



(10) **DE 11 2010 000 981 T5** 2012.09.27

(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2010/101690**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2010 000 981.3**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2010/023123**
(86) PCT-Anmeldetag: **04.02.2010**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **10.09.2010**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **27.09.2012**

(51) Int Cl.: **H01S 3/23 (2011.01)**

(30) Unionspriorität:
12/399,435 06.03.2009 US

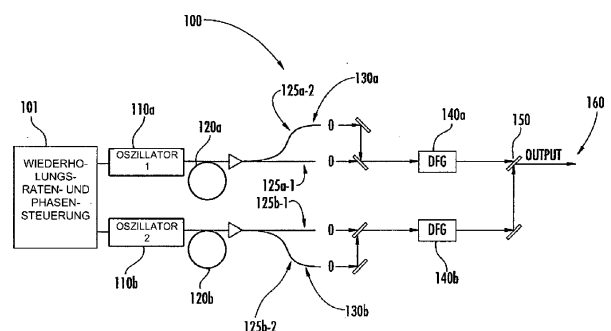
(74) Vertreter:
**Patent- und Rechtsanwälte Bardehle Pagenberg,
81675, München, DE**

(71) Anmelder:
IMRA America, Inc., Ann Arbor, Mich., US

(72) Erfinder:
**Fermann, Martin E., Dexter, Mich., US; Hartl,
Ingmar, Ann Arbor, Mich., US**

(54) Bezeichnung: **Optische Abtast- und Abbildsysteme, die auf dualgepulsten Lasersystemen basieren**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf gepulste Abtastlasersysteme zum optischen Abbilden. Kohärente duale Abtastlasersysteme (CDSL) und einige ihrer Anwendungen werden offenbart. Verschiedene Alternativen für Implementierungen werden dargestellt einschließlich hochintegrierten Konfigurationen. In mindestens einer Ausführungsform umfasst ein kohärentes duales Abtastlasersystem (CDSL) zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren. Die Oszillatoren werden konfiguriert, um bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten zu arbeiten, sodass eine Differenz f_r zwischen den Wiederholungsraten klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der Oszillatoren. Das CDSL-System umfasst auch einen nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitt, der optisch mit jedem Oszillator verbunden ist. Der Abschnitt umfasst ein nichtlineares optisches Element, das einen frequenzgewandelten spektralen Output erzeugt, der eine spektrale Bandbreite und einen Frequenzkamm hat, welcher Harmonische der Oszillator-Wiederholungsraten aufweist. Ein CDSL kann in einem Abbildungssystem angeordnet werden für eine oder mehrere der folgenden Aufgaben: optisches Abbilden, Mikroskopie, Mikro-Spektroskopie und/oder THz-Abbilden.



Beschreibung**HINTERGRUND DER ERFINDUNG****1. Gebiet der Erfindung**

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf gepulste Abtastlasersysteme zum optischen Abbilden.

2. Beschreibung von verwandten Systemen

[0002] Dual gepulste Lasersysteme, die zwei modengekoppelte Laser umfassen, welche bei zwei leicht unterschiedlichen Wiederholungsraten f_1 und f_2 arbeiten, sodass $\delta = |(f_1 - f_2)| \ll f_1$ und $\delta = |(f_1 - f_2)| \ll f_2$ gilt, sind nützliche Instrumente für die schnelle Abfrage von optischen Antwortfunktionen von vielfältig variierenden elektronischen und opto-elektronischen Geräten wie z. B. fotoleitende Schalter und integrierte Schaltkreise. Zusätzlich ist die Verwendung von dual gepulsten Lasersystemen zum THz-Abbilden vorgeschlagen worden, wie es im US-Patent 5,778,016 und in der US 6,396,856 von Sucha et al. offenbart ist.

[0003] Die Verwendung von dual modengekoppelten Lasern kann bezüglich des Untersuchens von optischen Antwortfunktionen durch das Implementieren von dualen elektronischen Schaltkreissystemen ersetzt werden, wie es im US-Patent 5,748,399 von van der Weide vorgeschlagen worden ist. Dieser Zugang hat einen gewissen Vorteil bei der Untersuchung der spektralen Abhängigkeit der Signalübertragung im THz-Spektralbereich. Zwei gepulste Signalquellen, die ebenfalls bei zwei leicht verschiedenen Wiederholungsraten f_1 und f_2 arbeiten, sind offenbart worden, die eine Emission im THz-Spektralbereich produzieren, die aus Frequenzlinien besteht, welche reine Harmonische der zwei Wiederholungsfrequenzen umfassen. Der Nachweis des Schwebungssignals bei $\delta, 2\delta, \dots, n\delta$ wird dann verwendet, um die Signalübertragung bei den Harmonischen der Wiederholungsrate $f_1, 2f_1, \dots, nf_1$ abzuleiten. Es ist zu beachten, dass bei diesem Schema ein Schwebungssignal bei einer Differenzfrequenz, welche so klein wie δ ist, verwendet wird, was nicht ideal ist, da δ typischerweise einen kleinen Wert hat, bei dem akustisches Rauschen das Signal korrumpieren kann.

[0004] Die Verwendung von modengekoppelten Lasern wurde später wieder offenbart von Keilmann et al. in dem Artikel „Time domain mid-infrared frequency-comb spectrometer“, Opt. Lett., vol. 29, S. 1542–1544 (2004), der die Verwendung eines dualen Abtastlasersystems für die Fouriertransformation-Spektroskopie (FTS) und die Analyse der spektralen Transmission von Materialien im Infrarotspektralbereich vorschlug.

[0005] Um die Abtastrate von FTS mittels dualen Laserabtasten zu verbessern, schlugen Keilmann et

al. in der internationalen Patentoffenlegungsschrift WO 2007/045461 vor, die Wiederholungsrate von einem Laser bezüglich des anderen Lasers zu verwascheln (dithering) unter Verwendung von Techniken, die ähnlich zu denen sind, die im '016-Patent beschrieben werden.

[0006] Die Verwendung von Lasern für die Spektroskopie wurde auch von Haensch et al. im US-Patent 7,203,402 vorgeschlagen, bei dem ein einzelner Frequenzkamm-Laser, welcher auf einem modengekoppelten Laser basiert, für die Messung von bestimmten Eigenschaften von optischen Elementen verwendet wurde. Hierbei wurde die Messung entweder gleichzeitig oder nacheinander bei jeder einzelnen Frequenzlinie des Kammlasers durchgeführt.

[0007] Ein Frequenzkammlaser wurde kürzlich auch mit einem konventionellen Fouriertransformation-Spektrometer kombiniert, um ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis bei spektralen Messungen zu erhalten (J. Mandon et al., „Fourier transform spectroscopy with a laser frequency comb“, in Nature Photonics, 2009).

[0008] Frühere duale Abtastlasersysteme haben eine Reihe von Begrenzungen, wenn sie für Spektroskopie verwendet werden. Die niedrige Wiederholungsrate der implementierten Laserquellen führt zu äußerst langen Datenerhebungszeiten, und die Techniken zur Signalerzeugung im nahen Infrarot bis mittleren Infrarot-Spektralbereich sind relativ umständlich. Systeme, die mit voluminösen Festkörperlaser ausgestattet sind, sind nicht gut geeignet für Instrumentierungsanwendungen und erfordern eine große Anzahl von Komponenten. Andere Systeme (P. Giaccari et al., „Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method“, Opt. Express., vol. 16, S. 4347 (2008)) und (I. Coddington et al., „Coherent Multiheterodyne Spectroscopy Using Stabilized Optical Frequency Combs“, Phys. Rev. Lett. 100, 13902 (2008)) liefern nur einen sehr begrenzten spektralen Umfang.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0009] Im Folgenden bezeichnen wir duale Abtastlasersysteme, die das diskrete Frequenzspektrum, das heißt: das Kammspektrum, von modengekoppelten Lasern nutzen, aber die keine präzise Kammsteuerung innerhalb des Laseroszillators erfordern noch sich darauf verlassen, als kohärente duale Abtastlaser (coherent dual scanning lasers, CDSLs).

[0010] Hier offenbaren wir einen neuen CDSL für Anwendungen in der Spektroskopie, Mikrospektroskopie, Mikroskopie, Fouriertransformation-Spektroskopie (FTS), optisches und THz-Abbilden und/oder ähnliche Anwendungen. Die CDSLs basieren auf mo-

dengekoppelten Faserlasern, die zum Betrieb bei hohen Wiederholungsraten ausgelegt sind, was hohe Abtastgeschwindigkeiten erlaubt. Effiziente spektroskopische Messungen werden durch den Einsatz von phasenkontrollierten Faserlasern mit niedrigem Rauschen ermöglicht, die konstruiert sind, um einen breiten spektralen Umfang mithilfe des Einsatzes von nichtlinearen spektralverbreiterten optischen Elementen bereitzustellen. Verschiedene kompakte Entwürfe werden beschrieben. In verschiedenen Ausführungsformen wird eine Reduzierung der Komponentenanzahl weiterhin erreicht durch den gleichzeitigen Einsatz von nichtlinearen spektralverbreiterten Elementen und die Verwendung von angemessenen Zeitverzögerungen zwischen den Lasern.

[0011] Wir offenbaren weiterhin die Verbindung von hochgradig nichtlinearen Wellenleitern in Verbindung mit kohärenter Superkontinuum-Erzeugung, um einen optischen Output vom sichtbaren bis zum mittleren Infrarotspektralbereich zu erzeugen. Differenzfrequenz-Erzeugung (Difference frequency generation, DFG) erzeugt einen Output im mittleren Infrarot-Spektralbereich und vereinfacht die Implementierung von FTS. DFG eliminiert Variationen der Phasenschlupffrequenz (Carrier envelope offset frequency) außerhalb des Laserresonators und erzeugt demnach ein Output-Spektrum, das echte Harmonische der Laserwiederholungsraten umfasst.

[0012] In Verbindung mit fotoleitenden Antennen kann eine spektrale Ausstrahlung in dem THz-Spektralbereich erhalten werden.

[0013] Um die Differenzfrequenz-Erzeugung effizient zu verwenden, können die modengekoppelten Laser so konfiguriert werden, dass jeder von ihnen zwei Outputs hat. Verstärker können weiterhin eingesetzt werden, um jene Outputs zu verstärken. Die Superkontinuum-Erzeugung kann dann eingesetzt werden, um diese Faserlaser-Outputs spektral zu verbreitern. Die Differenzfrequenz-Erzeugung kann zwischen spektralen Komponenten des Superkontinuums oder zwischen einer spektralen Komponente des Superkontinuums und einem anderen Faserlaser-Output eingesetzt werden.

[0014] Nichtlineare Signalinterferenzen bei nichtlinearen frequenzverbreiterten Elementen wegen überlappender Pulse können entfernt werden durch die Verwendung von separaten nichtlinearen frequenzverbreiterten Elementen für jeden Laser. Alternativ kann eine optische Verzögerungslinie am Output des CDSL eingesetzt werden, um ein Interferenzsignal nur aus Pulsen zu erzeugen, die nicht in irgendeinem nichtlinearen optischen Element überlappen. Elektronisches Gating kann außerdem eingesetzt werden, um eine optimale Signalaufbereitung zu erhalten.

[0015] In zumindest einer Ausführungsform können die Phasenschlupffrequenzen (carrier envelope offset frequencies) bei modengekoppelten Femtosekunden-Faserlasern zum kohärenten dualen Abtasten angepasst werden durch Steuerung von verschiedenen optischen Elementen innerhalb des Resonators wie zum Beispiel dem Resonatorverlust, der Temperatur eines sättigbaren Absorbers (saturable absorber), der Fasertemperatur und der Temperatur eines Fasergitters (Fiber Grating). In einigen Ausführungsformen kann die Steuerung der Phasenschlupffrequenz (carrier envelope offset frequency) vermieden werden durch die Implementierung von DFG.

[0016] In mindestens einer Ausführungsform können die Phasenschlupffrequenz (carrier envelope offset frequencies) und die Wiederholungsraten bei modengekoppelten Femtosekunden-Faserlasern zum kohärenten dualen Abtasten weiterhin gesteuert werden durch das Phasenkoppeln der zwei Laser an externe Resonatoren.

[0017] In mindestens einer Ausführungsform können die Phasenschlupffrequenzen (carrier envelope offset frequencies) und die Wiederholungsraten bei modengekoppelten Femtosekunden-Faserlasern zum kohärenten dualen Abtasten außerdem gesteuert werden durch das Phasenkoppeln der beiden Laser an zwei externe Einzelfrequenz-Laser.

[0018] In einer anderen Ausführungsform kann die Differenz zwischen den Phasenschlupffrequenzen (carrier envelope offset frequencies) und den Wiederholungsraten bei den modengekoppelten Femtosekunden-Faserlasern zum kohärenten dualen Abtasten weiter gesteuert werden durch das Phasenkoppeln der beiden Laser an einen externen Einzelfrequenz-Laser.

[0019] Zur verbesserten spektralen Auflösung können auch modengekoppelte Femtosekunden-Faserlaser zum kohärenten dualen Abtasten konstruiert werden mit Lasern, bei denen die Wiederholungsrate des einen Lasers eine näherungsweise Harmonische der Wiederholungsrate des anderen Lasers ist.

[0020] Das Rauschen der Phasenschlupffrequenzen (carrier envelope offset frequencies) kann minimiert werden durch ein angemessenes Anpassen der Laserdispersion innerhalb des Resonators und der Pulsbreite (pulse width), die in die Superkontinuum-Fasern eingeführt wird.

[0021] Eine Drift in der Phasenschlupffrequenz zwischen den beiden Lasern in den CDSLs kann überwacht werden und durch externe optische Mittel korrigiert werden. Ebenso kann ein f-2f-Interferometer eingesetzt werden zum Aufzeichnen der Phasenschlupffrequenz.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0022] **Fig. 1** ist ein Diagramm, das ein Beispiel eines CDSL zeigt.

[0023] **Fig. 2** ist ein schematisches Diagramm eines optisch integrierten Dispersionskompensators und eines nichtlinearen Frequenzumwandlungsabschnitts, wie er für die Superkontinuum-Erzeugung verwendet wird.

[0024] **Fig. 3** ist ein schematisches Diagramm eines CDSL, wie er für optische Abbildungsanwendungen verwendet wird.

[0025] **Fig. 4** ist ein schematisches Diagramm eines CDSL, der mit einer verringerten Zahl von Komponenten ausgelegt ist.

[0026] **Fig. 5** ist ein schematisches Diagramm eines weiteren CDSL, der auf dem Überwachen der Phasenschlupffrequenz (carrier envelope offset frequencies) basiert.

[0027] **Fig. 6a** ist ein schematisches Diagramm einer Anordnung innerhalb des Resonators bei einem modengekoppelten Faseroszillator zum Widerstandsheizen eines Faser-Bragg-Gitters (fiber Bragg grating) innerhalb des Resonators, um die Phasenschlupffrequenz zu steuern.

[0028] **Fig. 6b** ist ein schematisches Diagramm einer Anordnung innerhalb des Resonators bei einem modengekoppelten Faseroszillator zum Modulieren des Drucks, der auf ein innerhalb des Resonators angeordnetes Faser-Bragg-Gitter ausgeübt wird, um die Phasenschlupffrequenz zu kontrollieren.

[0029] **Fig. 6c** ist ein schematisches Diagramm einer Anordnung, welche einen innerhalb des Resonators angeordneten Modulator umfasst, wie er zum Modulieren des Verlusts innerhalb des Resonators eines modengekoppelten Lasers verwendet wird, um die Phasenschlupffrequenz zu steuern.

[0030] **Fig. 6d** ist ein schematisches Diagramm einer Anordnung innerhalb des Resonators bei einem modengekoppelten Faserlaser zum Modulieren der restlichen Pumpleistung, die auf einen innerhalb des Resonators angeordneten sättigbaren Absorber auftrifft, um die Phasenschlupffrequenz zu steuern.

[0031] **Fig. 7** ist ein Plot des Radiowellen-Spektrums eines bezüglich der Phasenschlupffrequenz verriegelten (locked) Yb-Faserlasers, der bei einer Wiederholungsrate von 1 GHz arbeitet, gemessen hinter einem f-2f-Interferometer.

