



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2008 022 793 A1** 2009.12.03

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2008 022 793.5**

(22) Anmeldetag: **08.05.2008**

(43) Offenlegungstag: **03.12.2009**

(51) Int Cl.⁸: **H01S 5/18** (2006.01)

H01S 5/42 (2006.01)

H01S 5/20 (2006.01)

(71) Anmelder:

Universität Ulm, 89081 Ulm, DE

(72) Erfinder:

Roscher, Ralf-Hendrik, 89073 Ulm, DE

(74) Vertreter:

PFENNING MEINIG & PARTNER GbR, 80339 München

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

US 58 77 519 A

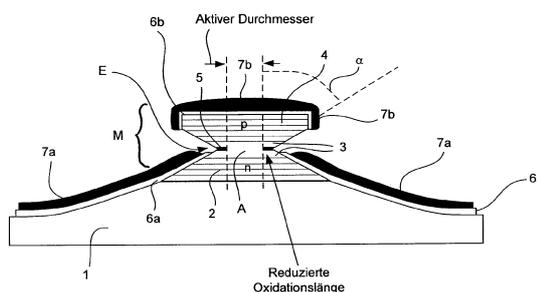
US 2002/01 10 169 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Vollständig selbstjustierter oberflächenemittierender Halbleiterlaser für die Oberflächenmontage mit optimierten Eigenschaften**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen oberflächenemittierenden Halbleiterlaser mit vertikalem Resonator, aufweisend einen Substratbasisabschnitt (1) und eine auf und/oder an dem Substratbasisabschnitt angeordnete Mesa (M), wobei die Mesa im Wesentlichen senkrecht zur Substratbasisebene gesehen, umfasst: zumindest einen Teil eines ersten, dem Substratbasisabschnitt zugewandt angeordneten Dotierbereiches (2), zumindest einen Teil eines zweiten, dem Substratbasisabschnitt abgewandt angeordneten Dotierbereiches (4) und einen zwischen dem ersten und dem zweiten Dotierbereich angeordneten aktiven Bereich (3) mit mindestens einer aktiven Schicht (A) mit laseremittierender Zone, welche im Wesentlichen senkrecht zur aktiven Schicht emittiert, dadurch gekennzeichnet, dass die Mesa (M) in zumindest einem Teilabschnitt ihrer Seitenflanke mindestens eine Einschnürung (E) aufweist.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf oberflächenemittierende Halbleiterlaser, auf Anordnungen bzw. Arrays aus solchen oberflächenemittierenden Halbleiterlasern sowie auf Verfahren zur Herstellung solcher oberflächenemittierender Halbleiterlaser und Halbleiterlaser-Arrays.

[0002] Oberflächenemittierende Halbleiterlaser, nachfolgend auch als Vertikallaserdioden oder VCSEL (englisch: Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers) bezeichnet sind eine neue Art von Halbleiter-Laserdioden, deren Entwicklung am Institut für Optoelektronik der Universität Ulm in den neunziger Jahren von Prof. K. J. Ebeling initiiert und vorangetrieben wurde und die heute unter Leitung von Dr.-Ing. R. Michalzik weiterhin maßgeblich mitbestimmt wird. Seit ca. 10 Jahren werden diese Laser mit steigendem kommerziellem Erfolg industriell in den verschiedensten Varianten gefertigt. Gerade in den letzten drei Jahren hat sich die Nachfrage nach VCSELn mit jährlichen Wachstumsraten von 100 bis 200% vervielfacht. Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften erschließen sie sich dabei immerwährend neue Anwendungsfelder. Heute werden sie von zahlreichen Firmen, darunter auch der Ulmer Ausgründung U-L-M photonics GmbH, jährlich in hohen Millionen-Stückzahlen gefertigt.

[0003] Die Anwendungsgebiete beginnen beim hochspezialisierten Einsatz in parallel-optischen Datenverbindungen, die heute das verteilte Rechnen innerhalb der weltweit leistungsfähigsten Supercomputer weiter beschleunigen, die bei einer Senkung der Herstellungskosten jedoch das Potential haben, kupferbasierte Bussysteme in handelsüblicher Rechentechnik abzulösen und sich so den Computermassenmarkt zu erschließen. Ein weiterer riesiger, allerdings extrem kostensensitiver Markt ist die Automobilindustrie. Hier bieten sich für die typischerweise im nahen Infrarotbereich emittierenden Laser in nächster Zukunft vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Sensorik durch die immer weiter ausgebauten Fahrerassistenzsysteme, wie Tote-Winkel-Überwachung oder Kollisionserkennung. In der Folge werden in immer intelligenteren Autos auch die Datenströme stark ansteigen, wodurch die Nachfrage nach Sensorik-VCSELn schließlich auch eine Nachfrage nach Datenübertragungs-VCSELn im Automobil nach sich ziehen wird. Endverbraucherprodukte, wie zum Beispiel optische Computermäuse, stellen einen weiteren Massenmarkt für VCSEL dar, in dem wegen des enormen Kostendrucks nur stete Produktivitätsfortschritte eines VCSEL-Herstellers auf Dauer sein Überleben sichern können.

[0004] Mit der Diskussion zukünftiger anspruchsvoller Massen Anwendungen wird jedoch deutlich, dass die konventionellen Herstellungsstrategien sowohl auf der Performance- als auch Kostenseite hierfür eine unzureichende Perspektive bieten. Neben der Reduktion des Flächenverbrauchs wird großes Potential in einer grundlegenden Änderung der Prozesstechnologie hin zu einer vollständig selbstjustierten VCSEL-Strukturierung gesehen, wie sie bei anderen modernen Halbleiterbauelementen schon üblich ist.

[0005] VCSEL sind verlustleistungsbehaftete und gleichzeitig temperaturempfindliche Bauelemente. In vielen Anwendungen sind viele dieser Laser auf engstem Raum untergebracht und zusätzlich integriert mit ebenfalls Verlustleistung produzierenden Treiber-Chips. Es existiert also ein thermisches Problem. Weiterhin erreichen die Bauelemente die hohen geforderten Modulationsgeschwindigkeiten erst bei hohen Pumpströmen, also in Betriebszuständen, in denen vergleichsweise viel Verlustwärme entsteht. Auch wegen der komplexen Schichtstruktur der VCSEL selbst ist im Stand der Technik eine ausreichende Wärmeabfuhr nur unzureichend gewährleistet.

[0006] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ausgehend vom Stand der Technik, oberflächenemittierende Halbleiterlaser bzw. Halbleiterlaserelemente und -arrays aus solchen Halbleiterlasern zur Verfügung zu stellen, welche eine verbesserte Wärmeableitfähigkeit zeigen, welche höhere Betriebsgeschwindigkeiten erlauben, welche eine verbesserte Konversionseffizienz aufweisen und welche eine längere Lebensdauer sowie eine höhere maximale Ausgangsleistung aufweisen, kurz, welche im Vergleich zu den aus dem Stand der Technik bekannten Halbleiterlaserelementen eine bessere Effizienz aufweisen. Aufgabe ist es darüber hinaus, Herstellungsverfahren für solche oberflächenemittierende Halbleiterlaserelemente bzw. Halbleiterlaserarrays zur Verfügung zu stellen.

[0007] Die Aufgabe wird durch ein oberflächenemittierendes Halbleiterlaserelement gemäß Patentanspruch 1, durch eine Anordnung aus solchen Halbleiterlaserelementen gemäß Anspruch 22 sowie durch ein Herstellungsverfahren gemäß Anspruch 39 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungsformen ergeben sich jeweils aus den abhängigen Ansprüchen. Patentanspruch 44 beschreibt darüber hinaus erfindungsgemäße Verwendungen.

[0008] Die vorliegende Erfindung wird nun zunächst allgemein beschrieben. Dem schließen sich zwei konkre-

te Ausführungsbeispiele an, welche zunächst in ihrem strukturell-körperlichen Aufbau beschrieben werden. Hiernach werden die beiden Ausführungsbeispiele ausführlich hinsichtlich der Funktionsweise des gezeigten oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelements, hinsichtlich der Vorteile des erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelements und hinsichtlich der Herstellung des erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelements beschrieben.

[0009] Die in den einzelnen Ausführungsbeispielen beschriebenen Aspekte der vorliegenden Erfindung können hierbei nicht nur in der jeweils konkret beschriebenen Kombination auftreten, sondern können im Rahmen der vorliegenden Erfindung basierend auf dem fachmännischen Können auch in anderen Kombinationen ausgeführt sein bzw. verwendet werden.

[0010] Bei der vorliegenden Erfindung wird unter einem Substrat oder Substratbasisabschnitt ganz allgemein ein Träger, eine Unterlage und/oder eine tragende Struktur beliebiger Form und beliebigen Materials verstanden. So kann das Substrat als ebener Halbleiterwafer aus Si oder aus GaAs ebenso ausgebildet sein wie als räumlich strukturierter Träger aus z. B. Kunststoff.

[0011] Grundlegende Idee der vorliegenden Erfindung ist es, die Mesa des oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelements auf eine völlig neue Art und Weise auszugestalten, nämlich in der Seitenflanke der Mesa eine Einschnürung oder auch mehrere Einschnürungen vorzusehen. Unter einer Einschnürung wird hierbei ein Bereich der Mesa verstanden, in welchem die Mesa in Richtung im Wesentlichen senkrecht zur Emissionsrichtung bzw. im Wesentlichen parallel zur Substratebene gesehen im Vergleich zu (in Emissionsrichtung gesehen) darüber- unter darunter liegenden Mesabereichen eine verringerte Querschnittsfläche aufweist. Insbesondere wird unter der Einschnürung im engeren Sinn derjenige Abschnitt der Mesa verstanden, auf dessen Höhe die Mesa die kleinste Flächenausdehnung aufweist (bei einer im Querschnitt parallel zur Substratschichtebene gesehen kreisförmigen Mesa wäre dies z. B. in Emissionsrichtung gesehen diejenige Höhe, auf der die Mesa den kleinsten Durchmesser aufweist). Mit anderen Worten wird bei der erfindungsgemäßen Mesa des oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelements ein Einschnitt bzw. eine seitliche Einätzung vorgesehen, somit auf Höhe der Einschnürung die Mesa ausbildendes Material aus der Seitenflanke der Mesa entfernt.

[0012] Ein weiterer wesentlicher Aspekt der vorliegenden Erfindung ist die auf der oben beschriebenen Einschnürung basierende, neuartige Ausbildung der Flip-Chip-Integration des Halbleiterlasers bzw. die Ausbildung einer völlig neuen Art und Weise der Einfassung des Halbleiterlasers durch ein dreidimensional strukturiertes Substrat bzw. ein dreidimensional strukturiertes tragendes Element.

[0013] Diese beiden vorgenannten wesentlichen Aspekte der vorliegenden Erfindung, welche nachstehend noch ausführlich anhand von Ausführungsbeispielen beschrieben werden, weisen gegenüber dem Stand der Technik die folgenden Vorteile auf:

Die erfindungsgemäßen VCSEL, welche nachfolgend aufgrund der erfindungsgemäßen Einschnürung auch als XCSEL bezeichnet werden (etwa X-shaped Cavity Surface-Emitting Laser oder auch eXtended-Capabilities SEL) stellen ein neues Niveau monolithischer VCSEL-Technologie dar. Sie bieten für verschiedenste Anwendungen völlig neue Ansätze zu bisher nicht erreichbar geglaubten Produktivitätsfortschritten in der Herstellung. Dies geschieht nicht etwa unter Inkaufnahme von Kompromissen bei der Bauelement-Performance, sondern hat im Gegenteil eine – teilweise dramatische – Verbesserung der Bauelementleistungen zur Folge. Zum Beispiel konnte in ersten Tests von flip-chip-integrierten XCSEL-Arrays der bisherige internationale Bestwert für den thermischen Widerstand dieserart aufgebauter Laser um ca. 50% unterboten werden, gegenüber kommerziell angebotenen Lösungen sogar um ca. 70 bis 80%. In der Konsequenz einer 50%-igen Reduktion werden die Laser bei vergleichbaren Betriebsbedingungen nur noch halb so warm, was umso schwerer wiegt, als sie generell in ihren kritischen Leistungsparametern und der Lebensdauer thermisch limitiert sind.

[0014] Damit eröffnet die vorliegende Erfindung neben drastischen Produktivitätsfortschritten auch neue Möglichkeiten durch überlegenes thermisches Management. Wie am Beispiel substrat-entfernter Hochgeschwindigkeits-VCSEL zur Datenübertragung gezeigt, können durch Einsatz der XCSEL die Übertragungsraten wesentlich gesteigert werden. Die vorgestellte Technologie ist zudem auch für Leistungs-VCSEL wegen der besseren Kühlung interessant. Auf technologischer Seite wird erstmals eine vollständig selbstjustierte Herstellung der kompletten VCSEL, gegebenenfalls sogar inklusive der p-seitigen Flip-Chip-Verbindung, möglich. Trotz der Einführung zusätzlicher Elemente werden Prozessschritte gänzlich eingespart und verbliebene rationalisiert. Die VCSEL bekommen neuartige optimierte Geometrien, welche nicht nur die Bauelement-Eigenschaften verbessern, sondern auch als technologische Werkzeuge in verschiedenen Varianten, insbesondere als eingebaute Lithographie- und Schattenmasken, zur Verfügung stehen.

[0015] Im Einzelnen ergeben sich insbesondere die folgenden Vorteile:

- Die Einschnürung in der Mesa bzw. die diaboloartige Mesaform führt zu einer Minimierung der Oxidationslänge (und der damit einhergehenden Kapazitäten) bei gleichzeitiger Limitierung der Streuverluste an den Mesawänden.
- Die erfindungsgemäße Geometrie erlaubt eine effiziente Seitenwand-Stromeinprägung und -Wärmeab-
leitung direkt bei der aktiven Zone unter bestmöglicher Umgehung der Bragg-Spiegel. Die durch die Mesa-
form erreichte Präzision erlaubt getrennte Seitenwandmetallisierungen für die n- und die p-Seite ohne da-
runterliegende Isolations- bzw. Passivierungsschichten (typ. SiN_x) und damit nicht nur den ungehinderten
Wärmefluss lateral aus der aktiven Zone vom Halbleiter direkt ins Seitenwand-Metall hoher Wärmeleitfähig-
keit, sondern gleichzeitig die direkte laterale Stromeinprägung direkt ober- bzw. unterhalb der aktiven Zone.
Daraus folgen im Vergleich zum Stand der Technik höhere Geschwindigkeiten, geringere Betriebstempera-
turen, längere Lebensdauern, höhere maximale Ausgangsleistungen, verbesserte Konversionseffizienzen
und somit eine bessere Gesamteffizienz.
- Die unter Performance-Gesichtspunkten optimierte Geometrie der XCSEL liefert gleichzeitig das wesent-
liche Werkzeug zur Herstellung der Laser selbst. Es ergibt sich folglich ein stark reduzierter Herstellungs-
aufwand und eine bessere Ausbeute: Zusätzliche Elemente und komplexere Geometrien liefern erweiterte
Funktionalitäten und bessere Leistungswerte bei vereinfachter Herstellung.
- XCSEL-Formgebung in nur einem, den gesamten Schichtenaufbau umfassenden Ätzschritt gegenüber
bisher praktizierter mehrstufiger Mesa-Ätzung.
- Reduzierte Zahl von Prozessschritten bzw. Prozesszeit → kürzere Durchlaufzeiten.
- Vollständig selbstjustierte Strukturen → erhöhte Präzision, kürzere Durchlaufzeiten.
- Elimination manueller zu Gunsten leicht automatisierbarer Prozesse.
- Visuelle In-situ-Verifizierbarkeit der kostengünstigeren Nassätzprozesse. Trockenätzen ist möglich zur
Herstellung von XCSEL, jedoch sind die Prozesse teurer und die erreichten Mesaformen in den meisten
Fällen weniger gut geeignet.

[0016] Werden die erfindungsgemäßen XCSEL flip-chip-integriert, so ergeben sich insbesondere folgende
neue Möglichkeiten bei Flip-Chip-Integration:

- Stark verbesserte Kühlung der Laser im Gesamtmodul durch
- Wärmeabtransport direkt aus der aktiven Zone hin zur gut kühlbaren optisch angebundenen Seite unter
Umgehung der Bragg-Spiegel (dabei vollständige Umhüllung der n-Seite mit einem Wärmeableiter, der aus
thermisch hoch-leitfähigen Schichten aufgebaut ist und nachfolgend auch als Kühlsonde bezeichnet wird).
- Umhüllung der p-seitigen Mesa durch gut wärmeleitfähige Metalle der Lotverbindung (Mesa zum Teil in-
nerhalb der Lotkugel). Damit wurden hier zum ersten Mal Wärmeverteilschichten (Wärmeableiter) imple-
mentiert, welche die Wärme direkt von der inneren Kavität der Laser auf der Epitaxienseite abholen und sie
zur optisch angebundenen Substratseite leiten, von der aus sie großflächig frei zugänglich sind für, zum
Beispiel, einen kühlenden Luftstrom. Dabei stellen sie einen den substratseitigen Bragg-Spiegelstapel
(nachfolgend auch DBR genannt von engl. „distributed bragg reflector“) überbrückenden Nebenschluss dar.
In bisherigen flip-chip-integrierten substrat-entfernten VCSELn aus dem Stand der Technik bleiben alle
Strukturen zur Kontaktierung auf der Epitaxienseite, auf der sich jedoch auch die selbst Wärme produzierende
Elektronik befindet, was den Wärmeabfluss aus dem Laser aufgrund fehlender Temperaturgradienten
behindert, ja ihn sogar noch zusätzlich erwärmen kann. Passive optische Elemente wie Linsen oder Glas-
fasern produzieren dagegen selbst keine Verlustwärme, weshalb die Verlustwärme vom Laser sehr gut auf
die optisch angebundene Seite in Richtung eines relativ großen negativen Temperaturgradienten abtrans-
portiert werden kann. Die erfindungsgemäße Struktur besitzt also Wärmeverteiler, die substratseitig mit
Submikrometer-Genauigkeit unmittelbar an den aktiven Schichten beginnen und in eine große, von der Epi-
taxienseite aus freiliegende Fläche übergehen.
- Integrierte selbstjustierte Faserführung
- Simultane Ausrichtung optischer Elemente (zum Beispiel Fasern eines Faserbündels oder Mikrolin-
sen-Arrays) für eine kostengünstige Montage und reproduzierbare sowie homogene Eigenschaften der
Koppelstellen.
- Unterdrückung von Rückreflexionen durch Indexanpassung zur weiteren Verbesserung der Dynamik.
- Möglichkeit zum gezielten Einströmen eines Kühlgases auf die Laser aus Längsöffnungen in Faser oder
Faserbündel.
- Effiziente Durchkontaktierung der Emissionsseite zur elektrischen Anbindung
- Bessere Bondpad-Benetzung beim Aufschmelz-Lötvorgang.
- Zusätzliche Formschlüssigkeit der Lotverbindung.
- Verringerte strukturelle Diskontinuitäten und räumlich ausgeglichene Kräfteflüsse.
- Erhöhte Lebensdauer.
- Selbst-planarisierende Flip-Chip-Technologie zur Überbrückung der Höhenunterschiede des nicht-plana-

ren Designs.

[0017] Auch bei der Flip-Chip-Integration ergibt sich somit eine verbesserte Leistung bei verringertem Herstellungsaufwand.

[0018] Nachfolgend wird nun die vorliegende Erfindung anhand von zwei Ausführungsbeispielen ausführlich beschrieben (zunächst erfolgt die Beschreibung der Struktur eines einzelnen erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Halbleiterlasers, dem schließt sich die Beschreibung seiner Funktionsweise an, sodann erfolgt die Beschreibung der Struktur eines erfindungsgemäßen flip-chip-integrierten Arrays von erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelementen und schließlich die Beschreibung der Funktionsweise des Letzteren).

[0019] Es zeigen:

[0020] [Fig. 1](#) oberflächenemittierende Halbleiterlaserelemente nach dem Stand der Technik.

[0021] [Fig. 2](#) die Flip-Chip-Integration eines oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelementes nach dem Stand der Technik.

[0022] [Fig. 3](#) ein einzelnes erfindungsgemäßes oberflächenemittierendes Halbleiterlaserelement, welches erfindungsgemäß eine Einschnürung in seiner Mesaseitenflanke aufweist.

[0023] [Fig. 3b](#) bis f Varianten der Erfindung wie sie in [Fig. 3a](#) gezeigt ist, Vergleiche der Erfindung mit dem Stand der Technik und/oder Herstellungsschritte im Rahmen der vorliegenden Erfindung.

[0024] [Fig. 4](#) die Flip-Chip-Integration von erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelementen gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0025] [Fig. 4b](#) einen Zwischenschritt bei der Herstellung des in [Fig. 4a](#) gezeigten Elements.

[0026] [Fig. 5](#) einen Ausschnitt aus [Fig. 4](#).

[0027] [Fig. 6](#) eine Variante der Erfindung mit mehreren Einschnitten bzw. Einschnürungen.

[0028] [Fig. 1](#) zeigt zwei oberflächenemittierende Halbleiterlaserelemente, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt sind. Wie [Fig. 1\(a\)](#) zeigt, ist aus dem Stand der Technik bekannt, eine Mesa des oberflächenemittierenden Halbleiterlaserelementes in Form von zwei übereinandergestapelten, auf einer gemeinsamen Achse zentrierten Kegelstümpfen auszubilden. Der als Kathode ausgebildete n-Mesabereich (welcher dem Substrat zugewandt auf diesem angeordnet ist) weist hierbei einen größeren mittleren Durchmesser (parallel zur Substratebene gesehen) auf, als der obere p-Mesabereich, welcher als Anode ausgebildet ist. Hierdurch ergeben sich zwei übereinander angeordnete, tafelförmige Mesabereiche mit im Vergleich zur Emissionsrichtung geneigten Seitenwänden bzw. Seitenflanken. Ebenso ist aber auch eine n-auf-p-Ausbildung mit vertauschter Polarität möglich (d. h. Dotierung der oberen Seite als n-leitend).

