



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 601 29 286 T2** 2007.11.22

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 219 984 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G02B 6/122** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **601 29 286.3**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 310 803.0**

(96) Europäischer Anmeldetag: **21.12.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **03.07.2002**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **11.07.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **22.11.2007**

(30) Unionspriorität:

2000396962 27.12.2000 JP

2001053634 28.02.2001 JP

2001081919 22.03.2001 JP

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:

**Nippon Telegraph and Telephone Corp.,
Tokio/Tokyo, JP**

(72) Erfinder:

**Notomi, Masaya, Musashino-shi, Tokyo 180-8585,
JP; Yamada, Koji, Musashino-shi, Tokyo 180-8585,
JP; Shinya, Akihiko, Musashino-shi, Tokyo
180-8585, JP; Takahashi, Junichi, Musashino-shi,
Tokyo 180-8585, JP; Takahashi, Chiharu,
Musashino-shi, Tokyo 180-8585, JP; Yokohama,
Itaru, Musashino-shi, Tokyo 180-8585, JP**

(74) Vertreter:

HOFFMANN & EITLE, 81925 München

(54) Bezeichnung: **Photonenkristall-Wellenleiter**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

1. Gebiet der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Wellenleiter aus einem photonischen Kristall, der als grundlegende Anordnung eingesetzt wird, aus welcher photonische Vorrichtungen wie beispielsweise Laser und photonische Ics hergestellt werden, die in der optischen Informationsverarbeitung, bei der optischen Übertragung und dergleichen eingesetzt werden.

2. Beschreibung des Stands der Technik

[0002] Bei einer herkömmlichen photonischen Vorrichtung muss infolge der Tatsache, dass der Lichteinschluss unter Verwendung des Unterschieds von Brechungsindizes erfolgt, der Raum für den Lichteinschluss groß sein. Daher kann die Vorrichtung nicht sehr klein ausgebildet werden. Darüber hinaus treten, wenn ein stark abgeregelter Wellenleiter verwendet wird, um das Ausmaß der Integration der Vorrichtung zu erhöhen, Streuverluste auf. Daher ist es schwierig, photonische Schaltungen zu integrieren, und ist es schwierig, photonische Vorrichtungen zu verkleinern. Dies führt dazu, dass die Abmessungen einer photonischen Vorrichtung erheblich größer sind als jene einer elektrischen Vorrichtung. Daher wird von einem photonischen Kristall erwartet, dass er ein neues photonisches Material darstellt, welches das voranstehend geschilderte Problem lösen kann, wobei der photonische Kristall einen Lichteinschluss mit Hilfe eines Konzepts durchführen kann, das sich vollständig von dem herkömmlichen Konzept unterscheidet.

[0003] Der photonische Kristall weist eine künstliche, mehrdimensionale, periodische Struktur auf, bei welcher die Periodizität, die annähernd gleich der Lichtwellenlänge ist, dadurch ausgebildet wird, dass mehr als eine Art von Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes eingesetzt werden, wobei der photonische Kristall eine Bandstruktur des Lichts ähnlich einer Bandstruktur von Elektronen aufweist. Daher taucht ein verbotenes Lichtband (photonische Bandlücke) in einer bestimmten Struktur auf, sodass der photonische Kristall, welcher diese bestimmte Struktur aufweist, als Nichtleiter für Licht wirkt.

[0004] Aus theoretischen Überlegungen ist bekannt, dass dann, wenn ein Liniendefekt, der die Periodizität des photonischen Kristalls stört, in dem photonischen Kristall enthalten ist, ein optischer Wellenleiter erzielt werden kann, der vollständig Licht einschließt, und eine Wellenleiter-Mode in einem Frequenzbereich der photonischen Bandlücke aufweist (J. D. Joannopoulos, P.R. Villeneuve, und S. Fan, Photonic Crystal: putting a new twist on light, Nature

386,143 (1997)). J. D. Joannopoulos et al setzten einen Liniendefekt in einem zweidimensionalen photonischen Kristall ein, bei welchem zylindrische Säulen, die einen großen Brechungsindex annähernd gleich jenem eines Halbleiters aufwiesen, auf einem quadratischen Gitter mit der Gitterkonstanten „a“ angeordnet waren, welche etwa gleich der Lichtwellenlänge ist, wobei der Radius jeder zylindrischen Säule gleich $a/5$ ist, und J. D. Joannopoulos et al wiesen theoretisch nach, dass ein optischer Wellenleiter erzielt werden kann, der keine Streuverluste aufweist, selbst wenn er stark gebogen ist. Ein derartiger Wellenleiter kann sehr wesentlich zur Erzielung einer im großen Umfang integrierten optischen Schaltung sein.

[0005] Um den optischen Wellenleiter zur Ausbildung der im großen Maßstab integrierten optischen Schaltung zu erzielen, ist es erforderlich, eine einzelne Wellenleiter-Mode in dem Frequenzband der photonischen Bandlücke zu erzielen. Wenn ein Multimoden-Wellenleiter, der mehrere Moden aufweist, als ein gebogener Wellenleiter verwendet wird, besteht beispielsweise in der Hinsicht ein Problem, dass ein Teil einer Mode in eine unterschiedliche Mode in einem abgeregerten Teil umgewandelt werden kann. Daher kann der Multimoden-Wellenleiter nicht als wirksamer, gebogener Wellenleiter verwendet werden, der zur Erzielung der in großem Maße integrierten optischen Schaltung erforderlich ist. Dies ist der Grund dafür, dass ein Betrieb mit Single-Mode erforderlich ist. Darüber hinaus ist der Multimoden-Wellenleiter nicht für Hochgeschwindigkeitskommunikation geeignet.

[0006] Es wurden einige Arten von Wellenleitern hergestellt. Unter den verschiedenen Wellenleitern sind Wellenleiter, welche den zweidimensionalen photonischen Kristall einsetzen, vielversprechend, da es sehr schwierig ist, Wellenleiter mit einem dreidimensionalen photonischen Kristall herzustellen, der eine vollständige Bandlücke aufweist.

[0007] Wenn der zweidimensionale photonische Kristall als der Wellenleiter eingesetzt wird, ist es erforderlich, Licht in Richtung senkrecht zur zweidimensionalen Ebene einzuschließen. Verschiedene Verfahren wurden als Verfahren für den Lichteinschluss vorgeschlagen. Unter diesen Verfahren ist die Verwendung eines Slabs aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall auf einem Oxidmantel vorzuziehen, da eine Struktur, die eine große Fläche aufweist, einfach bei dem Slab mit einem zweidimensionalen photonischen Kristall auf einem Oxidmantel hergestellt werden kann, und es einfach ist, verschiedene Funktionselemente bei derselben Struktur hinzuzufügen. Der Slab aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall auf einem Oxidmantel beruht auf einer Struktur, bei welcher ein dünner Halbleiterfilm mit hohem Brechungsindex (von 3 bis 3,5) auf ei-

nem Dielektrikum mit niedrigem Brechungsindex abgelagert wird (in vielen Fällen ein Oxid oder Polymer, wobei der Brechungsindex etwa 1,5 beträgt).

[0008] Weiterhin wird ein Substrat, das als Substrat des Typs Silizium-Auf-Isolator (SOI) bezeichnet wird, bei LSIs eingesetzt, und lässt sich seit einigen Jahren ein SOI-Substrat mit hoher Qualität herstellen. Das SOI-Substrat wird dadurch ausgebildet, dass ein Dünnschicht aus Silizium (Si) aus Siliziumoxid (SiO_2) vorgesehen wird. Bei Verwendung des SOI-Substrats ist der Vorteil vorhanden, dass der Slab aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall auf einem Oxidmantel, der eine hohe Qualität aufweist, einfach hergestellt werden kann. Dieser Vorteil kann nicht durch Einsatz anderer Strukturen erreicht werden (beispielsweise einen Slab aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall mit Luftbrücke, bei welcher der Mantel an beiden Seiten aus Luft besteht).

[0009] Wie voranstehend geschildert, weist der Slab aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall auf einem Oxidmantel den Vorteil auf, dass er einfacher herzustellen ist als der Slab aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall mit Luftbrücke und dergleichen. Allerdings weist die Struktur folgende Probleme auf, sodass ein Single-Mode-Wellenleiterbetrieb in dem Frequenzband der photonischen Bandlücke bei der herkömmlichen Struktur nicht erzielt wurde.

[0010] Bei Wellenleiter-Moden, die durch den Liniendefekt in dem optischen Wellenleiter aus dem Slab aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall erzeugt werden, wird Licht stark in den Richtungen der zweidimensionalen Ebene durch die photonische Bandlücke eingeschlossen, und treten in diesen Richtungen keine Streuverluste auf. Allerdings tritt Licht allgemein in einem Hochfrequenzbereich unterhalb einer Lichtlinie des Mantels heraus, sodass das Licht zum Mantel hin heraustreten kann. (Die Lichtlinie repräsentiert die niedrigste Frequenz, in Bezug auf die Ausbreitungskonstante, mit welcher Licht in dem Mantel übertragen werden kann, wobei die Lichtlinie durch eine Linie repräsentiert werden kann, die definiert ist durch ein $w = ck/n$ (w : Winkelfrequenz, c : Lichtgeschwindigkeit, n : Brechungsindex, k : Wellenzahl)). Daher ist es üblich, einen niederfrequenten Bereich unterhalb der Lichtlinie zu verwenden, sodass das Licht des Wellenleiters nicht zu Mantelschichten an beiden Seiten heraustritt.

[0011] Die [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) sind schematische Darstellungen der Struktur eines Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem Defekt einer einzigen Linie mit fehlenden Löchern eines typischen Luftlochtyps, gemäß der herkömmlichen Technik. [Fig. 1A](#) ist eine Aufsicht, [Fig. 1B](#) ist eine Schnittansicht B-B'. Der herkömmliche Wellenleiter aus einem

photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt mit fehlenden Löchern kann in der vorliegenden Beschreibung auch als ein normaler Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall bezeichnet werden. In den [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) ist mit **5** ein optisches Wellenleiterteil bezeichnet, mit **2** eine Si-Schicht, mit **3** eine SiO_2 -Schicht, die eine Mantelschicht ist, und mit **4** ein Luftloch-Dreiecksgitterpunkt, bei welchem die Gitterkonstante mit „a“ bezeichnet ist. Jedes Luftloch ist eine zylindrische Säule oder eine mehreckige Säule, welche durch die Si-Schicht **2** hindurchgeht. Der Durchmesser des Luftloches beträgt bei diesem Beispiel $0,215 \mu\text{m}$. Bei dem Luftloch-Dreiecksgitter ist das Luftloch in jedem Gitterpunkt des Dreiecksgitters angeordnet. Das Dreiecksgitter ist ein regelmäßiges Gitter, bei welchem Gitterpunkte auf Spitzen regelmäßiger Dreiecke angeordnet sind, die sich über die zweidimensionale Ebene erstrecken.

