



(10) **DE 10 2025 109 998 B3** 2026.07.30

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2025 109 998.7**
(22) Anmeldetag: **14.03.2025**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **30.07.2026**

(51) Int Cl.: **G02F 1/39** (2006.01)
G02B 6/12 (2006.01)
G02B 6/136 (2006.01)
G02F 1/365 (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;
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung eingetragener Verein,
80686 München, DE**

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

(72) Erfinder:
**Wenzel, Hans, Dr., 12355 Berlin, DE; Koester, Jan-
Philipp, Dr., 12555 Berlin, DE; Tenzler, Thomas,
14612 Falkensee, DE; Yang, Quankui, Dr., 79108
Freiburg, DE; Passow, Thorsten, Dr., 79108
Freiburg, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

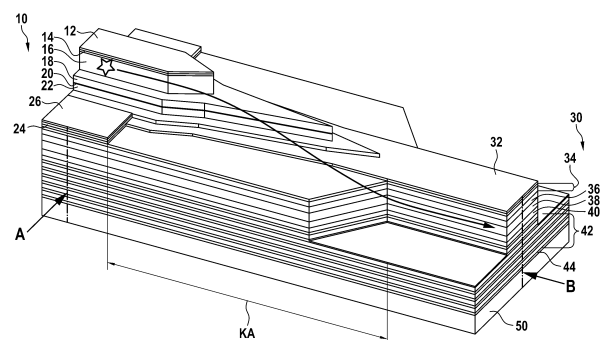
US 2023 / 0 216 267 A1
CN 1 15 712 220 A

**BIJLANI, Bhavin J.; HELMY, Amr S.: Design
methodology for efficient frequency conversion
in Bragg reflection lasers. In: Journal of the
Optical Society of America B: Optical Physics,
Vol. 29, 2012, No. 9, S. 2484-2492. ISSN 0740-
3224. DOI: 10.1364/JOSAB.29.002484. URL:
[https://opg.optica.org/view_article.cfm?
pdfKey=54da1421-1e1f-4c27-
b1892232d9aa5a27_240900](https://opg.optica.org/view_article.cfm?pdfKey=54da1421-1e1f-4c27-b1892232d9aa5a27_240900) [abgerufen am 2025-
03-20].**

(54) Bezeichnung: **Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle und Verfahren zur ihrer Herstellung**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft eine monolithisch integrierte Photonenpaarquelle, insbesondere einen zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz (engl. Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC) eingerichteten monolithisch aufgebauten Wellenleiterstapel.

Eine erfindungsgemäße monolithisch integrierte Photonenpaarquelle umfasst einen dielektrischen Wellenleiter, DWL, (10); und einen Bragg-Reflexions-Wellenleiter, BRWL, (30), eingerichtet zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz, wobei der BRWL (30) unter dem DWL (10) angeordnet ist und diese in einem gemeinsamen Kopplungsabschnitt (KA) derart miteinander wechselwirken, dass eine im DWL (10) geführte Pumpstrahlung in den BRWL (30) überkoppelt wird.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine monolithisch integrierte Photonenpaarquelle, insbesondere einen zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz (engl. Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC) eingerichteten monolithisch aufgebauten Wellenleiterstapel.

Stand der Technik

[0002] Die Nutzung verschränkter Photonenpaare hat sich in den letzten Jahren zu einem zentralen Forschungsgebiet in der Quantenphysik und in der Quantentechnologie entwickelt. Die quantenmechanischen Korrelationen, die durch die Quantenverschränkung entstehen, bieten das Potenzial für neuartige Anwendungen in den verschiedensten Bereichen.

[0003] Ein bedeutender Anwendungsbereich ist die Quantenkommunikation, insbesondere die Quantenkryptographie. Durch die Nutzung der Verschränkung können abhörsichere Kommunikationskanäle realisiert werden. Die Quantenschlüsselverteilung (engl. Quantum Key Distribution, QKD) nutzt die Verschränkung, um Verschlüsselungsschlüssel so zu übertragen, dass jedes Abhören sofort erkannt wird. Die Entwicklung von satellitenbasierter Quantenkommunikation hat gezeigt, dass verschränkte Photonen auch über große Entfernungen, einschließlich des Weltraums, übertragen werden können, was die Reichweite und Sicherheit der Quantenkommunikation erheblich erweitert.

[0004] In der Quantenmetrologie ermöglichen verschränkte Photonen die Verbesserung der Präzision von Messungen. Quantensensoren, die auf Verschränkung basieren, bieten das Potential, um einiges empfindlicher zu sein, als klassische Sensoren. Dies ermöglicht Anwendungen in der Atomuhrtechnik, der Gravitationswellendetektion und der hochpräzisen Spektroskopie. Durch die Nutzung von verschränkten Zuständen können Messungen mit einer Genauigkeit durchgeführt werden, die mit klassischen Methoden nicht erreichbar wäre.

[0005] Neben den genannten Anwendungsbereichen gibt es noch weitere Gebiete, in denen verschränkte Photonen eine Rolle spielen. Dazu gehören beispielsweise die Quantenbildgebung, die Quantensimulation, das Quantencomputing und die Grundlagenforschung zur Quantenphysik.

[0006] Zu den derzeitigen Herausforderungen bei der Erschließung dieser Anwendungen gehören insbesondere die Entwicklung effizienter und robuster Quellen für verschränkte Photonen sowie die Miniaturisierung und Integration von Quantengeräten.

[0007] Die Entwicklung integrierter photonischer Systeme zur Erzeugung verschränkter Photonenpaare stellt einen entscheidenden Fortschritt für die praktische Anwendung von Quantentechnologien dar. Meist werden verschränkte Photonen noch immer mit aus Einzelkomponenten zusammengesetzten optischen Aufbauten bereitgestellt, was jedoch häufig zu großen, instabilen und schwer zu miniaturisierenden Systemen führt. Die Integration solcher Photonenpaarquellen auf Chip-Ebene ermöglicht hingegen die Realisierung kompakter, robuster und skalierbarer Quantengeräte.

[0008] Eine gängige Methode zur integrierten Erzeugung verschränkter Photonenpaare basiert auf Wellenleitern. Hierbei werden nichtlineare optische Effekte in Wellenleitern ausgenutzt, um Photonenpaare zu erzeugen. Insbesondere die spontane parametrische Konversion (engl. Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC), welche auch als parametrische Fluoreszenz oder spontane parametrische Fluoreszenz bezeichnet wird, und die spontane Vierwellenmischung (engl. Spontaneous Four Wave Mixing, SFWM) sind dabei weit verbreitete Verfahren. Bei der SPDC wird ein Pump-Photon in einem nichtlinearen Material in zwei Photonen mit geringerer Energie umgewandelt, wobei durch eine geeignete Wahl des Materials und der Wellenleitergeometrie verschränkte Photonenpaare erzeugt werden können. Für die Photonenpaarerzeugung mittels SPDC sind Lithiumniobat-Wellenleiter aufgrund ihrer starken Nichtlinearität und der Möglichkeit, diese in integrierte Schaltungen zu implementieren, besonders vielversprechend. Beim SFWM interagieren hingegen zwei Pump-Photonen in einem nichtlinearen Material und erzeugen ein Signal- und ein Idler-Photon. Insbesondere Silizium-Wellenleiter sind aufgrund ihrer Kompatibilität mit der CMOS-Technologie und ihrer hohen Nichtlinearität attraktiv für die SFWM-basierte Erzeugung verschränkter Photonenpaare. Neben Lithiumniobat und Silizium sind jedoch auch andere Materialien, wie beispielsweise Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) und Siliziumnitrid (Si_3N_4), zur Ausbildung solcher nichtlinearen Wellenleiter zur Photonenpaarerzeugung geeignet.

[0009] Einen besonders vielversprechenden Ansatz für die Erzeugung verschränkter Photonenpaare mittels SPDC bietet die Verwendung von Bragg-Reflexions-Wellenleitern (BRWL). Ihre Konstruktion, die auf Bragg-Gittern basiert, ermöglicht eine flexible Steuerung der Phasenanpassung, einem entscheidenden Faktor für die SPDC. Durch die gezielte Gestaltung der Schichtstruktur kann eine Phasenanpassung für spezifische Wellenlängen und Materialien erfolgen. Dadurch kann eine verstärkte Wechselwirkung zwischen den Photonen und dem nichtlinearen Material erreicht werden, was die Effizienz nichtlinearer Prozesse steigert. Die Möglichkeit, sowohl gleich als auch kreuzpolarisierte Photo-

nenpaare erzeugen zu können, ist ein weiterer Vorteil, insbesondere für Anwendungen in der Quantenkommunikation und dem Quantencomputing.

