

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
26. Dezember 2024 (26.12.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/259468 A1

(51) Internationale Patentklassifikation: H01S 3/00 (2006.01) H01S 3/23 (2006.01)	1040 Wien (AT). IMANI, Aref ; Karlsplatz 13, 1040 Wien (AT).
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/AT2024/060242	(74) Anwalt: SONN PATENTANWÄLTE GMBH & CO KG ; Riemergasse 14, 1010 Wien (AT).
(22) Internationales Anmeldedatum: 21. Juni 2024 (21.06.2024)	(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.
(25) Einreichungssprache: Deutsch	
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch	
(30) Angaben zur Priorität: A 50501/2023 23. Juni 2023 (23.06.2023) AT	
(71) Anmelder: TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN [AT/AT]; Karlsplatz 13, 1040 Wien (AT).	
(72) Erfinder: BALTUSKA, Andrius ; Karlsplatz 13, 1040 Wien (AT). CARPEGGIANI, Paolo A. ; Karlsplatz 13,	

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR MANIPULATING PULSED LASER RADIATION

(54) Bezeichnung: VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM MANIPULIEREN VON GEPULSTER LASER- STRAHLUNG

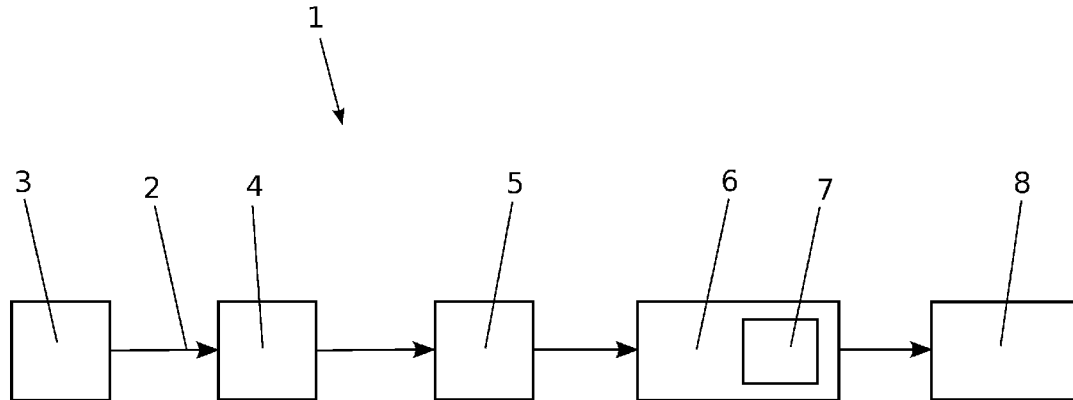


Fig.1

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for manipulating pulsed laser radiation (2), having the following steps: - providing pulsed laser radiation (2); - spatially separating the frequency components of the pulsed laser radiation (2) to a first predetermined extent in a direction perpendicular to a propagation direction of the pulsed laser radiation (2); - guiding pulsed laser radiation (2), spatially separated to the first predetermined extent, to a multiple-pass gas cell (8); - increasing the spectral bandwidth of the pulsed laser radiation (2) in the multiple-pass gas cell (8) for temporal pulse compression of the pulsed laser radiation (2). The invention also relates to a corresponding device (1).

(57) **Zusammenfassung:** Verfahren zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung (2) auf- weisend die Schritte: - Bereitstellen gepulster Laserstrahlung (2); - räumliches Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) in einem ersten vorbestimmten Ausmaß in eine Richtung senkrecht zu einer Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung (2); - Führen der im ersten vorbestimm-



(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)
- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

ten Ausmaß räumlich separierten gepulsten Laserstrahlung (2) zu einer Mehrfachdurchgangsgaszelle (8); - Erhöhen der spektralen Bandbreite der gepulsten Laserstrahlung (2) in der Mehrfachdurchgangsgaszelle (8) zur zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung (2). Weiters eine entsprechende Vorrichtung (1).

Vorrichtung und Verfahren zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung.

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden Hohlkernfasern (HCF) für die Pulskompression verwendet, da sie eine spektrale Verbreiterung bewirken und eine Wellenleitergeometrie aufweisen, mit der die Länge der nichtlinearen optischen Wechselwirkung bei vernachlässigbarer Dispersion auf mehrere Meter verlängert werden kann. Mehrfachdurchgangsgaszellen (Multipass-Gaszelle (MPC)) haben sich jedoch als praktische Alternative zu HCF erwiesen, um eine spektrale Verbreiterung durch Selbstphasenmodulation (SPM) in Gasen zu bewirken. Im Vergleich zu HCF bieten MPC kompaktere Aufbauten und weniger anspruchsvolle Einschränkungen in Bezug auf die Stabilität der Strahlausrichtung. Dennoch leiden beide Lösungen unter einer ungünstigen räumlichen Skalierung der Aufbauten, wenn Pulse mit höheren Energien behandelt werden.

Die externe Pulskompression mit Hilfe einer MPC ist eine äußerst leistungsfähige Technik zur Verkürzung der Dauer von Sub-ps-Laserpulsen (vgl. M. Hanna, X. Délen, L. Lavenu, F. Guichard, Y. Zaouter, F. Druon, und Patrick Georges, "Nonlinear temporal compression in multipass cells: theory" J. Opt. Soc. Am. B 34, 1340-1347 (2017)). Trotz ihres enormen Erfolgs und ihrer Vielseitigkeit steht die MPC-Methode vor der Herausforderung, mit hoher Energie umzugehen, da eine ungünstige geometrische Skalierung eine rasche Vergrößerung des Abstands zwischen den Hohlspiegeln und der entsprechenden Größe der Vakuumkammer erfordert.

Zwei Materialparameter - die Ionisationsschwelle des als Selbstphasenmodulation-(SPM-)Medium verwendeten Gases (typischerweise Ar für höhere Pulsenergien) und die Zerstörungsschwelle der dielektrischen Beschichtung auf den Zellenspiegeln - bestimmen die Längenskalierung der MPC in Abhängigkeit von der Pulsenergie. Während die Stärke der SPM durch Einstellung des Edelgasdrucks kontrolliert werden kann, gilt dies nicht für die Plasmaverlust-

te. Letztere können nur durch eine ausreichend große Strahltaille unterdrückt werden, um die Spitzenintensität des Pulses auf einem sicheren niedrigen Niveau zu halten. Wegen der losen Fokussierung ist eine lange Propagationsdistanz zum Spiegel erforderlich, um die Strahlgröße zu vergrößern und die Fluenz auf ein sicheres Niveau zu senken, das bei den derzeit verfügbaren Beschichtungen bei $\sim 0,5\text{--}0,6 \text{ J/cm}^2$ für sub-ps-Pulse liegt. In M. Kaumanns, D. Kormin, T. Nubbemeyer, V. Pervak, und S. Karsch, "Spectral broadening of 112 mJ, 1.3 ps pulses at 5 kHz in a LG10 multipass cell with compressibility to 37 fs" Opt. Lett. 46, 929-932 (2021) wurde ein Versuch unternommen, die Fluenz zu reduzieren, indem die grundlegende räumliche Mode des Laserstrahls in eine Mode höherer Ordnung umgewandelt wurde, die eine deutlich größere Spotgröße ermöglicht.

MPC sind also in der Pulsenergie und der entsprechenden Pulsintensität aufgrund der Zerstörungsschwelle der Optik und der Ionisationsgrenze des Gases in der Zelle begrenzt. Folglich erfordert die Energieskalierung der Laserpulse auch eine räumliche Skalierung der MPC, d. h. für höhere Pulsenergien werden größere MPC benötigt.

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, einen oder mehrere der Nachteile des Stands der Technik zu lindern oder zu beseitigen. Insbesondere liegt die Aufgabe der Erfindung darin, eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Bereitstellung gepulster Laserstrahlung, bevorzugt zur Pulskompression insbesondere bei der Verstärkung gechirpter Pulse (Chirped Pulse Amplification, CPA) und/oder zur CPA, vorzuschlagen, die höhere Pulsenergien erlauben und/oder eine geringere Größe des MPCs ermöglichen.

Die wird gelöst durch ein Verfahren zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung aufweisend die Schritte:

- Bereitstellen gepulster Laserstrahlung;
- räumliches Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung in einem ersten vorbestimmten Ausmaß in eine Richtung senkrecht zu einer Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung;
- Führen der im ersten vorbestimmten Ausmaß räumlich separierten gepulsten Laserstrahlung zu einer Mehrfachdurchgangsgas-

zelle;

- Erhöhen der spektralen Bandbreite der gepulsten Laserstrahlung in der Mehrfachdurchgangsgaszelle zur zeitlichen Puls-kompression der gepulsten Laserstrahlung.

