



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 60 2005 001 093 T2 2008.01.10**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 624 326 B1**

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

(21) Deutsches Aktenzeichen: **60 2005 001 093.9**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **05 254 844.3**

(96) Europäischer Anmeldetag: **03.08.2005**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **08.02.2006**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **09.05.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **10.01.2008**

(30) Unionspriorität:

2004228234 04.08.2004 JP

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:

Canon K.K., Tokio/Tokyo, JP

(72) Erfinder:

Hoshi, Hikaru, Tokyo, JP; Takagi, Akinari, Tokyo, JP; Ikemoto, Kiyokatsu, Tokyo, JP; Nobayashi, Kazuya, Tokyo, JP

(74) Vertreter:

Dr. Weser & Kollegen, 81245 München

(54) Bezeichnung: **Dreidimensionaler photonischer Kristall und optisches Element**

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****Bereich der Erfindung**

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen dreidimensionalen photonischen Kristall (nachstehend auch „3D-Photonenkristall“), insbesondere, aber nicht ausschließlich, bezieht sich die vorliegende Erfindung auf Photonenkristalle mit entworfener Defekt- und/oder Brechungsindexperiodizität.

Beschreibung des Standes der Technik

[0002] Yablonovitch schlug das Konzept vor, dass die Transmissions-/Reflexionseigenschaften einer elektromagnetischen Welle unter Verwendung einer Struktur gesteuert werden können, die kleiner als die Wellenlänge der elektromagnetischen Welle ist (Physical Review Letters, Band 58, Seite 2059f., 1987). Gemäß diesem Dokument kann eine periodische Struktur, die kleiner als die Wellenlänge ist, die Transmissions-/Reflexionseigenschaften der elektromagnetischen Welle steuern. Auf diese Weise können die Transmissions-/Reflexionseigenschaften von Licht gesteuert werden, wenn die Wellenlänge der elektromagnetischen Welle nahe bei der Periodizität der Struktur ist. Ein Photonenkristall kann eine solche Struktur sein.

[0003] Es wurde vorgeschlagen, dass ein reflektierender Spiegel mit einer Reflektivität von 100% (verlustfrei) in einem gewissen Wellenlängenbereich hergestellt werden kann. Dieses Konzept, das eine Reflektivität von nahe 100% in gewissen Wellenlängenbereichen erleichtert, führt zu einem Frequenzbereich mit einer verringerten transmittierten Wellenlängenleistung, der als photonische Bandlücke bezeichnet wird, verglichen mit der Energielücke in einem herkömmlichen Halbleiter. Darüber hinaus kann eine dreidimensionale feine periodische Struktur die photonische Bandlücke für einfallendes Licht aus jeder Richtung bereitstellen. Dies wird hiernach als eine vollständige photonische Bandlücke bezeichnet. Die vollständige photonische Bandlücke kann verschiedene Anwendungen haben (z.B. verringerte spontane Emission in einer Lichtemissionsvorrichtung).

[0004] Zum Beispiel kann ein Punktdefekt oder ein Liniendefekt im 3D-Photonenkristall einen Resonator oder einen Wellenleiter in Übereinstimmung mit einer gewünschten Wellenlänge der photonischen Bandlücke bereitstellen. Ein die photonische Bandlücke ausnutzender Punktdefektoresonator kann Licht in einem sehr kleinen Bereich einfangen und das Emissionsmuster von Licht steuern, wobei die Frequenz des emittierten Lichts im Bandlückenbereich liegen kann. Dies kann dann eine Licht emittierende Vorrichtung mit erhöhter Performance erzielen, die effizient Licht bei einer gewünschten Wellenlänge emittiert. Wenn ein Punktdefektoresonator aus einem lumineszenten Material hergestellt ist, kann das lumineszente Material durch jedes Anregungsverfahren angeregt werden, um Laseroszillation zu erzeugen (US-A-6392787).

[0005] Eine Struktur, die eine vollständige photonische Bandlücke in einem breiteren Wellenlängenbereich erzielen kann, kann das Erweitern des Arbeitswellenlängenbereichs einer solchen funktionalen Vorrichtung erleichtern. Einige Strukturen mit einer photonischen Bandlücke wurden vorgeschlagen (US-A-6392787, US-A-6134043, Applied Physics Letters, Band 84, Nr. 3, Seite 362f., 2004). [Fig. 33A](#) bis [Fig. 33F](#) illustrieren dreidimensionale periodische Strukturen, die eine vollständige photonische Bandlücke erzielen sollen. Diese sind eine Diamantstruktur, eine Holzstapelstruktur, eine helixartige Struktur, eine dreidimensionale periodische Struktur, eine zur dreidimensionalen periodischen Struktur inverse Struktur und eine Diamant-Holzstapelstruktur.

[0006] Die photonische Bandlücke in den oben beschriebenen 3D-Photonenkristallen kann durch Verändern der Gitterkonstante von diesen gesteuert werden. Zum Beispiel verschiebt eine größere Gitterkonstante das Wellenlängenband der photonischen Bandlücke zu einer längeren Wellenlänge, und eine kleinere Gitterkonstante verschiebt das Wellenlängenband der photonischen Bandlücke zu einer kürzeren Wellenlänge.

[0007] Noda et al. (Nature, Band 407, Seite 608, 2000) gibt an das Steuern einer Arbeitswellenlänge durch Gitterkonstantenmodulation in einer optischen Multiplex-/Demultiplexschaltung (add-drop optische Schaltung) unter Verwendung eines zweidimensionalen Photonenkristalls. Die optische Multiplex-/Demultiplexschaltung ist eine optische Eingangs-/Ausgangsschaltung, die aufweist eine (add)-Funktion zum Hinzufügen einer neuen Wellenlänge zu einem Medium, durch das mehrere Wellenlängen propagieren, und eine (drop)-Funktion zum Extrahieren nur einer gewissen Wellenlänge aus dem Medium. Vom Photonenkristall wird erwartet, dass er die Größe dieser Schaltung verringert. Diese Literatur gibt an, dass nahezu die gleiche drop-Effizienz erhalten wer-

den kann in mehreren Wellenlängen durch Modulieren der Gitterkonstante, um die Arbeitswellenlänge eines Wellenleiters und eines Resonators auf eine gewünschte Wellenlänge abzustimmen. Die Struktur, in der zweidimensionale Photonenkristalle mit verschiedenen Gitterkonstanten angeordnet sind, wird eine in-plane Heterostruktur genannt. Dieses Beispiel demonstriert, dass das Steuern des Wellenlängenbandes der photonischen Bandlücke zum Erzeugen eines optischen Nanobaelementes verwendet werden kann, was einen Photonenkristall verwenden kann.

[0008] Eine solche Struktur mit einer modulierten Gitterkonstante kann jedoch nicht direkt auf den 3D-Photonenkristall angewendet werden. Während es möglich ist, die photonische Bandlücke durch Modulieren einer Gitterkonstante sogar im 3D-Photonenkristall zu steuern, kann eine inkommensurable Struktur an einer Grenzfläche auftreten, an der die Gitterkonstante variiert, wie in [Fig. 34A](#) und [Fig. 34B](#) gezeigt. Insbesondere ist es schwierig, die dreidimensionale Struktur herzustellen, weil inkonsistente Gitterkonstanten in der x-, y- und der z-Achsen-Richtung auftreten. Zum Beispiel variiert in einer schichtweisen Struktur, in der Schichten eine nach der anderen gestapelt sind (z.B. der Holzstapelstruktur), die Gitterkonstante in der Schichtungsrichtung. Daher ist es schwierig, die herkömmliche Wiederholung der Strukturmusterbildung mittels Elektronenstrahlolithographie und der Beschichtung, einer herkömmlichen Waferfusionstechnik oder eines herkömmlichen Nanoimprintverfahrens ohne jegliche Modifikation zu verwenden.

[0009] Demzufolge kann es schwierig sein, einen bei mehreren Designwellenlängen arbeitenden herkömmlichen 3D-Photonenkristall zu erhalten, in dem die photonische Bandlücke auf ein gewünschtes Wellenlängenband ohne Ändern der Gitterkonstante eingestellt werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0010] Mindestens ein Ausführungsbeispiel bezieht sich auf einen 3D-Photonenkristall, welcher umfasst:
 eine erste Schicht mit mehreren säulenartigen Strukturen, die durch ein erstes vorbestimmtes Intervall voneinander beabstandet sind;
 eine zweite Schicht mit mehreren säulenartigen Strukturen, die durch ein zweites vorbestimmtes Intervall voneinander beabstandet sind, wobei sich die säulenartigen Strukturen in einer unterschiedlichen Richtung gegenüber den säulenartigen Struktur in der ersten Schicht erstrecken;
 eine dritte Schicht mit mehreren säulenartigen Strukturen, die durch ein erstes vorbestimmtes Intervall voneinander beabstandet sind, wobei sich die säulenartigen Strukturen im Wesentlichen in der gleiche Richtung wie jene der säulenartigen Strukturen in der ersten Schicht erstrecken;
 eine vierte Schicht mit mehreren säulenartigen Strukturen, die durch ein zweites vorbestimmtes Intervall voneinander beabstandet sind, wobei sich die säulenartigen Strukturen in der gleichen Richtung wie jene der säulenartigen Strukturen in der zweiten Schicht erstrecken;
 zusätzliche Schichten, die je mindestens eine Schicht mit diskreten Strukturen (nachstehend auch „Diskretstrukturen“), die in einer Ebene parallel zu jeder der vier Schichten diskret angeordnet sind, enthalten;
 wobei die erste Schicht bis vierte Schicht sequenziell mit der zusätzlichen Schicht zwischen den benachbarten zwei Schichten davon gestapelt sind,
 wobei die erste und die dritte Schicht derart gestapelt sind, dass die in diesen enthaltenen säulenartigen Strukturen gegeneinander verschoben sind um die Hälfte des ersten vorbestimmten Intervalls in der Richtung senkrecht zur Erstreckungsrichtung der säulenartigen Strukturen der ersten Schicht in den Schichten;
 wobei die zweite und die vierte Schicht derart gestapelt sind, dass die in diesen enthaltenen säulenartigen Strukturen gegeneinander verschoben sind um die Hälfte des zweiten vorbestimmten Intervalls in der Richtung senkrecht zur Erstreckungsrichtung der säulenartigen Strukturen der zweiten Schicht in den Schichten;
 wobei in den zusätzlichen Schichten enthaltene diskrete Strukturen an Positionen, die den Überkreuzungen benachbarter säulenartiger Strukturen der gestapelten Schichten entsprechen, angeordnet sind; und
 wobei der 3D-Photonenkristall mindestens zwei Bereiche unterschiedlicher diskreter Strukturen enthält.

[0011] Weitere Merkmale der vorliegenden Erfindung werden aus der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele unter Bezug auf die beigefügten Zeichnungen deutlich.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0012] [Fig. 1](#) ist eine schematische Ansicht eines 3D-Photonenkristallteils A gemäß einem Ausführungsbeispiel.

[0013] [Fig. 2](#) ist eine Draufsicht des 3D-Photonenkristallteils A.

- [0014] [Fig. 3](#) ist eine Seitenansicht des 3D-Photonenkristallteils A.
- [0015] [Fig. 4](#) ist eine graphische Darstellung der photonischen Bandstruktur des dreidimensionalen Kristallteils A.
- [0016] [Fig. 5](#) ist eine graphische Darstellung photonischer Bandstrukturen von 3D-Photonenkristallteilen A1 und A2 mit verschiedenen Breiten der zusätzlichen Schicht.
- [0017] [Fig. 6A](#) bis [6E](#) sind Draufsichten auf Variationen der diskreten Struktur.
- [0018] [Fig. 7A](#) bis [7C](#) und [7E](#) sind Seitenansichten von 3D-Photonenkristallen mit verschiedener Anzahl diskreter Strukturen, und [7D](#) ist eine Perspektivansicht eines 3D-Photonenkristalls.
- [0019] [Fig. 8A](#) ist eine schematische Ansicht eines 3D-Photonenkristalls B und [8B](#) ist eine graphische Darstellung, die eine Beziehung zwischen der Breite der zusätzlichen Schicht und der Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke zeigt.
- [0020] [Fig. 9A](#) bis [9C](#) sind eine Schrägansicht, eine Draufsicht bzw. eine Seitenansicht eines 3D-Photonenkristalls und zeigen eine Beziehung zwischen der photonischen Bandlücke und der Resonanzwellenlänge.
- [0021] [Fig. 10](#) ist eine Detailansicht dreier zusätzlicher Schichten.
- [0022] [Fig. 11](#) ist eine graphische Darstellung der Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke als Funktion der Breite einer zweiten zusätzlichen Schicht.
- [0023] [Fig. 12A](#) und [12B](#) sind eine Draufsicht bzw. eine Seitenansicht einer monolithischen Struktur gemäß einem Ausführungsbeispiel.
- [0024] [Fig. 13](#) ist eine schematische Ansicht eines 3D-Photonenkristallteils D gemäß einem Ausführungsbeispiel.
- [0025] [Fig. 14](#) ist eine graphische Darstellung einer Beziehung zwischen dem Brechungsindex der diskreten Struktur und der Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke.
- [0026] [Fig. 15](#) ist eine graphische Darstellung einer Beziehung zwischen dem Brechungsindex und der Gestalt der diskreten Struktur und der Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke.
- [0027] [Fig. 16](#) ist eine graphische Darstellung einer Beziehung zwischen der Breite 1x der ersten diskreten Struktur der 3D-Photonenkristalle G, H, und I und der Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke.
- [0028] [Fig. 17A](#) und [17B](#) sind eine Draufsicht bzw. eine Seitenansicht eines Punktdefektoresonators hergestellt aus einem 3D-Photonenkristall, der mehrere Bereiche beinhaltet, die diskrete Strukturen mit unterschiedlicher Form enthalten.
- [0029] [Fig. 18](#) ist eine schematische Ansicht eines rechtwinklig-parallelepipedförmigen Punktdefekts in einem 3D-Photonenkristall.
- [0030] [Fig. 19](#) ist eine graphische Darstellung einer durch einen Punktdefekt hervorgerufenen Resonanzmode.
- [0031] [Fig. 20](#) ist eine schematische Ansicht eines Punktdefektoresonators hergestellt aus einem 3D-Photonenkristall mit mehreren Bereichen, die diskrete Strukturen mit unterschiedlichem Brechungsindex enthalten.
- [0032] [Fig. 21A](#) und [21B](#) sind eine Draufsicht bzw. eine Seitenansicht eines Liniendefekt-Wellenleiters hergestellt aus einem 3D-Photonenkristall mit mehreren Bereichen, die diskrete Strukturen unterschiedlicher Gestalt enthalten.
- [0033] [Fig. 22A](#) und [22B](#) sind schematische Ansichten eines Liniendefekt-Wellenleiters aus einem 3D-Photonenkristall mit mehreren Bereichen, die diskrete Strukturen mit unterschiedlichem Brechungsindex enthalten.

[0034] [Fig. 23](#) ist eine schematische Ansicht eines optischen Multiplexers/Demultiplexers aus einem 3D-Photonenkristall mit mehreren Bereichen, die diskrete Strukturen unterschiedlicher Gestalt enthalten.

[0035] [Fig. 24A](#) ist eine schematische Ansicht eines optischen Multiplexers/Demultiplexers aus einem 3D-Photonenkristall mit mehreren Bereichen, die diskrete Strukturen mit unterschiedlichem Brechungsindex enthalten, und [Fig. 24B](#) ist eine graphische Darstellung der Intensität des Lichtes, das in einen Liniendefekt-Wellenleiters eintritt.

[0036] [Fig. 25](#) ist eine graphische Darstellung von Resonanzmodenspektren, die durch einen aus 3D-Photonenkristallen G, H und I hergestellten Punktdefektresonator erzeugt werden.

[0037] [Fig. 26](#) ist eine schematische Ansicht einer Punktdefekt-Lichtemissionsvorrichtung, die ein anorganisches lumineszentes Material gemäß einem Ausführungsbeispiel verwenden kann.

[0038] [Fig. 27](#) illustriert eine schematische Ansicht einer Punktdefekt-Lichtemissionsvorrichtung, die ein organisches lumineszentes Material gemäß einem Ausführungsbeispiel verwenden kann.

[0039] [Fig. 28A](#) und [Fig. 28B](#) sind schematische Ansichten von Punktdefekt-Lichtemissionsvorrichtungen, die transparente Elektroden zur Strominjektion (current injection) gemäß einem Ausführungsbeispiel verwenden können.

[0040] [Fig. 29](#) ist eine schematische Ansicht einer Punktdefekt-Lichtemissionsvorrichtung, die eine externe Lichtquelle gemäß einem Ausführungsbeispiel verwenden kann.

[0041] [Fig. 30](#) ist eine schematische Ansicht eines Farbfilterelementes gemäß einem Ausführungsbeispiel.

[0042] [Fig. 31](#) ist eine schematische Ansicht einer Anwendung des Farbfilterelementes gemäß einem Ausführungsbeispiel.

[0043] [Fig. 32](#) ist eine schematische Ansicht einer anderen Anwendung des Farbfilterelementes gemäß einem Ausführungsbeispiel.

[0044] [Fig. 33A](#) bis [Fig. 33F](#) sind schematische Ansichten herkömmlicher 3D-Photonenkristalle.

[0045] [Fig. 34A](#) und [Fig. 34B](#) sind eine Draufsicht bzw. eine Seitenansicht eines 3D-Photonenkristalls eines herkömmlichen Gitterkonstanten-Modulationstyps.

BESCHREIBUNG DER AUSFÜHRUNGSFORMEN

Beispiel 1

[0046] Die folgende Beschreibung von mindestens einem der möglichen Ausführungsbeispiele ist nur illustrativer Art und ist keinesfalls dazu gedacht, die Erfindung, ihre Anwendung, ihre Äquivalente oder Verwendungen einzuschränken.

[0047] Verfahren, Techniken, Vorrichtungen und Materialien, wie sie dem Fachmann bekannt sind, brauchen nicht im Detail diskutiert werden, sind aber, wo geeignet, als Teil der erläuternden Beschreibung gedacht. Zum Beispiel werden einige Beispiele der Photonenkristallausbildung diskutiert, Äquivalente und andere Photonenkristallkonfigurationen und verwendete Materialien, wie sie dem Fachmann bekannt sind, sollen im Umfang mindestens einiger Ausführungsbeispiele eingeschlossen werden.

[0048] Außerdem braucht die tatsächliche Größe der Strukturen nicht diskutiert zu werden, jedoch sollen Photonenkristallstrukturen jeder Größe von Makrometer (Zentimeter bis Meter) bis Nanometer und kleiner im Umfang von Ausführungsbeispielen liegen (z.B. photonischen Strukturen mit charakteristischen Größen von individuellen Molekülen, Nanometer-, Mikro-, Zentimeter- und Metergrößen).

[0049] Außerdem sind Ausführungsbeispiele nicht auf visuelle optische Systeme eingeschränkt; Photonenkristallstrukturen können zur Verwendung mit Infrarotsystemen oder Systemen anderer Wellenlänge konstruiert sein. Zum Beispiel ein Infrarotlichtdetektor (z.B. ein Detektor, der Infrarot-Markierungen misst).

