



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 696 36 110 T2** 2007.04.19

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 731 510 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **696 36 110.8**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **96 301 594.6**

(96) Europäischer Anmeldetag: **08.03.1996**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **11.09.1996**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **10.05.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **19.04.2007**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01L 31/0352** (2006.01)  
**H01L 33/00** (2006.01)

(30) Unionspriorität:

**9504666      08.03.1995      GB**

(73) Patentinhaber:

**Sharp K.K., Osaka, JP**

(74) Vertreter:

**Müller - Hoffmann & Partner Patentanwälte, 81667  
München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, FR, GB**

(72) Erfinder:

**Duggan, Geoffrey, Deddington, Oxon OX15 0SJ,  
GB; Rorison, Judy Megan, Cheltenham, Glos.  
GL54 5SP, GB; Teraguchi, Nobuaki, Abeno-ku,  
Osaka 545, JP; Tomomura, Yoshitaka, Abeno-ku,  
Osaka 545, JP**

(54) Bezeichnung: **Halbleitervorrichtung mit einem Miniband**

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 Erfindung betrifft eine optoelektronische Halbleiterlaserdiodenvorrichtung mit einem Miniband. Ein derartiges Miniband verbessert den Ladungsträgertransport innerhalb der Vorrichtung. Insbesondere verbessert das Miniband den Betrieb von Halbleiterlichtquellen, Modulatoren und Detektoren, die im grünen oder blauen Bereich des elektromagnetischen Spektrums betrieben werden.

**[0002]** Forscher auf dem Gebiet optoelektronischer Halbleitervorrichtungen haben mögliche Wege zur Bereitstellung von Lichtquellen im blau-grünen optischen Bereich untersucht. Über die Eigenschaften von II-VI Verbindungshalbleitern als Materialien für das Führungsgebiet und Claddinggebiet wurde berichtet.

**[0003]** Über anfängliche Forschungsergebnisse an optischen Vorrichtungen im blau-grünen Bereich wurde basierend auf der Verwendung von ZnSe und  $\text{ZnS}_{0.07}\text{Se}_{0.93}$  als Materialien für das Führungsgebiet und das Claddinggebiet berichtet („Blue-green laser diodes“, M.A. Haase et al., Appl. Phys. Lett. 59, S. 1272). Manche Forscher berichteten, dass ein an GaAs vom Gitter her angepasstes  $\text{ZnS}_{0.07}\text{Se}_{0.93}$  Führungsgebiet und ein ZnMgSSe Claddinggebiet zur Reduzierung des Schwellstroms und zur Verkleinerung der Laserwellenlänge erforderlich sind („Room temperature continuous operation of blue-green laser diode“, N. Nakayama et al., Electron. Lett. 29, S. 1488).

**[0004]** Möglicherweise limitiert der starke Abfall der Netto-Akzeptorkonzentration (Na-Nd) mit zunehmender Energiebandlücke in ZnMgSSe, das als geeignetes Material zur Reduzierung des Schwellstroms und der Verkürzung der Laserwellenlänge betrachtet wurde, den Schwellstrom und die Laserwellenlänge. Die kürzeste Laserwellenlänge, die der Anmelderin bekannt ist, beträgt 489.9nm und die Schwellstromdichte liegt bei  $1.5\text{kA/cm}^2$  für Dauerbetrieb bei Raumtemperatur („Continuous-wave operation of 489.9nm blue laser diode at room temperature“, N. Nakayama et al., Electron. Lett. 29, S. 2164).

**[0005]** Um einen erheblichen Abfall der Netto-Akzeptorkonzentration (Na-Nd) zu vermeiden und die Dotiereffizienz zu verbessern, wurde die Verwendung einer Modulationsdotiertechnik vorgeschlagen („Doping in a superlattice structure: improved hole activation in wide-gap II-VI materials“, I. Suemune, J. Appl. Phys. 67, S. 2364). Ebenso wurde eine weitere Technik zur Einführung einer Übergitterstruktur vorgeschlagen („One-hour-long blue temperature GW operation of ZnMgSSe-based blue-green laser diodes“ A. Ishibashi et al., 7th annual meeting on the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (1994)).

**[0006]** Seitens der Forscher wurde es als schwierig erachtet, blaue Laserdioden mit einer Wellenlänge von weniger als 480nm sowie Dauerbetrieb bei Raumtemperatur zu erzielen, selbst wenn eine an GaAs vom Gitter her angepasste ZnMgSSe Claddingschicht eingesetzt wird.

**[0007]** [Fig. 1](#) zeigt das Energieniveaudiagramm einer bekannten Separate-Confinement-Heterostruktur (SCH)-Laserdiode (LD) mit einem undotierten aktiven Gebiet **2**, in dem Ladungsträger, Elektronen und Löcher, zur Emission von Licht mit einer durch die Energiebandlücke zwischen Leitungsband und Valenzband bestimmten Wellenlänge rekombinieren. Das aktive Gebiet **2** kann ein einzelner Quantentopf (SQW) sein oder auch eine Mehrfach-Quantentopf(MQW)-Struktur mit Barrieren, die die Töpfe trennen. Führungsgebiete **3** und dotierte Claddinggebiete **4** wirken als Einschlussbarrieren für die in dem aktiven Gebiet **2** enthaltenen Ladungsträger. Die Führungsgebiete **3** weisen einen höheren Brechungsindex als die Claddinggebiete auf und dienen zur Führung der optischen Wellen. In bekannten LEDs wird auf die Führungsgebiete verzichtet.

**[0008]** Zur Verkürzung der Laserwellenlänge ist es erforderlich, die Energiebandlücke des aktiven Gebiets zu vergrößern. Es ist deshalb erforderlich die Energiebandlücke der durch die Gebiete **3** und **4** definierten Einschlussbarrieren zu vergrößern, da ansonsten die Banddiskontinuität zwischen dem aktiven Gebiet und den Gebieten **3** und **4** verkleinert wird, was zur Vergrößerung des Ladungsträgerüberschusses und infolge dessen zur Vergrößerung des Schwellstroms führt.

**[0009]** Die Quaternärverbindung ZnMgSSe wird als aussichtsreiches Material zur Verkleinerung des Schwellstroms und zur Verkürzung der Laserwellenlänge betrachtet. Jedoch wurde, wie oben erwähnt, eine rapide Abnahme der Netto-Akzeptorkonzentration (Na-Nd) mit zunehmender Energiebandlücke in ZnMgSSe berichtet. Dies bedeutet, dass es schwierig ist ZnMgSSe Schichten mit einer guten Leitfähigkeit und vergleichsweise großer Energiebandlücke zu erzielen. ZnMgSSe mit einer verhältnismäßig großen Energiebandlücke enthält verhältnismäßig große Mengen an S und Mg, was zu einer schlechten Zinkblende-Kristallqualität führen kann, da die chemische Zusammensetzung sich dem MgS annähert und die stabile Kristallstruktur für MgS eine Steinsalzstruktur ist.

**[0010]** Zur Kompensation des rapiden Abfalls der Netto-Akzeptorkonzentration und zur Verbesserung der Dotiereffizienz wurde die Verwendung einer Modulationsdotiertechnik von Suemune (siehe oben) vorgeschlagen. Bei diesem Vorschlag findet der Ladungsträgertransport durch einen als Hopping bezeichneten Mechanismus statt, siehe [Fig. 2](#).

**[0011]** Die Modulationsdotierung beabsichtigt die Anzahl freier Löcher in dem Valenzband der Quantentöpfe **10** eines ZnSe/ZnSSe Mehrfach-Quantentopfsystems zu vergrößern. In einem derartigen II–VI System ist die Aktivierungsenergie  $E_a$  der Akzeptoren sehr groß und liegt im Bereich von 110–150 meV. Folglich ist die Ansammlung thermisch aktivierter freier Löcher sehr klein. Die Ansammlung von freien Löchern in dem p-Typ ZnSe ist von entscheidender Bedeutung, zumal der Widerstand  $r$  des Materials durch

$$r = \frac{1}{q\mu p}$$

gegeben ist mit

$q$  = Elektronenladung  
 $\mu$  = Löcherbeweglichkeit ( $\approx 30 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ )  
 $p$  = Löcherkonzentration.

**[0012]** Demnach ist zur Realisierung eines geringen Widerstands und damit zur Reduzierung des Leistungsverbrauchs innerhalb der Vorrichtung eine Erhöhung der Löcherkonzentration wünschenswert. Suemune berechnete, dass die freie Löcherkonzentration für ein dotiertes Übergitter mit einer Periode von 60 Å um ungefähr 4 bis 5 Mal vergrößert werden könnte. Während sich jedoch Löcher frei parallel zu den Quantentöpfen **10** bewegen können, ist ein Transport senkrecht zu den Quantentöpfen nicht derart begünstigt, da die Löcher über die Quantentöpfe hüpfen müssen. Leider ist es der Transport von Löchern senkrecht zur Richtung der Quantentöpfe, der für den Betrieb vieler optoelektronischer Vorrichtungen wie LEDs, Lasern, Detektoren und Modulatoren von Bedeutung ist. Somit besteht tatsächlich die Möglichkeit, dass die von Suemune beschriebene Modulationsdotierung den Transportprozess entlang der Richtung senkrecht zu den Quantentöpfen verschlechtern könnte, da die Quantentöpfe als Haftstellen für Ladungsträger (Löcher) wirken können, die sich wie in [Fig. 2](#) gezeigt darin niederlassen können. Die thermische Aktivierung von Löchern aus den Quantentöpfen wird durch die Pfeile **12** gekennzeichnet und das Niederlassen der Löcher in die Quantentöpfe wird durch die Pfeile **14** gekennzeichnet. Die relativen Größen der Pfeile stellen schematisch die Wahrscheinlichkeit jedes Ereignisses dar, wobei ein wahrscheinlicheres Ereignis durch größere Pfeile gekennzeichnet ist. [Fig. 2](#) kennzeichnet ebenso das Energieniveau **6** des ersten eingeschlossenen Quantenzustands innerhalb jedes Topfes und die Energieniveaus **7** und **8** von Dotiermaterialien (Akzeptoren) innerhalb des jeweiligen Topfes und der Barrierenmaterialien.

**[0013]** EP-A-0334759 beschreibt einen unipolaren Halbleiterlaser im GaAs/AlGaAs System, bei dem die Laserstruktur Zwischen-Subbandübergänge zwischen Minibändern im Leitungsband eines Halbleiters beinhaltet. In einer derartigen Vorrichtung wer-

den Elektronen in ein oberes Subband injiziert und durchqueren ein Barrieren- oder Claddinggebiet auf dem Weg in das aktive Gebiet, das Teil des oberen Minibands ist. Die Elektronendichte in dem aktiven Gebiet vergrößert sich somit als Ergebnis des hinsichtlich der Energie im Barrierengebiet vergrößerten Minibandes und die Elektronen führen dann einen strahlenden Übergang in ein unteres Miniband durch, wobei eine Lichtemission stattfindet. Die Ladungsträger weisen einen kohärenten Minibandtransport durch die Barriere und das aktive Gebiet auf. Diese Vorrichtung ist zur Erzeugung von Licht langer Wellenlänge geeignet, jedoch nicht zur Erzeugung von Licht kurzer Wellenlänge (grünes oder blaues Licht).

