



(10) **DE 10 2020 108 941 B4** 2022.05.25

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2020 108 941.4**  
(22) Anmeldetag: **31.03.2020**  
(43) Offenlegungstag: **30.09.2021**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **25.05.2022**

(51) Int Cl.: **H01S 5/24 (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, 10179 Berlin, DE**

(72) Erfinder:  
**Zeghuzi, Anissa, 10245 Berlin, DE; Koester, Jan-  
Philipp, 10409 Berlin, DE; Wenzel, Hans, Dr., 12355  
Berlin, DE; Christopher, Heike, 12524 Berlin, DE;  
Knigge, Andrea, Dr., 15711 Königs Wusterhausen,  
DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

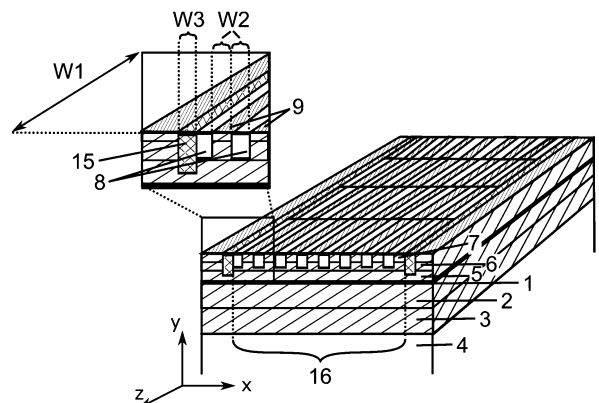
DE	10 2010 040 767	A1
DE	10 2016 113 071	A1
DE	10 2017 113 389	A1
US	2009 / 0 268 761	A1
US	4 811 354	A

**RADZIUNAS, Mindaugas [u.a.]: Intrinsic beam  
shaping mechanism in spatially modulated broad  
area semiconductor amplifiers. In: Applied  
Physics Letters (APL), Vol. 103, 2013, No. 13,  
Artikelnummer: 132101 (5 S.). - ISSN 0003-6951  
(P); 1077-3118 (E). DOI: 10.1063/1.4821251. URL:  
<http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4821251>  
[abgerufen am 2020-04-20]**

(54) Bezeichnung: **Diodenlaser mit verringerter Strahldivergenz**

(57) Hauptanspruch: Diodenlaser, umfassend:  
a) erste n-leitend ausgebildete Funktionsschichten (2, 3);  
b) eine aktive Schicht (1), die zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung geeignet ist und die auf den ersten Funktionsschichten (2, 3) angeordnet ist;  
c) zweite p-leitend ausgebildete Funktionsschichten (5, 6), die auf der aktiven Schicht (1) angeordnet sind;  
d) einen p-Kontaktbereich (9), wobei der p-Kontaktbereich (9) zur Ausbildung einer Talbot-Filtersektion eine longitudinal-laterale Strukturierung im Bereich eines Injektionsgebiets (16) umfasst, wobei durch die Strukturierung einzelne p-Kontakte ausgebildet werden; und  
e) mindestens eine Facette zur Auskopplung elektromagnetischer Strahlung entlang einer zweiten Achse (Z), wobei die ersten Funktionsschichten (2, 3), die aktive Schicht (1) und die zweiten Funktionsschichten (5, 6) entlang einer dritten Achse (Y) gestapelt sind;  
f) wobei die longitudinal-laterale Strukturierung zwischen den durch die Strukturierung ausgebildeten einzelnen p-Kontakten des p-Kontaktbereichs (9) indexführende Gräben (8, 15) mit einem niedrigeren Brechungsindex im Vergleich zu dem Brechungsindex der zweiten p-leitend ausgebildeten Funktionsschichten (5, 6) umfasst; und  
g) wobei die indexführenden Gräben (8, 15) entlang der ersten Achse (X) erste indexführende Gräben (8) und zweite indexführende Gräben (15) umfassen, wobei die

zweiten indexführenden Gräben (15) entlang der ersten Achse (X) die jeweiligen äußersten indexführenden Gräben (15) darstellen.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft einen Diodenlaser mit verringerter Strahldivergenz. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung einen Diodenlaser mit verringerter Strahldivergenz mittels einer Modulation des realen Brechungsindex des Diodenlasers.

### Stand der Technik

**[0002]** Seit der Erfindung der Diodenlaser wurden verschiedene Konzepte vorgeschlagen, um die hohe Ausgangsleistung von Breitstreifenlasern mit der guten Strahlqualität von Rippenwellenleiter-Lasern zu vereinen. Die Grundidee aller dieser Ansätze ist das Unterdrücken ungewünschter lateraler Lasermoden.

**[0003]** Ein Ansatz dies zu erreichen sind Streifenlaser. Sie kennzeichnen sich durch eine periodische Modulation des Kontaktes und Brechungsindex in eine Richtung. Die Supermoden eines solchen Systems können je nachdem, ob die Intensitätsmaxima mit den Indexmaxima oder Indexminima übereinstimmen, in „evanescent-wave type“ (Indexführung - siehe hierzu das laterale Profil der Feldamplitude in **Abb. 3(b)** und **Abb. 3(c)**) oder „leaky-wave type“ (Anti-Indexführung - siehe hierzu das laterale Profil der Feldamplitude in **Abb. 3(d)** und **Abb. 3(e)**) eingeteilt werden. Stimmt die Phase aller Amplitudenpeaks überein, spricht man vom In-Phase Betrieb (siehe **Abb. 3(b)** und **Abb. 3(d)**). Das resultierende Fernfeld besitzt eine beugungslimitierte Strahlkeule, sowie Seitenpeaks bei Fernfeldwinkeln von  $\pm\varphi_0 = \lambda_0/\Lambda_x$  (siehe **Abb. 3(f)**), wobei  $\lambda_0$  die Vakuumwellenlänge und  $\Lambda_x$  die volle Periode der lateralen Indexmodulation ist. Besitzen die Amplitudenpeaks einen  $\pi$ -Phasenversatz zueinander, spricht man vom Außer-Phase Betrieb (siehe **Abb. 3(c)** und **Abb. 3(e)**). Das entsprechende Fernfeld zeigt eine hohe Divergenz und besitzt zwei ausgeprägte Intensitätspeaks bei  $\pm\varphi \approx \frac{\lambda_0}{2\Lambda_x}$  (siehe **Abb. 3(g)**),

wobei  $\lambda_0$  die Vakuumwellenlänge und  $\Lambda_x$  die volle Periode der lateralen Indexmodulation ist.

**[0004]** Das Beugungsbild eines Gitters reproduziert sich bei paraxialer Propagation in einem bestimmten longitudinalen Abstand, Talbot-Länge genannt, wenn die Wellenlänge viel kleiner als der Abstand des Gitters ist. Des Weiteren wiederholt sich das Beugungsbild in einem Abstand der halben Talbot-Länge aber lateral um die halbe Länge der Gitterbreite verschoben.

**[0005]** Dieser Beugungseffekt kann in kontaktstrukturierten Lasern ausgenutzt werden, indem freilaufende Sektionen in die Kavität eingebracht werden, in denen es keine laterale Modulation des Gewinns

oder realen Brechungsindex gibt. Für diese als Talbot-Filter Sektionen bezeichneten Bereiche muss folgendes Verhältnis gelten:

$$\frac{2(\Lambda_x)^2 n_{\text{eff}}}{\lambda_0} = \Lambda_z, \quad (1)$$

wobei  $\Lambda_z = 2W_1$  die volle Periode in Propagationsrichtung ist, welche der Talbot-Länge entspricht,  $W_1$  ist die Länge der freilaufenden Talbot-Filter Sektion,  $\Lambda_x = 2W_2$  die Periode in lateraler Richtung (siehe **Abb. 5**),  $W_2$  die laterale Breite der kontaktstrukturierten Elemente,  $n_{\text{eff}}$  ist der effektive Brechungsindex und  $\lambda_0$  die Vakuum-Wellenlänge.