[0050] [Fig. 1](#), [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) sind eine schematische Ansicht, eine Seitenansicht bzw. eine Draufsicht eines 3D-Photonenkristalls **10A** gemäß einem Ausführungsbeispiel. Diese Figuren zeigen nur einen Teil der periodischen Struktur, die eine sich wiederholende periodische Struktur in den x-, y- und z-Achsenrichtungen haben kann. Unten beschriebene schematische Ansichten können ähnliche Periodizität besitzen.

[0051] Wie in [Fig. 1](#) dargestellt wird, kann ein 3D-Photonenkristall **10A** vier sich kreuzende Stäbe (**101a**, **101b**, **101c** und **101d**) beinhalten, und diskrete Strukturen **102a** mit einem horizontalen Querschnitt (z.B. quadratisch) zwischen den Stäben. In der Struktur des 3D-Photonenkristalls A können die Stäbe verschiedene Abmessungen haben (z.B. eine Breite von $0,25355a$, eine Dicke von $0,25355a$, wobei "a" die Gitterkonstante bezeichnet), und die diskreten Strukturen können ebenso verschiedene Abmessungen haben (z.B. eine Dicke von $0,10a$ und eine Breite von $0,50a$). Die photonische Bandlücke kann berechnet werden (z.B. durch eine Ebenen-Wellen-Entwicklung), um die photonische Bandstruktur, wie in [Fig. 4](#) gezeigt, zu erhalten. Die horizontale Achse stellt den Wellenzahlvektor dar, das heißt die Einfallrichtung der in den Photonenkristall eintretenden elektromagnetischen Welle. Zum Beispiel zeigt ein K-Punkt einen Wellenzahlvektor parallel zur x-Achse (oder y-Achse) an. Ein X-Punkt zeigt einen Wellenzahlvektor in der xy-Ebene bei einer Neigung von 45° gegenüber der x-Achse (oder y-Achse) an. Andererseits stellt die vertikale Achse die durch die Gitterkonstante normierte Frequenz dar. In einem durch Schraffur angezeigten normierten Frequenzband ist eine photonische Bandlücke (PBL) ausgebildet, wo kein Licht aus jeglicher Einfallrichtung vorhanden sein kann.

[0052] In mindestens einem Ausführungsbeispiel kann die Breite (z.B. **101WX** und **101WY**; [Fig. 1](#)) der diskreten Struktur **102a** verändert werden, während die Breite und die Dicke des Stabes, die Gitterkonstante, die Dicke und der Brechungsindex der diskreten Struktur im Wesentlichen konstant gehalten werden. In anderen Ausführungsbeispielen kann mindestens einer der anderen Faktoren zusätzlich oder alternativ geändert werden (z.B. die Breite und die Dicke des Stabes, die Gitterkonstante, die Dicke und der Brechungsindex der diskreten Struktur). Das Ändern der Breiten **102WX** und **102WY** kann den Füllfaktor eines dielektrischen Mediums ändern, das eine dreidimensionale Struktur in einer periodischen Struktureinheit bildet. Dies kann wiederum den effektiven Brechungsindex des gesamten 3D-Photonenkristalls und auch die photonische Bandlücke ändern. Auf diese Weise kann in mindestens einem Ausführungsbeispiel die photonische Bandlücke durch Ändern der Breite (z.B. **102WX** und **102WY**) der diskreten Struktur **102a** gesteuert werden. Diese Situation wird unter Bezug auf das in [Fig. 5](#) dargestellte photonische Bandschema beschrieben.

[0053] Die Bandstruktur eines 3D-Photonenkristalls A1 wird durch die durchgehende Linie angezeigt, während die Bandstruktur eines 3D-Photonenkristalls A2 durch die gepunktete Linie angezeigt wird. Die durch die jeweiligen Strukturen erzeugten photonischen Bandlücken werden durch PBL1 und PBL2 angezeigt. Der Photonenkristall A1 und der Photonenkristall A2 unterscheiden sich nur in der diskreten Struktur. Wenn die Querschnittsfläche der diskreten Struktur in der xy-Ebene durch das Produkt der Breite in x-Achsenrichtung (z.B. **102WX**) und der Breite in y-Achsenrichtung (z.B. **102WY**) der diskreten Struktur ausgedrückt wird, ist die Querschnittsfläche der diskreten Struktur im Photonenkristall A2 kleiner als die im Photonenkristall A1. Eine kleinere Querschnittsfläche der diskreten Struktur in der xy-Ebene führt zu einem kleineren effektiven Brechungsindex des 3D-Photonenkristalls, was die Frequenz verschiebt, bei der die photonische Bandlücke bei einer höheren Frequenz arbeiten kann. Auf diese Weise kann das Wellenlängenband der photonischen Bandlücke durch Ändern der Breite der diskreten Strukturen gesteuert werden.

[0054] Darüber hinaus können die diskreten Strukturen verschiedene Größen oder Gestalten haben und in mehreren Bereichen (z.B. [Fig. 12A](#) und [Fig. 12B](#)) angeordnet sein. Dies erleichtert die Steuerung des Wellenlängenbandes der photonischen Bandlücke, ohne dass die Gitterkonstante geändert werden muss, was das Herstellen des Photonenkristalls gemäß Ausführungsbeispielen erleichtert.

[0055] Während Ausführungsbeispiele des in [Fig. 1](#) dargestellten 3D-Photonenkristalls **10A** nur eine Diskretstruktur enthaltende Schicht beinhaltet, können weitere Ausführungsbeispiele mehrere Schichten diskreter Strukturen aufweisen (z.B. [Fig. 7A](#) bis [Fig. 7E](#)). Obwohl der 3D-Photonenkristall **10A** vier oder mehr Diskretstruktur enthaltende Schichten aufweisen kann, kann das Herstellungsverfahren komplizierter werden, wenn die Anzahl der Schichten ansteigt. Daher hängt die Anzahl der Diskretstruktur enthaltenden Schichten von der Anwendung ab. Darüber hinaus ist der Querschnitt der Diskretstruktur (z.B. **102a**) in der xy-Ebene nicht auf quadratisch beschränkt, sondern kann jede Gestalt besitzen (z.B. rechteckig, kreisförmig, elliptisch, dreieckig und polygonal, wie in [Fig. 6A](#) bis [Fig. 6E](#) gezeigt. Außerdem kann der gleiche Effekt erzielt werden durch Anordnen der Diskretstruktur enthaltenden Schicht auf nur einer Seite, wie in [Fig. 7E](#) gezeigt. In diesem Fall kann die Anzahl der Diskretstruktur enthaltenden Schichten auch eins, zwei, drei oder mehr sein. Obwohl die Querschnittsansichten in den Z-X- und Z-Y-Ebenen rechtwinklige Strukturen für die diskreten Strukturen zeigen, können die Querschnitte (z.B. **82** und **84** in [Fig. 8A](#)) verschiedene Gestalten haben (z.B. trapezartig, Pyrami-

denstumpf, kegelstumpffartig). Numerische Beispiele, die zwei oder drei Diskretstruktur enthaltende Schichten beinhalten, werden nachstehend spezieller beschrieben.

[0056] [Fig. 8A](#) ist eine schematische Ansicht eines 3D-Photonenkristalls **10B** gemäß einem zusätzlichen Ausführungsbeispiel. Der 3D-Photonenkristall **10B** weist eine Struktur auf, die zwei Diskretstruktur enthaltende Schichten (z.B. **82** und **84**) aufweist. Abmessungen und Eigenschaften der verschiedenen Elemente (z.B. **80**, **82**, **84**, **86**) des Photonenkristalls **10B** können variieren; in diesem besonderen Beispiel sind die Brechungsindizes des Stabes und der diskreten Struktur **2,5**, die Gitterkonstante ist 250 nm, die Breite des Stabes ist 62,5 nm (z.B. **86WY**), und die Dicke des Stabes ist 75 nm (z.B. **86TZ**). Im 3D-Photonenkristall **10B** ist die Breite der ersten diskreten Struktur **84** in der x-Achsenrichtung (senkrecht zur Seite) gleich der Breite **82WY** einer zweiten diskreten Struktur **82** in der y-Achsenrichtung. Die Breite **84WY** der ersten diskreten Struktur **84** in der y-Achsenrichtung ist gleich der Breite der zweiten diskreten Struktur **82** in der x-Achsenrichtung.

[0057] In der in [Fig. 8B](#) gezeigten graphischen Darstellung repräsentiert die horizontale Achse die Breite **82WY** der zweiten diskreten Struktur **82** und die vertikale Achse die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke (PBL). Die durchgehenden, gestrichelten und gepunkteten drei Linien entsprechen der Breite **84WY** der ersten diskreten Y-Struktur **84** von 75 nm bzw. 125 nm bzw. 175 nm. Die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke verschiebt sich zu längeren Wellenlängen hin mit zunehmender Breite **82WY** der zweiten diskreten Struktur **82**. Variationen in der Breite der diskreten Struktur ändern den Füllfaktor (Volumen) eines dielektrischen Mediums pro Volumeneinheit. Ein größerer Füllfaktor kann den effektiven Brechungsindex des 3D-Photonenkristalls erhöhen, was die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke zu längeren Wellenlängen hin verschiebt. Auf diese Weise kann eine Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke durch geeignetes Design der Breite der diskreten Struktur bestimmt werden. Die erste diskrete Struktur **84** oder die zweite diskrete Struktur **82** können beliebig groß sein.

[0058] [Fig. 9A](#) bis [Fig. 9C](#) zeigen schematische Ansichten eines 3D-Photonenkristalls **10C** mit drei Diskretstruktur (**102b**) enthaltenden Schichten (**100**, **104**, **106**). Der 3D-Photonenkristall **10C** kann mindestens drei Diskretstruktur enthaltende Schichten aufweisen. Der 3D-Photonenkristall **10C** kann verschiedene Abmessungen haben, das dargestellte spezielle Beispiel ([Fig. 9A](#) bis [Fig. 9C](#); [Fig. 10](#)) hat jedoch die folgenden Abmessungen: die Breite **101eWY** des Stabes **101e** ist 0,174a; die Dicke **101eTZ** des Stabes **101e** ist 0,174a; die Breite **106WX** einer ersten diskreten Struktur **106** ist 0,187a; die Breite **106WYv** der ersten diskreten Struktur **106** ist 0,400a; die Dicke **106TZ** der ersten diskreten Struktur **106** ist ungefähr 0,040a; die Breite **104WX** einer zweiten diskreten Struktur **104** die Breite **104WY** der zweiten diskreten Struktur **104** von 0,200a; die Dicke **104TZ** der zweiten diskreten Struktur **104** ist 0,040a; die Breite **100WX** einer dritten diskreten Struktur **100** ist 0,400a; die Breite **100WY** der dritten diskreten Struktur **100** ist 0,187a; und die Dicke **100TZ** der dritten diskreten Struktur **100** ist 0,040a, wobei die Brechungsindizes der Stäbe (z.B. **101e**) und der diskreten Strukturen (z.B. **100**, **104** und **106**) 2,5 betragen und "a" die Gitterkonstante bezeichnet. Die Querschnitte der ersten diskreten Struktur **106** und der dritten diskreten Struktur **100** in der xy-Ebene können rechtwinklig sein, und der Querschnitt der zweiten diskreten Struktur **104** in der xy-Ebene kann quadratisch sein ([Fig. 10](#)).

[0059] Der 3D-Photonenkristall **10C** kann die folgende mathematische Beziehung erfüllen:

$$106WX = 100WY = [(Gitterkonstante) - 104WX]/2; \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$106XY = 100WX = (104WX + 101eWY)/2; \quad (\text{Gleichung 2})$$

$$106TZ = 104TZ = 100TZ; \quad \text{und (Gleichung 3)}$$

$$101eTZ = \sqrt{2a/4} - [(106TZ) + (104TZ) + (100TZ)]. \quad (\text{Gleichung 4})$$

[0060] [Fig. 11](#) zeigt die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke als Funktion der Breite **104WX** der zweiten diskreten Struktur **104**, wenn die Gitterkonstante "a" 720 nm beträgt. Die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke kann zwischen 1400 nm und 1670 nm eingestellt werden durch Ändern der diskreten Struktur **102b**. Der Füllfaktor des dielektrischen Mediums pro Volumeneinheit kann mit zunehmender Breite **104WX** der zweiten diskreten Struktur **104** zunehmen. Dies vergrößert auch den effektiven Brechungsindex der dreidimensionalen periodischen Struktur, was die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke zu längeren Wellenlängen hin verschiebt ([Fig. 11](#)). Die photonische Bandlücke hängt ab von der Differenz pro Volumeneinheit zwischen dem elektrischen Feldstärkeanteil (fraction of the electric field strength), der konzentriert ist in dem den Stab und die diskrete Struktur in der zusätzlichen Schicht bildenden Medium, und dem elektrischen Feldstärkeanteil, der in dem anderen Medium konzentriert ist. Wenn diese Differenz größer wird, wird

die photonische Bandlücke breiter. Drei Diskretstruktur enthaltende Schichten vergrößern die Differenz in den elektrischen Feldstärkeanteilen, die in den Medien insbesondere in schräger Richtung (z.B. einer L-Richtung in [Fig. 4](#)) konzentriert sind, was zu einer breiteren photonischen Bandlücke führt.

[0061] In diesem Beispiel kann die photonische Bandlücke unter Verwendung der Breite **104WX** der zweiten diskreten Struktur **104** als Parameter gesteuert werden, und die photonische Bandlücke kann gesteuert werden unter Verwendung der Breite **106WX** der ersten diskreten Struktur **106** oder der Breite **100WX** der dritten diskreten Struktur **100** als Parameter.

[0062] Außerdem können, während in den 3D-Photonenkristallen **10A**, **10B** und **10C** rechtwinklige Stäbe **101** gezeigt sind, auch Prismen, Zylinder, elliptische Zylinder, polygonale Säulen, und andere Formen und Materialien, wie sie dem Fachmann bekannt sind, und Äquivalente verwendet werden. Wie in **Fig. 6A** bis **6E** gezeigt, können, während rechtwinklige Parallelepipede als die diskreten Strukturen **102b** verwendet werden, die Querschnitte der diskreten Strukturen **102a** und **102b** in der xy-Ebene jede Gestalt besitzen einschließlich rechtwinklig, kreisförmig, elliptisch, dreieckig und polygonal.

[0063] Außerdem kann, während die Stäbe **101a–e** im Wesentlichen orthogonal in der x- und in der y-Achsenrichtung angeordnet sind, der Winkel zwischen der x- und der y-Achse auch jeder von 90° verschiedene sein. Außerdem können die Abstände zwischen den zur x-Achse parallelen Stäben verschieden sein von den Abständen zwischen den zur y-Achse parallelen Stäben. Solche Variationen können das Design der Photonkristalle erleichtern zur Verbesserung der Performance (z.B. Reflexion, Transmission) gegenüber von bei einem vorbestimmten Winkel eintretenden Licht und/oder zum Erhalten einer anisotropen Struktur. Während die Stäbe **101a–e** und die diskreten Strukturen **102a–b** aus dem gleichen Medium gemacht sein können, können sie auch aus verschiedenen Medien gemacht sein.

[0064] Die Stäbe (z.B. **101a–e**) gemäß dem vorliegenden Beispiel (z.B. [Fig. 1](#) und [Fig. 9A](#) bis [Fig. 9C](#)) sind in einem vorbestimmten Intervall mit Gitterkonstante "a" angeordnet. Außerdem sind die Stäbe **101a** um 0,5a ("a" bezeichnet die Gitterkonstante) in x-Achsenrichtung verschoben bezüglich der Stäbe **101c** angeordnet. In der gleichen Art und Weise sind die Stäbe **101b** um 0,5a in y-Achsenrichtung verschoben bezüglich der Stäbe **101d** angeordnet. In einer solchen Konfiguration entsprechen die rechtwinkligen Parallelepipede zwischen den Stäben den Gitterpositionen in einem Diamantgitter. Auf diese Weise kann eine breite photonische Bandlücke erhalten werden. Das Ausmaß der horizontalen (x- und y-Richtung) Verschiebung der Stäbe kann im Bereich von 0,25a bis 0,75a, oder im Bereich von 0,3a bis 0,7a, oder im Bereich von 0,4a bis 0,6a liegen. Jedoch in mindestens einem Ausführungsbeispiel können die Stäbe **101a–d** vertikal (in z-Richtung) überlappen.

[0065] Da die photonische Bandlücke aus der Brechungsindexverteilung im Kristall herrührt, kann eine Kombination von Medien mit einem größeren Brechungsindexverhältnis eine breitere photonische Bandlücke erzeugen. Die Stäbe (z.B. **101a–e**) und die diskreten Strukturen (z.B. **102a–b**) bildenden Medien können verschiedene Brechungsindizes besitzen, zum Beispiel kann man ein Material mit hohem Brechungsindex verwenden (z.B. Si, GaAs, InP, Ge, TiO₂, GaN, Ta₂O₅, Nb₂O₅). Darüber hinaus kann das die Stäbe (z.B. **101a–e**) und die diskreten Strukturen (z.B. **102a–b**) bildende Medium ein transparentes Material sein ohne Absorption im Arbeitswellenlängenband der photonischen Bandlücke. Das andere Medium als das die Stäbe (z.B. **101a–e**) und die diskreten Strukturen (z.B. **102a–b**) bildende kann ein dielektrisches Material (z.B. SiO₂), ein hochmolekulares organisches Material (z.B. PMMA), oder ein Material mit niedrigem Brechungsindex (z.B. Luft oder Wasser) sein.

[0066] In Hinblick auf das Verfahren zur Herstellung des 3D-Photonenkristalls kann das andere Medium als das die Stäbe (z.B. **101a–e**) und die diskreten Strukturen (z.B. **102a–b**) bildende fest sein. Das feste Medium kann die Festigkeit der dreidimensionalen Struktur während der Bearbeitung (z.B. Beispiel Masken-Mustererzeugung (mask patterning), Ätzen, Polieren oder Waferfusion) der Stäbe (z.B. **101a–e**) und diskreten Strukturen (z.B. **102a–b**) erhöhen und dadurch das Ausbilden einer gewünschten Gestalt bei der dreidimensionalen Struktur erleichtern.

[0067] In den 3D-Photonenkristallen **10A**, **10B** und **10C** gemäß den Ausführungsbeispielen kann die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke ungeachtet der Anzahl Diskretstruktur enthaltender Schichten gesteuert werden, während eine Gitterkonstante in der xz-Ebene und eine Gitterkonstante in der xy-Ebene konstant gehalten werden können (z.B. [Fig. 12A](#) und [Fig. 12B](#)). Trotzdem kann in anderen Ausführungsbeispielen die Gitterkonstante in diesen Ebenen variieren, während andere konstant sind. Da Ausführungsbeispiele eine konstante Gitterkonstante aufweisen können, kann ein herkömmliches Herstellungsverfahren (z.B. Mustererzeugung einer Reihe von Strukturen unter Verwendung von Elektronenstrahl-Lithographie und Beschichtung,

einer Waferfusionstechnik oder eines Nanoimprintverfahrens) verwendet werden. Zusätzlich kann ein einziges Herstellungsverfahren/-vorgang verwendet werden zum Erzeugen einer bei mehreren Designwellenlängen arbeitenden Struktur. Dies erleichtert die Ausrichtung der Elemente und die Produktivität.

