



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Patentschrift  
10 DE 197 43 493 C 2

51 Int. Cl.7:  
G 01 J 9/04  
H 01 S 3/10

21 Aktenzeichen: 197 43 493.2-52  
22 Anmeldetag: 1. 10. 1997  
43 Offenlegungstag: 29. 4. 1999  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 22. 2. 2001

DE 197 43 493 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

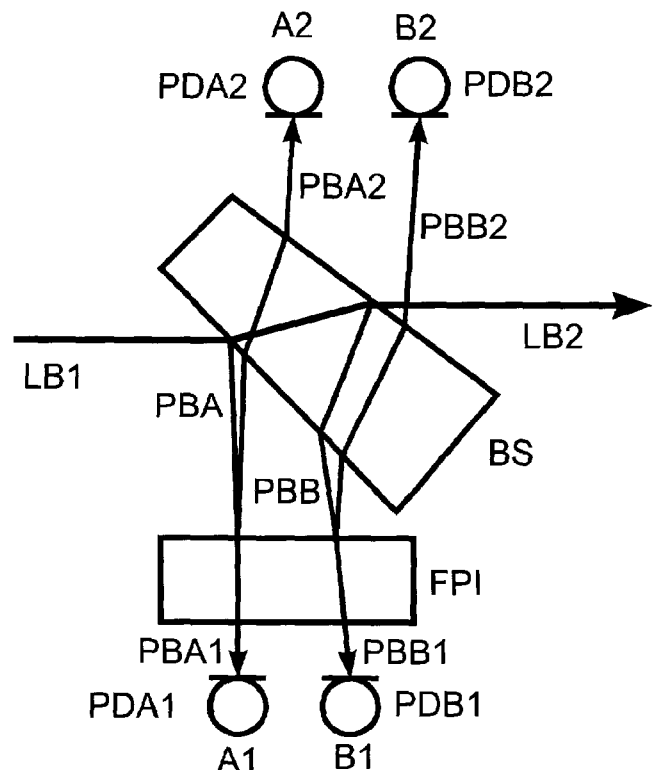
73 Patentinhaber:  
Müller-Wirts, Thomas, Dr.rer.nat., 30559 Hannover,  
DE; Schmidt, Oliver, Dr.rer.nat., 32457 Porta  
Westfalica, DE

72 Erfinder:  
Müller-Wirts, Thomas, Dr.rer.nat., 30559 Hannover,  
DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:  
DE 44 03 229 C2  
DE 39 26 945 A1

54 Verfahren und Vorrichtung zur Laserfrequenzmessung und -Stabilisierung

57 Verfahren zur Laserfrequenzmessung und -Stabilisierung mit Hilfe eines Interferometers (FPI), basierend auf der Erzeugung von zwei um etwa 90° phasenverschobenen Signalen (A\*, B\*), bei dem zwei räumlich oder über ihre Polarisations-eigenschaft zu trennende Teilstrahlen (PBA, PBB) das Interferometer (FPI) durchlaufen oder von diesem reflektiert werden, wobei die transmittierten oder reflektierten Teilstrahlen detektiert werden und durch die unterschiedlichen optischen Weglängen im Interferometer Phasenverschiebungen der gemessenen Signale (A, B) um etwa 90° entstehen, wobei die Weglängendifferenzen der Teilstrahlen im Interferometer hervorgerufen werden durch unterschiedliche Einstrahlwinkel ( $\alpha_A, \alpha_B$ ) der beiden Teilstrahlen gegenüber der Interferometerachse oder durch unterschiedliche optische Dicke ( $d_A, d_B$ ) des Interferometers für die beiden Teilstrahlen.



DE 197 43 493 C 2

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Laserfrequenzmessung und -Stabilisierung mit Hilfe eines Interferometers, basierend auf der Erzeugung von zwei um etwa 90° phasenverschobenen Signalen, welche aus zwei Teilstrahlen des zu messenden Laserstrahls erhalten werden.

## Stand der Technik

Je nach Verwendungszweck eines Lasers kann es wichtig sein, die Frequenz des Lasers konstant zu halten, ein gewünschtes Verhalten bei der Frequenzverstimmung, den sogenannten Scans, zu ermöglichen oder eine geeignete Kontrollmöglichkeit des Scanverhaltens oder der longitudinalen Einmodigkeit des Lasers zur Verfügung zu stellen. Hierfür ist es bekannt, mit optischen Interferometern, insbesondere Michelson-, Mach-Zehnder- und Fabry-Perot-Interferometern, ein elektrisches Signal zu erzeugen, welches sich mit der Laserfrequenz ändert. Durch die periodische Struktur dieses Signals liegt jedoch die Laserfrequenz noch nicht fest, da die Frequenz nur innerhalb einer Periode, dem sogenannten freien Spektralbereich des Interferometers, im folgenden FSR abgekürzt, bestimmt werden kann. Die Resonator-Mode, also die grobe Frequenz, muß dann durch ein weiteres Element bestimmt werden, z. B. durch ein optisches Gitter oder ein weiteres Interferometer mit entsprechend größerem FSR. Weiterhin können bei der Signalauswertung Fehlinterpretationen durch Intensitätsänderungen des Laserlichtes auftreten, da die gemessenen Signale normalerweise intensitätsproportional sind. Für genaue Messungen muß daher eine Intensitätsnormierung und eine Kompensation etwaiger Offsets stattfinden. Schließlich führt der sinusförmige Signalverlauf bei der Messung eines einzelnen Signals dazu, daß nicht zwischen der positiven und der negativen Signalfanke unterschieden werden kann und daß die Frequenzauflösung im Bereich der Maxima und Minima erheblich geringer ist, als im Bereich der Signalfanken. Diese Probleme lassen sich lösen, indem zwei praktisch identische, jedoch um etwa 90° phasenverschobene Signale verwendet werden.

Solche phasenverschobenen Signale können z. B. mit Hilfe eines sogenannten Sigmameters erzeugt werden. Bei einem Sigmameter handelt es sich um ein abgewandeltes Michelson-Interferometer, bei dem die besonderen Phasensprungeigenschaften der Totalreflektion ausgenutzt werden, um zwei 90°-verschobene sinusförmige Signalen zu erzeugen. Der Meßstrahl wird in den beiden möglichen Polarisationssebenen unabhängig voneinander detektiert. Ein sehr ähnliches Prinzip liegt dem sogenannten Kösters-Interferometer zugrunde. Der wesentliche Nachteil dieser Anordnungen ist, daß deren optischer Aufbau aus einer Vielzahl von hochwertigen Komponenten besteht. Dieses führt zu hohen Kosten für die Anordnung und zu einem hohen Aufwand für die mechanische und thermische Stabilisierung. Weiterhin ist ein kompakter Aufbau kaum möglich.

Andere Methoden der Laserfrequenzmessung verwenden planparallele Fabry-Perot-Interferometer oder solche mit einem kleinen Winkel zwischen den reflektierenden Flächen, sogenannte Fizeau-Interferometer. In beiden Fällen wird der zu messende Laserstrahl räumlich aufgeweitet und die transmittierte oder die reflektierte räumliche Struktur durch ein Detektor-Array aufgenommen. Ein Digitalrechner übernimmt die Bestimmung der Laserfrequenz. Vorteilhaft hierbei ist der große Frequenzbereich, der innerhalb einer Stufe einer solchen Anordnung eindeutig errechnet werden kann. Auch kann bei longitudinalem Mehrmodenbetrieb das Fre-

quenzspektrum in gewissem Umfang ermittelt werden. Nachteilig hierbei ist wiederum der hohe Aufwand der optischen Elemente, insbesondere der Strahlaufweitung, vor allem aber ist die Detektionsgeschwindigkeit durch die Verarbeitung durch den Digitalrechner und das Auslesen des Detektorarrays stark eingeschränkt. Ein weiterer Nachteil gegenüber dem hier vorgeschlagenen Verfahren ist die kritische Abhängigkeit von der räumlichen Struktur der zu detektierenden Strahlen, der transversalen Modenstruktur. Diese muß für hochauflösende Messungen sehr gut bekannt sein oder zusätzlich detektiert und kompensiert werden.

