(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
10. Juni 2004 (10.06.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/049461 A2

(51) Internationale Patentklassifikation[7]: H01L 33/00

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2003/012433

(22) Internationales Anmeldedatum:
6. November 2003 (06.11.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102 55 307.6 27. November 2002 (27.11.2002) DE
103 05 079.5 7. Februar 2003 (07.02.2003) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **VERTILAS GMBH** [DE/DE]; Lichtenbergstrasse 8, 85748 Garching (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **AMANN, Markus-Christian** [DE/DE]; Aronstabstrasse 6, 80935 München (DE).

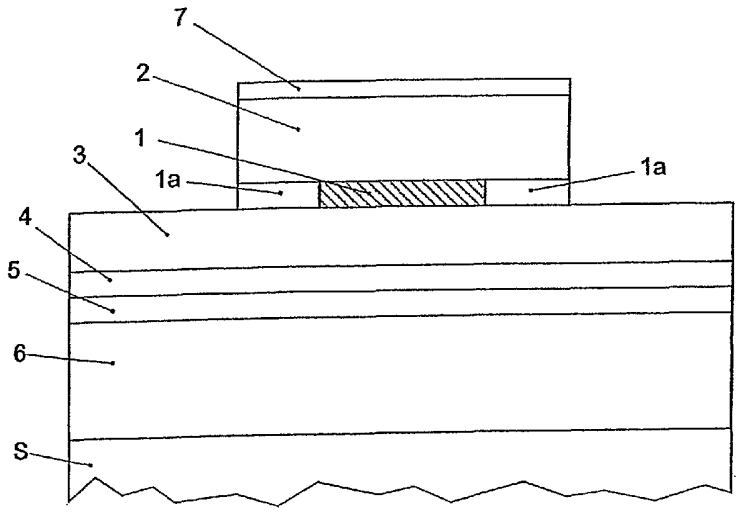
(74) Anwälte: **GRUNERT, Marcus** usw.; Hössle Kudlek & Partner, Postfach 10 23 38, 70019 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(national)*: AE, AG, AL, AM, AT (Gebrauchsmuster), AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ (Gebrauchsmuster), CZ, DE (Gebrauchsmuster), DE, DK (Gebrauchsmuster), DK, DM, DZ, EC, EE (Gebrauchsmuster), EE, ES, FI (Gebrauchsmuster), FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR PRODUCING A BURIED TUNNEL JUNCTION IN A SURFACE-EMITTING SEMICONDUCTOR LASER

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINES VERGRABENEN TUNNELKONTAKTS IN EINEM OBERFLÄCHENEMITTIERENDEN HALBLEITERLASER



(57) Abstract: The invention relates to a method for producing a buried tunnel junction (1) in a surface-emitting semiconductor laser and to a laser of this type. Said laser comprises an active zone (5) containing a pn-junction, surrounded by a first n-doped semiconductor layer (6) and at least one p-doped semiconductor layer (3, 4), in addition to a tunnel junction (1) on the p-side of the active zone (5), said tunnel junction bordering on a second n-doped semiconductor layer (2). To bury the tunnel junction (1), the layer provided for the tunnel junction (1) is removed laterally in a first step using material-selective etching until the desired diameter is achieved and is heated in a second step in a suitable atmosphere until the etched region (1a) is sealed by a mass transport from at least one of the semiconductor layers (2, 3) bordering on the tunnel junction (1). This enables surface-emitting laser diodes to be produced in high yields by simple technology, allowing the stabilisation of the lateral single-mode operation and the high-performance of the latter.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/049461 A2

NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK (Gebrauchsmuster), SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(regional)*: ARIPO-Gebrauchsmuster (BW), ARIPO-Patent (BW), ARIPO-Gebrauchsmuster (GH), ARIPO-Patent (GH), ARIPO-Gebrauchsmuster (GM), ARIPO-Patent (GM), ARIPO-Gebrauchsmuster (KE), ARIPO-Patent (KE), ARIPO-Gebrauchsmuster (LS), ARIPO-Patent (LS), ARIPO-Gebrauchsmuster (MW), ARIPO-Patent (MW), ARIPO-Gebrauchsmuster (MZ), ARIPO-Patent (MZ), ARIPO-Gebrauchsmuster (SD), ARIPO-Patent (SD), ARIPO-Gebrauchsmuster (SL), ARIPO-Patent (SL), ARIPO-Gebrauchsmuster (SZ), ARIPO-Patent (SZ), ARIPO-Gebrauchsmuster (TZ), ARIPO-Patent (TZ), ARIPO-Gebrauchsmuster (UG), ARIPO-Patent (UG), ARIPO-Gebrauchsmuster (ZM), ARIPO-Patent (ZM), ARIPO-Gebrauchsmuster (ZW), ARIPO-Patent (ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärung gemäß Regel 4.17:

— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv) nur für US*

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines vergrabenen Tunnelkontakts (1) in einem oberflächenemittierenden Halbleiterlaser und einen solchen Laser, wobei dieser eine einen pn-Übergang aufweisende aktive Zone (5) umgeben von einer ersten n-dotierten Halbleiterschicht (6) und mindestens einer p-dotierten Halbleiterschicht (3, 4) und einen Tunnelkontakt (1) auf der p-Seite der aktiven Zone (5) aufweist, der an eine zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2) grenzt. Zur Vergrabung des Tunnelkontaktes (1) wird vorgeschlagen, die für den Tunnelkontakt (1) vorgesehene Schicht in einem ersten Schritt mittels materialselektiver Ätzung bis zum gewünschten Durchmesser lateral abzutragen und in einem zweiten Schritt in einer geeigneten Atmosphäre solange zu erhitzen, bis der geätzte Bereich (1a) durch Massetransport aus zumindest einer der an den Tunnelkontakt (1) grenzenden Halbleiterschichten (2, 3) geschlossen ist. Hierdurch können oberflächenemittierende Laserdioden technologisch einfacher und mit grösserer Ausbeute hergestellt werden, zudem ist der laterale Einmodenbetrieb stabilisiert und mit höherer Leistung möglich.

Verfahren zur Herstellung eines vergrabenen Tunnelkontakts in einem oberflächenemittierenden Halbleiterlaser

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines vergrabenen Tunnelkontakts in einem oberflächenemittierenden Halbleiterlaser sowie einen solchen Halbleiterlaser.

Oberflächenemittierende Laserdioden (engl.: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: VCSEL) stellen Halbleiterlaser dar, bei denen die Lichtemission senkrecht zur Oberfläche des Halbleiterchips stattfindet. Verglichen mit konventionellen kantenemittierenden Laserdioden weisen die oberlächenemittierenden Laserdioden mehrere Vorteile auf, wie einen geringen elektrischen Leistungsverbrauch, die Möglichkeit der unmittelbaren Überprüfung der Laserdiode auf dem Wafer, einfache Ankoppelungsmöglichkeiten an eine Glasfaser, longitudinale Einmodenspektren und die Möglichkeit der Zusammenschaltung der oberflächenemittierenden Laserdioden zu einer zweidimensionalen Matrix.