Beispiel 2

[0068] [Fig. 13](#) zeigt eine schematische Ansicht eines 3D-Photonenkristalls **10D** gemäß mindestens einem Ausführungsbeispiel. Im 3D-Photonenkristall **10D** kann ein die diskreten Strukturen (**202a** und **202b**) bildendes Medium einen Brechungsindex besitzen, der sich von dem eines Stäbe (**201a**, **201b**, **201c** und **201d**) bildenden Mediums unterscheidet.

[0069] [Fig. 14](#) zeigt die Änderung in der Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke als Funktion des Brechungsindex des die diskreten Strukturen (z.B. **202a–b**) bildenden Mediums, während die Gestalten und Größen der den 3D-Photonenkristall **10D** bildenden diskreten Strukturen oder Stäbe konstant gehalten werden. Die horizontale Achse repräsentiert den Brechungsindex des die diskreten Strukturen (z.B. **202a–b**) bildenden Mediums. Die vertikale Achse repräsentiert die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke, normiert durch die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke falls die Stäbe den gleichen Brechungsindex wie die diskreten Strukturen aufweisen.

[0070] In dem durch Beispiel 2 illustrierten Ausführungsbeispiel sind die mittels der Gitterkonstante "a" ausgedrückten strukturellen Parameter wie folgt: die Breite des Stabes (z.B. **201dWY**) ist ungefähr 0,31a; die Dicke des Stabes (z.B. **201dTZ**) ist ungefähr 0,173553a; die Dicke einer ersten diskreten Struktur (z.B. **202bTZ**) ist ungefähr 0,09a; die Breite der ersten diskreten Struktur in x-Richtung (z.B. **202bWX**) ist ungefähr 0,37a; und die Breite der ersten diskreten Struktur in y-Richtung (z.B. **202bWY**) ist ungefähr 0,66a. In Beispiel 2 ist die Dicke der ersten diskreten Struktur **202bTZ** gleich der Dicke der zweiten diskreten Struktur **202aTZ**, die Breite der ersten diskreten Struktur **202bWX** ist gleich der Breite der zweiten diskreten Struktur **202aWY**, und die Breite der ersten diskreten Struktur **202bWY** ist gleich der Breite der zweiten diskreten Struktur **202aWX**.

[0071] Der effektive Brechungsindex des 3D-Photonenkristalls ändert sich, wenn sich der Brechungsindex des die diskreten Strukturen und/oder die Stäbe bildenden Mediums ändert. Auf diese Weise kann, wie in [Fig. 14](#) gezeigt, die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke durch Ändern des Brechungsindex-Parameters des die diskrete Struktur (z.B. **202a–b**) bildenden Mediums gesteuert werden.

[0072] Zusätzlich kann die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke gesteuert werden durch eine Parameterkombination des Brechungsindex des die diskrete Struktur bildenden Mediums und der Gestalt oder der Größe der diskreten Strukturen. [Fig. 15](#) zeigt die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke als Funktion eines Kombinationsparameters des Brechungsindex und der Gestalt der ersten diskreten Struktur (z.B. **202b**). Die vertikale Achse repräsentiert die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke und die horizontale Achse die Breite (z.B. **202bWX**) einer ersten diskreten Struktur. In diesem besonderen, nicht einschränkenden Beispiel kann das den Stab (z.B. **201d**) bildende Material einen Brechungsindex von 2,33 aufweisen. Das die diskrete Struktur bildende Medium kann einen Brechungsindex von 2,0 (3D-Photonenkristall E) oder 3,0 (3D-Photonenkristall F) aufweisen. Vertikale Balken **15V** bezeichnen das Ausmaß der photonischen Bandlücke. Strukturelle Parameter sind unter Verwendung der Gitterkonstante "a" ausgedrückt und sind wie folgt: die Gitterkonstante ist ungefähr $a = 680 \text{ nm}$; die Breite des Stabs (z.B. **201dWY**) ist ungefähr 0,31a; die Dicke des Stabes (z.B. **201dTZ**) ist ungefähr 0,173553a; die Dicke der ersten diskreten Struktur (z.B. **202bTZ**) ist ungefähr 0,10a; und die Breite der ersten diskreten Struktur in y-Richtung (z.B. **202bWY**) ist ungefähr 0,66a. In diesem besonderen Beispiel mindestens einem Ausführungsbeispiel ist die Dicke der ersten diskreten Struktur (z.B. **202bTZ**) gleich der Dicke der zweiten diskreten Struktur (z.B. **202aTZ**), die Breite der ersten diskreten Struktur in x-Richtung (z.B. **202bWX**) ist gleich der Breite der zweiten diskreten Struktur in y-Richtung (z.B. **202aWY**), und die Breite der ersten diskreten Struktur in y-Richtung (z.B. **202bWY**) ist gleich der Breite der zweiten diskreten Struktur in x-Richtung (z.B. **202aWX**).

[0073] Wie in [Fig. 15](#) gezeigt, kann die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke über ein breiteres Wellenlängenband gesteuert werden durch Kombinieren der Parameter Größe und Brechungsindex der diskreten Strukturen. In diesem Beispiel kann die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke über ein Infrarot-Wellenlängenband von 1330 nm bis 1550 nm gesteuert werden. Unter Verwendung eines größeren Brechungsindex des die diskrete Struktur bildenden Mediums und eines größeren Querschnitts in der xy-Ebene kann der effektive Brechungsindex des 3D-Photonenkristalls vergrößert werden, was die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke zu längeren Wellenlängen hin verschiebt.

[0074] Wie in Beispiel 1 werden 3D-Photonenkristalle G, H und I (z.B. mit Strukturen G, H und I) als Beispiele des 3D-Photonenkristalls beschrieben, der mindestens zwei Bereiche mit verschiedenen diskreten Strukturen enthält. Tabelle 1 zeigt einige der Parameter der Strukturen der 3D-Photonenkristalle G, H und I. Sie können die folgenden Beziehungen erfüllen: die Dicke einer ersten der diskreten Struktur ist gleich der Dicke einer zweiten diskreten Struktur, die Breite in x-Richtung der ersten diskreten Struktur ist gleich der Breite in y-Richtung der zweiten diskreten Struktur, und die Breite in y-Richtung der ersten diskreten Struktur ist gleich der Breite in x-Richtung der zweiten diskreten Struktur.

Tabelle 1

	Brechungsindex der Stäbe	Brechungsindex der diskreten Strukturen	Gitterkonstante	Breite der Stäbe	Dicke der Stäbe	Dicke der diskreten Strukturen	Breite der diskreten Strukturen
Struktur G	2,33	2,00	$a = 230 \text{ nm}$	$0,31 a$	$0,173553a$	$0,10a$	$0,66a$
Struktur H	2,33	3,00	$a = 230 \text{ nm}$	$0,31 a$	$0,173553a$	$0,10a$	$0,66a$
Struktur I	2,33	3,00	$a = 230 \text{ nm}$	$0,31 a$	$0,173553a$	$0,10a$	$0,90a$

[0075] [Fig. 16](#) zeigt die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke und das Ausmaß der photonischen Bandlücke in den 3D-Photonenkristallen G, H und I. Die vertikale Achse repräsentiert die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke und die horizontale Achse die Breite der ersten diskreten Struktur in x-Richtung. Vertikale Balken bezeichnen das Ausmaß der photonischen Bandlücke. Die Mittenwellenlängen der photonischen Bandlücke der 3D-Photonenkristalle G, H und I können in der Nähe von 450 nm, 530 nm und 630 nm gesteuert werden durch Einstellen der Breiten der ersten diskreten Strukturen (z.B. in x-Richtung) auf $0,31a$ bzw. $0,45a$ bzw. $0,58a$.

[0076] Die Herstellung diskreter Strukturen mit mehreren Bereichen mit unterschiedlichen Brechungsindizes kann die Bereiche individuell durch ein Halbleiterverfahren maskieren und die Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes für entsprechende diskrete Strukturen stapeln.

[0077] Während die Anzahl der Diskretstruktur enthaltenden Schichten in diesem besonderen Beispiel zwei ist, gibt es keine Grenze für die Anzahl der diskreten Schichten, die ein Ausführungsbeispiel aufweisen kann (z.B. drei). Zusätzlich kann der Effekt gemäß den Ausführungsbeispielen selbst dann erhalten werden, wenn der Brechungsindex des die diskrete Struktur bildenden Mediums oder die Gestalt oder die Größe der diskreten Struktur verschieden von den hierin beschriebenen ist. Gleichzeitige Steuerung der Gestalt und des Brechungsindex der diskreten Struktur kann den effektiven Brechungsindex des 3D-Photonenkristalls ändern. Auf diese Weise kann die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke und die photonische Bandlücke über einem breiteren Wellenlängenband gesteuert werden.

[0078] Ein bei mehreren Wellenlängen in einem breiten Wellenlängenband arbeitender Resonator kann ein Material mit einem hohen Brechungsindex und einem reduzierten Dämpfungskoeffizienten und eine Struktur des Photonenkristalls mit einer breiten photonischen Bandlücke verwenden. Ausführungsbeispiele können einen 3D-Photonenkristall bereitstellen, in dem die photonische Bandlücke über einem breiten Wellenlängenband (z.B. einschließlich eines Wellenlängenbandes entsprechend den drei Grundfarben des Lichts, RGB) ohne Änderung der Gitterkonstante gesteuert werden kann.

Beispiel 3

[0079] [Fig. 17A](#) und [Fig. 17B](#) zeigen schematische Ansichten eines Punktdefektoresonators, der aus einem 3D-Photonenkristall hergestellt werden kann, der mehrere Bereiche einschließt, die diskrete Strukturen (z.B. **1700**, **1702**, **1704**) mit unterschiedlicher Gestalt beinhalten. Die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke kann durch Ändern der Gestalt der diskreten Strukturen gesteuert werden, während die Gitterkonstante in der xz-Ebene und die Gitterkonstante in der xy-Ebene konstant gehalten werden. Die Einführung eines Punktdefekts **302a** in den 3D-Photonenkristall kann eine Resonanzmode erzeugen. Licht mit einer der Resonanzmode entsprechenden Wellenlänge ist im Punktdefekt **302a** lokalisiert. Beispiele der Punktdefektstruktur beinhalten eine Struktur, in der ein Teil der periodischen Struktur entfernt ist und Luft in den Punktdefekt **302a** platziert ist, eine Struktur, in der ein Teil der periodischen Struktur in ihrer Gestalt geändert wurde (z.B. die diskrete

Struktur an einem gewissen Gitterpunkt ist in ihrer Gestalt geändert), und eine Struktur, in der ein Material mit verschiedenem Brechungsindex in einen Teil der periodischen Struktur platziert ist. Diese Strukturen können durch verschiedene dem Fachmann bekannte Verfahren bereitgestellt werden.

[0080] [Fig. 18](#) zeigt einen 3D-Photonenkristall **600** mit zwei Diskretstruktur enthaltenden Schichten (z.B. **605** und **607**). Der 3D-Photonenkristall **600** in diesem besonderen, nicht einschränkenden Beispiel hat die folgenden Abmessungen: die Breite des Stabes **602WY** ist ungefähr 0,25a; die Breite des Stabes **602TZ** ist ungefähr 0,30a; die Breite des ersten diskreten Struktur in x-Richtung ist ungefähr 0,400a; die Breite der ersten diskreten Struktur **605** in y-Richtung ist ungefähr 0,600a; die Dicke der ersten diskreten Struktur **605** in z-Richtung ist ungefähr 0,050a; die Breite der zweiten diskreten Struktur **607** in x-Richtung ist ungefähr 0,600a; die Breite der zweiten diskreten Struktur **607** in y-Richtung ist ungefähr 0,400a; und die Dicke der zweiten diskreten Struktur **607** in z-Richtung ist ungefähr 0,050a. Die Brechungsindizes der Stäbe (z.B. **602**) und der diskreten Strukturen (z.B. **605** und **607**) können verschieden sein, aber in diesem besonderen Beispiel sind sie 3,309, wobei "a" die Gitterkonstante bezeichnet. Der Punktdefekt **302a** ist ein rechtwinkliges Parallelepiped und hat die Abmessungen $\Delta x = \Delta y = 0,70a$ und $\Delta z = 0,30a$. Während die Gestalt des Punktdefekts **302a** in der xy-Ebene quadratisch ist ($\Delta x = \Delta y$), können Δx und Δy unterschiedlich sein (z.B. kreisförmig, elliptisch, dreieckig oder polygonal).

[0081] [Fig. 19](#) zeigt die Resonanzmode der in [Fig. 18](#) beschriebenen Struktur. Die horizontale Achse repräsentiert eine durch eine Gitterkonstante "a" normierte Frequenz. Eine der Resonanzmode entsprechende hohe Signalspitze erscheint bei einer normierten Frequenz von etwa 0,40. Variationen in der Größe der diskreten Struktur ändern die Resonanzfrequenz (d.h. Wellenlänge), ändern den Füllfaktor eines Materials im 3D-Photonenkristall und verschieben die photonische Bandlücke. Auf diese Weise kann die Resonanzwellenlänge gesteuert werden. Ein bei mehreren Wellenlängen arbeitender monolithischer optischer Resonator oder ein monolithischer Schmalbandpass-Lichtfilter kann durch Platzieren eines Punktdefekts in jeder der mehreren Bereichen gebildet werden, die verschiedene Diskretstruktur enthaltende Schichten enthalten. Ein Bereich kann mehrere Punktdefekte **302a** aufweisen.

[0082] [Fig. 20](#) zeigt eine schematische Ansicht eines Punktdefektoresonators aus einem 3D-Photonenkristall J1, der einen Punktdefekt **302b** aufweist und mehrere Bereiche, die diskrete Strukturen (z.B. **2001**, **2003** und **2005**) mit unterschiedlichem Brechungsindex enthalten. Da der 3D-Photonenkristall J1 die Bereiche mit verschiedenen effektiven Brechungsindizes einschließt, kann der Resonator bei verschiedenen Resonanzwellenlängen arbeiten. Der 3D-Photonenkristall J1 kann ebenso angewendet werden für einen Lichtfilter zum Erzeugen von Schmalbandspektren bei mehreren verschiedenen Wellenlängen.

[0083] [Fig. 21A](#) und [Fig. 21B](#) zeigen schematische Ansichten eines Liniendefekt-Wellenleiters aus einem 3D-Photonenkristall J2, der mehrere Bereiche beinhaltet, die diskrete Strukturen mit verschiedener Gestalt enthalten. Das Einbringen eines Liniendefekts **301** in eine feine periodische Struktur erzeugt eine Leitermode (guided mode) aufgrund des Liniendefekts **301**. Licht mit einer der Leitermode entsprechenden Wellenlänge wird durch den Liniendefekt geführt. Die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke wird durch Ändern der Gestalt der diskreten Struktur gesteuert, während die Gitterkonstante in der xz-Ebene und die Gitterkonstante in der xy-Ebene konstant gehalten werden. Beispiele der Liniendefektstruktur beinhalten eine Struktur, in der ein Teil der Stäbe entfernt wurden, eine Struktur, in der die Breite eines Stabes geändert wurde, eine Struktur, in der der Brechungsindex eines Stabmaterials geändert wurde, und eine Struktur, in der ein Stab hinzugefügt wurde. Diese Strukturen können durch verschiedene dem Fachmann bekannte Verfahren bereitgestellt werden. Ein monolithischer spektral selektiver optischer Wellenleiter oder eine monolithische optische Verzögerungsschaltung kann durch Verbinden mehrerer Strukturen gemäß Ausführungsbeispielen aufgebaut werden, mit oder ohne Ändern der Gitterkonstante.

[0084] [Fig. 22A](#) und [Fig. 22B](#) zeigen schematische Ansichten eines Liniendefekt-Wellenleiters aus einem 3D-Photonenkristall J3, der einen Liniendefekt **301b** und mehrere Bereiche aufweist, die diskrete Strukturen (z.B. **2201**, **2203** und **2205**) mit unterschiedlichem Brechungsindex enthalten. Ein spektral selektiver, Grenzflächenreflexion ausnutzender Wellenleiter kann bereitgestellt werden durch Steuern der Brechungsindizes der diskreten Strukturen in den mehreren Bereichen, um die Beziehung zwischen der gewünschten photonischen Bandlücke und der Leitermode zu erfüllen. Da die photonische Bandlücke von den Parametern des diskreten Strukturbereiches abhängt, wird Licht λ_1 mit einer Wellenlänge, die in einem Bereich **1**, aber nicht in einem Bereich **2** vorhanden ist, nahezu vollständig durch Bereich **2** reflektiert ([Fig. 22B](#)). Der Liniendefekt-Wellenleiter, der mehrere solche Strukturen in einer Ebene enthält, kann für eine Dispersions-Kompensations-Vorrichtung zum Kompensieren von Zeitverzögerung bei mehreren Wellenlängen angewendet werden.

[0085] Wie in [Fig. 23](#) und [Fig. 24A](#) gezeigt, kann eine Kombination eines Punktdefekts (z.B. **302C** und **302D**)

und eines Liniendefekts (z.B. **301C** und **301D**) eine optische Multiplex-/Demultiplex-Schaltung (optische Add-Drop Schaltung) bereitstellen, die das Besitzen einer erhöhten Wellenlängenselektivität und einer erhöhten Effizienz erleichtert. [Fig. 24A](#) zeigt eine schematische Ansicht eines optischen Multiplexers/Demultiplexers aus einem 3D-Photonenkristall J5, der einen Liniendefekt **301D** und einen Punktdefekt **302D** enthält und mehrere Bereiche aufweist, die diskrete Strukturen (z.B. **2401**, **2403** und **2405**) mit unterschiedlichem Brechungsindex enthalten. Die kombinierte Struktur eines optischen Wellenleiters und eines Resonators erleichtert die Verwendung eines optischen Multiplexers/Demultiplexers, insbesondere in einem optischen Kommunikationsband. Eine graphische Darstellung in [Fig. 24B](#) zeigt die Intensität von in den Liniendefekt-Wellenleiter eintretendem Licht, wobei das Licht bei Wellenlängen λ_1 , λ_2 , λ_3 ,... und λ_n in einem Punktdefektoresonator in jedem Bereich resonant schwingt. Die Resonanzwellenlängen der Punktdefekte sind in einem Wellenlängenband beinhaltet, bei dem Licht durch den Liniendefekt-Wellenleiter propagiert. Auf diese Weise kann optisches Multiplex/Demultiplex bei den n Wellenlängen ausgeführt werden.