[0012] Als repräsentative, zweidimensionale photonische Kristalle, welche die photonische Bandlücke aufweisen, gibt es zwei Strukturen. Eine ist eine Struktur, bei welcher Säulen mit hohem Brechungsindex in Luft vorhanden sind. Eine andere ist eine Struktur, bei welcher Luftlöcher in einer Schicht mit einem hohen Brechungsindex vorhanden sind, wie bei dem voranstehend geschilderten Beispiel. (Das Luftloch kann auch als eine Säule mit niedrigem Brechungsindex oder als eine zylindrische Säule mit niedrigem Brechungsindex bezeichnet werden). Die erstgenannte Struktur, welche von J. D. Joannopoulos et al verwendet wurde, benötigt eine Mantelschicht zum Halten der Säule. Da der Brechungsindex der Mantelschicht größer ist als jener der Luft, welche einen Kern für den Liniendefekt-Wellenleiter darstellt, sind sehr lange Säulen erforderlich, um einen Lichtaustritt zur Oberseite und Unterseite zu verhindern, sodass die Herstellung einer derartigen Struktur sehr schwierig wird. Andererseits ist bei der letztgenannten Struktur es möglich, da das Luftloch selbständig stehen kann, die Mantelschicht frei auszuwählen, und ist es einfach, einen Kern festzulegen, der einen größeren Brechungsindex als jene der Mantelschicht aufweist. Daher gibt es nur geringe Einschränkungen für die Herstellung, sodass es einfach ist, einen baulichen Zustand auszuwählen, bei welchem Licht kaum zur Oberseite und zur Unterseite austritt.

[0013] Weiterhin können zwar die Löcher auf der zweidimensionalen Ebene der Platte mit hohem Brechungsindex des photonischen Kristalls auf verschiedene Arten und Weisen angeordnet werden, aber ist es von einer Struktur, bei welcher die Löcher (zylindrische Säulen oder mehreckige Säulen) in einem Dreiecksgittermuster angeordnet sind, bekannt, dass sie eine photonische Bandlücke aufweist, die über ein breites Frequenzband reicht. Dies bedeutet, dass diese Struktur als ein Nichtleiter für Licht in einem

breiten Frequenzband arbeitet. Diese Struktur ist vorzuziehen, da die Frequenz aus einem breiten Frequenzband ausgewählt werden kann, wenn ein Wellenleiter entworfen wird.

[0014] [Fig. 2](#) zeigt die Dispersionsbeziehung von Wellenleiter-Moden eines herkömmlichen, typischen Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzelnen Liniendefekt in Form fehlender Löcher. Wenn ein derartiger Wellenleiter durch den Slab aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall auf einem Oxidmantel gebildet wird, werden die Wellenleiter-Moden so, wie sie in [Fig. 2](#) gezeigt sind. In der Figur wird eine normierte Frequenz verwendet, repräsentiert durch (Gitterkonstante/Wellenlänge), die eine dimensionslose Zahl ist. Weiterhin wird eine normierte Ausbreitungskonstante verwendet, die repräsentiert wird durch (Wellenzahl \times Gitterkonstante/ 2π). Die Lichtlinie des Mantels (SiO_2 , Brechungsindex 1,46) ist ebenfalls in [Fig. 2](#) dargestellt.

[0015] Bei der herkömmlichen Struktur, die in [Fig. 2](#) gezeigt ist, ist die Wellenleiter-Mode, welche die Bedingung erfüllt, dass Licht nicht zur Mantelschicht austritt, nur in einem Bereich erfüllt, der von einer Ellipse umschlossen ist, die unterhalb der Lichtlinie liegt. Allerdings ist die Schrägstellung der Wellenleiter-Mode in dem Bereich sehr klein, sodass die Gruppengeschwindigkeit (Energieausbreitungsgeschwindigkeit) der Wellenleiter-Mode, die von der Schrägstellung abhängt, sehr klein ist. Es sind zahlreiche Probleme beim Einsatz des Wellenleiters vorhanden, der die Wellenleiter-Mode mit sehr niedriger Gruppengeschwindigkeit aufweist, da die Zeit für die Lichtübertragung lang wird. Weiterhin wird, da eine Heterogenität in gewissem Ausmaß bei einer tatsächlichen Struktur vorhanden ist, die Mode mit sehr kleiner Gruppengeschwindigkeit durch die Heterogenität beeinflusst, sodass es sein kann, dass sich Licht nicht ausbreiten kann. Weiterhin kann sich in der Mode oberhalb der Lichtlinie (im Hochfrequenzbereich) Licht nicht ausbreiten, da die Beugungsverluste in dem photonischen Kristall zu groß sind. Licht in dem Wellenleiter aus einem photonischen Kristall breitet sich daher aus, während es durch die periodische Struktur des photonischen Kristalls gestört wird, und Licht tritt zur Mantelschicht durch Beugungsverluste in der Mode oberhalb der Lichtlinie aus.

[0016] Die Erfinder stellten tatsächlich den herkömmlichen Wellenleiter aus einem photonischen Kristall mit einem Defekt in Form einer einzigen Linie mit fehlenden Löchern her. Allerdings wurde überhaupt keine Lichtausbreitung festgestellt. Der Grund für dieses Problem liegt daran, dass keine in der Praxis einsetzbare Wellenleiter-Mode vorhanden ist, die eine Gruppengeschwindigkeit aufweist, die nicht zu klein unterhalb der Lichtlinie ist, und dass die Beugungsverluste sehr groß im Bereich oberhalb der Lichtlinie sind.

[0017] Um die Mode unterhalb der Lichtlinie einzusetzen, ist es erforderlich, die Lichtlinie nach oben zu bewegen, oder die Wellenleiter-Mode geeignet in dem Diagramm von [Fig. 2](#) zu bewegen. So lang die Oxidmantelstruktur verwendet wird, kann jedoch infolge der Tatsache, dass die Position der Lichtlinie durch den Brechungsindex des Mantels bestimmt wird, die Position der Lichtlinie nicht wesentlich geändert werden. In Bezug auf die Wellenleiter-Mode ist es schwierig, soweit die Single-Mode in der Bandlücke eingesetzt werden soll, eine Wellenleiter-Mode zu erhalten, die eine große Gruppengeschwindigkeit unterhalb der Lichtlinie aufweist, bei Verwendung der in [Fig. 1](#) dargestellten Struktur. Bei Kristallstrukturen mit Ausnahme des Dreiecksgitters, beispielsweise bei einem quadratischen Gitter, ist es schwieriger, eine derartige Wellenleiter-Mode zu erhalten. Daher ist es äußerst schwierig, Wellenleiter-Moden unterhalb der Lichtlinie einzusetzen.

[0018] Die herkömmliche Technologie wird weiter aus einem anderen Gesichtspunkt nachstehend beschrieben.

[0019] Die [Fig. 3A–Fig. 3C](#) dienen zur Erläuterung des herkömmlichen Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form eines fehlenden Lochs (eines optischen Wellenleiters). [Fig. 3A](#) ist eine Aufsicht auf den optischen Wellenleiter, [Fig. 3B](#) ist eine Schnittansicht A-A', und [Fig. 3C](#) ist eine Schnittansicht B-B'.

[0020] In [Fig. 3A](#) weist der optische Wellenleiter **30** einen Slab **31** aus einem dielektrischen Dünnschicht auf (welcher der voranstehend erwähnten Platte mit hohem Brechungsindex entspricht), sandwichartig eingeschlossen zwischen einer oberen Mantelschicht **36** und einer unteren Mantelschicht **37**. Die Struktur eines photonischen Kristalls wird in dem Slab **31** aus dem dielektrischen Dünnschicht dadurch ausgebildet, dass zylindrische Säulen **35** mit niedrigem Brechungsindex, die einen niedrigeren Brechungsindex aufweisen als jenen des Slabs **31** aus einem dielektrischen Dünnschicht, in einem Dreiecksgittermuster vorgesehen werden. Weiterhin wird eine Linie der zylindrischen Säulen **35** mit niedrigem Brechungsindex durch ein Dielektrikum ersetzt, welches den gleichen Brechungsindex aufweist wie der Slab **31** aus einem dielektrischen Dünnschicht, sodass das Teil der einen Linie als ein optisches Wellenleiterstück **32** verwendet werden kann. Pfeile nach links und rechts in dem optischen Wellenleiterstück **32** bezeichnen optische Ausbreitungsrichtungen. Der in [Fig. 1](#) gezeigte Wellenleiter ist ein Beispiel für eine in [Fig. 3](#) gezeigte Struktur, bei welcher die obere Mantelschicht **36** und die zylindrische Säule **35** mit niedrigem Brechungsindex Luft sind, die untere Mantelschicht **37** aus SiO_2 besteht, und der Slab **31** aus einem dielektrischen Dünnschicht aus Si besteht.

[0021] Hierbei wird angenommen, dass der Brechungsindex des Slabs **31** aus einem dielektrischen Dünnschicht, der zylindrischen Säule **35** mit niedrigem Brechungsindex, der oberen Mantelschicht **36** und der unteren Mantelschicht **37** gleich $n_1 = 3,5$, $n_2 = 1,0$, $n_3 = n_4 = 1,46$ ist, und dass der Radius der zylindrischen Säule **35** mit niedrigem Brechungsindex gleich $0,275a$ ist, und die Dicke des Slabs **31** aus einem dielektrischen Dünnschicht gleich $0,50a$ beträgt, wobei „a“ die Gitterkonstante (eines Dreiecksgitters beim vorliegenden Beispiel) des photonischen Kristalls bezeichnet. Die zylindrische Säule **35** mit niedrigem Brechungsindex, welche einen Brechungsindex von $1,0$ aufweist, ist ebenso wie ein Luftloch ausgebildet. Eigenschaften des optischen Wellenleiters **30** werden nachstehend geschildert.

[0022] Diese Brechungsindizes des optischen Wellenleiters **30** entsprechen jenen von Si, Luft (Vakuum) bzw. SiO_2 , die häufig zur Ausbildung von Wellenleitern eingesetzt werden, welche Infrarotlicht für optische Kommunikation mit einer Wellenlänge von etwa $1,55 \mu\text{m}$ übertragen sollen.

[0023] Da die relative Dielektrizitätskonstante dem Quadrat des Brechungsindex entspricht, können „relative Dielektrizitätskonstante“ oder „Dielektrizitätskonstante“ bei der vorliegenden Beschreibung anstelle von „Brechungsindex“ verwendet werden.

[0024] Die [Fig. 4A–Fig. 4C](#) dienen zur Erläuterung von Wellenleiter-Moden des voranstehend erwähnten optischen Wellenleiters. [Fig. 4A](#) zeigt Dispersionskurven von Wellenleiter-Moden, die sich durch das optische Wellenleiterteil ausbreiten können. Die Dispersionskurven der Wellenleiter-Moden werden unter Verwendung eines Verfahrens mit Zerlegung in ebene Wellen erhalten (R. D. Meade et al, Physical Review B 48,8434 (1993)), bei welchem periodische Grenzbedingungen vorgegeben werden. Diese Figur ist ähnlich wie [Fig. 2](#). [Fig. 4B](#) zeigt eine Magnetfeldkomponente senkrecht zum Slab aus einem dielektrischen Dünnschicht gemäß einer Mode 1 in [Fig. 4A](#), und [Fig. 4C](#) zeigt eine Magnetfeldkomponente senkrecht zum Slab aus einem dielektrischen Dünnschicht gemäß einer Mode 2 in [Fig. 4A](#).

[0025] Jede Größe in [Fig. 4A](#) wird durch die Gitterkonstante oder die Lichtgeschwindigkeit c normiert. Die diagonal schraffierten Bereiche entsprechen der Außenseite der photonischen Bandlücke (J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, „Photonic Crystals“, Princeton University Press, Princeton (1995)), sodass die diagonal schraffierten Bereiche jene Bereiche angeben, in welchem Licht nicht in dem optischen Wellenleiterteil **32** eingeschlossen werden kann (A. Mekis et al, Physical Review B 58,4809 (1998)).