**[0014]** EP-A-0614253 beschreibt einen p-Typ Distributed Feedback (DFB) InGaAs Laser mit einer MQW Laserdiodensektion und einer optischen Modulationssektion, die mit der Laserdiodensektion integriert ist und eine Multi-Quantentopfstruktur aufweist. Die Multi-Quantentopfstruktur der optischen Modulatorsektion stellt eine gekoppelte Multi-Quantentopfstruktur dar, in der Quantenzustände der Quantentöpfe miteinander zur Ausbildung von Minibändern gekoppelt sind. Jedoch sind derartige Minibänder nicht in den Ladungsträgertransport zum aktiven Gebiet der Laserdiodensektion beteiligt.

**[0015]** WO 92/08250 und 94/00884 offenbaren MQW Fotodetektoren, bei denen die Quantentöpfe des aktiven Gebiets der Fotodetektoren voneinander durch Übergitter-Barrierschichten mit Minibändern getrennt sind.

**[0016]** Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird eine optoelektronische Halbleitervorrichtung mit einem aktiven Gebiet, einem ersten Übergittergebiet und einem zwischen dem aktiven Gebiet und dem ersten Übergittergebiet angeordneten Führungsgebiet angegeben, wobei das erste Übergittergebiet ein sich wiederholendes Muster von ersten und zweiten Halbleitergebieten aufweist, die eine Mehrzahl von durch Quantenbarrieren voneinander getrennten Quantentöpfen definieren, die Periode des sich wiederholenden Musters ausreichend klein zur Ausbildung eines Minibandes innerhalb des ersten Übergittergebiets ist, wobei die optoelektronische Halbleitervorrichtung eine Laserdiode darstellt; und wobei das erste Übergittergebiet innerhalb eines Claddinggebiets ausgebildet ist und das Führungsgebiet und das Claddinggebiet eine Ladungsträgereinschlussbarriere für Ladungsträger im aktiven Gebiet darstellen.

**[0017]** Das minimale Energieniveau des Minibandes kann größer oder gleich dem minimalen Energieniveau des Führungsgebiets sein.

**[0018]** Das aktive Gebiet kann eine Mehrzahl voneinander durch erste Quantenbarrieren getrennte Quantentöpfe aufweisen, wobei die über das sich

wiederholende Muster erster und zweiter Halbleitergebiete definierten Quantentöpfe eine zweite Mehrzahl von Quantentöpfen ausbilden, wobei die Quantentöpfe, die die zweite Mehrzahl von Quantentöpfen trennen, zweite Quantenbarrieren ausbilden, und wobei das minimale Energieniveau des Minibands größer oder gleich dem Energieniveau der ersten Quantenbarrieren ist.

**[0019]** Der hierin verwendete Ausdruck „Miniband“ beschreibt ein elektronisches Miniband, das ein Band von Zuständen darstellt, das Ladungsträgern, vorzugsweise Löchern, ein leichtes Fortbewegen ermöglicht.

**[0020]** Die Erfindung ist insbesondere für Vorrichtungen geeignet, bei denen das aktive Gebiet eine Energiebandlücke aufweist, die der Energiebandlücke zwischen dem Leitungs- und Valenzband des das aktive Gebiet ausbildenden Materials entspricht.

**[0021]** Durch Ausbilden einer Serie nahe beieinander liegender Quantentöpfe im ersten Übergittergebiet überlappen die Quantenwellenfunktionen, die sich außerhalb jedes Topfes erstrecken, mit den Wellenfunktionen benachbarter Töpfe. Die sich überlappenden Wellenfunktionen bilden ein Miniband aus und verbessern dadurch den Ladungsträgertransport senkrecht zu den Quantentöpfen. Die alternierende Serie erster und zweiter Halbleitergebiete bildet das Übergitter aus.

**[0022]** Der verbesserte Ladungsträgertransport durch das Valenzband innerhalb des ersten Übergittergebiets lässt sich lediglich dann erzielen, falls die Ladungsträger in das Miniband injiziert werden können. Die Ladungsträger wandern durch das Miniband, wobei sie möglicherweise Energie verlieren. Der hauptsächliche Einfluss darauf, ob die Ladungsträger durch das Miniband transportiert werden können, stellt die Energie des Minibands relativ zur Energie eines injizierenden Gebietes dar, das auf der gegenüber liegenden Seite des ersten Übergittergebiets zum aktiven Gebiet angeordnet ist als auch die Energie des Führungsgebiets oder der Barriere zwischen dem ersten Übergittergebiet und dem aktiven Gebiet. Die minimale Energie des Minibands innerhalb des Übergitters muss größer oder gleich dem potentiellen Energieniveau eines Führungsgebiets oder einer Barriere sein, die zwischen dem Übergitter und einem aktiven Gebiet der Vorrichtung angeordnet ist. Auf dieselbe Weise sollte das Energieniveau des Injektionsgebietes nahe bei oder überlappend zu derjenigen des Minibands liegen. Ist die Energie des Injektionsgebietes wesentlich geringer (z.B. mehr als 100meV geringer) als das minimale Energieniveau des Minibands, so kann der Ladungsträgerfluss in das erste Übergittergebiet behindert werden.

**[0023]** Vorzugsweise sind wenigstens die Quanten-

barrieren der Halbleiterschichten, die das erste Übergittergebiet ausbilden, dotiert. Dies vergrößert zudem die Ansammlung von Ladungsträgern und verbessert die Leitfähigkeit innerhalb des ersten Übergittergebiets. Die Quantentopfgebiete des ersten Übergittergebiets können ebenso dotiert sein.

**[0024]** Vorzugsweise ist die Breite des Minibands derart gewählt, dass der Ladungsträgertransport im Wesentlichen maximiert ist. Vorzugsweise entsprechen die Ladungsträger Löchern. Die Breite des Minibands hängt von den Halbleitermaterialien als auch von der Breite der Barriere und Topfschichten ab, d.h. der Breite der ersten und zweiten Halbleitergebiete. Darüber hinaus wird die Breite des Minibands derart gewählt, dass der Ladungsträgertransport über das Miniband selbst dann noch möglich ist, falls ein elektrisches Feld über dem ersten Gebiet anliegt, d. h. das Miniband nicht in Stark-Niveaus aufgespalten wird.

**[0025]** Vorzugsweise werden die Halbleiter aus pseudomorphen quaternären Verbindungen ausgewählt wie etwa Verbindungen aus Zn, Mg, S und Se. In vorteilhafter Weise bilden die ersten und zweiten Gebiete ein Übergitter mit einer  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}\text{-MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  ( $0 \leq x, y \leq 1$ ) Struktur aus.

**[0026]** Vorzugsweise lassen sich die Breiten einer der ersten und zweiten Halbleitergebiete oder die Periode des sich wiederholenden Musters zur Variation der Bandlücke ändern. Die Bandlücke lässt sich im Wesentlichen auf parabolische Weise variieren. Ein zweites Übergittergebiet kann an einer gegenüberliegenden Seite des aktiven Gebiets zum ersten Übergittergebiet vorgesehen werden. Jedes derartige Übergittergebiet kann eine räumlich variierende Wiederholperiode aufweisen und zur Definition einer Separate-Confinement-Heterostrukturvorrichtung mit graduelltem Index beitragen. Eine derartige Struktur ist optisch effizient.

**[0027]** Vorzugsweise sind die ersten und zweiten Halbleitergebiete im Wesentlichen vom Gitter her an das Gitter eines Substrats angepasst, so dass wenig oder keine Verspannung auf die ersten und zweiten Halbleiterschichten wirkt. Das Substrat kann aus GaAs gebildet sein und die Gitterkonstanten der ersten und zweiten Halbleiterschichten lassen sich durch Ändern der Konzentration an Mg und/oder S innerhalb der Schichten variieren.

**[0028]** Die Vorrichtung stellt eine Laserdiode dar.

**[0029]** Alternativ können die ersten und zweiten Halbleitergebiete aus III-V Halbleitersystemen wie (AlGaIn)P und (AlGaIn)N Verbindungen gebildet sein.

**[0030]** Die Wiederholperiode beträgt vorzugsweise

6 Monolagen oder weniger. Im Falls eines Materials mit einer Zinkblendestruktur entspricht die Breite einer Monolage der Hälfte der Gitterkonstante.

**[0031]** Somit ist es möglich, den Ladungsträgertransport in Richtung des aktiven Gebiets einer Vorrichtung zu verbessern. Darüber hinaus definiert das Übergittergebiet/die Übergittergebiete ein Gebiet mit graduelltem Index zur Verbesserung des Einschlusses innerhalb des aktiven Gebiets.

**[0032]** Die Erfindung wird im weiteren Verlauf beispielhaft mit Bezug zu den begleitenden Abbildungen beschrieben.

**[0033]** [Fig. 1](#) zeigt schematisch dargestellt ein Energieniveaudiagramm für eine bekannte Separate-Confinement-Heterostruktur-Laservorrichtung;

**[0034]** [Fig. 2](#) zeigt schematisch dargestellt ein Energieniveaudiagramm in einem Modulationsdotierschema wie von Suemune (siehe oben) beschrieben.