Dies wird weiters gelöst durch eine Vorrichtung zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung, aufweisend:

- eine Vorrichtung zum Bereitstellen gepulster Laserstrahlung;
- ein Separationselement zum räumlichen Separieren der Frequenzen der gepulsten Laserstrahlung in einem ersten vorbestimmten Ausmaß in eine Richtung senkrecht zu einer Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung;
- eine Mehrfachdurchgangsgaszelle zur Erhöhung der spektralen Bandbreite der gepulsten Laserstrahlung zur zeitlichen Puls-kompression der gepulsten Laserstrahlung, wobei die Mehrfach-durchgangszelle im optischen Pfad der gepulsten Laserstrahlung hinter dem Separationselement angeordnet ist.

Wenn die Energie des Laserpulses erhöht wird, überschreitet die Intensität im Laserfokus die Schwelle des optimalen Bereichs. Um den Anstieg der Intensität bei gleichzeitiger Erhöhung der Energie zu vermeiden, ist es erforderlich, die Größe des Laserfokus zu erhöhen.

$$I=E/(A*\tau),$$

mit I=Intensität, E=Laserpulsenergie, A=Fläche des Laserfokus, τ =Laserpulsdauer. Die Größe des Laserfokus r [$r \propto f/a$, r =Radius des Laserfokus, f =Abstand des Fokus, a =Radius des Laserspots auf dem Spiegel] kann in der MPC vergrößert werden:

- durch Verkleinerung der Größe (a) des Lasers auf den Spiegeln => begrenzt durch Laserschäden auf den Spiegeln
- durch Vergrößerung des Abstands (f) zwischen den Spiegeln und dem Fokus => begrenzt durch die Beschränkungen für die maximal zulässige Größe der MPC.

Durch das räumliche Separieren vor dem Zuführen zur Mehrfach-durchgangsgaszelle wird die Größe des kollimierten Strahls in der Mehrfachdurchgangsgaszelle (insbesondere an den Spiegeln der Mehrfachdurchgangsgaszelle) erhöht. Gleichzeitig bleibt die Größe des Strahls im Fokus erhalten. Bemerkenswert ist, dass die

Intensität auf den Spiegeln sogar noch schneller abnimmt als die Fluenz, da sich die effektive Pulsdauer auf den Spiegeln aufgrund des monochromatisierenden Effekts des räumlichen Chirpings ändert. Dies ist insofern von Bedeutung, als sich der Schädigungsmechanismus vorteilhafterweise von einem Lawinen-dominierten Effekt (für fs-Pulse) zu einem thermisch dominierten Effekt ($>>ps$) ändert, was die Verwendung höherer Fluenzen ermöglicht. Es wird also die Pulsdauer des kollimierten Strahls erhöht, wohingegen die ursprüngliche Pulsdauer beim Fokussieren des Strahls wiederhergestellt wird. Im Ergebnis ist es somit möglich, die Laserenergie in der Optik zu erhöhen, ohne die Eigenschaften des Laserpulses (Dauer) und des Strahls (Spotgröße) im Fokus zu ändern, wo die gewünschte spektrale Bandbreitenerhöhung normalerweise stattfindet. Durch die Reduktion der Fluenz auf den optischen Elementen der Mehrfachdurchgangsgaszelle wird das maximale Pulsenergielimit bspw. um einen Faktor von zwischen 1,4 und 2 bei feststehender Länge der Mehrfachdurchgangsgaszelle erhöht. Für eine feststehende Pulsenergie kann die Länge der Mehrfachdurchgangsgaszelle bspw. um einen Faktor von 1,4 bis 2 verringert werden.

Unter zeitlichem Verbreitern wird zeitliches Strecken der Frequenzanteile verstanden, also das Einführen eines temporal chirps (synonym verwendet zu spectral chirps). Zeitliches Verbreitern bezeichnet den umgekehrten Prozess zur zeitlichen Kompression. Unter dem räumlichen Separieren wird das Einführen eines spatial chirps verstanden. Unter der Beugung in unterschiedliche Winkel wird das Einführen eines angular chirps verstanden. Bevorzugt wird das räumliche Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung im ersten vorbestimmten Ausmaß vor dem Führen der gepulsten Laserstrahlung zur MPC nicht rückgängig gemacht. Bevorzugt ist die gepulste Laserstrahlung beim Injizieren in die MPC gegenüber der ursprünglich bereitgestellten gepulsten Laserstrahlung um den Faktor verbreitert, um den die gepulste Laserstrahlung beim räumlichen Separieren im ersten vorbestimmten Ausmaß verbreitert wurde.

Die Mehrfachdurchgangsgaszelle ist insbesondere mit einem Füllgas, beispielsweise Argon, gefüllt, das eine optische Nichtlinearität aufweist. Die Mehrfachdurchgangsgaszelle enthält insbe-

sondere ein Medium mit nichtlinearen optischen Eigenschaften, in dem die gepulste Laserstrahlung durch Selbstphasenmodulation eine nichtlineare Phase erhalten. Die MPC weist bevorzugt zumindest zwei Spiegelemente auf, zwischen denen die gepulste Laserstrahlung mehrfach reflektiert wird. Insbesondere weist die Mehrfachdurchgangsgaszelle zwei gegenüberliegende Spiegel auf, die einen konzentrischen Resonator ausbilden, der mehrfach von der gepulsten Laserstrahlung durchlaufen wird. Bevorzugt ist das nichtlineare Medium, insbesondere Argon, zwischen den Spiegeln vorgesehen. Es können selbstverständlich auch mehrere nichtlineare Elemente als nichtlineares Medium zwischen den Spiegeln angeordnet sein. Die gepulste Laserstrahlung wird insbesondere in die Mehrfachdurchgangszelle injiziert. Die MPC weist vorzugsweise zwei sphärische Spiegel auf, insbesondere solche mit niedriger Dispersion (z.B. Optoman).

Vorzugsweise weist die Vorrichtung eine Laserstrahlungsquelle zur Bereitstellung der gepulsten Laserstrahlung auf. Die gepulste Laserstrahlung sind insbesondere Ultrakurzpulsfolgen. Die (ursprünglich (d.h. vor Durchführung der restlichen Schritte des Verfahrens), insbesondere von der Laserstrahlungsquelle) bereitgestellte gepulste Laserstrahlung umfasst Laserpulse mit Pulsennergien im Bereich von 0,5 mJ bis 25 mJ, bevorzugt 1 mJ bis 14 mJ, insbesondere mit 2,5 mJ, und Pulsdauern im Bereich von 10 fs bis 5 ps, bevorzugt 100 fs bis 500 fs, insbesondere von 250 fs.

Das Ausmaß der Verbreiterung bezeichnet insbesondere den Faktor zwischen der Strahlentaille vor der Verbreiterung und nach der Verbreiterung (in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung). Es ist vorteilhaft, wenn beim räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung im ersten vorbestimmten Ausmaß eine Verbreiterung der gepulsten Laserstrahlung in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung auf zumindest das 1,5-Fache, bevorzugt zumindest das Doppelte, besonders bevorzugt zumindest das 3-Fache, erfolgt.

Vorzugsweise weist das Verfahren den folgenden Schritt, der vor dem Erhöhen der spektralen Bandbreite der gepulsten Laserstrahlung in der Mehrfachdurchgangsgaszelle durchgeführt wird (und

vor dem Führen der im ersten vorbestimmten Ausmaß räumlich separierten gepulsten Laserstrahlung zu einer Mehrfachdurchgangsgaszelle), auf:

- zeitliche Pulskompression (der Frequenzanteile) der gepulsten Laserstrahlung in einer Dispersionsanordnung, die zumindest zwei dispersive Elemente, insbesondere optische Gitter, aufweist, die dazu eingerichtet sind, ein räumliches Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung um ein zweites vorbestimmtes Ausmaß zu bewirken und nach einer Propagation über eine frequenzabhängig unterschiedliche optische Pfadlänge ein Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung entsprechend dem zweiten Ausmaß zu bewirken, sodass eine zeitliche Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung bewirkt wird. Dabei kann es sich um eine zeitliche Pulskompression handeln, wie diese bei der CPA durchgeführt wird. Vorzugsweise wird ein kollimierter, lateral expandierter (verbreiteter) Strahl erhalten, indem die Symmetrie zwischen einem eingehenden und einem ausgehenden Durchlauf der Dispersionsanordnung, insbesondere der zumindest zwei dispersiven Elemente, gebrochen wird. Es ist vorteilhaft, wenn beim räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung im zweiten vorbestimmten Ausmaß eine Verbreiterung der gepulsten Laserstrahlung in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung auf zumindest das 1,5-Fache, bevorzugt zumindest das Doppelte, besonders bevorzugt zumindest das 3-Fache, erfolgt. Vorzugsweise erfolgt beim räumlichen Zusammenführen zumindest eine entsprechende Verschmälerung. Es ist vorteilhaft, wenn beim räumlichen Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung im zweiten vorbestimmten Ausmaß eine Verschmälerung der gepulsten Laserstrahlung in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung auf gleich oder weniger als das $2/3$ -Fache, bevorzugt gleich oder weniger als das Halbe, besonders bevorzugt gleich oder weniger als das $1/3$ -Fache, erfolgt. Insbesondere werden beim räumlichen Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung im zweiten vorbestimmten Ausmaß die ursprüngliche Spotgröße und die ursprüngliche Überlappung der verschiedenen Frequenzanteile wiederhergestellt.