[0010] Im Stand der Technik sind insbesondere BRWL auf Basis von AlGaAs bekannt. Der Bragg-Wellenleiter setzt sich dabei aus einer Kernregion und darum liegenden Schichten mit alternierendem Aluminiumgehalt (den sogenannten Bragg-Reflektortpaaren) zusammen. Dadurch werden bei der hohen Wellenlänge die Grundmoden des Wellenleiters im Kern geführt und für das kurzwellige Licht bildet sich eine im Kernbereich eingeschlossene höhere Vertikalmode aus, die üblicherweise als „Braggmode“ bezeichnet wird. Die Phasenanpassung kann zwischen der Braggmode im kurzwelligen und den beiden Grundmoden im langwelligen Bereich hergestellt werden (vgl. Abolghasem, P., et al. „Monolithic photonics using second-order optical nonlinearities in multilayer-core Bragg reflection waveguides.“ In: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 18, 2012, No. 2, S. 812-825).

[0011] Das kurzwellige Licht ist in der Regel Laserlicht, dass entweder über optisches Pumpen unmittelbar in den Wellenleiter eingekoppelt wird (passives Bauelement) oder durch elektrischen Betrieb innerhalb einer aktiven Zone, die im Kern des BRWL integriert wurde, erzeugt wird (aktives Bauelement). Damit ermöglicht die letztere Variante des Bauelements die simultane Generierung von Laserstrahlung beispielsweise bei 775 nm und von verschränkten Photonen bei 1550 nm. Durch die Einführung der aktiven Zone wird allerdings ein nicht zu vernachlässigender Einfluss auf die Phasenanpassung und somit auch auf die Konversionswellenlänge des SPDC Prozesses ausgeübt. Außerdem können das LaserDesign und das Konversionsdesign nicht unabhängig voneinander optimiert werden, sondern es muss ein Kompromiss gewählt werden (vgl. Bijlani, B. J., and A. S. Helmy. „Design methodology for efficient frequency conversion in Bragg reflection lasers.“ In: Journal of the Optical Society of America B, Vol. 29, 2012, No. 9, S. 2484-2492).

[0012] US 2023/0216267 A1 betrifft ein Verfahren zur Erzeugung verschränkter Photonen in einem Bragg-Resonator, bei dem die Leistungskopplungsverluste im optischen Resonator dadurch reduziert werden, dass die Abhängigkeit von der optischen Kopplung innerhalb des Resonators verringert wird. CN 115712220 A betrifft einen Bragg-Reflexionswellenleiter zur direkten Erzeugung von hybrid verschränkter Photonenpaare, sowie die Anwendung des Bragg-Reflexionswellenleiters.

Offenbarung der Erfindung

[0013] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine monolithisch integrierte Photonenpaarquelle bereitzustellen, welche die Nachteile des Standes der Technik überwindet oder zumindest deutlich abschwächt. Insbesondere soll eine monolithisch integrierte Photonenpaarquelle zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz (engl. Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC) bereitgestellt werden, bei dem die strukturellen und geometrischen Eigenschaften des BRWL für eine verbesserte Konversionseffizienz weitgehend unabhängig von den für die Bereitstellung der Pumpstrahlung benötigten Strukturen optimiert und angepasst werden können. Vor allem sollen im Falle eines aktiven Bauelements das Laserdesign und das Konversionsdesign unabhängig voneinander optimiert werden können.

[0014] Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß durch die Merkmale der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Zweckmäßige Ausgestaltungen der Erfindung sind in den zugehörigen abhängigen Ansprüchen enthalten. Die in den Patentansprüchen einzeln aufgeführten Merkmale sind in technologisch sinnvoller Weise miteinander kombinierbar und durch erläuternde Sachverhalte aus der Beschreibung und/oder Details aus den Figuren ergänzbar, wobei weitere bevorzugte Ausführungsvarianten der Erfindung aufgezeigt werden.

[0015] Ein Aspekt der Erfindung betrifft eine monolithisch integrierte Photonenpaarquelle, umfassend einen dielektrischen Wellenleiter (DWL); und einen Bragg-Reflexions-Wellenleiter (BRWL), eingerichtet zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz (engl. Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC), wobei der BRWL unter dem DWL angeordnet ist und diese in einem gemeinsamen Kopplungsabschnitt derart miteinander wechselwirken, dass eine im DWL geführte Pumpstrahlung in den BRWL überkoppelt wird.

[0016] Die Idee der vorliegenden Erfindung liegt somit insbesondere in einem zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz eingerichteten monolithisch aufgebauten Wellenleiterstapel. Single-mode-DWL zur Führung monochromatischen Lichtes sind im Stand der Technik hinreichend bekannt. Auch die Verwendung von BRWL zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz sowie die damit verbundenen Methoden zur Einstellung der Phasenanpassung bei gleichzeitiger Optimierung der Konversionseffizienz sind dem Fachmann aus dem Stand der Technik hinreichend bekannt.

Erfindungsgemäß erfolgt jedoch eine Kombination dieser beiden an sich bekannten Technologien derart, dass ein DWL und der BRWL in einer monolithischen Plattform derart übereinander angeordnet werden, dass diese einen gemeinsamen Kopplungsabschnitt aufweisen, in welchem diese derart miteinander wechselwirken, dass eine im DWL geführte Pumpstrahlung in den BRWL überkoppelt wird. Wellenleiterbasierte integrierte vertikale Kopplerstrukturen sind für DWL als dem Fachmann ebenfalls hinreichend bekannt anzusehen, eine derartige Kombination eines DWL mit einem BRWL eingerichtet für eine Überkopplung einer im DWL geführten Pumpstrahlung in den BRWL zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz sind im Stand der Technik jedoch weder offenbart noch werden diese dem Fachmann darin nahegelegt.

[0017] Als Koppelabschnitt wird dabei eine zur entsprechenden Überkopplung eingerichtete quasiparallele Wegstrecke entlang der longitudinalen Richtung beider Wellenleiterstrukturen bezeichnet. Die quasiparallele Ausbildung der beiden Wellenleiterstrukturen ist dabei jedoch nicht auf den Koppelabschnitt beschränkt, vielmehr können sich die beiden Wellenleiterstrukturen auch über den eigentlichen Koppelabschnitt hinaus gemeinsam entlang einer gemeinsamen Richtung erstrecken. Vorzugsweise weisen beiden Wellenleiterstrukturen jedoch außerhalb des eigentlichen Koppelabschnitts nur eine geringe gegenseitige Kopplung auf. Der Ausdruck „quasiparallel“ bedeutet dabei, dass sich die beiden Wellenleiter zur gegenseitigen Kopplung entlang einer gewissen Strecke derart annähern, dass ein gewisser Feldüberlapp auftritt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die beiden Wellenleiter streng parallel im mathematischen Sinne angeordnet sein müssen, vielmehr kann der Abstand der Wellenleiter im Kopplungsabschnitt auch veränderlich oder moduliert sein.

[0018] Bevorzugt wird eine erfindungsgemäße monolithisch integrierte Photonenpaarquelle vollständig in einem AlGaAs-basierten Material realisiert, d. h. sowohl der DWL als auch der BRWL werden aus entsprechend einem dotierten oder intrinsischen AlGaAs-Material ausgebildet. Bei dem zugrundeliegenden Substrat kann es sich bevorzugt um ein GaAs-Substrat handeln. Dies soll jedoch keine Einschränkung hinsichtlich des verwendeten Materialsystems darstellen, vielmehr sind eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien zur Ausbildung entsprechender Wellenleiterstapel geeignet. Diese können abhängig vom erforderlichen Wellenlängenbereich für die Photonenpaare entsprechend ausgewählt und hinsichtlich der gewünschten optischen und elektronischen Eigenschaften optimiert werden.