Zahlreiche weitere Verfahren (z. B. auch in DE 39 26 945 A1 oder in DE 44 03 229 C2) werten die Interferenzstrukturen von zwei aus einem zu messenden Strahl erhaltenen Teilstrahlen ortsauflöst aus, um Aussagen über die zeitlichen und räumlichen Eigenschaften der Laserstrahlung zu erhalten. Im Gegensatz zu diesen werden in dem hier beschriebenen Verfahren die Teilstrahlen nicht überlagert und zur Interferenz gebracht, sondern es werden die voneinander unabhängigen Interferenzeffekte jedes einzelnen Teilstrahles innerhalb eines (vorzugsweise desselben) Interferometers ausgewertet.

## Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Laserfrequenz- und Modenkontrolle anzugeben, welches eine einfache, preiswerte und kompakte Bauweise bei gleichzeitig schneller und präziser Erfassung der Laserfrequenz ermöglicht. Diese Aufgabe wird durch das in Anspruch 1 angegebene Verfahren gelöst. Mit Hilfe der gewonnenen Signale kann eine wunschgemäße schnelle Korrektur der Laserfrequenz vorgenommen werden.

Der Erfindung liegt die weitere Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zur Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens anzugeben. Diese Aufgabe wird durch die in Anspruch 14 angegebene Vorrichtung gelöst.

Je nach Einfallswinkel eines Lichtstrahls auf ein Fabry-Perot-Interferometer ergibt sich eine unterschiedliche Phasenverschiebung  $\Phi$  zwischen den im Interferometer miteinander interferierenden Teilwellen. Diese ist gegeben durch

$$\Phi(\alpha, d, \lambda) = 2\pi \frac{2nd}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\alpha)}{n^2}}$$

wobei  $n$  der Brechungsindex innerhalb des Interferometers,  $d$  die Dicke des Interferometers,  $\alpha$  der Einfallswinkel und  $\lambda$  die Wellenlänge des einfallenden Lichtes ist. Diese Phasenverschiebung  $\Phi$  bestimmt den Anteil des reflektierten gegenüber dem des transmittierten Lichtes. Es ist daher möglich, zwei Teilstrahlen PBA und PBB zu erzeugen, deren detektierte Intensitäten der reflektierten oder transmittierten Anteile bei Veränderung der Wellenlänge  $\lambda$  gerade einen Phasenunterschied von  $\Phi_A - \Phi_B = \pi/2$ , also 90° zeigen. Dies kann durch eine geeignete Wahl der Einfallswinkel  $\alpha_A$  und  $\alpha_B$  daß und durch geeignete Wahl der optischen Dicke  $d_A$  bzw.  $d_B$  des Interferometers am Ort der Teilstrahlen erfolgen.

Im Prinzip besteht das erfindungsgemäße Verfahren zur Laserfrequenzmessung nun darin, daß zwei räumlich oder über ihre Polarisationseigenschaft zu trennende Teilstrahlen PBA und PBB ein Interferometer FPI durchlaufen und von diesem frequenzabhängig reflektiert werden. Die reflektierten oder transmittierten Anteile werden von lichtempfindlichen Sensoren detektiert und in elektronische Signale umgewandelt, wobei die Signale bei Variation der Wellenlänge eine zueinander relative Phasenverschiebung von etwa 90°

erfahren sollen. Dies wird erreicht entweder durch etwas unterschiedliche Einfallswinkel  $\alpha_A$  und  $\alpha_B$  oder etwas unterschiedliche Dicke  $d_A$  und  $d_B$  des Interferometers am Ort der Teilstrahlen PBA und PBB oder durch unterschiedliche Brechungsindizes  $n_A$  und  $n_B$  für beide Teilstrahlen, etwa durch den Effekt der Doppelbrechung.

Vorzugsweise ist das Interferometer hierbei ein Fabry-Perot-Interferometer, welches im Vergleich zu den anderen Interferometertypen einen sehr kompakten und sowohl thermisch, wie auch mechanisch leicht zu stabilisierenden Aufbau gestattet.

Ein besonders einfacher und kompakter Aufbau ergibt sich bei Verwendung eines aus einem transparenten Material bestehenden Substrates als Fabry-Perot-Interferometer, einem sogenannten Etalon.

Weisen die reflektierenden Oberflächen einen geringen Reflexionsgrad auf, so zeigen das reflektierte und das transmittierte Signal eine zueinander um  $180^\circ$  verschobene annähernd sinusförmige Struktur über der Wellenlänge. Gerade das reflektierte Signal hat einen großen Kontrastumfang und wird daher bevorzugt zur Detektion verwendet.

Vorteilhaft ist, für die beiden Teilstrahlen je ein oder ein gemeinsames Normierungssignal zu erzeugen, welches proportional zur Intensität des jeweiligen Teilstrahls ist, wobei aus den elektronischen Signalen durch Normierung mit Hilfe der Normierungssignale intensitätsunabhängige Quadratur-signale erzeugt werden.

Aus dem transmittierten und dem reflektierten Signal eines Interferometers kann durch eine geeignete Summation ein solches intensitätsproportionales Signal zum Zwecke der Intensitätsnormierung erzeugt werden, ohne die Notwendigkeit eines weiteren Strahlteilers.

Besonders vorteilhaft ist es, die Quadratur-signale in zwei senkrecht zueinander stehenden Koordinaten auf einem optischen Anzeigemittel darzustellen, etwa einem Oszilloskop.

Vorteilhaft ist es weiterhin, daß die gemessenen Quadratur-signale auf elektronisch vorgegebene Sollfrequenzquadratur-signale stabilisiert werden.

Vorzugsweise werden hierbei als Sollfrequenzquadratur-signale sinus/cosinusförmige Signale vorgegeben.

Vorteilhaft bei erhöhten Anforderungen an die Genauigkeit kann es auch sein, stattdessen als Sollfrequenzquadratur-signale zwei um etwa  $90^\circ$  phasenverschobene Airy-Funktionen vorzugeben.

Weiterhin können als Sollfrequenzquadratur-signale durch zuvor mit Hilfe einer Referenzmessung in eine elektronische Speichervorrichtung aufgenommene Signalverläufe vorgegeben werden, wodurch auch eine präzise Eichung oder Kontrolle des Verfahrens durchgeführt werden kann.

Bei Verwendung einer geeigneten Signalerzeugung kann bei Bedarf auch eine Kompensation von Unvollkommenheiten der Sinusform der gemessenen Signale vorgenommen werden. Es können so z. B. Fabry-Perot-Interferometer mit höherer Reflektivität verwendet werden, die größere Signalamplituden bei gleicher eingestrahelter Leistung ergeben, jedoch zeigt die Airy-Funktion einen höheren Obertongehalt, der so entsprechend kompensiert wird. Auch unerwünschte Reflexionen, die die Form der gemessenen Signale beeinflussen, können unter Vorgabe geeigneter Sollsignale, die dies berücksichtigen, kompensiert werden.

Weiterhin kann eine Unvollkommenheit der mechanisch gegebenen  $90^\circ$ -Phasenverschiebung kompensiert werden durch eine entsprechend korrigierte Phasenverschiebung bei der Erzeugung der Sollquadratur-signale.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, zwei oder mehr Laser nahezu exakt synchron zu verstimmen, indem die gemessenen Signale des einen Lasers als Soll-Werte des zwei-

ten Lasers verwendet werden.

Die Erzeugung eines analogelektronischen Signals, welches in bestimmten Grenzen proportional zur Abweichung der gemessenen zur vorgegebenen Laserfrequenz ist, erlaubt die Realisierung einer schnellen Stabilisierung und so einer Kompensation von Frequenzstörungen, z. B. durch mechanische und akustische Einflüsse auf den Laser.

Die Konstanz der Soll- bzw. Referenzfrequenz hängt dabei im wesentlichen von der Konstanz der Resonanzen des verwendeten Interferometers ab. Dieses muß gegebenenfalls temperaturstabilisiert werden. Im Gegensatz zum Laser ist das Interferometer jedoch ein passives optisches Element und kann daher viel einfacher und mit erheblich höherer Genauigkeit stabilisiert werden, als der Laser selbst. Insbesondere enthält es keine mechanisch bewegten oder elektrische Leistung dissipierenden Teile.

Da bei longitudinalem Einmodenbetrieb des Lasers der Betrag des gemessenen Quadratur-signals eine Konstante darstellt, kann durch eine elektronische Betragsbildung eine sehr schnelle Detektion der longitudinalen Einmodigkeit durchgeführt werden, die optisch angezeigt oder für Steuer- und Kontrollzwecke herangezogen werden kann.

