

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 100/2011
(22) Anmeldetag: 26.01.2011
(45) Veröffentlicht am: 15.02.2013

(51) Int. Cl. : **H01S 5/42** (2006.01)
H01S 5/12 (2006.01)
H01S 5/34 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
JP 2007035994 A
US 2004252741 A1
US 5052016 A

LEE, B.G.: 'Beam Combining of Quantum Cascade Laser Arrays' Optics Express, Vol. 17, Issue 18, pp.16216 - 16222 (27. August 2009)
<URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.17.016216>>

(73) Patentinhaber:
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
1040 WIEN (AT)

(72) Erfinder:
MUJAGIC ELVIS DR.
WIEN (AT)
STRASSER GOTTFRIED DR.
PFAFFSTÄTTEN (AT)
HOFFMANN LEONARD DR.
WIEN (AT)

(54) **ZWEIDIMENSIONALES DISTRIBUTED-FEEDBACK HALBLEITER LASER ARRAY**

(57) Eine Laserlichtquelle (11) enthält eine Vielzahl von Laser-Einrichtungen (12), die jeweils in Form von Halbleiterlasern, insbesondere Quanten-Kaskaden-Lasern (QCL), mit einer ringförmigen DFB-Architektur ausgebildet sind; in jeder Ring-DFB-Einheit ist zumindest einem in einem Substrat befindlichen Lasermedium ein Interferenzgitter (14) zugeordnet, welches ringförmig geschlossen und quer zur Umfangsrichtung mit einer vorgegebenen Gitterperiode strukturiert ist. Die Laser-Einrichtungen befinden sich auf einem gemeinsamen Substrat in einer zweidimensionalen Array-Anordnung, wobei die Interferenzgitter (14) der Laser-Einrichtungen verschiedene Gitterperioden aufweisen.

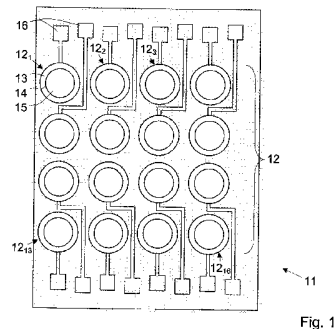


Fig. 1

Beschreibung

ZWEIDIMENSIONALES DISTRIBUTED-FEEDBACK HALBLEITERLASER-ARRAY

ART DER ERFINDUNG UND BESCHREIBUNG DES STANDES DER TECHNIK

[0001] Die vorliegende Erfindung beschreibt Lichtquellen basierend auf einer Halbleiterlasertechnologie, wie die Quantenkaskadenlaser (QCL). Insbesondere betrifft die Erfindung gewisse Verbesserungen einer Laser-Lichtquelle mit einer Vielzahl von Laser-Elementen, die jeweils als Halbleiterlaser mit einer Distributed-Feedback- (DFB) Architektur realisiert sind, in jedem dieser DFB-Elemente, mindestens ein Verstärkungsmedium (was bei einem QCL eine Quantenkaskadenschichtstruktur ist) auf einem Substrat angeordnet ist, und mit einem Interferenzgitter vorgegebener Gitterperiode strukturiert ist.

[0002] Eine QCL-basierende Laser-Lichtquelle der genannten Art, bestehend aus einem eindimensionalen Array von DFB QCL Elementen, ist im Artikel von B. G. Lee et al., Appl. Phys. Lett. 91, 231101 (2007) beschrieben. JP 2007-035994 A beschreibt oberflächenemittierende VCSEL-Laserquellen, die ein Interferenzgitter in einer 2dimensionalen Anordnung aufweisen, sowie ein Laserarray aus mehreren Laserquellen. Eine andere DFB-Laserquelle ist in US 2004/0252741 A1 beschrieben.

[0003] Optische Spektroskopie ist eine wichtige Methode für die Analyse und Forschung in verschiedenen Bereichen. Im Bereich der Umweltanalytik, zum Beispiel, sind hocheffiziente chemische Sensorsysteme für die Überwachung der vorgeschriebenen Grenzen von großer Bedeutung. Optische Analysemethoden erlauben die Detektion von Gasen, Flüssigkeiten und der entsprechenden Konzentrationen. Für all diese Anwendungen ist eine weit abstimmbare Single-Mode-Lichtquelle von äußerster Bedeutung. Eine zuverlässige Lichtquelle dieser Art erhöht die Effizienz, Sensitivität und Robustheit von Sensorsystemen. Um für praktische Anwendungen geeignet zu sein, sollte eine Lichtquelle zusätzlich kompakte Abmessungen und berechenbare und kontrollierbare spektralen Frequenzen aufweisen sowie mechanisch robust sein.

[0004] In den letzten zwei Jahrzehnten haben sich QCLs zu zuverlässigen Quellen für kohärentes Licht entwickelt, die das Licht im mittelinfraroten Spektralbereich emittieren. Die Demonstration der hohen optischen Leistung, Dauerstrichbetrieb (CW) und Betrieb der QCLs bei hohen Temperaturen, haben die Aufmerksamkeit der realen Anwendungen, wie z. B. der Gas-Analyse und der chemischen Sensorik auf sich gezogen. Für diese Anwendungen sind ein breiter spektraler Abstimmbereich und Single-Mode-Emission von großer Bedeutung. Diese Eigenschaften ermöglichen Multi-Analyt-Spektroskopie mit hoher Selektivität und Sensitivität der eingesetzten Messsysteme.

[0005] Ein QCL basiert auf einer Halbleiter-Multi-Layer-Struktur, d. h. einer periodischen Reihe von dünnen Schichten unterschiedlicher Materialzusammensetzung. Die Multi-Layer-Struktur bildet eine eindimensionale Vielfalt an Quantentöpfen (Quantum Wells); in jedem Quantentopf sind die Energiebänder des verwendeten Materials in eine Anzahl von diskreten elektronischen Teilbändern aufgeteilt. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes befinden sich die Subbänder der aufeinander folgenden Quantentöpfen auf verschiedenen Energieniveaus. Daher kann durch das Tunneln eines Elektrons von einem Topf zum nächsten, Energie durch Emission von Strahlung (Photonen) verlieren. Durch geeignete Gestaltung der Multi-Layer-Parameter (z. B. Dicke, Dotierung des Materials, etc.) kann eine Besetzungsinversion erreicht werden, welche die Laser-Emission beeinflusst, die im Grunde in der Richtung parallel zu der Multi-Schicht-Struktur stattfindet. Die Effizienz der Laserstrahlung wird weiter verbessert, indem das Elektron eine Vielzahl von Tunnelprozessen und Intersubband-Übergängen durchführen kann, und somit durch das Durchwandern einer Sequenz von Quantenfilmen multiple Photonen generiert.

[0006] Heutzutage existieren zwei Haupttypen von breitbandig abstimmbaren Single-Mode-Halbleiterlichtquellen: Distributed Feedback (DFB) Laser ausgeführt als lineare Arrays, und

QCLs betrieben in einer externen Kavität (EC) Konfiguration.

[0007] Die EC-Laser Konfiguration ermöglicht eine breite Abstimmung der Spektren, aber es erfordert zusätzliche Komponenten wie Linsen, Gitter und Piezo-Controller. EC-QCLs bieten enorme Abstimmbereiche durch die Ausnutzung des gesamten Verstärkungsbereiches des zu Grunde liegenden Materialsystems. Ein aktuelles Beispiel für eine EC-QCL Architektur ist im Artikel von M. J Weida et al., Opt. Eng. 49 (11), 111120 (Nov. 2010) beschrieben. Das EC-Setup erfordert hochwertige Antireflexions-Beschichtungen, piezoelektrische Controller und gut ausgerichtete externe optische Komponenten wie das Gitter für das Abstimmen. Daher stellt der EC ein komplexes, umständliches und vibrationsempfindliches System dar, resultierend in einem Aufbau mit großen Abmessungen und einer Komplexität, hinsichtlich der Implementierung und Handhabung.