[0086] Ein 3D-Photonenkristall gemäß Ausführungsbeispielen kann einen Licht einfangenden Effekt im Resonator unterstützen, was Polarisationssteuerung oder Strahlungsverteilung-Steuerung durch eine verbesserte Resonatormodenverteilung-Steuerung erleichtert. Da zusätzlich der Resonator in drei Dimensionen positioniert werden kann, können Ausführungsbeispiele einen gesteigerten Grad an Flexibilität in der Strahlextraktionsrichtung aufweisen. Dies erleichtert den Betrieb in einem engen Spektralbereich und kann einen optischen Multiplexer/Demultiplexer mit vergrößerter Performance mit einem gesteigerten Grad an Flexibilität in der Strahlextraktionsrichtung bereitstellen.

[0087] Die Größe und der Brechungsindex der diskreten Struktur können als Variable kombiniert werden, um die Mittenwellenlänge der photonischen Bandlücke zu steuern. Zum Beispiel können geeignete Punktdefekte in den 3D-Photonenkristallen G, H und I, die verschiedene diskrete Strukturen in drei verschiedenen Bereichen aufweisen, eine bei entsprechend verschiedenen Wellenlängen arbeitende Resonatorstruktur bereitstellen. Wie in [Fig. 25](#) gezeigt, kann eine Resonatorstruktur mit scharfen spektralen Signalspitzen um 450 nm, 530 nm und 630 nm aufgebaut werden durch Bereitstellen einer Punktdefekt-Resonatorstruktur, die Resonanzwellenlängen innerhalb der photonischen Bandlücken der 3D-Photonenkristalle G, H und I aufweist.

Beispiel 4

[0088] Das vorliegende Beispiel von mindestens einem Ausführungsbeispiel bezieht sich auf eine Licht emittierende Vorrichtung, in der ein lumineszentes Material enthaltender Punktdefekt in einen 3D-Photonenkristall eingebracht ist, der mehrere Bereiche aufweist, die diskrete Strukturen mit unterschiedlicher Gestalt und/oder Brechungsindex enthalten. Wie oben beschrieben, erzeugt das Einbringen eines Punktdefekts in den 3D-Photonenkristall eine Resonanzmode aufgrund des Punktdefekts. Licht mit einer der Resonanzmode entsprechenden Wellenlänge ist im Punktdefekt lokalisiert. Auf diese Weise ruft das Einbringen eines lumineszenten Materials mit einer der Resonanzmode entsprechenden Wellenlänge als Punktdefekt starke Emission von Licht hervor mit einer engen spektralen Breite bei der Resonanzwellenlänge, was eine effizientere Licht emittierende Vorrichtung bereitstellt, die das Verhalten von Licht in drei Dimensionen steuert. Beispiele des lumineszenten Materials beinhalten einen Verbindungshalbleiter, ein anorganisches lumineszentes Material, ein organisches lumineszentes Material, ein hochmolekulares lumineszentes Material, einen Quantenpunkt, einen Nanokristall, andere dem Fachmann bekannte lumineszente Materialien, und Äquivalente. Beispiele eines Anregungsverfahrens beinhalten Photoanregung durch eine externe Lichtquelle, Anregung durch Strominjektion (current injection), andere dem Fachmann bekannte Anregungsverfahren, und Äquivalente. Bei der Anregung durch Strominjektion ist es zum Beispiel möglich, ein metallisches Material (z.B. Al oder Cr) oder eine transparente leitfähige Schicht (z.B. ITO) als eine Elektrode sandwichartig anzuordnen und das metallische Material zur Lichtemission zu bringen. Darüber hinaus kann eine Elektrode, die unabhängig von mehreren Resonatorstrukturen arbeitet, die unabhängige Steuerung von Licht mit entsprechenden Wellenlängen erleichtern.

[0089] [Fig. 26](#) zeigt ein mögliches Verwendungsbeispiel eines anorganischen lumineszenten Materials. Eine lumineszente Schicht **400** aus einem anorganischen lumineszenten Material ist sandwichartig zwischen Isolatoren **401a** und **401b** abgeordnet, die jeweils Elektroden **402a** und **402b** auf einander abgewandten Seiten aufweisen. Wenn eine solche leuchtende Komponente in einem Punktdefektoresonator bereitgestellt wird, kann Licht mit einer von der Struktur des Punktdefektoresonators abhängigen Wellenlänge zur Resonanz gebracht und extrahiert werden. Die Elektroden können aus einem transparenten Material hergestellt sein oder ebenso aus einem Metall (z.B. Al, Au und Cr oder jedes andere dem Fachmann bekannte Elektrodenmaterial, und Äquivalente). Beispiele des anorganischen lumineszenten Materials beinhalten ZnS:Mn, ZnMgS:Mn, ZnS:Sm, ZnS:Tb, ZnS:Tm, CaS:Eu, SrS:Ce, SrS:Cu, SrGa₂S₄:Ce, BaAl₂S₄:Eu oder jedes andere dem Fachmann bekannte anorganische lumineszente Material, und Äquivalente. Beispiele des Isolators beinhalten SiO₂, SiN,

Al_2O_3 , Ta_2O_5 , SrTiO_3 oder jedes andere dem Fachmann bekannte Isolatormaterial, und Äquivalente.

[0090] In Ausführungsbeispielen kann das lumineszente Material auch ein organisches lumineszentes Material sein. [Fig. 27](#) zeigt ein Ausführungsbeispiel, das eine das organische lumineszente Material enthaltende lumineszente Struktur verwendet. Eine das organische lumineszente Material enthaltende lumineszente Schicht **403** ist sandwichartig zwischen einer Elektronentransportschicht **404** und einer Lochtransportschicht **405** angeordnet, die beide auf jeweils einander abgewandten Seiten Elektroden **406a** und **406b** aufweisen. Die lumineszente Struktur **403** emittiert Licht mit einer vom lumineszenten Material abhängigen Wellenlänge. Zusätzlich können verschiedene Strukturen bereitgestellt werden, die zum Beispiel eine Elektronen- oder eine Lochinjektionsschicht enthalten. Die transparente Elektrode kann in diesem speziellen nicht einschränkenden Beispiel aus ITO hergestellt sein. Eine Rück-Elektrode kann in diesem speziellen nicht einschränkenden Beispiel hergestellt sein aus ITO oder einem opaken Material (z.B. Al oder Cr).

[0091] Typische Beispiele eines niedermolekularen organischen lumineszenten Materials beinhalten Alq, $\text{Eu}(\text{DEM})_3(\text{Phen})$, BeBq und DPVBi. Typische Beispiele eines niedermolekularen Materials für den Lochtransport beinhalten TPD, α -NPD, TPT und Spiro-TPD. Typische Beispiele eines niedermolekularen Materials für den Elektronentransport beinhalten PBD, TAZ, OXD und Bphen. Ein typisches hochmolekulares organisches lumineszentes Material kann ein elektrisch leitfähiges Polymer sein, das eine mit einer Säure (z.B. Polystyrol-sulfonsäure oder Kampfersulfonsäure) dotierte lumineszente Polythiophen- oder Polyanilin-Schicht enthält. Die oben und unten aufgeführten Materialien sind nur Beispiele von Materialien, die in Ausführungsbeispielen verwendet werden können, andere dem Fachmann bekannte Materialien und Äquivalente können ebenso in Ausführungsbeispielen verwendet werden.

[0092] Zusätzlich zu den in [Fig. 26](#) und [Fig. 27](#) gezeigten Beispielen kann mindestens ein Ausführungsbeispiel Licht mit einer besonderen Wellenlänge zur Resonanz bringen und extrahieren. Ein Beispiel für dieses besondere Ausführungsbeispiel kann eine lumineszente Struktur beinhalten (z.B. vom Strominjektionstyp), die bereitgestellt ist in einer Punktdefektoresonatorstruktur, die ein lumineszentes Material beinhaltet (z.B. ein Material, das einen Verbindungshalbleiter, ein anorganisches lumineszentes Material, ein organisches lumineszentes Material, ein hochmolekulares lumineszentes Material, einen Quantenpunkt oder einen Nanokristall enthält).

[0093] [Fig. 28A](#) und [Fig. 28B](#) zeigen Beispiele, die eine transparente leitfähige Elektrode (z.B. ITO) als die Strominjektionselektrode verwenden. Die Verwendung der transparenten Elektrode als Wellenleiter und Elektrode kann die Lichtextraktion aus einem Punktdefektoresonator in einem Photonenkristall vereinfachen. Wenn zum Beispiel in ein lumineszentes Material **408** in einem Punktdefektoresonator **407** Strom injiziert wird aus transparenten Elektroden **410**, die durch Photonenkristalle **409** hindurchlaufen, kann Licht emittiert werden. Die transparenten Elektroden **410** selbst können Liniendefekte für den periodischen Photonenkristall **409** sein, und die transparenten Elektroden **410** können als Wellenleiter wirken und einen Teil des emittierten Lichts, das durch den Punktdefektoresonator **407** resonant schwingt, zur Außenseite des Photonenkristalls leiten.

[0094] Bei der Photoanregung mit einer externen Lichtquelle erleichtert die Verwendung von anregendem Licht mit einer Wellenlänge außerhalb der photonischen Bandlücke die Anregung des lumineszenten Materials, was die Effizienz und Emission von Licht verbessert. [Fig. 29](#) zeigt eine schematische Ansicht einer lumineszenten Struktur **415** als ein Beispiel eines Ausführungsbeispiels, in dem eine lumineszente Schicht unter Verwendung einer externen Lichtquelle photoangeregt wird. Photonenkristalle **416** mit einer gewünschten Bandlücke können einen Punktdefektoresonator **417** beinhalten, der eine innerhalb der photonischen Bandlücke fluoreszierend emittierende fluoreszierende Substanz enthalten kann. Eine Lichtquelle **418** (z.B. UV), die Licht bei einer gleichen oder kürzeren Wellenlänge als die photonische Bandlücke emittiert, ist an der Unterseite des Photonenkristalls **416** bereitgestellt, um die Anregung und Emission der fluoreszierenden Substanz in der Resonatorstruktur zu erleichtern. Zusätzlich kann ein Wellenlängen-Auswahlfilter **419** bereitgestellt sein zum Durchlassen des Lichts aus der Resonatorstruktur und zum Blockieren des anregenden Lichts aus der Lichtquelle **418** im oberen Teil des Photonenkristalls. Der Wellenlängen-Auswahlfilter **419** kann das Licht (z.B. ultraviolett) von der Lichtquelle **418** zu einem Betrachter blockieren und so die Sichtbarkeit verbessern. Darüber hinaus kann Licht aus der lumineszenten Schicht durch Ändern einer an die Lichtquelle angelegten Spannung gesteuert werden.

[0095] Wenn leuchtende Medien enthaltende Lichtquellen mit resonante Wellenlängen enthaltenden Emissionsspektren in den Resonatorstrukturen in einem 3D-Photonenkristall bereitgestellt sind, der mehrere Bereiche aufweist, die diskrete Strukturen mit unterschiedlicher Gestalt und/oder Brechungsindex enthalten, kann ein monolithischer Laser bereitgestellt werden, der Licht bei entsprechenden Resonanzwellenlängen emittiert.

Zum Beispiel kann eine monolithische Multiwellenlängen-Laserquelle gemäß Ausführungsbeispielen bereitgestellt werden durch Anpassen der Resonanzwellenlänge an die Wellenlänge des Bandes zur optischen Nachrichtenübertragung (das O Band (1260 nm bis 1360 nm), das E Band (1369 nm bis 1460 nm), das S Band (1460 nm bis 1530 nm), das C Band (1530 nm bis 1565 nm), das L Band (1556 nm bis 1625 nm), und das U Band (1625 nm bis 1675 nm)). Dies erreicht die Miniaturisierung und die Integration einer Lichtquelle für die optische Nachrichtenübertragung. Darüber hinaus kann eine monolithische RGB Laserquelle bereitgestellt werden gemäß den Ausführungsbeispielen durch Anpassen der Resonanzwellenlängen an die der drei Grundfarben des Lichts: rot (R), grün (G) und blau (B). Eine solche monolithische RGB Laserquelle ist insbesondere für eine Vollfarblichtquelle einer visuellen Anzeigeeinheit (z.B. eine Projektionsanzeige) nützlich. Typische RGB Wellenlängenbänder sind $\lambda_R = 600 \text{ nm}$ bis 780 nm für das R Wellenlängenband; $\lambda_G = 500 \text{ nm}$ bis 600 nm für das G Wellenlängenband; und $\lambda_B = 380 \text{ nm}$ bis 500 nm für das B Wellenlängenband. Spezifische Verfahren zur Lichtemission beinhalten die verschiedenen oben beschriebenen Verfahren und jegliche andere dem Fachmann bekannte Verfahren zur Lichtemission, und Äquivalente.

[0096] In Ausführungsbeispielen ist die Resonanzwellenlänge nicht auf die drei RGB Farben beschränkt. Zum Beispiel ist eine Lichtquelle für optisches Lesen/Schreiben in einer Compact Disk (CD) oder DVD ausgelegt, eine Resonanzwellenlänge von etwa 785 nm oder etwa 660 nm zu besitzen. Der monolithische Laser kann ebenfalls angewendet werden für eine Lichtquelle zum optischen Lesen/Schreiben mit hoher Dichte unter Verwendung eines blauen Wellenlängenbandes von 405 nm. Eine Licht mit drei Wellenlängen emittierende monolithische Lichtquelle kann ebenso als Lichtquelle für das optische Lesen/Schreiben bereitgestellt werden. Diese monolithische Lichtquelle ist bei der Miniaturisierung und Integration eines optischen Les-/Schreib-Kopfes der optischen Platte nützlich.

Beispiel 5

[0097] [Fig. 30](#) zeigt eine schematische Ansicht eines Farbfilters **3000**, der einen 3D-Photonenkristall gemäß einem Ausführungsbeispiel in verschiedenen Bereichen verwendet (z.B. Bereiche 1–4). Der Farbfilter **3000** kann eine Struktur aufweisen, die mehrere 3D-Photonenkristalle enthält, die jeweils ein Design-Wellenlängenband in der photonischen Bandlücke aufweisen. Wenn folglich zum Beispiel jeder der 3D-Photonenkristalle dazu ausgelegt ist, mit der Pixelfläche eines Flüssigkristallpanels überein zu stimmen, kann der Farbfilter als ein Displayfarbfilter verwendet werden. Wie in [Fig. 31](#) gezeigt, kann ein Farbfilter (z.B. **501a**) gemäß mindestens einem Ausführungsbeispiel auf der Rückseite eines reflektierenden Flüssigkristallpanels (z.B. **504**) platziert sein, um ein Displaypanel bereitzustellen. Außerdem kann ein Farbfilter (z.B. **501b**) gemäß mindestens einem Ausführungsbeispiel mit einem Bildsensor **505** (z.B. CCD oder CMOS) ausgerüstet sein, um einen komplementären Filter bereitzustellen ([Fig. 32](#)). Das Design der dreidimensionalen periodischen Struktur erleichtert die Auswahl der Arbeitsmittelenwellenlänge und des Arbeitswellenlängenbandes. Zusätzlich ermöglicht die Verwendung der photonischen Bandlücke einen Farbfilter verbesserter Qualität mit engem Emissionsband, niedriger Einfallswinkelabhängigkeit und verbesserter Farbproduzierbarkeit. Zusätzlich können den jeweiligen Arbeitswellenlängen entsprechende Strukturen mit einem Vorgang hergestellt werden. Zusätzlich kann die Ausrichtung von Ausführungsbeispielen von Photonenkristallen mit einem Flüssigkristall-Displaypanel oder einem Bildsensor erleichtert werden.

[0098] Mindestens ein Ausführungsbeispiel kann eine Brechungsindex-Periode kleiner als eine Design-Wellenlänge aufweisen. Weitere Ausführungsbeispiele können als optische Elemente verwendet werden, wie eine Licht emittierende Vorrichtung oder eine optische Schaltung, die einen Defekt in einem 3D-Photonenkristall aufweist und die mit einem Punktdefektoresonator oder einem Liniendefekt-Wellenleiter versehen ist, die bei einer gewünschten Wellenlänge arbeiten.

[0099] Während die vorliegende Erfindung unter Bezug auf Ausführungsbeispiele beschrieben wurde, ist zu verstehen, dass die Erfindung nicht auf die offenbarten Ausführungsbeispiele beschränkt ist. Dem Schutzbereich der folgenden Ansprüche ist die breiteste Interpretation zu bewilligen, so dass alle solche Modifikationen und äquivalenten Strukturen und Funktionen mit eingeschlossen sind.

Patentansprüche

1. Dreidimensionaler photonischer Kristall (kurz „3D-Photonenkristall“), welcher umfasst:
eine erste Schicht mit mehreren säulenartigen Strukturen, die durch ein erstes vorbestimmtes Intervall voneinander beabstandet sind;
eine zweite Schicht mit mehreren säulenartigen Strukturen, die durch ein zweites vorbestimmtes Intervall voneinander beabstandet sind, wobei sich die säulenartigen Strukturen in einer unterschiedlichen Richtung gegen-

über den säulenartigen Strukturen in der ersten Schicht erstrecken;
 eine dritte Schicht mit mehreren säulenartigen Strukturen, die durch ein erstes vorbestimmtes Intervall voneinander beabstandet sind, wobei sich die säulenartigen Strukturen in der gleichen Richtung wie jene der säulenartigen Strukturen in der ersten Schicht erstrecken;
 eine vierte Schicht mit mehreren säulenartigen Strukturen, die durch ein zweites vorbestimmtes Intervall voneinander beabstandet sind, wobei die säulenartigen Strukturen sich in der gleichen Richtung wie jene der säulenartigen Strukturen in der zweiten Schicht erstrecken;
 wobei die erste bis vierte Schicht sequentiell gestapelt sind,
 wobei die erste und die dritte Schicht derart gestapelt sind, dass die in diesen enthaltenen säulenartigen Strukturen gegeneinander verschoben sind um die Hälfte des ersten vorbestimmten Intervalls in der Richtung senkrecht zur Erstreckungsrichtung der säulenartigen Strukturen der ersten Schicht innerhalb der Schichten;
 wobei die zweite und die vierte Schicht derart gestapelt sind, dass die in diesen enthaltenen säulenartigen Strukturen gegeneinander verschoben sind um die Hälfte des zweiten vorbestimmten Intervalls in der Richtung senkrecht zur Erstreckungsrichtung der säulenartigen Strukturen der zweiten Schicht innerhalb der Schichten;
 wobei der Photonenkristall gekennzeichnet ist durch zusätzliche Schichten, die je mindestens eine Schicht mit diskreten Strukturen, die in einer Ebene parallel zu jeder der vier Schichten diskret angeordnet sind, enthalten, wobei die erste bis vierte Schicht sequentiell mit der zusätzlichen Schicht zwischen benachbarten zwei Schichten davon gestapelt sind;
 wobei in den zusätzlichen Schichten enthaltene diskrete Strukturen an Positionen, die den Überkreuzungen benachbarter säulenartiger Strukturen der gestapelten Schichten entsprechen, angeordnet sind; und
 wobei der 3D-Photonenkristall mindestens zwei Bereiche unterschiedlicher diskreter Strukturen enthält.

2. 3D-Photonenkristall nach Anspruch 1, bei dem die mindestens zwei Bereiche, die diskrete Strukturen enthalten, sich in Gestalt und/oder Brechungsindex unterscheiden.

