



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 699 23 577 T3 2009.05.14

(12) Übersetzung der geänderten europäischen Patentschrift

(97) EP 1 125 350 B2

(21) Deutsches Aktenzeichen: 699 23 577.4

(86) PCT-Aktenzeichen: PCT/US99/22960

(96) Europäisches Aktenzeichen: 99 950 116.6

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: WO 2000/025399

(86) PCT-Anmeldetag: 30.09.1999

(87) Veröffentlichungstag
der PCT-Anmeldung: 04.05.2000

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: 22.08.2001

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: 02.02.2005

(97) Veröffentlichungstag
des geänderten Patents beim EPA: 03.12.2008

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 14.05.2009

(51) Int Cl.⁸: **H01S 5/183 (2006.01)**

H01S 5/14 (2006.01)

H01S 3/094 (2006.01)

H01S 3/109 (2006.01)

H01S 3/108 (2006.01)

Patentschrift wurde im Einspruchsverfahren geändert

(30) Unionspriorität:

179022 26.10.1998 US

(73) Patentinhaber:

Coherent, Inc., Santa Clara, Calif., US

(74) Vertreter:

Blumbach Zinngrebe, 65187 Wiesbaden

(84) Benannte Vertragsstaaten:

AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,
LI, LU, MC, NL, PT, SE

(72) Erfinder:

CAPRARA, Andrea, Menlo Park, US; CHILLA, L.,
Juan, Sunnyvale, US; SPINELLI, A., Luis,
Sunnyvale, US

(54) Bezeichnung: OPTISCH GEPUMPTER HALBLEITERLASER MIT RESONATORINTERNER FREQUENZUMWANDLUNG

Beschreibung

[0001] Diese Erfindung betrifft einen Laser mit einer mehrlagigen oberflächenemittierenden Halbleiterverstärkungsstruktur, unterstützt von einem Substrat, wobei die Verstärkungsstruktur eine Vielzahl von aktiven Lagen enthält, welche durch Abstandslagen beabstandet sind; einem von ersten und zweiten Spiegeln abgeschlossenen Laserresonator, wobei die Verstärkungsstruktur in dem Laserresonator angeordnet ist; und einer Pumpstrahlungsquelle, welche dafür angeordnet ist, Pumpstrahlung an die Verstärkungsstruktur zum Erzeugen einer Laserstrahlung mit einer Grundfrequenz in dem Laserresonator zu liefern, wobei der Laserresonator eine Wellenlängen-selektive Vorrichtung enthält, um eine Frequenz der Laserstrahlung innerhalb einer Verstärkungsbandbreitenkennlinie der Zusammensetzung der Verstärkungsstruktur auszuwählen.

Diskussion des Stands der Technik

[0002] Resonatorintern frequenzverdoppelte Halbleiterlaser sind im Stand der Technik in zwei Klassen bekannt. Eine Klasse basiert auf kantenemittierenden Halbleiterlasern (Diodenlasern), die andere auf elektrisch angeregten oberflächenemittierenden Vertikalresonator-Lasern (VCSEL – vertical-cavity surface-emitting laser). In jeder Klasse muß zum zweckmäßigen Bewirken der resonatorinternen Verdopplung der Resonanzraum des Halbleiterlasers über die Halbleitervorrichtung hinaus ausgedehnt werden, was einen freien Raum hinterläßt, in welchem ein optisch nicht-linearer Kristall untergebracht werden kann, um die Frequenzverdoppelung zu bewirken. Dieses erfolgt üblicherweise durch die Bereitstellung einer Antireflexionsbeschichtung auf der emittierenden Oberfläche des Halbleiterlasers (welche ansonsten als ein Auskoppelspiegel dienen würde), und durch die Bereitstellung eines von dieser Oberfläche beabstandeten Außenspiegels, um denselben Zweck zu dienen. Eine derartige Anordnung wird üblicherweise als ein Außenresonator-Halbleiterlaser bezeichnet.

[0003] Der Wirkungsgrad einer Frequenzumwandlung in einem optisch nicht-linearen Kristall ist direkt proportional zu der Leistung (Intensität) der auf dem Kristall einfallenden Grundfrequenz. Dieses ist unabhängig davon der Fall, ob die Umwandlung eine Verdopplung in eine zweite harmonische Frequenz, eine Frequenzmischung zum Erzeugen dritter oder höherer ungeradzahliger harmonischer Frequenzen oder eine optisch parametrische Oszillation (OPO) ist. Demzufolge ist zum Beispiel für eine nützliche IC-Verdoppelung ein Hochleistungshalbleiterlaser (etwa 200 mW oder größer) unbedingt Voraussetzung. Leider tritt in beiden Klassen von Halbleiterlasern, welche bisher nach dem Stand der Technik für diesen Zweck verwendet wurden, eine zunehmende

Leistung auf Kosten einer abnehmenden Strahlqualität auf.

[0004] Ein kantenemittierender Halbleiterlaser beispielsweise ist inhärent eine Vorrichtung mit hoher Verstärkung, da das Laserlicht in einer Ebene der Lagen eine Resonanz hat, welche deren aktiven oder Verstärkungsbereich bilden. Da die Höhe (Dicke) dieser Verstärkungsbereichslagen durch elektrische Begrenzungs- und optische Begrenzungsgesichtspunkte beschränkt ist, muß die Ausgangsleistung durch Vergrößerung der Breite des Verstärkungsbereichs gesteigert werden. Wenn die Breite des Verstärkungsbereichs vergrößert wird (bis zu etwa dem Einhundertfachen seiner Höhe in Hochleistungsvorrichtungen), können mehr Moden oszillieren und der Ausgangsstrahl wird stark astigmatisch. Demzufolge wird die Konstruktion eines angemessenen Resonators zum Einkoppeln von Licht in einen optisch nicht-linearen Kristall darin, sowie hinsichtlich der allgemeinen Strahlqualität zunehmend schwieriger, wenn nicht unmöglich.