[0029] [Fig. 1\(b\)](#) zeigt ein weiteres Beispiel: Der n-Mesabereich ist hierbei wie beim in [Fig. 1\(a\)](#) gezeigten Beispiel ausgebildet. Der sich diesem auf der substratabgewandten Seite des n-Mesabereiches anschließende p-Mesabereich ist hier jedoch in Form eines flachen Zylinders (also mit Seitenflanken bzw. Seitenwänden parallel zur Emissionsrichtung und senkrecht zur Substratschichtebene) ausgebildet. Die Ausbildung der p-Mesa erfolgt hierbei durch Trockenätzung.

[0030] [Fig. 2](#) zeigt nun, wie ein solches oberflächenemittierendes Halbleiterlaserelement (hier am Beispiel des in [Fig. 1\(a\)](#) gezeigten Elementes dargestellt) flip-chip-integriert werden kann. Gut zu erkennen ist hier die im Falle des Standes der Technik notwendige umfassende und aufwändige Planarisierung durch mehrere zusätzliche Metallisierungs- und Passivierungsebenen.

[0031] [Fig. 3](#) zeigt nun im Gegensatz dazu ein erstes Beispiel für einen erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Halbleiterlaser. Dieser weist auf einem hier in Form eines sehr flachen Kegelstumpfes ausgebildeten Substratbasisabschnitt **1** (der Abschnitt **1** kann jedoch auch eben sein) eine Mesa M auf. Die Mesa M umfasst hierbei einen ersten, dem Substratbasisabschnitt zugewandt angeordneten Dotierbereich **2**, welcher hier als unmittelbar auf dem Substratbasisabschnitt **1** und angrenzend an diesen angeordneter n-dotierter Be-

reich ausgebildet ist. Auf dem n-dotierten Bereich **2** und unmittelbar angrenzend an diesen auf dessen substratbasisabgewandter Seite ist der aktive Bereich **3** der Mesa M angeordnet. Dieser aktive Bereich **3** weist mindestens eine aktive Schicht A mit laseremittierender Zone, welche im Wesentlichen senkrecht zur aktiven Schicht bzw. zur Substratschichtebene **1** emittiert (also in Vertikalrichtung im Bild), auf. Die aktive Schicht bzw. Zone A besteht hier aus einem bis fünf Quantenfilmen, sie kann jedoch auch Quantendrähte oder Quantenpunkte enthalten oder ein Volumenmaterial sein. Unmittelbar angrenzend an den aktiven Bereich **3** ist auf dessen substratbasisabgewandter Seite der zweite Dotierbereich **4** der Mesa M angeordnet. Dieser ist als p-dotierter Bereich ausgebildet. Der n-dotierte Bereich **2** und der p-dotierte Bereich **4** weist hierbei jeweils, wie es dem Fachmann bekannt ist, einen Bragg-Spiegelstapel auf.

[0032] Erfindungsgemäß weist die Mesa M nun wie folgt eine Einschnürung E ihrer Seitenflanken (dies sind diejenigen Abschnitte der Mesa M, welche nicht parallel zur Substratschichtebene **1** angeordnet sind) auf: Wie nachfolgend noch näher beschrieben, wurde aus der Seitenflanke der Mesa M über den gesamten Umfangsbereich der Mesa M ein Materialabschnitt so entfernt bzw. abgetragen, dass sich im Querschnitt senkrecht zur Substratschichtebene (und durch die Zentralachse der hier rotationssymmetrischen Mesa M) gesehen ein V-förmiger Einschnitt dergestalt ergibt, dass die Mesa M auf Höhe der aktiven Schicht A des aktiven Bereiches **3** einen Bereich aufweist (Einschnittsbereich E), in dem der Durchmesser der Mesa parallel zur Substratschichtebene gesehen in etwa die Hälfte des mittleren Durchmessers des n-Dotierbereiches **2** bzw. des p-Dotierbereiches **4** beträgt. Der V-förmige Einschnitt liegt hier auf Höhe der aktiven Schicht, jedoch befindet sich die engste Stelle des Einschnittes E in der ersten an den aktiven Bereich angrenzenden Spiegelschicht des oberen DBR. Sie liegt hier also einige Epitaxieschichten (ca. 100 bis 300 nm) oberhalb der Quantenfilme, in denen das Licht generiert wird. Bei vertauschter Polarität der unteren und oberen Mesateile würde die engste Stelle dann entsprechend unterhalb der aktiven Schicht liegen.

[0033] Näherungsweise lässt sich die die Elemente **2**, **3** und **4** umfassende Mesa M somit als ein geometrischer Körper beschreiben, welcher aus zwei Kegelstümpfen besteht, welche zentriert mit denjenigen Deckelflächen, welche beim jeweiligen Kegelstumpf den geringeren Durchmesser aufweisen, aneinander angrenzend angeordnet sind. Es ergibt sich somit für die Mesa M eine diaboloförmige Ausgestaltung bzw. eine Ausgestaltung, welche im Querschnitt senkrecht zur Substratschichtebene und durch die zentrale Rotationsachse der Mesa gesehen im Wesentlichen X-förmig ausgebildet ist.

[0034] Im Detail ist hierbei der n-dotierte Bereich **2** als Kegelstumpf ausgebildet, der p-dotierte Bereich **4** auf seiner dem n-dotierten Bereich **2** zugewandten Seite ebenfalls als Kegelstumpf, dem sich auf der dem n-dotierten Bereich **2** abgewandten Seite ein flacher Zylinder mit einem dem Basisdurchmesser des Kegelstumpfes entsprechenden Durchmesser anschließt. Der Zylinder ist hierbei ebenfalls Teil des p-Bereiches. Dieser flache Zylinder ist meist vorhanden, er muss es jedoch nicht zwingend sein. Wird der Einschnitt tiefer geätzt, besteht der obere Teil nur noch aus einem Kegelstumpf. In einer solchen Variante hat man einen größeren mittleren Abstand des optischen Feldes im Resonator von den Seitenwänden, da auch der obere Teil der Wände weiter nach außen weg läuft.

[0035] Aufgrund des im Bereich der Einschnürung E (welcher den Bereich des geringsten Durchmessers der Mesa darstellt) in etwa halbierten Mesadurchmessers ergibt sich somit auf Höhe der aktiven Schicht A in etwa eine Viertelung der Querschnittsfläche der Mesa M im Vergleich zur Querschnittsfläche im Bereich der beiden Bragg-Spiegelstapel **2** und **4**.

[0036] Im dargestellten Fall ist der Einschnitt lateral ca. 5 µm tief. Ein bevorzugter Wertebereich geht hier von 0.5 bis 10 µm, bevorzugte Tiefen liegen jedoch zwischen 1 und 6 µm. Die Seitenwände laufen hier unter einem Winkel von +−30° gegen die Horizontale vom Zentrum nach außen weg, wobei natürlich auch diese Winkel variierbar sind, und zwar über die Ätztatendifferentiale zwischen den beteiligten Schichten (Ätztatenunterschied zwischen schnell und langsam ätzenden Schichten). Die Oxidationslänge beträgt nur wenige Mikrometer, typischerweise ca. 2 µm, kann aber weniger als 1 µm und sogar 0 µm betragen.

[0037] Allgemeiner gilt:

Die laterale Tiefe des Einschnittes ist durch die Mesahöhe und die maximal erreichbaren Winkel begrenzt. Die Tiefe der Oxidationsschicht soll gerade groß genug sein, um Streuverluste am Mesaeinschnitt ausreichend zu reduzieren. Beide Elemente sollen das optische Feld ausreichend fern von den metallisierten Seitenwänden halten, da es dort andernfalls nicht nur durch Streuung, sondern auch durch induzierte Ströme zu erhöhten Verlusten käme. Die lateralen Ausdehnungen dieser Elemente werden demnach in erster Linie bestimmt vom erforderlichen Abstand zu den Seitenwänden. Hingegen sind der aktive Durchmesser und damit der Durchmesser der engsten Stelle des Einschnittes weitgehend frei wählbar. Sie sind theoretisch nur durch den Wa-

ferdurchmesser begrenzt, variieren aber auch praktisch je nach Anwendung sehr stark, wobei der Gesamtbereich etwa Werte zwischen 1 μm und 1 mm umfasst, häufiger vorkommende aktive Durchmesser jedoch zwischen 2 und 50 μm liegen.

[0038] Auf Höhe der aktiven Schicht A ist im gezeigten Fall im aktiven Bereich **3** darüber hinaus eine ringförmige, hochohmige oder elektrisch sperrende Stromeinschnürschicht **5** (hier durch eine entsprechende Oxidationsschicht, wie sie dem Fachmann bekannt ist) ausgebildet. Alternativ kann diese Stromeinschnürschicht **5** jedoch auch entfallen (es liegt dann nur eine geometrische Einschnürung E vor). Da die Stromeinschnürschicht **5** auf Höhe der Einschnürung E ausgebildet ist, ergibt sich für diese Stromeinschnürschicht **5** eine im Vergleich zum Stand der Technik deutlich reduzierte Oxidationslänge. Im gezeigten Beispiel weisen die durch die Entfernung des Materials bzw. die Ausbildung des Einschnittes E ausgebildeten Seitenflanken des n-dotierten Bereiches **2** und des unteren p-dotierten Bereiches **4** der Mesa M einen Winkel α von etwa 60° in Bezug auf die Rotationssymmetrieachse der Mesa M (welche der Emissionsrichtung des Halbleiterlasers entspricht) auf. In Bezug auf die Substratschichtebene **1** gesehen ergibt sich somit ein vergleichsweise flacher Verlauf dieser Seitenflanken. Unmittelbar angrenzend an und auf der Substratbasis **1** und der Oberfläche des ersten Dotierbereiches **2** ist nun, konzentrisch über den gesamten Umfang der Mesa M im Bereich **2** ausgebildet, ein erster Seitenwandmetallkontakt **6a** angeordnet. Dieser bedeckt nicht nur die Oberfläche des ersten Dotierbereiches **2** auf der Seitenflanke der Mesa M vollständig, sondern ist zusätzlich auch auf dem dem ersten Dotierbereich **2** zugewandten Oberflächenabschnitt des aktiven Bereiches **3** angeordnet und zieht sich somit bis auf wenige Mikrometer an die aktive Schicht A heran. Auf diesem ersten Seitenwandmetallkontakt **6a** und angrenzend an ihn ist ein erster Seitenwandwärmeableiter **7a**, hier aus Gold ausgebildet, angeordnet. Dieser bedeckt praktisch die gesamte den Elementen **1**, **2** und **3** abgewandte Oberflächenseite des ersten Seitenwandmetallkontaktes **6a** und sorgt somit durch diese Ausbildung für eine optimale Wärmeableitung der vom Halbleiterlaser produzierten Wärme.

[0039] Die der Substratbasis **1** abgewandte Oberfläche des p-dotierten Bereiches **4** sowie die Seitenflanken des vorbeschriebenen Zylinderabschnittes dieses Dotierbereiches tragen einen zweiten Seitenwandmetallkontakt **6b**. Dessen dem p-dotierten Bereich abgewandte Oberfläche wird von einem zweiten Seitenwandwärmeableiter **7b** umschlossen.

[0040] Wie gezeigt ergeben sich durch die beschriebene Geometrie somit eine stark reduzierte Oxidationslänge und ein aktiver Durchmesser (siehe Figur), welcher sich über etwa ein Drittel des mittleren Querschnittsdurchmessers des p-Dotierbereiches bzw. des n-Dotierbereiches erstreckt.

[0041] [Fig. 3](#) zeigt somit eine völlig neuartige und in mehrerlei Hinsicht überlegene Formgebung monolithischer VCSEL, die in der Herstellung erreicht wird durch einen technologischen Paradigmenwechsel. Die neue Form an sich verbessert sowohl die Bauelementeigenschaften als auch die Effizienz der Bauelementherstellung. Darüber hinaus ermöglicht sie erstmals eine direkte Stromeinprägung in – und Wärmeableitung aus – unmittelbarer Umgebung der aktiven Zone A der Laser, und zwar unter bestmöglicher Umgehung der relativ schlecht elektrisch und thermisch leitfähigen Heteroübergänge in den Bragg-Spiegeln **2**, **4**. Den Wärmefluss (und auch den Stromfluss) blockierende Passivierungsschichten zwischen Halbleiter und Metall, wie sie bisher bei zur Kühlung gedachten Seitenwandbeschichtungen eingesetzt wurden, sind nicht mehr notwendig.

[0042] In nahezu allen heute kommerziell eingesetzten VCSELn basierend auf dem InAlGaAs-Materialsystem befindet sich eine dünne hoch aluminiumhaltige Schicht innerhalb der epitaktischen Struktur, die im Stand der Technik bislang zur lateralen Stromeinschnürung durch selektive Oxidation Verwendung findet. In der vorliegenden Erfindung wird erstmals das laterale Ätzraten-Differential zwischen dieser Oxidationsschicht (oder auch einer weiteren, speziell dafür vorgesehenen Schicht) und den sonstigen Schichten einer VCSEL-Struktur ausgenutzt zur erfindungsgemäßen Konturierung der Mesen. Diese Formgebung erfolgt in nur einem einzigen nasschemischen Ätzschritt, der die Gesamtheit der epitaktischen Schichten des VCSELs umfasst. Im Gegensatz dazu erfolgte in der seit vielen Jahren aus dem Stand der Technik bekannten Zweischritt-Ätzung eine getrennte Strukturierung der p- und n-leitfähigen Epitaxieschichten in separaten und meist auch nicht direkt aufeinanderfolgenden Ätzungsschritten.

[0043] Unter lateralem Ätzraten-Differential wird dabei der Unterschied in den Ätzraten zwischen den einzelnen Epitaxie-Schichten verstanden, was beim Ätzen zur Ausbildung der geometrisch eingeschnürten XCSEL-Profile führt.

[0044] Die XCSEL bestehen aus einem Stapel sehr dünner Halbleiterschichten mit variierenden Materialzusammensetzungen. Je nach Schichtzusammensetzung können die Halbleitergitter verschieden schnell von

Ätzlösungen aufgelöst werden. In vertikaler Richtung sind die einzelnen Schichten jeweils nur sehr gering ausgedehnt, wodurch die Unterschiede in den Ätzzraten nicht zum Tragen kommen und nur eine mittlere Rate beobachtet wird, mit der die Ätzlösung vertikal vordringt. In lateraler Richtung dagegen sind die Schichten weit ausgedehnt und die Ätzzratenunterschiede können lange Zeit wirken, wodurch sich je nach Kombination schnell und langsam ätzender Schichten verschiedene Seitenwand-Profile ausbilden lassen. Beim Ätzzvorgang ist für das einzelne Bauelement ein begrenzter Bereich der Waferoberfläche von einer Ätzmaste (zum Beispiel Photolack) bedeckt. In den freiliegenden Bereichen werden die Schichten beim Ätzen vertikal zur Waferoberfläche eine nach der anderen abgetragen, wodurch an der Maskenkante mit Voranschreiten des Ätzzprozesses die Stirnseiten immer tiefer liegender Schichten der Ätzlösung ausgesetzt sind. Sobald eine Schicht zum Vorschein kommt, wird sie auch in lateraler Richtung von ihrer Stirnseite her angegriffen. Sobald eine schnell ätzende Schicht freigelegt wird, schreitet dort der Auflösungsprozess parallel zur Waferoberfläche schneller voran als oberhalb und unterhalb davon, was zur Ausbildung einer Kerbe bzw. der erfindungsgemäßen Einschnürung führt. Mit dem Entstehen einer Kerbe werden dann die nach oben/unten angrenzenden Schichten nicht mehr nur von deren Stirnseite aus angegriffen, sondern auch von unten/oben her (siehe [Fig. 3b](#)). Je nachdem, wie stark verschieden die Ätzzraten sind und wie lange nach dem Erscheinen der schnell ätzenden Schicht(en) noch weitergeätzt wird, bilden sich mehr oder weniger stark ausgeprägte Kerben oder Einschnürungen mit verschiedenen Tiefen und Flankenwinkeln aus.

[0045] So lassen sich im Prinzip eine Vielzahl von Grundformen bzw. Seitenwandprofile schon in die epitaktische Schichtstruktur „einprogrammieren“. Diese epitaxiegesteuerte Erzeugung der XCSEL-Profile erfolgt effizient in nur einem einzigen nass- oder trocken-chemischen Ätzzschritt, der alle Teile des Lasers (beide Spiegel und die dazwischenliegende aktive Zone) automatisch zueinander zentriert.

[0046] Unter anderem sind auch perfekt senkrechte Wände bzw. Wandabschnitte durch Nassätzen erzeugbar, indem die Ätzzrate der Schichten nach unten hin genau im richtigen Maße zunimmt, so dass diejenigen Schichten, welche erst später am Ätzzprozess teilnehmen zu den schon länger geätzten Schichten bis zum Ende des Ätzzprozesses gerade aufschließen können. Ebenso sind auch Kombinationen aus mehreren Kerben/Einschnürungen bzw. mehreren Überhänge im Seitenwandprofil (Abschnitte mit negativem Winkel der Seitenwand zwischen 0 und 90°) realisierbar, die im XCSEL zum Beispiel zur noch stärkeren lateralen Wellenführung beitragen, womit sich das Modenvolumen weiter verringern lässt, um die Laser wiederum schneller zu machen.

[0047] Die Ätzzrate der epitaktischen Schichten ist steuerbar durch ihre Zusammensetzung, also die Konzentrationen chemischer Elemente im Verbindungshalbleiter, die gerade beim epitaktischen Wachstum sehr genau kontrolliert werden können. Dies schließt sowohl die Elemente des Verbindungshalbleiters, wie zum Beispiel Al im AlGaAs, als auch die zugesetzten Dotierstoffe, wie zum Beispiel Si oder C ein. Im transportbegrenzten Fall beeinflusst dagegen auch die Dicke der Schichten die Rate mit der sie lateral abgetragen werden. Daneben ist jegliches Ätzzverhalten natürlich von der verwendeten Ätze bestimmt, die im AlGaAs Materialsystem zum Beispiel eine Mischung aus H_2SO_4 , H_2O_2 und H_2O ist.

[0048] In konventionellen mesaisolierten Bauelementen aus dem Stand der Technik stellen die Seitenwände eine potentielle Quelle für Teilchenverluste dar, die sie bei Kontakt mit den entsprechenden optischen bzw. elektrischen Teilchen vor allem durch Streuung und Oberflächenströme bzw. -rekombination verursachen. Daher wird ihr Einfluss durch lateral ausgedehnte dünne isolierende Blenden (zum Beispiel aus Luft oder Oxid bestehend) eliminiert, die jedoch mit nicht vernachlässigbaren Kapazitäten behaftet sind und den Wärmefluss behindern.

[0049] Erfindungsgemäße XCSELS beinhalten dagegen eine neuartige Funktionalisierung der Seitenwände. Im Gegensatz zum konventionellen Schema werden die Seitenwände hier nicht passiviert und ihr Einfluss damit weitestgehend eliminiert, sondern sie werden speziell ausgeformt und übernehmen eine neue, aktive Rolle. [Fig. 3c](#) zeigt diesen Unterschied genauer (links: konventioneller Air post VCSEL, Mitte: konventioneller Oxid-/Luftblenden-VCSEL, rechts: erfindungsgemäßer XCSEL; D_a ist jeweils der aktive Durchmesser).

Nachteile im Stand der Technik:

- Air post VCSEL: harte Führung und große optische und elektrische Verluste durch geätzte Seitenwände als Begrenzung der aktiven Zone und des Resonators.
- Oxid-/Luftblenden VCSEL: Es wird eine dünne, lateral ausgedehnte Blende aus isolierendem Material (zum Beispiel ein Oxid oder Nitrid des Materials oder auch Luft, kurz "Oxid-Einschnürung" bzw. "Oxidblende") erzeugt. Stromeinschnürung und Wellenführung erfolgen am Innenrand dieser Blende, wodurch die ak-

tive Zone so weit von den Seitenwänden entfernt wird, dass ihr Einfluss weitgehend eliminiert ist. Die Teilchenverluste werden gegenüber air post VCSELn stark reduziert, indem sowohl die freien Ladungsträger als auch die Lasermoden von den Seitenwänden ferngehalten werden. Diese Laser sind daher deutlich effizienter als air post VCSEL. Allerdings behindern die lateral ausgedehnten, dünnen Blenden aus isolierendem Material den Wärmeabfluss aus der Struktur und bringen obendrein eine nicht vernachlässigbare parasitäre Kapazität mit sich.

- In beiden Fällen sind die Seitenwände nicht direkt und strukturiert mit Leitungsstrukturen beschichtet, noch liegt eine Einschnürung vor.

[0050] Demgegenüber gilt für die vorliegende Erfindung:

- Neuartige, hybride Indexführung durch Kombination einer geometrischen (bevorzugt keilförmig ausgebildeten) Einschnürung mit einer Oxid-Einschnürung. Eine sehr kurze Oxidblende sorgt, vorzugsweise als direkter Fortsatz der geometrischen Einschnürung ausgeführt, für eine Verringerung der Streuverluste und Passivierung der Oberfläche des geometrischen „Führungskeils“.

- Die geometrische Einschnürung stellt durch ihren großen Brechzahlssprung (z. B. HL-Luft bzw. HL-Polymer; HL = Halbleiter) und ihre Form eine starke Wellenführung bereit, wobei deren relative Stärke durch die Tiefe der Oxidblende steuerbar ist. Die Geometrie ist bevorzugt keilförmig und unterscheidet sich sowohl von den (mehr oder weniger) geraden Wänden der air post VCSEL als auch von denen der Oxid-/Luftblenden-VCSEL. Das optische Feld wird bei den erfindungsgemäßen XCSELn auf einem scharf definierten Abstand zu den Seitenwänden gehalten.