3. 3D-Photonenkristall nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die mindestens zwei Bereiche, die unterschiedliche diskrete Strukturen enthalten, unterschiedliche photonische Bandlücken aufweisen

4. 3D-Photonenkristall nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei dem ein Bereich außerhalb der säulenartigen und außerhalb der diskreten Strukturen mit einem Medium, das sich von dem die säulenartigen und die diskreten Strukturen bildenden Medium unterscheidet, gefüllt ist.

5. 3D-Photonenkristall nach Anspruch 4, bei dem die säulenartigen und die diskreten Strukturen höhere Brechungsindizes aufweisen als das Medium, das in den Bereich außerhalb der säulenartigen und außerhalb der diskreten Strukturen gefüllt ist.

6. 3D-Photonenkristall nach Anspruch 5, bei dem die höheren relativen Brechungsindizes höher sind als das Zweifache des Brechungsindex des Mediums, das in den Bereich außerhalb der säulenartigen und außerhalb der diskreten Strukturen gefüllt ist.

7. 3D-Photonenkristall Kristall nach einem der Ansprüche 1 bis 6, bei dem sich die säulenartigen Strukturen von ersten Schicht und zweiter Schicht im Wesentlichen rechtwinklig kreuzen.

8. Optisches Element, welches mindestens einen Defekt im 3D-Photonenkristall nach einem der Ansprüche 1 bis 7 enthält.

9. Optisches Element nach Anspruch 8, bei dem der mindestens eine Defekt mindestens ein als Wellenleiter wirkender Liniendefekt ist.

10. Optisches Element nach Anspruch 9, wobei dieses als Dispersionskompensationsvorrichtung bei mehreren Wellenlängen arbeitet.

11. Optisches Element nach Anspruch 8, bei dem der mindestens eine Defekt mindestens ein als Resonator wirkender Punktdefekt ist.

12. Optisches Element nach Anspruch 11, wobei dieses als ein Schmalband-Lichtfilter bei mehreren Wellenlängen arbeitet.

13. Optisches Element nach Anspruch 8, bei dem der mindestens eine Defekt einen Liniendefekt und einen Punktdefekt beinhaltet und als eine bei mehreren Wellenlängen arbeitende optische Eingangs-/Ausgangs-

schaltung wirkt.

14. Optisches Element nach Anspruch 11, bei dem jeder der Bereiche, der verschiedene diskrete Strukturen im 3D-Photonenkristall enthält, mindestens einen Punktdefekt aufweist, wobei ein erster Bereich einen ersten Punktdefekt und ein zweiter Bereich einen zweiten Punktdefekt aufweist, wobei der erste und der zweite Punktdefekt ein lumineszentes Material beinhalten und das optische Element Licht bei mehreren Wellenlängen emittiert.

15. Optisches Element nach Anspruch 14, welches ein Laserelement ist, das Licht bei mehreren Wellenlängen in einem Infrarotwellenlängenband für optische Nachrichtenübertragung emittiert.

16. Optisches Element nach Anspruch 14, welches ein Laserelement ist, das Licht bei mehreren Wellenlängen in einem sichtbaren Wellenlängenband emittiert.

17. Optisches Element nach Anspruch 16, welches Licht bei einer Wellenlänge von rotem, einer Wellenlänge von grünem und einer Wellenlänge von blauem Licht emittiert.

18. Optisches Element nach Anspruch 14, welches ein Laserelement ist, das Licht bei mehreren Wellenlängen in einem Lese/Schreib-Wellenlängenband einer optischen Platte (disk) emittiert.

19. Optisches Element, welches den 3D-Photonenkristall nach einem der Ansprüche 1 bis 10 umfasst, wobei das optische Element als Farbfilter bei mehreren Wellenlängen arbeitet.

20. Photonenkristall nach einem der Ansprüche 1 bis 7, bei dem das Medium außerhalb der säulenartigen und außerhalb der diskreten Strukturen Vakuum und/oder Luft und/oder ein festes Material und/oder eine Flüssigkeit ist.

