



(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 1979/2007

(51) Int. Cl.⁸: **H01S 5/026**
H01S 5/34

(22) Anmeldetag: 2007-12-05

(43) Veröffentlicht am: 2009-05-15

(56) Entgegenhaltungen:

US 2004/0223529A1

JP 63-313888A JP 2000-183449A

LEE ET AL NONLINEAR ORGANIC
POLYMERS, PHOTONICS SPECTRA
APRIL 1989,

S. 169-170, 172, 174, ISSN 0919-0647

(73) Patentanmelder:

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
A-1040 WIEN (AT)

(72) Erfinder:

BASNAR BERNHARD DR. TECHN.
WIEN (AT)

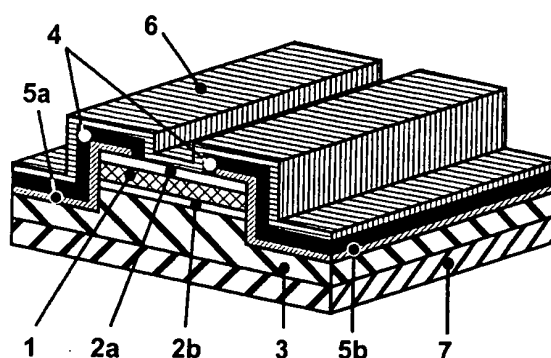
STRASSER GOTTFRIED DR.
PFAFFSTÄTTEN (AT)

AUSTERER MAXIMILIAN DIPL.ING.
WIEN (AT)

ANDREWS MAXWELL AARON DR.
WIEN (AT)

(54) HALBLEITERLASER

(57) Die Erfindung betrifft einen Halbleiterlaser, der eine aktive Zone (1) aus gegebenenfalls dotierten Halbleiterschichten zur Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung nach elektrischer Anregung, die in vier Raumrichtungen von Wellenleiterschichten (2a, 2b, 5a, 5b) umgeben ist, gegebenenfalls ein Substrat (3), und zumindest eine Stromzuführung (4) zur Anregung der Photonenbildung in den Halbleiterschichten, wobei manche Wellenleiterschichten (5a, 5b) gegebenenfalls Isolierschichten zwischen aktiver Zone (1) und Stromzuführung (4) bilden, umfasst und dadurch gekennzeichnet ist, dass zumindest ein Teil zumindest einer Wellenleiterschicht (2a, 2b, 5a, 5b) mit einer mit der elektromagnetischen Strahlung wechselwirkenden Absorptionsschicht (6) aus anorganischem und/oder organischem Material, das im Emissionswellenlängenbereich des Lasers nichthomogene Absorbanz zeigt und einen niedrigeren effektiven Brechungsindex als die aktive Zone (1) aufweist, in Kontakt steht oder aus diesem Material besteht.



Figur 1

Die Erfindung betrifft einen Halbleiterlaser mit einer die Emissionswellenlänge verändernden Absorptionsschicht.

Spektroskopieverfahren, insbesondere im mittleren Infrarot- (IR-), Terahertz- und ultravioletten (UV-) Wellenlängenbereich, sind auf den Gebieten Umweltanalytik sowie organischer und pharmazeutischer Synthese von großer Bedeutung und sind zudem viel versprechende Kandidaten für einen zukünftigen Einsatz im Securitybereich (z.B. auf Flughäfen). Durch die Verwendung von Halbleiterlasern (Diodenlasern) wird dieses Wellenlängenspektrum weitgehend abgedeckt, wobei seit einigen Jahren zunehmend Quantenkaskadenlaser (QCLs), deren Emissionswellenlängen (Gain-Spektrum) typischerweise im mittleren bis fernen Infrarot liegen, zum Einsatz kommen.

Halbleiterlaser bestehen im Wesentlichen aus einer zwischen Wellenleitern befindlichen aktiven Zone aus Halbleitermaterial, wie z.B. GaAs, durch die elektrischer Strom geleitet, zumeist gepulst ("gepumpt") wird, um aufgrund der Rekombination von Elektronen aus dem Leitungsband mit Löchern im Valenzband des Halbleiters (Interband-Übergänge) Photonen freizusetzen, die ihrerseits die Bildung weiterer Photonen derselben Wellenlänge stimulieren. Im Gegensatz dazu wird bei QCLs die Strahlung (vor allem IR-, d.h. Wärmestrahlung) durch Inter-Subband-Übergänge von Elektronen innerhalb des in eine Vielzahl von Minibändern aufgespaltenen Leitungsbands erzeugt.

Beide Lasertypen haben die inhärenten Nachteile gemein, dass die Wellenlänge des emittierten Lichts einerseits von zahlreichen Faktoren wie dem Material der aktiven Zone, der Betriebstemperatur, den Dimensionen der aktiven Zone, dem Brechungsindex des an den Wellenleiter angrenzenden Mediums etc. abhängt und andererseits nach beendeter Fertigung des Lasers, die v.a. durch Epitaxie von aktiven Schichten auf ein Substrat erfolgt, fix vorgegeben ist. Dies bedeutet, dass für verschiedene Wellenlängen jeweils ein eigener Laser hergestellt werden muss.

Zur nachträglichen Justierung der Emissionswellenlängen können optische Gitter eingesetzt werden, wobei durch Interferenzeffekte vor allem eine Homogenisierung des Laserlichts bewirkt wird. Das Gitter kann entweder auf den Wellenleiter (z.B. durch Ätzen) aufgebracht ("distributed feedback", DFB), durch die aktive Zone geätzt ("distributed Bragg reflector", DBR) oder extern vorgesehen werden ("external cavity"). Vor kurzem wurde herausgefunden, dass durch Verkippen eines externen Gitters die Wellenlänge eines QCLs kontinuierlich (zwischen 8,2 und 10,4 μm) verschoben werden kann (Appl. Phys. Lett. 89, 41115 (2006)). Aufgrund der Notwendigkeit, Antireflexbeschichtungen vorzusehen, ist die Herstellung solcher External-Cavity-Laser freilich sehr aufwändig, und sie sind aufgrund des externen Gitters für manche Anwendungen, wie z.B. "Lab-on-Chip"- (LOC-) Systeme, nicht einsetzbar.

Eine Verschiebung der Wellenlänge wurde auch durch Aufbringen bestimmter Medien mit einer höheren Brechzahl als Luft auf den Wellenleiter erzielt, um so den effektiven Brechungsindex des Wellenleiters zu beeinflussen. Dazu wurden einerseits QCLs in eine Mikrofluidik-Durchflussszelle verkapselt, durch die mehrere Flüssigkeiten (diverse Tauchöle, Methanol) geleitet wurden. Die damit erzielbare Verschiebung der Emission belief sich allerdings auf nur etwa 1 cm^{-1} (Optics Express 14(24), 11660-11667 (2006)). Andererseits wurde der Wellenleiter mit einem optischen Mantel (Cladding) aus Chalcogenid-Glas, z.B. aus As_2S_3 , versehen, was eine Verschiebung des Laserlichts von (im besten Fall) 3,8 cm^{-1} bewirkte. Bestrahlung des Mantels mit Schwarzlicht, d.h. UV-Licht, mit 368 nm Wellenlänge und daher einem die Bandlücke des Claddingmaterials übersteigenden Energiegehalt ergab eine weitere, irreversible Verschiebung um 1,3 cm^{-1} (Appl. Phys. Lett. 89, 41115 (2006)). In jedem der Fälle war ein hoher verfahrenstechnischer, zeitlicher und finanzieller Aufwand vonnöten, um eine geringfügige Veränderung der Emission herbeizuführen.

Ziel der Erfindung war vor diesem Hintergrund, eine Möglichkeit zu finden, die Emission eines

Halbleiterlasers nach dessen Fertigung auf alternative, relativ einfache Weise und in stärkerem Ausmaß als nach dem Stand der Technik modulieren zu können.