**[0035]** [Fig. 3](#) zeigt eine schematische Darstellung von Bandlücken für benachbarte Schichten aus MgS und ZnSe;

**[0036]** [Fig. 4](#) zeigt eine schematische Darstellung der Energieniveaus für Löcher innerhalb eines Quantentopfes und die Verbreiterung der Niveaus zur Ausbildung von Minibändern;

**[0037]** [Fig. 5](#) zeigt eine Darstellung einer Übergangswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Energieniveau für eine Vorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;

**[0038]** [Fig. 6](#) zeigt eine schematische Darstellung der ortsabhängigen Ladungsträger-Loch-Energieniveaus für eine Halbleitervorrichtung einer ersten Ausführungsform der Erfindung;

**[0039]** [Fig. 7](#) zeigt eine schematische Darstellung der ortsabhängigen Loch-Energieniveaus für eine von der Erfindung verschiedene Halbleitervorrichtung;

**[0040]** [Fig. 8](#) zeigt eine schematische Darstellung der ortsabhängigen Loch-Energieniveaus für eine Halbleitervorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;

**[0041]** [Fig. 9](#) zeigt eine schematische Darstellung der ortsabhängigen Loch-Energieniveaus für eine Halbleitervorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;

**[0042]** [Fig. 10](#) zeigt eine schematische Darstellung der ortsabhängigen Loch-Energieniveaus für eine von der Erfindung verschiedene Halbleitervorrichtung;

tung;

**[0043]** [Fig. 11](#) zeigt eine Darstellung der Bandlücken und Gitterkonstanten für verschiedene Halbleiter;

**[0044]** [Fig. 12a](#) bis [12c](#) zeigen Fotolumineszenz (PL) Spektren für verschiedene verspannte Übergitterschichten;

**[0045]** [Fig. 13a](#) und [13b](#) zeigen PL Spektren für weitere verspannte Übergitterschichten;

**[0046]** [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) zeigen eine Vorrichtung mit Übergitter zur Untersuchung des Effektes derartiger Übergitter;

**[0047]** [Fig. 16a](#) und [16b](#) zeigen PL Spektren für die in [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) dargestellten Vorrichtungen;

**[0048]** [Fig. 17](#) zeigt ein Diagramm der I-V Kennlinien für die in [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) dargestellten Vorrichtungen;

**[0049]** [Fig. 18](#) und [Fig. 19](#) zeigen weitere Vorrichtungen mit Übergitter zur Untersuchung der Auswirkungen derartiger Übergitter;

**[0050]** [Fig. 20a](#) und [20b](#) zeigen PL Spektren für die in [Fig. 18](#) und [Fig. 19](#) gezeigten Vorrichtungen;

**[0051]** [Fig. 21](#) zeigt ein Diagramm der I-V Kennlinien für die in [Fig. 18](#) und [Fig. 19](#) gezeigten Vorrichtungen;

**[0052]** [Fig. 22](#) zeigt einen Laser, der keine Ausführungsform der Erfindung darstellt;

**[0053]** [Fig. 23](#) zeigt einen Laser, der ähnlich zum Laser in [Fig. 22](#) ist;

**[0054]** [Fig. 24](#) zeigt eine Darstellung zum Vergleich der ausgegebenen Lichtintensität in Abhängigkeit des Stroms für die in [Fig. 22](#) und [Fig. 23](#) gezeigten Vorrichtungen;

**[0055]** [Fig. 25](#) bis [Fig. 27](#) zeigen weitere mit der Erfindung zusammenhängende Beispiele;

**[0056]** [Fig. 28](#) zeigt ein Energieniveaudiagramm für die in [Fig. 27](#) gezeigte Vorrichtung;

**[0057]** [Fig. 29](#) zeigt ein Diagramm eines Energieniveauschemas eines Lasers, der eine weitere Ausführungsform der Erfindung darstellt;

**[0058]** [Fig. 30](#) bis [Fig. 32](#) zeigen Energieniveaudiagramme für Laser, die weitere Ausführungsformen der Erfindung darstellen.



**[0059]** Wie oben erwähnt ist es erforderlich, die Energiebandlücke der durch das Führungsgebiet/die Barriere und das Claddinggebiet eines Halbleiterlasers definierten Einschlussbarrieren zum Verkleinern des Schwellstromes und zum Verkleinern der Laserwellenlänge zu vergrößern. Die Eigenschaften von S und Mg in ZnMgSSe lassen sich zur Erhöhung der Bandlücke variieren, jedoch kann möglicherweise derart viel S und Mg erforderlich sein, dass sich die Struktur als MgS auszubilden beginnt. Dies führt zu einer schlechten Kristallqualität, da die stabile Kristallstruktur für MgS eine Steinsalzstruktur ist. Deshalb bestehen hinsichtlich der Kristallqualität obere Begrenzungen bezüglich des Einbaus von S und Mg in ZnMgSSe. Jedoch kann diese Begrenzung durchbrochen werden, falls eine Übergitterstruktur verwendet wird und MgS Schichten mit einer Zinkblendestruktur und nicht mit einer Steinsalzstruktur gewachsen werden. Falls die Schichtdicke von  $\text{MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  ( $0 \leq y \leq 1$ ) ausreichend dünn ist, kann Zinkblende  $\text{MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  auf  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) gewachsen werden und eine obere  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  Schicht, die über der  $\text{MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  Schicht gewachsen ist, stabilisiert die Zinkblendestruktur der  $\text{MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  Schicht. Die Schichten lassen sich zur Ausbildung einer Übergitters wiederholen, wobei die Diskontinuitäten zwischen den Schichten eine maximale theoretische Banddiskontinuität  $\Delta E_c$  (Leitungsbandenergieänderung) von 0 bis 1115 meV und  $\Delta E_v$  (Valenzbandenergieänderung) von 0 bis 736 meV, wie in [Fig. 3](#) gezeigt, ergeben. [Fig. 3](#) zeigt zwei Energieniveaus im Valenzband, wobei diese Niveaus leichte Löcher (lh) und schwere Löcher (hh) betreffen. Die Energieniveaus sind für die Löcher in einem nicht verspannten Material entartet, jedoch hebt eine Verspannung innerhalb des Materials diese Entartung auf. Die schweren Löcher weisen ein geringeres Energieniveau auf und sind demnach stärker besetzt.

**[0060]** Innerhalb einer ersten und zweiten alternierenden Halbleiterschichten aufweisenden Struktur bildet sich ein Miniband aus, sobald die Schichtdicke reduziert wird. Die Ausbildung des Minibands kann als Überlagerung einer Mehrzahl von Lösungen des „rechteckförmigen Topfes“ betrachtet werden, was bei quantenmechanischen Problemen auch mit „Teilchen in einem Kasten“ bezeichnet wird.

**[0061]** Zur Wiederholung sei angemerkt, dass das Problem des „rechteckförmigen Topfes“ eine Lösung der Schrödinger-Gleichung einbezieht,

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\Psi}{dZ^2} = E\Psi,$$

wobei ein unendlich tiefer Topf der Breite  $L_z$  (Ausdehnung von 0 –  $L_z$ ) vorliegt. Bei dieser Lösung sind die Randbedingungen derart, dass die Wellenfunktionen an den Kanten des Topfes auf null abfallen. Deshalb ergibt sich die Lösung zu

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{n\pi}{L_z} \right)^2, \text{ wobei } n = 1, 2, 3,$$

wobei

$m$  = der effektiven Masse des Teilchens entspricht,  
 $\hbar$  = Plancksche Konstante/ $2\pi$   
 $\Psi$  = Quantenwellenfunktion

und

$$\Psi_n = A \sin\left(\frac{n\pi Z}{L_z}\right),$$

und  $Z$  die Position innerhalb des Kastens darstellt.

**[0062]** Wird jedoch die Höhe des Topfes endlich, so nehmen die Wellenfunktionen außerhalb der Begrenzungen des Topfes von null verschiedene Werte an. Darüber hinaus enthalten die Lösungen sowohl gerade (symmetrische) Lösungen sowie ungerade (nicht symmetrische) Lösungen.

**[0063]** Die Lösungen der Gleichungen für einen endlichen Topf bei Erstreckung von  $-L/2$  bis  $+L/2$  ergeben gerade Lösungen, die sich innerhalb des Topfes

$$\cos \frac{n\pi Z}{L}$$

nähern sowie antisymmetrische Lösungen, die sich innerhalb des Topfes

$$\sin \frac{n\pi Z}{L}$$

nähern. Jede Lösung weist ebenso eine außerhalb des Topfes dahinschwindende Welle auf.

**[0064]** Die Energieniveaus des endlichen, rechteckförmigen Topfes sind ähnlich, jedoch geringfügig geringer als die entsprechenden Energieniveaus der Lösung des rechteckförmigen Topfes mit unendlich hohen Wänden.

**[0065]** [Fig. 4](#) zeigt Lösungen der Schrödinger-Gleichungen für die ersten drei Energieniveaus ( $n = 1$  bis  $3$ ) für Löcher innerhalb eines endlichen Topfes, der einen Topf einer Serie von Töpfen aus alternierenden Schichten von ZnSe und MgS darstellt. Die Dicke wird bezüglich Monolagen des Kristalls (eine Monolage entspricht ungefähr 2.82) gemessen. Die Dicken von Topf und Barriere stimmen näherungsweise überein. Ausgehend von einer Dicke von 10 Monolagen wird jeder Topf wirksam von dessen benachbarten Töpfen isoliert, da der Wert der dahinschwindenden Wellenfunktion von benachbarten Töpfen im Wesentlichen Null beträgt. Eine Reduzierung der Anzahl

der Monolagen (d.h. Reduzierung der Breite der Töpfe und der Barrieren) führt dazu, dass die Energieniveaus der Lösungen größer werden, was auch erwartet werden kann, zumal  $E_n$  invers proportional zur Breite des Topfes ist. Nimmt die Breite der Töpfe und Barrieren weiter ab, so beginnen die dahinschwindenden Wellenfunktionen (hinsichtlich derer die symmetrischen und antisymmetrischen Lösungen verschiedene Werte annehmen) der anderen Töpfe erheblich von null verschiedene Werte innerhalb des Topfes anzunehmen und dies spaltet die Energieniveaulösung in eine Serie von Werten auf. Als Ergebnis der Herstellung einer Serie von Quantentöpfen bilden die Energieniveaus ein Kontinuum innerhalb eines Bandes aus, was durch die in [Fig. 4](#) schattiert dargestellten Gebiete gekennzeichnet ist.

**[0066]** [Fig. 5](#) zeigt die Transmissionswahrscheinlichkeit für ein schweres Loch in Abhängigkeit von der Energie innerhalb einer verspannten Übergitterschicht, die zehn Perioden von vier Monolagen aus ZnSe und zwei Monolagen aus MgS aufweist. Die Transmissionswahrscheinlichkeit erreicht Werte von bis zu 0.9.

**[0067]** Wie oben erwähnt ist es zur Erzielung von blauer Lichtgeneration erforderlich, die Energiebandlücke des Einschlussbarrieregebiets zu vergrößern. Die Abnahme der Netto-Akzeptorkonzentration (Na-Nd) mit zunehmender Energiebandlücke im Gebiet ZnMgSSe erschwert es, ZnMgSSe Schichten mit hoher Leitfähigkeit und einer großen Energiebandlücke zu erzeugen. Eine Modulationsdotierung kommt über diese Probleme hinweg. Jedoch ist in der Erfindung die Periode des Übergitters klein genug um ein Miniband auszubilden und der Ladungsträgertransport erfolgt über das Miniband ([Fig. 6](#)), was zu einem im Vergleich zu Hopping ([Fig. 2](#)) besseren Ladungsträgertransport führt. Die Periode des Übergitters sollte klein genug zur Ausbildung eines Minibands sein, z. B. kleiner als 6 Monolagen falls  $d_{\text{ZnSe}} = d_{\text{MgS}}$ , wobei  $d$  die Dicke darstellt.

