit mehr als zwei Umlenkspiegeln, wie gezeigt. Unabhängig von der Resonatorkonfiguration trifft der Laserstrahl schliesslich auf Ausgabeauskoppler («OC») 8 und wird aus dem Resonator als Ausgabestrah 9 mit der Laserwellenlänge ausgekoppelt.

**[0048]** Es sollte erwähnt werden, dass die Dispersionkompensation unter Verwendung speziell optimierter «dispersiver» Spiegel implementiert werden kann. Ein hochreflektierender Spiegel kann eine brauchbare Alternative zu Ausgabeauskoppler 8 sein. Der Resonator kann zusätzliche Komponenten für die Laserwellenlängen Anpassung beinhalten.

**[0049]** Im Gegensatz zu dem herkömmlichen Resonator des KLM-Lasers aus Fig. 1 und 3 weist der ebene Resonator der Erfindung einen Astigmatismus auf. In einer bestimmten Situation von TM:II-VI-Lasermaterialien ermöglicht jedoch die hohe Gleichförmigkeit des Pump- und Laserstrahls innerhalb des Gain-Elements, wie in Fig. 4B gezeigt, dass das Gain-Element im Wesentlichen den Astigmatismus der Resonanzkavität kompensiert. Das Grundsatzexperiment, das unten beschrieben wird, bestätigt die Aussage. Weiterhin kann der Astigmatismus des offenbaren ebenen Resonators durch eine sorgfältige Wahl der Krümmungsradien der konkaven Umlenkspiegel und der Umlenkwinkel sogar niedriger gehalten werden. Falls notwendig, gibt es auch eine Anzahl von Techniken zur Astigmatismuskompensation in einem gefalteten Resonator ohne ein optisches Brewster-Element, die einem Durchschnittsfachmann wohl bekannt sind, aber alle von ihnen sind lediglich optional und nicht, wie für Vorrichtungen nach dem Stand der Technik, notwendig.

**[0050]** Entsprechend kann ein wohl ausgeprägter nichtlinearer Kerr-Effekt in einem TM:II-VI-Medium eine signifikante Kompensation des Astigmatismus des Resonators ermöglichen. Dementsprechend ermöglicht die Verwendung von TM:II-VI-Gain-Elementen unter normalem Einfall etwas lockerere Anforderungen für die Kompensation von Astigmatismus in dem Resonator von KLM-Laser 50. Hauptvorteile der Montierung unter normalem Einfall des Gain-Elements sind (i) bessere Handhabung der thermisch-optischen Effekte in dem Gain-Element aufgrund der Kreisförmigkeit des Pump- und des Laserstrahls, (ii) signifikante Erhöhung der Pump- und Laserintensität innerhalb des Gain-Elements (im Vergleich zu der standardmässigen Brewster-Montierung), (iii) grössere Einfachheit der Verwendung des Gain-Elements mit grosser Länge und grossem Volumen und daher grosser Pumpabsorption. Die Montierung unter normalem Einfall kann auch für Kerr-Linsen-Modenkopplung bevorzugter sein.

**[0051]** Fig. 5–5B veranschaulichen die Ergebnisse eines ebenen KLM-Laserresonators 50 aus Fig. 4, der mit standardmässigem massenproduziertem AR-beschichtetem polykristallinem Cr:ZnS-Gain-Element 4 konfiguriert ist. Das KLM-Regime des Lasers wurde einfach erhalten. Das KLM-Regime des Lasers wurde durch Messung des Laseremissionsspektrums aus Fig. 5 und der nichtlinearen Autokorrelationsfunktion aus Fig. 5A bestätigt, wie hier nachfolgend besprochen wird. Die Fourier-transformationsbeschränkten Pulse mit einer Pulsdauer von 84 fs wurden durch mathematische Analyse der experimentellen Daten bestimmt, die auch hier nachfolgend besprochen werden. Der transformationsbeschränkte Puls ist ein theoretisch kürzest möglicher Puls, der als  $\Delta t \Delta \omega = 1/2$  bestimmt ist, wobei  $t$  eine Pulsdauer und  $\Delta \omega$  eine spektrale Breite ist. Wie aus dem Obigen gesehen werden kann, wird eine breite spektrale Bandbreite benötigt, um den kürzest möglichen Lichtpuls mit einer speziellen Dauer zu erzeugen. Wie gesehen werden kann, war der getestete KLM-TM:II-VI-Laser 50 betriebsfähig, einen Strahl 9 mit der Grund-/Laserwellenlänge mit einer Ausgabeleistung von etwa 1,3 W bei einer Wiederholrate von 93 MHz und einer Pulsenergie von 14 nJ und mit aufgezeigten transformationsbeschränkten Pulsen und guter Strahlqualität auszugeben, wie in Fig. 5B gezeigt. Die erhaltene Ausgabeleistung gilt als einzigartig hoch.

**[0052]** Fig. 6 veranschaulicht einen KLM-Laser 50 der Erfindung, der auf einem Cr<sup>2+</sup>:ZnS-Gain-Element 4 basiert und der den optimierten Resonator aufweist. HR – dispersive Hochreflektoren ( $GDD \sim -200 \text{ fs}^2$ ), YAG – 2 mm dicke Brewster-montierte Dispersionskompensationsplatte, OC – Ausgabeauskoppler ( $IGDDI < 150 \text{ fs}^2$ ), MgF<sub>2</sub> – optionaler 0,5 mm dicker Brewster-montierter doppelbrechender Auswahlfilter (Lyot-Filter), L – pumpfokussierende Linse, SHG – sekundäre Ausgaben des Lasers mit einer Wellenlänge der zweiten Harmonischen. Der Laser wird bei 1567 nm von linear polarisierter Strahlung eines Er-dotierten Faserlasers (EDFL) gepumpt.

**[0053]** Die Pumpquelle 1 beinhaltet einen standardmässigen linear polarisierten Er-dotierten Faserlaser (EDFL). Um die Laserausgabeleistung zu erhöhen, ist ein 5 mm langes polykristallines Cr<sup>2+</sup>:ZnS-Gain-Element 4' mit 11% Niedersignaltransmission bei 1567 nm Pumpwellenlänge zwischen AR-beschichteten Umlenkspiegeln 3 und 5 unter normalem Einfall auf einem wassergekühlten Kupferkühlkörper eingesetzt. Die Längen der Kavitätsbeine waren mit einem Verhältnis von 3 zu 5 ungleich. Eine Gesamtdispersion des Resonators bei der maximalen Laseremission (2300–2400 nm) betrug etwa 1400–1600 fs<sup>2</sup>. Für die Experimente bezüglich Wellenlängen Anpassung des KLM-Lasers wurde ein aus MgF<sub>2</sub> bestehender 0,5 mm dicker Brewster-montierter doppelbrechender Auswahlfilter 11 (Lyot-Filter mit einer einzigen Platte) verwendet. Ausserdem wurde eine 2 mm dicke Brewster-montierte YAG-Platte 12 neben dem Auswahlfilter 11 in dem zwischen Spiegel 6 und 13 definierten Bein platziert. Der ebene Resonator beinhaltet ferner ein zusätzliches Bein, das zwischen den ebenen Spiegeln 15 und 14 definiert ist und OC 8 direkt vorgelagert ist. Die Dispersion des OC liegt in einem Bereich von 2200 bis 2400 nm innerhalb von  $\pm 150 \text{ fs}^2$ . Die Ausgaben 16 bei SHG sind in Blau gezeigt, der Pumpstrahl ist in Grün und der Laserstrahl ist in Rot gezeigt.