OFFENBARUNG DER ERFINDUNG

Dieses Ziel wurde erfindungsgemäß durch Bereitstellung eines Halbleiterlaser erreicht, der Folgendes umfasst:

eine aktive Zone zur Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung nach elektrischer Anregung, die aus gegebenenfalls dotierten Halbleiterschichten besteht und in zwei Raumachsen entsprechenden vier Raumrichtungen von Wellenleiterschichten umgeben ist, wobei zumindest ein Abschnitt der von der aktiven Zone abgewandten Oberfläche einer Wellenleiterschicht gegebenenfalls mit einem Substrat verbunden ist; und
zumindest eine Stromzuführung, z.B. durch Goldkontakte, zur aktiven Zone zur Anregung der Bildung von Photonen in den Halbleiterschichten;
wobei gegebenenfalls eine oder mehrere der Wellenleiterschichten elektrisch nichtleitend sind und Isolierschichten zwischen aktiver Zone und Stromzuführung(en) bilden;
und der dadurch gekennzeichnet ist, dass zumindest ein Teil zumindest einer Wellenleiterschicht mit einer mit der in der aktiven Zone erzeugten elektromagnetischen Strahlung durch Absorption wechselwirkenden Schicht, die im Folgenden als Absorptionsschicht bezeichnet wird, aus anorganischem und/oder organischem Material, das im Emissionswellenlängenbereich des Lasers nichthomogene Absorbanz zeigt und einen niedrigeren effektiven Brechungsindex als die aktive Zone aufweist, in Kontakt steht oder aus diesem Material besteht.

Diese Absorptionsschicht absorbiert einen Teil der in der aktiven Zone gebildeten Photonen. Auf diese Weise können je nach Absorbanz des Materials der Absorptionsschicht sowohl Verschiebungen und Verstärkungen von Emissionsmaxima des ursprünglichen Lasers über den gesamten Gainbereich - der sich üblicherweise über mehrere Dutzend Wellenzahlen erstreckt - als auch eine Einengung ("Schärfung") seiner Emission erzielt werden. Eine solche Absorptionsschicht ist leicht herstellbar und erfordert keine komplexen, die Herstellungskosten deutlich erhöhenden Verfahrensschritte.

Mit "nichthomogener Absorbanz" ist gemeint, dass das Absorptionsvermögen des Materials der Absorptionsschicht im Gainbereich des Lasers variiert, um eine Wellenlängenselektion durch Absorption von Photonen bestimmter Wellenlänge vornehmen zu können. Das Material braucht kein Absorptionsmaximum im Emissionsbereich des Lasers aufzuweisen. Vorzugsweise ist dies nicht der Fall, da sonst möglicherweise eine zu starke Dämpfung des Leistungsausgangs erfolgt. Es muss jedoch eine Flanke oder ein Ausläufer eines Absorptionsmaximums in den Gainbereich hinein reichen. Vorzugsweise ändert sich die Absorption des Materials der Absorptionsschicht im Emissionsbereich stark, d.h. bestimmte Wellenlängen werden deutlich stärker absorbiert als andere, da dies deutliche Veränderungen des Emissionsspektrums des Lasers ergibt.

Die Absorptionsschicht kann prinzipiell aus jedem beliebigen Material oder Materialgemisch bestehen, das zur Absorption von in der aktiven Zone gebildeten Photonen in der Lage ist, und kann fest, flüssig oder gasförmig sein, wobei feste und flüssige Materialien u.a. aus Konzentrationsgründen bevorzugt werden. Ohne sich auf eine bestimmte Theorie festlegen zu wollen, wird angenommen, dass die Absorption in dem in der Absorptionsschicht vorliegenden evaneszenten Feld der an der Grenzfläche zwischen aktiver Zone und Absorptionsschicht, wenn die Absorptionsschicht selbst den Wellenleiter bildet, bzw. zwischen Wellenleiter und Absorptionsschicht geführten Photonen erfolgt. Diese werden dadurch aus dem Spektrum entfernt und können keine Emission weiterer Photonen mehr induzieren, so dass sich die Auswirkung der Absorption eines Photons in der Folge potenziert. Im Falle einer gasförmigen Absorptionsschicht hielten sich wohl zu wenige zur Absorption befähigte Moleküle im evaneszenten Feld auf, so dass zu wenige Absorptionsvorgänge möglich wären, um signifikante Auswirkungen auf das Gain-Spektrum des Lasers haben zu können. Eine Erhöhung der Gaskonzentration an der

Grenzfläche durch höheren Gasdruck in einer druckfesten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Lasers ist zwar möglich, aber nicht bevorzugt, da eine solche Ausführungsform in der Herstellung aufwändig ist.

Wie zuvor erwähnt können eine oder mehrere Wellenleiterschichten auch zur Gänze oder teilweise aus dem Material der Absorptionsschicht bestehen und somit sowohl als Wellenleiter als auch als Absorptionsschicht dienen. Wesentlich ist lediglich, dass der effektive Brechungsindex des Absorptionsmaterials niedriger ist als jener der benachbarten Schicht, d.h. der aktiven Zone oder einer zwischen aktiver Zone und Absorptionsschicht liegenden Wellenleiterschicht. Ansonsten könnte es nicht zur Entstehung eines evaneszenten Feldes in der Absorptionsschicht kommen, so dass keine Absorption von Photonen und damit auch keine Modulierung der Laseremissionen möglich wären. Ob Wellenleiterschichten zwischen aktiver Zone und Absorptionsschicht vorgesehen werden, hängt unter anderem maßgeblich von der Konstruktion des Lasers, vom Material der Absorptionsschicht und von der Position des jeweiligen Wellenleiters in der Laservorrichtung ab. Bei Verwendung von bei Betriebstemperatur festen Materialien als Absorptionsschicht ist ein Ersatz des Wellenleiters durch die Absorptionsschicht mitunter leichter möglich als mit Flüssigkeiten, insbesondere wenn eine von außen unzugängliche Wellenleiterschicht als Absorptionsschicht ausgeführt sein soll oder die Absorptionsschicht ablösbar sein soll, worauf später noch näher eingegangen wird.

Flüssige, aber auch feste Absorptionsschichten können auf einfache Weise beispielsweise durch Streich-, Spritz-, Schleuder- oder Tauchbeschichtung, z.B. Rotationsbeschichtung (Spin-Coating), Aufdampfen oder Aufspucken, auf den Wellenleiter oder als Wellenleiter aufgebracht werden, oder der Laser kann in ein flüssiges Medium getaucht betrieben werden. Weiters kann auch eine mit Flüssigkeit gefüllte Kammer oder eine eingangs beschriebene Durchflusszelle, für die jeweils die angrenzende Wellenleiterschicht oder die Oberfläche der aktiven Zone die Grundfläche (oder ein Teil davon) ist, als Absorptionsschicht dienen.

Falls Materialien für die Absorptionsschicht verwendet werden sollen, deren Absorption im gewünschten Bereich zu stark ist, können diese mit Substanzen verdünnt werden, die keine oder schwächere Absorption im Gainbereich des Lasers zeigen. Dies gilt für sämtliche Aggregatzustände der Absorptionsschicht. Generell können Reinsubstanzen oder Gemische davon ebenso eingesetzt werden wie Lösungen (einschließlich fester Lösungen), Suspensionen, Dispersionen, Aufschlämmungen, Pasten, Gele usw., die diese Substanzen umfassen. Als Absorptionsschicht bevorzugt werden feste Materialien, da diese eine stabile, hohe Dichte an absorptionsfähigen Molekülen an der Grenzfläche bereitstellen und somit dauerhaft gute Leistungsfähigkeit zeigen. Werden Substanzgemische eingesetzt, sollten die einzelnen Komponenten zu keinen oder nur zu vorhersagbaren, erwünschten Reaktionen miteinander in der Lage sein, um stabile, reproduzierbare Bedingungen während des Laserbetriebs zu ermöglichen.