[0032] **Fig. 8** ist ein Plot des spektralen Outputs einer auf einem Yb-Faserlaser basierenden kohären-

ten Superkontinuum-Quelle, die bei einer Wiederholungsrate von 1 GHz arbeitet.

[0033] **Fig. 9** ist ein schematisches Diagramm eines dualen Abtastlasersystems, das an zwei externe Resonatoren gekoppelt ist zur Steuerung der Wiederholungsrate und der Trägerphase.

[0034] **Fig. 10** ist ein schematisches Diagramm eines dualen Abtastlasersystems, das an zwei Laser mit schmaler Linienbreite gekoppelt ist, um die Wiederholungsrate und die Trägerphase zu steuern,

[0035] **Fig. 11** ist ein schematisches Diagramm eines ultrakompakten dualen Abtastlasersystems, das einen externen Laser mit schmaler Linienbreite verwendet, um die Wiederholungsrate und die Trägerphase zu steuern.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG
DER ERFINDUNG

[0036] Diese Beschreibung diskutiert zunächst einige Aspekte von modengekoppelten Lasern und Frequenzkamm-Erzeugung, die in besonderer Beziehung stehen zu einem CDSL und Anwendungen desselben. Beispiele von Anwendungen solcher Laser für IR-Spektroskopie und THz-Abbilden sind umfasst.

[0037] Modengekoppelte Laser mit festen optischen Frequenzspektren, welche eine Menge von äquidistanten optischen Frequenzlinien umfassen, werden typischerweise auch als Frequenzkamm-Laser bezeichnet. Das optische Frequenzspektrum eines Frequenzkammlasers kann durch $S(f) = f_{\text{ceo}} + mf_{\text{rep}}$ beschrieben werden, wobei m eine ganze Zahl ist, f_{ceo} die Phasenschlupffrequenz (carrier envelope offset frequency) ist und f_{rep} die Wiederholungsrate des Lasers ist. Die Amplitude der einzelnen Frequenzlinien tasten tatsächlich das Spektrum der optischen Einhüllenden an diskreten Punkten $f_{\text{ceo}} + mf_{\text{rep}}$ im optischen Frequenzraum ab.

[0038] Frequenzkamm-Laser wurden in der US 6,785,303 von Holzwarth et al. beschrieben, bei denen die Steuerung der Pumpleistung eines modengekoppelten Lasers in Verbindung mit elektronischen Rückkopplungsschleifen verwendet wird, um f_{ceo} zu stabilisieren und damit die Lage aller einzelnen Frequenzlinien, welche das optische Frequenzspektrum ausmachen, zu stabilisieren. In einem standardmäßigen modengekoppelten Laser ist f_{ceo} nicht kontrolliert und deswegen ist nur der Abstand zwischen allen einzelnen Frequenzlinien stabil, wenn man von einem langsamen Drift von f_r wegen Fluktuationen in der Resonatorlänge absieht. Wie oben beschrieben entspricht der spektrale Abstand der Wiederholungsrate f_{rep} des modengekoppelten Oszillators, die im Allgemeinen eine Frequenz im MHz-Bereich und in verschiedenen hier beschriebenen Ausführungsformen

vorzugsweise ungefähr ein GHz oder sogar noch höher ist. Die exakte Lage der Linie innerhalb des Frequenzspektrums variiert in zufälliger Weise. Jedoch kann das optische Spektrum eines Frequenzkamm-Lasers und eines modengekoppelten Lasers dieselbe einhüllende Funktion (envelope function) haben. Ebenso umfasst das optische Spektrum eines modengekoppelten Lasers eine Anzahl von diskreten Frequenzlinien, selbst wenn f_{ceo} nicht kontrolliert ist.

[0039] Wenn zwei Frequenzkamm-Laser bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten f_{rep} bzw. $f_{\text{rep}} + \delta$ betrieben werden und wenn der Output der beiden Laser auf einem Detektor überlappt wird, können verschiedene Schwebungsfrequenzen im Radiowellenbereich beobachtet werden. Wenn weiterhin sichergestellt ist, dass bei beiden Lasern die Frequenzzähne der Ordnung m zueinander nächstbenachbart sind, umfasst das Radiofrequenzspektrum harmonische Frequenzen $m\delta + \Delta f_{\text{ceo}}$, $(m + 1)\delta + \Delta f_{\text{ceo}}$, $(m + 2)\delta + \Delta f_{\text{ceo}}$... mit Amplituden aus dem geometrischen Mittel der Amplituden bei den optischen Frequenzen m , $f + f_{\text{ceo1}}$ und $m(f + \delta) + f_{\text{ceo2}}$, wobei $\Delta f_{\text{ceo}} = f_{\text{ceo1}} - f_{\text{ceo2}}$. Der Parameter f_{rep}/δ ist der Skalierungsfaktor, der die Radiofrequenzen zu den optischen Frequenzen skaliert. Zum Beispiel erhalten wir für $\delta = 10$ Hz und $f_{\text{rep}} = 1$ GHz einen Skalierungsfaktor von 10^8 ; eine im Radiofrequenzbereich bei 1 MHz gemessene Intensität entspricht einer optischen Frequenz von 10^{14} Hz. Δf_{ceo} kann gewählt werden, um weiterhin die Radiofrequenz zu erniedrigen, bei der Messungen durchgeführt werden müssen, um die Amplitude der optischen Frequenzen zu erhalten. Die Radiofrequenz, bei der Messungen durchgeführt werden sollen, kann verändert werden, indem gewährleistet wird, dass die Frequenzzähne der Ordnung m und n nächstbenachbart bei den beiden Lasern sind. In diesem Fall sind die Schwebungsfrequenzen gegeben durch $(m - n)f_r + m\delta + \Delta f_{\text{ceo}}$; $(m - n)f_r + (m + 1)\delta + \Delta f_{\text{ceo}}$; $(m - n)f_r + (m + 2)\delta + \Delta f_{\text{ceo}}$...

[0040] Die Notwendigkeit für einen Kammlaser mit einem festen optischen Frequenzspektrum für spektroskopische Messungen kann aufgehoben werden durch die Implementierung von Korrekturtechniken, die den Drift der Frequenzlinien innerhalb der spektralen Einhüllenden überwachen, wie es kürzlich von P. Giaccari et al., „Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method“, Opt. Express., vol. 16, S. 4347 (2008) diskutiert worden ist.

[0041] Alternativ kann der Drift der individuellen Frequenzlinien ausgeschaltet werden durch das Hinzufügen eines nichtlinearen Frequenzumwandlungsabschnitts nach einem modengekoppelten Oszillator. Zum Beispiel wenn die Differenzfrequenz-Erzeugung zwischen dem roten und dem blauen Teil eines Spektrums eines modengekoppelten Lasers implementiert

wird, ist es bekannt, dass die einzelnen Frequenzlinien präzise bei den echten Harmonischen der Laserwiederholungsrate auftreten, unabhängig vom Wert für f_{ceo} . Wie oben diskutiert, bezeichnen wir duale Abtastlasersysteme, die den Vorteil eines diskreten Frequenzspektrums von modengekoppelten Lasern nutzen, aber sich nicht auf eine präzise Phasen- oder f_{ceo} -Kontrolle innerhalb des Laseroszillators verlassen, als CDSLs.

[0042] Für Instrumentierungsanwendungen von modengekoppelten Faserlasern bieten modengekoppelte Faserlaser einige Vorteile sowohl gegenüber modengekoppelten voluminösen Festkörperlasern als auch gegenüber modengekoppelten Diodenlasern. Modengekoppelte Faserlaser bieten typischerweise überlegene Rauscheigenschaften verglichen mit modengekoppelten Diodenlasern und können in ein kleineres Volumen gepackt werden als modengekoppelte voluminöse Festkörperlaser. Modengekoppelte Faserlaser können mit exzellenter thermischer und mechanischer Stabilität produziert werden. Passiv modengekoppelte Faserlaser insbesondere können mit wenigen und kostengünstigen optischen Komponenten konstruiert werden, die für eine Massenproduktion geeignet sind, wie in den US-Patenten 7,191,705 von Fermann et al. und 11/546,998 von Hartl. et al. offenbart wird. US-Patent 7,190,705 wird in seiner Gänze hiermit durch Bezugnahme eingeschlossen. Zusätzlich ist die Verwendung von dual gepulsten Lasersystemen auch beim THz-Abbildern vorgeschlagen worden, wie im US-Patent 5,778,016 und US 6,396,856 von Sucha et al. offenbart ist. Die '016 und '856-Patente offenbaren auch verschiedene Techniken und Konfigurationen zum Kontrollieren des relativen und des absoluten Timing-Drifts von modengekoppelten Lasern. Die US-Patente 5,778,016 und 6,396,856 werden hier in ihrer Gänze durch Bezugnahme eingeschlossen.

[0043] Die bezüglich Dispersion kompensierten Faserlaser, wie sie in der '795 offenbart sind, eignen sich für die Konstruktion von Frequenzkamm-Quellen mit niedrigem Rauschen. Ebenfalls offenbart wurden Konstruktionen von Faserlasern, die mit Wiederholungsraten oberhalb von 1 GHz arbeiten.

[0044] Ein Betrieb mit niedrigem Rauschen von Faserlasern minimiert ihren Timing-Jitter, was eine optimierte Kontrolle des Timings der Pulse erlaubt. Das '705-Patent offenbarte die erste faserbasierte Frequenzkamm-Quelle mit niedrigem Rauschen. Ein Betrieb mit niedrigem Rauschen wurde erhalten durch das Kontrollieren der Dispersion des Faserresonators in einem bestimmten wohldefinierten Bereich. Der Betrieb mit niedrigem Rauschen von Faser-Frequenzkamm-Quellen ist im Allgemeinen erforderlich, um das Rauschen der Phasenschlupffrequenz (carrier envelope offset frequency) f_{ceo} des Lasers auf ein vernachlässigbares Niveau zu minimieren und eben-

so um das Messen und die Kontrolle von f_{ceo} zu erleichtern.

[0045] Einige Beispiele von Faser-basierten CDSL-Systemen werden unten offenbart. Implementierungen, die eine hohe Wiederholungsrate, niedriges Rauschen und einen hohen Grad von Integration bereitstellen, werden beschrieben. Nichtlineare spektrale Erzeugung (non-linear spectral generation) und verschiedene Implementierungen für die Phasenkontrolle führen zu stabilen Output-Signalen im nahen Infrarotbereich, wodurch Vorteile für Anwendungen von Infrarot-Spektroskopie und von THz-Abbilden bereitgestellt werden.

[0046] [Fig. 1](#) illustriert schematisch ein kohärentes duales Abtastlaser-System **100** (CDSL) gemäß einer Ausführungsform. In diesem Beispiel werden zwei modengekoppelte Oszillatoren **110a**, **110b**, die leicht verschiedene Wiederholungsraten besitzen, verwendet, um Input-Pulszüge (input pulse trains) bereitzustellen. Ein Pulszug aus jedem Oszillator wird verstärkt und in einen ersten und zweiten optischen Pfad aufgeteilt. Die Pulse in jedem Pfad werden mit einem Dispersionskompensator aufbereitet. Ein dazwischen liegender nichtlinearer Frequenzumwandlungsabschnitt erzeugt ein Superkontinuum entlang eines ersten Pfades, welcher dann kombiniert wird mit dem Pulszug in dem zweiten Pfad unter Verwendung eines nichtlinearen Frequenzumwandlers zur DFG (Differenzfrequenzerzeugung). Die DFG-Outputs, die jedem der Oszillatoren **110a**, **110b** entsprechen, werden dann kombiniert, um den Output des CDSL zu produzieren.

[0047] Bezugnehmend auf [Fig. 1](#) umfasst das System zwei Oszillatoren **110a**, **110b** (Oszillator 1 und Oszillator 2), die vorzugsweise Pulse erzeugen, die zu einer Femtosekunden(fs)-Zeitskala komprimiert werden können. Vorzugsweise werden die Oszillatoren **110a**, **110b** implementiert unter Verwendung von Er-, Yb- oder Tm-Oszillatoren, die bei Wiederholungsraten von ca. 250 MHz oder höher arbeiten. Solche Oszillatoren wurden zum Beispiel in den US-Patenten 7,190,705 von Fermann et al. und 11/546,998 von Hartl et al. beschrieben, wie auch in der vorläufigen US-Anmeldung US 61/120,022 mit dem Titel „Highly Rare-Earth-Doped Optical Fibers for Fiber Lasers and Amplifiers“ von Dong et al., die hier durch Bezugnahme eingeschlossen ist. Verschiedene Beispiele, die in der '022-Anmeldung offenbart sind, umfassen mit seltenen Erden hochdotierte Gain-Fasern, die eine Pumpabsorption von bis zu 5000 dB/m besitzen und einen Gain pro Längeneinheit im Bereich von 0,5–5 dB/cm. Verschiedene Dotiermaterial-Konzentrationen reduzieren das Yb-Clustering, wodurch eine hohe Pumpabsorption, ein großer Gain und ein geringes Photodarkening bereitgestellt werden. Solche mit seltenen Erden dotierten Fasern ermöglichen die Konstruktion von Faserlasern mit kurzer Resonator-

länge und die Erzeugung von hochenergetischen ultrakurzen Pulsen bei einer Wiederholungsrate oberhalb von 1 GHz. Solche Konfigurationen ermöglichen den Betrieb von CDSLs mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis. Beispielsweise werden andere Faserkonfigurationen, die eine hohe Pumpabsorption verglichen mit konventionellen Glasfasern (silica fibers) haben, zum Beispiel eine Absorption von 300–1500 dB/m bei 976 nm, auch in der US-Anmeldung 11/693,633 offenbart mit dem Titel „Rare earth doped and large effective area optical fibers for fiber lasers and amplifiers“, welche nun als US-Patentanmeldungsoffenlegungsschrift mit der Nummer 2008/0069508 veröffentlicht ist. Die US-Anmeldung 11/693,633 wird hiermit durch Bezugnahme in ihrer Gänze eingeschlossen.

[0048] Der Output der Oszillatoren wird vorzugsweise durch optische Isolatoren (nicht gezeigt) geleitet, um ihre Empfindlichkeit bezüglich Rückreflektionen zu minimieren. Die Wiederholungsraten der zwei Oszillatoren können überwacht werden durch Verwendung von zwei Abzweigkopplern (top-couplers), die in den Output der zwei Oszillatoren eingesetzt werden und die einen kleinen Bruchteil des Outputs der Oszillatoren auf zwei Detektoren (nicht gezeigt) leiten, die Signale, welche die Wiederholungsrate repräsentieren, an die Steuereinheit **101** liefern.

[0049] Die Oszillatoren können so konstruiert werden, dass sie bei entsprechenden Wiederholungsraten von f und $f + \delta$ arbeiten, wobei $\delta \ll f$. Alternativ kann die Wiederholungsrate des zweiten Oszillators als $nf + \delta$ gewählt werden, wobei n eine ganze Zahl ist. Der Unterschied zwischen ihren Wiederholungsraten δ oder $(n - 1)f + \delta$ für den Fall von stark verschiedenen Wiederholungsraten kann dann durch das Wiederholungsrate-Steuerelement **101** gesteuert werden, welches Phasenregelkreise (phase-lock loops) und einen innerhalb des Resonators angeordneten Transducer, der in einem der Oszillatoren eingesetzt wird, umfasst. Solch ein innerhalb des Resonators angeordneter Transducer kann ein Spiegel sein, der auf einem piezoelektrischen Element montiert ist oder ein Element zum Heizen der Faser sein, zum Beispiel wie im US-Patent 7,190,705 von Fermann et al. und in der US-Patentanmeldung mit der Nummer 11/546,998 von Hartl et al. diskutiert wird. Die Oszillatoren können näherungsweise chirp-freie Pulse oder leicht gechirpte Pulse emittieren. Vorzugsweise haben alle gechirpten Pulse, die von den Oszillatoren **110-a**, **110-b** ausgesendet werden, einen nahezu identischen Chirp. Vorzugsweise kann die Leistung der beiden Oszillatoren über einen Bereich angepasst werden, zum Beispiel durch ein variables Dämpfungsglied.

