



(10) **DE 10 2022 111 977 B4** 2025.12.04

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 111 977.7**
(22) Anmeldetag: **12.05.2022**
(43) Offenlegungstag: **16.11.2023**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **04.12.2025**

(51) Int Cl.: **H01S 5/223** (2006.01)
H01S 5/20 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Leibniz- Institut
für Höchstfrequenztechnik, 12489 Berlin, DE**

(74) Vertreter:
**Gulde & Partner Patent- und
Rechtsanwaltskanzlei mbB, 10785 Berlin, DE**

(72) Erfinder:
**Crump, Paul, 10245 Berlin, DE; Wenzel, Hans,
12355 Berlin, DE; Elattar, Mohamed, 12489 Berlin,
DE; Maaßdorf, Andre, 10437 Berlin, DE; Martin,
Dominik, 10825 Berlin, DE; Brox, Olaf, 14057
Berlin, DE**

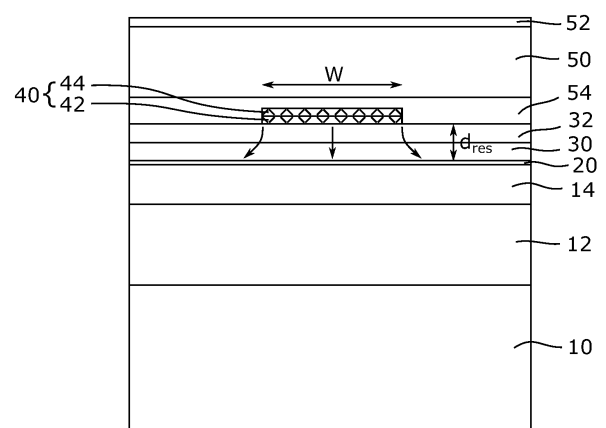
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2009 015 314	A1
DE	10 2019 102 499	A1
DE	10 2020 120 703	A1
US	2018 / 0 337 513	A1
CN	1 04 682 195	A
JP	2002- 319 703	A

Winterfeldt, M.; u.a.: „Assessing the influence
of the vertical epitaxial layer design on the lateral
beam quality of high-power broad area diode
lasers“, in: Proc. SPIE 9733, 2016, S. 973300

(54) Bezeichnung: **Breitstreifen-Diodenlaser mit integriertem p-n-Tunnelübergang**

(57) Hauptanspruch: Breitstreifen-Diodenlaser, umfassend:
eine zwischen einem n-dotierten Halbleitermaterial (10, 12,
14) und einem p-dotierten Halbleitermaterial (30, 32, 34)
ausgebildete aktive Schicht (20), wobei die aktive Schicht
(20) entlang einer Längsachse eine aktive Zone zur Erzeu-
gung elektromagnetischer Strahlung ausbildet;
wobei zwischen einem aufliegenden p-seitigen Metallkon-
takt (52) und dem p-dotierten Halbleitermaterial (30, 32,
34) mindestens eine n-dotierte Zwischenschicht (50, 54)
angeordnet ist, wobei in der mindestens einen n-dotierten
Zwischenschicht (50, 54) im Bereich oberhalb der aktiven
Zone ein unmittelbar an das p-dotierte Halbleitermaterial
(30, 32, 34) angrenzender p-n-Tunnelübergang (40) ausge-
bildet ist;
dadurch gekennzeichnet, dass
eine Restschichtdicke d_{res} zwischen der aktiven Schicht (20)
und dem p-n-Tunnelübergang (40) kleiner als $0,5 \mu\text{m}$ ist;
eine n-dotierte Mantelschicht (54) auf dem p-n-Tunnelüber-
gang (40) angeordnet ist, und
der p-n-Tunnelübergang (40) auf einer p-dotierten Mantel-
schicht (32) des p-dotierten Halbleitermaterials (30, 32, 34)
angeordnet ist und eine n-dotierte Kontaktschicht (50)
auf der n-dotierten Mantelschicht (54) aufliegt.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Breitstreifen-Diodenlaser (engl. „broad-area diode laser“, BAL) mit integriertem p-n-Tunnelübergang. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung einen Hochleistungs-Breitstreifen-Diodenlaser bei dem zur Verbesserung der Strahlqualität und zur Reduzierung des thermischen Widerstands ein in Sperrrichtung vorgespannter p-n-Tunnelübergang in das Schichtsystem des Diodenlaser integriert ist.

Stand der Technik

[0002] Breitstreifen-Diodenlaser können eine besonders hohe Effizienz und Brillanz aufweisen. Mit diesen Emittern lassen sich zuverlässig Ausgangsleistungen von >15 W erreichen. BALs sind die effizienteste Lichtquelle für Strahlung im nahen Infrarot (NIR), so dass sie als Pumpquelle für Festkörper- und Faserlaser weit verbreitet sind. Sie sind auch das Schlüsselement von fasergekoppelten Lasersystemen, die für die Bereitstellung von Strahlen hoher Strahlungsdichte für die Materialbearbeitung bei hohen Umwandlungseffizienzen ausgelegt sind. Um die Ausgangsleistung dieser Systeme zu erhöhen und ihre Kosten zu senken, ist es wichtig, die Strahlqualität insbesondere der langsamen Achse zu verbessern, da dies die Kopplung einer größeren Anzahl von Emittern in Fasern mit geringer numerischer Apertur (NA) ermöglicht.

[0003] Bei hohen optischen Ausgangsleistungen und den damit verbundenen Betriebsströmen kommt es jedoch im Allgemeinen zu einer deutlichen Verschlechterung der Strahlqualität, was sich insbesondere negativ auf eine Kopplung in Fasern auswirkt. Es konnte gezeigt werden, dass die thermische Linse (und nicht die ladungsträger- oder verstärkungsinduzierte Führung) in der langsamen Achse eine der vorherrschenden Ursachen für die Verschlechterung der Strahlqualität bei erhöhtem Betriebsstrom ist (Bai, J. G. et al., Mitigation of Thermal Lensing Effect as a Brightness Limitation of High-Power Broad Area Diode Lasers, Proc. SPIE 7953, 79531F (2011) & Crump, P. et al., Experimental Studies Into the Beam Parameter Product of GaAs High-Power Diode Lasers, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 28, no. 1 (2022)). Entscheidend für die Verschlechterung der Strahlqualität bei hohen Ausgangsleistungen ist somit die Ausbildung eines lateralen Temperaturgradienten aufgrund einer Temperaturerhöhung im zentralen Bereich unter dem Laserstreifen, welche zu einer lokalen Erhöhung des Brechungsindex und somit zu einer zusätzlichen lateralen Wellenführung und als Folge zu einem größeren Divergenzwinkel führt.