Die Dicke der Absorptionsschicht ist nicht entscheidend, solange sie ausreicht, um die beabsichtigte Wirkung zu erzielen. Sie hängt von den gewünschten Betriebsbedingungen des Lasers und von den Eigenschaften des Absorptionsmaterials, vor allem natürlich von dessen Absorbanz, aber auch vom Aggregatzustand und sonstigen physikalischen und chemischen Eigenschaften (wie Schmelzpunkt, Siedepunkt, Brechzahl, thermischer Beständigkeit, etwaiger chemischer Reaktivität mit der Umgebung usw.) unter den Betriebsbedingungen ab. Bei ausreichend starker Absorbanz kann eine monomolekulare Schicht des Absorptionsmaterials ausreichen, andererseits braucht die Dicke der Absorptionsschicht die Tiefe des evaneszenten Feldes nicht zu übersteigen, da es in diesem Bereich zu keinerlei Absorptionen mehr kommen kann. Je nach Material der Absorptionsschicht kann der Fachmann leicht die optimale Dicke für seinen Laser ermitteln, wobei auch die Wirtschaftlichkeit des Aufbringverfahrens zu berücksichtigen ist. Die Erfinder haben gute Ergebnisse mit Schichtdicken von mehreren hundert Nanometern erzielt, dieser Bereich kann jedoch im Bedarfsfall deutlich über- oder unterschritten werden.

Wie erwähnt ist jedes Material für die Absorptionsschicht geeignet, das im Wellenlängenbereich

des Lasers zu nichthomogener Absorption befähigt ist. Der Halbleiterlaser gemäß vorliegender Erfindung weist vorzugsweise eine Emissionswellenlänge im Bereich von UV-Strahlung, vorzugsweise naher UV-Strahlung, bis Terahertzstrahlung, d.h. von etwa 100 nm bis etwa 1 mm auf. Noch bevorzugter liegt die Emissionswellenlänge im Infrarotbereich, insbesondere im mittleren Infrarotbereich, d.h. zwischen etwa 1 μm , vorzugsweise etwa 3 μm , und etwa 15 μm . Dadurch kann in besonders bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung ein Quantenkaskadenlaser herkömmlicher Bauweise eingesetzt werden, der bekanntermaßen zumeist im IR- bis Terahertzbereich emittiert. Zudem existieren zahlreiche Verbindungen, die in diesen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums Absorbanz zeigen. Speziell für Wärmestrahlung emittierende Laser kommt eine sehr breite Palette anorganischer und speziell organischer Verbindungen infrage. Im UV- oder sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums absorbierende Verbindungen stehen ebenfalls in großer Zahl zur Verfügung. Für den Fachmann ist es problemlos möglich, anhand eines hochaufgelösten IR- bzw. Terahertz- oder UV-Spektrums geeignete Verbindungen für die Absorptionsschicht auszuwählen, die auf den jeweiligen Laser aufgebracht werden. Dabei sind neben der Absorbanz, wie oben erwähnt, Faktoren wie Kosten, Reaktivität, Stabilität und andere physikalisch-chemische Eigenschaften zu berücksichtigen, um eine für den Laser sozusagen "maßgeschneiderte" Absorptionsschicht bilden zu können. Speziell, aber nicht ausschließlich, für den UV-Bereich werden gemäß vorliegender Erfindung aromatische und/oder heteroaromatische Ringe enthaltende Moleküle, z.B. Pyrazin, bevorzugt, da diese eine stabile, starke Absorbanz aufweisen und verhältnismäßig unreaktiv sind, sofern sie keine reaktiven Funktionalitäten enthalten. Auch organische Polymere, wie z.B. Poly(meth)acrylsäure, sowie Derivate davon sind erfindungsgemäß bevorzugt, da mit diesen auf einfache Weise einheitliche, beständige Filme auf dem Wellenleiter erzeugt werden können.

In bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung bestehen zwei gegenüberliegende Wellenleiterschichten aus elektrisch nichtleitendem Material und können daher gleichzeitig als Isolierschichten zwischen aktiver Zone und Stromzuführungen dienen. Wenn das Material der Absorptionsschicht elektrisch isolierend ist, kann zumindest eine der Isolierschichten, nur ein Teil davon, aber auch sämtliche Isolierschichten, ebenfalls aus diesem Material bestehen, was die Wirkung der Erfindung verstärken kann, wenn dadurch mehr als eine, die aktive Zone umgebende Wellenleiterschicht als Absorptionsschicht dient. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Dämpfungswirkung nicht zu stark wird. Ansonsten wird als Isolierschicht in Abhängigkeit vom Wellenlängenbereich des Lasers üblicherweise SiO_2 oder SiN_x verwendet, es kann aber auch ein mit Luft gefüllter Raum als Isolator dienen.

Gemäß vorliegender Erfindung steht vorzugsweise zumindest eine Wellenleiterschicht zur Gänze mit einer Absorptionsschicht in Kontakt bzw. besteht zur Gänze aus dem Absorptionsmaterial, um eine möglichst starke Wirkung zu erzielen. Dies ist besonders bei Materialien mit nicht allzu starker Absorbanz im Gainbereich die Methode der Wahl. Speziell in solchen Fällen können auch mehrere Wellenleiterschichten eine Absorptionsschicht aufweisen oder eine solche bilden. Allerdings kann auch nur ein Teil einer oder mehrerer Wellenleiterschichten mit der Absorptionsschicht in Kontakt stehen oder daraus bestehen. Diese Variante kann beispielsweise bei besonders stark absorbierenden Verbindungen als Material der Absorptionsschicht gewählt werden. In diesem Fall kann die Absorptionsschicht auch in Form eines regelmäßigen Musters ausgebildet sein, beispielsweise um zusätzlich zur materialabhängigen Wechselwirkung auch als optisches Gitter auf dem Wellenleiter zu dienen. Auch Kombinationen von vollflächiger und teilweiser Bedeckung der aktiven Zone und/oder mehrerer Wellenleiterschichten in unterschiedlichen Raumrichtungen sind möglich. Beispielsweise können gleichzeitig als Isolierschichten dienende Wellenleiterschichten zur Gänze aus dem (nichtleitenden) Absorptionsmaterial bestehen, während eine weitere Wellenleiterschicht mit einer rasterförmigen Absorptionsschicht bedeckt ist.

In weiteren bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung ist die Absorptionsschicht, sofern sie lediglich auf eine oder mehrere Wellenleiterschichten aufgebracht ist und diese nicht daraus bestehen, nicht fix mit diesen Schichten verbunden, sondern davon ablösbar oder trennbar. Das

heißt, dass die Absorptionsschicht auf dem Wellenleiter lediglich aufliegt und z.B. mechanisch davon abgehoben werden kann, wodurch der Laser zwischen zwei Emissionsmoden schaltbar ist. Dies ist für zahlreiche Anwendungen von Vorteil, beispielsweise in der Analytik, wo ein emittierter Lichtstrahl beispielsweise zur Messung von Eigenschaften einer Probe und der modifizierte Strahl als Referenz dienen kann oder umgekehrt, oder auch zur digitalen Informationsübertragung (Zustände "aus" und "ein" oder 0 und 1).

Das Entfernen der Absorptionsschicht kann auf beliebige Weise, z.B. durch Abheben eines mit einem Film aus dem Absorptionsschichtmaterial beschichteten Bauteils, z.B. Plättchens, durch einfache Hebelwirkung oder auch mittels eines Elektromagneten, erfolgen. Vorzugsweise wird jedoch ein solcher Bauteil durch Elektrostriktion an den Wellenleiter angedrückt und von diesem entfernt. Dazu muss der Bauteil aus einem Material gefertigt werden, der reziprok piezoelektrisches, d.i. elektrostriktives, Verhalten zeigt, d.h. bei Anlegen von elektrischer Spannung eine Verformung erfährt und bei Wegfall der Spannung wieder in den Grundzustand zurückkehrt. Ob der Bauteil im spannungsfreien Zustand am Wellenleiter anliegt oder erst unter Spannung an diesen angedrückt wird, ist nicht entscheidend. Falls das Material der Absorptionsschicht selbst elektrostriktives Verhalten zeigt, kann der Bauteil auch ausschließlich aus einer Folie aus dem Absorptionsmaterial bestehen. Eine solche Entfernung der Absorptionsschicht kann freilich auch erfolgen, wenn diese eine Wellenleiterschicht bildet. In diesem Fall würde nach dem Entfernen eine Luftschicht den Wellenleiter bilden.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Lasers.