Es ist vorteilhaft, wenn

zum räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung um das zweite vorbestimmte Ausmaß mit einem ersten der zumindest zwei dispersiven Elemente die Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung in unterschiedliche Winkel gebeugt werden und mit einem zweiten der zumindest zwei dispersiven Elemente die in unterschiedliche Winkel gebeugten Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung kollimiert werden; und

zum räumlichen Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung entsprechend dem zweiten Ausmaß mit dem zweiten der zumindest zwei dispersiven Elemente die Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung in unterschiedliche Winkel gebeugt werden und mit dem ersten der zumindest zwei dispersiven Elemente die in unterschiedliche Winkel gebeugten Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung kollimiert werden. Die Dispersionsanordnung kann einen Treacy-Paar-Kompressor (ggf. zusätzlich mit einem Separationselement, s.u.) aufweisen.

Es ist vorteilhaft, wenn das räumliche Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung in dem ersten vorbestimmten Ausmaß in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung erfolgt, indem sich eine erste optische Pfadlänge der gepulsten Laserstrahlung zwischen dem ersten der zumindest zwei dispersiven Elemente und dem zweiten der zumindest zwei dispersiven Elemente beim räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung um das zweite vorbestimmte Ausmaß unterscheidet von einer zweiten optischen Pfadlänge der gepulsten Laserstrahlung zwischen dem zweiten der zumindest zwei dispersiven Elemente und dem ersten der zumindest zwei dispersiven Elemente beim räumlichen Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung entsprechend dem zweiten Ausmaß. Damit kann ein kontrolliertes Ausmaß an spatial chirp in den resultierenden Strahl eingeführt werden.

Es ist bevorzugt, wenn das räumliche Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung in dem ersten vorbestimmten Ausmaß in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung bei der zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung mit einem Separationselement in der Dispersionsanordnung bewirkt wird. Vorteilhafterweise können damit die bereits verfügbaren dispersiven Elemente zum Erzielen

des spatial Chirps im ersten Ausmaß verwendet werden. Vorzugsweise wird das räumliche Separieren im ersten Ausmaß (im Unterschied zum räumlichen Separieren im zweiten Ausmaß, das der zeitlichen Pulskompression dient) nicht umgekehrt. Das Separationselement bewirkt dabei insbesondere den oben beschriebenen Unterschied in der optischen Pfadlänge.

Es ist bevorzugt, wenn die gepulste Laserstrahlung in der Dispersionsanordnung mit einem Spiegel reflektiert wird, wobei die gepulste Laserstrahlung in der Dispersionsanordnung (von einem Eingang der Dispersionsordnung) entlang eines ersten optischen Pfads zum Spiegel propagiert wird und nach der Reflektion am Spiegel entlang eines zweiten optischen Pfads (zu einem Ausgang der Dispersionsordnung) propagiert wird, wobei die zumindest zwei dispersiven Elemente im ersten optischen Pfad und im zweiten optischen Pfad liegen, wobei das Separationselement nur im ersten optischen Pfad oder nur im zweiten optischen Pfad liegt.

Es ist vorteilhaft, wenn das Separationselement vier Spiegel aufweist. Damit kann auf einfache Weise ein kontrolliertes Ausmaß an spatial chirp bewirkt werden.

Vorzugsweise ist das Verfahren ein Verfahren zur CPA. Vorzugsweise weist das Verfahren weiter die folgenden Schritte auf, die vor dem räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung im ersten vorbestimmten Ausmaß durchgeführt werden:

- zeitliches Verbreitern/Strecken der gepulsten Laserstrahlung (vorzugsweise im umgekehrten Ausmaß zur zeitlichen Pulskompression mit der Dispersionsanordnung);
- Verstärken der zeitlich verbreiterten gepulsten Laserstrahlung.

Bezugnehmend auf die Vorrichtung ist es vorteilhaft, wenn diese eine Dispersionsanordnung, bevorzugt einen Gitterpaar-Pulskompressor, insbesondere einen Treacy-Paar-Pulskompressor, zur zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung mit zumindest zwei dispersiven Elementen, insbesondere optischen Gittern, aufweist. Die dispersiven Elemente sind insbesondere dazu eingerichtet, ein räumliches Separieren der Frequenzanteile

der gepulsten Laserstrahlung um ein zweites vorbestimmtes Ausmaß zu bewirken und nach einer Propagation über eine frequenzabhängig unterschiedliche optische Pfadlänge ein Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung entsprechend dem zweiten Ausmaß zu bewirken, sodass eine zeitliche Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung bewirkt wird. Die dispersiven Elemente sind insbesondere dazu eingerichtet, dass zum räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung um das zweite vorbestimmte Ausmaß mit einem ersten der zumindest zwei dispersiven Elemente die Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung in unterschiedliche Winkel gebeugt werden und mit einem zweiten der zumindest zwei dispersiven Elemente die in unterschiedliche Winkel gebeugten Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung kollimiert werden; und

zum räumlichen Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung entsprechend dem zweiten Ausmaß mit dem zweiten der zumindest zwei dispersiven Elemente die Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung in unterschiedliche Winkel gebeugt werden und mit dem ersten der zumindest zwei dispersiven Elemente die in unterschiedliche Winkel gebeugten Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung kollimiert werden.

Es ist vorteilhaft, wenn die Dispersionsanordnung einen Spiegel aufweist, der angeordnet ist, sodass die gepulste Laserstrahlung in der Dispersionsanordnung entlang eines ersten optischen Pfads zum Spiegel propagiert wird und nach der Reflektion am Spiegel entlang eines zweiten optischen Pfads propagiert wird, wobei die zumindest zwei dispersiven Elemente im ersten optischen Pfad und im zweiten optischen Pfad liegen, wobei das Separationselement nur im ersten optischen Pfad oder nur im zweiten optischen Pfad vorgesehen ist.

Es ist bevorzugt, wenn das Separationselement vier Spiegel aufweist, die insbesondere eine Verlängerung des optischen Pfads erzielen.

Es ist vorteilhaft, wenn die Vorrichtung aufweist:

- eine Verbreiterungsvorrichtung zum zeitlichen Verbreitern der gepulsten Laserstrahlung;
- eine Verstärkungsvorrichtung zur Verstärkung der zeitlich

verbreiterten gepulsten Laserstrahlung;

wobei das Separationselement und die Mehrfachdurchgangszelle im optischen Pfad der gepulsten Laserstrahlung nach der Verbreiterungsvorrichtung und der Verstärkungsvorrichtung vorgesehen sind. Die Verstärkungsvorrichtung kann eine oder mehrere Verstärkungsstufen aufweisen.

Die Vorrichtung zum Bereitstellen gepulster Laserstrahlung kann eine Laserstrahlenquelle umfassen. Vorzugsweise umfasst die Vorrichtung zum Bereitstellen gepulster Laserstrahlung: die Laserstrahlenquelle, die Verbreiterungsvorrichtung, die Verstärkungsvorrichtung und optional die Dispersionsanordnung. Die MPC dient vorzugsweise als Postkompressor. Vorteilhafterweise tritt der Postkompressionseffekt (d.h. die spektrale Verbreiterung) hauptsächlich im Laserfokus in der Mitte des Postkompressors auf.

Fig. 1 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform einer Vorrichtung zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung.

Fig. 2 zeigt schematisch eine bevorzugt Ausführungsform einer bekannten Dispersionsanordnung.

Fig. 3 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform einer Dispersionsanordnung der Vorrichtung zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung, mit einem Separationselement.

Fig. 4 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform einer Mehrfachdurchgangsgaszelle der Vorrichtung zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung.