[0019] Vorzugsweise ist der DWL als passiver Wellenleiter mit einem Eingang zur Einkopplung der Pumpstrahlung ausgebildet. In diesem Fall muss die Pumpstrahlung vor einer Überkopplung in den BRWL auf geeignete Weise zunächst in den DWL eingekoppelt werden. Die Bereitstellung der Pumpstrahlung kann dabei von außerhalb, beispielsweise mittels eines externen Lasers, erfolgen. Der Laser kann jedoch auch als weitere Komponente auf der erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Photonenpaarquelle ausgebildet sein. Ebenfalls möglich ist auch die Integration eines Lasers mit oder in den DWL außerhalb des Kopplungsbereichs. Der erfindungsgemäß beschriebene DWL wird jedoch auch in diesem Fall weiterhin als passiver Wellenleiter bezeichnet, da der für die Erfindung relevante Abschnitt des DWL weiterhin keine aktiven Laserstrukturen aufweist und die Pumpstrahlung dort wie im Falle einer externen Kopplung ebenfalls ausschließlich passiv geführt wird. Der DWL kann beispielsweise als planarer Rippen- oder Streifenwellenleiter ausgebildet sein und neben einer Wellenleiterschicht auch eine oder mehrere Mantelschichten umfassen.

[0020] In einer bevorzugten alternativen Ausführungsform ist der der DWL als aktiver Wellenleiter mit einer aktiven Schicht ausgebildet. Der prinzipielle Aufbau des DWL kann dabei einem voranstehend beschriebenen passiven DWL entsprechen, wobei innerhalb einer wellenführenden die aktive Schicht ausgebildet ist. Der aktive DWL kann dabei sowohl als direkt elektrisch gepumpte oder als optisch gepumpte Laserstruktur ausgebildet sein. Besonders bevorzugt ist dabei die Integration einer herkömmlichen Diodenlaserstruktur mit einem strahlenden p-n-Übergang unmittelbar in den Wellenleiter. Insbesondere kann der aktive Wellenleiter einen AlGaAs-basierten Diodenlaseraufbau mit beispielsweise GaInAsP als aktive Schicht umfassen. Ein als aktiver Wellenleiter ausgebildeter DWL kann DFB- oder DBR-Laserstrukturen aufweisen, mithin auch als DFB- oder DBR-Laser eingerichtet sein.

[0021] Vorzugsweise ist der DWL als Rippenwellenleiter mit einer auf einer Rippe angeordneten Elektrode und einer an der Unterseite des DWL angeordneten Kontaktschicht ausgebildet. Die Bereitstellung und Optimierung von Rippenwellenleiterstrukturen sind dem Fachmann ebenfalls hinreichend bekannt. Rippenwellenleiterstrukturen ermöglichen eine effektive laterale Modenführung innerhalb des aktiven Wellenleiters. Durch die gezielte Gestaltung der Rippe und der umgebenden Schichten wird ein Brechungsindexunterschied erzeugt, der das Licht auf den Kern des Wellenleiters beschränkt. Dies führt zu einer Reduzierung von Modenverlusten und einer verbesserten Strahlqualität. Ein weiterer wesentlicher Vorteil von Rippenwellenleitern ist die Möglichkeit, die Strominjektion in das aktive Material

zu optimieren. Die Rippenstruktur ermöglicht weiterhin eine präzise Kontrolle der Stromverteilung, was zu einer effizienteren Anregung der aktiven Schicht führt. Darüber hinaus bieten Rippenwellenleiterstrukturen eine hohe Flexibilität bei der Anpassung der Wellenleitergeometrie. Dies ermöglicht es, die Lasereigenschaften wie die Modengröße, die Divergenz und die Ausgangsleistung gezielt zu beeinflussen. Durch die Variation der Rippenbreite und -höhe können die optischen Eigenschaften des Wellenleiters präzise eingestellt werden, um den Anforderungen spezifischer Anwendungen gerecht zu werden. Durch die Ausbildung der Elektrode auf der Rippe und einer an der Unterseite des DWL angeordneten Kontaktschicht kann eine effektive Bestromung der aktiven Schicht erfolgen, ohne dass der Stromfluss zu einer Beeinträchtigung des BRWL führt. Der aktive DWL und der darunter angeordnete BRWL sind somit funktional weitgehend unabhängig voneinander realisier- und optimierbar.

[0022] Vorzugsweise weist der BRWL an seiner Oberseite eine Mantelungsschicht auf. Die Mantelungsschicht (dieser Begriff wird zur Abgrenzung von der Mantelschicht des DWL verwendet) wird als Anpassungs- und Abstandsschicht zur Einstellung des Abstandes der jeweiligen wellenführenden Schichten genutzt. Deren Dicke sollte jedoch nicht allzu groß gewählt werden, um eine ausreichende Überkopplung zwischen den Strukturen zu ermöglichen. Beispielsweise kann die Dicke der Mantelschicht zwischen etwa 50 nm und 500 nm, vorzugsweise bei etwa 200 nm, liegen. Über eine niedrigbrechende Mantelungsschicht kann ein ausreichender Einschluss der Lasermode im DWL erreicht werden.

[0023] Vorzugsweise umfasst der BRWL eine Wellenleitungsschicht, die zumindest unterhalb von mindestens einem Bragg-Reflektorpaar umgeben ist. Der BRWL kann neben den beiden genannten Elementen noch weitere Schichten, wie etwa zusätzliche Anpassungs-, Mantel-Abstands- und/oder Ätztuppschichten, umfassen. Die Wellenleitungsschicht muss derart eingerichtet sein, dass diese sowohl die aus dem DWL überkoppelte Pumpstrahlung als auch die über die darin ablaufenden nichtlinearen Prozesse erzeugte Konversionsstrahlung mit den verschränkten Photonenpaaren führen kann. Über die spezifische geometrische und strukturelle Einbettung der Wellenleitungsschicht in die Umgebung kann eine für einen effektiven Konversionsprozess erforderliche Wechselwirkung mittels Phasenanpassung realisiert werden. Eine vertikale Begrenzung der Wellenführung im BRWL nach unten erfolgt durch das mindestens eine Bragg-Reflektorpaar unterhalb der Wellenleitungsschicht. Eine vertikale Begrenzung der Wellenführung im BRWL nach oben kann ebenfalls durch mindestens ein weiteres Bragg-Reflektorpaar oberhalb der Wellenleitungsschicht

erfolgen. Eine vertikale Begrenzung der Wellenführung im BRWL nach oben kann jedoch auch ohne ein solches oberhalb der Wellenleitungsschicht liegendes Bragg-Reflektorpaar an anderen Strukturen, beispielsweise an einer entsprechend eingerichteten oberliegenden Mantelungsschicht oder einer freiliegenden Grenzfläche (z. B. durch strukturelle Ätzung), erfolgen. Bei einem herkömmlichen BRWL im Stand der Technik ist die Anzahl der Bragg-Reflektorpaare oberhalb und unterhalb der Wellenleitungsschicht symmetrisch ausgebildet, d. h. oberhalb und unterhalb befinden sich jeweils gleich viele Bragg-Reflektorpaare.

[0024] Bei einer erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Photonenpaarquelle ist die Anzahl der Bragg-Reflektorpaare oberhalb und unterhalb der Wellenleitungsschicht jedoch vorzugsweise asymmetrisch ausgebildet. Insbesondere kann die Anzahl oberhalb der Wellenleitungsschicht geringer als unterhalb der Wellenleitungsschicht sein. Wenn die Ausdehnung einer optionalen Mantelungsschicht des BRWL zu groß ist bzw. eine zu hohe Anzahl an Bragg-Reflektorpaaren auf der Oberseite des BRWL vorliegt, kann eventuell keine Überkopplung der Pumpstrahlung zwischen dem DWL und dem BRWL stattfinden. Unter Umständen liegt dann nämlich keine Überlappung der räumlichen Verteilung zwischen der Braggmode im BRWL und der Pumpmode im DWL vor und somit kann auch bei einer Übereinstimmung der effektiven Brechungsindizes keine Kopplung zwischen beiden Wellenleiterstrukturen auftreten.

