



(10) **DE 10 2024 116 972 B4** 2026.05.07

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2024 116 972.9**
(22) Anmeldetag: **17.06.2024**
(43) Offenlegungstag: **18.12.2025**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **07.05.2026**

(51) Int Cl.: **H01S 5/11 (2021.01)**
H01S 5/183 (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;
Forschungsverbund Berlin e.V., 12489 Berlin, DE**

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

(72) Erfinder:
**King, Ben, Dr., 10247 Berlin, DE; Wenzel, Hans,
Dr., 12355 Berlin, DE; Crump, Paul, Dr., 10245
Berlin, DE; Kuhn, Eduard, Dr., 12459 Berlin, DE;
Radziunas, Mindaugas, Dr., 10719 Berlin, DE**

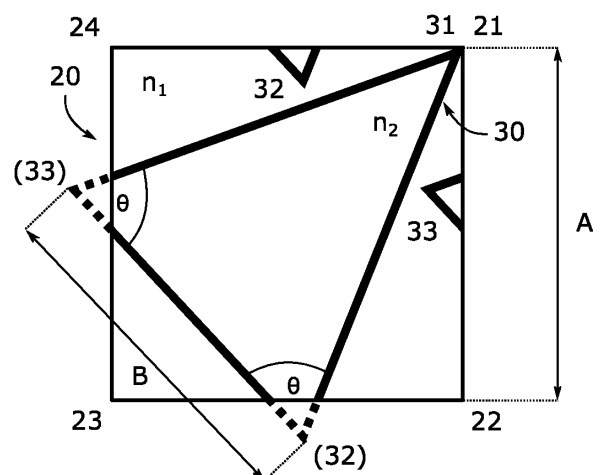
(56) Ermittelter Stand der Technik:

US 2019 / 0 288 483 A1

**HIROSE, Kazuyoshi [u.a.]: Watt-class high-
power, high-beam-quality photonic-crystal lasers.
In: Nature Photonics, Vol. 8, 2014, S. 1-6. - ISSN
1749-4885 (P); 1749-4893 (E). DOI: 10.1038/
nphoton.2014.75**

(54) Bezeichnung: **Großflächige oberflächenemittierende Hochleistungs-Einmoden-Vollhalbleiter-Photonischer-Kristall-Laser**

(57) Hauptanspruch: Photonischer-Kristall-Schicht, PC-Schicht, (100), für einen oberflächenemittierenden Photonischer-Kristall-Laser, PCSEL, (200), umfassend eine Halbleiterschicht (10), die aus einem ersten Halbleitermaterial besteht und einen strukturierten Bereich (12) umfasst, in dem eine Mehrzahl von benachbart angeordneten quadratischen PC-Einheitszellen (20) mit einer gemeinsamen Seitenlänge A eine periodische Brechungsindexmodulationsgitterstruktur ausbildet, wobei jede PC-Einheitszelle (20) ein symmetrisches gestrecktes gleichschenkliges Dreieck, SIT, (30) aus einem zweiten Halbleitermaterial mit einem niedrigeren oder höheren Brechungsindex als das erste Halbleitermaterial umfasst, wobei das SIT (30) eine Basislänge B und einen Basiswinkel θ aufweist, wobei die obere Ecke (31) des SIT (30) mit einer Ecke (21) der PC-Einheitszellen (20) zusammenfällt, wobei die Basislänge B zwischen $0,60A$ und $0,85A$ beträgt und der Basiswinkel θ zwischen 60° und 80° beträgt, und wobei die erste Basisecke (32) des SIT (30) und die zweite Basisecke (33) des SIT (30) sich außerhalb der PC-Einheitszelle (20) befinden oder jeweils mit einer Seite der PC-Einheitszelle (20) zusammenfallen.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Photonischer-Kristall(PC)-Schicht für einen oberflächenemittierenden Photonischer-Kristall-Laser (PCSEL) und einen großflächigen Hochleistungs-Einmoden-Vollhalbleiter-PCSEL mit einer solchen PC-Schicht. Insbesondere bezieht sich die vorliegende Erfindung auf einen verbesserten PCSEL, der eine kleine eindimensionale (1D) Rückkopplung, eine große zweidimensionale (2D) Rückkopplung und eine große Modendiskriminierung aufgrund einer speziell optimierten PC-Einheitszellengestaltung der PC-Schicht aufweist.

Technologischer Hintergrund

[0002] Einmoden-Diodenlaser-Emitter mit einem schmalen Fernfeld $< 1^\circ$, einer schmalen spektralen Breite < 1 nm, einer hohen Leistungsumwandlungseffizienz $> 50\%$ und einer hohen Dauerstrichleistung (CW-Leistung) (mehrere 10 W) werden für viele Anwendungen benötigt. Mit herkömmlichen Diodenlasertechnologien ist es jedoch schwierig, Diodenlaser bereitzustellen, die für alle diese Parameter optimiert sind. Beispielsweise benötigen einzelne GaAs-basierte Kantenemitter mit lateralen Einmoden-Wellenleitern (z. B. Stegwellenleitern), deren Wellenlänge anhand von externen oder internen Gittern stabilisiert wird, in der Regel kostenintensive Kollimationsoptiken für schmale Fernfelder und liefern eine CW-Leistung von < 5 W (vgl. M. Wilkens et al., „Externally Wavelength-Stabilized Single Mode Lasers with 65% Conversion Efficiency and 50 pm Spectral Width at 1 W Output,“ Proc. 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), München, Deutschland, 2021, S. 1-1). Einzelne oberflächenemittierende Multi-Junction-Einmoden-Laser mit vertikaler Hohlraumordnung (engl. „vertical cavity surface emitting lasers, VCSELs“) liefern in der Regel nur eine geringe Leistung < 20 mW und benötigen ebenfalls kostenintensive Kollimationsoptiken für den Betrieb im schmalen Fernfeld (vgl. M. M. Dummer et al., „Single-mode multi-junction VCSELs with integrated transverse mode filter“, Proc. SPIE 12439, 1243908 (2023)).

[0003] In den letzten Jahrzehnten hat sich eine relativ neue Diodenlasertechnologie entwickelt, die auf so genannten oberflächenemittierenden Photonischer-Kristall-Lasern (engl. „photonic crystal surface emitting lasers, PCSELs“) basiert. PCSEL haben aufgrund ihrer Fähigkeit, herkömmliche Halbleiterlaser zu übertreffen, indem sie eine hohe Ausgangsleistung bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Einmoden-Emission bieten, große Aufmerksamkeit erregt. Bei PCSEL handelt es sich um einen modernen Typ oberflächenemittierender elektrisch

gepumpter Halbleiterlaser, die eine zweidimensionale Photonischer-Kristall(PC)-Struktur verwenden, die sowohl einen In-Plane-Laserresonator ausbildet als auch das Licht aus der Laserebene herausbeugt, um eine nahezu beugungsbegrenzte Oberflächenemission zu erreichen. Die grundlegende Architektur eines PCSEL umfasst eine zweidimensionale PC-Struktur, die als ein In-Plane (lateraler) Hohlraum dient. Diese Struktur besteht im Wesentlichen aus einer dünnen Schicht aus einem Halbleitermaterial (z. B. GaAs, GaN oder InP), die ein Muster (z. B. quadratisch oder dreieckig) aus Luftlöchern umfasst, das sich über einen bestimmten Bereich erstreckt. Vorzugsweise wird das Licht aus dem Substrat der Vorrichtung emittiert, weshalb das Halbleitermaterial für die Laserstrahlung transparent (nicht absorbierend) sein muss. Durch Koppeln der PC-Struktur mit einer dünnen aktiven Schicht unter der PC-Schicht wird eine Laserverstärkung durch stimulierte Emission erreicht. In der Regel ist der aktive Bereich nur durch eine dünne wellenleitende Schicht von der PC-Struktur getrennt.

[0004] PCSEL haben erhebliche Fortschritte gemacht, einschließlich der Demonstration großflächiger kohärenter Oszillation, der Steuerung von Strahlenmustern, der Demonstration von Strahlenkung und der Realisierung eines Betriebs im Watt-Bereich und mit hoher Strahlenqualität. Aufgrund von Verlusten, die mit der auf Luftlöchern basierenden PC-Technologie verbunden sind, ist jedoch der Wirkungsgrad in der Regel gering. So bieten beispielsweise kürzlich vorgestellte PCSEL mit großer Apertur (3 mm), die auf Doppelgitter-PC-Designs mit Luftlöchern basieren, eine Leistungsumwandlungseffizienz von etwa 30 % (M. Yoshida et al., „High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser“, Nature 618, 727-732 (2023)).

[0005] Wenngleich kantenemittierende Vollhalbleiter-DFB-Laser aufgrund der Gittertechnologie mit vernachlässigbaren Verlusten herstellbar sind (vgl. C. M. Schultz et al., „In situ etched gratings embedded in AlGaAs for efficient high power 970 nm distributed feedback broad-area lasers“, Applied Physics Letters 100, 201115 (2012)), sind sie bisher nicht als großflächige PCSEL mit konventionellen PC-Designs realisierbar, da sie einen niedrigen Indexkontrast aufweisen und das Ätzen sehr kleiner Strukturen schwierig ist, was in der Regel zu einem hochgradig multimodalen Betrieb großflächiger PCSEL führt.