Fig. 5 zeigt die Fluenz und die Strahltaille in Abhängigkeit vom Ausmaß der räumlichen Separation.

Fig. 6a zeigt die Spitzenleistung und Fig. 6b die Spotgröße am Weg zum Fokus.

Fig. 7a zeigt normierte Intensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge und Fig. 7b die normierte Intensität in Abhängigkeit von der Pulsdauer.

Fig. 1 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform einer Vorrichtung 1 zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung 2. In dieser Ausführungsform ist die Vorrichtung 1 zur CPA eingerichtet. Die Vorrichtung 1 weist eine Vorrichtung 3 zum Bereitstellen gepulster Laserstrahlung 2 auf, insbesondere eine Laserstrahlenquelle, auf. Die gepulste Laserstrahlung 2 wird zu einer Verbreiterungsvorrichtung 4 zum zeitlichen Strecken der gepulsten Laserstrahlung 2 geführt. Die zeitlich verbreiterte Laserstrahlung 2 wird in einer Verstärkungsvorrichtung 5 verstärkt. In einer Dispersionsanordnung 6 erfolgt die zeitliche Pulskompression der verstärkten gepulsten Laserstrahlung 2. Die Dispersionsanordnung 6 weist auch ein Separationselement 7 zum räumlichen Separieren der Frequenzen der gepulsten Laserstrahlung 2 in einem ersten vorbestimmten Ausmaß in eine Richtung senkrecht zu einer Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung 2 auf. Alternativ kann das Separationselement 7 unabhängig (außerhalb) von der Dispersionsanordnung 6 vorgesehen sein. Die (wieder) zeitlich komprimierte, im ersten Ausmaß räumlich verbreiterte gepulste Laserstrahlung 2 wird zu einer Mehrfachdurchgangsgaszelle 8 geführt, die zur Erhöhung der spektralen Bandbreite der gepulsten Laserstrahlung 2 zur (weiteren) zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung 2 eingerichtet ist. Durch die räumliche Verbreiterung im ersten Ausmaß wird die Größe des kollimierten Strahls in der Mehrfachdurchgangsgaszelle 8 erhöht. Gleichzeitig bleibt die Größe des Strahls im Fokus der MPC 8 erhalten. Es wird die Pulsdauer des kollimierten Strahls erhöht, wohingegen die ursprüngliche Pulsdauer beim Fokussieren des Strahls wiederhergestellt wird. Im Ergebnis ist es somit möglich, die Laserenergie in der Optik zu erhöhen, ohne die Eigenschaften des Laserpulses (Dauer) und des Strahls (Spotgröße) im Fokus zu ändern.

Die Vorrichtung 1 kann auch lediglich die Vorrichtung 3 zum Bereitstellen der gepulsten Laserstrahlung 2, das Separationselement 7 und die Mehrfachdurchgangsgaszelle 8 aufweisen.

Fig. 2 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform einer bekannten Dispersionsanordnung 6, die auch bei der Vorrichtung 1 zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung 2 zur Anwendung kommen kann (dies ist insbesondere bevorzugt, wenn die Dispersi-

onsanordnung 6 und das Separationselement 7 getrennt ausgeführt sind). In dieser Ausführungsform ist der Dispersionsanordnung 6 insbesondere ein Treacy-Paar-Pulskompressor. Die Dispersionsanordnung 6 weist einen Eingangsspiegel IM, einen Mittelspiegel RM und einen Ausgangsspiegel OM auf. Eine obere Ebene der Dispersionsanordnung 6, die einen ersten optischen Pfad 9 der gepulsten Laserstrahlung 2 in der Dispersionsanordnung 6 vom Eingangsspiegel IM zum Mittelspiegel RM darstellt, ist in Teilfigur (a) dargestellt. Eine untere Ebene der Dispersionsanordnung 6, die einen zweiten optischen Pfad 10 der gepulsten Laserstrahlung 2 in der Dispersionsanordnung 6 vom Mittelspiegel RM zum Ausgangsspiegel OM darstellt, ist in Teilfigur (b) dargestellt.

Die Dispersionsanordnung 6 weist ein erstes optisches Gitter G1 und ein zweites optisches Gitter G2 auf, die beide im ersten optischen Pfad 9 und im zweiten optischen Pfad 10 liegen. Die gepulste Laserstrahlung 2 wird über den Eingangsspiegel IM in die Dispersionsanordnung gekoppelt. Das erste optische Gitter G1 bewirkt eine Auffächerung der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung 2 in unterschiedliche Winkel (angular chirp). Beispielhaft sind in Fig. 2 zwei Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung 2 dargestellt, nämlich ein beispielhafter niederfrequenter (bspw. roter) Frequenzanteil als strichlierte Linie 2a und ein beispielhafter hochfrequenter (bspw. blauer) Frequenzanteil 2b als gepunktete Linie. Das zweite optische Gitter G2 bewirkt eine genau entgegengesetzte Zusammenfächerung der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung 2 (angular chirp), sodass die gepulste Laserstrahlung 2 wieder kollimiert ist. Anschließend wird die gepulste Laserstrahlung 2 am Mittelspiegel RM zurückreflektiert, und verläuft anschließend entlang des zweiten optischen Pfades 10 in der unteren Ebene der Dispersionsanordnung 6. D.h., in Summe bewirken die beiden optischen Gitter G1, G2 im ersten optischen Pfad 9 ein räumliches Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung 2 um ein zweites vorbestimmtes Ausmaß (spatial chirp).

Im zweiten optischen Pfad 10 wirken das zweite optische Gitter G2 und das erste optische Gitter G1 genau umgekehrt zum ersten optischen Pfad 9. D.h., das zweite optische Gitter G2 bewirkt eine Auffächerung der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrah-

lung 2 in unterschiedliche Winkel (angular chirp). Das erste optische Gitter G1 bewirkt eine genau entgegengesetzte Zusammenfächerung der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung 2 (angular chirp), sodass die gepulste Laserstrahlung 2 wieder kollimiert ist. Gleichzeitig bewirken das zweite optische Gitter G2 und das erste optische Gitter G1 ein Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung 2 entsprechend dem zweiten Ausmaß, sodass der spatial chirp wieder aufgehoben wird. Da die Frequenzanteile 2 der gepulsten Laserstrahlung unterschiedliche optische Pfadlängen zurücklegten, wird somit ein temporal chirp bewirkt oder aufgehoben, insbesondere eine zeitliche Pulskompression bewirkt. Am Ausgangsspiegel OM verlässt die gepulste Laserstrahlung 2 die Dispersionsanordnung 6.

Fig. 3 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform einer Dispersionsanordnung 6 der Vorrichtung 1 zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung 2. Dabei wird das räumliche Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung 2 in dem ersten vorbestimmten Ausmaß in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungswirkung der gepulsten Laserstrahlung 2 bei der zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung 2 mit einem Separationselement 7 bewirkt wird, das in der Dispersionsanordnung 6 vorgesehen ist. Ansonsten (d.h. bis auf das Separationselement) ist die Dispersionsanordnung ausgeführt, wie im Zusammenhang mit Fig. 2 beschrieben, sodass die gleichen Bezugszeichen wie in Fig. 2 verwendet werden sowie auf die obige Beschreibung verwiesen wird. Dabei wird das räumliche Separieren im ersten Ausmaß bewirkt, indem die Symmetrie zwischen dem eingehenden Strahl (erster optischer Pfad 9) und dem ausgehenden Strahl (zweiter optischer Pfad 10) gebrochen wird. Dafür ist das Separationselement 7 nur im ersten optischen Pfad, nicht jedoch im zweiten optischen Pfad vorgesehen. Während das erste optische Gitter G1 und das zweite optische Gitter G2 im ersten optischen Pfad 9 ein räumliches Separieren im zweiten Ausmaß bewirken, und das zweite optische Gitter G2 und das erste optische Gitter G1 im zweiten optischen Pfad 10 ein räumliches Zusammenführen der Frequenzanteile im zweiten Ausmaß bewirken, bewirkt das Separationselement 7 ein räumliches Separieren im ersten Ausmaß. Dass das Separationselement 7 lediglich im ersten optischen Pfad 9 vorgesehen ist, wird das räumliche Separieren im ersten Ausmaß nicht umge-

kehrt, sodass die die Dispersionsanordnung 6 verlassende gepulste Laserstrahlung 2 auch im zweiten Ausmaß räumlich separiert ist (spatial chirp).

