



CH 683471 A5



SCHWEIZERISCHE Eidgenossenschaft

BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

11 CH 683471 A5

51 Int. Cl.⁵: H 01 S 3/10
G 01 R 15/07
G 01 R 29/12
G 02 B 26/06

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

12 PATENTSCHRIFT A5

21 Gesuchsnummer: 1370/92

22 Anmeldungsdatum: 28.04.1992

30 Priorität(en): 10.05.1991 DE 4115370

24 Patent erteilt: 15.03.1994

45 Patentschrift veröffentlicht: 15.03.1994

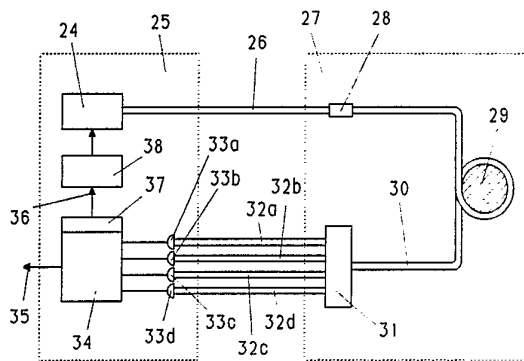
73 Inhaber:
Asea Brown Boveri AG, Baden

72 Erfinder:
Bohnert, Klaus, Dr., Niederrohrdorf
Fauth, Mathias, Dr., Baar

54 Faseroptischer Sensor.

57 Bei einem faseroptischen Sensor für elektrische Wechselfelder oder -spannungen wird die Interferenz in einer von einer Laserdiode (24) angeregten Zwei-Moden-Faser (30) auf passive Weise gemessen. Dazu werden am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser (30) die untereinander phasenverschobenen Nah- und Fernfeldsignale durch optische Mittel (31) getrennt, auf entsprechende Detektoren (33a, b, c, d) gegeben, und die entsprechenden elektrischen Signale durch elektronische Mittel (34) ausgewertet.

Bei dieser Auswertung wird neben dem Nutzsignal ein weiteres Signal gewonnen, welches mittels eines Quadraturreglers (37) und einer Laserdiodenregelung (38) über den Betriebsstrom oder die Temperatur der Laserdiode (24) die Wellenlänge und damit den Arbeitspunkt (28) des Interferometers regelt.



CH 683471 A5

Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

5 Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Faseroptik. Sie betrifft insbesondere einen faseroptischen Sensor für elektrische Wechselfelder bzw. -spannungen, umfassend

- (a) ein piezoelektrisches Sensorelement;
 10 (b) eine optische Faser mit einem Eingangsende und einem Ausgangsende, welche optische Faser zumindest teilweise an dem Sensorelement so fixiert ist, dass eine Dimensionsänderung des Sensorelements in einem elektrischen Feld zu einer Längenänderung in der Faser führt; und
 (c) Mittel zum Messen der feldbedingten Längenänderung der Faser;

Ein solcher faseroptischer Sensor ist z.B. aus der EP-A1 0 316 619 bekannt.

15

STAND DER TECHNIK

In verschiedenen Druckschriften wie z.B. den Europäischen Patentanmeldungen EP-A1 0 316 619 und EP-A1 0 316 635 oder den Artikeln von K. Bohnert und J. Nehring in Appl. Opt. 27, S. 4814–4818
 20 (1988), bzw. Opt. Lett. 14, S. 290–292 (1989), sind bereits faseroptische Sensoren zur Messung von elektrischen Feldern und Spannungen beschrieben worden.

Das dabei verwendete Messprinzip beruht auf dem inversen Piezoeffekt in Materialien mit ausgesuchter Kristallsymmetrie. Die zeitlich periodische Dimensionsänderung, die ein entsprechender piezoelektrische Körper in einem elektrischen Wechselfeld erfährt, wird auf eine an dem Körper fixierte Glasfaser übertragen. Die Längenänderung der Faser ist dann proportional zur Feld- bzw. Spannungsamplitude und wird interferometrisch gemessen und ausgewertet.

Für die interferometrische Messung können verschiedene Arten von Glasfaser-Interferometern eingesetzt werden. Aufgrund seiner Einfachheit ist von diesen Arten das aus dem Artikel von B. Y. Kim et al., Opt. Lett. 12, S. 729–731 (1987), bekannte Zwei-Moden-Faser-Interferometer von besonderem Interesse. Die Parameter der Sensorfaser sind bei diesem Interferometer so gewählt, dass sich in der Faser genau zwei Moden (der LP_{01} -Grundmodus und der gerade LP_{11} -Modus) ausbreiten können.

Wie in Fig. 1A am Prinzip eines faseroptischen Feldsensors dargestellt, wird beim Zwei-Moden-Faser-Interferometer Licht aus einer kohärenten Lichtquelle 1, z.B. einem Laser, durch eine Zwei-Moden-Faser 3 geschickt, welche an einem piezoelektrischen Sensorelement 2 für das elektrische Feld E fixiert ist. Am Faserende kann man dann ein Interferenzmuster beobachten, welches sich aus der Überlagerung dieser beiden Moden ergibt. Eine Längenänderung der Faser führt zu einer differentiellen Phasenverschiebung zwischen beiden Moden, die sich in einer entsprechenden Änderung des Interferenzmusters äußert. Fig. 1B zeigt solche Interferenzmuster für drei charakteristische Phasenunterschiede $n_2\pi$, $(2n+1)(\pi/2)$ und $(2n+1)\pi$.

Die beiden nebeneinanderliegenden Substrukturen des Interferenzmusters (in Fig. 1B auf der rechten Seite des Pfeils durch Halbellipsen angedeutet) werden mit zwei Detektoren 4a und 4b (z.B. in Form von Photodioden) detektiert. An deren Ausgang liegen zwei um 180° phasenverschobene Signale V_{11} und V_{12} vor:

45 (1) $V_{11} = (1/2)V_0(1 + \cos\phi(t))$

(2) $V_{12} = (1/2)V_0(1 - \cos\phi(t))$

mit $\phi(t) = A\sin\Omega t + e(t)$. Die Phasenverschiebung $\phi(t)$ zwischen den beiden Moden setzt sich also zusammen aus einem durch das zu messende Wechselfeld hervorgerufenen zeitlich periodischen Anteil $A\sin\Omega t$ (A ist dabei proportional zur Amplitude des Feldes) und einem willkürlichen Phasenterm $e(t)$, der sich z.B. infolge von temperaturbedingten Fluktuationen der Faserlänge ebenfalls zeitlich ändern kann. V_0 schliesslich ist proportional zur optischen Leistung und a ist ein Mass für den Interferenzkontrast.

Der gesuchte Term $A\sin\Omega t$ wird häufig mit einem Homodyn-Detektionsverfahren aus den Ausgangssignalen der Detektoren 4a und 4b gewonnen (für einen faseroptischen Sensor mit Ein-Moden-Faser siehe dazu: D. A. Jackson et al., Appl. Opt. 19, S. 2926–2929 (1980); ein entsprechender faseroptischer Sensor mit Zwei-Moden-Faser ist in der älteren Europäischen Anmeldung Nr. 90 123 660.4 beschrieben). Bei diesem Verfahren wird die Sensorfaser zusätzlich über einen piezoelektrischen Modulator geführt. Mit Hilfe dieses Modulators wird die Phasendifferenz $\phi(t)$ auf $+(\pi/2)$ oder $-(\pi/2)$ (modulo 2π) geregelt.

60 Neben dem Homodyn-Verfahren sind in der Literatur einige weitere Detektionsverfahren beschrieben worden, die den Vorteil haben, dass auf einen zusätzlichen Modulator im Bereich des Interferometers verzichtet werden kann, die aber dafür eine kompliziertere Sensorelektronik für die Signaldemodulation benötigen, die zudem oft eine geringere Genauigkeit aufweist. Beispiele dafür sind das synthetische Heterodyn-Verfahren (J. H. Cole et al., IEEE J. Quant. Electr. QE-18, S. 694–697 (1982)), das Homo-

dyn-Verfahren mit einem phasenmodulierten Trägersignal (A. Dandridge et al., IEEE J. Quant. Electr. QE-18, S. 1647–1653 (1982)), und Verfahren, bei denen auf optischem Wege zwei Interferometersignale erzeugt werden, die um 90° gegeneinander phasenverschoben sind (S. K. Sheem et al., Appl. Opt. 21, S. 689–693 (1982)).

In einer Reihe von praktischen Anwendungen des Sensors (z.B. bei der Spannungsmessung in Freiluftanlagen) können verhältnismässig grosse Abstände (10 m bis einige 100 m) zwischen dem eigentlichen Sensorkopf und der Sensorelektronik auftreten. Es ist unzweckmässig, diese Abstände mit der Zwei-Moden-Faser selbst zu überbrücken, da sich der Einfluss externer Störungen (Temperaturschwankungen, mechanische Erschütterungen etc.) mit zunehmender Faserlänge entsprechend vergrössert und das Signal/Rausch-Verhältnis verschlechtert. Die Lichtzuführung von der Laserdiode zum Interferometer und die Rückführung der Ausgangssignale des Interferometers sollten vielmehr über separate Glasfasern erfolgen, die nicht Bestandteil des Interferometers sind.

Bei dem oben beschriebenen Homodyn-Verfahren mit einem aktiven Phasen-Modulator wäre aber zusätzlich zu den Verbindungs-Glasfasern auch noch eine elektrische Verbindung zwischen der Sensorelektronik und dem Sensorkopf zur Ansteuerung des Modulators erforderlich. Die Attraktivität eines mit diesem Interferometertyp arbeitenden Sensors wäre dadurch sehr beschränkt.

Es ist deshalb in einer älteren Deutschen Patentanmeldung derselben Erfinder bereits vorgeschlagen worden, bei einem faseroptischen Sensor anstelle der bekannten aktiven Signaldetektion, die einen zusätzlichen Modulator in der Messfaser mit entsprechender elektrischer Zuleitung erfordert, eine passive Signaldetektion vorzusehen. Die passive Signaldetektion beruht auf dem Guoy-Effekt (siehe dazu: S. Y. Huang et al., Springer Proc. in Physics, Vol. 44 «Optical Fiber Sensors», S. 38–43, Springer Verlag Berlin, Heidelberg (1989)), d.h. dem Phasenunterschied zwischen den Interferenzmustern des Nah- und Fernfeldes: Die Substrukturen des Nah- und Fernfeldes (insgesamt 4) werden optisch separiert und können über separate Glasfasern zu einer entfernten Auswertelektronik übertragen werden. Dort kann unter Verwendung von wenigstens drei dieser vier Substrukturen die gewünschte Information über die Längenänderung der Messfaser gewonnen werden.