[0050] Die Outputs der Oszillatoren sind an zwei Faserverstärker **120-a**, **120-b** gekoppelt. Die Faserverstärker sind vorzugsweise mantelgepumpt. Sol-

che mantelgepumpten Verstärker werden im US-Patent 7,190,705 von Fermann et al. diskutiert. Ebenso kann Mantelpumpen über optische Sternkoppler (star-couplers) wie sie in Dong et al. in der Anmeldung mit Nummer 61/120,022 „Highly Rare-Earth-Doped Optical Fibers for Fiber Lasers and Amplifiers“ diskutiert werden, eingesetzt werden und wird hier nicht weiter diskutiert. Vorzugsweise ist die Dispersion in den beiden Ausbreitungspfaden zwischen Oszillatoren und Verstärkern aufeinander abgestimmt.

[0051] Im Beispiel der [Fig. 1](#) wird der Output der optischen Signale aus jedem Faserverstärker in zwei Arme aufgespalten: Arme **125a-1**, **125a-2** die optisch an den Verstärker **120a** und den Oszillator **110a** gekoppelt sind und Arme **125b-1**, **125b-2**, die optisch an den Verstärker **120b** und den Oszillator **110b** gekoppelt sind. Optische Faserkoppler sind bevorzugt und Aufspaltungsverhältnisse zwischen 5 zu 95 und 50 zu 50 können implementiert werden. Jeder Arm kann wie dargestellt in einer Konfiguration implementiert werden, die ganz aus Fasermaterial besteht. In einigen Ausführungsformen kann zumindest ein Teil eines Arms mit einzelnen Komponenten (bulk components) konstruiert werden.

[0052] Dispersionskompensation wird in den optischen Pfaden aller Arme durchgeführt, um Dispersion zu kompensieren, zum Beispiel mit einer Reihe von dispersionskompensierenden Elementen, die einen Dispersionskompensator bilden. Zumindest ein Teil der Arme kann aus identischen Komponenten konstruiert werden, einschließlich der verschiedenen dispersionskompensierenden Elemente. Dispersionskompensierende Elemente können optische Elemente zur Pulskomprimierung umfassen, um Femtosekunden-Pulse hoher Qualität bereitzustellen und können eine vollständige Dispersionskompensation bereitstellen oder leicht negativ oder positiv gechirpte Pulse an ihrem Ausgang produzieren. Wenn vollständige Dispersionskompensation verwendet wird, sind die Output-Pulse nahezu Fourier-limitiert (transform limited).

[0053] Ein Dispersionskompensator kann verschiedene Faserelemente umfassen und kann mit einem integrierten, vollständig in Fasermaterial ausgeführten Design implementiert werden, wie weiter unten mit Bezug auf [Fig. 2](#) diskutiert werden wird. Zum Beispiel kann ein erstes Faserelement eine Faser mit positiver Dispersion umfassen, um den Output des Verstärkers spektral zu verbreitern und mindestens ein zweites Faserelement zur Dispersionskompensation und zum Komprimieren des spektral verbreiterten Outputs in die Nähe der Bandbreitengrenze. Vorzugsweise umfasst das pulskomprimierende Faserelement eine dispersionskompensierende Faser oder eine photonische Kristall-Faser mit zentralem Luftloch, um die Nichtlinearität der dispersionskompensierenden Stufe zu minimieren. Pulskomprimierung

über Solitonkomprimierung höherer Ordnung kann in einem oder mehreren Faserelementen mit negativer Dispersion eingesetzt werden. Ebenso können voluminöse optische dispersionskompensierende Elemente wie ein Gitter, ein Prisma oder Prismenpaare verwendet werden. Vorzugsweise werden die Pulse zu einer Pulsbreite von weniger als 500 fs komprimiert, noch bevorzugter zu einer Pulsbreite von weniger als ungefähr 300 fs und am meisten bevorzugt zu einer Pulsbreite von weniger als ungefähr 100 fs.

[0054] Optische Pulse, die sich in den Armen **125a-2**, **125b-2** ausbreiten, werden auch frequenzgewandelt in einem nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitt, der die Frequenzwandlungselemente **130a**, **130b** umfasst. Die Frequenzwandlungselemente **130a**, **130b** können optische Elemente zur Superkontinuum-Erzeugung umfassen, um Pulse bereitzustellen mit einer spektralen Bandbreite von mindestens einem wesentlichen Bruchteil einer optischen Oktave und wesentlich breiter als das Output-Spektrum der Oszillatoren **110a**, **110b**. Die Frequenzwandlungselemente **130a**, **130b** erzeugen ein breitbandiges Spektrum, zum Beispiel ein Spektrum, welches sich in den nahen mittleren Infrarotbereich erstreckt, zum Beispiel vom nahen Infrarot- bis zu einem Bereich von mindestens ungefähr 3–5 μm oder bis zu ungefähr 10–20 μm .

[0055] In verschiedenen Implementierungen umfasst ein Frequenzwandlungsabschnitt vorzugsweise eine hochgradig nichtlineare Faser, einen periodisch gepolten LiNbO_3 (PPLN)-Wellenleiter, einen Siliziumwellenleiter oder irgendeinen anderen geeigneten nichtlinearen Wellenleiter. Ein Element kann auch optisch mit Mustern versehen werden oder periodisch oder aperiodisch gepolt werden oder periodische Veränderungen der Nichtlinearität zweiter Ordnung entlang seiner Länge haben. Die Frequenzwandlungsabschnitte **130a**, **130b** in jedem Arm erzeugen ein optisches Superkontinuum-Spektrum, das sich in den mittleren Infrarotbereich erstrecken kann, wenn hochgradig nichtlineare Fluorid- oder Chalcogenit-Wellenleiter verwendet werden. Die Superkontinuum-Erzeugung in nichtlinearen Wellenleitern wurde in der US-Patentanmeldung 11/546,998 von Hard et al. beschrieben und wird hier nicht weiter diskutiert. Wie es bei der Superkontinuum-Erzeugung bekannt ist, wird die fundamentale Frequenzkamm-Struktur von den Oszillatoren erhalten. Der zusätzlich erzeugte spektrale Output umfasst einzelne Frequenzzähne, die bezüglich der Frequenz durch die Wiederholungsrate des Lasers getrennt sind. Jedoch reduziert die Einspeisung von Pulsen, die kürzer als 300 fs sind und vorzugsweise kürzer als 100 fs sind, den inkohärenten Hintergrund zwischen einzelnen Frequenzzähnen des Superkontinuum-Spektrums. Der inkohärente Hintergrund ist unerwünscht, da er den Signal-contrast bei den CDSLs reduziert. Der Einfluss von inkohärentem Hintergrundrauschen auf den Kamm-

Kontrast wird in N. Newbury und W. Swann, „Low-noise fiber-laser frequency combs“, Journal of the Optical Society of America B 24, S. 1756–1770 (2007) beschrieben, welche hiermit durch Bezugnahme eingeschlossen ist.

[0056] Die Differenzfrequenz-Erzeugung (DFG) wird ausgeführt in nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitten **140a**, **140b** durch Mischen der dispersionskompensierten Output-Signalspulse aus den Pfaden **125a-1**, **125b-1** mit den entsprechenden dispersionskompensierten und frequenzgewandelten Outputs einschließlich eines Superkontinuums, das in einem Bereich der Arme **125a-2**, **125b-2** erzeugt wird. Die Outputs werden in dem Frequenzwandler **140a**, **140b** gemischt. Die Frequenzwandler **140a**, **140b** sind vorzugsweise mit nichtlinearen Kristallen konfiguriert, wie zum Beispiel LiMbO_3 , GaAs, GaSe, GaP oder irgendeinem anderen geeigneten, nichtlinearen Kristall. Diese nichtlinearen Kristalle können auch periodisch gepolt sein, optisch gemustert sein oder periodische Veränderungen ihrer Nichtlinearität zweiter Ordnung entlang ihrer Länge besitzen. Nichtlineare Wellenleiter können auch eingesetzt werden. Frequenzfilter und Kontrollelemente für die Polarisierung können außerdem umfasst sein oberhalb der DFG-Elemente **140a**, **140b** und werden nicht separat gezeigt. Der Output von den DFG-Elementen wird über den Strahlteiler **150** kombiniert und an den Output **160** geleitet.

[0057] In verschiedenen Ausführungsformen werden die optischen Signalspulse, die von den Verstärkern ausgegeben werden, weitergeleitet durch einen optischen Isolator, bevor sie in die Dispersionskompensations- und die Frequenzwandlungsstufen eingeleitet werden. Geeignete Zeitverzögerungen zwischen den zwei Oszillatoren werden weiterhin eingeführt, um einen Pulsüberlapp in den DFG-Elementen und dem Strahlteiler **150** zu gewährleisten. Solche Zeitverzögerungen können durch gut bekannte Verfahren zum Kontrollieren der Faserlängen und der Ausbreitungspfade im freien Raum eingeführt werden und werden hier nicht separat gezeigt.

[0058] Eine ganz aus Fasermaterial ausgeführte Konstruktion eines Dispersionskompensators und eines nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitts in jedem Arm liefert einige Vorteile. Ein Vorteil bei der Verwendung einer hochgradig nichtlinearen Faser für die Frequenzwandlungseinheiten **130a**, **130b** ist, dass die Verstärkungsstufen **120a**, **120b**, die dispersionskompensierenden Elemente und die Frequenzwandlungsabschnitte **130a**, **130b** alle zusammengepleißt werden können, wie schematisch in [Fig. 2](#) illustriert ist. Verschiedene Elemente werden in [Fig. 2](#) gezeigt, die in jedem Arm verwendet werden können, insbesondere in **125a-2**, **125b-2**, in denen sowohl Dispersionskompensation als auch Superkontinuum-Erzeugung durchgeführt werden. Die Polarisierung er-

haltene Faserkomponenten können ebenso implementiert werden, oder alternativ können Polarisationssteuerelemente (nicht gezeigt) verwendet werden, um den Polarisationszustand für die Superkontinuum-Erzeugung zu optimieren. Ein mit einer Faserkopplung versehener Isolator (fiber pig-tailed isolator) (nicht gezeigt) isoliert vorzugsweise den Output des Verstärkers von unerwünschten Reflektionen.

[0059] In dem in [Fig. 2](#) gezeigten Beispiel wird eine dispersionskompensierende Faser **215** an eine Länge einer Übertragungsfasers **220** an jedem Ende gespleißt, die die fundamentale Mode der Faser umwandelt, um sie an die Mode der benachbarten Faser anzupassen, so wie zum Beispiel ein Verstärker **120a**, **120b**, der Input bereitstellt oder eine hochgradig nichtlineare Faser **230**, die einen Output liefert, wie in [Fig. 2](#) gezeigt wird. Die hochgradig nichtlineare Faser, die mit der Anordnung, wie sie in [Fig. 2](#) gezeigt ist, konfiguriert wird, kann auch in Frequenzwandlungsabschnitten verwendet werden, zum Beispiel den Abschnitten **130a**, **130b**. Eine Übertragungsfasers **220** kann mehr als ein Faserstück umfassen und kann ebenfalls faseroptische Verjüngungen (Tapers) umfassen.

[0060] Die Output-Pulse des Verstärkers, die von der Übertragungsphase **220** ausgegeben werden, werden danach in einer Länge einer dispersionskompensierenden Faser **215** komprimiert. Eine Länge einer photonischen Kristallfasers kann verwendet werden, aber irgendeine andere Art von Faser mit geeigneten nichtlinearen und linearen Eigenschaften kann ebenso für die Pulskomprimierung eingesetzt werden. Sowohl lineare also auch nichtlineare Verstärker wie zum Beispiel Similariton-Verstärker, wie sie im US-Patent 6,885,683 von Fermann et al. beschrieben werden, können eingesetzt werden. Wenn nichtlineare Verstärker eingesetzt werden, können die Leistungsniveaus der Oszillatoren vorzugsweise angepasst werden. Zum Beispiel erzeugen Similariton-Verstärker positiv gechirpte Pulse, die in die Nähe der Bandbreitengrenze komprimiert werden können in einer Länge einer photonischen Kristall-Fasers, wie es im US-Patent 7,414,780 von Fermann et al. diskutiert wird.

[0061] Die hochgradig nichtlineare Faser **230** wird dann für die Superkontinuum-Erzeugung verwendet. Hochgradig nichtlineare Fasern, die auf Quarzglas (silica) basieren, werden im US-Patent 7,496,260 mit dem Titel „Ultra High Numerical Aperture Optical Fibers“ von Dong et al. diskutiert, das hier in seiner Gänze durch Bezugnahme eingeschlossen wird. In verschiedenen Ausführungsformen können Nicht-Quarzglas-Fasern mit verbesserter Infrarot-Transparenz verwendet werden. Zum Beispiel können nichtlineare Fluorid-, Wismut-, Tellurid- und Chalkogenid-Fasern eingesetzt werden. Solche Infrarotlicht übertragenden Fasern können Wellenlängen bis zu ca.

20 µm übertragen und sind kommerziell erhältlich. Da die Schmelztemperatur einer Übertragungsfaser für mittleres Infrarotlicht typischerweise kleiner ist als die Schmelztemperatur von Quarzglasfasern, können außerdem optische Linsenarrangements verwendet werden, um das Licht von der dispersionskompensierenden Faser an die hochgradig nichtlineare Faser zu koppeln, um ein kompliziertes Spleißen der Fasern mit stark unterschiedlichen Schmelztemperaturen zu vermeiden.

[0062] Ein optisches Abbildungssystem, das einen CDSL umfasst, wird in [Fig. 3](#) gezeigt. Hier ist ein Strahlteiler nach dem Output des CDSL eingefügt worden und teilt den Output entlang von zwei optischen Pfaden. Der Strahlteiler leitet einen Bruchteil eines Outputs entlang eines ersten Pfades auf den Detektor D2, der benutzt wird, um das Referenzspektrum zu messen, welches den Output des CDSL als eine Funktion der Wellenlänge wiedergibt. Die untersuchte Probe wird in den zweiten Pfad eingefügt. Durch das Teilen des Spektrums, welches mit dem Detektor D1 gemessen wird, durch das Spektrum, welches mit dem Detektor D2 gemessen wird, kann ein genaues Absorptionsspektrum der untersuchten Probe erhalten werden. Solche Schemata mit zwei Detektoren sind gut bekannt in der Standard-Fouriertransformationsspektroskopie, um spektrale Veränderungen und zeitliche Drifts der Lichtquelle in Absorptionmessungen auszuschalten. Um die räumliche Verteilung der Absorption der Probe zu erhalten und um ein Abbilden durchzuführen, wird weiterhin ein optischer Abtaster (Scanner) **310** wie zum Beispiel ein kommerziell erhältliches Galvanometer-Spiegelsystem in den zweiten Strahlpfad des Outputs von dem CDSL eingefügt. In einigen Ausführungsformen kann die zu untersuchende Probe auf einer beweglichen Bühne montiert sein. In verschiedenen Ausführungsformen kann eine Kombination von Strahlbewegung und Bewegung der Probe verwendet werden. Der Output des CDSL wird dann auf die zu untersuchende Probe mit einem Mikroskop-Objektiv **325** oder einer anderen geeigneten Strahlführungsoptik fokussiert. Das Transmissionslicht wird mit einem Detektor D1 detektiert. In verschiedenen Ausführungsformen wird ein Referenzspektrum mit dem Detektor D2 erhalten. Alternativ kann der Detektor D2 weggelassen werden, und das Referenzspektrum kann erhalten werden durch Herausnehmen der Probe aus dem Strahlpfad 2. In einigen Ausführungsformen kann reflektiertes Licht detektiert werden oder eine Kombination von transmittiertem und reflektiertem Licht. Um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis im Infrarot zu verbessern, kann auch ein Abkühlen des Detektors durchgeführt werden. Zum Beispiel können mit flüssigem Stickstoff gekühlte HgCdTe(MCT)-Detektoren eingesetzt werden, die kommerziell mit Detektionsbandbreiten von bis zu 100 MHz erhältlich sind. Außerdem können Filterräder (nicht gezeigt) irgendwo in den Strahlpfad eingefügt werden, um

bestimmte optische Frequenzbereiche auszuwählen. Ein Bild wird dann erhalten durch Überwachen der Radiofrequenzspektren für jeden Bildpunkt und durch entsprechendes in Beziehung Setzen dieser Radiofrequenzspektren mit den optischen Transmissions- oder Reflektionsspektren.