[0004] Insbesondere haben frühere Studien über GaAs-basierte Breitstreifen-Diodenlaser (z. B. Riep-

rich, J. et al., Thermal boundary resistance between GaAs and p-side metal as limit to high power diode lasers, IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conf. (Coventry, UK), pp. 35-36 (2019)) gezeigt, dass sich an der Grenzfläche zwischen der hoch p-dotierten GaAs-Kontaktschicht und dem darüber abgeschiedenen Metallkontakt eine erhebliche thermische Barriere ausbildet. Die durch diese Barriere verringerte Wärmeableitung verstärkt die Wirkung der entstehenden thermischen Linse, was zu einer geringeren Strahlqualität und einem erhöhten thermischen Widerstand führt. An der anderen Halbleiter-Metall-Grenzfläche innerhalb des Bauelements, d. h. zwischen n-dotierten GaAs und Metall, konnte eine solche thermische Barriere hingegen nicht nachgewiesen werden.

[0005] Aus US 2018 / 0 337 513 A1 ist bekannt, dass eine Verbesserung der Wärmeabfuhr aus einem optischen Hochleistungs-Halbleiterbauelementen über einen n-p-Tunnelübergang zur Ausbildung eines legierter Kontaktübergangs erreicht werden kann, welcher unmittelbar zwischen dem n-p-Tunnelübergang und einer Metallkontaktschicht ausgebildet wird, wobei der legierter Kontaktübergang einen geringeren thermischen und elektrischen Widerstand aufweist, als ein metallurgisch abrupter Übergang bei einem herkömmlichen p-Typ-Kontakt. Der n-dotierte Bereich des n-p-Tunnelübergangs selbst bildet dabei den zur Kontaktierung erforderlichen Metall-Halbleiterübergang aus.

[0006] Die DE 10 2009 015 314 A1 betrifft ebenfalls eine Halbleiterlaservorrichtung mit einem integrierten p-n-Tunnelübergang der zwischen einer Wellenleiterschicht aus p-dotiertem Material und einer n-dotierten Mantelschicht ausgebildet ist. Durch die Verwendung eines vergrabenen Tunnelübergangs kann in der p-seitigen Mantelschicht mit Vorteil auf Magnesium-dotierte Schichten verzichtet werden. Dadurch kann insbesondere erreicht werden, dass Alterungseffekte in der Halbleiterlaservorrichtung, die ansonsten durch die Diffusion von Magnesium herbeigeführt werden können, verringert werden.

[0007] In der JP 2002 319 703 A wird eine Tunnel-dioden umfassende laminierte Gruppe-III-Nitrid-Halbleiterschichtstruktur mit mindestens einer ersten laminierten Gruppe-III-Nitrid-Halbleiterschichtstruktur vom n-Typ, einer laminierten Gruppe-III-Nitrid-Halbleiterschichtstruktur vom p-Typ und einer zweiten laminierten Gruppe-III-Nitrid-Halbleiterschichtstruktur vom n-Typ, welche auf einem Substrat ausgebildet sind, offenbart.

[0008] Die CN 104 682 195 A zeigt einen kantene-mittleren Halbleiterlaser mit einer in einen streifenförmigen Rippenwellenleiter integrierten Tunnel-übergangsstruktur sowie ein entsprechendes Verfahren zur Herstellung.

[0009] Aus Winterfeldt et al. (Winterfeldt, M.; et al.: „Assessing the influence of the vertical epitaxial layer design on the lateral beam quality of high-power broad area diode lasers“, in: Proc. SPIE 9733, 2016, S. 97330O) sind Laserstrukturen mit einer starken Asymmetrie in der Wellenleiterdicke bekannt, welche einen sehr dünnen p-Wellenleiter für minimalen elektrischen Widerstand und Unterdrückung von einem Bias-induziertem Ladungsträgerverlust aufweist.

Offenbarung der Erfindung

[0010] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Breitstreifen-Diodenlaser anzugeben, bei dem zur Verbesserung der Strahlqualität und zur Reduzierung des thermischen Widerstands die auftretende thermische Barriere zwischen einer hoch p-dotierten Kontaktschicht und dem darüber abgeschiedenen Metallkontakt zu verringern oder ganz zu verhindern ist.

[0011] Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß durch die Merkmale des unabhängigen Patentanspruchs 1 gelöst. Zweckmäßige Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen enthalten.

[0012] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Breitstreifen-Diodenlaser umfassend eine zwischen einem n-dotierten Halbleitermaterial und einem p-dotierten Halbleitermaterial ausgebildete aktive Schicht, wobei die aktive Schicht entlang einer Längsachse eine aktive Zone zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung ausgebildet; wobei zwischen einem aufliegenden p-seitigen Metallkontakt und dem p-dotierten Halbleitermaterial mindestens eine n-dotierte Zwischenschicht angeordnet ist, wobei in der mindestens einen n-dotierten Zwischenschicht im Bereich oberhalb der aktiven Zone ein unmittelbar an das p-dotierte Halbleitermaterial angrenzender p-n-Tunnelübergang ausgebildet ist, wobei eine Restschichtdicke d_{res} (d. h., der tatsächliche minimale Abstand) zwischen der aktiven Schicht und dem p-n-Tunnelübergang kleiner als $0,5 \mu\text{m}$ ist, wobei eine n-dotierte Mantelschicht auf dem p-n-Tunnelübergang angeordnet ist, und wobei der p-n-Tunnelübergang auf einer p-dotierten Mantelschicht des p-dotierten Halbleitermaterials angeordnet ist und eine n-dotierte Kontaktschicht auf der n-dotierten Mantelschicht aufliegt. Die mindestens eine n-dotierte Zwischenschicht umfasst eine p-seitige n-Kontaktschicht. Der p-seitige Metallkontakt ist auf der p-seitigen n-Kontaktschicht angeordnet sein.

[0013] Das n-dotierte Halbleitermaterial umfasst dabei typischerweise ein n-dotiertes Substrat (als n-Substrat bezeichnet), eine auf dem n-Substrat angeordnete n-seitige n-Mantelschicht und eine auf der n-seitigen n-Mantelschicht angeordnete n-Wellenlei-

terschicht. Das p-dotierte Halbleitermaterial umfasst typischerweise eine p-Wellenleiterschicht und eine auf der p-Wellenleiterschicht angeordnete p-Mantelschicht. Im Stand der Technik ist auf der p-Mantelschicht zumeist eine p-Kontaktschicht angeordnet. Zwischen den beiden unterschiedlich dotierten Halbleitermaterialien befindet sich die aktive Schicht, welche zur Lichterzeugung ausgebildet ist. Die aktive Zone ist dabei derjenige Teilbereich der aktiven Schicht, in dem durch Ladungsträgerinjektion während des Betriebs der Laserdiode tatsächlich eine Lichterzeugung stattfindet. Die Längsachse weist in die longitudinale Richtung und entspricht bevorzugt der Resonatorachse des Lasers.