[0026] In dem Vertikallinien-Schraffurbereich wird

das Ausmaß des Lichteinschlusses, das durch den Unterschied der Brechungsindizes zwischen dem Slab **31** aus einem dielektrischen Dünnschicht und der oberen Mantelschicht **36** bzw. unteren Mantelschicht **37** hervorgerufen wird, abgeschwächt, sodass Licht nicht in dem optischen Wellenleiterteil **32** eingeschlossen werden kann (S. G. Johnson et al, Physical Review B 60,5751 (1999)). Der Vertikallinien-Schraffurbereich entspricht dem voranstehend geschilderten Bereich oberhalb der Lichtlinie. Daher ist ein Bereich, der zum Einsatz bei dem Wellenleiter berücksichtigt werden muss, nur ein weißer Bereich in [Fig. 4A](#).

[0027] Wie aus der Figur hervorgeht, sind zwei Wellenleiter-Moden 1 und 2 in dem weißen Bereich des herkömmlichen optischen Wellenleiters **30** vorhanden. Zusätzliche Wellenleiter-Moden können vorhanden sein, wenn die Bandlücke größer ist, jedoch werden hier die beiden Moden 1 und 2 zur Vereinfachung betrachtet. Die Mode 1 entspricht jener Mode, die von der Ellipse in [Fig. 2](#) umschlossen ist, und die Mode 2 entspricht der Mode der oberen gestrichelten Linie.

[0028] Bei diesen zwei Moden 1 und 2 weist die Mode 1 an der Niederfrequenzseite normalerweise eine Magnetfeldverteilung auf, wie sie in [Fig. 4B](#) gezeigt ist, und weist die Mode 2 an der Hochfrequenzseite normalerweise die in [Fig. 4C](#) gezeigte Magnetfeldverteilung auf.

[0029] Bei diesen Wellenleiter-Moden 1 und 2 ist die Mode 1 praktisch, da die Mode 1 eine Verteilung des elektrischen Feldes aufweist, die beinahe ebenso ist wie bei einem üblichen Single-Mode-Wellenleiter. Andererseits unterscheidet sich die Verteilung des elektrischen Feldes der Mode 2 wesentlich von jener des üblichen Single-Mode-Wellenleiters. Daher ist es sehr schwierig, Licht von einer äußeren Schaltung unter Verwendung der Mode 2 zu leiten. Die Mode 2 stellt daher keine praktische Wellenleiter-Mode dar. Darüber hinaus wird unter denselben Gesichtspunkten deutlich, aufgrund üblicher Eigenschaften eines Wellenleiters, dass Wellenleiter-Moden an der Seite der höheren Frequenz, die auftauchen, wenn die Bandlücke breit ist, nicht praktisch sind, da sich die Wellenleiter-Mode wesentlich von jener des üblichen Single-Mode-Wellenleiters unterscheidet.

[0030] Daher wird die Mode 1 bei dem herkömmlichen Wellenleiter eingesetzt. Wie aus [Fig. 4A](#) hervorgeht, ändert sich jedoch die Frequenz kaum, selbst wenn sich die Ausbreitungskonstante bei dieser Mode 1 ändert, sodass die Mode 1 den Nachteil hat, dass das nutzbare Frequenzband sehr schmal ist. Beim vorliegenden Beispiel beträgt das Frequenzband etwa 1% .

[0031] Die Tatsache, dass sich die Frequenz kaum ändert, selbst wenn sich die Ausbreitungskonstante

ändert, bedeutet, dass die Gruppengeschwindigkeit der Wellenleiter-Mode sehr niedrig ist. Daher weist der herkömmliche Wellenleiter den Nachteil auf, dass die Übertragungszeit sehr groß wird, und Ausbreitungsverluste infolge von Absorptions- und Streuverlusten im Wellenleiter groß werden. Ein Wellenleiter aus einem photonischen Kristall, der in einem Dreiecksgitter in einem Slab aus einem photonischen Kristall vorgesehen ist, der eine kleinere Breite hat als die Breite eines Wellenleiters, infolge des Weglassens einer einzigen Linie von Gitterpunkten, wird in dem folgenden Artikel beschrieben: T. Søndergaard, A. Bjarklev, M. Kristensen, J. Erland, J. Broeng, „Designing finite-height two-dimensional photonic crystal waveguides“, Applied Physics Letters, Vol. 77, No. 6, Seiten 785–787 (07-08-2000).

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0032] Ein Ziel der vorliegenden Erfindung besteht in der Lösung der voranstehend geschilderten Probleme bei dem Wellenleiter aus einem photonischen Kristall, und in der Bereitstellung eines Slab-Wellenleiters aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall, der eine Single-Mode-Übertragung ermöglicht, bei welcher die Gruppengeschwindigkeit erhöht ist, und die Ausbreitungsverluste verringert sind.

[0033] Das voranstehende Ziel kann durch einen zweidimensionalen Slab-Wellenleiter aus einem photonischen Kristall erreicht werden, der durch einen Liniendefekt in einer Dreiecksgitterstruktur eines zweidimensionalen Slabs aus einem photonischen Material gebildet wird, wobei der Slab aus einem photonischen Kristall auf jeder Seite des Liniendefekts eine regelmäßige Dreiecksgitterstruktur mit Gitterpunkten mit niedrigem Brechungsindex aufweist, die eine gemeinsame Gitterkonstante hat, und so orientiert ist, dass die Gitterpunkte auf geraden Linien parallel zum Liniendefekt liegen, wobei die Dreiecksgitterstrukturen an jeder Seite des Liniendefekts relativ zueinander in der Richtung des Liniendefekts ausgerichtet sind, als würde der Liniendefekt durch eine einzige Linie von Gitterpunkten gebildet, die entlang dem Liniendefekt verlaufen, der nicht vorhanden ist, sodass der Liniendefekt ausgebildet wird, wobei der zweidimensionale Slab-Wellenleiter aus einem photonischen Kristall einen Oxidmantel aufweist, der keine Gitterpunkte hat, oder einen Polymermantel, der keine Gitterpunkte hat, wobei:

die Breite des Wellenleiters so ist, dass eine erste Breite, die eine Entfernung zwischen Zentren von zwei nächsten Gitterpunkten ist, die an entgegengesetzten Seiten des Wellenleiters angeordnet sind, verschieden von einer zweiten Breite ist, die eine Entfernung zwischen Zentren zweier nächster Gitterpunkte ist, die an entgegengesetzten Seiten eines Liniendefekts angeordnet sind, der in einem zweidimensionalen Slab aus einem photonischen Kristall ausgebildet würde, der die regelmäßige Dreiecksgit-

terstruktur und die gemeinsame Gitterkonstante aufweist, und bei welchem einfach Gitterpunkte einer einzelnen Linie fehlen, wobei die erste Breite einen Wert von 0,5-fachen bis zum 0,85-fachen der zweiten Breite aufweist, und dadurch gekennzeichnet ist, dass:

die Dicke des zweidimensionalen Slabs aus einem photonischen Kristall 0,2 μm beträgt, und die gemeinsame Gitterkonstante gleich 0,39 μm ist.

[0034] Gemäß der Erfindung kann, da die erste Breite, die eine Entfernung zwischen Zentren zweier nächster Gitterpunkte ist, die an beiden Seiten des Liniendefekts angeordnet sind, verschieden von der zweiten Breite ist, die eine entsprechende Entfernung in einem normalen Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall ist, ein optischer Wellenleiter zur Verfügung gestellt werden, der eine Single-Mode-Wellenleitung ausbilden kann, bei welcher eine große Gruppengeschwindigkeit unterhalb der Lichtlinie vorhanden ist. Der Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall kann als Wellenleiter aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Defekt in Form einer Linie mit fehlenden Löchern bezeichnet werden.

[0035] Bei dem Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall kann die Gitterstruktur durch Luftloch-Dreiecksgitter gebildet werden. Weiterhin kann der Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall unter Verwendung eines Substrats des Typs Silizium-Auf-Isolator (SOI) gebildet werden.

[0036] Gemäß der Erfindung kann ein optischer Wellenleiter zur Verfügung gestellt werden, der eine Single-Mode-Wellenleitung mit geringen Verlusten oberhalb der Lichtlinie ausbilden kann.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0037] Andere Ziele, Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden aus der folgenden, detaillierten Beschreibung noch deutlicher werden, wenn sie im Zusammenhang mit den beigefügten Zeichnungen gelesen wird, bei welchen:

[0038] [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) schematische Darstellungen einer Struktur eines Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher eines typischen Luftloch-typs gemäß einer herkömmlichen Technologie sind, wobei [Fig. 1A](#) eine Aufsicht ist, und [Fig. 1B](#) eine Schnittansicht B-B';

[0039] [Fig. 2](#) eine Dispersionsbeziehung von Wellenleiter-Moden eines herkömmlichen, typischen Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher zeigt;

[0040] [Fig. 3A–Fig. 3C](#) Figuren zur Erläuterung des herkömmlichen Wellenleiters (optischen Wellenleiters) aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher sind, wobei [Fig. 3A](#) eine Aufsicht auf den optischen Wellenleiter ist, [Fig. 3B](#) eine Schnittansicht A-A' ist, und [Fig. 3C](#) eine Schnittansicht B-B' ist;

[0041] [Fig. 4A–Fig. 4C](#) Figuren zur Erläuterung von Wellenleiter-Moden des herkömmlichen Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher sind;

[0042] [Fig. 5A](#) und [Fig. 5B](#) die Struktur eines Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigen, wobei [Fig. 5A](#) eine Aufsicht ist, und [Fig. 5B](#) eine Schnittansicht B-B' ist;

[0043] [Fig. 6](#) eine Dispersionsbeziehung von Wellenleiter-Moden des Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher gemäß der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0044] [Fig. 7](#) eine Figur zur Erläuterung von [Fig. 6](#) ist;

[0045] [Fig. 8A](#) und [Fig. 8B](#) Ergebnisse theoretischer Berechnungen der Wellenleiter-Modenverteilung in jenen Fällen zeigen, bei welchen die Breite des optischen Wellenleiterteils gleich 0,85 W bzw. 0,50 W beträgt;

[0046] [Fig. 9A–Fig. 9C](#) Figuren zur Erläuterung der Mode-Berechnung des Wellenleiters aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall sind.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0047] Der optische Wellenleiter bei den Ausführungsformen ist so ausgebildet, dass bei einem Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall, bei welchem ein Teil von Löchern in einer Gitterstruktur eines Slabs aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall nicht geradlinig vorgesehen ist, sodass ein Liniendefekt erzeugt wird, eine erste Breite, welche eine Entfernung zwischen Zentren zweier am nächsten benachbarter Gitterpunkte ist, die an beiden Seiten des Liniendefekts liegen, kleiner ist als eine zweite Breite, die eine Entfernung zwischen Zentren zweier am nächsten benachbarter Gitterpunkte ist, die an beiden Seiten eines Liniendefekts bei einem normalen Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall angeordnet sind, bei dem einfach Löcher in einer einzigen Linie fehlen. Durch Ausbildung des Wellenleiters auf diese Art und Weise kann eine Struktur erzielt

werden, die geringe Verluste und eine große Gruppengeschwindigkeit aufweist, und eine Single-Mode-Wellenleitung ermöglicht, während der Lichteinschluss unter Verwendung der photonischen Bandlücke und der Differenz zwischen Brechungsindizes erfolgt.