Fig. 2 illustriert schematisch das Funktionsprinzip der Erfindung.

Fig. 3 zeigt das Emissionsspektrum des in Beispiel 1 hergestellten Lasers mit Pyrazin als Material der Absorptionsschicht.

Fig. 4 zeigt einen Ausschnitt der IR-Spektren von Polyacrylsäure und deren Kaliumsalz.

Fig. 5 zeigt das Emissionsspektrum der in den Beispielen 2 bis 5 hergestellten Laser mit Polyacrylsäurekaliumsalz als Material der Absorptionsschicht.

Fig. 6 zeigt die Emissionsspektren der in den Beispielen 6 bis 9 hergestellten Laser mit Polyacrylsäure als Material der Absorptionsschicht.

Eine Ausführungsform eines Halbleiterlasers der vorliegenden Erfindung in Form eines Quantenkaskadenlasers ist zu Illustrationszwecken in Fig. 1 schematisch dargestellt. Dabei bezeichnen die Bezugszeichen 1 die aktive Zone, in der die elektromagnetische Strahlung generiert wird; 2a und 2b zwei ober- bzw. unterhalb der aktiven Zone angeordnete Wellenleiterschichten; 3 ein Substrat als Träger für die aktive Zone sowie zur Wärmeableitung und zur Verbesserung der Stromverteilung in der aktiven Zone 1; 4 eine zweigeteilte Zuführung für elektrischen Strom; 5a und 5b Isolierschichten zwischen der aktiven Zone bzw. dem Substrat und den Stromzuleitern 4; 6 eine erfindungsgemäße Absorptionsschicht; und 7 ein Trägerplättchen für den Laser, das gleichzeitig als Gegenelektrode dient.

Bei Inbetriebnahme des Lasers fließt über die Stromzuleiter 4, die üblicherweise aus Gold- oder Ge/Au/Ni/Au-Schichten, vorzugsweise mit einer Titanschicht als Haftvermittler, bestehen, ein gegebenenfalls gepulster Gleichstrom, der an zwei Stellen im Querschnitt des Lasers in den Wellenleiter 2a eintritt, worin sich das elektrische Feld homogen ausbreiten kann. In der Folge fließen Elektronen von oben nach unten durch die aktive Zone 1, Wellenleiter 2b und Substrat 3 zum Träger 7 hin. In der aktiven Zone gehen Elektronen innerhalb des Leitungsbands der ver-

wendeten Halbleiter durch elektrische Anregung von einem elektronischen Zustand auf einen energetisch höher liegenden Zustand über, um von diesem in einer Kaskade in einem Inter-Subband-Übergang unter Aussendung eines Photons in einen Grundzustand zurückzukehren, der dem angeregten Zustand der nächsten Kaskade entspricht. In überwiegendem Ausmaß

5 kommt es jedoch nicht zu spontaner, sondern zu induzierter Emission. Das heißt, die durch elektrische Anregung gebildeten Primärphotonen induzieren die Sprünge von angeregten Elektronen auf niedrigere Energieniveaus, was einen Verstärkereffekt darstellt. Die so entstehenden Photonen sind zudem bezüglich Energie, Ausbreitungsrichtung und Phase mit den einlaufenden stimulierenden Photonen identisch, weswegen die dabei ausgesandte Strahlung kohärent ist.

10 Die Isolierschichten 5a und 5b dienen nicht nur zur Verhinderung einer Stromzufuhr an den Seitenflächen der aktiven Zone 1, sondern auch zur Lichtführung, wodurch die Laseremission schließlich in der Ebene der aktiven Zone bzw. in einem kleinen Winkel dazu aus dem Laser austritt.

15 Im mittleren Bild von Fig. 2 ist schematisch ein Emissionsspektrum eines Quantenkaskadenlasers ohne Absorptionsschicht dargestellt.

20 Die erfindungsgemäße Absorptionsschicht beeinflusst allerdings dieses Spektrum, wofür folgender Mechanismus angenommen wird. Die in der aktiven Zone 1 entstandene Strahlung wird auch an der Grenzfläche zwischen Wellenleiter 2a und der Absorptionsschicht 6 geführt, wobei es jedoch aufgrund der niedrigeren Brechzahl der Absorptionsschicht zur Ausbildung eines evaneszenten Feldes kommt, das bis zu einer der halben Wellenlänge der Strahlung entsprechenden Tiefe in die Absorptionsschicht 6 hinein reicht, obwohl - wie die Erfinder in ihren Experimenten zeigen konnten - nur für wenige Prozent der geführten optischen Mode eine reelle Aufenthaltswahrscheinlichkeit in der Absorptionsschicht besteht. In der Absorptionsschicht kann

25 dadurch vom Material der Schicht, das bei diesen Wellenlängen Absorbanz zeigt, wie im oberen Bild von Fig. 2 schematisch gezeigt wird, ein Teil dieser Photonen absorbiert werden, die somit keine weitere Emission induzieren können und bei deren Wellenlängen daher das Emissionsspektrum des Lasers entsprechend gedämpft wird. Im Optimalfall verschwinden die zugehörigen Peaks gänzlich aus dem Spektrum. In Fig. 2 endet das Absorptionsspektrum des Materials der Absorptionsschicht bei niedrigeren Wellenlängen an einem weiteren Absorptionsmaximum, was bewirkt, dass ein mit einem Material dieser Absorptionscharakteristik in Kontakt stehender, idealisierter Laser lediglich Wellenlängen emittieren könnte, die zwischen den beiden Absorptionsmaxima liegen, wie im unteren Bild von Fig. 2 dargestellt ist.

30

35

Wie bereits erwähnt braucht kein Absorptionsmaximum des Materials oder der Materialien der Absorptionsschicht im Gainspektrum des Lasers zu liegen und soll dies aufgrund der ansonsten möglicherweise zu starken Dämpfung der Laserleistung auch nicht. Das bedeutet, dass gemäß

40 vorliegender Erfindung eine der Lage des linken Maximums im oberen Bild von Fig. 2 entsprechende Absorbanz der Absorptionsschicht bevorzugt wird. So könnten beispielsweise sämtliche Peaks im hochenergetischen Abschnitt des Emissionsspektrums des unbeschichteten Lasers aus dem Spektrum "gelöscht" werden, was zu einer engeren, verstärkten Emission bei niedrigerer Energie (höherer Wellenlänge) führen würde.

45 Die Absorptionsschicht 6 ist in Fig. 1 als ein die gesamte Oberfläche des Lasers bedeckender Film dargestellt, was eine mögliche Ausführungsform der Erfindung ist. Bei Verwendung von entsprechend preisgünstigem Material der Absorptionsschicht wird dies die Variante der Wahl sein, da ein beliebiges, rasches Aufbringungsverfahren, z.B. Schleuder- oder Rotationsbeschichtung

50 mit einem flüssigen Absorptionsmaterial oder einer Lösung eines Feststoffs und Abdampfen des Lösungsmittels, zum Einsatz kommen kann. Soll die Absorptionsschicht nur auf dem Wellenleiter oder sogar nur auf Teilen davon, z.B. als optisches Gitter, oder als Wellenleiter direkt auf der aktiven Zone vorgesehen werden, können Verfahren wie etwa verschiedene Varianten der Lithographie angewandt werden.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von nichteinschränkenden Beispielen illustriert.

BEISPIELE

- 5 In den Synthesebeispielen wurden Quantenkaskadenlaser (QCL) durch epitaxiales Aufwachsen von Schichten der aktiven Zone auf ein Substrat hergestellt, die anschließend wie in den Beispielen 1 bis 9 beschrieben mit einer Absorptionsschicht versehen wurden.