[0014] Die Ladungsträger werden n-seitig üblicherweise über das n-Substrat und p-seitig über einen aufliegenden Metallkontakt zugeführt, wobei dieser p-seitige Metallkontakt dann mit einer darunterliegenden p-Kontaktschicht eine Halbleiter-Metall-Grenzfläche ausbildet. Wie obenstehend bereits beschrieben, stellt diese Grenzfläche eine erhebliche thermische Barriere dar. Da bei einer n-seitigen Halbleiter-Metall-Grenzfläche eine solche thermische Barriere nicht nachgewiesen werden konnte, wird erfindungsgemäß zwischen dem aufliegenden p-seitigen Metallkontakt und dem darunter befindlichen p-dotierten Halbleitermaterial mindestens eine n-dotierte Zwischenschicht angeordnet. Zudem ist zur weiteren Ermöglichung der Ladungsträgerinjektion in der mindestens einen n-dotierten Zwischenschicht im Bereich oberhalb der aktiven Zone ein unmittelbar an das p-dotierte Halbleitermaterial angrenzender p-n-Tunnelübergang ausgebildet. Somit kann auch p-seitig eine als bevorzugt angesehene Grenzfläche zwischen einem n-Halbleitermaterial und einem Metall, d. h. ohne Ausbildung einer erheblichen thermischen Barriere, realisiert werden. Der p-n-Tunnelübergang hat bevorzugt eine Gesamtdicke von kleiner als 100 nm .

[0015] Der vorliegenden Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass insbesondere eine Halbleiter-Metall-Grenzfläche mit einem n-dotierten Halbleiter auf beiden Seiten des BAL von Vorteil ist. Um dies zu erreichen, kann die p-seitige Kontaktschicht des BAL als eher n-dotiert statt p-dotiert ausgebildet werden. Dadurch entsteht jedoch ein in Sperrrichtung vorgespannter p-n-Übergang, der als Stromsperre wirkt. Um diesen zu vermeiden, wird an dieser p-n-Grenzfläche ein umgekehrt vorgespannter p-n-Tunnelübergang (engl. „reversebiased tunnel p-n-junction“, oder kurz: „tunnel junction“, TJ) ausgebildet, der beispielsweise aus sehr hoch dotierten Halbleiterschichten besteht und es Ladungsträgern ermöglicht, zwischen einer entsprechenden p-seitigen n-Kontaktschicht und den anderen p-seitigen Halbleiterschichten zu tunneln. Bei einem solchen Design ist es entscheidend, dass der Tunnelübergang eine sehr niedrige Einschaltspannung und einen sehr

niedrigen Serienwiderstand aufweist, damit die Umwandlungseffizienz der BAL nicht beeinträchtigt wird. Die erfindungsgemäßen BAL werden auch als TJ-BAL bezeichnet.

[0016] Neben der Verringerung bzw. Vermeidung der ansonsten an der p-seitigen Halbleiter-Metall-Grenzfläche ausbildenden thermischen Barriere bietet dieser Ansatz noch weitere Vorteile. Die hohe elektrische Leitfähigkeit der hochdotierten n-Kontakt- und TJ-Schichten kann zu einem sehr geringen Serienwiderstand zwischen der aktiven Zone und dem episeitigen Kontakt, insbesondere in vertikalen Strukturen mit dünnen p-seitigen Wellenleiter- und Mantelschichten wie beim ETAS-Design (ETAS - Extreme Triple Asymmetric Structure) führen. Der niedrige Serienwiderstand führt zu einer höheren Umwandlungseffizienz, insbesondere bei höheren Stromstärken (Crump, P. et al., Efficient High-Power Laser Diodes, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 19, no. 4 (2013)). Darüber hinaus sind die flächig ausgebildeten TJ-Schichten so hoch dotiert, dass sie zu einem Äquipotenzial tendieren, was bedeutet, dass auftretende Spannungsunterschiede zwischen unterschiedlichen Bereichen des Laserchips nicht aufrechterhalten werden können und sich unmittelbar ausgleichen. Der niedrige epi-seitige Widerstand und das Vorhandensein eines Äquipotenzials haben den Vorteil, dass sie das räumliche Lochbrennen (engl. „spatial hole burning“) reduzieren und laterale Moden höherer Ordnung unterdrücken, wodurch die Strahlqualität, die Ausgangsleistung und die Umwandlungseffizienz noch zusätzlich verbessert werden (Zeghuzi, A. et al., Traveling wave analysis of non-thermal far-field blooming in high-power broad-area lasers, IEEE J. Quantum Electron., vol. 55, no. 2 (2019) & Zeghuzi, A. et al., Influence of non-linear effects on the characteristics of pulsed high-power broad-area distributed Bragg reflector lasers, Opt. Quant. Electron., vol. 50, no. 88 (2018)).

[0017] Ein weiterer Vorteil des sehr niedrigen spezifischen Widerstandes von hoch n-dotierten p-seitigen Halbleiterschichten und des Äquipotentials ist, dass die Dicke der p-seitigen n-Kontaktschicht, die über dem p-n-Tunnelübergang aufgewachsen ist, deutlich erhöht werden kann, ohne dass sich der elektrische Widerstand wesentlich verschlechtert. Dadurch kann die aktive Zone in Strukturen mit einer dünnen p-Seite vor prozess- und bauartbedingten mechanischen Spannungen geschützt werden, welche die Polarisationsreinheit, die Ausgangsleistung und die Lebensdauer des Bauelements beeinträchtigen und zu unerwünschter Wellenleitung führen können, die wiederum die Strahlqualität verringert.

[0018] Vorzugsweise umfasst der p-n-Tunnelübergang eine auf dem p-dotierten Halbleitermaterial angeordnete p⁺-Tunnelschicht und eine darauf ange-

ordnete n⁺-Tunnelschicht. Durch die hohe Dotierung der beiden Tunnelschichten des p-n-Tunnelübergangs können die Ladungsträger durch den an der Grenze zwischen der mindestens eine p-seitige n-dotierte Zwischenschicht und dem p-dotierten Halbleitermaterial ausgebildeten umgekehrt vorgespannten p-n-Übergang tunneln, so dass der elektrische Widerstand bei der Ladungsträgerinjektion trotzdem gering bleibt. Die Dotierungskonzentration der n- und p-dotierten Schichten des p-n-Tunnelübergangs ist vorzugsweise $N_{D,A} \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (übliche Dotierungskonzentration der Umgebung etwa bis 10^{18} cm^{-3}).