[0063] Der Detektor D1 überwacht Schwebungsfrequenzen in dem Radiofrequenz-Bereich. Wegen des Skalierens der optischen Frequenzen mit den Radiofrequenzen über einen Skalenfaktor f_{rep}/δ in einem CDSL können wir die Funktion des CDSL so interpretieren, dass es ein Frequenzgitter im Radiowellenbereich repräsentiert zum Skalieren von Radiowellen zu optischen Frequenzen; jede optische Frequenz wird eindeutig mit einer 1:1-Beziehung auf eine Radiofrequenz abgebildet. Die Differenzfrequenz-Erzeugung, wie sie in [Fig. 1](#) dargestellt wird, schaltet die Phasenschlupffrequenzen (Carrier Envelope Offset Frequencies) aus, die extern zu den Lasern sind. Da die Phasenschlupffrequenzen der beiden Laser nach den DFG-Stufen gleich Null sind, ist die Beziehung zwischen optischer f_{opt} und Radiowellen-Schwebungsfrequenz f_{rf} gegeben durch

$$f_{\text{opt}} = f_{\text{rf}} \times f_{\text{rep}}/\delta \quad (1)$$

wobei die minimale Radiowellenfrequenz RF_{min} , die Information über die Signalübertragung bei optischen Frequenzen enthält, durch $m\delta$ gegeben ist. Es sei darauf hingewiesen, dass – da m eine große Zahl ist (von der Ordnung 10^4 oder größer) – RF_{min} in der Größenordnung von MHz sein kann.

[0064] Eine alternative Ausführungsform eines CDSL wird in [Fig. 4](#) gezeigt. Hier ist die Anzahl der Komponenten verringert durch Verwendung von zwei Oszillatoren, die bei leicht verschiedenen Wiederholungsfrequenzen arbeiten. Die Oszillator-Outputs werden kombiniert und in einen gemeinsamen Ausbreitungspfad eingekoppelt. Die Komponenten in dem gemeinsamen Ausbreitungspfad können ähnlich oder identisch zu denen sein, die mit Bezug auf [Fig. 1](#) beschrieben worden sind. In diesem Beispiel werden ein Verstärker **420**, ein zwischengeschalteter Abschnitt zur Superkontinuum-Erzeugung **430** und ein DFG-Abschnitt **440** verwendet. Der Output des Verstärkers **420** wird in die Arme **425a**, **425b** aufgespalten in einer Weise, die ähnlich zu derjenigen ist, die in [Fig. 1](#) gezeigt wird. DFG wird erhalten durch Mischen des dispersionskompensierten Outputs des Arms **425a** mit dem Output aus dem Superkontinuum-Erzeuger, der in Arm **425b** konfiguriert ist. Der nichtlineare Kristall **440** liefert die DFG, wie mit Bezug auf [Fig. 1](#) diskutiert wird. Der Output des Systems wird mit den Detektoren D1 und D2 detektiert, wobei D2 verwendet wird, um ein Referenzspektrum zu erhalten und D1 verwendet wird, um die Absorption der zu untersuchenden Probe zu erhalten. Zusätzliche optische Komponenten zum Abtasten können

ebenfalls hinzugefügt werden wie in dem Beispiel der [Fig. 3](#).

[0065] Um eine Verschlechterung des Signals wegen der nichtlinearen Wechselwirkung in dem Zeitraum, in dem sich die Outputpulse der beiden Oszillatoren in dem DFG-Abschnitt zeitlich überlappen, zu verhindern, können die Detektoren elektronisch gesteuert (gated) werden, dass sie in diesen Zeiträumen nicht empfänglich sind. Um ein Interferenzsignal zu Zeiten zu erhalten, wenn die Outputpulse der beiden Oszillatoren nicht zeitlich überlappen, kann eine optische Verzögerungslinie **470** vor den Detektoren D1 und D2 (oder an den Output des CDSL) hinzugefügt werden, wie gezeigt. In mindestens einer Ausführungsform wird eine Verzögerungslinie, die auf einen Mach-Zehnder-Interferometer basiert, verwendet, obwohl andere Arten von Verzögerungslinien wie ein Michelson-Interferometer mit unbalancierten Armlängen ebenso eingesetzt werden können. Die Zeitverzögerungslinie erzeugt bequemerweise eine Zeitverzögerung von einem Bruchteil der Resonator-Umlaufzeit der beiden Laser, wobei vorzugsweise dieser Bruchteil 50% ist. Wenn ein Interferogramm mit einer optischen Verzögerungslinie aufgezeichnet wird, resultiert ein kleiner Nachteil von dem erhöhten Hintergrundsignal und dem erhöhten Schrotrauschen, aber dieser Nachteil wird mehr als ausgeglichen durch den Vorteil einer verringerten Anzahl von Komponenten des Systems. Unerwünschte nichtlineare Puls-Wechselwirkungen wegen eines möglichen Pulsüberlapps in anderen Teilen des Systems können weiterhin vermieden werden durch eine angemessene Kontrolle der Pig-Tail-Längen von den zwei Oszillatoren.

[0066] Ein anderes Beispiel eines CDSL wird in [Fig. 5](#) gezeigt. Wie mit Bezug auf [Fig. 1](#) beschrieben wird, umfasst das System auch eine Steuereinheit **101** für die Wiederholungsrate, zwei Oszillatoren **110a**, **110b** (Oszillator 1 und Oszillator 2) und Verstärker **120a**, **120b**. Die Systemkonfiguration ist sehr ähnlich zu dem System, das mit Bezug auf [Fig. 1](#) beschrieben worden ist, aber die DFG-Abschnitte sind weggelassen worden. Der Output der beiden Oszillatoren breitet sich entlang von zwei verschiedenen Ausbreitungspfaden aus und wird in zwei separate faseroptische Verstärker **520a**, **520b** eingeführt. Vorzugsweise weisen der Verstärker und der Oszillator überlappende Gain-Spektren auf. Vorzugsweise emittieren beide Oszillatoren chirp-freie Pulse oder Pulse, die einen nahezu identischen Chirp besitzen. Vorzugsweise ist die Dispersion entlang der zwei Ausbreitungspfade aneinander angepasst. Vorzugsweise kann die Leistung der beiden Oszillatoren über einen Bereich angepasst werden, zum Beispiel durch ein variables Dämpfungsglied. Der Output der Verstärker wird weiterhin durch einen optischen Isolator (nicht gezeigt) geleitet, bevor er in zwei Dispersionskompensatoren und Frequenzwandlungsab-

schnitte eingespeist wird, die ähnlich in der Konstruktion zu den Armen **125a-2**, **125b-2** sind, die mit Bezug auf [Fig. 1](#) beschrieben worden sind. In diesem Beispiel erzeugen die Frequenzwandlungsabschnitte zwei vorzugsweise sehr breite Superkontinuum-Spektren, die eine Oktave oder mehr aufspannen und sich in den mittleren Infrarot-Bereich erstrecken können, wenn zum Beispiel hochgradig nichtlineare Fluorid- oder Chalkogenid-Wellenleiter verwendet werden. Mehrere Frequenzwandlungsabschnitte und zwischengeschaltete Verstärker können aneinander gehängt werden, und Frequenzwandlungsstufen, die auf PPLN-Wellenleitern oder Silizium-Wellenleitern basieren, können auch verwendet werden.

[0067] Im Gegensatz zu dem System, welches mit Bezug auf [Fig. 1](#) beschrieben wird, wird ein Teil des Outputs der beiden erzeugten Superkontinua zu zwei Phasendetektions- und Steuereinheiten **540a**, **540b** abgelenkt. Eine Phasendetektion kann zum Beispiel bequem mit einem f-2f-Interferometer durchgeführt werden, wie es in den US-Patenten 7490,705 von Fermann et al. und 11/546,998 von Hartl et al. diskutiert wird. Solche f-2f-Interferometer werden deswegen nicht weiter hier diskutiert. Das f-2f-Interferometer erzeugt ein Radiowellen-Schwebungssignal, das zu f_{ceo} korrespondiert, welches in die Oszillatoren zurückgespeist wird, um eine f_{ceo} -Steuerung über eine Rückkopplungsschleife durchzuführen. Die f_{ceo} von beiden Oszillatoren können durch eine Frequenzkopplung mittels Rückkopplungsschleifen innerhalb einer Radiofrequenz-Filterbandbreite gehalten werden. Für eine optimale Präzision der Rückkopplungsschleife kann ein Phasenregelkreis (phase locked loop) eingesetzt werden, aber andere Rückkopplungsschleifen können auch eingesetzt werden.

[0068] Wie im US-Patent 7,190,705 diskutiert wird, kann die Temperatur eines innerhalb des Resonators angeordneten Fasergitters, welches sich innerhalb eines modengekoppelten Faseroszillators befindet, verwendet werden, um den Phasenschlupf (carrier envelope phase) zu steuern. Alternativ kann, wie ebenfalls in der '705 diskutiert wird, ein externer Druck auf das Fasergitter ausgeübt werden, und Variationen des Drucks können verwendet werden, um den Phasenschlupf zu steuern.

[0069] In [Fig. 6](#) wird eine Vielzahl von Techniken zur Steuerung des Phasenschlupfs (carrier envelope phase control) in einem Faseroszillator illustriert. In [Fig. 6a](#) wird ein Stück einer innerhalb des Resonators angeordneten Faser **601** gezeigt, welche ein Faser-Bragg-Gitter aufweist zur Dispersionskontrolle des Resonators. Um die Phasenschlupffrequenz (carrier-envelope offset frequency) zu steuern, wird das Äußere des Fasergitters mit Gold beschichtet und ein Strom wird durch die Beschichtung hindurch geleitet. Die Temperatur des Gitters kann demnach über Widerstandsheizen in der Goldbeschichtung gesteuert

werden, was wiederum zu einer schnellen Modulation der Phasenschlupffrequenz führt, die dann über eine Rückkopplungsschleife in Verbindung mit einem f-2f-Interferometer stabilisiert werden kann.

[0070] In [Fig. 6b](#) übt ein piezoelektrischer Transducer (PZT) **602** Druck auf eine Seite der Faser aus, welcher auch moduliert und verwendet werden kann zur Steuerung der Phasenschlupffrequenz innerhalb des Resonators. Die Verwendung eines PZT erlaubt eine schnellere Rückkopplungssteuerung im Vergleich zu einem Widerstandsheizelement.

[0071] Eine noch schnellere Steuerung der Phasenschlupffrequenz (carrier-envelope offset frequency) kann über einen innerhalb des Resonators angeordneten akustooptischen Modulator (AOM) **603** erreicht werden wie er in [Fig. 6c](#) gezeigt wird. Durch Änderung der Antriebsspannung für den AOM kann der Verlust innerhalb des Faseroszillators schnell moduliert werden, was wiederum zu einer Modulierung der Phasenschlupffrequenz führt.

[0072] In [Fig. 6d](#) wird die Phasenschlupffrequenz über eine Modulation der restlichen Pumpleistung gesteuert, welche auf den im Resonator angeordneten sättigbaren Absorber auftrifft. Dies wird erreicht durch Einsetzen eines Polarisierers vor den sättigbaren Absorber und das Modulieren der Polarisation des Pumplichts **604**. Die Polarisation des Pumplichts kann auf verschiedene Arten moduliert werden; eine im Wesentlichen verlustfreie und schnelle Modulierung der Polarisation ist möglich durch Durchleiten des Pumplichts durch eine Länge einer polarisationserhaltenden Faser, die auf einer PZT-Trommel (PZT drum) aufgewickelt ist und durch Anregen von beiden Achsen der polarisationserhaltenden Faser in gleicher Weise mit linear polarisiertem Pumplicht.

[0073] Andere Mittel zur Steuerung der Phasenschlupffrequenz können auch eingesetzt werden; zum Beispiel kann die Temperatur des innerhalb des Resonators angeordneten sättigbaren Absorbers moduliert werden. Verschiedene Kombinationen können auch eingesetzt werden. Darüber hinaus können die Rückkopplungssysteme der [Fig. 6](#) mehrere Rückkopplungsschleifen umfassen für eine unabhängige Messung und Steuerung der Phasenschlupffrequenz.

[0074] In [Fig. 7](#) wird das entsprechende Radiowellenspektrum eines bezüglich der Phasenschlupffrequenz gekoppelten Yb-Faserlasers, welcher bei einer Wiederholungsrate von 1,04 GHz arbeitet, gezeigt, wobei hinter einem nichtlinearen f-2f-Interferometer gemessen wird. Das Radiowellenspektrum zeigt einen Peak bei 1 GHz, der zu der Wiederholungsrate des Lasers gehört und zwei Peaks bei 210 und 830 MHz, die der Phasenschlupffrequenz entsprechen.

[0075] [Fig. 8](#) zeigt ein Beispiel eines Superkontinuum-Spektrums, das mit einem bezüglich des Phasenschlupfs gekoppelten Yb-Faserlasers, welcher bei einer Wiederholungsrate von 1 GHz arbeitet, erzeugt wird. Hier wurde das Superkontinuum in einer hochgradig nichtlinearen optischen Faser erzeugt. Das Superkontinuum-Spektrum wurde aufgezeichnet von einem Ausbreitungspfad des Faserspektrums wie in [Fig. 5](#) gezeigt.

[0076] Statt f_{ceo} mit einem f-2f-Interferometer zu steuern, kann f_{ceo} auch durch Referenzieren des Frequenzkamms eines modengekoppelten Lasers auf die Fabry-Perot-Resonanzen eines passiven Resonators gesteuert werden. Diese Technik hat gewisse Vorteile: keine eine Oktave umfassende Kontinuum-Erzeugung ist erforderlich und relativ kleine Leistungsniveaus, die mit einem Teil der Oszillatorleistung bereitgestellt werden können, sind ausreichend. Dieses Verfahren wird beschrieben in R. Jason Jones und Jean-Claude Diels „Stabilization for Femtosecond Lasers for Optical Frequency Metrology and Direct Optical to RadioSynthesis“ PRL 86, S. 3288 (2001) und in R. Jason Jones et al. "Precision stabilization of femtosecond lasers to high-finesse optical cavities" Phys. Rev. A 69, 051803 (2004), welche hiermit durch Bezugnahme in seiner Gänze eingeschlossen sind.

[0077] Eine Ausführungsform, welche externe Resonatoren verwendet, wird in [Fig. 9](#) gezeigt. Die Outputs der Oszillatoren **110a**, **110b** werden kombiniert und in einen einzigen Ausbreitungspfad gekoppelt und mit dem Faserverstärker **920** verstärkt, wie oben diskutiert. Ein Teil von jedem Oszillator-Output wird auch zu den Referenzresonatoren **940a**, **940b** geleitet und in zwei voneinander getrennten spektralen Bereichen auf einen Referenzresonator stabilisiert. In diesem Beispiel werden zwei Referenzresonatoren **940a**, **940b** mit leicht verschiedenen Umlaufzeiten gezeigt. Beide Resonatoren sind vorzugsweise in einem engen thermischen und mechanischen Kontakt, damit sie bezüglich aller thermisch und mechanisch induzierten Fluktuationen in einem gemeinsamen Modus sind. Eine Konfiguration mit einem externen Resonator ist auch möglich. Wenn nur ein Resonator verwendet wird, liefert ein doppelbrechendes Element, das im Resonator integriert ist, zwei verschiedene Umlaufzeiten entlang von zwei Polarisationsachsen, wobei diese Achsen wiederum an jeden Laser gekoppelt sind. Solch eine Implementierung wird nicht separat gezeigt.

