



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 23 772 T2** 2008.10.30

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 302 810 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 23 772.6**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 252 247.8**

(96) Europäischer Anmeldetag: **27.03.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **16.04.2003**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **28.11.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **30.10.2008**

(51) Int Cl.⁸: **G02F 1/39** (2006.01)

G02F 1/355 (2006.01)

H01L 31/0352 (2006.01)

H01S 5/343 (2006.01)

H01L 29/12 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

2001311046 09.10.2001 JP

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:

Fujitsu Ltd., Kawasaki, Kanagawa, JP

(72) Erfinder:

**Akiyama, Tomoyuki, Nakahara-ku, Kawasaki-shi,
Kanagawa 211, JP**

(74) Vertreter:

W. Seeger und Kollegen, 81369 München

(54) Bezeichnung: **Photohalbleitervorrichtung und Herstellungsverfahren**

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

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Photohalbleitervorrichtung und ein Verfahren zum Herstellen der Photohalbleitervorrichtung und, im Besonderen, eine Photohalbleitervorrichtung mit Quantenpunkten und ein Verfahren zum Herstellen der Photohalbleitervorrichtung.

[0002] Halbleiterlichtverstärker und Halbleiterlaser haben kleine Abmessungen und einen niedrigen Elektroenergieverbrauch, wodurch sie auf dem Gebiet der optischen Kommunikation attraktiv sind.

[0003] Ein herkömmlicher Halbleiterlichtverstärker wird unter Bezugnahme auf [Fig. 9](#) erläutert. [Fig. 9](#) ist eine Querschnittsansicht des herkömmlichen Halbleiterlichtverstärkers.

[0004] Wie in [Fig. 9](#) gezeigt, ist eine Deckschicht **112** aus n-Typ-InP auf einem Halbleitersubstrat **110** aus n-Typ-InP gebildet. Eine aktive Grundmaterialschicht **124** aus InGaAs ist auf der Deckschicht **112** gebildet. Eine Deckschicht **136** ist auf der aktiven Grundmaterialschicht **124** gebildet. Die Deckschicht **136**, die aktive Grundmaterialschicht **124** und die Deckschicht **112** sind insgesamt in einer Mesa gebildet und stellen eine mesaförmige Lichtwellenleiterschicht **138** dar. Eine Strombegrenzungsschicht **118** ist aus einer p-Typ-InP-Schicht **118a** und einer n-Typ-InP-Schicht **118b** auf beiden Seiten der Lichtwellenleiterschicht **138** gebildet. Eine Kappenschicht **140** ist aus n-Typ-InP auf der Lichtwellenleiterschicht **138** und der Strombegrenzungsschicht **118** gebildet. Ein AR-(Antireflexions-)Mantelfilm (nicht gezeigt) ist auf beiden Seiten der mesaförmigen Lichtwellenleiterschicht **138** gebildet. Der herkömmliche Halbleiterlichtverstärker hat solch eine Struktur.

[0005] Die Verwendung einer aktiven Quantenmuldenschicht anstelle der aktiven Grundmaterialschicht **124** wird auch vorgeschlagen. Durch die Verwendung der aktiven Quantenmuldenschicht kann die Verstärkungsbandbreite im Vergleich zu der Verwendung der aktiven Grundmaterialschicht verbessert werden.

[0006] Jedoch ist die Verstärkungsbandbreite des herkömmlichen Halbleiterlichtverstärkers unter Verwendung der aktiven Grundmaterialschicht und der aktiven Quantenmuldenschicht klein. Daher kann der herkömmliche Halbleiterlichtverstärker ein WDM-(Wellenlängenmultiplex)-Signal eines Breitbandes nicht auf einmal verstärken.

[0007] Wenn hier mehr Strom in die aktive Grundmaterialschicht und die aktive Quantenmuldenschicht injiziert wird, nehmen die Anzahlen der Elektronen und Löcher zu, die in der aktiven Grundmaterialschicht und der aktiven Quantenschicht gespei-

chert werden, wodurch die Verstärkungsbandbreite erweitert wird. Durch die Zunahme des in die aktive Grundmaterialschicht und die aktive Quantenmuldenschicht injizierten Stroms erhöht sich jedoch die Wärmeenergie, und die Temperaturen der aktiven Grundmaterialschicht und der aktiven Quantenmuldenschicht steigen an. Daher ist dem Erweitern der Verstärkungsbandbreite, indem in die aktive Grundmaterialschicht und die aktive Quantenmuldenschicht mehr Strom injiziert wird, eine Grenze gesetzt.

[0008] Durch das Verringern der Dicke der aktiven Grundmaterialschicht oder das Verringern der Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht verringert sich der Dichtezustand von Trägern pro Einheitsfläche des Strominjektionsbereichs, wodurch das Fermi-Niveau auf die Seite der höheren Energie übergehen kann und die Verstärkungsbandbreite erweitert werden kann. Jedoch wird auch durch das Verringern von z. B. der Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht auf eine Schicht die Verstärkungsbandbreite maximal auf ungefähr 70 nm erweitert.

[0009] Hier ist ein Film mit hoher Reflexion (nicht gezeigt) auf beiden Seitenoberflächen der mesaförmigen Lichtwellenleiterschicht **138** gebildet, um dadurch einen Halbleiterlaser zu bilden. Jedoch haben die herkömmlichen Halbleiterlaser unter Verwendung der aktiven Grundmaterialschicht und der aktiven Quantenmuldenschicht schmale Verstärkungsbandbreiten, und dementsprechend engen sie variable Wellenlängenbereiche ein.

[0010] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist das Vorsehen einer Photohalbleitervorrichtung mit einer breiten Verstärkungsbandbreite und eines Verfahrens zum Herstellen der Photohalbleitervorrichtung.

[0011] Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung ist eine Photohalbleitervorrichtung vorgesehen, die mehrere Quantenpunkte umfasst, wobei die mehreren Quantenpunkte ungleichmäßige Größen aufweisen und in dreidimensional gewachsenen Inseln durch einen S-K-Modus selbstgebildet sind; dadurch gekennzeichnet, dass, wenn die Fläche eines Strominjektionsbereichs A ist und die Gesamtfläche der mehreren Quantenpunkte B ist, das Flächenverhältnis B/A der mehreren Quantenpunkte 0,4 oder weniger beträgt.

[0012] Gemäß einem anderen Aspekt der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Herstellen einer Photohalbleitervorrichtung vorgesehen, mit dem Schritt: Erzeugen mehrerer Quantenpunkte von ungleichmäßiger Größe über ein Halbleitersubstrat, wobei die mehreren Quantenpunkte in dreidimensional gewachsenen Inseln durch einen S-K-Modus selbst-

gebildet sind; dadurch gekennzeichnet, dass die mehreren Quantenpunkte so ausgebildet sind, dass, wenn die Fläche eines Strominjektionsbereichs A ist und die Gesamtfläche der mehreren Quantenpunkte B ist, das Flächenverhältnis B/A der mehreren Quantenpunkte 0,4 oder weniger beträgt.

