

(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
09. November 2017 (09.11.2017)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2017/190930 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

H01S 3/00 (2006.01) H01S 3/23 (2006.01)
H01S 3/13 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/058834

(22) Internationales Anmeldedatum:
12. April 2017 (12.04.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2016 108 282.1
04. Mai 2016 (04.05.2016) DE

(71) Anmelder: FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG
E. V. [DE/DE]; Hansastraße 27c, 80686 München

(DE). FRIEDRICH-SCHILLER-UNIVERSITÄT JE-
NA [DE/DE]; Fürstengraben 1, 07743 Jena (DE).

(72) Erfinder: MÜLLER, Michael; Magdelstieg 92, 07745
Jena (DE). KIENEL, Marco; Friedrich-Engels-Str. 27,
08058 Zwickau (DE). KLENKE, Arno; Jenaische Straße 7,
07747 Jena (DE). LIMPERT, Jens; Mühlenweg 12, 07751
Jena (DE). TÜNNERMANN, Andreas; Wilhelm-Wagen-
feld Str. 16, 99425 Weimar (DE).

(74) Anwalt: SCHNEIDERS & BEHRENDT et al.; Huestr.
23, 44787 Bochum (DE).

(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, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP,

(54) Title: LASER SYSTEM WITH SUPERPOSITIONING OF TEMPORALLY OR SPATIALLY SEPARATE LASER PULSES

(54) Bezeichnung: LASERSYSTEM MIT ÜBERLAGERUNG VON ZEITLICH ODER RÄUMLICH SEPARATEN LASERPULSEN

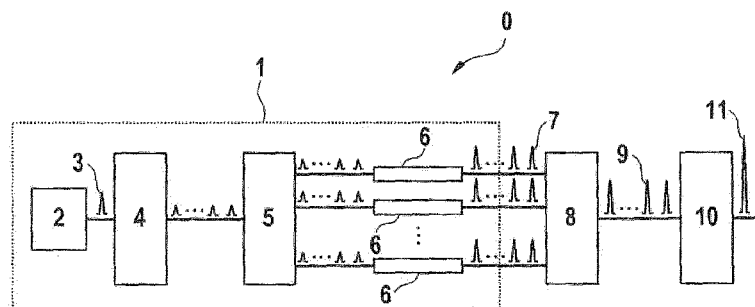


Fig. 1

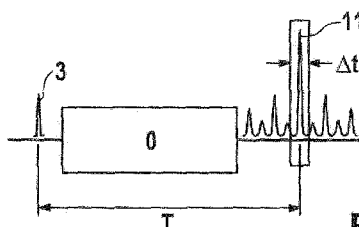


Fig. 4

(57) Abstract: The invention relates to a laser system comprising the following: - at least one laser pulse source (1) which generates input laser pulses (7) at an input repetition frequency, - at least one combination element (8, 10) which superpositions two or more of the input laser pulses (7) in a respective output laser pulse (11) and thus generates an output laser pulse train at an output repetition frequency, wherein the combination element (8, 10) is paired with at least one phase adjustment element (14, 15) which influences the relative phase position of the input laser pulses (7) superpositioned in the output laser pulse (11), - an error signal detector (16) which derives an error signal (18) from the output laser pulse, and - a regulator (19) which forms a regulating signal (20) from the error signal (18) in order to actuate the phase adjustment element (14, 15). The aim of the invention is to provide a laser system that is improved

WO 2017/190930 A1



KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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).

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

compared to the prior art and comprises an actively stabilized combination of temporally and spatially separate input laser pulses into high-power output laser pulses. This is achieved by the invention in that the error signal detector (16) periodically scans the output laser pulse train at the output repetition frequency. Alternatively, the error signal detector (16) evaluates the current power level of the output laser pulse train. The invention further relates to a method for generating laser pulses.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Lasersystem mit - wenigstens einer Laserpulsquelle (1), die Eingangslaserpulse (7) bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz erzeugt, - wenigstens einem Kombinationselement (8, 10), das zwei oder mehr der Eingangslaserpulse (7) in jeweils einem Ausgangslaserpuls (11) überlagert und so einen Ausgangslaserpulszug bei einer Ausgangsrepetitionsfrequenz erzeugt, wobei dem Kombinationselement (8, 10) wenigstens ein Phasenstellelement (14, 15) zugeordnet ist, das die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls (11) überlagerten Eingangslaserpulse (7) beeinflusst, - einem Fehlersignaldetektor (16), der aus dem Ausgangslaserpulszug ein Fehlersignal (18) ableitet, und - einem Regler (19), der aus dem Fehlersignal (18) ein Regelsignal (20) zur Ansteuerung des Phasenstellelementes (14, 15) bildet. Aufgabe der Erfindung ist es, ein gegenüber dem Stand der Technik verbessertes Lasersystem mit aktiv stabilisierter Kombination von zeitlich und räumlich separaten Eingangslaserpulsen zu Ausgangslaserpulsen hoher Leistung bereit zu stellen. Diese Aufgabe löst die Erfindung dadurch, dass der Fehlersignaldetektor (16) den Ausgangslaserpulszug periodisch mit der Ausgangsrepetitionsfrequenz abtastet. Alternativ schlägt die Erfindung vor, dass der Fehlersignaldetektor (16) die momentane Leistung des Ausgangslaserpulszuges bewertet. Außerdem betrifft die Erfindung Verfahren zur Erzeugung von Laserpulsen.

Lasersystem mit Überlagerung von zeitlich oder räumlich separaten Laserpulsen

- 5 Die Erfindung betrifft ein Lasersystem mit
- wenigstens einer Laserpulsquelle, die Eingangslaserpulse bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz erzeugt,
 - wenigstens einem Kombinationselement, das zwei oder mehr der Eingangslaserpulse in jeweils einem Ausgangslaserpuls überlagert und so einen
- 10 Ausgangslaserpulszug bei einer Ausgangsrepetitionsfrequenz erzeugt, wobei dem Kombinationselement wenigstens ein Phasenstellelement zugeordnet ist, das die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls überlagerten Eingangslaserpulse beeinflusst,
- einem Fehlersignaldetektor, der aus dem Ausgangslaserpulszug ein
- 15 Fehlersignal ableitet, und
- einem Regler, der aus dem Fehlersignal ein Regelsignal zur Ansteuerung des Phasenstellelementes bildet.

Außerdem betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Erzeugung von Laserpulsen, mit den Verfahrensschritten:

- 20 - Erzeugen von Eingangslaserpulsen bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz,
- Überlagern von zwei oder mehr Eingangslaserpulsen in jeweils einem Ausgangslaserpuls, wodurch ein Ausgangslaserpulszug bei einer Ausgangsrepetitionsfrequenz erzeugt wird, wobei die relative Phasenlage der in
- 25 dem Ausgangslaserpuls überlagerten Eingangslaserpulse nach Maßgabe eines Regelsignals eingestellt wird,
- Ableitung eines Fehlersignals aus dem Ausgangslaserpulszug, und

- Bildung des Regelsignals aus dem Fehlersignal.

