



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 117 050.0**
(22) Anmeldetag: **08.07.2022**
(43) Offenlegungstag: **11.01.2024**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **05.03.2026**

(51) Int Cl.: **H01S 3/13 (2006.01)**
H01S 5/065 (2006.01)
H01S 5/14 (2006.01)
G02B 5/18 (2006.01)
H01S 5/0687 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Leibniz- Institut
für Höchstfrequenztechnik, 12489 Berlin, DE**

(74) Vertreter:
**Gulde & Partner Patent- und
Rechtsanwaltskanzlei mbB, 10785 Berlin, DE**

(72) Erfinder:
**Hirsch, Janpeter, 13599 Berlin, DE; Schiemangk,
Max, Dr., 12487 Berlin, DE; Wicht, Andreas, Dr.,
12459 Berlin, DE**

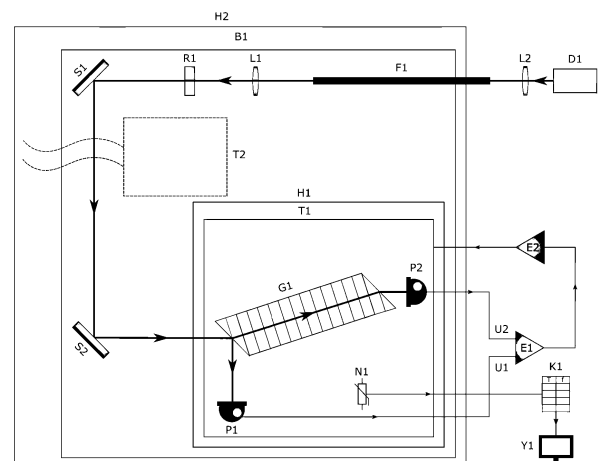
(56) Ermittelter Stand der Technik:

WO 95/ 08 206 A1

**SOTOR, Jaroslaw Z. ; ANTONCZAK, Arkadiusz
J. ; ABRAMSKI, Krzysztof M.: Fiber bragg
gratings as references for frequency stabilization
of microchip laser. In: 2006 International
Conference on Transparent Optical Networks, 18-
22 June 2006, Nottingham, UK, S. 167-169. - ISBN
1-4244-0235-2. DOI: 10.1109/ICTON.2006.248529.
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4013889> [abgerufen am 2022-07-20]**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Messung der Frequenz eines Lasers**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Messung der Frequenz eines Lasers (D1) unter Verwendung einer Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers (D1, D2), umfassend einen Strahlengang zur Einkopplung einer vom Laser (D1, D2) emittierten Laserstrahlung auf ein frequenzselektives Element (G1), wobei das frequenzselektive Element (G1) temperaturgeregelt ist, und es sich bei dem frequenzselektiven Element um ein Volumen-Bragg-Gitter, VBG, (G1) mit einer Vielzahl von Gitterstrukturen (E) handelt und vor einer Einkopplung der Laserstrahlung in das VBG (G1) über eine Eingangsfacette ein Anteil der Laserstrahlung in einen Referenzstrahl abgezweigt wird und der in das VBG (G1) eingekoppelte Anteil der Laserstrahlung einen Messstrahl ausbildet, dadurch gekennzeichnet, dass aus einer Intensität des Referenzstrahls und einer Intensität des Messstrahls nach Durchlaufen des VBG (G1) ein Fehlersignal abgeleitet wird, über einen Regelkreis mit dem Fehlersignal die Temperatur des VBG (G1) derart eingestellt wird, dass eine Bragg-Frequenz des VBG (G1) bis auf eine optional ausgewählte, vorzeichenbehafte Frequenzdifferenz der Frequenz des Lasers (D1) entspricht, und mittels einer bekannten Zuordnung aus der eingestellten Temperatur des VBG (G1) die Frequenz des Lasers (D1) bestimmt wird.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Messung der Frequenz eines Lasers, insbesondere ein Verfahren zur Messung der Frequenz eines Lasers basierend auf der Spektroskopie eines temperaturstabilisierten Volumen-Bragg-Gitters (engl. „volume Bragg grating“, VBG).

Stand der Technik

[0002] Für Telekommunikations- und Quantensensorik-Anwendungen werden Frequenzreferenzen für die Stabilisierung von Lasern mit einem besonderem Leistungsprofil benötigt. Insbesondere für Anwendungen auf mobilen Plattformen im Weltraum müssen solche Frequenzreferenzen möglichst kompakt, modensprungfrei durchstimmbar, und langzeitstabil sein, wobei eine (reproduzierbare) Frequenzgenauigkeit von etwa 50 MHz erreicht werden muss. Entsprechende Frequenzreferenzmodule zur Realisierung weltraumtauglicher Frequenzreferenzen mit diesen Eigenschaften sind im Stand der Technik bisher nicht bekannt.

[0003] Frequenzreferenzen im Stand der Technik basieren typischerweise auf der Spektroskopie eines Faser-Bragg-Gitters (engl. „fiber Bragg grating“, FBG) und sind dem Fachmann beispielsweise aus Sotor et al. (J. Z. Sotor, A. J. Antonczak and K. M. Abramski, „Fiber Bragg Gratings as References for Frequency Stabilization of Microchip Laser,“ 2006 International Conference on Transparent Optical Networks, 2006, pp. 167-169) bekannt. Wie in der Sotor et al. entnommenen und in **Fig. 1** dargestellten Abbildung gezeigt ist, wird die Laserstrahlung hierbei über einen Lichtwellenleiter-basierten Strahlungsteiler in ein FBG eingekoppelt. Das gebeugte Signal wird über einen Lichtwellenleiter-basierten Strahlungsteiler abgespalten und mit dem transmittierten Signal zur Erzeugung eines Fehlersignals zur Frequenzstabilisierung eines Lasers verwendet. Um die thermische Stabilität des frequenzselektiven Elements sicherzustellen, welche für eine hohe Frequenzstabilität des Lasers erforderlich ist, ist das FBG von einem athermischen Gehäuse umgeben.

[0004] Ein Lichtwellenleiter-basierter Spektroskopie-Ansatz hat jedoch erhebliche Nachteile. Vor allem können Lichtwellenleiter ihre Eigenschaften, insbesondere im Langzeitbetrieb, unter dem Einfluss von Bestrahlung, mechanischer Spannungen und Temperaturschwankungen verändern. Dies führt bei hochsensiblen Sensoranwendungen zu unzulässigen Messfehlern. Bei Einsatz eines Wellenleiter-basierten Strahlungsteilers führen diese Einflüsse zudem auch zu einer Temperatur- und Polarisationsabhängigkeit des Teilungsverhältnisses des Wellenleiter-basierten Strahlungsteilers. Schwankungen im Teilungsverhältnis führen beim laufenden Betrieb zu

einer falschen Interpretation des Spektroskopie-Signals. Diese systematischen Fehler führen zu Frequenzfehlern. Die Verwendung eines athermischen Gehäuses soll eine thermische Entkoppelung des FBGs herbeiführen, um eine hohe Frequenzstabilität zu erreichen. Dieser Ansatz verhindert jedoch die Möglichkeit das Gitter durch Regelung seiner Gittertemperatur in seiner Frequenz durchzustimmen. FBG-basierte Frequenzstabilisierungen sind somit für Anwendungen auf mobilen Plattformen im Weltraum nicht geeignet und es müssen hierfür andere Stabilisierungskonzepte verwendet werden.

[0005] Aus der WO 95 / 08 206 A1 ist ein Laser bekannt, bei dem die Rückkopplung von einem holografischen Volumengitter, das als Wellenlängenstandard verwendet wird, dazu genutzt wird, die Laserausgangswellenlänge auf den gewünschten Wert einzustellen. Die Rückkopplung kann nicht-optisch erfolgen, wobei der Ausgang des holografischen Filters zur aktiven Steuerung der Wellenlänge durch einen externen Kontrollmechanismus verwendet wird. Alternativ dazu kann die Rückkopplung auch optisch erfolgen, wobei ein Volumenhologramm-Reflexionsgitter zur Erzeugung einer optischen Rückkopplung auf die Laserverstärkung verwendet wird.

Offenbarung der Erfindung

[0006] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung zur Messung der Frequenz eines Lasers zur Verfügung zu stellen, welche eine für die zuvor erwähnten mobilen Anwendungen im Weltraum hinreichende Laserstabilität mit dem obenstehend aufgeführten Leistungsprofil ermöglicht.

[0007] Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst. Zweckmäßige Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen enthalten. Die in den Patentansprüchen einzeln aufgeführten Merkmale sind in technologisch sinnvoller Weise miteinander kombinierbar und können durch erläuternde Sachverhalte aus der Beschreibung und/oder Details aus den Figuren ergänzt werden, wobei weitere Ausführungsvarianten der Erfindung aufgezeigt werden.

[0008] Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers, umfassend einen Strahlengang zur Einkopplung einer vom Laser emittierten Laserstrahlung auf ein frequenzselektives Element, wobei das frequenzselektive Element temperaturgeregelt ist, wobei es sich bei dem frequenzselektiven Element um ein Volumen-Bragg-Gitter, VBG, mit einer Vielzahl von Gitterstrukturen handelt und vor einer Einkopplung der Laserstrahlung in das VBG über eine Eingangsfläche ein Anteil der Laserstrahlung in einen Referenz-

strahl abgezwiegt wird und der in das VBG eingekoppelte Anteil der Laserstrahlung einen Messstrahl ausbildet.

[0009] Unter einem Strahlengang wird dabei insbesondere eine Führung der Laserstrahlung als sogenannter Freistrah verstanden, d. h. die Laserstrahlung wird nicht mittels einer optischen Faser oder einem Wellenleiter auf das frequenzselektive Element eingekoppelt sondern beispielsweise als sich frei ausbreitender Gauß-Strahl (freier Strahl).

[0010] Die Temperatur des frequenzselektiven Elements ist regelbar, d. h. diese kann über einen entsprechende Regelung gegenüber der Umgebung variiert werden. Da die Filterfrequenz eines frequenzselektiven Elements im Allgemeinen von seiner Temperatur abhängig ist, umfasst eine Temperaturregelung des frequenzselektiven Elements somit auch eine Regelbarkeit der Filterfrequenz (Mittenfrequenz) des frequenzselektiven Elements. Für eine schnelle Regelung der Temperatur des VBG ist der Einsatz eines Peltier-Elements von Vorteil, da dieses im Gegensatz zu einem Heizelement in Verbindung mit einer zusätzlichen Kühlung auch eine inhärente aktive Kühlung ermöglicht. Bei Einsatz eines Heizelements muss die thermische Anbindung des VBG hingegen speziell für eine schnelle und effektive Kühlung optimiert werden.