**[0068]** [Fig. 6](#) zeigt schematisch dargestellt das Energieniveauschema innerhalb einer Halbleitervorrichtung gemäß einer ersten Ausführungsform der Erfindung. Das Niveauschema ist ähnlich zu demjenigen in [Fig. 2](#), da auch hier eine Mehrzahl von durch die Barrieren **12** definierten Quantentöpfen **10** vorliegt. Jedoch bestehen zwei wesentliche Unterschiede. Der erste Unterschied besteht darin, dass die Quantentöpfe **10** und Barrieren **12** dünner sind (dieses Merkmal ist nicht dargestellt), so dass ein Übergittergebiet **13** mit einem Miniband **18** ausgebildet wird. Der zweite Unterschied besteht darin, dass die wesentlichen Energiebedingungen für Löcher sowohl hinsichtlich der Injektion in das Miniband **18** als auch für den Übergang von Löchern aus dem Miniband **18** in das aktive Gebiet **2** der Vorrichtung erfüllt sind. Das Löcherinjektionskriterium ist erfüllt, falls die Energie

des Minibands **18** mit dem Energieniveau eines Injektionsgebiets **20** überlappt oder ausreichend nahe bei diesem liegt, das zusammen mit dem Übergittergebiet **13** das Claddinggebiet **4** in dieser Ausführungsform definiert. Das Löcherübergangskriterium wird erfüllt, falls das minimale Energieniveau **21** des Minibands **18** größer als oder vergleichbar zum Energieniveau des Valenzbands des Führungsgebiets **3** ist, das zwischen dem Übergittergebiet **13** und dem aktiven Gebiet **2** der Vorrichtung ausgebildet ist. Löcher sind dann in der Lage über das Miniband **18** aus dem Injektionsgebiet **20** in das aktive Gebiet **2** zu wandern.

**[0069]** Die Ausbildung eines derartigen Minibands **18** mit einem minimalen Energieniveau größer als oder gleich zu demjenigen des Gebiets **3** und einem vergleichbaren Energieniveau oder einem geringeren Energieniveau verglichen mit demjenigen des Gebiets **20** macht es erforderlich, dass die Barrieren **12** des Übergitters aus einem Halbleitermaterial mit einer größeren Bandlücke im Vergleich zum aktiven Gebiet **2** der Vorrichtung bestehen. Falls die Energie des Minibands **18** geringfügig größer als die Energie des Injektionsgebiets **20** ist, können Löcher weiterhin thermisch in das Miniband gelangen.

**[0070]** In dem Beispiel in [Fig. 7](#) ist das Übergittergebiet **13** mit dem Miniband **18** zwischen dem Führungsgebiet **3** und dem Claddinggebiet **4** eingebracht, wobei das Letztere in diesem Beispiel aus dem Injektionsgebiet **20** ausgebildet ist, das Löcher in das Miniband **18** injiziert. In einer LED Vorrichtung wird auf ein derartiges Führungsgebiet **3** verzichtet und das Übergittergebiet **13** definiert seinerseits die Ladungsträgereinschlussbarriere für das aktive Gebiet **2**. In einem derartigen Fall entspricht das minimale Energieniveau des Minibands **18** dem Energieniveau der Einschlussbarriere.

**[0071]** In der Ausführungsform in [Fig. 8](#) ist das Übergittergebiet **13** mit dem Miniband **18** innerhalb des Claddinggebiets **4** ausgebildet. In einer LED Vorrichtung wird auf das Führungsgebiet **3** verzichtet und das Claddinggebiet **4** definiert die Ladungsträgereinschlussbarriere für das aktive Gebiet **2**. In einem derartigen Fall entspricht die minimale Energieniveau des Minibands **18** dem Energieniveau der Einschlussbarriere.

**[0072]** In der Ausführungsform in [Fig. 9](#) ist die Vorrichtung ähnlich zu derjenigen in [Fig. 7](#), da das Übergittergebiet **13** mit dem Miniband **18** zwischen das Führungsgebiet **3** und das Claddinggebiet **4** eingebunden ist. Jedoch ist in dieser Ausführungsform das aktive Gebiet **2** ein MQW Gebiet, das durch eine Mehrzahl aktiver Quantentöpfe **2a** definiert wird, die durch Barrieren **2b** voneinander getrennt sind. Das Kriterium besteht darin, dass das minimale Energieniveau **21** des Minibands **18** größer oder gleich dem

Energieniveau der Barrieren **2b** ist.

**[0073]** In dem Beispiel in [Fig. 10](#) ist die Vorrichtung ähnlich zu derjenigen in [Fig. 7](#), da das Übergittergebiet **13** mit dem Miniband **18** zwischen dem Führungsgebiet **3** und dem Claddinggebiet **4** eingebunden ist. Jedoch ist in diesem Beispiel das Energieniveau des Volumenmaterials, das die Töpfe **10** des Übergittergebiets **13** definiert, kleiner als dasjenige des aktiven Gebiets **2**.

**[0074]** [Fig. 11](#) zeigt die Energiebandlücke und Gitterkonstante für eine Mehrzahl von II–VI Verbindungshalbleitern. Die Gitterkonstanten von ZnSe und MgS betragen jeweils 5.6681 Å und 5.62 Å, welche nahezu vom Gitter her an ein GaAs Substrat (5.653 Å) angepasst sind. Die Gitterkonstante von ZnSe ist geringfügig größer als diejenige von GaAs und die Gitterkonstante von MgS ist geringfügig kleiner als diejenige von GaAs. Deshalb lässt sich die innere Verspannung eines ZnSe-MgS Übergitters durch geeignete Auswahl zu null gestalten. Die Verspannungsvermeidung ist nahezu vollständig falls  $d_{\text{ZnSe}} = 2d_{\text{MgS}}$  gilt. Durch geeignete Zusammensetzungen von  $x$  und  $y$  in  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}\text{-MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  ( $0 \leq x, y \leq 1$ ) lässt sich das Übergitter vom Gitter her nahezu perfekt an GaAs anpassen. Durch Verwendung einer verspannungsausgleichenden Zusammensetzung kann die innere Verspannung in  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}\text{-MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  ( $0 \leq x, y \leq 1$ ) Übergitter nahezu verschwinden

**[0075]** Innerhalb des Bereichs von Verbindungen  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  und  $\text{MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  sind ZnSe ( $x = 0$ ) und MgS ( $y = 1$ ) binäre Verbindungen und diese können folglich am genauesten hinsichtlich der Zusammensetzung eingestellt werden. Jedoch können  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  und  $\text{MgS}_y\text{Se}_{1-y}$  immer noch genauer eingestellt werden als quaternäre ZnMgSSe Verbindungen.

**[0076]** Zur Untersuchung der Eigenschaften von Vorrichtungen, die Übergitter einbeziehen, wurde eine Serie von Experimenten durchgeführt.

**[0077]** Die MgS Barrierendickenabhängigkeit von PL Spektren von verspannten ZnSe-MgS Übergitterschichten wurde untersucht. Die verspannten Übergitterschichten wurden durch Molekularstrahlepitaxie mit den folgenden Aufwuchsbedingungen gewachsen: GaAs Substrat, Substrattemperatur von 275°C, strahläquivalente Drücke von Zn, Se, Mg und S von jeweils  $6 \times 10^{-7}$ ,  $1.4 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-7}$  und  $2 \times 10^{-7}$  Torr.

**[0078]** [Fig. 12a–c](#) zeigen PL Spektren bei 77K für eine verspannte ZnSe-MgS Übergitterschicht mit einer ZnSe Aufwuchsdauer von 15s und mit einer MgS Aufwuchsdauer von jeweils 10s, 20s und 30s in den entsprechenden [Fig. 12a bis 12c](#). Die Peakenergien der Emission aufgrund quantisierter Energieniveaus betrugen jeweils (a) 3.19eV, (b) 3.31eV und (c)

3.39eV. Der Energiebandlückenunterschied zwischen all den verspannten Übergitterschichten und ZnSe beträgt mehr als 0.3eV, so dass all die verspannten Übergitterschichten aussichtsreiche Claddinggebiete oder Einschlussbarrieregebiete darstellen.

**[0079]** In einem zweiten Experiment wurde die ZnSe Quantentopfdickenabhängigkeit von PL Spektren von verspannten ZnSe-MgS Übergitterschichten untersucht. Die verspannten Übergitterschichten wurden durch Molekularstrahlepitaxie mit den folgenden Bedingungen aufgewachsen: GaAs Substrat, Substrattemperatur von 275°C, strahläquivalente Drücke von Zn, Se, Mg und S von jeweils  $8 \times 10^{-7}$ ,  $1.8 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-7}$  und  $2 \times 10^{-7}$  Torr.

**[0080]** [Fig. 13a](#) und [13b](#) zeigen PL Spektren bei 77K für verspannte ZnSe-MgS Übergitterschichten mit einer MgS Aufwuchsdauer von 10s und mit einer ZnSe Aufwuchsdauer von 10s für [Fig. 13a](#) und 20s für [Fig. 13b](#). Die Peakenergien der Emission aufgrund des quantisierten Energieniveaus betrugen jeweils (a) 3.20eV und (b) 2.98eV. Die Bandlückenenergiedifferenz zwischen verspannten Übergitterschichten mit dünnerer ZnSe Topfdicke ([Fig. 9a](#)) und ZnSe beträgt mehr als 0.3eV, so dass die verspannte Übergitterschicht mit der dünneren ZnSe Topfdicke ein aussichtsreicheres Material für ein Claddinggebiet oder ein Einschlussbarrieregebiet darstellt.

**[0081]** Auf der nächsten Stufe der Untersuchungen wurden Cl-dotierte verspannte Übergitterschichten gewachsen. Die zwei verschiedenen Arten von Cl-dotierten verspannten Übergitterschichten sind in [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) dargestellt.

**[0082]** Die in [Fig. 14](#) gezeigte Vorrichtung weist ein n-Typ GaAs Substrat **30** auf, das eine darauf ausgebildete n-Typ ZnSe Pufferschicht **32** aufweist. Eine verspannte intrinsische ZnSe-MgS Übergitterschicht **34** ist über der Pufferschicht **32** ausgebildet und eine n-Typ ZnSe Deckschicht **36** (ebenso eine Pufferschicht) ist über der verspannten Übergitterschicht **34** ausgebildet. Dies stellt eine n-i-n Struktur (Cl dotiertes ZnSe, undotiertes Übergitter, Cl dotiertes ZnSe) dar. Die verspannte Übergitterschicht **34** wurde durch Molekularstrahlepitaxie mit einer Substrattemperatur von 275°C und strahläquivalenten Drücken für Zn, Se, Mg und S von jeweils  $8 \times 10^{-7}$ ,  $1.8 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-7}$  und  $2 \times 10^{-7}$  Torr mit einer K-Zelltemperatur von  $\text{ZnCl}_2$  von 147°C aufgewachsen. Eine Indiumelektrode **38** wird in Kontakt mit dem Substrat **1** ausgebildet und eine weitere Indiumelektrode **14** mit einem Radius von 200µm wird über der Deckschicht **36** durch Vakuumverdampfung ausgebildet.

**[0083]** [Fig. 15](#) zeigt eine ähnliche Vorrichtung wie in [Fig. 14](#), jedoch ist die verspannte ZnSe-MgS Übergitterschicht **34** durch eine verspannte n-Typ Zn-



Se-MgS Übergitterschicht **42** ersetzt, was zu einer n-n-n Struktur (Cl dotiertes ZnSe, Cl dotiertes Übergitter, Cl dotiertes ZnSe) führt.