[0006] Es besteht daher ein Bedarf an einem verbesserten PCSEL-Design, das die Mängel des Stands der Technik überwindet oder zumindest signifikant reduziert und das außerdem die Bereitstellung von Diodenlaser-Einzelemittieren mit schmalen Fernfeld $< 1^\circ$, schmalen Spektrum < 1 nm, hoher Leis-

tungsumwandlungseffizienz > 50 % und hoher CW-Leistung (mehrere 10 W) ermöglicht.

[0007] US 2019/0288483 A1 betrifft ein einzelnes lichtemittierendes Halbleiterelement mit einer Vielzahl von lichtemittierenden Abschnitten, von denen jeder in der Lage ist, Licht mit einem gewünschten Strahlenprojektionsmuster zu erzeugen, und ein Verfahren zur Herstellung des lichtemittierenden Halbleiterelements.

Kurze Darstellung der Erfindung

[0008] Die vorliegende Erfindung löst diese objektive Aufgabe durch Bereitstellen einer Photonischer-Kristall(PC)-Schicht für einen oberflächenemittierenden Photonischer-Kristall-Laser (PCSEL) nach Anspruch 1 und einer solchen PC-Schicht umfassenden PCSEL nach Anspruch 6. Bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0009] Nach einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird eine Photonischer-Kristall(PC)-Schicht für einen oberflächenemittierenden Photonischer-Kristall-Laser (PCSEL) bereitgestellt, wobei die PC-Schicht eine Halbleiterschicht umfasst, die aus einem ersten Halbleitermaterial besteht und einen strukturierten Bereich umfasst, in dem eine Mehrzahl von benachbart angeordneten quadratischen PC-Einheitszellen mit einer gemeinsamen Seitenlänge A eine periodische Brechungsindexmodulationsgitterstruktur ausbildet, wobei jede PC-Einheitszelle ein symmetrisches gestrecktes gleichschenkliges Dreieck (engl. „symmetric stretched isosceles triangle, SIT“) aus einem zweiten Halbleitermaterial mit einem niedrigeren oder höheren Brechungsindex als das erste Halbleitermaterial umfasst, wobei das SIT eine Basislänge B und einen Basiswinkel θ aufweist. Von diesen beiden Alternativen wird jedoch diejenige bevorzugt, bei der das zweite Halbleitermaterial einen niedrigeren Brechungsindex als das erste Halbleitermaterial aufweist, wobei die obere Ecke des SIT mit einer Ecke der PC-Einheitszellen zusammenfällt, wobei die Basislänge B zwischen $0,60A$ und $0,85A$ beträgt und der Basiswinkel θ zwischen 60° und 80° beträgt, und wobei die erste Basisecke des SIT und die zweite Basisecke des SIT sich außerhalb der PC-Einheitszelle befinden oder jeweils mit einer Seite der PC-Einheitszelle zusammenfallen.

[0010] Die vorliegende Erfindung basiert auf einer Verbesserung einer 2D-PC-Struktur, die aus einem quadratischen Gitter besteht, in dem jedes Gitterelement einem Loch in Form eines mit Luft gefüllten rechtwinkligen gleichschenkligen Dreiecks (engl. „right-angled isosceles triangle, RIT“) zugeordnet ist (K. Hirose et al., „Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers“, Nature Photonics 8,

406 - 411 (2014)). Das RIT-Design basiert auf einer deutlich asymmetrischen Struktur in Form von RIT-förmigen Luftlöchern. Solche RIT-Formen sind für den Hochleistungs-PCSEL-Betrieb von Vorteil, da sie einen Auslöschungseffekt des Feldes umgehen, der bei PC-Strukturen mit symmetrischer Form (etwa einem Kreis) auftritt und zur Unterdrückung der gebeugten Vertikalemission von der 2D-PC führt. Dadurch lässt sich mit den RIT-förmigen Luftlöchern eine höhere Extraktionseffizienz erzielen.

[0011] Das Vorhandensein von Luftlöchern (Hohlräumen) in den Halbleiterlasern führt jedoch zu hohen Streu- (optischen) und Ladungsträger- (Shockley-Read-Hall-) Verlusten und erhöht außerdem den elektrischen Widerstand (durch die Hohlräume kann kein Strom fließen). Um sowohl eine höhere Leistungsumwandlungseffizienz als auch eine Skalierung der Vorrichtungsgröße für höhere Leistung mit einem schmalen Fernfeld zu ermöglichen, werden die Luftlöcher des ursprünglichen PC-Designs durch ein anderes Halbleitermaterial ersetzt, wodurch ein Vollhalbleiter-PCSEL entsteht und somit Verluste aufgrund des Vorhandenseins von Luftlöchern (Hohlräumen) vermieden werden. Die Eigenschaften des PCSEL müssen dann auch hinsichtlich der Abmessungen der PC-Strukturen (hier der dreieckigen SIT-Struktur), des Brechungsindexkontrasts und anderer Designparameter weiter optimiert werden.

[0012] Die geeigneten Abmessungen für die erfindungsgemäße PC-Strukturgestaltung konnten anhand eines speziell entwickelten Simulationswerkzeugs ermittelt werden. Es konnte ein klares Prozessfenster für symmetrische SIT-förmige Strukturen in der PC-Einheitszelle identifiziert werden, in dem großflächige Vollhalbleiter-PCSEL mit hoher Modendiskriminierung arbeiten können und gleichzeitig eine hohe Leistung, ein hoher Wirkungsgrad, ein schmales Spektrum und ein schmales Fernfeld ermöglicht werden. Da diese Eigenschaften in den PC-Strukturen korrelieren und bei der Optimierung eine große Anzahl verschiedener Parameter berücksichtigt werden muss, ist ein analytischer Ansatz in der Regel nicht möglich, sodass zum Simulieren der Eigenschaften von RIT- oder SIT-basierten PC-Strukturen numerische Verfahren angewendet werden mussten.

[0013] Die obere Ecke des SIT fällt mit einer Ecke der PC-Einheitszellen zusammen. Die obere Ecke jedes Dreiecks hat somit eine klar definierte Position in Bezug auf seine jeweilige PC-Einheitszelle.

[0014] Vorzugsweise unterscheiden sich der erste Brechungsindex n_1 des ersten Halbleitermaterials und der zweite Brechungsindex n_2 des zweiten Halbleitermaterials um zwischen 2 % und 20 %, bevorzugter um zwischen 2 % und 25 % und noch bevor-

zugter um zwischen 2 % und 35 % oder mehr. Insbesondere kann das Material mit dem niedrigen Index den SIT-Strukturen entsprechen, und das Material mit dem hohen Index kann dem umgebenden Halbleiter entsprechen.

[0015] Vorzugsweise handelt es sich bei dem ersten Halbleitermaterial um GaAs und bei dem zweiten Halbleitermaterial um eine Verbindung aus $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$, beispielsweise $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ (InGaP), wobei x so gewählt ist, dass es an GaAs nahezu gitterangepasst ist. Im sichtbaren (VIS) und nahen infraroten (NIR) Spektrum kann der Brechungsindex von GaAs beispielsweise in einem Bereich zwischen 3,3 und 3,6 liegen, während ein typischer Bereich für den Brechungsindex für $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ in einem Bereich zwischen 3,5 und 3,2 liegen kann. Die vorliegende Erfindung ist jedoch nicht auf diese spezifischen Materialien beschränkt, und es können auch andere Halbleitermaterialien kombiniert werden, um die vorteilhaften Wirkungen der vorliegenden Erfindung zu erzielen. Insbesondere können GaAs und AlAs, GaAs und AlGaAs, InP und AlInAs, InP und InGaAsP oder allgemeiner zwei beliebige Halbleiterverbindungen aus den Al-In-Ga-As-P-Sb-N Verbindungshalbleitermaterialsystemen als erstes Halbleitermaterial und zweites Halbleitermaterial kombiniert werden.

[0016] Vorzugsweise weist der strukturierte Bereich einen Durchmesser $D > 0,5$ mm, bevorzugter $D > 1$ mm auf, und/oder die Dicke d der PC-Schicht beträgt zwischen 50 nm und 1.000 nm. Der Durchmesser kann im Falle eines kreisförmigen strukturierten Bereichs direkt oder als die seitliche Ausdehnung (z. B. der Durchmesser eines umschriebenen Kreises) eines strukturierten Bereichs mit einer anderen Form (z. B. einer rechteckigen, quadratischen oder elliptischen Form) definiert werden. Dies sind typische Abmessungen für PC-Schichten in PCSEL, und sie ermöglichen eine einfache Herstellung der PC-Strukturen mit herkömmlichen Verfahren in hoher Präzision und mit aperturweiter struktureller Gleichmäßigkeit.

[0017] Bei einem herkömmlichen RIT-Design beträgt das Verhältnis der Basislänge B zur Seitenlänge A der PC-Einheitszelle in der Regel zwischen $0,7\sqrt{2}A$ und $\sqrt{2}A$, wobei der Basiswinkel θ 45° beträgt. Bei PCSEL, die auf RIT-Designs basieren, ist die maximale PCSEL-Größe und damit die maximal erreichbare Leistung in einem schmalen Fernfeld durch das Auftreten von Moden höherer Ordnung stark begrenzt.