[0011] Bei einem VBG handelt es sich um eine spezielle Form eines optischen Gitters. Im Gegensatz zu mechanischen Gittern (engl. „ruled gratings“) oder holographisch erzeugten planaren Gittern (engl. „holographic gratings“), welche typischerweise als Oberflächengitter ausgebildet sind, handelt es sich bei VBG im Allgemeinen um sog. dicke Gitter im Inneren eines Materialvolumens. VBG weisen dabei eine Vielzahl von hintereinander angeordneten Gitterstrukturen auf. Als Gitterstrukturen werden im Rahmen dieser Erfindung die einzelnen reflektierenden Schichten eines Gitters bezeichnet. Hierbei kann es sich beispielsweise um die einzelnen Gitterebenen eines aus mehreren hintereinander in einem geeigneten Material angeordneten Gitterebenen bestehenden VBG handeln. Die einzelnen Gitterstrukturen können jedoch auch nicht-planare Formen, beispielsweise gekrümmte Flächenformen, aufweisen. Der Abstand der Gitterstrukturen untereinander kann zur Bereitstellung eines Gitters mit breiter spektraler Verteilung (sog. „Chirped Grating“) variieren. Ein VBG kann auch mehrere voneinander getrennte oder zumindest teilweise ineinander übergehende Gitter mit entsprechenden Gitterstrukturen umfassen. Typischerweise werden VBG holographisch erzeugt, die entsprechenden Filterelemente werden dann auch als volumenholografische Bragg-Gitter (engl. „volume holographic gratings“, VHG) bezeichnet. VBG-Strukturen können jedoch auch nicht-holographisch, beispielsweise mittels Ein-

schreiben mit fs-Laserpulsen über eine Phasemaske in Glas, erzeugt werden.

[0012] Vorzugsweise ist das VBG als volumenholographisch erzeugtes Bragg-Gitter in einem photothermorefraktiven Glas ausgebildet. In bevorzugten Ausführungsformen kann auch ein volumenholographisches Bragg-Gitter basierend auf dichromatischer Gelatine, Photopolymeren, photorefraktiven Kristallen oder einer Silberhalogenid-Emulsion als VBG-Medium verwendet werden. Ein wichtiges Kriterium für Anwendungen auf mobilen Plattformen im Welt- raum ist hierbei insbesondere die Langzeitstabilität des VBG und insbesondere eine geringe Beeinflussung durch Bestrahlung, mechanische Spannungen und Temperaturschwankungen sowie auftretende Alterungseffekte.

[0013] Erfindungsgemäß wird vor einer Einkopplung der Laserstrahlung in das VBG, welche über eine Eingangsfacette des VBG erfolgt, ein Anteil der Laserstrahlung in einen Referenzstrahl abgezwiegt. Der Ausdruck „vor einer Einkopplung“ ist dabei in Bezug auf Positionen entlang des Strahlenverlaufs zu verstehen, eine Abzweigung kann somit auch zeitlich parallel mit der Einkopplung, d. h. bei bzw. während des physikalischen Vorgangs der Einkopplung, erfolgen. Eine Abzweigung des Referenzstrahls kann dazu insbesondere durch eine unmittelbare Reflexion an der Eingangsfacette des VBG bei der Einkopplung erfolgen. Alternativ dazu kann der Referenzstrahl auch durch einen vor dem VBG angeordneten Strahlteiler aus dem auf das VBG gerichteten Freistrah abgezwiegt werden. Der Referenzstrahl kann mit einem entsprechenden Referenzdetektor erfasst werden. Der in das VBG eingekoppelte Anteil der Laserstrahlung bildet hingegen einen Messstrahl aus. Der Messstrahl kann dabei bevorzugt entweder als transmittierter Messstrahl hinter dem VBG oder als gebeugter Messstrahl vor dem VBG erfasst werden. Sowohl der transmittierte als auch der gebeugte Messstrahl können dabei innerhalb des VBG auch mehrfach reflektiert werden (z. B. an den Außenflächen des VBG).

[0014] Vorzugsweise ist das VBG in einer Littrow-Konfiguration angeordnet. In einer solchen Konfiguration trifft die Laserstrahlung senkrecht auf die Gitterstrukturen des VBG. Wird das VBG in Littrow-Konfiguration betrieben, ist der Wert der Frequenz der erfindungsgemäßen Vorrichtung (Mittenfrequenz des VBG) in erster Ordnung unempfindlich gegenüber Verkippungen des einfallenden Laserstrahls.

[0015] Vorzugsweise weist die Eingangsfacette des VBG einen Winkel ungleich 90° zur Strahlachse der einfallenden Laserstrahlung auf und/oder einen Winkel zu den Gitterstrukturen des VBG auf. Wenn die Eingangsfacette des VBG einen Winkel ungleich 90° zur Strahlachse der einfallenden Laserstrahlung

aufweist, ist der an der Eingangsfacette des VBG reflektierte Anteil der einfallenden Laserstrahlung in eine von der Einfallrichtung abweichende Richtung gerichtet. Dadurch kommt es zu keinem direkten Rückreflex in den Laser, welcher zu Störungen führen kann. Weiterhin kann über die Reflexion unmittelbar vor der Einkopplung in das VBG somit ein Anteil der Laserstrahlung in einen separaten Referenzstrahl abgezweigt werden. Die räumliche Trennung des einfallenden und des von der Eingangsfacette reflektierten Strahls erlaubt den Verzicht auf einen zusätzlichen Strahlteiler. Dielektrische Strahlteiler besitzen nämlich hochreflektierende Beschichtungen, deren Eigenschaften temperaturabhängig sind und die sich mit der Zeit ändern (Alterungseffekte). Besonders bevorzugt wird ein Teil der eingehenden Laserstrahlung durch eine Fresnel-Reflexion an der Eingangsfacette des VBG abgezweigt. Abhängig von der Brechzahl des VBG-Mediums und dem Einfallswinkel kann ein bestimmter Winkel zwischen der Laserstrahlung und den Gitterstrukturen des VBG eingestellt werden. Insbesondere kann dadurch das VBG optimal an eine bestimmte Littrow-Konfiguration angepasst werden, wobei in der Littrow-Konfiguration der von der Eingangsfacette reflektierte Strahl nicht in Richtung des eingehenden Strahls reflektiert wird.

[0016] Vorzugsweise umfasst das VBG eine Montagefläche, eine der Montagefläche gegenüberliegende Oberseitenfläche, und zwei die Montagefläche und die Oberseitenfläche verbindende Seitenflächen; wobei ein Gittervektor des VBG und die Oberseitenfläche parallel zur Montagefläche ausgebildet sind und/oder die Seitenflächen parallel zueinander ausgebildet sind. Das VBG kann zusätzlich eine die Montagefläche und die Oberseitenfläche verbindende Vorderseitenfläche, durch die bevorzugt die Laserstrahlung eintritt (Eingangsfacette), und eine die Montagefläche und die Oberseitenfläche verbindende Rückseitenfläche, die der Eingangsfacette gegenüberliegt, umfassen. Die Seitenflächen des VBG sind bevorzugt mit einer Toleranz von $\pm 100^\circ$, bevorzugter von $\pm 10^\circ$, parallel zueinander ausgerichtet, um das Volumen des VBG zu minimieren. Der Gittervektor, der orthogonal zu den Gitterstrukturen (z. B. ebene oder schwach gekrümmte Flächen gleichen Brechungsindices) ist, als auch die Oberseitenfläche sind bevorzugt mit einer Toleranz von $\pm 40^\circ$, bevorzugter von $\pm 4^\circ$, parallel zur Montagefläche des VBG ausgerichtet, um den Integrationsprozess der erfindungsgemäßen Vorrichtung zu vereinfachen. Der Winkel zwischen dem Gittervektor des VBG und der Strahlachse des gebrochenen Strahls (Messstrahl nach Einkopplung in das VBG) weist bevorzugt eine Toleranz von $\pm 40^\circ$, bevorzugter von $\pm 4^\circ$, auf. Eine engere Toleranz des Winkels zwischen dem Gittervektor des VBG und der Strahlachse des gebrochenen Strahls

ermöglicht mehr Freiheiten beim Integrationsprozess.

[0017] Der Winkel zwischen der Strahlachse des einfallenden Strahls und der Eingangsfacette des VBG beträgt bevorzugt $\pm 10^\circ$, bevorzugter $\pm 1^\circ$. Bevorzugt weist die Eingangsfacette des VBG einen Winkel von $45^\circ \pm 1^\circ$ zur Strahlachse des einfallenden Lichtstrahls auf. Die Nutzung eines 45° -Winkels zwischen der Strahlachse des einfallenden Strahls und der Eingangsfacette des VBG vereinfacht die mechanische Integration, wohingegen eine engere Toleranz des Winkels zwischen der Strahlachse des einfallenden Strahls und der Eingangsfacette des VBG für einen besser planbaren Detektor-Signalpegel aufgrund der Winkelabhängigkeit der Fresnel-Reflexion und somit die Verwendung von kleinere und schnellere Detektoren ermöglicht.

[0018] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform beträgt der Winkel zwischen Strahlachse des einfallenden Strahls und der Eingangsfacette des VBG nicht 45° , sondern nimmt einen anderen Wert an, wobei der einfallende Strahl und der an der Eingangsfacette reflektierte Strahl räumlich getrennt werden. In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform überlappen der auf die Eingangsfacette des VBG einfallende und der an der Eingangsfacette reflektierte Strahl räumlich. In diesem Fall kann der Referenzstrahl durch einen Strahlteiler erzeugt werden, der vor dem VBG angeordnet ist.

[0019] Vorzugsweise ist das VBG als Parallelepiped ausgebildet und die Gitterstrukturen des VBG sind jeweils senkrecht zur Montagefläche, zur Oberseitenfläche und den Seitenflächen des VBG angeordnet. In diesem Fall wird sowohl der Integrationsprozess der erfindungsgemäßen Vorrichtung vereinfacht als auch das benötigte Volumen und somit dessen thermische Last reduziert. Ein Parallelepiped kann dabei bereits die für eine Fresnel-Reflexion an der Eingangsfacette notwendige Abschrägung der Oberfläche gegenüber den Gitterstrukturen bereitstellen.

[0020] Vorzugsweise wird der Referenzstrahl an einer Oberfläche des VBG (bevorzugt über eine Fresnel-Reflexion an der Eingangsfacette) oder einen vor dem VBG angeordneten Strahlteiler abgezweigt. Im Falle einer Fresnel-Reflexion kann auf eine dielektrische Beschichtung der Eingangsfacette zur Reflexminderung verzichtet werden. Der Verzicht auf eine dielektrische Beschichtung der Eingangsfacette des VBG vermeidet Temperatur- und Alterungseffekte bei der Reflexion und Transmission.

[0021] Vorzugsweise umfasst die erfindungsgemäße Vorrichtung weiterhin einen zur Bestimmung einer Intensität des Referenzstrahls eingerichteten Referenzdetektor und einen zur Bestimmung einer

Intensität des Messstrahls eingerichteten Messdetektor, wobei die Intensität des Messstrahls nach Durchlaufen des VBG bestimmt wird. Der Messstrahl kann dabei mehrfach innerhalb des VBG an den Außenflächen reflektiert werden. Insbesondere kann vor einer Detektion des Messstrahls dieser ein-, zwei-, oder mehrmalig das VBG durchlaufen. Bevorzugt wird vom Messdetektor dabei ein vom VBG transmittiertes Signal detektiert (Transmissionssignal). Alternativ hierzu kann jedoch auch ein vom VBG gebeugter Lichtstrahl vom Messdetektor detektiert werden (Beugungssignal). Vorzugsweise handelt es sich bei Detektoren um Photodioden.

[0022] Vorzugsweise umfasst die erfindungsgemäße Vorrichtung weiterhin eine erste elektronische Schaltung zur Ableitung eines Fehlersignals aus einem Referenzsignal des Referenzdetektors und einem Messsignal des Messdetektors. Unter einem Fehlersignal wird dabei ein Signal mit einer zur Regelabweichung korrelierenden funktionalen Abhängigkeit verstanden. Typischerweise weist das Fehlersignal dabei einen für eine Regelschaltung geeigneten charakteristischen Arbeitspunkt (z. B. bei einem Nulldurchgang) auf.