Es folgen 28 Blatt Zeichnungen

FIG. 1

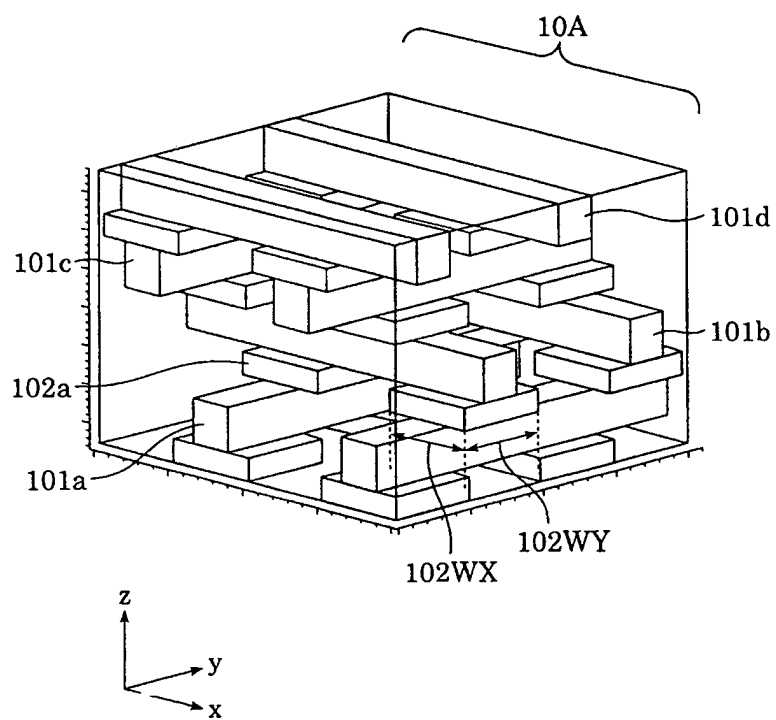


FIG. 2

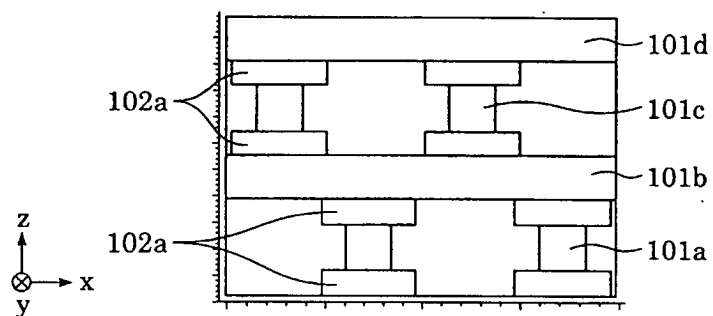


FIG. 3

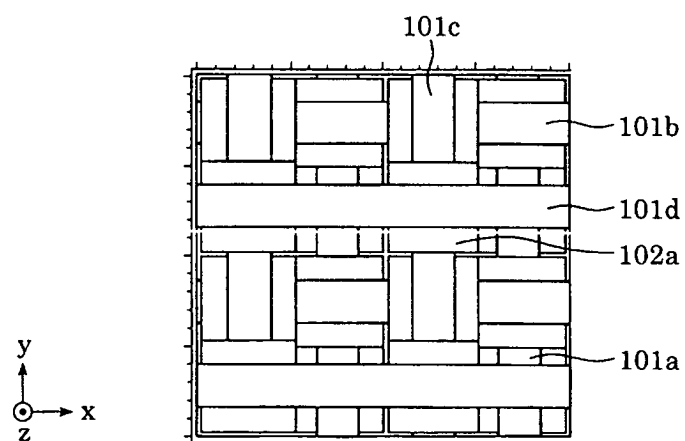


FIG. 4

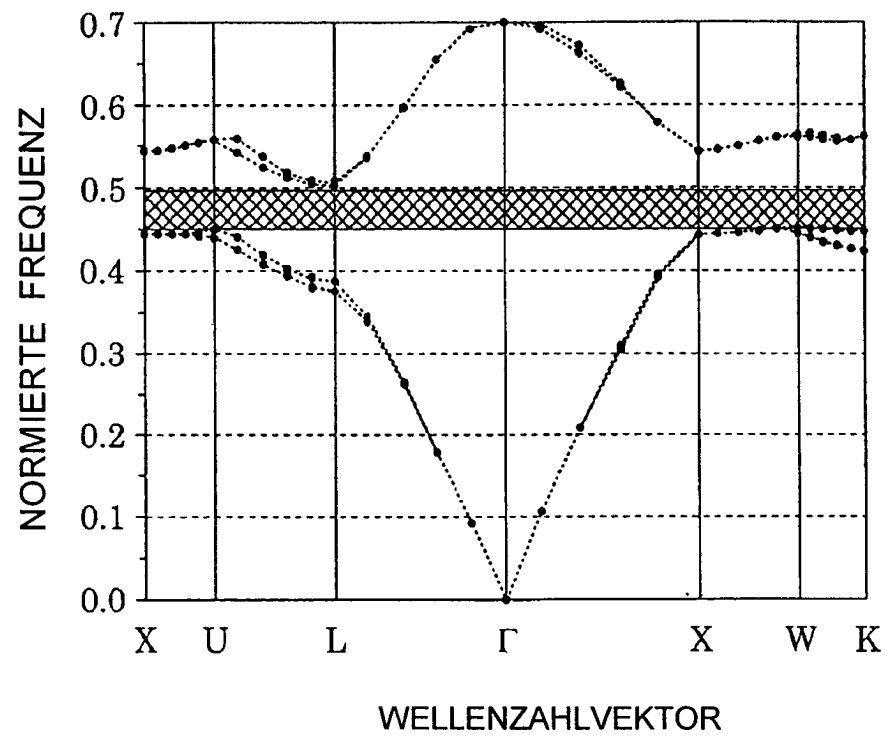


FIG. 5

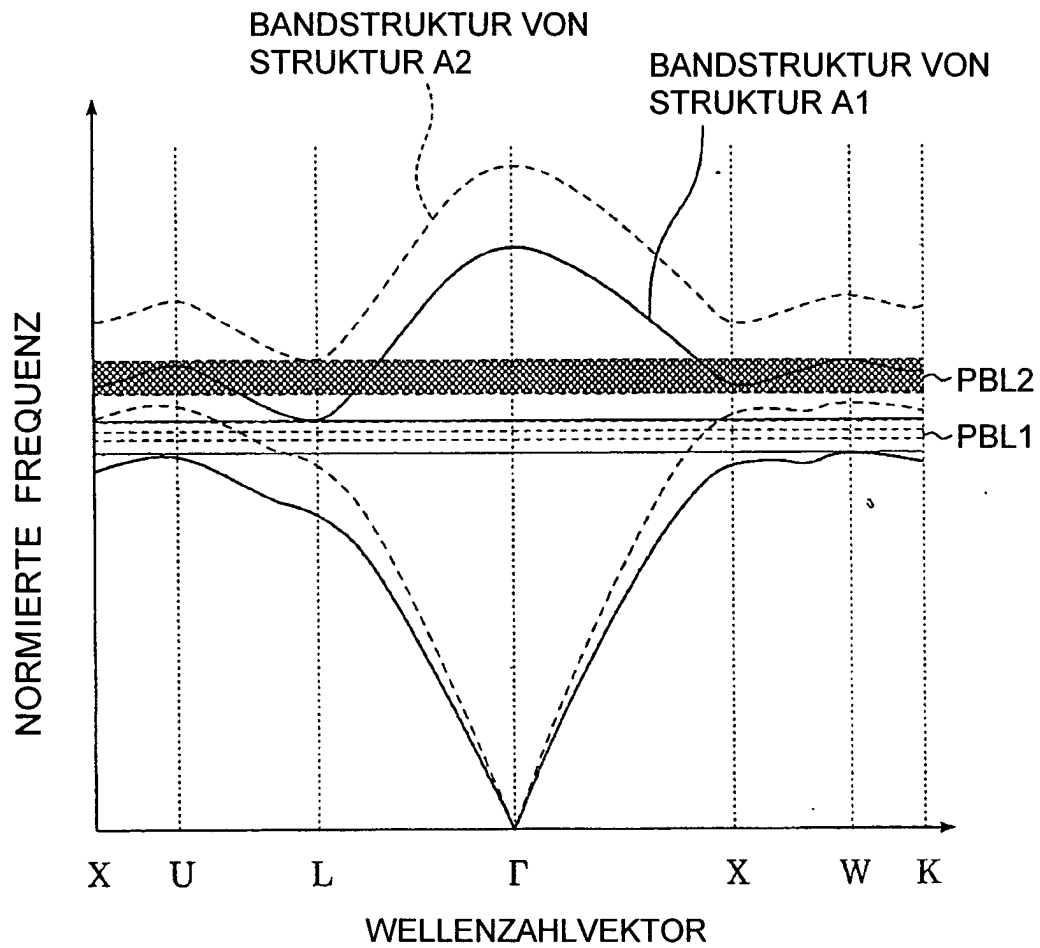


FIG. 6A FIG. 6B FIG. 6C FIG. 6D FIG. 6E

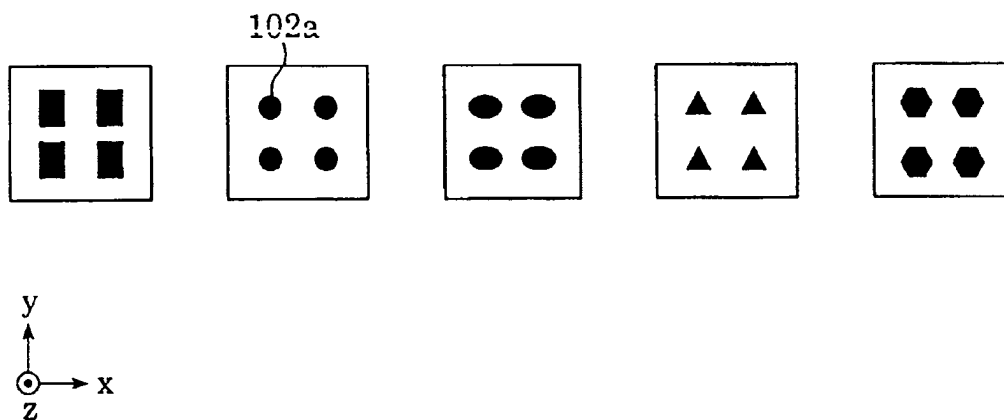


FIG. 7A

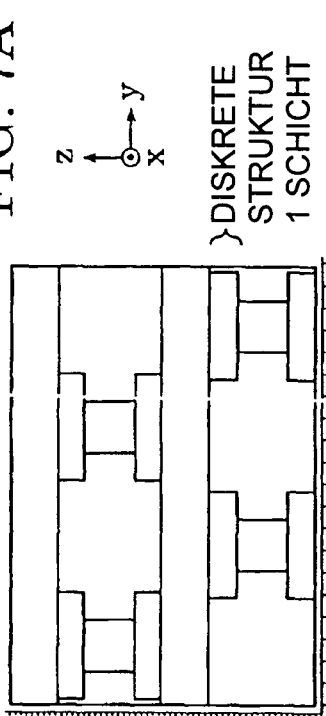


FIG. 7B

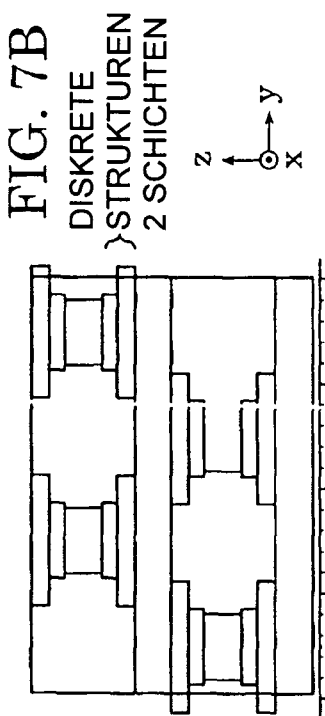


FIG. 7C

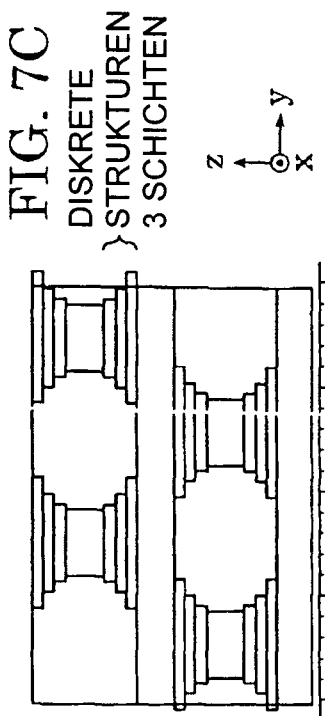


FIG. 7D

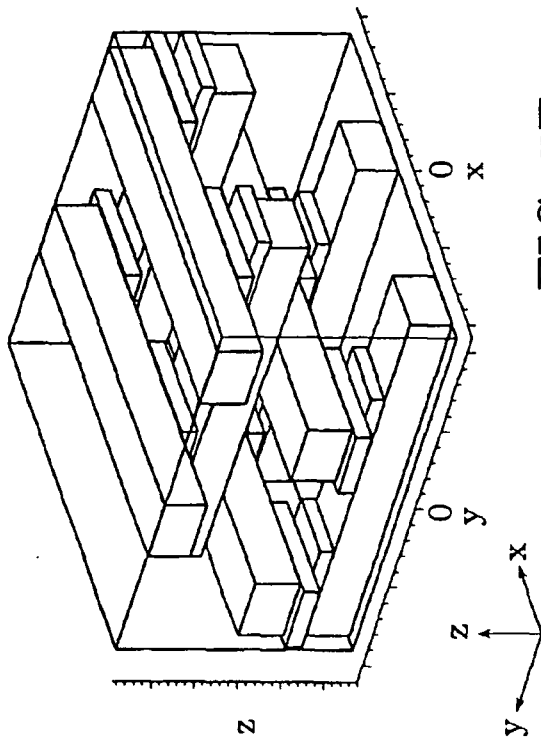


FIG. 7E



FIG. 8A

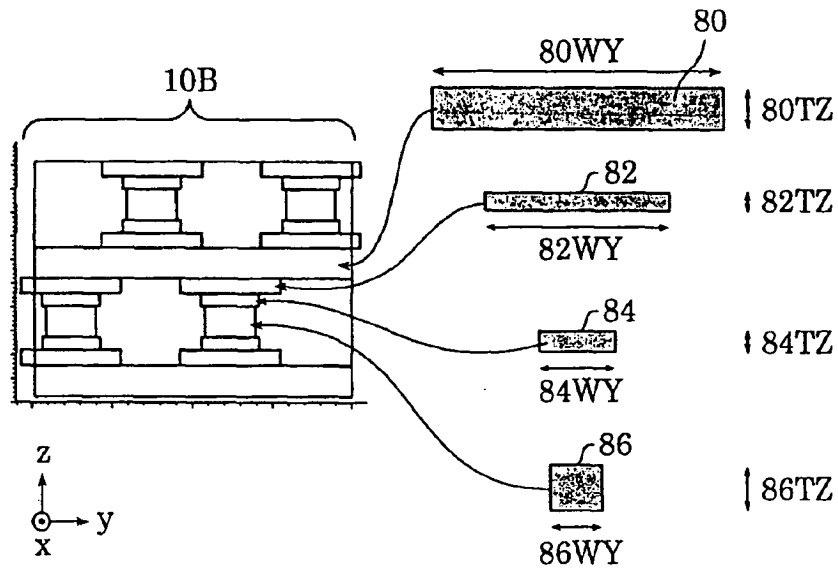


FIG. 8B

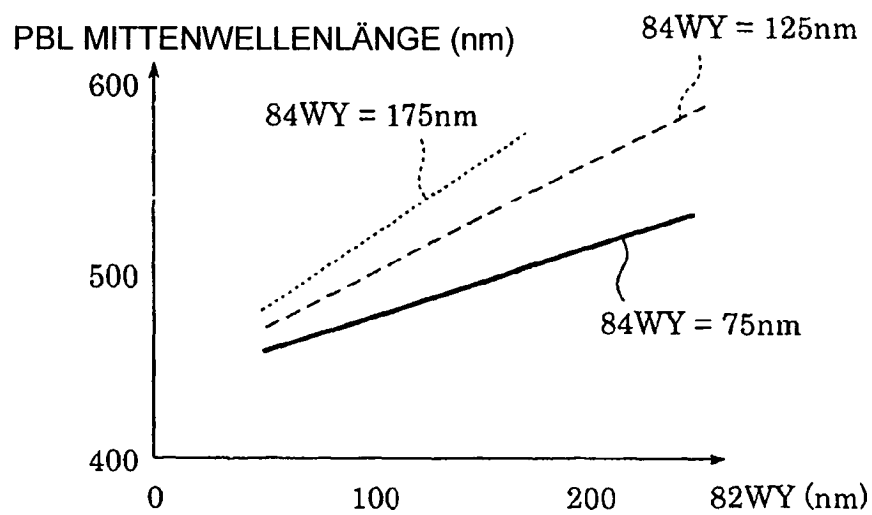


FIG. 9A

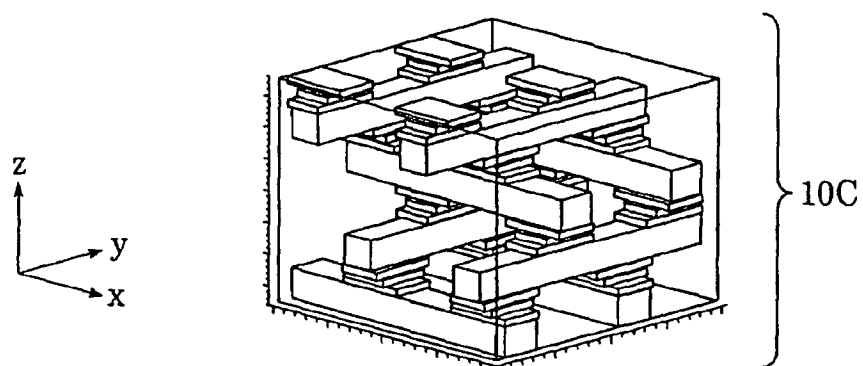


FIG. 9B

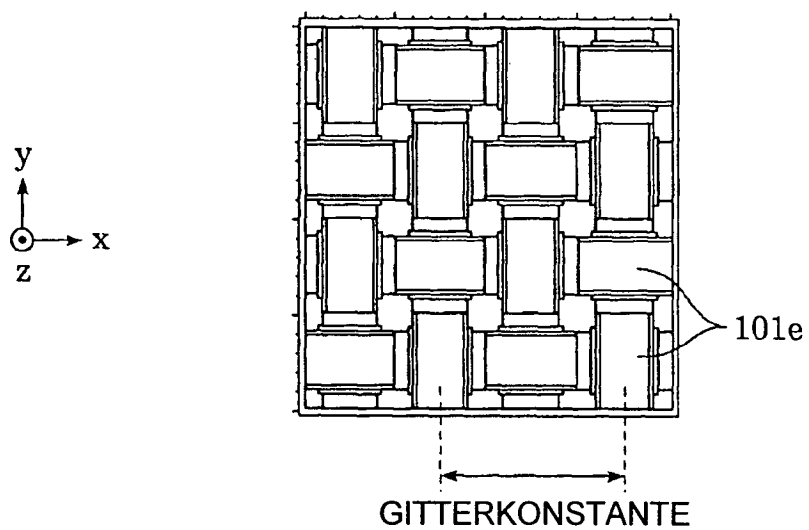


FIG. 9C

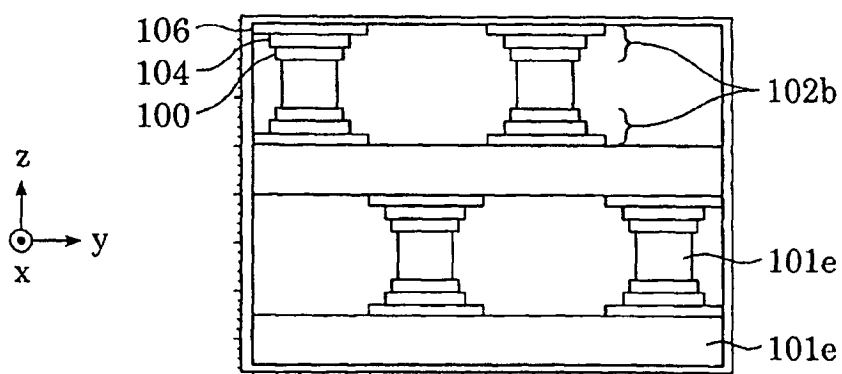


FIG. 10

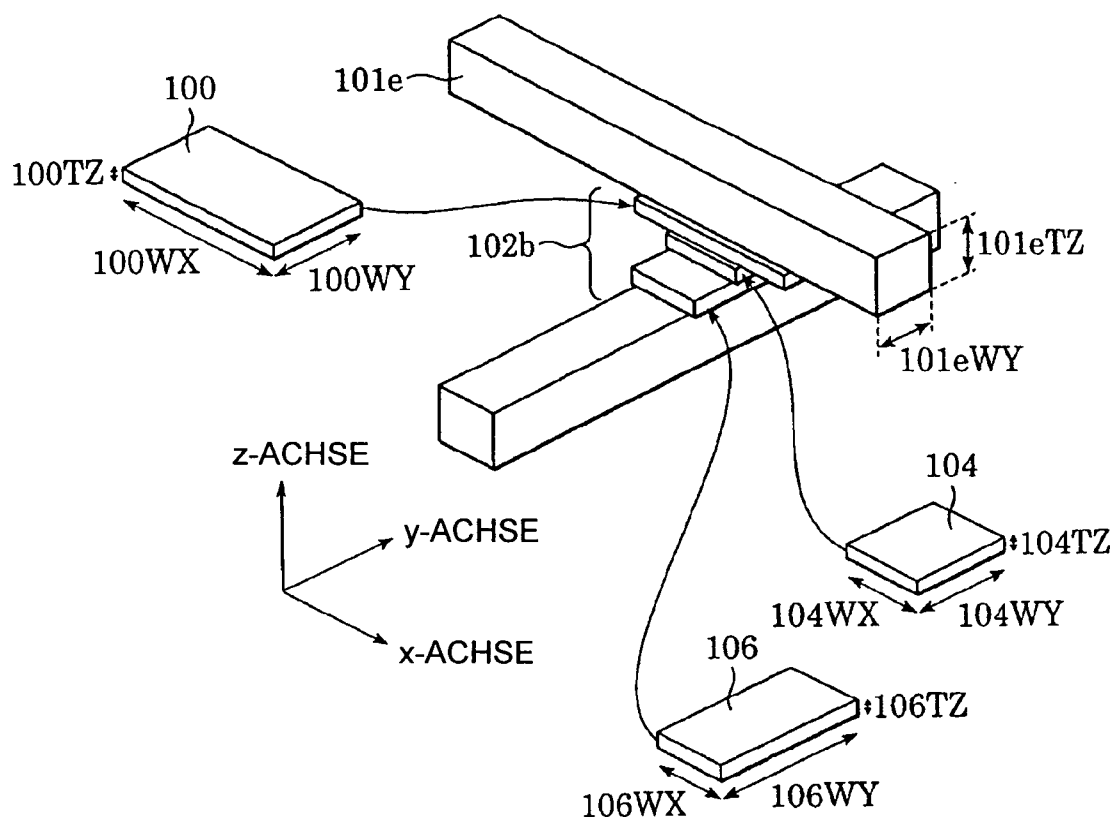


FIG. 11

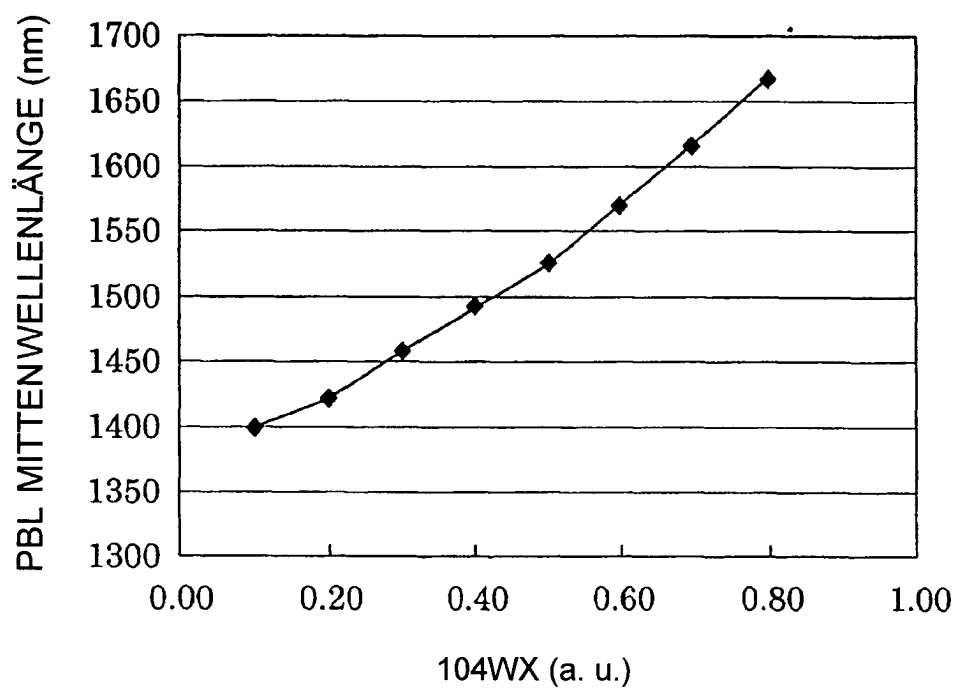