Auf dem Gebiet der Kommunikationstechnik mittels Glasfasern besteht aufgrund der wellenlängenabhängigen Dispersion bzw. Absorption das Bedürfnis nach VCSELs in einem Wellenlängenbereich von ca. 1,3 bis 2 µm, insbesondere um die Wellenlängen von 1,31 µm oder 1,55 µm. Langwellige Laserdioden mit anwendungstauglichen Eigenschaften, speziell für den Wellenlängenbereich oberhalb 1,3 µm, werden bislang aus InP-basierten Verbindungshalbleitern hergestellt. GaAs-

basierte VCSELs sind für den kurzwelligeren Bereich < 1,3 µm geeignet. Die folgenden Lösungsansätze wurden bisher verfolgt:

Ein Continuous-Wave VCSEL, der mit einer Leistung von 1 mW bei 1,55 µm emittiert, ist beispielsweise aus einem InP-Substrat mit metamorphen Schichten bzw. Spiegeln aufgebaut (IEEE Photonics Technology Letters, Volume 11, Number 6, June 1999, Seiten 629 bis 631). Ein weiterer Vorschlag bezieht sich auf einen kontinuierlich bei 1,526 µm emittierenden VCSEL, der durch Waferverbindung einer InP/InGaAsP-aktiven Zone mit GaAs/AlGaAs-Spiegeln hergestellt ist (Applied Physics Letters, Volume 78, Number 18, Seiten 2632 bis 2633 vom 30. April 2001). Ein VCSEL mit Luft-Halbleiterspiegel (InP-Luftspalt-DBRs, für Distributed Bragg Reflectors) ist in IEEE ISLC 2002, Seiten 145 bis 146 vorgeschlagen. Hier ist zwischen der aktiven Zone und dem oberen DBR-Spiegel ein Tunnelkontakt angebracht, wobei durch Unterätzen der Tunnelkontaktschicht eine Strombegrenzung erreicht wird. Der den verbleibenden Tunnelkontaktbereich umgebende Luftspalt dient zur Wellenführung des optischen Feldes.

Weiterhin ist aus der Veröffentlichung zur 26. European Conference on Optical Communication, ECOC 2000, „88°C, Continous-Wave Operation of 1,55 µm Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers", ein VCSEL mit Antimonid-basierten Spiegeln bekannt, bei dem eine unterätzte InGaAs-aktive Zone von zwei n-dotierten InP-Schichten eingeschlossen ist, an die sich AlGaAsSb-DBR-Spiegel anschließen.

Die besten Eigenschaften hinsichtlich Leistung, Betriebstemperaturbereich und Modulationsbandbreite weisen jedoch

VCSEL mit vergrabenen Tunnelkontakten (engl.: Buried Tunnel Junction, BTJ) auf. Herstellung und Struktur des vergrabenen Tunnelkontakts sollen im Folgenden anhand Figur 1 dargelegt werden. Mittels Molekularstrahlepitaxie (engl.: Molecular Beam Epitaxy, MBE) wird ein hochdotiertes p^+/n^+-Schichtenpaar 101, 102 mit geringem Bandabstand hergestellt. Zwischen diesen Schichten bildet sich der eigentliche Tunnelkontakt 103 aus. Durch reaktives Ionenätzen (engl.: Reactive Ion Etching, RIE) wird ein kreisförmiger oder elliptischer Bereich geformt, der im wesentlichen durch die n^+-dotierte Schicht 102, den Tunnelkontakt 103 sowie eines Teils oder der gesamten p^+-dotierten Schicht 101 gebildet wird. Dieser Bereich wird in einem zweiten Epitaxiedurchlauf mit n-dotiertem InP (Schicht 104) überwachsen, sodass der Tunnelkontakt 103 „vergraben" ist. Der Kontaktbereich zwischen der überwachsenen Schicht 104 und der p^+-dotierten Schicht 101 wirkt beim Anlegen einer Spannung als Sperrschicht. Der Strom fließt durch den Tunnelkontakt mit Widerständen von typisch $3 \times 10^{-6}\ \Omega\ cm^2$. Hierdurch kann der Stromfluss auf den eigentlichen Bereich der aktiven Zone 108 beschränkt werden. Weiterhin ist die Wärmeerzeugung gering, da der Strom von einer hochohmigen p-dotierten zu einer niederohmigen n-dotierten Schicht fließt.

Die Überwachsung des Tunnelkontakts führt zu leichten Dikkenvariationen, die sich ungünstig auf die laterale Wellenführung auswirken, sodass das Entstehen höherer lateraler Moden insbesondere bei größeren Aperturen erleichtert ist. Für den - insbesondere bei der glasfaseroptischen Kommunikationstechnik geforderten - Einmodenbetrieb können daher nur kleine Aperturen mit entsprechend geringer Laserleistung verwendet werden. Ein weiterer Nachteil dieses Konzep-

tes ist die benötigte Zweifachepitaxie, die zur Überwachsung des vergrabenen Tunnelkontakts benötigt wird. In Analogie zu den GaAs-basierten kurzwelligen VCSELs wäre auch hier ein Herstellungsprozess mit nur einer Epitaxie aus Ausbeute- und Kostengründen von erheblichem Vorteil.

Beispiele und Anwendungen von VCSELs mit vergrabenen Tunnelkontakten finden sich beispielsweise in „Low-threshold index-guided 1,5 µm long wavelength vertical-cavity surface-emitting laser with high efficiency", Applied Physics Letter, Volume 76, Number 16, Seiten 2179 bis 2181 vom 17. April 2000, in „Long Wavelength Buried-Tunnel-Junction Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers", Adv. in Solid State Phys. 41, 75 bis 85, 2001, in "Vertical-cavity surface-emitting laser diodes at 1,55 µm with large output power and high operation temperature", Electronics Letters, Volume 37, Number 21, Seiten 1295 bis 1296 vom 11. Oktober 2001, in „90°C Continuous-Wave Ooperation of 1,83 µm Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers", IEEE Photonics Technology Letters, Volume 12, Number 11, Seiten 1435 bis 1437, November 2000, sowie in "High-Speed modulation up to 10 Gbit/s with 1,55 µm wavelength InGaAlAs VCSELs", Electronics Letters, Volume 38, Number 20, 26. September 2002.

Im Folgenden soll ausgehend von dem beschriebenen Aufbau des vergrabenen Tunnelkontakts in Figur 1 kurz die Struktur des in der oben genannten Literatur behandelten InP-basierten VCSEL anhand Figur 2 erläutert werden.

Der vergrabene Tunnelkontakt (BTJ) ist in dieser Struktur umgekehrt angeordnet, sodass die aktive Zone 106 oberhalb des Tunnelkontakts mit dem Durchmesser D_{BTJ} zwischen der p^+-dotierten Schicht 101 und der n^+-dotierten Schicht 102 ge-

legen ist. Die Laserstrahlung tritt in der mit dem Pfeil 116 dargestellten Richtung aus. Die aktive Zone 106 ist von einer p-dotierten Schicht 105 (InAlAs) und von einer n-dotierten Schicht 108 (InAlAs) umgeben. Der vorderseitige Spiegel 109 oberhalb der aktiven Zone 106 besteht aus einem epitaxialen DBR mit etwa 35 Schichtpaaren InGaAlAs/InAlAs, wodurch sich eine Reflektivität von etwa 99,4% ergibt. Der hinterseitige Spiegel 112 besteht aus einem Stapel dielektrischer Schichten als DBR und wird von einer Goldschicht abgeschlossen, wodurch sich eine Reflektivität von nahezu 99,75% ergibt. Eine Isolierschicht 113 vermeidet den direkten Kontakt der n-InP-Schicht 104 mit der meist aus Gold oder Silber bestehenden p-seitigen Kontaktschicht 114 (siehe hierzu DE 101 07 349 A1).

Die Kombination aus dielektrischem Spiegel 112 und der integrierten Kontaktschicht 114 und Wärmesenke 115 resultiert in einer stark erhöhten Wärmeleitfähigkeit verglichen mit epitaxialen Vielschichtstrukturen. Strom wird über die Kontaktschicht 114 bzw. über die integrierte Wärmesenke 115 und den n-seitigen Kontaktstellen 110 injiziert. Zu weiteren Einzelheiten bezüglich der Herstellung und den Eigenschaften der in Figur 2 dargestellten VCSEL-Typen sei ausdrücklich nochmals auf die oben zitierten Literaturstellen hingewiesen.