**[0084]** Fig. 16a und 16b zeigen PL Spektren für die jeweils in Fig. 13 und Fig. 14 dargestellten Vorrichtungen. Beide Vorrichtungen zeigen eine Peakenergie von 3.21eV aufgrund einer Emission eines quantisierten Energieniveaus.

**[0085]** Fig. 17 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie für die in Fig. 14 und Fig. 15 gezeigten Vorrichtungen. Der mit A gekennzeichnete Verlauf bezieht sich auf die in Fig. 14 gezeigte Vorrichtung, wobei der mit B gekennzeichnete Verlauf die in Fig. 15 gezeigte Vorrichtung betrifft. Wie hieraus ersichtlich ist, weist die n-n-n-Struktur in Fig. 15 einen besseren Stromfluss als die in Fig. 14 gezeigte intrinsische Struktur auf. Somit ist die Cl-Dotierung innerhalb der verspannten Übergitterschicht effektiv.

**[0086]** Ebenso wurden zwei weitere Vorrichtungen mit Stickstoff-dotierten verspannten Übergitterschichten hergestellt. Die in Fig. 18 gezeigte Vorrichtung weist ein p-Typ GaAs Substrat **50** auf, auf welches eine p-Typ ZnSe Pufferschicht **52** ausgebildet ist. Eine intrinsische ZnSe-MgS Übergitterschicht **34** ist über der Schicht **52** ausgebildet und eine p-Typ ZnSe Deckschicht **54** ist über der Schicht **34** ausgebildet.

**[0087]** Die verspannte Übergitterschicht **34** wurde durch Molekularstrahlepitaxie mit den folgenden Bedingungen gewachsen: einem GaAs Substrat bei einer Temperatur von 275°C, strahläquivalenten Drücken von Zn, Se, Mg und S von jeweils  $8 \times 10^{-7}$ ,  $1.8 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-7}$  und  $2 \times 10^{-7}$  Torr. Dies führt zu einer p-i-p Struktur (N-dotiertes ZnSe, undotiertes Übergitter, N-dotiertes ZnSe). Die Stickstoffdotierung wurde durch eine Radikal-Dotiertechnik mit einer Eingangsleistung von 250W und einem Hintergrunddruck von  $4.2 \times 10^{-7}$  Torr durchgeführt.

**[0088]** Eine Indiumelektrode **38** wird in Kontakt mit dem Substrat **50** ausgebildet und eine Goldelektrode **56** mit 200µm Radius wird über der Deckschicht **54** ausgebildet.

**[0089]** Die in Fig. 19 gezeigte Vorrichtung ist ähnlich zu derjenigen in Fig. 18, außer dass die intrinsische, verspannte Übergitterstruktur **34** durch eine verspannte p-Typ ZnSe-MgS Übergitterschicht **58** ersetzt wurde, weshalb eine p-p-p Struktur (N-dotiertes ZnSe, N-dotiertes Übergitter, N-dotiertes ZnSe) Struktur vorliegt.

**[0090]** Fig. 20a und 20b zeigen PL Spektren bei 77K für die jeweils in Fig. 18 und Fig. 19 gezeigten Vorrichtungen. Beide Vorrichtungen weisen ein Peakenergieniveau bei 3.2eV aufgrund einer Emission

eines quantisierten Energieniveaus auf.

**[0091]** Fig. 21 zeigt die Strom-Spannungs-Kennlinie für die in Fig. 18 und Fig. 19 gezeigten Vorrichtungen. Der mit A gekennzeichnete Verlauf betrifft die in Fig. 18 gezeigte Vorrichtung, wobei der mit B gekennzeichnete Verlauf die in Fig. 19 gezeigte Vorrichtung betrifft. Wie hieraus ersichtlich wird, weist die in Fig. 19 gezeigte Vorrichtung mit einer verspannten p-dotierten Übergitterschicht **58** einen besseren Stromfluss auf als die in Fig. 18 gezeigte Vorrichtung. Dies deutet darauf hin, dass die N-Dotierung innerhalb der verspannten Übergitterschicht wirksam ist.

**[0092]** Die obigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die verspannte ZnSe-MgS Übergitterschicht eine aussichtsreiche Claddingschicht oder Ladungsträgerbarrierschicht darstellt.

**[0093]** In Fig. 22 weist der Laser ein n-Typ GaAs Substrat **30** mit einer darauf ausgebildeten n-Typ ZnSe Claddingschicht **60** auf. Eine  $\text{Zn}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Se}$  aktive Schicht **62** ist über der Schicht **60** positioniert und eine p-Typ ZnSe Claddingschicht **64** ist über der aktiven Schicht **62** ausgebildet. Schließlich ist eine p-Typ Kontaktschicht **66** über der p-Typ Claddingschicht **64** ausgebildet. Eine Indiumelektrode **38** stellt einen Kontakt zum Substrat **30** her, wobei eine 5µm breite Goldelektrode **68** in Kontakt mit der p-Typ Kontaktschicht **66** ausgebildet ist. Der Laser wird aus einem Wafer gespalten und weist eine Resonatorlänge von 1mm auf. Der Laser wird auf eine Kupferwärmesenke in einer „Junction-up“-Anordnung aufgebracht.

**[0094]** Ein in Fig. 23 gezeigter zweiter Laser ist im Wesentlichen identisch mit dem in Fig. 22 gezeigten Laser mit der Ausnahme, dass eine verspannte p-Typ ZnSe-MgS Übergitterschicht **58** zwischen der aktiven Schicht **62** und der p-Typ ZnSe Claddingschicht **64** ausgebildet ist. Das Übergitter **58** enthält ein Miniband und definiert eine Ladungsträgereinschlussbarriere für die aktive Schicht **62**. Das minimale Energieniveau des Minibands entspricht dem Energieniveau einer derartigen Barriere.

**[0095]** Die Ausgabekennlinien zwischen Licht und Strom für die Laser der Fig. 22 und Fig. 23 wurden bei 77K in einem gepulsten Modus mit einer Pulsweite von 2ms und einem Duty-Cycle von 1/5000 gemessen. Die Laserspiegel lagen wie nach der Spaltung vor und die verspannte Übergitterschicht **58** in dem zweiten Laser (Fig. 23) wies 20 Perioden von vier Monolagen ZnSe mit zwei Monolagen MgS auf.

**[0096]** Die Kennlinie zwischen Lichtintensität und Strom für die Laser ist in Fig. 24 dargestellt. Der zweite Laser (Fig. 23) mit der verspannten Übergitterschicht zeigte einen Schwellstrom von 10mA auf, der dreimal kleiner verglichen mit einem gleichartigen Laser ohne verspannte Übergitterschicht ist. Dies

verdeutlicht, dass die verspannte ZnSe-MgS Übergitterschicht wirksam hinsichtlich des Unterdrückens eines Elektronenüberschusses ist und einen verbesserten Löchertransport fördert. Die Laserwellenlänge betrug 490nm.

[0097] In [Fig. 25](#) weist ein dritter Laser ein n-Typ GaAs Substrat **30** mit einer darauf ausgebildeten n-Typ ZnSe Pufferschicht **32** auf. Eine verspannte n-Typ  $\text{ZnS}_{0.07}\text{Se}_{0.93}$  Claddingschicht **70** ist über der Schicht **32** ausgebildet und weist eine darauf ausgebildete verspannte n-Typ ZnSe-MgS Übergitterschicht **42** auf. Eine aktive ZnSe Schicht **72** ist über der verspannten Übergitterschicht **42** ausgebildet und weist eine darauf ausgebildete verspannte p-Typ ZnSe-MgS Übergitterschicht **58** auf. Jedes der Übergitter **42** und **58** definiert eine Ladungsträgereinschlussbarriere für die aktive Schicht **72** und jedes Übergitter weist ein Miniband auf, dessen minimales Energieniveau gleich dem Energieniveau einer derartigen Barriere ist. Eine p-Typ  $\text{ZnS}_{0.07}\text{Se}_{0.93}$  Claddingschicht **74** ist über der verspannten Übergitterschicht **58** ausgebildet und schließlich ist eine p-Typ Kontaktschicht **66** über der Claddingschicht **74** ausgebildet. Eine Indiumelektrode **38** stellt einen Kontakt zum Substrat **30** her und eine Streifenelektrode **68** stellt einen Kontakt zur Kontaktschicht **66** her. Der Laser weist eine Laserwellenlänge von weniger als 480nm bei Raumtemperatur auf, die auf weniger als 460nm bei 77K abfällt.

[0098] Diese Wellenlängen lassen sich bei Verwendung einer quaternären ZnMgSSe Verbindung nicht erzielen.

[0099] In [Fig. 26](#) ist ein ähnlicher Laser wie in [Fig. 25](#) dargestellt, bei dem jedoch auf die zwischen der n-Typ Claddingschicht **70** und der aktiven Schicht **72** ausgebildete verspannte n-Typ ZnSe-MgS Übergitterschicht **42** verzichtet wurde. Laserbetrieb wurde bei 77K mit einer Wellenlänge von 445 nm beobachtet.

[0100] Für die in [Fig. 25](#) und [Fig. 26](#) gezeigten Vorrichtungen wiesen die verspannten Übergitterschichtstrukturen **20** Perioden von 4 Monolagen von ZnSe in Verbindung mit zwei Monolagen von MgS auf.

[0101] Ein Separate-Confinement-Heterostrukturlaser mit gradualem Index (GRINSCH Laser) wurde hergestellt. Die in [Fig. 27](#) gezeigte Vorrichtung ist ähnlich zu derjenigen in [Fig. 25](#), außer dass die verspannten Übergitterschichten **42** und **58** an jeder Seite des aktiven Gebiets **72** durch modulierte periodisch verspannte Übergitterschichten **76** und **78** ersetzt sind. Die relativen Breiten der Quantentöpfe und Quantenbarrieren in den modulierten periodisch verspannten Übergitterschichten variieren in Richtung der aktiven Schichten, so dass ein graduelles

Energiebandprofil erzielt wird, was schematisch in [Fig. 28](#) dargestellt ist. Jedes Übergitter **76** und **78** definiert die Ladungsträgereinschlussbarriere für das aktive Gebiet **72** und weist ein Miniband (nicht in [Fig. 28](#) dargestellt) auf, dessen minimales Energieniveau gleich dem Energieniveau einer derartigen Barriere ist. In einer alternativen Anordnung liegt das Übergitter in dem Flachband-Claddinggebiet der GRINSCH Struktur und das Miniband eines derartigen Übergitters weist ein minimales Energieniveau auf, das gleich oder größer als das minimale Energieniveau des graduellen Gebiets der GRINSCH Struktur ist.