- Gleichzeitig entsteht ein Seitenwandprofil mit Überhängen, das sich selbstjustiert direkt beschichten lässt und bei gerichteter Abscheidung leitfähiger Materialien automatisch für eine Strukturierung in Form einer Unterbrechung unmittelbar an den aktiven Schichten sorgt, also Kurzschlüsse von p-n Übergängen sicher verhindert.

- Da ein solches Seitenwandprofil wie beschrieben durch die epitaktische Schichtstruktur selbst vordefiniert wird, dringt die Präzision der Strukturdefinition der Seitenwandbeschichtung in ähnliche Größenordnungen vor, wie sie typische Strukturgrößen der epitaktischen Schichtstruktur aufweisen. Dabei weist die Fertigung hohe Effizienz und geringe Komplexität auf.

- In der Konsequenz wird die Seitenwandbeschichtung befähigt, in geringstem Abstand um das optische Feld herumzugreifen und mit dem Ende bis zur zentralen Kavität zu reichen, um dort direkt durch die Seitenwände Strom zu- und Wärme abzuführen. Die beschriebene hybride Indexführung erlaubt einerseits das nahe Heranreichen der Seitenwandmetallisierung an die aktiven Gebiete unter Umgehung der schlecht leitfähigen Heteroübergänge, während andererseits eine ausreichend starke Führung des Feldes in der engsten Stelle durch Einschnürung und Oxidschicht das optische Feld auf ausreichendem Abstand von eben diesen Metallflächen hält, die ansonsten nicht nur durch Streuung sondern auch durch induzierte Ströme zu starken Verlusten führen würden.

[0051] Die [Fig. 3d](#) stellt wesentliche Aspekte der erfindungsgemäßen XCSEL Seitenwandgeometrie anhand einer Beispielkonfiguration dar. Gezeigt ist ungefähr der in [Fig. 3c](#) rechts im XCSEL markierte Ausschnitt (punktierte Linie dort):

(a) keilförmiger "Abstandshalter";

(b) strukturelle Kante erlaubt in Verbindung mit gerichteter Abscheidung, dass leitfähige Materialien in geringem Abstand um das optische Feld herum separat von oben und unten in die unmittelbare Umgebung der aktiven Zone geführt werden;

(c) kurzer Oxidfortsatz bewirkt eine der stärkeren geometrischen Führung vorgelagerte schwächere Führung, wodurch sich die Streuverluste reduzieren sowie der Anteil der geometrischen Führung an der Gesamtführung einstellbar wird (M: Seitenwandmetallisierung(en), A: aktive Schichten, Skizzen nicht maßstabsgerecht).

[0052] Die aktive Zone kann sich dabei sowohl oberhalb als auch unterhalb der engsten Stelle befinden.

[0053] Zusammenfassend offenbart die Erfindung eine neue Art, gerichtet abscheidbare Materialien seitlich bis unmittelbar an die aktive Zone heranzuführen, mit bevorzugt:

- Abstandshalter: geometrischer Keil mit optionalem Fortsatz aus isolierender Blende und

- Seitenwandprofilen mit Überhängen, die selbstjustiert beschichtbar sind und in geringem, präzise definierten Abstand um das optische Feld im Resonator herumzugreifen und wiederum genau steuerbar in unmittelbarer Nähe der aktiven Schichten enden.

[0054] Die resultierende erfindungsgemäße X-förmige bzw. diaboloförmige Kontur der Laser, wie sie in [Fig. 3](#) im Vergleich zu den konventionellen Formen in [Fig. 1](#) dargestellt ist, kombiniert eine starke Einschnü-

rung E der Mesa M selbst, und zwar unmittelbar auf Höhe der aktiven Schichten A, mit einer weiterhin möglichen zusätzlichen Stromeinschnürung **5** und Wellenführung durch eine laterale Oxidation. Die Mesa-Einschnürung erlaubt eine Minimierung der Oxidationslänge und der damit verbundenen intrinsischen parasitären Kapazitäten bei gleichzeitiger Limitierung der Streuverluste durch einen ausreichend großen mittleren Abstand der extrem schräg verlaufenden Mesawände (ca. $\alpha = 60^\circ$ gegen die Vertikale) vom optischen Feld im Resonator. Mithin verbessert die erfindungsgemäße Form sowohl die potentielle Modulationsgeschwindigkeit der VCSEL durch Reduktion von Parasitäten als auch den Verlustwärme-Abfluss innerhalb der Struktur, für den die Oxidschicht **5** ein Hemmnis darstellt. Ein besserer Abtransport von Wärme hält die Betriebstemperatur auf niedrigerem Niveau, was wiederum unmittelbar rückwirkt auf die erreichbaren Modulationsgeschwindigkeiten. Kühlere Laser sind jedoch nicht nur schneller, sie haben unter anderem auch längere Lebensdauern und zeigen höhere Ausgangsleistungen.

[0055] Zudem bereitet die erfindungsgemäße Form auch einer wesentlich fortschrittlicheren Technologie den Weg. Neben reinen Rationalisierungsvorteilen in der Herstellung ermöglicht sie sowohl die Integration von bisher nicht sinnvoll machbaren, ggf. optionalen zusätzlichen Elementen als auch eine gesteigerte Präzision. Beides bewirkt nochmals substantielle Leistungssteigerungen der Bauelemente, insbesondere was das thermische Management und aller damit verbundenen Leistungsparameter dieser allgemein thermisch limitierten und Verlustleistung erzeugenden Laser angeht.

[0056] Die zusätzlichen Elemente sind bei dem in **Fig. 3a** gezeigten solitären, erfindungsgemäßen XCSEL sowohl die elektrischen als auch die thermischen Seitenwand-Kontakte und -Wärmeableiter, die, präzise strukturiert, jeweils unmittelbar bis an die aktiven Schichten innerhalb der Kavität heranreichen können und – ohne passivierende, den Wärmefluss blockierende Zwischenschicht – in direktem Kontakt zu den „Stirnseiten“ der Epitaxieschichten auf den Seitenwänden angebracht sein können. Diese Elemente haben keine Entsprechung in den herkömmlichen VCSELn nach **Fig. 1** und die Seitenwandprofile der XCSEL werden zu ihrer Herstellung als Schattenmaske (bei Vakuumabscheidung durch Verdampfen oder Sputtern) bzw. als Lithographiemaske (bei galvanischer Abscheidung) herangezogen.

[0057] Im Einzelnen können sowohl der p-Kontakt **6b** als auch der n-Kontakt **6a** unter Nutzung der Mesa-Überhänge als Schattenmasken mit hoher Präzision vollständig selbstjustiert hergestellt werden, ohne dass ein einziger Lithographieschritt hierfür notwendig ist. Der n-Kontakt **6a** wird hierbei, als weiteres erfindungsgemäßes Merkmal, auch (oder ausschließlich) auf den Mesaflanken gebildet. Er kann auf der Seitenwand bis hin zur inneren Kavität E reichen, wodurch die relativ hochohmigen Hetero-Übergänge des Bragg-Spiegels **2** umgangen werden und die Strominjektion effizient auf den Seitenwänden in unmittelbarer Nähe der aktiven Zone A erfolgen kann (engl. etwa „intracavity sidewall injection“). Besonders attraktiv ist dieser Ansatz bei Verwendung von VCSELn mit verlängerter innerer Kavität, bei denen mehr Kontaktfläche auf Halbleiterschichten mit kleinerer Bandlücke für einen guten ohmschen Kontakt zur Verfügung steht. In Gebieten geringer Feldintensität können diese Schichten partiell hochdotiert sein. Außerdem bewirkt das Einlegieren des n-Kontakt-Materials als eine entartete Dotierung der Seitenwände. In der Konsequenz lassen sich die Bragg-Spiegel **2, 4** beim epitaktischen Wachstum dann sogar im Hinblick auf reduzierte freie Ladungsträgerstreuung und erhöhte Reflektivitäten optimieren, da sie nicht mehr unbedingt und in vollem Umfang für die Ladungsträgerinjektion benötigt werden. Eine dann mögliche Verkürzung der Bragg-Spiegel verbessert abermals die Kühlung der aktiven Schichten.

[0058] Die Herstellung des p-Kontaktes **6b** und des n-Kontaktes **6a** kann dabei wie folgt erfolgen (siehe auch **Fig. 3e**):

1. Senkrecht Abscheiden des für die Polarität des oberen, vom Substrat abgewandten XCSEL-Teils passenden Metallsystems (hier: Metallisierungsfolge für p-Kontakte, bspw. Ti:Pt:Au).
2. Schräges Abscheiden unter Rotation des für die Polarität des unteren, substratseitigen XCSEL-Teils passenden Metallsystems (hier: Metallisierungsfolge für n-Kontakte, bspw. Ge:Au:Ni:Au).

[0059] Beispiel A (A in **Fig. 3e**): Ohne flachen Zylinder im oberen Teil und demzufolge mit nur einer ganz oben gelegenen Kante zur Definition des unteren Kontakts.

[0060] Beispiel B (B in **Fig. 3e**): Mit kurzer geometrischer Einschnürung und nahezu vollständig beschichteten Seitenwänden auch im oberen Teil, der leicht negativ geneigte Seitenwände aufweist. In diesem Fall wird die untere der beiden Kanten des oberen XCSEL-Teils zur Definition des an der aktiven Zone gelegenen Kontakt-Endes wirksam.

[0061] Beispiel C (C in **Fig. 3e**): Der obere Teil weist leicht positiv geneigte Seitenwände auf, wodurch auch

auf ihnen ohmsche Kontakte zur lateralen Strominjektion entstehen.

[0062] Entscheidend ist, dass die gewünschte Metall-Sorte auf einer ausreichenden Kontaktfläche der jeweiligen Polarität zu liegen kommt. Die Überhänge bzw. Einschnürungen in den XCSEL-Profilen ermöglichen dies, ohne dass die aktiven Bereiche und Flächen der jeweils anderen Polarität durch Lithographieschritte mit Photolack abzudecken wären. Je nachdem, welche Metalle auf den p- bzw. n-dotierten Bereichen abgeschieden werden, entstehen ohmsche oder sperrende Seitenwandkontakte.

[0063] Der Wafer wird bei Vakuumabscheidung der Kontaktmetalle auf eine Kippvorrichtung montiert, die eine Einstellung des Winkels, mit dem die Waferoberfläche zur Quelle orientiert ist und auch seine Rotation ermöglicht. Ist der obere Teil zum Beispiel p-dotiert, werden in einem ersten Schritt die Metalle eines p-Kontaktes abgeschieden, während die Waferebene unter einem 90°-Winkel zur Quelle zeigt, die Metalle also genau senkrecht auf die Waferoberfläche auftreffen. Dies beschichtet alle von oben sichtbaren Flächen mit p-Metall. Die unten auf dem Substrat liegende Metallschicht hat eine Öffnung, die genau lotrecht unterhalb der am weitesten außen liegenden überstehenden Kante des XCSEL-Profiles beginnt. Für die Beschichtung mit dem n-Metall zur niederohmigen Kontaktierung des unteren, dem Substrat zugewandten n-Mesateils wird der Wafer nun genau so verkippt, dass die innere Kante dieser n-Metallschichten unmittelbar an der aktiven Zone entsteht. Die Position der inneren Kante ergibt sich aus der Projektion einer der überstehenden Kanten des XCSEL-Profiles unter dem gewählten Winkel auf die untere Seitenwand.

[0064] Der obere, dem Substrat abgewandte XCSEL-Teil kann je nach Ausgestaltung den vorbeschriebenen flachen Zylinder enthalten oder nicht. So ergeben sich entweder nur eine (vgl. Beispiel A) oder auch mehrere (Beispiele B, C) Kanten, die unter verschiedenen Kippwinkeln als Schattenmasken zur Kontaktkanten-Definition herangezogen werden können. Das n-Metall kommt außerdem oben auf den XCSELS und unten auf dem Substrat auf dem dort schon abgeschiedenen p-Metall zu liegen, ist in diesen Bereichen also nicht im Kontakt mit dem Halbleiter und daher elektrisch unwirksam.

[0065] Ist der obere Teil so ausgebildet, dass seine Flanken wie in Beispiel B einen leicht negativen Winkel aufweisen, so wird bei schräger Beschichtung das n-Metall auf den Flanken des p-Teils abgeschieden, was zu einem elektrisch sperrenden Kontakt führt, über den Wärme abfließen kann. Durch die Ausbildung einer Raumladungszone unterhalb der Kontaktfläche erfolgt hier zusätzlich eine feldbedingte Stromeschnürung der in diesem Fall durch die Mesoobenseite injizierten Ladungsträger (hier: Löcher).

[0066] In Beispiel C hat der obere Teil leicht positiv geneigte Flanken, die dann bei der ersten, senkrechten Beschichtung mit demjenigen Metall bedeckt werden, welches mit der Polarität des oberen Mesateils einen ohmschen Kontakt bilden. Damit besteht bei dieser Ausführungsform die Möglichkeit zur kavitätsnahen lateralen Strominjektion durch die Seitenwände für beide Ladungsträgersorten.

[0067] Dieses Verfahren funktioniert in der Praxis zuverlässig. Es sind jedoch auch Prozess-Sequenzen möglich, bei denen noch vor jeglicher Ätzung ein Metallkontakt mittels normalem Lift-off-Verfahren für die obere Mesa hergestellt wird. Dann lässt sich neben den Seitenwänden auch die gesamte Substratoberfläche mit demjenigen Metall beschichten, was zum Substrat einen ohmschen Kontakt herstellt. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn das Substrat nachfolgend nicht entfernt wird und zusätzlich für eine Strominjektion herangezogen werden soll.

[0068] Die vorstehend ebenfalls erwähnte, mögliche Verkürzung der Bragg-Spiegel kann wie folgt realisiert werden:

- Die Bragg-Spiegel bestehen aus ca. 25 bis 40 Paaren von Halbleiterschichten oberhalb und unterhalb der aktiven Zone bzw. der Kavität und sind jeweils insgesamt einige Mikrometer (ca. 3 bis 6 μm) dick. So viele Schichtenpaare sind in der Regel erforderlich, um die gewünschte hohe Gesamtreflektivität aus den Einzelreflektivitäten zwischen den Schichten zu bekommen. Die große Gesamtdicke dieser Schichtenstapel und insbesondere die Vielzahl von Grenzflächen zwischen den Schichten behindern jedoch den Strom- und Wärmefluss. Durch graduelle Übergänge zwischen den Schichten und partiell hohe Dotierung werden die Gesamtstapel ausreichend niederohmig.
- Diese Maßnahmen verringern jedoch die Einzelreflektivitäten zwischen den Schichten und erhöhen die Absorption, also die optischen Verluste im Spiegel. Insgesamt sind so für das Erreichen einer geforderten Gesamtreflektivität in der Regel eine höhere Zahl Spiegelpaare erforderlich, als es in einem Schichtenstapel der Fall ist, in den der Strom seitlich injiziert wird und dann vorwiegend lateral in nur wenigen kavitätsnahen Schichten fließt, der also keine Niederohmigkeit für senkrechten Stromfluß zu gewährleisten hat. Ein solcher Bragg-Spiegel kann weitestgehend undotiert sein, was die Effizienz des Lasers aufgrund geringerer

Absorption steigert. Weiterhin sind statt fließender Übergänge zwischen den Schichten nun abrupte Grenzen möglich.

- Der Indexkontrast zwischen den Spiegelschichten lässt sich erhöhen, da keine Rücksicht mehr auf Banddiskontinuitäten zu nehmen ist, solange das Material noch transparent für die Betriebswellenlänge ist. Das ist im AlGaAs Materialsystem gleichbedeutend mit stärkeren binären Anteilen der Schichten, was die thermische Leitfähigkeit des Materials stark verbessert, denn sie sinkt deutlich mit steigendem ternären Charakter. So betragen die thermischen Leitfähigkeiten ca.: 0.5 W/cm/K für GaAs und 0.8 W/cm/K für AlAs, jedoch nur 0.1 W/cm/K für $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$.
- Letztendlich bewirken geringere Absorption und höhere Einzelreflektivitäten neben einer gesteigerten Effizienz, dass die Bragg-Spiegel schon mit weniger Spiegelpaaren, d. h. bei geringerer Gesamtdicke, die geforderte hohe Gesamtreflektivität erreichen. Mit einer geringeren „Bauhöhe“ der beiden Spiegel ist auch der Weg für den Wärmeabfluss in vertikaler Richtung kürzer und die Kühlung der aktiven Schichten weiter verbessert.
- Ein weiterer Aspekt ist ein in longitudinaler (vertikaler) Richtung damit auch verringertes Modenvolumen. Damit verkürzt sich die Umlaufzeit im Resonator was ebenfalls zu höheren Modulationsgeschwindigkeiten beiträgt.
- Hat man in (nahezu) binären DBRs hohe Al-Anteile in den Schichten, werden diese gegebenenfalls lateral mitoxidiert, wodurch sich ein durch mehrere gestapelte Oxidblenden gegebener Trichter wie in [Fig. 3f](#), links ausbildet. So können die weiter entfernt von der Kavität in die Seitenwände injizierten Ladungsträger ebenfalls trichterförmig zur aktiven Zone fließen, was zu einer gleichmäßigeren lateralen Stromverteilung auf Höhe der aktiven Schichten beiträgt, somit Stromüberhöhungen am Aperturrand entgegenwirkt und vor allem bei höheren Strömen ein gleichmäßigeres Pumpen der aktiven Fläche ermöglicht. Diese Ausbildung der XCSEL-Form toleriert durch die seitlich weglaufenden Seitenwände auch Oxidationstiefen in den DBR-Schichten, die lateral weiter ausgedehnt sind als die Oxidblende auf Höhe der aktiven Schichten.
- Andererseits lässt sich die Oxidation von kavitätsfernen Spiegelschichten auch verhindern, indem ihre Stirnseiten wie in [Fig. 3f](#) rechts vor dem Oxidationsprozess durch eine Metallisierung verschlossen werden.

[0069] Die erfindungsgemäßen XCSEL ermöglichen eine laterale Strominjektion über Abschnitte der Seitenwände, ohne dabei auf dünne, lateral ausgedehnte Stromzufuhrschichten angewiesen zu sein. Das sich zur aktiven Zone hin verjüngende Profil zusammen mit einer Platzierung der Kontakte auf den Seitenwänden verkürzt die Stromflusspfade gegenüber bisherigen Lösungen für Intrakavitätskontakte deutlich.

[0070] Gleichzeitig kann durch das Einlegieren der Kontakte eine sehr hohe Dotierung der Seitenwände erfolgen, die sich auf kavitätsnahen Abschnitten so nah am Rand der Stromapertur befinden können, dass die Eindringtiefe der Kontakte den verbleibenden Anstand praktisch überbrücken kann, was für geringe Serienwiderstände sorgt.

[0071] Im Gegensatz zu lateral durchgehenden hochdotierten Gebieten führt sie jedoch nicht zu erhöhter Absorption, da die Dotierung dort wieder absinkt, wo das optische Feld im Resonator geführt wird. Die Eindringtiefe des Legierkontaktes ist so zu bemessen, dass innerhalb des aktiven Durchmessers die periodische Struktur des Schichtenaufbaus nicht zerstört wird.

[0072] Dieser Vorgang entspricht einer nachträglichen Dotierung von Gebieten unterhalb der Seitenwandoberfläche, wodurch zusätzlich zum longitudinal variierenden, epitaktischen Dotierprofil durch die nachfolgende Prozessierung auch ein lateral variierendes Dotierprofil entsteht. Alternativ bieten die erfindungsgemäßen XCSEL auch die Möglichkeit, ein lateral variierendes Dotierprofil durch Überwachsen in einem zweitem MBE-Schritt zu erzeugen, bei dem hochdotiertes Halbleitermaterial gezielt auf den Seitenwänden abgeschieden wird.

[0073] Somit können optischer Pfad und Strompfad zumindest in Teilen getrennt verlaufen, was nachteilige Effekte wie freie Ladungsträgerabsorption und Linienverbreiterung durch Modulation verringert.

[0074] Die erfindungsgemäß drastisch erhöhte Präzision der Strukturdefinition ohne manuelle Justageschritte rationalisiert die Herstellung durch Ausschluss von Fehlerquellen und ebnet den Weg für eine weitere Miniaturisierung der Bauelemente zur Steigerung der Modulationsraten und Integrationsdichten. Mit der erfindungsgemäßen Struktur lassen sich ganze Prozessschritte einsparen bzw. durch solche ersetzen, die sich in einem Produktionsumfeld leicht automatisieren lassen. Insbesondere die weitgehende Eliminierung zeitraubender (meist manueller) Kontaktlithographie verkürzt die Durchlaufzeiten der Wafer erheblich, spart Personal und schont das teure VCSEL-Wafermaterial, da in der Herstellung weniger mit ihm hantiert wird.

[0075] Zum Beispiel ist im konventionellen VCSEL-Design für jedes einzelne Strukturelement ein Lithographieschritt zur Definition der Geometrien erforderlich. Beim erfindungsgemäßen XCSEL lassen sich dagegen in einer geeigneten Produktionsanlage (nach Einbau fernbedienbarer Kippversteller) beide elektrischen Kontakte **6a**, **6b** (p- und n-seitig) sowie auch aufgedampfte n-seitige Wärmesenken **7a**, **7b** sequentiell ohne Vakuumunterbrechung, also praktisch in einem Schritt, herstellen. Die damit einhergehende Verkürzung von Entwicklungszeiten ist relevant speziell für die zunehmend wichtige Fähigkeit zur schnellen Anpassung bestehender Grunddesigns an spezifische Kundenwünsche. Weiterhin stellt die Kontaktolithographie, bei der die Wafer-Oberfläche gegen eine Glasscheibe gepresst wird, eine erhebliche Belastung speziell für VCSEL-Wafer wegen ihrer ausgeprägten Oberflächentopographie dar. Eine weitgehende Eliminierung solcher belastender Prozesse wird daher auch die Ausbeute erhöhen – also den Anteil vorgeschädigter Bauelemente verringern, die durch Burn-in-Tests aussortiert werden müssen.