[0078] Die Gitter **950a**, **950b** leiten zwei spektrale Bereiche des Oszillator-Outputs zu zwei verschiedenen Detektoren, die dann benutzt werden, um die Zähne der zwei verschiedenen Oszillatorkämme an zwei verschiedenen Resonanzen der externen Resonatoren zu koppeln, die als passive Resonatoren oder mit einer Rückkopplungssteuerung konfiguriert

werden können. Mit der Verwendung von einem oder zwei externen Resonatoren werden alle vier Freiheitsgrade, nämlich die f_{ceo} von beiden Lasern wie auch f_{rep} und δ auf die Resonatormoden bezogen. In einer bevorzugten Ausführungsform wird ein Pound-Drever-Hall-Schema zum Verriegeln der Oszillatoren mit den Referenzresonatoren verwendet. Das Pound-Drever-Hall-Schema erfordert die Implementierung von zusätzlichen Phasenmodulatoren (nicht gezeigt) in den Faser-Pig-Tails, welche das Signal zu den äußeren Resonatoren transportieren. Statt separater Phasenmodulatoren kann eine Phasenmodulation auch im Resonator implementiert werden, beispielsweise durch das Modulieren eines Endspiegels des Resonators. Das Pound-Drever-Hall-Schema ist gut bekannt im Stand der Technik zum Verriegeln von modengekoppelten Faserlasern mit externen Resonatoren und wird nicht weiter erklärt.

[0079] Als eine Alternative zur Nutzung von passiven Resonatoren als stabile Bezugsgrößen für die Steuerung von Wiederholungsrate und Trägerphase der CDSLs können Dauerstrich-Referenzlaser (cw reference lasers) **1080a**, **1080b** verwendet werden, wie in [Fig. 10](#) gezeigt wird. Die Outputs der Oszillatoren **110a**, **110b** werden ebenfalls kombiniert und in einen einzigen Ausbreitungspfad gekoppelt und mit dem Faserverstärker **1020** verstärkt wie oben diskutiert. Zusätzlich werden zwei stabile Einzelfrequenz-Laser für eine Stabilisierung verwendet. Solche Einzelfrequenz-Laser basieren bevorzugt auf Halbleiter- oder Faser-Lasern und sind kommerziell erhältlich. Die Frequenzen der beiden Einzelfrequenz-Laser sind verschieden voneinander und werden so gewählt, dass sie beide mit den Spektren der modengekoppelten Laser überlappen, vorzugsweise in Teilen des Spektrums mit niedrigen und hohen Frequenzen. Der Frequenzkamm eines jeden modengekoppelten Lasers kann nun bei zwei Kammzähnen an die stabilen Dauerstrichlaser phasengekoppelt werden durch Rückkopplungssteuerung an f_{ceo} und f_{rep} von beiden Lasern, was zwei Frequenzen von jedem Kamm fixiert und damit f_{ceo} und f_{rep} stabilisiert. Wenn die Stabilisierung so durchgeführt wird, dass für jeden modengekoppelten Laser eine verschiedene Zahl von Kammzähnen zwischen den beiden fixierten Kammzähnen liegt, sind ihre Wiederholungsraten verschieden, was für einen CDSL erforderlich ist. Eine Implementierung dieses Stabilisierungsverfahrens ist beschrieben in I. Coddington et al., „Coherent Multi-heterodyne Spectroscopy Using Stabilized Optical Frequency Combs“, Phys. Rev. Lett. 100, 13902 (2008), welcher durch Bezugnahme eingeschlossen ist.

[0080] Eine kompakte und hochintegrierte Konfiguration eines CDSL wird in [Fig. 11](#) gezeigt. Die Outputs der Oszillatoren **110a**, **110b** werden kombiniert und in einen einzigen Ausbreitungspfad gekoppelt und mit dem Faserverstärker **120** verstärkt, wie oben diskutiert. Ein Bereich des verstärkten Outputs wird abge-

fragt (sampled) und zu dem Detektor D1 geleitet. Alternativ kann der Output der Oszillatoren oder die verstärkten Outputs der Oszillatoren zu zwei verschiedenen Detektoren geleitet werden, wobei eine solche Implementierung nicht separat gezeigt wird. Ein Einzelfrequenz-Laser wird verwendet, um die Wiederholungsrate und die Trägerphase zu kontrollieren. In diesem Schema wird einer der Frequenzzähne des Oszillators **110a** über einen Phasenregelkreis (phase-locked loop, PLL1) an den Einzelfrequenz-Laser gekoppelt, und einer der Frequenzzähne des Oszillators **110b** wird über einen anderen Phasenregelkreis (PLL2) an den Einzelfrequenz-Laser gekoppelt. Um ein Phasenkoppeln zu gewährleisten, kann die Resonatorlänge von jedem Laser moduliert werden. Nach dem Phasenkoppeln dieser beiden Frequenzzähne kann der Ausdruck für die Frequenzspektren der beiden Oszillatoren beschrieben wie folgt geschrieben werden.

$$mf_{\text{rep}} + f_{\text{ceo1}} = f_y + f_{b1} \quad (2)$$

$$n(f_{\text{rep}} + \delta) + f_{\text{ceo2}} = f_y + f_{b2}, \quad (3)$$

wobei f_y die Frequenz des Einzelfrequenzlasers ist und f_{b1} , f_{b2} die Radiofrequenz-Schwebungsfrequenzen sind, an welche die Frequenzzähne der beiden Oszillatoren gekoppelt sind; δ ist die Differenz zwischen den Wiederholungsraten der Laser. f_{rep} und δ können weiterhin an zwei weitere Radiowellen-Referenzsignale gekoppelt werden durch beispielsweise Steuern des Pumpstroms an die Laser. Wir können weiterhin n und m auswerten, indem zum Beispiel die Laserbedingungen so gesetzt werden, dass $m f_{\text{rep}} = f_y + f_{b1}$, wobei $f_y + f_{b1}$ aus einer externen Kalibrierung unter Verwendung zum Beispiel eines Wellenlängenmessgeräts erhalten wird. Dieselbe Prozedur kann eingesetzt werden, um n zu erhalten. Im Folgenden nehmen wir der Einfachheit halber an, dass $n = m$. Indem die Differenz der Gleichungen (2) und (3) gebildet wird, erhalten wir

$$n\delta + \Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_b, \quad (4)$$

[0081] Da Δf_b und δ bekannt sind und n , m über die oben beschriebene Kalibrierungsprozedur erhalten werden können, können wir Δf_{ceo} aus den Gleichungen (2) oder (3) mit großer Präzision erhalten.

[0082] Es kann leicht gezeigt werden, dass für $\Delta f_{\text{ceo}} \neq 0$ das Frequenzgitter im Radiowellenbereich in der Frequenz verschoben ist im Vergleich zur Gleichung (1) und die Beziehung zwischen optischen f_{opt} und Radiowellenfrequenzen f_{rf} wie folgt modifiziert ist.

$$f_{\text{opt}} = (f_{\text{rf}} - \Delta f_{\text{ceo}})f_{\text{rep}}/\delta + f_{\text{ceo1}} \neq (f_{\text{rf}} - \Delta f_{\text{ceo}})f_{\text{rep}}/\delta, \quad (5)$$

[0083] Hierbei können wir Gleichung (5) vereinfachen, da $f_{\text{ceo}} \ll f_{\text{opt}}$. In diesem Beispiel wird Δf_{ceo} sta-

bilisiert statt der einzelnen Phasenschlupffrequenzen (carrier-envelope offset frequencies), um ein genaues Radiowellen-Frequenzgitter zur Messung von optischen Frequenzen zu erhalten.

[0084] Um die bestmögliche Präzision über einen langen Zeitraum für Frequenzmessungen mit einem CDSL-System zu erhalten, werden beide Oszillatoren vorzugsweise in eine enge Nachbarschaft gepackt, um irgendwelche thermischen Fluktuationen von Laserparametern zwischen den beiden Lasern anzugleichen. Ebenso wird der Einzelfrequenz-Referenzlaser auch vorzugsweise mit einer guten thermischen Steuerung zusammengepackt.

[0085] Zusätzlich kann das System mit Verstärkern und nichtlinearen Frequenzwandlungsanschnitten ausgestattet werden, um einen vergrößerten spektralen Bereich abzudecken. Eine zeitliche Verzögerungsstrecke 470 kann vor den Detektoren D2, D3 eingefügt werden, um Pulsinterferenz ohne zeitlichen Pulsüberlapp in den nichtlinearen Stufen zu detektieren. Ebenso können zwei Detektoren D2, D3 verwendet werden, wobei ein Detektor zur Detektion eines Referenzspektrums verwendet wird und der andere verwendet wird, um die Absorptionscharakteristik einer Probe zu bestimmen.

[0086] Das System der Fig. 11 ist vorteilhaft für kommerzielle Anwendungen, da es mit wenigen Komponenten und mit einem hohen Grad an optischer Integration arbeitet.

[0087] Die oben beschriebenen Ausführungsformen können auf verschiedene Arten kombiniert werden, um alternative Implementierungen zu erzeugen. Viele Möglichkeiten existieren, und verschiedene Modifikationen können gemacht werden basierend auf spezifischen Anwendungen. Zum Beispiel kann ein nichtlinearer Frequenzwandlungsabschnitt mit mindestens einem nichtlinearen Faserverstärker konfiguriert werden, um ein Spektrum zu verbreitern.

[0088] Zurückgehend zur Fig. 5 kann eine Phasensteuerungseinheit auch mit einer Phasenüberwachungseinheit ersetzt werden. Zum Beispiel kann eine Phasenüberwachungseinheit einen faseroptischen Tap-Splitter (vor dem Verstärker eingefügt) umfassen, der etwas von dem Oszillatorlicht ablenkt und zwei enge spektrale Linien aus den Oszillatorspektren auswählt, um die zeitliche Veränderung von Phasenschlupffrequenz und Wiederholungsrate zu überwachen. Die zeitliche Veränderung der Phasenschlupffrequenz kann auch nach der Verstärker- oder der ersten Frequenzwandlungsstufe überwacht werden, aber die Verwendung des Oszillatorsignals liefert das geringste Rauschen. Solche Phasenüberwachungseinheiten wurden in Giaccari et al. diskutiert und werden hier nicht separat beschrieben. Als eine Alternative zu solch einer Phasenüberwachungsein-

heit können auch zwei f-2f-Interferometer verwendet werden, die die Phasenschlupffrequenz der beiden Oszillatoren überwachen. Wie mit Bezug auf Fig. 3 diskutiert wurde, kann der Output des CDSL durch eine optische Probe geleitet werden und kann auch zu einem Detektor geleitet werden, in dem Schwebungsfrequenzen im Radiowellenbereich beobachtbar sind. Wegen des Skalierens der optischen Frequenzen mit den Radiowellenfrequenzen über einen Skalierungsfaktor f_{rep}/δ bei CDSLs können wir die Funktion des dualen Lasersystems zum Abtasten so interpretieren, dass ein Frequenzgitter im Radiowellenbereich zum Skalieren von Radiowellen mit optischen Frequenzen bereitgestellt wird, d. h. jede optische Frequenz wird auf einer Radiowellenfrequenz abgebildet. Wenn die Phasenschlupffrequenzen der beiden Laser an verschiedene Werte gekoppelt werden, kann Gleichung (5) verwendet werden, um ein genaues Radiowellen-Frequenzgitter zur Messung von optischen Frequenzen zu erhalten.

[0089] Komplexere Modifikationen des Radiowellen-Frequenzgitters und der Relation zwischen optischen und Radiowellenfrequenzen können erhalten werden für kleine kontinuierliche Veränderungen von Δf_{ceo} wie auch von δ . Durch den Einsatz einer Phasenüberwachungseinheit können die entsprechenden Korrekturen des Radiowellen-Frequenzgitters berechnet werden, um eine genaue Umwandlung von Radiowellen in optische Frequenzen zu erhalten. Solche Korrekturen zu dem Radiowellen-Frequenzgitter wurden durch Giacari diskutiert und werden hier nicht weiter beschrieben. Ähnliche Korrekturen können auch angewendet werden, wenn Δf_{ceo} mit einem f-2f-Interferometer überwacht wird. Da das f-2f-Interferometer ein direktes Ablesen von f_{ceo} für jeden Oszillator unter Verwendung von Radiowellen-Techniken erlaubt, kann Δf_{ceo} leicht berechnet werden und die optischen Frequenzen können unter Verwendung von Gleichung (5) berechnet werden.

[0090] Die Abbildungsanordnung, wie sie mit Bezug auf Fig. 3 diskutiert wird, kann auch in den THz-Bereich ausgedehnt werden. Wie von Yasui et al. in Appl. Phys. Lett., vol. 88, S. 211104–1 bis 3 (2006) diskutiert wird, wird ein THz-Kamm durch einen photoleitenden Emitter erzeugt, der von einem Femtosekunden-Laser angeregt wird. Das Gleiche gilt auch, wenn THz-Pulse über optische Gleichrichtung in einem elektro-optischen Kristall erzeugt werden. Darüber hinaus umfasst der Frequenzkamm im THz-Frequenzbereich reine Harmonische der Laser-Wiederholungsrate. Demnach können zwei leicht gegeneinander verschobene THz-Frequenzkämme erzeugt werden durch das Leiten des Outputs eines CDSL-Systems auf einen elektro-optischen Kristall oder einen photoleitenden Emitter. Ein System zum Erzeugen von THz-Frequenzkämmen und zum Abbilden im THz-Spektralbereich kann demnach ähnlich zu den Implementierungen, die in den Fig. 3

und Fig. 5 gezeigt werden, konstruiert werden, wobei der Frequenzwandlungsabschnitt und die Phasensteuerungsabschnitte weggelassen werden und der nichtlineare Frequenzwandlungsabschnitt durch einen elektro-optischen Kristall ersetzt wird wie zum Beispiel GaP, GaSe, periodisch gepoltes LiNbO₃, optisch gemustertes GaAs oder eine photoleitende Antenne. Eine angemessene THz-Optik kann dann verwendet werden zum Abbilden der THz-Strahlung auf eine Probe, die bequem auf eine bewegliche Bühne zum optischen Abtasten platziert werden kann. In verschiedenen Ausführungsformen kann der Abtaster weggelassen werden, teils aus dem Grund der begrenzten Verfügbarkeit von Abtastern, die für eine Verwendung im THz-Frequenzbereich geeignet sind. Ein angemessener Detektor wie zum Beispiel eine photoleitende Antenne kann dann das Radiowellenschwebungssignal überwachen, aus dem das THz-Spektrum abgeleitet werden kann unter Verwendung einer Radiowellen-Analyse des detektierten Photostroms in den Detektor, wie von Yasui et al. diskutiert.

[0091] Demnach haben die Erfinder CDSLs und einige ihrer Anwendungen beschrieben und verschiedene Alternativen für eine Implementierung einschließlich hochgradig integrierter Konfigurationen.

[0092] In mindestens einer Ausführungsform umfasst ein kohärentes duales Abtastlasersystem (CDSL) zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren. Die Oszillatoren werden konfiguriert, um bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten zu arbeiten, so dass eine Differenz δf_r in den Wiederholungsraten klein ist verglichen mit den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der Oszillatoren. Das CDSL-System umfasst auch einen nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitt, der mit jedem Oszillator optisch verbunden ist. Der Abschnitt umfasst ein nichtlineares optisches Element, welches einen frequenzgewandelten spektralen Output erzeugt, der eine spektrale Bandbreite und einen Frequenzkamm hat, der Harmonische der Oszillator-Wiederholungsraten umfasst.

[0093] In verschiedenen Ausführungsformen finden sich die folgenden Merkmale:
Ein Frequenzwandlungsabschnitt umfasst einen Output-Abschnitt, welcher mehrere Input-Frequenzen empfängt und kombiniert und einen spektralen Output bei einer Differenzfrequenz derselben erzeugt, und das System umfasst einen zwischengeschalteten nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitt zwischen dem mindestens einen Oszillator und dem Output-Abschnitt, wobei der zwischengeschaltete Abschnitt ein breitbandiges Spektrum erzeugt, welches eine Bandbreite hat, die wesentlich größer als ein Oszillator-Spektrum ist.

[0094] Ein CDSL wird in einem Messsystem angeordnet, das spektrale Information nutzt, und ein spek-

traler Output wird verwendet, um eine physikalische Eigenschaft einer Testprobe mit spektralen Komponenten innerhalb der spektralen Bandbreite zu untersuchen.

[0095] Ein CDSL wird in einem Abbildungssystem angeordnet für eine oder mehrere der folgenden Aufgaben: optisches Abbilden, Mikroskopie, Mikrospektroskopie und/oder THz-Abbilden.