Im Prinzip besteht die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Laserfrequenzmessung in einem Strahlteiler, wobei durch Reflexionen an der Vorder- und Rückseite zwei Teilstrahlen erzeugt werden, einem Interferometer, bei dem die zwei Teilstrahlen beim Durchlaufen eine optische Gesamtweglängendifferenz von etwa  $\lambda/4$  erfahren, und mindestens zwei lichtempfindlichen Sensoren zur Detektion der beiden Teilstrahlen nach Transmission oder Reflexion durch das Interferometer und Umwandlung in elektronische Signale, welche die erforderliche relative Phasenverschiebung von etwa  $90^\circ$  bei Variation der Wellenlänge zeigen.

In verschiedenen Ausführungsformen kann die erforderliche Phasenverschiebung durch unterschiedliche Einfallswinkel der Teilstrahlen bezüglich der optischen Achse des Interferometers oder durch unterschiedliche optische Dicke des Interferometers am Ort der Teilstrahlen erfolgen.

Die unterschiedlichen Einfallswinkel der beiden Teilstrahlen können durch Verwendung eines keilförmigen Strahlteilers oder durch Einbringen eines keilförmigen Substrates zwischen Strahlteiler und Interferometer in einen oder beide Teilstrahlen erreicht werden. Unterschiedliche optischen Dicken des Interferometers für die beiden Teilstrahlen können durch Verwendung eines keilförmigen, stufenförmigen oder geteilten Interferometers oder durch die Verwendung eines doppelbrechenden Materials im Interferometer entstehen.

Als keilförmiges Substrat für die Funktion des Strahlteilers, des ablenkenden Substrates oder des Interferometers können vorteilhaft Komponenten mit örtlich sich änderndem Keilwinkel verwendet werden, z. B. in Form von langbrennweitigen Linsen, so daß der Keilwinkel und damit die resultierende Phasenverschiebung der gewonnenen Quadratur-signale der Wellenlänge oder etwaigen Toleranzen der optischen Komponenten durch eine mechanische Verschiebung angepaßt werden kann.

Weiterhin ist es vorteilhaft, einen oder mehrere zusätzliche lichtempfindliche Detektoren zu verwenden, mit denen sich ein zur Intensität der Teilstrahlen proportionales Signal erzeugen läßt, welches zur Intensitätsnormierung herangezogen wird.

Vor den Detektoren können vorteilhaft optische Linsen angeordnet sein, welche eine Kompensation des Strahlversatzes bei einer Translation oder Rotation des Aufbaus gegenüber dem Laserstrahl bewirken. Hierdurch ist auf einfache Weise der Abgleich der benötigten  $90^\circ$ -Phasenverschiebung durch Justierung des gesamten kompakten Aufbaus

ohne einen mechanischen Eingriff oder einen Justierfreiheitsgrad innerhalb der Anordnung möglich.

Durch die Möglichkeit eines kompakten Aufbaus kann es vorteilhaft sein, die Anordnung nicht als eigenständige Meß- oder Kontrolleinrichtung zu verwenden, sondern in ein Lasersystem zu integrieren, d. h. geeignete mechanische oder elektronische Verbindungen der Vorrichtung oder deren Ansteuerung in Bezug auf ein bestimmtes Lasersystem vorzubereiten oder auch das äußere Erscheinungsbild der Vorrichtung oder deren Ansteuerung auf das des Lasersystems abzustimmen.

Mehrere Stufen der Anordnung, basierend auf dem gleichen Prinzip, jedoch mit unterschiedlichem FSR des Interferometers, können zur Erweiterung des Detektionsbereiches bzw. der Detektionsauflösung kombiniert werden.

#### Zeichnungen

Anhand der Zeichnungen werden Ausführungsbeispiele der Erfindung beschrieben. Diese zeigen in:

**Fig. 1** Eine Anordnung zur Laserfrequenzmessung mit keilförmigem Strahlteiler;

**Fig. 2** eine Anordnung zur Laserfrequenzmessung mit Keilplatte in einem der Teilstrahlen;

**Fig. 3** eine Anordnung zur Laserfrequenzmessung mit einem keilförmigen oder stufenförmigen Fabry-Perot-Etalon;

**Fig. 4** eine Anordnung zur Laserfrequenzmessung mit polarisationsabhängiger Strahlteilung;

**Fig. 5** eine Anordnung zur Laserfrequenzmessung mit doppelbrechendem Fabry-Perot-Etalon;

**Fig. 6** eine Anordnung nach **Fig. 2**, jedoch mit optischen Linsen zur Kompensation von Strahlversatzbeiträgen;

**Fig. 7** ein Blockschaltbild einer Anordnung zur elektronischen Auswertung der gemessenen Signale;

**Fig. 8** eine Funktionsskizze zur Detektion einer Abweichung von der Sollfrequenz;

**Fig. 9** eine Funktionsskizze zur Stabilisierung der gemessenen Laserfrequenz auf eine vorgegebene Sollfrequenz;

**Fig. 10** eine Funktionsskizze zur Stabilisierung eines Zwei-Phasen-Oszillators auf die gemessene Laserfrequenz

**Fig. 11** Skizzen der in einem orthogonalen Koordinatensystem dargestellten Verläufe der gemessenen und normierten Quadratursignale

- a) bei einem ordnungsgemäßen Scanverhalten
- b) bei Auftreten eines Modensprunges
- c) bei Auftreten eines Multi-Mode-Betriebes

#### Ausführungsbeispiele

In **Fig. 1** ist eine Anordnung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt. Der einfallende Laserstrahl LB1 trifft auf einen Strahlteiler BS. Hierbei handelt es sich vorzugsweise um ein unbeschichtetes Glassubstrat, da für das Meßverfahren nur ein Bruchteil der Laserstrahlung ausreicht und ein Großteil der Laserleistung noch im ausfallenden Strahl LB2 für den eigentlichen Verwendungszweck zur Verfügung stehen soll. Der an der vorderen Oberfläche des Strahlteilers reflektierte Teilstrahl PBA passiert nun ein Etalon FPI mit geringer Finesse. Der vom Etalon reflektierte Teilstrahl PBA2 wird von Photodiode PDA2 detektiert und in das elektrische Signal A2 umgewandelt. Dieses zeigt einen frequenzabhängigen Verlauf mit einem hohen Kontrastverhältnis, ist jedoch intensitätsproportional. Der vom Etalon transmittierte Strahl FBA1 wird von Photodiode PDA1 in das Signal A1 umgewandelt. Aus geeigneter elektronischer Summation der Signale A1 und A2 kann ein

frequenzunabhängiges intensitätsproportionales Signal IA erzeugt werden, welches zur Normierung des Signals A2 herangezogen wird. Hieraus resultiert das intensitätsunabhängige Signal A\* (siehe auch **Fig. 7**). Auf die gleiche Weise wird an, der Rückseite des Strahlteilers BS ein Teil des Laserstrahls reflektiert. Der hieraus resultierende Teilstrahl PBB wird ebenfalls vom Etalon frequenzabhängig als Teilstrahl PBB2 reflektiert und liefert an Photodiode PDB2 das elektrische Signal B2, welches mit Hilfe des transmittierten Strahls PBB1 und der Erzeugung des Signals B1 mit Photodiode PDB1 unter Berechnung des Intensitätssignals IB zum Signal B\* normiert werden kann. Die erforderliche Phasendifferenz zwischen den resultierenden Signalen A\* und B\* wird hier dadurch erzeugt, daß der Strahlteiler nicht planparallele Oberflächen aufweist, sondern leicht keilförmig ist, wobei sich der Winkel nach der angegebenen Formel aus der jeweiligen Laserwellenlänge und dem FSR des Fabry-Perot-Etalons ergibt.

**Fig. 2** zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel für die erfindungsgemäße optische Anordnung. Diese unterscheidet sich von der Anordnung nach **Fig. 1** dadurch, daß der für die Phasenverschiebung erforderliche Winkel zwischen den Teilstrahlen durch Transmission durch ein keilförmiges Substrat S erzeugt wird. Dieses Substrat S wird zwischen dem Strahlteiler BS und dem Etalon FPT in den Strahlengang von einem oder von beiden Teilstrahlen eingebracht und erzeugt so die benötigte Winkelabweichung. Diese Abwandlung ermöglicht durch die einfache Auswechslung des Substrates eine unproblematische Anpassung an verschiedene Wellenlängen oder Etalon-Dicken. Die Anforderungen an die Toleranz des Winkels zwischen den Oberflächen sind geringer als bei der Anordnung in **Fig. 1**. Ebenso ist es möglich, unterschiedliche Winkel längs des Substrates vorzusehen und damit die Anpassung der Phasenverschiebung an die Wellenlänge durch mechanisches Verschieben des Substrates durchzuführen.