[0019] Vorzugsweise ist der p-n-Tunnelübergang auf einer p-dotierten Sub-Kontaktschicht (p-Sub-Kontaktschicht) des p-dotierten Halbleitermaterials angeordnet. Die p-Sub-Kontaktschicht entspricht im Wesentlichen der p-Kontaktschicht im Stand der Technik. Auf der p-Sub-Kontaktschicht ist erfindungsgemäß jedoch kein Metallkontakt angeordnet, sondern dieser ist durch die mindestens eine n-dotierte Zwischenschicht von der p-Sub-Kontaktschicht getrennt. Die p-Sub-Kontaktschicht lässt sich von der darunter angeordneten p-Mantelschicht entweder durch das Halbleitermaterial bzw. dessen Zusammensetzung oder durch eine Unstetigkeit im Verlauf der Brechzahl / des Brechzahlgradienten an der Schichtgrenze unterscheiden.

[0020] In einer nicht von den Ansprüchen umfassten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist der p-n-Tunnelübergang auf einer p-dotierten Mantelschicht des p-dotierten Halbleitermaterials angeordnet. In diesem Fall ist keine p-Sub-Kontaktschicht zwischen der p-dotierten Mantelschicht und dem p-n-Tunnelübergang angeordnet. Bevorzugt ist eine n-dotierte Mantelschicht auf dem p-n-Tunnelübergang angeordnet. Dies bedeutet, die p-seitige Mantelschicht umfasst einen p-dotierten und einen n-dotierten Bereich, zwischen denen der p-n-Tunnelübergang angeordnet ist. Da die in der Wellenleiterschicht geführten optischen Moden sich auch bis in die Mantelschichten erstrecken, bedeutet dies, dass die optischen Moden sich p-seitig über den p-n-Tunnelübergang hinaus bis in die p-seitige n-dotierte Mantelschicht hinein erstrecken können. Eine sich eventuell daran anschließende Kontaktschicht nimmt hingegen nicht mehr wesentlich an der Wellenführung teil.

[0021] Vorzugsweise ist über eine laterale Breite W des p-n-Tunnelübergangs eine Streifenbreite des Diodenlasers festgelegt. Durch den überall außerhalb des p-n-Tunnelübergangs entstehenden sperrenden p-n-Übergang kann über die geometrische Definition des p-n-Tunnelübergangs das Injektionsgebiet definiert werden. Somit kann über die Größe und Form des p-n-Tunnelübergangs der Strompfad festgelegt werden.

[0022] Alternativ hierzu kann der p-n-Tunnelübergang als Schicht ausgebildet sein und eine Streifenbreite des Diodenlasers wird über eine laterale Breite W einer Öffnung einer in das p-dotierte Halbleitermaterial eingebrachten n-Stromblende festgelegt. In diesem Fall hebt der p-n-Tunnelübergang die Wirkung des sperrenden p-n-Übergangs großflächig auf und eine Strukturierung einzelner Streifen muss somit auf anderem Wege erfolgen. Die vorgeschlagenen n-Stromblende sind im Stand der Technik zur Begrenzung des Stromflusses hinreichend bekannt. Über die Größe und Form der Öffnung der n-Stromblende (Blendenöffnung) kann somit vollkommen analog zur voranstehend beschriebenen Ausführungsform der Strompfad festgelegt werden. Die n-Stromblende weist bevorzugt eine Gesamtdicke von kleiner als 100 nm auf, wobei die Dotierungskonzentration der n-Stromblende vorzugsweise $N_D \geq 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ist.

[0023] Wenn der p-n-Tunnelübergang als Schicht ausgebildet ist, kann die Streifenbreite des Diodenlasers anstatt über eine n-Stromblende auch über eine laterale Breite W eines Bereichs zwischen zwei benachbarten Tiefenimplantationsgebieten (z. B. mittels Ionenimplantation) festgelegt werden. Durch die Tiefenimplantation kann der Widerstand in den behandelten Gebieten so stark erhöht werden, dass ein Stromfluss effektiv nur noch über die nicht tiefenimplantierten Bereiche erfolgt. Bevorzugt reicht die Tiefenimplantation dabei vom Metallkontakt bis in die p-Mantelschicht hinein. Der Serienwiderstand des Tiefenimplantationsgebiets ist bevorzugt mindestens doppelt so hoch wie derjenige des umgebenden Gebiets.

[0024] Vorzugsweise basiert das Halbleitermaterial auf GaAs. Beispielsweise kann ein n-Substrat GaAs, eine n-seitige n-Mantelschicht AlGaAs, eine n-Wellenleiterschicht AlGaAs, eine p-Wellenleiterschicht AlGaAs und eine p-Mantelschicht AlGaAs umfassen. Eine p-Sub-Kontaktschicht kann GaAs umfassen. Ein p-n-Tunnelübergang kann als p⁺-Tunnelschicht p⁺-GaAs und als n⁺-Tunnelschicht n⁺-GaAs umfassen. Eine n-Kontaktschicht kann GaAs umfassen. Eine p-seitige n-Mantelschicht kann AlGaAs umfassen.

[0025] Der minimale Abstand zwischen der aktiven Schicht und dem p-n-Tunnelübergang ist kleiner als 0,5 μm . Der Vorteil eines möglichst kleinen Abstands zwischen der aktiven Schicht und dem p-n-Tunnelübergang ist die Verringerung des Serienwiderstands und des räumlichen Lochbrennens, wodurch die Lasereigenschaften (z. B. Strahlqualität, Leistung, Effizienz) verbessert werden.

[0026] In den erfindungsgemäßen TJ-BALs können verschiedene laterale Strukturierungstechniken implementiert werden, um den Strom auf die Mitte

des Bauelements (d. h. unter den Laserstreifen bzw. oberhalb der aktiven Zone) zu begrenzen. Die daraus resultierende Strombegrenzung minimiert die Verluste an den Streifenkanten und begrenzt die nachteiligen Auswirkungen der lateralen Stromausbreitung und der lateralen Ladungsträgerakkumulation (engl. „lateral carrier accumulation“, LCA) auf die Strahlqualität. Die Strombegrenzung ist bei diesen TJ-BALs wichtiger als bei Standard-BALs, da die Stromausbreitung in einer n-Kontaktschicht aufgrund der höheren Mobilität von Elektronen im Vergleich zu Löchern wesentlich stärker ist als in einer p-Kontaktschicht.

[0027] Die Restschichtdicke d_{res} zwischen der aktiven Zone und einer Stromblende ist bevorzugt kleiner als 1 μm . Durch eine möglichst geringe Restschichtdicke d_{res} kann eine nachteilige Stromaufweitung vermindert werden. Die p-seitige Gesamtdicke d_{tot} einschließlich p-n-Tunnelübergang und p-seitiger n-Kontaktschicht ist bevorzugt größer als 2 μm . Die Gesamtdicke d_{WL} der Wellenleiterschichten ist bevorzugt größer als 1 μm . Die Dicke der p-seitigen Wellenleiterschicht $d_{\text{p-WL}}$ ist bevorzugt kleiner als 350 nm. Eine Streifenbreite W ist bevorzugt größer oder gleich 50 μm . Die Resonatorlänge L ist bevorzugt größer oder gleich 3 mm.

[0028] Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den in den jeweiligen Unteransprüchen genannten Merkmalen.