**[0006]** Laser, die den Talbot Effekt ausnutzen, um die In-Phase Mode zu unterstützen wurden schon früh in „P. D. V. Eijk, M. Reglat, G. Vassilieff, G. J. M. Krijnen, A. Driessen, and A. J. Mouthaan, „Analysis of the modal behavior of an antiguided diode laser array with Talbot filter,“ J. Light. Technol., vol. 9, no. 5, pp. 629–634, 1991“ vorgestellt. Diese sind anders strukturiert als die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Erzeugung von Laserstrahlung und beinhalten die oben beschriebenen freilaufenden Talbot-Filter Sektionen (siehe **Abb. 5**).

**[0007]** In „H. Yang, L. J. Mawst, M. Nesnidal, J. Lopez, A. Bhattacharya, and D. Botez, „10 W near-diffraction-limited peak pulsed power from Al-free phase-locked antiguided arrays,“ Electron. Lett., vol. 33, no. 2, pp. 136-137, 1997“ wurden mit einem anti-Index geführten Laser, der einen Talbot-Filter nutzte, ein Fernfeld-Winkel mit einer vollen Halbwertsbreite von  $0.62^\circ$  mit einem Leistungsinhalt von 60% bei 10 W Ausgangsleistungen bei 15 A Pulsstrom erreicht.

**[0008]** Bei beiden genannten Arbeiten handelt es sich um Anti-Index geführte Laser. Hier stimmen die Intensitätsmaxima mit den Brechungsindex-Minima überein (siehe **Abb. 3(d)**) und die Anregung der In-Phase Supermode ist aufgrund der lateralen Gewinnverteilung leichter gegenüber Index-geführten Lasern. Jedoch zeichnen sich Anti-Index geführte Laser durch hohe Verluste aus und müssen in einem vergleichsweise aufwendigen Herstellungsprozess gewachsen werden, da hier eine Zwei-Schritt Epitaxie notwendig ist. Des Weiteren entstehen bei der Anregung der gewünschten In-Phase Mode wie oben schon erwähnt Seitenpeaks bei Fernfeldwinkeln von  $\pm\varphi_0 = \lambda_0/\Lambda_x$  (siehe **Abb. 3(f)**), welche den Leistungsinhalt der zentralen Lobe beschränkt.

**[0009]** In „K. Staliunas, R. Herrero, and R. Vilaseca, „Subdiffraction and spatial filtering due to periodic spatial modulation of the gain-loss profile,“ Phys. Rev. A, vol. 80, no. 1, p. 013821, 2009“ wurde gezeigt, dass eine longitudinal-laterale Gewinn/Verlust Modulation in der Art von **Fig. 6** zu einem anisotropen Gewinn führt. In „M. Radziunas, M. Botey, R.

Herrero, and K. Staliunas, „Intrinsic Beam Shaping Mechanism in Spatially Modulated Broad Area Semiconductor Amplifiers,“ Appl. Phys. Lett., vol. 103, no. 13, p. 132101, 2013“ wurde durch Simulationen gezeigt, dass dieses Konzept für Verstärker zu einem schmalen Fernfeld führen kann, wobei die entstehenden Seitenpeaks unterdrückt werden. Als Anwendung für Laser war dieses Konzept bisher nicht erfolgreich, da durch räumliches Lochbrennen die außer-Phase Supermode angeregt wird, sodass zwei Intensitäts-Peaks im Fernfeld entstehen und die Strahlqualität schlecht ist (siehe Fig. 3g).

**[0010]** In DE 10 2016 113 071 A1 wird eine Halbleiterlaserdiode umfassend eine Halbleiterschichtenfolge mit einer aktiven Schicht offenbart, wobei die Halbleiterschichtenfolge eine Grabenstruktur mit zumindest einem Graben oder einer Mehrzahl von Gräben zumindest auf einer Seite lateral neben dem aktiven Bereich aufweist. Aus DE 10 2010 040 767 A1 ist ein Halbleiterbauelement mit einem durch seitliche Gräben ausgebildeten Rippenwellenleiter bekannt. US 2009/0268761 A1 beschreibt ein Verfahren zur Modensteuerung in wellenleiterbasierten Multimode-Halbleiterlasern durch Bereitstellung und Unterstützung einer Talbot-Mode.

#### Offenbarung der Erfindung

**[0011]** Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Diodenlaser anzugeben, die die vorgenannten Nachteile überwindet.

**[0012]** Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß durch die Merkmale des unabhängigen Patentanspruchs 1 gelöst. Zweckmäßige Ausgestaltungen der Erfindung sind in den jeweiligen Unteransprüchen enthalten.

**[0013]** Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung umfasst der erfindungsgemäße Diodenlaser erste n-leitend ausgebildete Funktionsschichten; eine aktive Schicht, die zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung geeignet ist und die auf den ersten Funktionsschichten angeordnet ist; zweite p-leitend ausgebildete Funktionsschichten, die auf der aktiven Schicht angeordnet sind; einen p-Kontaktbereich, wobei der p-Kontaktbereich zur Ausbildung einer Talbot-Filtersektion eine longitudinal-laterale Strukturierung im Bereich eines Injektionsgebiets umfasst, wobei durch die Strukturierung einzelne p-Kontakte ausgebildet werden; und mindestens eine Facette zur Auskopplung elektromagnetischer Strahlung entlang einer zweiten Achse, wobei die ersten Funktionsschichten, die aktive Schicht und die zweiten Funktionsschichten entlang einer dritten Achse gestapelt sind; wobei die longitudinal-laterale Strukturierung zwischen den durch die Strukturierung ausgebildeten einzelnen p-Kontakten des p-Kontaktbereichs indexführende Gräben mit einem niedrigeren

Brechungsindex im Vergleich zu dem Brechungsindex der zweiten p-leitend ausgebildeten Funktionsschichten umfasst; und wobei die indexführenden Gräben entlang der ersten Achse erste indexführende Gräben und zweiten indexführende Gräben umfassen, wobei die zweiten indexführenden Gräben entlang der ersten Achse die jeweiligen äußersten indexführenden Gräben darstellen.

**[0014]** Die Idee der vorliegenden Erfindung ist es, durch eine gezielte Modulation des realen Brechungsindex des Diodenlasers eine Strahldivergenz im Fernfeld zu verringern. Hierzu wird ein Bereich des Diodenlasers, Injektionsgebiet genannt, mit unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes strukturiert. Hierbei kann die Wahl des Materials den effektiven Brechungsindex an der jeweiligen longitudinal-lateralen Position beeinflussen.

**[0015]** Die Modulation des Brechungsindex macht es möglich, eine Supermode anzuregen, deren Feld unter den Kontakten dieselbe Phase hat (In-Phase Mode) ist.

**[0016]** Licht, welches unter den Bereichen eines niedrigeren Brechungsindex propagiert, erhält nach einem Durchgang der indexführenden Gräben einen Phasenversatz von  $\pi$ . Somit wird die In-phase Mode unterstützt und das Ausbilden der außer-Phase Mode verhindert. Folglich kann man auf diesem Wege im Gegensatz zu konventionellen Breitstreifen-Diodenlasern und insbesondere Streifenlasern das Laserfeld auch bei hohen Leistungen so stabilisieren, dass nur eine zentrale Strahlkeule im Fernfeld zurückbleibt.