[0025] Daher kann die Zahl der Bragg-Reflektorpaare im BRWL oberhalb der Wellenleitungsschicht asymmetrisch auf beispielsweise lediglich ein Bragg-Reflektorpaar reduziert werden. Unterhalb der Wellenleitungsschicht ist eine Reduktion der Bragg-Reflektorpaare nicht erforderlich, weshalb dort beispielsweise 4-10 Bragg-Reflektorpaare, vorzugsweise 6 Bragg-Reflektorpaare, den Lichteinschluss unterstützen können. Die Ausbildung der Braggmode im BRWL ist trotz dieser Asymmetrie weiterhin möglich. Um einen ausreichend hohen Lichteinschluss der Pumpstrahlung im BRWL zu gewährleisten, kann beispielsweise im genannten AlGaAs-Materialsystem eine relativ dünne Mantelungsschicht, bevorzugt mit einem hohem Aluminiumgehalt, verwendet werden.

[0026] Vorzugsweise findet in Koppelrichtung zunächst eine Verjüngung der lateralen Breite des DWL und anschließend eine Verjüngung der lateralen Breite des BRWL statt, wobei die kleinste laterale Breite des BRWL im gemeinsamen Kopplungsabschnitt KA größer als die größte laterale Breite des DWL ist. Laterale Verjüngungen wurden bereits für SPDC im gestapelten Wellenleiter auf Basis von AlGaAs genutzt (vgl. Gerini, A., et al. „Electrically

injected InGaAsP/AlGaAs optical parametric oscillator: design and technology.“ In: Journal of the Optical Society of America B, Vol. 38, 2021, No. 8, S. B40-B45). Der Wellenleiter für die Konversion war hierbei jedoch kein BRWL.

[0027] Außerdem basierte das dort verwendete Kontaktschichtmaterial auf GaAs. Dadurch genügte eine laterale Verjüngung in zwei Stufen (zwei Lithographie-Ebenen/Ätzungen). In der ersten Stufe wurde die Rippe des DWL entfernt, während in der zweiten Stufe der obere Wellenleiter selbst entfernt wurde. Dadurch konnte eine Kopplung zwischen der Lasermode und der zweiten Obermode des unteren Wellenleiters realisiert werden.

[0028] Eine laterale Verjüngung von Wellenleitern kann zur Optimierung der vertikalen Kopplung von Strahlung zwischen zwei indexführenden Schichten genutzt werden. Insbesondere bietet ein solcher Ansatz die Möglichkeit, einzelne Abschnitte des gleichen Wafers für separate Aufgaben eines Bauelementes zu optimieren (vgl. Studenkov, P. V., Gokhale, M. R., and Forrest, S. R. „Efficient coupling in integrated twin-waveguide lasers using waveguide tapers.“ In: IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 11, 1999, No. 9, S. 1096-1098).

[0029] Bei Verringerung der Breite des DWL wird der effektive Brechungsindex der geführten Pumpmode verringert, wodurch dieser mit dem effektiven Brechungsindex der Mode des BRWL zur Übereinstimmung gebracht wird, was eine resonante und hocheffiziente Kopplung der Pumpstrahlung aus dem DWL in den BRWL ermöglicht (vgl. Menon, V. M., Fengnian X., and S. R. Forrest. „Photonic integration using asymmetric twin-waveguide (ATG) technology: part II-devices.“ In: IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 11, 2005, No. 1, S. 30-42).

[0030] Vorzugsweise erfolgt die Verjüngung des DWL und des BRWL jeweils abschnittsweise innerhalb der einzelnen Wellenleiterstrukturen, d. h. dass jeweils mindestens eine Verjüngung des DWL und eine des BRWL erfolgt. Insbesondere können sowohl der DWL als auch der BRWL jeweils mehrere abschnittsweise Verjüngungsstufen aufweisen. Durch diesen abgestuften Ansatz kann die Effizienz der Überkopplung der Pumpstrahlung vom DWL in den BRWL gegenüber einem jeweils einstufigen Verjüngungsschritt deutlich erhöht werden. Insbesondere können die einzelnen Verjüngungsstufen dabei derart hintereinander in Koppelungsrichtung angeordnet sein, dass an jeder Verjüngung eine zunehmende laterale Aufweitung der jeweiligen lokalen Strahlungsmoden zur Anpassung an eine jeweils unmittelbar darunterliegende Ebene erfolgt. Somit kann eine stufenweise zunehmende laterale Aufweitung der Strahlungsmoden aus einem obenliegenden

schmalen DWL in einen darunterliegenden breiteren BRWL erfolgen. Die Verjüngungsstufen können innerhalb eines die Wellenleiter in lateraler Richtung umgebenden Materials (z. B. eines seitlichen Mantelabschnitts) erfolgen. Bevorzugt ist jedoch, dass die einzelnen Verjüngungsstufen mit Ätzstufen innerhalb einer die erfindungsgemäße monolithisch integrierte Photonenpaarquelle ausbildenden Schichtstruktur korrespondieren. Insbesondere kann mit jeder weiteren in Koppelungsrichtung folgenden Verjüngungsstufe eine entsprechend tiefergehende Freilegung eines Bereichs der Schichtstruktur erfolgen. Ein entsprechendes illustratives Ausführungsbeispiel mit insgesamt 5 solcher korrespondierenden Verjüngungs- und Ätzstufen ist in **Fig. 1** gezeigt.

[0031] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Photonenpaarquelle, umfassend das Bereitstellen eines entsprechenden planaren Schichtsystems; und das Ausbilden der Verjüngungen durch mehrere aufeinanderfolgende Ätzschritte, wobei mit jedem Ätzschritt tieferliegende Schichten des Schichtsystems partiell freigelegt werden. Das erfindungsgemäße Verfahren bezieht sich insbesondere auf die Realisierung der voranstehend beschriebenen abschnittsweisen Verjüngung des DWL und des BRWL. Die technischen Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich dabei unmittelbar aus der zugehörigen Beschreibung der erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Photonenpaarquelle.

[0032] Erfindungsgemäß befindet sich ein DWL monolithisch gestapelt auf einem BRWL. Über laterale Verjüngungen kann eine im DWL erzeugte und/oder geführte Pumpstrahlung in den BRWL überkoppelt werden, in dem anschließend eine Konversion der Pumpstrahlung mittels SPDC zu quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren erfolgen soll. Dadurch kann eine kompakte monolithisch-integrierte On-Chip-Quelle für quantenmechanisch verschränkte Photonenpaare realisiert werden. Ein Vorteil gegenüber einem direkt elektrisch gepumpten einfachen BRWL aus dem Stand der Technik besteht insbesondere darin, dass der DWL und der BRWL unabhängig voneinander für die Erzeugung der Pumpstrahlung und für den anschließenden SPDC-Prozess optimiert werden können.

[0033] Die vertikale Schichtstruktur des Wellenleiterstapels kann mit aus dem Stand der Technik bekannten Methoden wie metallorganischer Gasphasenepitaxie oder Molekularstrahlepitaxie auf einem gemeinsamen Substrat abgeschieden werden. Die beschriebene mehrstufige Verjüngungsstruktur kann anschließend durch aus dem Stand der Technik bekannten Methoden zur Lithographie und trockenchemischen Ätzen (z. B. mittels Inducti-

vely Coupled Plasma Reactive Ion Etching, ICP-RIE) durch nacheinander ausgeführte Ätzschritte hergestellt werden (vgl. Gerini, A., et al. „Electrically injected InGaAsP/AlGaAs optical parametric oscillator: design and technology.“ In: Journal of the Optical Society of America B, Vol. 38, 2021, No. 8, S. B40-B45).

[0034] Der wesentliche Unterschied zu den gestapelten Wellenleitern gemäß Stand der Technik ist die Verwendung eines BRWL als unterer Wellenleiter für den Konversionsprozess. Die für die Phasenanpassung erforderliche hohe Breite der Struktur und die tiefe Ätzung des BRWL erlaubt jedoch die Bildung von und Kopplung mit höheren lateralen Moden, die für den SPDC Prozess im Allgemeinen unerwünscht sind. Wird hochbrechendes InGaP oder ein anderes Material für den n-Kontakt genutzt, kann dies zu einer nicht zu vernachlässigenden Strahlungsmenge in der oberen Kontaktschicht führen, die auch nach der Kopplung verbleibt.