[0005] Ein VCSEL ist inhärent eine Vorrichtung mit relativ niedriger Verstärkung, da die Resonanz der Laserstrahlung senkrecht zu der Ebene der Lagen auftritt, welche deren aktiven Verstärkungsbereich bilden. Für einen relativ kleinen Strahldurchmesser, beispielsweise etwa 5 Mikrometer (μm) oder weniger, kann ein Einmodenbetrieb und eine hohe Strahlqualität erzielt werden. Verstärkung und Ausgangsleistung können zum Teil durch Erhöhen der Anzahl aktiver Schichten in dem Verstärkungsmedium verbessert werden. Dieses ist etwas hinsichtlich Überlegungen der die Halbleiterstruktur bildenden Materialeigenschaften eingeschränkt. Für eine weitere Zunahme in der Leistung muß jedoch die Fläche der emittierenden Oberfläche vergrößert werden. Eine Vergrößerung der emittierenden Oberfläche auf einen Durchmesser größer als etwa 5 μm führt unvermeidlich zunächst zu einem Mehrmodenbetrieb. Eine weitere Erhöhung des Durchmessers führt zu Problemen bei der Anregung des Lasers, da das elektrische Pumpen seitlich zugeführt werden muß. Um dieses gleichmäßig und effizient auszuführen, muß der elektrische Widerstand der den Laser bildenden Halbleiterlagen durch gesteigertes Dotieren vergrößert werden. Eine gesteigerte Dotierung verringert jedoch die Lichtdurchlässigkeit der Lagen und steigert den Resonatorverlust, so daß das Ziel der erhöhten Dotierung schnell sich selbst widersprechend wird.

[0006] In einem Artikel mit dem Titel "A CW External Cavity Surface-Emitting-Laser", Seiten 313 to 315 in IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 8, No. 3, März 1996, beschreiben J. V. Sandusky und S. R. J. Brueck einen Laser, in welchem eine Pumpstrahlungsquelle in der Form eines 715 nm CW Ring-Farbstofflasers mit einer auf den oberflächenemittierenden Laserwafer einfallenden Leistung von 50 mW auf

eine Strahltaille von 10 bis 15 μm fokussiert ist. Der Außenresonator wird als nahezu halbkugelförmig beschrieben und verwendet einen Auskopplungsreflektor mit 50 mm Außenkrümmungsradius. Der Laser arbeitete nur im Mehrmodenbetrieb, und die aufgezeichnete maximale Leistung war etwa 20 μW . Sandusky und Brueck stellen fest, daß: "der Mehrmodenbetrieb und die Effekte der Apertur noch nicht gut verstanden sind. Diese Autoren erwähnen auch, daß experimentelle Untersuchungen eines VCSEL-Betriebs in einem Außenresonator die Einfügung von Komponenten, wie z. B. einer Brewster-Winkelplatte zur Polarisationssteuerung oder eines resonatorinternen Etalons zur Abstimmungssteuerung in den Resonator ermöglichen.

[0007] Der in Optic Letters, vol. 16, no. 18, Seiten 1394–1396 veröffentlichte Artikel offenbart einen Laser mit den Merkmalen des Oberbegriffes des Anspruches 1.

[0008] Es besteht ein Bedarf für einen resonatorintern frequenzumgewandelten Außenresonator-Halbleiterlaser, welcher eine hohe frequenzumgewandelte Ausgangsleistung zusammen mit einer hohen Strahlqualität liefern kann.

[0009] Ein Laser gemäß der vorliegenden Erfindung wird in Anspruch 1 bereitgestellt. Weitere Ausführungsformen der Erfindung werden in den abhängigen Ansprüchen 2–10 definiert.

[0010] Nachteile des herkömmlichen resonatorintern (IC-)verdoppelten Außenresonator-Halbleiterlasers werden in einem Aspekt der vorliegenden Erfindung überwunden, indem ein an der vertikalen Oberfläche emittierender Laser in einer Weise verwendet wird, welche dessen inhärente gute Strahlqualität nutzt, und indem der Laser optisch statt elektrisch gepumpt wird, um eine hohe Pumpleistung in einen kleinen Strahldurchmesser zu liefern, um dadurch eine hohe Grundschwingungsleistung bereitzustellen und demzufolge eine hohe frequenzverdoppelte Leistung ohne die Strahlqualität zu opfern.

[0011] In einer bevorzugten Ausführungsform eines Vertikalresonator-Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung, welcher einen epitaxial aufgewachsenen monolithischen Halbleiter aufweist, enthält die mehrlagige Struktur einen Bragg-Spiegelabschnitt und einen Verstärkungsabschnitt mit einer Vielzahl durch Abstandslagen beabstandeter aktiver Lagen. Ein von der Halbleitermehrlagenstruktur getrennter externer Spiegel ist so angeordnet, daß er einen Laserresonator mit dem Bragg-Spiegelabschnitt der monolithischen Halbleitermehrfachlage bildet. Der Laserresonanzraum enthält den Verstärkungsabschnitt der monolithischen Halbleitermehrfachlage.

[0012] Eine Pumpstrahlungsquelle ist so eingerichtet, daß sie Pumpstrahlung in den Verstärkungsabschnitt der monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur liefert, um Laserstrahlung in dem Laserresonator zu erzeugen. Ein frequenzselektives (wellenlängenselektives) Element, wie z. B. ein doppelbrechendes Filter (BRF – birefringent filter), ein Etalon oder ein Dispersionsprisma ist in dem Laserresonanzraum zum Auswählen einer Frequenz (Wellenlänge) der Laserstrahlung innerhalb einer Verstärkungsbandbreitenkennlinie der Zusammensetzung des Verstärkungsabschnittes der monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur angeordnet. Ein optisch nicht-linearer Kristall ist in dem Resonanzraum zwischen dem doppelbrechenden Filter und dem externen Spiegel angeordnet und so eingerichtet, daß er die ausgewählte Frequenz der Laserstrahlung in eine gewünschte umgewandelte Frequenz umwandelt.

[0013] Die Erfindung wird nun beispielhaft unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben, in welchen:

[0014] [Fig. 1](#) schematisch eine bevorzugte Ausführungsform eines optisch gepumpten oberflächenemittierenden Außenresonator-Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung mit einem Außenresonanzraum mit einem für Frequenzverdoppelung eingerichteten optisch nicht-linearen Kristall darstellt,

[0015] [Fig. 2](#) schematisch eine weitere bevorzugte Ausführungsform eines optisch gepumpten oberflächenemittierenden Außenresonator-Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung mit einem Außenresonanzraum mit einem für Frequenzverdoppelung eingerichteten optisch nicht-linearen Kristall darstellt,

[0016] [Fig. 3](#) schematisch noch eine weitere bevorzugte Ausführungsform eines optisch gepumpten oberflächenemittierenden Außenresonator-Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung mit einem Außenresonanzraum mit einem für Frequenzverdoppelung eingerichteten optisch nicht-linearen Kristall darstellt,

[0017] [Fig. 4](#) schematisch noch eine weitere bevorzugte Ausführungsform eines optisch gepumpten oberflächenemittierenden Außenresonator-Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung mit einem Außenresonanzraum mit einem für nicht-kollinear gepumpte optisch parametrische Oszillation eingerichteten optisch nicht-linearen Kristall darstellt,