**[0017]** Da die Ladungsträgerdichte und Temperatur und somit die Brechungsindexverteilung auch im gepulsten Betrieb bei sehr hohen Strömen vom Operationspunkt des Lasers abhängt, muss die Tiefe der indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex an den Laseroperationspunkt angepasst werden. Dabei muss folgende Phasenbedingung für den Operationspunkt erfüllt sein:

$$\Delta\varphi(x,z) = k_0 \Lambda_z / 2 \cdot (n_0(x,z) - n_1(x,z)) = \pi,$$

wobei  $n_0(x,z)$  und  $n_1(x,z)$  die realen Brechungsindexänderungen jeweils unter den Bereichen des p-Kontaktgebiets und der indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex sind.

**[0018]** Die erste Achse, die zweite Achse und die dritte Achse stehen alle senkrecht zueinander. Vorzugsweise wird die erste Achse auch laterale Achse oder laterale Richtung genannt. Vorzugsweise wird die zweite Achse auch longitudinale Achse, longitudinale Richtung oder Propagationsrichtung genannt.

Vorzugsweise wird die dritte Achse auch vertikale Achse oder vertikale Richtung genannt.

**[0019]** Die indexführenden Gräben umfassen erste indexführende Gräben und zweite indexführende Gräben, wobei die zweiten indexführenden Gräben die jeweiligen äußersten indexführenden Gräben in erster Richtung darstellen. Die ersten indexführenden Gräben dienen der Phasen Anpassung der Laserstrahlung und die zweiten indexführenden Gräben stabilisieren das Laserfeld.

**[0020]** Vorzugsweise umfassen die ersten n-leitend ausgebildeten Funktionsschichten eine n-Mantelschicht und eine n-Wellenleiterschicht, bevorzugter bestehen die ersten n-leitend ausgebildeten Funktionsschichten aus genau einer n-Mantelschicht und genau einer n-Wellenleiterschicht. Vorzugsweise hat die n-Wellenleiterschicht eine Dicke in erster Richtung von zwischen 0.1  $\mu\text{m}$  bis 6  $\mu\text{m}$ , noch bevorzugter 1  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$ . Vorzugsweise hat die n-Mantelschicht eine Dicke in erster Richtung von zwischen 0.1  $\mu\text{m}$  bis 6  $\mu\text{m}$ , noch bevorzugter 1  $\mu\text{m}$  bis 3  $\mu\text{m}$ .

**[0021]** Vorzugsweise umfassen die zweiten p-leitend ausgebildeten Funktionsschichten eine p-Mantelschicht und eine p-Wellenleiterschicht. Vorzugsweise hat die p-Wellenleiterschicht eine Dicke in erster Richtung von zwischen 0.1  $\mu\text{m}$  bis 6  $\mu\text{m}$ , noch bevorzugter 0.1  $\mu\text{m}$  bis 2  $\mu\text{m}$ . Vorzugsweise hat die p-Mantelschicht eine Dicke in erster Richtung von zwischen 0.1  $\mu\text{m}$  bis 6  $\mu\text{m}$ , noch bevorzugter 0.1  $\mu\text{m}$  bis 2  $\mu\text{m}$ . Vorzugsweise umfasst die longitudinal-laterale Strukturierung mindestens 12 indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex.

**[0022]** Vorzugsweise ist die longitudinal-laterale Strukturierung entlang der ersten Achse abwechselnd mit zueinander unterschiedlichen Brechungsindexen strukturiert.

**[0023]** Vorzugsweise ist die longitudinal-laterale Strukturierung entlang der zweiten Achse abwechselnd mit zueinander unterschiedlichen Brechungsindexen strukturiert.

**[0024]** Die abwechselnde Strukturierung verursacht die Modulation des Brechungsindexes des Diodenlasers. Die abwechselnde Strukturierung besteht aus den indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex und Bereichen der zweiten p-leitend ausgebildeten Funktionsschichten.

**[0025]** Vorzugsweise ragen die indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex entlang der dritten Achse in die p-Mantelschicht hinein oder durchdringen diese.

**[0026]** Vorzugsweise ragen die indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex ent-

lang der dritten Achse in die p-Wellenleiterschicht hinein.

**[0027]** Die Höhe der bis zur aktiven Zone zurückbleibenden Schichten, also die Tiefe der indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex die in die p-Wellenleiterschicht und / oder die p-Wellenleiterschicht hineinragen, bestimmt die Höhe des effektiven Brechungsindex-Unterschieds zwischen den strukturierten p-Kontaktbereichen und der indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex. Sie muss so angepasst sein, dass Licht, welches unter den Bereichen eines niedrigeren Brechungsindex propagiert nach einem Durchgang der indexführenden Gräben einen Phasenversatz von  $\pi$  erhält.

**[0028]** Vorzugsweise umfasst die longitudinal-laterale Strukturierung entlang der ersten Achse mindestens 6 indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex, noch bevorzugter mindestens 10. Je größer die Anzahl der indexführenden Gräben entlang der ersten Achse ist, desto geringer ist die Fernfeld-Divergenz entlang der ersten Achse.

**[0029]** Vorzugsweise umfasst die longitudinal-laterale Strukturierung entlang der zweiten Achse mindestens 2 indexführenden Gräben mit einem niedrigeren Brechungsindex, noch bevorzugter mindestens 4. Je größer die Anzahl der indexführenden Gräben entlang der zweiten Achse ist, desto besser wird Licht, welches bei höheren Abstrahlwinkeln propagiert und zu Seitenpeaks im Fernfeld führt, unterdrückt.

**[0030]** Vorzugsweise umfasst eine Rückfacette eine DBR-Sektion. Diese DBR-Sektion würde eine wellenlängenstabilisierende Wirkung haben.

**[0031]** Vorzugsweise ist der p-Kontaktbereich entsprechend Formel 1 strukturiert. Die halbe Periode in lateraler Richtung liegt vorzugsweise im Bereich des 3 bis 10-fachen der Vakuum-Wellenlänge, um lateralen Monomodbetrieb zu gewährleisten. Die halbe Periode in Propagationsrichtung ergibt sich vorzugsweise entsprechend der Formel 1.

**[0032]** Die verschiedenen in dieser Anmeldung genannten Ausführungsformen und Aspekte der Erfindung sind, sofern im Einzelfall nicht anders ausgeführt, mit Vorteil miteinander kombinierbar.

#### Figurenliste

**[0033]** Die Erfindung wird nachfolgend in Ausführungsbeispielen anhand der zugehörigen Zeichnung erläutert. Es zeigen:

**Fig. 1** ein Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Diodenlasers

**Fig. 2a** eine Darstellung einer longitudinal-lateralen Strukturierung eines weiteren Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Diodenlasers,

**Fig. 2b** eine Ladungsträgerdichte-Verteilung und Phase des vorwärts-propagierenden optischen Feldes an den in **Fig. 2a** ausgezeichneten Positionen,

**Fig. 2c** ein lateral-vertikaler (x,y)-Querschnitt des erfindungsgemäßen Diodenlasers,

**Fig. 2d** ein lateral-vertikaler (x,y)-Querschnitt eines weiteren Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Diodenlasers,

**Fig. 3** ein Beispiel einer Modulation des Brechungsindexes in konventionellen Streifenlasern unter (a), und dazu

(b): eine Feldamplitude (in willkürlichen Einheiten) der In-Phase Supermode bei einer Indexführung entsprechend der Brechungsindexvariation in (a),

(c): eine Feldamplitude (in willkürlichen Einheiten) der Außer-Phase Supermode bei einer Indexführung entsprechend der Brechungsindexvariation in (a),