[0029] Die verschiedenen in dieser Anmeldung genannten Ausführungsformen der Erfindung sind, sofern im Einzelfall nicht anders ausgeführt, mit Vorteil miteinander kombinierbar.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0030] Die Erfindung wird nachfolgend in Ausführungsbeispielen anhand der zugehörigen Zeichnung erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine beispielhafte schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode,

Fig. 2 eine beispielhafte schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode,

Fig. 3 eine beispielhafte schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode,

Fig. 4 eine beispielhafte schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode

Fig. 5 eine beispielhafte schematische Darstellung einer fünften Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode, und

Fig. 6 eine beispielhafte schematische Darstellung einer sechsten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode.

Ausführliche Beschreibung der Zeichnungen

[0031] **Fig. 1** zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode. Die gezeigte Laserdiode umfasst eine zwischen einem n-dotierten Halbleitermaterial (n-Substrat 10, n-seitige n-Mantelschicht 12, n-Wellenleiterschicht 14) und einem p-dotierten Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32, p-Sub-Kontaktschicht 34) ausgebildete aktive Schicht 20, wobei die aktive Schicht 20 entlang einer Längsachse eine aktive Zone zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung ausbildet; wobei zwischen einem aufliegenden p-seitigen Metallkontakt 52 und dem p-dotierten Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32, p-Sub-Kontaktschicht 34) eine n-Kontaktschicht 50 angeordnet ist, wobei in der n-Kontaktschicht 50 im Bereich oberhalb der aktiven Zone ein unmittelbar an das p-dotierte Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32, p-Sub-Kontaktschicht 34) angrenzender p-n-Tunnelübergang 40 ausgebildet ist. Der gezeigte p-n-Tunnelübergang 40 umfasst eine auf dem p-dotierten Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32, p-Sub-Kontaktschicht 34) angeordnete p⁺-Tunnelschicht 42 und eine darauf angeordnete n⁺-Tunnelschicht 44. Der p-n-Tunnelübergang 40 ist bei dieser Ausführungsform auf einer p-dotierten Sub-Kontaktschicht 34 des p-dotierten Halbleitermaterials (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32, p-Sub-Kontaktschicht 34) angeordnet. Über eine laterale Breite W des p-n-Tunnelübergangs 40 ist eine Streifenbreite des Diodenlasers festgelegt. Die Restschichtdicke d_{res} ist als der minimale Abstand zwischen der aktiven Schicht 20 und dem p-n-Tunnelübergang 40 definiert.

[0032] Diese Ausführungsform der Erfindung kann über ein zweistufiges Epitaxieverfahren mit einem dazwischen liegenden Ätzschritt bereitgestellt werden. In einem ersten Wachstumsschritt kann die Struktur bis zum p-n-Tunnelübergang 40 aufgewachsen werden. Anschließend können die Tunnelübergangsschichten (42, 44) selektiv außerhalb des Streifens weggeätzt werden. Nach einem anschließenden epitaktischen Aufwachsen der n-Kontaktschicht 50 entsteht in den äußeren Bereichen der Struktur ein p-n-Übergang in Sperrrichtung, während der zentrale p-n-Tunnelübergang 40 den Stromfluss ermöglicht. Dies ist ein bekanntes Verfahren für die Strom- und optische Begrenzung in oberflächenemittierenden Lasern mit vertikalem Resonator (VCSELs).

[0033] **Fig. 2** zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode. Der grundlegende Schichtaufbau entspricht der in **Fig. 1** gezeigten Anordnung, die einzelnen Bezugszeichen und deren jeweilige Zuordnung gelten daher entsprechend. Im Gegensatz zur dort gezeigten Ausführungsform ist hierbei der p-n-Tunnelübergang 40 jedoch als Schicht ausgebildet und die Streifenbreite des Diodenlasers wird über eine laterale Breite W einer Öffnung einer in das p-dotierte Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32, p-Sub-Kontaktschicht 34) eingebrachten n-Stromblende 60 festgelegt. Insbesondere ist im gezeigten Beispiel die n-Stromblende 60 innerhalb der p-Sub-Kontaktschicht 34 angeordnet. Die Restschichtdicke d_{res} ist bei dieser Ausführungsform als der minimale Abstand zwischen der aktiven Schicht 20 und der Stromblende 60 definiert.

[0034] Bei dieser Ausführungsform der Erfindung kann der Stromeinschluss ebenfalls durch einen 2-Schritt-Epitaxieprozess mit einem dazwischen liegenden Ätzschritt erreicht werden. Die Stromsperre an den Bauteilkanten wird hierbei durch die sogenannte (verbesserte) selbstausrichtende laterale Struktur (engl. „(enhanced) self-aligned lateral structure“) unabhängig vom Tunnelübergang realisiert. Dazu können hoch n-dotierte Schichten in der Nähe der Unterseite der p-seitigen Kontaktschicht (d. h. der p-Sub-Kontaktschicht 34) integriert werden, wodurch ein sperrender p-n-Übergang mit umgekehrter Vorspannung entsteht. Der erste Wachstumsschritt endet nach dem Aufwachsen dieser Schichten. Anschließend können diese selektiv in der Mitte weggeätzt werden, um eine entsprechende Öffnung für den Stromfluss zu schaffen. Der Rest der p-Sub-Kontaktschicht 34 sowie der p-n-Tunnelübergang 40 und die n-Kontaktschicht 50 können anschließend über der strukturierten n-Stromblende 60 aufgewachsen werden.

[0035] **Fig. 3** zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode. Der grundlegende Schichtaufbau entspricht der in **Fig. 2** gezeigten Anordnung, die einzelnen Bezugszeichen und deren jeweilige Zuordnung gelten daher entsprechend. Der p-n-Tunnelübergang 40 ist hierbei ebenfalls als Schicht ausgebildet. Im Gegensatz zur dort gezeigten Ausführungsform wird über eine laterale Breite W eines Bereichs zwischen zwei benachbarten Tiefenimplantationsgebieten 70 eine Streifenbreite W des Diodenlasers festgelegt. Insbesondere reichen im gezeigten Beispiel die beiden randständigen Tiefenimplantationsgebiete 70 vom Metallkontakt 52 bis in die p-Mantelschicht 32 hinein. Da durch die Tiefenimplantationsgebiete 70 ebenfalls eine Öffnung für den Stromfluss geschaffen werden kann, ist die zusätzliche Integration einer n-Strom-

blende 60 nicht erforderlich. Die Restschichtdicke d_{res} ist bei dieser Ausführungsform als der minimale Abstand zwischen der aktiven Schicht 20 und der Unterseite der Tiefenimplantationsgebiete 70 definiert.