[0023] Zur Ableitung des Fehlersignals können anstatt des Referenz- und eines Transmissionssignals auch das Referenz- und ein Beugungssignal verwendet werden. In weiteren Ausführungsform können ein Transmissionssignal und ein Beugungssignal bzw. das Referenzsignal, ein Transmissionssignal und ein Beugungssignal zur Ableitung eines Fehlersignals verwendet werden. Weiterhin können zur Ableitung eines Fehlersignals auch nur ein Beugungssignal oder nur ein Transmissionssignal verwendet werden, wobei in beiden Fällen jedoch ein konstanter Eingangsspiegel erforderlich ist.

[0024] Vorzugsweise ist das VBG über ein Gittergehäuse thermisch von seiner Umgebung entkoppelt. Ein entsprechendes Gittergehäuse kann eine verbesserte thermische und optische Isolation des VBG ermöglichen. Das Gittergehäuse kann an eine optische Bank, auf der das VBG mit anderen Komponenten angeordnet ist, angebunden werden. Das Gittergehäuse kann eine Temperaturstabilisierung umfassen. Eine solche Ausführungsform ermöglicht einen geringeren Temperaturgradienten der für Wärmestrahlung relevanten Umgebung des VBG.

[0025] Vorzugsweise ist das VBG mit anderen Komponenten in einem Modulgehäuse angeordnet. Insbesondere kann das VBG mit oder ohne ein zusätzliches Gittergehäuse mit anderen Komponenten (z. B. Spiegel, Polarisatoren und/oder eine optische Bank) in dem Modulgehäuse angeordnet werden. Eine solche Ausführungsform ermöglicht eine bessere thermische und akustische Isolation des VBG. Das Modulgehäuse kann thermisch von seiner Umge-

bung entkoppelt sein und eine Temperaturstabilisierung umfassen.

[0026] Vorzugsweise wird zur Temperaturstabilisierung des VBG mindestens eine Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen verwendet. Bevorzugt kann eine Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen ein Peltier-Element oder ein Heizelement umfassen. Bei Einsatz eines Heizelements kann die thermische Anbindung des VBG (bzw. damit verbundener Elemente) speziell für eine schnelle und effektive Kühlung optimiert werden. Bei der Kühlung kann es sich beispielsweise um eine Strahlungskühlung gegenüber dem Weltraum handeln. Bevorzugt ist weiterhin, dass die für eine erfindungsgemäße Signalerfassung verwendeten Detektoren mit dem VBG auf einem gemeinsamen Peltier-Element bzw. einer thermisch entsprechend angeordneten gemeinsamen Plattform angeordnet sind. Eine solche Ausführungsform ermöglicht eine Reduzierung der Empfindlichkeit gegenüber einer Strahldejustage, wodurch die Genauigkeit der erfindungsgemäßen Vorrichtung erhöht wird.

[0027] Die genannten Ausführungsformen können mit Vorteil ganz oder teilweise miteinander kombiniert werden.

[0028] Ein zweiter Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft ein Verfahren zur Frequenzstabilisierung eines Lasers unter Verwendung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, wobei aus einer Intensität des Referenzstrahls und einer Intensität des Messstrahls nach (mindestens einmaligem) Durchlaufen des VBG ein Fehlersignal abgeleitet wird und über einen Regelkreis die Frequenz des Lasers mit dem Fehlersignal stabilisiert wird.

[0029] Insbesondere kann hierzu die Temperatur der erfindungsgemäßen Vorrichtung über eine Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen geregelt werden. Diese Regelung kann dabei lokal das VBG oder andere Komponenten, wie beispielsweise eine optische Bank, auf der das VBG mit anderen Komponenten angeordnet ist, betreffen. Ebenfalls möglich ist eine Kombination mehrerer Temperaturregelungsansätze. Eine Temperaturstabilisierung der optischen Bank erhöht die Genauigkeit des erfindungsgemäßen Verfahrens.

[0030] Vorzugsweise wird die vom VBG spektral gefilterte Laserstrahlung zur Ausbildung eines erweiterten Resonators für den Laser in den Laser zurückgekoppelt. Insbesondere kann dadurch ein frequenzstabiler Diodenlaser mit erweitertem Resonator (engl. „extended cavity diode laser“, ECDL) realisiert werden. Über einen zugehörigen Regelkreis kann dann anschließend beispielsweise der Injektionsstrom oder die Temperatur des Lasers

zur Einstellung und Stabilisierung der Laserfrequenz geregelt werden.

[0031] Ein dritter Aspekt betrifft ein Verfahren zur Messung der Frequenz eines Lasers unter Verwendung einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, wobei aus einer Intensität des Referenzstrahls und einer Intensität des Messstrahls nach (mindestens einmaligem) Durchlaufen des VBG ein Fehlersignal abgeleitet wird, über einen Regelkreis mit dem Fehlersignal die Temperatur des VBG derart eingestellt wird, dass eine Bragg-Frequenz (Mittenfrequenz) des VBG bis auf eine optional ausgewählte, vorzeichenbehaftete Frequenzdifferenz der Frequenz des Lasers entspricht, und mittels einer bekannten Zuordnung aus der eingestellten Temperatur des VBG die Frequenz des Lasers bestimmt wird. Die Bragg-Frequenz (Mittenfrequenz) des VBG kann somit auch unmittelbar auf die Frequenz des Lasers eingestellt werden.

[0032] Das Verfahren zur Messung der Frequenz eines Lasers und das erfindungsgemäße Verfahren zur Frequenzstabilisierung eines Lasers unterscheiden sich im Wesentlichen lediglich durch die geregelte Größe, basieren ansonsten jedoch auf einer gemeinsamen erfinderischen Idee. Während zur Frequenzstabilisierung eines Lasers der erfindungsgemäß abgeleitete Fehlerwert zur Regelung der Temperatur und/oder des Injektionsstroms des Laser genutzt werden kann, um eine bestimmte Laserfrequenz einzustellen und diese zu stabilisieren, kann zur Messung der Frequenz eines Lasers die Temperatur des VBG mit Hilfe einer Temperaturregelung so stabilisiert werden, dass eine Bragg-Frequenz (Mittenfrequenz) des VBG bis auf eine optional ausgewählte, vorzeichenbehaftete Frequenzdifferenz der Frequenz des Lasers entspricht. Aus der eingestellten bzw. über einen Temperatursensor ermittelten Temperatur des VBG kann anschließend über eine bekannte Zuordnung die Frequenz des Lasers bestimmt und beispielsweise in einer Anzeigevorrichtung angezeigt werden.

[0033] Im Übrigen ergeben sich weitere bevorzugte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens unmittelbar aus den zur erfindungsgemäßen Vorrichtung in der Beschreibung genannten Merkmalen.

[0034] Die vorliegende Erfindung kann in Quantensensoren genutzt werden, um Laser schneller und zuverlässiger auf eine gewünschte Wellenlänge, zum Beispiel eines atomaren Übergangs, zu stabilisieren. Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann dadurch beispielsweise die Aufnahme der Kommunikation (Lock-Akquisition) zwischen zwei Satelliten für die optische Satellitenkommunikation erleichtern.

[0035] Während im Stand der Technik die Lichtsignale in Lichtwellenleitern geführt werden, breiten sich diese bei der vorliegenden Erfindung vorzugsweise im freien Raum aus. Die vorliegende Erfindung zeichnet sich dabei insbesondere durch die folgenden strukturellen Unterschiede aus:

1. Als frequenzselektives Element wird ein VBG anstatt eines FBG verwendet.
2. Die Trennung der Lichtsignale vor dem FBG erfolgt nicht durch einen Lichtwellenleiterbasierten Strahlungsteiler. Ein Teil des einfallenden Lichtsignals wird bevorzugt durch eine Fresnel-Reflektion an der Eingangsfacette des VBG vom Rest des Signals abgezweigt. Dafür kann die Eingangsfacette des VBG unter einen Winkel gegen den einfallenden Strahl angeordnet sein, so dass der Fresnel-Reflex und der eingehende Strahl räumlich voneinander getrennt werden. Das Fehlersignal kann bevorzugt aus dem transmittierten und dem abgezweigten einfallenden Lichtsignal abgeleitet werden.
3. Das VBG kann auf einer optischen Bank bzw. allgemein auf einem geeigneten Träger angeordnet werden, dessen Temperatur mit einer geeigneten Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen und einem Temperatursensor auf einen vorgegebenen Wert stabilisiert werden kann.

[0036] Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist im Vergleich zum Stand der Technik deutlich robuster gegenüber Bestrahlung, mechanische Spannungen und Temperaturänderungen, da an den für die Messgenauigkeit besonders kritischen Stellen keine Lichtwellenleiterkomponenten eingesetzt werden. Eine bevorzugte Abzweigung des Referenzstrahls durch eine Fresnel-Reflexion ermöglicht eine weitgehende Unabhängigkeit des Teilungsverhältnisses von Temperatureinflüssen. Das VBG kann mit Hilfe eines Peltier-Elements und dem Verzicht auf ein athermales Gehäuse direkt über die Temperatur in seiner Frequenz durchgestimmt werden. Durch eine Miniaturisierung der Vorrichtung und eine angepasste Form des VBG kann eine höhere mechanische Stabilität verbunden mit einem geringeren Gewicht und einem reduzierten Formfaktor erreicht werden. Durch ein optionales Modulgehäuse kann die erfindungsgemäße Vorrichtung weitestgehend von akustischen und thermischen Einflüssen abgeschirmt werden. Weiterhin kann durch eine gestaffelte Temperaturstabilisierung des VBG beispielsweise mit Hilfe eines Peltier-Elements unter dem VBG, einem Gittergehäuse um das Peltier-Element, eines weiteren Peltier-Elements zur Stabilisierung einer optischen Bank und einem Modulgehäuse um die optische Bank eine hohe Frequenzgenauigkeit bei gleichzeitig möglicher Frequenzdurchstimmung erreicht werden.

[0037] Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den in den jeweiligen Unteransprüchen genannten Merkmalen.

[0038] Die verschiedenen in dieser Anmeldung genannten Ausführungsformen der Erfindung sind, sofern im Einzelfall nicht anders ausgeführt, mit Vorteil miteinander kombinierbar.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0039] Die Erfindung sowie das technische Umfeld werden nachfolgend anhand der beiliegenden Figuren näher erläutert. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Erfindung durch die angeführten Ausführungsbeispiele nicht beschränkt werden soll. Insbesondere ist es, soweit nicht explizit anders dargestellt, auch möglich, Teilaspekte der in den Figuren erläuterten Sachverhalte zu extrahieren und mit anderen Bestandteilen und Erkenntnissen aus der vorliegenden Beschreibung zu kombinieren. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer herkömmlichen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers gemäß Stand der Technik (aus Sotor et al.);

Fig. 2 eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers;

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers;

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers;

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers;

Fig. 6 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen VBG-Geometrie;

Fig. 7 eine schematische Darstellung zur Umsetzung einer ersten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Frequenzstabilisierung eines Lasers unter Verwendung einer Vorrichtung nach **Fig. 2**;

Fig. 8 eine schematische Darstellung der Signale entsprechend der Ausführungsform nach **Fig. 7**;

Fig. 9 eine schematische Darstellung zur Umsetzung einer zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Frequenzstabilisierung eines Lasers unter Verwendung einer Vorrichtung nach **Fig. 2**;

Fig. 10 eine schematische Darstellung zur Umsetzung einer dritten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Frequenzstabilisierung eines Lasers unter Verwendung einer Vorrichtung nach **Fig. 2**;

Fig. 11 eine schematische Darstellung zur Umsetzung einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Messung der Frequenz eines Lasers unter Verwendung einer Vorrichtung nach **Fig. 2**;

Fig. 12 eine schematische Darstellung der Signale entsprechend **Fig. 11**; und

Fig. 13 eine schematische Darstellung einer Zuordnung der Temperatur des VBG zur Frequenz des Lasers entsprechend **Fig. 11**.