[0035] Bei der vorliegenden Erfindung können diese parasitären Effekte der Strahlungsführung der Kontaktschicht und der Kopplung in höhere Moden insbesondere dadurch verringert werden, dass eine Verjüngung mit zusätzlichen Stufen (Lithographie-Ebenen/Ätzungen) erfolgt. Im ersten Schritt kann, nach der Entfernung des DWL, eine n-Kontaktschicht entfernt werden. Im zweiten Schritt wird der BRWL nicht direkt auf die Zieltiefe für die Phasenanpassung geätzt, sondern stattdessen erfolgt zunächst eine flache Ätzung, wodurch die Braggmode im BRWL geführt wird, allerdings höhere laterale Moden nicht unterstützt werden. Nach Abschluss der Kopplung und Entfernung der Kontaktschicht kann anschließend eine tiefe Ätzung des BRWL erfolgen.

[0036] Die vorliegende Erfindung ermöglicht somit eine Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mit einer kompakten elektrisch gepumpten On-Chip-Quelle. Dies wird beispielsweise durch direktes elektrisches Pumpen eines AlGaAs-basierten Bragg-Reflexionswellenleiters (BRWL) möglich. In diesem Fall muss der BRWL jedoch sowohl zur Verwendung als Laserdioden als auch zur Konversion des Pumplichts für die Erzeugung der verschränkten Photonen geeignet sein, was typischerweise Kompromisse in der Effizienz erfordert. Deshalb wird bei der vorliegenden Erfindung die Verwendung von zwei monolithisch aufeinander gestapelten Wellenleiterstrukturen (bevorzugt auf Basis von AlGaAs) vorgeschlagen, wobei der obere Wellenleiter beispielsweise ein aktiv gepumpter Laser-DWL und der untere ein BRWL ist und eine vertikale optische Kopplung zwischen beiden Wellenleitern erfolgen soll. Dadurch können die benötigten Laser- und Konversionseigenschaften getrennt voneinander eingestellt und opti-

miert werden. Zur Verbesserung der erforderlichen vertikalen optischen Kopplung können mehrere Verjüngungen der Struktur vorgesehen werden, da die Überkopplung der Pumpstrahlung bevorzugt zwischen einer Grundmode des DWL und einer höheren Mode des BRWL, insbesondere der Braggmode des BRWL, erfolgen soll.

[0037] Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den in den jeweiligen Unteransprüchen genannten Merkmalen.

[0038] Die verschiedenen in dieser Anmeldung genannten Ausführungsformen der Erfindung sind, sofern im Einzelfall nicht anders ausgeführt, mit Vorteil miteinander kombinierbar.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0039] Die Erfindung sowie das technische Umfeld werden nachfolgend anhand der beiliegenden Figuren näher erläutert. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Erfindung durch die angeführten Ausführungsbeispiele nicht beschränkt werden soll. Insbesondere ist es, soweit nicht explizit anders dargestellt, auch möglich, Teilaspekte der in den Figuren erläuterten Sachverhalte zu extrahieren und mit anderen Bestandteilen und Erkenntnissen aus der vorliegenden Beschreibung zu kombinieren. Es zeigen:

Fig. 1 eine räumlich-schematische Darstellung einer beispielhaften Ausführungsform einer erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Photonenpaarquelle;

Fig. 2 eine Querschnittsansicht der erfindungsgemäßen Photonenpaarquelle aus **Fig. 1** in lateraler Richtung entlang der eingezeichneten Schnittfläche A;

Fig. 3 eine Querschnittsansicht der erfindungsgemäßen Photonenpaarquelle aus **Fig. 1** in longitudinaler Richtung entlang der eingezeichneten Schnittfläche B; und

Fig. 4 eine Aufsicht auf eine beispielhafte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Photonenpaarquelle zur Darstellung der mehreren aufeinanderfolgenden Ätzschritte in einem zugehörigen Verfahren zu dessen Herstellung.

Ausführliche Beschreibung der Zeichnungen

[0040] **Fig. 1** zeigt eine räumlich-schematische Darstellung einer beispielhaften Ausführungsform einer erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Photonenpaarquelle. Die gezeigte Struktur umfasst einen dielektrischen Wellenleiter, DWL, 10; und einen Bragg-Reflexions-Wellenleiter, BRWL, 30, eingerichtet zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer

Fluoreszenz (SPDC), wobei der BRWL 30 unter dem DWL 10 angeordnet ist und diese in einem gemeinsamen Kopplungsabschnitt KA derart miteinander wechselwirken, dass eine im DWL 10 geführte Pumpstrahlung in den BRWL 30 überkoppelt wird. Der DWL 10 ist in dieser Ausführungsform als aktiver Wellenleiter mit einer aktiven Schicht 20 ausgebildet, es könnte sich alternativ jedoch auch um einen extern lasergekoppelten passiven Wellenleiter handeln. Der gezeigte DWL 10 ist als Rippenwellenleiter mit einer auf einer Rippe angeordneten Elektrode 12 und einer an der Unterseite des DWL 10 angeordneten Kontaktschicht 24 ausgebildet. Der gezeigte BRWL 30 weist an seiner Oberseite eine Mantelungsschicht 32 auf. Weiterhin umfasst der BRWL 30 eine Wellenleitungsschicht 38, die zumindest unterhalb von mindestens einem Bragg-Reflektorpaar 42 umgeben ist. Die Anzahl der Bragg-Reflektorpaare 34, 42 oberhalb und unterhalb der Wellenleitungsschicht 38 ist dabei asymmetrisch ausgebildet, insbesondere ist die Anzahl oberhalb der Wellenleitungsschicht 38 geringer als unterhalb der Wellenleitungsschicht 38. In Koppelrichtung findet zunächst eine Verjüngung der lateralen Breite des DWL 10 und anschließend eine Verjüngung der lateralen Breite des BRWL 30 statt, wobei die kleinste laterale Breite des BRWL 30 im gemeinsamen Kopplungsabschnitt KA größer als die größte laterale Breite des DWL 10 ist. Die Verjüngung des DWL 10 und des BRWL 30 erfolgt jeweils abschnittsweise innerhalb der einzelnen Wellenleiterstrukturen.

[0041] Der DWL 10 und der BRWL 30 können gestapelt übereinander auf einem gemeinsamen Substrat 50 angeordnet sein. Der DWL 10 kann dabei einen typischen planaren Schichtaufbau mit einer Rippenwellenleiterstruktur aufweisen. Im gezeigten Ausführungsbeispiel wird die Rippe dabei aus einer ersten Elektrode 12 (z. B. einer p-Elektrode) zur elektrischen Kontaktierung, einer darunter angeordneten ersten Kontaktschicht 14 (z. B. einer p-Kontaktschicht) und einer darunter angeordneten ersten Mantelschicht 16 (z. B. einer p-Mantelschicht) ausgebildet. Unmittelbar darunter anschließend sind der Reihe nach ein erster Einschluss bzw. eine erste Wellenleiterschicht 18 (z. B. eine p-Wellenleiterschicht), eine aktive Schicht 20 (z. B. einer Quantengraben-schicht) und ein zweiter Einschluss bzw. eine zweite Wellenleiterschicht 22 (z. B. eine n-Wellenleiterschicht) angeordnet. Diese bilden in der gezeigten Ausführungsform eine erste Stufe unterhalb der dargestellten Rippenstruktur aus. Darunter befindet sich bei der gezeigten Ausführungsform eine zweite Stufe aus einer zweiten Kontaktschicht 24 (z. B. n-Kontaktschicht). Zur Bestromung des aktiven DWL kann, wie auch in der Darstellung gezeigt, ein Teilbereich der zweiten Kontaktschicht 24 mit einer zweiten Elektrode 26 (z. B. n-Elektrode) zur elektrischen Kontaktierung versehen sein. Die zweite Kontaktschicht 24 kann ebenfalls eine Strukturierung zur Ausbildung

einer dritten Stufe auf dem darunterliegenden BRWL 30 aufweisen. Obwohl vorliegend eine obenliegende p-Struktur und eine darunter liegende n-Struktur beschrieben ist, können diese Strukturen selbstverständlich auch gegeneinander vertauscht ausgebildet werden. Ebenfalls möglich ist eine Ausbildung mit mindestens einem zwischenliegenden p-n-Tunnelübergang.