[0008] Im Gegensatz dazu stellt ein monolithisch integriertes DFB-Laser-Array eine kompakte Version einer weit abstimmbaren Lichtquelle dar. Dieser Ansatz basiert auf einem kantenemittierenden Laser-Array. In einer DFB-Konfiguration ist ein aktiver Bereich des Lasers in der Regel mit einer periodischen Formgebung versehen, sodass ein Beugungsgitter gebildet wird. Die Gitterstruktur repräsentiert ein eindimensionales Interferenzgitter, welches Strahlung einer definierten Wellenlänge vorselektiert. Während diese Lösung eine kompakte Lichtquelle darstellt, ist die Betriebseigenschaft solcher Systeme schwer zu reproduzieren und inhomogen. Dies ist aufgrund erheblicher gitterinduzierter Schwankungen der Schwellströme und Strahlungswirkungsgrade gegeben. Dies wiederum ist auf die Lichtemission über die Facetten zurückzuführen, welche durch die schwer kontrollierbare Spalttechnik definiert sind. Die konventionelle DFB-Laser-Konfiguration beruht auf kantenemittierenden Elementen, d. h. hier tritt das Laserlicht am Ende der linearen Gitterstruktur aus, wobei die Hauptrichtung der Emission parallel zu dem mehrschichtigen Aufbau ist.

[0009] Beide Ansätze, sowohl die EC- als auch die DFB-Konfiguration, zeigen eine hohe Strahldivergenz, und erfordern daher üblicherweise zusätzliche Optik für die Strahlkollimation.

[0010] Die DFB-Konfiguration wird verwendet, um eine abstimmbare Laserquelle durch die Kombination einer Vielzahl von Laserquellen zu realisieren. Aber aus geometrischen Gründen erlaubt die DFB-Konfiguration ausdrücklich eine eindimensionale Anordnung der einzelnen Laser. Eine abstimmbare QCL-Quelle, die aus einer linearen Anordnung von DFB QCLs besteht, ist in dem oben erwähnten Artikel von B. G. Lee et al. (op-cit.) beschrieben. Diese abstimmbare QCL-Lichtquelle leidet an den genannten Nachteilen wie der hohen Strahldivergenz, gegeben durch die lineare DFB-QCL Architektur und die Kantenemissionen. Darüber hinaus sind die Lichtleistungseigenschaften der einzelnen QCL-Elemente stark ungleichmäßig.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0011] Die vorliegende Erfindung stellt eine kompakte breitbandig abstimmbare Laserlichtquelle dar, die optimale Eigenschaften bezüglich der Strahlkollimation und Gleichmäßigkeit der Lichtleistung über den kompletten Bereich der Laserfrequenzen aufweist.

[0012] Um die genannten Ziele zu erreichen, behandelt die Erfindung eine Laserlichtquelle mit einer Vielzahl von Laserelementen auf einem gemeinsamen Substrat in einer zweidimensionalen Array-Anordnung, wobei jede Lasereinrichtung als Halbleiterlaser (z. B. ein Quantenkaskadenlaser) mit einer ringförmigen DFB-Architektur ausgeführt ist, jede ringförmige DFB-Architektur mit mindestens einem Verstärkungsmedium (z. B. ein Quantenkaskadenschichtaufbau im Fall des QCLs) als Kern der aktiven Struktur auf einem Substrat angeordnet ist, mit einem Interferenzgitter versehen ist, welches zu einem Ring geschlossen ist und quer mit einer vorgegebenen Gitterperiode strukturiert ist, worin die Interferenzgitter der Lasereinrichtungen unterschiedliche Gitterperioden aufweisen.

[0013] Das Laser-Array basiert auf mehreren facettenlosen ringförmigen oberflächenemittierenden (Distributed Feedback) Elementen auf einem gemeinsamen Substrat (Einzel-Substrat-Array). Genauer gesagt, ein zweidimensionales Breitband-Quantenkaskadenlaser Array basierend auf DFB Ring-Resonator-Oberflächenemittierenden-Lasern. Die Machbarkeit eines sol-

chen Ring-Lasers basierend auf QCL-Technologie wurde bereits von den Erfindern und Mitarbeitern gezeigt, siehe E. Mujagic et al., Appl. Phys. Lett. 93,161101 (2008).

[0014] Die einzelnen Laser können separat angesprochen werden und damit diskrete Frequenzen unabhängig voneinander gewählt werden. Das Laser-Array ist in der Lage, stark gebündelte Strahlung mit wählbaren diskreten (Einzel-) Moden in einem breiten Spektralbereich zu emittieren, und bietet zudem einen breiten linearen Abstimmbereich des Spektrums. Die Geräte zeigen Monomodennmission mit einer erheblichen Seitenmodenunterdrückung. Ein typischer Wert ist 30 dB. Als Ergebnis der facettenlosen Natur der einzelnen Strahler, spiegeln die spektralen Abhängigkeiten der Schwellstromdichten und der optischen Leistung, den Gewinn des eingearbeiteten Materials und werden nicht durch die Vielfalt der zu Grunde liegenden DFB-Designs beeinträchtigt.

[0015] Die Herstellung eines solchen Arrays ist mit Hilfe bekannter Fertigungsprozesse der Mikrotechnologie möglich, die eine hohe Reproduzierbarkeit und Batch-Verarbeitung ermöglichen. Die Verwendung von QCLs als Halbleiterlichtquellen für die zweidimensionale (2D) Integration von kohärenten Emittieren des QCL Typs ist reizvoll, da es On-Wafer-Tests und Skalierbarkeit auf Wafer-Ebene ermöglicht. Diese reduzieren folglich die Herstellungskosten und den Arbeitsaufwand. Somit stellt die Erfindung eine Laser-Lichtquelle dar, die als Baustein für miniaturisierte optische Systeme ohne Linsen und bewegliche Bauteile dienen kann.

[0016] Die Erfindung schränkt sich nicht ausschließlich auf QCL Lichtemitter ein. Auch andere Arten von Halbleiterlasern, wie Diodenlaser, sind für den Einsatz als Laserelemente, für die in der Erfindung beschriebenen Laserlichtquellen, geeignet. Auch ist die Erfindung nicht beschränkt auf Halbleiterlaser im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Es können auch Lasereinheiten, die mit der vorliegenden Erfindung kombiniert werden, herangezogen werden die elektromagnetische Strahlung auch in anderen Bereichen aussenden. Insbesondere bietet die Erfindung einzigartige Vorteilen in jedem der folgenden Bereiche: UV, sichtbares Licht, Infrarot- und Terahertz-Bereich.

[0017] In einer vorteilhaften Ausgestaltung, haben das Gitter und/oder die entsprechenden Strukturen des Verstärkungsmediums die gleiche allgemeine Ringform und Abmessungen, wenn auch mit unterschiedlicher Realisierung des Gitters, insbesondere unterschiedliche Gitterperioden, wie bereits erwähnt.