[0018] [Fig. 5](#) schematisch eine weitere bevorzugte Ausführungsform eines optisch gepumpten oberflächenemittierenden Außenresonator-Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung mit einem Außenresonanzraum mit einem für kollinear gepumpte optisch parametrische Oszillation eingerichteten optisch nicht-linearen Kristall darstellt.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0019] In den Zeichnungen, in welchen gleiche Komponenten mit gleichen Bezugszeichen bezeichnet sind, stellt [Fig. 1](#) eine bevorzugte Ausführungsform **10** eines optisch-gepumpten IC-verdoppelten Vertikalresonator-Lasers gemäß der vorliegenden Erfindung dar. Der Laser **10** enthält eine epitaxial aufgewachsene monolithische (oberflächenemittierende) Halbleiter-Mehrfachlagenstruktur **12**, die einen Bragg-Spiegelabschnitt **14** enthält, und einen Verstärkungsabschnitt **16** mit einer Vielzahl (nicht dargestellter) aktiver Lagen, die durch (nicht dargestellte) Abstandslagen beabstandet sind. Es sei hier angemerkt, daß der Begriff "Abstandslagen" in dem Zusammenhang dieser Beschreibung und der beigefügten Ansprüche auf eine oder mehrere die aktiven Lagen trennende Lagen zutrifft. Wenigstens eine derartige Lage absorbiert optische Pumpstrahlung. Abhängig von der Zusammensetzung dieser Lagen können eine oder mehrere andere Lagen zur Kompensation mechanischer Spannung enthalten sein. Derartige Anordnungen sind auf dem Gebiet der Halbleiterlaser allgemein bekannt, und jede derartige Anordnung ist in dem Zusammenhang der vorliegenden Erfindung anwendbar. Eine detaillierte Beschreibung derartiger Anordnungen ist für das Verständnis der Prinzipien der vorliegenden Erfindung nicht erforderlich, und wird demzufolge hierin nicht präsentiert.

[0020] Die monolithische Halbleitermehrlagenstruktur **12** ist mit einem Substrat oder einer Wärmesenke **18** verbunden. Die monolithische Halbleitermehrlagenstruktur **12** kann optional eine (nicht dargestellte) Antireflexionsbeschichtung auf einer äußersten Oberfläche (der emittierenden Oberfläche) des Verstärkungsbereiches **16** enthalten.

[0021] Ein externer Spiegel **20** und ein Faltspiegel **22** sind so angeordnet, daß der externe Spiegel **20** und der Bragg-Spiegelabschnitt **14** der monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur **12** einen Laserresonanzraum **23** ausbilden. Der Verstärkungsabschnitt **16** der monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur **12** ist dadurch in dem Laserresonanzraum **23** enthalten.

[0022] Eine Pumpstrahlungsquelle **24** ist dafür eingerichtet, Pumpstrahlung einem Verstärkungsabschnitt **16** der monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur **12** über ihre emittierende Oberfläche zuzuführen, um Laserstrahlung in dem Laserresonanzraum **23** zu erzeugen. Eine auf diese Weise erzeugte Grundstrahlung zirkuliert in dem Laserresonanzraum **23** entlang der (hier gefalteten) Resonatorachse **26**, wie es durch einfache Pfeilspitzen dargestellt ist. Die Pumpstrahlungsquelle **24** ist bevorzugt ein kantennemittierender Halbleiterdiodenlaser **28** oder ein Array derartiger Laser. Zur Vereinfachung ist Pumpstrahlung **29** aus dem Diodenlaser **28** in [Fig. 1](#) als ein di-

vergenter Strahl dargestellt, der direkt auf eine Fokussierungslinse **30** auftrifft, um auf einen Verstärkungsabschnitt **16** einer monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur **12** fokussiert zu werden. Ein Vorteil der Konfiguration des Lasers **10** besteht darin, daß die Pumpstrahlung an den Verstärkungsabschnitt der Halbleiterlagenstruktur **12** ohne Durchquerung irgendeiner anderen Resonanzraumkomponente geliefert werden kann. Ein weiterer Vorteil der Konfiguration des Lasers **10** besteht darin, daß eine oder mehrere zusätzliche Pumpstrahlungsquellen verwendet werden können, um zusätzliche Pumpstrahlung auf den Verstärkungsabschnitt **16** der monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur **12** zu liefern, wie in [Fig. 1](#) durch die Pfeile **29A** angedeutet.

[0023] Die Linse **30** ist zu Vereinfachung in [Fig. 1](#) als nur ein positives Element dargestellt. Der Fachmann auf diesem Gebiet wird erkennen, daß die Linse **30** zwei oder mehrere Elemente enthalten kann, und er wird auch erkennen, daß eine oder mehrere zylindrische oder anamorphe Elemente erforderlich sein können, um den inhärenten Astigmatismus im Strahl **29** zu kompensieren. Der Fachmann auf diesem Gebiet wird ferner ohne zusätzliche Darstellung erkennen, daß Licht aus dem Diodenlaser **29** gesammelt und zu der Linse **30** über einen optischen Wellenleiter oder eine optische Faseranordnung transportiert werden kann.

[0024] Ein optisch nicht-linearer Kristall **32** ist in dem Laserresonanzraum **23** angeordnet und dafür eingerichtet, eine vorbestimmte Frequenz einer Laser-Grundstrahlung zu verdoppeln, die aus einem Spektrum derartiger durch ein Verstärkungsbandbreitenprodukt definierter Frequenzen ausgewählt ist. Die frequenzverdoppelte Strahlung zirkuliert nur in einem Arm **23a** des Laserresonanzraums **23**, wie es durch doppelte Pfeilspitzen dargestellt ist. Die Verstärkungsbandbreite ist für die Zusammensetzung des Verstärkungsbereiches **16** der monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur **12** charakteristisch. Die frequenzverdoppelte Strahlung wird aus dem Laserresonanzraum **23** über den Faltspiegel **22** entnommen, welcher für eine hohe Reflektivität bei der Grundwellenlänge und für eine hohe Transmission bei der zweiten harmonischen (frequenzverdoppelten) Wellenlänge beschichtet ist.

[0025] Ein doppelbrechendes Filter **34** ist im Arm **23B** des Laserresonanzraums **23** zum Auswählen der vorbestimmten Frequenz der Laserstrahlung angeordnet. Ein frequenz-(wellenlängen)-selektives Element, wie zum Beispiel ein Doppelbrechungsfilter **34**, ein unbeschichtetes Etalon, oder ein Dispersionsprisma ist in dem erfindungsgemäßen Laser unter anderem aus zwei Gründen vorteilhaft.