[0096] Ein auf einem CDSL basierendes Messsystem kann ein Element zum optischen Abtasten (Scanning) umfassen.

[0097] Ein Phasenregelkreis steuert die Differenz zwischen den Wiederholungsraten der Oszillatoren.

[0098] Ein Radiowellenspektrumanalysator erzeugt einen Output bei Radiowellenfrequenzen, die zu den optischen Frequenzen über einen Konversionsfaktor $(f_{r1} + f_{r2})/2\delta f_r$ in Beziehung stehen.

[0099] Modengekoppelte Faseroszillatoren umfassen einen Nd-, Yb-, Tm- oder Er-Faseroszillator.

[0100] Mindestens ein Faserverstärker wird umfasst zum Verstärken von einem oder mehreren Oszillator-Outputs.

[0101] Ein integrierter, ganz aus Fasermaterial bestehender Dispersionskompensator und ein nichtlinearer Frequenzwandlungsabschnitt sind eingeschlossen, wobei der integrierte Abschnitt eine oder mehrere der folgenden Fasern umfasst: eine hochgradig nichtlineare Faser, eine photonische Kristall-Faser, eine dispersionskompensierende Faser und/oder eine Faser, die ein zentrales Luftloch aufweist.

[0102] Ein System umfasst ein voluminöses (bulk) optisches Element zur Dispersionskompensation, welches mindestens eines der folgenden Elemente umfasst: ein Gitter-Paar, ein Prismenpaar und/oder ein Gitter-Prismen-System, wobei die Dispersionskompensation eine Pulskomprimierung umfasst.

[0103] Ein nichtlinearer Frequenzwandlungsabschnitt umfasst einen Differenzfrequenz-Erzeuger.

[0104] Ein nichtlinearer Frequenzabschnitt umfasst einen Superkontinuum-Erzeuger, der nach dem mindestens einen Oszillator angeordnet ist.

[0105] Ein modengekoppelter Faseroszillator erzeugt Pulse bei einer Wiederholungsrate, die größer als ungefähr 250 MHz ist.

[0106] In mindestens einer Ausführungsform umfasst ein kohärentes duales Abtastlasersystem zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren. Die Oszillatoren sind konfiguriert, um bei leicht verschiede-

nen Wiederholungsraten zu arbeiten, so dass eine Differenz δf_r bei den Wiederholungsraten klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der beiden Oszillatoren. Der CDSL umfasst auch einen nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitt, der optisch an jeden Oszillator gekoppelt ist, wobei der Abschnitt ein nichtlineares optisches Element umfasst, welches einen frequenzgewandelten spektralen Output erzeugt, der eine spektrale Bandbreite und eine Frequenzkammstruktur mit einem Frequenzabstand hat, der den Oszillator-Wiederholungsraten entspricht. Der nichtlineare Frequenzwandlungsabschnitt erzeugt einen spektralen Output, der wesentlich breiter als der spektrale Output von jedem Oszillator ist.

[0107] In verschiedenen Ausführungsformen finden sich die folgenden Merkmale:

Ein Mittel zum Überwachen der Differenz zwischen den Phasenschlupffrequenzen (carrier envelope offset frequencies) der beiden Laser ist umfasst, wobei die Information, die von dem Überwachungsmittel erzeugt wird, eine 1:1-Korrespondenz zwischen Radiowellenfrequenzen und optischen Frequenzen liefert.

[0108] Eine Korrespondenz wird mit einer 1:1-Abbildung der Radiowellenfrequenzen zu den optischen Frequenzen dargestellt.

[0109] Ein f-2f-Interferometer ist umfasst zur Steuerung der Phasenschlupffrequenz von jedem Laser.

[0110] Ein Rückkopplungssystem ist umfasst zum Stabilisieren der Differenz in den Phasenschlupffrequenzen (carrier envelope offset frequencies) der beiden Oszillatoren.

[0111] Eine Phasenschlupffrequenz-Information, die durch das Rückkopplungssystem erzeugt wird, wird verwendet, um ein Frequenzgitter im Radiowellenbereich zu erzeugen, das eine 1:1-Entsprechung zu einem Frequenzgitter im optischen Bereich hat.

[0112] Ein Rückkopplungssystem umfasst einen Einzelfrequenz-Referenzlaser.

[0113] Zwei Referenzresonatoren werden verwendet zur Steuerung der Phasenschlupffrequenz von jedem Oszillator.

[0114] Ein Referenzresonator wird verwendet für die Steuerung der Phasenschlupffrequenz von jedem Oszillator.

[0115] Zwei Einzelfrequenz-Referenzlaser werden verwendet zur Steuerung der Phasenschlupffrequenz von jedem Oszillator.

[0116] Ein nichtlinearer Frequenzwandlungsabschnitt umfasst eine hochgradig nichtlineare Faser.

[0117] Ein Verhältnis einer Wiederholungsrate zu der Differenz in den Wiederholungsraten ist mindestens ungefähr 10^6 und kann auch im Bereich von ungefähr 10^6 bis ungefähr 10^9 liegen.

[0118] Die Wiederholungsraten f_{r1} , f_{r2} und das Verhältnis einer Wiederholungsrate zu der Differenz der Wiederholungsraten sind hinreichend groß, um eine Radiowellenfrequenz in eine optische Frequenz umzuwandeln.

[0119] Mindestens eine Ausführungsform umfasst ein System zum Abbilden in den THz-Spektralbereich. Das Abbildungssystem umfasst ein kohärentes duales Abtastlasersystem (CDSL), das zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren hat. Die modengekoppelten Oszillatoren sind konfiguriert, um bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten zu arbeiten, sodass eine Differenz δf_r zwischen den Wiederholungsraten klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der Oszillatoren. Das System umfasst ein Material, welches THz-Strahlung emittiert als Antwort auf einen Output des CDSL und einen Detektor, der auf die THz-Strahlung anspricht.

[0120] In mindestens einer Ausführungsform umfasst ein kohärentes duales Abtastlasersystem zwei passiv modengekoppelte Oszillatoren, die mindestens zwei Züge von kurzen optischen Pulsen erzeugen. Die Oszillatoren werden konfiguriert, um bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten zu arbeiten, so dass eine Differenz zwischen den Wiederholungsraten δf_r klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der Oszillatoren. Das System umfasst einen Strahlkombinierer für das räumliche Kombinieren der Züge von kurzen optischen Pulsen, um sie entlang eines gemeinsamen optischen Pfads unterhalb (downstream) des Strahlkombinierers auszubreiten. Ein nichtlineares optisches Element zum spektralen Verbreitern von mindestens einem Zug der kurzen optischen Pulse wird umfasst, die sich entlang des gemeinsamen optischen Pfads ausbreiten. Ein duales Arm-Interferometer wird mit verschiedenen Armlängen konfiguriert, um die Interferenz zwischen Pulszügen zu detektieren, wenn die Pulse nicht zeitlich überlappend sind in der Zeit, bevor sie in das Interferometer hineinkommen.

[0121] In verschiedenen Ausführungsformen entspricht eine Armlängendifferenz ungefähr der Hälfte der Resonatorumlaufzeit der Oszillatoren.

[0122] In mindestens einer Ausführungsform umfasst ein kohärentes duales Abtastlasersystem zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren, die zwei separate Züge von kurzen optischen Pulsen erzeugen. Die Oszillatoren werden angepasst, um bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten zu arbeiten, so dass eine Differenz δf_r zwischen den Wie-

derholungsrate klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsrate der Oszillatoren. Ein Rückkopplungssystem stabilisiert die Differenz der Phasenschlupffrequenzen (carrier envelope offset frequencies) der beiden Oszillatoren, und das Rückkopplungssystem umfasst einen Einzelfrequenz-Laser. Ein Strahlkombinierer kombiniert die Züge von kurzen optischen Pulsen räumlich, um sie entlang eines gemeinsamen optischen Pfads unterhalb (downstream) des Strahlkombinierers auszubreiten. Das System umfasst ein nichtlineares optisches Element zum spektralen Verbreitern von mindestens einem Zug von kurzen optischen Pulsen, der sich entlang eines gemeinsamen optischen Pfads ausbreitet. Ein duales Arm-Interferometer wird konfiguriert mit verschiedenen Armlängen, so dass eine Interferenz zwischen Pulszügen detektiert werden kann, wenn die Pulse nicht zeitlich überlappend sind in der Zeit, bevor sie in das Interferometer hereinkommen.

[0123] Während nur bestimmte Ausführungsformen hier spezifisch beschrieben worden sind, wird demnach deutlich, dass zahlreiche Modifikationen an ihnen gemacht werden können, ohne vom Geist und dem Umfang der Erfindung abzuweichen. Außerdem werden Abkürzungen nur benutzt, um die Lesbarkeit der Beschreibung und der Ansprüche zu erhöhen. Es sollte bemerkt werden, dass diese Abkürzungen nicht dazu beabsichtigt sind, die Allgemeinheit der verwendeten Begriffe zu verringern, und sie sollten nicht so verstanden werden, dass sie den Umfang der Patentansprüche auf die hier beschriebenen Ausführungsformen reduzieren.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 5778016 [0002, 0005, 0042, 0042]
- US 6396856 [0002, 0042, 0042]
- US 5748399 [0003]
- WO 2007/045461 [0005]
- US 7203402 [0006]
- US 6785303 [0038]
- US 7191705 [0042]
- US 11/546998 [0042, 0047, 0067]
- US 7190705 [0042, 0044, 0047, 0049, 0050, 0068]
- US 6885683 [0060]
- US 7414780 [0060]
- US 7496260 [0061]
- US 7490705 [0067]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Keilmann et al. in dem Artikel „Time domain mid-infrared frequency-comb spectrometer“, Opt. Lett., vol. 29, S. 1542–1544 (2004) [0004]
- Keilmann et al. [0005]
- J. Mandon et al., „Fourier transform spectroscopy with a laser frequency comb“, in Nature Photonics, 2009 [0007]
- P. Giaccari et al., „Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method“, Opt. Express., vol. 16, S. 4347 (2008) [0008]
- I. Coddington et al., „Coherent Multiheterodyne Spectroscopy Using Stabilized Optical Frequency Combs“, Phys. Rev. Lett. 100, 13902 (2008) [0008]
- P. Giaccari et al., „Active Fourier-transform spectroscopy combining the direct RF beating of two fiber-based mode-locked lasers with a novel referencing method“, Opt. Express., vol. 16, S. 4347 (2008) [0040]
- N. Newbury und W. Swann, „Low-noise fiber-laser frequency combs“, Journal of the Optical Society of America B 24, S. 1756–1770 (2007) [0055]
- R. Jason Jones und Jean-Claude Diels „Stabilization for Femtosecond Lasers for Optical Frequency Metrology and Direct Optical to RadioSynthesis“ PRL 86, S. 3288 (2001) [0076]
- R. Jason Jones et al. „Precision stabilization of femtosecond lasers to high-finesse optical cavities“ Phys. Rev. A 69, 051803 (2004) [0076]
- I. Coddington et al., „Coherent Multiheterodyne Spectroscopy Using Stabilized Optical Frequency Combs“, Phys. Rev. Lett. 100, 13902 (2008) [0079]
- Yasui et al. in Appl. Phys. Lett., vol. 88, S. 211104–1 bis 3 (2006) [0090]
- Yasui et al. [0090]

Patentansprüche

1. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem (CDSL) umfassend:

zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren, wobei die Oszillatoren so konfiguriert sind, dass sie bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten arbeiten, so dass eine Differenz δf_r zwischen den Wiederholungsraten klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der Oszillatoren; ein nichtlinearer Frequenzwandlungsabschnitt, der optisch mit jedem Oszillator verbunden ist, wobei dieser Abschnitt ein nichtlineares optisches Element umfasst, welches einen frequenzgewandelten spektralen Output erzeugt, der eine spektrale Bandbreite und einen Frequenzkamm hat, welcher Harmonische der Oszillator-Wiederholungsraten aufweist.

2. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei der Frequenzwandlungsabschnitt einen Output-Abschnitt umfasst, der eine Mehrzahl von Input-Frequenzen empfängt und kombiniert und den spektralen Output bei einer Differenzfrequenz derselben erzeugt und wobei das System einen zwischengeschalteten nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitt zwischen mindestens einem Oszillator und dem Output-Abschnitt umfasst, wobei der zwischengeschaltete Abschnitt ein breitbandiges Spektrum erzeugt, das eine Bandbreite hat, die wesentlich größer als ein Oszillatorspektrum ist.

3. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei der CDSL in einem Messsystem angeordnet ist, das spektrale Informationen verwendet und wobei der spektrale Output verwendet wird, um eine physikalische Eigenschaft einer Testprobe mit spektralen Komponenten innerhalb der spektralen Bandbreite zu untersuchen.

4. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei das System in einem Abbildungssystem angeordnet ist für eine oder mehrere der folgenden Aufgaben: optisches Abbilden, Mikroskopie, Mikro-Spektroskopie und THz-Abbilden.

5. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 4, wobei das Messsystem ein Element zum optischen Abtasten umfasst.

6. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, weiterhin umfassend: einen Phasenregelkreis, um die Differenz zwischen den Wiederholungsraten der Oszillatoren zu steuern.

7. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, weiterhin umfassend einen Radiowellen-Spektrumanalysator, der einen Output bei Radiowellen-Frequenzen erzeugt, die über einen Konversionsfaktor $(f_{r1} + f_{r2})/2\delta f_r$ mit den optischen Frequenzen in Beziehung stehen.

8. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei die modengekoppelten Faseroszillatoren einen Nd-, Yb-, Tm- oder Er-Faseroszillator umfassen.

9. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei das System mindestens einen Faserverstärker umfasst zum Verstärken von einem oder mehreren Oszillator-Outputs.

10. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei das System einen integrierten, ganz aus Fasermaterial bestehenden Dispersionskompensator und einen nichtlinearen Frequenzwandlungsabschnitt umfasst, wobei der integrierte Abschnitt ein oder mehrere der folgenden Elemente umfasst: eine hochgradig nichtlineare Faser, eine photonische Kristall-Faser, eine dispersionskompensierende Faser und eine Faser, die ein zentrales Luftloch aufweist.

11. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei das System ein voluminöses optisches Element zur Dispersionskompensation umfasst, welches wenigstens eines der folgenden Elemente einschließt: ein Gitter-Paar, ein Prismen-Paar, ein Gitter-Prisma-System, wobei die Dispersionskompensation eine Pulskomprimierung umfasst.

12. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei der nichtlineare Frequenzwandlungsabschnitt einen Differenzfrequenz-Erzeuger aufweist.

13. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei das System einen nichtlinearen Frequenzabschnitt aufweist, der einen Superkontinuum-Erzeuger aufweist, welcher nach dem mindestens einen Oszillator angeordnet ist.

14. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei ein modengekoppelter Faseroszillator Pulse bei einer Wiederholungsrate erzeugt, die größer als ungefähr 250 MHz ist.

15. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem, umfassend:

zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren, wobei die Oszillatoren so konfiguriert sind, dass sie bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten arbeiten, so dass eine Differenz δf_r zwischen den Wiederholungsraten klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der beiden Oszillatoren; ein nichtlinearer Frequenzwandlungsabschnitt, der optisch mit jedem Oszillator verbunden ist, wobei dieser Abschnitt ein nichtlineares optisches Element umfasst, das einen frequenzgewandelten spektralen Output erzeugt, der eine spektrale Bandbreite und eine Frequenzkammstruktur hat, welche einen Fre-

quenzabstand entsprechend den Oszillator-Wiederholungsraten hat, wobei der nichtlineare Frequenzwandlungsabschnitt einen spektralen Output erzeugt, der wesentlich breiter ist als der spektrale Output von jedem Oszillator.

16. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 15, weiter umfassend: Mittel zum Überwachen der Differenz zwischen den Phasenschlupffrequenzen der beiden Laser, wobei Information, die von dem Überwachungsmittel erzeugt werden, eine 1:1-Korrespondenz zwischen Radiowellenfrequenzen und optischen Frequenzen liefert.

17. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 16, wobei die Korrespondenz durch eine 1:1-Abbildung der Radiowellenfrequenzen auf die optischen Frequenzen dargestellt wird.

18. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 15, weiter umfassend ein f-2f-Interferometer für die Steuerung der Phasenschlupffrequenz von jedem Laser.

19. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 15, weiter umfassend ein Rückkopplungssystem zum Stabilisieren der Differenz zwischen den Phasenschlupffrequenzen der beiden Oszillatoren.

20. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 19, wobei die Information über die Phasenschlupffrequenzen, die von dem Rückkopplungssystem erzeugt wird, verwendet wird, um ein Frequenzgitter im Radiowellen-Frequenzbereich zu erzeugen, welches eine 1:1-Korrespondenz zu einem Frequenzgitter im optischen Bereich hat.

21. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 19, wobei das Rückkopplungssystem weiterhin einen Einzelfrequenz-Referenzlaser aufweist.

22. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 15, welches weiterhin zwei Referenzresonatoren zur Steuerung der Phasenschlupffrequenz von jedem Oszillator umfasst.

23. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 15, welches weiterhin einen Referenzresonator zur Steuerung der Phasenschlupffrequenz von jedem Oszillator aufweist.

24. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 15, welches weiterhin zwei Einzelfrequenz-Referenzlaser zur Steuerung der Phasenschlupffrequenz von jedem Oszillator aufweist.

25. Ein System zum Abbilden im THz-Spektralbereich, umfassend:

ein kohärentes duales Abtastlasersystem (CDSL), welches zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren umfasst, wobei die modengekoppelten Oszillatoren konfiguriert sind, um bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten zu arbeiten, so dass eine Differenz δf_r zwischen den Wiederholungsraten klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der Oszillatoren;
ein Material, welches THz-Strahlung emittiert in Antwort auf einen Output des CDSL; und
einen Detektor, der auf die THz-Strahlung anspricht.

26. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem, umfassend:

zwei passiv modengekoppelte Oszillatoren, die mindestens zwei Züge von kurzen optischen Pulsen erzeugen, wobei die Oszillatoren so konfiguriert sind, um bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten zu arbeiten, so dass die Differenz der Wiederholungsraten δf_r klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der Oszillatoren;
einen Strahlkombinierer für ein räumliches Kombinieren der Züge von optischen Pulsen, um sie entlang eines gemeinsamen optischen Pfads unterhalb des Strahlkombinierers auszubreiten;
ein nichtlineares optisches Element zum spektralen Verbreitern des mindestens einen Zugs von kurzen optischen Pulsen, welche sich entlang des gemeinsamen optischen Pfads ausbreiten; und
ein duales Arm-Interferometer, das mit verschiedenen Armlängen konfiguriert ist, um eine Interferenz zwischen den Pulszügen zu detektieren, wenn die Pulse nicht zeitlich überlappend sind in der Zeit, bevor sie in das Interferometer hineinkommen.

27. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 24, wobei die Armlängendifferenz ungefähr der Hälfte der Resonatorumlaufzeit der Oszillatoren entspricht.

28. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem, umfassend:

zwei passiv modengekoppelte Faseroszillatoren, die zwei separate Züge von kurzen optischen Pulsen erzeugen, wobei die Oszillatoren angepasst sind, um bei leicht verschiedenen Wiederholungsraten zu arbeiten, so dass eine Differenz δf_r zwischen den Wiederholungsraten klein ist im Vergleich zu den Werten f_{r1} und f_{r2} der Wiederholungsraten der Oszillatoren;
ein Rückkopplungssystem zum Stabilisieren der Differenz in den Phasenschlupffrequenzen der beiden Laser, wobei das Rückkopplungssystem einen Einzelfrequenzlaser umfasst;
einen Strahlkombinierer für ein räumliches Kombinieren der Züge von kurzen optischen Pulsen, um sie entlang eines gemeinsamen optischen Pfads unterhalb des Strahlkombinierers auszubreiten;
ein nichtlineares optisches Element zum räumlichen Verbreitern des mindestens einen Zugs von kurzen

optischen Pulsen, welche sich entlang des gemeinsamen optischen Pfads ausbreiten; und
ein duales Arm-Interferometer, das mit verschiedenen Armlängen konfiguriert ist, um so eine Interferenz zwischen den Pulszügen zu detektieren, wenn die Pulse nicht zeitlich überlappend sind in der Zeit, bevor sie in das Interferometer hineinkommen.

29. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei der nichtlineare Frequenzwandlungsabschnitt eine hochgradig nichtlineare Faser umfasst.

30. Ein kohärentes duales Abtastlasersystem gemäß Patentanspruch 1, wobei ein Verhältnis einer Wiederholungsrate zu einer Differenz zwischen den Wiederholungsraten mindestens ungefähr 10^6 ist und ausreichend groß ist, um eine Radiowellenfrequenz zu einer optischen Frequenz zu skalieren.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

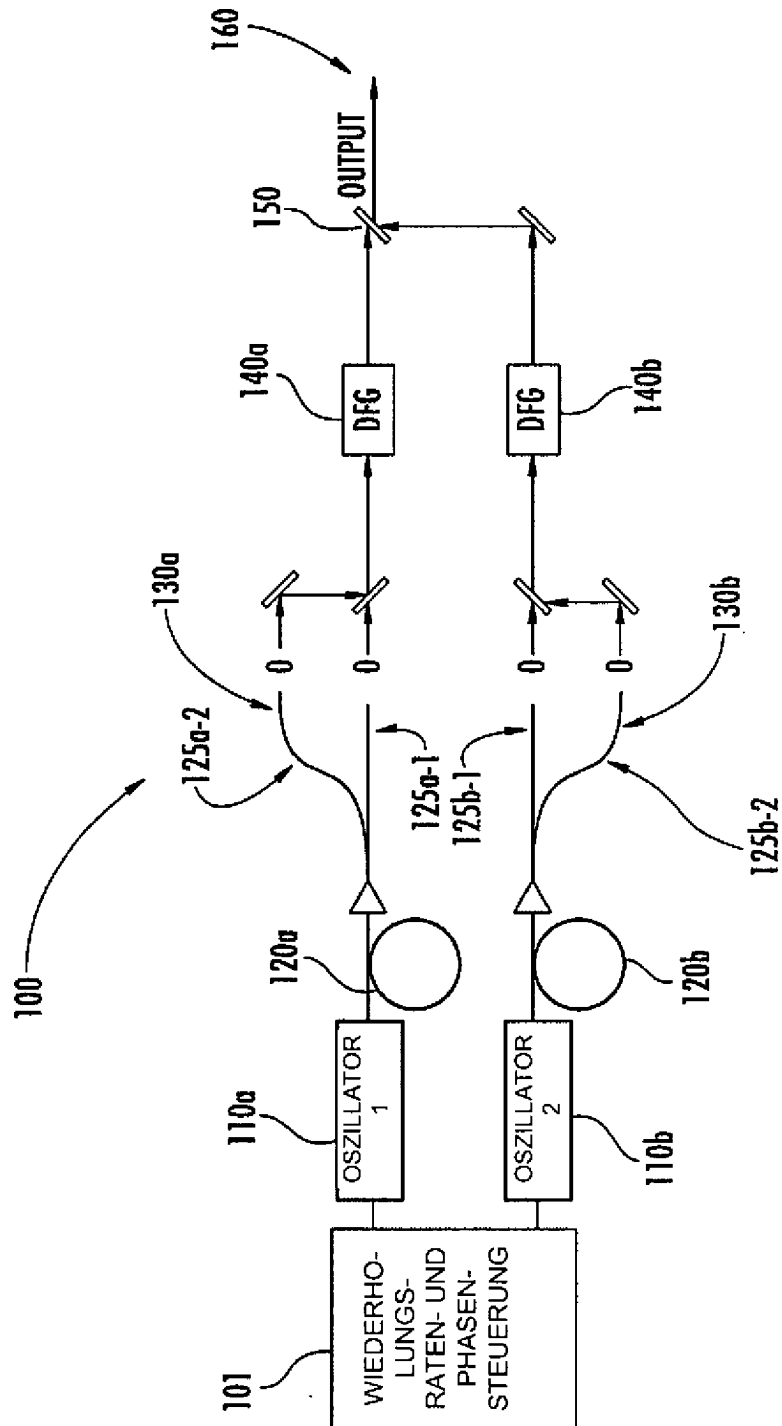
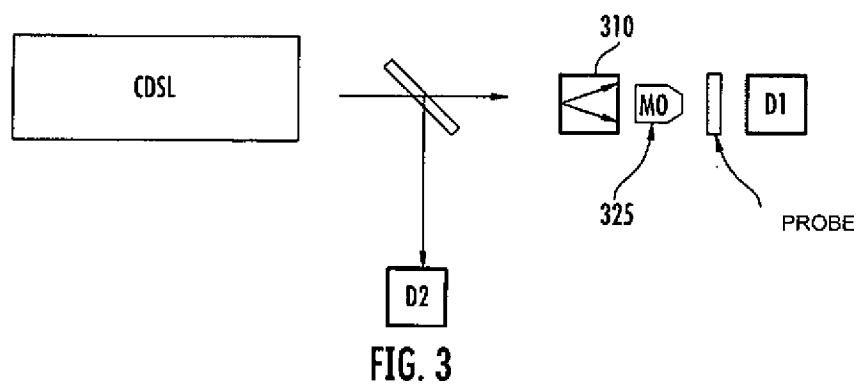
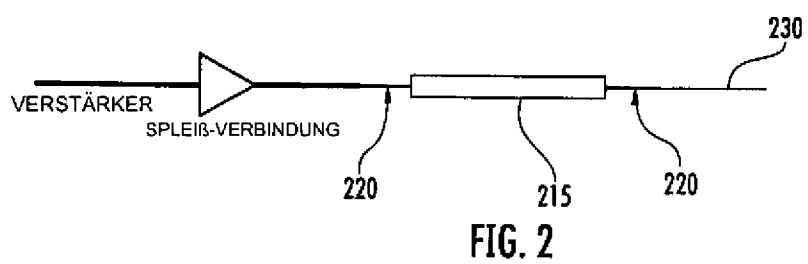