[0102] [Fig. 29](#) zeigt ein Energieniveauschema für einen Laser mit einer auf einem Substrat (nicht dargestellt) ausgebildeten  $\text{Mg}_{0.1}\text{ZnS}_{0.14}\text{Se}$  Claddingschicht **90**. Eine 500Å dicke  $\text{ZnS}_{0.06}\text{Se}$  Führungsschicht **92** ist über der Schicht **90** ausgebildet und unterstützt eine aktive  $\text{Cd}_{0.2}\text{ZnSe}$  Schicht **94** zwischen 50 und 100Å Dicke. Eine weitere Führungsschicht **96**, die identisch mit der Führungsschicht **92** ist, bedeckt die aktive Schicht **94**. Eine 200Å dicke  $\text{Mg}_{0.1}\text{ZnS}_{0.14}\text{Se}$  Claddingschicht **98** stellt ein optisches Einschlussgebiet zwischen der Führungsschicht **96** und einem Übergitter **100** dar. Die Claddingschicht **98** und das Übergitter **100** definieren zusammen ein Claddinggebiet.

[0103] Ein derartiges Claddinggebiet und die Führungsschicht **96** wirken als Einschlussbarrieren für die in der aktiven Schicht **94** enthaltenen Ladungsträger. Das Übergitter **100** besteht aus 10 Wiederholungen einer 5.65Å dicken Schicht aus MgS und einer 11.13Å dicken Schicht aus ZnSe. [Fig. 29](#) stellt die relativen Energieniveaus von Elektronen im Leitungsband und Löchern im Valenzband einer derartigen Vorrichtung dar. [Fig. 29](#) kennzeichnet ebenso die Tiefe der in dem Übergitter **100** ausgebildeten Quantentöpfe, wie sie von Elektronen und Löchern gesehen wird. Die gestrichelten Linien **104** und **106** stellen schematisch die Grenzen des Minibands **107** dar und die Linien **108** kennzeichnen die Akzeptor-Energieniveaus der Dotierstoffe innerhalb des Barrierenmaterials.

[0104] Bei Betrieb rekombinieren Elektronen und Löcher innerhalb eines in der aktiven Schicht **94** ausgebildeten Quantentopfes. Die Führungsschichten **92** und **96** bilden zusammen Barrierengebiete für das aktive Gebiet **94** und die Schichten **92** bis **96** bilden ein optisches Führungsgebiet innerhalb der Vorrichtung aus. Optische Strahlung sowie Elektronen und Löcher sind durch die Claddingschichten **90** und **98** und das Übergitter **100** eingeschlossen. Elektronen werden in die Claddingschicht **90** injiziert und bewegen sich in Richtung der aktiven Schicht **94**. Elektronen, die über die aktive Schicht **94** hinaustreten, werden von dem Übergitter **100** reflektiert, das eine effektive Barriere von 172meV ausbildet und durch die

gestrichelte Linie **101** gekennzeichnet ist. Die Löcher werden in das Schwerloch-Miniband **107** injiziert. Die Löcher wandern sodann in Richtung der aktiven Schicht **94**. Der Transport von Löchern innerhalb des Minibands **107** wird dadurch verbessert, dass wenigstens die Quantenbarrieren innerhalb des Übergitters **100** dotiert werden. Ea kennzeichnet die Aktivierungsenergie der Akzeptoren, wobei die Akzeptoren in die Quantenbarrieren durch Dotierung implantiert wurden. Somit wirkt das Übergitter **100** sowohl hinsichtlich des Einschlusses von Elektronen als auch hinsichtlich der Verbesserung des Löchertransports.

**[0105]** [Fig. 30](#) zeigt das Energieniveauschema für einen Laser, der ähnlich zu der mit Bezug zu [Fig. 29](#) beschriebenen Vorrichtung ist, außer, dass das Übergitter **100** durch ein p-dotiertes Übergitter **102** ersetzt wurde, das 10 Wiederholungen einer 8.47Å dicken  $\text{Mg}_{0.1}\text{ZnS}_{0.14}\text{Se}$  Schicht und einer 14.31Å dicken  $\text{Mg}_{0.4}\text{ZnS}_{0.4}\text{Se}$  Schicht aufweist. Dies führt zu einer geringeren Bandlücke in dem Übergitter verglichen mit der in [Fig. 29](#) gezeigten Vorrichtung. Der Betrieb der in [Fig. 30](#) gezeigten Vorrichtung ist ähnlich zum Betrieb der Vorrichtung in [Fig. 29](#).

**[0106]** [Fig. 31](#) zeigt das Energieniveauschema für einen Laser, der in seinem Aufbau ähnlich zu den in Bezug zu [Fig. 29](#) und [Fig. 30](#) beschriebenen Vorrichtungen ist, außer dass die aktive Schicht **94** durch einen Quantentopf **110** oder eine Multi-Quantentopfstruktur bestehend aus  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  ersetzt wurde, wobei die Führungsgebiete **112**, **114** aus  $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$  aufgebaut sind und die Claddingschichten **116**, **118** aus  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  aufgebaut sind. Das Übergitter **100** wurde durch ein p-dotiertes Übergitter **120** mit 10 Wiederholungen einer 11.4Å dicken  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  Schicht und einer 6.68Å dicken  $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$  Schicht ersetzt. Der Betrieb der in [Fig. 31](#) gezeigten Vorrichtung ist ähnlich zu demjenigen der in [Fig. 29](#) gezeigten Vorrichtung.

**[0107]** [Fig. 32](#) zeigt das Energieniveauschema für einen Laser, der einen ähnlichen Aufbau wie die mit Bezug zu [Fig. 31](#) beschriebene Vorrichtung aufweist, außer dass das Übergitter **120** durch ein p-dotiertes Übergitter **122** mit 10 Wiederholungen einer 6.84Å dicken GaN Schicht und einer 4.56Å dicken AlN Schicht ersetzt wurde. Jegliche Verspannung innerhalb dieses Übergitters lässt sich durch die Gestaltung des Übergitters ausgleichen. Der Betrieb der in [Fig. 32](#) gezeigten Vorrichtung ist ähnlich zu demjenigen in [Fig. 29](#).

**[0108]** In jeder der oben beschriebenen Ausführungsformen der Erfindung kann die aktive Schicht/das aktive Gebiet eine einzelne Quantentopfstruktur sein oder diese kann eine Multi-Quantentopfstruktur darstellen, wobei im letzteren Falle das minimale Energieniveau des Minibands größer oder gleich dem Energieniveau der Barrieren der Mul-

ti-Quantentopfstruktur ist.

**[0109]** Die Ausbildung eines Minibands ist nicht auf Vorrichtungen begrenzt, die ausschließlich aus II–VI Halbleitern aufgebaut sind. Vorrichtungen, die Ausführungsformen der Erfindung darstellen, lassen sich ebenso aus dem III–V Halbleitersystem bilden wie etwa aus (AlGaIn)P und (AlGaIn)N Verbindungen.

**[0110]** Somit ist es möglich, blaue Laserdioden bereitzustellen, die für Dauerbetrieb bei Raumtemperatur geeignet sind.

## Patentansprüche

1. Optoelektronische Halbleitervorrichtung mit einem aktiven Gebiet (**2**, **94**), einem ersten Übergittergebiet (**13**, **100**, **102**) und einem zwischen dem aktiven Gebiet (**2**, **94**) und dem ersten Übergittergebiet (**13**, **100**, **102**) angeordneten Führungsgebiet (**3**, **96**), wobei das erste Übergittergebiet ein sich wiederholendes Muster von ersten und zweiten Halbleitergebieten aufweist, die ersten und zweiten Halbleitergebiete eine Mehrzahl von durch Quantenbarrieren voneinander getrennte Quantentöpfe definieren, die Periode des sich wiederholenden Musters ausreichend klein zur Ausbildung eines Minibands (**18**, **107**) innerhalb des ersten Übergittergebiets (**13**, **100**, **102**) ist, wobei die Ladungsträger durch das Miniband (**18**, **107**) transportiert werden; wobei die optoelektronische Halbleitervorrichtung eine Laserdiode darstellt; und wobei das erste Übergittergebiet (**13**, **100**, **102**) innerhalb eines Claddinggebiets ausgebildet ist und das Führungsgebiet (**3**, **96**) und das Claddinggebiet eine Ladungsträgereinschlussbarriere für Ladungsträger im aktiven Gebiet (**2**, **94**) darstellen.

2. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 1, wobei das minimale Energieniveau des Minibands (**18**, **107**) größer oder gleich dem minimalen Energieniveau des Führungsgebiets (**3**, **96**) ist.

3. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 1, wobei das aktive Gebiet (**2**) eine erste Mehrzahl voneinander durch erste Quantenbarrieren (**2b**) getrennte Quantentöpfe (**2a**) aufweist; wobei die über das sich wiederholende Muster erster und zweiter Halbleitergebiete definierten Quantentöpfe eine zweite Mehrzahl von Quantentöpfen (**10**) ausbilden; wobei die Quantentöpfe, die die zweite Mehrzahl von Quantentöpfen (**10**) trennen, zweite Quantenbarrieren (**12**) ausbilden; und wobei das minimale Energieniveau des Minibands (**18**) größer oder gleich dem Energieniveau der ersten Quantenbarrieren (**2b**) ist.

4. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche mit zusätzlich: einem Ladungsträgerinjektionsgebiet (**20**) zum Injizieren von Ladungsträgern in das Miniband (**18**), wobei das Energieniveau des Injektionsgebiets (**20**) im

Wesentlichen mit demjenigen des Minibands übereinstimmt.

5. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei das aktive Gebiet (**2**, **62**, **72**, **94**) eine Energiebandlücke aufweist, die der Energiebandlücke zwischen dem Leitungs- und Valenzband des Materials entspricht, das das aktive Gebiet ausbildet.

6. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die ersten und zweiten Halbleiter der II–VI Halbleitergruppe entstammen.

7. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 6, wobei der erste Halbleiter ZnSe und der zweite Halbleiter MgS entspricht.

8. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 6, wobei der erste Halbleiter  $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$  aufweist,  $0 \leq x \leq 1$ , und der zweite Halbleiter  $\text{MgS}_y\text{Se}_{1-y}$ ,  $0 \leq y \leq 1$ , aufweist.

9. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 6, wobei die ersten und zweiten Halbleiter aus Kombinationen pseudomorpher quaternärer Verbindungen bestehen.

10. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die ersten und zweiten Halbleiter der III–V Halbleitergruppe entstammen.

11. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 10, wobei die ersten und zweiten Halbleiter aus Kombinationen pseudomorpher quaternärer Verbindungen bestehen.

12. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 10 oder 11, wobei die ersten und zweiten Halbleiter Kombinationen des Verbindungssystems (AlGaIn)N sind.

13. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 10 oder 11, wobei die ersten und zweiten Halbleiter Kombinationen des Verbindungssystems (AlGaIn)P sind.

14. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 10 oder 11, wobei die ersten und zweiten Halbleiter Kombinationen des Verbindungssystems (AlGa)N sind.

15. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 14, wobei der erste Halbleiter AlN und der zweite Halbleiter GaN entspricht.

16. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei we-

nigstens einer der ersten und zweiten Halbleiter n-Typ dotiert ist.

17. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei wenigstens einer der ersten und zweiten Halbleiter p-Typ dotiert ist.

18. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die ersten und zweiten Halbleiter eine Gitterfehlانpassung zu einem Substrat aufweisen, jedoch derart kombiniert sind, dass diese keinen Netto-Stress erfahren.

19. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 8, wobei die ersten und zweiten Halbleiter eine Gitteranpassung zum Substrat aufweisen.

20. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 18 oder 19, wobei das Substrat aus GaAs gebildet ist.

21. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 18 oder 19, wobei das Substrat aus ZnSe gebildet ist.

22. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Periode des sich wiederholenden Musters sechs Monolagen oder weniger entspricht.

23. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche 1 bis 21, wobei die relativen Dicken der ersten und zweiten Halbleitergebiete und/oder die Periode des sich wiederholenden Musters ortsabhängig variieren.

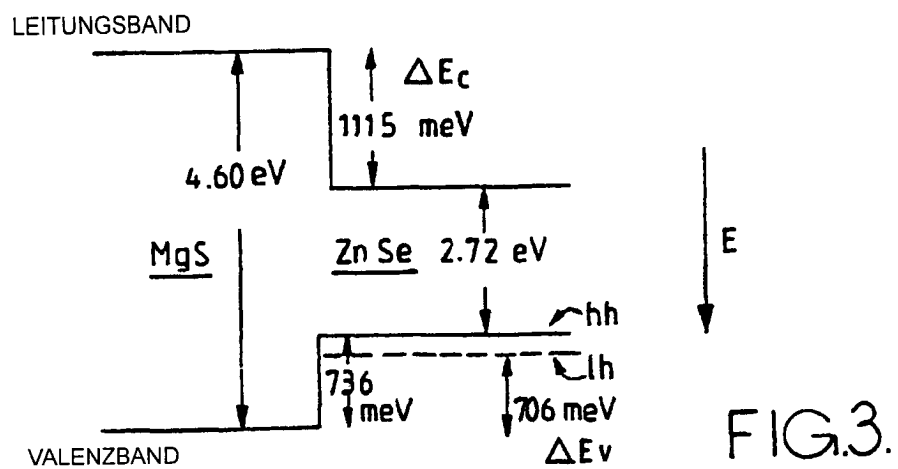
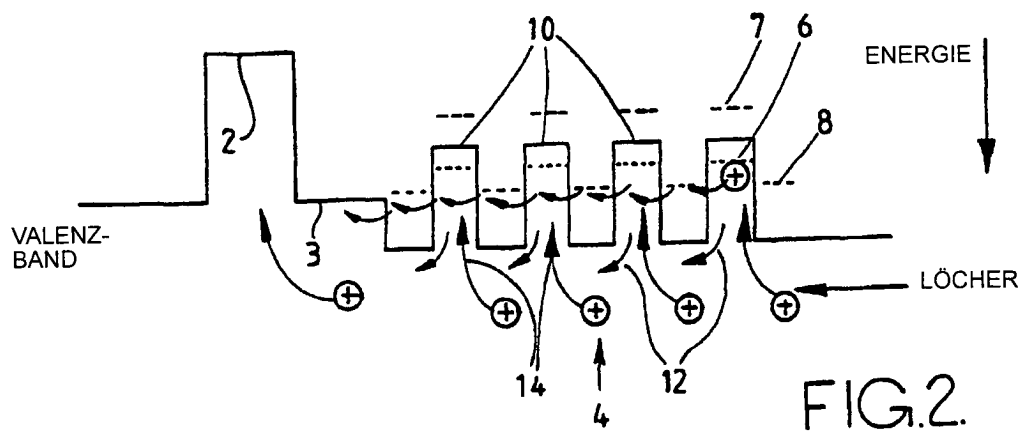
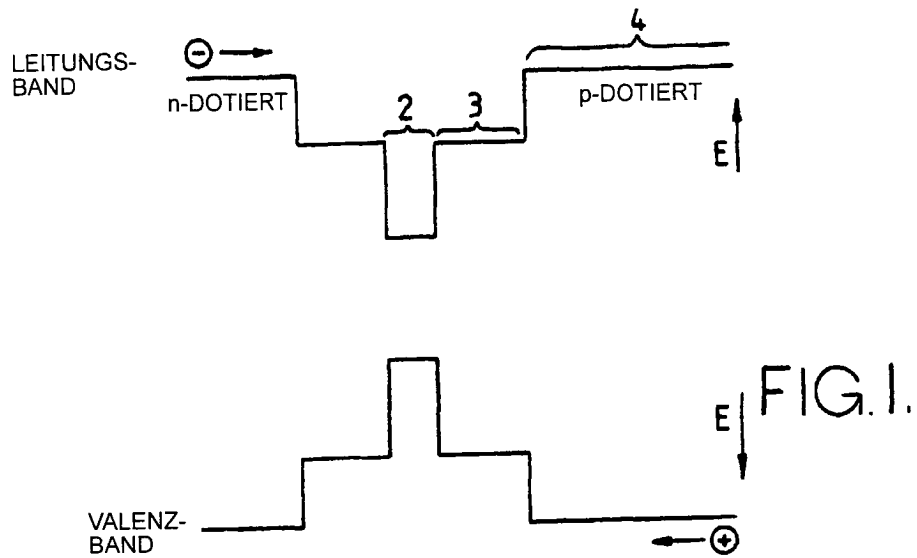
24. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 23, wobei die Vorrichtung zudem ein zweites Übergittergebiet (**42**, **76**) mit einem sich wiederholenden Muster von dritten und vierten Halbleitergebieten aufweist, die Musterperiode ausreichend klein ist zur Ausbildung eines Minibands innerhalb des zweiten Gebiets und wobei die aktive Schicht (**72**) zwischen den ersten und zweiten Übergittergebieten (**58**, **78** und **42**, **76**) eingebettet ist.

25. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 24, wobei die relativen Dicken der dritten und vierten Halbleitergebiete und/oder die Periode des sich wiederholenden Musters ortsabhängig variieren.

26. Optoelektronische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 7, wobei die ersten Halbleitergebiete im Wesentlichen doppelt so dick wie die zweiten Halbleitergebiete sind.

Es folgen 19 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen





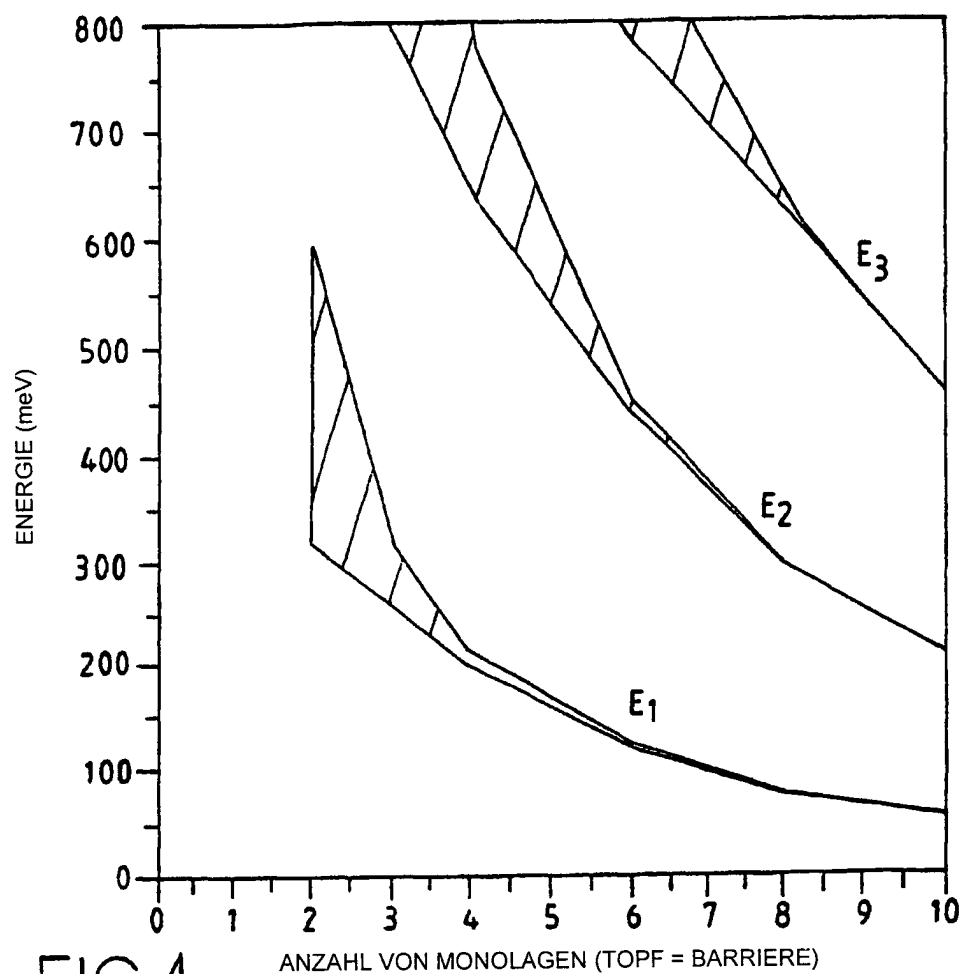


FIG.4.

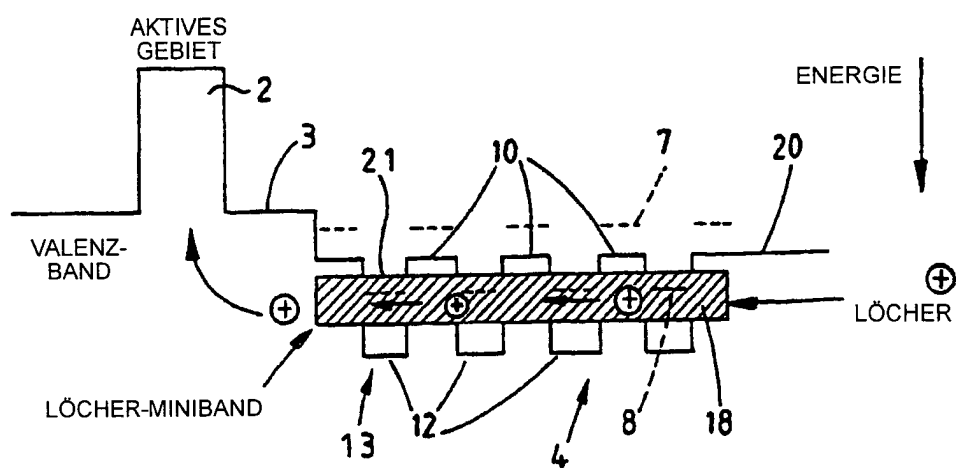


FIG.6.