**Fig. 3** zeigt eine Anordnung ähnlich **Fig. 1**, jedoch wird hier die erforderliche Phasenverschiebung durch unterschiedliche Dicken des Etalons FPI am Ort der Teilstrahlen erzeugt. Dies kann durch eine gezielte keilförmige Formgebung oder auch durch Vermessung und Auswahl eines geeigneten Substrates mit ohnehin durch den Herstellungsprozeß vorhandenen Dickenschwankungen geschehen, da der erforderliche Dickenunterschied im Bereich einer achteil Wellenlänge und damit im Toleranzbereich gängiger Herstellungsverfahren liegt. Alternativ kann auch ein stufenförmiges Substrat Verwendung finden, bei dem auf einer Hälfte eine um  $\lambda/8$  größere optische Dicke durch eine optische Beschichtung erreicht wurde.

**Fig. 4** zeigt eine Anordnung, bei der im Gegensatz zu **Fig. 1** die mit unterschiedlichen Einfallswinkeln auf das Etalon tretenden Teilstrahlen (PBA und PBB) nicht direkt räumlich getrennt werden, da sie von einem polarisationsabhängigen Strahlteilererelement PBS, z. B. einem Wollaston-Prisma, stammen, das zwischen beiden Teilstrahlen nur einen kleinen Winkel erzeugt. Zur unabhängigen Detektion der transmittierten Teilstrahlen (PBA1, PBB1) mit den Sensoren (PDA und PDB) muß daher eine Polarisationsoptik (PO), z. B. ein polarisierender Strahlteiler, eingesetzt werden. Vorteilhaft bei dieser Anordnung ist die Unempfindlichkeit gegenüber relativ ausgedehnten Teststrahlen und der dennoch mögliche sehr kompakte Aufbau. Die Verwendung eines Wollaston-Prismas oder eines ähnlichen (teuren) Elementes rechtfertigt den Einsatz in einer derartigen Anordnung, wenn ein solches Element und ein brauchbares Normierungssignal ohnehin im Aufbau enthalten sind.

**Fig. 5** zeigt eine Anordnung, in der sich die beiden Teilstrahlen nur in ihrer optischen Weglänge innerhalb des Eta-

lons FPI unterscheiden, nicht jedoch in ihrem räumlichen Verlauf. Dies wird durch die Verwendung eines doppelbrechenden Materials BM für das FPI-Etalon mit unterschiedlichem Brechungsindex für die verschiedenen Polarisations-ebenen bewirkt. Auch hier geschieht die unabhängige Detektion der Teilstrahlen (PBA2, PBB2) mit Hilfe einer Polarisationsoptik PO. Das zur Normierung verwendete Signal kann durch einen gemeinsamen Detektor PDAB1 erhalten werden.

**Fig. 6** zeigt eine Anordnung nach **Fig. 2**, jedoch sind optische Linsen L1 bis L4 vor den Detektoren angeordnet. Diese bewirken eine Kompensation des Strahlversatzes bei einer Translation oder Rotation des Aufbaus gegenüber dem Laserstrahl. Hierdurch ist auf einfache Weise der Abgleich der benötigten 90°-Phasenverschiebung durch Justierung des gesamten kompakten Aufbaus ohne einen mechanischen Eingriff in die Anordnung möglich. Die Verwendung von optischen Linsen kann auch auf die Anordnungen nach **Fig. 1, 3, 4 und 5** übertragen werden.

In **Fig. 7** ist ein Blockschaltbild einer Anordnung zur elektronischen Auswertung der erhaltenen Signale dargestellt. Die vier Photodiodensignale A1, B1, A2 und B2 werden den Verstärkerschaltungen AMPA1, AMPA2, AMPB2 und AMPB2 zugeführt. Da oft nicht direkt ein intensitätsproportionales Signal zur Verfügung steht, sondern nur die vom Interferometer reflektierten und die transmittierten Signale, werden mit Hilfe geeigneter elektronischer Summationen aus diesen Größen die intensitätsproportionalen Signale IA und IB erzeugt, welche für die exakten Normierungen der Signale A und B geeignet sind. In den folgenden Blöcken NA und NB werden diese Normierungen durchgeführt. Die normierten Signale A\* und B\* berechnen sich zu

$$A^* = (2A/IA) - 1 \text{ und } B^* = (2B/IB) - 1$$

Zusätzlich können einstellbare Offsetsignale subtrahiert werden. Aufgabe des folgenden Blocks DF ist es, die Abweichung der gemessenen von der vorgegebenen Frequenz zu berechnen. Die gemessene Frequenz ist proportional dem Winkel, der sich aus den gemessenen Quadratursignalen A\* und B\* durch Arcus-Tangens-Bildung ergibt. Die Sollfrequenz wird daher ebenfalls durch ein Quadratursignal, AS und BS, angegeben. Es soll ein vorzeichenrichtiges Fehler- oder Diskriminatorsignal DIS erzeugt werden, welches angibt, ob die gemessene Phase  $\varphi$  aus A\* und B\* oder die vorgegebene Phase  $\theta$  aus AS und BS größer ist. Hierbei wird von folgender trigonometrischen Beziehung Gebrauch gemacht:

$$\sin\varphi \cos\theta - \sin\theta \cos\varphi = \sin(\varphi - \theta)$$

$$\text{also DIS} = A^* BS - AS B^*$$

Für kleine Abweichungen vom Sollwert  $\varphi - \theta$  ist

$$\sin(\varphi - \theta) \approx \varphi - \theta,$$

also ein der Frequenzabweichung proportionales Signal, das für eine Regelung direkt als Diskriminatorsignal verwendet werden kann. Dieses Ausgangssignal DIS des Blocks DF wird dann zwei Reglerblöcken PID1 und PID2 zugeführt und kann für verschiedene Stabilisierungsverfahren, wie im folgenden beschrieben, benutzt werden. Schließlich ist für die Stabilisierungsverfahren ein Zwei-Phasen-Oszillator VCO vorgesehen. Dies ist bevorzugt ein spannungsgesteuerter Sinus/Cosinus-Oszillator.

Die Anordnung kann insbesondere für drei verschiedene Schaltungsvarianten eingesetzt werden:

In **Fig. 8** ist eine reine Detektion der Abweichung der gemessenen Frequenz von der vorgegebenen Frequenz ( $\varphi - \theta$ ) gezeigt. Die aus der Laserfrequenz LF, gegeben durch A\*, B\*, und dem Sollwert SV, gegeben durch AS, BS, durch den Block DF ermittelte Abweichung DIS der Laserfrequenz von der Sollfrequenz wird hierbei ausgegeben und kann in Abhängigkeit von der Zeit oder der Variation beliebiger experimenteller Parameter beobachtet bzw. aufgezeichnet werden.

In **Fig. 9** ist eine Stabilisierung der gemessenen Laserfrequenz LF, gegeben durch A\*, B\*, auf die elektronisch vorgegebene Sollfrequenz SF, gegeben durch AS, BS, gezeigt. SF kann still stehen oder zeitlich veränderlich sein. Das Fehlersignal DIS wird einem Regler PID1 zugeführt, dessen Regelsignal CLAS die Frequenz des Lasers LAS steuert. Als Vorgabe der Sollfrequenz SF können

- zeitlich fixierte Signale FSV (z. B. durch zwei Potentiometer AS MAN und BS MAN in **Fig. 7**),
- ein Zwei-Phasen-Oszillator VCO (mit den Signalen AS VCO und BS VCO in **Fig. 7**) oder
- rechnergesteuerte Quadratursignale EXT (mit den Signalen AS EXT und BS EXT in **Fig. 7**)

verwendet werden. Der Regler PID1 regelt hierbei durch Verstärken des Lasers das Fehlersignal DIS zu Null, d. h. die Laserfrequenz (gegeben durch die Phase  $\varphi$  der Signale A\* und B\*) folgt exakt der Phase  $\theta$  der vorgegebenen Sollwertsignale AS und BS. Bei einer konstanten Oszillationsfrequenz des VCOs (z. B. bei einem konstanten Signal VCO EXT in **Fig. 7**) bzw. bei einer geeigneten Vorgabe der oszillierenden EXT-Werte scannt der Laser dann praktisch absolut linear, Nichtlinearitäten, Driften und Hysteresen der mechanischen Aktoren des Lasers werden praktisch vollständig unterdrückt. Bei Verwendung einer geeigneten Signalerzeugung kann bei Bedarf auch eine Kompensation von Unvollkommenheiten der Sinusform oder der Phasendifferenz der gemessenen Signale vorgenommen werden. Es können hierfür die zwei externen Quadratursignale AS EXT und BS EXT eingespeist werden. Normalerweise geschieht dies mit zwei Digital/Analog-Wandlerkanälen. Mit einem digitalen Rechner kann so die Laserfrequenz vorgegeben und sowohl beliebig vorwärts, wie rückwärts gesamt werden. Im Rechner wird bei Bedarf auch die o. a. Kompensation von Unvollkommenheiten der Sinusform und der Phasenverschiebung der gemessenen Signale vorgenommen, indem zuvor eine Referenzmessung, z. B. mit einem geeichten Wellenlängenstandard, durchgeführt wurde.