[0018] Durch die Verwendung eines gestreckten gleichschenkligen Dreiecks des neuartigen SIT-Designs anstelle eines herkömmlichen Designs eines rechtwinkligen gleichschenkligen Dreiecks (RIT) lässt sich die PC-Struktur anhand weniger Parameter optimieren, wobei der Betrieb im schma-

len Fernfeld auch bei wesentlich größeren Vorrichtungsgrößen beibehalten werden kann. Insbesondere wurde das definierte Prozessfenster durch Simulieren verschiedener Strukturen gefunden, die eine kleine eindimensionale (1D) Rückkopplung, eine große zweidimensionale (2D) Rückkopplung und eine große Modendiskriminierung aufgrund einer speziell optimierten Photonischer-Kristall-Einheitszellengestaltung der PC-Struktur aufweisen. Eine eindimensionale Rückkopplung könnte leicht zum Oszillieren von getrennten Moden führen, was breitere Fernfelder zur Folge hat, während bei großer 2D-Kopplung die spektrale Filterung der PC-Struktur verbessert werden kann.

[0019] Die Erfinder fanden heraus, dass bei geringerer 1D-Kopplung und hoher 2D-Kopplung die Basislänge B vorzugsweise zwischen 0,60A und 0,85A, bevorzugter zwischen 0,65A und 0,80A und noch bevorzugter zwischen 0,70A und 0,75A liegt. Der Basiswinkel θ kann vorzugsweise zwischen 60° und 80° , bevorzugter zwischen 65° und 75° und noch bevorzugter zwischen 67° und 73° liegen.

[0020] Nach einem weiteren Aspekt der vorliegenden Erfindung wird ein oberflächenemittierender Photonischer-Kristall-Laser (PCSEL) bereitgestellt, der Folgendes umfasst: eine erfindungsgemäße PC-Schicht; eine aktive Schicht (d. h. eine Schicht, in der entgegengesetzte Ladungsträger kombiniert werden, um Photonen zu erzeugen); und eine Filterschicht (oder Reflektorschicht) (z. B. eine vertikale Filter-/Reflektor-Schicht) mit einem wellenlängenselektiven Element (z. B. einem verteilten Bragg-Reflektor, DBR), wobei die PC-Schicht, die aktive Schicht und die Filterschicht eine gestapelte Schichtstruktur ausbilden (z. B. eine dreidimensionale, 3D, Schichtstruktur), die derart ausgestaltet ist, dass eine von der aktiven Schicht emittierte elektromagnetische Strahlung in die gestapelte Schichtstruktur eingekoppelt und darin geleitet wird.

[0021] In der aktiven Schicht erzeugte Photonen werden in die PC-Struktur eingekoppelt, die als 2D-Resonator für die Photonen fungiert. Die Dreiecke bieten eine effektive In-Plane-Rückkopplung, fungieren aber gleichzeitig als Streustrukturen, die ein Ein- und Auskoppeln in beide zur Ebene der PC-Schicht senkrechte Richtungen ermöglichen. So fungieren die PC-Strukturen als Filterelement, das eine optische Rückkopplung mit der aktiven Schicht auf einer Seite (z. B. von der Unterseite) ermöglicht und das ein Auskoppeln der gefilterten elektromagnetischen Strahlung auf beide Seiten der aktiven Schicht ermöglicht.

[0022] Die beschriebene PCSEL-Struktur entspricht einem herkömmlichen PCSEL-Design, nutzt aber die Vorteile einer erfindungsgemäßen verbesserten PC-Schicht. Darüber hinaus kann die Filterschicht als

Reflektor fungieren, der es ermöglicht, die Verluste durch den Laser weiter zu reduzieren. Bei einer bevorzugten Ausführungsform kann sich die PC-Schicht zwischen der aktiven Schicht und der Filterschicht befinden. In diesem Fall kann jede elektromagnetische Strahlung, die von der PC-Schicht in die von der aktiven Schicht des Lasers wegführende Richtung ausgekoppelt wird, weiterhin als nützliche Emission zurückreflektiert werden. So können bewährte Filterschichten (z. B. vertikale Reflektorschichten), wie sie von oberflächenemittierenden Lasern mit vertikaler Hohlräumenanordnung (VCSEL) bekannt sind, mit neuen PC-Schichten gemäß der vorliegenden Erfindung kombiniert werden, um einen großflächigen Hochleistungs-Einmoden-Vollhalbleiter-PCSEL mit einem schmalen Fernfeld $< 1^\circ$, einem schmalen Spektrum $< 1 \text{ nm}$, einer hohen Leistungsumwandlungseffizienz $> 50 \%$ und zugleich einer hohen Dauerstrichleistung (mehrere 10 W) bereitzustellen.

[0023] Vorzugsweise entspricht die Seitenlänge A der PC-Einheitszellen einer Periode eines Gitters zweiter Ordnung zum Reflektieren einer Emissionswellenlänge des PCSEL. Die Filterfunktion der PC-Struktur muss daher an die Emissionswellenlänge des PCSEL angepasst werden, um die oben beschriebene Filterfunktion der PC-Struktur zu berücksichtigen. Es hat sich gezeigt, dass, wenn die Seitenlänge A der PC-Einheitszelle einer Periode eines Gitters zweiter Ordnung zum Reflektieren einer Emissionswellenlänge des PCSEL entspricht, die daraus resultierenden Strukturgrößen leicht anhand von Standardverfahren hergestellt werden können, während die Emissionswellenlänge des Lasers in einfacher Weise variiert werden kann, indem nur die Seitenlänge A der PC-Einheitszelle und die von der Seitenlänge A abhängigen Parameter geändert werden.

[0024] Vorzugsweise umfasst das wellenlängenselektive Element einen verteilten Bragg-Reflektor (engl. „distributed Bragg-reflector, DBR“) zum Reflektieren einer Emissionswellenlänge des PCSEL. Die Verwendung von DBR für VCSEL ist bekannt und kann direkt auf die erfindungsgemäßen PCSEL übertragen werden.

[0025] Weitere bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den in den abhängigen Ansprüchen genannten Merkmalen.

[0026] Die verschiedenen in dieser Anmeldung genannten Ausführungsformen und Aspekte der Erfindung können in vorteilhafter Weise miteinander kombiniert werden, sofern im Einzelfall nichts Anderslautendes angegeben ist.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0027] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der Zeichnungen näher beschrieben. Die angeführten Beispiele dienen der Beschreibung der Erfindung und sollen die vorliegende Erfindung nicht auf die beschriebenen Ausführungsformen beschränken. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Ausführungsform einer Photonischer-Kristall(PC)-Schicht;

Fig. 2 eine schematische Darstellung von PC-Einheitszellen auf der Grundlage eines Designs eines rechtwinkligen gleichschenkligen Dreiecks (RIT) nach dem Stand der Technik;

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer PC-Einheitszelle mit einem RIT nach dem Stand der Technik;

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer PC-Einheitszelle mit einer erfindungsgemäßen Ausführungsform eines SIT;

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer PC-Einheitszelle mit einer weiteren erfindungsgemäßen Ausführungsform eines SIT;

Fig. 6 eine schematische Darstellung einer PC-Einheitszelle mit noch einer weiteren erfindungsgemäßen Ausführungsform eines SIT;

Fig. 7 eine schematische Darstellung einer beispielhaften Ausführungsform eines erfindungsgemäßen oberflächenemittierenden Photonischer-Kristall-Lasers (PCSEL);

Fig. 8 einen beispielhaften vertikalen Querschnitt eines Brechungsindexprofils eines erfindungsgemäßen PCSEL;

Fig. 9 beispielhafte Darstellungen der optischen 2D ($|k_{2D+}|$ und $|k_{2D-}|$)- und 1D ($|k_{1D}|$)-Kopplungsstärken in der Ebene für eine unendliche PC-Schicht gemäß der vorliegenden Erfindung;

Fig. 10 beispielhafte Darstellungen der Modengewinnseparation und des Modenstrahlungsverlusts in einer unendlichen PC-Schicht gemäß der vorliegenden Erfindung und

Fig. 11 Diagramme zur Modenseparation, zum externen differentiellen Wirkungsgrad und zum Schwellenstrom für einen beispielhaften PCSEL endlicher Größe gemäß der vorliegenden Erfindung.