[0036] Im Gegensatz zu den voranstehend beschriebenen Ausführungsbeispielen kann diese Ausführungsform über ein einstufiges epitaktisches Wachstum realisiert werden, was die Komplexität des Herstellungsprozesses und somit dessen Kosten reduziert. Die Strombegrenzung erfolgt beispielsweise durch eine tiefe Ionenimplantation mit hoher Energie an den Kanten des Bauelements. Darüber kann der Stromfluss durch Erhöhung des Serienwiderstands und Einführung von Punktdéfekten, an denen Ladungsträger schnell rekombinieren, verhindert werden. Eine tiefe Implantation durch die aktive Zone verhindert effektiv eine Stromspreizung und LCA, wodurch die Strahlqualität erheblich verbessert werden könnte, wodurch aber auch die Leistung und die Effizienz stark beeinträchtigt werden. Daher ist ein Implantationsprofil, das so zugeschnitten ist, dass es oberhalb der aktiven Zone endet (z. B. innerhalb der p-Mantelschicht), im Hinblick auf die Gesamtleistung bevorzugt.

[0037] Fig. 4 zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode. Die gezeigte Laserdiode umfasst eine zwischen einem n-dotierten Halbleitermaterial (n-Substrat 10, n-seitige n-Mantelschicht 12, n-Wellenleiterschicht 14) und einem p-dotierten Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32) ausgebildete aktive Schicht 20, wobei die aktive Schicht 20 entlang einer Längsachse eine aktive Zone zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung ausbildet; wobei zwischen einem aufliegenden p-seitigen Metallkontakt 52 und dem p-dotierten Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32) eine n-Kontaktschicht 50 und eine p-seitige n-Mantelschicht 54 angeordnet sind, wobei in der p-seitigen n-Mantelschicht 54 im Bereich oberhalb der aktiven Zone ein unmittelbar an das p-dotierte Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32) angrenzender p-n-Tunnelübergang 40 ausgebildet ist. Der gezeigte p-n-Tunnelübergang 40 umfasst eine auf dem p-dotierten Halbleitermaterial (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32) angeordnete p⁺-Tunnelschicht 42 und eine darauf angeordnete n⁺-Tunnelschicht 44. Der p-n-Tunnelübergang 40 ist bei dieser Ausführungsform auf einer p-dotierten Mantelschicht 32 des p-dotierten Halbleitermaterials (p-Wellenleiterschicht 30, p-Mantelschicht 32) angeordnet. Zusätzlich ist eine n-dotierte Mantelschicht 54 auf dem p-n-Tunnelübergang 40 ausgebildet. Über eine laterale Breite W des p-n-Tunnelübergangs 40 ist eine Streifenbreite des Diodenlasers festgelegt. Die Restschichtdicke d_{res} ist als der minimale Abstand zwi-

schen der aktiven Schicht 20 und dem p-n-Tunnelübergang 40 definiert.

[0038] Der wesentliche Unterschied zur in Fig. 1 gezeigten Ausführungsform besteht somit darin, dass der p-n-Tunnelübergang 40 auf der p-dotierten Mantelschicht 32 und somit näher an der aktiven Zone angeordnet ist. Auf die Integration einer zusätzlichen p-Sub-Kontaktschicht 34 kann verzichtet werden. Durch dieses Heranbringen des p-n-Tunnelübergangs 40 an die aktive Zone wird die Herstellung zwar technologisch komplexer (insbesondere bei den Varianten mit 2-Schritt-Epitaxiewachstum), es können aber deutliche Leistungsvorteile erzielt werden.

[0039] Fig. 5 zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung einer fünften Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode. Der grundlegende Schichtaufbau entspricht der in Fig. 4 gezeigten Anordnung, die einzelnen Bezugszeichen und deren jeweilige Zuordnung gelten daher entsprechend. Das eigentliche Funktionsprinzip sowie ein mögliches Verfahren zur Herstellung können hingegen der Fig. 2 entnommen werden. Diese Ausführungsform unterscheidet sich von der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform lediglich durch die Lage des Tunnelübergangs 40 und das Fehlen einer p-Sub-Kontaktschicht 34.

[0040] Fig. 6 zeigt eine beispielhafte schematische Darstellung einer sechsten Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Laserdiode. Der grundlegende Schichtaufbau entspricht der in Fig. 5 gezeigten Anordnung, die einzelnen Bezugszeichen und deren jeweilige Zuordnung gelten daher entsprechend. Das eigentliche Funktionsprinzip sowie ein mögliches Verfahren zur Herstellung können hingegen der Fig. 3 entnommen werden. Diese Ausführungsform unterscheidet sich von der in Fig. 3 gezeigten Ausführungsform ebenfalls lediglich durch die Lage des Tunnelübergangs 40 und das Fehlen einer p-Sub-Kontaktschicht 34.

Bezugszeichenliste

10	n-Substrat (z. B. GaAs)
12	n-Mantelschicht (n-seitig, z. B. AlGaAs)
14	n-Wellenleiterschicht (z. B. AlGaAs)
20	aktive Schicht (umfasst aktive Zone)
30	p-Wellenleiterschicht (z. B. AlGaAs)
32	p-Mantelschicht (z. B. AlGaAs)
34	p-Sub-Kontaktschicht (z. B. GaAs)
40	p-n-Tunnelübergang
42	p ⁺ -Tunnelschicht (z. B. p ⁺ -GaAs)
44	n ⁺ -Tunnelschicht (z. B. n ⁺ -GaAs)

50	n-(Sub-)Kontaktschicht (p-seitig, z. B. GaAs)
52	Metallkontakt (p-seitig)
54	n-Mantelschicht (p-seitig, z. B. AlGaAs)
60	n-Stromblende
70	Tiefenimplantationsgebiet
W	Streifenbreite
d_{res}	Restschichtdicke

5. Breitstreifen-Diodenlaser nach Anspruch 1 oder 2, wobei der p-n-Tunnelübergang (40) als Schicht ausgebildet ist und über eine laterale Breite W eines Bereichs zwischen zwei benachbarten Tiefenimplantationsgebieten (70) eine Streifenbreite des Diodenlasers festgelegt ist.

6. Breitstreifen-Diodenlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Halbleitermaterial auf GaAs basiert.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Patentansprüche

1. Breitstreifen-Diodenlaser, umfassend:

eine zwischen einem n-dotierten Halbleitermaterial (10, 12, 14) und einem p-dotierten Halbleitermaterial (30, 32, 34) ausgebildete aktive Schicht (20), wobei die aktive Schicht (20) entlang einer Längsachse eine aktive Zone zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung ausbildet;

wobei zwischen einem aufliegenden p-seitigen Metallkontakt (52) und dem p-dotierten Halbleitermaterial (30, 32, 34) mindestens eine n-dotierte Zwischenschicht (50, 54) angeordnet ist, wobei in der mindestens einen n-dotierten Zwischenschicht (50, 54) im Bereich oberhalb der aktiven Zone ein unmittelbar an das p-dotierte Halbleitermaterial (30, 32, 34) angrenzender p-n-Tunnelübergang (40) ausgebildet ist;

dadurch gekennzeichnet, dass

eine Restschichtdicke d_{res} zwischen der aktiven Schicht (20) und dem p-n-Tunnelübergang (40) kleiner als $0,5 \mu\text{m}$ ist;

eine n-dotierte Mantelschicht (54) auf dem p-n-Tunnelübergang (40) angeordnet ist, und

der p-n-Tunnelübergang (40) auf einer p-dotierten Mantelschicht (32) des p-dotierten Halbleitermaterials (30, 32, 34) angeordnet ist und eine n-dotierte Kontaktschicht (50) auf der n-dotierten Mantelschicht (54) aufliegt.