[0026] Einerseits können Schwankungen in der Zusammensetzung des Verstärkungsbereiches **16** der

monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur **12** aufgrund von Steuerungstoleranzen in der Herstellung erwartungsgemäß eine entsprechende Schwankung der Grundfrequenz erzeugen. Typischerweise überschreitet diese Schwankung nicht die Verstärkungsbandbreite. Demzufolge stellt das doppelbrechende Filter **34** sicher, daß die Grundlaserstrahlung immer dieselbe Frequenz trotz Fertigungsschwankungen in der Halbleitermehrlagenstruktur aufweist. Dieses ist von selbst aus Gründen der Herstellungsqualität und Konsistenz in einem optisch gepumpten Externresonanzraumhalbleiterlaser vorteilhaft, unabhängig davon, ob die Laserfrequenz innerhalb des Resonators verdoppelt wird oder nicht.

[0027] Andererseits wird typischerweise in jedem Falle ein optisch nicht-linearer Kristall zum Frequenzverdoppeln einer spezifischen Frequenz angeordnet. Da der Verdopplungsprozess einen Verlust in dem Laserresonanzraum darstellt, wird der Resonator bei einem gegebenen Verstärkungsmedium mit ausreichender Verstärkungsbandbreite versuchen, mit einer anderen Frequenz als der zu verdoppelnden Frequenz zu schwingen (sogenanntes "Wellenlängenspringen"), um den Verlust zu vermeiden. Die Folge davon ist eine unkontrollierte Modulation oder Rauschen, wenn nicht ein vollständiger Verlust der frequenzverdoppelten Ausgangsleistung. Der Einschluß eines doppelbrechenden Filters **34** zwingt den Laserresonanzraum **23** nur bei der zu verdoppelnden ausgewählten Frequenz zu schwingen, wodurch eine Frequenzverdoppelung und eine Beseitigung des Rauschens aufgrund von Wellenlängenspringen erzwungen werden.

[0028] Optisches Pumpen erlaubt das Liefern einer hohen Pumpleistung in einen relativ kleinen Strahl durchmesser auf den Verstärkungsbereich **16** der monolithischen Halbleitermehrlagenstruktur **12**. In diesem Falle arbeitet bei gegebener geeignet stabiler Resonatorkonfiguration für den Laserresonanzraum **23** der Resonator inhärent in einem Einmodenbetrieb. Ein derartiger Resonanzraum wird hierin nachstehend im Detail weiter diskutiert. Ein Einmodenbetrieb erzeugt nicht nur eine hohe Strahlqualität, sondern schließt auch eine Ausgaberauschphänomen-Charakteristik eines unkontrollierten Mehrmodenbetriebs, wie z. B. Modenkopplung und Summenfrequenzerzeugung im optisch nicht-linearen Kristall **32** aus. Demzufolge stellt der Einmodenbetrieb bei hoher Pumpleistung, kombiniert mit der Elimination von Wellenlängenspringen durch das BRF **34** sicher, daß eine frequenzverdoppelte Ausgangsstrahlung mit hoher Leistung und niedrigem Rauschen mit hoher Strahlqualität verfügbar ist. In einem bevorzugten Beispiel eines IC-verdoppelten, optisch gepumpten Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung enthält die Halbleitermehrlagenstruktur **12** einen BraggSpiegelabschnitt **14**, welcher aus abwechselnden Schichten aus Galliumarsenid (GaAs) und Alu-

minumarsenid (AlAs) besteht, und einen Verstärkungsabschnitt **16**, welcher **15** aktive Lagen aus Indiumgalliumarsenid (InGaAs) beabstandet durch Abstandsschichten aus Indiumgalliumarsenidphosphid (InGaSP) aufgebaut ist. Die aktive Lagenzusammensetzung stellt eine Grundlaserstrahlung mit einem Ausgangsspektrum nominell um eine Wellenlänge von etwa 976 nm zentriert bereit. Die Pumplichtquelle **24** liefert etwa 1,0 Watt an Pumpleistung bei einer Wellenlänge von etwa 808 nm n den Verstärkungsabschnitt **16** der Halbleitermehrlagenstruktur **12**.

[0029] Das doppelbrechende Filter **34** ist so eingerichtet, daß es die Grundstrahlung von 976 nm auswählt. Der optisch nicht-lineare Kristall **32** ist ein LBO (Lithiumtriborat LiB_3O_5) Kristall von 5 mm Länge und ist für eine Typ I Phasenanpassung eingerichtet. Es sei hier angemerkt, daß, obwohl LBO ein bevorzugter optisch nicht-linearer Kristall ist, jeder andere optisch nicht-lineare Kristall beispielsweise Kaliumniobat (KNbO_3) oder Kaliumtitanylphosphat (KTP) verwendet werden kann.

[0030] Der externe Spiegel **20** ist ein ebener Spiegel, der für eine hohe Reflektivität bei der Grundwellenlänge und der halben Grundwellenlänge (harmonischen Wellenlänge) beschichtet ist. Der Faltspiegel **22** besitzt einen Krümmungsradius von 25,0 mm und ist etwa 18 mm von dem externen Spiegel **20** entfernt angeordnet. Der Faltspiegel **22** ist für hohe Reflektivität bei der Grundwellenlänge und hohe Transmission bei der harmonischen Wellenlänge beschichtet. Die Halbleitermehrfachlagenstruktur **12** ist etwa 26 mm von dem Faltspiegel **22** entfernt angeordnet. Diese Resonanzraumanordnung erzeugt eine Strahltafel zwischen dem Faltspiegel **22** und dem externen Spiegel **20**. Der optisch nicht-lineare Kristall **32** ist an einer Position angeordnet, welche mit der Strahltafel mit minimalem Durchmesser übereinstimmt. Die Strahltafel hat bei den $1/e^2$ -Punkten etwa 50 μm Durchmesser. In diesem Beispiel wird eine Ausgangsleistung von etwa 50,0 mW bei einer Wellenlänge von etwa 488 nm erhalten.