Grober beispielhafter Vergleich der Prozesszeiten (lithography, evaporation, evacuation, LO = lift-off):

VCSEL:

p-Kontakt:	litho. 1 h; evap. 4 .. 6 evac. + 0.5 h process; LO 0.5 h
n-Kontakt:	litho. 1 h; evap. 4 .. 6 evac. + 0.5 h process; LO 0.5 h
[aufgedampfte Wärmesenke:	litho. 1 h; evap. 4 .. 6 h evac. + 0.5 h process; LO 0.5 h]

→ aber diese Wärmesenke ist hypothetisch, da praktisch unwirksam, weil viel zu weit weg von aktiver Zone
Summe = 18 .. 24 h [12 .. 16 h ohne Wärmesenke]

Erfindungsgemäßer XCSEL:

p-Kontakt:	evap. 4 .. 6 h evac. + 0.5 h process;
n-Kontakt:	+ 0.5 h process;
aufgedampfte Wärmesenke:	+ 0.5 h process

Summe: 5.5 .. 7.5 h [5 .. 7 h ohne Wärmesenke]

→ Selbst ohne Wärmesenke **7a**, **7b**, die beim erfindungsgemäßen XCSEL im Gegensatz zum VCSEL extrem effektiv ist, wird über die Hälfte der Prozesszeit eingespart, beim Vergleich mit Wärmesenke **7a**, **7b** über zwei Drittel. Natürlich sinkt auch der Energieaufwand entsprechend.

[0076] Ein weiterer Vorteil der erfindungsgemäßen XCSEL ist die präzise Kenntnis der Oxidationslänge. Bei konventionellen nassgeätzten VCSELn (**Fig. 1(a)**) liegt der Startpunkt der Oxidation in der Krümmung der flach auslaufenden p-Mesa. Wegen des Oberflächengradienten in diesem Bereich wirken sich schon geringe Schwankungen in der Ätztiefe drastisch auf den Außendurchmesser der Oxidationsschicht und damit die für einen bestimmten Zieldurchmesser der Stromapertur notwendige Oxidationslänge aus. Für viele moderne Anwendungen muss der aktive Durchmesser der Laser jedoch mit einer Genauigkeit im Sub-Mikrometer-Bereich bekannt sein. Wird er beim Oxidationsprozess nicht mit ausreichender Genauigkeit getroffen droht der Verlust ganzer Wafer, da keine nachträgliche Korrektur einer einmal erfolgten Oxidation möglich ist. Auch eine In-situ-Kontrolle in der mit Wasserdampf durchströmten Oxidationskammer wird in Produktionsanlagen, soweit bekannt, nicht eingesetzt, vor allem wohl wegen einer Störung des laminaren Gasflusses und der Temperaturverteilung durch die Optiken, welche die Homogenität der Oxidationsrate über die Waferoberfläche beeinträchtigen würde. Weiterhin ist wegen des flachen Auslaufens der Mesa der Außendurchmesser der Oxidationsschicht auch messtechnisch nicht zerstörungsfrei und hinreichend genau zu ermitteln. Eine heute verbreitete Lösung dieses generellen Problems besteht darin, die p-seitige Mesa durch einen Trockenätzprozess zu realisieren, was in Strukturen wie in **Fig. 1(b)** dargestellt resultiert. Ein genau eingestellter Trockenätzprozess hinterlässt senkrechte Mesawände, wodurch der Außendurchmesser gut bekannt ist. Allerdings ist der apparative Aufwand um ein Vielfaches höher als beim Nassätzen, und die Halbleiteroberfläche wird durch auftreffende Ionen geschädigt.

[0077] Beim erfindungsgemäßen XCSEL (**Fig. 3**) startet die Oxidation genau in der engsten Stelle E der Mesa. Der Startdurchmesser ist trotz Einsatzes eines kostengünstigen Nassätzprozesses scharf definiert. Er ergibt sich aus den vertikalen und lateralen Ätzraten der epitaktischen Schichten und ihrer individuellen Lage im vertikalen Schichtenaufbau. Im einfachsten Falle ist das Nassätzen, genau wie das Trockenätzen, ein zeitgestoppter Prozess. Beim Trockenätzen ist die Ätzrate durch die von vornherein wesentlich aufwändigere Apparatur jedoch unter Laborbedingungen meist besser kontrolliert. Unter Produktionsbedingungen lässt sich jedoch auch das Nassätzen genau kontrollieren (Zusammensetzung, Temperatur, Agitation, Alter der Ätze usw.),

ohne dass es seinen Kostenvorteil gegenüber dem Trockenätzen einbüßt. Im Gegensatz zum Trockenätzen, bei dem sich die Ätztiefe nur über aufwändige Laseroptiken in situ beobachten lässt, besteht beim Nassätzen sogar die Möglichkeit einer visuellen In-situ-Kontrolle mittels geeigneter Objektive, welche wegen der erfindungsgemäßen Geometrie im Falle der XCSEL schon genaue Rückschlüsse auf den Startdurchmesser der Oxidation zulässt, wobei sich hier wie beschrieben geringe Variationen in der Ätztiefe auch vergleichsweise wenig auf den Startdurchmesser auswirken. Da beim erfindungsgemäßen XCSEL die Oxidationsschicht **5** genau in der engsten Stelle der Mesa liegt, lässt sich der Startdurchmesser vor der Oxidation nochmals genau verifizieren. Nach erfolgter Oxidation sind dann sowohl Start- als auch Endpunkt des oxidierten Bereiches leicht durch Abbildung auf eine CCD-Kamera erkennbar, da sie in der Draufsicht mit keiner anderen Kante der Struktur zusammenfallen, wie es hingegen für trocken geätzte Mesen der Fall ist.

[0078] Wie ebenfalls aus [Fig. 3](#) ersichtlich, bietet die erfindungsgemäße Kontur der XCSEL weiterhin die Möglichkeit, dicke physikalisch (Aufdampfen) und/oder galvanisch aufgebraachte Wärmeableiter **7a**, **7b** mit solcher Präzision zu positionieren, dass sie, ähnlich wie auch der n-Kontakt **6a**, ohne darunterliegende, den Wärmefluss blockierende Passivierungsschicht bis in die unmittelbare Umgebung der aktiven Zone A reichen können. Hierfür findet die spezielle Lasergeometrie als eingebaute Lithographiemaske Verwendung, um die freiliegenden aktiven Schichten mit einer Manschette aus geeignetem Photolack schützend zu umschließen. Die Lackmanschetten-Form lässt sich sehr genau durch Anpassen der X-Mesa-Form, also durch die Wahl des Verhältnisses von schräg und vertikal verlaufenden Anteilen der Mesawand (vgl. hierzu die p-Mesa in [Fig. 3](#): im gezeigten Beispiel verlaufen ca. die unteren zwei Drittel der p-Mesa-Wand schräg, das obere Drittel vertikal), sowie über Lackdicke und Belichtungs-dosis einstellen. Dabei wird keine externe Lithographiemaske benötigt. Auch dieser Prozess geschieht also selbstjustiert sowie „berührungsfrei“, was, wie dargelegt, das Material schont.

[0079] Die so implementierten Wärmeableiter **7a**, **7b** kühlen den aktiven Bereich A mit bisher unerreichter Wirksamkeit, da sie die Wärme in Inneren des Resonators unmittelbar dort abholen, wo eine Kühlung direkt die intrinsischen, die Dynamik bestimmenden Größen beeinflusst. Die Wärme fließt innerhalb der Kavität E größtenteils lateral in Richtung erhöhter Wärmeleitfähigkeit der epitaktischen Schichtstruktur zur Spitze der metallenen Wärmeableiter. Der Weg dorthin kann aufgrund der besonderen Mesaform in Verbindung mit stark reduzierten Oxidationslängen extrem kurz sein und muss nicht erst in vertikaler Richtung über Heterobarrieren mit ihrer reduzierten Wärmeleitfähigkeit führen. Je nach XCSEL-Dimensionierung kann die Spitze dieser „Kühlsonden“ bis auf die Seitenwand der inneren Kavität reichen und damit nur wenige einzelne Mikrometer vom Rand der Stromapertur entfernt sein. Dennoch befindet sich das Metall ohne blockierende Passivierungs-Zwischenschichten auf den Seitenwänden in direktem Kontakt zum Halbleiter, was den Wärmeaustausch über diese Grenzfläche hinweg stark erhöht.

[0080] Zum Beispiel erreichen Datenübertragungs-VCSEL die gewünschten hohen Modulationsgeschwindigkeiten sowie flachen Verläufe der Übertragungsfunktionen bei ausreichendem Signalhub generell erst bei hohen Pumpströmen verbunden mit guter Abfuhr der Verlustwärme. Wie erwähnt verringert eine direkte Ableitung der Verlustwärme aus der aktiven Zone die Betriebstemperatur unmittelbar dort, wo temperaturabhängige Größen direkten Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften der Laser haben. Die erfindungsgemäße Technologie erlaubt hierbei ausreichend dicke, extrem nah an die aktive Zone herangeführte Wärmeableiter **7**, ohne dass diese im Gegenzug jedoch dominierende parasitäre Kapazitäten erzeugen würden, die den durch eine direkte Kühlung der inneren elektro-optischen Prozesse erzielten dynamischen Vorteil durch das zusätzliche Einbringen parasitärer extrinsischer Kapazitäten wieder zunichtemachen würden: In konventioneller Technologie beinhalteten ausreichend dicke Metallschichten, die sich nah genug an der aktiven Zone befinden, um thermisch wirksam zu sein, immer den Einbau großer geometrischer Kapazitäten, die die Hochfrequenz-Modulierbarkeit der Laser stark beeinträchtigen. Die erfindungsgemäßen XCSEL erlauben hingegen die Implementierung von Kühlstrukturen, welche keine der Modulierbarkeit zuwiderlaufenden Kapazitäten hervorrufen, was in Datenübertragungstests bestätigt wurde.

[0081] Im Einzelnen ergibt sich somit für die erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Halbleiterlaser im Vergleich zum Stand der Technik Folgendes:

- 1) Konventionelle nasschemische geätzte VCSEL nach dem Stand der Technik (**Fig. 1(a)**):
 - Mittlerer Herstellungsaufwand, schlechteste Leistung.
 - Lange Prozesszeiten und viele Prozessschritte.
 - Jedes Element muss einzeln manuell justiert werden, nötige Toleranzen verhindern eine effiziente Miniatürisierung.
 - Große und schlecht definierte Oxidationslängen; schlecht reproduzierbare aktive Durchmesser; große parasitäre Kapazitäten und geringe Modulationsgeschwindigkeiten.

- Keine einfach integrierbaren und effizienten Kühlstrukturen.
- 2) Konventionelle trocken-geätzte VCSEL (vgl. **Fig. 1(b)**):
 - Hohe Kosten, verbesserte Leistung gegenüber 1).
 - Teures Trockenätzen, daher etwas kürzere und besser definierte Oxidationslänge.
 - Bestenfalls ist nur der p-Kontakt selbstjustiert zur p-Mesa mit aktiver Zone.
 - Sonstige Nachteile, wie unter 1) aufgeführt.
- 3) Erfindungsgemäße XCSEL (**Fig. 3**):
 - Geringste Kosten.
 - Beste Leistung.
 - Vollständig selbstjustiert und nur nasschemisch geätzt.
 - Reduzierte parasitäre Kapazitäten, verringerte Streuverluste und überlegenes thermisches Management.

[0082] **Fig. 4** zeigt nun einen Ausschnitt aus einer erfindungsgemäßen Anordnung einer Vielzahl von oberflächenemittierenden Halbleiterlasern, welche wie vorbeschrieben erfindungsgemäß ausgebildet sind. Die einzelnen Halbleiterlaser (hier ist lediglich einer davon gezeigt) sind dabei in Form einer zweidimensionalen Matrix auf bzw. an einer Substratbasis angeordnet, welche eine Vielzahl von (den einzelnen Lasern zugeordneten) Substratbasisabschnitten **1** aufweist, welche jeweils eine dreidimensionale Formgestaltung, wie sie in **Fig. 4** gezeigt ist, aufweisen.

[0083] Die grundlegende Ausgestaltung des in **Fig. 4** gezeigten einzelnen oberflächenemittierenden Halbleiterlasers (mit den Elementen **1** bis **7**) ist wie diejenige zu **Fig. 3** beschriebene. Im vorliegenden Fall ist jedoch der Träger **1** bzw. der Substratbasisabschnitt **1** in Form einer hier passivierenden Polymerschicht (wie z. B. Polyimid oder BCB) dergestalt räumlich ausgebildet, dass die Mesa M des gezeigten Halbleiterlasers im Bereich ihrer Einschnürung E formschlüssig vom gezeigten Substratbasisabschnitt **1** eingefasst ist. Dieser (tragende) Substratbasisabschnitt ist nicht mit dem (siehe nachfolgend zu **Fig. 4b**) hier bis auf ggf. noch vorhandene Reststrukturen **13a**, **13b** entfernten Halbleitersubstrat zu verwechseln. Es ergibt sich somit eine Fassung, bei dem das gezeigte Halbleiterlaserelement freischwebend eingefasst ist, ohne dass auf dessen Ober- oder Unterseite (also den dem aktiven Bereich **3** abgewandten Oberflächen des ersten und des zweiten Dotierbereiches **2**, **4**) unterstützende Substratabschnitte bzw. -strukturen notwendig wären. Es ist jedoch auch möglich (hier in zwei Variationen **13a**, **13b** gestrichelt eingezeichnet) beispielsweise auf der dem aktiven Bereich **3** abgewandten Außenseite des n-dotierten Bereiches **2** entsprechende Stützstrukturen **13a**, **13b** aus einem weiteren Substratmaterial (hier: Halbleitermaterial wie z. B. Si) vorzusehen bzw. die besagte Oberfläche in Teilbereichen mittels übrig gebliebener Substratabschnitten aus einem Halbleitermaterial entsprechend zu unterstützen. Eine detailliertere Analyse des gezeigten Falles zeigt, dass im vorliegenden Beispiel der Substratbasisabschnitt **1** zusammen mit dem ersten Seitenwandwärmeableiter **7a** und zusammen mit dem ersten Seitenwandmetallkontakt **6a** so ausgeformt ist, dass die beschriebene formschlüssige Einfassung des Halbleiterlaserelementes bzw. dessen Mesa M auf Höhe der Einschnürung E erfolgt.

[0084] Erfindungsgemäß sind jedoch der Substratbasisabschnitt **1** und der Seitenwandmetallkontakt/Seitenwandwärmeableiter **6a**, **7a** nicht nur zur Einfassung des Halbleiterlasers ausgeformt, sondern bilden im Bereich der Einfassung des Halbleiterlaserelementes bzw. konzentrisch drumherum zusätzlich durch ihre gezeigte Ausformung eine mechanische Führungsstruktur F aus: Diese Führungsstruktur wird dadurch ausgebildet, dass um die Lasereinfassung herum eine badewannenförmige Vertiefung der Elemente **1**, **6**, **7** ausgebildet ist. Diese Vertiefung ist so ausgebildet, dass ein optisches Element, hier eine Faser **8** eines Glasfaserbündels, selbstzentrierend bzw. selbstzentriert (in Bezug auf den Laser gesehen) in die mechanische Führungsstruktur F einführbar und dort (beispielsweise mit einer entsprechenden transparenten Kleberschicht) fixierbar ist. Nach Fixierung der Faser **8** ist diese Faser in Bezug auf den Laser nicht nur zentriert, sondern mit seiner dem Laser zugewandten, stirnseitigen Endfläche auch beabstandet von der Emissionsseite des Lasers (Oberfläche des n-dotierten Abschnittes, hier gekennzeichnet durch die Photonenstrahlungsenergie $h \cdot \nu$) angeordnet. Die scheinbar mögliche Verkippung der Faser in der Führungsstruktur (Winkelfehler) wird verhindert, indem es sich ja eigentlich um eine Matrix solcher Elemente handelt, die ausreichend starr miteinander verbunden sind. Damit steht das Array optischer Elemente sozusagen auf vielen Beinen und kann nicht verkippen. Die Faserführung kann jedoch auch andere Geometrien aufweisen, insbesondere auch steile Wände so ähnlich wie die Durchkontaktierungsmesa (sie kann auch trocken-geätzt sein, obwohl nasschemisch aus Kostengründen vorzuziehen ist). Weiterhin lässt sich die flache Unterseite eines optischen Elements auch flach aufsetzen und so gleichzeitig zur Ausrichtung in der Ebene (xy-Ebene bzw. senkrecht zur Papierebene und zur Laseremissionsrichtung) auch ein Winkelfehler (eine Verkippung) schon bei einem Einzelbauelement vermeiden.

[0085] Durch die mechanische Führungsstruktur F ergibt sich somit zwischen dem Halbleiterlaser bzw. dessen Mesa M und dem stirnseitigen Ende des optischen Elementes **8** ein Zwischenraum Z. Dieser Zwischen-

raum kann zur optischen Ankopplung mit einem transparenten Material gefüllt werden. Es ist alternativ jedoch auch möglich, die Führungsstruktur F (beispielsweise durch geeignete Zu- und Abflusselemente) so auszugestalten, dass durch den Zwischenbereich Z ein transparentes, gasförmiges oder flüssiges Medium (im einfachsten Falle N oder deionisiertes Wasser) hindurchleitbar ist, welches für einen Abtransport der erzeugten Wärme und für eine entsprechende optische Ankopplung sorgt.

[0086] Alternativ oder kumulativ hierzu ist es ebenso möglich, dass in dem optischen Element (hier in der Faser **8**) Kanäle **14** vorgesehen werden, über die gezielt das Einströmen eines Kühlmediums (Kühlflüssigkeit oder -gas) in den Zwischenraum Z möglich ist (die in die Faser **8** eingebrachten Kanäle verlaufen hier parallel zu deren Symmetrieachse bzw. Längsachse, jedoch können dies genauso auch längs zwischen den einzelnen Multimode-Fasern im Faserbündel verlaufende Kanäle sein. Das kühlende Medium trifft dann mit einem lateralen Versatz zu den Lasern auf, der für die beschriebene Brechungsindex-Anpassung Platz lässt. Weiterhin lässt sich auch ein Kreislauf erzeugen, also verschiedene Teilmengen der Kanäle als Zu- bzw. Abflüsse betreiben).

[0087] Eingefasst wird der erfindungsgemäße XCSEL der [Fig. 4](#) somit nur von den Metallschichten des substratseitigen Seitenwand-Kontaktes und -Wärmeableiters (Bezugszeichen **7a**) und einer Polymerschicht wie Polyimide oder BCB (Bezugszeichen **1**). Wie [Fig. 4b](#) noch erläutert, liegt das Halbleitersubstrat **13** (was dem Substrat **1** der [Fig. 3](#) entspricht) vor seiner Entfernung im Falle der Flip-Chip Integration in [Fig. 4](#) oben (siehe Reste **13a**, **13b**). Der XCSEL aus [Fig. 3](#) steht in [Fig. 4](#) also auf dem Kopf. Die Polymerschicht **1** in [Fig. 4](#) ist dagegen in [Fig. 3](#) nicht vorhanden, da hier nur die eigentlichen Laser gezeigt sind, noch bevor jegliches Packaging stattfindet.

[0088] Weiterhin wurde das Halbleitersubstrat **13** in [Fig. 4](#) (bis auf die optionalen Reste **13a**, **13b**) entfernt, und zwar zur Freilegung der mechanischen Führungen F für optische Elemente und auch weil es für häufig verwendete Wellenlängen gar nicht transparent ist. Nach der Substratentfernung bleibt wie in [Fig. 4](#) dargestellt eine freistehende Struktur **1**, **7a** zurück, die so ausreichend stabil ist. Bei industriellen Anwendungen wird der Zwischenraum für zusätzliche Stabilität meist durch einen Underfill UD gefüllt.

[0089] [Fig. 4b](#) zeigt einen Zwischenschritt, der die Entstehung des XCSEL von [Fig. 4](#) verdeutlicht. Dargestellt ist in [Fig. 4b](#), wie die Waferoberfläche über den eigentlichen XCSEL in [Fig. 3](#) hinausgehend weiter ausgeformt wird zur Erzeugung zusätzlicher Profile, die dann von den nachfolgend aufgebrachtten Schichten (Seitenwandkontakt, -wärmeableiter und nachfolgend auch der hier noch nicht gezeigten Polymerschicht) abgeformt werden. Nach der Flip-Chip-Lötung zeigt das Substrat **13** nach oben und wird entfernt, wodurch nun in diesen Schichten jeweils die Gegenstücke der zuerst ins Substrat geätzten Profile zum Vorschein kommen. Im Falle der mechanischen Führung für die optische Ankopplung entsteht so erst die gewünschte Form, nämlich gewissermaßen das Negativ der ursprünglichen Erhebung im Substrat. Dagegen wird bei der Durchkontaktierungsmesa die entstandene Form in den aufgebrachtten Schichten zwar ebenfalls bei der Substratentfernung ausgehöhlt (ganz oder teilweise), jedoch spielt dies funktionell keine Rolle.