[0048] Der Slab mit einem zweidimensionalen photonischen Kristall ist ein photonischer Kristall, bei welchem dielektrische, zylindrische oder mehreckige Säulen, die einen kleineren Brechungsindex aufweisen als ein Slab aus einem dielektrischen Dünnsfilm, in dem Slab aus einem dielektrischen Dünnsfilm in einem zweidimensionalen Gittermuster vorgesehen sind, und der Slab aus einem dielektrischen Dünnsfilm sandwichartig durch eine obere Mantelschicht und eine untere Mantelschicht eingeschlossen ist, deren Brechungsindex niedriger ist als jener des Slabs aus einem dielektrischen Dünnsfilm. Die obere oder untere Mantelschicht und/oder die dielektrischen, zylindrischen oder mehreckigen Säulen können aus Luft oder Vakuum bestehen.

[0049] Nachstehend werden Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung beschrieben.

<Erste Ausführungsform>

[0050] Zunächst wird nachstehend die erste Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beschrieben.

[0051] Die [Fig. 5A](#) und [Fig. 5B](#) zeigen die Struktur eines Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Der Wellenleiter aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher kann auch als ein Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall bezeichnet werden.

[0052] [Fig. 5A](#) ist eine Aufsicht, und [Fig. 5B](#) ist eine Schnittansicht B-B'. Bei dieser Ausführungsform wird ein einziger Liniendefekt in einem Slab aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall auf einem Oxidmantel dadurch ausgebildet, dass Löcher der einzelnen Linie entfernt werden, wobei die Breite des Liniendefekts (anders ausgedrückt, die Breite des optischen Wellenleiterteils **5**) so abgestimmt wird, dass Positionen der gesamten Kristallgitter beider Seiten des Liniendefekts verschoben werden. Dies führt dazu, dass eine einzige Wellenleiter-Mode erzielt werden kann, die eine hohe Gruppengeschwindigkeit unterhalb der Lichtlinie des Mantels aufweist. Bei der ersten und zweiten Ausführungsform weisen die Breite des Liniendefekts und die Breite des optischen Wellenleiterteils dieselbe Bedeutung auf, nämlich dass die Breite eine Entfernung zwischen Zentren zweier am nächsten benachbarter Gitterpunkte

ist, die sich auf beiden Seiten des Liniendefekts befinden.

[0053] Ein photonischer Kristall mit einem Luftloch-Dreiecksgitter mit einer Gitterkonstanten $a = 0,39 \mu\text{m}$ wurde daher auf einem SOI-Substrat hergestellt, das aus einer Si-Schicht **2** mit einer Dicke von $0,2 \mu\text{m}$ und einer SiO_2 -Schicht mit einer Dicke von $2,3 \mu\text{m}$ bestand, durch Elektronenstrahlolithographie und Trockenätzung, wobei verschiedene Defekte einer einzigen Linie mit verschiedener Breite bei dem photonischen Kristall mit einem Luftloch-Dreiecksgitter eingesetzt wurden. Die Abstimmung der Breite eines Wellenleiterteils wird dadurch durchgeführt, dass Kristallgitter an beiden Seiten des Liniendefekts um eine vorbestimmte Entfernung in Richtung senkrecht zum Liniendefekt verschoben werden.

[0054] Die Breite des Liniendefekts eines normalen Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher (die als eine normale Breite W bezeichnet werden kann) ist als eine Entfernung zwischen Zentren nächster Gitterpunkte **4** an beiden Seiten des Liniendefekts definiert. Die Breite des Liniendefekts bei dieser Ausführungsform kann durch eine konstante Zahl, multipliziert mit der normalen Breite W repräsentiert werden. Der photonische Kristall selbst weist die photonische Bandlücke zwischen einer Wellenlänge von $1,35 \mu\text{m}$ und einer Wellenlänge von $1,57 \mu\text{m}$ auf. Daher wurde keine Lichtübertragung in einem Teil beobachtet, welches keinen Defekt in dem Kristall innerhalb des Wellenlängenbereichs aufwies. Dann wurde das Lichtübertragungsspektrum für jeden Liniendefekt gemessen. Bei einem einfachen (normalen) einzelnen Liniendefekt (dessen Breite $1,0 W$ beträgt) wurde keine Lichtübertragung in dem Frequenzbereich der photonischen Bandlücke beobachtet. Andererseits zeigte sich, wenn ein Wellenleiter mit der Breite von $0,7 W$ eingesetzt wurde, deutlich eine Lichtübertragung in dem Frequenzbereich der photonischen Bandlücke.

[0055] [Fig. 6](#) zeigt die Dispersionsbeziehung von Wellenleiter-Moden des Wellenleiters aus einem photonischen Kristall mit einem einzigen Liniendefekt in Form fehlender Löcher gemäß der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. [Fig. 2](#) kann als [Fig. 7](#) zum Vergleich mit [Fig. 6](#) betrachtet werden. Die Lichtlinie des Mantels (SiO_2 bei der vorliegenden Ausführungsform) ist in [Fig. 7](#) überlagert, wie in [Fig. 6](#). Wie aus [Fig. 7](#) hervorgeht, weist eine Wellenleiter-Mode (welche der Mode **1** in [Fig. 4](#) entspricht), unterhalb der Lichtlinie des normalen Wellenleiters (dessen Breite gleich $1,0 W$ ist) eine kleine Schrägstellung auf. Andererseits ist gemäß der vorliegenden Erfindung, wie in [Fig. 6](#) gezeigt, eine Wellenleiter-Mode, die eine starke Schrägstellung aufweist, also eine große Gruppengeschwindigkeit aufweist, unterhalb der Lichtlinie in der photonischen

Bandlücke vorhanden. Darüber hinaus wird aus der Figur deutlich, dass die Bedingung einer Single-Mode in dem Bereich erfüllt ist.

[0056] Ein Wellenlängenbereich, in welchem eine Lichtübertragung in einem Versuch festgestellt wurde, ist ebenso wie der Bereich, in welchem diese Wellenleiter-Mode vorhanden ist. Dies zeigt, dass die Lichtübertragung erzielt wird, da die Single-Mode-Wellenleitung, die eine hohe Gruppengeschwindigkeit aufweist, dadurch ausgebildet wird, dass die Breite des Liniendefekts verringert wird (des optischen Wellenleiterteils). Als Ergebnis der Berechnung der Wellenleiter-Moden-Dispersion durch ein Zeitbereichsverfahren mit finiten Differenzen und das Verfahren mit Zerlegung in ebene Wellen unter Verwendung verschiedener Strukturparameter stellte sich heraus, dass eine Wellenleiter-Mode, die eine hohe Gruppengeschwindigkeit unter der Lichtlinie aufweist, ausgebildet werden kann, wenn die Breite des Liniendefekts (das optische Wellenleiterteil) auf einen Wert von $0,50 W$ bis $0,85 W$ eingestellt wird. Darüber hinaus zeigte sich eine Lichtausbreitung innerhalb des Bereiches der Breiten bei Versuchen.

[0057] Die [Fig. 8A](#) und [Fig. 8B](#) zeigen die Ergebnisse theoretischer Berechnungen der Wellenleiter-Moden-Dispersion in solchen Fällen, bei welchen die Breite des optischen Wellenleiterteils gleich $0,85 W$ und $0,50 W$ war. [Fig. 8A](#) zeigt jenen Fall von $0,85 W$ und [Fig. 8B](#) zeigt den Fall von $0,50 W$. Wenn die Breite des optischen Wellenleiterteils einen Wert zwischen $0,85 W$ und $0,50 W$ annimmt, ist die Übertragungsbandbreite der Wellenleiter-Mode breiter als bei den in den [Fig. 8A](#) und [Fig. 8B](#) gezeigten Fällen, wie dies beispielsweise aus [Fig. 6](#) ($0,7 W$) hervorgeht. Hieraus ergibt sich, dass der Wellenleiter mit dem Liniendefekt innerhalb des Bereichs der Breite in der Praxis funktioniert.

[0058] Der Grund dafür, dass der voranstehend geschilderte Effekt durch Verringerung der Breite erzielt werden kann, ist folgender.

[0059] Wie in Bezug auf den Stand der Technik beschrieben, weist bei dem typischen (normalen) Einzellinien-Defektzustand, wie in [Fig. 2](#) gezeigt, die Mode (die in [Fig. 2](#) eingeschlossene Mode) in dem niederfrequenten Bereich unterhalb der Lichtlinie innerhalb der photonischen Bandlücke eine sehr kleine Gruppengeschwindigkeit auf. Daher ist diese Mode in der Praxis nicht einsetzbar. Hierbei wird eine Wellenleiter-Mode außerhalb der Bandlücke, welche eine große Gruppengeschwindigkeit aufweist, überlegt.

[0060] Eine Verringerung der Breite des Liniendefekts entspricht einer Verringerung des Brechungsindex. Daher kann die Mode der niedrigsten Mode in [Fig. 2](#) zur hochfrequenten Seite verschoben werden,

durch Verengung der Breite. Daher kann diese Mode innerhalb der photonischen Bandlücke eingesetzt werden, und unterhalb der Lichtlinie. Daher wird ermöglicht, dass eine Mode, die eine große Gruppengeschwindigkeit aufweist, innerhalb der Bandlücke und unterhalb der Lichtlinie erzielt werden kann.

[0061] Der Brechungsindex des Wellenleiters kann darüber hinaus dadurch verringert werden, dass ein Medium mit niedrigem Brechungsindex in dem Wellenleiterteil verwendet wird, durch Bereitstellung von Löchern.

[0062] Nachstehend wird ein Berechnungsverfahren für Wellenleiter-Moden-Dispersionskurven ([Fig. 6](#), [Fig. 7](#) und dergleichen), die zur Erläuterung der vorliegenden Erfindung verwendet werden, beschrieben.

[0063] Die Dispersionskurve kann dadurch erhalten werden, dass die Maxwell-Gleichung unter Verwendung eines Berechnungsverfahrens untersucht wird, das als FDTD-Verfahren bezeichnet wird (finites Differenz-Zeitbereichsverfahren). Nachstehend wird das Untersuchungsverfahren beschrieben.

[0064] Zuerst wird eine Untersuchung der elektronischen Bandstruktur bei üblichen Kristallen und dergleichen beschrieben.

[0065] Eine periodische Struktur wie ein Kristall kann durch Wiederholung einer Einheitszelle repräsentiert werden. Es ist wohl bekannt, dass das Feld bei derartigen Strukturen zu einer Bloch-Welle wird. Bei der Banduntersuchung werden periodische Grenzbedingungen, welche der Bloch-Bedingung genügen, bei Grenzen von Einheitszellen eingesetzt, und werden Felder, welche der Bedingung genügen, als Eigenmoden abgezogen. Der zu untersuchende Gegenstand zu diesem Zeitpunkt ist die Schrödinger-Gleichung. Da die Verteilung des räumlichen Potentials sich in Abhängigkeit von dem Material ändert, können verschiedene Bandstrukturen vorhanden sein. Diese Idee wird bei dem photonischen Kristall eingesetzt, der eine periodische, dielektrische Struktur darstellt. Da der Gegenstand Licht anstelle von Elektronen darstellt, ist die zu berücksichtigende Gleichung die Maxwell-Gleichung, und wird die Verteilung des Brechungsindex (der Dielektrizitätskonstante) zur Berechnung anstelle einer Potentialverteilung verwendet.

[0066] Als nächstes wird ein Verfahren zum Abziehen der Eigenmode unter Verwendung des FDTD-Verfahrens beschrieben. Durch das FDTD-Verfahren wird die Maxwell-Gleichung zeitlich und räumlich in Gleichungen mit finiter Differenz aufgeteilt, und wird das elektromagnetische Feld der Lichtausbreitung in der Struktur (Raumausbreitung des Brechungsindex) durch aufeinanderfolgende Be-

rechnung erhalten. Dies bedeutet, dass das FDTD-Verfahren kein Verfahren zum direkten Erhalten des Eigenwertes ist. Allerdings kann man mit dem Verfahren Moden einer vorgegebenen Struktur auf die folgende Art und Weise erhalten.