[0013] Gemäß der vorliegenden Erfindung werden Quantenpunkte von ungleichmäßigen Größen mit einem niedrigen Flächenverhältnis gebildet, wie oben beschrieben, wodurch die Photohalbleitervorrichtung eine breite Verstärkungsbandbreite haben kann.

[0014] Quantenpunktlaser mit selbstgebildeten Quantenpunkten sind bekannt aus den Artikeln "Self-Organised Quantum Dots and Quantum Dot Lasers" von H. Ishikawa et al, S. 794–800, J. Vac. Sci. Technology A16(2), März/April 1998, "In(Ga)As/GaAs Self-Organised Quantum Dot Lasers: DC and Small-Signal Modulation Properties" von P. Bhattacharya et al, IEEE Transactions on Electron Devices", Bd. 46, Nr. 5, Mai 1999, S. 871–883, und "Growth and Optical Properties of Self-Assembled Quantum Dots for Semiconductor Lasers with Confined Electrons and Photons", IEICE Transactions in Electronics, Bd. E. 79-C, Nr. 11, November 1996, S. 1487–1493.

[0015] Zum besseren Verstehen der vorliegenden Erfindung wird nun beispielhaft Bezug auf die beiliegenden Zeichnungen genommen, in denen: –

[0016] [Fig. 1](#) ein Graph ist, der die Dichte von Zuständen in der aktiven Schicht zeigt;

[0017] [Fig. 2](#) ein Graph ist, der die Dichte von Zuständen und Trägerdichten zeigt;

[0018] [Fig. 3](#) ein Graph ist, der Verstärkungskoeffizienten und Besetzungsinversionskoeffizienten zeigt;

[0019] [Fig. 4](#) eine Schnittansicht der Photohalbleitervorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0020] [Fig. 5](#) eine Draufsicht auf die Quantenpunkte der Photohalbleitervorrichtung gemäß der einen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist;

[0021] [Fig. 6](#) ein Graph ist, der ein Verstärkungsspektrum der Photohalbleitervorrichtung gemäß der einen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0022] [Fig. 7A–Fig. 7C](#) und [Fig. 8A–Fig. 8C](#) Schnittansichten der Photohalbleitervorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sind, die die Schritte des Verfahrens zum Herstellen der Photohalbleitervorrichtung zeigen; und

[0023] [Fig. 9](#) eine Schnittansicht eines herkömmlichen Halbleiterlichtverstärkers nach Stand der Technik ist.

[0024] Zuerst wird unter Bezugnahme auf [Fig. 1](#) bis [Fig. 3](#) das Prinzip der vorliegenden Erfindung erläutert.

[0025] In [Fig. 1](#) sind Energien des Trägers an der horizontalen Achse dargestellt und sind Dichten des Zustandes in der aktiven Schicht an der vertikalen Achse dargestellt.

[0026] Wie in [Fig. 1](#) gezeigt, haben Dichten des Zustandes in der aktiven Grundmaterialschiicht eine sanfte Verteilung, wobei die Dichten des Zustandes zu Quadratwurzeln der Trägerenergie proportional sind. Die Dichten des Zustandes in der aktiven Quantenmuldenschiicht haben eine stufenförmige Verteilung.

[0027] Für eine breite Verstärkungsbandbreite in der Photohalbleitervorrichtung wird die Dichte des Zustandes in der aktiven Schicht niedrig eingestellt. Damit die Dichte des Zustandes in der aktiven Grundmaterialschiicht niedrig wird, wird die aktive Grundmaterialschiicht dünn ausgebildet. Damit die Dichte des Zustandes der Träger in der aktiven Quantenmuldenschiicht niedrig ist, wird die Anzahl der Schichten in der aktiven Quantenmuldenschiicht klein gehalten. Jedoch wird selbst durch eine Verringerung der Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschiicht auf eine Schicht, wie oben beschrieben, eine Verstärkungsbandbreite maximal auf ungefähr 70 nm erweitert. Eine Verstärkungsbandbreite mit ausreichender Breite kann nicht erhalten werden.

[0028] Hier werden Quantenpunkte als aktive Schicht verwendet. Die Verwendung von Quantenpunkten als aktive Schicht ermöglicht es, die Dichte des Zustandes in einem Strominjektionsbereich innerhalb einer Einheitsfläche zu verringern, wodurch es möglich wird, eine Verstärkungsbandbreite zu erweitern, ohne dass der in die aktive Schicht injizierte Strom zunimmt.

[0029] Wenn jedoch bloß Quantenpunkte als aktive Schicht verwendet werden, weist die Dichte der Zustandsverteilung einige Verstärkungsspitzen auf, wie in [Fig. 1](#) gezeigt. Aufgrund dessen wird bloß durch die Verwendung von Quantenpunkten keine Photohalbleitervorrichtung mit guten Verstärkungscharakteristiken vorgesehen.

[0030] Die Erfinder der vorliegenden Anmeldung haben bedeutende Studien angefertigt und haben erkannt, dass Quantenpunkte in ungleichmäßigen Größen gebildet werden, um dadurch eine glatte Dichte der Zustandsverteilung wie jene der Träger in der aktiven Grundmaterialschiicht zu erhalten. Quanten-

punkte, die in ungleichmäßigen Größen gebildet sind, verbinden zwischen den Verstärkungsspitzen jeweiliger Energieniveaus, die in der Dichte der Zustandsverteilung in dem Fall erscheinen, wenn Quantenpunkte in gleichmäßiger Größe gebildet sind.

[0031] In der Beschreibung der vorliegenden Anmeldung ist mit Strominjektionsbereich kein gesamter Bereich mit einer darin gebildeten Elektrode (nicht gezeigt) zum Injizieren von Strom gemeint, sondern ein Bereich, wo Strom, der durch die Strombegrenzungsschicht begrenzt wird, tatsächlich in die aktive Schicht injiziert wird.

[0032] In [Fig. 2](#) sind die Energien der Träger an der horizontalen Achse dargestellt und sind die Dichten des Zustandes und Trägerdichten an der vertikalen Achse dargestellt.

[0033] In [Fig. 2](#) kennzeichnet die dünne gestrichelte Linie Dichten des Zustandes pro Einheitsfläche des Strominjektionsbereichs in dem Fall, wenn die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht eins beträgt. Wie durch die dünne gestrichelte Linie in [Fig. 2](#) angegeben ist, sind im Fall der aktiven Quantenmuldenschicht Dichten des Zustandes in Bezug auf die Einheitsfläche des Strominjektionsbereichs relativ hoch.