(d): eine Feldamplitude (in willkürlichen Einheiten) der In-Phase Supermode bei einer Anti-Indexführung entsprechend der Brechungsindexvariation in (a),

(e): eine Feldamplitude (in willkürlichen Einheiten) der Außer-Phase Supermode bei einer Anti-Indexführung entsprechend der Brechungsindexvariation in (a),

(f): eine Fernfeldintensität einer In-Phase Supermode eines konventionellen Diodenlasers,

(g): eine Fernfeldintensität einer Außer-Phase Supermode eines konventionellen Diodenlasers,

**Fig. 4** eine Darstellung eines lateralen Fernfeldes eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Diodenlasers,

**Fig. 5** eine Darstellung der longitudinal-lateralen Strukturierung eines Lasers mit konventioneller Talbot-Filter Sektion,

**Fig. 6a** eine Darstellung einer longitudinal-lateralen Gewinn/Verlust Modulation eines konventionellen Diodenlasers,

**Fig. 6b** eine Darstellung des lateral-vertikalen Querschnitts einer Gewinn/Verlust Modulation eines konventionellen Diodenlasers.

Ausführliche Beschreibung der Zeichnungen

**[0034]** **Fig. 1** zeigt ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Diodenlasers vom Talbot-Typ mit longitudinal-lateraler Brechungsindex- und Gewinnmodulation. Die vertikale Schichtstruktur stimmt mit der einer konventionellen Hochleistungslaserdiode überein. Diese besteht aus mindestens einer aktiven Schicht 1, die von p-Wellenleiter 5, p-Mantelschicht 6, n-Wellenleiter 2 und n-Mantelschicht 3 umgeben ist, welche wiederum auf dem Substrat 4 aufgebracht sind. Der Laser wird von einer Front- und Rückfacette begrenzt. Optional kann die Rückfacette durch eine wellenlängenstabilisierende DBR-Sektion ergänzt werden. Optional kann das laterale Injektionsgebiet 16 durch zweite indexführende Gräben 15 begrenzt werden, die durch die p-Mantelschicht 6 oder auch zusätzlich durch Teile der p-Wellenleiterschicht 5 geätzt werden, und das Laserfeld stabilisieren.

**[0035]** Der p-Kontaktbereich 9 ist dadurch gekennzeichnet, dass die Schichten in vertikaler Richtung unterhalb dieses Bereiches, also die p-Kontaktschicht 7, die p-Mantelschicht 6 und die p-Wellenleiterschicht 5 leitend sind. Die ersten indexführenden Gräben 8 hingegen leiten Strom nicht, sodass eine Strukturierung des p-Kontaktbereichs zu einer Gewinn/Verlust Modulation in der aktiven Schicht 1 führt. Um die Strukturierung des p-Kontaktbereichs deutlich zu machen, wurde die p-Metallisierung in der Darstellung in **Fig. 1** weggelassen. Ein lateral-vertikaler Querschnitt von **Fig. 1**, der auch die p-Metallisierung beinhaltet ist in **Fig. 2c** dargestellt.

**[0036]** Der p-Kontaktbereich 9 des Ausführungsbeispiels ist entsprechend der Formel 1 strukturiert.

$$\frac{2(\Lambda_x)^2 n_{\text{eff}}}{\lambda_0} = \Lambda_z \quad (1)$$

**[0037]** Die halbe Periode in lateraler Richtung  $W_2 = \Lambda_x/2$  liegt bei 1  $\mu\text{m}$  Vakuumwellenlänge bei 3 bis 10  $\mu\text{m}$ . Die halbe Periode in Propagationsrichtung  $W_1 = \Lambda_z/2$  ergibt sich auch entsprechend der Formel 1 und liegt bei 1  $\mu\text{m}$  Vakuumwellenlänge und  $n_{\text{eff}} \approx 3.3$  bei 100  $\mu\text{m}$  bis 2000  $\mu\text{m}$ .

**[0038]** Es wird zusätzlich zur longitudinal-lateralen Strukturierung des p-Kontaktbereichs 9 im Injektionsbereich 16 eine longitudinal-laterale Modulation des Brechungsindex eingeführt. Diese Modulation entsteht im Ausführungsbeispiel durch erste indexführende Gräben 8 mit einem Material eines niedrigeren Brechungsindex im Vergleich zu dem Brechungsindex der p-Wellenleiterschicht 5 und der p-Mantelschicht 6. Die Anzahl der lateralen ersten indexführenden Gräben 8 mit einer Breite von  $W_2$ , die durch einen Abstand  $W_2$  periodisch durch den p-Kontaktbereich getrennt sind, beträgt im Ausführungs-

rungsbeispiel in **Fig. 1** acht. Die Anzahl der longitudinalen ersten indexführenden Gräben mit einer Länge von  $W_1$ , die durch einen Abstand  $W_1$  periodisch durch den p-Kontaktbereich getrennt sind beträgt im Ausführungsbeispiel in **Fig. 1** zwei.

**[0039]** Diese ersten indexführenden Gräben 8 mit einem Material eines niedrigeren Brechungsindex können durch Wegätzen der p-Mantelschicht 6 oder auch zusätzlich durch Wegätzen von Teilen der p-Wellenleiterschicht 5 erzeugt werden. In die geätzten Bereiche wird entweder eine Isolationsschicht 11 z.B. 100 nm SiN und darüber die p-Metallisierung 10 gegeben, wie in **Fig. 2c** dargestellt oder aber die geätzten Bereiche werden mit einem Halbleitermaterial 13 überwachsen, welches einen niedrigeren Brechungsindex als die p-Wellenleiterschicht 5 und p-Mantelschicht 6 hat, wie in **Fig. 2d** dargestellt. Da diese Bereiche leitend sind, müssen diese Bereiche eines anderen Brechungsindex noch zusätzlich implantiert werden, damit die Strukturierung des p-Kontaktbereichs 9 auch zu einer Gewinn/Verlust-Modulation in der aktiven Zone 1 führt. Strom, der über die p-Metallisierung 10 in den p-Kontaktbereich 9 injiziert wird, spreizt in lateraler x-Richtung, sodass die Implantation mindestens die p-Kontaktschicht 7, besser aber zusätzlich die p-Mantelschicht durchdringen sollte.

**[0040]** **Fig. 2a** zeigt eine Darstellung einer longitudinal-lateralen Strukturierung des erfindungsgemäßen Diodenlasers, der in **Fig. 1** dargestellt ist. Die longitudinal-laterale Strukturierung mit sich abwechselnden Bereichen von p-Kontaktgebiet 9 und ersten indexführenden Gräben 8, die zur Phasen Anpassung genutzt werden, sind entsprechend Formel 1 strukturiert. Die Modulation des Brechungsindex durch die ersten indexführenden Gräben 8 muss so gewählt werden, dass die Phasenbedingung,

$$\Delta\varphi(x,z) = k_0\Lambda_z / 2 \cdot (n_0(x,z) - n_1(x,z)) = \pi,$$

für den Operationspunkt erfüllt ist, wobei  $n_0(x,z)$  und  $n_1(x,z)$  die realen Brechungsindexänderungen jeweils unter den Bereichen des p-Kontaktgebiets 9 und der ersten indexführenden Gräben 8 sind. Ein beispielhaftes laterales Profil der Ladungsträgerdichte (LTD) an der z-Position 3.82 mm ist in **Fig. 3b** oben dargestellt. In **Fig. 3b** unten ist die Phase des vorwärts-propagierenden optischen Feldes an den in **Fig. 2a** ausgezeichneten Positionen gezeigt. Die Regionen einer niedrigen Ladungsträgerdichte entsprechen lateralen Regionen der Index-führenden Gräben. Es ist zu erkennen, dass die Phase des optischen Feldes welches in diesen Regionen propagiert bei der Propagation von der z-Position 3.63 mm zur z-Position 4 mm einen Phasenversatz von  $\pi$  gegenüber dem Feld erhält welches in Regionen hoher Ladungsträgerdichte propagiert.