Ziel der Erfindung ist es nunmehr, eine insbesondere InP-basierte oberflächenemittierende Laserdiode mit vergrabenem Tunnelkontakt (BTJ-VCSEL) anzugeben, die sich preiswerter und mit höherer Ausbeute fertigen lässt. Außerdem soll der laterale Einmodenbetrieb auch bei größeren Aperturen stabil sein, wodurch eine insgesamt höhere Einmodenleistung ermöglicht werden soll. Das erfindungsgemäße Verfahren zur Her-

stellung eines vergrabenen Tunnelkontakts in einem oberflächenemittierenden Halbleiterlaser, der eine einen pn-Übergang aufweisende aktive Zone umgeben von einer ersten n-dotierten Halbleiterschicht und mindestens einer p-dotierten Halbleiterschicht aufweist sowie einen Tunnelkontakt auf der p-Seite der aktiven Zone, der an eine zweite n-dotierte Halbleiterschicht grenzt, sieht die folgenden Schritte vor: In einem ersten Schritt wird die für den Tunnelkontakt vorgesehene Schicht mittels materialselektiver Ätzung bis zum gewünschten Durchmesser des Tunnelkontakts lateral abgetragen, so dass ein geätzter Spalt verbleibt, der den Tunnelkontakt umgibt. In einem zweiten Schritt wird der Tunnelkontakt in einer geeigneten Atmosphäre so lange erhitzt, bis der geätzte Spalt durch Massetransport aus zumindest einer an den Tunnelkontakt grenzenden Halbleiterschicht geschlossen ist. Die an den Tunnelkontakt grenzenden Halbleiterschichten sind die zweite n-dotierte Halbleiterschicht auf der der aktiven Zone abgewandten Seite sowie eine p-dotierte Halbleiterschicht auf der der aktiven Zone zugewandten Seite des Tunnelkontaktes.

Für die genannte Massetransporttechnik („Mass-Transport"-Technik, MTT) ist es besonders vorteilhaft, wenn zumindest eine der genannten an den Tunnelkontakt grenzenden Halbleiterschichten aus einer Phosphid-Verbindung, insbesondere InP, besteht.

Die vorliegende Erfindung löst sowohl das Problem der Zweifachepitaxie als auch das der eingebauten lateralen Wellenführung durch den Einsatz der genannten „Mass-Transport"-Technik. Die MTT ersetzt dabei den zweiten Epitaxieprozess und führt dabei nicht zu der sonst entstehenden lateralen Dickenvariation mit der Konsequenz einer starken lateralen

Wellenführung. Das Vergraben des Tunnelkontakts findet nun nicht mehr durch Überwachsung statt, sondern durch Unterätzung der Tunnelkontaktschicht und anschließendes Verschließen des geätzten Bereichs mittels Massentransport aus benachbarten Schichten. Hierdurch können oberflächenemittierende Laserdioden preiswerter und mit höherer Ausbeute gefertigt werden. Zudem ist der laterale Einmodenbetrieb auch bei größeren Aperturen stabilisiert, wodurch sich eine höhere Einmodenleistung ergibt.

Die Massentransport-Technik wurde in einem anderen Zusammenhang Anfang der 80er Jahre zur Herstellung vergrabener aktiver Zonen für die so genannten Buried-Heterostructure (BH) Laserdioden auf InP-Basis eingesetzt (siehe „Study and Application of the Mass-Transport Phenomenon in InP", Journal of Applied Physics 54(5), Mai 1983, Seiten 2407 bis 2411 sowie „A Novel Technique for GaInAsP/InP Buried Heterostructure Laser Fabrication", in Applied Physics Letters 40(7), 1. April 1982, Seiten 568 bis 570). Das Verfahren erwies sich jedoch aufgrund erheblicher Degradationsprobleme als nachteilig. Diese Degradation der mittels MTT hergestellten Laser beruht auf der Erosion der seitlichen Ätzflanken der aktiven Zone, die durch MTT nicht in ausreichender Qualität geschützt werden können. Zu Einzelheiten und zur Durchführung der Massentransport-Technik sei ausdrücklich auf die genannten Literaturstellen verwiesen.

Es hat sich herausgestellt, dass der erwähnte Alterungsmechanismus bei der Massentransport-Technik, der die Realisierung brauchbarer BH-Laser verhindert hat, bei der Einbettung von Tunnelkontakten keine Rolle spielt, da in diesen kein hoch angeregtes Elektron-Loch-Plasma wie in einer aktiven Zone des Lasers vorliegt und somit Oberflächenre-

kombinationen, die die Degradationsprobleme verursachen, nicht auftreten.

Die Erfindung der „Mass-Transport"-VCSELs (MT-VCSEL) erlaubt technologisch einfacher herzustellende und bezüglich der maximalen Einmodenleistung bessere langwellige VCSELs, insbesondere auf InP-Basis.

Der Massentransport-Prozess wird vorzugsweise in einer Phosphor-Atmosphäre, beispielsweise bestehend aus H_2 mit PH_3, ausgeführt, während die Erhitzung des Bauteils erfolgt. Der bevorzugte Temperaturbereich liegt zwischen 500 und 800°C, vorzugsweise zwischen 500 und 700°C. Eine Möglichkeit der Massetransport-Technik besteht darin, den Wafer mit H_2 und PH_3 in strömender Atmosphäre zu behandeln, während er auf 670°C erhitzt und anschließend für eine weitere Zeitspanne auf dieser Temperatur gehalten wird (Gesamtbehandlungsdauer etwa eine Stunde). Auch Experimente mit InP-Schichten in einer Wasserstoff-Atmosphäre führten zu einem Massentransport von InP.

Durch den Massentransport-Prozess schließt sich der geätzte Spalt und vergräbt somit den Tunnelkontakt. Aufgrund des hohen Bandabstands von InP und der geringen Dotierung stellen die an den Tunnelkontakt grenzenden, durch Massetransport geschlossenen Bereiche keine Tunnelkontakte dar und sperren daher den Stromfluss. Andererseits tragen diese Bereiche aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von InP wesentlich zur Wärmeabfuhr bei.

Zur Herstellung einer oberflächenemittierenden Laserdiode gemäß der Erfindung, ist es vorteilhaft, von einer epitaktischen Ausgangsstruktur auszugehen, bei der auf der p-

Seite der aktiven Zone nacheinander eine p-dotierte Halbleiterschicht, die für den Tunnelkontakt vorgesehene Schicht und daran anschließend die zweite n-dotierte Halbleiterschicht aufgebracht sind, wobei zunächst mittels Photolithographie und/oder Ätzung (beispielsweise reaktives Ionenätzen (engl.: Reactive Ion Etching, RIE)) ein kreisförmiger oder elliptischer Stempel geformt wird, dessen Flanken die zweite n-dotierte Halbleiterschicht und die für den Tunnelkontakt vorgesehene Schicht in Richtung senkrecht zur Schicht umfassen und zumindest bis unterhalb der Tunnelkontaktschicht reichen, und dass anschließend die erfindungsgemäße Unterätzung der Tunnelkontaktschicht sowie die Vergrabung des Tunnelkontakts mittels Massetransport erfolgt.

Die auf diese Weise erhaltene Struktur ist ideal zur Herstellung oberflächenemittierender Laserdioden geeignet.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung ist eine weitere Halbleiterschicht vorgesehen, die sich auf der p-Seite der aktiven Zone an die zweite n-dotierte Halbleiterschicht auf der der aktiven Zone abgewandten Seite des Tunnelkontakts anschließt. Diese weitere Halbleiterschicht grenzt ihrerseits an eine dritte n-dotierte Halbleiterschicht, wobei auch diese weitere Halbleiterschicht zunächst mittels materialselektiver Ätzung lateral bis zu einem gewünschten Durchmesser abgetragen und anschließend in einer geeigneten Atmosphäre so lange erhitzt wird, bis der geätzte Spalt durch Massetransport aus zumindest einer der an die weitere Halbleiterschicht grenzenden n-dotierten Halbleiterschichten geschlossen ist.

Hierbei ist es vorteilhaft, die laterale materialselektive Ätzung sowie den Massetransport-Prozess zeitgleich mit der entsprechenden erfindungsgemäßen Herstellung des vergrabenen Tunnelkontakts vorzunehmen.