Ausführliche Beschreibung der Erfindung

[0028] **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform einer Photonischer-Kristall (PC)-Schicht 100. Die PC-Schicht 100 umfasst eine Halbleiterschicht 10, die aus einem ersten Halbleiter-

material (mit einem ersten Brechungsindex n_1) besteht und einen strukturierten Bereich 12 umfasst, in dem eine Mehrzahl von benachbart angeordneten quadratischen PC-Einheitszellen 20 mit einer gemeinsamen Seitenlänge A eine periodische Brechungsindexmodulationsgitterstruktur ausbildet. Der strukturierte Bereich 12 kann ein Teilbereich der Halbleiterschicht 10 sein, wie beispielsweise im mittleren Bereich der Halbleiterschicht 10 dargestellt ist. Er kann verschiedene Formen aufweisen, beispielsweise eine rechteckige, quadratische, kreisförmige, elliptische Form oder dergleichen, und die periodische Brechungsindexmodulationsgitterstruktur umfassen, wobei die Periodizität durch die Anordnung der quadratischen PC-Einheitszellen 20 gegeben ist. Die PC-Einheitszellen 20 können somit ausschließlich durch die Periodizität der Strukturen im strukturierten Bereich selbst definiert werden und müssen nicht durch Bereitstellen physischer „Zellen“ mit einer strukturellen Grenze o. Ä. definiert werden. Der strukturierte Bereich 12 kann sich in einigen Ausführungsformen über die gesamte Oberfläche der Halbleiterschicht 10 erstrecken. Eine Dicke d der PC-Schicht 100 kann zwischen 50 nm und 1.000 nm betragen. Die Seitenlänge A kann zwischen 100 nm und 1.000 nm betragen, und der strukturierte Bereich 12 kann einen Durchmesser $D > 0,5$ mm aufweisen.

[0029] Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung von PC-Einheitszellen auf der Grundlage des Designs eines rechtwinkligen gleichschenkligen Dreiecks, RIT 30, (engl. „right-angled isosceles triangle, RIT“) nach dem Stand der Technik. Die Darstellung kann sich insbesondere auf eine Draufsicht auf einen Teilbereich des in Fig. 1 gezeigten strukturierten Bereichs 12 beziehen. Jede PC-Einheitszelle 20 umfasst ein RIT 30, das durch ein Luftloch innerhalb des Halbleitermaterials der Halbleiterschicht 10, das einen niedrigeren Brechungsindex als das Halbleitermaterial der Halbleiterschicht 10 aufweist, ausgebildet ist (vgl. K. Hirose et al., „Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers“, Nature Photonics 8, 406 - 411 (2014)). Der zweite Brechungsindex n_2 des Dreiecks beträgt also etwa 1, während der erste Brechungsindex n_1 des Halbleitermaterials in der Regel zwischen 3 und 4 beträgt.

[0030] Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer PC-Einheitszelle 20 mit einem RIT 30 nach dem Stand der Technik. Die dargestellte PC-Einheitszelle 20 und das RIT 30 können den in Fig. 2 gezeigten Einheitszellen 20 entsprechen. Die quadratischen PC-Einheitszellen 20 haben eine gemeinsame Seitenlänge A und umfassen eine erste Ecke 21, eine zweite Ecke 22, eine dritte Ecke 23 und eine vierte Ecke 24. Das RIT ist innerhalb dieser quadratischen Struktur definiert und umfasst eine obere Ecke 31, eine erste Basisecke 32 und eine zweite Basisecke 33. Die obere Ecke 31 des RIT 30 fällt mit der

ersten Ecke 21 der PC-Einheitszelle 20 zusammen. Ferner fällt die erste Basisecke 32 des RIT 30 mit der zweiten Ecke 22 der PC-Einheitszelle 20 zusammen, und die zweite Basisecke 33 des RIT 30 fällt mit der dritten Ecke 23 der PC-Einheitszelle 20 zusammen. Das Verhältnis der Basislänge B zur Seitenlänge A der PC-Einheitszelle 20 beträgt in der Regel zwischen $0,7\sqrt{2}A$ und $\sqrt{2}A$, wobei der Basiswinkel $\theta 45^\circ$ beträgt.

[0031] Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung einer PC-Einheitszelle 20, die eine erfindungsgemäße Ausführungsform eines SIT 30 (engl. „symmetric stretched isosceles triangle, SIT“) umfasst. Die Grundstruktur der PC-Einheitszelle 20 ist dieselbe wie die des RIT 30 aus Fig. 3, anstelle eines rechtwinkligen gleichschenkligen Dreiecks befindet sich jedoch ein symmetrisches gestrecktes gleichschenkliges Dreieck in der PC-Einheitszelle 20. Das SIT 30 ist innerhalb der quadratischen Struktur der PC-Einheitszelle 20 definiert und umfasst eine obere Ecke 31, eine erste Basisecke 32 und eine zweite Basisecke 33, wobei die obere Ecke 31 des RIT 30 mit der ersten Ecke 21 der PC-Einheitszelle 20 zusammenfällt. Im Gegensatz zu dem in Fig. 2 gezeigten herkömmlichen RIT-Design befinden sich jedoch bei dem neuartigen SIT-Design die erste Basisecke 32 und die zweite Basisecke 33 jeweils an den Seiten der PC-Einheitszelle 20 gegenüber der zusammenfallenden Ecke (erste Ecke 21) und fallen nicht mit den anderen Ecken der PC-Einheitszelle 20 zusammen. Die Basislänge B kann somit als ein Parameter definiert sein, der von der gemeinsamen Seitenlänge A der PC-Einheitszellen 20 abhängt, wobei die Basislänge B vorzugsweise in einem Bereich zwischen $0,65A$ und $0,804$ liegt. Der Basiswinkel θ kann in einem Bereich zwischen 65° und 75° liegen.

[0032] Ein weiterer Unterschied des neuartigen SIT-Designs besteht darin, dass die Luftlöcher der RIT-Strukturen durch ein zweites Halbleitermaterial ersetzt sind, das einen anderen Brechungsindex als das erste Halbleitermaterial aufweist. Vorzugsweise unterscheiden sich der erste Brechungsindex n_1 des ersten Halbleitermaterials und der zweite Brechungsindex n_2 des zweiten Halbleitermaterials um zwischen 2 % und 35 %. Insbesondere kann das Material mit dem niedrigen Index dem zweiten Brechungsindex n_2 des zweiten Halbleitermaterials entsprechen, und das Material mit dem hohen Index kann dem ersten Brechungsindex n_1 des ersten Halbleitermaterials entsprechen. Insbesondere kann es sich bei dem ersten Halbleitermaterial um GaAs und bei dem zweiten Halbleitermaterial um InGaP handeln.

[0033] Fig. 5 zeigt eine schematische Darstellung einer PC-Einheitszelle 20, die eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform eines SIT 30 umfasst. Das gezeigte SIT 30 entspricht im Wesent-

lichen dem SIT 30 der in **Fig. 4** gezeigten vorherigen Ausführungsform. Es unterscheidet sich jedoch darin, dass die erste Basisecke 32 des SIT 30 und die zweite Basisecke 33 des SIT 30 nicht mit einer Seite der PC-Einheitszelle 20 zusammenfallen, sondern sich innerhalb der PC-Einheitszelle 20 befinden. Insbesondere weist das SIT 30 bei dieser Ausführungsform nur eine Ecke (die obere Ecke 31) auf, die mit einer Ecke (der ersten Ecke 21) der PC-Einheitszelle 20 zusammenfällt. Auf diese Weise kann der effektive Brechungsindexunterschied zwischen den Dreiecken und dem Hintergrundmaterial in den PC-Einheitszellen der Struktur weiter reduziert werden.

[0034] **Fig. 6** zeigt eine schematische Darstellung einer PC-Einheitszelle 20, die noch eine weitere erfindungsgemäße Ausführungsform eines SIT 30 umfasst. Das gezeigte SIT 30 entspricht im Wesentlichen dem SIT 30 der in **Fig. 4** und **5** gezeigten Ausführungsformen. Es unterscheidet sich jedoch darin, dass die erste Basisecke 32 des SIT 30 und die zweite Basisecke 33 des SIT 30 nicht mit einer Seite der PC-Einheitszelle 20 zusammenfallen, sondern sich außerhalb der PC-Einheitszelle 20 befinden. Insbesondere weist das SIT 30 bei dieser Ausführungsform nur eine Ecke (die obere Ecke 31) auf, die mit einer Ecke (der ersten Ecke 21) der PC-Einheitszelle 20 zusammenfällt, und jede PC-Einheitszelle 20 umfasst eine erste Basisecke 32 und eine zweite Basisecke 33 von benachbarten PC-Einheitszellen 20. Jede PC-Einheitszelle 20 inkludiert somit ein SIT 30, d. h. selbst wenn das SIT 30 strukturell nicht einheitlich ist, kann sich die Inklusion zumindest auf einen Bereich der PC-Einheitszellen 20 beziehen, der in der Draufsicht von einem stückweise vollständigen SIT 30 bedeckt ist.

[0035] **Fig. 7** zeigt eine schematische Darstellung einer beispielhaften Ausführungsform eines oberflächenemittierenden Photonischer-Kristall-Lasers (PCSEL) 200 gemäß der vorliegenden Erfindung. Der gezeigte PCSEL 200 umfasst eine erfindungsgemäße PC-Schicht 100; eine aktive Schicht 110 und eine Filterschicht 120 mit einem wellenlängenselektiven Element, wobei die PC-Schicht 100, die aktive Schicht 110 und die Filterschicht 120 eine gestapelte Schichtstruktur ausbilden, die derart ausgestaltet ist, dass eine von der aktiven Schicht 110 emittierte elektromagnetische Strahlung in die gestapelte Schichtstruktur eingekoppelt und darin geleitet wird. Insbesondere umfasst die hier beispielhaft gezeigte gestapelte Schichtstruktur einen P-Kontakt 130; eine P-Kontaktschicht 132 über dem P-Kontakt 130; die Filterschicht 120 über der P-Kontaktschicht 132; eine p-Mantelschicht 134 über der Filterschicht 120; die aktive Schicht 110 über der p-Mantelschicht 134; eine n-Mantelschicht 144 über der aktiven Schicht 110; ein n-Substrat (oder eine n-Kontaktschicht) 142 über der n-Mantelschicht 144 und einen n-Kon-

takt 140 über dem n-Substrat (oder einer n-Kontaktschicht) 142. Ein Treiberstrom wird zwischen den P-Kontakt 130 und den n-Kontakt 140 injiziert, wobei der P-Kontakt 130 als einzelner Streifen ausgebildet ist, der unterhalb des strukturierten Bereichs der PC-Schicht 100 angeordnet ist, während der n-Kontakt 140 als Ringstruktur ausgebildet sein kann, die eine Öffnung (optische Apertur) über dem P-Kontakt 130 definiert. Der PCSEL 200 kann derart ausgestaltet sein, dass er eine optische Apertur aufweist, die einer Hohlraumlänge $L > 0,5$ mm entspricht.