[0090] Die Vorgehensweise lässt sich folgendermaßen grob gliedern:

1. Erzeugung dreidimensionaler Profile in der Waferoberfläche **13**
2. Beschichtung/Abformung dieser Profile
3. (Flip-Chip)-Lötung mit der beschichteten Epitaxieseite kopfüber auf ein Trägersubstrat
4. Entfernung des XCSEL-Substrats **13** und damit Freilegung der Führungsstrukturen

(Eine mechanische Stabilisierung der ansonsten freistehenden Schichten kann wie üblich durch Füllung des Freiraumes zwischen den Lötverbindungen mit einem Underfill UD erfolgen.)

[0091] Wie im linken unteren Bildbereich der [Fig. 4](#) gezeigt, ist der Halbleiterlaser bzw. dessen Mesa M (über den p-seitigen Seitenwandmetallkontakt **6b** und den darauf angeordneten Seitenwandwärmeableiter **7b**) durch Einbettung in eine Lotverbindung oder Lotkugel **9** (nachfolgend alternativ auch als Bondpad **9** bezeichnet) mit einem Flip-Chip-Träger **12** mit elektrischen Zuleitungen und ggf. integrierter Elektronik (hier z. B. ein CMOS-Chip) kontaktiert. Dies ist hier dadurch realisiert, dass die näherungsweise ellipsoidförmige Lotverbindung **9** die Elemente **4**, **6b** und **7b** umschließt.

[0092] Wie [Fig. 4](#) weiter zeigt, ist seitlich beabstandet von dem Einfassungsbereich E für den Laser bzw. der mechanischen Führungsstruktur F für das Glasfaserbündel **8** eine elektrische Durchkontaktierung **10** in dem gezeigten Substratbasisabschnitt **1** ausgebildet. Wie nachfolgend noch näher beschrieben wird, ist diese Durchkontaktierung **10** hier in Form einer Durchkontaktierungsmesa, also einer Auswölbung des n-seiten Sei-

tenwandmetallkontaktes **6a**, des zugehörigen Seitenwandwärmeableiters **7a** sowie des Substratbasisabschnittes **1** hin zum CMOS-Chip **12** ausgebildet. Die Durchkontaktierungsmesa ist hierbei mit dem Bezugszeichen DM versehen. Wie nachfolgend ebenfalls noch näher beschrieben wird, ist der Auswölbungsabschnitt bzw. der hervorstehende Abschnitt der Durchkontaktierungsmesa DM in eine im Wesentlichen ellipsoidförmige Durchkontaktierungsplotverbindung **11** (nachfolgend auch als Durchgangskontaktierungsbondpad **11** bezeichnet) integriert bzw. wird von Letzterer umschlossen (diese ist wie die Verbindung **9** aus einem Lötmaterial ausgebildet). Wie [Fig. 4](#) zeigt, ist die Durchkontaktierungsplotverbindung **11** dann mit dem CMOS-Chip **12** kontaktiert.

[0093] Nach der oben beschriebenen Ausprozessierung weist die elektrische Durchkontaktierung **10** somit von Richtung der Emissionsseite (n-Seite) hin zur p-Seite gesehen die folgende Schichtenfolge, bei der die einzelnen Schichten jeweils in Form von übereinander und angrenzend aneinander angeordneten Aussackungen bzw. Auswölbungen (zur p-Seite hin) ausgebildet sind, auf: Metallisierungskontaktschicht **6a'**, Wärmeableitungsschicht **7a'** und mit dem Bondpad **11** unmittelbar in Kontakt stehende Wärmeableitung **7b'**. Im Flankenbereich der Auswölbung ist hierbei zwischen der Schicht **7a'** und der Schicht **7b'** der stabilisierende Substratabschnitt **1'** ausgebildet. Das Element **7b'** ist hier in erster Linie ein nicht-ebenes Bondpad, das natürlich auch mit zur Wärmeableitung beiträgt, jedoch nicht mehr so stark, da es durch eine größere gekühlte Fläche vom Laser getrennt ist.

[0094] [Fig. 4](#) zeigt somit als schematischen Querschnitt eine einzelne Zelle eines flip-chip-integrierten XCSEL-Arrays gemäß der vorliegenden Erfindung mit einer Umhüllung **7b** der Anodenseite (p-Seite) durch wärmeableitendes Metall, welches direkt in die Lotverbindung **9** übergeht, mit einem kavitätsnahen (im Bereich E angeordneten) und auf der optisch angebundenen Seite herausgeführten Seitenwandwärmeableiter **7a**, mit einer integrierten Faserführung F mit optionaler Einleitung und/oder Ausleitung (z. B. auch in Form eines Kreislaufs) **14** von Kühlgas und, wie nachfolgend beschrieben, mit einer Brechungsindexanpassung im Zwischenraum Z sowie mit einer erfindungsgemäßen Durchkontaktierung **10**, DM für das Kathodenpotential (n-Seite).

[0095] [Fig. 5](#) zeigt eine Vergrößerung aus [Fig. 4](#): Diese dient der Darstellung der im flip-chip-integrierten erfindungsgemäßen XCSEL-Design bereitgestellten Wärmeflusspfade (gestrichelt eingezeichnet). Wie zu sehen ist, erfolgt ein Wärmeabfluss der vom Halbleiterlaserelement erzeugten Wärme sowohl über die Lotverbindung **9** als auch über die im Einschnittsbereich E ausgebildete Tragestruktur **1**, **6a**, **7a**, welche den Seitenwandwärmeableiter **7a** aufweist. Besonders wirksam ist hier der extrem kurze Pfad vom Stromapertur-Rand im aktiven Bereich **3** in die Spitze der n-seitigen Kühlsonden bzw. Seitenwandwärmeableiter **7a** und dann weiter auf die optische Seite.

[0096] [Fig. 4](#) zeigt somit, wie für den speziellen Anwendungsfall der Flip-Chip-Integration von VCSEL-Arrays mit Treiberelektronik die erfindungsgemäße Struktur der XCSEL erfindungsgemäß weiter ausgebaut wurde. Der schon dargelegte Paradigmenwechsel in der Bauelement-Herstellung führt hier zu einer Reihe weiterer wesentlicher Neuerungen. In der seit über zehn Jahren etablierten konventionellen Herangehensweise wurden die stark ausgeprägten vertikalen Profile auf der Waferoberfläche, wie sie solchen VCSELn eigen sind ([Fig. 1](#)), als notwendiges Übel betrachtet und dementsprechend angestrebt, sie möglichst klein zu halten sowie die unvermeidlichen verbleibenden Topographien nach ihrer Entstehung wieder zu planarisieren. Ein Beispiel einer solchen konventionellen umfassenden Planarisierung durch mehrere zusätzliche Metallisierungs- und Passivierungsebenen ist in [Fig. 2](#) dargestellt. Planarisierung und Einbettung in flip-chip-kontaktierbare Strukturen erfordern hier im Vergleich zur Herstellung des eigentlichen Lasers überproportional hohen Prozessieraufwand. Hierbei ist etwa jede organische Schicht einzeln für mehrere Stunden bei Temperaturen bis zu 350°C auszubacken. Außerdem ist die verwendete Technologie anfällig gegenüber Prozessschwankungen und der Justagesorgfalt des Personals, so dass sie wenig geeignet für ein Produktionsumfeld ist.

[0097] Die den erfindungsgemäßen XCSELn zugrunde liegende Technologie folgt einem anderen Denkmuster, indem sie sich einer bewussten Modellierung der Wafertopographie bedient. Die Prozessierung beginnt hier mit der dreidimensionalen Ausformung der Wafer-Oberfläche durch eine Folge von Nassätzprozessen. So werden zu Beginn der Prozessierung stark ausgeprägte vertikale Profile komplexer Struktur im Wafermaterial gebildet, wovon Teile später formgebend sind für neue Elemente, die bisher nicht sonnvoll realisierbar waren. Die in der Flip-Chip-Integration von VCSEL-Arrays mit Elektronik aufgrund existierender Standards dominierende Technik substratseitig emittierender und substrat-entfernter VCSEL bekommt durch die Einführung der XCSEL einen wesentlichen Entwicklungsschub. Damit wird es erstmals möglich, die Verlustwärme, die wie beschrieben durch die Seitenwand-Wärmeableiter **7** aus der unmittelbaren Umgebung der aktiven Zone extrahiert wird, wie aus [Fig. 4](#) ersichtlich unter thermischer Überbrückung des kathodenseitigen Bragg-Spiegels **2** direkt auf die optisch angebundene Rückseite der Laser zu leiten. Diese Seite ist besonders gut kühlbar, da

sei von der elektrisch angeordneten Seite abgewandt ist, welche zusätzlich durch die wärmeproduzierende Treiberelektronik aufgeheizt wird.

[0098] Möglich wird dies durch Eliminierung durchgehender Epitaxieschichten, die bisher emissionsseitig für den lateralen Stromtransport zwischen seitlich versetztem Lötkontakt und dem VCSEL sorgte und als Teil des optischen Pfades (vgl. [Fig. 2](#)), die bisher als kathodenseitige Kontaktschicht für den lateralen Stromtransport sorgte und als Teil des optischen Pfades auch für zusätzliche Absorptionsverluste verantwortlich war. Beim erfindungsgemäßen XCSEL geschieht die kathodenseitige elektrische Kontaktierung – genau wie auch die thermische Kontaktierung – in erster Linie auf den schräg verlaufenden Flanken der Laser, wodurch keine lateral über den größten Durchmesser der VCSEL-Mesa hinausgehenden Stromzufuhrschichten erforderlich sind, die den Wärmefluss hin zur optisch angeordneten Seite behindern würden.

[0099] Als weiterer erfindungsgemäßer Aspekt lassen sich die neuen Wärmeableiter **7** gleich zu integrierten mechanischen Führungen **F** für die selbstjustierte optische Anbindung an Glasfasern oder Mikrolinsen-Arrays auf der Rückseite ausformen. Die Herstellung dieser Führungen ist in der neuen Technologie ebenfalls selbstjustiert möglich, ohne dass hierfür etwa manuell justierte Durchlicht-Lithographie erforderlich wäre. Die Strukturierung der Faserführungen **F** geschieht auf Waferebene schon von der Wafervorderseite aus in Kombination mit den ohnehin durchgeführten Oberflächenätzungen für die Laser. Sie hat also nur sehr geringen Mehraufwand zur Folge. Die Führungen werden beim Entfernen des Substrats von der Rückseite (Emissionsseite) aus freigelegt und garantieren dann ein problemloses und beispielsweise für jede einzelne Faser eines passenden Faserbündels individuell genau justiertes Andocken an die Laser. Das aufgelötete XCSEL-Array ist hierzu wie üblich erst mechanisch durch Unterfütterung mit einem geeigneten Underfill zu stabilisieren. Der Vorteil dieser Faserführungen für das gesamte System der parallel-optischen Datenverbindung besteht in reproduzierbaren und gleichmäßigen Koppel-effizienzen für alle Laser-Glasfaser/Linsen-Paare.

[0100] Weiterhin werden teure externe Justagestrukturen wie extra gefertigte passgenaue Pins auf den Ansteuerplatinen sowie personal- und zeitintensives Ausrichten der Systemkomponenten zueinander überflüssig. Bei einem akzeptablen lateralen Versatz von höchstens $\pm 15 \mu\text{m}$ bei Einkopplung in Multimode-Fasern mit $50 \mu\text{m}$ Kerndurchmesser würden die Anforderungen an die Maßhaltigkeit externer Justagestrukturen die normalen Fertigungstoleranzen von Leiterplatten in der Größenordnung von $\pm 50 \dots 100 \mu\text{m}$ bei weitem übersteigen und deshalb die Kosten in die Höhe treiben. Damit ist es nun möglich, nicht nur wie in herkömmlichen Sendemodulen die Faserbündel oder Mikrolinsen-Arrays in ihrer Gesamtheit global zum VCSEL-Array zu justieren, sondern individuell die paarweise Ausrichtung jedes Lasers eines VCSEL-Arrays zum korrespondierenden Element eines Arrays aus beispielsweise Fasern oder Linsen simultan zu bewältigen, ganz ähnlich wie auch auf der elektrisch angeordneten Seite alle Kontakte in einem einzigen Aufschmelz-Lötvorgang simultan hergestellt und durch automatisches Einschwimmen ausgerichtet werden. Die in [Fig. 4](#) gezeigte Ausführungsform der XCSEL bringen in jedes einzelne Bauelement direkt integrierte Justageeinrichtungen **F** mit, die eine simultane Prozessierung identischer Elemente als Vorteil der Array Technik auch auf die individuelle Ausrichtung und Ankopplung optischer Elemente an die Laser ausdehnt.

[0101] Die integrierten Führungsstrukturen **F** bewirken einen sehr genau bekannten und vor allem auch stabilen vertikalen (axialen) Abstand zwischen Laser-Auskoppelfacette und Faserendfläche. Der in [Fig. 4](#) erkennbare Zwischenraum **Z** zwischen VCSEL und Faser lässt sich nun mit Material zur Brechungsindexanpassung füllen. Dies kann gleichzeitig ein die Fasern fixierender, für die Betriebswellenlänge transparenter Kleber sein. Im Idealfall ist sein Brechungsindex an die Breite des Zwischenraums angepasst. Rückreflexionen von der Faserendfläche in den Laser hinein, die das dynamische Verhalten der Bauelemente empfindlich beeinträchtigen können, werden somit im Wesentlichen unterbunden. In einer anderen Ausführungsform wird der Kleber hingegen nur lokal an den Auflagepunkten der Fasern **8** angebracht. Die nun verbleibende Kavität **Z** kann dann zur weiteren Kühlung der VCSEL ausgenutzt werden. Es ist sogar denkbar, statt zweidimensionaler Bündel aus regulären Multimodefasern hierfür Bündel aus geeigneten Photonischen-Kristall-Fasern (Photonic Crystal Fibers, Holey Fibers) zu verwenden, wobei sich die längs durchgehenden Öffnungen in solchen Fasern bei ausreichender Größe für das gezielte Einströmen eines gasförmigen Kühlmediums, zum Beispiel gekühltes N_2 , einsetzen lassen. In einem einfacheren und womöglich kostengünstigeren Fall können längs zwischen den einzelnen Multimodefasern im Faserbündel verlaufende Öffnungen **14** für das Einströmen genutzt werden. Das kühlende Medium wird dann mit einem leichten lateralen Versatz zu den aktiven Bauelementen auftreffen, der für die beschriebene Brechungsindex-Anpassung Platz lässt.

[0102] Ebenfalls im Zuge der anfänglichen dreidimensionalen Formung der Waferoberfläche durch nasschemisches Ätzen werden, ähnlich effizient wie die Faserführungen, gleich auch Mesen **DM** zur kathodenseitigen Durchkontaktierung **10** des Flip-Chip-Kontaktes aus Metall gebildet. Diese ersetzen die bisher allgemein an-

gewandte – aber stark problembehaftete – Technik der Polymer-Sackloch-Galvanisierung. Diese herkömmliche Technik erfordert mehrere Kontaktlithographieschritte. Genau so erfordert auch die alternative Verwendung von Dummy-VCSEL-Mesen deren gesonderte Behandlung bei Abscheideprozessen, was mehrere zusätzliche Kontaktlithographieschritte nach sich zieht. Außerdem verhindern häufig schon geringste Lithographieprobleme sowie auch während der zwingenden Hochtemperaturbehandlung des Polymers stattfindende Diffusionsprozesse in der Metallisierung mit anschließender Oxidation unbekannter Spezies an der freiliegenden Oberfläche ein homogenes und reproduzierbares Galvanisieren in allen, über den gesamten Wafer verteilten Polymer-Öffnungen. Prinzipiell ist auch ein Polymer-Sackloch eine schlecht durch Galvanik abzudichtende Geometrie. Da die Galvanik nicht auf dem inerten Polymer abscheiden kann, entsteht generell keine innige Verbindung der Metallsäule mit den aus Polymer bestehenden, mehrere μm hohen Flanken der Öffnung. Nach ihrer Füllung mit Metall bleibt daher auch kein wirklich ebener Abschluss zurück, sondern eher eine zerklüftete Oberfläche. Gerade für eine Aufschmelzlötung, wie sie beim Flip-Chip-Bonden eingesetzt wird, sind gut abgedichtete Übergänge zwischen den Metallisierungsebenen jedoch sehr wünschenswert.

[0103] Dagegen hat die erfindungsgemäße, auf der bewussten Waferoberflächen-Modellierung basierende Technologie wiederum sowohl herstellungsspezifische Vorteile als auch eine den eben beschriebenen konventionellen Strukturen überlegene Funktion. Eine im Zuge der anfänglichen Waferoberflächen-Modellierung geätzte Säule **1'** im Halbleitermaterial **1** (ca. 20 μm hoch mit 5 μm breitem Plateau, vgl. auch [Fig. 4b](#)) wird im weiteren Verlauf der Prozessierung bei jedem Metallisierungsprozess einfach gleichmäßig mitbeschichtet (Abschnitte **6a'**, **7a'** der Elemente **6a**, **7a**). Hierfür sind keine weiteren Vorkehrungen notwendig, die gewollten Strukturen **6a'**, **7a'** entstehen durch die bloße Existenz der Säulen **1'** selbst. Nachdem die XCSEL fertig prozessiert sind, werden sie zusammen mit den nun mehrfach metallisierten Säulen **1'**, **6a'**, **7a'** in eine einzige Schicht unstrukturierten Polymers (Element **1** in [Fig. 4](#)) eingegossen. Das anschließende Ausbacken erfolgt unter vollständigem Luftabschluss der Waferoberfläche durch das Polymer. Abschließend wird die Polymerschicht in einem kurzen Plasmaschritt gleichmäßig rückgeätzt. Danach liegen sowohl die mit Metall umhüllten Anoden **4** der erfindungsgemäßen XCSEL als auch die Durchkontaktierungen **10** der Kathodenseite frei, wobei sich durch die Konturen auf der Waferoberfläche sowie das Fließverhalten des aufgeschleuderten Polymers die in [Fig. 4](#) angedeuteten Oberflächenprofile ausgebildet haben. Die ursprünglich für die Durchkontaktierung formgebende Mesa aus Halbleitermaterial wird beim abschließenden Entfernen des Substrats in flip-chip-geötetem Zustand aus der durch die Metallschichten gebildeten Vertiefung herausgeätzt.

[0104] Diese Art der Durchkontaktierung **10** verzichtet völlig auf eine separate metallische Füllung. Die Übergänge zwischen den beteiligten Strukturelementen sind geometrisch fließend, ohne scharfe Winkel wie die konventionelle Sacklochstruktur aufzuweisen. Zudem haften alle verwendeten Materialien innig aufeinander. Im Ergebnis entsteht also eine von einem Bondpad einfach zu versiegelnde glatte Oberfläche. Im Gegensatz zu den ebenen Bondpads, wie sie sonst allgemein üblich sind, bildet diese Durchkontaktierung eine Erhebung DM, die von der Lotkugel **11** umschlossen wird, was der Stabilität der Lotverbindung zugute kommt.

[0105] Auch hier sind die strukturellen Diskontinuitäten im Vergleich zur herkömmlichen Verbindung nach dem Stand der Technik verringert, da die ansteigenden Flanken der Lotbrücke (vgl. Element **11** in [Fig. 4](#)) auf ebenfalls ansteigende Flanken des Bondpads treffen können (nicht explizit aus [Fig. 4](#) ersichtlich). Das führt zu vergleichsweise räumlich ausgeglichenen Kraftflüssen innerhalb der Struktur ohne wesentliche lokale Überhöhungen und plötzliche Richtungswechsel angreifender Kräfte. In der Folge verlängert dies die Modul-Lebensdauern, da sich Stellen mit solchen strukturellen Diskontinuitäten in Lebensdauertests (wiederholtes Durchlaufen von Temperaturzyklen) typischerweise als Ausgangspunkt für die Entstehung von Rissen erweisen. Weiterhin hat, zusätzlich zum üblichen Kontakt durch Interdiffusion der Materialien beim Löten, die so entstehende Lotverbindung auch eine formschlüssige Komponente, da die Lotkugel den Bondpad-Höcker umschließt. Dies macht die entstehende Lotverbindung nochmals stabiler als im herkömmlichen Fall, in dem die Lotkugel nur flach auf einem ebenen Bondpad aufliegt.

[0106] Gleichermaßen wird auch der anodenseitige Bragg-Spiegel **4** des XCSEL selbst von der entsprechenden Lotkugel **9** umschlossen. Bei geringem Wärmeeintrag durch die Elektronik kann demnach ein substantieller Teil der Abwärme wie in [Fig. 5](#) angedeutet auch über diesen Kanal fließen.

[0107] Nachdem das erfindungsgemäße Design also keine plane Oberfläche besitzt, findet obendrein eine selbstplanarisierende Flip-Chip-Technologie Verwendung, bei der variierende Lotkugelgrößen die Überbrückung aller Höhenunterschiede übernehmen.

[0108] Beim Flip-Chip XCSEL nach [Fig. 4](#) bietet die neue Herangehensweise, bei der die Waferoberfläche ohnehin schon speziell dreidimensional ausgeformt wird, zusätzlich die Möglichkeit, auch Mesen für die Durch-

kontaktierungen (10 in [Fig. 4](#)) und zur Formung von mechanischen Faserführungen (F in [Fig. 4](#)) ohne wesentlichen Mehraufwand gleich mit herzustellen. Das sind Elemente, die nicht direkt auf die X-Form als Werkzeug zur Herstellung zurückgreifen, die sich aber elegant aus dem neuen Prozessablauf ergeben, wie er durch die X-Form ermöglicht wird.

[0109] [Fig. 6](#) zeigt ein weiteres Beispiel (Ausschnitt) für einen erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Halbleiterlaser. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass seine Mesa in ihrer Seitenflanke nicht nur eine Einschnürung E aufweist, sondern in diesem Fall zwei Einschnürungen E1 und E2. Die beiden Einschnürungen E1 und E2 sind dabei senkrecht zur Substratbasisebene 1 gesehen (bzw. in Emissionsrichtung gesehen) übereinander angeordnet.