**[0054]** Das KLM-Regime des Lasers mit dem optimierten ebenen Resonator wurde unter Verwendung der Ausgabeauskoppler mit 96, 90, 70 und 50% Reflexionsgrad erhalten. Die meisten Messungen wurden mit der Pulswiederholrate von 94,5 MHz ausgeführt. Jedoch wurden KLM-Laseroszillationen in einem Bereich der Pulswiederholraten (80–120 MHz) erhalten. Ergebnisse der Lasercharakterisierung sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle

| $R_{OC}$ , | $P_{out}$ , | $\tau$ , fs, | $\Delta\lambda$ , | $\lambda_C$ , | $P_{pump}$ , |
|------------|-------------|--------------|-------------------|---------------|--------------|
| 96         | 0,3         | 85           | 70                | 2380          | 3,4          |
| 90         | 0,6         | 46           | 120               | 2300          | 5,2          |
| 70         | 1,2         | 68           | 84                | 2332          | 6,7          |
| 50         | 2,0         | 67           | 82                | 2295          | 10,0         |

**[0055]**  $R_{OC}$  – Reflexionsgrad des Ausgabeauskopplers,  $P_{out}$  – mittlere Ausgabelaserleistung im KLM-Regime,  $\tau$  – Laserpulsdauer (FWHM),  $\Delta\lambda$  – Breite des Laseremissionsspektrums (FWHM),  $\lambda_C$  – Laseremissionsspitze,  $P_{pump}$  – optimale Pumpleistung.

**[0056]** Emissionsspektren und Autokorrelationsspuren des KLM-Lasers 50 aus Fig. 6, die für die OCs mit unterschiedlichem Reflexionsgrad erhalten wurden, sind jeweils in Fig. 7 und 8 veranschaulicht. Die Form der Spektren der Autokorrelationsfunktionen entsprechen  $\text{sech}^2$ -Pulsen für alle vier Arten des OC. Dies ermöglicht die Verwendung des Zeit-Band-

breiten-Produkts von 0,315 zur Abschätzung der Pulsdauer. Die kleine Spitze im bei  $R_{OC} = 90\%$  (2525 nm) gemessenem Spektrum deutet eine Anwesenheit von Kelly-Seitenbändern in der Laseremission an. Das entgegengesetzte Seitenband wird aufgrund eines Verlusts durch die Hochreflektoren bei Wellenlängen unterhalb von 2200 nm unterdrückt. Die gemessenen Spektren mit flacher Oberseite bei  $R_{OC} = 90$  und 70% werden unten für den Fall erklärt, wenn eine Erzeugung der zweiten Harmonischen (SHG – Second Harmonie Generation) direkt in polykristallinem  $Cr^{2+}$ :ZnS erhalten wurde.

**[0057]** Die oben offenbarten Konfigurationen des KLM-Lasers 50, der auf normal montierten polykristallinen II-VI-Materialien basiert, und insbesondere eines polykristallinen  $Cr^{2+}$ :ZnS-Lasers, zusammenfassend werden stabile Ein-Puls-fs-Laseroszillationen routinemässig in einem Bereich der Pulswiederholraten von 80-120 MHz mit einer Ausgabeleistung des fs-Lasers von etwa 2W und kürzesten Pulsdauern von etwa 46 fs erhalten. Alle der obigen Daten werden als beispiellos für das II-VI-Gain-Medium gehalten. Weiterhin war der KLM-Laser 50 bei mehreren Gelegenheiten betriebsfähig, einzigartigere Daten mit der Ausgabeleistung von bis zu 20 W und Pulsdauern so niedrig wie 30–35 Pikosekunden zu erzeugen.

**[0058]** Die praktischen Anwendungen von Femtosekundenlasern benötigen oft nichtlineare Frequenzumwandlung (z.B. optische Harmonischenerzeugung, Summen- und Differenzfrequenzerzeugung und optische parametrische Erzeugung). Beispielsweise kann der spektrale Bereich von 1,1 bis 1,5  $\mu m$ , der für die Multiphotonenbildgebung von Bedeutung ist, unter Verwendung eines Ti:S-fs-Lasers in Kombination mit dem optischen parametrischen Generator adressiert werden. Der gleiche spektrale Bereich kann unter Verwendung von SHG eines TM:II-VI-fs-Lasers im Mittel-IR, der in einem Spektralbereich von 2,2 bis 3,0  $\mu m$  arbeitet, adressiert werden.

**[0059]** Die Effizienz von SHG in nichtlinearen Materialien ist durch Dispersion (eine Differenz der Geschwindigkeit von Lichtpropagation bei einer Grundlaserwellenlänge und der halben Grundwellenlänge («SH»)) begrenzt. Deswegen findet der Energietransfer von der Grundwellenlänge zu der SH-Wellenlänge in einer begrenzten Länge des nichtlinearen Materials, der sogenannten Kohärenzlänge («CL» – Coherence Length), statt. In den meisten Materialien ist die CL in der Grössenordnung von wenigen Zehn  $\mu m$ , was zu einer geringen SH-Erzeugungseffizienz führt. Eine Reihe von Techniken wurde während der letzten Jahrzehnte entwickelt, um diese Grenze zu überwinden. Traditionelle Techniken basieren auf Doppelbrechung von manchen nichtlinearen Kristallen. Neuere Entwicklungen basieren auf dem Konstruieren der mikroskopischen Struktur des nichtlinearen Materials (Quasiphasenanpassung oder QPM). Standard-QPM-Kristalle enthalten regelmässige Strukturen, die für die effizienteste nichtlineare Frequenzumwandlung bei einer gewünschten Laserwellenlänge optimiert sind, z.B. weisen sie eine begrenzte Bandbreite der nichtlinearen Frequenzumwandlung auf. Aufwändigere Strukturierung ermöglicht eine Erhöhung der Bandbreite, was mit einer Verringerung der Gesamtumwandlungseffizienz einhergeht.