**Fig. 10**, zeigt eine Stabilisierung eines Zwei-Phasen-Oszillators VCO auf die gemessene Laserfrequenz LF. Das Fehlersignal DIS wird hierfür dem Regler PID2 zugeführt, dessen Regelsignal CVCO die Oszillatorfrequenz bestimmt. Dieses Regelsignal ist daher proportional der Laser-Schwingungsgeschwindigkeit. Auch Frequenzsprünge des Lasers können so temporär, quantitativ und vorzeichenbehaftet erfaßt werden.

Der erste Regler PID1 steuert ein mechanisches System, d. h. z. B. einen Laser mit elektromechanischen Aktoren, und muß daher mit den Zeitkonstanten auf dieses System angepaßt werden. Der zweite Regler PID2 steuert dagegen lediglich einen elektronischen Oszillator, die Zeitkonstanten können daher sehr schnell gewählt werden, um eine hohe Detektionsgeschwindigkeit zu erhalten. Prinzipiell kann jedoch für die beiden Stabilisierungsvarianten auch der gleiche Reglerblock verwendet werden.

Die Signale A\* und B\* können auch zur Beobachtung des Scanverhaltens des frei laufenden Lasers mit einem Oszilloskop genutzt werden. Hierfür werden beide Regler-Blöcke (PID1, PID2) durch das Signal REG OFF in **Fig. 7** in den

Resetzustand gebracht, d. h. es findet keine Beeinflussung von Laser oder VCO statt.

In **Fig. 11** werden die gemessenen und normierten Signale  $A^*$  und  $B^*$  dem X- und Y-Eingang eines Oszilloskops in orthogonaler Darstellungsart zugeführt. Bei einmodiger Laseroszillation beschreibt das beobachtete Signal unter Veränderung der Laserfrequenz einen Kreis um den Schirmmittelpunkt, wie in **Fig. 11a** dargestellt. Ein voller Kreis entspricht hierbei genau einem FSR des verwendeten Interferometers, der Winkel, bezogen auf die Schirmachsen, der Laserfrequenz. Die Anzahl der Kreise kann bei Variation der Scanweite mitgezählt werden. Durch eine gezielte geringe Unvollkommenheit der Normierung kann auch ein spiralförmiges Bild erhalten werden, bei dem die Anzahl der Kreise leichter zu erkennen ist, ohne jedoch deutlich an Winkelauflösung zu verlieren.

Findet dagegen ein Modensprung statt, so läuft der Leuchtpunkt schnell durch den Innenbereich des Kreises (**Fig. 11b**).

Scannt der Laser zum Teil im Mehrmodenbetrieb, erscheinen Figuren mit einem deutlich kleineren und nicht-konstanten Radius (**Fig. 11c**).

Mit einem elektronischen Zusatz kann ein Signal erzeugt werden, welches aktiv ist, wenn der Radius, also der aktuelle Abstand des Leuchtpunktes vom Schirmmittelpunkt, einen den Single-Mode-Betrieb kennzeichnenden Wert unterschreitet. Es kann dann z. B. ein Warnsignal ausgegeben werden, eine angeschlossene Regelelektronik, die evtl. auf einen sauberen Single-Mode-Betrieb des Lasers angewiesen ist, inaktiviert oder anderweitig reagiert werden.

Der Radius wird hierbei elektronisch erzeugt:

$$R^2 = (R \sin \varphi)^2 + (R \cos \varphi)^2, \text{ also } R^2 = (A^*)^2 + (B^*)^2.$$

$R^2$  wird durch einen elektronischen Komparator mit einer den Single-Mode-Betrieb kennzeichnenden Konstanten verglichen. Diese Detektion kann sehr schnell sein (im MHz-Bereich) und daher auch zur Kontrolle schneller Regelkreise dienen.

Ist PID2 (vgl. **Fig. 10**) aktiv, so wird von PID2 durch Beeinflussung des frequenzbestimmenden Signals CVCO des Oszillators das Fehlersignal DIS zu Null geregelt, d. h. die Phase  $\theta$  der VCO-Signale (AS und BS) folgt exakt der Phase  $\varphi$  der gemessenen Laserfrequenz ( $A^*$ ,  $B^*$ ), CVCO ist also proportional der Scangeschwindigkeit. Diese Betriebsart ist besonders zur Analyse und zur Parameter-Justierung von durchstimmbaren Lasern wertvoll: Mit einem Oszilloskop, welches auf die Scan-Quelle getriggert wird, beobachtet man die Scangeschwindigkeit (und nicht die Laserfrequenz) während des Laserscans. Größe, Richtung und Zeitpunkte von Modensprüngen sind eindeutig und leicht zu erkennen, und zwar sowohl bei langsamen als auch bei schnellen Scangeschwindigkeiten, bei denen herkömmliche Methoden versagen. Gerade bei weit durchstimmbaren Lasern mit kritischen Justierparametern, wie z. B. einem External-Cavity-Laser (ECL), kann die Parameterjustierung per Echtzeit-Beobachtung oder durch Rechnersteuerung und -Korrektur durchgeführt werden. Die typische Laserresonatorlänge bei ECLn liegt im Bereich von einigen Millimetern bis einigen Zentimetern. Um einen Modensprung oder eine Modenkonzurrenz von Nachbarmoden des externen Resonators sicher und vorzeichenbehaftet detektieren zu können, sollte der FSR des verwendeten Etalons etwa dem dreifachen FSR des Laserresonators, die Etalondicke also etwa 1/5 bis 1/3 der Laserresonatorlänge entsprechen.

Eine Messung und eine Kompensation von Scan-Linearitäts-Abweichungen ist z. B. bei weit stimmenden ECLn wichtig, die über mehrere Resonatormoden des Laserchips

scannen können: Beim Übergang von der Resonanz zur Antiresonanz des externen zum Laserchip-Resonator ergeben sich durch Restreflexion der Austritts-Laserfacette und die daraus resultierenden Resonatorkopplungen sog. push- und pull-Effekte, die zu einer zusätzlichen unerwünschten und für manche Meßmethoden sehr störenden Frequenzmodulation führen. Diese können mit dem Stabilisierungsverfahren nach **Fig. 10** direkt gemessen und mit dem Verfahren nach **Fig. 9** kompensiert werden.

Auch die mechanischen Stellelemente dieser Laser zeigen thermische Driften, Nichtlinearitäten und Hysteresen, die in der beschriebenen Weise nahezu exakt korrigiert werden können.