[0110] Auf dem Substrat 1 (Halbleitersubstrat) sind hier in dieser Reihenfolge gesehen angeordnet: Zunächst ein erster Dotierbereich (n-dotierter Bereich) 2, auf diesem der aktive Bereich 3 und auf dem aktiven Bereich 3 der zweite Dotierbereich 4 (dieser ist hier ebenfalls n-dotiert; dies liegt an dem nachfolgend noch beschriebenen Aufbau des aktiven Bereichs 3).

[0111] Ganz analog wie bereits für das oberflächenemittierende Halbleiterlaserelement der [Fig. 3](#) beschrieben, sind im Bereich der Elemente 1 und 2 ein erster Seitenwandmetallkontakt 6a und ein erster Seitenwandwärmeableiter 7a, sowie im Bereich des Elements 4 ein zweiter Seitenwandmetallkontakt 6b und ein zweiter Seitenwandwärmeableiter 7b angeordnet.

[0112] Im Unterschied zum in [Fig. 3](#) gezeigten Element ist der aktive Bereich 3 jedoch wie folgt aufgebaut: Von der der Substratbasis 1 zugewandten Seite in Richtung der Substratbasis abgewandten Seite weist der aktive Bereich 3 zunächst einen ersten aktiven Subbereich 3-1 auf, in dem eine erste aktive Schicht A1 mittig angeordnet ist. Auf diesem ersten Subbereich 3-1 ist ein Dotierbereich (p-dotierter Bereich) 15 angeordnet. Dieser Dotierbereich trägt dann den zweiten aktiven Subbereich 3-2 mit der in diesem Subbereich 3-2 mittig angeordneten aktiven Schicht (zweite aktive Schicht A2).

[0113] Knapp unterhalb der ersten aktiven Schicht A1 weist die Mesa des gezeigten Halbleiterlaserelements einen ersten Einschnittbereich bzw. eine erste Einschnürung E1 auf, die ganz analog zu dem in [Fig. 3](#) gezeigten Fall im Wesentlichen V-förmig ausgebildet ist. Im oberen Abschnitt des p-dotierten Bereichs 15 und im Bereich unterhalb der zweiten aktiven Schicht A2 weist das Halbleiterelement die zweite Einschnürung E2 auf, die ebenfalls im Wesentlichen V-förmig ausgebildet ist, wobei der Winkel der beiden V-Schenkel in diesem Falle etwa das 1,5-fache des Winkels bei der ersten Einschnürung E1 beträgt. Im Bereich des dem Substrat 1 zugewandten, unteren V-Schenkels der zweiten Einschnürung E2 trägt die Mesaseitenwand nun in analoger Ausbildung zu den Elementen 6a, 7a und 6b, 7b einen dritten Seitenwandmetallkontakt 6c und einen dritten Seitenwandwärmeableiter 7c, über die die p-dotierte Zone 15 elektrisch kontaktiert ist. Dies ist im vorliegenden Fall so realisiert, dass oberhalb der auf der Substratbasis 1 aufliegenden Elemente 6a, 7a und die erste Einschnürung E1 vollständig ausfüllend eine Polymerschicht 16 (rückgeätzte Polymerschicht) vorgesehen ist, welche in ihrer Höhe bis knapp unterhalb des p-dotierten Bereichs reicht. Auf dieser Polymerschicht 16 sind dann die nicht an die Mesaseitenwand (im Bereich 15) angrenzenden Abschnitte des dritten Seitenwandmetallkontakts 6c und des dritten Seitenwandwärmeableiters 7c angeordnet.

[0114] Erfindungsgemäß lassen sich somit auch mehrere Einschnürungen (bevorzugt senkrecht übereinander bzw. in Richtung der Emission gesehen übereinander gestapelt) realisieren. Dies dient insbesondere dazu, durch stärkere Führung das Modenvolumen zu verringern und die Geometrie der Stromzufuhr bzw. der Wärmeabfuhr an spezielle Anforderungen anzupassen. Die Erfindung lässt sich somit auch im Bereich drei- oder mehrterminalartiger Bauelemente (VCSEL bzw. XCSEL mit mehreren kaskadierten aktiven Bereichen und/oder VCSEL bzw. XCSEL mit integrierter Photodetektorschicht) ohne weiteres realisieren.

[0115] Die vorgestellten erfindungsgemäßen flip-chip-gelöteten XCSEL-Arrays wurden schon vollständig als Prototypen hergestellt. Dabei wurden sie anstatt mit CMOS-Chips zu Testzwecken mit silizium-basierten Trägern integriert, die zur Hochfrequenz-Charakterisierung koplanare Ansteuerleitungen enthalten. Die Bauelemente wurden in flip-chip-gelötetem Zustand umfassend charakterisiert und zeigen gegenüber herkömmlichen Bauelementen stark verbesserte thermische und dynamische Eigenschaften.

[0116] Wie in [Fig. 4](#) gestrichelt (Elemente 13a, 13b) angedeutet, können auch Teile des Substrats 13 (HL-Substrat) auf der emittierenden Oberfläche des dotierten Bereiches 2 (n-Bragg-Stapel) verbleiben, um eine zentralere Stromeinprägung zu ermöglichen. Dies kann erreicht werden, indem beim Substratätzen die entsprechenden Bereiche stehen gelassen werden.

[0117] Mit der vorgestellten Technologie konnte schon in ersten Versuchen der thermische Widerstand gegenüber den bislang international besten Werten halbiert werden. Vorläufige Steigerungen der Grenzfrequenzen um bislang ebenfalls ca. 50% auf 17 GHz für flip-chip-integrierte Substrat-entfernte Laser zeigen, dass die thermischen Verbesserungen wie beschrieben nicht auf Kosten der Dynamik erreicht werden, sondern ihr im Gegenteil durch geringere interne Temperaturen bei Vermeidung zusätzlicher extrinsischer Parasitäten zugute kommen. Weiterhin wurden erste Datenübertragungsexperimente bei der maximalen mit dem vorhandenen Equipment erreichbaren Datenrate von 12.5 Gbit/s durchgeführt und somit die Tauglichkeit der Technologie für solche Anwendungen demonstriert.

[0118] Die vorgestellte Erfindung zeigt wie vorbeschrieben im aktiven Bereich **3** die Ausbildung einer hochohmigen oder elektrisch sperrenden Stromeinschnürschicht **5** mit einer reduzierten Oxidationslänge. Alternativ hierzu ist es jedoch nicht nur möglich, die Oxidationslänge (durch einen entsprechend gering ausgedehnten ringförmigen Oxidationsbereich **5**) zu minimieren, sondern sogar eine Eliminierung der Oxidationslänge vorzunehmen. Es ist somit nicht notwendig, einen entsprechenden Einschnürbereich **5** auszubilden: Die geometrische Einschnürung wurde hier mit der Einschnürung durch eine ringförmige Isolationsschicht kombiniert, lässt sich aber auch allein, also ohne zusätzliche laterale Oxidationsschicht (isolierende Blende) einsetzen.

[0119] Die ersten Prototypen des erfindungsgemäßen XCSEL zeigten keine besonderen Anfälligkeiten im rauen Laboralltag und ließen eine extensive Charakterisierung über einen längeren Zeitraum ohne besondere Vorkehrungen problemlos zu.

[0120] Alternativ zu den oben beschriebenen Ausführungsformen können im Rahmen der Erfindung auch die folgenden Varianten realisiert werden:

- Auch nicht-runde Grundflächen der Mesen sind möglich (z. B. elliptische oder vieleckige Grundflächen).
- Auch andere Beschichtungen als die typischen Metalle sind z. B. als Seitenwandwärmeableiter möglich: Da die MBE auch eine gerichtete Abscheidung macht, ist es auch denkbar, nach der Profilätzung die Flanken in einem zweiten MBE-Wachstumsschritt zu überwachsen (z. B. für gute Kontakte und lateral variierende Dotierprofile). Dies ist insbesondere dadurch möglich, dass die XCSEL-Profil selbst die Masken für eine strukturierte Abscheidung darstellen und somit keine temperaturempfindlichen Materialien wie Photolacke erforderlich sind, welche die Temperaturen in der MBE nicht überstehen würden.
- Auch teilweise dielektrische DBR sind möglich: Gerade die beschriebene seitliche Kontaktierung lässt sich vorteilhaft mit DBRs kombinieren, die zum Teil aus dielektrischen Schichten wie SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , o. ä. bestehen, solange ein laterales Ätztatendifferential existiert.
- Die Erfindung ist in verschiedenen Materialsystemen und damit für verschiedene Wellenlängenbereiche realisierbar:

Da die Profilsteuerung über die epitaktische Schichtstruktur nicht die Wahl der Wellenlängen einschränkt, ist das Design nicht auf einen bestimmten Wellenlängenbereich festgelegt, sondern unterstützt zum Beispiel neben den kürzeren Wellenlängen im sichtbaren Bereich (380 bis 780 nm) über die Datenkommunikation (780 bis 1000 nm) auch die längerwelligen Bereiche von 1000 bis 1650 nm. Gerade in anderen Materialsystemen (z. B. InGaAsP/InP), in denen eine selektive laterale Oxidation nur unbefriedigend funktioniert (zu geringe Oxidationsraten bzw. geringe Selektivität), kann der Einschnitt im Profil die Oxidationsweite stark reduzieren und im Extremfall ganz eliminieren. Ätztatendifferentiale zwischen Spiegelschichten sind in vielfältigen Materialsystemen und mit großer Zahl verfügbarer Ätzen einfacher darzustellen und an die jeweiligen Ansprüche anzupassen als die im AlGaAs bewährte selektive laterale Oxidation aluminiumreicher Schichten.

- Das Substrat des in [Fig. 4](#) gezeigten FC-XCSEL (Flip-Chip XCSEL) ist entfernt, um substratseitige Emission bei 850 nm zu ermöglichen. Bei anderen Wellenlängen, für die das Substrat transparent ist (zum Beispiel 980 nm), kann man es auch beibehalten.
- FC-XCSEL: Die Durchkontaktierungsmesa (Element **10** in [Fig. 4](#)) kann auch anders realisiert werden (mit/ohne Dreiecksfuß, pyramidenförmig, breiter/dünner, höher/tiefer usw.).
- FC-XCSEL: Die Faserführung kann auch eine andere Geometrie aufweisen, insbesondere auch steile Wände ähnlich der Durchkontaktierungsmesa. Dann lässt sich die flache Unterseite eines optischen Elements flach "auf Stoß" aufsetzen und so gleichzeitig zur Ausrichtung in der Ebene (xy-Ebene) auch ein Winkelfehler schon bei einem Einzelbauelement vermeiden. Dagegen wird ein Winkelfehler beim Array durch Aufsetzen vieler gleicher Elemente vermieden.
- FC-XCSEL: Die gezeigte Löt-Konfiguration kann neben 2D Arrays auch auf einzelne oberflächengelötete Bauelemente oder 1D Arrays angewendet werden.

Patentansprüche

1. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser mit vertikalem Resonator, aufweisend einen Substratbasisabschnitt (1) und eine auf und/oder an dem Substratbasisabschnitt angeordnete Mesa (M), wobei die Mesa im Wesentlichen senkrecht zur Substratbasisebene gesehen umfasst: zumindest einen Teil eines ersten, dem Substratbasisabschnitt zugewandt angeordneten Dotierbereiches (2), zumindest einen Teil eines zweiten, dem Substratbasisabschnitt abgewandt angeordneten Dotierbereiches (4) und einen zwischen dem ersten und dem zweiten Dotierbereich angeordneten aktiven Bereich (3) mit mindestens einer aktiven Schicht (A) mit laseremittierender Zone, welche im wesentlichen senkrecht zur aktiven Schicht emittiert, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mesa (M) in zumindest einem Teilabschnitt ihrer Seitenflanke mindestens eine Einschnürung (E) aufweist.
2. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach dem vorhergehenden Anspruch dadurch gekennzeichnet, dass die Ebene der Einschnürung (E) im Wesentlichen parallel zur aktiven Schicht verläuft und/oder dadurch, dass die Mesa (M) in zumindest einem Teilabschnitt ihrer Seitenflanke mehrere Einschnürungen (E1, E2) aufweist, wobei bevorzugt mindestens zwei dieser mehreren Einschnürungen in Emissionsrichtung gesehen im Wesentlichen übereinander angeordnet sind.
3. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Einschnürung (E) senkrecht zur Substratbasisebene gesehen auf Höhe der aktiven Schicht (A), oberhalb der aktiven Schicht (A) oder unterhalb der aktiven Schicht (A) ausgebildet ist.
4. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass parallel zur Ebene der Einschnürung (E) gesehen das Verhältnis der Flächenausdehnung der Einschnürung und der maximalen Flächenausdehnung des ersten und/oder des zweiten Dotierbereiches kleiner als 0.5, bevorzugt kleiner als 0.33, bevorzugt kleiner als 0.25, bevorzugt kleiner als 0.2 ist.
5. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Mesa im Bereich der Einschnürung (E) senkrecht zur Substratbasisebene gesehen näherungsweise einen X-förmigen, doppelkegelstumpfförmigen und/oder diabolartigen Querschnitt aufweist.
6. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Teilabschnitt der Mesoberfläche im Bereich des ersten Dotierbereiches (2) und/oder im Bereich des zweiten Dotierbereiches (4) unter einem Winkel (α) von größer als 45° , bevorzugt von größer als 55° , bevorzugt von größer als 60° zur Substratbasisnormalen verläuft.
7. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach dem vorhergehenden Anspruch dadurch gekennzeichnet, dass ein erster Teilabschnitt der Mesoberfläche im Bereich des zweiten, auf der substratbasisabgewandten Seite des aktiven Bereiches angeordneten Dotierbereiches (4) im Wesentlichen parallel zur Substratbasisnormalen verläuft und dass ein zweiter Teilabschnitt der Mesoberfläche im Bereich des zweiten Dotierbereiches (4) im wesentlichen unter einem Winkel (α) von größer als 45° , bevorzugt von größer als 55° , bevorzugt von größer als 60° zur Substratbasisnormalen verläuft, wobei vom zweiten Teilabschnitt aus gesehen der erste Teilabschnitt auf der dem Substratbasisabschnitt gegenüberliegenden Seite ausgebildet ist.
8. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach dem vorhergehenden Anspruch dadurch gekennzeichnet, dass das Verhältnis der Ausdehnung in Richtung der Substratbasisnormalen des ersten Teilabschnitts und des zweiten Teilabschnitts zwischen 1:1.5 und 1:2.5, bevorzugt 1:2 beträgt.
9. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass im aktiven Bereich (3) eine hochohmige oder elektrisch sperrende Stromeinschürschicht (5) ausgebildet ist.
10. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach dem vorhergehenden Anspruch dadurch gekennzeichnet, dass die hochohmige oder elektrisch sperrende Stromeinschürschicht (5) im Bereich der Einschnürung ausgebildet ist und/oder dass die hochohmige oder elektrisch sperrende Stromeinschürschicht (5) durch eine bevorzugt ringförmige Oxidationsschicht ausgebildet ist.

11. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche gekennzeichnet durch
einen ersten Seitenwandmetallkontakt (**6a**), welcher im Bereich des ersten Dotierbereiches (**2**) angrenzend an letzteren und letzteren im Mesaflankenbereich zumindest teilweise bedeckend angeordnet ist
und/oder
einen zweiten Seitenwandmetallkontakt (**6b**), welcher im Bereich des zweiten Dotierbereiches (**4**) angrenzend an letzteren und letzteren im Mesaflankenbereich zumindest teilweise bedeckend angeordnet ist.
12. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach dem vorhergehenden Anspruch dadurch gekennzeichnet, dass der erste und/oder der zweite Seitenwandmetallkontakt auch den aktiven Bereich im Mesaflankenbereich zumindest teilweise bedeckt.
13. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der beiden vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass der erste und/oder der zweite Seitenwandmetallkontakt eine Au-Ge-Ni-Legierung und/oder eine Pd/AuBe/Pt/Au-Legierung, eine Pd/Ti/Pt/Au-Legierung, eine Ge/Au/Ni/Au-Legierung und/oder eine Pd/Ge/Pt/Au-Legierung enthält oder daraus besteht.
14. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche gekennzeichnet durch
einen ersten Seitenwandwärmeableiter (**7a**), welcher zumindest teilweise im Mesaflankenbereich des ersten Dotierbereiches (**2**) angeordnet ist
und/oder
einen zweiten Seitenwandwärmeableiter (**7b**), welcher zumindest teilweise im Mesaflankenbereich des zweiten Dotierbereiches (**4**) angeordnet ist.
15. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach dem vorhergehenden Anspruch und nach einem der drei diesem Anspruch vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass
der erste Seitenwandwärmeableiter (**7a**) angrenzend an den ersten Seitenwandmetallkontakt (**6a**) und letzteren im Mesaflankenbereich zumindest teilweise bedeckend angeordnet ist
und/oder
dass der zweite Seitenwandwärmeableiter (**7b**) angrenzend an den zweiten Seitenwandmetallkontakt (**6b**) und letzteren im Mesaflankenbereich zumindest teilweise bedeckend angeordnet ist.
16. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der beiden vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass
der erste und/oder der zweite Seitenwandwärmeableiter ein Material mit einer Wärmeleitfähigkeit von größer als 0,5 W/cm/K und/oder Au, Cu, Ag, Al, Diamant, BN, SiC, AlN und/oder Si enthält oder daraus besteht
und/oder
dass der erste und/oder der zweite Seitenwandwärmeableiter im wesentlichen schichtförmig mit einer Dicke von 0,1 µm bis 10 µm, insbesondere von 0,2 µm bis 5 µm, ausgebildet ist.
17. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der drei vorhergehenden Ansprüche gekennzeichnet durch mindestens eine/n, mit dem ersten und/oder dem zweiten Seitenwandwärmeableiter in thermischem Kontakt stehende Wärmesenke, Wärmeverteiler und/oder Wärmeableiter.
18. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass
der erste Dotierbereich (**2**) einen ersten Bragg-Spiegelstapel umfasst und/oder dass der zweite Dotierbereich (**4**) einen zweiten Bragg-Spiegelstapel umfasst
und/oder
dass der erste Dotierbereich (**2**) n-dotiert ist und dass der zweite Dotierbereich (**4**) p-dotiert ist oder umgekehrt.
19. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach dem vorhergehenden Anspruch dadurch gekennzeichnet, dass der erste und/oder der zweite Dotierbereich zumindest partiell eine Dotierstoffkonzentration von größer als 10^{18} Atome/cm³, bevorzugt von größer als 10^{20} Atome/cm³ aufweist.
20. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass der oberflächenemittierende Halbleiterlaser auf Basis eines InAlGaAs-Materialsystems ausgebildet ist.

21. Oberflächenemittierender Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche gekennzeichnet durch einen Substratbasisabschnitt (1), welcher Si, InP und/oder GaAs und/oder ein Polymer enthält oder daraus besteht.

22. Anordnung aufweisend mindestens einen oberflächenemittierenden Halbleiterlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass der einen Teil des Substrates der Anordnung ausbildende Substratbasisabschnitt (1) mindestens eines der Halbleiterlaser so angeordnet und/oder ausgeformt ist, dass die Mesa (M) dieses Halbleiterlasers im Bereich ihrer Einschnürung (E) zumindest teilweise formschlüssig und/oder kraftschlüssig von diesem Substratbasisabschnitt (1) eingefasst ist.

23. Anordnung nach dem vorhergehenden Anordnungsanspruch dadurch gekennzeichnet, dass die Mesa (M) des mindestens einen Halbleiterlasers freischwebend eingefasst ist und/oder dass die dem Substratbasisabschnitt zugewandte Unterseite dieser Mesa und die dem Substratbasisabschnitt abgewandte Oberseite dieser Mesa nicht durch den Substratbasisabschnitt oder einen Teil desselben unterstützt ist.

24. Anordnung nach einem der vorhergehenden Anordnungsansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die dem Substratbasisabschnitt zugewandte Unterseite der Mesa (M) des mindestens einen Halbleiterlasers teilweise durch den Substratbasisabschnitt oder einen Teil desselben unterstützt ist und/oder bedeckt ist (13).

25. Anordnung nach einem der vorhergehenden Anordnungsansprüche, wobei der mindestens eine Halbleiterlaser nach einem der Ansprüche 11 bis 17 ausgebildet ist, dadurch gekennzeichnet, dass der Substratbasisabschnitt (1) des mindestens einen Halbleiterlasers zusammen mit dem ersten und/oder dem zweiten Seitenwandmetallkontakt (6a, 6b) und/oder dem ersten und/oder dem zweiten Seitenwandwärmeableiter (7a, 7b) so angeordnet und/oder ausgeformt ist, dass die genannten Elemente die Mesa (M) des mindestens einen Halbleiterlasers im Bereich ihrer Einschnürung (E) formschlüssig und/oder kraftschlüssig erfassen.

26. Anordnung nach einem der vorhergehenden Anordnungsansprüche dadurch gekennzeichnet, dass der Substratbasisabschnitt (1) des mindestens einen Halbleiterlasers so angeordnet und/oder ausgeformt ist, dass durch zumindest einen Teilabschnitt dieses Substratbasisabschnittes eine mechanische Führungsstruktur (F) für mindestens ein optisches Element (8), insbesondere eine Glasfaser, ein Glasfaserbündel, eine Mikrolinse und/oder ein Mikrolinsenarray ausgebildet ist.

27. Anordnung nach dem vorhergehenden Anordnungsanspruch gekennzeichnet durch ein optisches Element (8), welches so integriert in und/oder angrenzend an die Führungsstruktur angeordnet ist, dass zwischen zumindest einem Teilabschnitt der Führungsstruktur (F) und/oder zumindest einem Teilabschnitt des ersten Dotierbereiches des mindestens einen Halbleiterlasers und zumindest einem Teilabschnitt des optischen Elements ein Zwischenraum (Z) ausgebildet ist.