Die Leistungsfähigkeit von optischen Elementen, z.B. von Laserverstärkern, spektralen Verbreiterungselementen, Transportfasern, Optiken (z.B. 5 Spiegeloberflächen, Substrate, Linsen) usw. ist durch verschiedene physikalische Effekte begrenzt. Dabei ist zwischen der Durchschnittsleistung und der bei gepulsten Systemen wichtigen Pulsspitzenleistung zu unterscheiden. Eine Begrenzung ist auf thermische Effekte zurückzuführen, welche ab einer gewissen Durchschnittsleistung auftreten und von der Geometrie des Elementes sowie 10 äußeren Einflüssen abhängen. Als ein Beispiel für diese Effekte kann bei klassischen Festkörperlaser eine Veränderung des Ausgangsstrahls aufgrund des Auftretens einer thermischen Linse angeführt werden. Bei Faserverstärkern stellt dagegen das Auftreten von Modeninstabilitäten durch thermische Effekte eine Begrenzung der erreichbaren mittleren Ausgangsleistung dar.

15 Bei hohen Pulsspitzenleistungen treten darüber hinaus nichtlineare Effekte im Medium auf, wie z.B. Selbstphasenmodulation. Diese sorgen für eine räumliche bzw. zeitliche Veränderung der Phase der Laserstrahlung. Im zeitlichen Bereich kann es deshalb zu einer nicht gewünschten Verformung des Laserpulses kommen, was vor allem bei Laserpulsen mit hoher Bandbreite zu einer 20 Verringerung der Pulsqualität und Verlängerung der Pulsdauer führt. Im räumlichen Bereich können diese nichtlinearen Effekte zur Selbstfokussierung des Strahls führen, was eine Zerstörung des jeweiligen Mediums hervorrufen kann. Neben der Begrenzung der maximal möglichen Pulsspitzenleistung in Verbindung mit einer gegebenen Pulsform bzw. Pulslänge bewirken nichtlineare 25 Effekte auch eine Begrenzung der maximalen Pulsenergie. Zusätzlich sind Beschädigungen der Oberflächen des Mediums bei hohen Pulsspitzenleistungen oder Pulsenergien möglich, welche ebenfalls eine Begrenzung darstellen können.

Verschiedene Ansätze zur Überwindung dieser Begrenzungen und zur Steigerung der erreichbaren mittleren Ausgangsleistung sind aus dem Stand der 30 Technik bekannt.

Zum Beispiel existieren Ansätze zur Vermeidung von Limitierungen in Bezug auf die optische Verstärkung und die spektrale Verbreiterung.

Durch Vergrößerung der Strahlfläche ist es möglich, die Leistungsdichte bzw. die Pulsspitzenintensitäten in den verwendeten optischen Elementen zu reduzieren.

- 5 Ein Beispiel beim Einsatz von faseroptischen Elementen ist die Verwendung von so genannten Large-Mode-Area Fasern. Dies ermöglicht aufgrund der größeren Strahlfläche eine entsprechende Erhöhung der Pulsspitzenleistung ohne nachteilige Auswirkungen.

- 10 Durch Verwendung von beispielsweise zirkular polarisierten Laserpulsen kann die Stärke des Kerr-Effekts herabgesetzt werden, welcher u.a. für das Auftreten der Selbstfokussierung verantwortlich ist.

Durch eine zeitliche Streckung der Laserpulse kann die Pulsspitzenleistung in einem Medium herabgesetzt werden, was als Chirped-Pulse-Amplification (CPA) dem Stand der Technik entspricht.

- 15 Durch Manipulation der spektralen Phasen oder Amplituden kann eine Degradation der Pulsqualität durch nichtlineare Effekte kompensiert werden.

- 20 Bei der so genannten Divided Pulse Amplification (DPA) bzw. Divided Pulse Nonlinear Compression (DPNLC) erfolgt eine Aufteilung eines Laserpulses in mehrere zeitlich getrennte Pulsreplika. Nach der Verstärkung bzw. Verbreiterung der Pulse des Pulszuges erfolgt eine Rekombination in einem Laserpuls. Hierzu werden Kombinationselemente verwendet, die zwei oder mehr der aufgeteilten Laserpulse in jeweils einem Ausgangslaserpuls überlagern. Aufgrund der zeitlichen Aufteilung ist die Pulsspitzenleistung jeder Pulsreplika kleiner als diejenige eines einzelnen Laserpulses.

- 25 Räumlich getrennte Verstärker bzw. Verbreiterungselemente können verwendet werden, wobei eine Aufspaltung des Eingangsstrahls mittels Strahlteilern in mehrere Strahlen erfolgt. Diese werden in mehreren räumlich getrennten, unabhängigen optischen Elementen/Kanälen verstärkt bzw. spektral verbreitert

und schließlich wieder in einem Strahl kombiniert. Dabei ist zwischen der Kombination von Signalen gleicher oder unterschiedlicher Spektren zu unterscheiden. Bei der spektral gleichen Kombination propagieren in den verschiedenen Kanälen die gleichen spektralen Komponenten, es findet am Strahlteiler nur eine Teilung der Leistung statt. Bei der spektralen Kombination hingegen findet zusätzlich noch eine spektrale Teilung des Eingangssignals statt. Kombinationen beider Verfahren sind möglich.

Die zeitliche Phasenlage der einzelnen Laserpulse ist für die Überlagerung von fundamentaler Bedeutung, welche im sub-Wellenlängenbereich korrekt sein muss, um die gewünschte maximale Leistung zu erhalten. In einigen Fällen kann aufgrund des Aufbaus gewährleistet werden, dass diese Bedingung durchgehend erfüllt ist. Ansonsten kann eine aktive Stabilisierung der Phasenlagen nötig sein. Im gepulsten Betrieb muss der möglichst genaue zeitliche Überlapp der einzelnen Pulse bei der Kombination gewährleistet werden. Eine Abweichung führt zu einer Verringerung der Kombinationseffizienz. Bei der spektral gleichen Kombination sollten die einzelnen Laserpulse in den Kanälen selbst möglichst identische Phasen- bzw. Amplitudenprofile aufweisen. Abweichungen können hier ebenfalls zu einer Verringerung der Kombinationseffizienz führen.

Typischerweise kommt eine aktive Stabilisierung auf Basis eines Regelkreises mit einem Fehlersignaldetektor zum Einsatz, der aus dem Laserpulszug der rekombinierten, d.h. überlagerten Laserpulse ein Fehlersignal ableitet, wobei ein Regler aus dem Fehlersignal ein Regelsignal zur Ansteuerung von den Kombinationselementen jeweils zugeordneten Phasenstellelementen bildet (vgl. Zhou et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., Bd. 15, S. 248-256, 2009).

Solche aktiven Stabilisierungsmethoden gleichen durch die Phasenstellelemente Schwankungen der optischen Weglängen der überlagerten Laserpulse aus. Phasenstellelemente können z.B. piezogesteuerte Spiegelhalter, elektrooptische oder thermooptische Phasenmodulatoren sein. Der Regelkreis basiert typischerweise auf einem am Systemausgang erzeugten Fehlersignal, aus dem das Regelsignal zur Phasenkorrektur abgeleitet wird. Dabei wird ein kleiner Teil des Ausgangslaserpulszuges abgespalten und als

Rohsignal zur Erzeugung des Fehlersignals genutzt, während der Großteil des Ausgangslaserpulszuges für die jeweilige Anwendung zur Verfügung steht.

Es sind verschiedene Ansätze und Komponenten zur Kombination von (räumlich und/oder zeitlich separat propagierenden) Laserpulsen bekannt.