Ausführliche Beschreibung der Zeichnungen

[0040] **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung einer herkömmlichen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers gemäß Stand der Technik (aus Sotor et al.). Der Laser („Stabilized laser“) umfasst einen mittels Peltier-Element (TEC - „Thermoelectric cooler“) temperaturgeregelten Laserkristall (Nd: YAG/KTP), welcher doppelresonant bei Emissionswellenlängen von 1064 nm und 532 nm emittiert. Der Laserkristall wird über einen Diodenlaser („Pumping diode“) mit einer Emissionswellenlänge bei 808 nm gepumpt. Der Strahlungsanteil bei 1064 nm wird über einen dichroitischen Strahlteiler („Dichroic mirror“) abgezweigt und über eine Faserkopplung („Fibre coupler“) in ein innerhalb eines athermischen Gehäuses angeordnetes FBG („Athermal housed FBG“) eingekoppelt. Über entsprechend angeordnete PIN-Photodioden („PIN-diodes“) wird dabei jeweils die Intensität des gebeugten Strahlungsanteils („reflected signal“) und des vom FBG transmittierten Strahlungsanteils („transmitted signal“) bestimmt und beide Signale einer elektronischen Schaltung zur Regelung der Temperatur des Laserkristalls („Automatic Frequency Control“) zugeführt. Die Güte der Frequenzstabilisierung des Lasers hängt hierbei vor allem von der Stabilität des FBG und der zugehörigen Faserabschnitte innerhalb der Vorrichtung ab.

[0041] **Fig. 2** zeigt eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers. Ein Lichtsignal wird hierbei über einen polarisationserhaltenden einmodigen Lichtwellenleiter (PMSF) F1 in die Vorrichtung eingekoppelt. Die PMSF F1 erlaubt eine einfache Integration der erfindungsgemäßen Vorrichtung in bereits bestehende optische Systeme. Das eingekoppelte Lichtsignal wird mit einer Optik L1 kollimiert. Mit einem Polarisator R1 wird dafür gesorgt, dass ausschließlich s-polarisiertes Licht mit den Spiegeln S1 und S2 auf das VBG G1 gelenkt wird. Der Lichtstrahl kann dabei so

gelenkt werden, dass, wie in **Fig. 6** gezeigt, das VBG G1 in einer Littrow-Konfiguration (d. h. senkrechter Einfall des Lichts auf die Gitterstrukturen E) mit einer Toleranz von $\pm 1^\circ$ betrieben werden kann. Durch den Polarisator R1 können eventuell auftretende Polarisierungsschwankungen, die zu systematischen Fehlern bei der Messung führen können, vermieden werden. Eine Strahlführung über die beiden Spiegeln S1 und S2 bietet eine größere Freiheit beim Positionieren des VBG als bei der Verwendung nur eines oder keines Spiegels.

[0042] Das VBG G1 kann mit einem Temperatursensor N1 zur Temperaturstabilisierung beispielsweise auf einer ersten Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen T1 befestigt sein. Der Referenzdetektor P1 und der Messdetektor P2 können ebenfalls an der Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen T1 befestigt sein, um eine stabile Strahljustage zu gewährleisten. Bevorzugt sind die PMSF F1, die Optik L1, der Polarisator R1, die Spiegel S1 und S2, und die Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen T1 auf einer gemeinsamen optischen Bank B1 mittels adhäsiven Bonden integriert. Ein Gittergehäuse H1 kann zur Verbesserung der Temperaturstabilität der erfindungsgemäßen Vorrichtung thermisch leitend an die optische Bank B1 angebunden sein. Mit einer zweiten Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen T2 kann die optische Bank B1 ebenfalls auf eine gewünschte Temperatur stabilisiert werden.

[0043] Ein optionales Modulgehäuse H2 kann zur Abschirmung der optischen Bank B1 von thermischen und akustischen Störungen aus der Umgebung genutzt werden. Bei der Optik L1, dem Polarisator R1, den Spiegeln S1 und S2, und dem VBG G1 handelt es sich bevorzugt um mikrooptische Komponenten. Der Einsatz mikrooptischer Komponenten ist aufgrund des damit zusammenhängenden geringeren Formfaktors, des reduzierten Gewichts und erhöhter mechanischer Stabilität der erfindungsgemäßen Vorrichtung bevorzugt. Die Vorrichtungen zum Kühlen und/oder Heizen T1, T2 können bevorzugt Peltier-Elemente oder Heizelemente umfassen.

[0044] **Fig. 3** zeigt eine schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers. Die gezeigte Darstellung entspricht weitgehend der **Fig. 2**, die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten daher entsprechend. Bei dieser Ausführungsform wird die Intensität des vom VBG G1 gebeugten Lichtstrahls mit dem Messdetektor P3 bestimmt (Beugungssignal). Zur Erzeugung eines Fehlersignals kann somit anstatt des Referenz- und eines direkten Transmissionssignals das Referenz- und ein Beugungssignal verwendet werden. Die Intensität des gebeugten Strahls kann dabei nach Reflexion an einem Strahlteiler A1 vor

dem VBG G1 mit dem Messdetektor P3 bestimmt werden.

[0045] **Fig. 4** zeigt eine schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers. Die gezeigte Darstellung entspricht weitgehend der **Fig. 3**, die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten daher entsprechend. Falls sich der einfallende und der gebeugte Strahl räumlich nicht überlappen, kann auf den zusätzlichen Strahlteiler A1 vor dem VBG G1 verzichtet werden und die Intensität des gebeugten Strahls kann stattdessen auch unmittelbar mit einem Messdetektor P4 bestimmt werden.

[0046] **Fig. 5** zeigt eine schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers. Die gezeigte Darstellung entspricht weitgehend der **Fig. 4**, die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten daher entsprechend. Alternativ zu einer Bestimmung der Intensität des gebeugten Strahls mit einem Messdetektor P4 kann diese beispielsweise auch über einen über eine Seitenfläche (z. B. Seitenflächen A, B) des VBG G1 ausgekoppelten Strahl mit einem Messdetektor P5 erfolgen. Die entsprechende Seitenfläche des VBG G1, aus der der gebeugte Strahl nach Reflexion an der Eingangsfläche austritt, muss in diesem Fall eine optische Qualität aufweisen.

[0047] **Fig. 6** zeigt eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen VBG-Geometrie. Die Eingangsfläche des VBG G1 weist bevorzugt einen Winkel von $45^\circ \pm 1^\circ$ zur Strahlachse des einfallenden Lichtstrahls auf und ist nicht beschichtet. Die Seitenflächen A, B des VBG G1 sind bevorzugt mit einer Toleranz von $\pm 10^\circ$ parallel zueinander ausgerichtet, um das Volumen des VBG G1 zu minimieren. Der Gittervektor, der orthogonal zu den Gitterstrukturen E gleichen Brechungsindices ist, als auch die Oberseitenfläche D sind bevorzugt mit einer Toleranz von $\pm 4^\circ$ parallel zur Montagefläche C des VBG G1 ausgerichtet, um den Integrationsprozess des VBG in die erfindungsgemäße Vorrichtung zu vereinfachen. Der einfallende Lichtstrahl wird bevorzugt an der Eingangsfläche des VBG G1 Fresnelreflektiert.

[0048] **Fig. 7** zeigt eine schematische Darstellung zur Umsetzung einer ersten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Frequenzstabilisierung eines Lasers unter Verwendung einer Vorrichtung nach **Fig. 2**. Die gezeigte Darstellung entspricht somit weitgehend der **Fig. 2**, die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten daher entsprechend. Das Licht eines Lasers D1 wird hierbei beispielhaft mit Hilfe einer Optik L2 in den Lichtwellenleiter F1 einer erfindungsgemäßen Vorrichtung eingekoppelt, so dass über eine

entsprechende Regelung die Frequenz des Lasers D1 stabilisiert werden kann.

[0049] Der an der Eingangsfacette des gezeigten VBG G1 reflektierte Strahl trifft beispielsweise auf einen Referenzdetektor P1 (Referenzsignal), welcher die Intensität des reflektierten Strahls detektiert. Ein Anteil des auf die Eingangsfacette einfallenden Lichtstrahls wird bei Eintritt in das VBG G1 gebrochen. Die Intensität des durch das VBG G1 transmittierten Strahls kann mit einem Messdetektor P2 (Transmissionssignal) detektiert werden. Aus dem Referenzsignal U1 des Referenzdetektors P1 und dem Transmissionssignal U2 des Messdetektors P2 kann ein Fehlersignal erzeugt werden, das zur Stabilisierung eines Lasers D1 (bzw. zur Messung der Emissionsfrequenz eines Lasers D1) genutzt werden kann.

[0050] Dazu werden die Signale U1 und U2 des Referenzdetektors P1 und des Messdetektors P2 mit einer geeigneten elektronischen Schaltung E1 zu einem Fehlersignal verarbeitet. Das Fehlersignal kann anschließend mit einer geeigneten elektronischen Schaltung E2 aufbereitet und als Regelsignal an den Laser G1 zur Regelung der Frequenz des Lasers G1 so zurückgeführt werden, dass die Frequenz des Lasers G1 sich auf einen definierten Wert f_0 einstellt.

[0051] Im einfachsten Fall kann die elektronische Schaltung E1 so realisiert werden, dass sie die Signale U1 und U2 des Referenzdetektors P1 und des Messdetektors P2 proportional mit einem geeigneten Proportionalitätsfaktor verstärkt und die Differenz der Signale U1 und U2 ermittelt (siehe **Fig. 8**).

[0052] **Fig. 8** zeigt eine schematische Darstellung der Signale entsprechend der Ausführungsform nach **Fig. 7**. Es sind beispielhafte Verläufe des Referenzsignals U1 des Referenzdetektors P1 und des Transmissionssignal U2 des Messdetektors P2 (Photodioden-Signale) über die Frequenz des Lasers D1 (Laserfrequenz f) aufgetragen. Davon abgeleitet lässt sich ein Differenzsignal $U2-U1$ als Fehlersignal ermitteln, wobei in **Fig. 8** beispielhaft der erste Nulldurchgang des Fehlersignals als Regelpunkt für die Frequenz des Lasers G1 auf eine definierten Wert f_0 eingezeichnet ist. Bei Aktivierung des Regelkreises stellt sich die Frequenz des Lasers G1 dann auf den Wert f_0 ein, bei dem das Fehlersignal einen Nulldurchgang entweder mit positiver oder mit negativer (wie dargestellt) Steigung besitzt.

[0053] **Fig. 9** zeigt eine schematische Darstellung zur Umsetzung einer zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Frequenzstabilisierung eines Lasers unter Verwendung einer Vorrichtung nach **Fig. 2**. Die gezeigte Darstellung entspricht weitgehend der **Fig. 2**, die Bezugszei-

chen und deren Zuordnung gelten daher entsprechend. Es handelt sich hierbei insbesondere um ein Verfahren zur internen Frequenzstabilisierung eines Diodenlasers mit erweitertem Resonator (engl. „extended cavity diode laser“, ECDL) mit Hilfe einer erfindungsgemäßen Vorrichtung.