28. Anordnung nach dem vorhergehenden Anordnungsanspruch gekennzeichnet durch einen zumindest teilweise mit einem transparenten Fluid und/oder einem transparenten Festkörpermaterial, insbesondere einem Kleber, füllbaren und/oder gefüllten Zwischenraum und/oder einen zumindest teilweise zur Durchströmung mit einem transparenten Fluid, insbesondere einem Kühlgas und/oder einer Kühlflüssigkeit, ausgebildeten Zwischenraum.

29. Anordnung nach dem vorhergehenden Anordnungsanspruch dadurch gekennzeichnet, dass das transparente Fluid und/oder das transparente Festkörpermaterial einen an den optischen Brechungsindex des optischen Elements und/oder die Wellenlänge des emittierbaren und/oder emittierten Laserlichts des mindestens einen Halbleiterlasers angepassten optischen Brechungsindex aufweist und/oder dass das transparente Fluid und/oder das transparente Festkörpermaterial einen an die Breite des Zwischenraums zwischen zumindest dem Teilabschnitt der Führungsstruktur (F) und/oder zumindest dem Teilabschnitt des ersten Dotierbereiches des mindestens einen Halbleiterlasers und zumindest dem Teilabschnitt des optischen Elements angepassten optischen Brechungsindex aufweist.

30. Anordnung nach einem der vorhergehenden Anordnungsansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Mesa des mindestens einen Halbleiterlasers teilweise in einen Bondpad und/oder ein Lot (9) integriert ist und/oder teilweise von dem Bondpad und/oder Lot (9) umschlossen ist.

31. Anordnung nach dem vorhergehenden Anordnungsanspruch dadurch gekennzeichnet, dass der zwei-

te, dem Substratbasisabschnitt abgewandt angeordnete Dotierbereich (4) der Mesa zumindest teilweise in dem Bondpad und/oder Lot (9) integriert ist und/oder zumindest teilweise von diesem umschlossen ist.

32. Anordnung nach einem der beiden vorhergehenden Anordnungsansprüche und nach einem der Ansprüche 11 bis 17 dadurch gekennzeichnet, dass der erste und/oder der zweite Seitenwandmetallkontakt (6a, 6b) und/oder der erste und/oder der zweite Seitenwandwärmeableiter (7a, 7b) zumindest teilweise zwischen dem Bondpad und/oder Lot (9) und der Mesa (M) angeordnet ist.

33. Anordnung nach einem der vorhergehenden Anordnungsansprüche dadurch gekennzeichnet, dass der einen Teil des Substrates der Anordnung ausbildende Substratbasisabschnitt (1) des mindestens einen Halbleiterlasers beabstandet von seiner Einfassung der Mesa eine elektrische Durchkontaktierung (10) aufweist.

34. Anordnung nach dem vorhergehenden Anordnungsanspruch dadurch gekennzeichnet, dass die Durchkontaktierung (10) in Form einer Durchkontaktierungsmesa (DM) ausgebildet ist.

35. Anordnung nach dem vorhergehenden Anordnungsanspruch dadurch gekennzeichnet, dass die Durchkontaktierungsmesa (DM) teilweise in ein(en) Durchkontaktierungsbondpad und/oder -lot (11) integriert ist und/oder teilweise von dem Durchkontaktierungsbondpad und/oder -lot (11) umschlossen ist.

36. Anordnung nach einem der sechs vorhergehenden Anordnungsansprüche dadurch gekennzeichnet, dass der Bondpad und/oder das Lot (9) und/oder der Durchkontaktierungsbondpad und/oder das -lot (11) ein Lötmaterial aufweist oder daraus besteht.

37. Anordnung nach einem der sieben vorhergehenden Anordnungsansprüche gekennzeichnet durch einen mit dem Bondpad und/oder Lot (9) und/oder dem Durchkontaktierungsbondpad und/oder Lot (11) mechanisch verbundenen Chip (12), insbesondere einen CMOS-Chip.

38. Anordnung gekennzeichnet durch mehrere nach einem der vorhergehenden Anordnungsansprüche ausgebildete Halbleiterlaser, welche in Form einer Matrix (Array) angeordnet sind.

39. Verfahren zur Herstellung eines oberflächenemittierender Halbleiterlasers mit vertikalem Resonator, wobei mittels Nassätzung und/oder Trockenätzung ein Substratbasisabschnitt (1) und eine auf und/oder an dem Substratbasisabschnitt angeordnete Mesa (M) herausgebildet werden, wobei die Mesa im Wesentlichen senkrecht zur Substratbasisebene gesehen umfasst: zumindest einen Teil eines ersten, dem Substratbasisabschnitt zugewandt angeordneten Dotierbereiches (2), zumindest einen Teil eines zweiten, dem Substratbasisabschnitt abgewandt angeordneten Dotierbereiches (4) und einen zwischen dem ersten und dem zweiten Dotierbereich angeordneten aktiven Bereich (3) mit mindestens einer aktiven Schicht (A) mit laseremittierender Zone, welche im wesentlichen senkrecht zur aktiven Schicht emittiert, und wobei in zumindest einem Teilabschnitt der Seitenflanke der Mesa (M) durch die Nassätzung und/oder die Trockenätzung mindestens eine Einschnürung (E) herausgebildet wird.

40. Verfahren nach dem vorhergehenden Verfahrensanspruch dadurch gekennzeichnet, dass ein Halbleiterlaser oder eine Anordnung nach einem der vorangehenden Vorrichtungsansprüche herausgebildet wird.

41. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Formgebung der Mesa (M) mindestens eines Halbleiterlasers in einem einzigen, den gesamten Schichtaufbau umfassenden Ätzschritt durchgeführt wird.

42. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche dadurch gekennzeichnet, dass ein Seitenwandkontakt und/oder ein Seitenwandwärmeableiter mindestens eines Halbleiterlasers durch Verwendung von Mesaüberhängen als Schattenmasken definiert und abgeschieden wird.

43. Verfahren nach einem der vorhergehenden Verfahrensansprüche dadurch gekennzeichnet, dass der erste und/oder der zweite Seitenwandmetallkontakt (6a, 6b) und/oder der erste und/oder der zweite Seitenwandwärmeableiter (7a, 7b) mindestens eines Halbleiterlasers ohne Vakuumunterbrechung mittels eines einzigen Aufdampfschrittes, insbesondere mittels eines einzigen PVD- oder CVD-Schrittes, hergestellt wird.

44. Verwendung eines oberflächenemittierenden Halbleiterlasers nach einem der vorhergehenden Ansprüche im Bereich der Datenübertragung, im Bereich der Sensorik, insbesondere im Bereich der Sensorik in-

DE 10 2008 022 793 A1 2009.12.03

nerhalb von Fahrzeugen, insbesondere im Bereich von Fahrerassistenzsystemen, insbesondere zur Totwinkelüberwachung und/oder zur Kollisionserkennung, oder innerhalb von optischen Computermäusen.

Es folgen 12 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

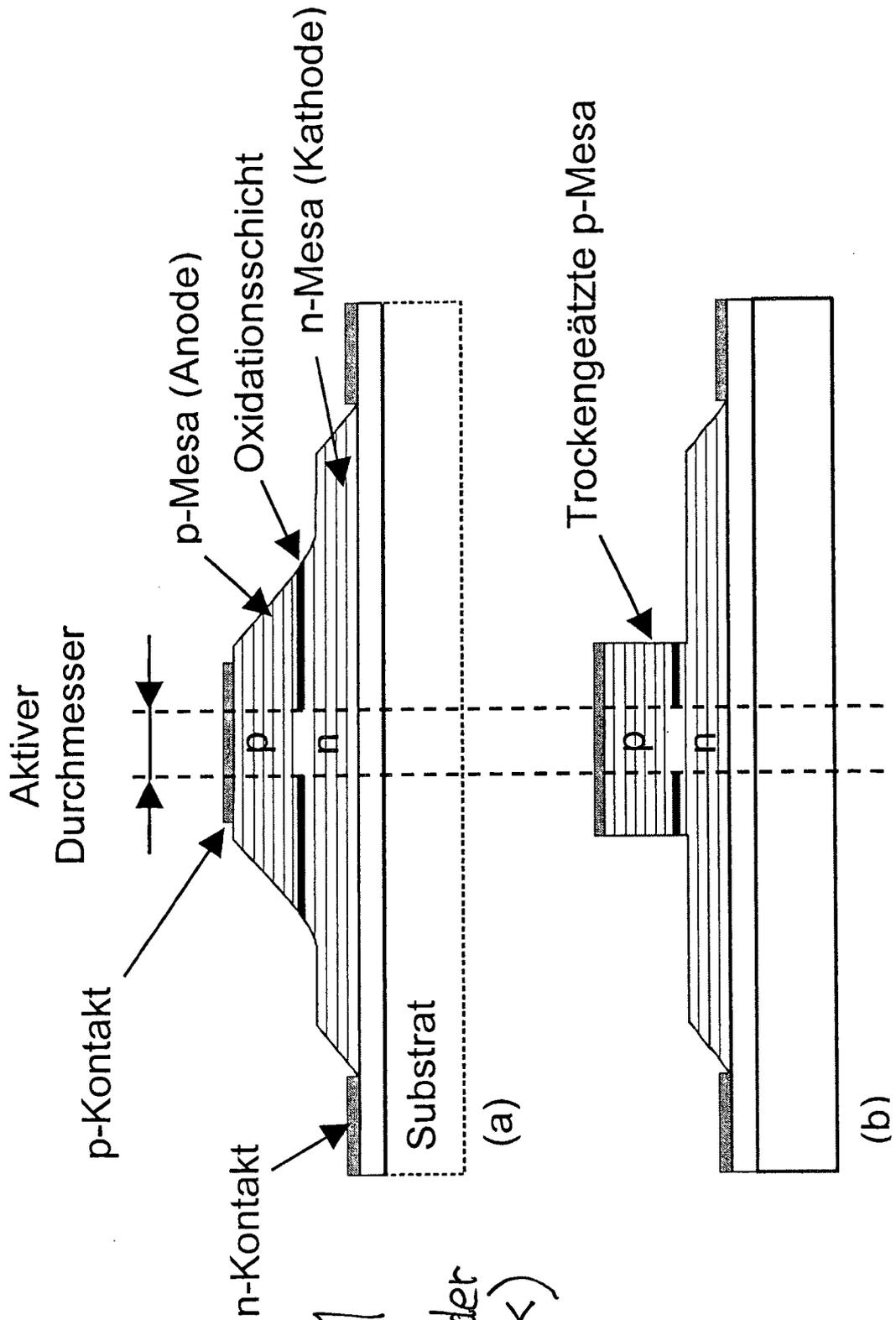
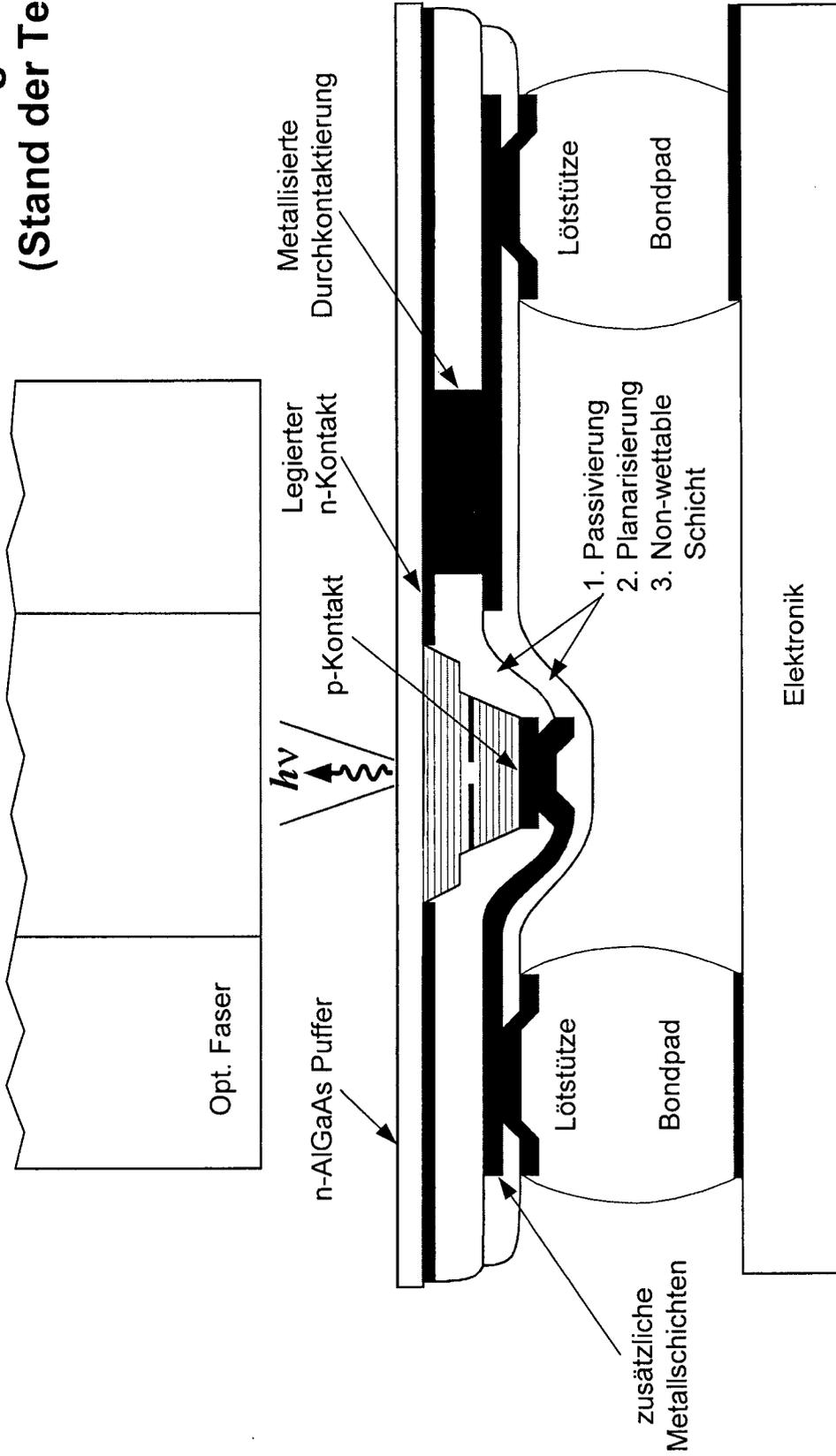


Fig. 1
(Stand der Technik)

Fig. 2
(Stand der Technik)



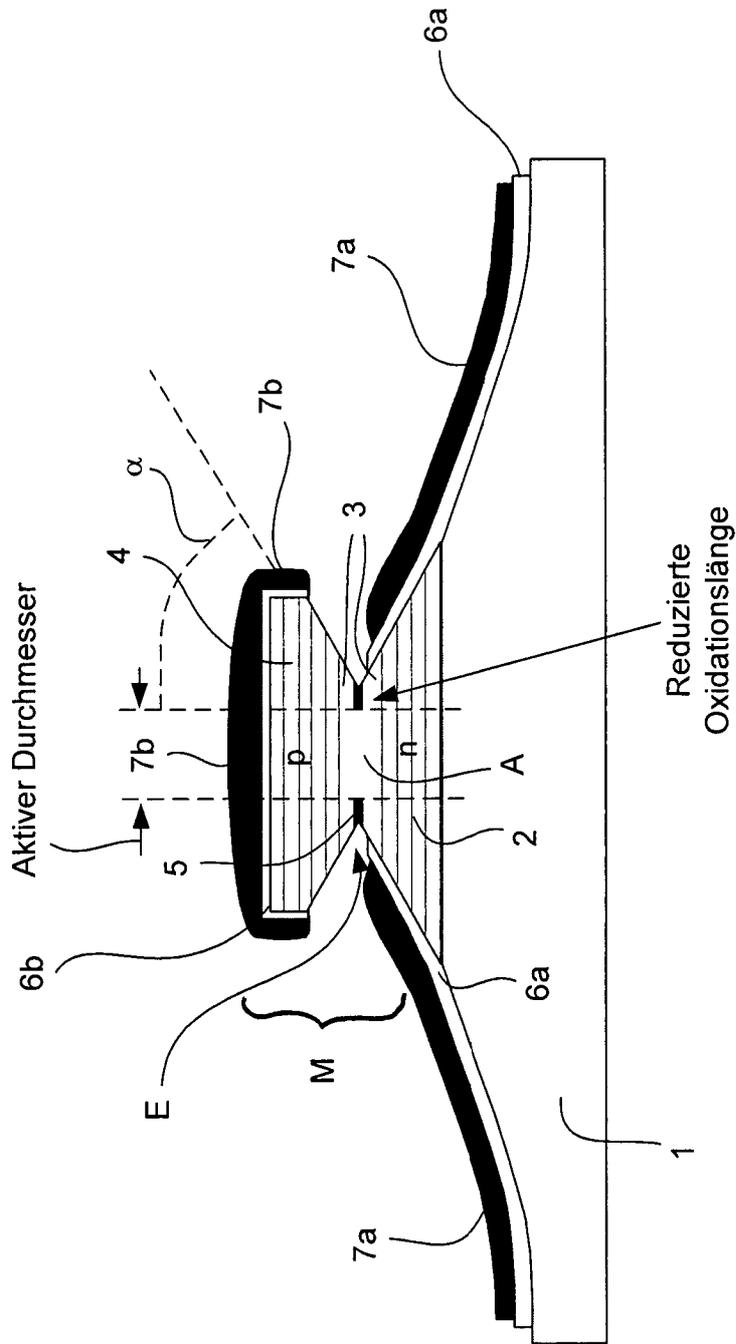


Fig. 3

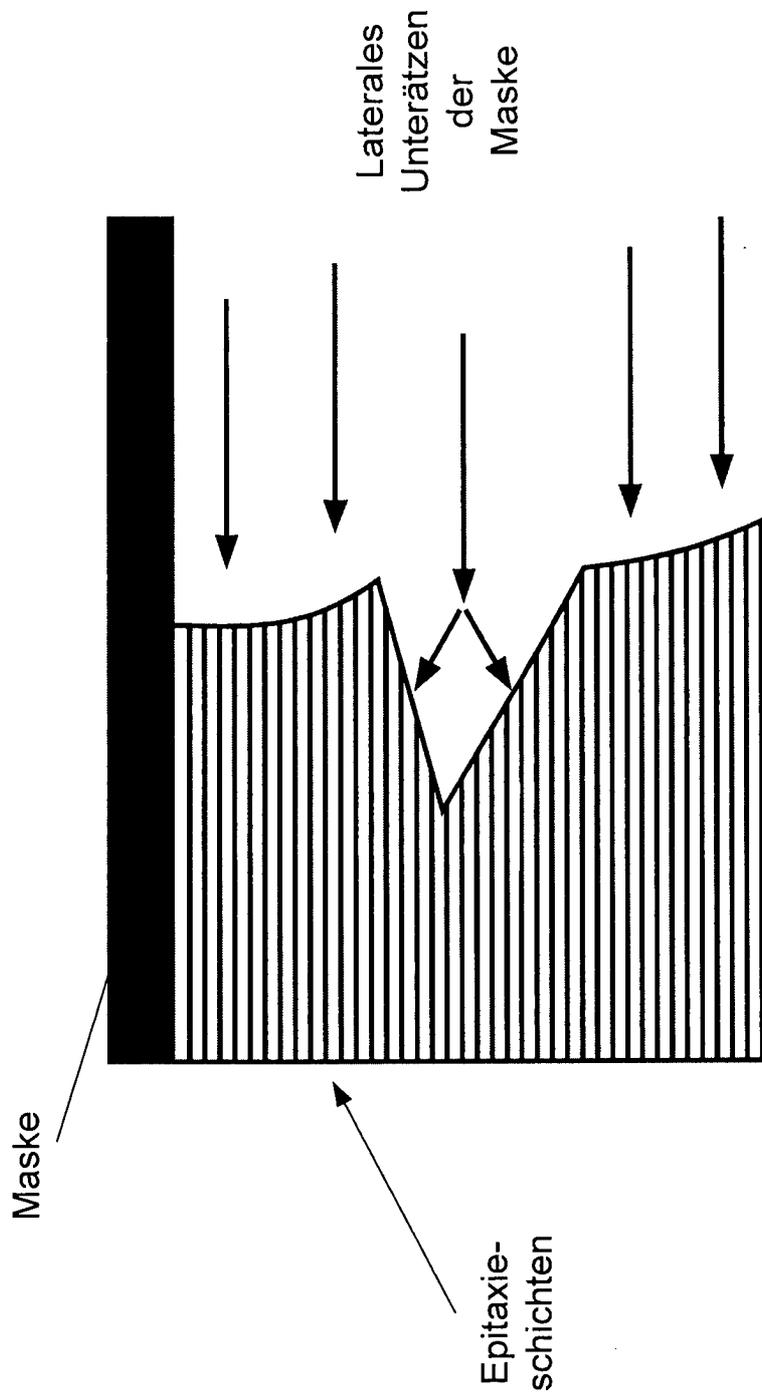
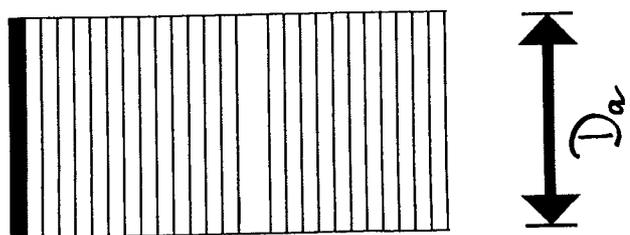
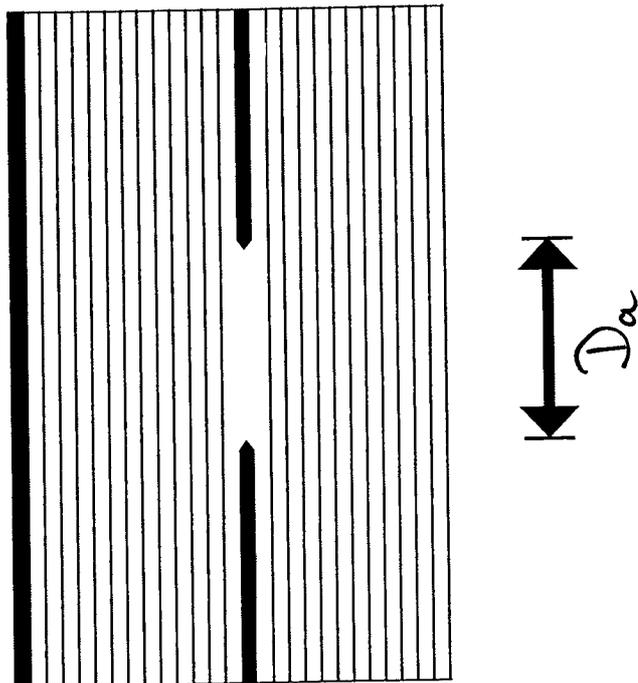
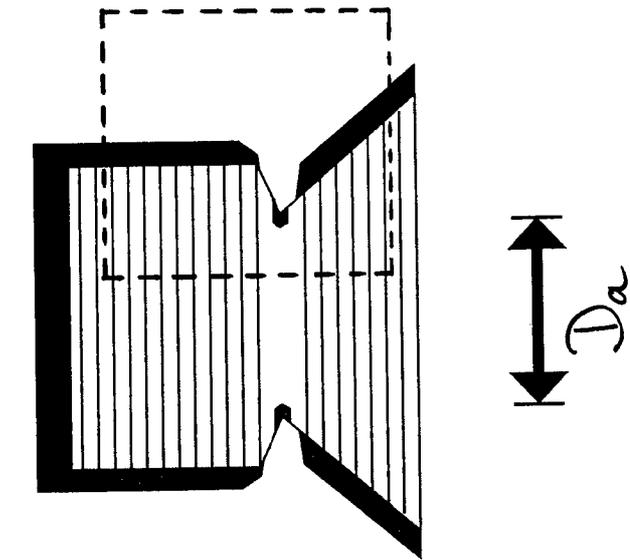
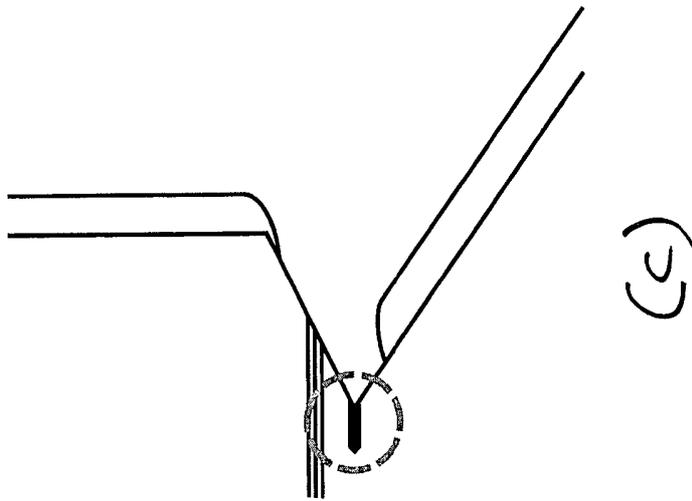