[0018] Generell ist die Gestaltung des Gitters und/oder der entsprechenden Verstärkungsmediumstrukturen einander kongruent. Dies bedeutet, dass in jedem einzelnen Lasergerät die QCL-Struktur und das Gitter die gleiche zweidimensionale Ausdehnung aufweisen. Dabei befindet sich die QCL-Struktur parallel zum Gitter und unterhalb desselben. Nach einem weiteren vorteilhaften Aspekt der Erfindung erfolgt die Emission in eine Richtung senkrecht zu der Ebene, in der die Laser-Elemente angeordnet sind. Darüber hinaus kann das Substrat transparent sein und besitzt eine Fläche die den Durchgang des von den Lasereinheiten generierten Laserlichtes ermöglicht. Im Allgemeinen kann das in der Erfindung beschriebene Laser-Array das Licht über die Oberfläche, wo sich die Lasereinheiten befinden, auskoppeln und/oder über die Oberfläche des Substrats. Eine Implementierung mit einer Emission über das Substrat ermöglicht eine monolithische Integration von optischen Elementen, wobei die Substratseite als eine inerte Oberfläche dient. Um darüber hinaus die Emission von Licht durch die Oberfläche zu vermeiden und/oder unerwünschte umfeldbedingte oder chemische Einflüsse auf die Lasereinheiten zu eliminieren, kann die Seitenfläche der Lichtquellen (d. h. der gegenüberliegenden Seite der Substratoberfläche), wo die Laserelemente sich befinden, mit einer schützenden Beschichtung und/oder einer lichtreflektierenden oder undurchlässigen Beschichtung abgedeckt werden.

[0019] Darüber hinaus kann ein Temperaturregler zur Einstellung der Temperatur der individuellen Laser auf dem Array bereitgestellt werden. Durch die Temperaturabhängigkeit der Emissionswellenlänge der Lasereinheit, kann die Wellenlänge eingestellt werden. Vorzugsweise ist die Temperaturregelung konfiguriert, einen Temperaturbereich abzudecken, der einem Wellenlängenbereich entspricht, welches zumindest dem Abstand zweier Wellenlängen unterschiedlicher Lasereinheiten entspricht. Mit anderen Worten entspricht der Temperaturbereich dem Wellen-

längenabstand zweier benachbarter Laser-Wellenlängen, wenn sie basierend auf der besagten Temperaturabhängigkeit ineinander abgebildet werden.

[0020] Gemäß der Erfindung kann die Laser-Lichtquelle auch für breitbandige Emission mit mehreren diskreten Frequenzen verwendet werden. Eine weitere Anwendung ist der Betrieb der Laser-Lichtquelle, beschrieben durch die Erfindung, mit langen Pulsen für die kontinuierliche Abdeckung des Spektrums. Zum Beispiel kann dies durch Nutzung der Temperaturabhängigkeit der Emissionswellenlänge mit einer Temperaturregelung des Laser-Arrays realisiert werden, wie bereits für die Feinabstimmung der Wellenlängen der Lasereinrichtung beschrieben.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0021] Im Folgenden werden die Erfindung und weitere vorteilhafte Entwicklungen im Detail beschrieben. Dieses geschieht anhand eines Ausführungsbeispiels, das in den beiliegenden Zeichnungen illustriert wird:

- [0022]** Fig. 1 eine schematische Draufsicht auf die Ausführungsform mit einem 4 x 4 Array einzelner QCL-Elemente, so genannten ringsCSELS.
- [0023]** Fig. 2 das Oberflächengitter eines ringCSEL aus Fig. 1 (Strukturen sind maßstäblich, nur etwa die Hälfte eines Ringes ist dargestellt).
- [0024]** Fig. 3 ein schematischer Querschnitt entlang einer Längsrichtung des Ringresonators, entsprechend der Linie 3-3 in Fig. 2.
- [0025]** Fig. 4 schematischer Querschnitt der Resonatorstruktur entlang radialer Schnitte durch ein Gitterplateau und eine Gitternut entsprechend (a) Linie 4a-4a (Plateau) beziehungsweise (b) Linie 4b-4b (Nut) in Fig. 2.
- [0026]** Fig. 5 eine Aufnahme durch Rasterelektronenmikroskopie (REM) einer Umsetzung der Anordnung von Fig. 1. Die gesamte Anordnung ist ca. 4 x 3 mm² groß. Der Bildeinschub in der oberen linken Ecke ist eine Detailaufnahme, die einen Teil des Wellenleiters zeigt. Dieses trägt ein geätztes Gitter zweiter Ordnung, welches zur vertikalen Lichtauskopplung dient.
- [0027]** Fig. 6 ein Diagramm mit den Spektren der 16 oberflächenemittierenden Laserelemente des Arrays aus Fig. 1 und 5. Daten entsprechen einem Betrieb bei Raumtemperatur (293 K). Der Bildeinschub in der oberen rechten Ecke zeigt ein Single-Mode-Spektrum bei 1261 cm⁻¹ mit einer Seitenmodenunterdrückung von 30 dB.
- [0028]** Fig. 7 ein Diagramm zur Veranschaulichung der temperaturinduzierten spektralen Verstimmung der Resonanz einer Lasereinheit.
- [0029]** Fig. 8 ein Diagramm zur Darstellung der optischen Spitzenleistung und Spannung in Abhängigkeit von Stromdichte für acht einzelne Laser, die sich im Bereich der niedrigen Frequenzen befinden (die Werte der einzelnen Frequenzen sind in der oberen linken Ecke gegeben).
- [0030]** Fig. 9 ein Diagramm, das die Schwellstromdichte (Quadrate) und optische Spitzenleistung (Kreise) als Funktion der Wellenlänge zeigt. Zum Vergleich ist die gemessene Elektrolumineszenz aufgezeichnet (gestrichelte Linie; Skala "Intensität"), die das Verstärkungsspektrum des benutzten QC-Materials abbildet.
- [0031]** Fig. 10 Bild eines gemessenen Fernfeldes von einem 16-Element-Array, wenn nur die vier Elemente an jeder der Ecken in Betrieb sind. Aufgenommen in einem Abstand von 20 mm.
- [0032]** Fig. 11 eine schematische Seitenansicht, die die Extraktion des Lichts an beiden Seiten eines Chip-Elementes, d. h. über die Oberfläche und/oder über das Substrat, illustriert.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG EINES AUSFÜHRUNGSBEISPIELS DER ERFINDUNG

[0033] Im Folgenden wird eine Implementierung der Erfindung als ein nicht einschränkendes Beispiel beschrieben. Diese beruht auf dem Prinzip des Ring Cavity Surface Emitting QCLs („Ring-Resonator-Oberflächenemittierenden-Lasern“), auch ringCSEL genannt, wobei jedes in Single-Mode betrieben wird, und diese zu einem vertikal emittierenden 2D Laser-Breitband-Array zusammengesetzt sind.

[0034] Dieses Konzept nutzt die Eigenschaft aus, dass die Vorzüge einer Oberflächenemission es den ringCSELs erlaubt als grundlegender Baustein für 2D QCL Arrays genutzt zu werden. Ein Fachmann auf dem Gebiet wird erkennen, dass der Grundgedanke der Erfindung mit anderen Arten von Halbleiter-Laser-Geräten ebenfalls implementiert werden können.

ALLGEMEINES LAYOUT

[0035] Fig. 1 zeigt eine Draufsicht der Anordnung des 4 x 4 ringCSEL Arrays. Eine REM-Aufnahme des Arrays ist in Fig. 5 gezeigt. In dem Array 11 sind die einzelnen ringCSEL Elemente 12 in einer quadratischen Anordnung platziert (die einzelnen Elemente sind durch Bezugszeichen $12_1, 12_2, \dots, 12_{16}$ bezeichnet).

[0036] In jeder der Einrichtungen 12 umgibt eine Elektrode 13 einen ringförmigen QCL-Resonator 14. Der Bereich 15 innerhalb des Ringresonators 14 wird in der Regel auch mit dem Elektrodenmaterial abgedeckt, aber dieser mittlere Abschnitt könnte auch frei sein. Es sollte angemerkt werden, dass die Dimension des Resonators 14 in radialer Richtung sehr gering ist, so dass der Resonator 14 als eine Kreislinie in Fig. 1 erscheint und ist nur geringfügig in der SEM von Fig. 5 sichtbar.

[0037] Kontaktpads 16 sind an den Seiten des Arrays angebracht, und jedes Kontaktpad ist mit einer der Elektroden 13 verbunden. Die Kontaktstellen 16 sind so angebracht, dass die einzelnen Ring-CSEL Elemente 12 individuell elektrisch betrieben werden können, ohne dass die elektrische Zuleitung den lichtemittierenden Bereich der Laserelemente abschattet/blockt.