Ein Beispiel für einen solchen faseroptischen Sensor mit passiver Signaldetektion aus der genannten älteren Anmeldung ist in Fig. 2 wiedergegeben. Sensorelement 2 und Zwei-Moden-Faser 3 bilden zusammen mit optischen Mitteln 14 zur Trennung der am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser 3 auftretenden Nah- und Fernfeldsignale (I_{11} , I_{21} , I_{22}) einen eigenständigen Sensorkopf 9, der ausschliesslich durch separate Glasfasern (7, 13a, b, c) mit einer entfernt platzierten Sensorelektronik 6 potential-getrennt verbunden ist.

Die Sensorelektronik 6 umfasst als kohärente Lichtquelle eine Laserdiode 5 zur Anregung der Moden in der Zwei-Moden-Faser 3, eine Mehrzahl von Detektoren 12a,b,c zum Umwandeln der Nah- und Fernfeldsignale I_{11} , I_{21} , I_{22} in entsprechende elektrische Signale, sowie nachgeschaltete elektronische Mittel 11 zur Gewinnung der Längenänderungs-Information aus diesen umgewandelten Nah- und Fernfeldsignalen. Das resultierende Nutzsignal steht am Signalausgang 10 zur Verfügung.

Die Laserdiode 5 koppelt ihr (linear polarisiertes) Licht über eine polarisationserhaltende Ein-Moden-Faser 7 in das Eingangsende der Zwei-Moden-Faser 3 ein. Beide Fasern sind dabei über einen Spleiss 8 so zusammengespisst, dass LP_{01} -Grundmodus und gerader LP_{11} -Modus in etwa gleicher Intensität angeregt werden und die Polarisationsrichtung parallel zu einer der beiden Achsen des elliptischen Faserkerns der Zwei-Moden-Faser 3 liegt. Am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser 3 erfolgt durch die optischen Mittel 14 die Aufspaltung in mehrere getrennte optische Signale I_{11} , I_{21} und I_{22} , welche über separate Glasfasern (Multimoden-Fasern 13a, b, c) den Detektoren 12a, b, c zugeführt, dort in entsprechende elektrische Signale I_{11} , I_{21} und I_{22} umgewandelt und schliesslich durch die elektronischen Mittel 11 ausgewertet werden.

Eine mögliche Ausführungsform für die im Beispiel der Fig. 2 verwendeten optischen Mittel 14 ist in der Fig. 3A dargestellt. Sie umfasst im wesentlichen zwei Selfoc-Linsen 15a, b mit einem Pitch von 0,25, eine dritte Selfoc-Linse 15c mit einem Pitch kleiner 0,25, einen Strahlteiler 16 sowie eine Ein-Moden-Faser 17. Die erste Selfoc-Linse 15a kollimiert die aus dem Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser 3 austretenden Interferenzsignale zu einem Parallelstrahl, welcher durch den Strahlteiler 16 in zwei Teilstrahlen zerlegt wird (der zugehörige Strahlengang 19 ist durch gestrichelte Linien angedeutet).

Der erste Teilstrahl wird durch die zweite Selfoc-Linse 15b wieder so fokussiert, dass das Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser 3 auf die dem Strahlteiler 16 abgewandte Fläche abgebildet wird, d.h. dort das Nahfeld-Interferenzmuster erscheint. Von diesem Nahfeld-Interferenzmuster wird durch die Ein-Moden-Faser 17, die als räumliches Filter wirkt, eine der Substrukturen – in diesem Fall I_{11} – ausgekoppelt und über eine mit einem Spleiss 18 angespleisste erste Multimoden-Faser 13a zu dem entsprechenden Detektor 12a (Fig. 2) geleitet.

Der zweite Teilstrahl wird durch die dritte Selfoc-Linse 15c so gebündelt, dass sich die Eingangsenden der zwei nachfolgenden, als Auskopplungsfasern dienenden Multimoden-Fasern 13b,c noch im optischen Fernfeld der Zwei-Moden-Faser 3 befinden, das Licht aber bereits effizient in die zwei Auskopplungsfasern eingekoppelt wird, wobei jeweils eine der beiden Substrukturen des Fernfeld-Interferenzmusters der Zwei-Moden-Faser 3 in jeweils eine der beiden Auskopplungsfasern eingekoppelt wird.

Eine mögliche Ausführungsform der im Beispiel der Fig. 2 verwendeten elektronischen Mittel 11 ist in der Fig. 3B wiedergegeben. Aus den Signalen I_{11} , I_{21} und I_{22} wird dort in der angegebenen Weise durch

Filterung mittels dreier Tiefpassfilter 21a, b, c und zweier Bandpassfilter 20a,b, sowie durch Kombination mittels zweier Subtrahierer 22a,b, dreier Addierer 55a, b, c, eines Abschwächers 54 (mit dem Abschwächungsfaktor 0,5), vier Absolutwertbildner 53a, b, c, d und eines Dividierers 23 das gewünschte Nutzsignal erzeugt und am Signalausgang 10 bereitgestellt.

- 5 Die Vorteile des beschriebenen faseroptischen Sensors gemäss der älteren Anmeldung sind:
- Es gibt keine elektrische Verbindung zwischen der Sensorelektronik 6 und dem Sensorkopf 9 (galvanische Trennung);
 - der Abstand zwischen der Sensorelektronik 6 und dem Sensorkopf 9 kann relativ gross sein;
 - es ist keine Kontrolle bzw. Regelung des Interferometer-Arbeitspunkts erforderlich; und
 - 10 – die elektronischen Mittel zur Signalauswertung sind einfach.

Diesen Vorteilen stehen allerdings auch Nachteile gegenüber: Da der Arbeitspunkt des Interferometers nicht stabilisiert wird, enthalten die Interferenzsignale am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser 3 höhere Harmonische des Grundsignals. Diese Harmonischen müssen für die Demodulation der Interferenzsignale mit elektronischen Bandpassfiltern (20a, b in Fig. 3B) herausgefiltert werden. Die nutzbare Bandbreite ist damit eingeschränkt.

15 DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen faseroptischen Sensor anzugeben, der sich bei grosser nutzbarer Bandbreite durch einfachen Aufbau und hohe Genauigkeit und Störsicherheit auszeichnet, und bei dem die eigentliche Messfaser ausschliesslich über separate Glasfasern an die Lichtquelle und die Auswerteelektronik angekoppelt werden kann.

Die Aufgabe wird bei einem Sensor der eingangs genannten Art dadurch gelöst, dass

- 25 (d) die Faser eine Zwei-Moden-Faser ist, deren Parameter so gewählt sind, dass sich in ihr der LP_{01} -Grundmodus und der gerade LP_{11} -Modus ausbreiten können;
- (e) vor dem Eingangsende der Zwei-Moden-Faser eine kohärente Lichtquelle mit einer regelbaren Wellenlänge angeordnet ist, welche kohärente Lichtquelle die beiden Moden der Zwei-Moden-Faser anregt;
- 30 (f) die Mittel zum Messen der feldbedingten Längenänderung der Faser optische Mittel, elektronische Mittel und Detektoren umfassen; wobei
- (g) die optischen Mittel die am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser auftretenden Interferenzmuster in optische Nah- und Fernfeldsignale aufteilen;
- (h) die Detektoren die optischen Nah- und Fernfeldsignale in entsprechende elektrische Nah- und Fernfeldsignale umwandeln; und
- 35 (i) die elektronischen Mittel aus den elektrischen Nah- und Fernfeldsignalen einerseits die Längenänderungs-Information und andererseits ein Signal für die Regelung der Wellenlänge der kohärenten Lichtquelle gewinnen.

40 Der Kern der Erfindung besteht darin, einerseits – wie in der älteren Deutschen Anmeldung – eine auf dem Guoy-Effekt basierende, die unterschiedlichen Nah- und Fernfeldsignale verwendende, passive Signaldetektion zu verwirklichen, und andererseits aus den Fern- oder Nahfeldsignalen ein Regelsignal zu gewinnen, mit dessen Hilfe die Wellenlänge der Lichtquelle geregelt werden kann.

45 Auf diese Weise kann der Arbeitspunkt des Zwei-Moden-Faser-Interferometers so eingestellt werden, dass bei der Modulation durch das Feldsignal höhere Harmonische nur in einer vernachlässigbaren Grössenordnung entstehen und in der Auswerteelektronik auf entsprechende Bandpassfilter verzichtet werden kann. Die gewünschte galvanische Trennung zwischen Sensorelektronik und Sensorkopf bleibt dabei vollständig erhalten.

50 Eine erste bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemässen Sensors zeichnet sich dadurch aus, dass

- (a) die kohärente Lichtquelle als Laserdiode ausgebildet ist;
- (b) die Wellenlänge der Laserdiode über deren Betriebsstrom oder Temperatur von einer Laserdiodenregelung geregelt wird, welche ein Regelsignal aus einem Quadraturregler erhält, dessen Eingang wiederum mit den elektronischen Mitteln in Verbindung steht; und
- 55 (c) die Wellenlänge der Laserdiode so eingeregelt wird, dass im Fernfeld zwischen den beiden interferierenden Moden ein Gangunterschied von $\pm \pi/2$ (modulo 2π) besteht.

Bei einer zweiten bevorzugten Ausführungsform umfassen die optischen Mittel zur Trennung der Nah- und Fernfeldsignale:

- (a) eine direkt am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser angeordnete erste Linse zur Kollimierung der aus der Zwei-Moden-Faser austretenden zwei Moden zu einem Parallelstrahl;
- (b) einen ersten, hinter der ersten Linse angeordneten Strahlteiler, welcher den Parallelstrahl in zwei Teilstrahlen aufspaltet;
- 65

(c) eine zweite Linse mit einer nachgeordneten ersten Auskopplungsfaser, welche zweite Linse den ersten der beiden Teilstrahlen so fokussiert, dass die Endfläche der Zwei-Moden-Faser auf das Eingangsende der ersten Auskopplungsfaser abgebildet wird; und

(d) eine dritte Linse mit zwei parallelen, nachgeordneten Auskopplungsfasern, welche dritte Linse den zweiten Teilstrahl so bündelt, dass sich die Eingangsenden der zwei Auskopplungsfasern noch im optischen Fernfeld der Zwei-Moden-Faser befindet, das Licht aber bereits effizient in die zwei Auskopplungsfaser eingekoppelt wird, wobei jeweils eine der beiden Substrukturen des Fernfeld-Interferenzmusters der Zwei-Moden-Faser in jeweils eine der beiden Auskopplungsfasern eingekoppelt wird.