[0067] Zuerst wird ein ordnungsgemäßes Ausgangsfeld in der Struktur vorgegeben. Nach Durchführung der aufeinanderfolgenden Berechnungen erhalten sich Felder, die für die Struktur einsetzbar sind, und werden andere Felder nicht ausgewählt. Mittels Durchführung einer Fourier-Wandlung bei der zeitlichen Änderung des Feldes kann ein Frequenzspektrum erhalten werden. Wenn ein Feld, das für die Struktur anwendbar ist, vorhanden ist, tritt ein Peak in dem Frequenzspektrum auf. Da die Bloch-Bedingung, die bei der Berechnung verwendet wird, eine Funktion der Wellenzahl ist, wird die Frequenz, bei welcher der Peak auftritt, eine Funktion der Wellenzahl. Der Bandwert des photonischen Kristalls kann durch Angabe der Funktion erhalten werden.

[0068] Als nächstes wird die Moden-Berechnung des Wellenleiters aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall beschrieben.

[0069] Grundsätzlich wird die gleiche Berechnung, wie voranstehend geschildert, durchgeführt. Allerdings ist bei dem photonischen Kristall, der bei der vorliegenden Erfindung eingesetzt wird, der Linieneffekt innerhalb des Kristalls vorgesehen, sodass die Periodizität in Richtung senkrecht zum Liniendefekt gestört wird. Daher wird eine Struktur, wie sie in den [Fig. 9A–Fig. 9C](#) gezeigt ist, als die Einheitszelle verwendet. Die periodische Grenzbedingung, welche der Bloch-Bedingung genügt, wird daher in Ausbreitungsrichtung des Lichts eingesetzt. In Richtung senkrecht zur Lichtausbreitungsrichtung wird die periodische Struktur dadurch erzielt, dass eine Spiegel-Grenze eingesetzt wird, bei welcher Wellenleiter so angeordnet sind, dass keine erhebliche Störung auftritt, und ein Bereich zum Aufnehmen von austretendem Licht, das nicht zu einer Mode wird, in Richtung der Dicke vorgesehen ist.

[0070] [Fig. 9A](#) zeigt die Struktur von [Fig. 1](#). [Fig. 9B](#) ist eine vergrößerte Ansicht eines Teils in einem Kasten aus einer gestrichelten Linie von [Fig. 9A](#), und [Fig. 9C](#) zeigt eine stereoskopische Ansicht der Struktur von [Fig. 9B](#), welche die Einheitszelle des Wellenleiters aus einem photonischen Kristall darstellt. Das Diagramm der Wellenzahl in Abhängigkeit von der Frequenz kann dadurch erhalten werden, dass die Maxwell-Gleichung durch das FDTD-Verfahren für die Einheitszelle gelöst wird. Das Diagramm stellt die Dispersionskurve dar, welche in der vorliegenden Beschreibung geschildert wird.

[0071] Bei dieser Berechnung kann eine Mode mit Ausnahme der Eigenmode als ein Peak des Spek-

trums erfasst werden, wenn die Mode für lange Zeit in dem Wellenleiter vorhanden ist. Daher wird eine Untersuchung der Lichtaustrittsmoden verfügbar, welche oberhalb der Lichtlinie der Mantelschicht liegt. Dieses Merkmal des vorliegenden Verfahrens stellt einen Vorteil dar, der nicht durch andere Eigenwert-Untersuchungsverfahren erhalten werden kann. Dieser Vorteil wird bei der vorliegenden Erfindung eingesetzt. Darüber hinaus können infolge der Tatsache, dass die Lebensdauer von Wellenleiter-Moden in dem Wellenleiter gemäß diesem Berechnungsverfahren berechnet werden können, theoretische Ausbreitungsverluste unter Verwendung der Gruppengeschwindigkeit (der Energieausbreitungsgeschwindigkeit) angegeben werden, die durch die Dispersionskurve erhalten wird.

[0072] Bei dem Wellenleiter, bei welchem die Breite des optischen Wellenleiterteils verkleinert ist, wurde erkannt, dass der Single-Mode-Bereich sich nicht nur an der niederfrequenten Seite der Lichtlinie erstreckt, sondern auch an der hochfrequenten Seite der Lichtlinie.

[0073] Bei der ersten und zweiten Ausführungsform können die Wellenleiter unter Verwendung beispielsweise des Silizium-Auf-Isolators (SOI) unter Verwendung von Si und SiO₂ als Medium hergestellt werden. Allerdings wird deutlich, dass die Auswirkungen der vorliegenden Erfindung auch beim Einsatz anderer Materialien erzielt werden können. Allgemein wird, wenn ein Wellenleiter mit einem einzigen Liniendefekt unter Verwendung des Slabs aus einem photonischen Kristall erzeugt wird, wobei ein Dielektrikum mit niedrigem Brechungsindex unter einem Dünnschichtmedium mit hohem Brechungsindex angeordnet wird, ermöglicht, eine Wellenleiter-Mode auszubilden, welche die Bedingung für Single-Mode oberhalb oder unterhalb der Lichtlinie erfüllt, durch Einstellung der Breite, wie bei den voranstehend geschilderten Ausführungsformen.

[0074] Beispielsweise können anstelle von Si Halbleiter wie beispielsweise eine Verbindung auf Galliumarsenidgrundlage (GaAs, InGaAs, InGaAsP und dergleichen), Verbindungen auf Indiumphosphidgrundlage (InP und dergleichen) und dergleichen verwendet werden. Weiterhin können ein Polymer, Aluminiumoxid und dergleichen anstelle von SiO₂ eingesetzt werden. Weiterhin wird zwar SiO₂ als der untere Mantel eingesetzt, und wird Luft als der obere Mantel bei den Ausführungsformen eingesetzt, jedoch kann selbstverständlich derselbe Effekt erhalten werden, wenn ein dielektrischer Mantel wie beispielsweise aus SiO₂ sowohl als der obere als auch der untere Mantel eingesetzt wird.

<Auswirkungen der vorliegenden Erfindung>

[0075] Wie voranstehend geschildert, ist der

Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall gemäß der vorliegenden Erfindung so ausgebildet, dass ein Teil von Löchern in einer Gitterstruktur eines Slabs aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall nicht geradlinig vorhanden ist, sodass ein Liniendefekt vorhanden ist, und eine erste Breite, welche eine Entfernung zwischen Zentren von zwei am nächsten benachbarten Gitterpunkten ist, die an beiden Seiten des Liniendefekts liegen, kleiner ist als eine zweite Breite, die eine Entfernung zwischen Zentren zweier am nächsten benachbarter Gitterpunkte ist, die an beiden Seiten eines Liniendefekts liegen, bei einem normalen Slab-Wellenleiter aus einem zweidimensionalen photonischen Kristall, bei dem einfach Löcher in einer einzigen Linie fehlen. Daher kann ein optischer Wellenleiter zur Verfügung gestellt werden, der eine Single-Mode-Wellenleitung aufweist, bei welcher eine hohe Gruppengeschwindigkeit unterhalb der Lichtlinie vorhanden ist.

[0076] Daher können gemäß der vorliegenden Erfindung mikrominiaturisierte optische Wellenleiterstrukturen zur Verfügung gestellt werden, welche die Gruppengeschwindigkeit verbessern, und kleine Verluste aufweisen.

[0077] Die vorliegende Erfindung ist nicht auf die speziell geschilderten Ausführungsformen beschränkt, und es können Variationen und Abänderungen vorgenommen werden, ohne von dem Umfang der Erfindung abzuweichen.

Patentansprüche

1. Zweidimensionaler Slab-Wellenleiter aus einem photonischen Kristall, gebildet durch einen Liniendefekt in einer Dreiecksgitterstruktur eines zweidimensionalen Slabs aus einem photonischen Kristall, wobei der Slab aus einem photonischen Kristall auf jeder Seite des Liniendefekts eine regelmäßige Dreiecksgitterstruktur mit Gitterpunkten (4) mit niedrigem Brechungsindex aufweist, die eine gemeinsame Gitterkonstante hat, und so orientiert ist, dass die Gitterpunkte auf geraden Linien parallel zum Liniendefekt liegen, wobei die Dreiecksgitterstrukturen an jeder Seite des Liniendefekts relativ zueinander in der Richtung des Liniendefekts ausgerichtet sind, als würde der Liniendefekt durch eine einzige Linie von Gitterpunkten gebildet, die entlang dem Liniendefekt verlaufen, der nicht vorhanden ist, so dass der Liniendefekt ausgebildet wird, wobei der zweidimensionale Slab-Wellenleiter aus einem photonischen Kristall einen Oxydmantel (3) aufweist, der keine Gitterpunkte hat, oder einen Polymermantel, der keine Gitterpunkte hat, wobei:

Die Breite des Wellenleiters so ist, dass eine erste Breite, die eine Entfernung zwischen Zentren von zwei nächsten Gitterpunkten ist, die an entgegengesetzten Seiten des Wellenleiters angeordnet sind, verschieden von einer zweiten Breite ist, die eine Ent-

fernung zwischen Zentren zweier nächster Gitterpunkte ist, die an entgegengesetzten Seiten eines Liniendefekts angeordnet sind, der in einem zweidimensionalen Slab aus einem photonischen Kristall ausgebildet würde, der die regelmäßige Dreiecksgitterstruktur und die gemeinsame Gitterkonstante aufweist, und bei welchem einfach Gitterpunkte einer einzelnen Linie fehlen, wobei die erste Breite einen Wert vom 0,5-fachen zum 0,8-fachen der zweiten Breite aufweist; und **dadurch gekennzeichnet**, dass:

die Dicke des zweidimensionalen Slabs aus einem photonischen Kristall $0,2\ \mu\text{m}$ beträgt, und die gemeinsame Gitterkonstante gleich $0,39\ \mu\text{m}$ ist.

2. Zweidimensionaler Slab-Wellenleiter aus einem photonischen Kristall nach Anspruch 1, bei welchem die Dreiecksgitterstruktur durch Luftloch-Dreiecksgitter gebildet wird.