- 5 Zum Beispiel können Strahlen mit Hilfe von 1:2-Strahlteilern kombiniert werden. Ein 1:2-Strahlteiler kann mit Hilfe eines polarisationsabhängigen Strahlteilers (Polarisationsstrahlteiler) bzw. einer teilreflektiven Oberfläche (Intensitätsstrahlteiler) realisiert werden. Durch Kaskadierung ist mit mehreren dieser Strahlteiler eine 1:N Teilung realisierbar. Die Erzeugung von N Teilstrahlen ist
10 damit möglich. Das gleiche Prinzip kann auch für die Kombination, d.h. die Überlagerung mehrerer Teilstrahlen in einem Ausgangsstrahl verwendet werden. Für einen 1:32 Strahlteiler sind z.B. 31 1:2-Strahlteiler (Polarisationsstrahlteiler oder Intensitätsstrahlteiler) nötig.

- 15 In einem System mit kaskadierten Kombinationselementen zur Überlagerung zeitlich und räumlich separater Laserpulse, wobei den Kombinationselementen jeweils ein Phasenstellelement zugeordnet ist, wird das Fehlersignal typischerweise nur nach dem letzten Kombinationsschritt detektiert. Nachteilig ist, dass der resultierende Regelkreis dann mehrere stabile Zustände aufweisen kann, so dass eine zuverlässige Regelung nicht möglich ist.

- 20 Aufgabe der Erfindung ist es, ein gegenüber dem Stand der Technik verbessertes Lasersystem mit aktiv stabilisierter Kombination von zeitlich und räumlich separaten Eingangslaserpulsen zu Ausgangslaserpulsen hoher Leistung bereit zu stellen.

- 25 Diese Aufgabe löst die Erfindung ausgehend von einem Lasersystem der eingangs angegebenen Art dadurch, dass der Fehlersignaldetektor den Ausgangslaserpulszug periodisch mit der Ausgangsrepetitionsfrequenz abtastet.

Erfindungsgemäß erfolgt, anders ausgedrückt, die Detektion des Fehlersignals pro Pulszyklus jeweils nur während eines (schmalen) Zeitfensters. Die Detektion

des Fehlersignals in dieser Weise ermöglicht es, das dem globalen Maximum der Ausgangsleistung zugeordnete (minimale) Fehlersignal eindeutig zu identifizieren. Damit ist eine zuverlässige Stabilisierung möglich, auch wenn eine Vielzahl von kaskadierten Kombinationselementen mit diesen jeweils zugeordneten Phasenstellelementen in die Regelung einbezogen ist.

Bei einer bevorzugten Ausgestaltung ist die Abtastdauer, d.h. die zeitliche Dauer jedes Abtastvorgangs bzw. die Breite des Zeitfensters der Fehlersignaldetektion, kleiner als die inverse Eingangsrepetitionsfrequenz. Das bedeutet, dass die Dauer des zeitlichen Fensters der Abtastung des Fehlersignals kleiner oder gleich dem minimalen zeitlichen Abstand der Eingangslaserpulse ist. Dabei wird zweckmäßig die Lage des zeitlichen Fensters, d.h. der Zeitpunkt jedes Abtastvorgangs, so gewählt, dass er entsprechend der Laufzeit der Laserpulse durch das Lasersystem demjenigen Zeitpunkt entspricht, zu dem bei phasenrichtiger Überlagerung der Eingangslaserpulse der Ausgangslaserpuls jeweils am Ort des Detektors eintrifft. Durch die aufgrund des Aufbaus des Lasersystems vorab bekannte Laufzeit der Laserpulse ist der Zeitpunkt, zu dem der durch phasenrichtige Überlagerung erzeugte Ausgangslaserpuls jeweils am Ort des Detektors zu erwarten ist, eindeutig definiert. Wird erfindungsgemäß nur zu diesem Zeitpunkt das Fehlersignal detektiert, ergibt sich daraus vorteilhaft ein eindeutiges Fehlersignal mit nur einem stabilen Zustand der Regelung.

Bei einer bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Lasersystems umfasst der Fehlersignaldetektor zur Abtastung des Ausgangslaserpulszuges einen optischen Schalter. Der optische Schalter wird aktiviert bzw. deaktiviert, um das Zeitfenster für die Detektion des Fehlersignals festzulegen. Bei dem optischen Schalter kann es sich z.B. um einen elektrooptischen Modulator oder einen akustooptischen Modulator oder auch um ein Chopperrad handeln.

Alternativ kann der Fehlersignaldetektor einen elektronischen Schalter aufweisen, der, analog einer üblichen Sample-and-Hold-Schaltung, ein zuvor aus dem Ausgangslaserpulszug abgeleitetes elektrisches Signal erfindungsgemäß periodisch mit der Ausgangsrepetitionsfrequenz zu den geeigneten Zeitpunkten abtastet.

Bei einer möglichen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Lasersystems sind die in dem Ausgangslaserpuls jeweils überlagerten Eingangslaserpulse unterschiedlich polarisiert, wobei der Fehlersignaldetektor einen Hänsch-Couillaud-Detektor umfasst. Das bekannte Hänsch-Couillaud-Verfahren basiert auf der Erfassung der Leistung in zwei orthogonalen Polarisationsrichtungen, wobei die relative Phasenlage des elektromagnetischen Feldes in den beiden Polarisationsrichtungen, d.h. die Elliptizität der Polarisation, erfasst wird. Werden mit dem erfindungsgemäßen System orthogonal polarisierte Eingangslaserpulse in dem Ausgangspulszug überlagert, ist die Polarisation bei phasenrichtiger Überlagerung linear. Bei Verwendung eines Hänsch-Couillaud-Detektors als Fehlersignaldetektor muss für das in jeder Polarisationsrichtung verwendete Detektionselement ein individuelles Zeitfenster für die periodische Abtastung entsprechend der jeweiligen Pulslaufzeit definiert werden.

Bei der Kombination gleichartig polarisierter Eingangslaserpulse können für die Regelung bekannte Dithering-Techniken (z.B. das so genannte LOCSET-Verfahren) oder stochastische Methoden (z.B. das sogenannte SPGD-Verfahren) verwendet werden, wobei durch Erzeugung eines definierten, zeitlich modulierten Phasenfehlers das Fehlersignal mittels nur eines Detektors aus dem Ausgangslaserpulszug abgeleitet werden kann.

Die der Erfindung zu Grunde liegende Aufgabe wird ausgehend von einem Lasersystem der eingangs genannten Art auch dadurch gelöst, dass der Fehlersignaldetektor die momentane Leistung des Ausgangslaserpulszuges bewertet. Dabei wird ausgenutzt, dass die Leistung des Ausgangslaserpulszuges bei phasenrichtiger Überlagerung der Eingangslaserpulse maximal ist. Durch geeignete Bewertung der momentanen Leistung kann eine eindeutige Stabilisierung des Lasersystems erreicht werden.

Hierzu kann z.B. die Regelung so eingerichtet sein, dass der Fehlersignaldetektor das Fehlersignal nur bildet, wenn die momentane Leistung einen vorgebbaren Schwellenwert überschreitet. Dabei wird ausgenutzt, dass lokale Extrema der Leistung im Ausgangslaserpulszug bei der Fehlersignaldetektion ausgeblendet werden, die den Schwellenwert nicht erreichen. Nur das globale Leistungsmaximum, das sich bei phasenrichtiger Überlagerung der

Eingangslaserpulse im Ausgangslaserpulszug einstellt, wird bei der Fehlersignaldetektion berücksichtigt. Daraus resultiert eine zuverlässige und eindeutige Stabilisierung des Lasersystems.