**[0041]** **Fig. 2c** und **Fig. 2d** zeigen Ausführungsbeispiele der ersten indexführenden Gräben 8. In beiden Fällen wird Halbleitermaterial der p-Kontaktschicht 7, der p-Mantelschicht 6 und/oder der p-Wellenleiterschicht 5 weggeätzt. Im Fall von **Fig. 2c** wird in die geätzten Bereiche eine Isolationsschicht 11 z.B. 100 nm SiN eingebracht, darüber liegt die p-Metallisierung 10. Im Falle von **Fig. 2d** werden die geätzten Bereiche mit einem Halbleitermaterial 13 überwachsen, welches einen niedrigeren Brechungsindex als die p-Wellenleiterschicht 5 und p-Mantelschicht 6 hat. Nachteilig an diesem Prozess ist, dass eine aufwendige Zwei-Schritt-Epitaxie notwendig ist, weshalb das erstere Verfahren bevorzugt wird. In letzteren Fall ist das neu gewachsene Halbleitermaterial leitend und aus diesem Grund muss in diese Bereiche zusätzlich implantiert 12 werden, damit eine Gewinn/Verlust Modulation bis zur aktiven Zone gewährleistet ist.

**[0042]** In **Fig. 3a** ist ein Beispiel einer Modulation des realen Brechungsindex in konventionellen Streifenlasern dargestellt. Gleichzeitig entspricht dieses Profil auch der Modulation des realen Brechungsindex im erfindungsgemäßen Laser an einer longitudinalen z-Position, wobei  $n_0(x,z)$  und  $n_1(x,z)$  die realen Brechungsindexänderungen jeweils unter den Bereichen des p-Kontaktgebiets 9 und der ersten indexführenden Gräben 8 sind. In **Fig. 3b** bis **Fig. 3e** sind Feldamplituden erwähnenswerter Supermoden dieses konventionellen Streifenlasers dargestellt.

**[0043]** In **Fig. 3b** und **Fig. 3c** sind Index-geführte Supermoden dargestellt, bei denen die Intensitätsmaxima, also das Betragsquadrat der dargestellten Feldamplituden, mit den Maxima der realen Brechungsindex-Modulation übereinstimmen.

**[0044]** In **Fig. 3d** und **Fig. 3e** sind Anti-index-geführte Supermoden dargestellt, bei denen die Intensitätsmaxima mit den Minima der realen Brechungsindex-Modulation übereinstimmen. In **Fig. 3b** und **Fig. 3d** sind die In-Phase Supermoden dargestellt, bei der die Phase benachbarter Intensitätspeaks übereinstimmt. In **3c** und **3e** sind die Außer-Phase Supermoden dargestellt, bei denen jeweils die Phase benachbarter Intensitätspeaks einen Phasenunterschied von  $\pi$  zeigen. Das Fernfeld der In-Phase Supermoden aus **Fig. 3b** und **Fig. 3d** ist in **Fig. 3f** dargestellt. Es besitzt die erwünschte zentrale Strahlkeule, sowie Seitenpeaks bei Fernfeldwinkeln von  $\pm\varphi_0 = \lambda_0/\Lambda_x$ , wobei  $\lambda_0$  die Vakuumwellenlänge und  $\Lambda_x$  die volle Periode der lateralen Indexmodulation ist. Das Fernfeld der Außer-Phase Supermoden aus **Fig. 3c** und **Fig. 3e** ist in **Fig. 3g** dargestellt. Es zeigt eine hohe Divergenz und besitzt zwei ausgeprägte Intensitätspeaks bei  $\pm\varphi \approx \lambda_0/2\Lambda_x$ .

**[0045]** Fig. 4 zeigt die Fernfeldintensität einer konkreten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Lasers in willkürlichen Einheiten. Die aktive Schicht 1 dieser Ausführungsform besteht aus einem 12 nm dicken InGaAs Quantengraben für Laserlicht-Emission bei einer Wellenlänge von 905 nm. Die aktive Schicht befindet sich zwischen 1,1  $\mu\text{m}$  dicken n-Wellenleiterschichten und 0,2  $\mu\text{m}$  dicken p-Wellenleiterschichten aus Al(0.40)Ga(0.60)As mit einer Dotierung von  $1\text{E}17\text{ cm}^{-3}$ , begrenzt durch jeweils 2  $\mu\text{m}$  dicke n- und p-Mantelschichten aus Al(0.45)Ga(0.55)As mit einer Dotierung von  $1\text{E}18\text{ cm}^{-3}$ .

**[0046]** Es ist deutlich eine zentrale Strahlkeule zu erkennen, wobei die Seitenpeaks, die in Fig. 3f erkennbar sind unterdrückt wurden. Die zentrale Strahlkeule hat einen Leistungsinhalt von 40% bei einem Fernfeldwinkel von  $\Theta_{40\%} = 0.4$ . In diesem konkreten Ausführungsbeispiel beträgt die volle laterale Periode  $\Lambda_x = 6\text{ }\mu\text{m}$  und die volle longitudinale Periode  $\Lambda_z = 260\text{ }\mu\text{m}$ . Der durch Indexgräben herbeigeführte Brechungsindexunterschied beträgt  $\Delta n_0 = -5.5 \cdot 10^{-3}$ . Das Injektionsgebiet 16 hat eine Breite von 270  $\mu\text{m}$  und eine Länge von 3 mm. Es ist lateral von zweiten indexführenden Gräben 15 begrenzt, welche das Laserfeld zusätzlich stabilisieren. An der Rückfacette befindet sich ein wellenlängenstabilisierendes DBR Element mit einer Länge von 1 mm, sodass der gesamte Laser eine Länge von 4 mm hat.

**[0047]** Fig. 5 zeigt die longitudinal-lateralen Strukturierung eines Lasers mit konventioneller Talbot-Filter Sektion. Er umfasst strukturierte p-Kontaktbereiche 9, die zu einer Gewinn/Verlust Modulation führen. Diese Regionen können theoretisch sowohl einen höheren als auch niedrigen realen Brechungsindex als die anliegenden Regionen haben, sodass die Supermode sowohl Index- als auch Anti-indexgeführt sein kann. Bei den oben genannten Publikationen handelt es sich aber um Anti-index geführte Laser. Für die Länge dieser Sektionen in longitudinaler z-Richtung gibt es keine Design-spezifischen Einschränkungen. Der Laser hat zusätzlich konventionelle Talbot-Filter Sektionen mit einer Länge, die der halben Talbot-Länge  $\Lambda_z/2$  entspricht. Die Sektionen sind longitudinal-lateral unstrukturiert und das optische Feld kann hier frei laufen.

**[0048]** In Fig. 6a ist eine longitudinal-laterale Gewinn/Verlust Modulation nach Stand der Technik, ohne zusätzliche Modulation des realen Brechungsindex durch indexführende Gräben gezeigt und in Fig. 6b der lateral-vertikalen Querschnitts einer solchen Modulation. Das longitudinal-laterale Gebiet besteht aus periodischen Abfolgen von p-Kontaktgebiet 9 und nichtleitenden implantierten Gebieten 12, wobei die volle Periode der lateralen Modulation  $\Lambda_x$  und die volle Periode der longitudinalen Modulation  $\Lambda_z$  der Formel 1 genügen. Damit Strom, der über die p-Metallisierung 10 in den p-Kontaktbereich 9 injiziert

wird, nicht in lateraler x-Richtung spreizt muss die Implantation mindestens die p-Kontaktschicht 7, besser aber zusätzlich die p-Mantelschicht durchdringen. So kann eine Gewinn/Verlust Modulation bis zur aktiven Zone 1 gewährleistet sein.