Die Erfindung kann jedoch für jede Form von kontinuierlichen und gepulsten Laserquellen verwendet werden, insbesondere aber für weit durchstimmbare Laser, wie durchstimmbare Diodenlaser, Farbstoff- und Festkörperlaser. Voraussetzung ist lediglich eine gegenüber der zu messenden Scanweite geringe oder zumindest konstante Bandbreite des Laserlichtes.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Laserfrequenzmessung und -Stabilisierung mit Hilfe eines Interferometers (FPI), basierend auf der Erzeugung von zwei um etwa  $90^\circ$  phasenverschobenen Signalen ( $A^*$ ,  $B^*$ ), bei dem zwei räumlich oder über ihre Polarisierungseigenschaft zu trennende Teilstrahlen (PBA, PBB) das Interferometer (FPI) durchlaufen oder von diesem reflektiert werden, wobei die transmittierten oder reflektierten Teilstrahlen detektiert werden und durch die unterschiedlichen optischen Weglängen im Interferometer Phasenverschiebungen der gemessenen Signale (A, B) um etwa  $90^\circ$  entstehen, wobei die Weglängendifferenzen der Teilstrahlen im Interferometer hervorgerufen werden durch unterschiedliche Einstrahlwinkel ( $\alpha_A$ ,  $\alpha_B$ ) der beiden Teilstrahlen gegenüber der Interferometerachse oder durch unterschiedliche optische Dicke ( $d_A$ ,  $d_B$ ) des Interferometers für die beiden Teilstrahlen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Interferometer ein Fabry-Perot-Interferometer ist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß für die beiden Teilstrahlen ein oder zwei Normierungssignale (IA, IB) erzeugt werden, die proportional zur Intensität der Teilstrahlen (PBA, PBB) sind, wobei aus den elektronischen Signalen (A, B) durch Normierung mit Hilfe der Normierungssignale (IA, IB) die Quadratur-signale ( $A^*$ ,  $B^*$ ) erzeugt werden.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Quadratur-signale ( $A^*$ ,  $B^*$ ) in zwei senkrecht zueinander stehenden Koordinaten auf einem optischen Anzeigemittel dargestellt werden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Betragsbildung der Quadratur-signale ( $A^*$ ,  $B^*$ ) der longitudinale Ein-Modenbetrieb der Laserquelle detektiert wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Quadratur-signale ( $A^*$ ,  $B^*$ ) auf elektronisch vorgegebene Sollfrequenzquadratur-signale (AS, BS) stabilisiert werden.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß ein zur Abweichung der gemessenen von der vorgegebenen Laserfrequenz näherungsweise proportionales, von der absoluten Frequenz jedoch weitge-

hend unabhängiges Signal auf analogelektronische Weise erzeugt wird, welches einem Regelkreis als Diskriminatorsignal dient.

8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß als Sollfrequenzquadratursignale (AS, BS) zeitabhängige elektronische Quadratursignale vorgegeben werden.

9. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß als Sollfrequenzquadratursignale (AS, BS) zwei um etwa  $90^\circ$  phasenverschobene Airy-Funktionen vorgegeben werden.

10. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß als Sollfrequenzquadratursignale (AS, BS) durch zuvor mit Hilfe einer Referenzmessung in eine elektronische Speichervorrichtung aufgenommene Signalverläufe als Quadratursignale vorgegeben werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Stabilisierung eine Kompensation von mechanischen, thermischen oder akustischen Störungen des Laserresonators durchgeführt wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Stabilisierung eine Kompensation von thermischen Driften, Nichtlinearitäten oder Hystereseeffekten mechanischer Stillelemente des Lasers durchgeführt wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß durch die Stabilisierung eine Korrektur der Scanlinearität eines durchstimmbaren Lasers durchgeführt wird.

14. Vorrichtung zur Laserfrequenzmessung basierend auf der Erzeugung von zwei um etwa  $90^\circ$  phasenverschobenen Signalen (A\*, B\*), mit einer Strahlteilereinheit (BS), durch die zwei Teilstrahlen (PBA, PBB) erzeugt werden, einem Interferometer (FPI), welches einen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten zeigt, der für die beiden Teilstrahlen (PBA, PBB) unterschiedlich ist, indem die beiden Teilstrahlen entweder unter verschiedenen Winkeln auf das Interferometer treffen oder indem diese das Interferometer an zwei Orten unterschiedlicher Dicke treffen oder indem beide Teilstrahlen aufgrund ihrer unterschiedlichen Polarisation eine optische Weglängendifferenz erfahren, und mindestens zwei lichtempfindlicher Sensoren (PDA, PDB) zur Detektion der beiden durch das Interferometer transmittierten oder reflektierten Teilstrahlen durch Umwandlung in elektronische Signale.

15. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß als Strahlteilereinheit ein keilförmiges Substrat verwendet wird, dessen Keilwinkel auf die Dicke des Interferometers (FPI) und die vorgesehene Laserwellenlänge abgestimmt ist.

16. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der erforderliche Einstrahlwinkel zwischen den Teilstrahlen durch ein transmittiertes keilförmiges Substrat (S) hervorgerufen wird, welches zwischen dem Strahlteiler (BS) und dem Interferometer (FPI) in einen oder in beide Teilstrahlen (PBA, PBB) eingefügt wird.

17. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die erforderliche Phasenverschiebung zwischen den detektierten Signalen durch die Verwendung eines keil- oder stufenförmigen Substrates als Fabry-Perot-Interferometer hervorgerufen wird.

18. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß das verwendete keilförmige Substrat unterschiedliche Keilwinkel an verschiedenen Positionen aufweist, um eine Anpassung der er-

forderlichen Phasenverschiebung der detektierten Signale zu ermöglichen.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß als keilförmiges Substrat mit unterschiedlichem Keilwinkel eine langbrennweitige Linse verwendet wird.

20. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlteilereinheit (BS) aus zwei zueinander im Winkel justierbaren Teilen besteht.

21. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß ein Strahlversatz durch Translation oder Rotation der Vorrichtung gegenüber dem Laserstrahl mit Hilfe von optischen Linsen vor den Detektoren ganz oder teilweise kompensiert wird.

22. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperatur des eingesetzten Interferometers aktiv elektronisch stabilisiert wird.

23. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Anteil der durch die Vorrichtung aus dem Laserstrahl entnommenen Leistung durch die Wahl der Polarisationssebene der Laserstrahlung in Bezug auf die Vorrichtung einstellbar ist.

24. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorrichtung mechanisch, elektronisch oder durch das äußere Erscheinungsbild der Vorrichtung oder ihrer Ansteuerung auf ein bestimmtes Lasersystem angepaßt ist und eine nach außen sichtbare Einheit bildet.

25. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß der verwendete Laser ein Diodenlaser ist.

26. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß der verwendete Laser ein Diodenlaser mit einem angekoppelten externen Resonator ist.

27. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß der verwendete Laser ein diodengepumpter Festkörperlaser ist.

28. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Dicke des verwendeten Fabry-Perot-Etalons zwischen etwa einem fünftel und der Hälfte der Resonatorlänge des verwendeten Lasers liegt.

29. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß zwei oder mehr dieser Vorrichtungen zur Erweiterung des Detektionsfrequenzbereiches bzw. der Detektionsauflösung miteinander kombiniert werden.