[0034] Die dünne durchgehende Linie in [Fig. 2](#) kennzeichnet Dichten des Zustandes in Bezug auf die Einheitsfläche des Strominjektionsbereichs in dem Fall, wenn Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen in einem Flächenverhältnis F von 0,1 gebildet sind. Wie durch die dünne durchgehende Linie in [Fig. 2](#) angegeben ist, betragen in dem Fall, wenn Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen mit einem Flächenverhältnis F von 0,1 gebildet sind, Dichten des Zustandes der Träger pro Einheitsfläche des Strominjektionsbereichs ungefähr $1/10$ derer, wenn sich die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht auf eine Schicht beläuft.

[0035] Hier ist das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte das Verhältnis B/A , wobei A eine Fläche des Strominjektionsbereichs ist und B die Gesamtfläche von einer Vielzahl von Quantenpunkten ist, die in dem Strominjektionsbereich gebildet sind. Die Schichtanzahl der Quantenpunkte muss nicht unbedingt 1 betragen, und die Quantenpunkte können über eine Vielzahl von Schichten hinweg gebildet sein. Wenn die Quantenpunkte über zwei Schichten hinweg gebildet sind, die Gesamtfläche der Quantenpunkte, die in einer Schicht in dem Strominjektionsbereich gebildet sind, B_1 ist und eine Gesamtfläche von Quantenpunkten, die in der zweiten Schicht in dem Strominjektionsbereich gebildet sind, B_2 ist, wird ein Flächenverhältnis F der Quantenpunkte ausgedrückt durch $(B_1 + B_2)/A$. Falls die Quantenpunkte über n Schichten hinweg gebildet sind, wird, wenn die

Gesamtfläche der Quantenpunkte, die in der n -ten Schicht in dem Strominjektionsbereich gebildet sind, B_n ist, das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte ausgedrückt durch $(B_1 + B_2 + \dots + B_n)/A$. Wenn das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte 1 ist, stimmt die Dichte des Zustandes pro Einheitsfläche in dem Strominjektionsbereich im Wesentlichen mit den Dichten des Zustandes pro Einheitsfläche in dem Strominjektionsbereich in dem Fall überein, wenn die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht 1 beträgt.

[0036] Wenn Strom in die aktive Schicht injiziert wird, werden Träger, d. h. Elektronen und Löcher, in dem Leitungsband und dem Valenzband gemäß der Fermi-Verteilung gespeichert.

[0037] In [Fig. 2](#) kennzeichnet die dicke gestrichelte Linie Trägerdichten in dem Strominjektionsbereich in dem Fall, wenn die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht 1 beträgt. Wie durch die dünne gestrichelte Linie in [Fig. 2](#) angegeben ist, sind im Falle der aktiven Quantenmuldenschicht die Dichten des Zustandes pro Einheitsfläche in dem Strominjektionsbereich relativ hoch. Daher ist, wie durch die dicke gestrichelte Linie in [Fig. 2](#) angegeben ist, die Energieverteilung der Träger relativ schmal.

[0038] In [Fig. 2](#) kennzeichnet die dicke durchgehende Linie Trägerdichten in dem Strominjektionsbereich in dem Fall, wenn die Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen in einem Flächenverhältnis F von 0,1 gebildet sind. Wie durch die dünne durchgehende Linie in [Fig. 2](#) angegeben ist, sind in dem Fall, wenn die Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen in einem Flächenverhältnis F von 0,1 gebildet sind, die Dichten des Zustandes der Träger in jeder Einheitsfläche in dem Strominjektionsbereich niedrig. Daher ist, wie durch die dicke durchgehende Linie in [Fig. 2](#) angegeben ist, die Energieverteilung der Träger sehr breit.

[0039] In [Fig. 3](#) sind Energien von Photonen an der horizontalen Achse dargestellt und sind Verstärkungskoeffizienten und Besetzungsinversionskoeffizienten an der vertikalen Achse dargestellt.

[0040] Die dicke gestrichelte Linie in [Fig. 3](#) kennzeichnet den Verstärkungskoeffizienten in dem Fall, wenn die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht 1 beträgt. Der Verstärkungskoeffizient ist gegeben durch $dP/dZ = gP$, wobei P die Lichtenergie ist und Z die Ausbreitungsrichtung ist. Wie durch die dicke gestrichelte Linie in [Fig. 3](#) angegeben ist, ist im Falle der aktiven Quantenmuldenschicht die Breite des Verstärkungsspektrums relativ schmal, auch wenn die Schichtanzahl 1 beträgt.

[0041] In [Fig. 3](#) gibt die dicke durchgehende Linie Verstärkungskoeffizienten in dem Fall an, wenn die

Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen in einem Flächenverhältnis F von 0,1 gebildet sind. Wie durch die dicke durchgehende Linie in [Fig. 3](#) angegeben ist, ist die Breite des Verstärkungsspektrums sehr breit, wenn die Quantenpunkte mit gleichmäßiger Größe in einem Flächenverhältnis F von 0,1 gebildet sind.

[0042] Somit wird festgestellt, dass die Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen in einem niedrigen Flächenverhältnis F gebildet sind, wodurch eine Photohalbleitervorrichtung mit breitem Verstärkungsband vorgesehen wird.

[0043] Die dünne gestrichelte Linie in [Fig. 3](#) kennzeichnet Besetzungsinversionskoeffizienten in dem Fall, wenn die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht 1 beträgt. Wie durch die dünne gestrichelte Linie in [Fig. 3](#) angegeben ist, ist im Falle der aktiven Quantenmuldenschicht der Energiebereich der kleinen Besetzungsinversionskoeffizienten relativ schmal.

[0044] Der Besetzungsinversionskoeffizient wird ausgedrückt durch $F_c/(F_c - F_v)$, wobei eine Häufigkeitswahrscheinlichkeit von Elektronen in dem Leitungsband F_c ist und eine Häufigkeitswahrscheinlichkeit von Elektronen in dem Valenzband F_v ist. Wenn der Energiebereich von kleinen Besetzungsinversionskoeffizienten breiter wird, verbessern sich die Rauschcharakteristiken.

[0045] Die dünne durchgehende Linie in [Fig. 3](#) kennzeichnet Besetzungsinversionskoeffizienten in der Fläche, wo die Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen in einem Flächenverhältnis F von 0,1 gebildet sind. Wie durch die dünne durchgehende Linie in [Fig. 3](#) angegeben ist, wird in dem Fall, wenn Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen in einem Flächenverhältnis F von 0,1 gebildet sind, der Energiebereich von kleinen Besetzungsinversionskoeffizienten sehr breit.

[0046] Somit wird festgestellt, dass Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen mit einem niedrigen Flächenverhältnis F gebildet sind, wodurch eine Photohalbleitervorrichtung mit guten Rauschcharakteristiken vorgesehen wird.