**[0060]** Hier verwendete polykristalline TM:II-VI-Materialien bestehen aus mikroskopischen Einkristallkörnern. Die in den Experimenten verwendeten polykristallinen TM:II-VI-Proben weisen eine Korngrösse von der Grössenordnung der Kohärenzlänge des SHG-Prozesses im Mittel-IR-Wellenlängenbereich (30–60  $\mu m$ , abhängig von der Wellenlänge und der Art des Materials) auf. Dementsprechend können polykristalline TM:II-VI-Materialien wie ein Standard-QPM-Material strukturiert werden. Im Gegensatz zu Standard-QPM-Material ist die Strukturierung nicht perfekt, sondern zufällig (es bestehen Ungleichheiten der Korngrösse und der Orientierung der kristallografischen Achsen). Diese Zufälligkeit der Strukturierung führt zu einem niedrigen nichtlinearen Gain (im Vergleich zu Standard-QPM-Material). Die Zufälligkeit ermöglicht jedoch eine SHG in einem sehr breiten Spektralbereich. Dementsprechend weisen polykristalline TM:II-VI-Materialien eine sehr breite Bandbreite der nichtlinearen Frequenzumwandlung auf. Die Effizienz der nichtlinearen Frequenzumwandlung hängt stark von der optischen Intensität ab (beispielsweise ist die SHG-Effizienz proportional zum Quadrat der optischen Intensität). Daher kann ein relativ niedriger nichtlinearer Gain von polykristallinem TM:II-VI-Material durch eine sehr hohe Intensität von fs-Laserpulsen kompensiert werden. Beschriebene Eigenschaften von polykristallinen TM:II-VI-Materialien sind für nichtlineare Frequenzumwandlung von fs-Laseremission von Bedeutung.

**[0061]** Speziell mit Bezug auf Fig. 9 und 10 ist der KLM-Laser 50 mit einem polykristallinen TM:II-VI-Gain-Medium 4' konfiguriert. Die offenbarte Konfiguration von Fig. 10 ist betriebsfähig, gleichzeitig die Strahlen mit jeweiligen Wellenlängen der zweiten, dritten und vierten Harmonischenerzeugung, die jeweils in Gelb (SHG), Grün (THG) und Blau (FGG) in Fig. 9 gezeigt sind, auszugeben, als auch Summen- und Differenzfrequenzwellenlängen, die beide in Schwarz gezeigt sind (SFG und DFG).

**[0062]** Die Laserausgabe bei einer Grundwellenlänge ist mittels eines teilweise transmittierenden OC 8 implementiert. Die Laserausgaben bei jeweiligen zweiten, dritten und vierten Harmonischen verlassen den Resonator mittels Spiegel 20 nach einer Reflexion an Spiegel 18. Es ist wichtig zu betonen, dass alle Spiegel des Resonators nicht speziell dazu ausgelegt sein müssen, eine Ausgabe hoher Harmonischen zu erzeugen. In der getesteten Vorrichtung beträgt die Transmission der Spiegel in SHG-Wellenlängenbereichen etwa 50% und oszilliert als eine Funktion der Wellenlänge. Fig. 11A veranschaulicht eine Momentaufnahme von typischen Bildern der Ausgaben bei 2 W des KLM-Lasers 50, jeweils bei der Grundwellenlänge (A), Wellenlängen der zweiten (B), dritten (C) und vierten (D) Harmonischen (2300, 1150, 770, 575 nm), die durch eine IR-empfindliche Karte erhalten wurden, nachdem sie hinter Spiegel 20 platziert wurde. Fig. 11B veranschaulicht zwei Bilder des Ausgabestrahls bei der Grundfrequenz und der zweiten Harmonischen, die mit einer Pyrokamera gemessen wurden, die hinter dem OC 8 platziert wurde. Fig. 11C veranschaulicht einen Graphen, der zu einer Wellenform des KLM-Laserpulszugs zugehörig ist, der bei der SHG-Wellenlänge aufgenommen wurde. Dementsprechend ist ein beträchtlicher Anteil (bis zu 50%) der Mittel-IR-Femtosekundenlaseremission in die zweite Harmonische umgewandelt und die Menge der SH-Leistung kann durch Steuerung des OC-Reflexionsgrades eingestellt werden.

**[0063]** Die Ausgabeleistung des fs-Lasers 50 aus Fig. 10 bei der SHG-Wellenlänge betrug 30 mW nach Spiegel 20. Dies ermöglicht, 240 mW SHG-Leistung innerhalb des Resonators zu erhalten (man muss die Transmission von 50% der Spiegel 18, 20 und die Tatsache, dass SHG in zwei entgegengesetzten Richtungen auftritt, berücksichtigen). Die erhaltenen Ergebnisse offenbaren die folgenden Eigenschaften der polykristallinen TM:II-VI-Materialien: Polykristalline TM:II-VI-Materialien sind eher effiziente nichtlineare Frequenzumwandler für Mittel-IR-fs-Pulse (z.B. wurde während dem Machbarkeitsexperiment etwa die gleiche optische Leistung bei der Grund- und der SHG-Wellenlänge erhalten). Die Phasenanpassungsbandbreite von polykristallinen TM:II-VI-Materialien ist breit genug, um SHG des gesamten fs-Laseremissionsspektrums zu ermöglichen. Die Phasenanpassungsbandbreite von polykristallinen TM:II-VI-Materialien ist breit genug, um gleichzeitig SHG, THG und FHG zu ermöglichen. Polykristalline TM:II-VI-Materialien innerhalb des offenbaren ebenen Resonators können sowohl als das fs-Laser-Gain-Medium als auch als der nichtlineare Frequenzumwandler fungieren. Dementsprechend kann der Laser 50 aufgrund der polykristallinen Struktur des Gain-Mediums 4' mehrere fs-Ausgaben bei vier verschiedenen Wellenlängen ausgeben, wenn die Grössen der mikroskopischen Einkristallkörner von der Grössenordnung der Kohärenzwellenlänge des SHG-, THG- und FHG-Prozesses sind.

**[0064]** Ungleichheiten der Korngrösse und der Orientierung der kristallografischen Achsen führen zu der «Strukturierung» des Materials, wie in quasiphasenangepassten (QPM) nichtlinearen Umwandlern. Im Gegensatz zu dem Standard-QPM-Material ist die Strukturierung nicht regelmässig, sondern zufällig. Einerseits ist der nichtlineare Gain in zufällig strukturierter Material sehr gering. Andererseits führt die zufällige Strukturierung zu einer sehr grossen Bandbreite der nichtlinearen Frequenzumwandlung. Entsprechend wird ein niedriger nichtlinearer Gain von polykristallinem  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$  durch eine hohe Spitzenintensität von fs-Laserpulsen innerhalb des Resonators kompensiert. Zusammenfassend weist die Verwendung von polykristallinen TM:II-VI-Materialien mit zufälliger QPM folgende wichtige Merkmale auf:

- (i) Die Verwendung von polykristallinen TM:II-VI-Materialien ermöglicht nichtlineare Frequenzumwandlung des gesamten Emissionsspektrums des fs-Lasers aufgrund einer sehr grossen nichtlinearen Bandbreite des Mediums.
- (ii) Die nichtlineare Frequenzumwandlung in polykristallinen TM:II-VI-Materialien kann SHG, Summenfrequenzmischung zwischen der Laseremission bei einer Grundwellenlänge und ihrer optischen Harmonischen, Summen- und Differenzfrequenzmischung zwischen dem fs-Laser und der anderen Laserquelle (z.B. dem Pump laser) usw. beinhalten.
- (iii) Montieren eines polykristallinen TM:II-VI-Materials unter normalem Einfall ermöglicht eine Reduzierung der Laserstrahlgrösse innerhalb des Mediums und daher eine Zunahme der optischen Intensität und daher eine signifikante Zunahme der nichtlinearen Umwandlungseffizienz.
- (iv) Montieren eines polykristallinen TM:II-VI-Materials innerhalb des ebenen Resonators des fs-Lasers ermöglicht gleichzeitige Erzeugung von fs-Laserpulsen mit einer Grundwellenlänge und mit einer Reihe von sekundären Wellenlängen (SHG, THG, FHG, SFG, DFG usw.).
- (v) Montieren eines polykristallinen TM:II-VI-Mediums unter normalem Einfall innerhalb des ebenen Resonators des KLM-Lasers ermöglicht eine Zunahme der Länge des Gain-Elements und daher eine Zunahme der Länge von nichtlinearer Interaktion und daher weitere signifikante Zunahme der nichtlinearen Umwandlungseffizienz.
- (vi) Montieren eines polykristallinen TM:II-VI-Materials innerhalb des ebenen Resonators des KLM-Lasers ermöglicht eine genaue Steuerung von fs-Laserparametern mittels des Zusammenspiels zwischen der Kerr-Nichtlinearität und anderen Nichtlinearitäten in dem Material, wie unten beschrieben wird.
- (vii) Montieren eines polykristallinen TM:II-VI-Materials innerhalb des ebenen Resonators des KLM-Lasers ermöglicht eine Maximierung der nichtlinearen Umwandlungseffizienz, da die optische Leistung, die innerhalb des Resonators zirkuliert, stets höher ist als die optische Leistung ausserhalb des Resonators. Weiterhin kann die optische Leistung innerhalb des ebenen Resonators (und daher die Intensität des Laserstrahls in dem polykristallinen TM:II-VI-Material) durch Optimierung des Reflexionsgrades des Ausgabeauskopplers genau gesteuert werden.
- (viii) Die sekundäre Ausgabe eines polykristallinen TM:II-VI-fs-Lasers bei SHG-, THG-, FHG-, SFG-, DFG-Wellenlängen kann mittels eines speziell gestalteten dichroitischen Spiegels mit hohem Reflexionsgrad HR bei einer Grundwellenlänge und hoher Transmission HT bei sekundären Wellenlängen implementiert sein.
- (ix) Die sekundäre Ausgabe eines polykristallinen TM:II-VI-fs-Lasers bei SHG-, THG-, FHG-, SFG-, DFG-Wellenlängen können mittels speziell gestalteter dielektrisch beschichteter Platten mit HT bei einer Grundlaserwellenlänge und HR bei sekundären Wellenlängen implementiert sein. Die Platten können z.B. zwischen dem polykristallinen optischen TM:II-VI-Element und den Resonatorspiegeln montiert sein.

**[0065]** Fig. 12 und 12A veranschaulichen ein Schaubild zum Steuern der Parameter eines Kerr-Linsen-modengekoppelten polykristallinen TM:II-VI-Lasers 50. Ähnlich zu dem Schaubild aus Fig. 4 ist das veranschaulichte Schaubild mit einer optischen Pumpquelle 1, pumpstrahlfokussierenden- und -formenden optischen Elementen 2, konkavem dielektrisch beschichtetem Umlenkspiegel 3 mit hohem Reflexionsgrad bei der Laserwellenlänge und hoher Transmission bei der Pumpwellenlänge, Antireflexion(AR)-beschichtetem polykristallinem TM:II-VI-Gain-Element 4' das unter normalem Einfall montiert ist, konfiguriert. Das Gain-Element 4' ist auf eine Plattform 30 aus Fig. 12A montiert, die eine Verschiebung entlang des Laserstrahls ermöglicht, wie durch eine Linie mit zwei Pfeilen gezeigt ist. Der KLM-Laser 50 beinhaltet ferner konkave dielektrisch beschichtete Umlenkspiegel 5 mit hohem Reflexionsgrad bei einer Laserwellenlänge (und optional hoher Transmission bei Pump- und/oder SHG-, THG-, FHG-, SFG-, DFG-Wellenlängen). Er weist auch einen ebenen Spiegel 6 mit hohem Reflexionsgrad bei einer Laserwellenlänge (dielektrisch oder metallbeschichtet), optionale Polarisationskomponenten und Komponenten zur Dispersionskompensation auf, wie etwa ein Prisma 7, das als eine im Laserresonator im Brewster-Winkel montierte planparallele Platte montiert ist. Der offenbarte KLM-Laser beinhaltet ferner einen Ausgabe-

auskoppler 8, der für den Ausgabelaserstrahl 9 bei der Grundwellenlänge transmittierend ist, und sekundäre Ausgänge 10, die für eine SHG-Welle (und/oder THG-, FHG-, SFG-, DFG-Wellenlängen) transmittierend sind. Der Pfad des Laserstrahls ist durch rote Farbe gezeigt und der Pumpstrahl ist durch grüne Farbe gezeigt.

**[0066]** Kerr-Linsen-modengekoppelte Laser sind auf den Kerr-Effekt angewiesen: ein nichtlinearer optischer Effekt, der auftritt, wenn Licht mit hoher Intensität in einem optischen Medium propagiert. Er kann als sofort auftretende Modifikation des Brechungsindex des Mediums beschrieben werden. Die «Stärke» des Kerr-Effekts ist proportional zu der optischen Intensität:  $S_{\text{Kerr}} \sim I$ . Daher ist die enge Fokussierung des Laserstrahls in dem Gain-Medium in KLM-Lasern unerlässlich. Die benötigte Fokussierung wird üblicherweise erreicht, indem das Gain-Medium zwischen den zwei gekrümmten Spiegeln in der Taille des Laserstrahls platziert wird und indem der Abstand zwischen den gekrümmten Spiegeln optimiert wird. Die Taille des Laserstrahls ist in Fig. 12A schematisch gezeigt. Die optische Intensität ist proportional zu der Laserstrahlfläche und daher erreicht sie in der Taille ein Maximum und nimmt mit der Zunahme der Strahlgrösse ab.

**[0067]** Die Experimente zeigen, dass das polykristalline TM:II-VI-Medium ein geeignetes Material für KLM-Laser ist. Die Experimente zeigen ausserdem, dass ein polykristallines TM:II-VT-Medium ein eher effizienter SHG-Umwandler für Mittel-IR-fs-Pulse ist, wie oben offenbart wurde. Die «Stärke» des SHG-Effekts ist proportional zu der optischen Intensität im Quadrat:  $S_{\text{SHG}} \sim I^2$ .

**[0068]** Dementsprechend treten zwei nichtlineare Effekte in einem polykristallinen TM:II-VI-KLM-Laser gleichzeitig auf: Kerr-Linseneffekt (proportional zu  $I$ ) und SHG (proportional zu  $I^2$ ). Verschiedene Abhängigkeiten des Kerr-Linseneffekts und der SHG von der optischen Intensität ermöglichen, die relativen «Stärken» von zwei nichtlinearen Effekten durch Verschiebung des polykristallinen TM:II-VI-Gain-Elements entlang der Taille des Laserstrahls zu variieren. Dementsprechend kann die nichtlineare Handlung eines polykristallinen TM:II-VI-Mediums zwischen diesen zwei nichtlinearen Effekten auf steuerbare Weise umverteilt werden.