Der Sensor ist dann beispielsweise so ausgebildet, dass

(a) die elektronischen Mittel zwei Tiefpassfilter und einen Verstärker mit jeweils einem Ein- und einem Ausgang, sowie zwei Subtrahierer, einen Addierer und einen Dividierer mit jeweils zwei Eingängen und einem Ausgang, umfassen; wobei

(b) auf die beiden Eingänge des ersten Subtrahierers und die beiden Eingänge des Addierers die beiden elektrischen Fernfeldsignale gelangen, und der Ausgang des ersten Subtrahierers mit dem Eingang des ersten Tiefpassfilters und dem ersten Eingang des Dividierers, und der Ausgang des Addierers mit dem ersten Eingang des zweiten Subtrahierers verbunden sind;

(c) auf den zweiten Eingang des zweiten Subtrahierers über das zweite Tiefpassfilter und den nachgeschalteten Verstärker eines der beiden elektrischen Nahfeldsignale gelangt;

(d) der Ausgang des ersten Tiefpassfilters auf den Eingang des Quadraturreglers geschaltet ist;

(e) der Ausgang des zweiten Subtrahierers mit dem zweiten Eingang des Dividierers verbunden ist; und

(f) der Ausgang des Dividierers mit einem Signalausgang für die Abnahme des Nutzsignals in Verbindung steht.

Weitere Ausführungsformen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit der Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen

Fig. 1A ein Beispiel für einen faseroptischen E-Feld-Sensor mit Zwei-Moden-Faser;

Fig. 1B die Prinzipdarstellung der Interferenzmuster am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser (3) aus Fig. 1A;

Fig. 2 den Aufbau eines faseroptischen Sensors mit passiver Signaldetektion gemäss einer älteren Deutschen Anmeldung derselben Erfinder;

Fig. 3A ein Ausführungsbeispiel für die optischen Mittel (14), wie sie im Sensor gemäss Fig. 2 verwendet werden;

Fig. 3B ein Ausführungsbeispiel für die elektronischen Mittel (11), wie sie im Sensor gemäss Fig. 2 verwendet werden;

Fig. 4 den Aufbau eines beispielhaften Sensors mit passiver Signaldetektion und Arbeitspunktregelung des Interferometers nach der Erfindung;

Fig. 5A ein erstes Ausführungsbeispiel für die optischen Mittel (31) gemäss Fig. 4 zur Trennung aller Nah- und Fernfeldsignale;

Fig. 5B eine zu Fig. 5A alternative Ausführungsform der optischen Mittel (31), bei welchen nur ein Nah- und beide Fernfeldsignale getrennt werden;

Fig. 6A ein Ausführungsbeispiel für die elektronischen Mittel (34) eines Sensors nach Fig. 4 mit den optischen Mitteln (31) gemäss Fig. 5A;

Fig. 6B eine zu Fig. 6A alternative Ausführungsform der elektronischen Mittel (34), welche optische Mittel (31) gemäss Fig. 5B voraussetzt;

Fig. 7A, B Amplitudendiagramme zur Verdeutlichung der Arbeitspunktregelung des Sensor-Interferometers; und

Fig. 8 ein Diagramm für die normierte Phasenverschiebung im Interferometer in Abhängigkeit von der Wellenlänge der kohärenten Lichtquelle.

WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Auf die Darstellungen in den Fig. 1A, B, Fig. 2 und Fig. 3A, B soll im folgenden nicht weiter eingegangen werden, da sie sich auf die bereits genannte ältere Deutsche Anmeldung beziehen und bereits im Zusammenhang mit der Einleitung erläutert worden sind.

Fig. 4 zeigt ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines faseroptischen Sensors nach der Erfindung. Der Sensor besteht im wesentlichen aus einem Sensorkopf 27, einer Sensorelektronik 25 und einer

Mehrzahl von separaten Glasfasern (26, 32a–d), welche Sensorkopf 27 und Sensorelektronik 25 miteinander verbinden.

Im Sensorkopf 27 ist ein piezoelektrisches Sensorelement 29 angeordnet, welches seine durch ein E-Feld hervorgerufenen Dimensionsänderungen als Längenänderung auf eine an ihm fixierte Zwei-Moden-Faser 30 überträgt. Die Zwei-Moden-Faser 30 stellt ein Interferometer dar, welches von einer Laserdiode 24 über eine polarisationserhaltende Ein-Moden-Faser 26 und einen entsprechenden Spleiss 28 angeregt wird.

Die angeregten Moden interferieren längenabhängig. Die Substrukturen der resultierenden Interferenzmuster werden am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser 30 mit Hilfe optischer Mittel 31 getrennt, über Multimodenfasern 32a–d auf entsprechende Detektoren 33a–d gegeben und dort in geeignete elektrische Signale umgewandelt. Aus den elektrischen Signalen wird dann mit Hilfe elektronischer Mittel 34 das gewünschte Nutzsignal sowie ein weiteres Signal gewonnen. Das Nutzsignal, welches an einem Signalausgang 35 abgenommen werden kann, gibt ein Mass für das am Sensorelement 29 anliegende elektrische Feld. Das weitere Signal wird über einen Quadraturregler 37 und eine Laserdiodenregelung 38 zur aktiven Regelung der Wellenlänge der Laserdiode 24 und damit des Arbeitspunktes des Interferometers verwendet (siehe Fig. 8).

Grundsätzlich ergibt sich für die Interferenz in der Zwei-Moden-Faser 30 die folgende Situation: Der LP_{01} -Grundmodus und der LP_{11} -Modus der Zwei-Moden-Faser können in sehr guter Näherung durch die Gauss'schen TEM_{00} - und TEM_{10} -Moden dargestellt werden. Diese beiden Moden haben nach Verlassen der Faser die Form

$$(3) E_{lm}(x,y,z) = E_{0lm}(x,y,z) \exp[-ik(x^2+y^2)/2R(z) - ikz + i(l+m+1)\eta(z)].$$

Hierbei ist $E_{0lm}(x,y,z)$ die Amplitude, x und y sind die Koordinatenrichtungen senkrecht und z ist die Koordinatenrichtung parallel zur Strahlbreitungsrichtung ($z = 0$ entspricht der Position des Faserendes); k ist die Wellenzahl ($k = 2\pi/\lambda$, wobei λ für die optische Wellenlänge steht). $R(z)$ und $\eta(z)$ sind gegeben durch

$$(4) R(z) = z(1 + z_0^2/z^2)$$

$$(5) \eta(z) = \tan^{-1}(z/z_0)$$

mit

$$(6) z_0 = (\pi\Omega_0^2 \cdot n)/\lambda.$$

n ist der Brechungsindex ($n \approx 1$ in Luft), Ω_0 ist der laterale Abstand von der optischen Achse bei $z = 0$, bei welchem die Feldamplitude auf $1/e$ ihres Wertes auf der Achse gefallen ist.

Für Abstände $z \gg z_0$ vom Faserende geht $\eta(z)$ gegen $\pi/2$. Die beiden Moden $TEM_{00}(l=0, m=0)$ und $TEM_{10}(l=1, m=0)$ (bzw. die LP_{01} - und LP_{11} -Moden) erfahren also bei ihrer Ausbreitung vom optischen Nahfeld ($z \approx 0$) ins optische Fernfeld ($z \gg z_0$) eine relative Phasenverschiebung von $\pi/2$. Zwischen den Interferenzmustern der beiden Moden im Nah- und Fernfeld besteht damit ebenfalls ein Phasenunterschied von $\pi/2$. Die Intensitäten in den Substrukturen der Interferenzmuster sind dann im Nahfeld (Nahfeldsignale)

$$(7) I_{11} = (1/2)I_0(1 + \cos\Phi(t))$$

$$(8) I_{12} = (1/2)I_0(1 - \cos\Phi(t))$$

und im Fernfeld (Fernfeldsignale)

$$(9) I_{21} = (1/2)I_0(1 + \sin\Phi(t))$$

$$(10) I_{22} = (1/2)I_0(1 - \sin\Phi(t)),$$

mit $\Phi(t) = A\sin\Omega t + \Theta(t)$. Die Phasenverschiebung $\Phi(t)$ zwischen den beiden Moden setzt sich also – wie bereits eingangs erwähnt – zusammen aus einem durch das zu messende Wechselfeld hervorgerufenen, zeitlich periodischen Anteil $A\sin\Omega t$ (A ist dabei proportional zur Amplitude des Feldes) und einem willkürlichen Phasenterm $\Theta(t)$, der sich z.B. infolge von temperaturbedingten Fluktuationen der Faserlänge ebenfalls zeitlich ändern kann. I_0 ist die totale Lichtintensität und a ist ein Mass für den Interferenzkontrast. Man beachte, dass zwischen Nah- und Fernfeld ein Phasenunterschied von $\pi/2$ besteht.

Von den insgesamt vier Nah- und Fernfeldsignalen ($I_{11} - I_{22}$) werden wenigstens drei, insbesondere auch alle vier, zur Auswertung in der Sensorelektronik herangezogen. Zu diesem Zweck müssen sie zunächst durch die optischen Mittel 31 voneinander separiert werden.

Die Fig. 5A zeigt ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel für die optischen Mittel 31 aus Fig. 4, die es

erlauben, alle vier Nah- und Fernfeldsignale gemäss den Gleichungen (7) – (10) voneinander zu trennen und dann über die separaten Glasfasern (32a–d) zu den sich in einiger Entfernung befindlichen Detektoren 33a–d zu führen:

Die beiden aus der Zwei-Moden-Faser 30 austretenden Moden werden mit einer ersten Selfoc-Linse 39a (mit einem Pitch von 0,25) zu einem Parallelstrahl kollimiert, dessen räumliche Intensitätsverteilung dem Fernfeld-Interferenzmuster entspricht (der entsprechende Strahlengang 41 ist in den Fig. 5A und 5B als gestrichelte Linie angedeutet).

Der kollimierte Strahl wird mit Hilfe zweier hintereinander angeordneter, würfelförmiger Strahlteiler 40a,b in drei Teilstrahlen aufgespalten. Zwei dieser Teilstrahlen werden mittels zweier weiterer 0,25-Pitch-Selfoc-Linsen 39b und 39d fokussiert. An den vom Strahlteiler 40b abgewandten Seiten der beiden Selfoc-Linsen 39b und 39d entsteht dann das Bild der Endfläche der Zwei-Moden-Faser 30 und folglich wieder das Nahfeld-Interferenzmuster.