---

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -



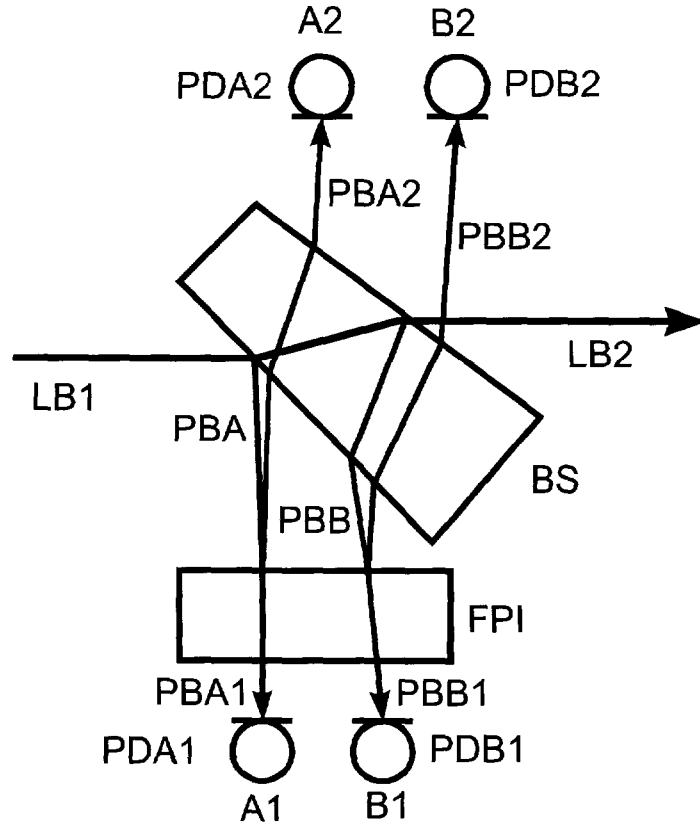


FIG. 1

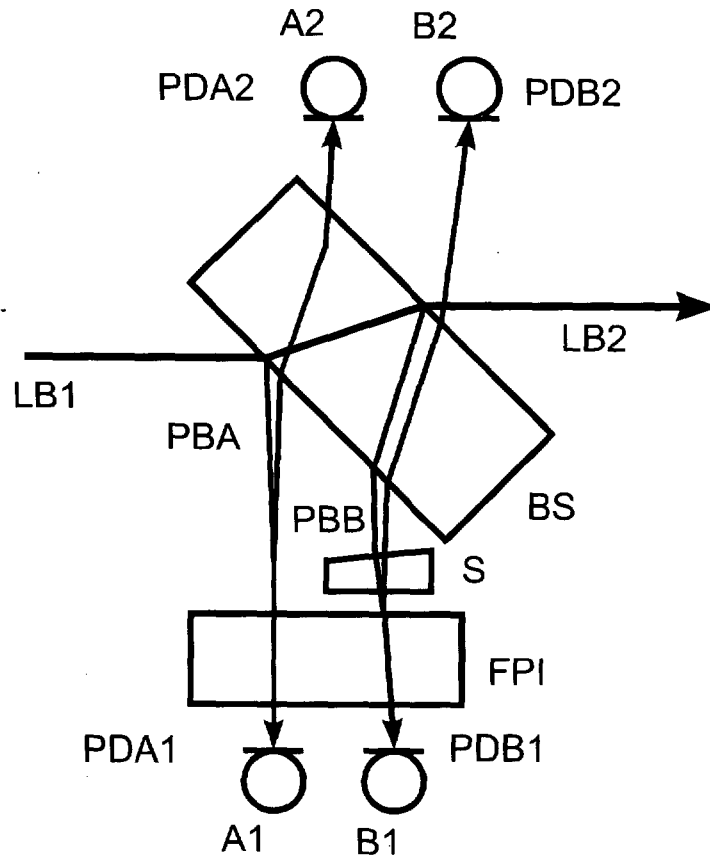


FIG. 2

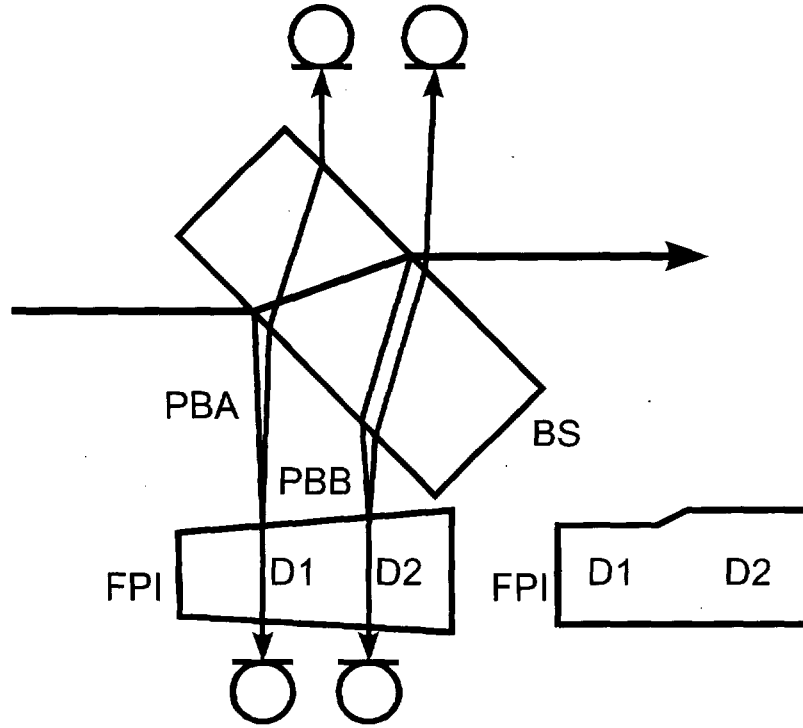


FIG. 3

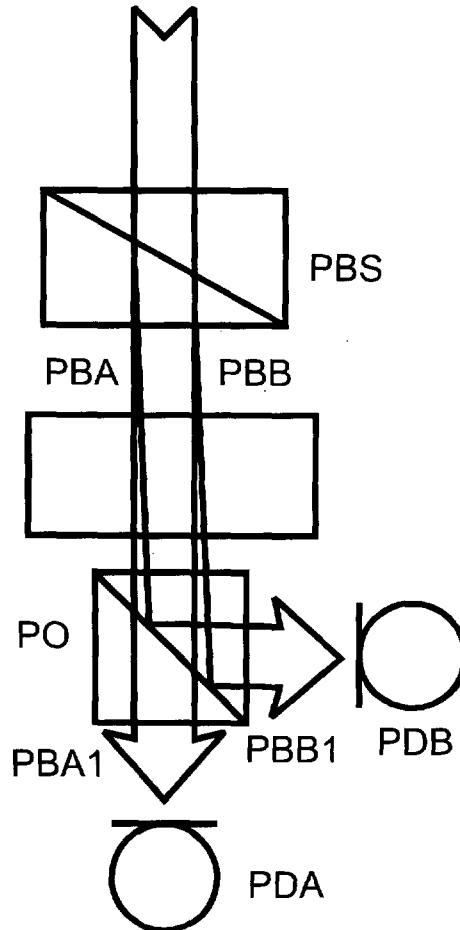


FIG. 4

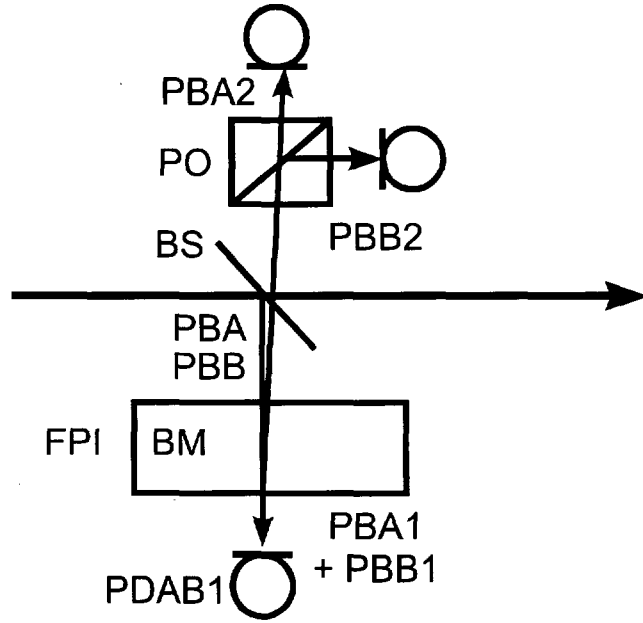


FIG. 5

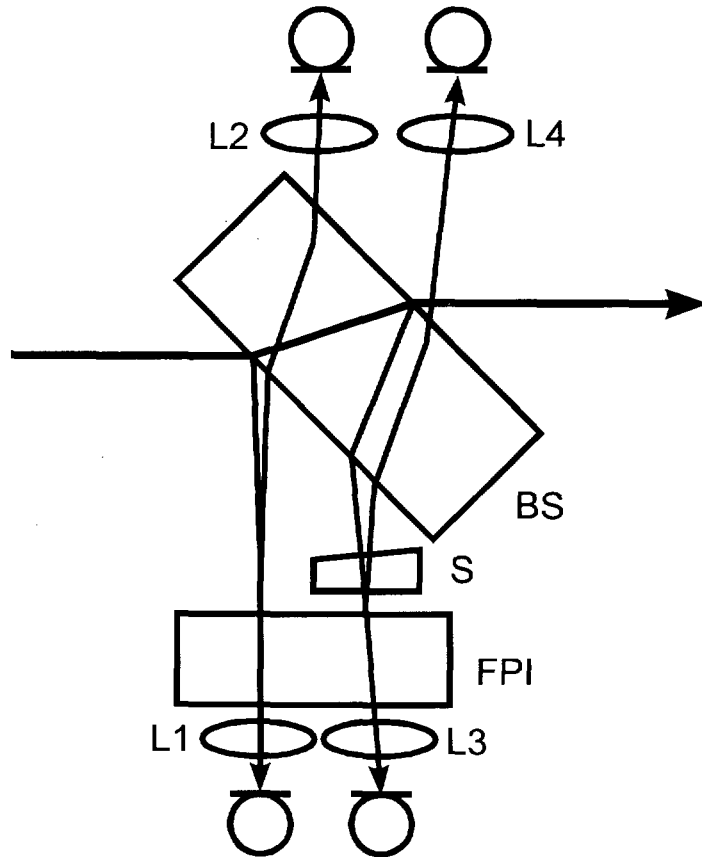


FIG. 6