[0047] Wie oben beschrieben, sind die Quantenpunkte mit ungleichmäßigen Größen in einem niedrigen Flächenverhältnis F gebildet, wodurch eine Photohalbleitervorrichtung mit breitem Verstärkungsband und guten Rauschcharakteristiken vorgesehen wird, ohne die Strominjektion in die aktive Schicht zu erhöhen.

[0048] Unter Bezugnahme auf [Fig. 4](#) bis [Fig. 8C](#) werden nun die Photohalbleitervorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung und

das Verfahren zum Herstellen der Halbleitervorrichtung beschrieben.

[0049] In der vorliegenden Ausführungsform wird das Prinzip der vorliegenden Erfindung auf einen Halbleiterlichtverstärker angewendet. Das Prinzip der vorliegenden Erfindung ist jedoch nicht auf die Anwendung auf Halbleiterlichtverstärker begrenzt und ist auf beliebige andere Photohalbleitervorrichtungen anwendbar, wie beispielsweise auf Halbleiterlaser.

(Photohalbleitervorrichtung)

[0050] Wie in [Fig. 4](#) gezeigt, ist eine Deckschicht **12** aus n-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ auf einem Halbleitersubstrat **10** aus n-Typ-GaAs gebildet.

[0051] Eine Strombegrenzungsschicht **14** aus Al_2O_3 und eine Stromdurchgangsschicht **16** aus AlAs sind auf der Deckschicht **12** gebildet.

[0052] Eine n-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **18** ist auf der Strombegrenzungsschicht **14** und der Stromdurchgangsschicht **16** gebildet.

[0053] Eine SCH-(Separate Confinement Heterostructure)-Schicht **20** aus GaAs ist auf der n-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **18** gebildet.

[0054] Eine InAs-Schicht **24** mit einer Vielzahl von selbstgebildeten Quantenpunkten mit ungleichmäßigen Größen ist auf der SCH-Schicht **20** gebildet. Die Quantenpunkte **22** können z. B. im Stranski-Krastanow-Modus (nachfolgend als "S-K-Modus" bezeichnet) gebildet sein. Im S-K-Modus wachsen Halbleiterkristalle, die epitaktisch wachsen sollen, zu Beginn des Wachsens zweidimensional (im Film) und, wenn das Wachsen die elastische Grenze des Films überschritten hat, dreidimensional. Zur Selbstbildung der Quantenpunkte **22** in dreidimensional gewachsenen Inseln durch den S-K-Modus muss ein Film mit einer größeren Gitterkonstante als jener des Materials des Basisfilms gebildet werden. Im Allgemeinen wird der S-K-Modus verwendet, der die Selbstbildung einfach erleichtern kann.

[0055] Wie in [Fig. 5](#) gezeigt, haben die Quantenpunkte **22** ungleichmäßige Größen. Die Größen der Quantenpunkte **22** werden ungleichmäßig gemacht, um eine glatte Dichte der Zustandsverteilung zu erhalten, wie oben beschrieben.

[0056] Das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** beträgt z. B. 0,1. Denn wenn das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** solch einen niedrigen Wert wie 0,1 hat, wie oben beschrieben, kann die Photohalbleitervorrichtung eine breite Verstärkungsbandbreite haben.

[0057] Das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** ist nicht unbedingt auf 0,1 begrenzt. Zum Beispiel kann ein Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** innerhalb eines Bereiches von kleiner als 1, wobei 1 ausgenommen ist, zweckmäßig festgelegt werden. Indem ein Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** kleiner als 1 wird, wobei 1 ausgenommen ist, kann die Dichte des Zustandes pro Einheitsfläche in dem Strominjektionsbereich **26** niedriger werden als wenn die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht 1 beträgt. Daher wird es durch ein Flächenverhältnis der Quantenpunkte **22** von kleiner als 1 möglich, das Verstärkungsband breiter als wenigstens jenes in dem Fall zu bilden, wenn die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht 1 beträgt.

[0058] Es ist vorzuziehen, das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** auf 0,4 oder weniger festzulegen. Indem ein Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** auf 0,4 oder weniger festgelegt wird, kann die Verstärkungsbandbreite mehr erweitert werden.

[0059] Ferner wird das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** vorzugsweise auf etwa 0,1 festgelegt. Das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** wird auf lediglich etwa 0,1 festgelegt, wodurch das Verstärkungsband viel breiter werden kann.

[0060] Eine SCH-Schicht **28** aus GaAs ist auf der InAs-Schicht **24** gebildet. Eine p-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **30** ist auf der SCH-Schicht **28** gebildet.

[0061] Eine Strombegrenzungsschicht **32** aus Al_2O_3 und eine Stromdurchgangsschicht **34** aus AlAs sind auf der p-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **30** gebildet.

[0062] Eine Deckschicht **36** aus p-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ ist auf der Strombegrenzungsschicht **32** und der Stromdurchgangsschicht **34** gebildet.

[0063] Die Schichtfilme der Deckschicht **36**, der Strombegrenzungsschicht **32**, der p-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **30**, der SCH-Schicht **28**, der InAs-Schicht **24**, der SCH-Schicht **20**, der n-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **18**, der Strombegrenzungsschicht **14** und der Deckschicht **12** werden im Allgemeinen zu einer Mesaform geätzt. So wird eine Lichtwellenleiterschicht **38** gebildet.

[0064] Ein AR-Mantelfilm (nicht gezeigt) ist auf beiden Endoberflächen der Lichtwellenleiterschicht **38** gebildet.

[0065] Die Photohalbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Ausführungsform ist hauptsächlich dadurch gekennzeichnet, dass die Quantenpunkte **22** mit ungleichmäßigen Größen in einem niedrigen Flächenverhältnis F gebildet sind.

[0066] Gemäß der vorliegenden Ausführungsform wird die aktive Schicht durch die Quantenpunkte **22** vorgesehen und wird ein Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** niedrig festgelegt, wobei die Dichte des Zustandes in jeder Einheitsfläche in dem Strominjektionsbereich **26** niedrig sein kann. Gemäß der vorliegenden Ausführungsform sind die Quantenpunkte **22** mit ungleichmäßigen Größen gebildet, wodurch eine abgestumpfte Dichte der Zustandsverteilung erhalten werden kann. Somit kann die Photohalbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Ausführungsform eine breite Verstärkungsbandbreite und gute Rauschcharakteristiken haben.

[0067] Durch das Verringern des Flächenverhältnisses F der Quantenpunkte **22** wird die Verstärkung im Allgemeinen reduziert. Eine Verlängerung der Lichtwellenleiterschicht **38** kann jedoch ausreichende Verstärkungen gewährleisten.