3. Zweidimensionaler Slab-Wellenleiter aus einem photonischen Kristall nach Anspruch 1, bei welchem der zweidimensionale Slab-Wellenleiter aus einem photonischen Kristall unter Verwendung eines Substrats des Typs Silizium-Auf-Isolator (SOI) gebildet wird.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

FIG. 1A STAND DER TECHNIK

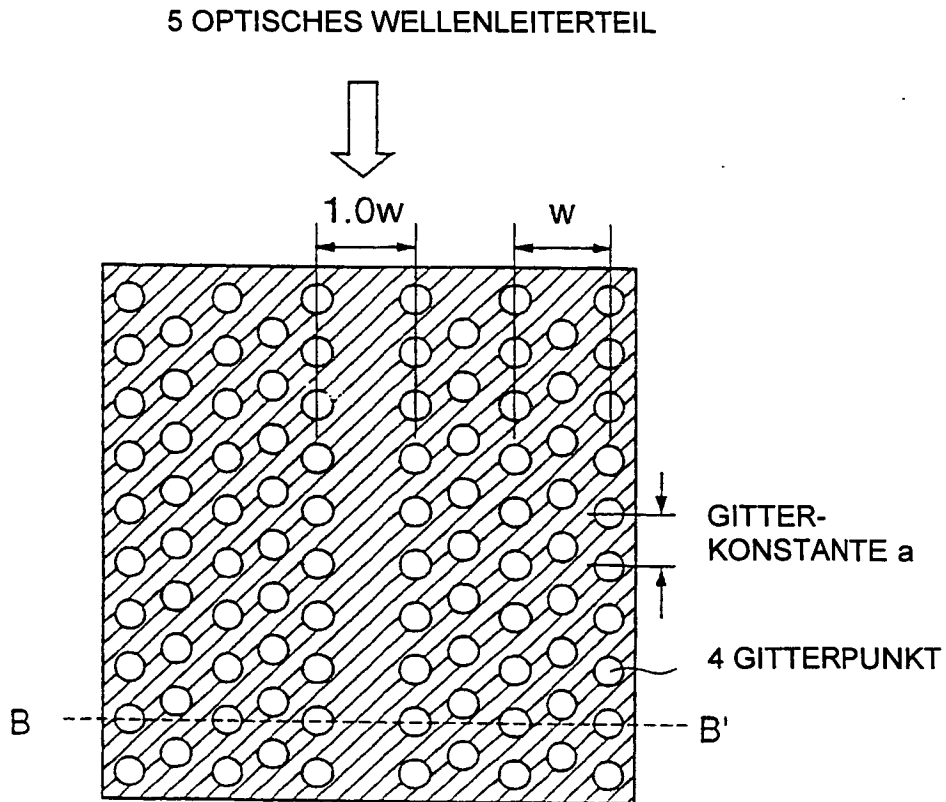


FIG. 1B STAND DER TECHNIK

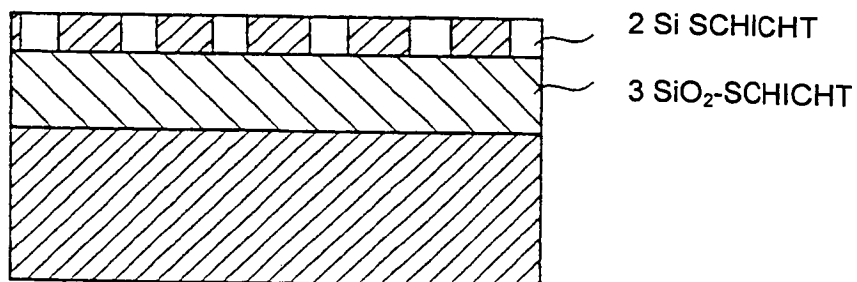


FIG. 2 STAND DER TECHNIK

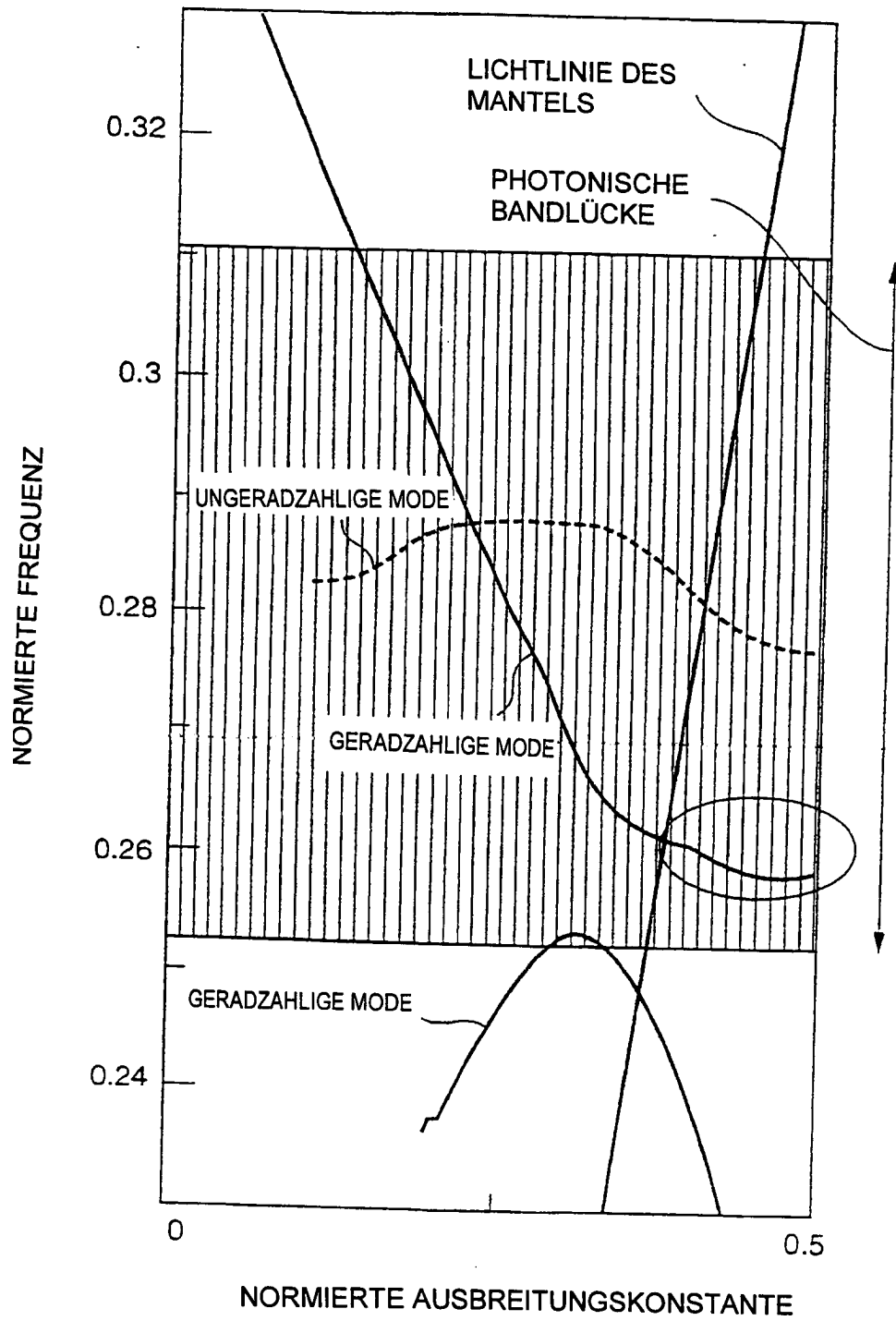