FIG. 1



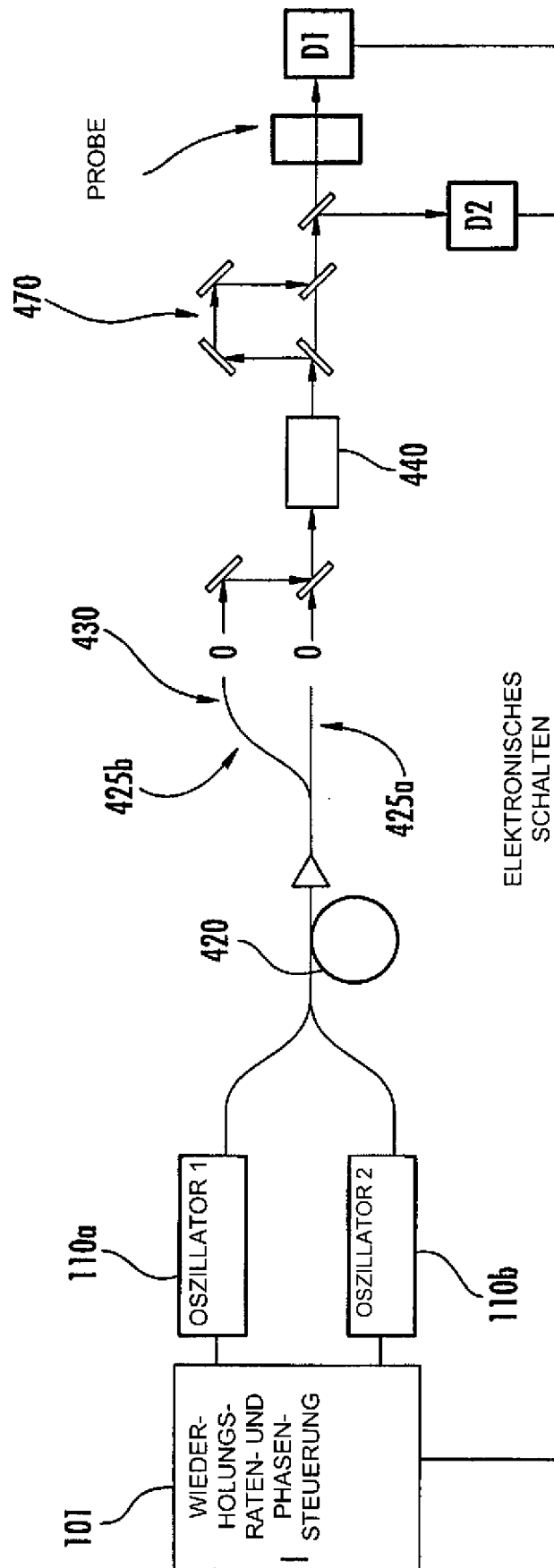


FIG. 4

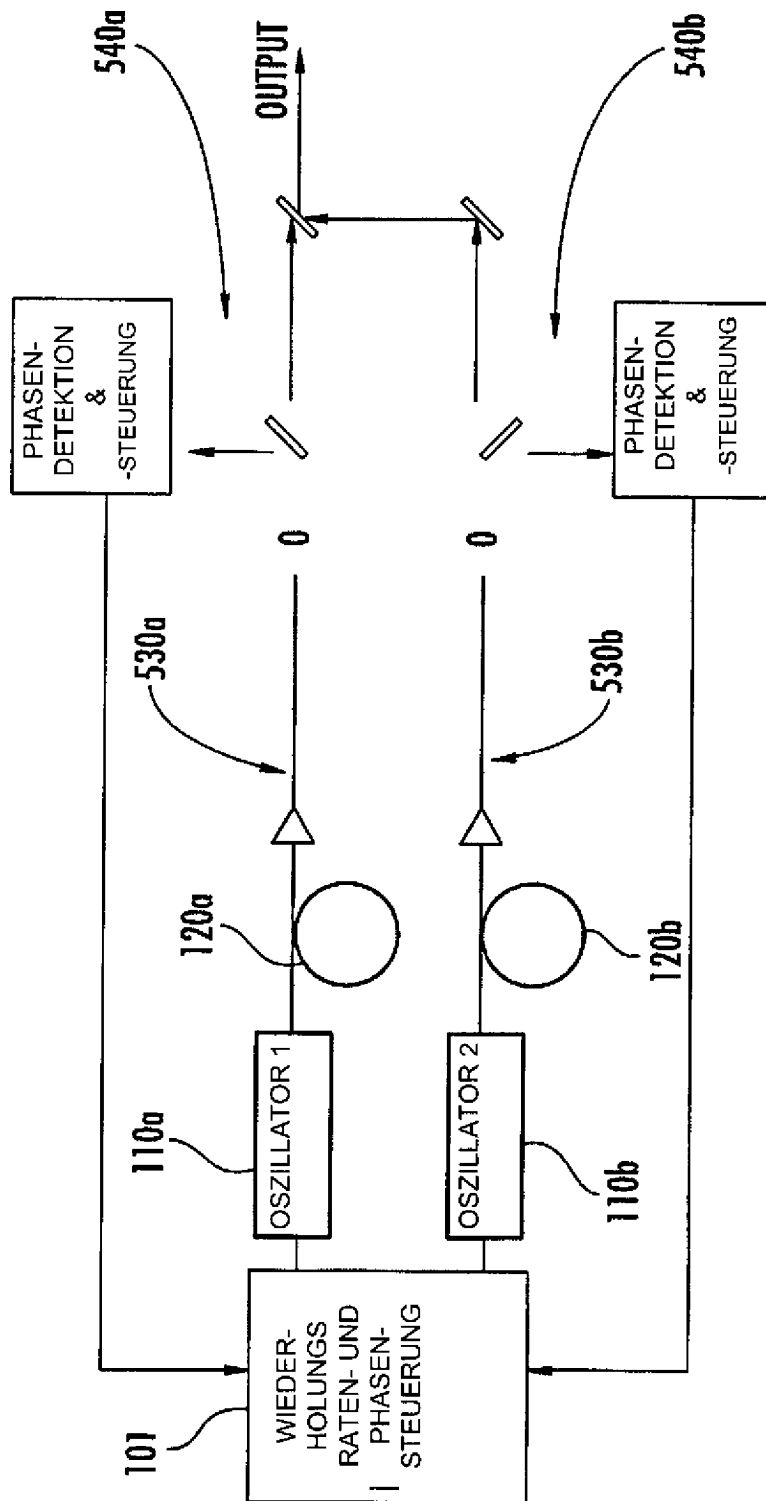


FIG. 5

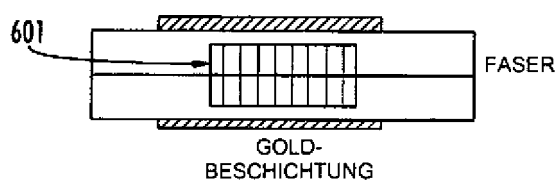


FIG. 6A

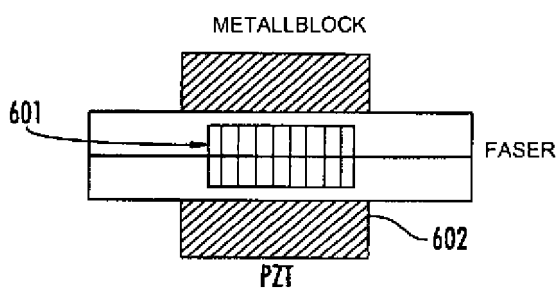


FIG. 6B

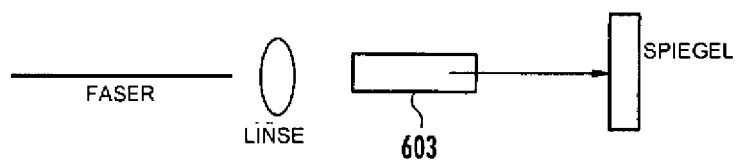


FIG. 6C

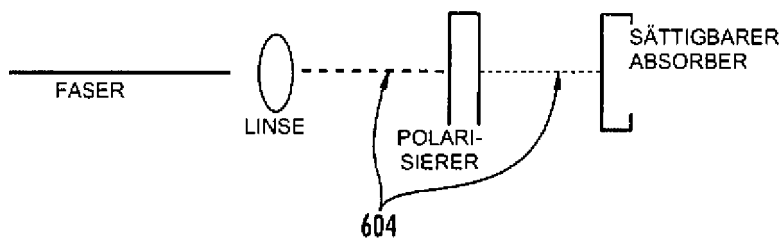


FIG. 6D

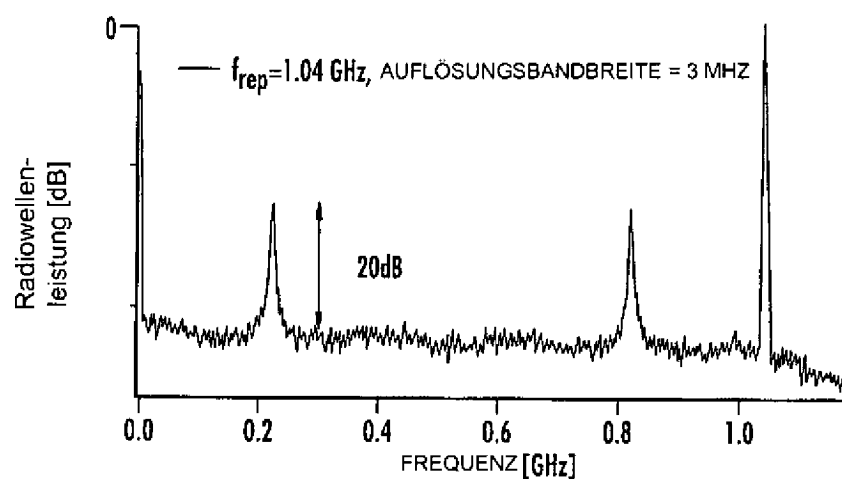


FIG. 7

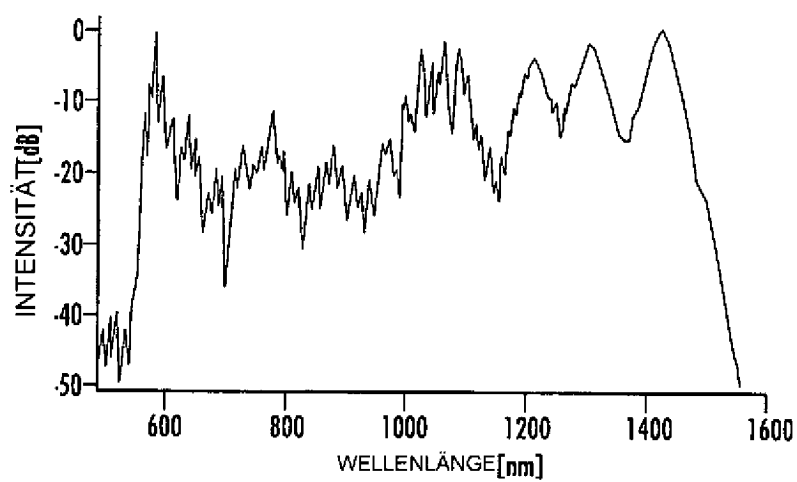
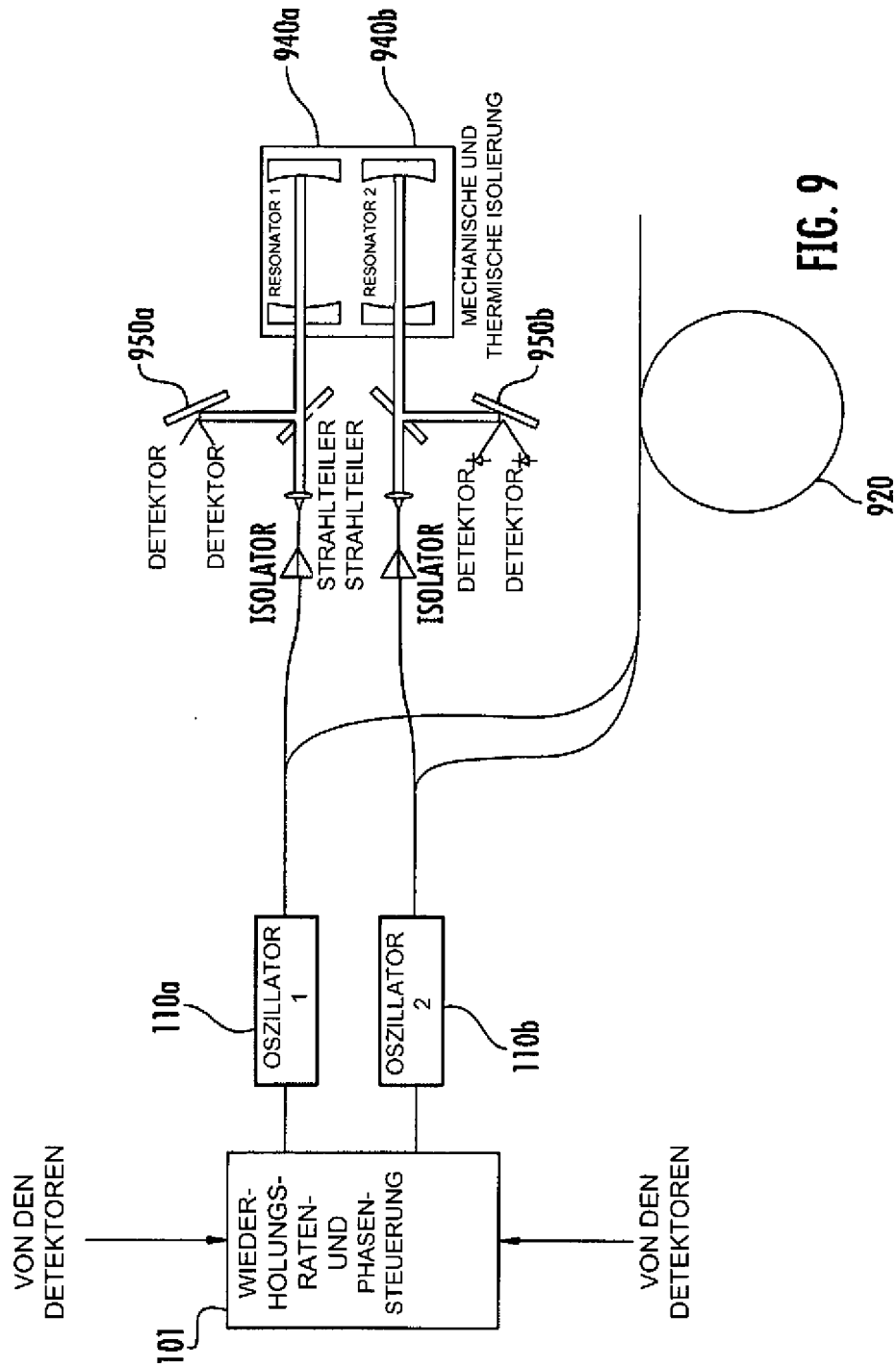


FIG. 8



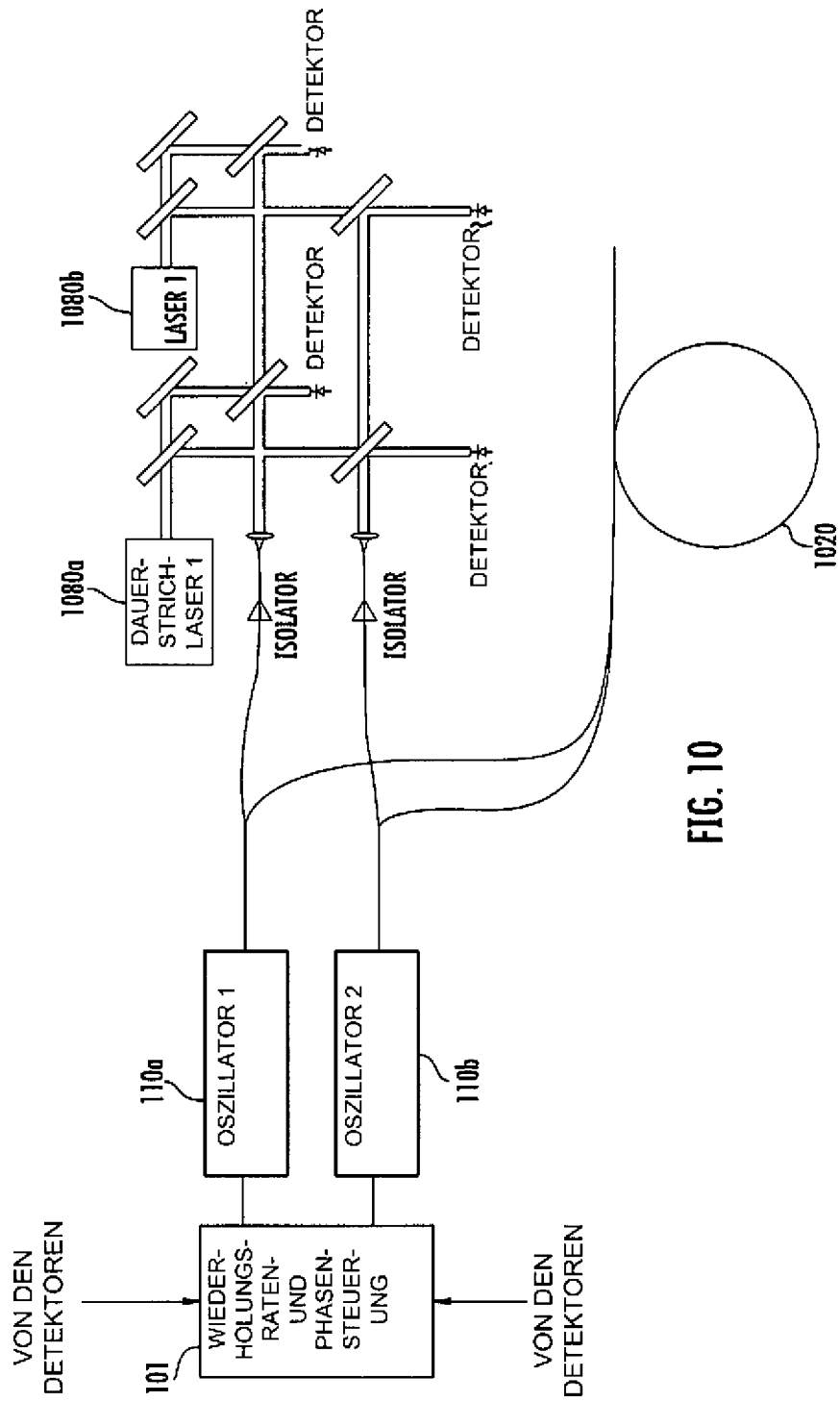


FIG. 10

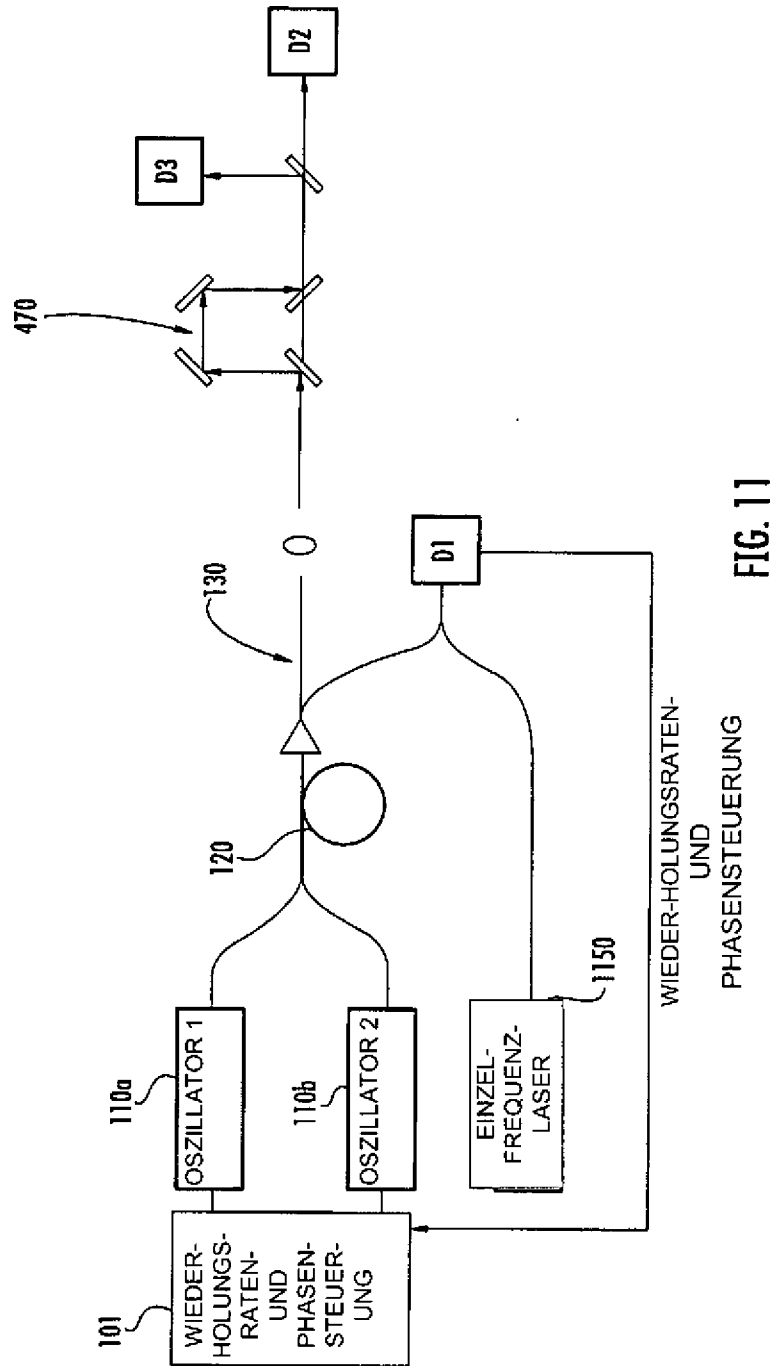


FIG. 11