(Auswertungsergebnis)

[0068] In [Fig. 6](#) sind die Energien von Photonen an der horizontalen Achse dargestellt und sind Leistungen an der vertikalen Achse dargestellt. Beispiel 1 gibt das Verstärkungsspektrum einer Photohalbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Ausführungsform an, und zwar speziell ein Verstärkungsspektrum in dem Fall, wenn ein Flächenverhältnis F der Quantenpunkte 0,1 ist. Steuerung 1 gibt das Verstärkungsspektrum der Photohalbleitervorrichtung in dem Fall an, wenn die Schichtanzahl der aktiven Quantenmuldenschicht 1 beträgt.

[0069] Wie durch Steuerung 1 angegeben ist, beläuft sich in der Photohalbleitervorrichtung unter Verwendung der aktiven Quantenmuldenschicht eine Halbwertsbreite des Spitzenwertes des Verstärkungsspektrums etwa 0,03 eV und ist somit relativ schmal.

[0070] Im Gegensatz dazu werden in der Photohalbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Ausführungsform kontinuierliche Spektren in dem Bereich von 0,9 eV bis 1,2 eV erhalten. Die Halbwertsbreite der Spitze des Verstärkungsspektrums beträgt 0,17 eV und ist somit sehr breit.

[0071] Daher kann gemäß der vorliegenden Ausführungsform das Verstärkungsband immerhin eine Breite von etwa 400 nm bis 600 nm haben. Die Photohalbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Ausführungsform kann ein sehr breites Verstärkungsband haben, das sich bis auf über 50 THz erstreckt. So können gemäß der vorliegenden Ausführungsform WDM-Signale von Breitbändern durch eine Photohalbleitervorrichtung auf einmal verstärkt werden, wodurch zu einer rigorosen Vereinfachung der Systeme und zu niedrigeren Kosten beigetragen wird.

(Verfahren zum Herstellen der Photohalbleitervorrichtung)

[0072] Wie in [Fig. 7A](#) gezeigt, wird die Deckschicht **12** aus n-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ in einer Dicke von 1200 nm durch MBE (Wachsen durch Molekularstrahlepitaxie) auf der gesamten Oberfläche eines Halbleitersubstrats **10** aus n-Typ-GaAs gebildet.

[0073] Dann wird, wie in [Fig. 7B](#) gezeigt, eine AlAs-Schicht **13** in einer Dicke von 80 nm auf der gesamten Oberfläche durch MBE gebildet.

[0074] Danach wird die n-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **18** in einer Dicke von 150 nm auf der gesamten Oberfläche durch MBE gebildet.

[0075] Als Nächstes wird, wie in [Fig. 7C](#) gezeigt, die SCH-Schicht **20** aus GaAs in einer Dicke von 100 nm auf der gesamten Oberfläche durch MBE gebildet.

[0076] Dann wird die InAs-Schicht **24** auf der gesamten Oberfläche durch MBE gebildet. Da InAs eine größere Gitterkonstante als GaAs hat, das die SCH-Schicht **20** bildet, können die Quantenpunkte **22** durch den S-K-Modus selbstgebildet werden. Bedingungen zum Bilden der InAs-Schicht **24** sind eine Substrattemperatur von z. B. 510°C, eine InAs-Zufuhrmenge von z. B. 1,5 ml und eine Wachzeit von 250 Sekunden. Die unter diesen Bedingungen gewachsene InAs-Schicht **24** hat ein Flächenverhältnis F von z. B. etwa 0,1, und die Quantenpunkte **22** haben ungleichmäßige Größen.

[0077] Die Bedingungen zum Bilden der Quantenpunkte **22** in ungleichmäßigen Größen sind nicht auf die obigen begrenzt.

[0078] Größen der Quantenpunkte **22** tendieren zur Ungleichmäßigkeit, wenn eine Wachrate hoch ist und die Substrattemperatur niedrig ist. Die Wachrate zum Bilden der InAs-Schicht **24** wird reduziert, Zufuhrmengen der Rohmaterialien der InAs-Schicht **24** werden verringert, und die Substrattemperatur wird auf einen hohen Wert gesetzt, wobei das Flächenverhältnis F der Quantenpunkte **22** dazu tendiert, niedrig zu sein.

[0079] Dementsprechend werden die Wachrate und die Rohmaterialzufuhrmengen der InAs-Schicht **24**, die Substrattemperatur, etc. zweckmäßig festgelegt, wodurch die Quantenpunkte **22** mit ungleichmäßigen Größen in einem erforderlichen Flächenverhältnis F gebildet werden können.

[0080] Dann wird, wie in [Fig. 8A](#) gezeigt, die SCH-Schicht **28** aus GaAs in einer Dicke von 100 nm auf der gesamten Oberfläche durch MBE gebildet.

[0081] Als Nächstes wird die

p-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **30** in einer Dicke von 150 nm auf der gesamten Oberfläche durch MBE gebildet.

[0082] Als Nächstes wird, wie in [Fig. 8B](#) gezeigt, die AlAs-Schicht **31** in einer Dicke von 80 nm auf der gesamten Oberfläche durch MBE gebildet.

[0083] Dann wird die Deckschicht **36** aus p-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ in einer Dicke von 1200 nm auf der gesamten Oberfläche durch MBE gebildet.

[0084] Als Nächstes wird, wie in [Fig. 8C](#) gezeigt, der Schichtfilm der Deckschicht **36**, der AlAs-Schicht **31**, der p-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **30**, der SCH-Schicht **28**, der InAs-Schicht **24**, der SCH-Schicht **20**, der n-Typ- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ -Schicht **18**, der AlAs-Schicht **13** und der Deckschicht **12** zu einer Mesaform geätzt. Dadurch wird eine Lichtwellenleiterschicht **38** gebildet.

[0085] Dann werden die AlAs-Schichten **13**, **31** in dem Teil der Lichtwellenleiterschicht **38**, ihren zentralen Teil ausgenommen, oxidiert, um die Strombegrenzungsschichten **14**, **32** aus Al_2O_3 zu bilden. Die AlAs-Schichten **13**, **31** in dem Teil, der nicht oxidiert worden ist, bilden die Stromdurchgangsschichten **16**, **34**.

[0086] Dann wird ein AR-Mantelfilm (nicht gezeigt) auf beiden Endoberflächen der Lichtwellenleiterschicht **38** gebildet.

[0087] So wird eine Photohalbleitervorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung hergestellt.

[Abwandlungen]

[0088] Die vorliegende Erfindung ist nicht auf die oben beschriebene Ausführungsform begrenzt und kann verschiedenartige andere Abwandlungen einschließen.

[0089] Zum Beispiel wird in der oben beschriebenen Ausführungsform das Prinzip der vorliegenden Erfindung auf den Halbleiterlichtverstärker angewendet. Das Prinzip der vorliegenden Erfindung ist, wie oben beschrieben, nicht nur auf Halbleiterlichtverstärker anwendbar, sondern auch auf beliebige andere Photohalbleitervorrichtungen, wie etwa Halbleiterlaser. Wenn das Prinzip der vorliegenden Erfindung auf Halbleiterlaser angewendet wird, können die Halbleiterlaser einen breiten variablen Wellenlängenbereich haben.