[0042] Der gezeigte BRWL 30 umfasst eine erste Mantelungsschicht 32 (z. B. eine obere Mantelungsschicht) und einen darunter angeordneten ersten Bragg-Reflektor 34 (z. B. einen oberen Bragg-Reflektor, dargestellt ist ein einzelnes Bragg-Reflektorpaar als bevorzugte Ausführungsform) zur vertikalen Begrenzung der Wellenführung nach oben. Die Photonenpaarerzeugung findet im sich darunter unmittelbar in der beschriebenen Reihenfolge anschließenden wellenführenden Bereich, umfassend eine erste Anpassungsschicht 36 (z. B. eine obere Anpassungsschicht), einer Wellenleitungsschicht 38 und einer zweiten Anpassungsschicht 40 (z. B. einer unteren Anpassungsschicht), statt. Zur vertikalen Begrenzung der Wellenführung nach unten ist darunter ein zweiter Bragg-Reflektor 42 (z. B. ein unterer Bragg-Reflektor, vorzugsweise sechs Bragg-Reflektorpaare umfassend) angeordnet. Zur Trennung dieser Strukturen vom Substrat 50 kann zwischen dem zweiten Bragg-Reflektor 42 und dem Substrat wie gezeigt weiterhin eine zweite Mantelungsschicht 44 (z. B. eine untere Mantelungsschicht) angeordnet sein. Der gezeigte BRWL umfasst insgesamt zwei Stufen (zusätzlich zu den oben genannten drei Stufen des DWL). Die vierte Stufe betrifft eine flache Ätzung der ersten Mantelungsschicht 32 zur Ausscheidung höherer Kopplungsmoden, während die fünfte Stufe der lateralen Begrenzung der Wellenführung im BRWL 30 dient.

[0043] Die dargestellten Stufen innerhalb der gezeigten planaren Schichtstruktur korrespondieren mit entsprechenden abschnittswisen Verjüngungen der Wellenleiterstrukturen zur Verbesserung der vertikalen Überkopplungseigenschaften. Entsprechend umfasst die gezeigte Struktur auch insgesamt fünf Verjüngungsbereiche. Die erste Verjüngung betrifft die Rippe des DWL 10 und kann zusammen mit der ersten Stufe (z. B. durch Rippenstrukturierung) ausgebildet werden. Die zweite Verjüngung betrifft die wellenführenden Schichten (18, 20, 22) des DWL 10 und kann zusammen mit der zweiten Stufe (z. B. mittels Durchätzung der eigentlichen Laserstrukturen) ausgebildet werden. Die dritte Verjüngung betrifft die zweite Kontaktschicht 24 des DWL 10 und kann zusammen mit der dritten Stufe (z. B. Durchätzung zweite n-Kontaktschicht) ausgebildet werden. Entsprechend betrifft die vierte Verjüngung die erste Mantelungsschicht 32 des BRWL 30 und kann zusammen mit der vierten Stufe (z. B. mittels flacher Ätzung) ausgebildet werden. Die vierte Ver-

jüngung ermöglicht insbesondere eine Verbesserung der Kopplung an die Braggmode im BRWL durch Unterdrückung der Anregung unerwünschter parasitärer Kopplungsmoden. Schließlich betrifft die fünfte Verjüngung insbesondere die wellenführenden Schichten (36, 38, 40) des BRWL 30 und kann zusammen mit der fünften Stufe (z. B. mittels tiefer Ätzung) ausgebildet werden. Die fünfte Verjüngung kann auch zumindest einen Teilbereich des zweiten Bragg-Reflektors 42 mit umfassen. Grundsätzlich könnte die fünfte Verjüngung bei diesem Ausführungsbeispiel aber auch nur den ersten Bragg-Reflektor 34 oder zumindest einen Teilbereich der wellenführenden Schichten 36, 38, 40 umfassen.

[0044] Weiterhin zeigt die Darstellung den ungefähren Verlauf der vertikalen Überkopplung aus dem DWL 10 in den BRWL 30 als sich in longitudinaler Richtung erstreckenden Pfeil. Durch die erfindungsgemäße Verjüngungsstruktur kann ein gegenüber einem entsprechenden planaren Schichtaufbau mit verringerter Anzahl an Stufen bzw. ohne Verjüngungen erhöhter Kopplungsfaktor bei der Überkopplung vom DWL 10 in den BRWL 30 erreicht werden. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass insbesondere die Anzahl, Tiefe und Position der einzelnen Stufen und/oder Verjüngungen hier nur beispielhaft beschrieben sind und diese Parameter abhängig vom verwendeten Materialsystem, den geometrischen Abmessungen und den gewünschten Kopplungseigenschaften variiert und angepasst werden können. Insbesondere kann abhängig vom gewählten Design eventuell auch auf das zusätzliche Einbringen von Stufen und/oder Verjüngungen verzichtet werden.

[0045] Fig. 2 zeigt eine Querschnittsansicht der erfindungsgemäßen Photonenpaarquelle aus Fig. 1 in lateraler Richtung entlang der eingezeichneten Schnittfläche A. Der voranstehend beispielhaft beschriebene planare Schichtaufbau ist entsprechend zu erkennen. Zusätzlich zur gezeigten Struktur wurden beispielhaft Zusammensetzungen für einen möglichen planaren Schichtaufbau in einem GaAs-basierten Materialsystem mit den entsprechenden bevorzugten Abmessungen mit eingezeichnet. Diese sollen die erfindungsgemäße monolithisch integrierte Photonenpaarquelle jedoch weder auf dieses Materialsystem noch auf die gezeigten Werte- und Parameterbereiche beschränken, vielmehr soll es sich um ein rein illustratives Beispiel für eine konkrete praktische Umsetzung handeln. Sämtliche mit den beigefügten Ansprüchen kompatiblen Änderungen und Anpassungen beispielsweise bei den Materialien, Schichtdicken und/oder Schichtfolgen sollen ausdrücklich vom Rahmen dieser Offenbarung mit umfasst sein. Dem Fachmann ist dabei ohne Weiteres offensichtlich, dass beispielsweise Abmessungen stets im Hinblick auf das verwendete Materialsystem, die genutzten Wellenlän-

genbereiche und die verwendeten Strukturen zu betrachten sind und diese somit lediglich zur konkreten Beschreibung einzelner spezifischer Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung geeignet sind.

[0046] Fig. 3 zeigt eine Querschnittsansicht der erfindungsgemäßen Photonenpaarquelle aus Fig. 1 in longitudinaler Richtung entlang der eingezeichneten Schnittfläche B. Auch in diesem Schnitt ist der zu Fig. 1 beispielhaft beschriebene planare Schichtaufbau entsprechend zu erkennen. Alle diesbezüglich in der Beschreibung zur Fig. 2 getroffenen Aussagen und Annahmen gelten entsprechend.

[0047] Fig. 4 zeigt eine Aufsicht auf eine beispielhafte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen monolithisch integrierten Photonenpaarquelle zur Darstellung der mehreren aufeinanderfolgenden Ätzschritte in einem zugehörigen Verfahren zu dessen Herstellung. Wie voranstehend zur Fig. 1 beschrieben, kann der Darstellung von links nach rechts mehrfach eine Verjüngung des Wellenleiters entnommen werden, so dass eine Pumpstrahlung aus der Lasermode des DWL in eine höhere Vertikalmode (Braggmode) des BRWL überkoppelt werden kann. Bis zu welcher Tiefe an der entsprechenden Stelle der erfindungsgemäßen Struktur geätzt werden kann (p-Kontakt $\neq$ keine Ätzung), kann der zugehörigen Legende entnommen werden. Die Segmente der Struktur, innerhalb derer sich der Öffnungswinkel einer Verjüngung nicht ändert, sind über römische Ziffern (I-VI) gekennzeichnet.

[0048] Ein möglicher Parametersatz für die gezeigte Struktur könnte beispielsweise lauten:

- Abstände zwischen den Ätzschritten: 2 μm
- laterale Ausdehnung der Spitzen: 0,5 μm
- Breite des für SPDC angepassten BRWL: 5 μm
- Länge Segment III: 150 μm
- Länge anderer Segmente: 20 μm

[0049] Anhand von 2D+z Finite-Differenzen-Simulationen konnte an der in dieser Anmeldung beschriebenen konkreten Ausführungsform eine Kopplungseffizienz von bis zu 40% zwischen der Lasermode und der Braggmode berechnet werden.