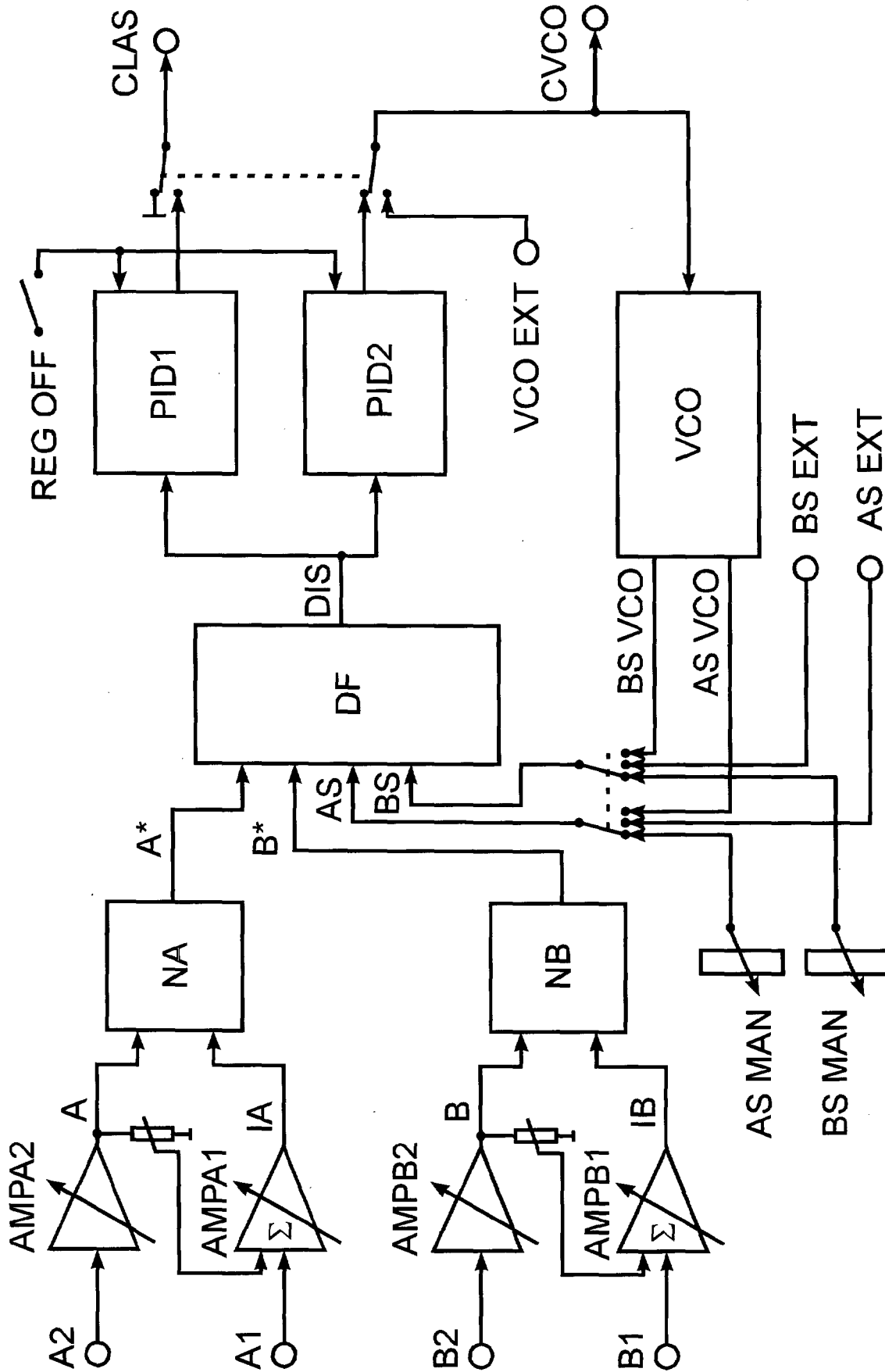


FIG. 7

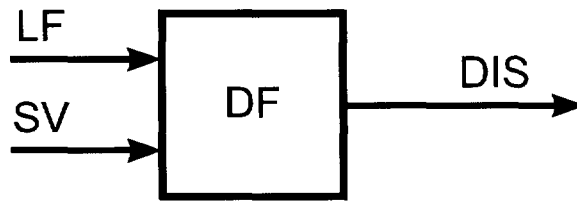


FIG. 8

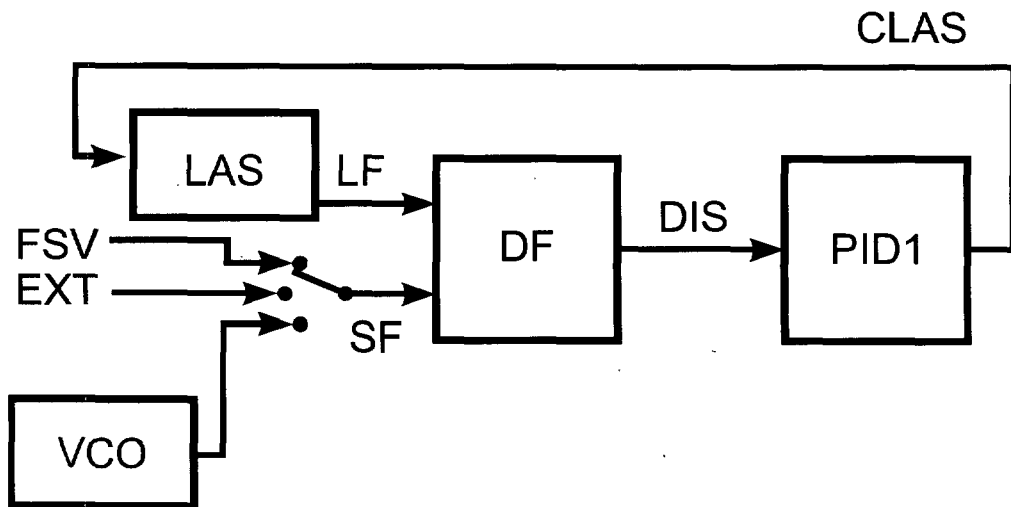


FIG. 9

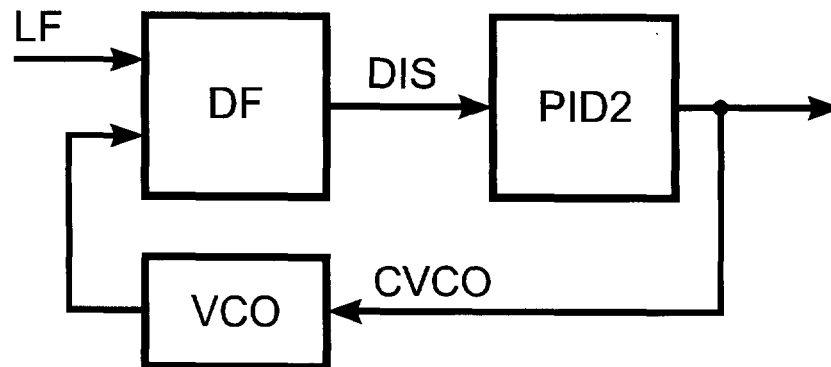


FIG. 10

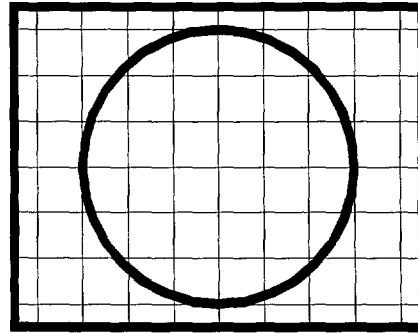


FIG. 11a

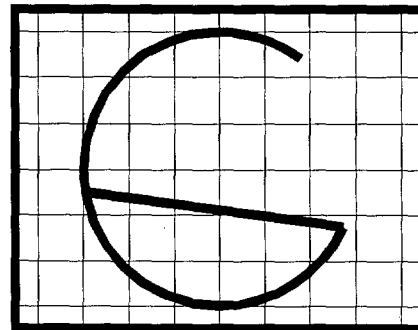


FIG. 11b

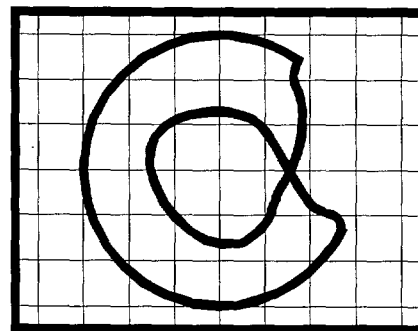


FIG. 11c