[0090] In der oben beschriebenen Ausführungsform sind die Quantenpunkte in einer Schicht gebildet. Die Quantenpunkte müssen jedoch nicht unbedingt in einer Schicht gebildet sein und können über eine Vielzahl von Schichten hinweg gebildet sein.

[0091] In der oben beschriebenen Ausführungsform ist das Material des Halbleitersubstrats ein Material auf GaAs-Basis. Das Material des Halbleitersubstrats, etc. ist jedoch nicht auf Materialien auf GaAs-Basis begrenzt und kann ein Material auf InP-Basis sein.

Patentansprüche

1. Photohalbleitervorrichtung, die mehrere Quantenpunkte (22) umfasst, wobei die mehreren Quantenpunkte (22) ungleichmäßige Größen aufweisen und in dreidimensional gewachsenen Inseln durch einen S-K-Modus selbstgebildet sind,

dadurch gekennzeichnet, dass, wenn die Fläche eines Strominjektionsbereichs (26) A ist und die Gesamtfläche der mehreren Quantenpunkte (22) B ist, das Flächenverhältnis B/A der mehreren Quantenpunkte (22) 0,4 oder weniger beträgt.

2. Photohalbleitervorrichtung nach Anspruch 1, bei der das Flächenverhältnis B/A der mehreren Quantenpunkte (22) 0,1 beträgt.

3. Photohalbleitervorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, bei der die Quantenpunkte (22) auf einer SCH-Schicht (20) ausgebildet sind und die Gitterkonstante eines Materials der Quantenpunkte (22) größer als die eines Materials der SCH-Schicht (20) ist.

4. Photohalbleitervorrichtung nach Anspruch 1, 2 oder 3, bei der die Quantenpunkte (22) aus InAs ausgebildet sind und die SCH-Schicht (20) aus GaAs ausgebildet ist.

5. Photohalbleitervorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei der die Quantenpunkte (22) eine aktive Schicht aus einem Halbleiterlichtverstärker sind.

6. Photohalbleitervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei der die Quantenpunkte (22) eine aktive Schicht aus einem Halbleiterlaser sind.

7. Verfahren zur Herstellung einer Photohalbleitervorrichtung mit den Schritten:

Erzeugen mehrerer Quantenpunkte (22) von ungleichmäßiger Größe über ein Halbleitersubstrat (10), wobei die mehreren Quantenpunkte (22) in dreidimensional gewachsenen Inseln durch einen S-K-Modus selbstgebildet sind, dadurch gekennzeichnet, dass die mehreren Quantenpunkte (22) so ausgebildet sind, dass, wenn die Fläche eines Strominjektionsbereichs (26) A ist und die Gesamtfläche der mehreren Quantenpunkte (22) B ist, das Flächenverhältnis B/A der mehreren Quan-

tenpunkte (22) 0,4 oder weniger beträgt.

8. Verfahren zur Herstellung einer Photohalbleitervorrichtung nach Anspruch 7, bei dem im Schritt der Erzeugung von mehreren Quantenpunkten (22) die mehreren Quantenpunkte so erzeugt werden, dass das Flächenverhältnis B/A der mehreren Quantenpunkte (22) 0,1 beträgt.

9. Verfahren zur Herstellung einer Photohalbleitervorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, das ferner den Schritt umfasst:

Erzeugen einer SCH-Schicht (20) aus einem Material mit einer Gitterkonstante, die kleiner als die der Quantenpunkte (22) ist, über dem Halbleitersubstrat (10) vor dem Schritt der Erzeugung von Quantenpunkten (22).

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

FIG. 1

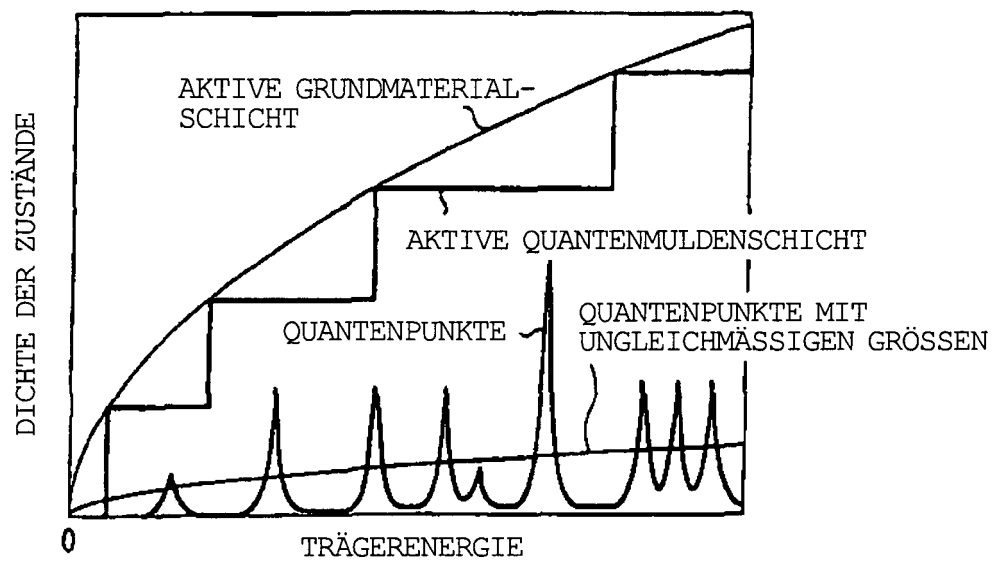
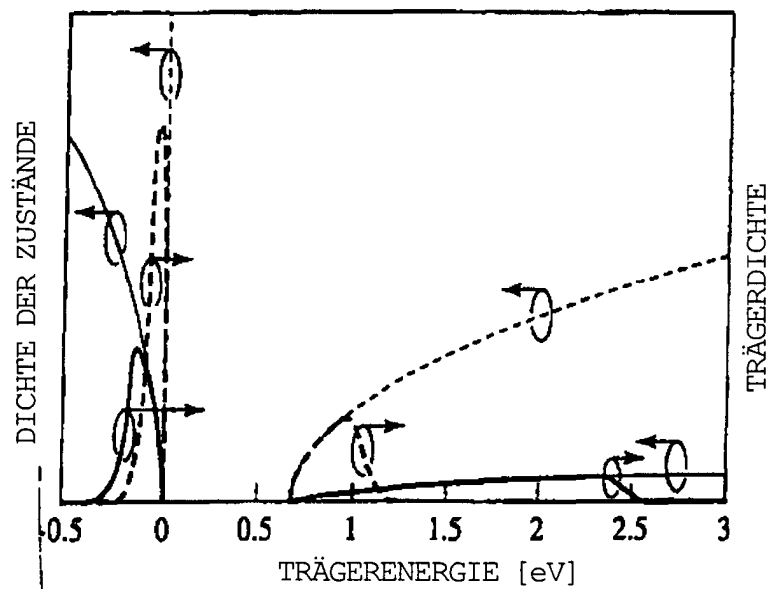
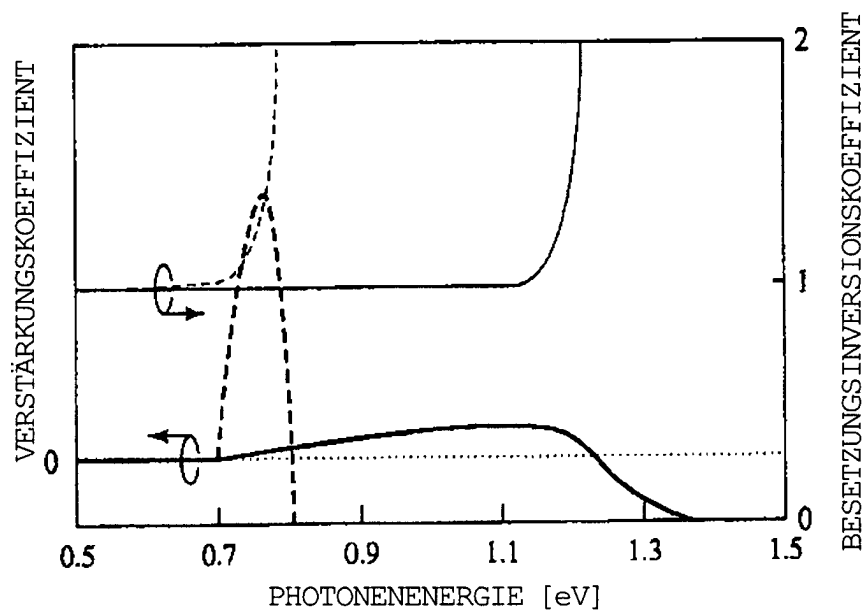