Bezugszeichenliste

10	dielektrischer Wellenleiter (DWL)
12	erste Elektrode (z. B. p-Elektrode)
14	erste Kontaktschicht (z. B. p-Kontaktschicht)
16	erste Mantelschicht (z. B. p-Mantelschicht)

18	erster Einschluss bzw. erste Welleiterschicht (z. B. p-Wellenleiterschicht)
20	aktive Schicht (z. B. Quantengraben-schicht)
22	zweiter Einschluss bzw. zweite Wellenleiterschicht (z. B. n-Wellenleiterschicht)
24	zweite Kontaktschicht (z. B. n-Kontaktschicht)
26	zweite Elektrode (z. B. n-Elektrode)
30	Bragg-Reflexions-Wellenleiter (BRWL)
32	erste Mantelungsschicht (z. B. obere Mantelungsschicht)
34	erster Bragg-Reflektor (z. B. oberer Bragg-Reflektor, vorzugsweise ein einzelnes Bragg-Reflektorpaar)
36	erste Anpassungsschicht (z. B. obere Anpassungsschicht)
38	Wellenleitungsschicht
40	zweite Anpassungsschicht (z. B. untere Anpassungsschicht)
42	zweiter Bragg-Reflektor (z. B. unterer Bragg-Reflektor, vorzugsweise sechs Bragg-Reflektorpaare)
44	zweite Mantelungsschicht (z. B. untere Mantelungsschicht)
50	Substrat
KA	Kopplungsabschnitt
I	planares Schichtsystem
II	erster Verjüngungsabschnitt (z. B. Kontaktschichtverjüngung)
III	zweiter Verjüngungsabschnitt (z. B. Einschlussverjüngung)
IV	dritter Verjüngungsabschnitt (z. B. Kontaktschichtverjüngung)
V	vierter Verjüngungsabschnitt (z. B. Mantelungsverjüngung)
VI	fünfter Verjüngungsabschnitt (z. B. Reflektorverjüngung)

Patentansprüche

1. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle, umfassend:
einen dielektrischen Wellenleiter, DWL, (10); und
einen Bragg-Reflexions-Wellenleiter, BRWL, (30),
eingerrichtet zur Bereitstellung von quantenmechanisch verschränkten Photonenpaaren mittels parametrischer Fluoreszenz, wobei der BRWL (30) unter dem DWL (10) angeordnet ist und diese in

einem gemeinsamen Kopplungsabschnitt (KA) derart miteinander wechselwirken, dass eine im DWL (10) geführte Pumpstrahlung in den BRWL (30) überkoppelt wird.

2. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle nach Anspruch 1, wobei der DWL (10) als passiver Wellenleiter mit einem Eingang zur Einkopplung der Pumpstrahlung ausgebildet ist.

3. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle nach Anspruch 1, wobei der DWL (10) als aktiver Wellenleiter mit einer aktiven Schicht (20) ausgebildet ist.

4. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle nach Anspruch 3, wobei der DWL (10) als Rippenwellenleiter mit einer auf einer Rippe angeordneten Elektrode (12) und einer an der Unterseite des DWL (10) angeordneten Kontaktschicht (24) ausgebildet ist.

5. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der BRWL (30) an seiner Oberseite eine Mantelungsschicht (32) aufweist.

6. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der BRWL (30) eine Wellenleitungsschicht (38) umfasst, die zumindest unterhalb von mindestens einem Bragg-Reflektorpaar (42) umgeben ist.

7. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle nach Anspruch 6, wobei die Anzahl der Bragg-Reflektorpaare (34, 42) oberhalb und unterhalb der Wellenleitungsschicht (38) asymmetrisch ausgebildet ist, insbesondere die Anzahl oberhalb der Wellenleitungsschicht (38) geringer als unterhalb der Wellenleitungsschicht (38) ist.

8. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in Koppelrichtung zunächst eine Verjüngung der lateralen Breite des DWL (10) und anschließend eine Verjüngung der lateralen Breite des BRWL (30) stattfindet, wobei die kleinste laterale Breite des BRWL (30) im gemeinsamen Kopplungsabschnitt (KA) größer als die größte laterale Breite des DWL (10) ist.

9. Monolithisch integrierte Photonenpaarquelle nach Anspruch 8, wobei die Verjüngung des DWL (10) und des BRWL (30) jeweils abschnittsweise innerhalb der einzelnen Wellenleiterstrukturen erfolgt.

10. Verfahren zur Herstellung einer monolithisch integrierten Photonenpaarquelle nach Anspruch 8 oder 9, umfassend:

Bereitstellen eines entsprechenden planaren Schichtsystems;
Ausbilden der Verjüngungen durch mehrere aufeinanderfolgende Ätzschritte, wobei mit jedem Ätzschritt tieferliegende Schichten des Schichtsystems partiell freigelegt werden.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