Je eine der beiden Substrukturen dieses Nahfeld-Interferenzmusters wird jeweils mit einem kurzen Stück einer Ein-Moden-Faser 42a bzw. 42b (die hier die Wirkung eines räumlichen Filters hat) herausgefiltert. Dabei ist zu beachten, dass zwei Substrukturen ausgefiltert werden, die relativ zueinander um 180° ausser Phase sind, also den Signalen I_{11} und I_{12} entsprechen. Die ausgefilterten Nahfeldsignale können dann mit Multimoden-Fasern 44a bzw. 44d, die über entsprechende Spleisse 43a bzw. 43b an die Ein-Moden-Fasern 42a bzw. 42b angespleisst sind, zu den Detektoren übertragen werden. Die Verwendung von Multimoden-Fasern bietet Kostenvorteile (z.B. kostengünstige Fasersteckverbindungen); prinzipiell können anstelle der beiden kurzen Ein-Moden-Fasern 42a,b aber auch lange Ein-Moden-Fasern verwendet werden, welche die I_{11} - und I_{12} -Signale über die gesamte Distanz bis zu den Detektoren übertragen und damit die Multimoden-Fasern 44a und 44d ersetzen.

Im dritten Teilstrahl befindet sich eine weitere Selfoc-Linse 39c mit einem Pitch kleiner 0,25 (der Fokus liegt also ininigem Abstand ausserhalb der Linse). Die Selfoc-Linse 39c bündelt den Strahl auf zwei unmittelbar nebeneinander liegende Multimoden-Fasern 39b und 39c. Die Linsenlänge (bzw. der Pitch der Linse) ist so gewählt, dass (i) sich die vom Strahlteiler 40a abgewandte Endfläche der Linse noch im optischen Fernfeld befindet und (ii) der Strahl aber bereits soweit gebündelt ist, dass das Licht effizient in die beiden Multimoden-Fasern 39 b,c eingekoppelt wird. Die Multimoden-Fasern 39 b,c sind dabei so angeordnet, dass sie jeweils eine der beiden Substrukturen des Fernfeld-Interferenzmusters erfassen. Vorzugsweise wählt man Multimoden-Fasern mit einem relativ grossen Kerndurchmesser und kleiner Dicke des Fasermantels (z.B. Hard Cladded Silica (HCS) Fasern mit einem $200\ \mu\text{m}$ dicken Quarzglaskern und einem $15\ \mu\text{m}$ dicken Hartplastik-Mantel; bei genügend grossem Kerndurchmesser kann auf die Selfoc-Linse 39c sogar ganz verzichtet werden). Die beiden Multimoden-Fasern führen somit die Signale I_{21} und I_{22} und übertragen sie zu einem zweiten Detektorpaar.

Die vier getrennten optischen Nah- und Fernfeldsignale gelangen über die Multimoden-Fasern 39a–d auf die Detektoren 33a–d, werden dort in vier elektrische Nah- und Fernfeldsignale $I_{11} - I_{22}$ umgewandelt und dann durch elektronische Mittel 34 ausgewertet, wie sie beispielhaft in Fig. 6A wiedergegeben sind. Diese elektronischen Mittel 34 umfassen zwei Subtrahierer 45a, b und einen Dividierer 47 mit jeweils zwei Eingängen und einem Ausgang, sowie zwei Tiefpassfilter 46a, b, welche in der in Fig. 6A angegebenen Weise miteinander verschaltet sind.

Die Fernfeldsignale (I_{21} , I_{22}) werden jeweils auf die Eingänge des ersten Subtrahierers 45a, die Nahfeldsignale (I_{11} , I_{12}) auf die Eingänge des zweiten Subtrahierers 45b gegeben. Durch Bildung der Differenz der Fernfeldsignale im ersten Subtrahierer 45a erhält man an dessen Ausgang:

$$(11) I_{21} - I_{22} = aI_0' \sin\Phi(t) = aI_0' \sin(\text{Asin}\Omega t + \Theta(t)) \quad (A \ll \pi/2).$$

Mit Hilfe des ersten Tiefpassfilters 46a wird aus diesem Differenzsignal der langsam fluktuierende Teil $aI_0' \sin\Theta(t)$ herausgefiltert und dem Quadraturregler 37 zugeführt. Der Quadraturregler 37 regelt über den Reglerausgang 36 im Zusammenspiel mit der nachfolgenden Laserdiodenregelung 38 den Betriebsstrom oder die Temperatur der Laserdiode 24 und damit die Wellenlänge (λ) in der Weise, dass das Reglereingangssignal $aI_0' \sin\Theta(t)$ gleich Null wird. Der Phasenunterschied Θ im Fernfeld wird also auf 0 oder π (modulo 2π) eingestellt. Dies ist möglich, weil – wie weiter unten im Zusammenhang mit Fig. 8 erklärt – Θ eine Funktion der Wellenlänge ist. I_0' ist hier gleich $(1/3)I_0$; dabei ist angenommen, dass die Strahlteilung in den optischen Mitteln 31 gemäss Fig. 5A so erfolgt, dass alle vier Nah- und Fernfeldsignale gleiche Amplitude haben und keine Verluste auftreten.

Mit der Regelung der Wellenlänge ist das Signal am Ausgang des ersten Subtrahierers nun:

$$(12) I_{21} - I_{22} = aI_0' \sin(\text{Asin}\Omega t) \quad \text{für } \Theta=0, 2\pi, 4\pi \dots \text{ bzw. } = -aI_0' \sin(\text{Asin}\Omega t) \quad \text{für } \Theta=\pi, 3\pi, 5\pi \dots$$

Die Entwicklung nach Besselfunktionen ergibt:

(13)

$$I_{21} - I_{22} = aI_0' 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m-1}(A) \sin(2m-1)\Omega t$$

$$\approx aI_0' 2J_1(A) \sin\Omega t \approx aI_0' A \sin\Omega t$$

für kleine Amplituden A.

Die Differenz der Nahfeldsignale im zweiten Subtrahierer 45b ergibt (mit $\theta=0, 2\pi, 4\pi, \dots$) entsprechend:

(14)

$$I_{11} - I_{12} = aI_0' \cos(A \sin\Omega t)$$

$$= aI_0' (J_0(A) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(A) \cos 2m\Omega t) .$$

Mit dem zweiten Tiefpassfilter 46b (Grenzfrequenz kleiner $2n$) werden die periodischen Anteile blockiert. Man erhält dann am Ausgang des zweiten Tiefpassfilters 46b:

$$(15) \quad I_{11} - I_{12} = aI_0' J_0(A) = aI_0'$$

für kleine Amplituden A. Durch Quotientenbildung von (13) und (15) im Dividierer 47

(16)

$$\frac{I_{21} - I_{22}}{I_{11} - I_{12}} = A \sin\Omega t$$

erhält man schliesslich am Signalausgang 35 das gewünschte Nutzsignal, welches unabhängig von Fluktuationen der Laserintensität und des Interferenzkontrastes ist.

Bei der Herleitung der Gleichung (16) wurden begrenzte Amplituden A der periodischen optischen Phasenverschiebung durch das elektrische Feld angenommen. Die nachfolgende Tabelle gibt den relativen Fehler dieser Näherung für verschiedene Werte von A an:

Tabelle:

A		J ₀ (A)	2J ₁ (A)	Rel.Fehl.
Radian	Grad			
0	0	1,0	0	0
0,1	5,73	0,9975	0,0998	0,0005
0,2	11,4	0,9900	0,1990	0,005
0,5	28,6	0,9385	0,4846	0,0327
1,0	57,3	0,7652	0,8802	0,15
Mit Rel.Fehl. = (2J ₁ (A)/J ₀ (A))/A - 1.				

Für Phasenverschiebungen unterhalb 0,1 rad (5,7 Grad) ist der Fehler kleiner als 0,05% und damit für alle praktischen Anwendungen vernachlässigbar.

Im Beispiel der Fig. 6A wird das Regelsignal und das Signal $aI_0' \sin\Omega t$ aus den Fernfeldsignalen I_{21} und I_{22} abgeleitet. Die Nahfeldsignale I_{11} und I_{12} werden gemäss Gleichung (16) zur Normierung herangezogen. Selbstverständlich können im Rahmen der Erfindung bei entsprechender Abänderung der Schaltung die beiden Signale aber auch umgekehrt aus den beiden Nahfeldsignalen abgeleitet und die beiden Fernfeldsignale zur Normierung herangezogen werden.

Weiterhin ist es möglich, die beiden gewünschten Signale unter Verwendung beider Fernfeldsignale und nur eines der Nahfeldsignale zu erhalten. Diese Ausführungsform hat den Vorteil, dass anstelle der optischen Mittel 31 gemäss Fig. 5A ein vereinfachter Aufbau nach Fig. 5B verwendet werden kann. Die Anordnung aus Fig. 5B ist mit der aus Fig. 5A identisch mit Ausnahme des nicht mehr erforderlichen zweiten Strahlteilers 40b und des fehlenden zweiten Nahfeldzweiges. Aufbau und Wirkungsweise sind dieselben wie bei der Konfiguration der Fig. 3A.

Die zugehörigen elektronischen Mittel 34 sind in Fig. 6B wiedergegeben. Sie umfassen zwei Subtrahierer 48a,b, einen Addierer 50, zwei Tiefpassfilter 49a,b, einen Verstärker 51 (mit dem Verstärkungsfaktor 2) und einen Dividierer 52. Die Arbeitspunktregelung und die Gewinnung des Differenzsignals $I_{21} - I_{22}$ erfolgen mittels des ersten Subtrahierers 48a und des ersten Tiefpassfilters 49a auf die gleiche Weise wie bei der Schaltung gemäss Fig. 6A mit dem Unterschied, dass jetzt I_0' gleich $(1/2)I_0$ ist.