[0038] Natürlich ist das 4 x 4 quadratische Array nur beispielhaft und andere Zahlen und Anordnungen sind ebenso gut möglich umzusetzen, zum Beispiel rechteckige oder hexagonale Arrays, basierend auf Seitenlängen mit 2,3,4,5, usw. oder 2N Elementen.

[0039] Fig. 2 zeigt die Form des Oberflächengitters 20 eines einzelnen ringCSEL-Elementes. Die radiale Breite und die Gitterperiode sind in dieser Zeichnung nicht maßstabsgetreu. Es dient lediglich zur besseren Veranschaulichung der Gittermerkmale.

[0040] Bezugnehmend auf die Fig. 3 und 4 besteht der Ringresonator eines ringCSEL-Elementes aus folgenden Komponenten: Ein aktiver Kern 31 wird durch einen mehrschichtigen Aufbau aus geeignetem Material als Verstärkungsmedium realisiert. Auf beiden Seiten ist der aktive Kern 31 von einem unteren Mantel 32 und einem oberen Mantel 33, die als Wellenleiter dienen, begrenzt. Auf dem oberen Mantel 33 befindet sich eine Kontaktschicht 34, die zusammen mit einer Metallisierungsoberfläche 35 den ersten elektrischen Kontakt darstellt (Elektrode 14 der Fig. 1). Das elektrisch leitende Substrat 30 dient als zweiter elektrischer Kontakt. Das Bauteil wird durch Anlegen einer Vorspannung zwischen dem Substrat 30 und der Kontaktschicht 34 aktiviert.

[0041] Die Gitterstruktur erstreckt sich über die Kontaktschicht 34 bis in den oberen Mantel 33. Die Form der Gitterstruktur, definiert durch Tiefe D, Gitterperiode A, Tastverhältnis B/A (wobei B die Länge einer Gitterrippe ist) und die Dicken der Schichten 31, 32, 33 sind zweckmäßig so gewählt, um eine effiziente Auskopplung der Strahlung mit der gewählten Wellenlänge λ (lambda) zu erreichen.

HERSTELLUNG

[0042] Den Aufbau der einzelnen QCL-Elemente, angewandt in der nicht einschränkenden Ausführungsform der Abbildungen 1 bis 5, bildet eine $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ Heterostruktur,

welche auf einem sogenannten bound-to-continuum Design für Breitband-Emission im Wellenlängenbereich von $\lambda = 7$ bis $9 \mu\text{m}$ basiert.

[0043] Der aktive Kern 31 besteht aus vierzig Perioden der Schichtstruktur, eingebettet zwischen zwei InGaAs (Si, $n = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 500 nm) Spacern, welche auf ein niedrig dotiertes InP Substrat 30 gewachsen wurden. Der obere Wellenleitermantel 33 besteht aus einer InAlAs-Schicht (Si, $n = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 2800 nm), gefolgt von einer InGaAs Plasmon-Schicht (Si, $n = 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 600 nm). Eine weitere InGaAs (Si, $n = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 30 nm) Kontakt-Schicht 34 schließt das Wachstum ab. Die Techniken zur Erzeugung der QCL-Struktur, insbesondere das Wachstum der Schichten, sind im Sinne des Standes der Technik gut bekannt.

[0044] Um die Breite des Gain-Spektrums bestimmen zu können, wurden kreisförmige Mesa-Strukturen mit $400 \mu\text{m}$ Durchmesser hergestellt. Anschließend wurde die Elektrolumineszenz (EL) aus gespaltenen halbkreisförmigen Mesas im gepulsten Betrieb (80 kHz/500 ns) bei 293 K gemessen. Aus den aufgezeichneten Daten wurde eine Halbwertsbreite (FWHM) von ca. 200 cm^{-1} mit einer zentralen Frequenz von 1230 cm^{-1} ($8,13 \mu\text{m}$) extrahiert.

[0045] Die Herstellung des Bauteils aus Abbildungen 1 und 5 begann mit der Definition von Ti/Au (10/200 nm) radialen Bragg-Gittern zweiter Ordnung mit Hilfe von Elektronenstrahl-Lithographie und Lift-off-Technik. Die Gitter wurden in einer 16-Element 2D-Konfiguration (Fig. 1) angeordnet und dienten als Hartmaske für die anschließende Ätzung. Nominale Gitterperioden A (vgl. Fig. 3) in einem Bereich zwischen $2,356$ und $2,753 \mu\text{m}$ wurden gewählt, um Emissionsfrequenzen zwischen 1135 und 1326 cm^{-1} zu realisieren. Der dabei berechnete effektive Brechungsindex beträgt $3,2$. Diese Konfiguration ermöglicht einen Abstand von ca. 13 cm^{-1} zwischen den einzelnen Spektrallinien. Es wurde ein Tastverhältnis von 60% (= Verhältnis B/A in Fig. 3) für die Gitter gewählt. Das Einätzen der Gitterstruktur bis zu einer Tiefe von $D = 1.9 \mu\text{m}$ wurde durch reaktives Ionenätzen (RIE) durchgeführt. Für die ausgewählten Parameter Tastverhältnis und Gittertiefe wurde ein Kopplungskoeffizient von $12,2 \text{ cm}^{-1}$ berechnet. Ringförmige Wellenleiter, $10 \mu\text{m}$ breit und $18 \mu\text{m}$ tief, mit einem äußeren Radius von $200 \mu\text{m}$ wurden ebenfalls durch RIE definiert. Der Abstand zwischen den einzelnen Strahlern beträgt $600 \mu\text{m}$. Zur elektrischen Isolation wurde eine 300 nm dicke Silizium-Nitrid-Schicht (SiN_x) abgeschieden (Isolatorschicht 36 der Fig. 4). Anschließend wurden herausgeführte Kontaktflächen (= Metallisierungsschicht 35 der Fig. 4) durch Sputtern von Ti/Au (10/250 nm) gebildet. Um Oberflächen-Emission zu ermöglichen, wurden Isolierung und herausgeführte Kontaktschicht oben auf dem ringförmigen Wellenleiter geöffnet. Abschleifen des Substrates auf ca. $200 \mu\text{m}$, sowie anschließendes Polieren und Aufdampfen einer Ge/Au/Ni/Au (15/30/14/150 nm) Rückkontaktschicht bilden die letzten Schritte des Herstellungsprozesses. Der mit Drahtbonding versehene ring-CSEL Array wurde mit einer Größe von ca. $4 \times 3 \text{ mm}^2$ auf einem Peltier-Kühler befestigt. Der Peltier-Kühler dient als Kühlkörper und Temperaturregler zur Einstellung der Temperatur des Arrays.

BETRIEB UND LEISTUNG

[0046] Die Messung der optischen Spitzenleistung wurde im Puls-Mode-Betrieb mit einer Pulslänge von 100 ns und einer Wiederholrate von 5 kHz bei 293 K durchgeführt. Die Spektren im mittleren Infrarotbereich wurden mit Hilfe eines Fourier-Transform-Spektrometers mit einer Auflösung von $0,2 \text{ cm}^{-1}$ aufgezeichnet. Im Falle der spektralen Charakterisierung wurden Pulsbedingungen von $20 \text{ ns} / 100 \text{ kHz}$ verwendet.