FIG.3A
STAND DER TECHNIK

FIG.3C
STAND DER TECHNIK

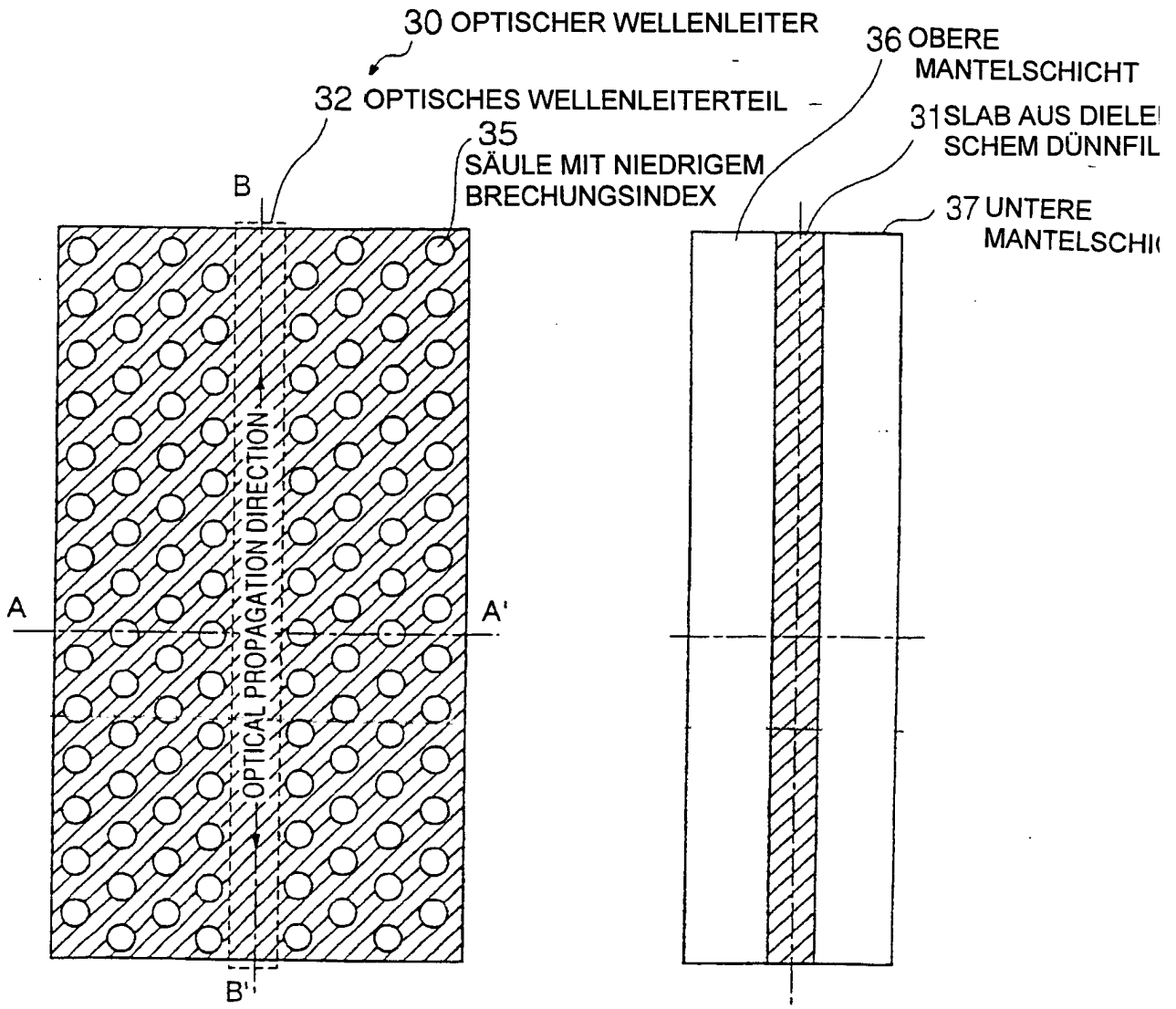


FIG.3B
STAND DER TECHNIK

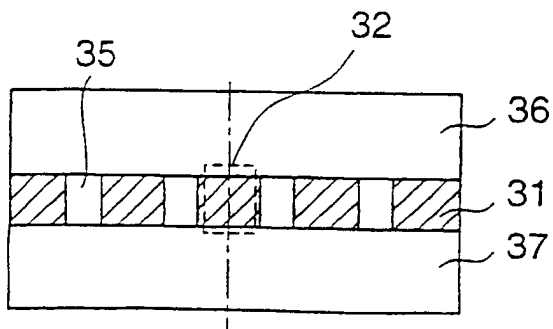


FIG.4A STAND DER TECHNIK

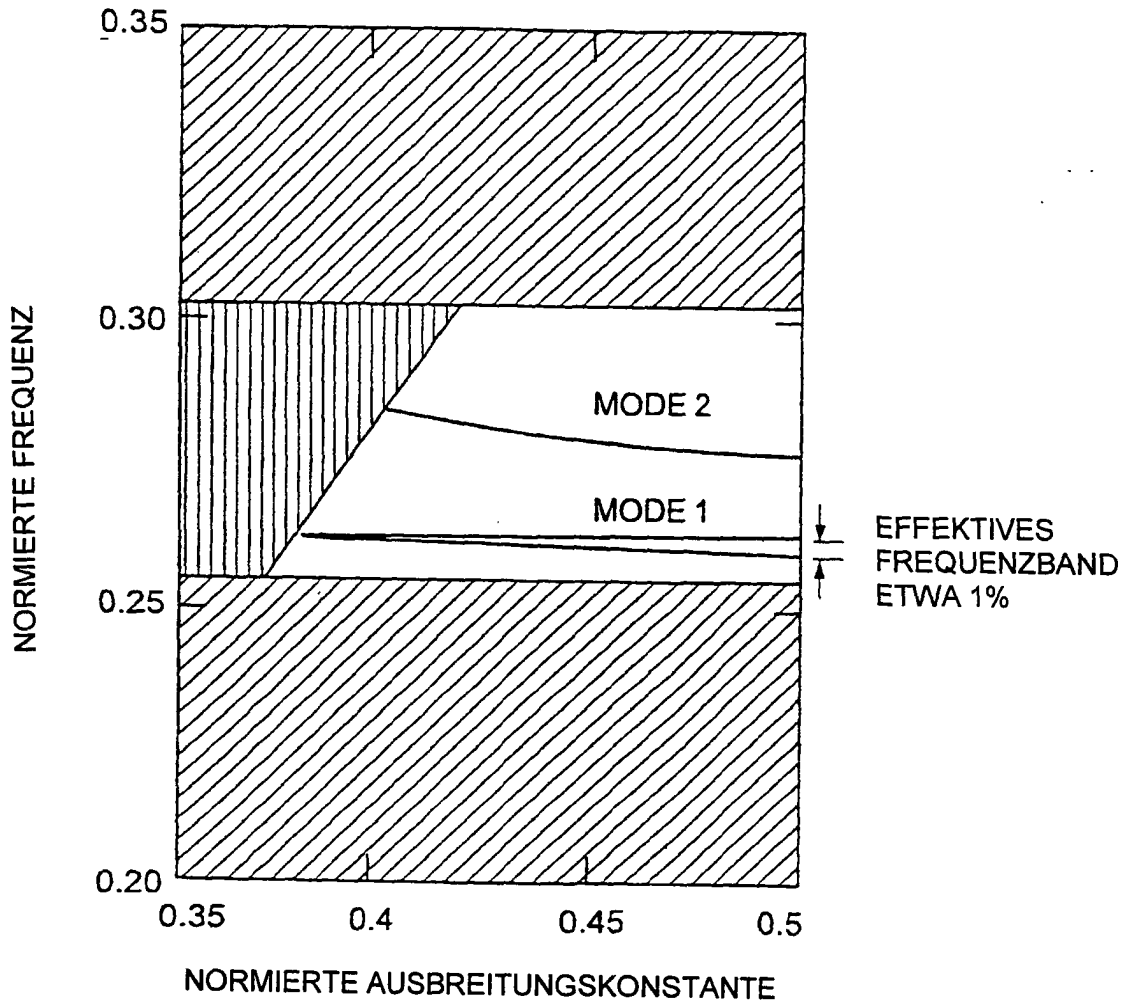


FIG.4B

STAND DER TECHNIK

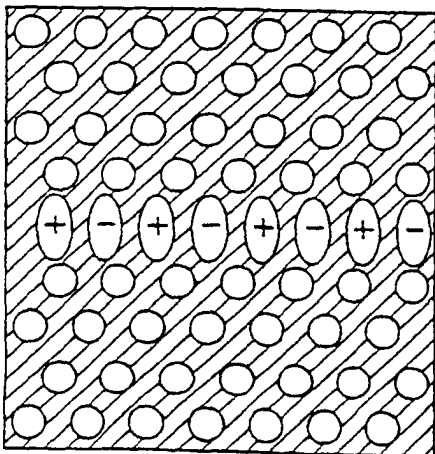


FIG.4C

STAND DER TECHNIK

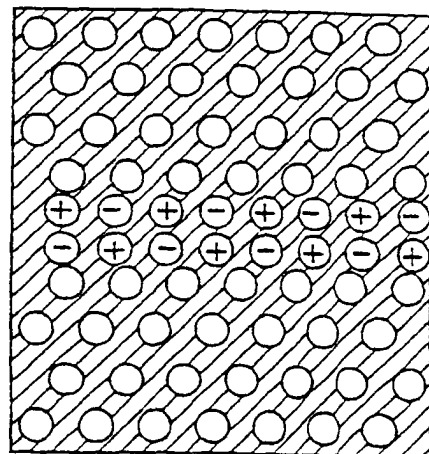


FIG.5A

1 OPTISCHES WELLENLEITERTEIL

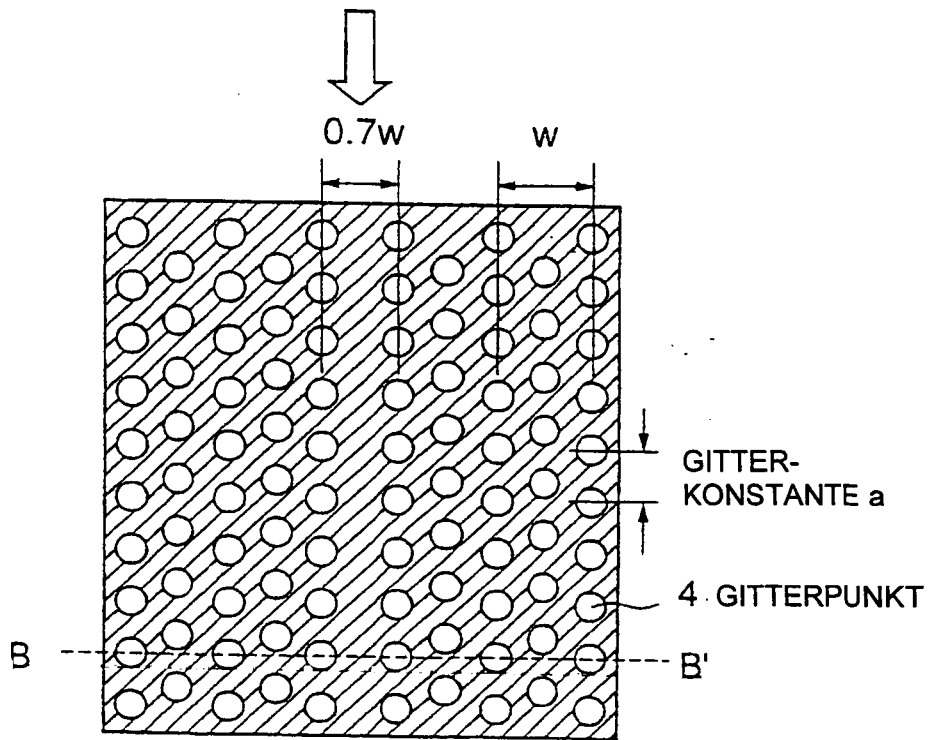


FIG.5B

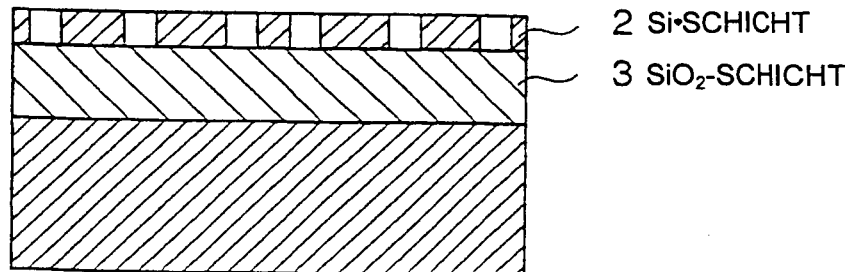