**[0069]** Insbesondere veranschaulichen Fig. 13, 13A und 13B die Emissionsspektren und Autokorrelationsspuren, die für zwei Positionen (in Rot und Blau) des Gain-Mediums 4' im Verhältnis zu den gekrümmten Spiegeln 3 und 5 aus Fig. 12 erhalten wurden. Wie gesehen werden kann, führt eine Verschiebung des polykristallinen Cr:ZnS-Gain-Elements zu einer signifikanten Variation der fs-Laserparameter: die Pulsdauer wurde von 84 fs auf 68 fs reduziert (die Breite des Emissionsspektrums nahm proportional zu). Dementsprechend ermöglicht das vorgeschlagene Verfahren eine genaue Justierung der fs-Laserparameter. Weiterhin führte die Verschiebung des polykristallinen Cr:ZnS-Gain-Elements zu einer Variation der fs-Laserausgabeleistung bei der SHG-Wellenlänge (zwischen ~10 mW und ~20 mW). Die Zunahme der SHG-Ausgabe zeigt sich durch eine Verzerrung des Laseremissionsspektrums bei der Grundwellenlänge (hohe SHG-Ausgabe entspricht der flachen Oberseite einer Emissionsspitze, da ein signifikanter Anteil der Laseremission in SHG umgewandelt ist). Mit Bezug auf Fig. 14 führt die Fähigkeit zur genauen Steuerung der polykristallinen-TM:II-VI-KLM-Laserparameter zu einer Pulsdauer von 46 fs, was, wie zuvor erwähnt, nach dem Stand der Technik in Zusammenhang mit TM:II-VI-KLM-Lasern im Mittel-IR nie erreicht wurde.

**[0070]** Die gleichzeitige Anwesenheit des Kerr-Effekts und des ausreichend starken SHG-Effekts in den polykristallinen TM:II-VI-Materialien bietet folgende wichtige Anwendungen:

- (i) Verschiebung des polykristallinen TM:II-VI-Gain-Elements, das innerhalb des ebenen Resonators des KLM-Lasers montiert ist, entlang der Taille des Laserstrahls ermöglicht eine genaue Umverteilung der fs-Laserleistung zwischen der primären Ausgabe mit einer Grundwellenlänge und einer sekundären Ausgabe mit SHG-, THG-, FHG-, SFG-, DFG-Wellenlängen.
- (ii) Verschiebung des polykristallinen TM:II-VI-Gain-Elements, das innerhalb des ebenen Resonators des KLM-Lasers montiert ist, entlang der Taille des Laserstrahls ermöglicht eine genaue Steuerung von fs-Laserparametern (Pulsdauer, Breite und Form des Emissionsspektrums).
- (iii) Gleichzeitige Anwesenheit des Kerr-Effekts und des ausreichend starken SHG-Effekts in den polykristallinen TM:II-VI-Materialien macht die Erzeugung von kürzeren Laserpulsen (im Vergleich zu einem herkömmlichen Kerr-Linsen-modengekoppelten Regime) möglich.

**[0071]** Eine Vielzahl von Änderungen der offenbarten Struktur kann durchgeführt werden, ohne von dem Wesen und wesentlichen Merkmalen von dieser abzuweichen. Dementsprechend soll der gesamte Gegenstand, der in der obigen Beschreibung enthalten ist, als lediglich veranschaulichend und in einem beschränkenden Sinn interpretiert werden, wobei der Schutzzumfang der Offenbarung durch die beigefügten Ansprüche definiert wird.

## Patentansprüche

1. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser, der Folgendes umfasst:
  - eine Resonanzkavität; und
  - ein Gain-Medium, das aus polykristallinen Übergangsmetall-dotierten II-VT-Materialien, TM:II-VI, ausgewählt ist, wobei das Gain-Medium in einem normalen Einfallswinkel zu einem Pumpstrahl montiert ist und so in der Resonanzkavität montiert ist, dass Kerr-Linsen-Modenkopplung auslösbar ist, die ausreicht, so dass mit der Resonanzkavität ein gepulster Laserstrahl mit einer Grundwellenlänge emittierbar ist, wobei Pulse des emittierten Laserstrahls mit der Grundwellenlänge jeweils innerhalb eines Wellenlängenbereichs von 1,8–8 Mikrometer,  $\mu\text{m}$ , fallen, eine Pulsdauer in einem Zeitbereich von 30 bis 35 Femtosekunden, fs, und eine mittlere Ausgabeleistung in einem Leistungsbereich von