Wird für die weitere Halbleiterschicht ein anderes Material, z. B. InGaAsP, als für den Tunnelkontakt, z. B. InGaAs, verwendet, kann eine unterschiedliche laterale Ätzung ausgenutzt werden, wodurch der laterale Wellenleiter - definiert durch den Durchmesser der weiteren Halbleiterschicht - breiter werden kann als der aktive Bereich, dessen Durchmesser dem Durchmesser des Tunnelkontakts entspricht. Diese Ausführungsform erlaubt damit eine kontrollierte und von der Stromapertur unabhängige Einstellung der lateralen Wellenführung. Hierzu wird diese weitere Halbleiterschicht nicht in einem Knoten, sondern z. B. in einem Bauch (Maximum) des longitudinalen elektrischen Feldes angeordnet.

Der Bandabstand der weiteren Halbleiterschicht sollte größer sein als derjenige der aktiven Zone, um optische Absorption zu vermeiden.

Zur materialselektiven Ätzung hat sich eine nasschemische Ätzung mit H_2SO_4:H_2O_2:H_2O Ätzlösung im Verhältnis von 3:1:1 bis 3:1:20 als vorteilhaft erwiesen, wenn der Tunnelkontakt aus InGaAs, InGaAsP oder InGaAlAs besteht.

Ein entsprechend dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellter vergrabener Tunnelkontakt in einem oberflächenemittierenden Halbleiterlaser weist mehrere Vorteile auf: Im Vergleich zu bisherigen Lösungen der Überwachsung des Tunnelkontakts mit einem zweiten Epitaxieprozess, ist nunmehr nur noch ein Epitaxieprozess notwendig, weshalb die

Laserdioden preiswerter und mit höherer Ausbeute zu fertigen sind. Bei Verwendung von InP für den Massetransport-Prozess entstehen den Tunnelkontakt lateral einschließende Bereiche, die den Stromfluss seitlich vom Tunnelkontakt sperren und gleichzeitig wesentlich zur Wärmeleitung in die benachbarten Schichten beitragen. Zudem weist ein erfindungsgemäß hergestellter oberflächenemittierender Halbleiterlaser nur eine sehr geringe eingebaute Wellenführung auf, was die Stabilisierung des lateralen Einmodenbetriebs auch bei größeren Aperturen erleichtert und damit insgesamt höhere Einmodenleistungen als bei bisherigen Lösungen ergibt.

Ein oberflächenemittierender Halbleiterlaser gemäß Erfindung ist im Anspruch 11 angegeben, vorteilhafte Ausgestaltungen in den entsprechenden Unteransprüchen. Die jeweiligen Vorteile dieses oberflächenemittierenden Halbleiterlasers wurden im wesentlichen mit der Schilderung des erfindungsgemäßen Verfahrens angegeben. Weitere Vorteile und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den nachfolgenden Ausführungsbeispielen. Hierbei zeigt

Figur 1 die schematische Darstellung eines vergrabenen Tunnelkontakts bei bekannten oberflächenemittierenden Halbleiterlasern,

Figur 2 einen Querschnitt durch einen bekannten oberflächenemittierenden Halbleiterlaser mit vergrabenem Tunnelkontakt (BTJ-VCSEL) in schematischer Darstellung,

Figur 3 eine typische epitaktische Ausgangsstruktur für einen erfindungsgemäßen Massetransport-VCSEL (MT-VCSEL) in schematischer Ansicht im Querschnitt,

Figur 4 die Struktur von Figur 3 mit geformten Stempel,

Figur 5 die Struktur von Figur 3 mit tiefer geformten Stempel,

Figur 6 die Struktur gemäß Figur 4 nach Unterätzen der Tunnelkontaktschicht,

Figur 7 die Struktur gemäß Figur 6 nach dem Massetransport-Prozess,

Figur 8 eine schematische Querschnittsansicht eines erfindungsgemäßen MT-VCSEL,

Figur 9 eine verbesserte Ausführungsform einer epitaktischen Ausgangsstruktur und

Figur 10 eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Ausführungsform der Erfindung.

In der Beschreibungseinleitung wurden Herstellung und Struktur eines vergrabenen Tunnelkontakts und einer oberflächenemittierenden Laserdiode mit einem solchen Tunnelkontakt gemäß den Figuren 1 bzw. 2 beschrieben. Im Folgenden sollen Ausführungsformen der Erfindung anhand der Figuren 3 bis 10 näher erläutert werden.

Figur 3 zeigt schematisch eine typische epitaktische Ausgangsstruktur für einen erfindungsgemäßen MT-VCSEL. Ausge-

hend vom InP-Substrat S werden nacheinander ein n-dotierter epitaktischer Bragg-Spiegel 6, eine aktive Zone 5, eine optionale p-dotierte InAlAs-Schicht 4, eine p-dotierte untere InP-Schicht 3, ein aus mindestens jeweils einer hoch p- und n-dotierten Halbleiterschicht bestehender Tunnelkontakt 1, der sich in einem Knoten (Minimum) des longitudinalen elektrischen Feldes befindet, eine n-dotierte obere InP-Schicht 2 und eine n^+-dotierte obere Kontaktschicht 7 abgeschieden.

Anschließend werden durch Photolithographie und Ätzung kreisförmige oder elliptische Stempel auf einem Wafer mit der Ausgangsstruktur gemäß Figur 3 hergestellt. Die Stempel sind in den Figuren 4 und 5 im Querschnitt zu sehen. Sie reichen mindestens bis unterhalb des Tunnelkontakts 1, der die Dicke d besitzt (vgl. Figur 4), oder bis in die untere p-InP-Schicht 3 (Figur 5), wodurch in diese untere Schicht 3 eine Kante 3a geätzt wird. Der Stempeldurchmesser (w+2h) ist typischerweise ca. 5 bis 20 µm größer als der vorgesehene Aperturdurchmesser w von typischerweise 3 bis 20 µm, sodass h ca. 3 bis 10 µm beträgt. h stellt hierbei (vgl. Figur 6) die Breite des unterätzten Bereichs B der für den Tunnelkontakt 1 vorgesehenen Schicht dar.

Mittels materialselektiver Ätzung wird nun, wie im Bild 6 dargestellt, der Tunnelkontakt 1 seitlich abgetragen, ohne dass dabei die ihn umgebenden Schichten, hier die n-dotierte obere InP-Schicht 2 und die p-dotierte untere InP-Schicht 3, geätzt werden. Die seitliche Unterätzung des Tunnelkontakts 1 (bzw. der für den Tunnelkontakt vorgesehenen Schicht) von typischerweise h= 2 bis 10 µm dient zur Definition der Apertur A, die der verbleibenden Tunnelkontaktfläche entspricht. Die materialselektive Ätzung ist

beispielsweise nasschemisch möglich mit $H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$ Ätzlösung in einem Verhältnis von 3:1:1 bis 3:1:20, wenn der Tunnelkontakt 1 aus InGaAs, InGaAsP oder InGaAlAs besteht.

Um nun einen vergrabenen Tunnelkontakt 1 in der in Figur 6 dargestellten Struktur zu erhalten, wird erfindungsgemäß der geätzte Spalt, also der den Tunnelkontakt 1 lateral umgebende Bereich B mittels eines Massetransport-Prozesses verschlossen. Hierzu wird der Wafer mit der in Figur 6 dargestellten Struktur unter phosphorhaltiger Atmosphäre für einige Zeit vorzugsweise auf 500 bis 600°C erhitzt. Typische Zeitdauern betragen 5 bis 30 Minuten. Während dieses Prozesses werden geringe Mengen InP von der oberen und/oder unteren InP-Schicht 2 bzw. 3 in den zuvor geätzten Spalt bewegt, der sich dadurch schließt.

Das Ergebnis des Massetransport-Prozesses ist in Figur 7 gezeigt. Das transportierte InP im Bereich 1a schließt nun den Tunnelkontakt 1 lateral ein (vergräbt ihn). Aufgrund des hohen Bandabstands von InP und der geringen Dotierung stellen die Bereiche 1a keine Tunnelkontakte dar und sperren daher den Stromfluss. Damit entspricht der stromdurchflossene Bereich der aktiven Zone 5 mit dem Durchmesser w (vgl. Figur 6) weitgehend der Fläche (Apertur A in Figur 6) des Tunnelkontakts 1. Andererseits tragen die aus InP bestehenden ringförmigen Bereiche 1a mit der Ringbreite h aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von InP wesentlich mit zur Wärmeabfuhr über die obere InP-Schicht 2 bei.