5 Zur zuverlässigen Detektion des globalen Maximums der Ausgangsleistung sollte der Schwellenwert 50-95 %, vorzugsweise ca. 70-80%, idealerweise mindestens 75 % derjenigen Leistung entsprechen, die bei phasenrichtiger Überlagerung der Eingangslaserpulse im Ausgangslaserpulszug zu erwarten ist.

Bei einer bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Lasersystems umfasst der Fehlersignaldetektor wenigstens eine Photodiode, die die momentane Intensität des Ausgangslaserpulszuges detektiert. Die Detektionsbandbreite der Photodiode muss dabei hinreichend hoch sein. Bei erfindungsgemäßer periodischer Abtastung des Ausgangslaserpulszuges mit einer zeitlichen Dauer des Abtastvorgangs, die kleiner ist als die inverse Eingangsrepetitionsfrequenz, muss entsprechend die Detektionsbandbreite der Fotodiode mindestens gleich der Eingangsrepetitionsfrequenz sein.

Bei bevorzugten Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Lasersystems umfasst das Kombinationselement ein optisches Interferometer. Zur Kombination der Eingangslaserpulse können z.B. Polarisationsstrahlteiler und/oder Intensitätsstrahlteiler in kaskadierter Anordnung entsprechend der Anzahl der Eingangslaserpulse, die jeweils in einem Ausgangslaserpulszug überlagert werden sollen, zum Einsatz kommen. Als Phasenstellelemente, die besonders einfach realisierbar sind, eignen sich optische Verzögerungsstrecken, deren Länge nach Maßgabe des Regelsignals variabel ist. Z.B. können Umlenkspiegel der optischen Verzögerungsstrecken auf Aktoren montiert sein, die bei entsprechender Ansteuerung die optische Verzögerungsstrecke verlängern bzw. verkürzen.

Die Erfindung betrifft nicht nur ein Lasersystem, sondern auch ein Verfahren zur Erzeugung von Laserpulsen. Das Verfahren umfasst die folgenden Verfahrensschritte:

30 - Erzeugen von Eingangslaserpulsen bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz,

- Überlagern von zwei oder mehr Eingangslaserpuls in jeweils einem Ausgangslaserpuls, wodurch ein Ausgangslaserpulszug bei einer Ausgangsrepetitionsfrequenz erzeugt wird, wobei die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls überlagerten Eingangslaserpulse eingestellt wird,
 - 5 - Ableitung eines Fehlersignals aus dem Ausgangslaserpulszug, und
 - Bildung eines Regelsignals zur Ansteuerung des Phasenstellelementes aus dem Fehlersignal. Dabei wird erfindungsgemäß, wie oben erläutert, entweder der Ausgangslaserpulszug zur Ableitung des
 - 10 Fehlersignals periodisch mit der Ausgangsrepetitionsfrequenz abgetastet. Alternativ wird die momentane Leistung des Ausgangslaserpulszuges bewertet, wobei die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls überlagerten Eingangslaserpulse nach Maßgabe des Regelsignals nur eingestellt wird, wenn die momentane Leistung einen vorgebbaren Schwellenwert überschreitet.
- 15 Ausführungsbeispiele der Erfindung werden im Folgenden anhand der Zeichnungen erläutert. Es zeigen:

- | | | |
|----|----------|---|
| | Figur 1: | schematische Darstellung eines Lasersystems mit Aufteilung, Verstärkung und Rekombination von Laserpulsen; |
| 20 | Figur 2: | schematische Darstellung der Kombination von Laserpulsen mittels Polarisations- und Intensitätsstrahlteilern; |
| | Figur 3: | erfindungsgemäßes Lasersystem als Blockdiagramm; |
| 25 | Figur 4: | Illustration der erfindungsgemäßen Detektion des Fehlersignals während eines begrenzten Zeitfensters; |
| | Figur 5: | erfindungsgemäße Fehlersignaldetektion mit optischem Schalter; |
| 30 | Figur 6: | erfindungsgemäße Fehlersignaldetektion mit elektronischem Schalter; |

Figur 7: erfindungsgemäße Fehlersignaldetektion mit Bewertung der Ausgangsleistung.

Die Erfindung geht aus von einem Lasersystem, das grundsätzlich wie in Figur 1 dargestellt aufgebaut ist. Das insgesamt mit 0 bezeichnete Lasersystem umfasst eine Laserpulsquelle, die in der Figur 1 mit der Bezugsziffer 1 bezeichnet ist. Die Laserpulsquelle 1 umfasst einen Oszillator 2, beispielsweise in Form eines herkömmlichen und kommerziell verfügbaren modengekoppelten Faserlasers, der Laserpulse 3 bei einer Repetitionsfrequenz emittiert. In einem Aufteilungselement 4 erfolgt eine zeitliche Pulsteilung. Jeder Laserpuls 3 wird in N zeitlich getrennte Pulsreplika aufgeteilt. Dabei sollte N eine Potenz von 2 sein ($N=2^n$). Dabei erhöht sich entsprechend die Repetitionsfrequenz um den Faktor N. In einem weiteren Aufteilungselement 5 erfolgt eine räumliche Pulsteilung. Der Strahl der Laserpulse wird auf M räumlich separate Strahlen aufgeteilt. Danach propagiert die Laserstrahlung in M verschiedenen Kanälen. In jedem der Kanäle ist ein optischer Verstärker 6 angeordnet, der die Laserpulse verstärkt. Bei den Verstärkern 6 handelt es sich z.B. um optisch gepumpte Verstärkerfasern. Am Ausgang der Laserpulsquelle 1 stehen im Sinne der Erfindung Eingangslaserpulse 7 bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz in M räumlich separaten Kanälen zur Verfügung.

Ein Kombinationselement 8 ist vorgesehen, in dem eine räumliche Pulskombination erfolgt, analog zur Aufteilung in dem Aufteilungselement 4. Am Ausgang des Kombinationselementes 8 haben die Laserpulse 9 eine entsprechend höhere Leistung. Die Laserpulse liegen nach wie vor bei der Eingangsrepetitionsfrequenz vor. Die räumliche Pulskombination erfolgt komplementär zu der räumlichen Pulsteilung in dem Aufteilungselement 5 im Verhältnis M:1. Am Ausgang des Kombinationselementes 8 liegt somit wiederum nur ein einzelner Strahl vor, in dem die Laserpulse 9 räumlich zusammen propagieren. In dem weiteren Kombinationselement 10 erfolgt eine zeitliche Pulskombination im Verhältnis N:1, d.h. komplementär zu der zeitlichen Pulsteilung in dem Aufteilungselement 4. Dies bewirkt, dass am Ausgang des Kombinationselementes 10 die Ausgangslaserpulse 11 in einem Ausgangslaserpulszug bei einer Ausgangsrepetitionsfrequenz zur Verfügung stehen, die der Repetitionsfrequenz des Oszillators 2 entspricht.