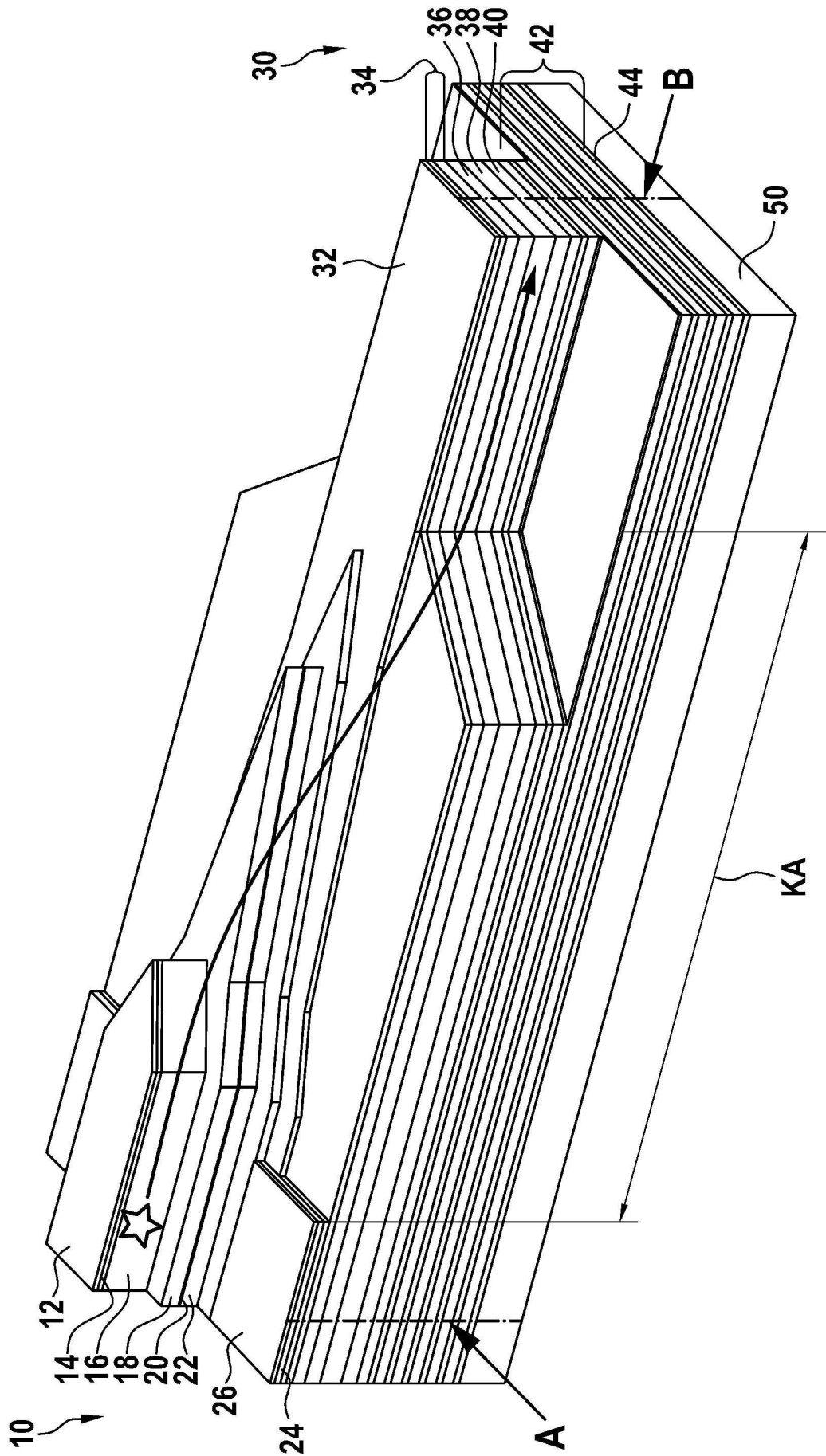


Fig. 2

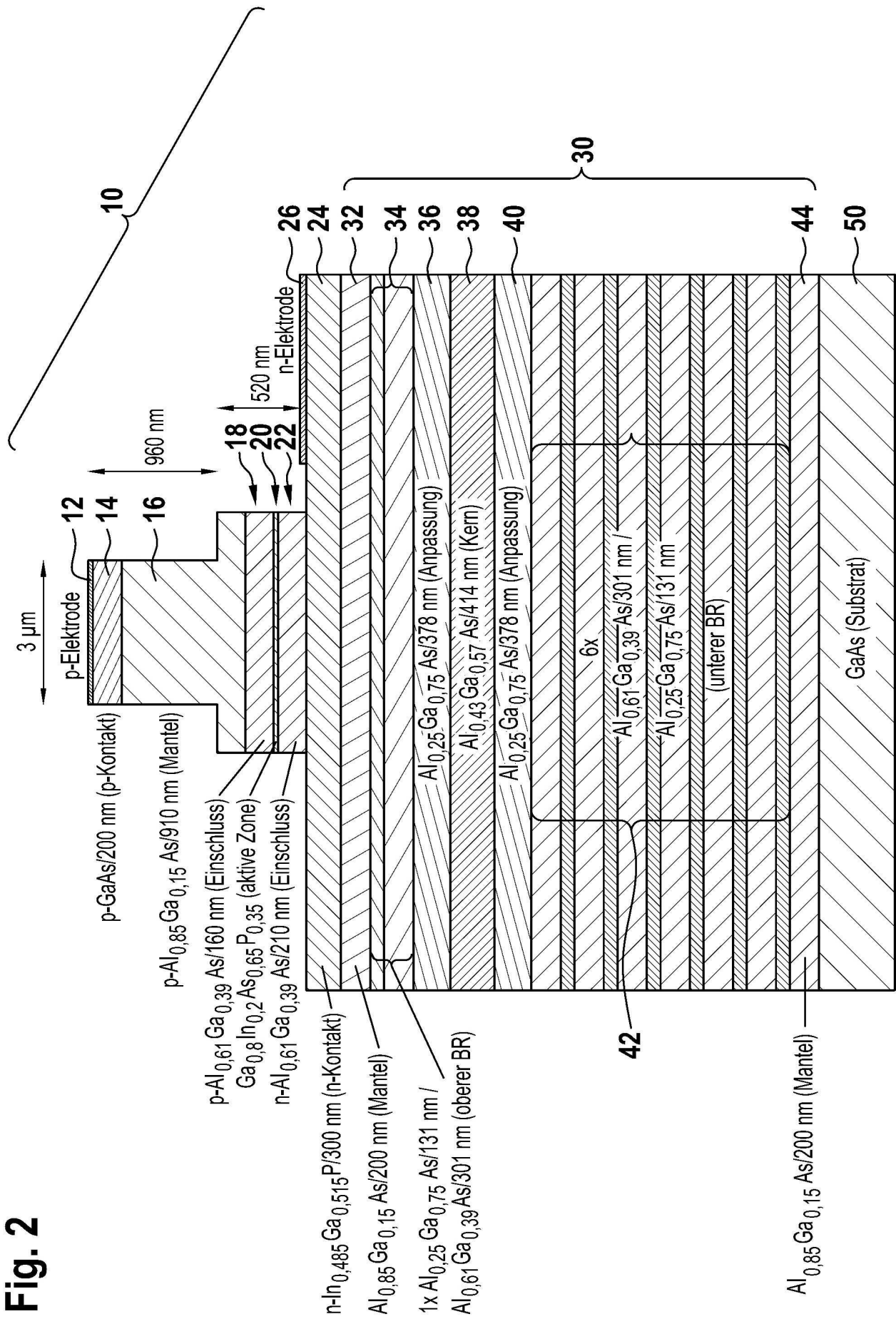


Fig. 3

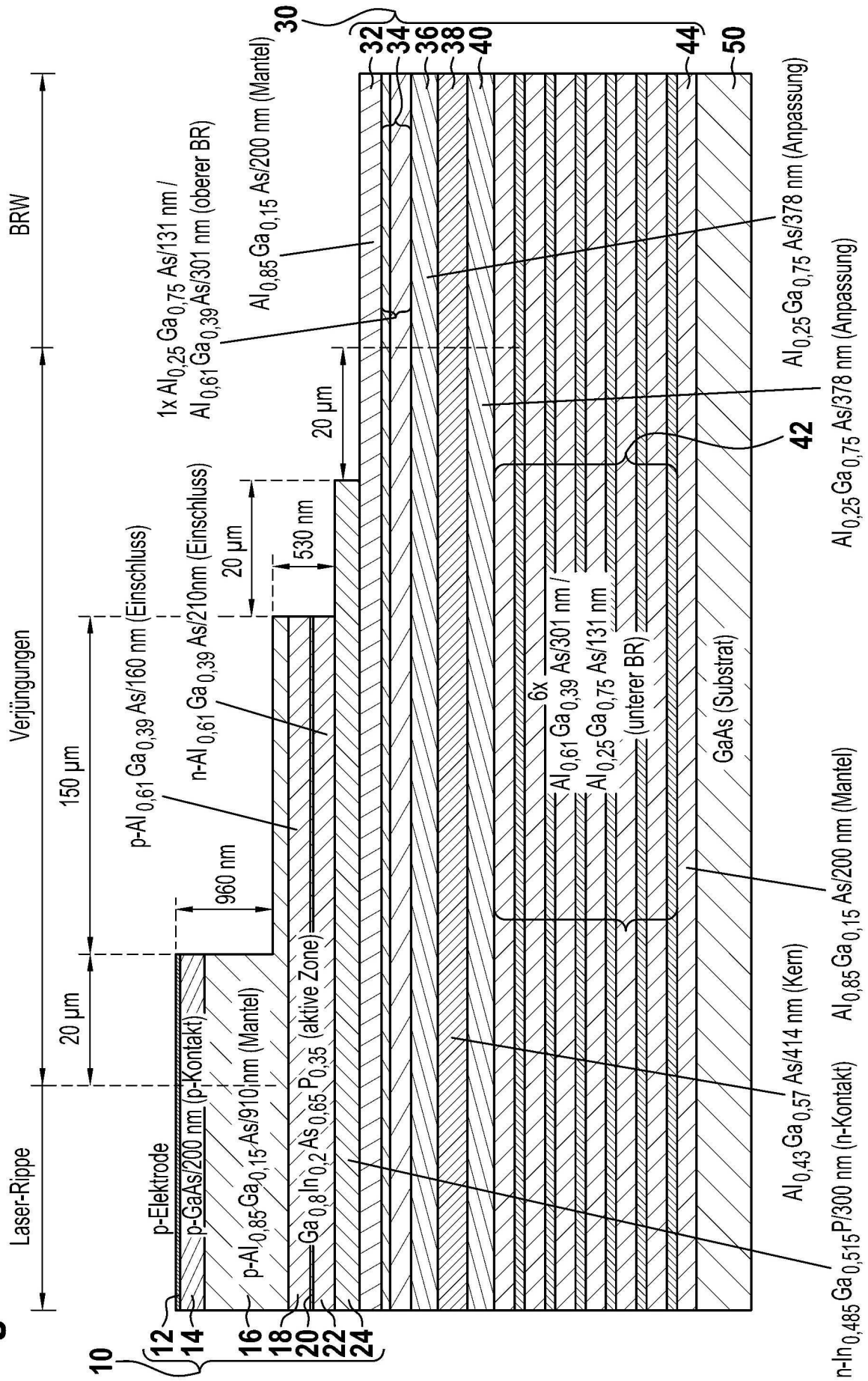


Fig. 4