Für die Signalnormierung werden zunächst aus dem Signal I_{11} oder aus dem Signal I_{12} die periodischen Anteile mit dem zweiten Tiefpassfilter 49b (Grenzfrequenz kleiner 2Ω) herausgefiltert. Man erhält dann:

$$(17) I_{11} = (1/2)I_0'(1 + aJ_0(A)) \approx (1/2)I_0'(1 + a) \quad (\text{bzw. } I_{12} \approx (1/2)I_0'(1 - a)).$$

Die im Addierer 50 gewonnene Summe der Fernfeldsignale ergibt:

$$(18) I_{21} + I_{22} I_0'.$$

Durch Multiplizieren der Gleichung (17) mit einem Faktor 2 (im Verstärker 51) und subtrahieren von I_0' (Gleichung (18)) im zweiten Subtrahierer 48b ergibt sich:

$$(19) 2(1/2)I_0'(1 + a) - I_0' = aI_0'.$$

Der im Dividierer 52 gebildete Quotient aus (13) und (19) ergibt erneut am Signalausgang 35 die gewünschte Grösse $A \sin \Omega t$, wiederum unabhängig von der Laserintensität I_0 und dem Interferenzkontrast a . Der relative Fehler aufgrund der Approximation der Besselfunktionen ist dabei der gleiche wie bei der Verarbeitung gemäss Fig. 6A.

In Fig. 7A sind die cosinus- bzw. sinusförmigen Verläufe der Amplituden AM der Differenzen der Nah- bzw. Fernfeldsignale in Abhängigkeit von der Phase ϕ dargestellt (man beachte den Phasenunterschied aufgrund des Guoy-Effektes). In den beschriebenen Beispielen des Sensors nach der Erfindung wird nun der Arbeitspunkt 28 des Interferometers über die Regelung der Wellenlänge der Laserdiode 24 so eingestellt, dass er – wie in Fig. 7A gezeigt – im linearen Teil der cos-Funktion liegt. Die vom elektrischen Feld herrührende, überlagerte, vergleichsweise kleine Signalamplitude AM gemäss Fig. 7B führt dann nur zu geringen Oberwellen, sodass auf Bandpassfilter verzichtet werden kann.

Wie oben bereits erwähnt, hat eine Änderung des Betriebsstromes bzw. der Temperatur der Laserdiode 24 eine Verschiebung der Laserwellenlänge $\delta\lambda$ zur Folge, die wiederum zu einer differentiellen Phasenverschiebung $\delta\phi$ zwischen den beiden Fasermoden in der Zwei-Moden-Faser 30 führt. Der Betrag $\delta\phi$ am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser 30 ist bei einer gegebenen Wellenlängenänderung $\delta\lambda$ abhängig von der Faserlänge L und den Faserparametern (Brechungsindexsprung zwischen Kern und Mantel und Länge der Hauptachsen der Kernellipse). Fig. 8 zeigt experimentelle (Punkte) und theoretische (Strich) Ergebnisse für den Wert $(1/L)(\delta\phi/\delta\lambda)$, die normierte Phasenverschiebung NPS, als Funktion von λ ($\Delta n = 0,034$; $3 \times 2 \mu\text{m}^2$ Kernellipse). Man beachte, dass die Funktion einen Nulldurchgang aufweist. Die Parameter sind dabei so zu wählen, dass die Laserwellenlänge genügend weit vom Nulldurchgang entfernt liegt und ein ausreichend grosser Dynamikbereich ($> \pm\pi$) erreicht wird.

In dem Fall, in welchem die Wellenlänge der Laserdiode 24 über deren Temperatur geregelt wird, wird das Ausgangssignal des Quadraturreglers 37 benutzt, um die die Temperatur eines Peltierelementes zu steuern, das in thermischem Kontakt mit der Laserdiode 24 steht. Abhängig vom Laserdiodentyp ergibt sich für eine Temperaturänderung von 1°C eine Wellenlängenverschiebung von bis zu 0,1 nm.

Patentansprüche

1. Faseroptischer Sensor für elektrische Wechselfelder bzw. -spannungen, umfassend
 - (a) ein piezoelektrisches Sensorelement (29);
 - (b) eine optische Faser mit einem Eingangsende und einem Ausgangsende, welche optische Faser zumindest teilweise an dem Sensorelement (29) so fixiert ist, dass eine Dimensionsänderung des Sensorelements (29) in einem elektrischen Feld zu einer Längenänderung in der Faser führt; und
 - (c) Mittel zum Messen der feldbedingten Längenänderung der Faser; dadurch gekennzeichnet, dass
 - (d) die Faser eine Zwei-Moden-Faser (30) ist, deren Parameter so gewählt sind, dass sich in ihr der LP_{01} -Grundmodus und der gerade LP_{11} -Modus ausbreiten können;
 - (e) vor dem Eingangsende der Zwei-Moden-Faser (30) eine kohärente Lichtquelle mit einer regelba-

ren Wellenlänge angeordnet ist, welche kohärente Lichtquelle die beiden Moden der Zwei-Moden-Faser (30) anregt;

(f) die Mittel zum Messen der feldbedingten Längenänderung der Faser optische Mittel (31), elektronische Mittel (34) und Detektoren (33a,b,c,d) umfassen; wobei

5 (g) die optischen Mittel (31) die am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser (30) auftretenden Interferenzmuster in optische Nah- und Fernfeldsignale (I_{11} , I_{12} ; I_{21} , I_{22}) aufteilen;

(h) die Detektoren (33a,b,c,d) die optischen Nah- und Fernfeldsignale in entsprechende elektrische Nah- und Fernfeldsignale (I_{11} , I_{12} ; I_{21} , I_{22}) umwandeln; und

10 (i) die elektronischen Mittel (34) aus den elektrischen Nah- und Fernfeldsignalen (I_{11} , I_{12} ; I_{21} , I_{22}) einerseits die Längenänderungs-Information und andererseits ein Signal für die Regelung der Wellenlänge der kohärenten Lichtquelle gewinnen.

2. Faseroptischer Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass

(a) die kohärente Lichtquelle als Laserdiode (24) ausgebildet ist;

15 (b) die Wellenlänge der Laserdiode (24) über deren Betriebsstrom oder Temperatur von einer Laserdiodenregelung (38) geregelt wird, welche ein Regelsignal aus einem Quadraturregler (37) erhält, dessen Eingang wiederum mit den elektronischen Mitteln (34) in Verbindung steht; und

(c) die Wellenlänge der Laserdiode (24) so eingeregelt wird, dass im Fernfeld zwischen den beiden interferierenden Moden ein Gangunterschied von $\pm \pi/2$ (modulo 2π) besteht.

3. Faseroptischer Sensor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die optischen Mittel (31) von den zwei Substrukturen des Nahfeld-Interferenzmusters und den zwei Substrukturen des Fernfeld-Interferenzmusters insgesamt zumindest drei Substrukturen optisch voneinander trennen und für die Auswertung über separate Glasfasern den Detektoren (33a, b, c, d) zuführen.

4. Faseroptischer Sensor nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die optischen Mittel (31) zur Trennung der Nah- und Fernfeldsignale (I_{11} , I_{12} ; I_{21} , I_{22}) umfassen:

25 (a) eine direkt am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser (30) angeordnete erste Linse zur Kollimierung der aus der Zwei-Moden-Faser (30) austretenden zwei Moden zu einem Parallelstrahl;

(b) einen ersten, hinter der ersten Linse angeordneten Strahlteiler (40a), welcher den Parallelstrahl in zwei Teilstrahlen aufspaltet;

30 (c) eine zweite Linse mit einer nachgeordneten ersten Auskopplungsfaser, welche zweite Linse den ersten der beiden Teilstrahlen so fokussiert, dass die Endfläche der Zwei-Moden-Faser (30) auf das Eingangsende der ersten Auskopplungsfaser abgebildet wird; und

35 (d) eine dritte Linse mit zwei parallelen, nachgeordneten Auskopplungsfasern, welche dritte Linse den zweiten Teilstrahl so bündelt, dass sich die Eingangsenden der zwei Auskopplungsfasern noch im optischen Fernfeld der Zwei-Moden-Faser (30) befindet, das Licht aber bereits effizient in die zwei Auskopplungsfaser eingekoppelt wird, wobei jeweils eine der beiden Substrukturen des Fernfeld-Interferenzmusters der Zwei-Moden-Faser (30) in jeweils eine der beiden Auskopplungsfasern eingekoppelt wird.

5. Faseroptischer Sensor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass

40 (a) zwischen dem ersten Strahlteiler (40a) und der zweiten Linse ein zweiter Strahlteiler (40b) angeordnet ist, welcher zweite Strahlteiler (40b) einen dritten Teilstrahl erzeugt; und

(b) eine vierte Linse mit einer nachgeordneten vierten Auskopplungsfaser vorgesehen ist, welche vierte Linse den dritten Teilstrahl so fokussiert, dass die Endfläche der Zwei-Moden-Faser (30) auf das Eingangsende der vierten Auskopplungsfaser abgebildet wird.

45 6. Faseroptischer Sensor nach einem der beiden Ansprüche 4 und 5, dadurch gekennzeichnet, dass die erste und ggf. die vierte Auskopplungsfaser jeweils Ein-Moden-Fasern (42a, b) sind, welche als räumliche Filter wirken und jeweils eine der beiden Substrukturen des Nahfeld-Interferenzmusters der Zwei-Moden-Faser (30) herausfiltern.

7. Faseroptischer Sensor nach einem der Ansprüche 4 und 5, dadurch gekennzeichnet, dass die erste und zweite und ggf. die vierte Linse jeweils eine Selfoc-Linse (39a, b, d) mit einem Pitch von 0,25 und die dritte Linse eine Selfoc-Linse (39c) mit einem Pitch kleiner 0,25 ist.

8. Faseroptischer Sensor nach einem der Ansprüche 4 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite und dritte Auskopplungsfaser jeweils eine Multimoden-Faser (44b, c) ist.

9. Faseroptischer Sensor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass

55 (a) die elektronischen Mittel (34) zwei Tiefpassfilter (49a, b) und einen Verstärker (51) mit jeweils einem Ein- und einem Ausgang, sowie zwei Subtrahierer (48a, b), einen Addierer (50) und einen Dividierer (52) mit jeweils zwei Eingängen und einem Ausgang, umfassen; wobei

60 (b) auf die beiden Eingänge des ersten Subtrahierers (48a) und die beiden Eingänge des Addierers (50) die beiden elektrischen Fernfeldsignale (I_{21} , I_{22}) gelangen, und der Ausgang des ersten Subtrahierers (48a) mit dem Eingang des ersten Tiefpassfilters (49a) und dem ersten Eingang des Dividierers (52), und der Ausgang des Addierers (50) mit dem ersten Eingang des zweiten Subtrahierers (48b) verbunden sind;

(c) auf den zweiten Eingang des zweiten Subtrahierers (48b) über das zweite Tiefpassfilter (49b) und den nachgeschalteten Verstärker (51) eines der beiden elektrischen Nahfeldsignale (I_{11} , I_{12}) gelangt;

65 (d) der Ausgang des ersten Tiefpassfilters (49a) auf den Eingang des Quadraturreglers (37) geschaltet ist;

(e) der Ausgang des zweiten Subtrahierers (48b) mit dem zweiten Eingang des Dividierers (52) verbunden ist; und

(f) der Ausgang des Dividierers (52) mit einem Signalausgang (35) für die Abnahme des Nutzsignals in Verbindung steht.