2. Breitstreifen-Diodenlaser nach Anspruch 1, wobei der p-n-Tunnelübergang (40) eine auf dem p-dotierten Halbleitermaterial (30, 32, 34) angeordnete p⁺-Tunnelschicht (42) und eine darauf angeordnete n⁺-Tunnelschicht (44) umfasst.

3. Breitstreifen-Diodenlaser nach Anspruch 1 oder 2, wobei über eine laterale Breite W des p-n-Tunnelübergangs (40) eine Streifenbreite des Diodenlasers festgelegt ist.

4. Breitstreifen-Diodenlaser nach Anspruch 1 oder 2, wobei der p-n-Tunnelübergang (40) als Schicht ausgebildet ist und über eine laterale Breite W einer Öffnung einer in das p-dotierte Halbleitermaterial (30, 32, 34) eingebrachten n-Stromblende (60) eine Streifenbreite des Diodenlasers festgelegt ist.

Anhängende Zeichnungen

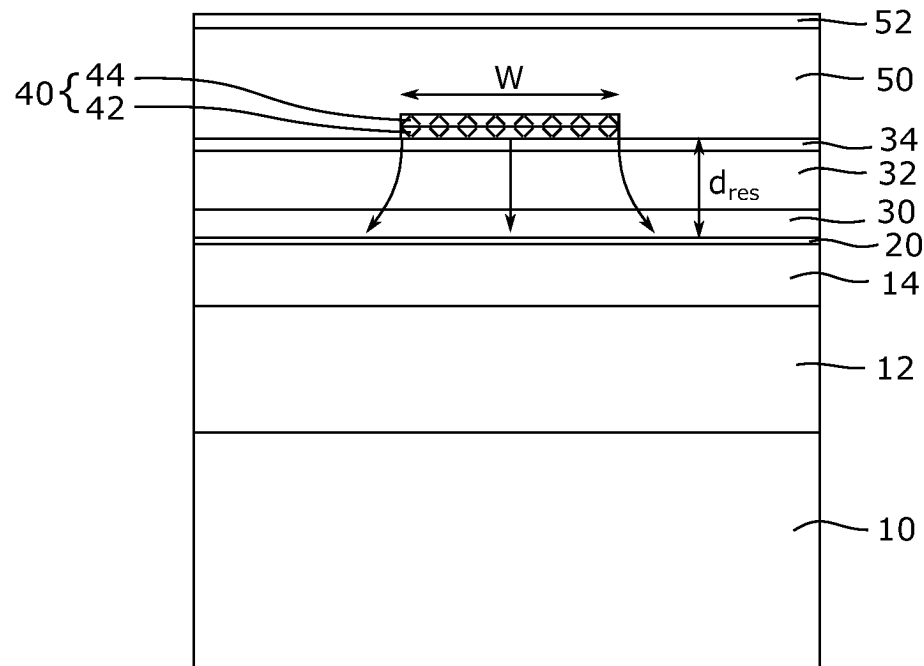


FIG. 1

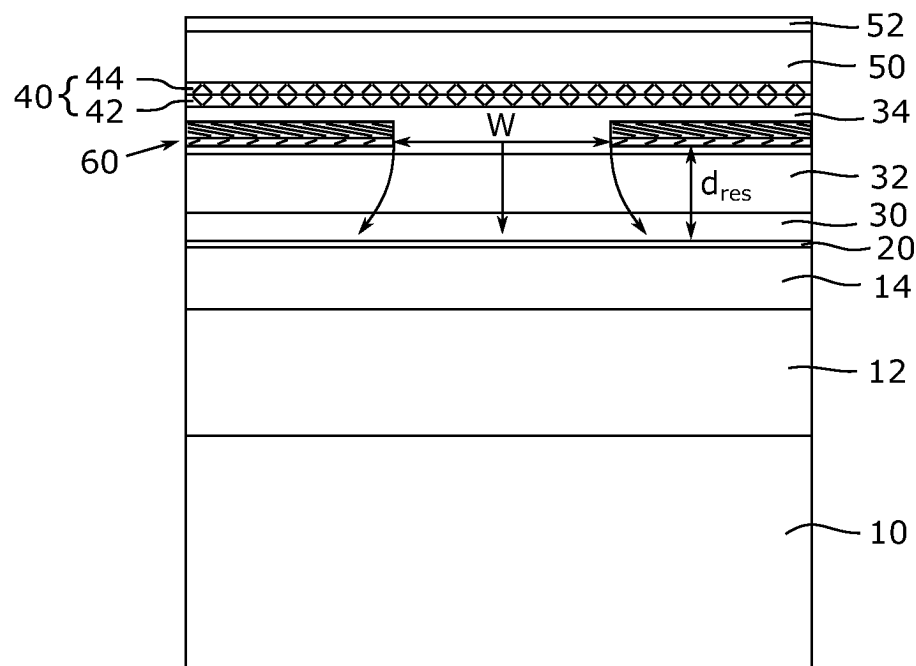


FIG. 2

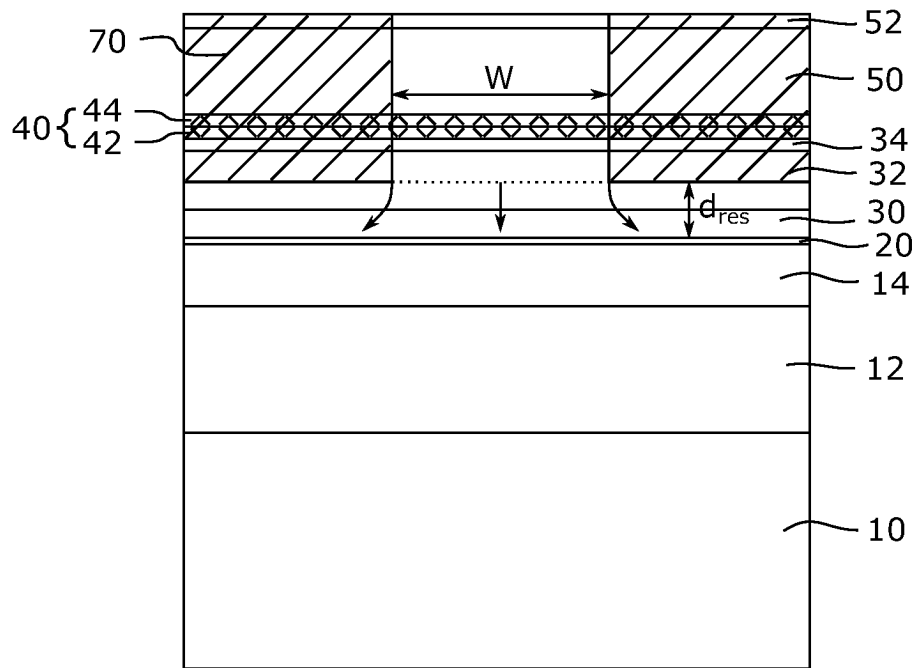


FIG. 3

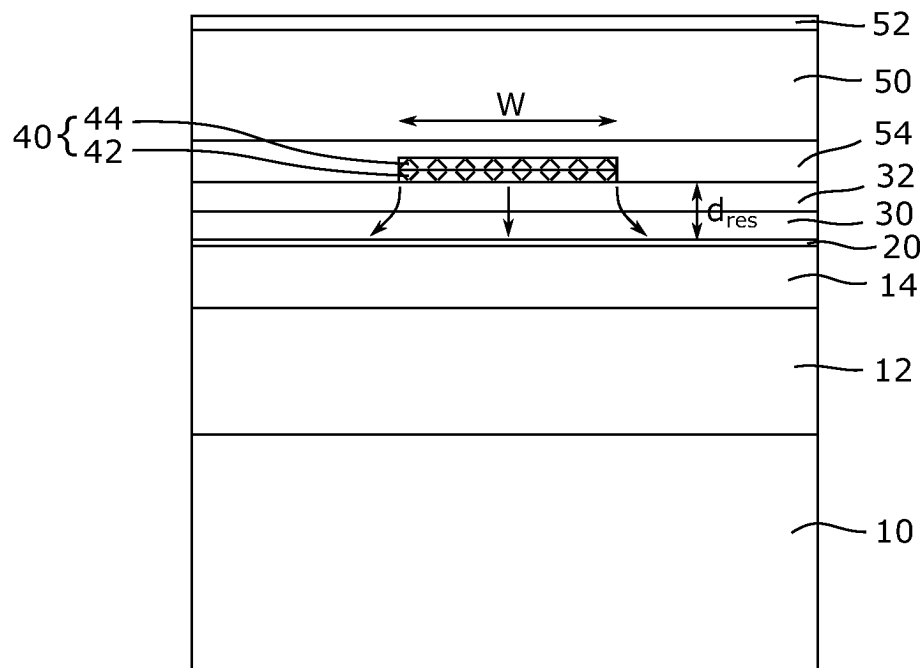


FIG. 4

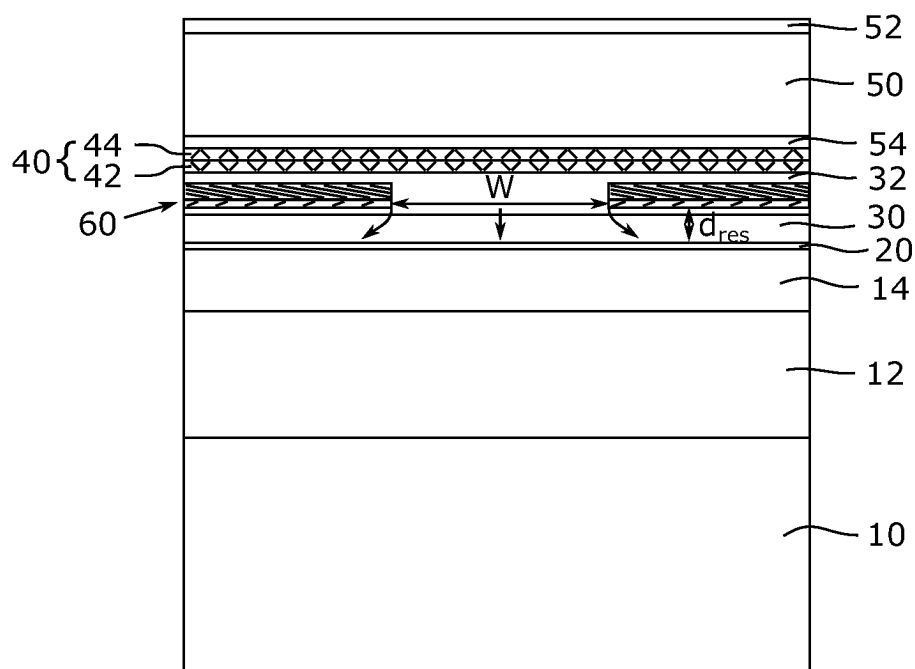


FIG. 5

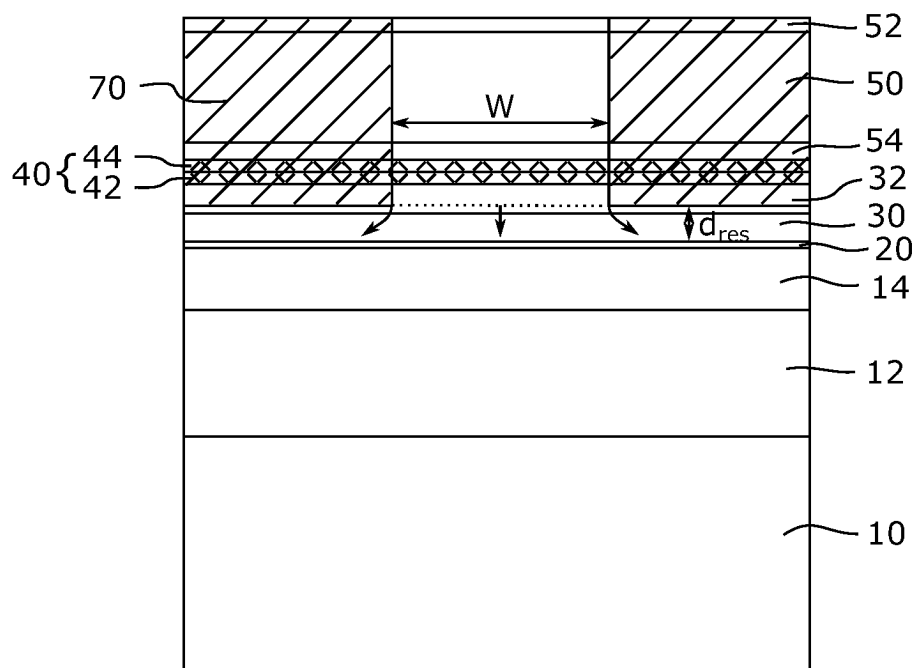


FIG. 6