- 1 mW bis etwa 20 Watt, W, aufweisen, wobei der Laser eine linear polarisierte Faserlaserpumpquelle umfasst, die von einer Erbium- oder Thulium-dotierten Monomodenfaser ausgewählt ist, zwecks Emittierens eines Pumpstrahls, der mit einer Pumpwellenlänge unterschiedlich von der Grundwellenlänge in das Gain-Medium einkoppelbar ist, wobei der Laser- und der Pumpstrahl während einer Propagation durch das Gain-Medium kreisförmig verbleiben.
2. KLM-Laser nach Anspruch 1, wobei das Gain-Medium mit einer Phasenanpassungsbandbreite konfiguriert ist, die breit genug ist, um Emittieren des Ausgabelaserstrahls mit der halben Grundwellenlänge, SHG, innerhalb des gesamten Grundwellenlängenbereichs bereitzustellen.
  3. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 2, wobei die Phasenanpassungsbandbreite des Gain-Mediums ausreichend breit ist, damit Wellenlängen der zweiten, dritten und vierten Harmonischen der Grundwellenlänge gleichzeitig mit Letzterer erzeugt werden.
  4. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 1, wobei die Resonanzkavität eben ist.
  5. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 1, wobei das Gain-Medium TM-dotierte binäre und ternäre II-VI-Materialien beinhaltet.
  6. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 5, wobei die Materialien Folgende beinhalten:  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdS}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnTe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdMnTe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{CdZnTe}$ ,  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSSe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{CdSe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{CdS}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnTe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{CdMnTe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{CdZnTe}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSSe}$ .
  7. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 3, wobei die Resonanzkavität wenigstens zwei angrenzende, vorgelagerte und nachgelagerte dielektrisch beschichtete Umlenkspiegel beinhaltet, die entlang eines Pfads des Pumpstrahls beabstandet sind und die jeweils mit einem hohen Reflexionsgrad bei der Grundwellenlänge und einer hohen Transmission bei der Pumpwellenlänge konfiguriert sind, wobei das Gain-Medium sich zwischen den Umlenkspiegeln befindet und von diesen beabstandet ist, wobei der nachgelagerte Umlenkspiegel konfiguriert ist, die Wellenlänge der hohen Harmonischen wenigstens teilweise zu transmittieren.
  8. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 7, wobei die Resonanzkavität ferner einen bei der Grundwellenlänge teilweise transmittierenden Ausgabeauskoppler und wenigstens einen dem Ausgabeauskoppler vorgelagerten ebenen dichroitischen Spiegel, der mit einem hohen Reflexionsgrad bei der Grundwellenlänge konfiguriert ist, und wenigstens eine Zwischenplatte mit einer hohen Transmission bei der Grund- und einer Hohen-Harmonischen-Wellenlänge beinhaltet.
  9. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 8, wobei die Resonanzkavität ferner ein Dispersionskompensationselement beinhaltet, das als eine planparallele Platte oder ein planparalleles Prisma, die oder das in einem Brewster-Winkel montiert ist, konfiguriert ist und betriebsfähig ist, eine Dispersion zu beschränken.
  10. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 9, wobei die Resonanzkavität ferner einen Brewster-montierten doppelbrechenden Auswahlfiler beinhaltet.
  11. Kerr-Linsen-modengekoppelter Laser nach Anspruch 2, der ferner einen Linearverstärker umfasst, der das Gain-Medium innerhalb der Resonanzkavität entlang einer Taille des Laserstrahls versetzt, um die mittlere Leistung des Laserstrahls zwischen einer primären Ausgabe des emittierten Laserstrahls mit der Grundwellenlänge und sekundären Ausgaben mit jeweiligen Wellenlängen der zweiten, dritten und vierten Harmonischen steuerbar umzuverteilen.
  12. Verfahren zu einer Femtosekundenlaseremission in einem Kerr-Linsen-modengekoppelten Laser, KLM, das Folgendes umfasst: Bereitstellen einer Resonanzkavität mit Mehrfachdurchgang; und Montieren eines Gain-Mediums innerhalb der Resonanzkavität bei einem normalen Einfallswinkel zu einem Pumpstrahl, welches Gain-Medium aus übergangsmetall-dotierten II-VI-Materialien, TM:II-VI-Materialien, ausgewählt wird, wodurch die Resonanzkavität Kerr-Linsen-modengekoppelt wird, so dass sie eine primäre Ausgabe der Laseremission einschliesslich eines Zuges von Ausgabepulsen mit einer Grundwellenlänge emittiert, wobei die Pulse jeweils innerhalb eines Wellenlängenbereichs von 1,8–8 Mikrometer,  $\mu\text{m}$ , variieren, eine Pulsdauer in einem Zeitbereich gleich oder länger als 30–35 Femtosekunden, fs, und eine mittlere Ausgabeleistung in einem Leistungsbereich innerhalb von 1 mW bis 20 Watt, W, aufweisen.
  13. Verfahren nach Anspruch 12, das ferner Bereitstellen einer sekundären Ausgabe des Laserstrahls mit einer Wellenlänge der zweiten Harmonischen der Grundwellenlänge entlang des Wellenlängenbereichs zusammen mit der primären Ausgabe umfasst.
  14. Verfahren nach Anspruch 13, das ferner Bereitstellen von zusätzlichen Ausgaben des Laserstrahls mit Wellenlängen der dritten und vierten Harmonischen der Grundwellenlänge gleichzeitig mit der primären und sekundären Ausgabe umfasst.
  15. Verfahren nach Anspruch 14, das ferner Folgendes umfasst:  
Erzeugen eines Pumpstrahls mit einer Pumpwellenlänge unterschiedlich von der Grundwellenlänge und Einkoppeln des Pumpstrahls in das Gain-Medium, und  
Erzeugen zusätzlicher Ausgaben des Laserstrahls mit einer Summe der Pump- und Grundwellenlänge und einer Differenz zwischen diesen und einer Summe der Grundwellenlänge und Wellenlängen der zweiten, dritten und vierten optischen Harmonischen und einer Differenz von diesen.

FIG. 1  
Stand der Technik

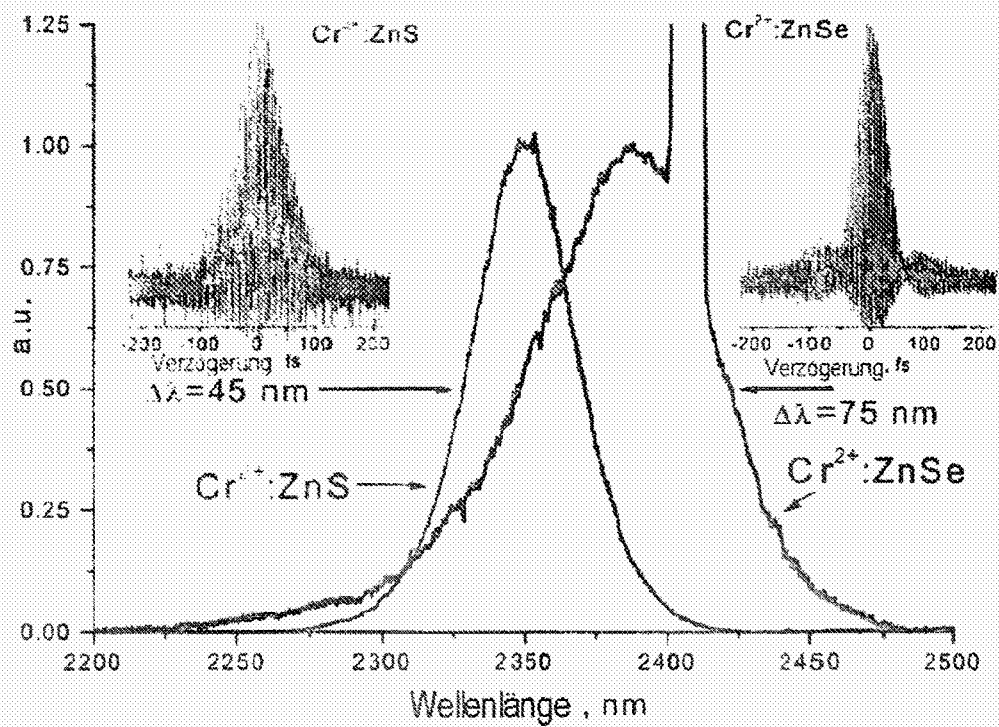
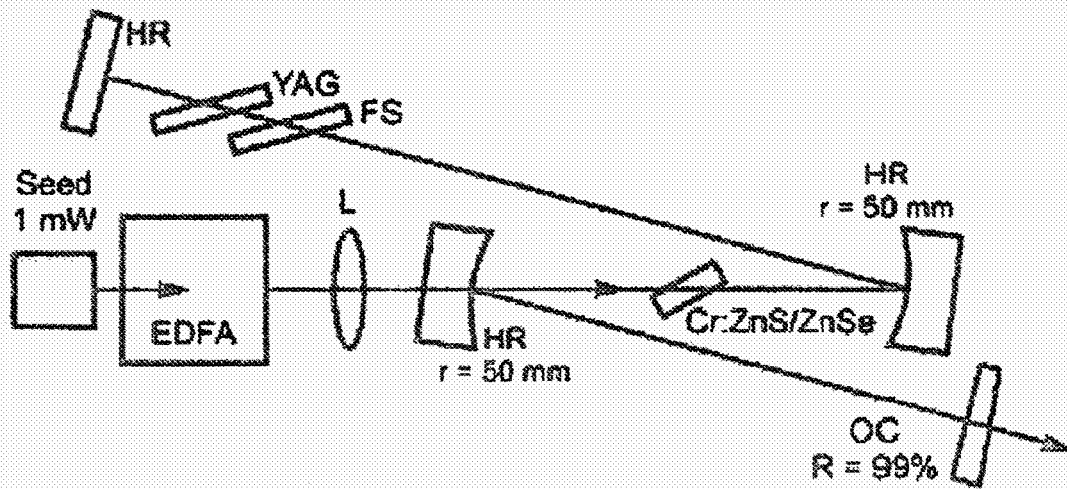