[0047] Fig. 6 zeigt die aufgenommenen Spektren des gesamten Laser-Arrays. Laseremission wurde bei allen 16 Emittlern erreicht. Die Laser zeigen Single-Mode Betrieb, wobei die Lichtfrequenz der jeweiligen Gitterperiode entspricht. Die Wellenlängen der einzelnen Resonanzen beinhalten einen Abstand von ca. $12,5 \text{ cm}^{-1}$. Insgesamt wird ein Bereich von 1140 bis 1322 cm^{-1} (entsprechend einem Wellenlängenbereich von $7,56$ bis $8,77 \mu\text{m}$) abgedeckt, was eine spektrale Breite von ca. 180 cm^{-1} ergibt. Bei der Unterdrückung der Nebenmoden wurde ein Verhältnis zur von 30 dB für alle Frequenzen und Betriebsströme (Bildeinschub in Fig. 6) erreicht.

[0048] Wie dargestellt in Fig. 7, lässt sich eine weitere Durchstimmbarkeit der einzelnen Reso-

nanz durch Veränderung der Wärmesenktemperatur erreichen. Auch Intrapuls-Erhitzung und die Überlagerung eines Gleichstromes können eingesetzt werden, um eine spektrale Verschiebung zu verursachen. Es wurde festgestellt, dass die einzelnen Resonanzen einem linearen Trend folgen und keine signifikanten spektralen Modensprünge aufweisen. Auf diese Weise kann eine kontinuierliche Abdeckung des gesamten Emissionsbereiches erreicht werden. So kann basierend auf dieser Erfindung eine bestimmte Emissionswellenlänge mit einem Laser-Array erzeugt werden, indem zuerst ein Laserelement ausgewählt wird, dessen nominale Wellenlänge am Nächsten an der gewünschten Wellenlänge liegt, und anschließend die Wellenlänge des ausgewählten Laserelementes auf die gewünschte Wellenlänge durch geeignete Anpassung der Temperatur fein abgestimmt wird.

[0049] Die Ring-Konfiguration ermöglicht Oberflächenemission des Laserlichtes und bietet erhebliche Vorteile gegenüber auf dem Stand der Technik basierenden Konfigurationen. In Bauteilen mit indexgekoppelten kantenemittierenden DFBs, kann Lasern bei zwei verschiedenen Moden (mit gleichen Verlusten) stattfinden, welche sich an beiden Rändern der photonischen Lücke zentriert bei der Bragg-Wellenlänge befinden. In Abhängigkeit von der Position der Spiegelfacetten gegenüber dem Laser-Gitter (d. h. von der Phasendifferenz) ergeben sich unterschiedliche Verluste, so dass Lasern auf einer dieser Moden bevorzugt wird. Aufgrund der zufälligen Variation der Phasendifferenz in einem DFB-Array kann diese Tatsache in einer ungleichmäßigen Frequenzverteilung resultieren. In oberflächenemittierenden DFB-Lasern zweiter Ordnung, wie z. B. ringCSEs, ist starke Verlust-Diskriminierung zwischen den beiden Resonatormoden inhärent vorhanden, welche sich aus den unterschiedlichen Strahlungsverlusten für diese beiden Moden ergibt. Aus diesem Grund emittieren ringCSEs stets auf der selben Seite der photonischen Lücke (in der antisymmetrischen Mode), unabhängig von der Gitterperiode. Folglich bieten solche oberflächenemittierende Bauteile einen robusten und vorhersehbaren Single-Mode-Betrieb, mit dem sich DFB-Arrays mit gleichmäßig verteiltem Frequenzkamm, wie gezeigt in Abbildung 2, realisieren lassen. Außerdem erleichtert das Fehlen von Facetten in Ring-Resonatoren die Beseitigung jeglicher störender Spiegel-induzierter Einflüsse auf das spektrale Verhalten, wie dies in kantenemittierenden Arrays beobachtet werden kann.

[0050] Fig. 8 zeigt optische Spitzenleistung (Kurven unten, linke Skala in mW) und Spannung (Kurven oben, rechte Skala in V) als Funktion der Stromdichte (Abszisse, in kA/cm^2) für acht Laser im unteren Frequenzbereich des Arrays. Eine gewisse Abhängigkeit von Schwellenstrom und optischer Leistung in Bezug auf die Gitterperiode lässt sich beobachten. Diese Schwankungen sind jedoch unerheblich.

[0051] Fig. 9 zeigt gemessene Schwellenstromdichte und optische Spitzenleistung als Funktion des gesamten Emissionsbereiches. Zum Vergleich wurde auch das aufgezeichnete EL-Spektrum aufgetragen. Eine maximale Leistung von 60 mW wurde bei $1237,5 \text{ cm}^{-1}$ beobachtet. An dieser Stelle befindet sich die Maximalverstärkung. Die optische Leistung nimmt allmählich in Richtung der Ränder der EL-Kurve ab und erreicht dort eine minimale Emission von ca. 20 mW. Ebenso wurde eine minimale Schwellenstromdichte J_{th} von $4,6 \text{ kA/cm}^2$ in der Mitte des aufgezeichneten EL-Profiles gemessen, welche in Richtung der EL-Ränder regelmäßig ansteigt, mit höchsten Schwellen von rund $5,5 \text{ kA/cm}^2$.

[0052] Diese Werte wurden anschließend mit einem Fabry-Perot-Laser verglichen, hergestellt aus dem gleichen Material und mit vergleichbaren Abmessungen ($1,2 \text{ mm} \times 10 \text{ }\mu\text{m}$), wobei der Fabry-Perot-Laser eine Spitzenleistung von 140 mW sowie ein J_{th} von $3,5 \text{ kA/cm}^2$ bei 293 K lieferte. Diese reduzierte Leistung für ringCSEs wird deren Wellenleiterstruktur zugeschrieben, welche nicht optimal geeignet ist für Oberflächen-Emission. Um hierbei eine ausreichende Kopplung zu erzielen, wurden relativ tiefe Gitter auf Kosten erhöhter Verluste geätzt.

[0053] Mit optimiertem Wellenleiter sind ringCSEs zu einer deutlich verbesserten Leistung im Vergleich zu konventionellen kantenemittierenden QCLs in der Lage. Sowohl die beobachteten Emissionseigenschaften als auch die Schwellenwerte des 2D-Arrays spiegeln das Verstärkungsprofil ohne nennenswerte Schwankungen wieder. Im Gegenteil zeigt die Leistung linearer DFBs eine starke Abhängigkeit von der Position der Spiegel-Facette in Bezug auf das Laser-

Gitter. Insbesondere wurde eine erhebliche Streuung der Amplitude des emittierten Lichtes sowie der Schwellenströme in durchstimmbaren DFB-Arrays mit unterschiedlicher Gitterperiode beobachtet. Aufgrund ihrer Facetten-freien Natur stellen ringCSELS ein attraktives Element für Laser-Arrays dar, dessen Leistungseigenschaften durch die Verstärkung des verwendeten Materials charakterisiert werden und dabei nicht vom zugrunde liegenden Mechanismus zur Frequenzauswahl betroffen sind.

KOLLIMATION

[0054] Fig. 10 zeigt das Fernfeld des Arrays, wenn vier ringCSELS (jeweils an den Ecken des Arrays) betrieben werden. In einem Abstand von 20 mm lässt sich die gesamte Strahlung auf einer Fläche von 4 mm x 4 mm erfassen. Diese starke Strahlkollimation zeigt das Potenzial zur Herstellung von Lab-on-a-Chip Systemen ohne zwischengelagerte Linsen. Als solches ist der präsentierte Laser-Array von großem Interesse für die Entwicklung miniaturisierter Spektrometer, ohne dass die Notwendigkeit für externe optische oder mechanische Komponenten besteht (keine beweglichen Teile).