[0036] Die gezeigte PCSEL-Struktur entspricht im Wesentlichen einer herkömmlichen PCSEL-Struktur, nutzt aber den Vorteil des verbesserten Designs der erfindungsgemäßen PC-Schicht 100. Darüber hinaus fungiert die Filterschicht 120 als Reflektor, der es ermöglicht, die Verluste innerhalb des Diodenlasers weiter zu reduzieren. Bei einer bevorzugten Ausführungsform kann sich die PC-Schicht 100 zwischen der PC-aktiven Schicht 110 und der Filterschicht 120 befinden. In diesem Fall kann eine elektromagnetische Strahlung, die von der PC-Schicht 100 in einer von der aktiven Schicht 110 wegführenden Richtung ausgekoppelt wird, immer noch von der Filterschicht 120 in Richtung der aktiven Schicht 110 zurückreflektiert werden.

[0037] **Fig. 8** zeigt einen beispielhaften vertikalen Querschnitt eines Brechungsindexprofils eines erfindungsgemäßen PCSEL 200. Das Brechungsindexprofil und die Lage der PC-Schicht 100 in einem beispielhaften erfindungsgemäßen Vollhalbleiter-PCSEL 200 (z. B. in dem in **Fig. 7** gezeigten PCSEL 200) sind erkennbar. Der P-Kontakt 130 befindet sich auf der linken Seite des Diagramms (bei $0 \mu\text{m}$), während sich der n-Kontakt 140 auf der rechten Seite befindet (bei $7 \mu\text{m}$). Die Gesamthöhe der Schichtstruktur des PCSEL 200 beträgt somit bei diesem Beispiel $7 \mu\text{m}$, kann jedoch bei anderen Ausführungsformen auch anders sein. Aus der Abbildung ist deutlich erkennbar, dass die PC-Schicht 100 zwischen der PC-aktiven Schicht 110 und der Filterschicht 120 angeordnet ist, wobei die Schichten durch Mantelschichten (134, 144), die eine gemeinsame Dicke t_{clad} aufweisen können, voneinander getrennt sind.

[0038] **Fig. 9** zeigt beispielhafte Darstellungen der optischen 2D ($|k_{2D+}|$ und $|k_{2D-}|$)- und 1D ($|k_{1D}|$)-Kopplungsstärken in der Ebene für eine unendliche PC-Schicht gemäß der vorliegenden Erfindung, wobei es sich bei k_{1D} , k_{2D+} und k_{2D-} um komplexe Zahlen handelt, wie sie in T. Inoue et. al. („General recipe to realize photonic-crystal surface-emitting lasers with 100-W-to-1-kW single-mode operation“, Nature Communications 13.1, 3262 (2022)) definiert sind. Insbesondere zeigen **Fig. 9A** die optischen 2D ($|k_{2D+}|$)-Kopplungsstärken in der Ebene, **Fig. 9B** die optischen 2D ($|k_{2D-}|$)-Kopplungsstärken in der

Ebene und **Fig. 9C** die optischen 1D ($|k_{1D}|$)-Kopplungsstärken in der Ebene. Dies sind die Ergebnisse numerischer Simulationen, die mit einem speziell entwickelten Simulationswerkzeug zur Simulation von PCSEL mit unendlichem Hohlraum gemäß der vorliegenden Erfindung in Anlehnung an M. Radziunas et al. („Optical Mode Calculation in Large-Area Photonic Crystal Surface-Emitting Lasers“, IEEE Photonics J. 16, 0601209 (2024)) abgeleitet wurden. Für die vorgesehene Anwendung als Resonatorelement in einem PCSEL müssen die 1D-Rückkopplung klein und die 2D-Rückkopplung groß sein. Rückkopplung bezieht sich in diesem Fall auf die jeweilige Kopplung zwischen Moden der PC-Struktur in 1D oder 2D. Eine hohe 2D-Rückkopplung bedeutet, dass eine Anregung in der PC-Struktur mit hoher Wahrscheinlichkeit an 2D-Moden koppelt, während eine hohe 1D-Rückkopplung bedeutet, dass eine Anregung in der PC-Struktur mit hoher Wahrscheinlichkeit an 1D-Moden der PC-Struktur koppelt. Da für die Einmoden-Laseremission die Anregung von 2D-Moden erforderlich ist, müssen die jeweiligen Kopplungsstärken in dieser Hinsicht optimiert werden. Daher muss ein optimales Betriebsfenster gefunden werden, in dem die 2D-Rückkopplung groß und die 1D-Rückkopplung klein ist. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass die Bedingungen bei einem Designfenster mit einer Basislänge B zwischen 0,60 μ m und 0,804 μ m und einem Basiswinkel θ zwischen 60° und 80° weitestgehend erfüllt sind. Unter Berücksichtigung weiterer Aspekte, die sich auf Modengewinnseparation und Modenstrahlungsverluste innerhalb der PC-Struktur beziehen, wird ein bevorzugtes Betriebsfenster für eine Basislänge B zwischen 0,65 μ m und 0,80 μ m und einen Basiswinkel θ zwischen 65° und 75° ermittelt. Das bevorzugte Betriebsfenster ist in den Darstellungen auch durch ein Quadrat gekennzeichnet.

[0039] **Fig. 10** zeigt beispielhafte Darstellungen der Modengewinnseparation und des Modenstrahlungsverlusts in einer unendlichen PC-Schicht gemäß der vorliegenden Erfindung. Insbesondere zeigt **Fig. 10A** den gesamten optischen Modenverlust aufgrund von Oberflächenkopplung zwischen der verlustärmsten unendlichen Hohlraumgrundmode und der nächstverlustärmeren Mode (Modengewinnseparation), und **Fig. 10B** zeigt den gesamten Strahlungsverlust der Grundmode (Strahlungsverlust der Mode A). Für den Einmodenbetrieb sollte eine große Modenseparation ($> 2 \text{ cm}^{-1}$) im gesamten optischen Modenverlust zwischen der Grundmode und der nächstverlustärmeren Mode gegeben sein. Außerdem sollte für einen Betrieb mit niedrigem Schwellenwert und hohem Wirkungsgrad der gesamte Strahlungsverlust der Grundmode nicht zu hoch oder zu niedrig sein ($> 5 \text{ cm}^{-1}$, $< 20 \text{ cm}^{-1}$). Weitere Berechnungen mit dem obengenannten Simulationswerkzeug haben bestätigt, dass diese Anforderungen innerhalb des ermittelten bevorzugten Betriebsfensters erfüllt sind.

[0040] **Fig. 11** zeigt Diagramme zur Modenseparation, zum externen differentiellen Wirkungsgrad und zum Schwellenstrom für einen beispielhaften PCSEL endlicher Größe gemäß der vorliegenden Erfindung. In den Diagrammen ist die Abhängigkeit dieser Werte von der Hohlraumlänge L für einen PCSEL gemäß der vorliegenden Erfindung mit einer erfindungsgemäßen SIT-Struktur und einer herkömmlichen RIT-Struktur in der PC-Schicht dargestellt. Insbesondere zeigen **Fig. 11A** die Modenseparation, **Fig. 11B** den externen differentiellen Wirkungsgrad und **Fig. 11C** den Schwellenstrom.

[0041] Eine ausreichende Modendiskriminierung ($> 2 \text{ cm}^{-1}$) zwischen der Grundmode und den ersten Moden höherer Ordnung muss für die definierte PCSEL-Struktur mit endlicher Fläche innerhalb des Designfensters erreicht werden. Darüber hinaus sollte der Schwellenstrom I_{th} niedrig sein ($< 10 \text{ A}$ für den Test bis zu einem beispielhaften Betriebsstrom von $I = 100 \text{ A}$, vgl. M. Yoshida et al., „High-brightness scalable continuous-wave single-mode photonic-crystal laser“, Nature 618, 727-732 (2023)) für einen Schwellenwertbeitrag zum Wirkungsgrad von $[(I - I_{th})/I] \geq 90\%$, und der externe differentielle Wirkungsgrad sollte hoch sein ($\eta_D > 80\%$, entsprechend einem Steigungswirkungsgrad $> 0,9 \text{ W/A}$ bei $\lambda = 1.070 \text{ nm}$). Die Darstellungen resultieren aus Berechnungen, die durchgeführt wurden für eine beispielhafte PCSEL-Struktur mit einem Gesamtaußendurchmesser (d. h. einer Hohlraumlänge L) von bis zu 3 mm und für ein Design auf der Grundlage einer herkömmlichen RIT-basierten Einheitszelle (als „RIT“ bezeichnet) und einer erfindungsgemäßen SIT-basierten Einheitszelle (als „Tri_70“ bezeichnet), die im angegebenen bevorzugten Betriebsfenster mit einer Basislänge B von 0,75 μ m und einem Basiswinkel θ von 70° liegen.