Insbesondere ist das Separationselement 7 zwischen dem ersten optischen Gitter G1 und dem zweiten optischen Gitter G2 im ersten optischen Pfad 9 vorgesehen, und bewirkt dort eine Verlängerung der Pfadlänge zwischen dem ersten optischen G1 und dem zweiten optischen Gitter G2 gegenüber der Pfadlänge zwischen dem zweiten optischen Gitter G2 und dem ersten optischen Gitter G1 im zweiten optischen Pfad 10. Dadurch wird der im ersten optischen Pfad 9 bewirkte spatial chirp im zweiten optischen Pfad 10 nicht vollständig (sondern nur entsprechend dem zweiten Ausmaß) umgekehrt, sodass die resultierte gepulste Laserstrahlung 2 beim Verlassen der Dispersionsanordnung 6 beim Ausgangsspiegel OM einen spatial chirp im ersten Ausmaß aufweist, wie aus dem Abstand zwischen den beiden beispielhaften Frequenzanteilen 2a, 2b (gepunktete und strichlierte Linie) erkennbar ist. Zur Verlängerung der Pfadlänge weist das Separationselement 7 vier Spiegel M1, M2, M3, M4 auf.

Fig. 4 zeigt schematisch eine bevorzugte Ausführungsform einer Mehrfachdurchgangsgaszelle 8 der Vorrichtung 1 zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung 2. Die gepulste Laserstrahlung 2 wird, nachdem sie im ersten Ausmaß räumlich verbreitert wurde, mit einem Spiegel 11 fokussiert und in die Mehrfachdurchgangsgaszelle 8 injiziert. Die Mehrfachdurchgangsgaszelle 8 weist zwei gegenüberliegende Spiegel CM1, CM2 auf, die einen konzentrischen Resonator ausbilden, der mehrfach von der gepulsten Laserstrahlung 2 durchlaufen wird. Wie zu erkennen ist, bleibt die Größe des Strahls im Fokus erhalten. D.h. im Fokus liegt ein runder Strahl vor, wohingegen die Strahlenspotspots an den Spiegeln CM1, CM2 elongiert sind.

Im Zusammenhang mit den Figuren 4 bis 7b werden die erzielten Werte einer beispielhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens bzw. der erfindungsgemäßen Vorrichtung dargestellt. Im Konkreten zeigt Fig. 5 die Fluenz und die Strahltaille in Abhängigkeit vom Ausmaß der räumlichen Separation; Fig. 6a zeigt die Spitzenleistung und Fig. 6b die Spotgröße am Weg zum Fokus;

Fig. 7a zeigt normierte Intensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge und Fig. 7b die normierte Intensität in Abhängigkeit von der Pulsdauer.

Dabei wurde ein Yb CPA-Gitterkompressor (wie in Fig. 3) dargestellt mit einem 4-Spiegel-Bypass verwendet, um das räumliche Chirpen einzuführen und der räumlich verbreiterte Strahl in eine Standard-MPC injiziert, die zwei $r=-300$ niedrig-dispersion sphärische Spiegel (Optoman) aufweist, die ~ 590 mm voneinander beabstandet sind. Wie in Fig. 4 zu sehen, wird die 1-D-Strahlfleckverlängerung periodisch durch die 2f-2f-Abbildungsbedingung wiederholt, so dass die Ausgangsebene des räumlichen Chirp nicht gekippt wird. Diese flexible Einstellung der Spotgröße ermöglicht eine einfache Kontrolle der Fluenz (vgl. Fig. 5) auf dem Spiegel bei gleichzeitiger Beibehaltung der Spitzenintensität in der Strahltaille (Fig. 6a, 6b).

In Fig. 5 ist insbesondere die Verringerung der Spitzenfluenz auf den Spiegeln CM1, CM2 ersichtlich. Fig. 7a zeigt insbesondere die experimentelle SPM-Verbreiterung von 2,5 mJ-Pulsen in 1 bar Ar und Fig. 7b die Fourier-Grenze des Pulses. Die spektralen und zeitlichen Eingangsintensitäten sind dargestellt.

Bemerkenswert ist, dass die Intensität auf den Spiegeln CM1, CM2 sogar noch schneller abnimmt als die Fluenz, da sich die effektive Pulsdauer für die Beschichtung der Spiegel CM1, CM2 aufgrund des monochromatisierenden Effekts des räumlichen Chirpings ändert. Dies ist insofern von Bedeutung, als sich der Schädigungsmechanismus von einem Lawinen-dominierten Effekt (für fs-Pulse) zu einem thermisch dominierten Effekt (für $\gg$ ps-Pulse) ändert, was die Verwendung höherer Fluenzen ermöglicht. Fig. 7a und 7b zeigen die von uns experimentell ermittelte spektrale Verbreiterung von 2,5-mJ 250-fs Pulsen, die räumlich gechirpt wurden, um den Strahlfleck um $\sim \times 2$ zu dehnen, was die maximale Ausdehnung war, die technisch durch die Apertur der im Aufbau installierten Optik begrenzt war.

Man beachte, dass der räumliche Chirp, der nach der spektralen Verbreiterung und Pulsrekompensation im Strahl verbleibt, bei vielen Anwendungen nicht kritisch ist. Durch die Fokussierung

wird der räumliche Chirp in einen winkligen Chirp umgewandelt, was die Entwicklung einer phasenangepassten Bandbreite bei der Frequenzumwandlung (vgl. B.A. Richman, S.E. Bisson, R. Trebino, M.G. Mitchell, E. Sidick, und A. Jacobson. "Achromatische Phasen Anpassung für die abstimmbare Erzeugung der zweiten Harmonischen mit Hilfe eines Gitters" Opt. Lett. 22, 1223-1225 (1997)) und der Wellenfrontmanipulation (H. Vincenti, und F. Quéré. "Attosecond lighthouse: how to use spatiotemporally coupled light fields to generate isolated as pulses" Phys. Rev. Lett. 108, 113904 (2012)) ermöglicht, während bei Prozessen wie der Erzeugung von Oberwellen höherer Ordnung (higher-order harmonic generation) in einer Gaszelle, die auf einen winzigen Bruchteil der Rayleigh- Länge des Treiberstrahls beschränkt ist, sowohl der winklige als auch der räumliche Chirp innerhalb des kurzen Interaktionsabstands aufgehoben werden.

Patentansprüche:

1. Verfahren zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung (2) aufweisend die Schritte:

- Bereitstellen gepulster Laserstrahlung (2);
- räumliches Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) in einem ersten vorbestimmten Ausmaß in eine Richtung senkrecht zu einer Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung (2);
- Führen der im ersten vorbestimmten Ausmaß räumlich separierten gepulsten Laserstrahlung (2) zu einer Mehrfachdurchgangsgaszelle (8);
- Erhöhen der spektralen Bandbreite der gepulsten Laserstrahlung (2) in der Mehrfachdurchgangsgaszelle (8) zur zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung (2).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei beim räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) im ersten vorbestimmten Ausmaß eine Verbreiterung der gepulsten Laserstrahlung (2) in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung (2) auf zumindest das 1,5-Fache, bevorzugt zumindest das Doppelte, besonders bevorzugt zumindest das 3-Fache, erfolgt.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, aufweisend den folgenden Schritt, der vor dem Erhöhen der spektralen Bandbreite der gepulsten Laserstrahlung (2) in der Mehrfachdurchgangsgaszelle (8) durchgeführt wird:

- zeitliche Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung (2) in einer Dispersionsanordnung (6), die zumindest zwei dispersive Elemente (G1, G2), insbesondere optische Gitter, aufweist, die dazu eingerichtet sind, ein räumliches Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) um ein zweites vorbestimmtes Ausmaß zu bewirken und nach einer Propagation über eine frequenzabhängig unterschiedliche optische Pfadlänge ein Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) entsprechend dem zweiten Ausmaß zu bewirken, sodass eine zeitliche Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung (2) bewirkt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei

zum räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) um das zweite vorbestimmte Ausmaß mit einem ersten (G1) der zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) die Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) in unterschiedliche Winkel gebeugt werden und mit einem zweiten (G2) der zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) die in unterschiedliche Winkel gebeugten Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) kollimiert werden; und

zum räumlichen Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) entsprechend dem zweiten Ausmaß mit dem zweiten (G2) der zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) die Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) in unterschiedliche Winkel gebeugt werden und mit dem ersten (G1) der zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) die in unterschiedliche Winkel gebeugten Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) kollimiert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei das räumliche Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) in dem ersten vorbestimmten Ausmaß in die Richtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung (2) erfolgt, indem sich

eine erste optische Pfadlänge der gepulsten Laserstrahlung (2) zwischen dem ersten (G1) der zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) und dem zweiten (G2) der zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) beim räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) um das zweite vorbestimmte Ausmaß