FIG. 12A

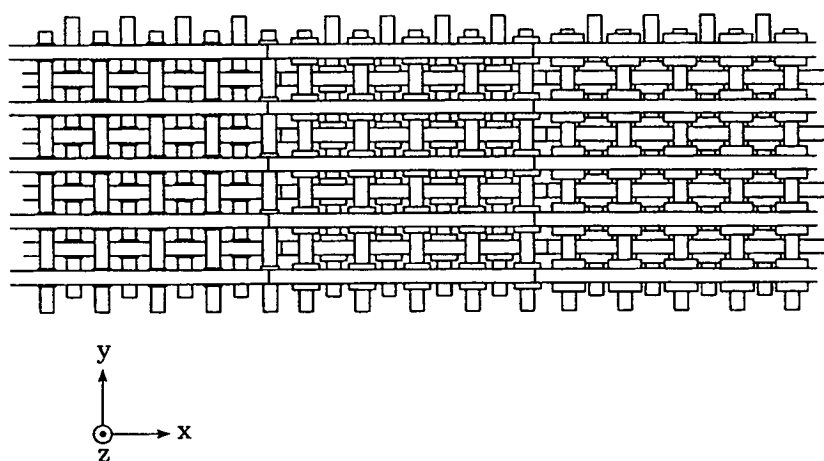


FIG. 12B

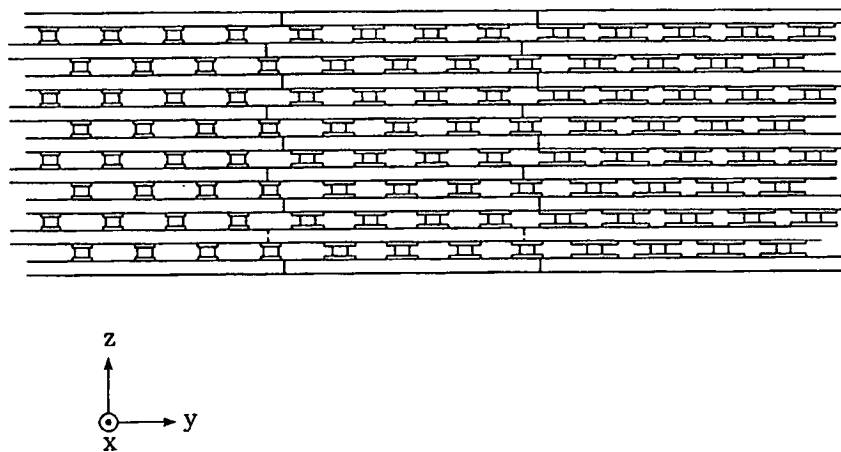


FIG. 13

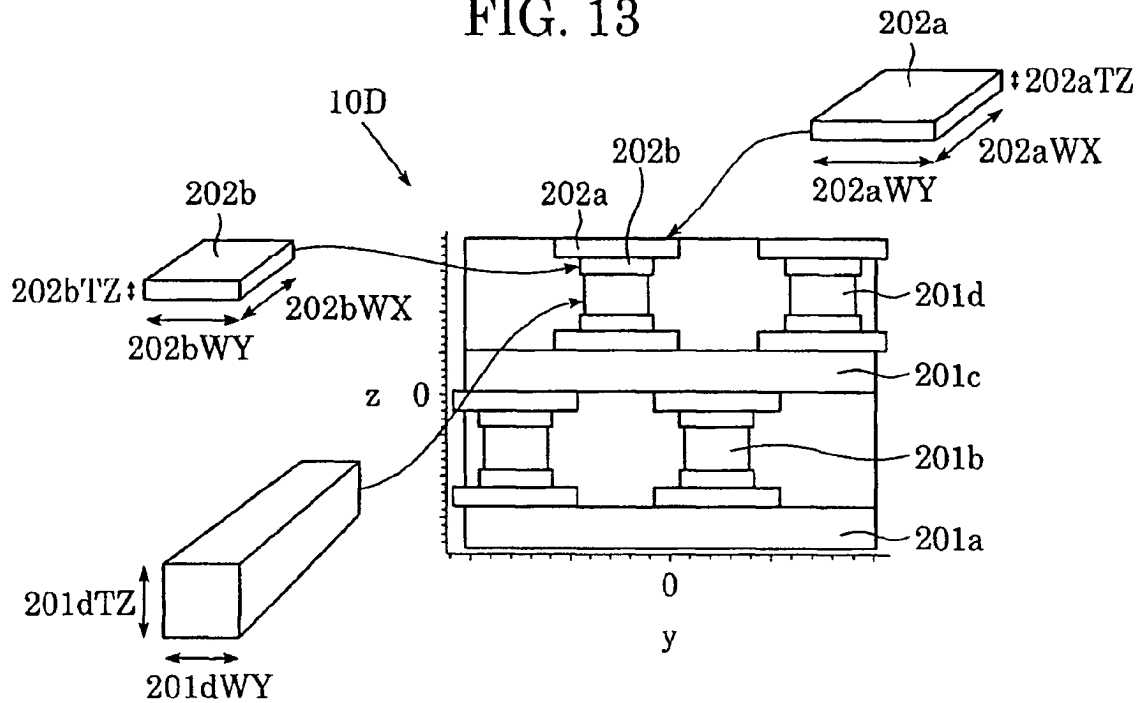


FIG. 14

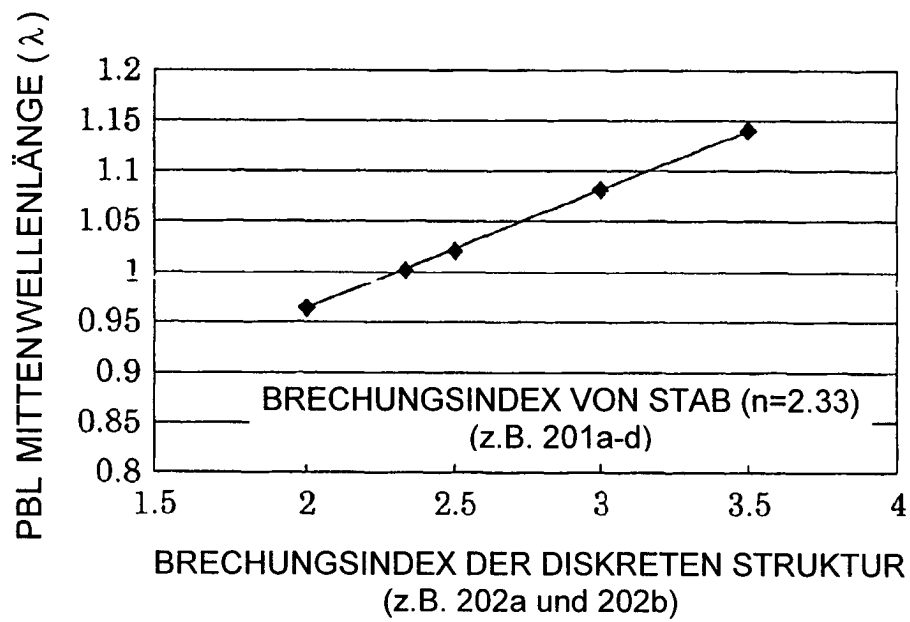


FIG. 15

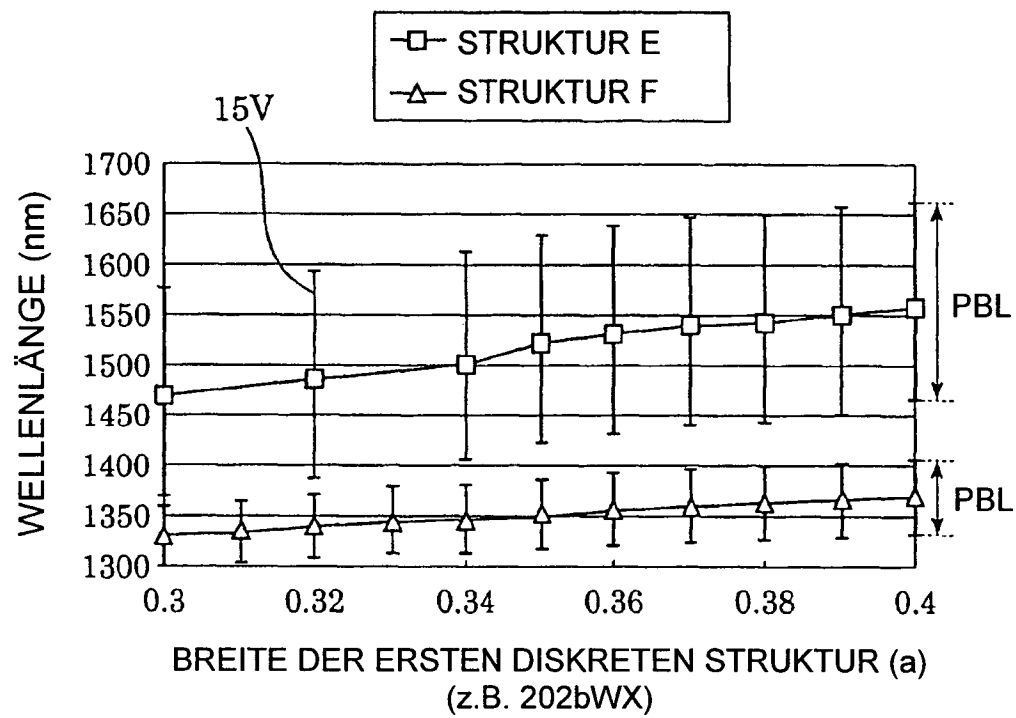


FIG. 16

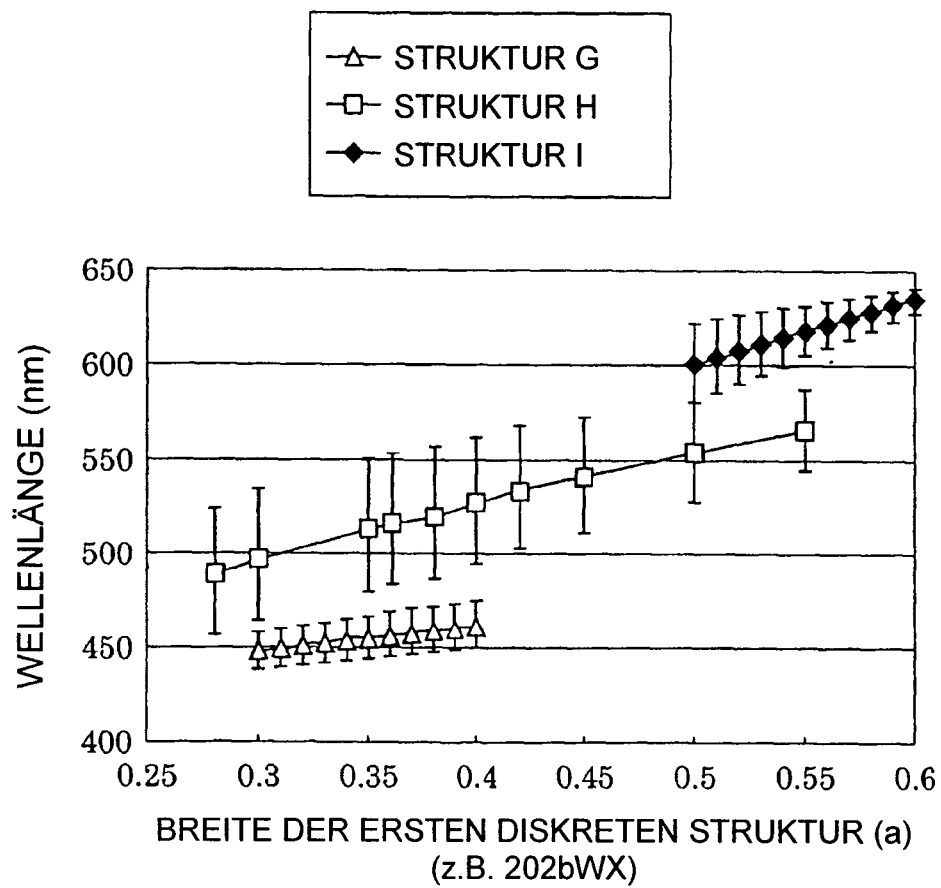


FIG. 17A

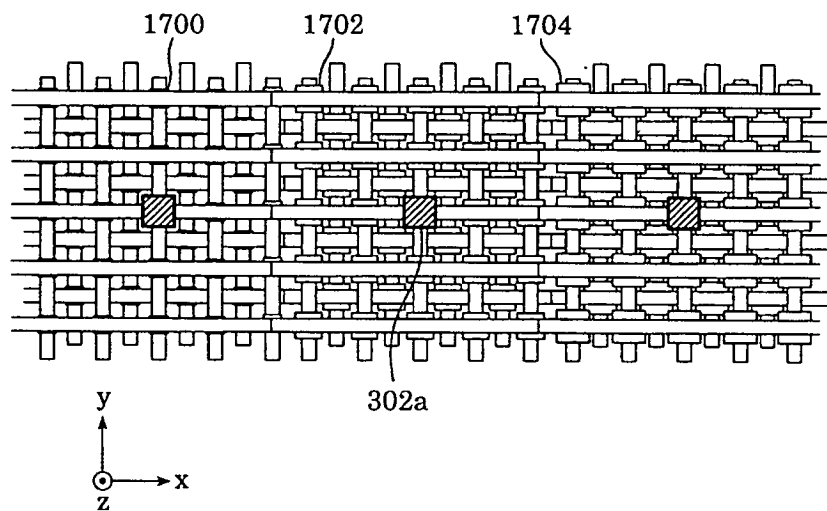


FIG. 17B

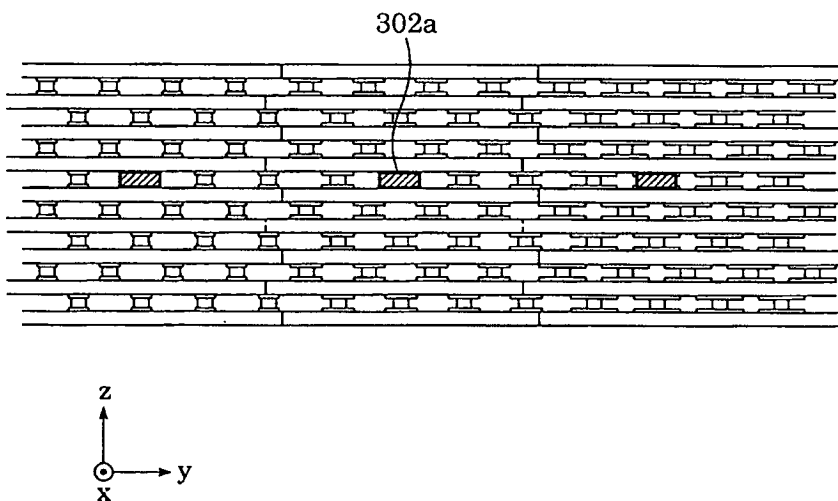


FIG. 18

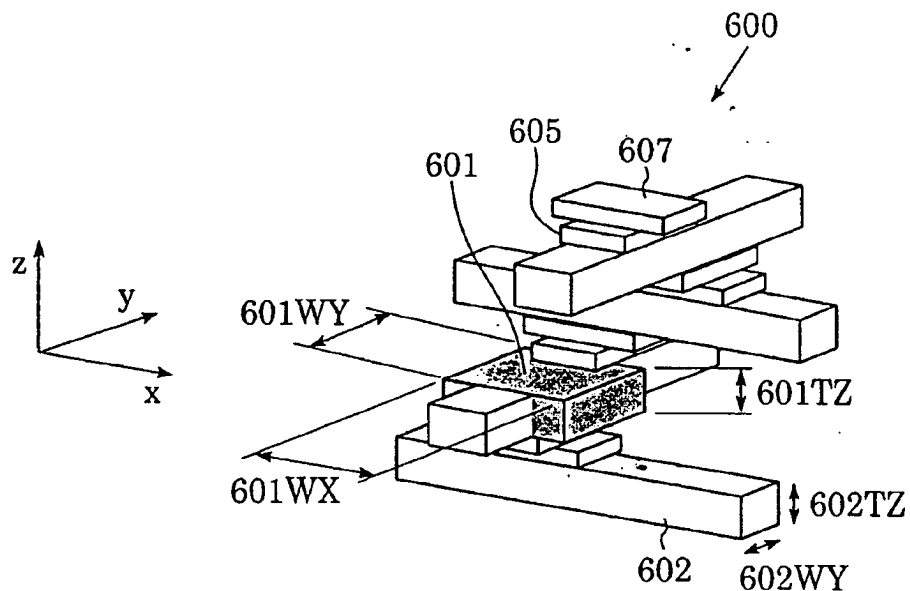


FIG. 19

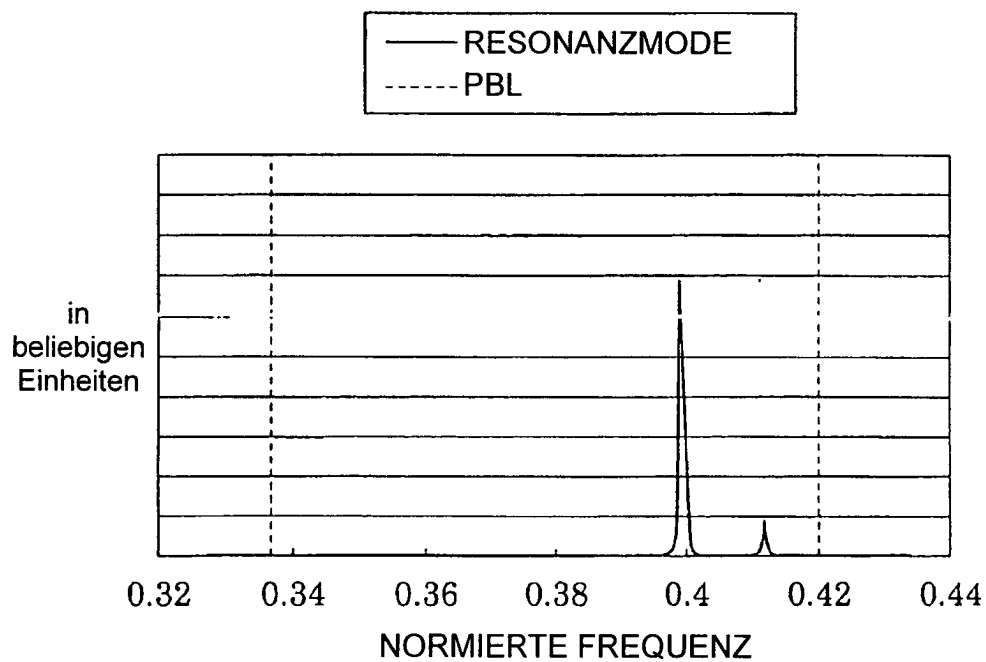


FIG. 20

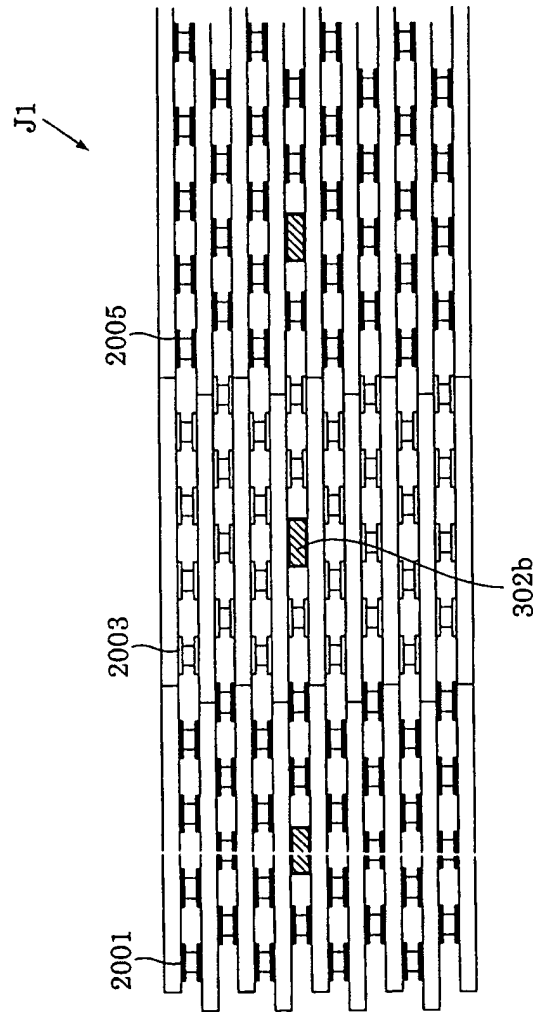


FIG. 21A

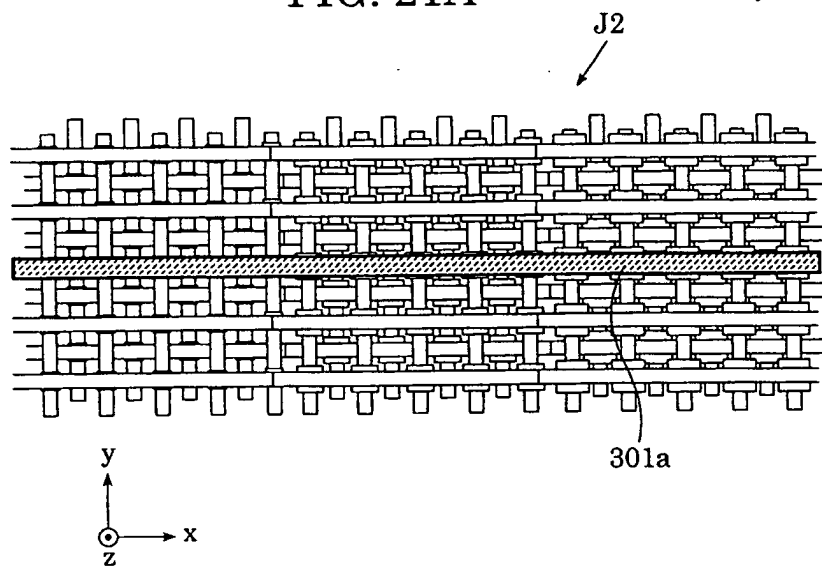


FIG. 21B

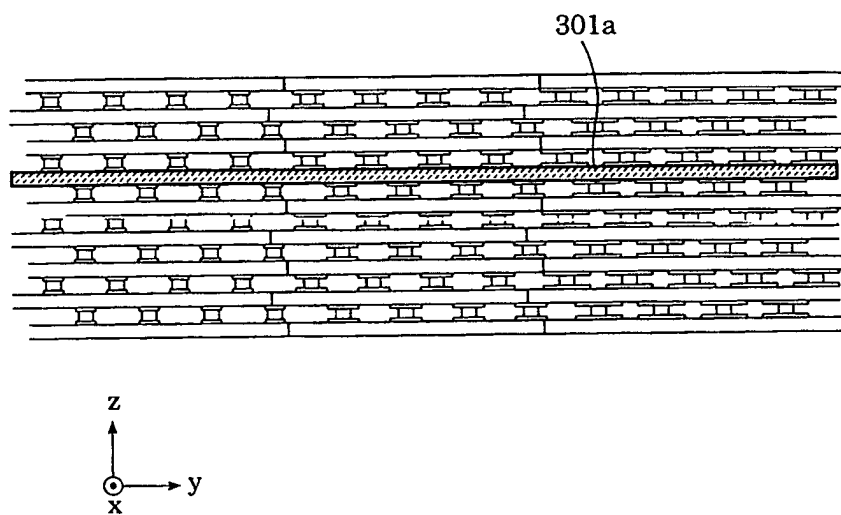


FIG. 22A

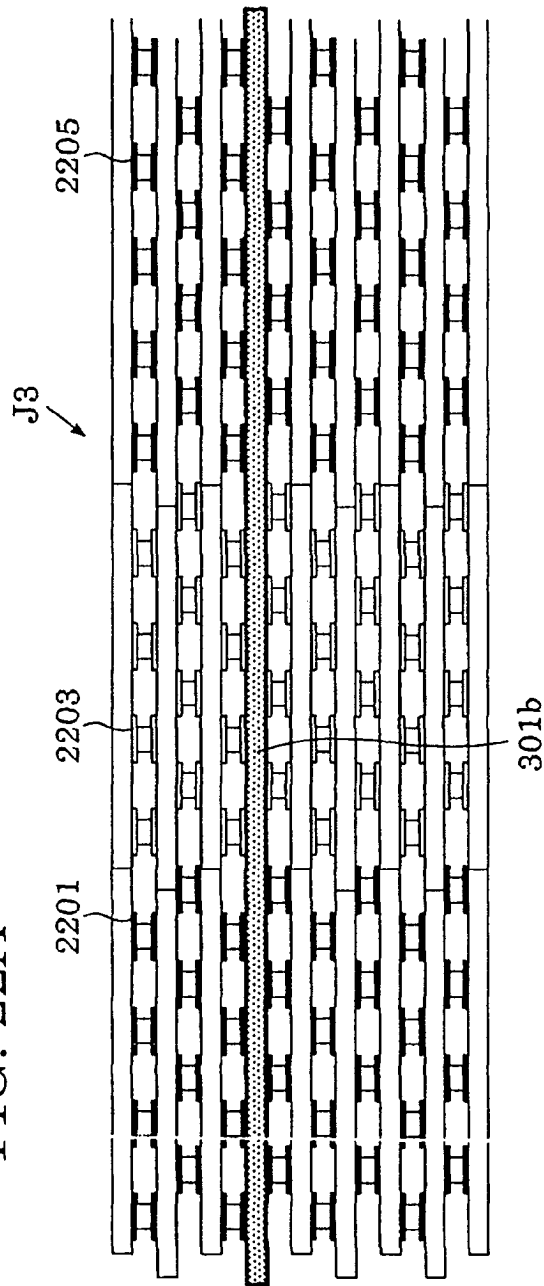


FIG. 22B

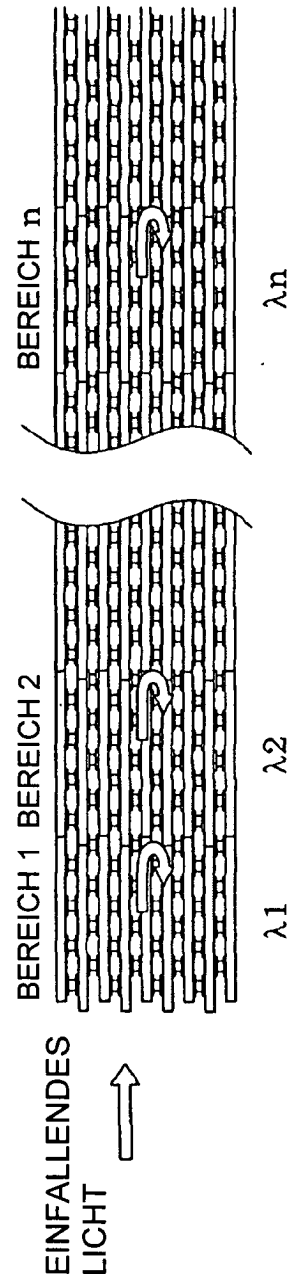


FIG. 23

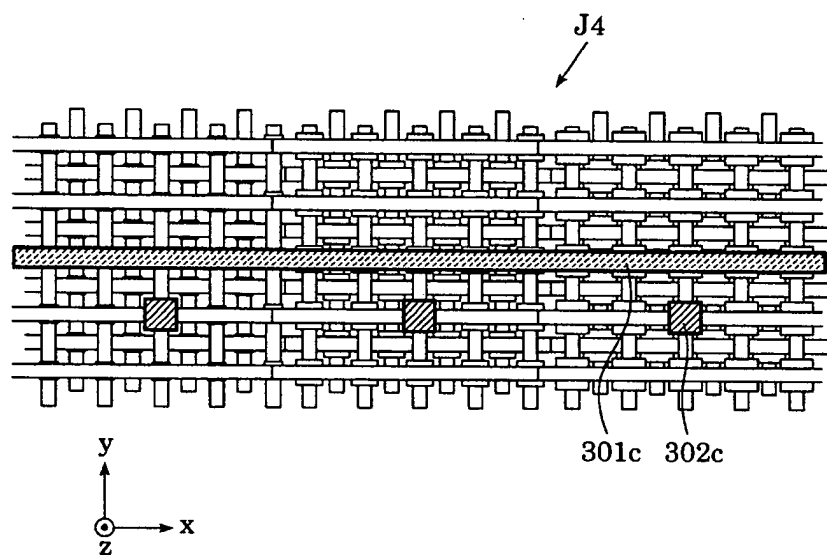


FIG. 24A

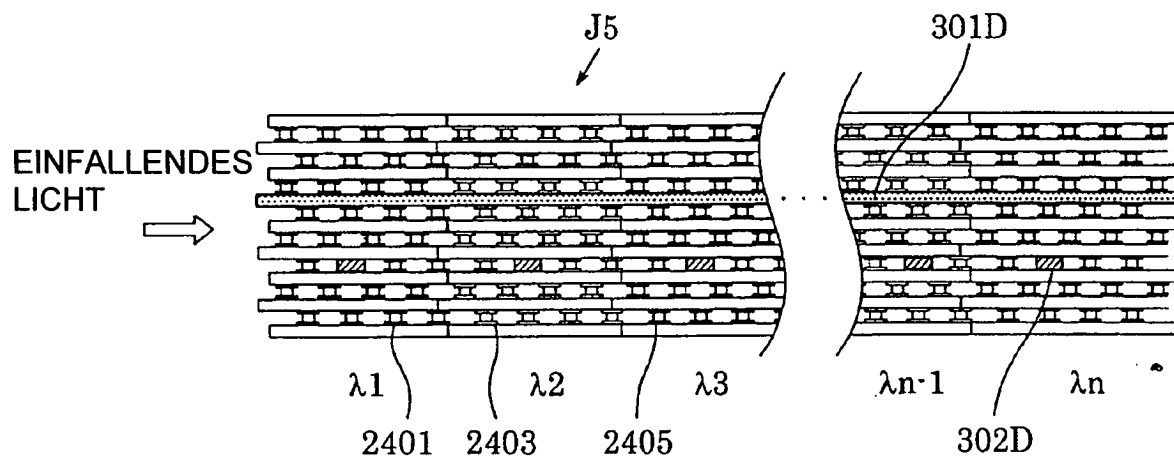


FIG. 24B

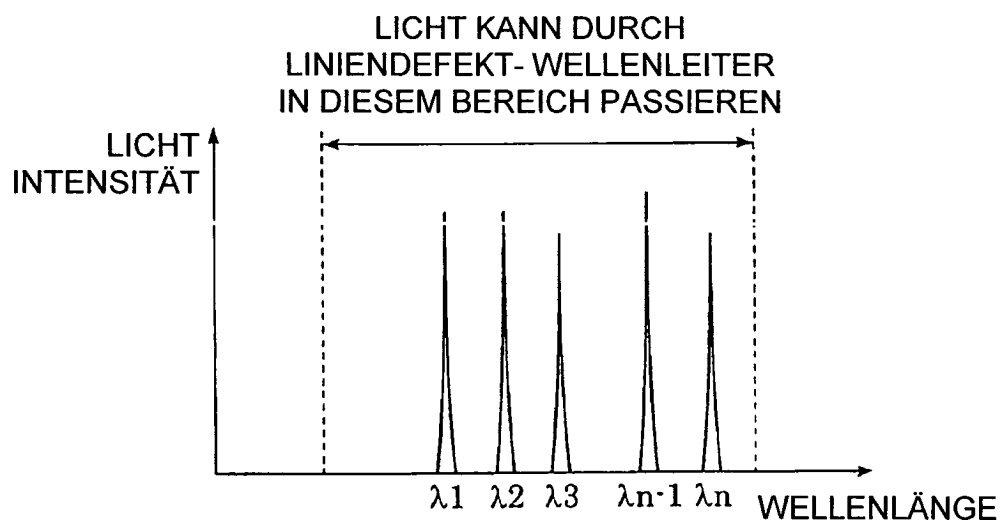


FIG. 25