[0042] Aus **Fig. 11A** ist ersichtlich, dass die Modenseparation bis zur maximal berechneten Kavitätslänge $L = 3 \text{ mm}$ für einen PCSEL gemäß der vorliegenden Erfindung mit der erfindungsgemäßen SIT-Struktur $> 2 \text{ cm}^{-1}$ beträgt, während sie bei einer Kavitätslänge L von mehr als 500 μ m für ein herkömmliches RIT-basiertes Design auf unter 2 cm^{-1} fällt. Dies begrenzt die Stromstärke für RIT-basierte Designs auf kleine Vorrichtungsgrößen und ist daher für Betriebsleistungen von mehreren 10 W ungeeignet (z. B. aufgrund der Schwierigkeit, sie zu kühlen). Aus **Fig. 11B** ist ersichtlich, dass der externe differentielle Wirkungsgrad η_D für den PCSEL gemäß der vorliegenden Erfindung, der die erfindungsgemäße SIT-Struktur aufweist, mit der Hohlraumlänge L stark ansteigt und für eine Hohlraumlänge $L > 1 \text{ mm}$ ($L > 400 \mu\text{m}$ für ein herkömmliches RIT-basiertes Design) bei $> 80\%$ liegt. Aus **Fig. 11C** ist ersichtlich, dass ein PCSEL gemäß der vorliegenden Erfindung, der die erfindungsgemäße SIT-Struktur umfasst, bis zur Hohlraumlänge $L = 2,5 \text{ mm}$ einen Schwellen-

strom $I_{th} < 10$ A aufrechterhält, während beim herkömmlichen RIT-Design für Hohlraumtlängen $L > 1,4$ mm ein Schwellenstrom $I_{th} > 10$ A auftritt. Die Leistung des Lasers wird auf der Grundlage gemessener charakteristischer Parameter für eine vertikale Struktur mit $\lambda = 1070$ nm berechnet, wie in Fig. 7 gezeigt (Design basierend auf optischem Verlust = $1,41 \text{ cm}^{-1}$, Modalgewinnvorfaktor $\Gamma g_0 = 22,7 \text{ cm}^{-1}$ und Transparenzstromdichte $J_{tr} = 56 \text{ A/cm}^2$).

[0043] Eine weitere Effizienzskalierung ist allerdings zu erwarten, wenn mehrere aktive Schichten in einem auf der erfindungsgemäßen SIT-Struktur basierenden PCSEL gemäß der vorliegenden Erfindung umfasst sind. Die mehreren aktiven Schichten können durch Tunnelverbindungen miteinander verbunden sein. Ein solcher oberflächenemittierender Multi-Junction-PC-Laser kann in einem einzelnen vertikalen Modus arbeiten und durch eine einzelne PC-Struktur stabilisiert werden, sodass der „Widerstands-Overhead“ der Filterschicht (z. B. einschließlich eines DBR-Gitters) auf mehrere Laserstrukturen verteilt wird.

Bezugszeichenliste

10	Halbleiterschicht
12	strukturierter Bereich
20	PC-Einheitszelle
21	erste Ecke (PC-Einheitszelle)
22	zweite Ecke (PC-Einheitszelle)
23	dritte Ecke (PC-Einheitszelle)
24	vierte Ecke (PC-Einheitszelle)
30	rechtwinkliges oder gestrecktes gleichschenkliges Dreieck (RIT/SIT)
31	obere Ecke (RIT/SIT)
32	erste Basisecke (RIT/SIT)
33	zweite Basisecke (RIT/SIT)
100	Photonischer-Kristall(PC)-Schicht
110	aktive Schicht
120	Filterschicht
130	P-Kontakt
132	P-Kontaktschicht
134	P-Mantelschicht
140	N-Kontakt
142	N-Substrat oder N-Kontaktschicht
144	N-Mantelschicht
200	oberflächenemittierender Photonischer-Kristall-Laser, PCSEL
A	Seitenlänge (PC-Einheitszelle)

d	Dicke (Halbleiterschicht)
B	Basislänge (RIT/SIT)
D	Durchmesser (z. B. Durchmesser des Umfangs des strukturierten Bereichs)
L	Hohlraumtlänge
θ	Basiswinkel (RIT/SIT)

Patentansprüche

1. Photonischer-Kristall-Schicht, PC-Schicht, (100), für einen oberflächenemittierenden Photonischer-Kristall-Laser, PCSEL, (200), umfassend eine Halbleiterschicht (10), die aus einem ersten Halbleitermaterial besteht und einen strukturierten Bereich (12) umfasst, in dem eine Mehrzahl von benachbart angeordneten quadratischen PC-Einheitszellen (20) mit einer gemeinsamen Seitenlänge A eine periodische Brechungsindexmodulationsgitterstruktur ausbildet, wobei jede PC-Einheitszelle (20) ein symmetrisches gestrecktes gleichschenkliges Dreieck, SIT, (30) aus einem zweiten Halbleitermaterial mit einem niedrigeren oder höheren Brechungsindex als das erste Halbleitermaterial umfasst, wobei das SIT (30) eine Basislänge B und einen Basiswinkel θ aufweist, wobei die obere Ecke (31) des SIT (30) mit einer Ecke (21) der PC-Einheitszellen (20) zusammenfällt, wobei die Basislänge B zwischen $0,60A$ und $0,85A$ beträgt und der Basiswinkel θ zwischen 60° und 80° beträgt, und wobei die erste Basisecke (32) des SIT (30) und die zweite Basisecke (33) des SIT (30) sich außerhalb der PC-Einheitszelle (20) befinden oder jeweils mit einer Seite der PC-Einheitszelle (20) zusammenfallen.

2. PC-Schicht (100) nach Anspruch 1, wobei sich der erste Brechungsindex n_1 des ersten Halbleitermaterials und der zweite Brechungsindex n_2 des zweiten Halbleitermaterials um zwischen 2 % und 35 % unterscheiden.

3. PC-Schicht (100) nach Anspruch 1 oder 2, wobei es sich bei dem ersten Halbleitermaterial um GaAs und bei dem zweiten Halbleitermaterial um InGaP handelt; oder um GaAs und AlAs, GaAs und AlGaAs, InP und AlInAs, InP und InGaAsP, oder wobei allgemeiner zwei beliebige Halbleiterverbindungen aus den Al-In-Ga-As-P-Sb-N-Verbindungshalbleitermaterialsystemen als erstes Halbleitermaterial und zweites Halbleitermaterial kombiniert sind.

4. PC-Schicht (100) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der strukturierte Bereich (12) einen Durchmesser $D > 0,5$ mm aufweist und/oder eine Dicke d der PC-Schicht zwischen 50 nm und 1.000 nm beträgt.

5. PC-Schicht (100) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Seitenlänge A zwischen 100 nm und 1.000 nm beträgt.

6. Oberflächenemittierender Photonischer-Kristall-Laser, PCSEL, (200) umfassend:
eine PC-Schicht (100) nach einem der vorangehenden Ansprüche;
eine aktive Schicht (110) und
eine Filterschicht (120) mit einem wellenlängenselektiven Element,
wobei die PC-Schicht (100), die aktive Schicht (110) und die Filterschicht (120) eine gestapelte Schichtstruktur ausbilden, die derart ausgestaltet ist, dass eine von der aktiven Schicht (110) emittierte elektromagnetische Strahlung in die gestapelte Schichtstruktur eingekoppelt und darin geleitet wird.

7. PCSEL (200) nach Anspruch 6, wobei die Seitenlänge A der PC-Einheitszellen (20) einer Periode eines Gitters zweiter Ordnung zum Reflektieren einer Emissionswellenlänge des PCSEL (200) entspricht.