FIG. 2



- :QUANTENPUNKTE (F=0,1)
- - - :AKTIVE QUANTENMULDENSCHICHT (1 SCHICHT)
- :QUANTENPUNKTE (F=0,1)
- - - :AKTIVE QUANTENMULDENSCHICHT (1 SCHICHT)

FIG. 3



- : QUANTENPUNKTE ($F=0,1$)
- - - - - : AKTIVE QUANTENMULDENSCHICHT (1 SCHICHT)
- : QUANTENPUNKTE ($F=0,1$)
- - - - - : AKTIVE QUANTENMULDENSCHICHT (1 SCHICHT)

FIG. 4

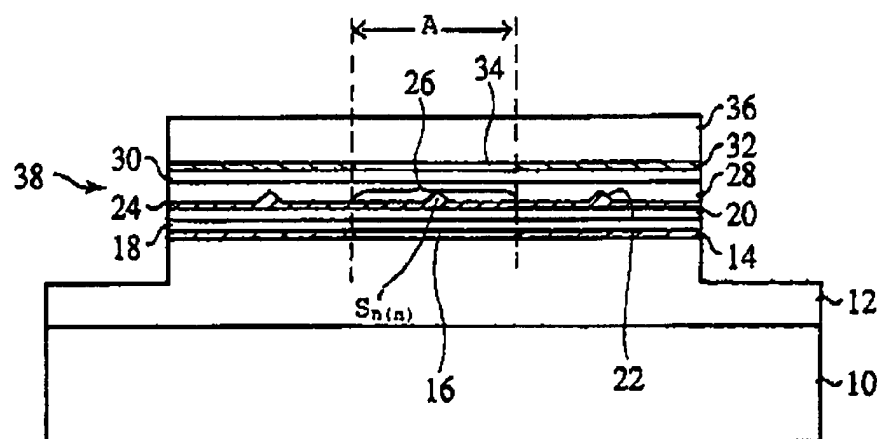
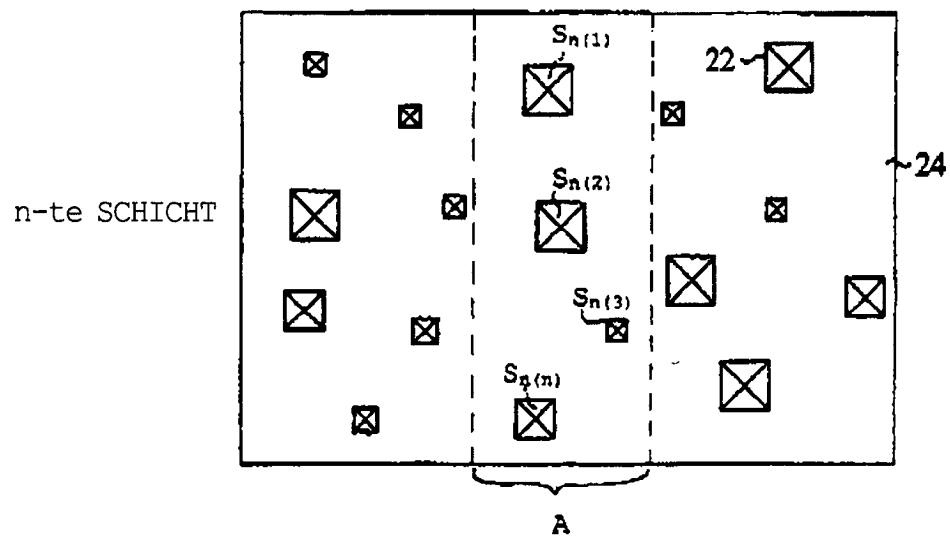


FIG. 5



$$n\text{-te SCHICHT: } B_n = S_{n(1)} + S_{n(2)} + S_{n(3)} + \dots + S_{n(n)}$$

$$\text{GESAMTSCHICHT: } B = B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_n$$