FIG.6

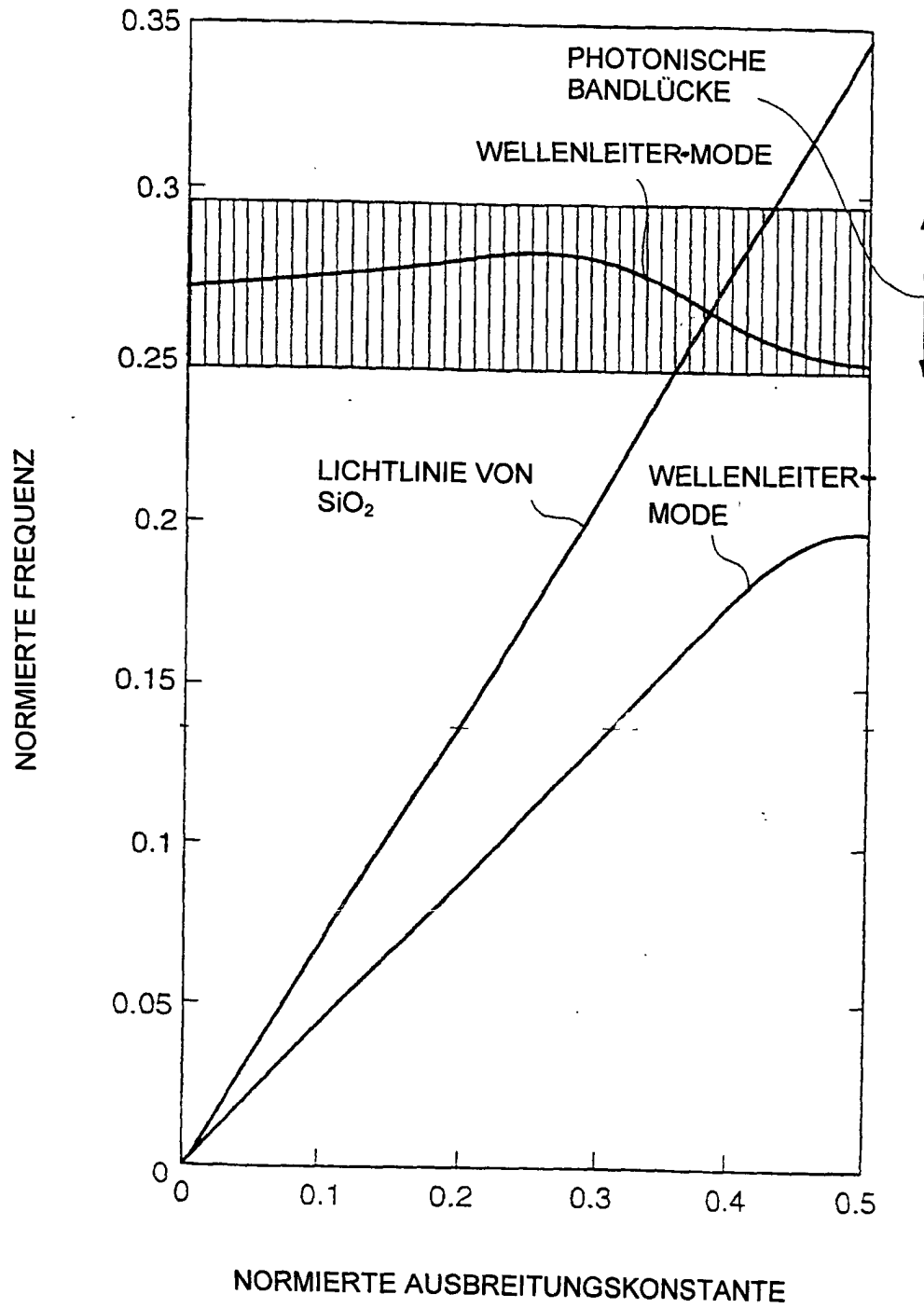


FIG.7

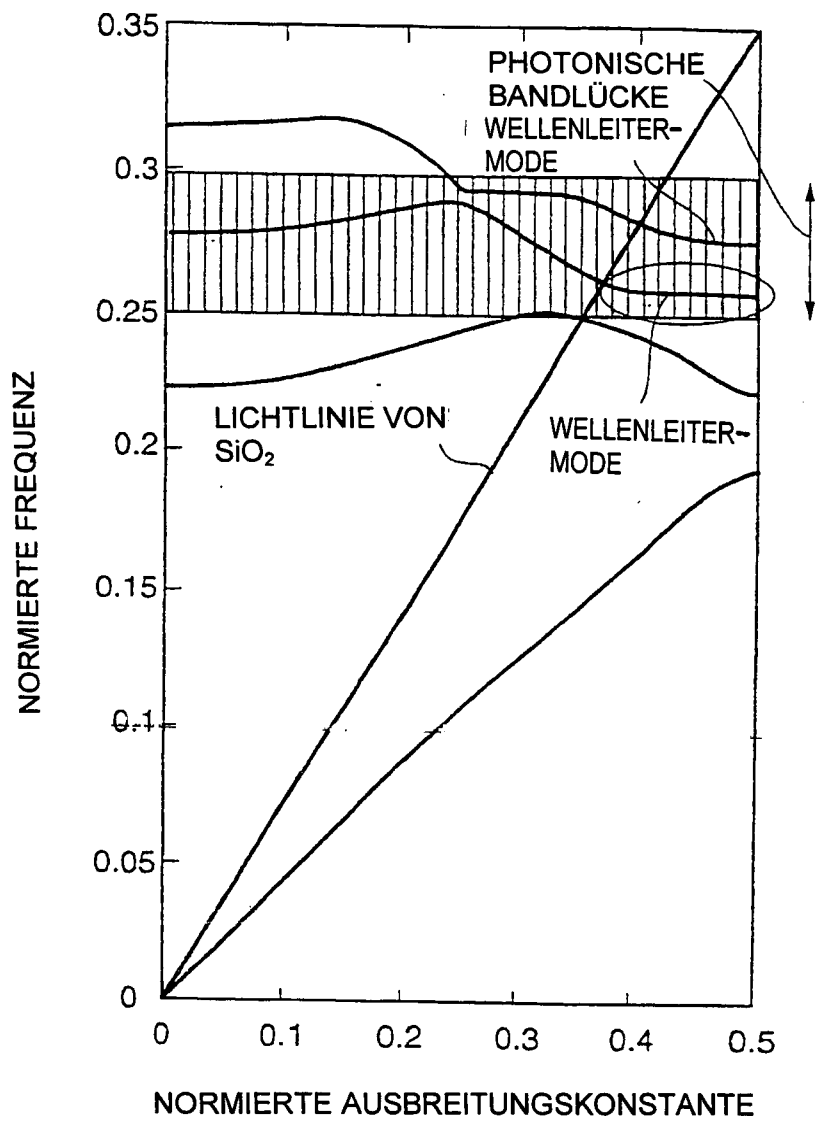


FIG.8A

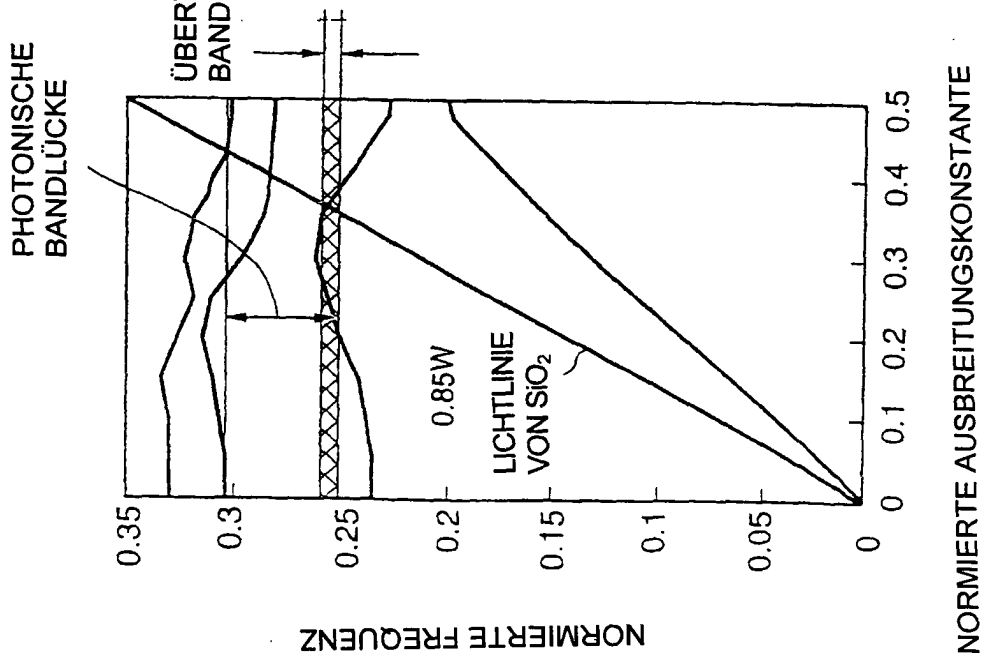
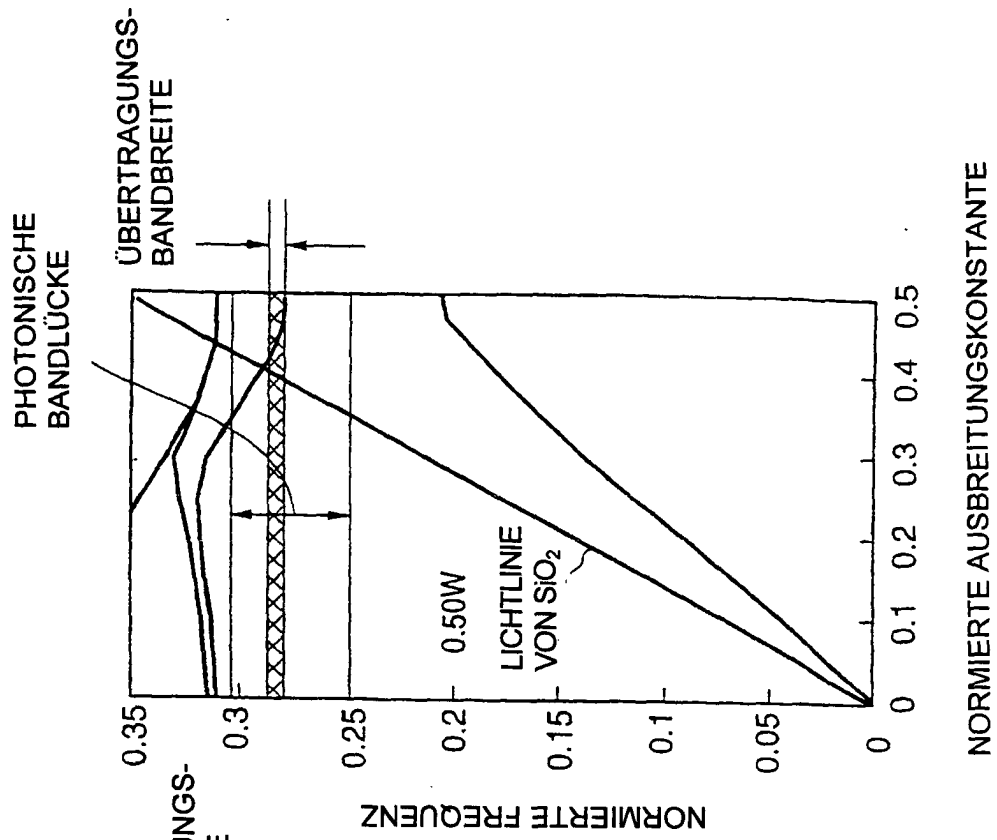


FIG.8B



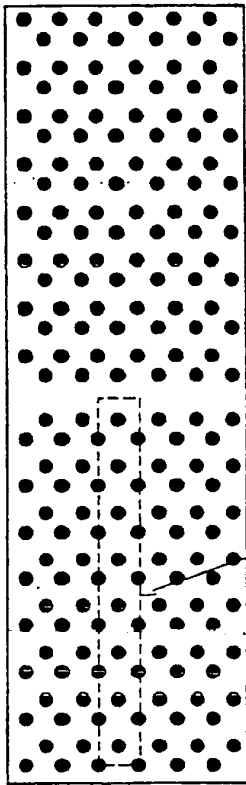


FIG. 9A

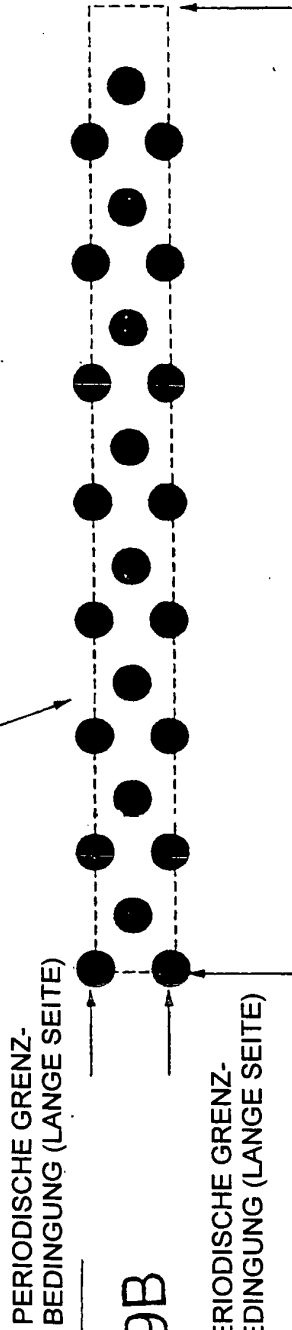


FIG. 9B

SPIEGEL-GRENZBEDINGUNG
(SPIEGELSYMMETRIE IN
BEZUG AUF KURZE SEITE)

SPIEGEL-GRENZBEDINGUNG
(SPIEGELSYMMETRIE IN
BEZUG AUF KURZE SEITE)

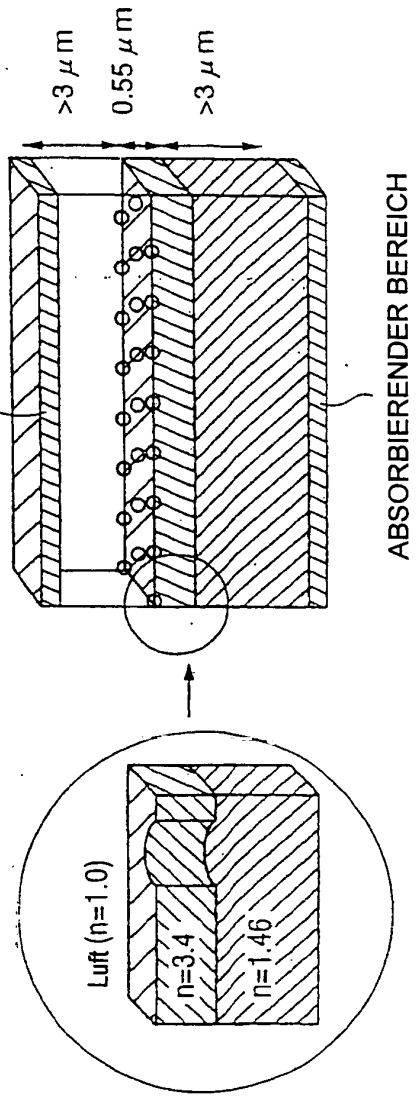


FIG. 9C