[0055] Fig. 11 zeigt, dass aufgrund des Oberflächengitters zweiter Ordnung das Licht nicht nur entlang der oberen (Oberflächen-) Richtung 38, sondern auch nach unten in (Substrat-) Richtung 37 abgegeben werden kann. Die letztere Emissionsart kann als Lichtquelle für optische Messungen verwendet werden. In diesem Fall kann der/das charakterisierte Analyt/Material direkt auf dem Substrat aufgebracht werden. Die Strahlung durchdringt den Analyten und wird über einen optischen Detektor nachgewiesen. Der Analyt interagiert weder mit den Laserelementen (ringCSELS) noch mit den elektrischen Kontakten, welche sich auf der gegenüberliegenden Seite des Chips befinden. Zum weiteren Schutz der Laser 12 vor Umwelteinflüssen, können die Bauteile (auf der Oberfläche siehe Fig. 11) mit einer undurchlässigen Beschichtung 39 abgedeckt werden, welche, je nach erstrebter Anwendung, chemisch inert und/oder reflektierend und/oder undurchsichtig sein kann. Die Substratoberfläche (untere Fläche in Fig. 11) lässt sich vor der Aufbringung eines weiteren Analyten leicht reinigen. Dieser Reinigungsschritt lässt die Laser unberührt, so dass die Laserleistung nicht beeinflusst wird. Darüber hinaus kann das Substrat als Grundlage für monolithisch integrierte (d. h. als Teil des Substrats verarbeitete) Elemente wie Fresnel-Linsen oder andere strahlformende Elemente wie Axikone oder Phasenmasken dienen.

[0056] Zusammenfassend ergibt die vorliegende Erfindung zweidimensionale Breitband-Halbleiterlaser-Arrays auf Basis von oberflächenemittierenden Lasern mit ringförmiger Kavität und verteilter Rückkopplung (DFB). Durch die Verwendung von Quantenkaskadenlaserbauteilen in Form eines 16-Element-Arrays, weist die Laser-Lichtquelle einen großen linearen Durchstimmbereich auf. Im Fall des oben diskutierten Beispiels beträgt dieser Bereich 180 cm^{-1} mit einer mittleren Wellenlänge von $8,2 \mu\text{m}$ bei Pulsbetrieb und Raumtemperatur. Die Bauteile zeigen Single-Mode-Emission mit einem Unterdrückungsverhältnis der Nebenmoden von 30 dB, gemessen bei Raumtemperatur. Sowohl die spektrale Ausprägung der emittierten Strahlung als auch die Schwellenströme spiegeln das gemessene Verstärkungsprofil des verwendeten Materials wieder. Angesichts der facettenfreien Natur der einzelnen Emitter spiegeln die wellenlängenabhängigen Größen Schwellenstromdichte und optische Leistung das Verstärkungsprofil des verarbeiteten Materials wieder und werden nicht durch die Vielfalt der zugrunde liegenden DFB-Designs beeinträchtigt.

[0057] Die vorliegende Erfindung bietet folgende Vorteile:

- [0058]** - Array ermöglicht die geometrische Skalierung der einzelnen Emitter ohne negative Auswirkungen auf die elektro-optische Leistung.
- [0059]** - Äußerst robuste und vorhersehbare spektrale Eigenschaften.
- [0060]** - Emission über Substrat erlaubt Abdeckung des Substrats durch jedes andere Material, ohne Auswirkungen auf die Lasereigenschaften oder die elektrischen Kontakte (keine Verschmutzung oder Kurzschluss).

- [0061] - Das Substrat ermöglicht die Reinigung nach Kontakt mit beliebigem Material, ohne dabei die Lasereigenschaften zu beeinflussen.
- [0062] - Substrat als Grundlage für optionale monolithisch integrierte Elemente wie Linsen oder andere strahlformende Elemente einsetzbar.
- [0063] - Erleichtert die Realisierung von miniaturisierten, robusten Spektrometern/ durchstimmbaren Lichtquellen ohne zusätzliche Optik oder bewegliche Teile.
- [0064] - Array kann durch Ansteuerung eines einzigen Laserelementes oder mehrerer Elemente zu einem Zeitpunkt betrieben werden, wenn dies gewünscht wird.

[0065] Es wird betont, dass die Erfindung nicht auf das oben genannte Beispiel beschränkt ist. Stattdessen würde es von Fachleuten auf dem Gebiet anerkannt werden, dass Änderungen an der oben beschriebenen Ausführungsform vorgenommen werden könnten, ohne von dem allgemeinen Konzept der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Daher umfasst die Erfindung auch Modifikationen und Variationen innerhalb des Geistes und des Umfangs der vorliegenden Erfindung, welche in den beigefügten Ansprüchen definiert wird.

Patentansprüche

1. Laserlichtquelle (11), umfassend eine Vielzahl von Laser-Einrichtungen (12), die jeweils in Form von Halbleiterlasern mit einer DFB-Architektur ausgebildet sind, in welcher zumindest einem in einem Substrat befindlichen Lasermedium ein Interferenzgitter (14, 20) zugeordnet ist, welches quer zu seiner Längsrichtung mit einer vorgegebenen Gitterperiode strukturiert ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Laser-Einrichtungen sich auf einem gemeinsamen Substrat (30) in einer zweidimensionalen Array-Anordnung befinden und ringförmig ausgebildet sind, nämlich das Interferenzgitter (14, 20) ringförmig geschlossen und quer zur Umfangsrichtung mit einer vorgegebenen Gitterperiode (A) strukturiert ist, wobei die Interferenzgitter der Laser-Einrichtungen verschiedene Gitterperioden aufweisen.
2. Laserlichtquelle nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Halbleiterlaser als Quanten-Kaskaden-Laser ausgebildet sind.
3. Laserlichtquelle nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Interferenzgitter der Laser-Einrichtungen gleichartige Ringform hinsichtlich ihrer Dimensionen aufweisen.
4. Laserlichtquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Emission in einer Richtung (37, 38) erfolgt, die senkrecht zu der Ebene ist, in der die Laser-Einrichtungen orientiert sind.
5. Laserlichtquelle nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (30) zumindest im Bereich der Laser-Einrichtungen transparent ist und eine Oberfläche aufweist, die den Durchtritt von in den Laser-Einrichtungen erzeugtem Laserlicht gestattet.
6. Laserlichtquelle nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Laser-Einrichtungen an der Oberfläche des Substrats gegenüber liegenden Seite von zumindest einer Schutzschicht und/oder lichtundurchlässigen oder lichtreflektierenden Schicht (39) bedeckt sind.
7. Laserlichtquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Formgebung des Lasermediums der Laser-Einrichtungen der des jeweiligen Interferenzgitters entspricht.
8. Laserlichtquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **gekennzeichnet durch** am Außenrand der zweidimensionalen Anordnung vorgesehene Kontaktflächen (16), die jeweils mit einer Elektrode (13) der Laser-Einrichtungen (12) verbunden sind.

9. Laserlichtquelle nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **gekennzeichnet durch** eine Temperatursteuerung zum Einstellen der Temperatur der Laser-Einrichtungen, wodurch aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Wellenlänge der von den Laser-Einrichtungen emittierten Strahlung die Wellenlängen justierbar sind, wobei die Temperatursteuerung einen Temperaturbereich überdeckt, der zumindest dem Abstand je zweier benachbarter Wellenlängen von Laser-Einrichtungen in der Array-Anordnung umgerechnet auf eine Temperaturunterschied entspricht.