#### Bezugszeichenliste

1	Aktive Schicht
2	n-Wellenleiterschicht
3	n-Mantelschicht
4	Trägersubstrat
5	p-Wellenleiterschicht
6	p-Mantelschicht
7	p-Kontaktschicht
8	erste indexführende Gräben
9	p-Kontaktbereich
10	p-Metallisierung
11	Isolationsschicht
12	Implantierung
13	Halbleitermaterial eines niedrigeren Brechungsindex als das Material der p-Schichten
14	freilaufende Talbot-Filter Sektion
15	zweite indexführende Gräben
16	Injektionsgebiet
17	Restschichtdicke
W1	Halbe Periode in Propagationsrichtung
W2	Halbe Periode in lateraler Richtung
W3	Breite der zweiten indexführenden Gräben
X	Erste Achse
Y	Dritte Achse
Z	Zweite Achse

#### Patentansprüche

1. Diodenlaser, umfassend:
  - a) erste n-leitend ausgebildete Funktionsschichten (2, 3);
  - b) eine aktive Schicht (1), die zur Erzeugung elektromagnetischer Strahlung geeignet ist und die auf den ersten Funktionsschichten (2, 3) angeordnet ist;
  - c) zweite p-leitend ausgebildete Funktionsschichten (5, 6), die auf der aktiven Schicht (1) angeordnet sind;
  - d) einen p-Kontaktbereich (9), wobei der p-Kontaktbereich (9) zur Ausbildung einer Talbot-Filtersektion eine longitudinal-laterale Strukturierung im Bereich

eines Injektionsgebiets (16) umfasst, wobei durch die Strukturierung einzelne p-Kontakte ausgebildet werden; und

e) mindestens eine Facette zur Auskopplung elektromagnetischer Strahlung entlang einer zweiten Achse (Z), wobei die ersten Funktionsschichten (2, 3), die aktive Schicht (1) und die zweiten Funktionsschichten (5, 6) entlang einer dritten Achse (Y) gestapelt sind;

f) wobei die longitudinal-laterale Strukturierung zwischen den durch die Strukturierung ausgebildeten einzelnen p-Kontakten des p-Kontaktbereichs (9) indexführende Gräben (8, 15) mit einem niedrigeren Brechungsindex im Vergleich zu dem Brechungsindex der zweiten p-leitend ausgebildeten Funktionsschichten (5, 6) umfasst; und

g) wobei die indexführenden Gräben (8, 15) entlang der ersten Achse (X) erste indexführende Gräben (8) und zweite indexführende Gräben (15) umfassen, wobei die zweiten indexführenden Gräben (15) entlang der ersten Achse (X) die jeweiligen äußersten indexführenden Gräben (15) darstellen.

2. Diodenlaser nach Anspruch 1, wobei die ersten n-leitend ausgebildeten Funktionsschichten (2, 3) eine n-Mantelschicht (3) und eine n-Wellenleiterschicht (2) umfassen.

3. Diodenlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zweiten p-leitend ausgebildete Funktionsschichten (5, 6) eine p-Wellenleiterschicht (5) und eine p-Mantelschicht (6) umfassen.

4. Diodenlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die longitudinal laterale Strukturierung entlang einer ersten Achse (X) abwechselnd mit zueinander unterschiedlichen Brechungsindices strukturiert ist.

5. Diodenlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die longitudinal laterale Strukturierung entlang der zweiten Achse (Z) abwechselnd mit zueinander unterschiedlichen Brechungsindices strukturiert ist.

6. Diodenlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die indexführenden Gräben (8, 15) entlang der dritten Achse (Y) in die p-Mantelschicht (6) hineinragen oder diese durchdringen.

7. Diodenlaser nach Anspruch 6, wobei die indexführenden Gräben (8, 15) entlang der dritten Achse (Y) in die p-Wellenleiterschicht (5) hineinragen.

8. Diodenlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die longitudinal laterale Strukturierung entlang der ersten Achse (X) mindestens sechs der indexführenden Gräben (8, 15) umfasst.

9. Diodenlaser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die longitudinal laterale Strukturierung entlang der zweiten Achse (Z) mindestens zwei der indexführenden Gräben (8, 15) umfasst.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen



Anhängende Zeichnungen

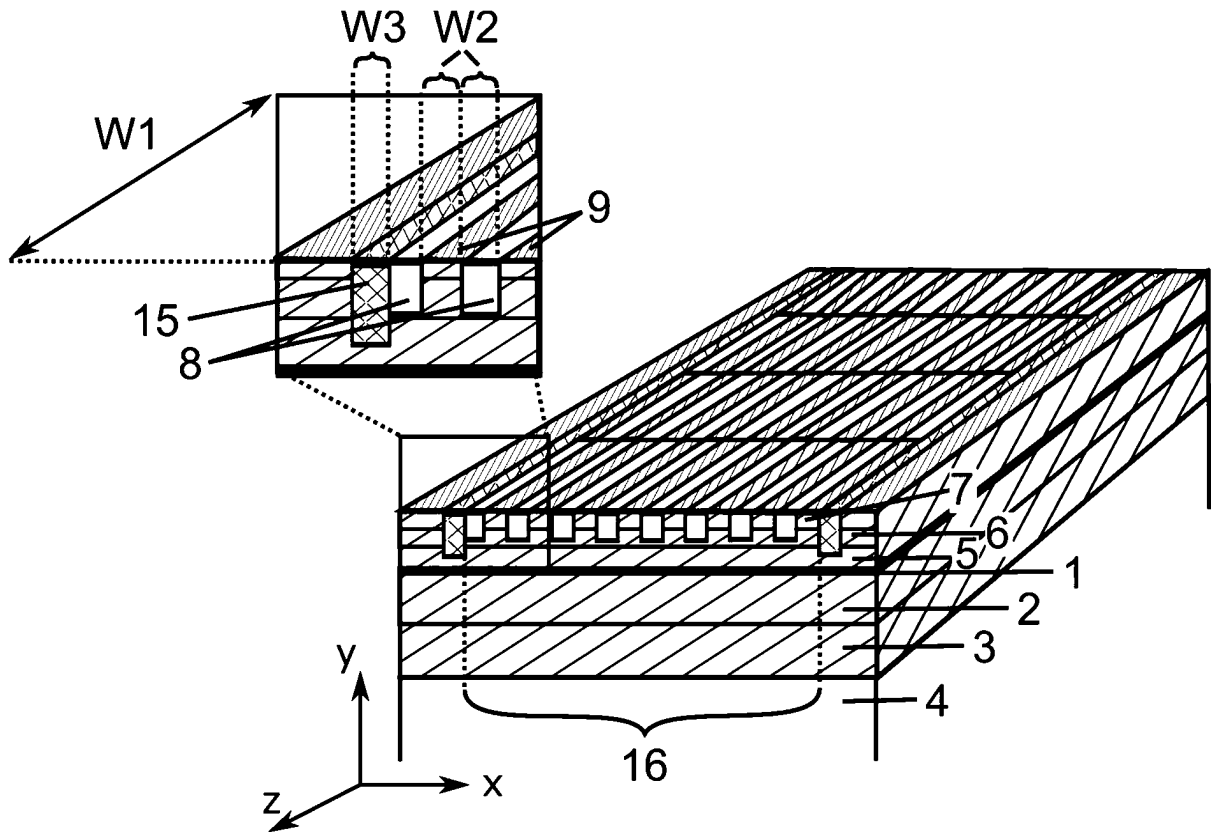


Fig. 1

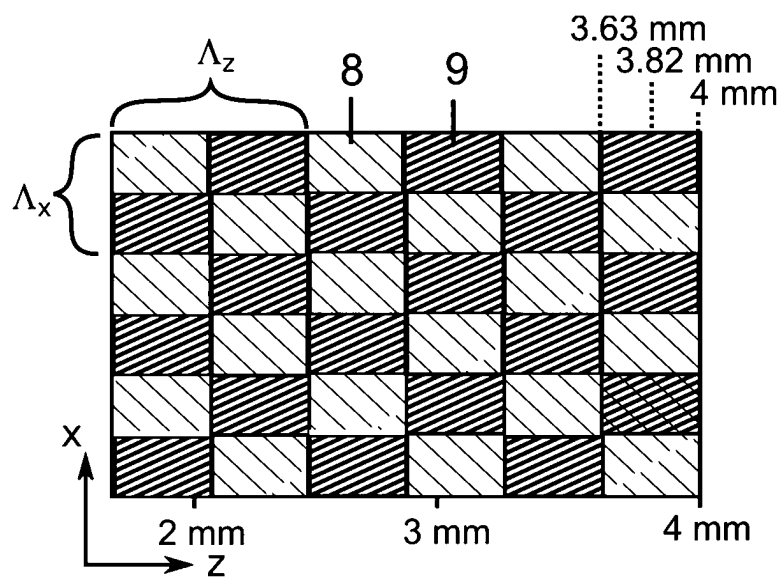


Fig. 2a

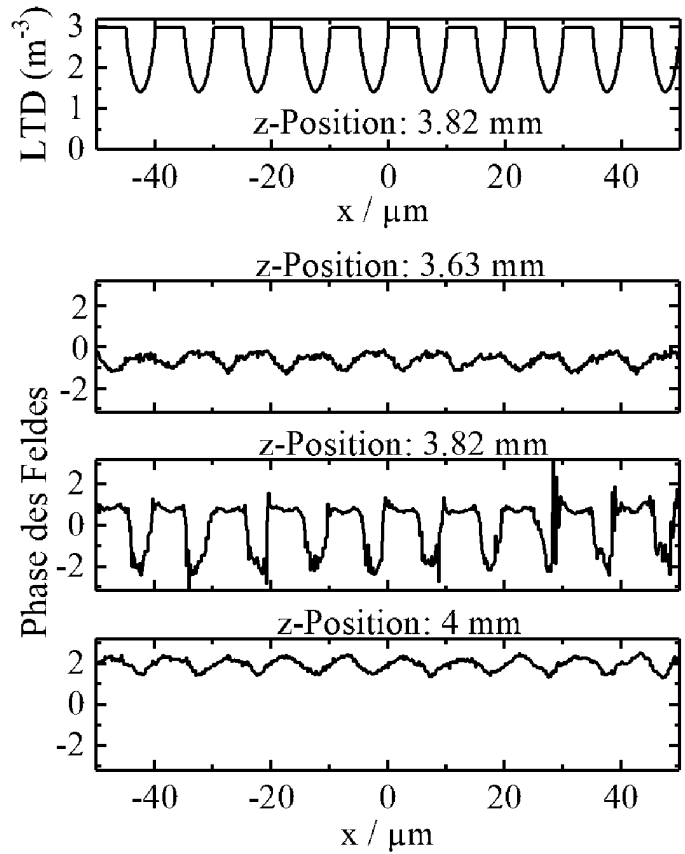


Fig. 2b

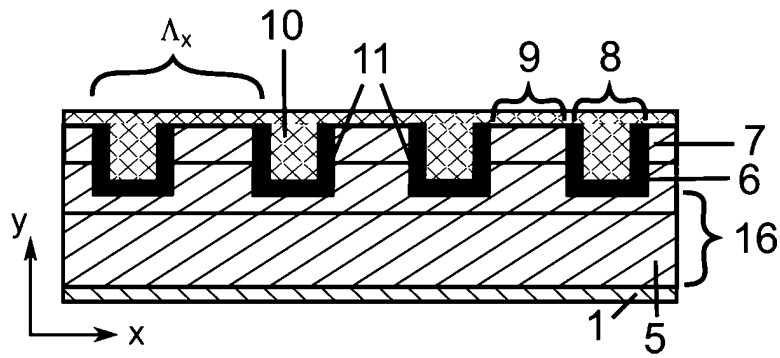


Fig. 2c

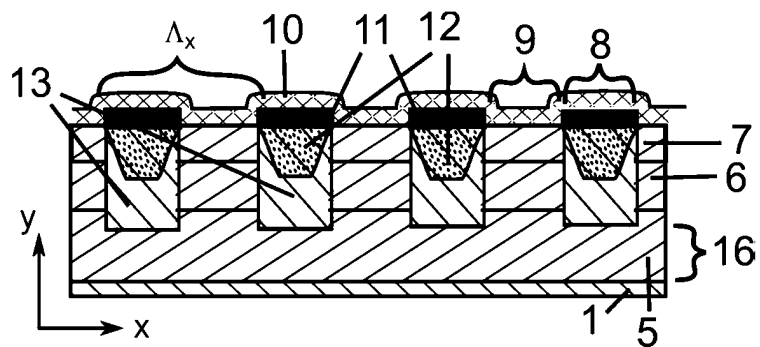


Fig. 2d

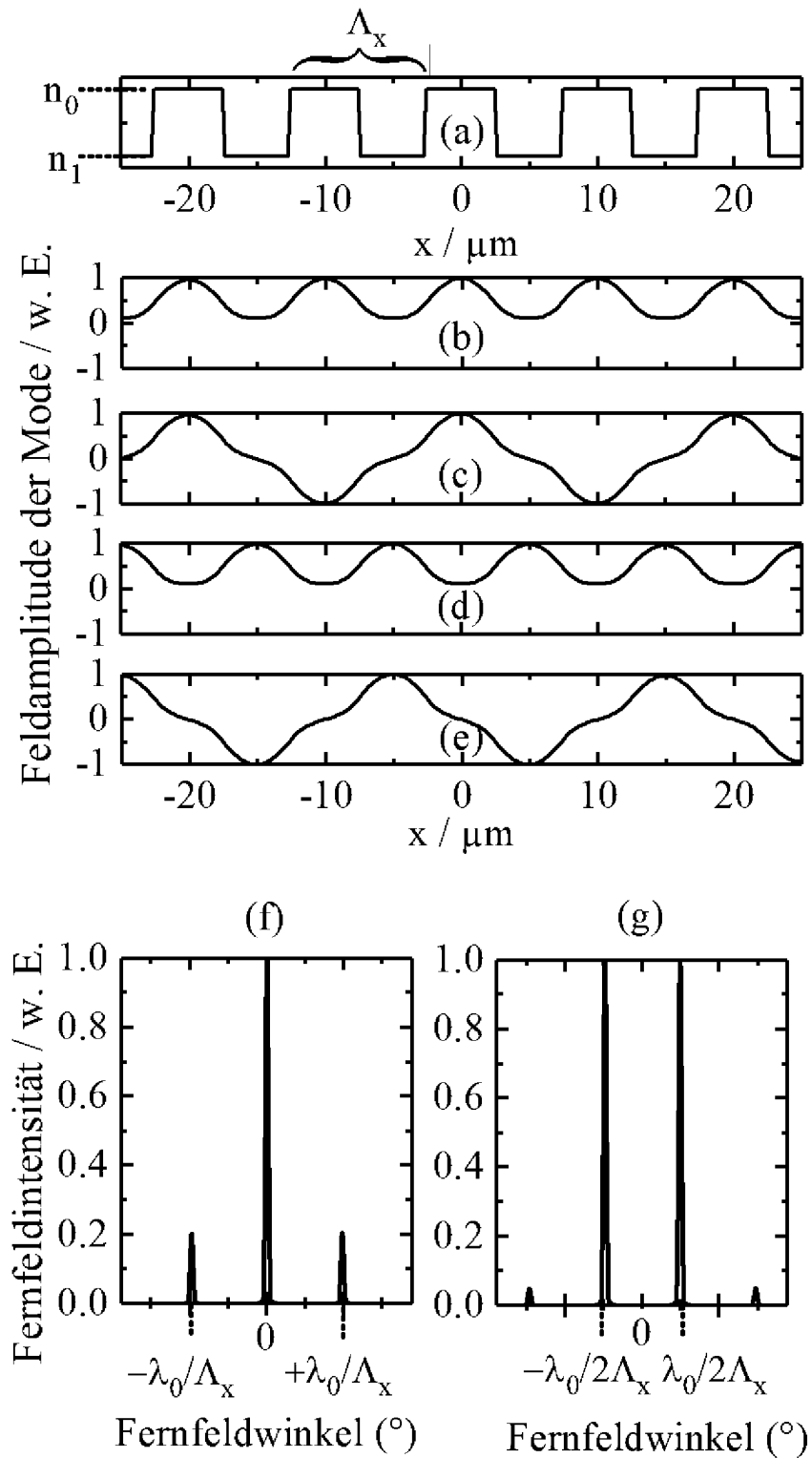