Die weitere Prozessierung der Struktur gemäß Figur 7 zum fertigen MT-VCSEL entspricht der von den BTJ-VCSELs her bekannten Technik, wie sie eingangs sowie in den zitierten Literaturstellen beschrieben ist, und soll daher hier nicht

näher beschrieben werden. Figur 8 zeigt den fertigen erfindungsgemäßen MT-VCSEL. Hierbei ist eine integrierte Gold-Wärmesenke mit 9 bezeichnet, 8 bezeichnet einen dielektrischen Spiegel, der an die obere n-dotierten InP-Schicht 2 grenzt und von der Gold-Wärmesenke 9 umgeben wird, 7a bezeichnet die ringförmig strukturierte n-seitige Kontaktschicht, und mit 10 ist eine Isolations- und Passivierungsschicht, z. B. aus Si_3N_4 oder Al_2O_3, bezeichnet, die sowohl die p-dotierte untere als auch die n-dotierte obere InP-Schicht 3, 2 vor einem direkten Kontakt mit dem p-seitigen Kontakt 11 bzw. der Gold-Wärmesenke 9 schützt. Der p-seitige Kontakt 11 ist beispielsweise aus Ti/Pt/Au hergestellt. 12 bezeichnet den n-seitigen Kontakt aus z. B. Ti/Pt/Au.

Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass die aktive Zone 5, die hier als homogene Schicht gezeigt ist, meistens aus einer Schichtenstruktur von beispielsweise 11 dünnen Schichten (5 Quantenfilm- und 6 Barrierenschichten besteht).

Eine verbesserte Ausführungsform der epitaktischen Ausgangsstruktur ist in Figur 9 dargestellt, bei der unterhalb der aktiven Zone 5 eine zusätzliche n-dotierte InP-Schicht 6a eingefügt ist. Diese Schicht verstärkt den lateralen Wärmeabfluss von der aktiven Zone 5 und reduziert damit deren Temperatur.

Eine weitere Ausführungsform der Erfindung ist in Figur 10 gezeigt. Hier wird die Massentransport-Technik in zwei übereinander liegenden Schichten angewendet, wobei vorzugsweise ein einziger Massentransport-Prozess sowohl für die Tunnelkontaktschicht als auch für die weitere Halbleiter-

schicht 21 ausgeführt wird. In Figur 10 ist diese weitere Halbleiterschicht 21 oberhalb des Tunnelkontakts 1 angeordnet. Die weitere Halbleiterschicht 21 grenzt an zwei n-dotierte InP-Schichten 2, 2'. Der die weitere Halbleiterschicht 21 lateral umgebende Bereich 20 besteht aus InP, das durch Massetransport in den vorher unterätzten Bereich 20 gelangt ist und diesen verschließt.

Sofern der Brechungsindex der weiteren Halbleiterschicht 21 sich von dem des umgebenden InP unterscheidet, erzeugt diese Schicht 21 eine kontrollierte laterale Wellenführung, indem diese Schicht nicht in einem Knoten, sondern z. B. in einem Bauch (Maximum) des longitudinalen elektrischen Feldes angeordnet wird. Bei Verwendung unterschiedlicher Halbleiter, z. B. InGaAs für den Tunnelkontakt 1 und InGaAsP für die weitere Halbleiterschicht 21, kann eine unterschiedliche laterale Ätzung ausgenutzt werden, wodurch der laterale Wellenleiter, der durch dem Durchmesser der Schicht 21 definiert wird, breiter wird als der aktive Bereich der aktiven Zone 5, dessen Durchmesser den Durchmesser des Tunnelkontakts 1 entspricht. Diese Ausführungsform erlaubt damit eine kontrollierte und von der Stromapertur unabhängige Einstellung der lateralen Wellenführung.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines vergrabenen Tunnelkontakts (1) in einem oberflächenemittierenden Halbleiterlaser mit einer einen pn-Übergang aufweisenden aktiven Zone (5) umgeben von einer ersten n-dotierten Halbleiterschicht (6) und mindestens einer p-dotierten Halbleiterschicht (3, 4), und mit einem Tunnelkontakt (1) auf der p-Seite der aktiven Zone (5), der an eine zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2) grenzt, wobei
die für den Tunnelkontakt (1) vorgesehene Schicht in einem ersten Schritt mittels materialselektiver Ätzung bis zum gewünschten Durchmesser des Tunnelkontakts (1) lateral abgetragen wird und in einem zweiten Schritt in einer geeigneten Atmosphäre so lange erhitzt wird, bis der geätzte Spalt durch Massentransport aus zumindest einer an den Tunnelkontakt (1) grenzenden Halbleiterschicht (2, 3) geschlossen ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine der an den Tunnelkontakt (1) grenzenden Halbleiterschichten (2, 3) aus einer Phosphid-Verbindung, vorzugsweise aus InP, besteht.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass als Atmosphäre in dem genannten zweiten Schritt eine Phosphor-Atmosphäre, vorzugsweise PH_3 und Wasserstoff, verwendet wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur im genannten zweiten Schritt zwischen 500 und 800°C, vorzugsweise zwischen 500 und 600°C, gewählt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass ausgehend von einer epitaktischen Ausgangsstruktur des oberflächenemittierenden Halbleiterlasers, bei der auf der p-Seite der aktiven Zone (5) nacheinander eine p-dotierte Halbleiterschicht (3), die für den Tunnelkontakt (1) vorgesehene Schicht und die zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2) aufgebracht sind, mittels Photolithographie und/oder Ätzung ein kreisförmiger oder elliptischer Stempel geformt wird, dessen Flanken die zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2) und die für den Tunnelkontakt (1) vorgesehene Schicht umfassen und zumindest bis unterhalb der für den Tunnelkontakt (1) vorgesehenen Schicht reichen, und dass anschließend der genannte erste und der genannte zweite Schritt zur Herstellung des vergrabenen Tunnelkontakts (1) ausgeführt werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass sich auf der p-Seite der aktiven Zone (5) an die zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2) eine weitere Halbleiterschicht (21) anschließt, die ihrerseits an eine dritte n-dotierte Halbleiterschicht (2') grenzt, wobei mittels materialselektiver Ätzung diese weitere Halbleiterschicht (21) bis zu einem gewünschten Durchmesser lateral abgetragen wird und anschließend in einer geeigneten Atmosphäre so lange erhitzt wird, bis der geätzte Spalt durch Massetransport aus zumindest einer an die weitere

Halbleiterschicht (21) grenzenden Halbleiterschichten (2, 2') geschlossen ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass für die weitere Halbleiterschicht (21) und für den Tunnelkontakt (1) unterschiedliche Halbleiter verwendet werden.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass für die weitere Halbleiterschicht (21) InGaAsP und für den Tunnelkontakt (1) InGaAs verwendet werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die weitere Halbleiterschicht (21) in einem Maximum des longitudinalen elektrischen Feldes angeordnet wird, während sich der Tunnelkontakt (1) in ein Minimum des longitudinalen elektrischen Feldes befindet.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass zur materialselektiven Ätzung als Ätzlösung H_2SO_4:H_2O_2:H_2O in einem Verhältnis von 3:1:1 bis 3:1:20 verwendet wird, wenn der Tunnelkontakt (1) aus InGaAs, InGaAsP oder InGaAlAs besteht.

11. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser, der eine einen pn-Übergang aufweisende aktive Zone (5) umgeben von einer ersten n-dotierten Halbleiterschicht (6) und mindestens einer p-dotierten Halbleiterschicht (3, 4) aufweist, sowie einen Tunnelkontakt (1) auf der p-Seite der aktiven Zone (5), der an eine zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2) grenzt, wobei
der Tunnelkontakt (1) lateral von einem Bereich (1a) umgeben ist, der die zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2)

mit einer der p-dotierten Halbleiterschichten (3, 4) verbindet und durch Massetransport aus zumindest einer dieser angrenzenden Schichten (2, 3) entstanden ist.

12. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine der an den Tunnelkontakt (1) grenzenden Halbleiterschichten (2, 3) aus einer Phosphid-Verbindung, vorzugsweise aus InP, besteht.

13. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass sich an die aktive Zone (5) als die mindestens eine p-dotierte Halbleiterschicht eine p-dotierte InAlAs-Schicht (4) gefolgt von einer p-dotierten InP-Schicht (3) anschließt.

14. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass der Tunnelkontakt (1) in einem Minimum des longitudinalen elektrischen Feldes angeordnet ist.

15. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass eine weitere n-dotierte Halbleiterschicht (6a) zwischen der aktiven Zone (5) und der ersten Halbleiterschicht (6), die als Halbleiterspiegel ausgebildet ist, vorhanden ist.

16. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 11 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass eine weitere Halbleiterschicht (21) vorgesehen ist, die sich an die an den Tunnelkontakt (1) grenzende zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2) anschließt, und die ihrerseits an eine dritte n-dotierte Halbleiterschicht (2') grenzt, wobei diese weitere Halbleiterschicht (21) lateral von einem Be-

reich (20) umgeben ist, der die zweite n-dotierte Halbleiterschicht (2) mit der dritten n-dotierten Halbleiterschicht (2') verbindet und durch Massetransport aus zumindest einer dieser beiden Schichten (2, 2') entstanden ist.

17. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass sich der Brechungsindex der weiteren Halbleiterschicht (21) von dem bzw. denen der beiden umgebenden Schichten (2, 2') unterscheidet.

18. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach Anspruch 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass die weitere Halbleiterschicht (21) in einem Maximum des longitudinalen elektrischen Feldes angeordnet ist.

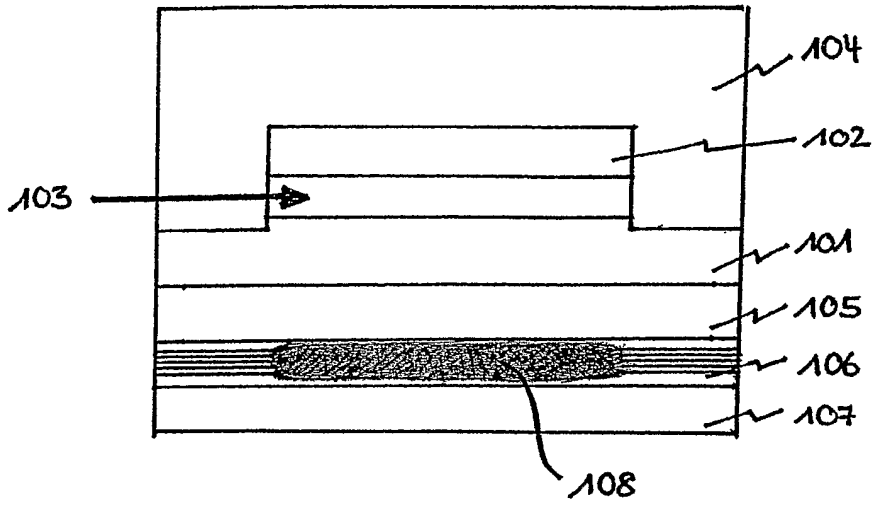
19. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 16 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass die weitere Halbleiterschicht (21) und der Tunnelkontakt (1) aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien bestehen.

20. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die weitere Halbleiterschicht (21) aus InGaAsP und der Tunnelkontakt (1) aus InGaAs besteht.

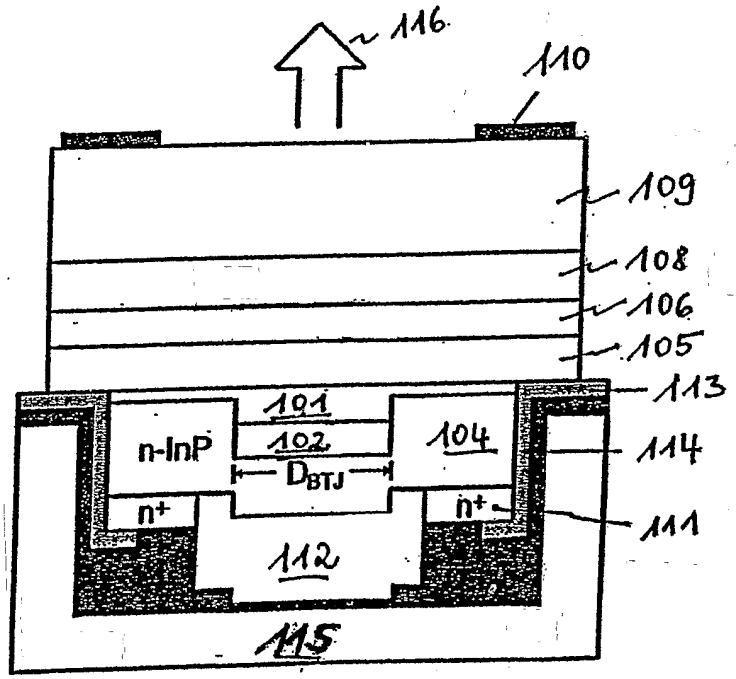
21. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 16 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass der Durchmesser der weiteren Halbleiterschicht (21) größer ist als der des Tunnelkontakts (1).

22. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 16 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass der

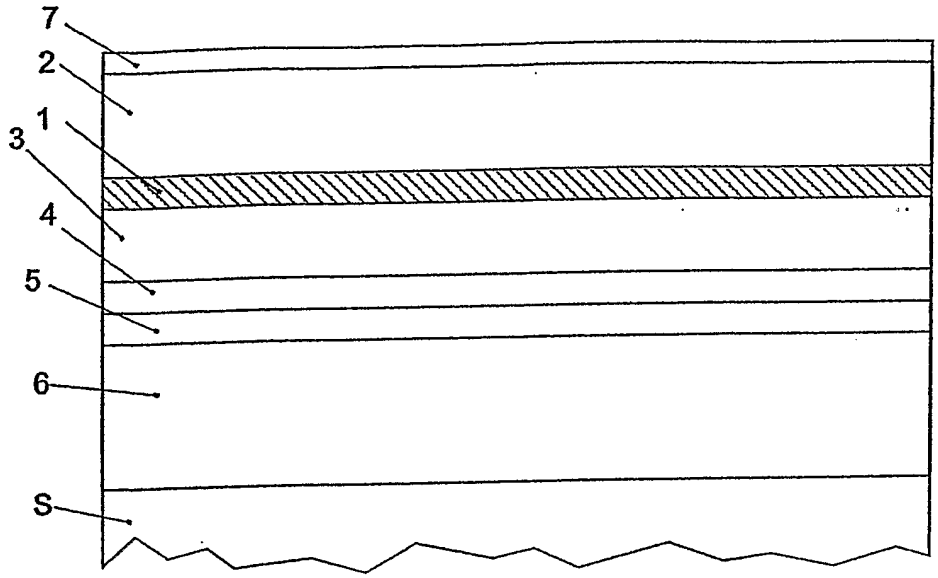
Bandabstand der weiteren Halbleiterschicht (21) größer ist als der Bandabstand der aktiven Zone (5).