- Den Kombinationselementen 8 und 10 sind (in Figur 1 nicht dargestellte) Phasenstellelemente zugeordnet, die die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls 1 überlagerten Eingangslaserpulse beeinflussen. Zur Phasenstellung kommen z.B. optische Verzögerungsstrecken zum Einsatz, worauf weiter unten in Bezug auf die Figur 2 noch näher eingegangen wird. Zur Kombination der M räumlich separaten Kanäle sind zumindest M-1 Phasenstellelemente erforderlich, um die relativen Phasenlagen der überlagerten Laserpulse jeweils paarweise beeinflussen zu können. Das die zeitliche Kombination durchführende Kombinationselement 10 benötigt maximal N Phasenstellelemente, um die relativen Phasenlagen bei der Überlagerung der Laserpulse 9 in dem Ausgangslaserpuls 11, wiederum paarweise, beeinflussen zu können. Somit weist das System in Bezug auf die Phasenstellung bis zu M+N-1 Freiheitsgrade auf, die bei der Stabilisierung des Lasersystems zu berücksichtigen sind.
- Die Figur 2 illustriert schematisch die erfindungsgemäße Kombination von Laserpulsen mittels binärer Strahlteiler, bei denen es sich um Polarisations- oder Intensitätsstrahlteiler handeln kann. In den Figuren 2a) und 2b) erfolgt die Kombination von jeweils vier zeitlich separaten Laserpulsen 9 zu einem Ausgangslaserpuls 11 (Strahlrichtung von rechts nach links). In Figur 2a) kommt hierzu eine Kaskade von insgesamt vier Polarisationsstrahlteilern 12 in Kombination mit Wellenplatten 13 zum Einsatz. Durch Punkte und Pfeile ist die Polarisation der einzelnen Laserpulse angedeutet. Die zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgend eintreffenden Laserpulse 9 haben jeweils orthogonale lineare Polarisation. Die von den Laserpulsen 9 durchlaufenen binären Polarisationsstrahlteiler 12 sind über optische Verzögerungsstrecken 14 miteinander verbunden. Jede Verzögerungsstrecke 14 erzeugt einen zeitlichen Verzug derjenigen Laserpulse, die über die Verzögerungsstrecke 14 von dem jeweils in Strahlrichtung ersten Polarisationsstrahlteiler 12 zu dem jeweils zweiten Polarisationsstrahlteiler 12 gelangen, gegenüber denjenigen Laserpulsen, die direkt vom ersten Polarisationsstrahlteiler 12 zum zweiten Polarisationsstrahlteiler 12 gelangen. Die zeitliche Verzögerung ist dabei so bemessen, dass am Ausgang des zweiten Polarisationsstrahlteilers 12 jeweils zwei der Laserpulse zeitlich koinzidieren. Am Ausgang des in Strahlrichtung ersten Paares von Polarisationsstrahlteilern 12 ist somit die Repetitionsfrequenz gegenüber der

Repetitionsfrequenz der Laserpulse 9 halbiert. In entsprechender Weise erfolgt eine weitere Halbierung der Repetitionsfrequenz durch das in Strahlrichtung folgende, weitere Paare von Polarisationsstrahlteilern 12. Die optischen Verzögerungsstrecken 14 der Strahlteilerpaare sind verstellbar, hierzu sind die Umlenkspiegel der Verzögerungsstrecken 14 mittels Aktoren 15 beweglich, so dass die optischen Verzögerungsstrecken 14 entsprechend verlängerbar bzw. verkürzbar sind. Jede der optischen Verzögerungsstrecken 14 in Kombination mit den zugehörigen Aktoren 15 bildet ein Phasenstellelement im Sinne der Erfindung.

In ähnlicher Weise erfolgt die zeitliche Pulskombination gemäß Figur 2b). Dort kommen drei kaskadierte binäre Strahlteiler 12, 12' zum Einsatz. Es handelt sich um einen Polarisationsstrahlteiler 12 in Kombination mit einer Wellenplatte 13 sowie zwei Intensitätsstrahlteiler 12'. Wiederum sind mittels Aktoren 15 verstellbare optische Verzögerungsstrecken 14 als Phasenstellelemente vorgesehen. Entsprechende verstellbare Verzögerungsstrecken können zur Phasenstellung bei der räumlichen Kombination mittels des Kombinationselementes 8 jeweils in den M Kanälen gemäß Figur 1 vorgesehen sein.

Die Figur 3 illustriert das Regelungsschema des erfindungsgemäßen Lasersystems als Blockdiagramm. Die Eingangslaserpulse 7 werden mittels Kombinationselementen 8 und 10 (wie in Figur 1 dargestellt) zu Ausgangslaserpulsen 11 überlagert. Die Kombinationselemente 8, 10 weisen Phasenstellelemente auf, wie in Figur 2 beispielhaft für die zeitliche Pulskombination dargestellt. Auf diese Weise ist die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls 11 jeweils überlagerten Eingangslaserpulse 7 für jeden einzelnen Kombinationsschritt einstellbar. Ein Fehlersignaldetektor 16 ist vorgesehen, der aus dem Ausgangslaserpulszug mittels einer Photodiode 17 ein Fehlersignal 18 ableitet. Ein Regler 19 bildet aus dem Fehlersignal 18 ein Regelsignal 20 zur Ansteuerung der Phasenstellelemente, die den Kombinationselementen 8 und 10 zugeordnet sind. Dadurch wird die zeitliche Phasenlage der im Ausgangslaserpuls 11 überlagerten Laserpulse in der Weise eingestellt, dass die Leistung des Ausgangslaserpulszuges, d.h. die mittlere Leistung sowie auch die Pulsspitzenleistung der Ausgangslaserpulse 11, maximal

ist. Die Phasenstellelemente und deren Ansteuerung durch den Regler 19 sorgen dafür, dass die überlagerten Laserpulse möglichst genau zeitlich überlappen.

Erfindungsgemäß tastet der Fehlersignaldetektor 16 den Ausgangslaserpulszug periodisch mit der Ausgangsrepetitionsfrequenz ab. Dabei ist die Abtastdauer, d.h. die zeitliche Dauer jedes Abtastvorgangs kleiner als die inverse Eingangsrepetitionsfrequenz. Dies ist in Figur 4 illustriert. Die Detektion des Fehlersignals erfolgt pro Pulszyklus jeweils nur während eines Zeitfensters der Dauer Δt . Die Dauer Δt muss dabei dem minimalen zeitlichen Abstand der Laserpulse 9 entsprechen, der im noch nicht kombinierten Laserpulszug auftritt. Die Figur 4 zeigt schematisch das Ausgangssignal des Lasersystems 0 bei nicht vollständig phasenrichtiger Überlagerung der Eingangslaserpulse. Die Signallaufzeit T durch das gesamte Lasersystem 0 definiert eindeutig den Zeitpunkt, zu dem bei phasenrichtiger Überlagerung der Eingangslaserpulse 9 der Ausgangslaserpuls 11 jeweils am Ort des Detektors 17 eintrifft. Wie in Figur 4 illustriert, wird das Fehlersignal ausschließlich im (oder ausschließlich außerhalb) des dargestellten Zeitfensters Δt aufgenommen. Daraus ergibt sich ein Fehlersignal, das eine Regelung mit nur einem eindeutig definierten, stabilen Zustand ermöglicht.

Realisiert werden kann die erfindungsgemäße Fehlersignaldetektion beispielsweise wie in Figur 5 illustriert. Dort durchläuft der Ausgangslaserpulszug einen optischen Schalter 21, bei dem es sich um einen elektrooptischen Modulator oder um einen akustooptischen Modulator an sich üblicher Bauart handeln kann. Der optische Schalter 21 schaltet nur zu dem durch die Laufzeit T definierten Zeitpunkt und während der Dauer des Zeitfensters Δt durch. Am Ausgang des optischen Schalters 21 wird dann nur der Laserpuls 11' mittels der Photodiode 17 detektiert.