5 10. Faseroptischer Sensor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass
 (a) die elektronischen Mittel (34) zwei Tiefpassfilter (46a,b) mit jeweils einem Ein- und einem Ausgang sowie zwei Subtrahierer (45a, b) und einen Dividierer (47) mit jeweils zwei Eingängen und einem Ausgang umfassen; wobei

10 (b) auf die beiden Eingänge des ersten Subtrahierers (45a) die beiden elektrischen Fernfeldsignale (I_{21} , I_{22}) gelangen, und der Ausgang des ersten Subtrahierers (45a) mit dem Eingang des ersten Tiefpassfilters (46a) und dem ersten Eingang des Dividierers (47) verbunden ist;

(c) auf die beiden Eingänge des zweiten Subtrahierers (45b) die beiden elektrischen Nahfeldsignale (I_{11} , I_{12}) gelangen, und der Ausgang des zweiten Subtrahierers (45b) mit dem Eingang des zweiten Tiefpassfilters (46b) verbunden ist;

15 (d) der Ausgang des ersten Tiefpassfilters (46a) auf den Eingang des Quadraturreglers (37) geschaltet ist;

(e) der Ausgang des zweiten Tiefpassfilters (46b) mit dem zweiten Eingang des Dividierers (47) verbunden ist; und

20 (f) der Ausgang des Dividierers (47) mit einem Signalausgang (35) für die Abnahme des Nutzsignals in Verbindung steht.