Synthesebeispiel 1

- 10 Auf ein GaAs-Substrat wurden abwechselnd Schichten aus AlGaAs, genauer gesagt $\text{Al}_{0,45}\text{Ga}_{0,55}\text{As}$, und GaAs in einem 3-Well-Design aufgewachsen, so dass insgesamt 40 Kaskaden erhalten wurden. Diese aktive Zone wurde in einen schwach dotierten ($3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) GaAs-Kern (unten $2,7 \mu\text{m}$, oben $3,3 \mu\text{m}$) mit einem unteren (d.h. zum Substrat hin) optischen Confinement aus einer $1 \mu\text{m}$ dicken $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ -Schicht. Das obere Confinement war durch den Brechzahlunterschied zur Umgebungsluft gegeben ("air cladding"). Die oberste, 100 nm dicke, stark dotierte ($3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) GaAs-Schicht wurde lediglich zur Erzielung einer homogenen Stromverteilung aufgewachsen.

- 20 Konkret wurden die folgenden Verfahrensschritte durchgeführt:

Ätzen der Stege:

- Rotationsbeschichtung: Photoresist AZ 5214 (1:0), 35 s, 4000 U/min;
- 25 - Backen: 1 min, 120°C ;
- Belichtung: Ridge B-Maske, 12 s;
- Entwicklung: Entwickler MIF 726, 40 s, Spülen, Trocknen;
- Ätzen: RIE ("reactive ion etching"), 96 min, $20 \text{ Ncm}^3 \text{ SiCl}_4$, 20 mTorr Basisdruck, 60 W Hochfrequenz, 0 W induktiv gekoppeltes Plasma (ICP),
- 30 Äztiefe: $\sim 10 \mu\text{m}$;
- Entfernung von überschüssigem Resist mit Aceton.

Elektrische Isolierung der Stege:

- 35 - PECVD ("plasma enhanced chemical vapor deposition"): SiN_x , 20 min, Dicke: $\sim 300 \text{ nm}$ (Oxford Systems PlasmaLab 80 plus);
- Rotationsbeschichtung: Photoresist Shipley maP 275 (1:0), 35 s, 8000 U/min;
- Backen: 5 min, 100°C ;
- Belichtung: Isoliermaske, 60 s;
- 40 - Entwicklung: Entwickler maD 330, 60 s, Spülen, Trocknen;
- Ätzen: RIE, 14 min, $20 \text{ Ncm}^3 \text{ SF}_6$, 20 mTorr Basisdruck, 60 W Hochfrequenz, 0 W ICP
- Äztiefe: $\sim 300 \text{ nm}$;
- Entfernung von überschüssigem Resist mit Aceton.

45

Metallisierung für die oberen Kontakte:

- Rotationsbeschichtung: Photoresist Shipley maP 275 (1:0), 35 s, 8000 U/min;
- Backen: 5 min, 100°C ;
- 50 - Belichtung: Maske aus Metall (2. Ordnung), 60 s;
- Belichtung: Maske aus Metall (2. Ordnung), um $7 \mu\text{m}$ verschoben, 60 s;
- Entwicklung: Entwickler maD 330, 60 s, Spülen, Trocknen;
- Ti/Au-Sputtern: Ti-Target 2 x 30 s, 25 W Hochfrequenzleistung;
- Au-Target 15 x 40 s, 25 W Hochfrequenzleistung
- 55 (Dicke: $\sim 500 \text{ nm}$);

- Goldabhebung mit Aceton im Ultraschallbad, 1 min, 10 % Leistung.

Metallisierung für die unteren Kontakte:

- 5 - Ti/Au-Sputtern: Ti-Target 2 x 30 s, 25 W Hochfrequenzleistung;
Au-Target 2 x 120 s, 50 W Hochfrequenzleistung
(Dicke: ~ 500 nm).

- 10 Auf diese Weise wurden Laserstrukturen mit einer Länge von 1,97 mm und einer Breite von 40 μm erzeugt. Diese wurden mittels einer Indium-Schicht als Haftvermittler und elektrischer Kontaktvermittler mit einem Cu-Träger verbunden. Fabry-Perot-Moden wurden zwischen 1150 und 1167 cm^{-1} emittiert.

Synthesebeispiel 2

- 15 Die aktive Zone wurde durch Molekülstrahl-Epitaxie abwechselnder InGaAs/InAlAs-Schichten in einem $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ -4-Well-Design hergestellt. Ausgehend von einem stark dotierten ($2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) InP-Substrate wurde eine 2,2 μm dicke, schwach dotierte ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) InP-Schicht als dielektrischer unterer Wellenleiter aufgewachsen, gefolgt von einer 100 nm dicken
- 20 InGaAs-Pufferschicht ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). Anschließend wurde aus 35 aktiven Schichten eine 1,84 μm dicke aktive Zone, gefolgt von einer weiteren, 600 nm dicken InGaAs-Pufferschicht ($1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) einer 10 nm dicken, stark dotierten ($7,2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) InGaAs-Schicht zur Kontaktverbesserung erzeugt. Der obere Teil des Wellenleiters wurde als Luftwellenleiter ausgeführt, um einen Wechselwirkungsbereich mit der Absorptionsschicht bereitzustellen. Daher wurden
- 25 oberhalb der Laserstege Luftfenster freigelassen, und die Laservorrichtungen wurden über äußere Kontaktkissen mit 2 μm breiten, seitlichen Kontaktstreifen auf beiden Seiten entlang der Stege kontaktiert. Die Kontaktsschichten bestanden aus Ti/Au-Streifen (10/500 nm), die auf eine 300 nm dicke SiNx-Isolierschicht aufgesputtert wurden. Auf diese Weise wurden vier Laserstrukturen mit einer Länge von 2,02 mm und variabler Breite von 28, 38, 48 bzw. 58 μm
- 30 erzeugt. Fabry-Perot-Moden wurden zwischen 1285 und 1317 cm^{-1} emittiert.

Beispiel 1 - QCL mit einer Absorptionsschicht aus Pyrazin

- 35 Auf den oberen Wellenleiter eines wie oben in Synthesebeispiel 1 beschriebenen hergestellten QCLs wurde eine Lösung von Pyrazin in Hexan/Aceton = 1:1 aufgetropft und durch Abdampfen des Lösungsmittels bei Raumtemperatur eine Pyrazinschicht als Absorptionsschicht mit einer Dicke von etwa 50 nm gebildet.

- 40 In Fig. 3 sind übereinander ein Ausschnitt aus dem IR-Spektrum von Pyrazin sowie das Emissionsspektrum des unbeschichteten und des mit Pyrazin beschichteten Lasers (zu Vergleichszwecken in willkürlichen Einheiten über der Wellenzahl in cm^{-1}) dargestellt. Pyrazin besitzt eine von etwa 1150 cm^{-1} bis etwa 1161 cm^{-1} abfallende Flanke eines breiten Absorptionsmaximums. Da der Laser zwischen 1150 und 1167 cm^{-1} emittierte, wurde durch die Absorptionsschicht aus Pyrazin der größte Teil des Spektrums gedämpft. Das ursprünglich bei etwa 1157 cm^{-1} liegende
- 45 Emissionsmaximum wurde um rund 17 Wellenzahlen zu etwa 1174 cm^{-1} verschoben, wo die außerhalb des Pyrazin-Absorptionsmaximums liegende, zuvor nur mittelstarke Emission deutlich verstärkt wurde. Die Peaks in unmittelbarer Nachbarschaft des ursprünglichen Emissionsmaximums waren nahezu vollständig verschwunden.

- 50 Beispiele 2 bis 5 - QCLs mit einer Absorptionsschicht aus Kaliumpolyacrylat

- 55 Auf den oberen Wellenleiter der vier in Synthesebeispiel 2 hergestellten QCLs unterschiedlicher Breite wurde ein Tropfen einer Lösung von Polyacrylsäure (PAA) in wässriger KOH-Lösung, die durch Erhitzen von 0,15 g PAA (mittlere Viskosität, Fluka) mit 0,11 g KOH in 50 ml destilliertem Wasser bis zum vollständigen Auflösen des Polymers hergestellt worden war, auf den jeweili-

gen Laser aufgebracht, der QCL mit 3000 U/min rotiert und anschließend durch Abdampfen des Wassers bei 120 °C eine Absorptionsschicht aus Kaliumpolyacrylat mit einer Dicke von etwa 500 nm gebildet.