Fig. 3 Stand der Technik

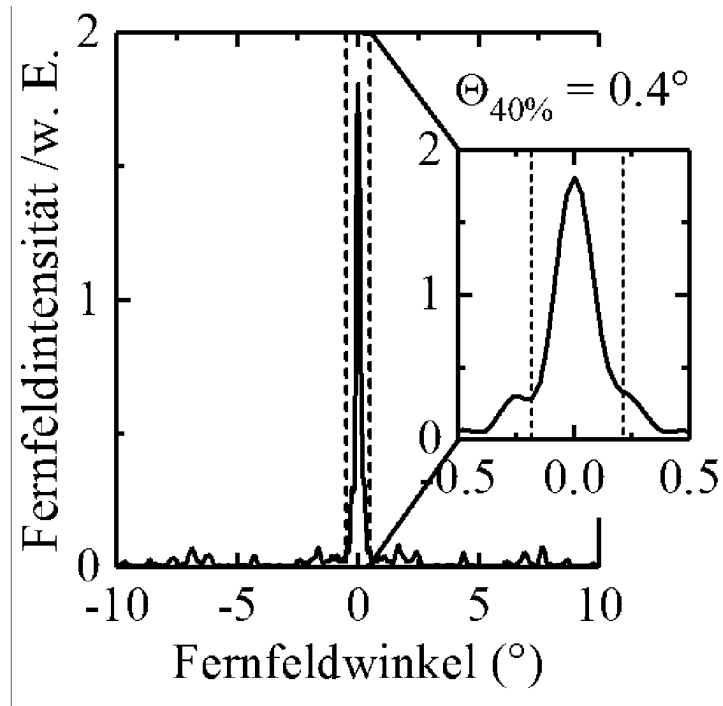


Fig. 4

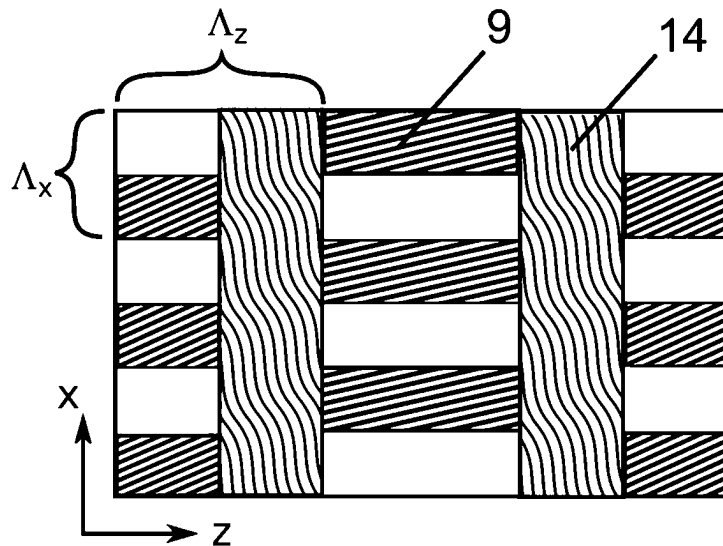


Fig. 5 Stand der Technik

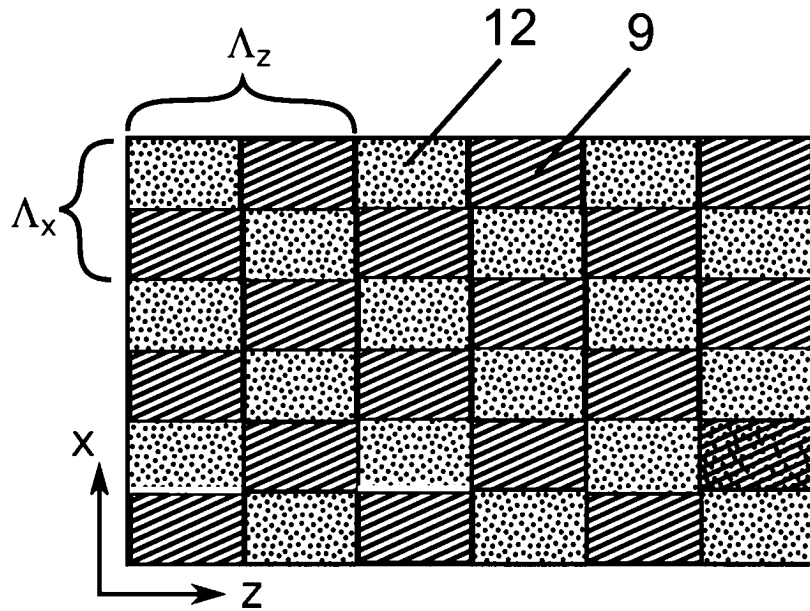


Fig. 6a Stand der Technik

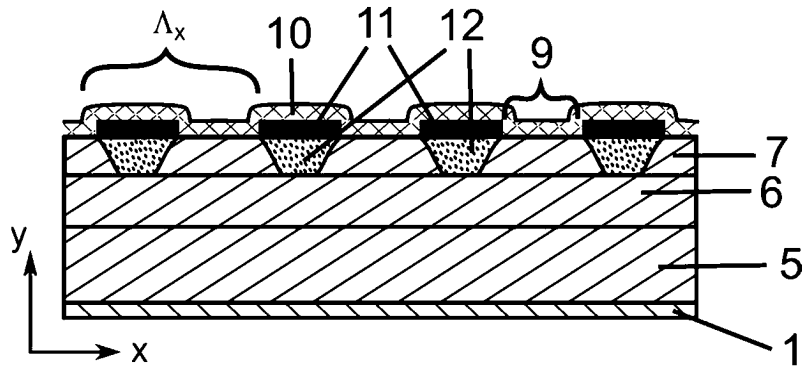


Fig. 6b Stand der Technik