11. Faseroptischer Sensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass

(a) die Zwei-Moden-Faser (30) zusammen mit dem Sensorelement (29) und den optische Mitteln (31) zur Trennung der am Ausgangsende der Zwei-Moden-Faser (30) auftretenden Nah- und Fernfeldsignale (I_{11} , I_{12} ; I_{21} , I_{22}) einen separaten Sensorkopf (27) bildet;

25 (b) die kohärente Lichtquelle, die Detektoren (33a, b, c, d) und die elektronischen Mittel (34) Teil einer separaten Sensorelektronik (25) sind;

(c) die kohärente Lichtquelle über eine polarisationserhaltende Ein-Moden-Faser (26) mit dem Eingangsende der Zwei-Moden-Faser (30) optisch verbunden ist; und

30 (d) die Detektoren (33a, b, c, d) mit den optischen Mitteln (31) durch separate Glasfasern in Form von Multimoden-Fasern (32a, b, c, d) optisch verbunden sind.

12. Faseroptischer Sensor nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass ein Teil der Multimoden-Fasern (32a, b, c, d) vollständig durch Ein-Moden-Fasern ersetzt ist.

35

40

45

50

55

60

65

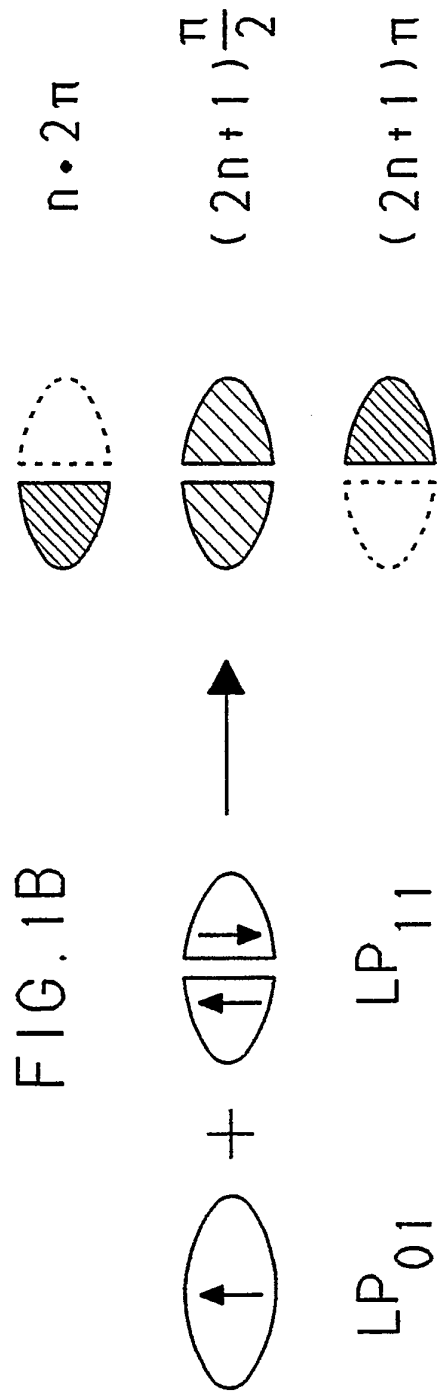
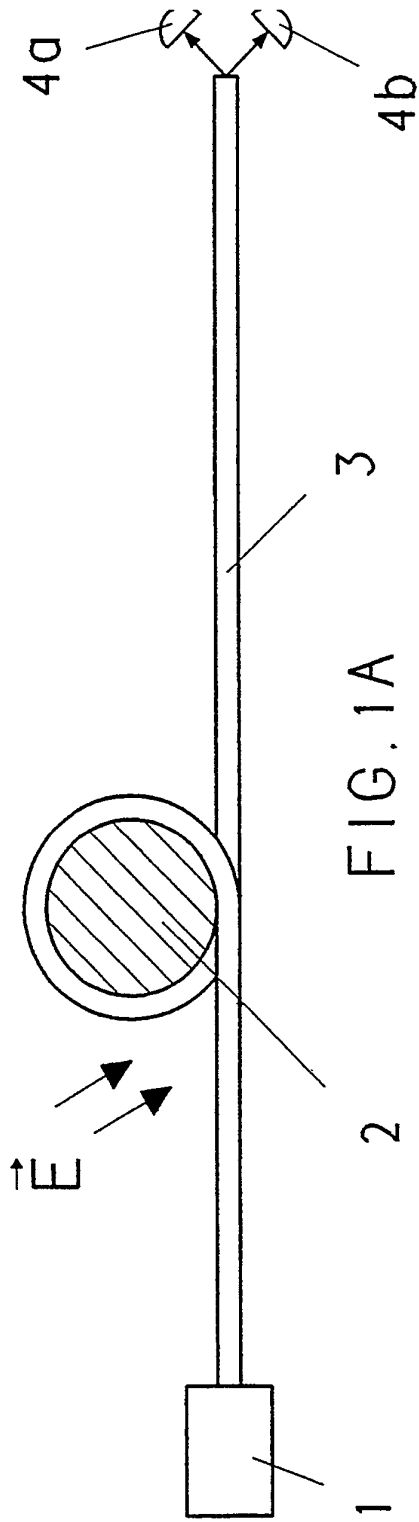
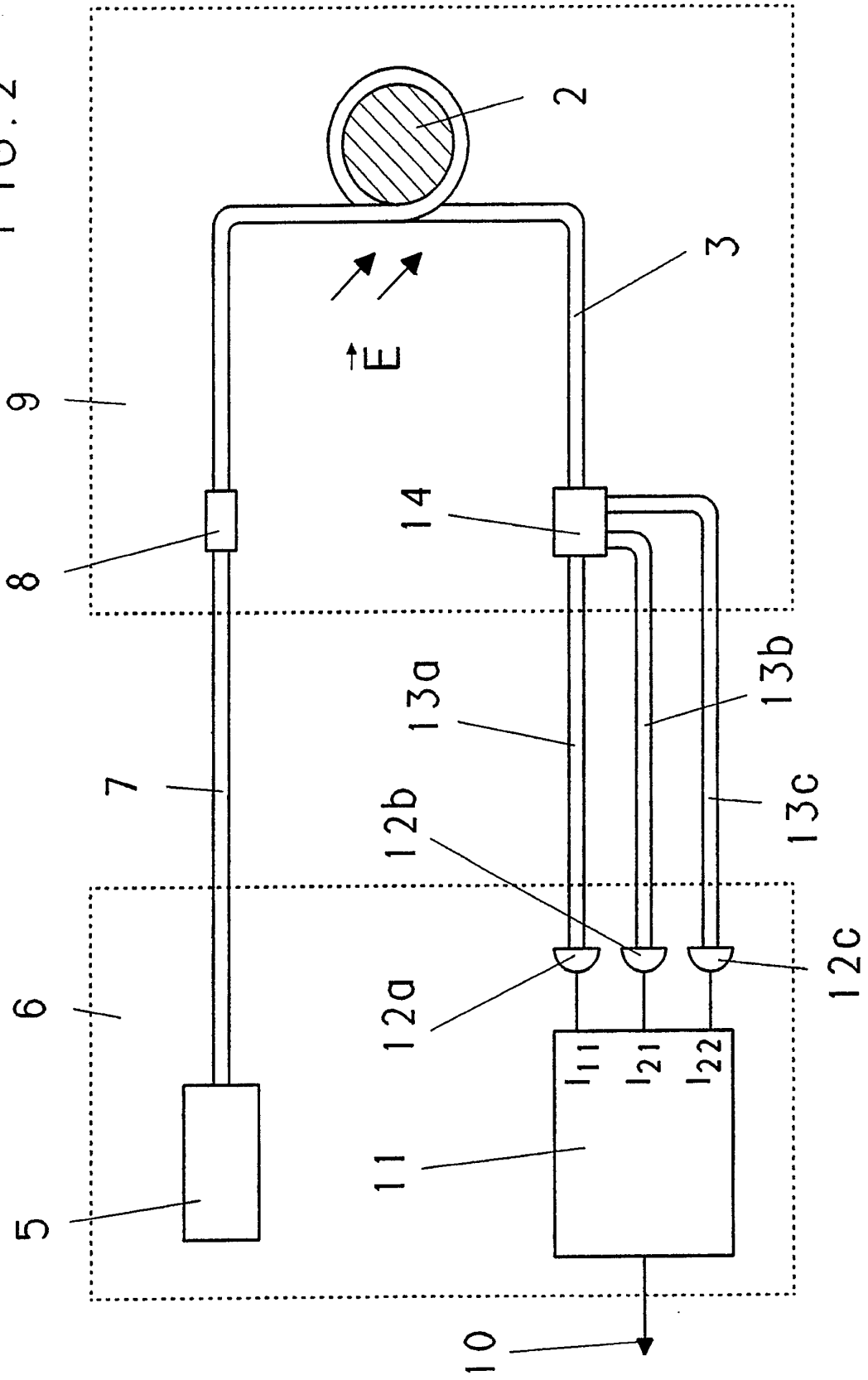
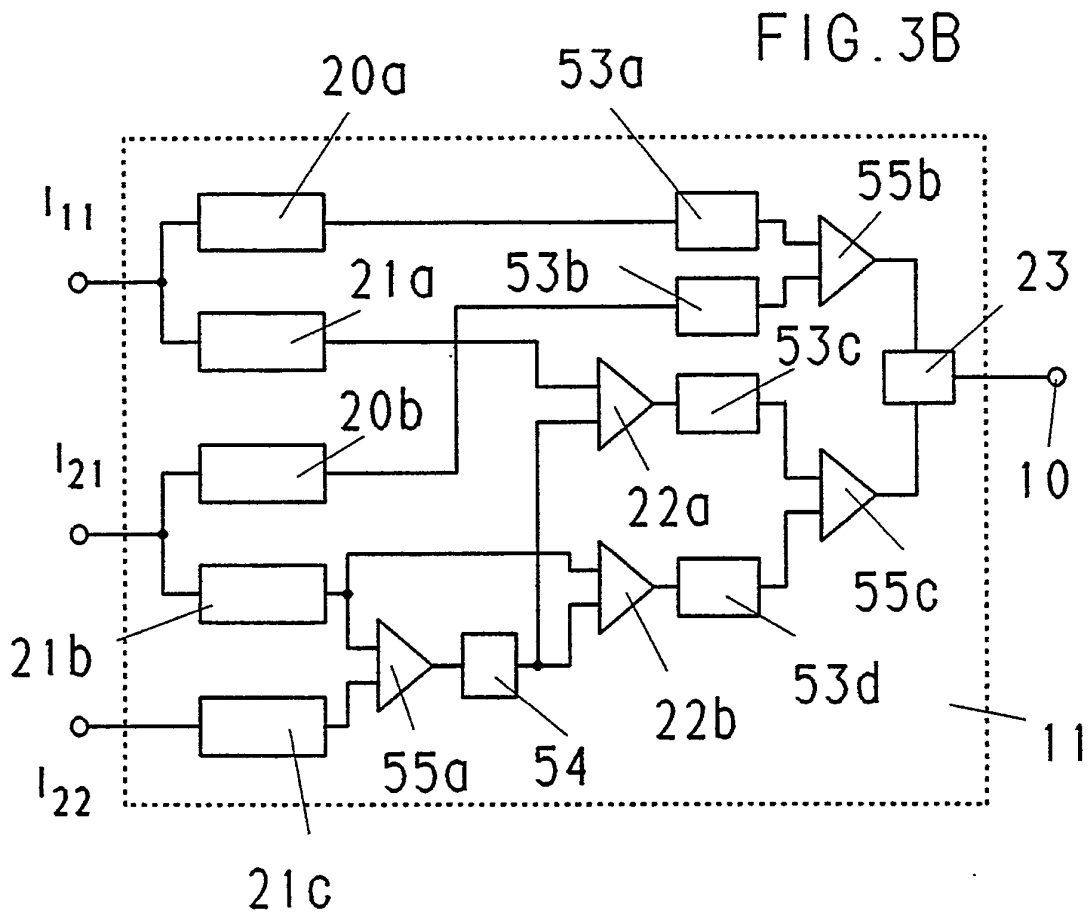
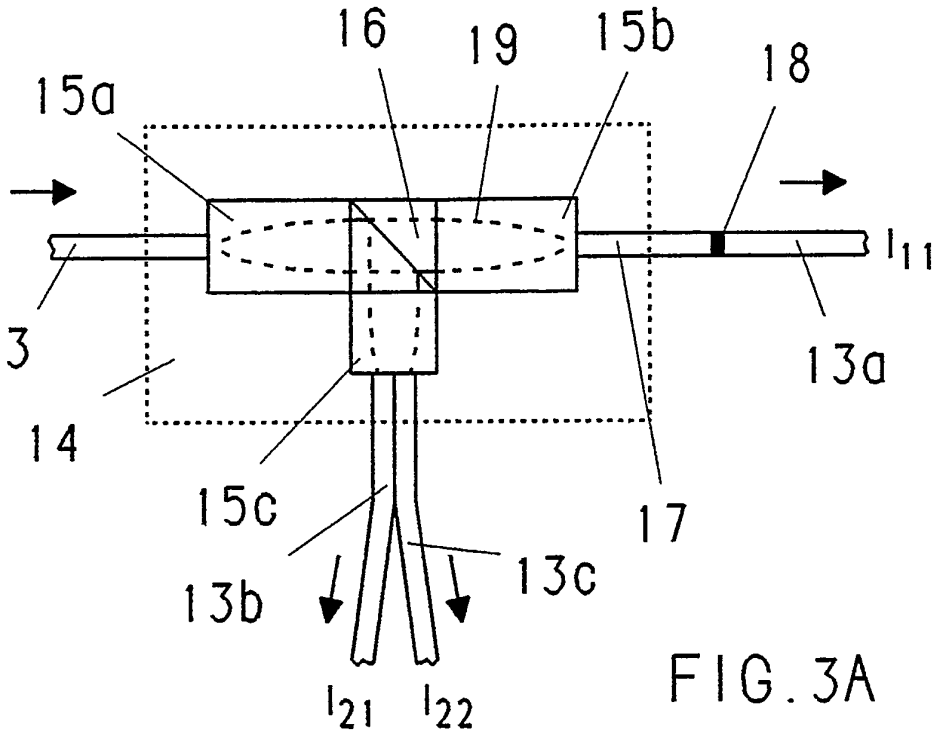