8. PCSEL (200) nach Anspruch 6 oder 7, wobei das wellenlängenselektive Element einen verteilten Bragg-Reflektor, DBR, zum Reflektieren einer Emissionswellenlänge des PCSEL (200) umfasst.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

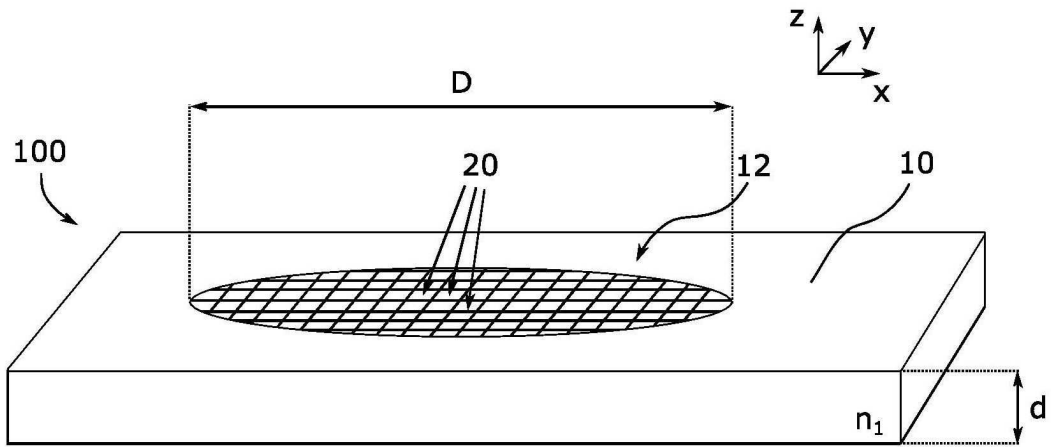


FIG. 1

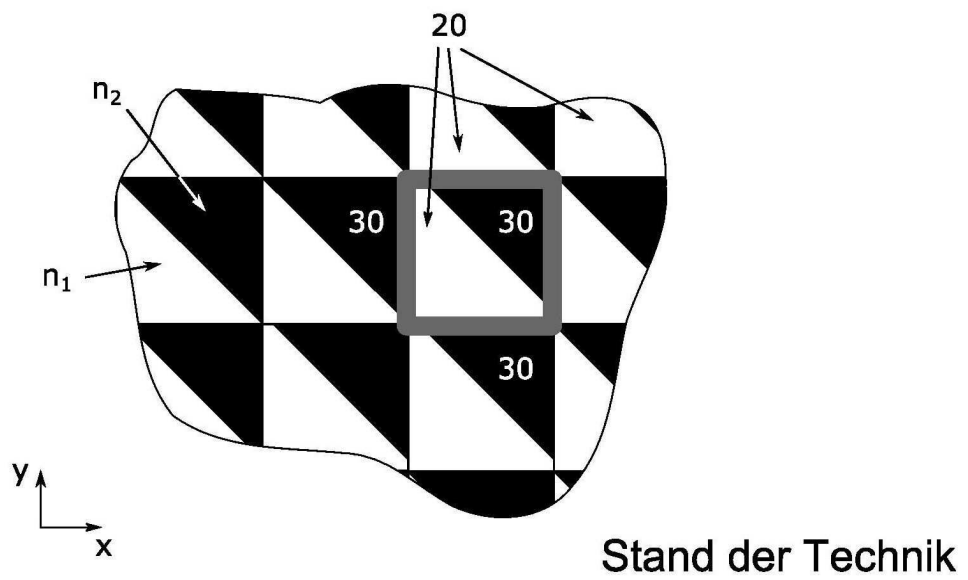
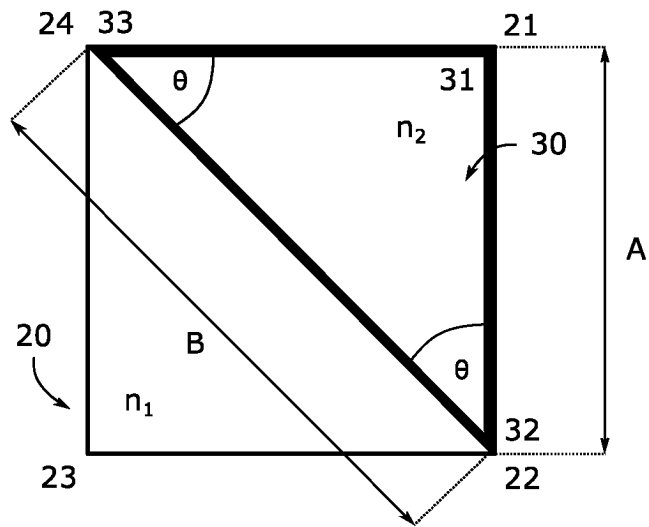