[0054] Die von einem Laser D2 emittierte Strahlung wird mithilfe einer Kollimationsoptik L3 kollimiert und mithilfe der Optik L2 in eine erfindungsgemäße Vorrichtung eingekoppelt. Die eingekoppelte Strahlung wird vom VBG G1 frequenzselektiv gebeugt. Der so ausgeführte Laseraufbau oszilliert bei einer Frequenz, die der Frequenz einer der möglichen longitudinalen Eigenmoden des ECDL entspricht. Durch das als spektral schmalbandiger Reflektor wirkende VBG G1 wird eine der möglichen longitudinalen Eigenmoden für die Oszillation ausgewählt. Typischerweise ist dies die longitudinale Eigenmode, deren Frequenz der Mittenfrequenz des Spektrums des als Reflektor wirkenden VBG G1 am nächsten liegt. Für den Einsatz des hier beschriebenen Verfahrens ist eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung bevorzugt, bei der die Vorrichtung keinen Lichtwellenleiter zur Einkopplung umfasst, sondern bei der ein Freistrahl in die Vorrichtung eingekoppelt wird. Damit werden insbesondere parasitäre Rückkopplungen von den Facetten des Lichtwellenleiters in den Laser D2 vermieden, die ansonsten den Betrieb des ECDL stören könnten.

[0055] Bei einer Veränderung des Luftdrucks der Umgebung des Laseraufbaus, der Temperatur des Lasers D2, des Injektionsstromes in den Laser D2 und/oder bei einer Veränderung der Temperatur des aus dem Laser D2, der Kollimationsoptik L3 und einer erfindungsgemäßen Vorrichtung bestehenden Laseraufbaus kommt es zu einer spektralen Verstimmung zwischen der Frequenz der longitudinalen Eigenmode des ECDL und der Mittenfrequenz des als spektral schmalbandigen Reflektor wirkenden VBG G1. Erreicht diese Verstimmung die Größenordnung des freien Spektralbereichs des ECDL, kommt es zu einem Modensprung, d. h. es findet ein Wechsel zu einer anderen longitudinalen Eigenmode des ECDL statt. Hierbei ändert sich die Frequenz der Laseroszillation sprunghaft.

[0056] Soll eine sprunghafte Änderung der Frequenz der Laseroszillation im Betrieb bei konstanter Frequenz oder bei einer gewünschten Frequenzänderung vermieden werden, kann das erfindungsgemäße Verfahren zur Frequenzstabilisierung eines Lasers eingesetzt werden. Dazu wird aus dem Referenzsignal U1 des Referenzdetektors P1 und dem Transmissionssignal U2 des Messdetektors P2 mit einer geeigneten elektronischen Schaltung E1 ein Fehlersignal erzeugt. Mit einer geeigneten elektronischen Schaltung E2 kann daraus anschließend ein Regelsignal erzeugt werden, dass beispielsweise

den Injektionsstrom oder die Temperatur des Lasers D2 oder die Temperatur des aus Laser D2, Kollimationsoptik L3 und erfindungsgemäßer Vorrichtung bestehenden Aufbaus mithilfe einer entsprechenden Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen T3 regelt. Es kann auch auf eine Kombination dieser Größen geregelt werden. Damit wird die Oszillationsfrequenz der Eigenmode des ECDL so eingestellt, dass es auf die Frequenz f_0 der erfindungsgemäßen Vorrichtung abgestimmt bleibt. Die Oszillationsfrequenz des ECDL folgt so der Frequenz f_0 der erfindungsgemäßen Vorrichtung.

[0057] Fig. 10 zeigt eine schematische Darstellung zur Umsetzung einer dritten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Frequenzstabilisierung eines Lasers unter Verwendung einer Vorrichtung nach Fig. 2. Die gezeigte Darstellung entspricht weitgehend der Fig. 9, die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten daher entsprechend. Im Unterschied zur Fig. 9 wird hierbei das durch die elektronische Schaltung E2 erzeugte Regelsignal eingesetzt, um eine unmittelbar mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung gekoppelte Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen T1 zu steuern. In diesem Fall wird die Frequenz f_0 der erfindungsgemäßen Vorrichtung auf die Oszillationsfrequenz des ECDL stabilisiert.

[0058] Fig. 11 zeigt eine schematische Darstellung zur Umsetzung einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Messung der Frequenz eines Lasers unter Verwendung einer Vorrichtung nach Fig. 2. Die gezeigte Darstellung entspricht weitgehend der Fig. 2, die Bezugszeichen und deren Zuordnung gelten daher entsprechend. Das Licht eines Lasers D1 wird hierbei beispielhaft mit Hilfe einer Optik L2 in den Lichtwellenleiter F1 einer erfindungsgemäßen Vorrichtung eingekoppelt, so dass die Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen T1 so angesteuert werden kann, dass die Frequenz f_0 der erfindungsgemäßen Vorrichtung (entspricht bis auf eine optional ausgewählte, vorzeichenbehaftete Frequenzdifferenz der Mittenfrequenz des VBG bzw. der Bragg-Frequenz) den Wert f_1 der Frequenz des Lasers D1 annimmt. Dem so eingestellten, am Temperatursensor N1 gemessenen Wert der Temperatur kann ein bestimmter Wert der Frequenz des Lasers D1 zugeordnet werden.

[0059] Dazu werden das Referenzsignal U1 des Referenzdetektors P1 und das Transmissionssignal U2 des Messdetektors P2 mit einer geeigneten elektronischen Schaltung E1 verarbeitet. Das Fehlersignal wird mithilfe einer elektronischen Schaltung E2 so aufbereitet, dass es als Regelsignal eine Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen T1 so steuert, dass die Frequenz der erfindungsgemäßen Vorrichtung f_0 der Oszillationsfrequenz f_1 des Lasers D1 entspricht. Je nach Wert f_1 der Oszillationsfrequenz des

Lasers D1 stellt sich dabei eine für den Wert f_1 der Oszillationsfrequenz des Lasers D1 charakteristische Temperatur T am Temperatursensor N1 ein. Mit Hilfe einer bekannten Zuordnung (z. B. einer Kalibriertabelle K1) kann daher der Wert f_1 der Oszillationsfrequenz des Lasers D1 aus dem Wert der Temperatur T am Temperatursensor N1 ermittelt und auf einer Anzeigevorrichtung Y1 dargestellt werden.

[0060] Fig. 12 zeigt eine schematische Darstellung der Signale entsprechend Fig. 11. Die Frequenz f_0 der erfindungsgemäßen Vorrichtung wird auf den Wert der Frequenz des Lasers D1 (Laserfrequenz f) stabilisiert. Es sind beispielhafte Verläufe des Differenzsignal U2-U1 (vgl. Fig. 8 zur Ermittlung) für zwei unterschiedliche Temperaturen T_1 und T_2 der erfindungsgemäßen Vorrichtung dargestellt. Auch hierbei kann der erste Nulldurchgang des Fehlersignals als Bezugspunkt genutzt werden kann. Mit Hilfe einer bekannten Zuordnung kann der Wert f_1 bzw. f_2 der Oszillationsfrequenz des Lasers D1 aus dem Wert der Temperatur T_1 bzw. T_2 am Temperatursensor N1 ermittelt werden (vgl. Fig. 14).

[0061] Fig. 13 zeigt eine schematische Darstellung einer Zuordnung der Temperatur des VBG (G1) zur Frequenz des Lasers entsprechend Fig. 11. In der Darstellung ist die Temperatur T des Temperatursensors N1 (T_{N1}) über die Frequenz des Lasers G1 (Laserfrequenz f) aufgetragen.

Bezugszeichenliste

D1, D2	Laser
G1	Volumen-Bragg-Gitter (VBG, frequenzselektives Element)
E	Gitterstrukturen (z. B. Gitterflächen oder -ebenen)
A, B	Seitenflächen
C	Montagefläche
D	Oberseitenfläche
A1	Strahlteiler
P1, P3	Referenzdetektoren
P2, P4, P5	Messdetektoren
U1	Referenzsignal (Referenzdetektor)
U2	Messsignal (Messdetektor)
E1, E2	elektronische Schaltungen
H1	Gittergehäuse
H2	Modulgehäuse
T1, T2, T3	Vorrichtungen zum Kühlen und/oder Heizen

K1	Kalibriertabelle
Y1	Anzeigevorrichtung
L1, L2, L3	Optiken
S1, S2	Spiegel
F1	Lichtwellenleiter
R1	Polarisator
N1	Temperatursensor
B1	optische Bank

Patentansprüche

1. Verfahren zur Messung der Frequenz eines Lasers (D1) unter Verwendung einer Vorrichtung zur Frequenzstabilisierung eines Lasers (D1, D2), umfassend einen Strahlengang zur Einkopplung einer vom Laser (D1, D2) emittierten Laserstrahlung auf ein frequenzselektives Element (G1), wobei das frequenzselektive Element (G1) temperaturgeregelt ist, und es sich bei dem frequenzselektiven Element um ein Volumen-Bragg-Gitter, VBG, (G1) mit einer Vielzahl von Gitterstrukturen (E) handelt und vor einer Einkopplung der Laserstrahlung in das VBG (G1) über eine Eingangsfacette ein Anteil der Laserstrahlung in einen Referenzstrahl abgezweigt wird und der in das VBG (G1) eingekoppelte Anteil der Laserstrahlung einen Messstrahl ausbildet, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus einer Intensität des Referenzstrahls und einer Intensität des Messstrahls nach Durchlaufen des VBG (G1) ein Fehlersignal abgeleitet wird, über einen Regelkreis mit dem Fehlersignal die Temperatur des VBG (G1) derart eingestellt wird, dass eine Bragg-Frequenz des VBG (G1) bis auf eine optional ausgewählte, vorzeichenbehaftete Frequenzdifferenz der Frequenz des Lasers (D1) entspricht, und mittels einer bekannten Zuordnung aus der eingestellten Temperatur des VBG (G1) die Frequenz des Lasers (D1) bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das VBG (G1) als volumenholographisch erzeugtes Bragg-Gitter in einem photothermorefraktiven Glas ausgebildet ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das VBG (G1) in einer Littrow-Konfiguration angeordnet ist.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Eingangsfacette des VBG (G1) einen Winkel ungleich 90° zur Strahlachse der einfallenden Laserstrahlung aufweist und/oder einen Winkel zu den Gitterstrukturen (E) des VBG (G1) aufweist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das VBG (G1) eine Montagefläche (C), eine der Montagefläche (C) gegenüberliegende Oberseitenfläche (D), und zwei die Montagefläche (C) und die Oberseitenfläche (D) verbindende Seitenflächen (A, B) umfasst; wobei ein Gittervektor des VBG (G1) und die Oberseitenfläche (D) parallel zur Montagefläche (C) ausgebildet sind und/oder die Seitenflächen (A, B) parallel zueinander ausgebildet sind.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei das VBG (G1) als Parallelepiped ausgebildet ist und die Gitterstrukturen (E) des VBG (G1) jeweils senkrecht zur Montagefläche (C), zur Oberseitenfläche (D) und den Seitenflächen (A, B) des VBG (G1) angeordnet sind.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Referenzstrahl an einer Oberfläche des VBG (G1) oder einen vor dem VBG (G1) angeordneten Strahlteiler (A1) abgezweigt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiterhin umfassend einen zur Bestimmung einer Intensität des Referenzstrahls eingerichteten Referenzdetektor (P1, P3) und einen zur Bestimmung einer Intensität des Messstrahls eingerichteten Messdetektor (P2, P4, P5), wobei die Intensität des Messstrahls nach Durchlaufen des VBG (G1) bestimmt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, weiterhin umfassend eine erste elektronische Schaltung (E1) zur Ableitung eines Fehlersignals aus einem Referenzsignal (U1) des Referenzdetektors (P1, P3) und einem Messsignal (U2) des Messdetektors (P2, P4, P5).