FIG. 2





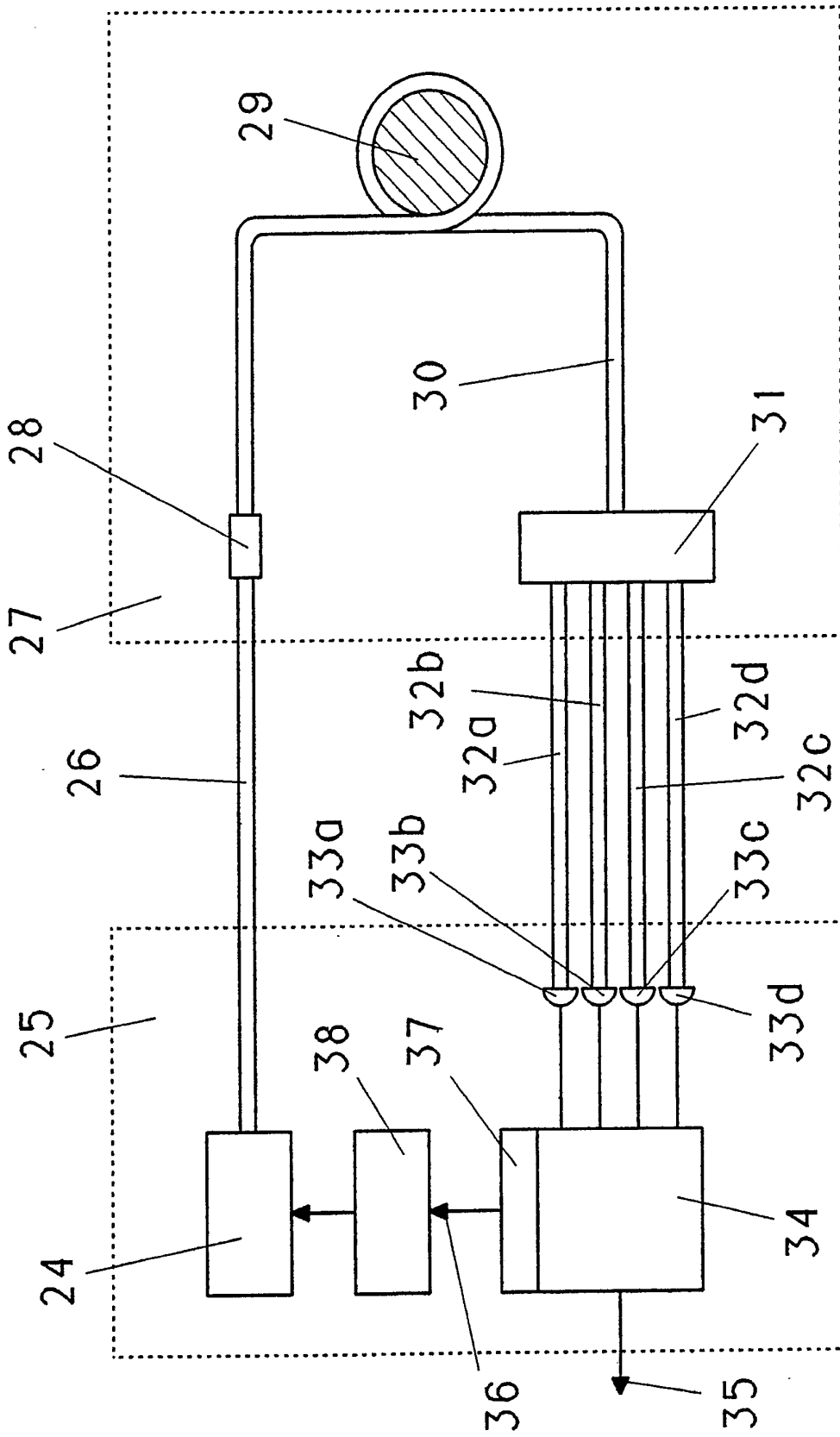
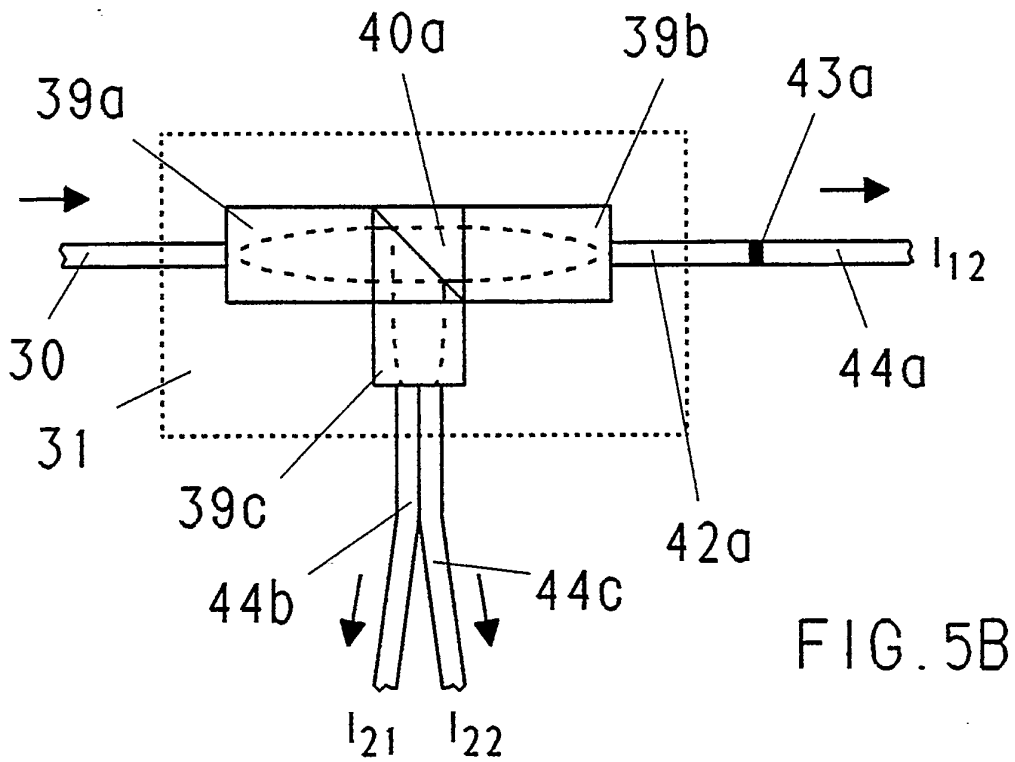
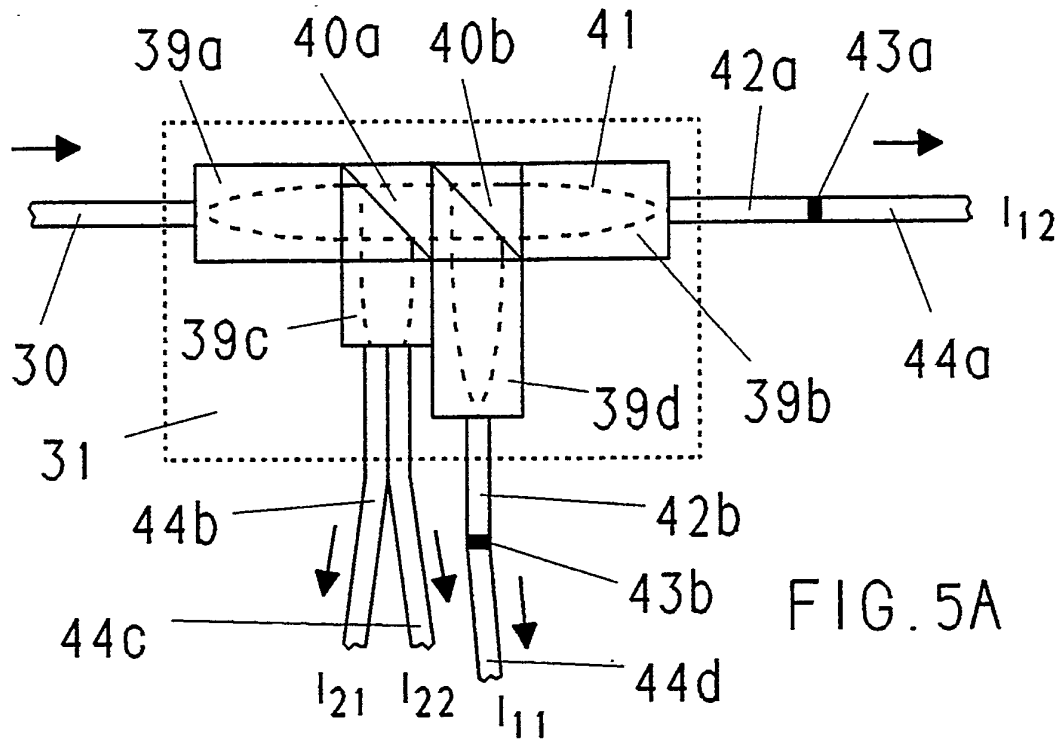
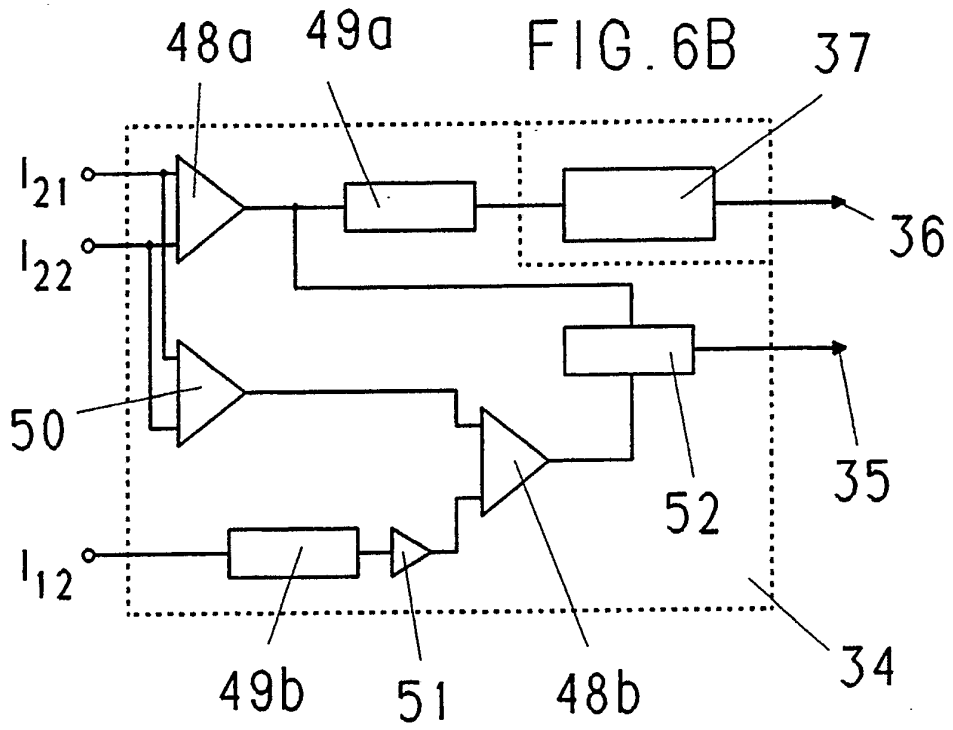
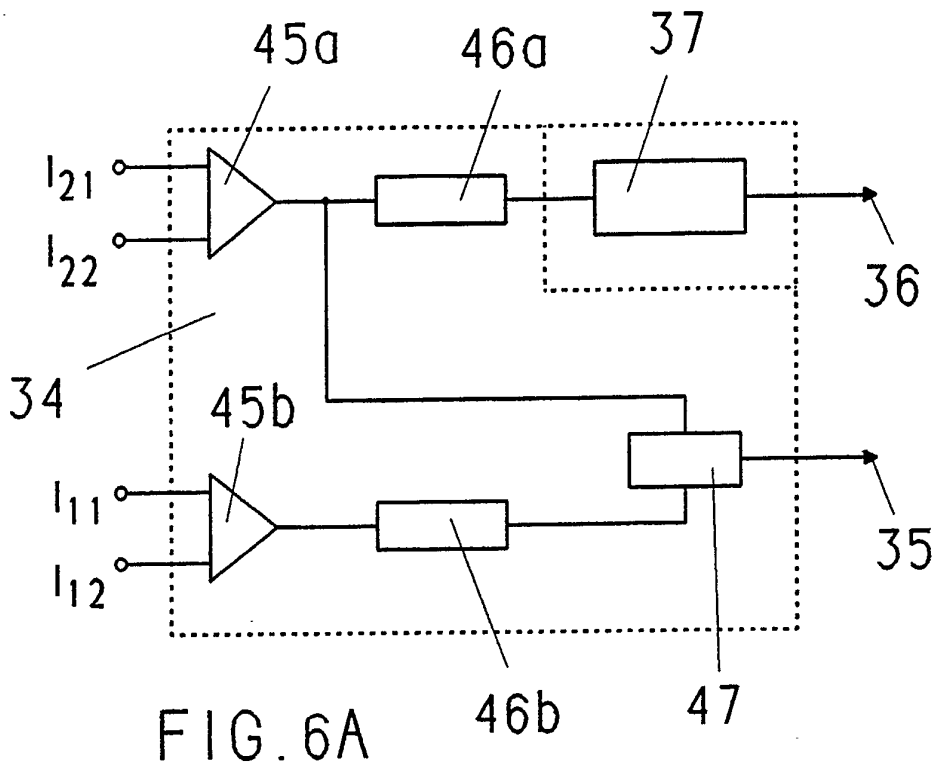


FIG. 4





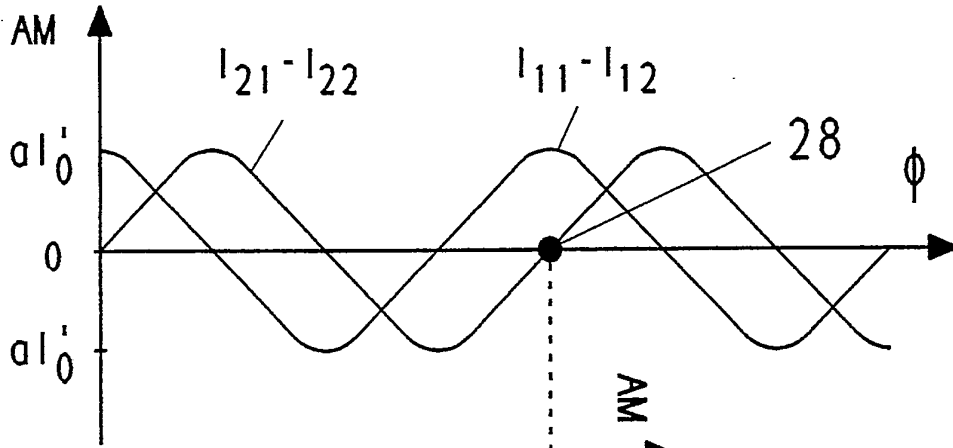


FIG. 7A

FIG. 7B

FIG. 8