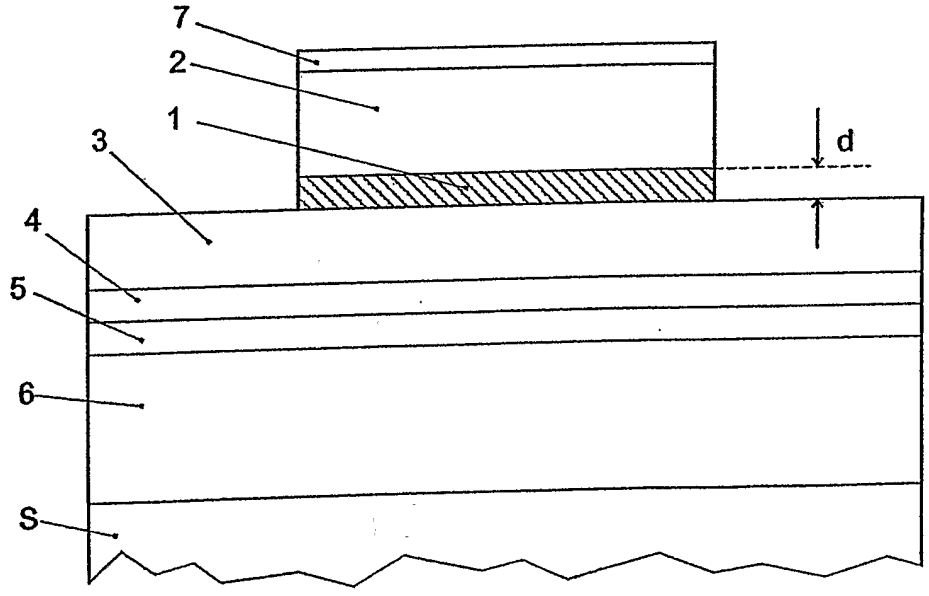
Figur 1



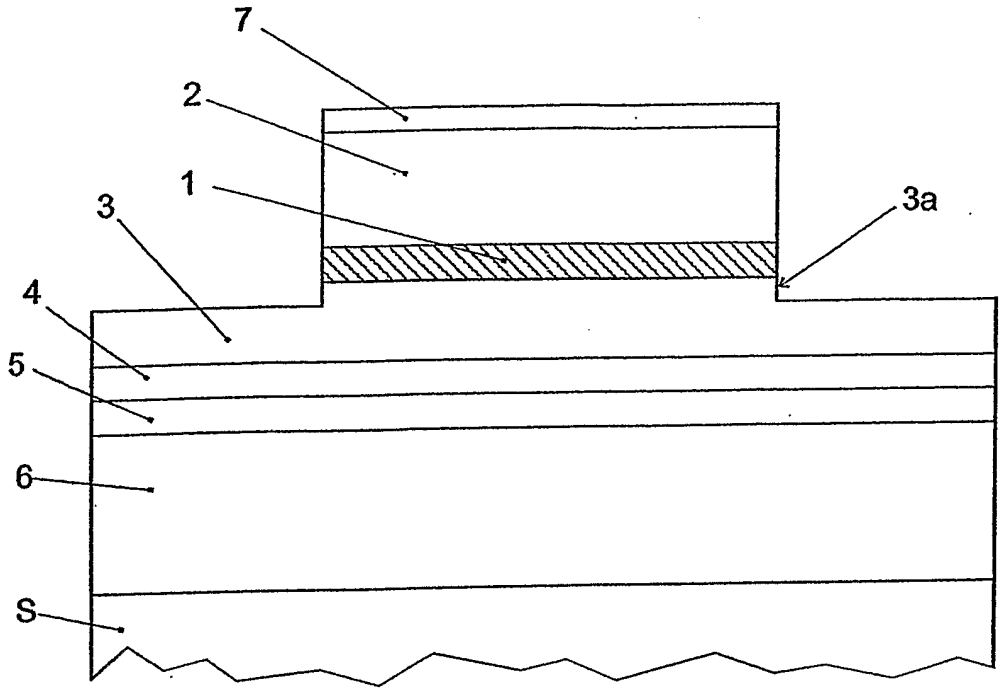
Figur 2



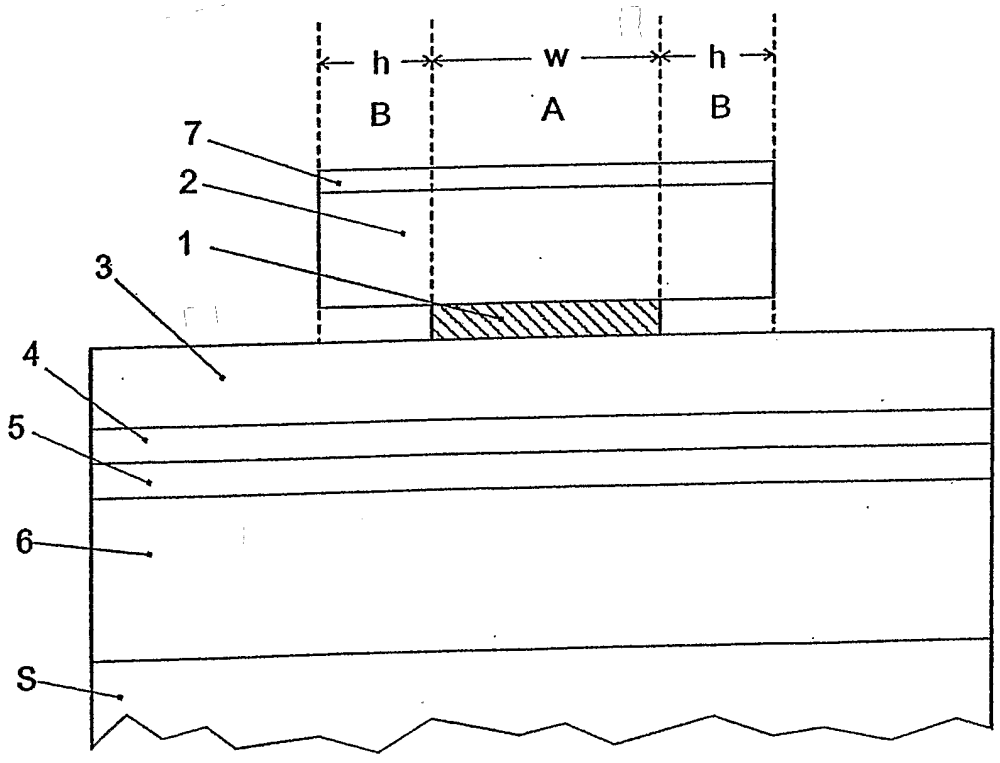
Figur 3



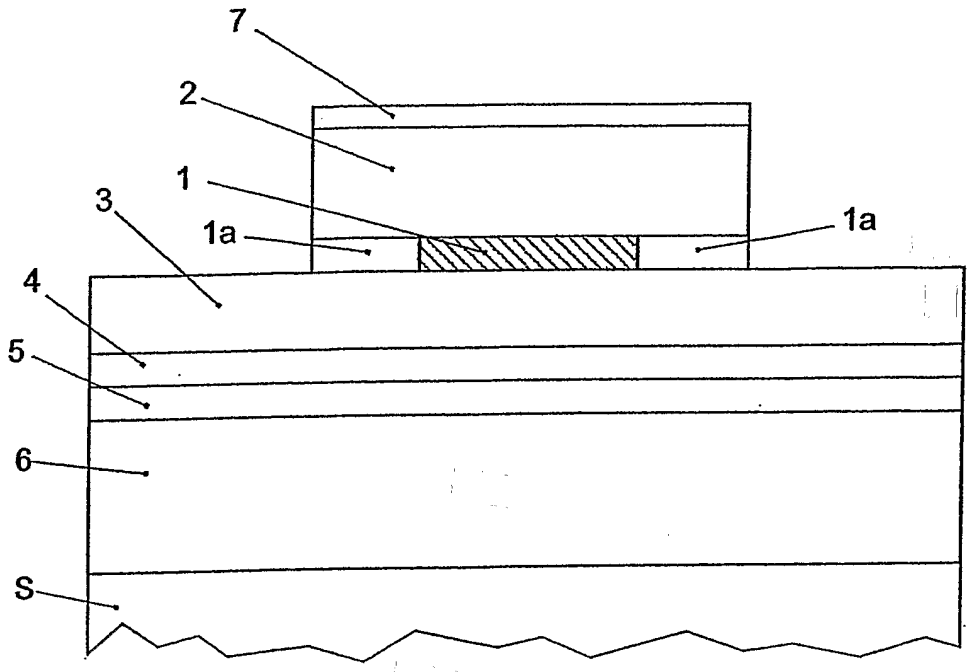