unterscheidet von

einer zweiten optischen Pfadlänge der gepulsten Laserstrahlung (2) zwischen dem zweiten (G2) der zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) und dem ersten (G1) der zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) beim räumlichen Zusammenführen der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) entsprechend dem zweiten Ausmaß.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 5, wobei das räumliche Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) in dem ersten vorbestimmten Ausmaß in die Richtung

senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung (2) bei der zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung (2) mit einem Separationselement (7) in der Dispersionsanordnung (6) bewirkt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei die gepulste Laserstrahlung (2) in der Dispersionsanordnung (6) mit einem Spiegel (RM) reflektiert wird, wobei die gepulste Laserstrahlung (2) in der Dispersionsanordnung (6) entlang eines ersten optischen Pfads (9) zum Spiegel propagiert wird und nach der Reflektion am Spiegel entlang eines zweiten optischen Pfads (10) propagiert wird, wobei die zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) im ersten optischen Pfad (9) und im zweiten optischen Pfad (10) liegen, wobei das Separationselement (7) nur im ersten optischen Pfad (9) oder nur im zweiten optischen Pfad (10) liegt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 oder 7, wobei das Separationselement (7) vier Spiegel (M1, M2, M3, M4) aufweist.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiter aufweisend die folgenden Schritte, die vor dem räumlichen Separieren der Frequenzanteile der gepulsten Laserstrahlung (2) im ersten vorbestimmten Ausmaß durchgeführt werden:

- zeitliches Verbreitern der gepulsten Laserstrahlung (2);
- Verstärken der zeitlich verbreiterten gepulsten Laserstrahlung (2).

10. Vorrichtung zum Manipulieren von gepulster Laserstrahlung (2), aufweisend:

- eine Vorrichtung (3) zum Bereitstellen gepulster Laserstrahlung (2);
- ein Separationselement (7) zum räumlichen Separieren der Frequenzen der gepulsten Laserstrahlung (2) in einem ersten vorbestimmten Ausmaß in eine Richtung senkrecht zu einer Ausbreitungsrichtung der gepulsten Laserstrahlung (2);
- eine Mehrfachdurchgangsgaszelle (8) zur Erhöhung der spektralen Bandbreite der im ersten vorbestimmten Ausmaß räumlich separierten gepulsten Laserstrahlung (2) zur zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung (2), wobei die Mehrfachdurchgangsgaszelle (8) im optischen Pfad der gepulsten

Laserstrahlung (2) nach dem Separationselement (7) angeordnet ist und die Mehrfachdurchgangsgaszelle (8) angeordnet ist, um die im ersten vorbestimmten Ausmaß räumlich separierte gepulste Laserstrahlung zu empfangen.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, aufweisend eine Dispersionsanordnung (6), bevorzugt einen Gitterpaar-Pulskompressor, insbesondere einen Treacy-Paar-Pulskompressor, zur zeitlichen Pulskompression der gepulsten Laserstrahlung (2) mit zumindest zwei dispersiven Elementen (G1, G2), insbesondere optischen Gittern.

12. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei die Dispersionsanordnung (6) einen Spiegel (RM) aufweist, der angeordnet ist, sodass die gepulste Laserstrahlung (2) in der Dispersionsanordnung (6) entlang eines ersten optischen Pfads (9) zum Spiegel (RM) propagiert wird und nach der Reflektion am Spiegel (RM) entlang eines zweiten optischen Pfads (10) propagiert wird, wobei die zumindest zwei dispersiven Elemente (G1, G2) im ersten optischen Pfad (9) und im zweiten optischen Pfad (10) liegen, wobei das Separationselement nur im ersten optischen Pfad (9) oder nur im zweiten optischen Pfad (10) vorgesehen ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei das Separationselement (7) vier Spiegel (M1, M2, M3, M4) aufweist.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 10 bis 13, aufweisend:

- eine Verbreiterungsvorrichtung (4) zum zeitlichen Verbreitern der gepulsten Laserstrahlung (2);
 - eine Verstärkungsvorrichtung (5) zur Verstärkung der zeitlich verbreiterten gepulsten Laserstrahlung (2);
- wobei das Separationselement (7) und die Mehrfachdurchgangsgaszelle (8) im optischen Pfad der gepulsten Laserstrahlung (2) nach der Verbreiterungsvorrichtung (4) und der Verstärkungsvorrichtung (5) vorgesehen sind.