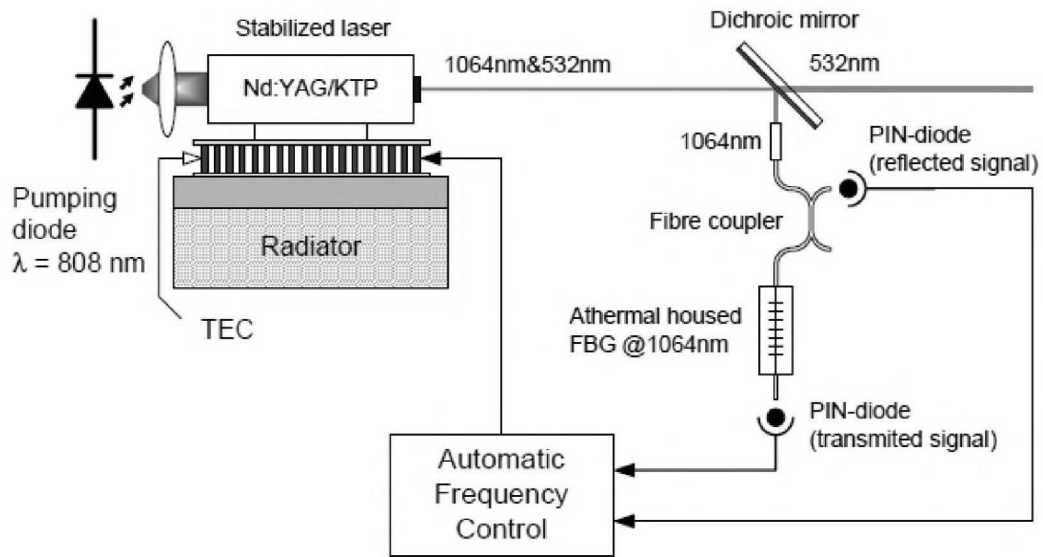
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das VBG (G1) über ein Gittergehäuse (H1) thermisch von seiner Umgebung entkoppelt ist.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das VBG (G1) mit anderen Komponenten in einem Modulgehäuse (H2) angeordnet ist.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zur Temperaturstabilisierung des VBG (G1) mindestens eine Vorrichtung zum Kühlen und/oder Heizen (T1, T2, T3) verwendet wird.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



Stand der Technik
(aus Sotor et al.)