Hierzu 5 Blatt Zeichnungen

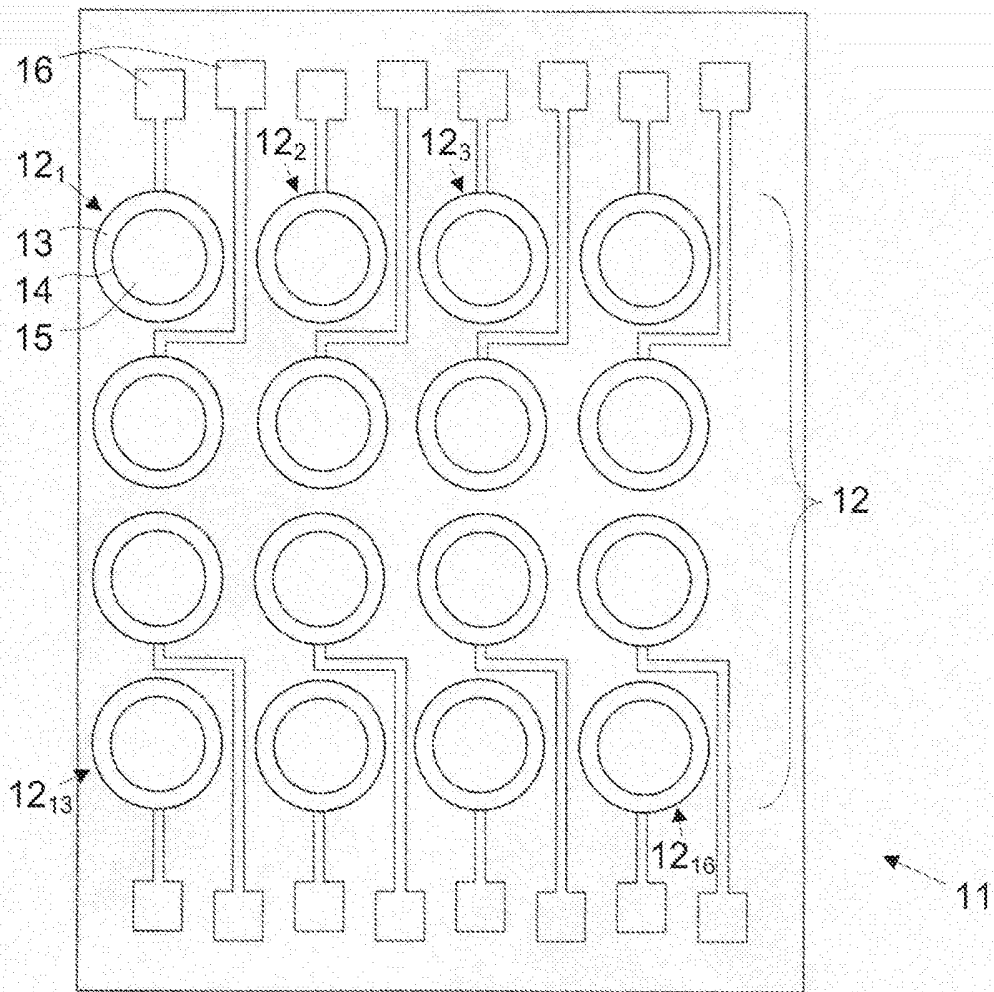


Fig. 1

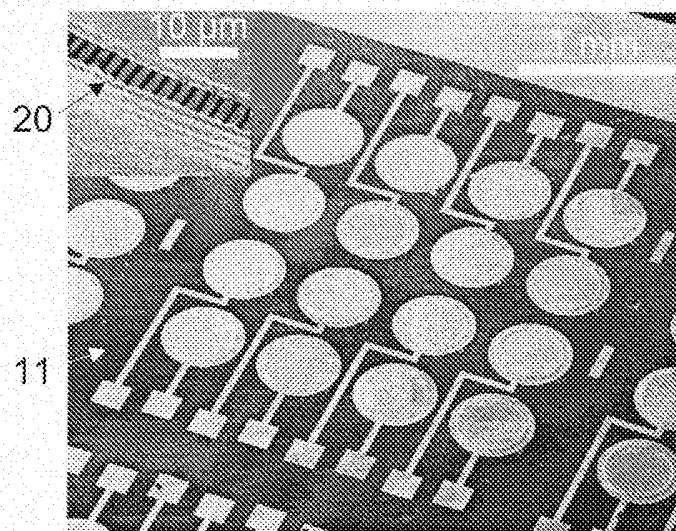


Fig. 5

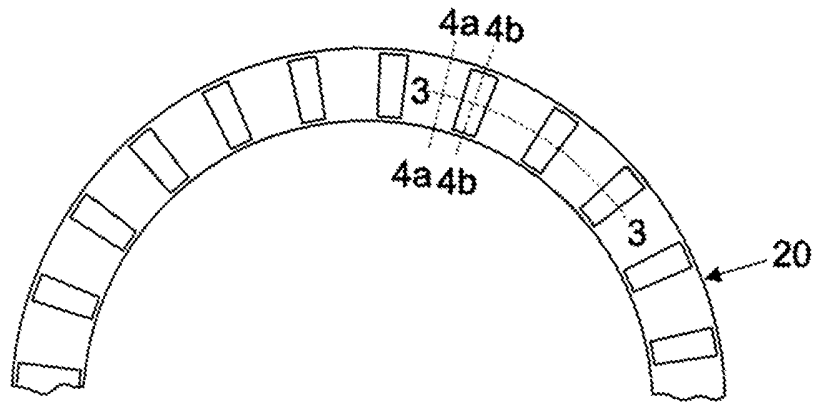


Fig. 2

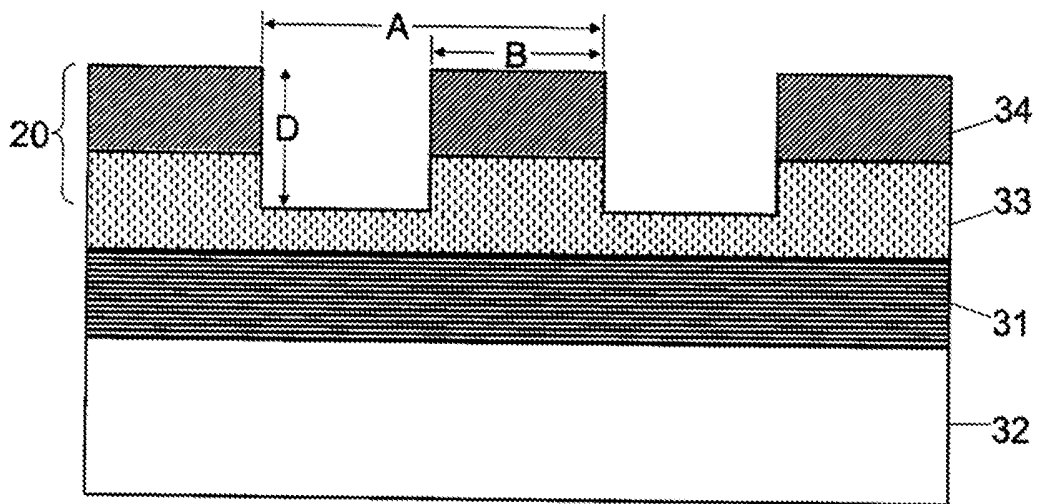
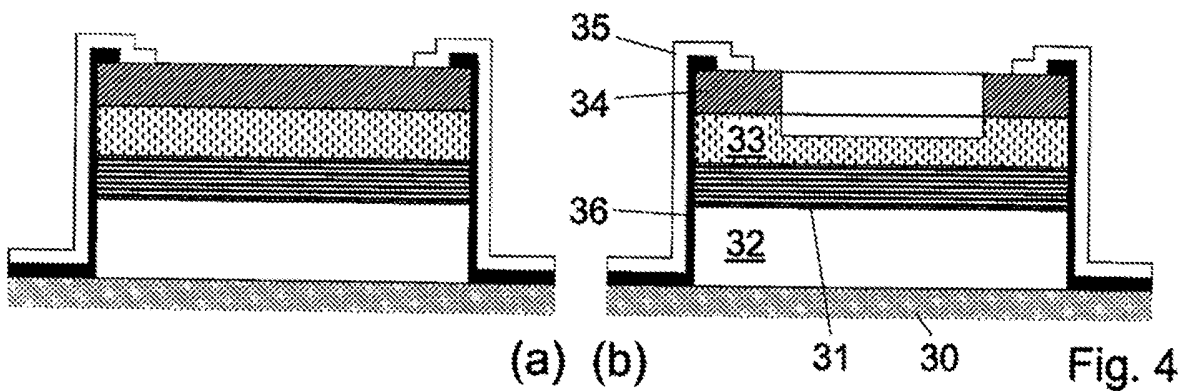