[0031] Es sei hier angemerkt, daß ein IC-verdoppelter optisch gepumpter Halbleiterlaser gemäß der vorliegenden Erfindung nicht auf die Verwendung mit Materialien der vorstehend angegebenen oberflächenemittierenden Halbleitermehrlagenstruktur beschränkt ist. Jede oberflächenemittierende aktive Halbleitermehrlagen-Lagenstruktur kann verwendet werden einschließlich, jedoch nicht beschränkt auf InGaAs/GaAs, AlGaAs/GaAs, InGaAsP/GaAs und InGaN/Al₂O₃ (Indiumgalliumnitrid/Aluminiumoxidlaser). Diese liefern jeweils Grundwellenlängen in den Bereichen von etwa 850 bei 1100 nm; 700 bis 850 nm; 620 bis 700 nm; und 425 bis 550 nm. Eine Frequenzverdoppelung gemäß der vorliegenden Erfindung kann somit Ausgangswellenlängen bereitstellen, welche von dem grünen bis in den ultravioletten

Bereich des elektromagnetischen Spektrums reichen. Der Fachmann auf diesem Gebiet wird erkennen, daß in den vorgenannten Bezeichnungen für die aktive Lagenstruktur die Verbindung auf der linken Seite des Schrägstreichs das aktive Lagenmaterial darstellt, und die Verbindung auf der rechten Seite des Schrägstreichs das Substrat darstellt, auf welches die Halbleiterlagenstruktur epitaxial aufgewachsen ist.

[0032] Ein IC-verdoppelter optisch gepumpter Halbleiterlaser gemäß der vorliegenden Erfindung ist nicht auf die gefaltete Resonanzraumanordnung von [Fig. 1](#) beschränkt. Der Fachmann auf diesem Gebiet wird weitere Resonanzraumanordnungen ohne weitere Darstellung kennen, welche in der vorliegenden Erfindung angewendet werden können. Beispiele alternativer Resonanzraumanordnungen werden nachstehend dargestellt.

[0033] In [Fig. 2](#) ist eine weitere Ausführungsform 11 eines optisch gepumpten, IC-verdoppelten oberflächenemittierenden Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung dargestellt. Hier wird ein Laserresonanzraum 21 durch einen ebenen externen Spiegel 20 abgeschlossen, welcher für hohe Reflektivität bei der Grundwellenlänge und der harmonischen Wellenlänge beschichtet ist, und durch einen konkaven externen Spiegel 22, der für maximale Reflektivität bei der Grundwellenlänge beschichtet ist. Die Achse 26 des Resonanzraums 23 wird durch einen Bragg-Spiegelabschnitt 14 der Halbleitermehrlagenstruktur 12 gefaltet. Pumpstrahlung wird dem Verstärkungsabschnitt 16 der Halbleitermehrlagenstruktur 12 gemäß vorstehender Beschreibung unter Bezugnahme auf den Laser 10 zugeführt.

[0034] Ein wellenlängenselektives Element 34 und ein optisch nichtlinearer Kristall 32 sind in Armen 21B bzw. 21A des Laserresonanzraums 21 enthalten. Die frequenzverdoppelte Strahlung wird aus dem Resonanzraum 21 durch einen Strahlteiler 25 reflektiert, welcher für eine hohe Reflektivität bei der harmonischen Wellenlänge und eine hohe Durchlässigkeit bei der Grundwellenlänge beschichtet ist.

[0035] Die Verwendung der Halbleitermehrlagenstruktur als ein Faltspiegel, wie es vorstehend diskutiert wurde, kann vorteilhaft dazu genutzt werden, um zusätzliche Leistung in Konfigurationen des Lasers in Abhängigkeit von der vorliegenden Erfindung zu erzeugen, indem ein Resonator zwei- oder mehrmals (in einer "Z"-, "W"- oder im allgemeinen Zickzackform) unter Verwendung von zwei oder mehr Halbleitermehrlagenstrukturen 12 (jede getrennt optisch gepunkt) als Faltspiegel gefaltet wird. Aus der vorstehend gegebenen Beschreibung sind derartige Konfigurationen für den Fachmann auf diesem Gebiet ohne weitere detaillierte Beschreibung oder Darstellung ersichtlich.

[0036] In [Fig. 3](#) ist eine weitere Ausführungsform 13 eines optisch gepumpten, IC-verdoppelten Vertikalresonatorlasers gemäß der vorliegenden Erfindung dargestellt. Der Laser 13 enthält einen geraden Resonanzraum 25, abgeschlossen durch den Bragg-Spiegelabschnitt 14 der Halbleitermehrlagenstruktur 12 und einen konkaven Spiegel 22, welcher für hohe Reflektivität bei der Grundwellenlänge und hohe Transmission bei der harmonischen Wellenlänge beschichtet ist, um die Ausgabe der frequenzverdoppelten Strahlung zu ermöglichen. Der Resonanzraum 25 enthält einen optisch nicht-linearen Kristall 32 und ein wellenlängenselektives Element 34, welche, wie es vorstehend unter Bezugnahme auf die Laser 10 und beschrieben wurde, funktionieren. Die Pumpstrahlung wird an den Verstärkungsabschnitt 16 der Halbleitermehrlagenstruktur 12 geliefert, wie es vorstehend unter Bezugnahme auf die Laser 10 und 11 beschrieben wurde.

[0037] Der Laser 13 ist im Aufbau deutlich einfacher als die vorstehend beschriebenen Laser 10 und 11, hat jedoch einen deutlichen Nachteil im Vergleich dagehend, daß die frequenzverdoppelte Strahlung, die durch die Grundstrahlung erzeugt wird (und in derselben Richtung wandert), die den optisch nicht-linearen Kristall 32 in einer Richtung zu der Halbleitermehrlagenstruktur 12 durchquert, im wesentlichen vollständig durch die Absorption in der Halbleitermehrlagenstruktur verloren geht, was im wesentlichen 100% für die harmonische Wellenlänge ist. Die Laser 10 und 11 sind neben anderen Gründen so konfiguriert, daß der Verlust der harmonischen Strahlung in der Halbleiterlagenstruktur vermieden wird.

[0038] Wie vorstehend erwähnt, ist die Einfügung eines wellenlängenselektiven Elementes 34 in einen optisch gepumpten oberflächenemittierenden Außenresonator-Halbleiterlaser von selbst nützlich, das heißt selbst bei Fehlen eines resonatorinternen optisch nicht-linearen Kristalls, da er einen Laser mit einer konstanten gewünschten Frequenz bereitstellen kann, der in der Lage ist, die der Halbleiterprozesssteuerung inhärenten Einschränkungen zu tolerieren. Es sei auch angemerkt, daß ein getrenntes wellenlängenselektives Element weggelassen werden kann, wenn wenigstens einer von den Spiegeln 20, 22 oder 23 mit einem hochselektiven Bandpaßfilter, wie zum Beispiel einem sehr feinstufigen Etalon oder dergleichen versehen ist, das in einem reflektiven Modus verwendet wird. In diesem Falle kann der Spiegel selbst als das wellenlängenselektive Element im Zusammenhang mit der Auswahl einer speziellen Frequenz aus einer Verstärkungsbandbreite ausgelegt sein.