FIG. 1

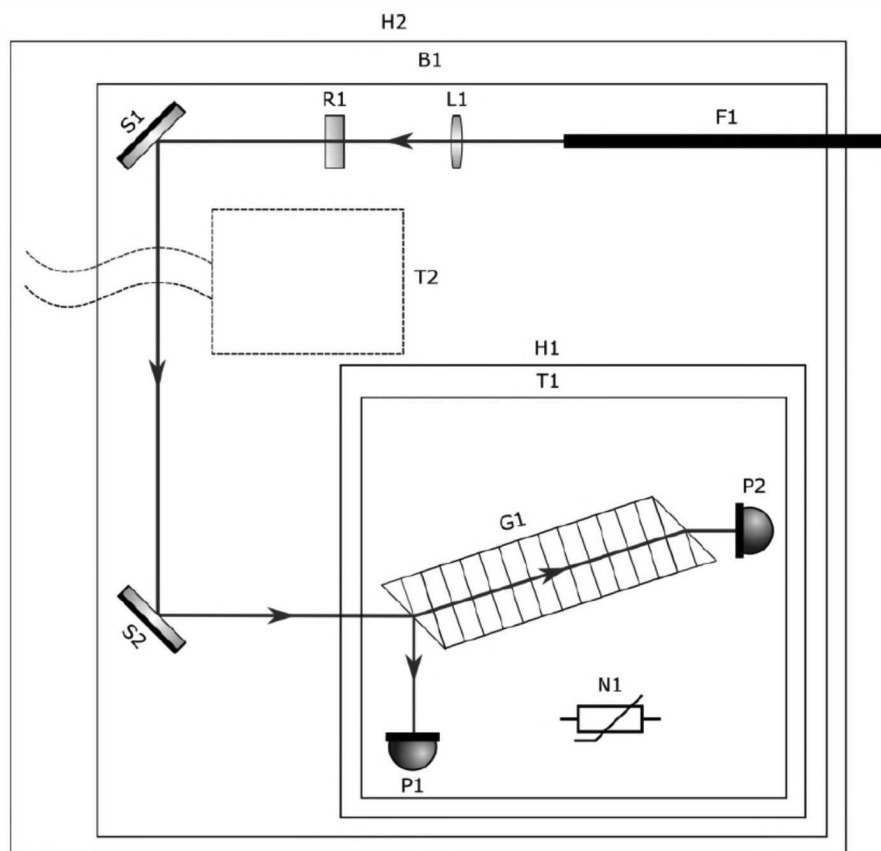


FIG. 2

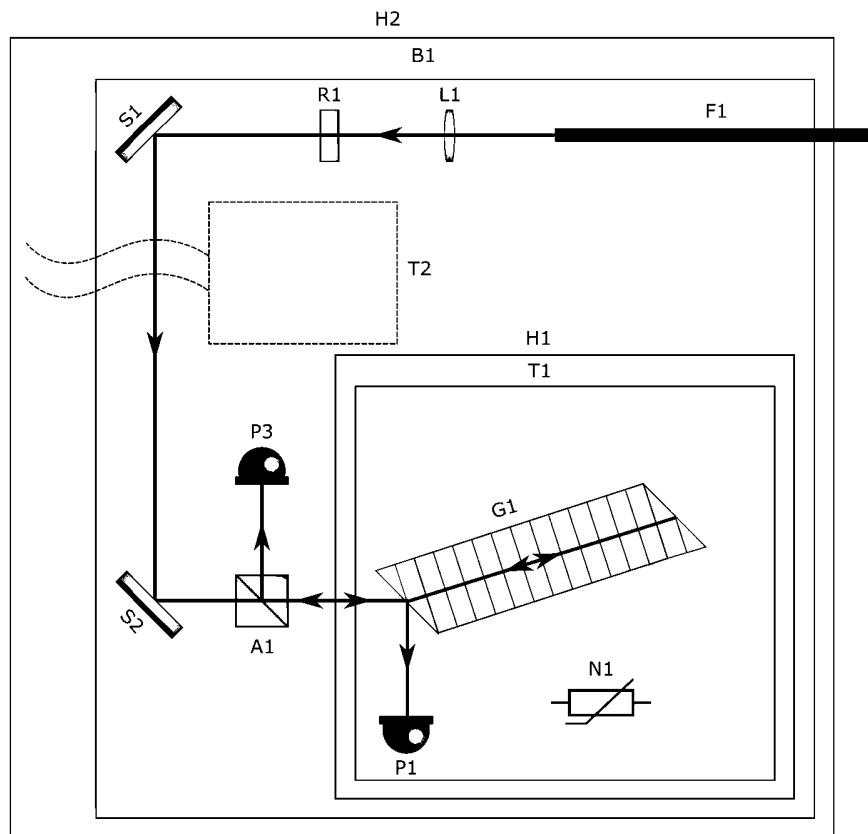


FIG. 3

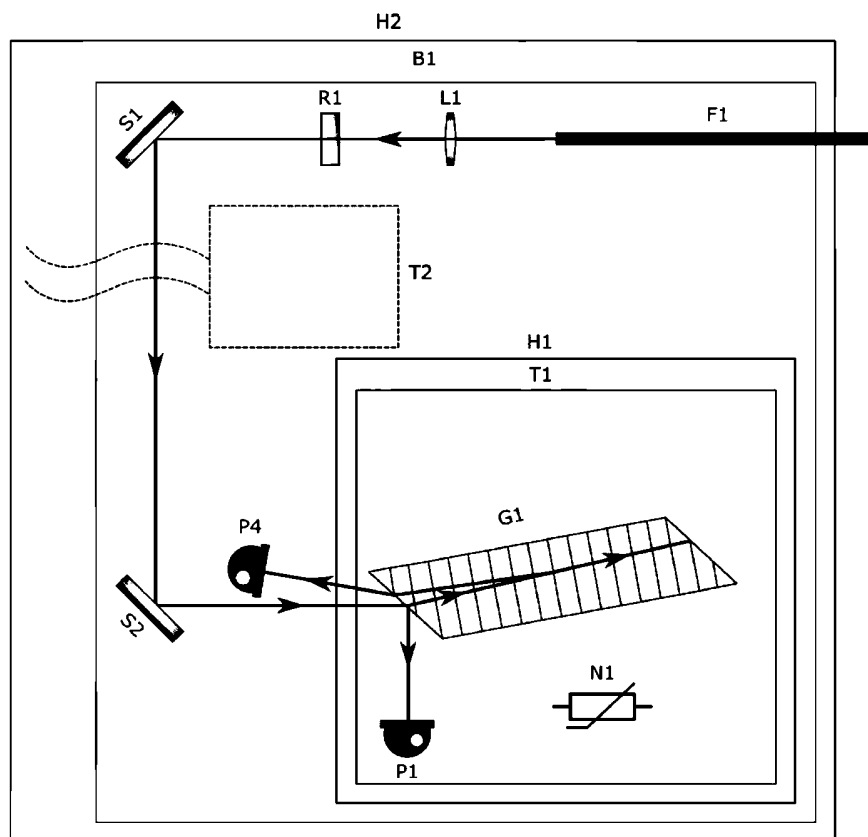


FIG. 4

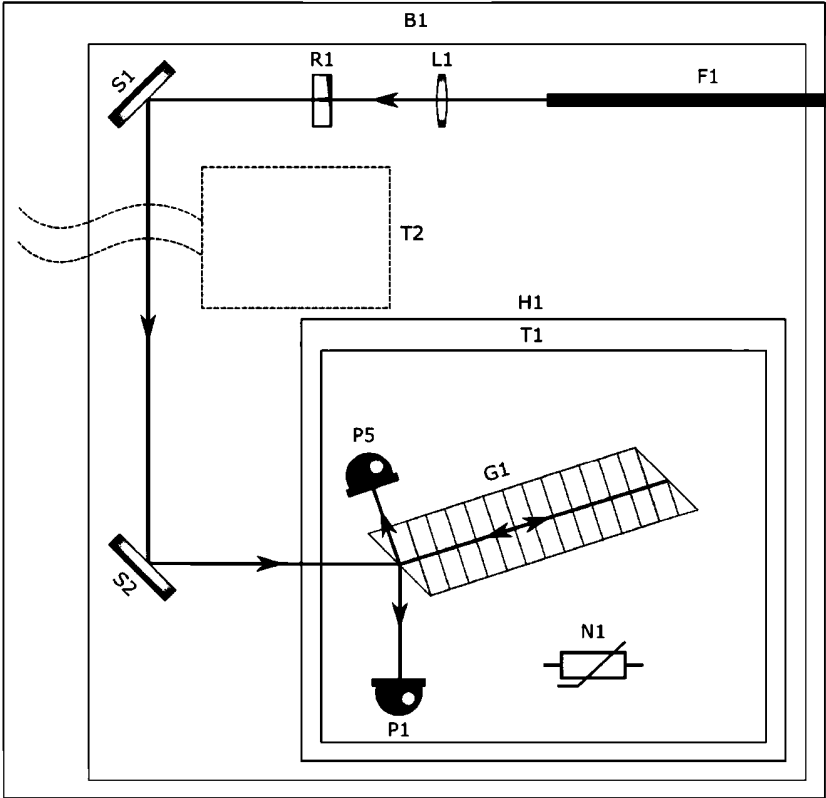


FIG. 5

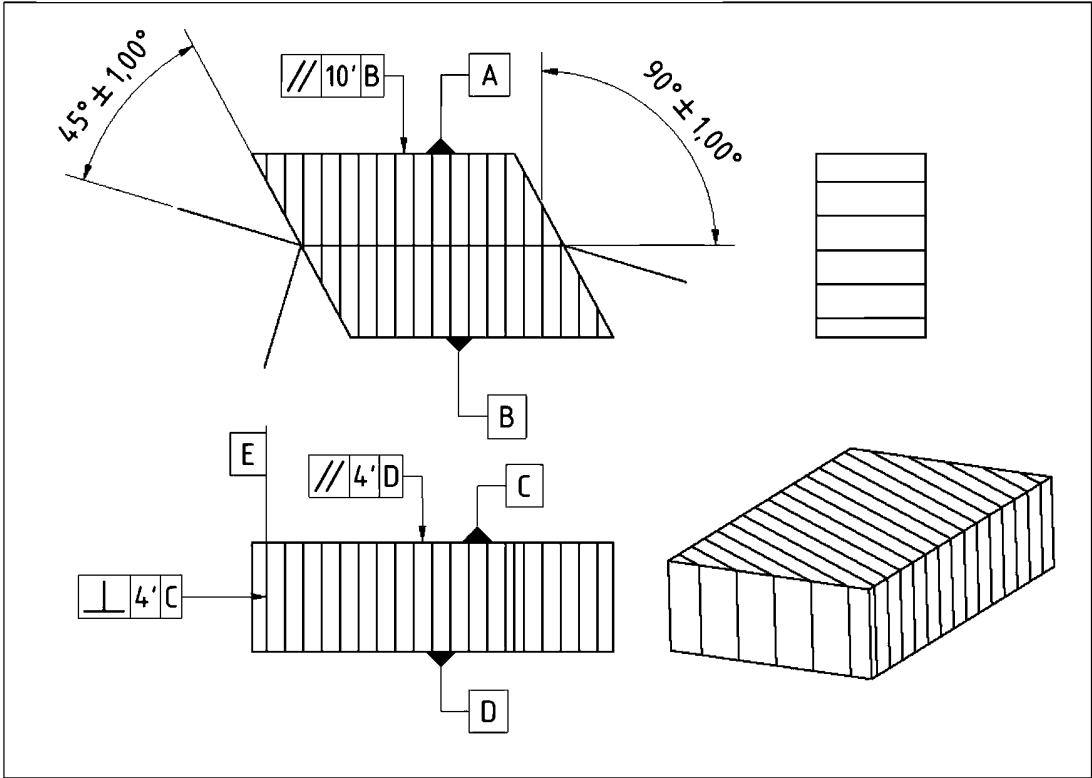


FIG. 6

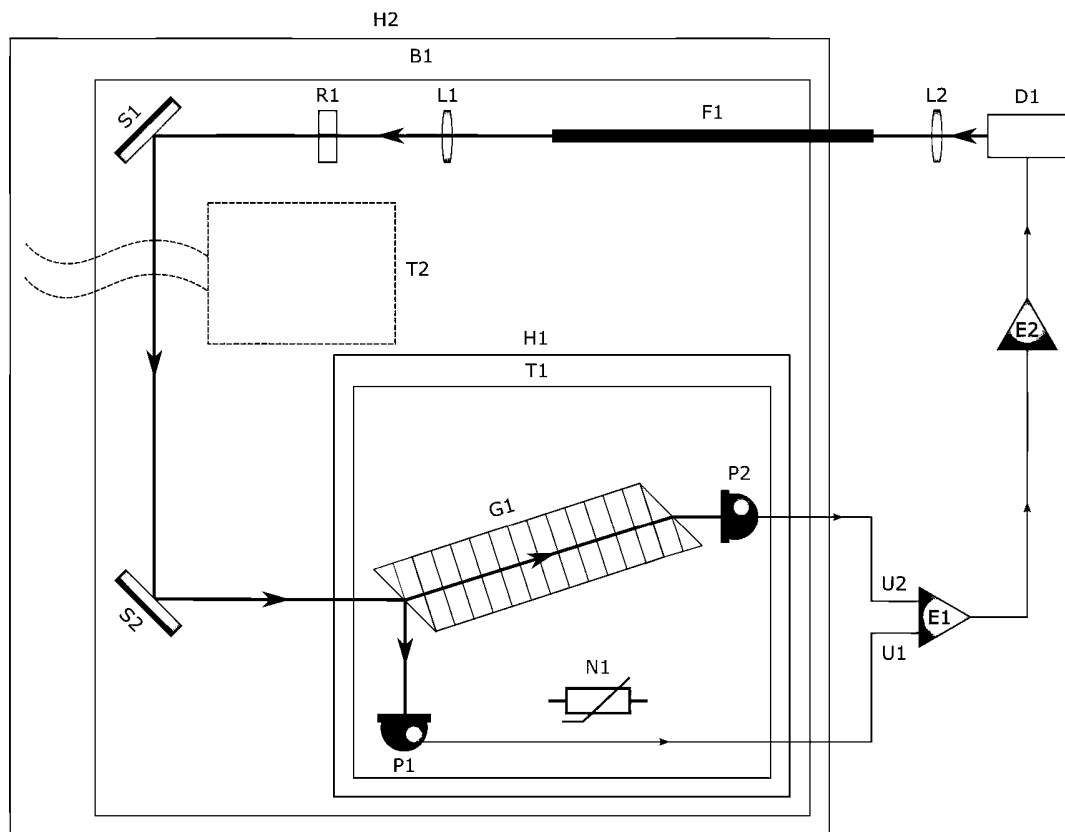


FIG. 7