Fig. 3



(a) (b) Fig. 4

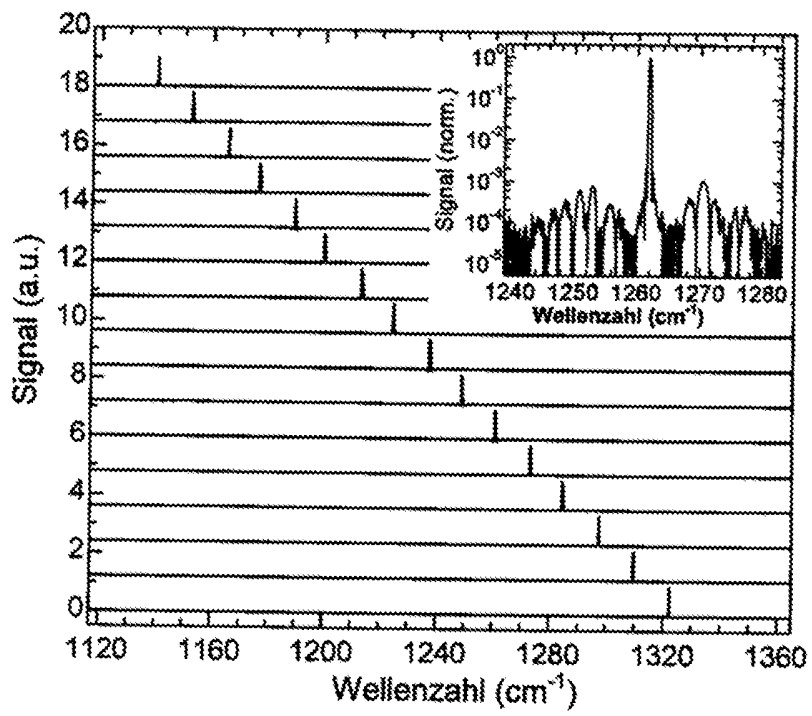


Fig. 6

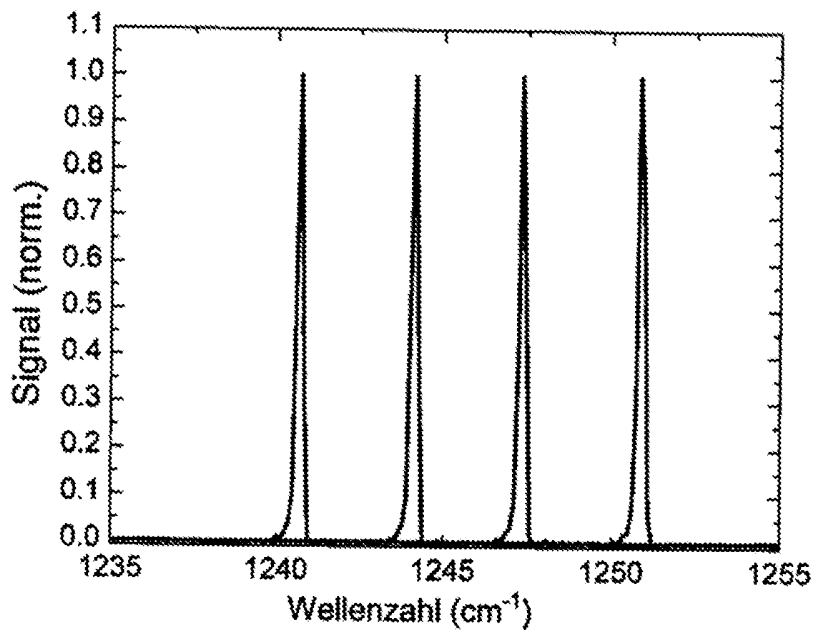


Fig. 7

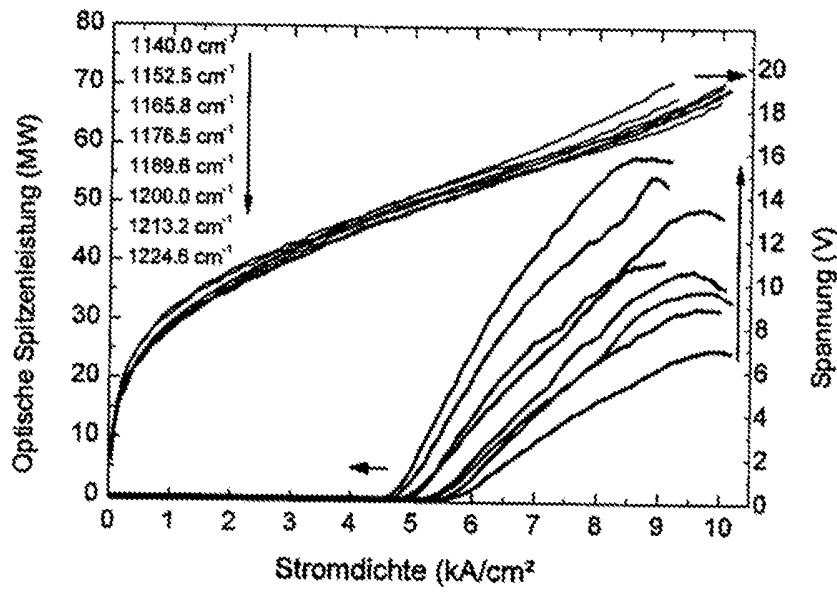


Fig. 8

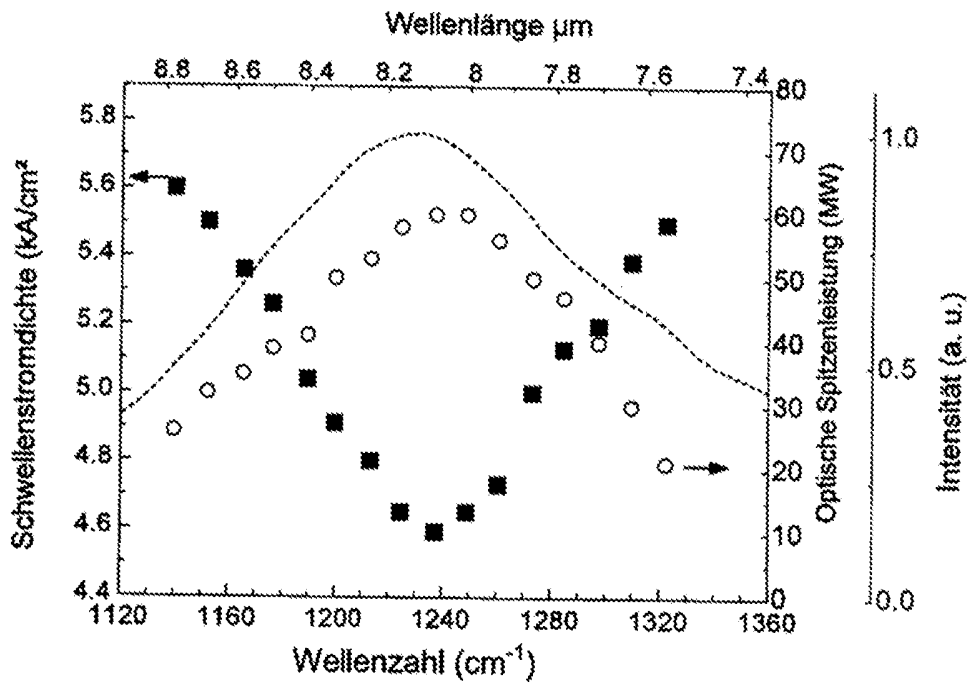


Fig. 9