[0039] Obwohl IC-frequenzumgewandelte optische gepumpte Halbleiterlaser gemäß der vorliegenden Erfindung als IC-frequenzverdoppelte Laser beschrieben wurden, sollte dieses nicht als Einschrän-

kung der vorliegenden Erfindung betrachtet werden. Der Fachmann auf diesem Gebiet wird ohne weitere detaillierte Beschreibung oder Darstellung erkennen, daß Prinzipien der Erfindung in gleicher Weise für die Umwandlung in höhere harmonische Frequenzen durch die Hinzufügung von einem oder mehreren zusätzlichen resonatorinternen optisch nicht-linearen Kristallen in dem Resonanzraum möglich sind.

[0040] Dieses kann beispielsweise ausgeführt werden, um die Frequenz der bereits frequenzverdoppelten Strahlung zu verdoppeln, und dadurch eine Strahlung einer vierten Harmonischen zu erzeugen, oder um die Grund- und zweite harmonische Strahlung zu mischen, um eine Strahlung der dritten Harmonischen zu erzeugen.

[0041] In einem IC-frequenzumgewandelten und optisch gepumpten Halbleiterlaser gemäß der vorliegenden Erfindung kann auch ein optisch nicht-linearer Kristall **32** ausgewählt und angeordnet werden, um einen parametrischen Mischprozess und eine optische parametrische Oszillation (OPO) zu erzeugen.

[0042] Ein parametrischer Mischprozess in dem nicht-linearen Kristall erzeugt eine optische Verstärkung durch Umwandlung parametrischer Pumpstrahlung bei einer Grundfrequenz ω_{pump} in Licht bei optischen Ausgangs-(umgewandelten)-frequenzen ω_{signal} (Signallicht oder Signalfrequenz) und ω_{idler} (Zwischenfrequenz). Diese Frequenzen haben eine nicht-geradzahlige Beziehung zueinander und die Bezeichnung, welche Ausgangsfrequenz das Signallicht ist, ist beliebig.

[0043] Ein optischer Resonanzraum liefert eine Rückkopplung von verstärktem Signallicht, was zu einer dauernden Strahlung oder Resonanz des Signallichts und der Produktion einer nutzbaren Signallichtabgabe führt. Wie es im Fachgebiet allgemein bekannt ist, können die Signalfrequenz (und die entsprechende Zwischenfrequenz) kontinuierlich über einen Bereich von Frequenzen abgestimmt werden. Die Abstimmung kann beispielsweise durch Einstellen des Winkels des optischen nicht-linearen Kristalls in Bezug auf den Pumpstrahl erzeugt werden. Ein bevorzugtes optisch nicht-lineares Kristallmaterial zur Erzeugung einer parametrischen Mischung ist Beta-bariumborat ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ oder BBO).

[0044] [Fig. 4](#) stellt eine weitere Ausführungsform **15** eines optisch gepumpten, IC-frequenzverdoppelten Halbleiterlasers gemäß der vorliegenden Erfindung dar, wobei der optisch nicht-lineare Kristall **32** für eine optisch parametrische Oszillation angeordnet ist. Der Laser **15** enthält einen geradlinigen Laserresonanzraum **25** mit einem wellenlängenselektiven Element **34** und einem optisch nicht-linearen Kristall **32** und wird optisch wie vorstehend für den Laser **13** von [Fig. 3](#) beschrieben gepumpt.

[0045] Eine optisch parametrische Oszillation wird hier in einer sogenannten nicht-kollinear gepumpten Anordnung erzielt, für welche ein getrennter Resonanzraum **39** vorgesehen ist. Der Resonanzraum **39** besitzt eine Resonatorachse **41**, die in einem Winkel α zu einer Resonatorachse **26** des Resonators **25** geneigt und durch Spiegel (Reflektoren) **40** und **42** abgeschlossen ist.

[0046] Der Winkel α ist in [Fig. 4](#) zur Erleichterung der Darstellung etwas übertrieben. Der Spiegel **40** ist bei der umgewandelten Frequenz (Signalwellenlänge) hoch reflektiv. Der Spiegel **42** ist bei der Signallichtwellenlänge teilreflektiv und teildurchlässig und dient als ein Auskopplungsspiegel für das Signallicht aus dem Resonanzraum **39**.

[0047] Eine optisch parametrische Oszillation ist auch in sogenannten kollinear gepumpten Anordnungen möglich, in welchen Signallicht und parametrisches Pumplicht durch den optisch nicht-linearen Kristall im allgemeinen entlang einer gemeinsamen Achse oszillieren. [Fig. 5](#) stellt einen derartigen Laser **17** dar. Der Laser **17** enthält einen geradlinigen Laserresonanzraum **25** mit einem wellenlängenselektiven Element **34** und einem optisch nicht-linearen Kristall **32** und wird optisch wie vorstehend für den Laser **13** von [Fig. 3](#) beschrieben gepumpt. Außerdem ist in dem Resonator **25** ein Strahlteilerelement **37** enthalten, das für hohe Reflektivität bei der Signallichtwellenlänge und hohe Transmission bei der Grundwellenlänge beschichtet ist. Zusammenwirkend mit dem Strahlteiler **37** und dem Spiegel **22**, welches für Teilreflektivität bei der Signallichtwellenlänge und hohe Reflektivität bei der Grundwellenlänge beschichtet ist, bildet ein für hohe Reflektivität sowohl bei der Signallicht als auch Grundwellenlänge beschichteter Spiegel **52** einen OPO-Resonator **50**. Der OPO-Resonator **50** besitzt eine Achse **56**, welche zu der Achse **26** des Resonators **25** in dem optisch nicht-linearen Kristall **32** kollinear ist.

[0048] Ausführungsformen von Lasern gemäß der vorstehend diskutierten vorliegenden Erfindung enthalten alle ein wellenlängenselektives Element zum Erzwingen eines Einmodenbetriebs und zum Verhindern von Wellenlängenspringen.

[0049] Die vorliegende Erfindung wurde im Hinblick auf bevorzugte und weitere Ausführungsformen beschrieben und dargestellt.

[0050] Die Erfindung ist jedoch nicht auf die beschriebenen und dargestellten Ausführungsformen beschränkt. Statt dessen ist die Erfindung durch die hierin nachstehend beigefügten Ansprüche definiert.