FIG. 2  
Stand der Technik

FIG. 3  
Stand der Technik

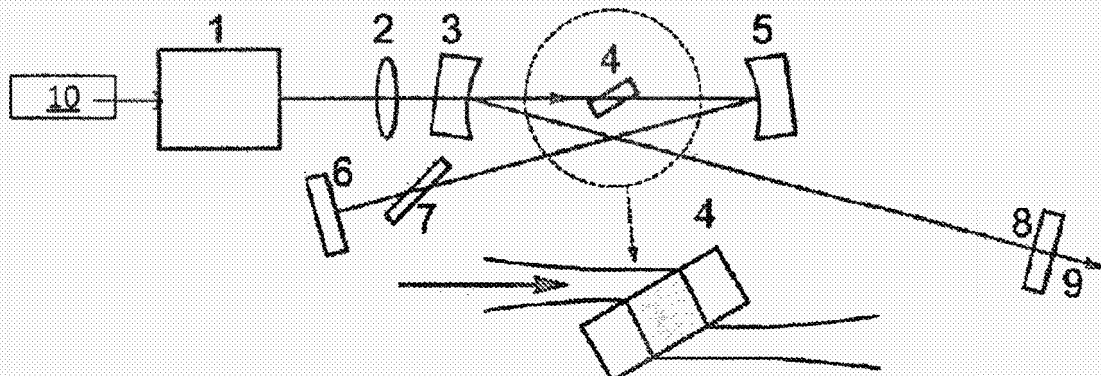


FIG. 3A  
Stand der Technik

FIG. 4B

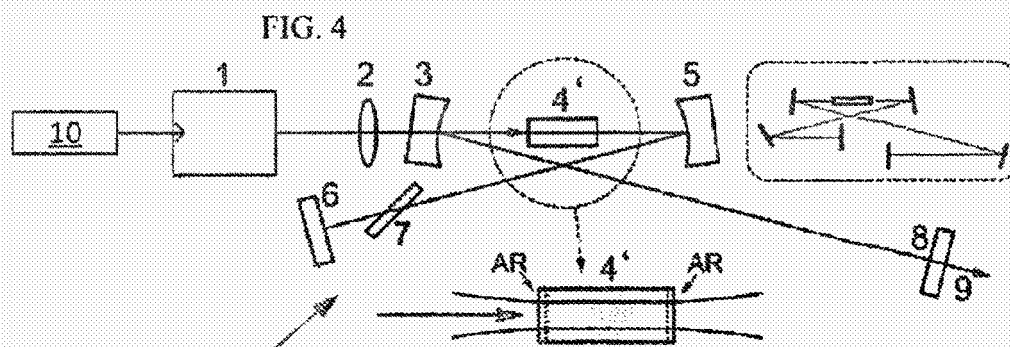
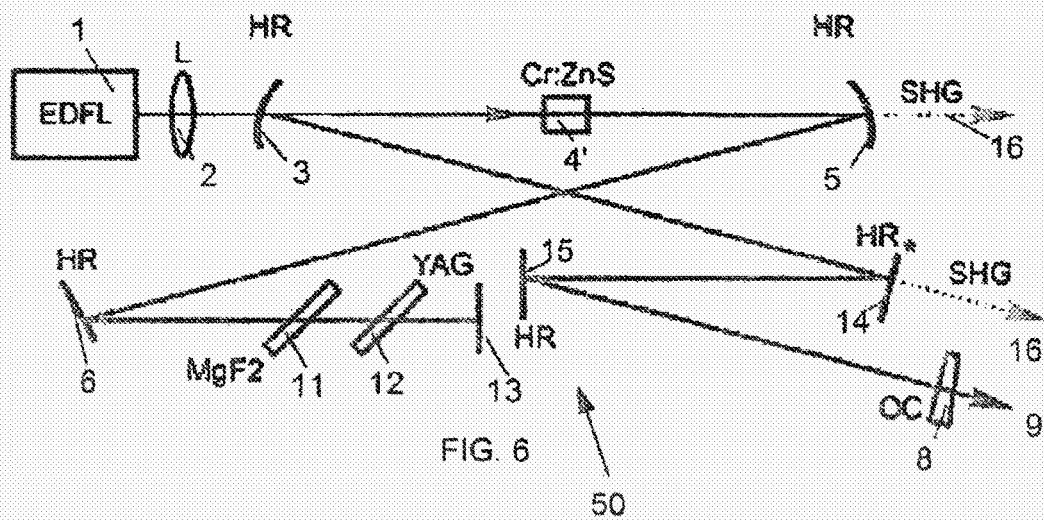
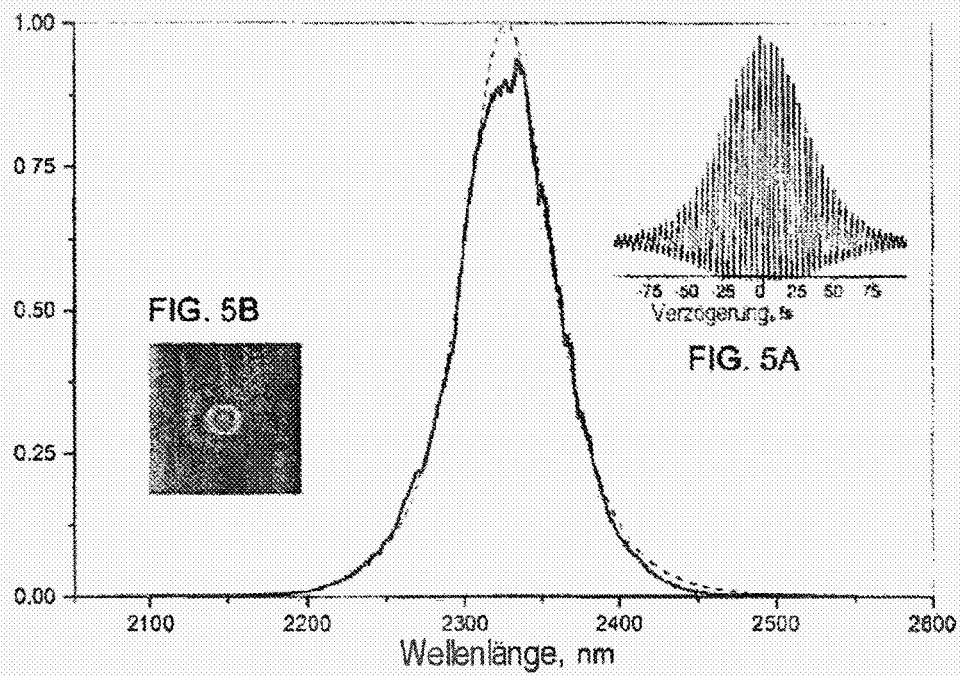