FIG. 2



Stand der Technik

FIG. 3

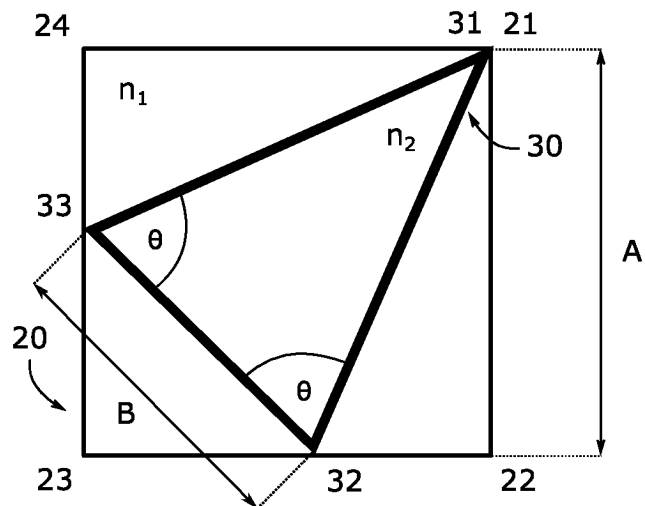


FIG. 4

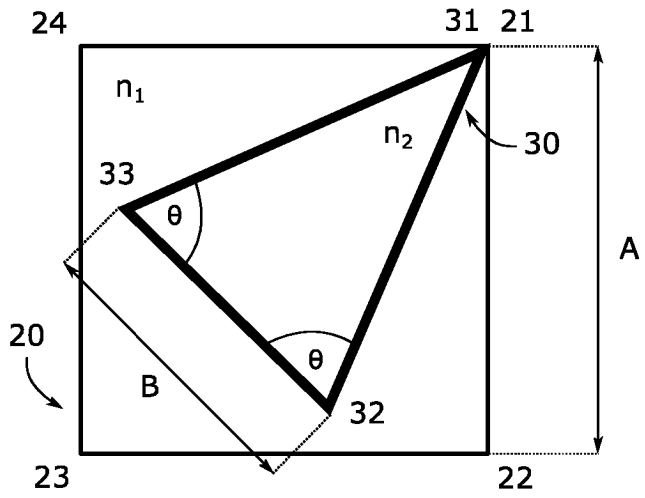


FIG. 5

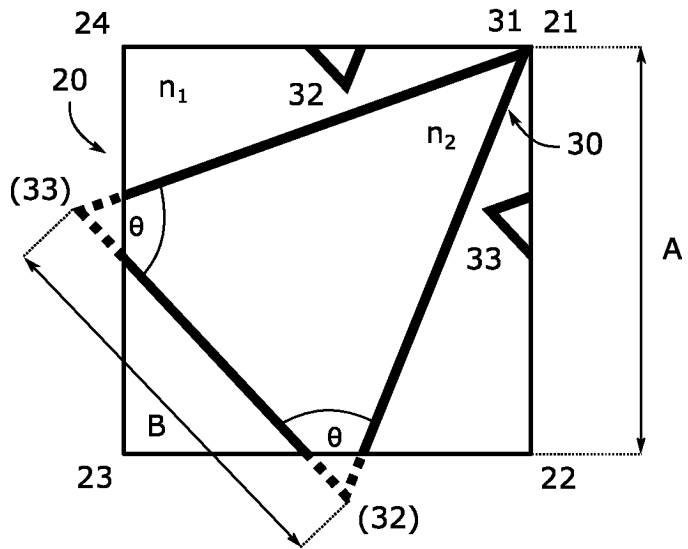


FIG. 6

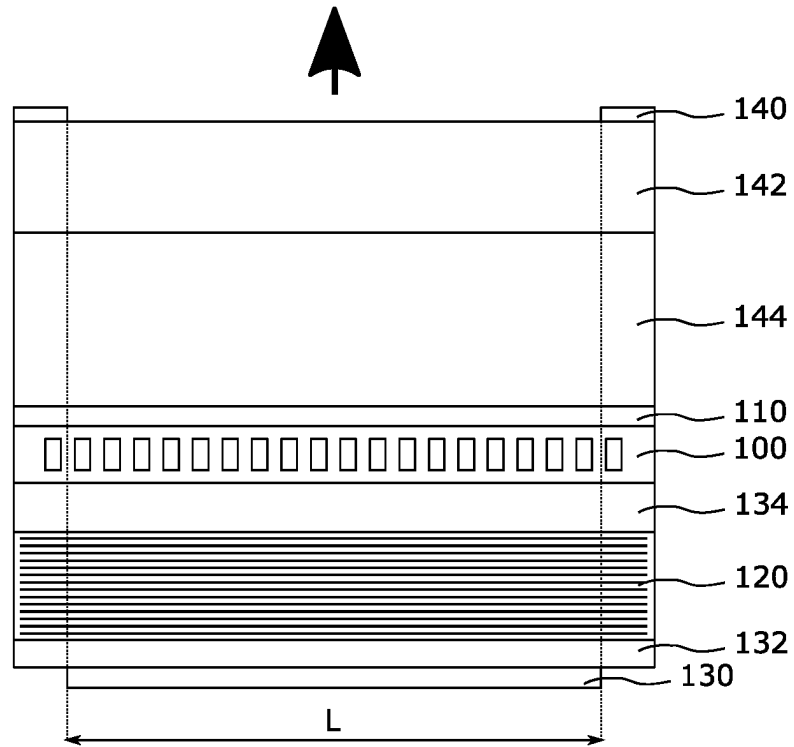


FIG. 7

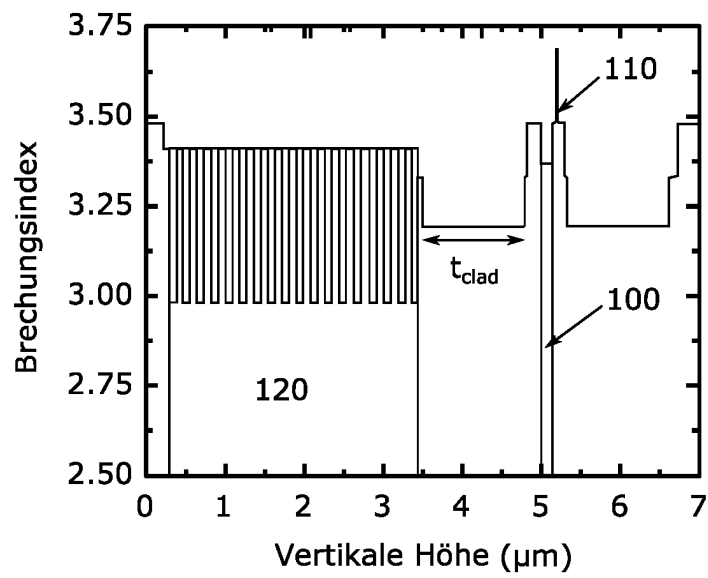


FIG. 8

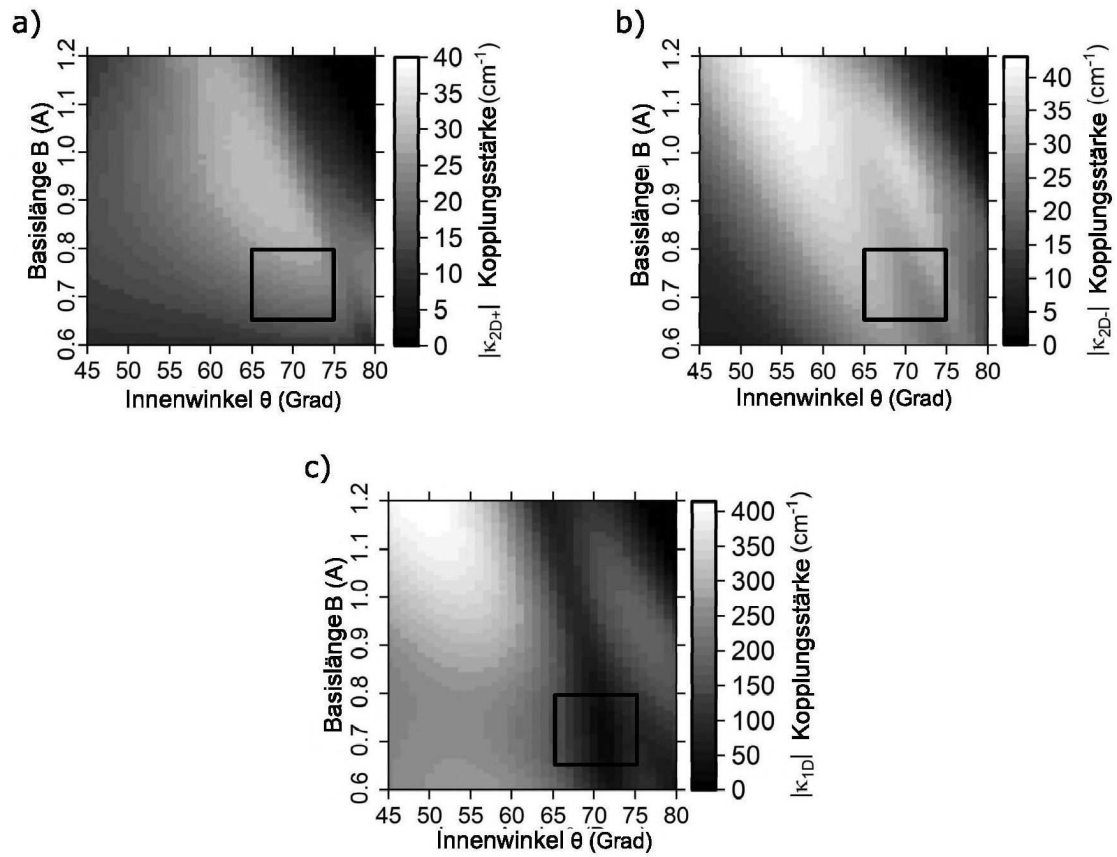


FIG. 9

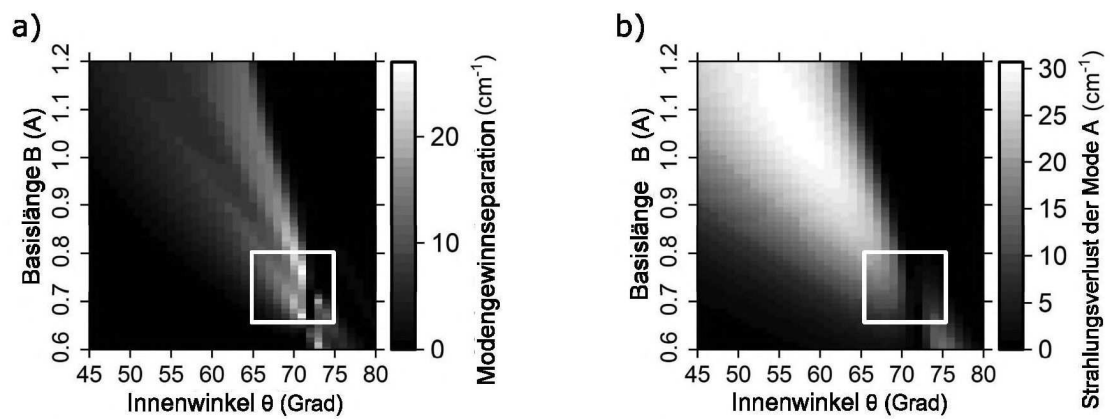


FIG. 10

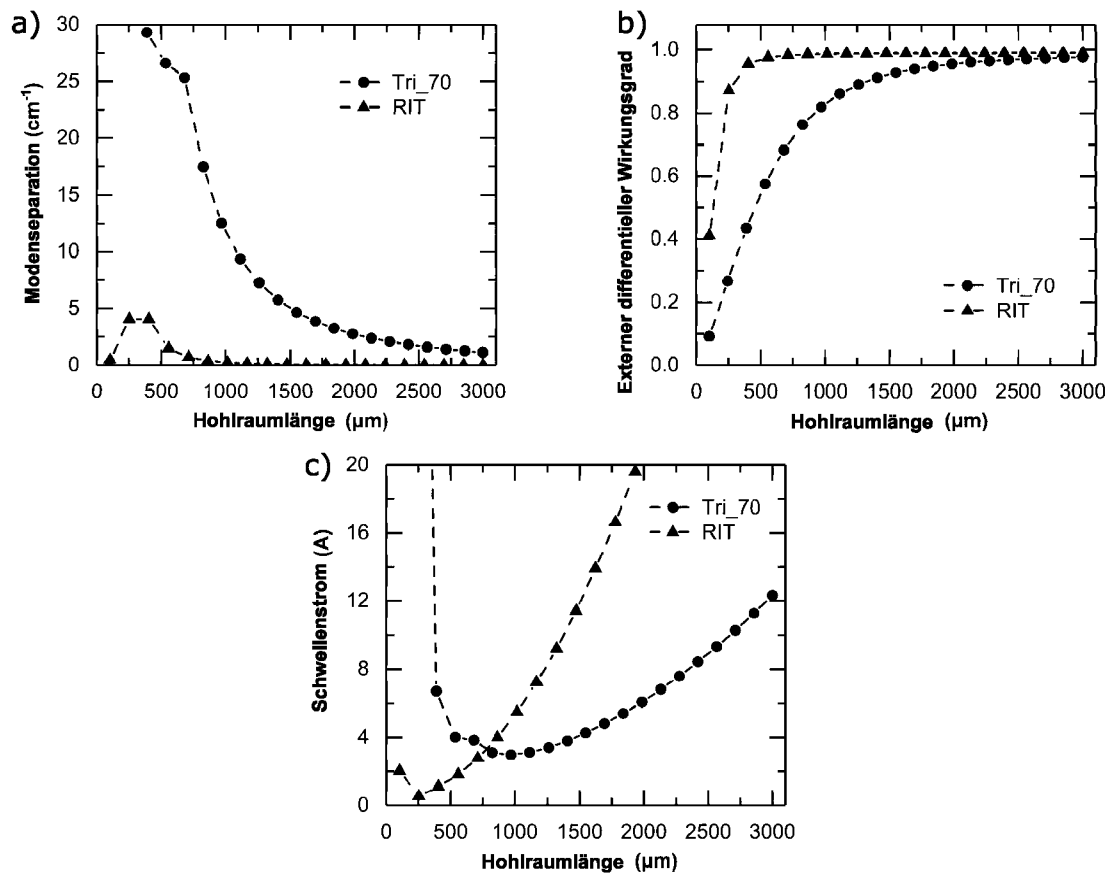


FIG. 11