Patentansprüche

1. Laser mit:

einer mehrlagigen oberflächen-emittierenden Halbleiterverstärkungsstruktur (16), unterstützt von einem Substrat (18), wobei die Verstärkungsstruktur eine Vielzahl von aktiven Lagen enthält, welche durch Abstandslagen beabstandet sind, wobei die emittierende Oberfläche der Verstärkungsstruktur (16) in Bezug auf das Substrat (18) am weitesten außen liegt; einem von ersten und zweiten Spiegeln (14, 20) abgeschlossenen Laserresonator (23) mit einer Resonatorachse (26), wobei die Verstärkungsstruktur (16) in dem Laserresonator (23) angeordnet ist; einer Diodenlaser-Pumpstrahlungsquelle (24), welche dafür eingerichtet ist, Pumpstrahlung zu der Verstärkungsstruktur (16) zum Erzeugen einer Laserstrahlung mit einer Grundfrequenz in dem Laserresonator (23) zu liefern, und einem ersten optisch nicht-linearen Kristall (32), der in dem Laserresonator (23) angeordnet und dafür eingerichtet ist, die Grundfrequenz in Licht mit zumindest einer unterschiedlichen Frequenz umzuwandeln, um dadurch eine frequenzumgewandelte Strahlung zu erzeugen,

dadurch gekennzeichnet, dass

die Pumpstrahlungsquelle (24) dafür eingerichtet ist, die Pumpstrahlung durch die emittierende Oberfläche hindurch in die Verstärkungsstruktur (16) zu liefern; und

ein Doppelbrechungsfilter (34) in dem Laserresonator (23) angeordnet ist, um eine Frequenz der Laserstrahlung innerhalb einer charakteristischen Verstärkungsbandbreitenkennlinie der Zusammensetzung der Verstärkungsstruktur auszuwählen und den Laser zu zwingen mit der umzuwandelnden Frequenz zu resonieren.

2. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserresonator (25) als ein geradliniger Resonator mit dem ersten Spiegel (22) beabstandet von der Verstärkungsstruktur (16) konfiguriert ist, und dadurch, daß der zweite Spiegel (14) ein von der Verstärkungsstruktur (16) überbauter Bragg-Spiegel ist, und zwischen der Verstärkungsstruktur (16) und dem Substrat (18) angeordnet ist.

3. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserresonator (21) als ein gefalteter Resonator konfiguriert ist, wobei die ersten und zweiten Spiegel (20, 22) von der Verstärkungsstruktur (16) beabstandet sind, und dadurch, dass die Verstärkungsstruktur (16) einen Bragg-Spiegel (14) überbaut, der zwischen der Verstärkungsstruktur (16) und dem Substrat (18) angeordnet ist und als ein Faltspiegel zum Falten des Resonators dient.

4. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der erste optisch nicht-lineare Kristall (32) dafür ausgewählt und angeordnet ist, die Grundfrequenz der Laserstrahlung zu verdoppeln, wodurch die frequenzumgewandelte Strahlung die Strahlung der zweiten Oberwelle ist.

5. Laser nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserresonator (23) in erste und zweite Abschnitte (23A, 23B) durch einen zwischen den ersten und zweiten Spiegeln (14, 20) angeordneten dritten Spiegel (22) gefaltet ist, wobei der erste Abschnitt (23A) zwischen den zweiten und dritten Spiegeln (20, 22) liegt und der zweite Abschnitt (23B) zwischen den ersten und dritten Spiegeln (14, 22) liegt, und der erste optisch nicht-lineare Kristall (32) und die Verstärkungsstruktur (16) sich in dem ersten beziehungsweise zweiten Abschnitt (23A, 23B) des Laserresonators (23) befinden.

6. Laser nach Anspruch 4 oder 5, gekennzeichnet durch einen zweiten optisch nicht-linearen Kristall, der in dem Laserresonator angeordnet und dafür eingerichtet ist, die Frequenz der Strahlung der zweiten Oberwelle zu verdoppeln, und dadurch eine Strahlung einer vierten Oberwelle zu erzeugen.

7. Laser nach Anspruch 4 oder 5, gekennzeichnet durch einen zweiten optischen nicht-linearen Kristall, der in dem Laserresonator angeordnet und dafür eingerichtet ist, die Strahlung der zweiten Oberwelle mit der ausgewählten Frequenz der Strahlung zu mischen, um dadurch eine Strahlung einer dritten Oberwelle zu erzeugen.

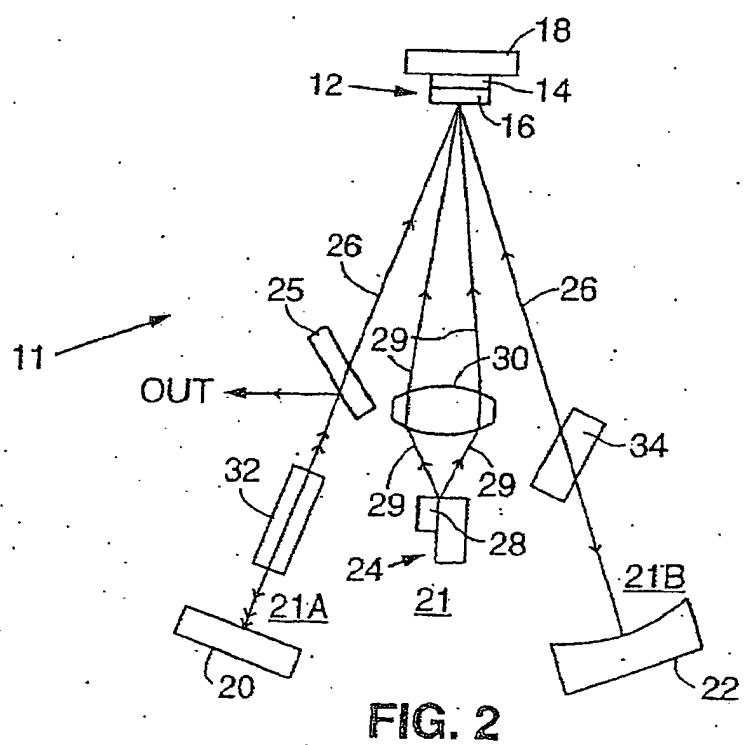
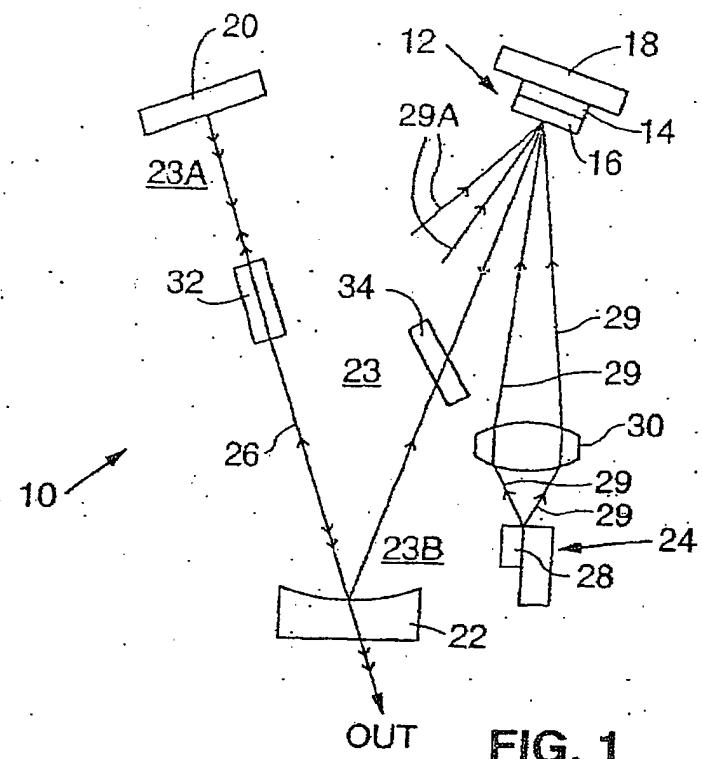
8. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der optisch nicht-lineare Kristall ausgewählt und angeordnet ist, um die Grundfrequenz der Laserstrahlung in erste und zweite unterschiedliche Frequenzen umzuwandeln, wovon eine zur Ausgabe als das frequenzumgewandelte Licht ausgewählt wird.