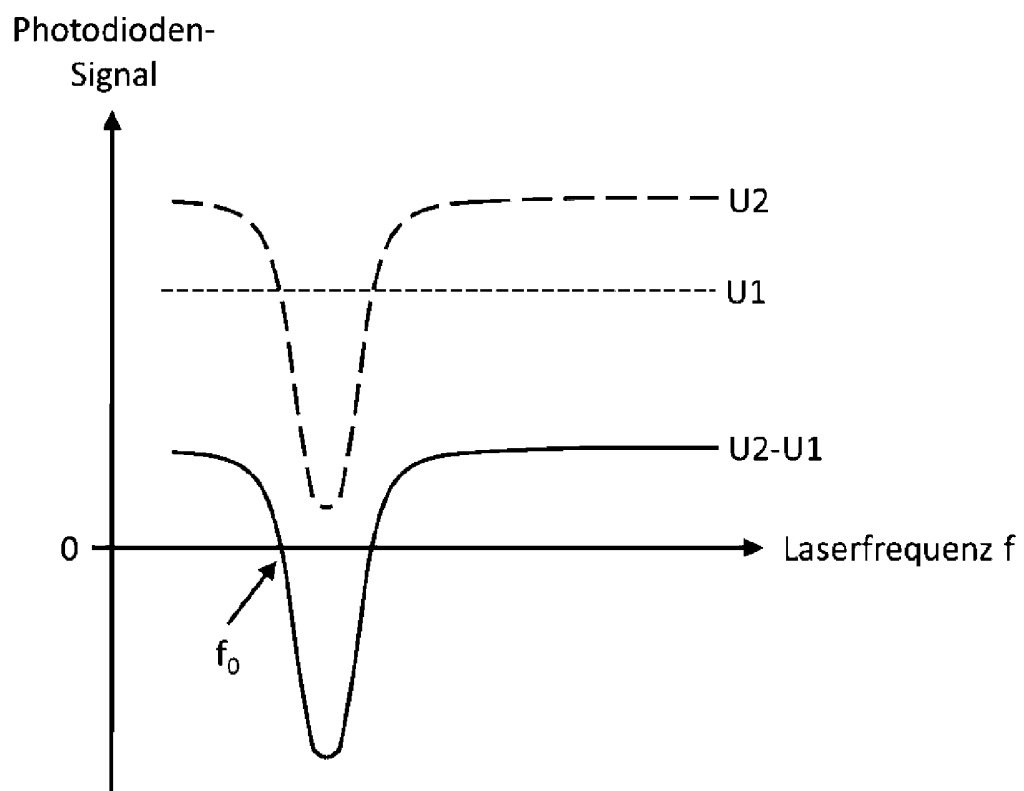


FIG. 8

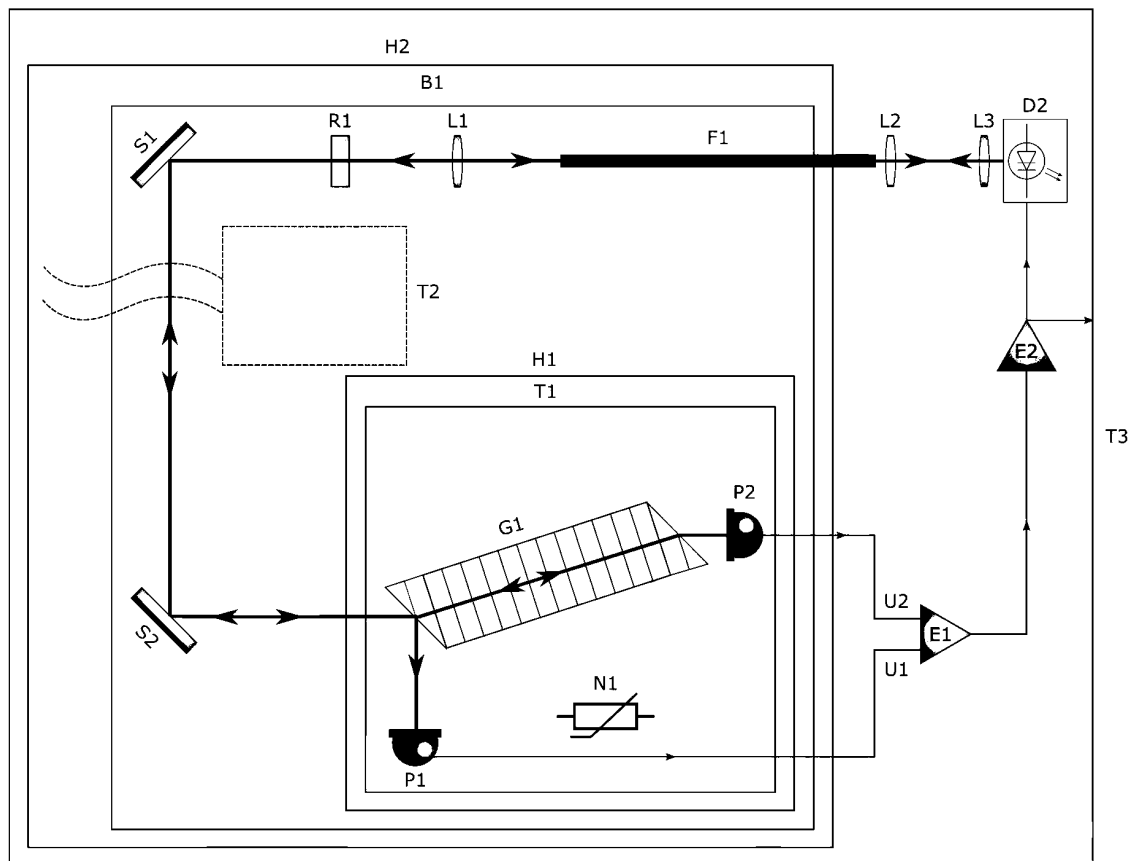


FIG. 9

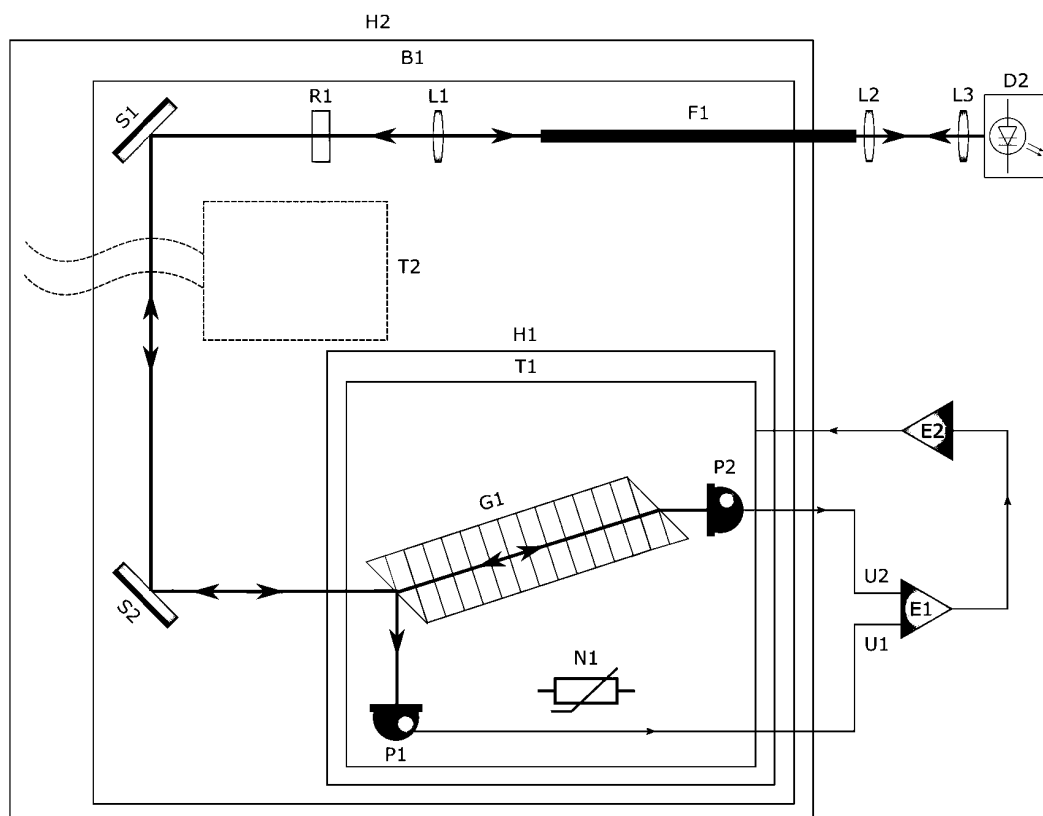


FIG. 10

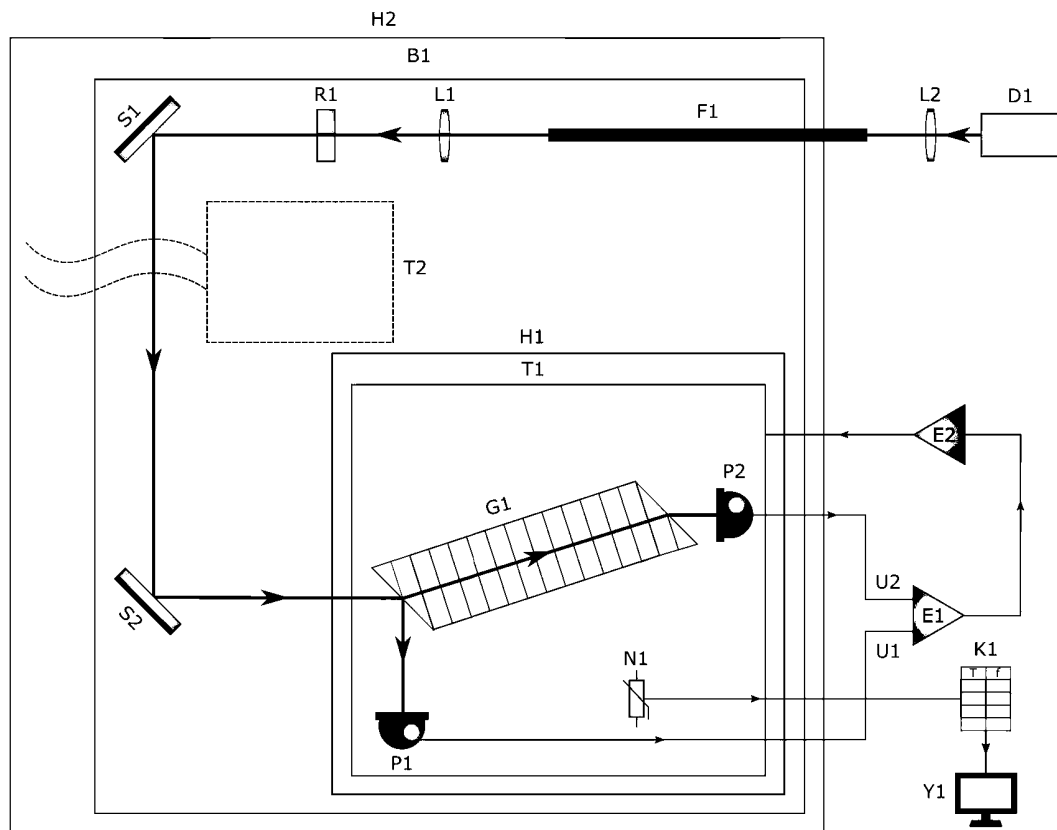


FIG. 11

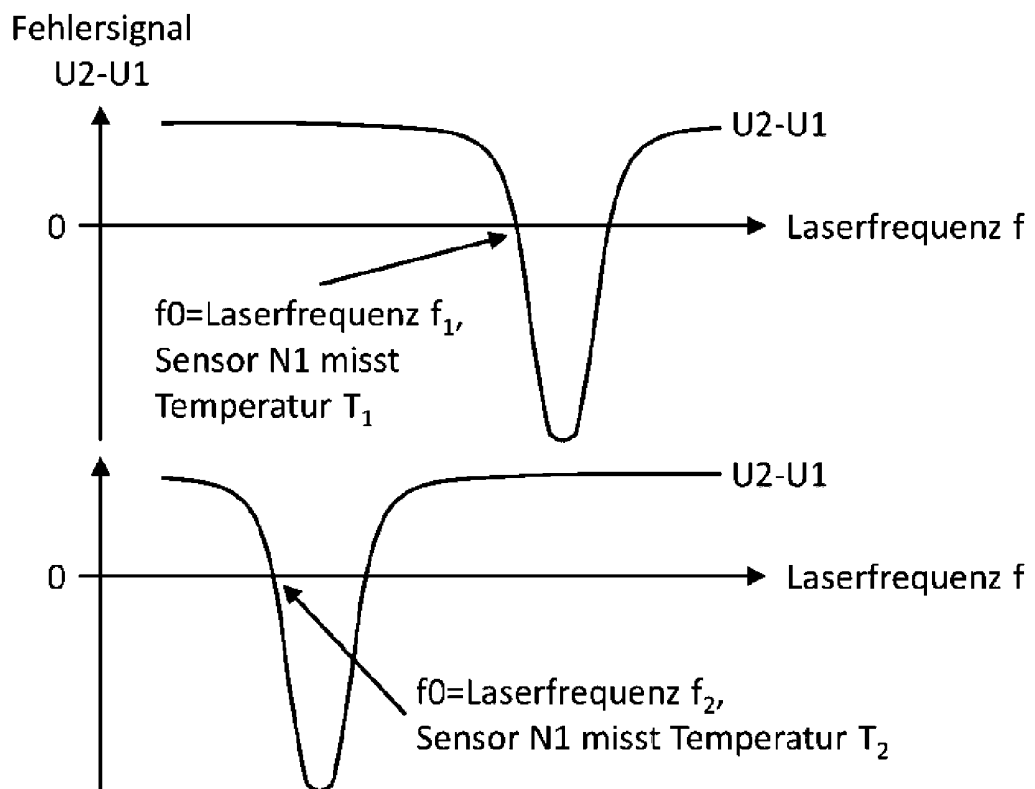


FIG. 12

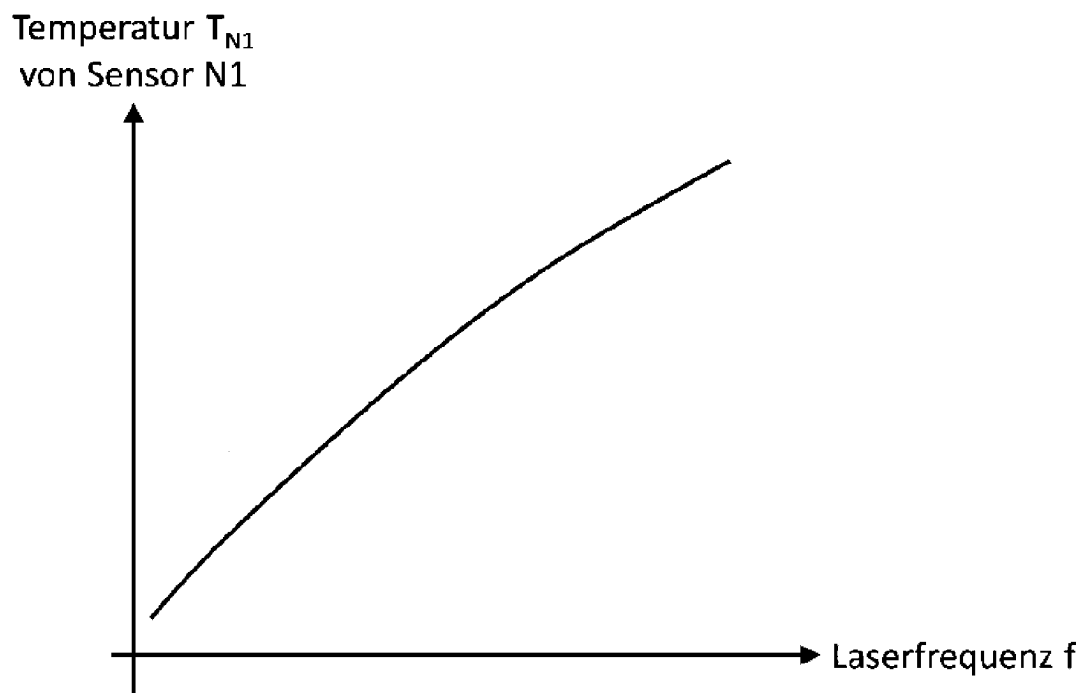


FIG. 13