In Fig. 4 ist ein Ausschnitt der IR-Spektren von Kaliumpolyacrylat und PAA (die in den Beispielen 6 bis 9 als Absorptionsschicht eingesetzt wurde) dargestellt. Kaliumpolyacrylat besitzt ein Absorptionsmaximum um etwa 1345 cm⁻¹, das zu niedrigeren Wellenzahlen hin bis etwa 1280 cm⁻¹ abfällt. Da die unbeschichteten Laser bei etwa 1285 bis 1317 cm⁻¹ emittierten (in Fig. 4 als "Laseremission" gekennzeichnet), sollte die Absorptionsschicht das Emissionsmaximum der Laser zu niedrigeren Wellenzahlen hin verschieben (Rotverschiebung).

Fig. 5 zeigt von oben nach unten die Emissionsspektren der in den Beispielen 2 bis 5 hergestellten QCLs mit Breiten von 28, 38, 48 und 58 µm jeweils ohne (punktierte Linien) und mit (durchgehende Linien) der Absorptionsschicht aus Kaliumpolyacrylat. Auffällig ist zunächst, dass die Breite des Lasers einen merklichen Einfluss auf dessen Emission ausübt: Die Emissionsmaxima der unbeschichteten QCLs unterscheiden sich um mehrere Wellenzahlen voneinander.

Die Absorptionsschichten aus Kaliumpolyacrylat der Beispiele 2, 4 und 5 bewirkten gegenüber den unbeschichteten QCLs nur geringfügige Verschiebungen der Emissionsmaxima. In Beispiel 3 wurde das Maximum jedoch um etwa 8 Wellenzahlen von etwa 1293 cm⁻¹ zu etwa 1301 cm⁻¹ verschoben. In den Beispielen 2 bis 4, vor allem in den Beispielen 2 und 3, kam es außerdem zu einer erheblichen Einengung oder Homogenisierung der Emissionen. In allen Fällen lag der Emissionsbereich nach Aufbringung der Absorptionsschicht zwischen etwa 1290 cm⁻¹ und etwa 1303 cm⁻¹.

Beispiele 6 bis 9 - QCLs mit einer Absorptionsschicht aus Polyacrylsäure

Die in den Beispielen 2 bis 5 hergestellten Absorptionsschichten aus Kaliumpolyacrylat wurden durch Aufblasen von HCl-Gas für 1 min jeweils in die freie Säure übergeführt.

Wie in Fig. 4 zu erkennen, besitzt die freie Säure ein Absorptionsmaximum bei etwa 1260 cm⁻¹. Da die unbeschichteten Laser bei etwa 1285 bis 1317 cm⁻¹ emittierten, sollte die PAA-Absorptionsschicht deren Emissionsmaximum zu höheren Wellenzahlen hin verschieben (Blauverschiebung).

Fig. 6 zeigt von oben nach unten die Emissionsspektren der in den Beispielen 6 bis 9 hergestellten QCLs mit Breiten von 28, 38, 48 und 58 µm jeweils ohne (punktierte Linien) und mit (durchgehende Linien) der Absorptionsschicht aus Polyacrylsäure.

Der in Beispiel 6 verwendete QCL mit einer Breite von 28 µm wies ohne Beschichtung drei starke Emissionsmaxima um etwa 1292, 1298 und 1302 cm⁻¹ auf. Diese wurden durch die Absorptionsschicht vollständig "gelöscht". Stattdessen wies der PAA-beschichtete Laser einen äußerst scharfen Emissionspeak bei etwa 1309 cm⁻¹ auf, wo zuvor nur geringfügige Emission zu beobachten gewesen war. Die Emission wurde durch die Absorptionsschicht aus PAA somit wie in Beispiel 1 um bis zu 17 Wellenzahlen verschoben und zudem deutlich homogenisiert.

Der in Beispiel 7 verwendete QCL mit einer Breite von 38 µm wies ohne Beschichtung nur ein starkes Emissionsmaximum um etwa 1293 cm⁻¹ sowie zwei schwache Maxima um etwa 1285 und etwa 1303 cm⁻¹ auf. Diese wurden durch die Absorptionsschicht auch in diesem Fall vollständig aus dem Spektrum "gelöscht". Stattdessen wies der PAA-beschichtete Laser nun ein Emissionsmaximum um etwa 1307 cm⁻¹ auf, wo zuvor kaum Emission zu beobachten gewesen war. Das Emissionsmaximum wurde durch die Absorptionsschicht aus PAA somit um 14 Wellenzahlen verschoben und homogenisiert.

Der in Beispiel 8 verwendete QCL mit einer Breite von 48 μm wies ohne Beschichtung ein sehr breites Emissionsmaximum um etwa 1301 cm^{-1} (von etwa 1288 bis 1310 cm^{-1}) auf. Erneut wurde diese Emission durch die Absorptionsschicht praktisch vollständig "gelöscht" bzw. zu einem Emissionsmaximum um etwa 1310 cm^{-1} verschoben, wo zuvor kaum Emission zu beobachten gewesen war. Das Emissionsmaximum wurde durch die Absorptionsschicht aus PAA somit um 9 Wellenzahlen verschoben und homogenisiert.

Der in Beispiel 9 verwendete QCL mit einer Breite von 58 μm wies ohne Beschichtung einen sehr scharfen Emissionspeak bei etwa 1297 cm^{-1} auf. Auch hier wurde diese Emission vollständig zu einem Emissionsmaximum um etwa 1311 cm^{-1} (Doppelppeak bei etwa 1310 und 1312 cm^{-1}) verschoben, wo zuvor keinerlei Emission zu beobachten gewesen war. Das Emissionsmaximum wurde durch die Absorptionsschicht aus PAA somit um 14 Wellenzahlen verschoben.

In allen vier Fällen lag der Emissionsbereich nach Aufbringung der Absorptionsschicht zwischen etwa 1303 cm^{-1} und etwa 1319 cm^{-1} .

Aus den obigen Ausführungsbeispielen ist jedenfalls klar zu erkennen, dass durch die vorliegende Erfindung die Emissionen von Halbleiterlasern auf signifikante Weise modifiziert werden können. Es ist den Erfindern gelungen, sowohl deutliche Verschiebungen der Emissionsmaxima um bis zu 17 Wellenzahlen, was um eine Größenordnung über den nach dem Stand der Technik erzielbaren Werten liegt, als auch erhebliche Verbesserungen der Homogenität der Emissionen zu bewirken. Mit einer erfindungsgemäßen Absorptionsschicht versehene Halbleiterlaser, vor allem Quantenkaskadenlaser, sind zudem rasch, einfach und kostengünstig herstellbar und stellen demnach eine wertvolle Erweiterung des Standes der Technik dar.