9. Laser nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen zweiten Resonator (39) mit einer zweiten Resonatorachse und so konfiguriert, dass er eine Oszillation des frequenzumgewandelten Lichtes durch den optisch nicht-linearen Kristall (32) hindurch bewirkt.

10. Laser nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Resonatorachse (26) des Laserresonators (25) zu der zweiten Resonatorachse nicht kollinear ist.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



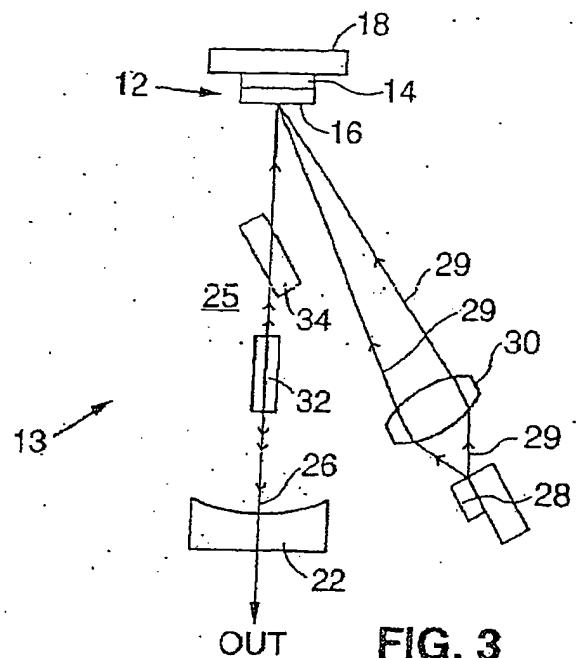


FIG. 3

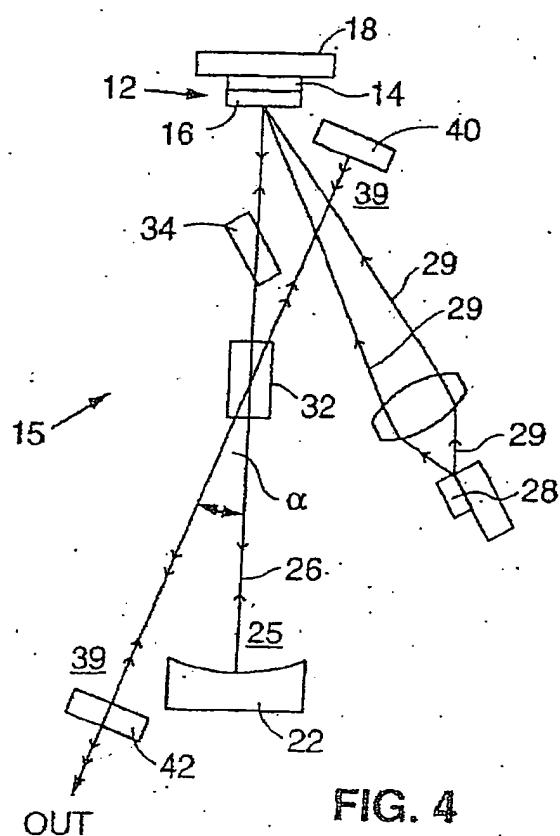


FIG. 4

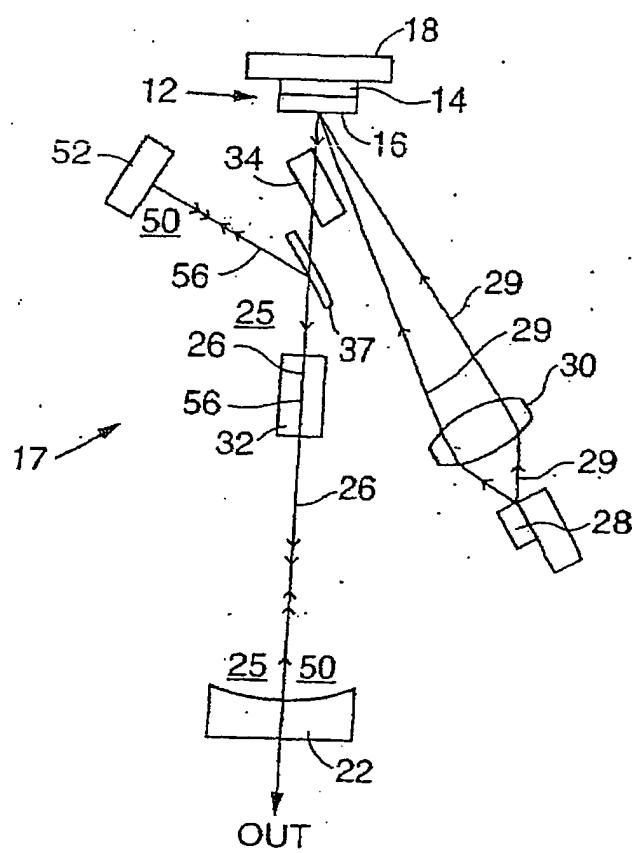


FIG. 5