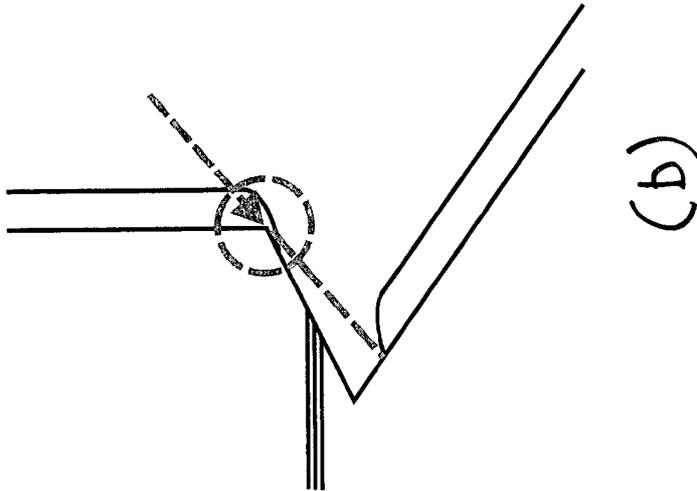
Fig. 3b

Fig. 3C

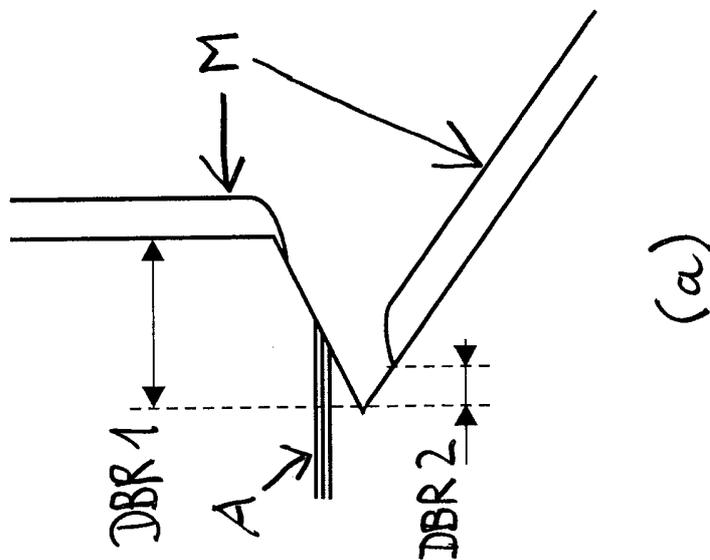




(c)



(b)



(a)

Fig. 3d

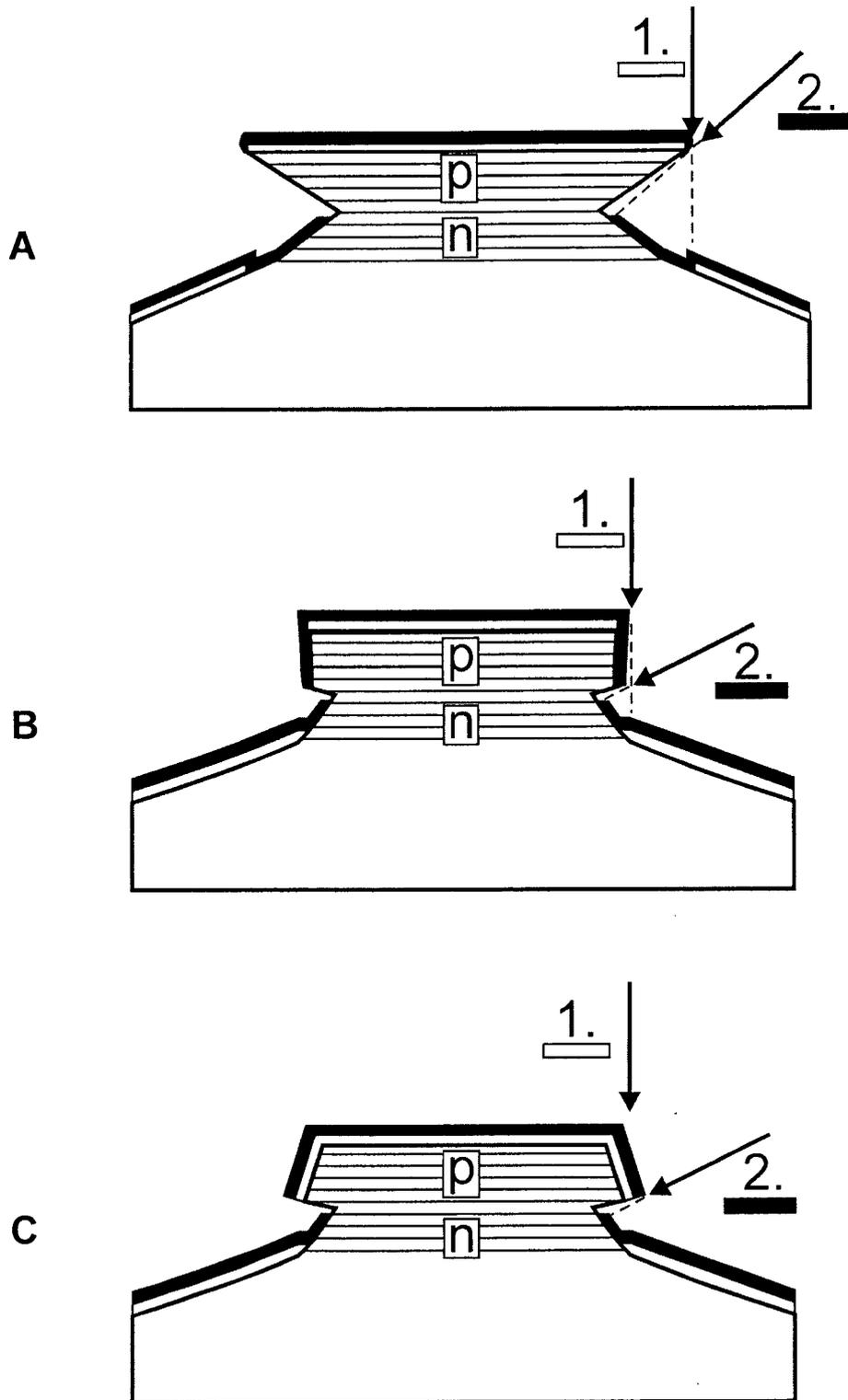


Fig. 3e

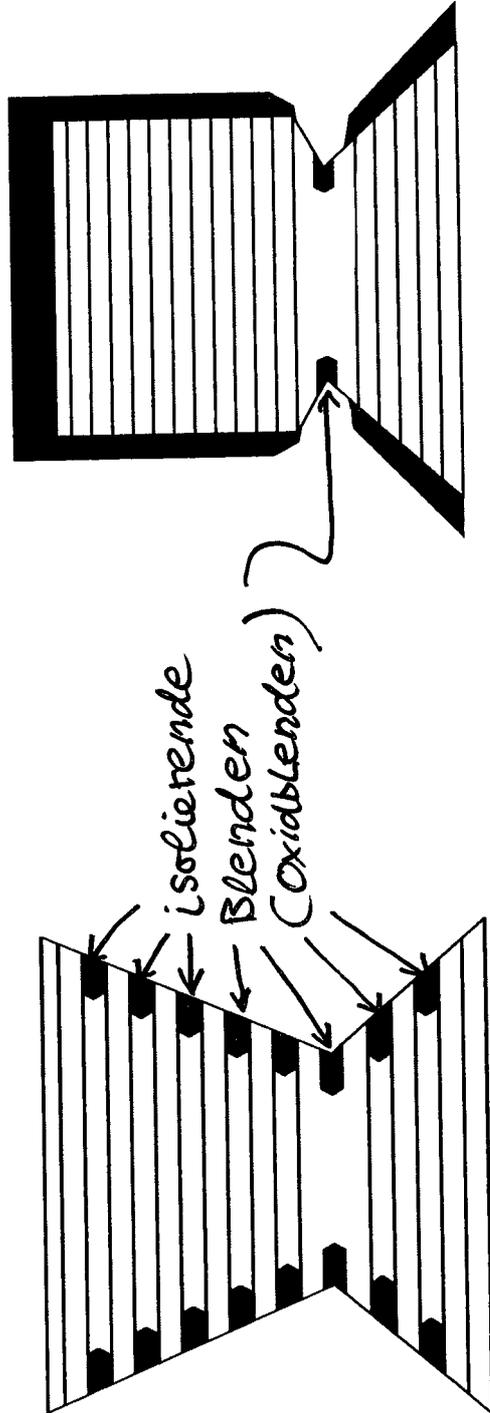
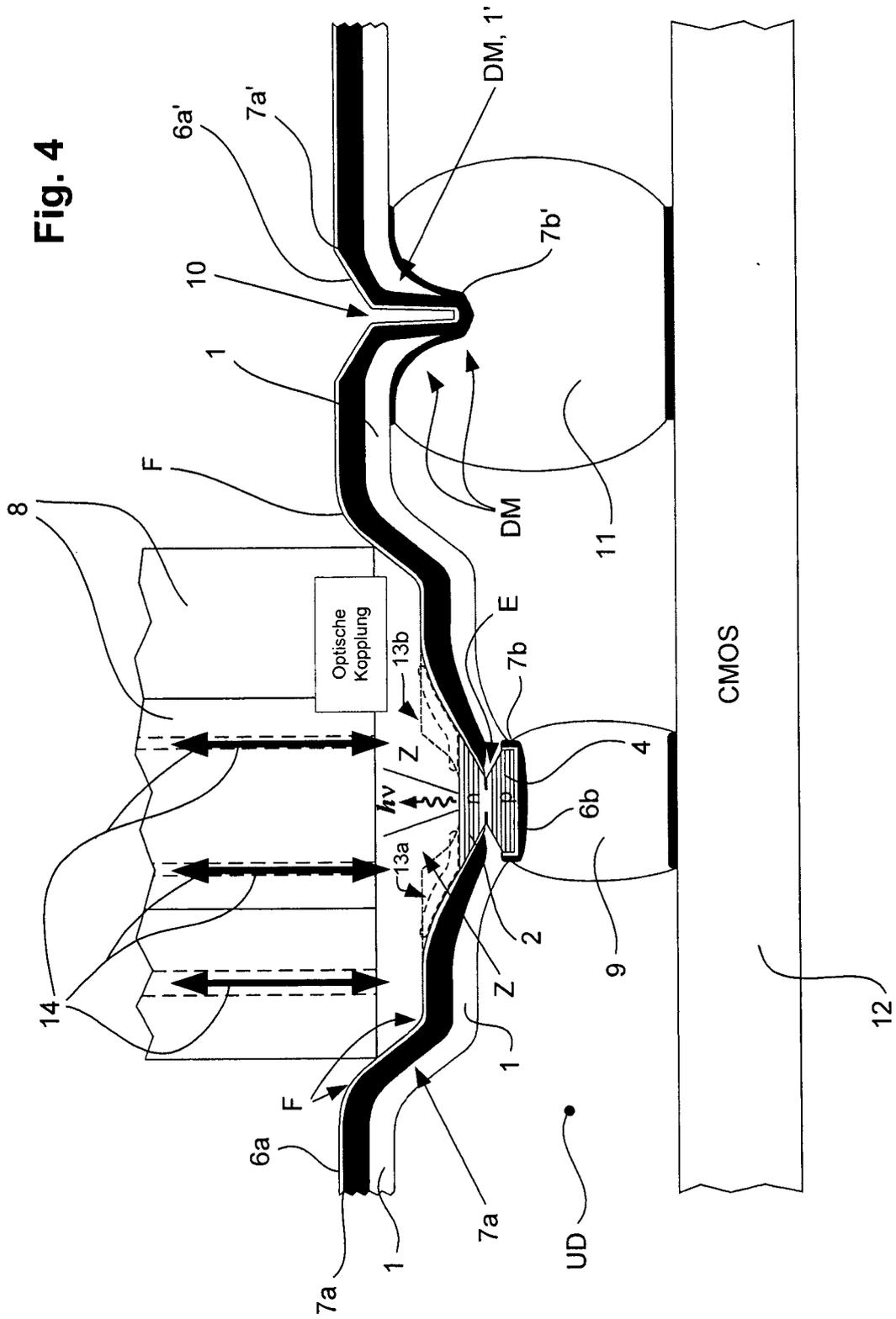


Fig. 3f

Fig. 4



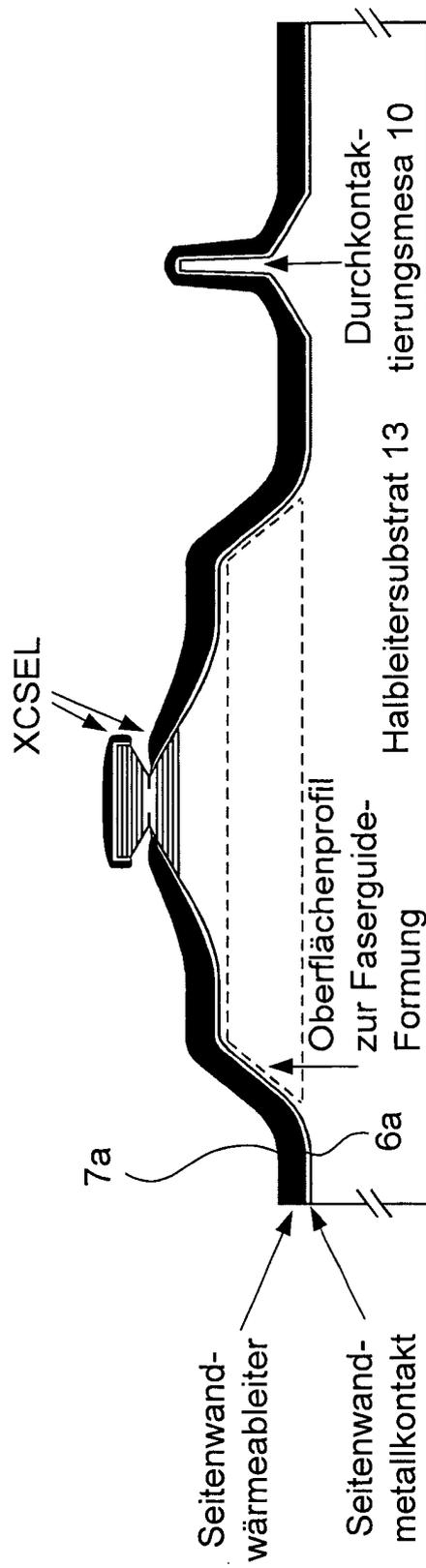


Fig. 4b

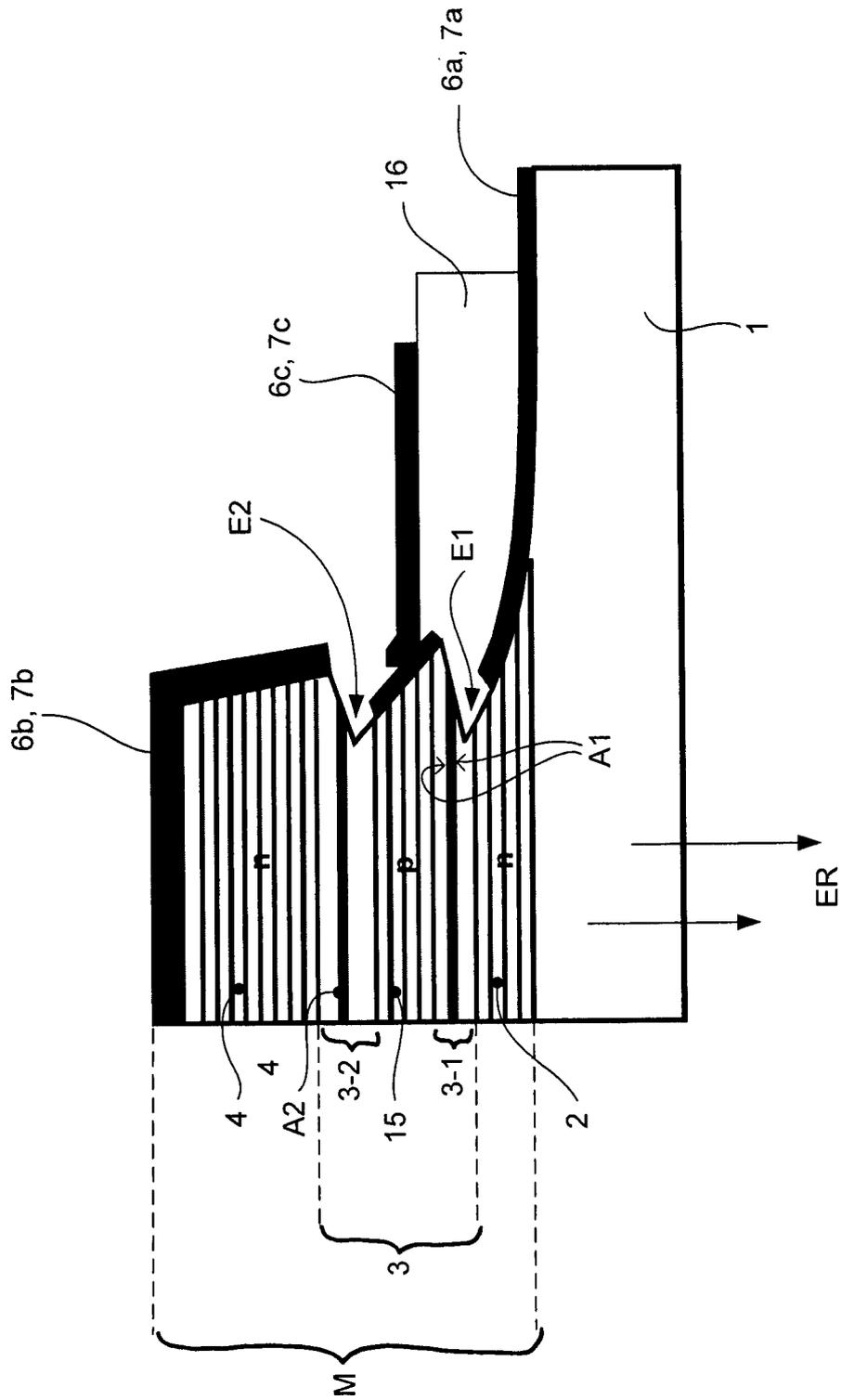


Fig. 6