Patentansprüche:

1. Halbleiterlaser, Folgendes umfassend:
eine aktive Zone (1) zur Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung nach elektrischer Anregung, die aus gegebenenfalls dotierten Halbleiterschichten besteht und in zwei Raumachsen entsprechenden vier Raumrichtungen von Wellenleiterschichten (2a, 2b, 5a, 5b) umgeben ist, wobei zumindest ein Abschnitt der von der aktiven Zone (1) abgewandten Oberfläche einer Wellenleiterschicht (2b) gegebenenfalls mit einem Substrat (3) verbunden ist; und
zumindest eine Stromzuführung (4), z.B. durch Goldkontakte, zur aktiven Zone (1) zur Anregung der Bildung von Photonen in den Halbleiterschichten;
wobei gegebenenfalls eine oder mehrere der Wellenleiterschichten (5a, 5b) elektrisch nichtleitend sind und Isolierschichten zwischen aktiver Zone (1) und Stromzuführung(en) (4) bilden;
dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Teil zumindest einer Wellenleiterschicht (2a, 2b, 5a, 5b) mit einer mit der in der aktiven Zone (1) erzeugten elektromagnetischen Strahlung durch Absorption wechselwirkenden Schicht (6) aus anorganischem und/oder organischem Material, das im Emissionswellenlängenbereich des Lasers nichthomogene Absorbanz zeigt und einen niedrigeren effektiven Brechungsindex als die aktive Zone (1) aufweist, in Kontakt steht oder aus diesem Material besteht.
2. Halbleiterlaser nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Material aus aromatische und/oder heteroaromatische Ringe enthaltenden Molekülen und organischen Polymeren ausgewählt ist.
3. Halbleiterlaser nach Anspruch 2, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Material aus Pyrazin, Poly(meth)acrylsäure, Kombinationen und Derivaten davon ausgewählt ist.

4. Halbleiterlaser nach einem der vorangegangenen Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, dass zwei gegenüberliegende Wellenleiterschichten (5a, 5b) als Isolierschichten ausgeführt sind.
- 5 5. Halbleiterlaser nach Anspruch 4, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Material der Isolierschichten (5a, 5b) Luft ist.
6. Halbleiterlaser nach Anspruch 4, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Material der Absorptionsschicht (6) elektrisch isolierend ist und zumindest eine der Isolierschichten (5a, 5b) zu-
- 10 mindest zum Teil ebenfalls aus diesem Material besteht.
7. Halbleiterlaser nach einem der vorangegangenen Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, dass dieser ein Quantenkaskadenlaser ist.
- 15 8. Halbleiterlaser nach einem der vorangegangenen Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Emissionswellenlänge des Lasers im Bereich von UV-Strahlung, vorzugsweise naher UV-Strahlung, bis Terahertzstrahlung liegt.
9. Halbleiterlaser nach Anspruch 8, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Emissionswellenlänge
- 20 im Infrarotbereich, vorzugsweise im mittleren Infrarotbereich, liegt.
10. Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 9, *dadurch gekennzeichnet*, dass zumindest eine Wellenleiterschicht (2a, 2b, 5a, 5b) zur Gänze mit der Absorptionsschicht (6) in Kontakt steht oder daraus besteht.
- 25 11. Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 1 bis 9, *dadurch gekennzeichnet*, dass nur ein Teil zumindest einer Wellenleiterschicht (2a, 2b, 5a, 5b) mit der Absorptionsschicht (6) in Kontakt steht oder daraus besteht.
- 30 12. Halbleiterlaser nach Anspruch 11, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Absorptionsschicht (6) ein regelmäßiges Muster bildet.
13. Halbleiterlaser nach einem der vorangegangenen Ansprüche, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Absorptionsschicht (6) von den damit in Kontakt stehenden Wellenleiterschichten
- 35 (2a, 2b, 5a, 5b) ablösbar ist.