Alternativ kann die zeitliche Selektion mittels eines elektronischen Schalters 22, wie in Figur 6 illustriert, erfolgen. Hierzu wird zunächst der Ausgangslaserpulszug kontinuierlich mittels der Photodiode 17 abgetastet und ein entsprechendes elektrisches Messsignal erzeugt. Das elektrische Messsignal wird mittels des elektronischen Schalters 22 nur während des Zeitfensters Δt zu den durch die Laufzeit T definierten Zeitpunkten durchgelassen. Das so aufbereitete Messsignal

wird dann weiter zur Erzeugung des Regelsignals 20 mittels des Reglers 19 (siehe Figur 3) verwendet. Bei dem Ausführungsbeispiel der Figur 6 muss die Photodiode 17 eine ausreichende Bandbreite aufweisen, um die verschiedenen Maxima im Ausgangslaserpulszug voneinander trennen zu können.

- 5 Die Figur 7 zeigt eine alternative Ausgestaltung der Erfindung. Bei dieser bewertet der Fehlersignaldetektor 16 die momentane Leistung des Ausgangslaserpuls-
zuges. Der Fehlersignaldetektor 16 bildet das Fehlersignal 18 nur, wenn die
mittlere Leistung einen vorgebbaren Schwellenwert überschreitet, der z.B. 75 %
10 derjenigen Leistung entspricht, die bei phasenrichtiger Überlagerung der
Eingangslaserpulse 9 im Ausgangslaserpulszug zu erwarten ist. Auf diese Weise
kann ebenfalls eine Regelung mit nur einem stabilen Zustand realisiert werden.
Solange kein Fehlersignal 18 erzeugt wird, weil der vorgegebene Schwellenwert
nicht erreicht wird, wartet der Regler 19 passiv, bis die relative Phasenlage der
15 Laserpulse im Lasersystem 0 in die Nähe des Zustands gelangt (z.B. durch Drift),
in dem die Laserpulse phasenrichtig überlagert werden. Erst dann, d.h. in der
Nähe des gewünschten Zustands, wird der Schwellenwert überschritten, und die
Regelung wird aktiv, um das Lasersystem dort zu stabilisieren. Die Bewertung der
Leistung kann mittels eines einfachen Spannungskomparators erfolgen. Durch
20 die Bewertung und durch den Vergleich mit dem Schwellenwert können lokale
Maxima im Ausgangslaserpulszug vom globalen Maximum unterschieden
werden. Die lokalen Maxima werden entsprechend aus dem Fehlersignal 18
entfernt. Im Gegensatz zu der in den Figuren 4-6 illustrierten Methode erfordert
die in Figur 7 gezeigte Methode die Nachstellung des Schwellenwertes, wenn die
Ausgangsleistung des Lasersystems verändert wird.

Patentansprüche

1. Lasersystem mit
- wenigstens einer Laserpulsquelle (1), die Eingangslaserpulse (7)
- 5 bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz erzeugt,
- wenigstens einem Kombinationselement (8, 10), das zwei oder mehr der Eingangslaserpulse (7) in jeweils einem Ausgangslaserpuls (11) überlagert und so einen Ausgangslaserpulszug bei einer Ausgangsrepetitionsfrequenz erzeugt, wobei dem Kombinationselement (8, 10)
- 10 wenigstens ein Phasenstellelement (14, 15) zugeordnet ist, das die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls (11) überlagerten Eingangslaserpulse (7) beeinflusst,
- einem Fehlersignaldetektor (16), der aus dem Ausgangslaserpulszug ein Fehlersignal (18) ableitet, und
- 15 - einem Regler (19), der aus dem Fehlersignal (18) ein Regelsignal (20) zur Ansteuerung des Phasenstellelementes (14, 15) bildet,
- d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass der Fehlersignaldetektor (16) den Ausgangslaserpulszug periodisch mit der Ausgangsrepetitionsfrequenz abtastet.
- 20 2. Lasersystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Abtastdauer (Δt), d.h. die zeitliche Dauer jedes Abtastvorgangs kleiner als die inverse Eingangsrepetitionsfrequenz ist.
3. Lasersystem nach Anspruch 1 oder 2, dass der Abtastzeitpunkt, d.h. der Zeitpunkt jedes Abtastvorgangs, so gewählt ist, dass er entsprechend der
- 25 Laufzeit der Laserpulse durch das Lasersystem (0) demjenigen Zeitpunkt

entspricht, zu dem bei phasenrichtiger Überlagerung der Eingangslaserpulse (7) der Ausgangslaserpuls (11) jeweils am Ort des Detektors eintrifft.

4. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Fehlersignaldetektor (16) zur Abtastung des Ausgangspulszuges einen optischen oder elektronischen Schalter (21, 22) umfasst.

5. Lasersystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Schalter (21) ein elektrooptischer Modulator oder ein akustooptischer Modulator oder ein Chopperrad ist.

10 6. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die in dem Ausgangslaserpuls (11) überlagerten Eingangslaserpulse (7) unterschiedlich polarisiert sind, wobei der Fehlersignaldetektor (16) einen Hänsch-Couillaud-Detektor umfasst.

7. Lasersystem mit

15 - wenigstens einer Laserpulsquelle (1), die Eingangslaserpulse (7) bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz erzeugt,

- wenigstens einem Kombinationselement (8, 10), das zwei oder mehr der Eingangslaserpulse (7) in jeweils einem Ausgangslaserpuls (11) überlagert und so einen Ausgangslaserpulszug erzeugt, wobei dem

20 Kombinationselement (8, 10) wenigstens ein Phasenstellelement (14, 15) zugeordnet ist, das die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls (11) überlagerten Eingangslaserpulse (7) beeinflusst,

- einem Fehlersignaldetektor (16), der aus dem Ausgangslaserpulszug ein Fehlersignal (18) ableitet, und

25 - einem Regler (19), der aus dem Fehlersignal (18) ein Regelsignal (20) zur Ansteuerung des Phasenstellelementes (14, 15) bildet,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

dass der Fehlersignaldetektor (16) die momentane Leistung des Ausgangslaserpulszuges bewertet.

8. Lasersystem nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Fehlersignaldetektor (16) das Fehlersignal (18) nur bildet, wenn die momentane Leistung einen vorgebbaren Schwellenwert überschreitet.

5 9. Lasersystem nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Regler (19) nur aktiv ist, wenn die momentane Leistung einen vorgebbaren Schwellenwert überschreitet.

10 10. Lasersystem nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwellenwert 50-95%, vorzugsweise 75% derjenigen Leistung entspricht, die bei phasenrichtiger Überlagerung der Eingangslaserpulse (7) im Ausgangslaserpulszug zu erwarten ist.

11. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Fehlersignaldetektor (16) wenigstens eine Photodiode (17) umfasst, die die momentane Intensität des Ausgangslaserpulszuges detektiert.

15 12. Lasersystem nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionsbandbreite der Photodiode (17) mindestens gleich der Eingangsrepetitionsfrequenz ist.

20 13. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass das Kombinationselement (8, 10) ein optisches Interferometer umfasst.

14. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass das Kombinationselement (8, 10) einen oder mehrere Strahlteiler (12, 12') aufweist, und zwar Polarisationsstrahlteiler (12) und/oder Intensitätsstrahlteiler (12').

25 15. Lasersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass das Phasenstellelement (14, 15) eine optische

Verzögerungsstrecke aufweist, deren Länge nach Maßgabe des Regelsignals (20) einstellbar ist.