FIG. 6

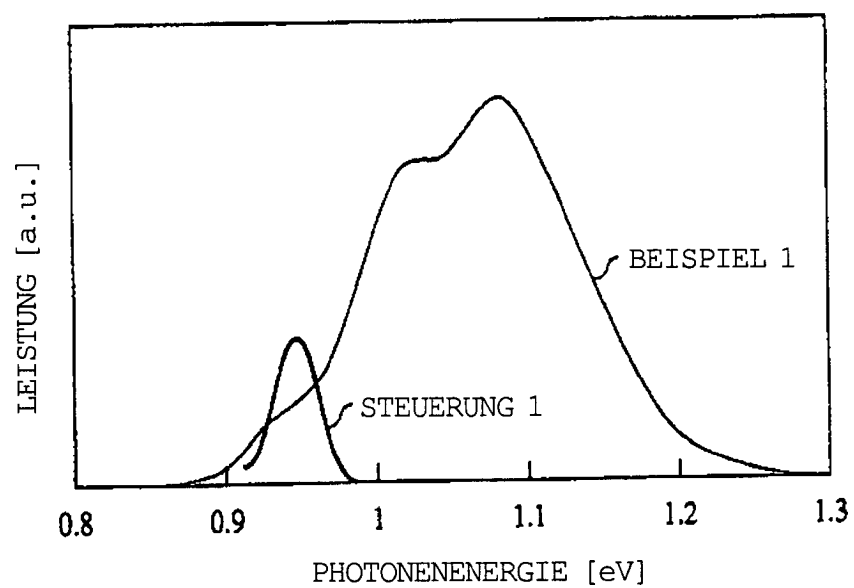


FIG. 7A

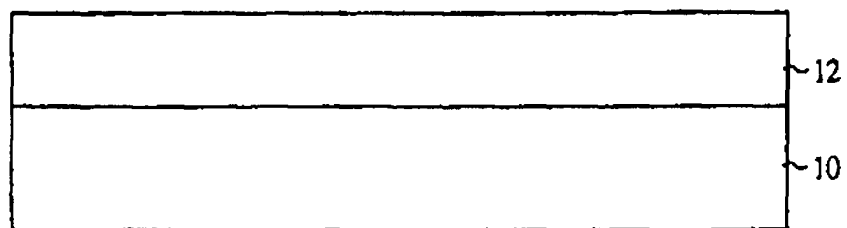


FIG. 7B

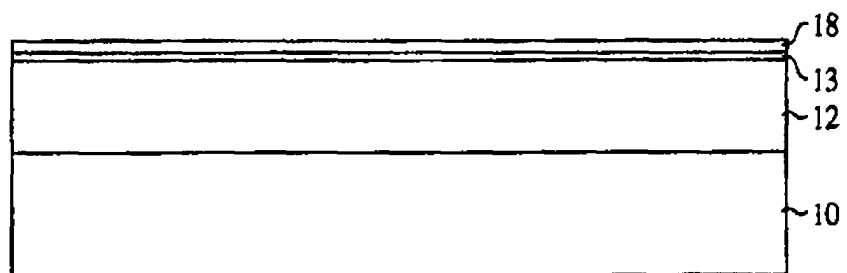


FIG. 7C

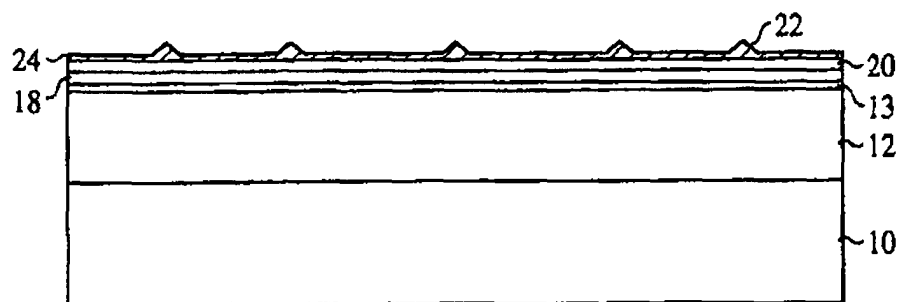


FIG.8A

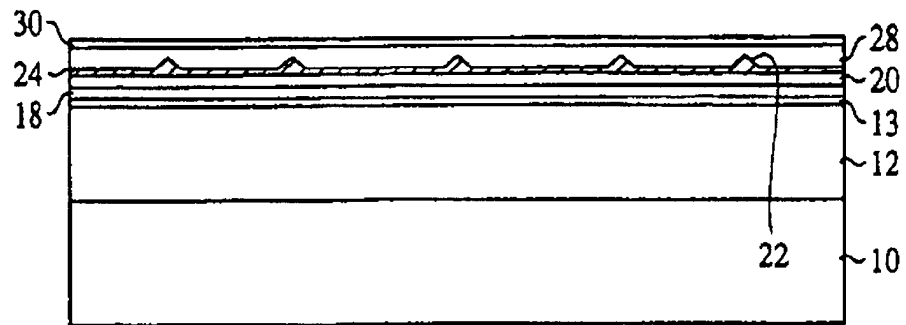


FIG.8B

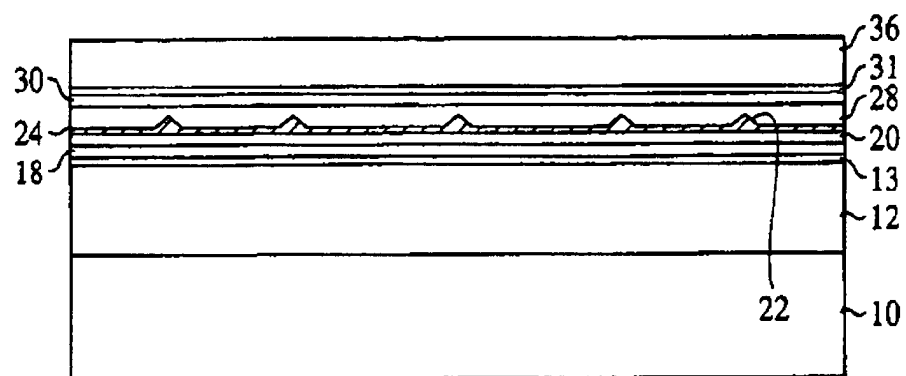


FIG.8C

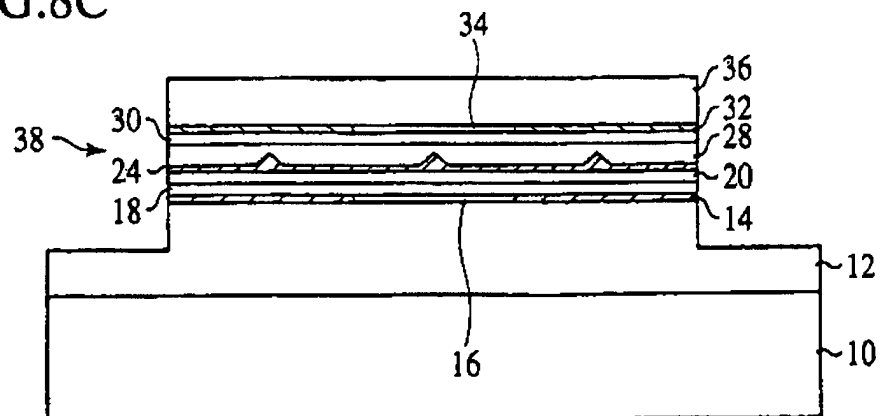


FIG. 9