Figur 4



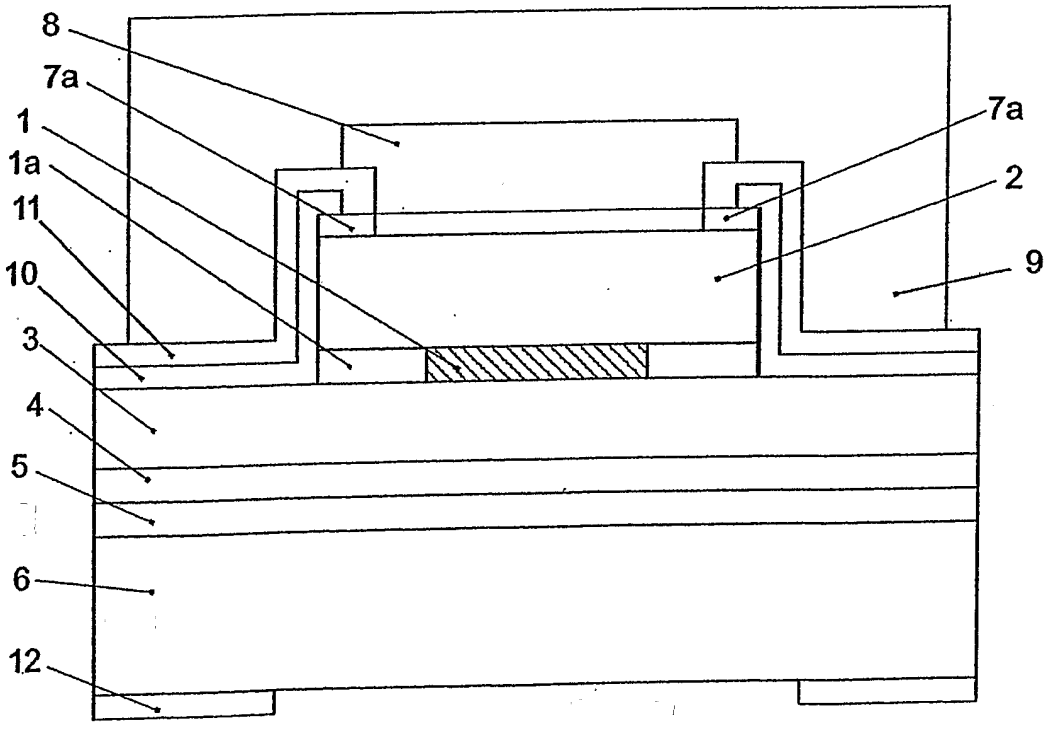
Figur 5



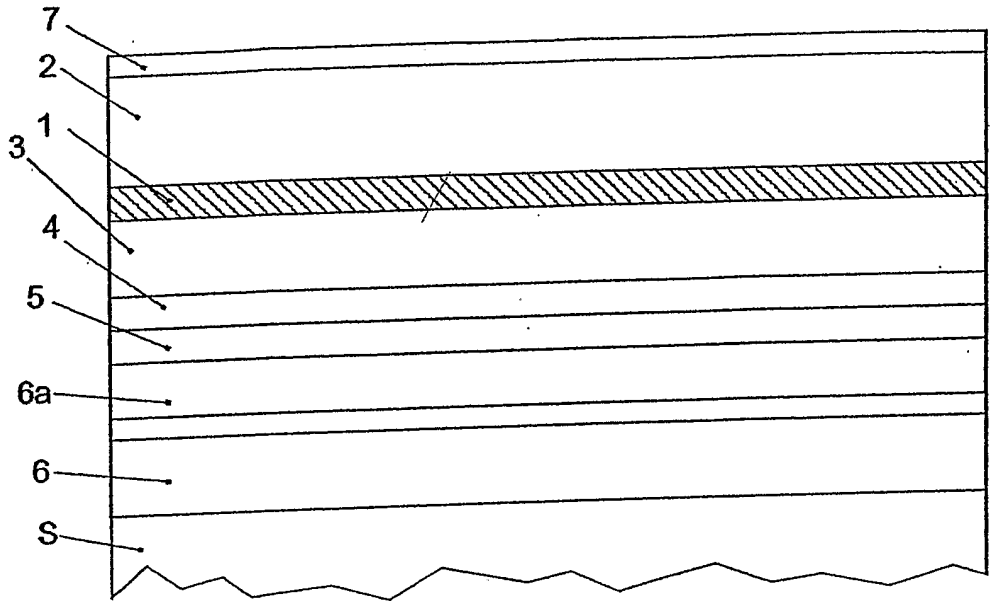
Figur 6



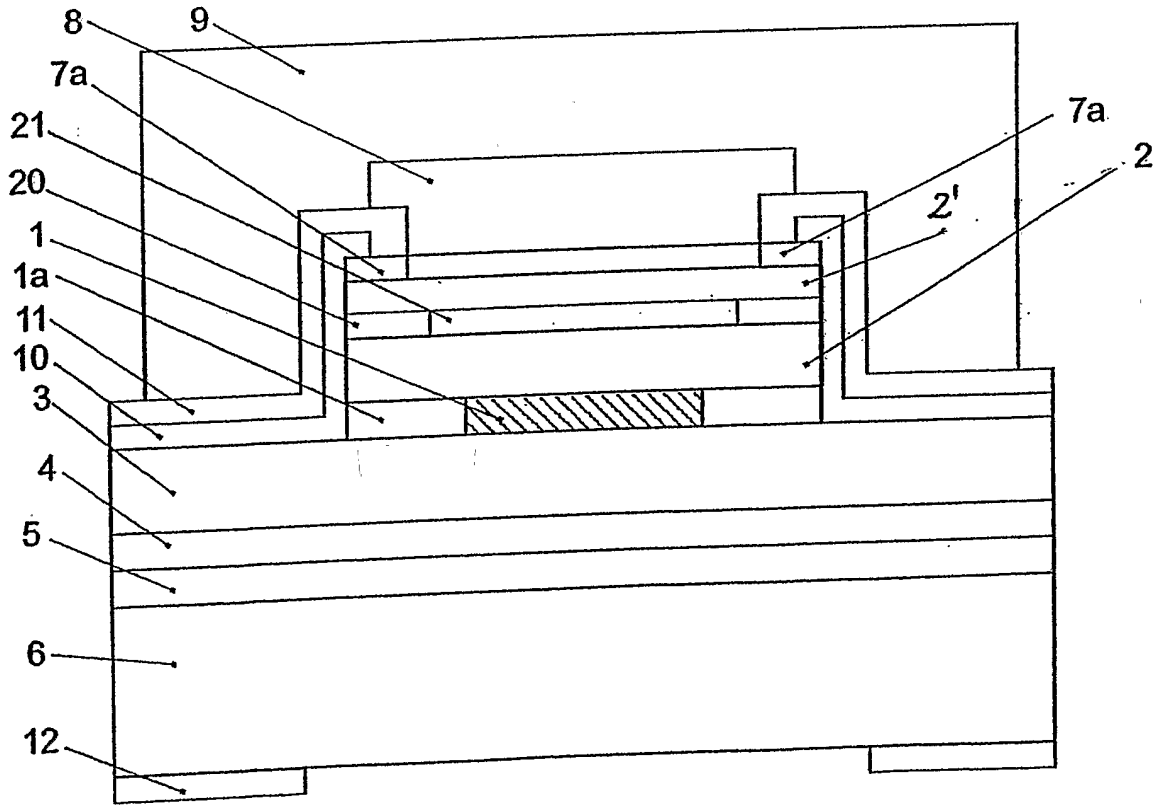
Figur 7



Figur 8



Figur 9



Figur 10