16. Lasersystem, nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Laserpulsquelle (1) Aufteilungselemente (4, 5) zur zeitlichen und räumlichen Aufteilung von Laserpulsen umfasst.

17. Verfahren zur Erzeugung von Laserpulsen, mit den Verfahrensschritten:

- Erzeugen von Eingangslaserpulsen (7) bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz,
- 10 - Überlagern von zwei oder mehr Eingangslaserpulsen (7) in jeweils einem Ausgangslaserpuls (11), wodurch ein Ausgangslaserpulszug bei einer Ausgangsrepetitionsfrequenz erzeugt wird, wobei die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls (11) überlagerten Eingangslaserpulse (7) nach Maßgabe eines Regelsignals (20) eingestellt wird,
- 15 - Ableitung eines Fehlersignals (18) aus dem Ausgangslaserpulszug, und
- Bildung des Regelsignals (20) aus dem Fehlersignal (18),
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass der Ausgangslaserpulszug zur Ableitung des Fehlersignals (18) periodisch
20 mit der Ausgangsrepetitionsfrequenz abgetastet wird.

18. Verfahren zur Erzeugung von Laserpulsen, mit den Verfahrensschritten:

- Erzeugen von Eingangslaserpulsen (7) bei einer Eingangsrepetitionsfrequenz,
- 25 - Überlagern von zwei oder mehr Eingangslaserpulsen (7) in jeweils einem Ausgangslaserpuls (11), wodurch ein Ausgangslaserpulszug erzeugt wird, wobei die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls (11) überlagerten Eingangslaserpulse (7) nach Maßgabe eines Regelsignals (20) eingestellt wird,
- Ableitung eines Fehlersignals (18) aus dem Ausgangslaserpulszug,
- 30 und
- Bildung des Regelsignals (20) aus dem Fehlersignal (18),
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

dass die momentane Leistung des Ausgangslaserpulszuges bewertet wird, wobei die relative Phasenlage der in dem Ausgangslaserpuls (11) überlagerten Eingangslaserpulse (7) nach Maßgabe des Regelsignals (20) nur eingestellt wird, wenn die momentane Leistung einen vorgebbaren Schwellenwert überschreitet.