FIG. 4A



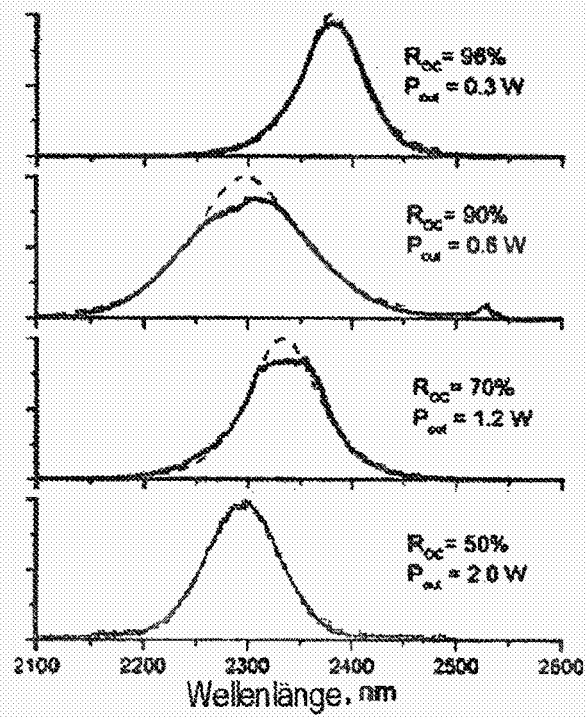


FIG. 7

FIG. 8

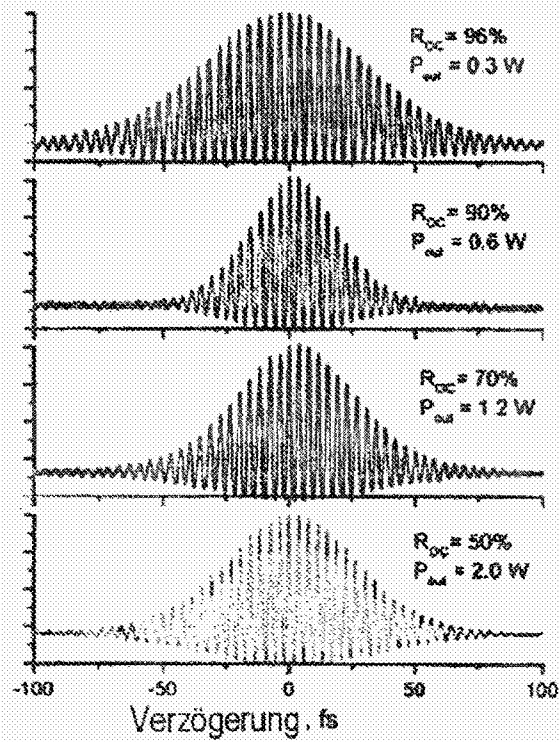


FIG. 9

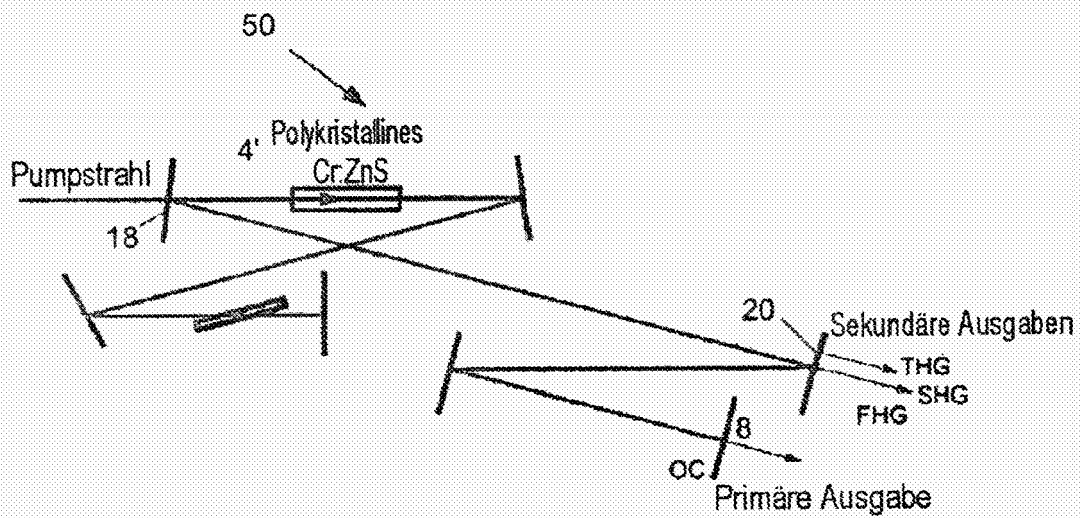
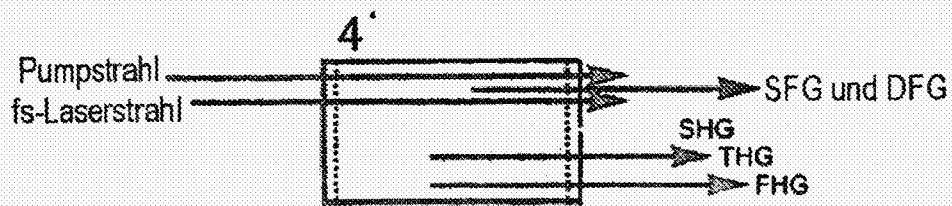


FIG. 10

FIG. 11B

FIG. 11A

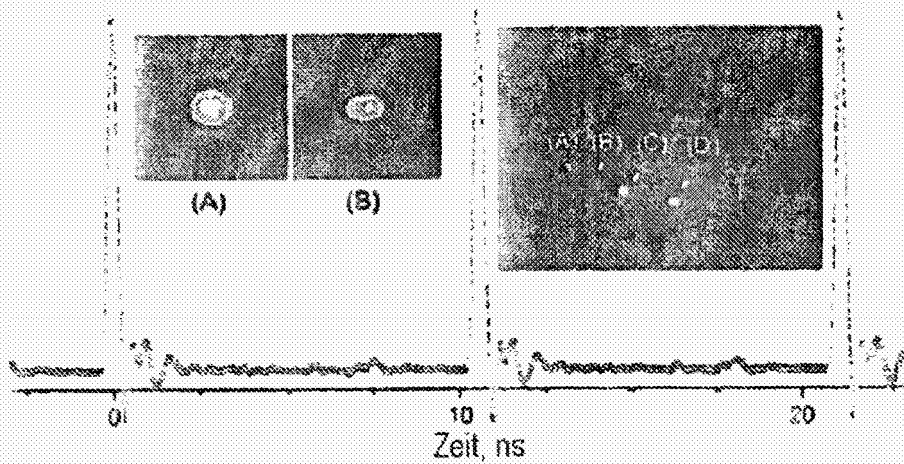


FIG. 11C