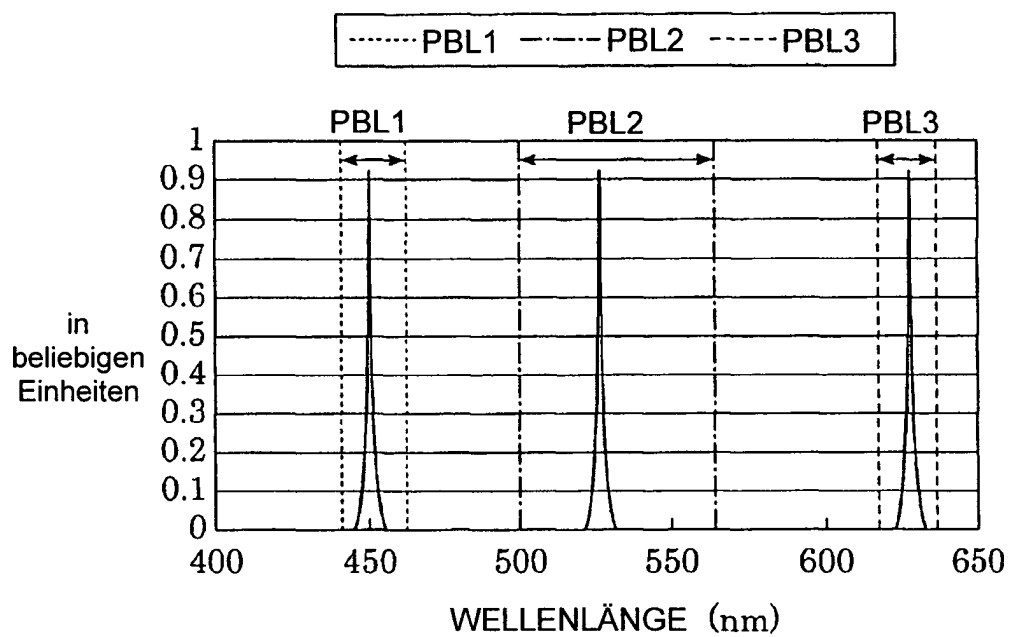


FIG. 26

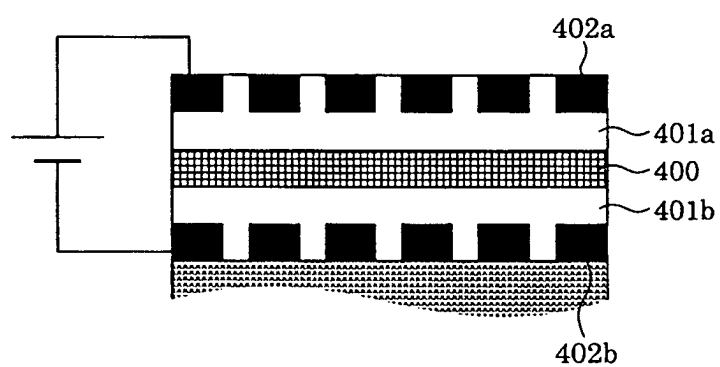


FIG. 27

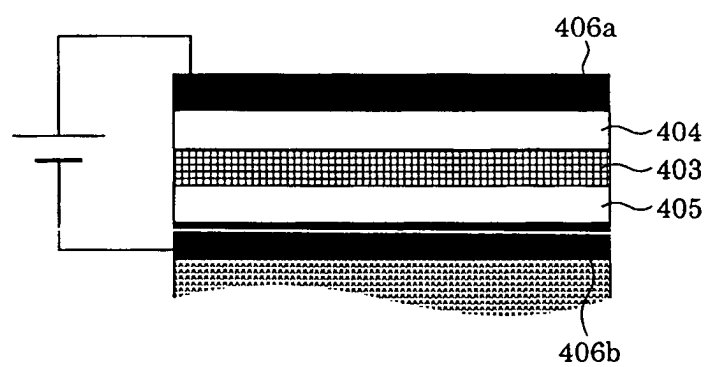


FIG. 28A

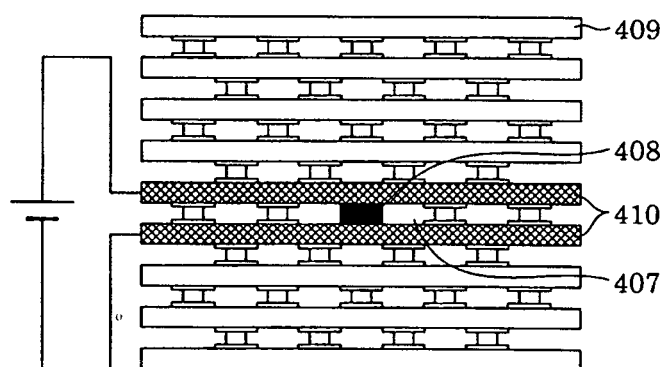


FIG. 28B

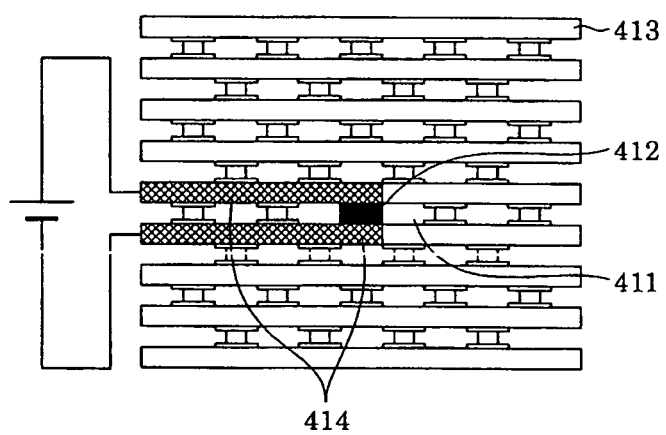


FIG. 29

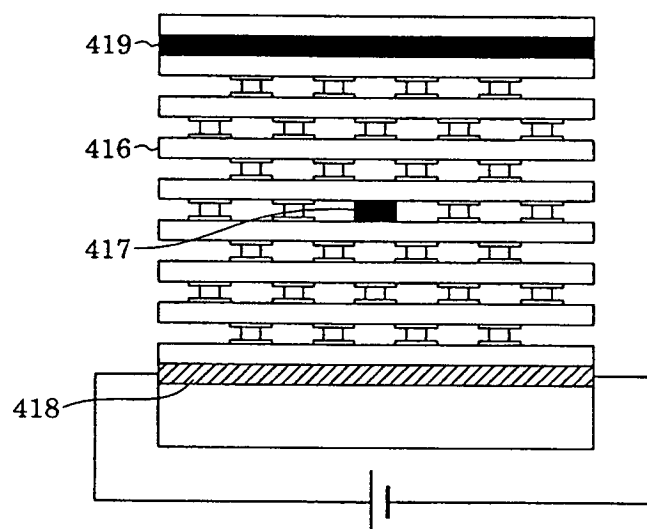


FIG. 30

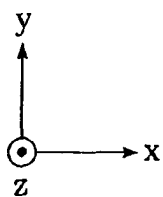
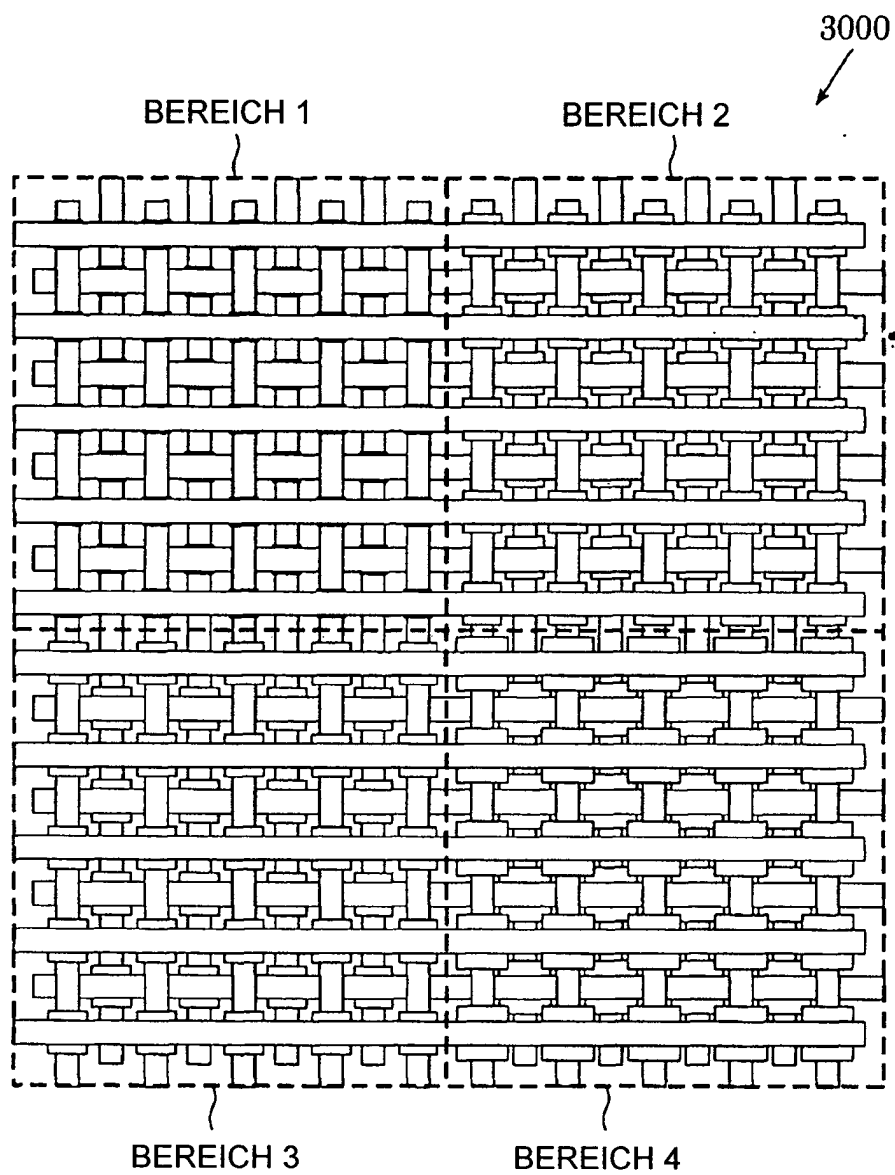


FIG. 31

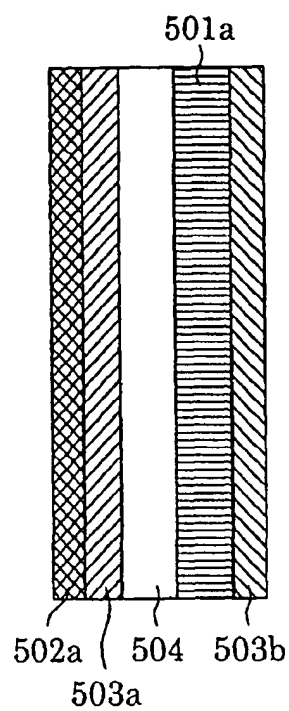
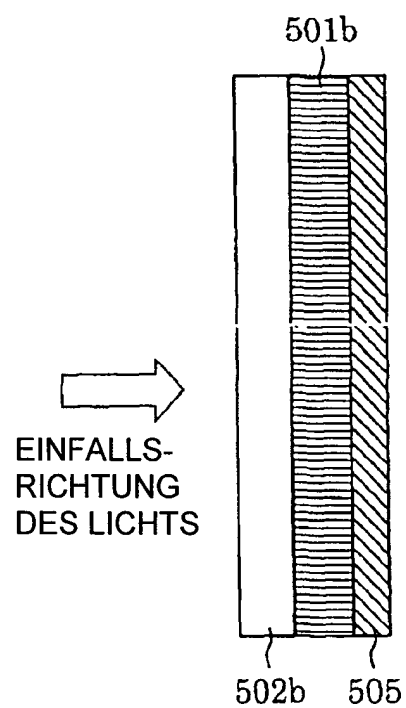
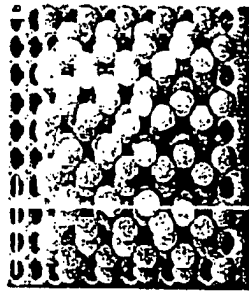


FIG. 32



VERWANDTE TECHNIK



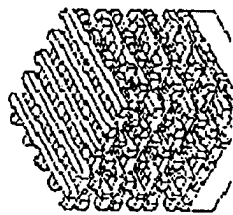
DIAMANT
STRUKTUR

FIG. 33A



DREIDIMENSIONALE
STRUKTUR

FIG. 33D



HOLZSTAPEL
STRUKTUR

FIG. 33B



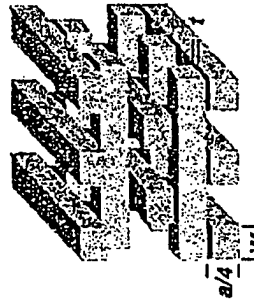
INVERSE
STRUKTUR

FIG. 33E



HELIXARTIGE
STRUKTUR

FIG. 33C



DIAMANT
HOLZSTAPEL
STRUKTUR

FIG. 33F

FIG. 34A VERWANDTE TECHNIK

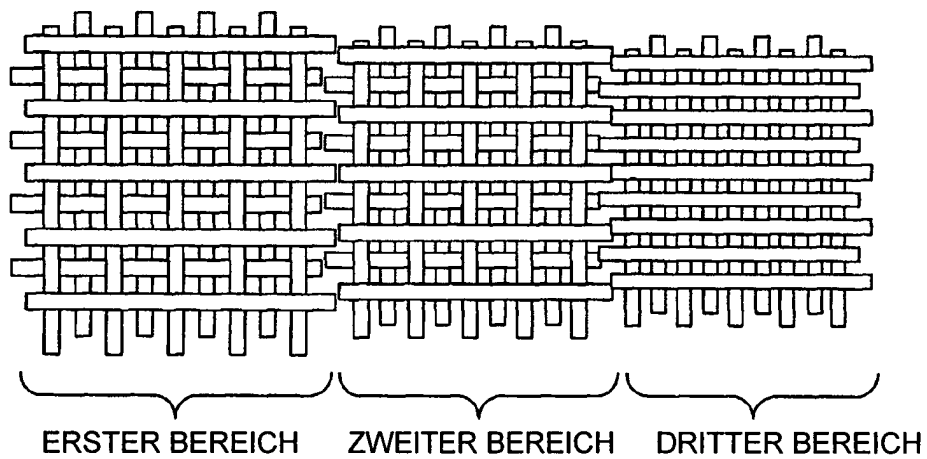


FIG. 34B VERWANDTE TECHNIK