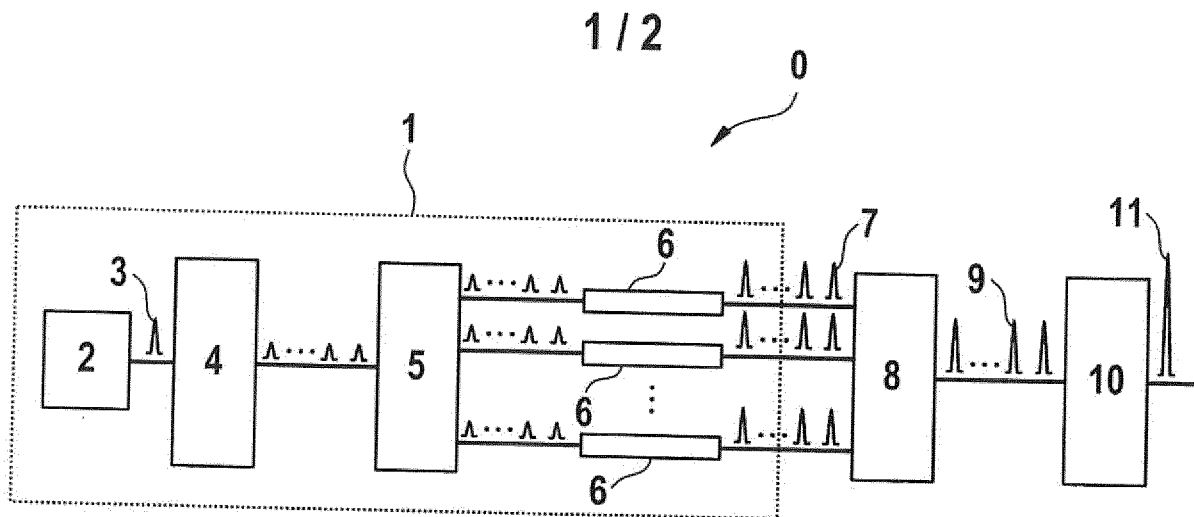


Fig. 1

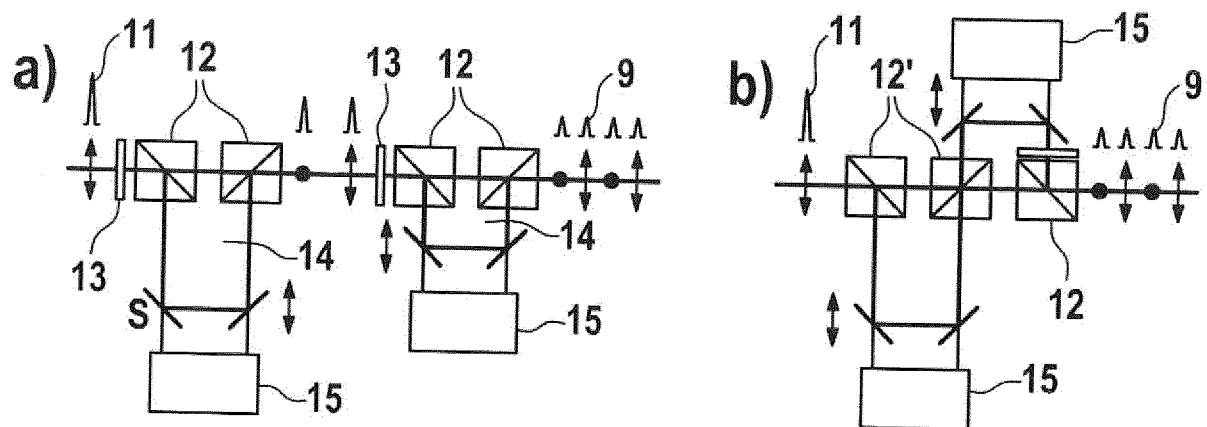


Fig. 2

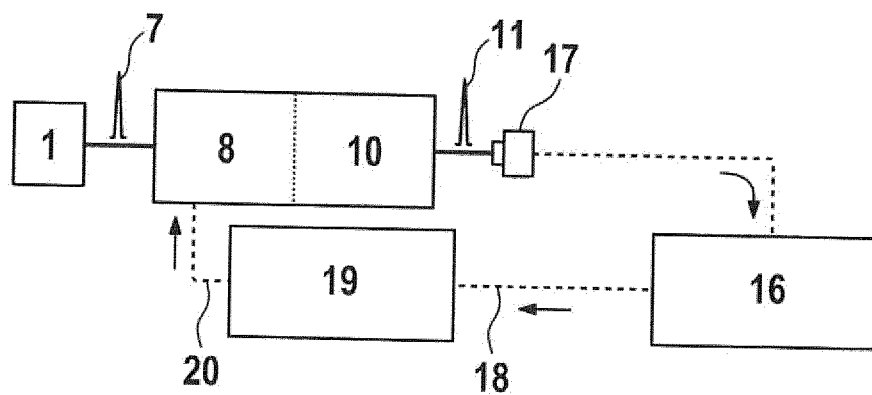


Fig. 3

2 / 2

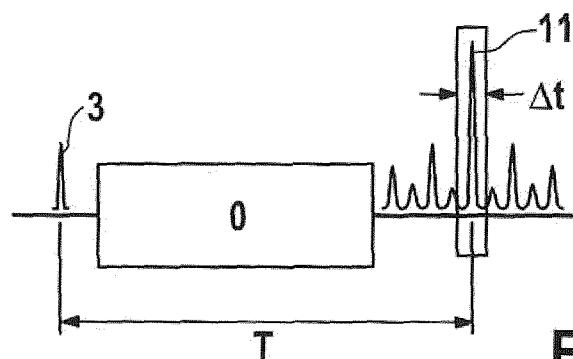


Fig. 4

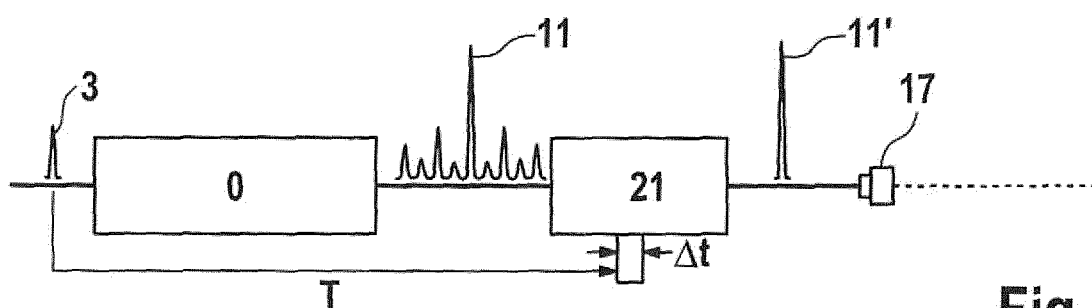


Fig. 5

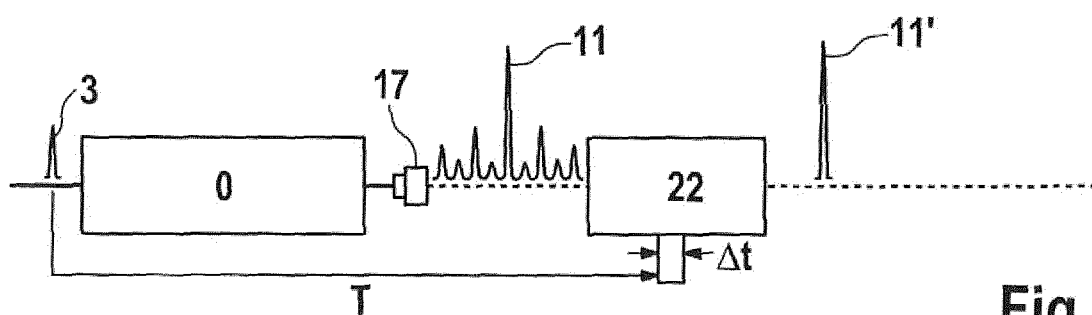


Fig. 6

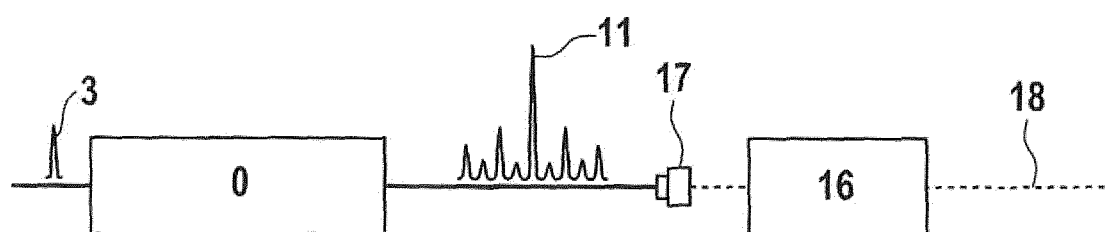


Fig. 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/058834

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. H01S3/00 H01S3/13 H01S3/23 ADD.		
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		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	MÜLLER M ET AL: "Phase stabilization of multidimensional amplification architectures for ultrashort pulses", PROCEEDINGS OF SPIE, FIBER LASERS XII: TECHNOLOGY, SYSTEMS, AND APPLICATIONS, vol. 9344, 4 March 2015 (2015-03-04), pages 93441D1-93441D7, XP060049601, DOI: 10.1117/12.2079222 ISBN: 978-1-62841-730-2 the whole document ----- -/--	1-18
☒ 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	Date of mailing of the international search report	
1 August 2017	07/08/2017	
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer Riechel, Stefan	

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2017/058834

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	MÜLLER M ET AL: "Electro-optically controlled divided-pulse amplification", SPIE - INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING. PROCEEDINGS, S P I E - INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, US, vol. 9728, 11 March 2016 (2016-03-11), pages 97282J-97282J, XP060067461, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.2212219 ISBN: 978-1-5106-0753-8 the whole document	1-6, 11-17
A	----- ENRICO SEISE ET AL: "Coherent addition of fiber-amplified ultrashort laser pulses", OPTICS EXPRESS, vol. 18, no. 26, 20 December 2010 (2010-12-20), page 27827, XP055031748, ISSN: 1094-4087, DOI: 10.1364/OE.18.027827 figures 2,3	6
A	----- KLENKE ARNO ET AL: "22GW peak power femtosecond fiber CPA system", PROCEEDINGS OF SPIE, FIBER LASERS XII:TECHNOLOGY, SYSTEMS , AND APPLICATIONS, vol. 9344, 4 March 2015 (2015-03-04), pages 93441A-93441A, XP060049598, DOI: 10.1117/12.2079193 ISBN: 978-1-62841-730-2 figure 3 -----	6

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. H01S3/00 H01S3/13 H01S3/23 ADD.		
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		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	MÜLLER M ET AL: "Phase stabilization of multidimensional amplification architectures for ultrashort pulses", PROCEEDINGS OF SPIE, FIBER LASERS XII:TECHNOLOGY, SYSTEMS , AND APPLICATIONS, Bd. 9344, 4. März 2015 (2015-03-04), Seiten 93441D1-93441D7, XP060049601, DOI: 10.1117/12.2079222 ISBN: 978-1-62841-730-2 das ganze Dokument ----- -/--	1-18
☒ 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		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
1. August 2017		07/08/2017
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 Riechel, Stefan

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	MÜLLER M ET AL: "Electro-optically controlled divided-pulse amplification", SPIE - INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING. PROCEEDINGS, S P I E - INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, US, Bd. 9728, 11. März 2016 (2016-03-11), Seiten 97282J-97282J, XP060067461, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.2212219 ISBN: 978-1-5106-0753-8 das ganze Dokument	1-6, 11-17
A	----- ENRICO SEISE ET AL: "Coherent addition of fiber-amplified ultrashort laser pulses", OPTICS EXPRESS, Bd. 18, Nr. 26, 20. Dezember 2010 (2010-12-20), Seite 27827, XP055031748, ISSN: 1094-4087, DOI: 10.1364/OE.18.027827 Abbildungen 2,3	6
A	----- KLENKE ARNO ET AL: "22GW peak power femtosecond fiber CPA system", PROCEEDINGS OF SPIE, FIBER LASERS XII: TECHNOLOGY, SYSTEMS, AND APPLICATIONS, Bd. 9344, 4. März 2015 (2015-03-04), Seiten 93441A-93441A, XP060049598, DOI: 10.1117/12.2079193 ISBN: 978-1-62841-730-2 Abbildung 3 -----	6