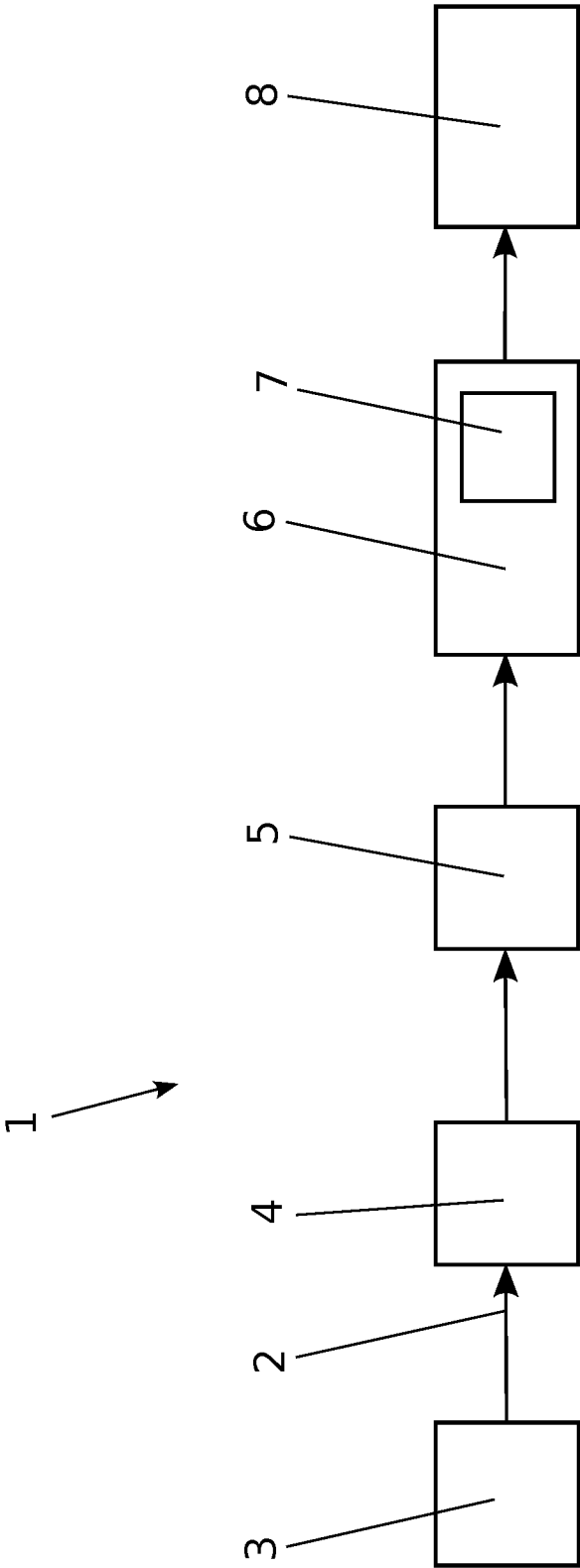


Fig.1

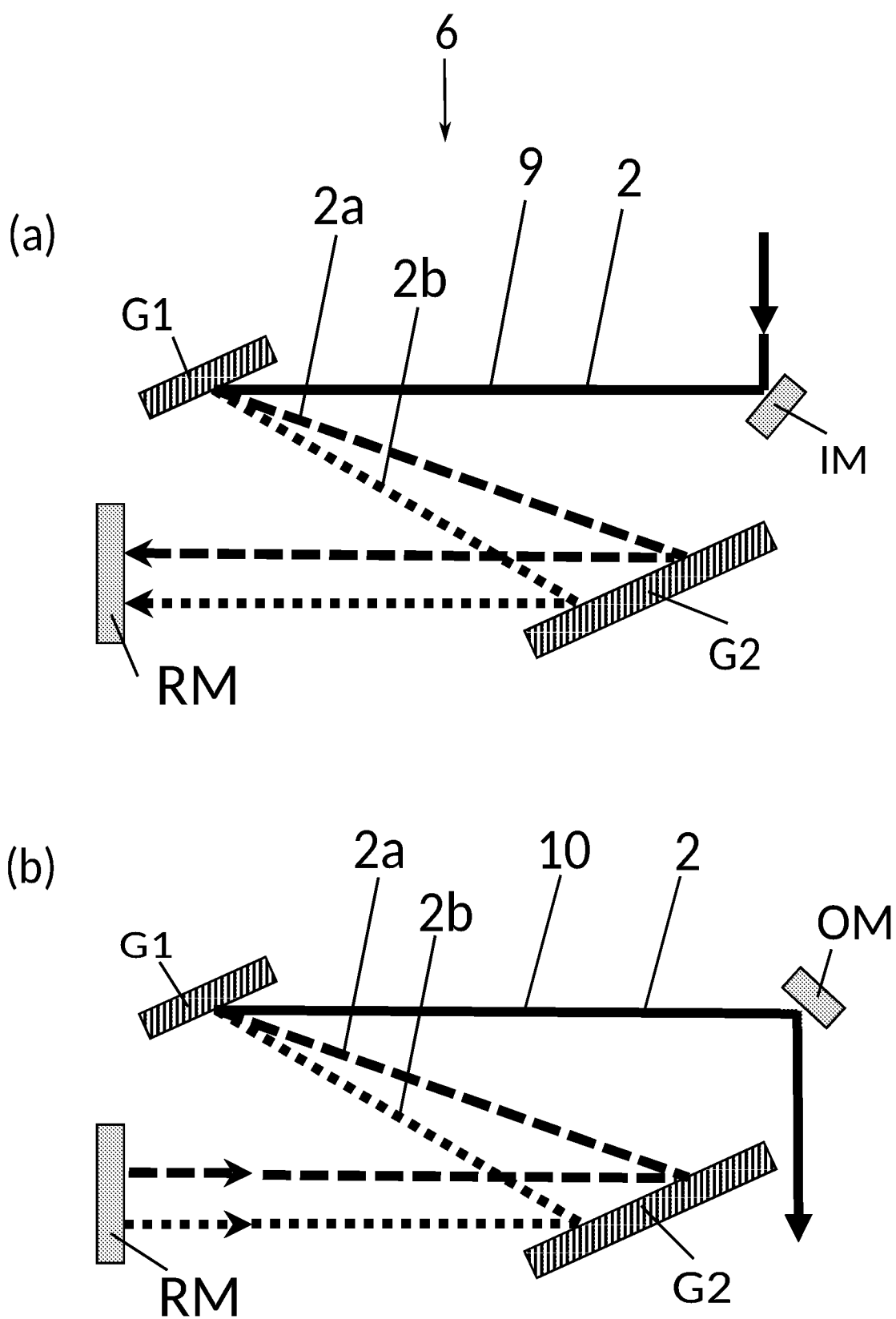


Fig. 2

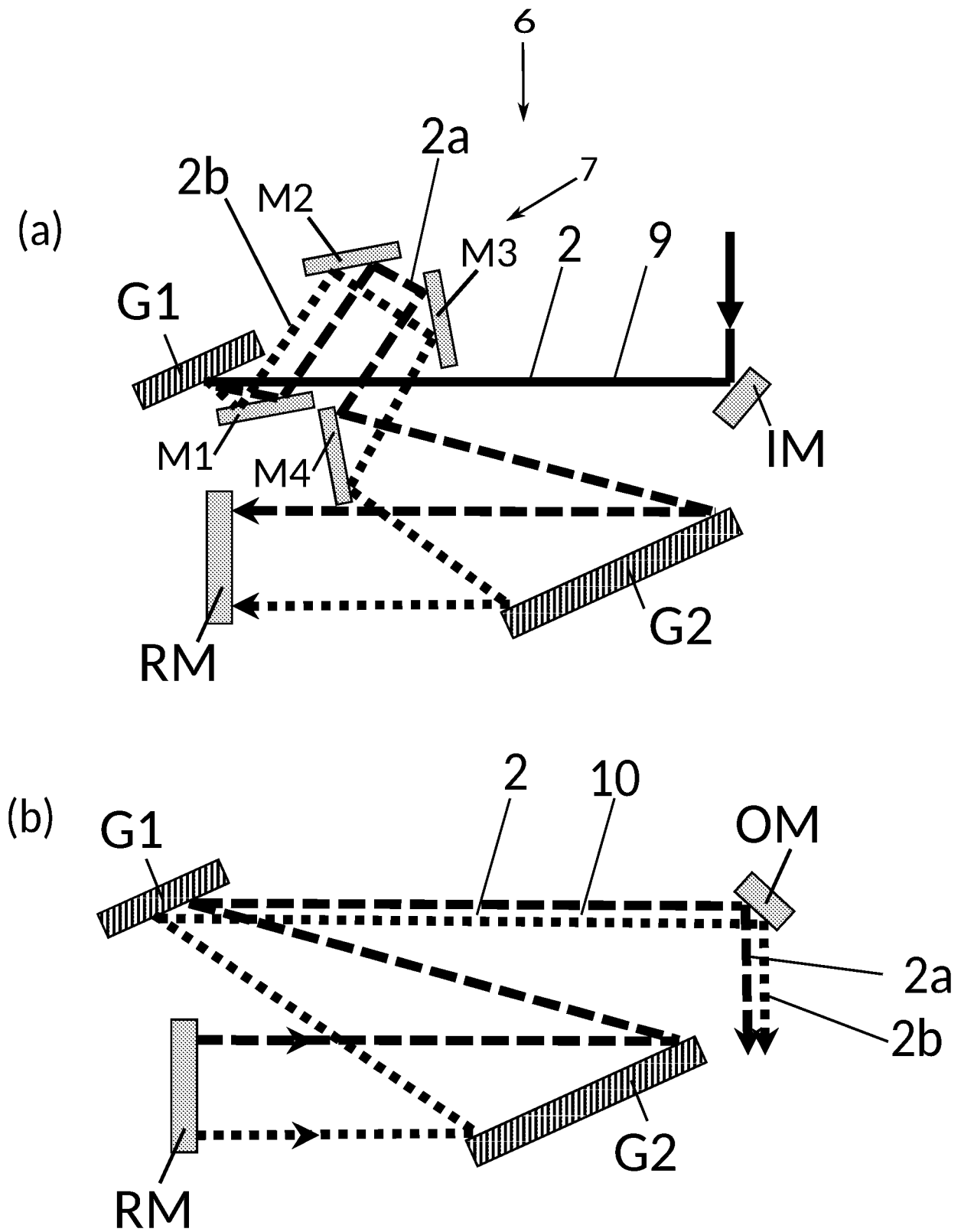


Fig. 3

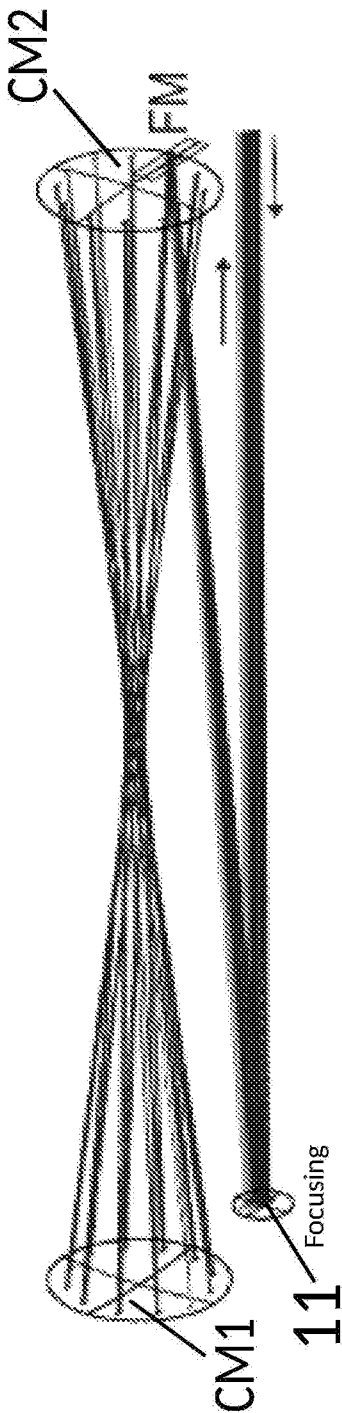


Fig. 4

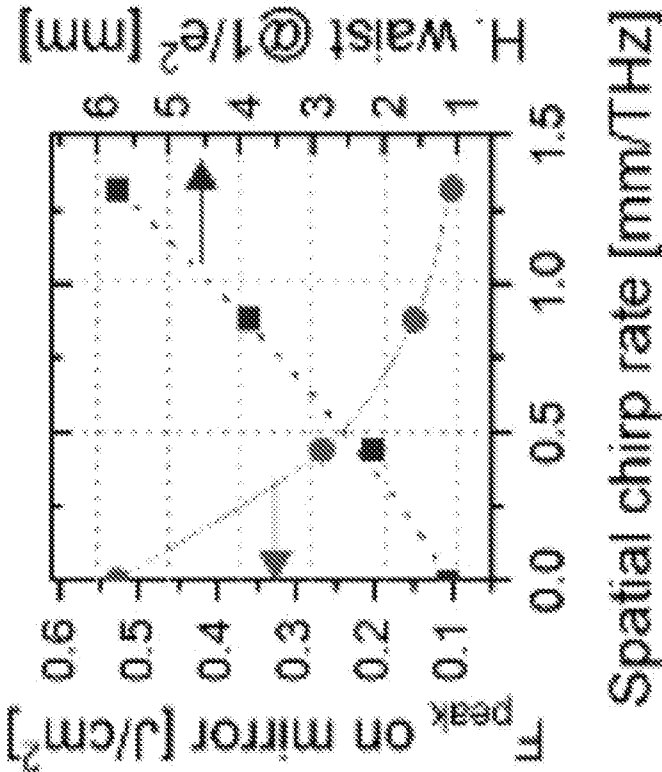


Fig. 5

Fig. 6a

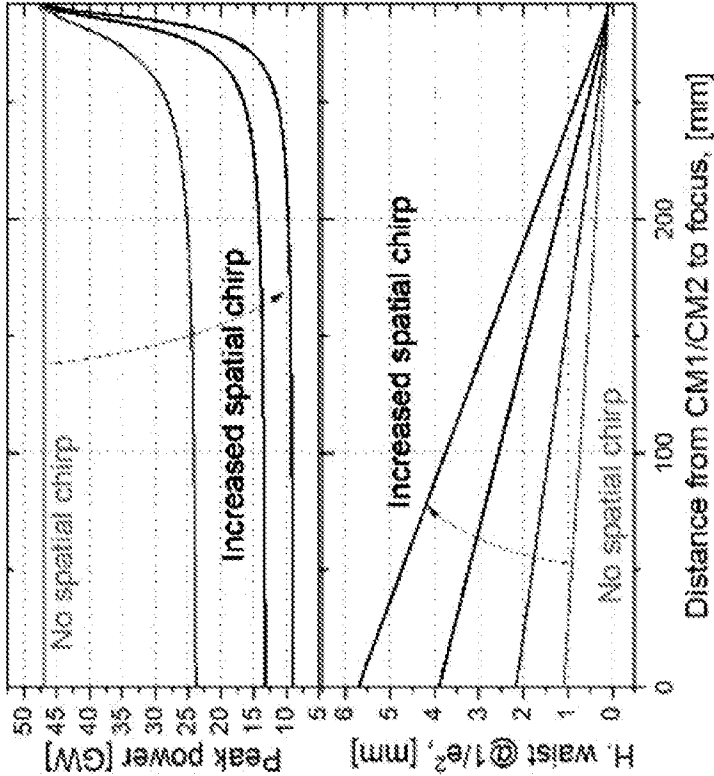
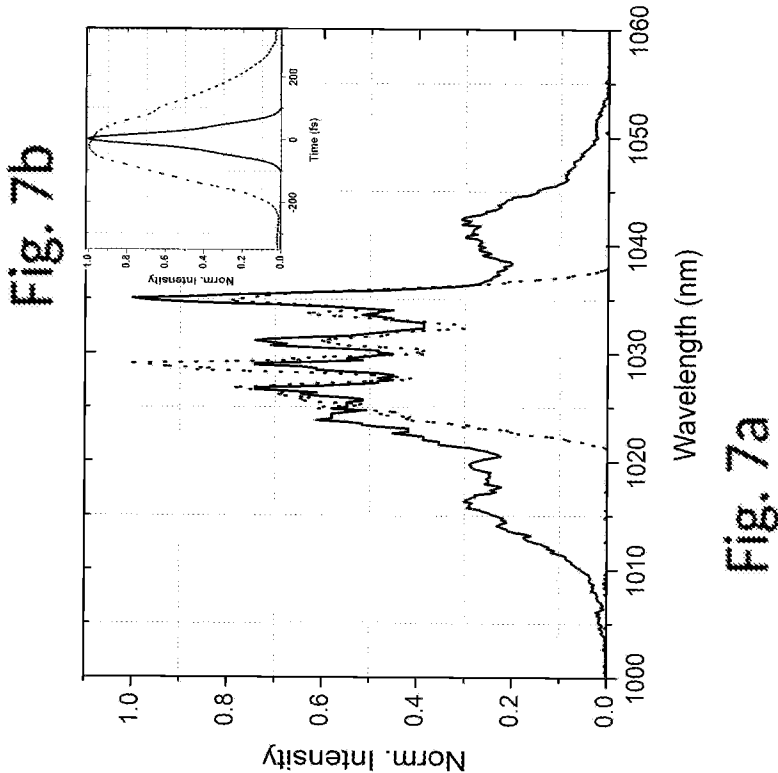


Fig. 6b



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/AT2024/060242

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>H01S 3/00</i> (2006.01)i; <i>H01S 3/23</i> (2006.01)n According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01S Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	RENJING CHEN ET AL. "Self-compression of ultrahigh-peak-power lasers" <i>ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853</i> , 22 June 2023 (2023-06-22), XP091608994	1,9-11,14
Y	page 1, paragraph 1 - page 15, paragraph 1; figures 1-5,8,9	2-8,12,13
X	TAVELLA F. ET AL. "Multi-pass cell spectral broadening at high pulse energies" <i>PHYSICS OF PLASMAS</i> , US, Vol. 29, No. 8, 01 August 2022 (2022-08-01), DOI: 10.1063/5.0091955 ISSN: 1070-664X, XP093193384	1,9-11,14
Y	pages 083902-1, left-hand column, paragraph 1 - pages 083902-7, right-hand column, paragraph 2; figures 1-5	2-8,12,13
Y	US 2016170217 A1 (SQUIER JEFF A [US] ET AL) 16 June 2016 (2016-06-16) paragraphs [0004], [0005], [0021] - [0041]; figures 1-4	2-8,12,13
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 08 August 2024		Date of mailing of the international search report 03 September 2024
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands (Kingdom of the) Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Laenen, Robert Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/AT2024/060242

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No
X,P	AREF IMANI ET AL. "Multipass Spectral Broadening of Spatially Chirped Pulses" 2023 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS EUROPE & EUROPEAN QUANTUM ELECTRONICS CONFERENCE (CLEO/EUROPE-EQEC), IEEE, 26 June 2023 (2023-06-26), page 1 DOI: 10.1109/CLEO/EUROPE-EQEC57999.2023.10232123 XP034416945 page 1, paragraph 1-3; figure 1	1-14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/AT2024/060242