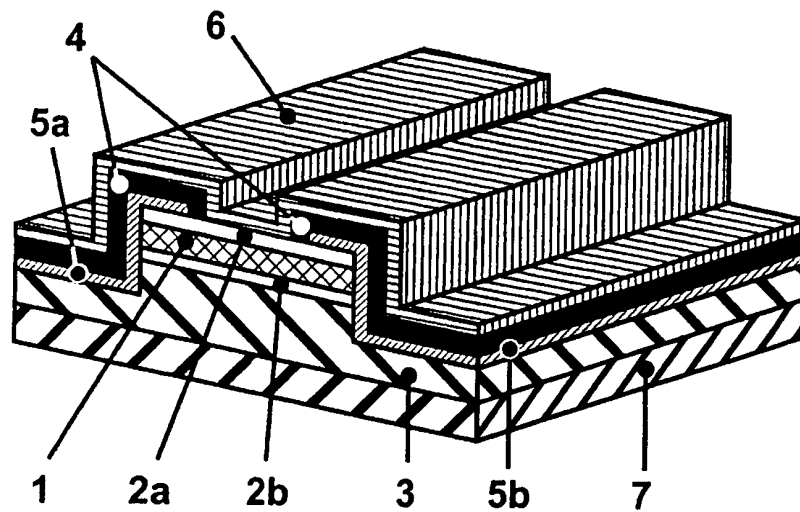
Hiezu 6 Blatt Zeichnungen

40

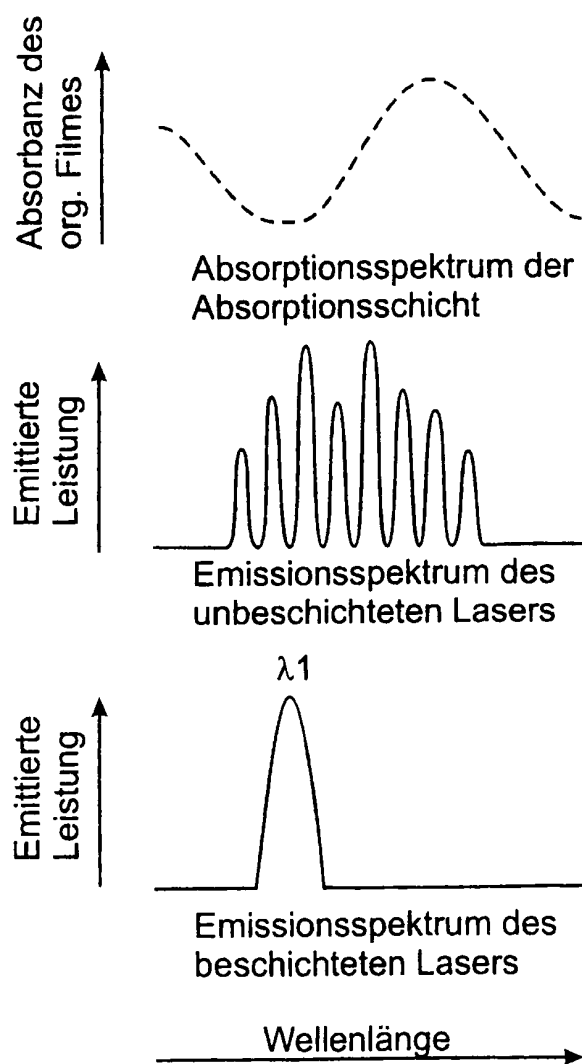
45

50

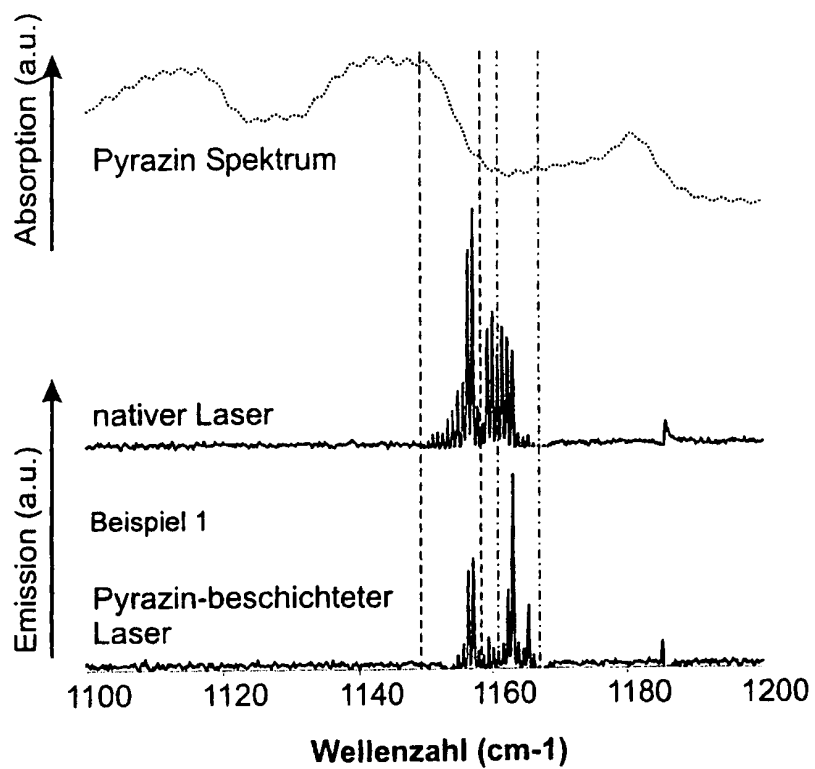
55



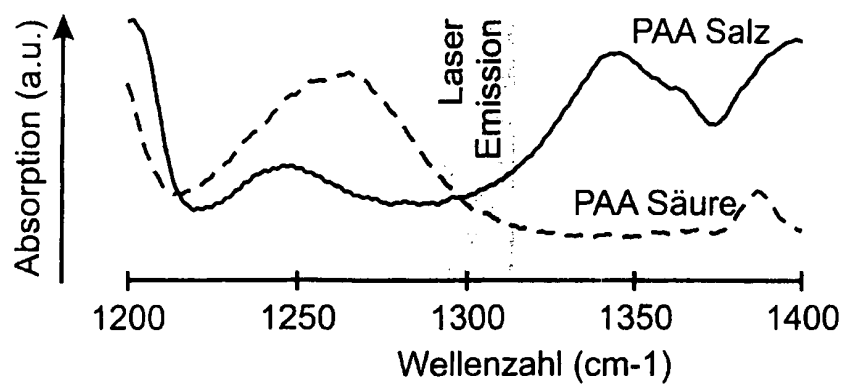
Figur 1



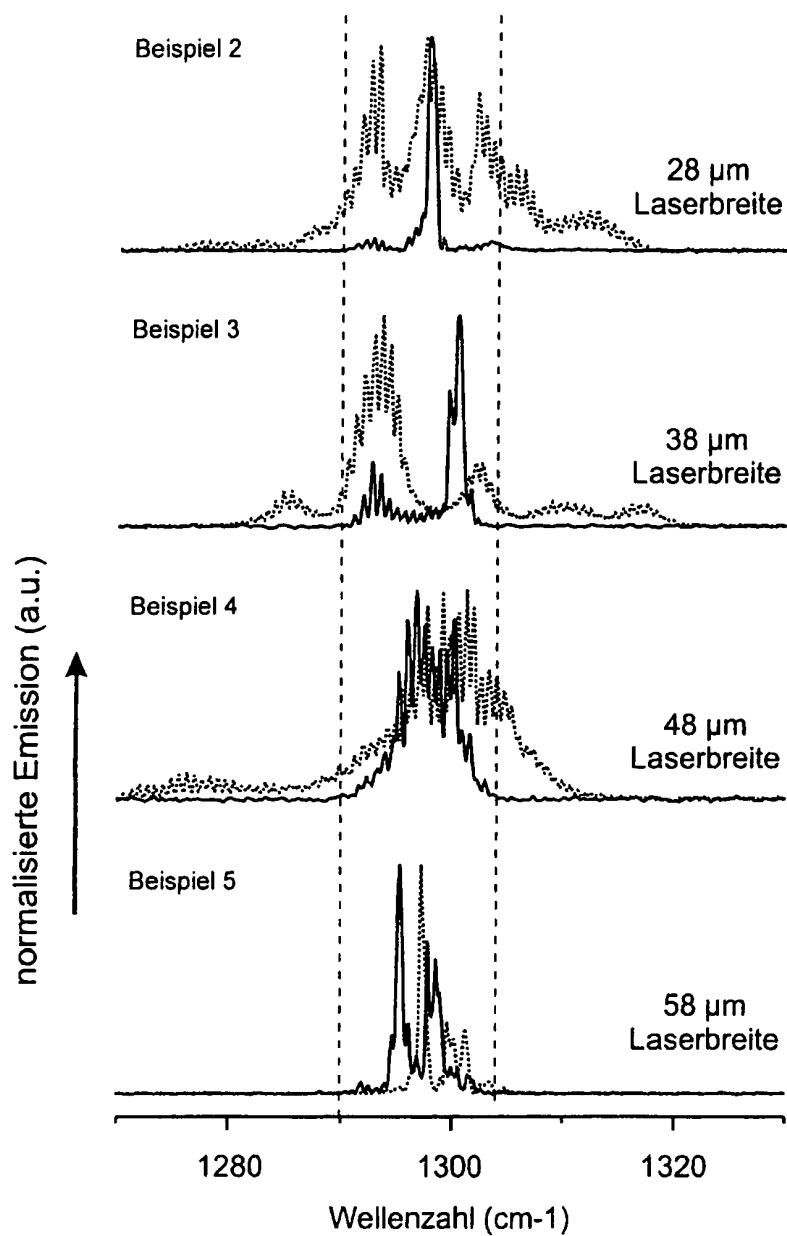
Figur 2



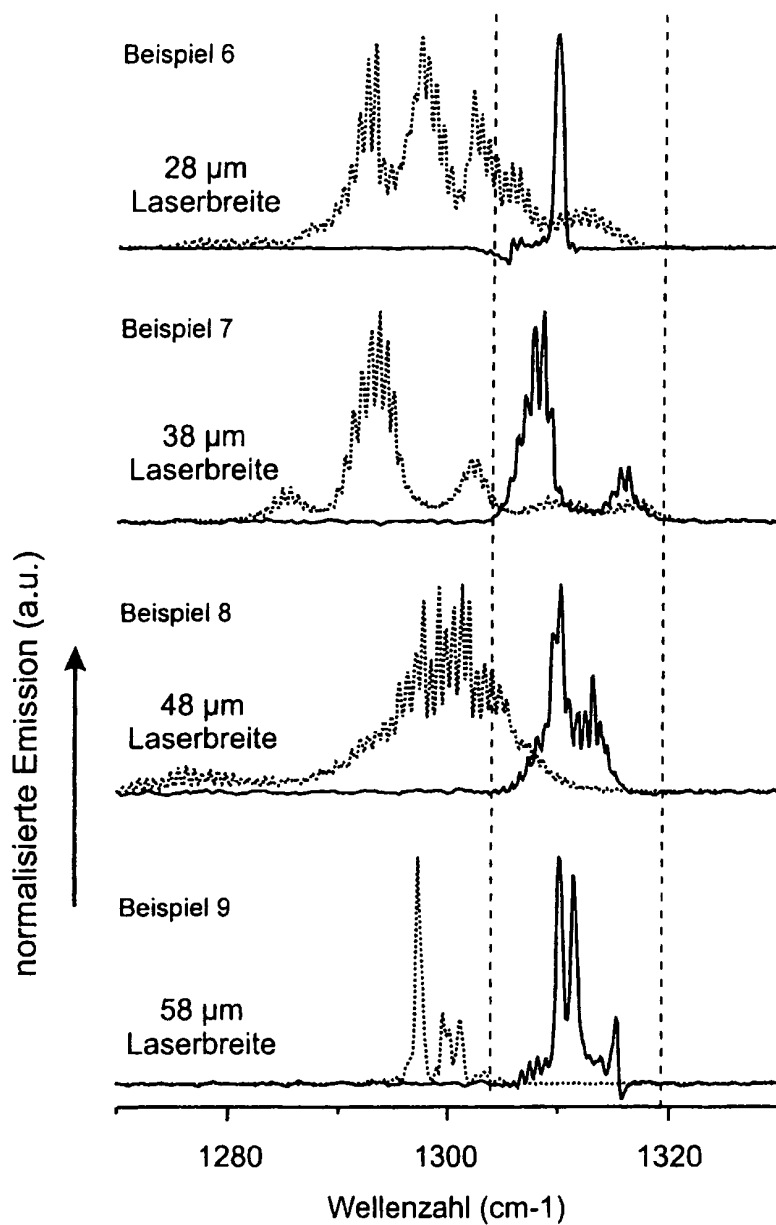
Figur 3



Figur 4



Figur 5



Figur 6