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US	2016170217	A1	16 June 2016	NONE	

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. H01S3/00
ADD. H01S3/23

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
H01S

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	RENJING CHEN ET AL: "Self-compression of ultrahigh-peak-power lasers", ARXIV.ORG, CORNELL UNIVERSITY LIBRARY, 201 OLIN LIBRARY CORNELL UNIVERSITY ITHACA, NY 14853, 22. Juni 2023 (2023-06-22), XP091608994,	1,9-11, 14
Y	Seite 1, Absatz 1 - Seite 15, Absatz 1; Abbildungen 1-5,8,9 ----- -/-	2-8,12, 13

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 8. August 2024	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 03/09/2024
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Laenen, Robert

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	TAVELLA F. ET AL: "Multi-pass cell spectral broadening at high pulse energies", PHYSICS OF PLASMAS, Bd. 29, Nr. 8, 1. August 2022 (2022-08-01) , XP93193384, US ISSN: 1070-664X, DOI: 10.1063/5.0091955	1,9-11, 14
Y	Seiten 083902-1, linke Spalte, Absatz 1 - Seiten 083902-7, rechte Spalte, Absatz 2; Abbildungen 1-5	2-8,12, 13
Y	----- US 2016/170217 A1 (SQUIER JEFF A [US] ET AL) 16. Juni 2016 (2016-06-16) Absätze [0004], [0005], [0021] - [0041]; Abbildungen 1-4	2-8,12, 13
X,P	----- AREF IMANI ET AL: "Multipass Spectral Broadening of Spatially Chirped Pulses", 2023 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS EUROPE & EUROPEAN QUANTUM ELECTRONICS CONFERENCE (CLEO/EUROPE-EQEC), IEEE, 26. Juni 2023 (2023-06-26), Seite 1, XP034416945, DOI: 10.1109/CLEO/EUROPE-EQEC57999.2023.1023212 3 Seite 1, Absatz 1-3; Abbildung 1 -----	1-14

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/AT2024/060242

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2016170217 A1	16-06-2016	KEINE	