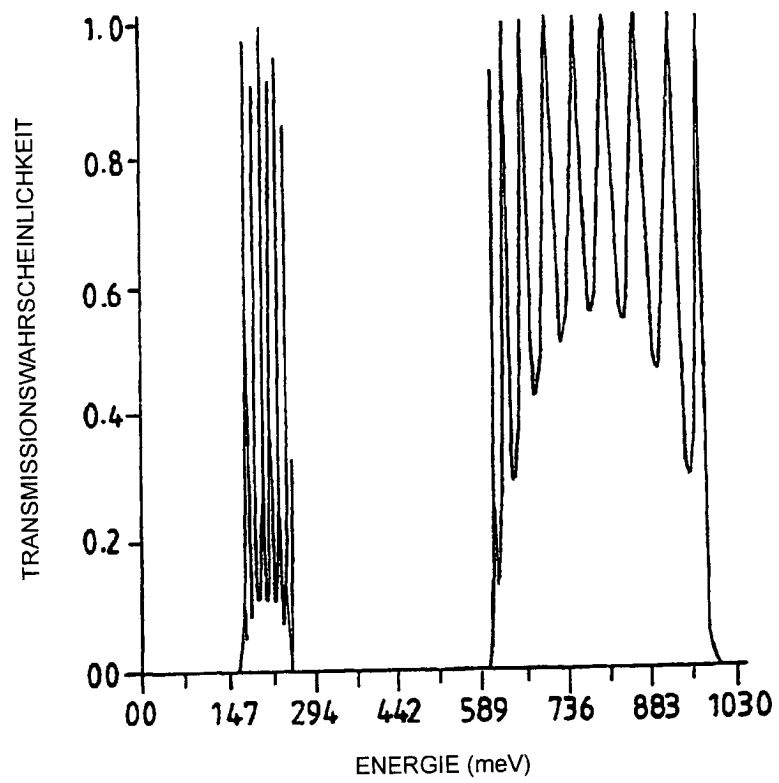


FIG.5.

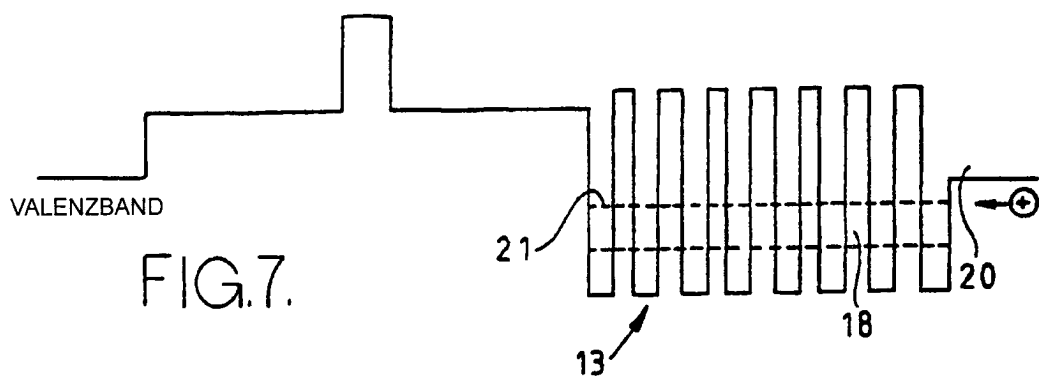
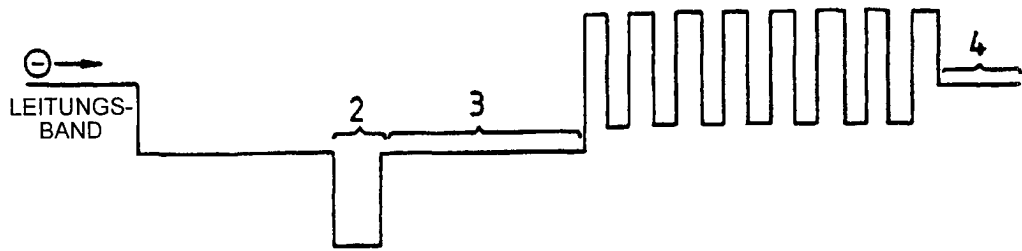


FIG. 8.

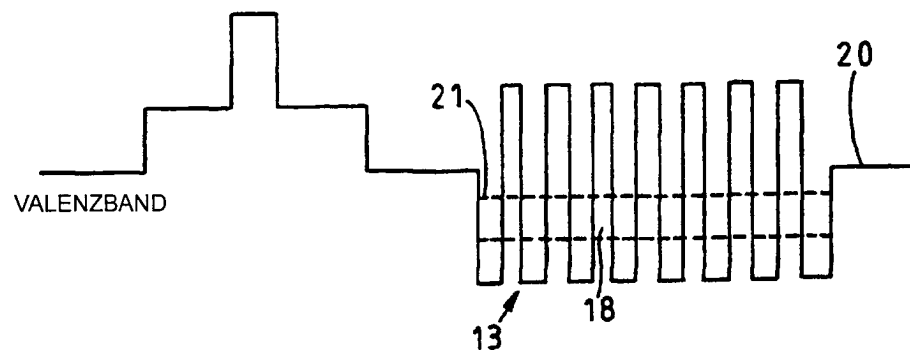
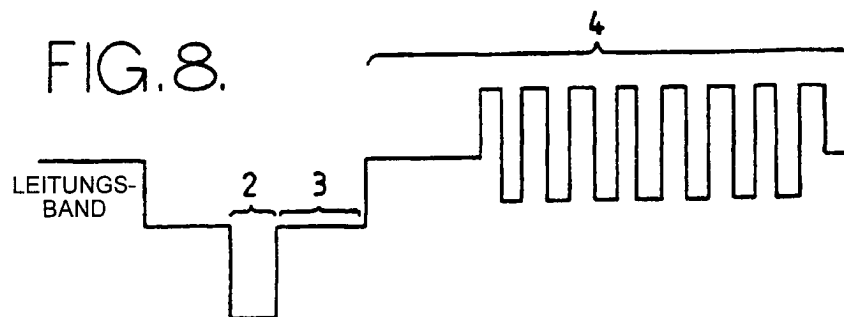


FIG.9.

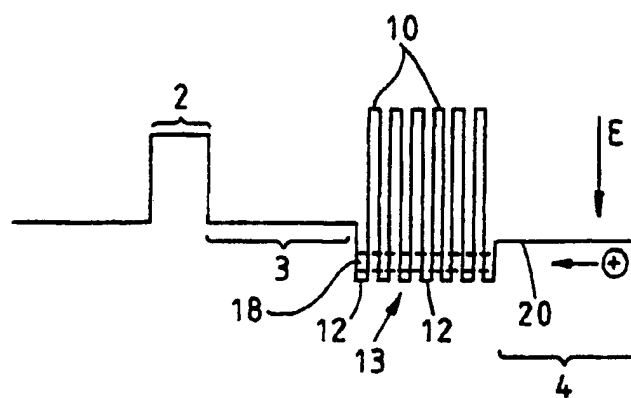
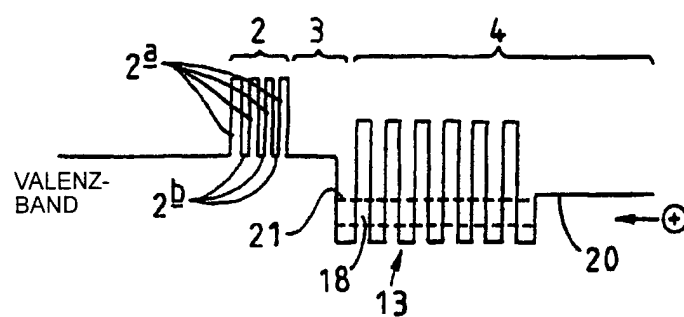


FIG.10.

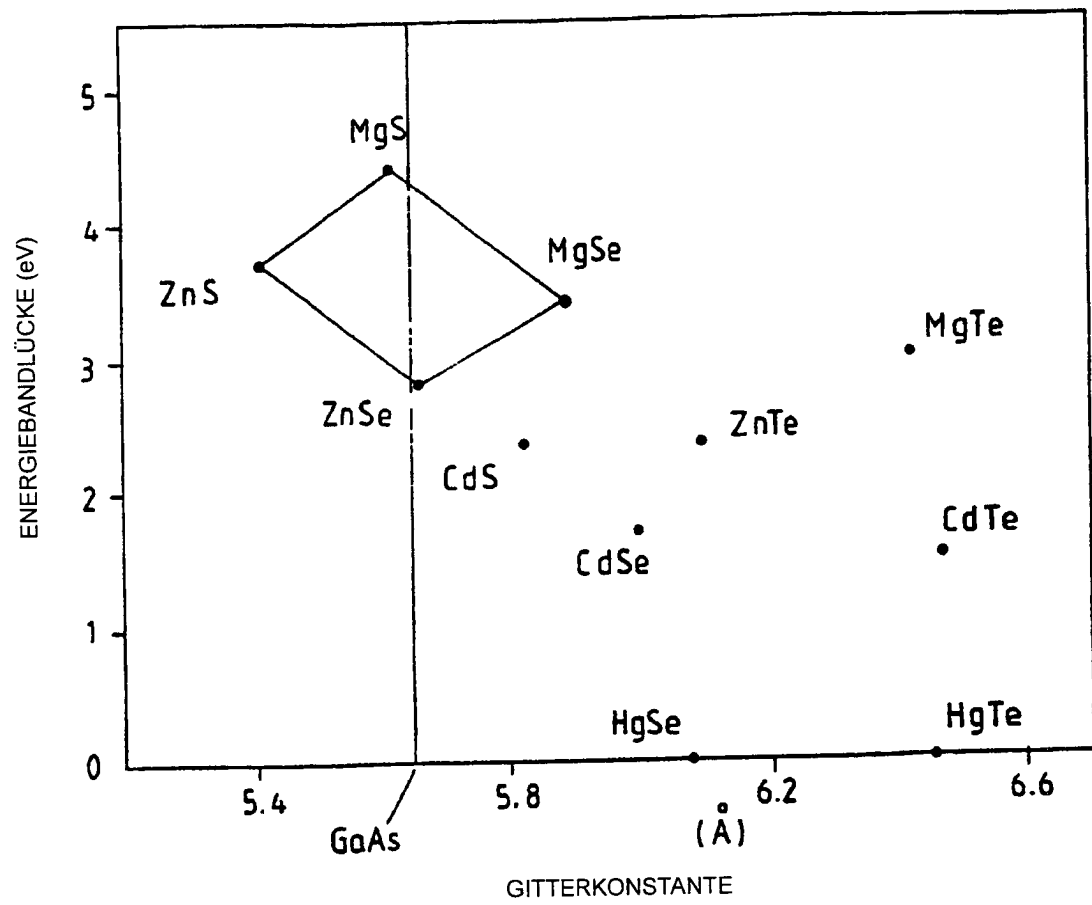


FIG.11.



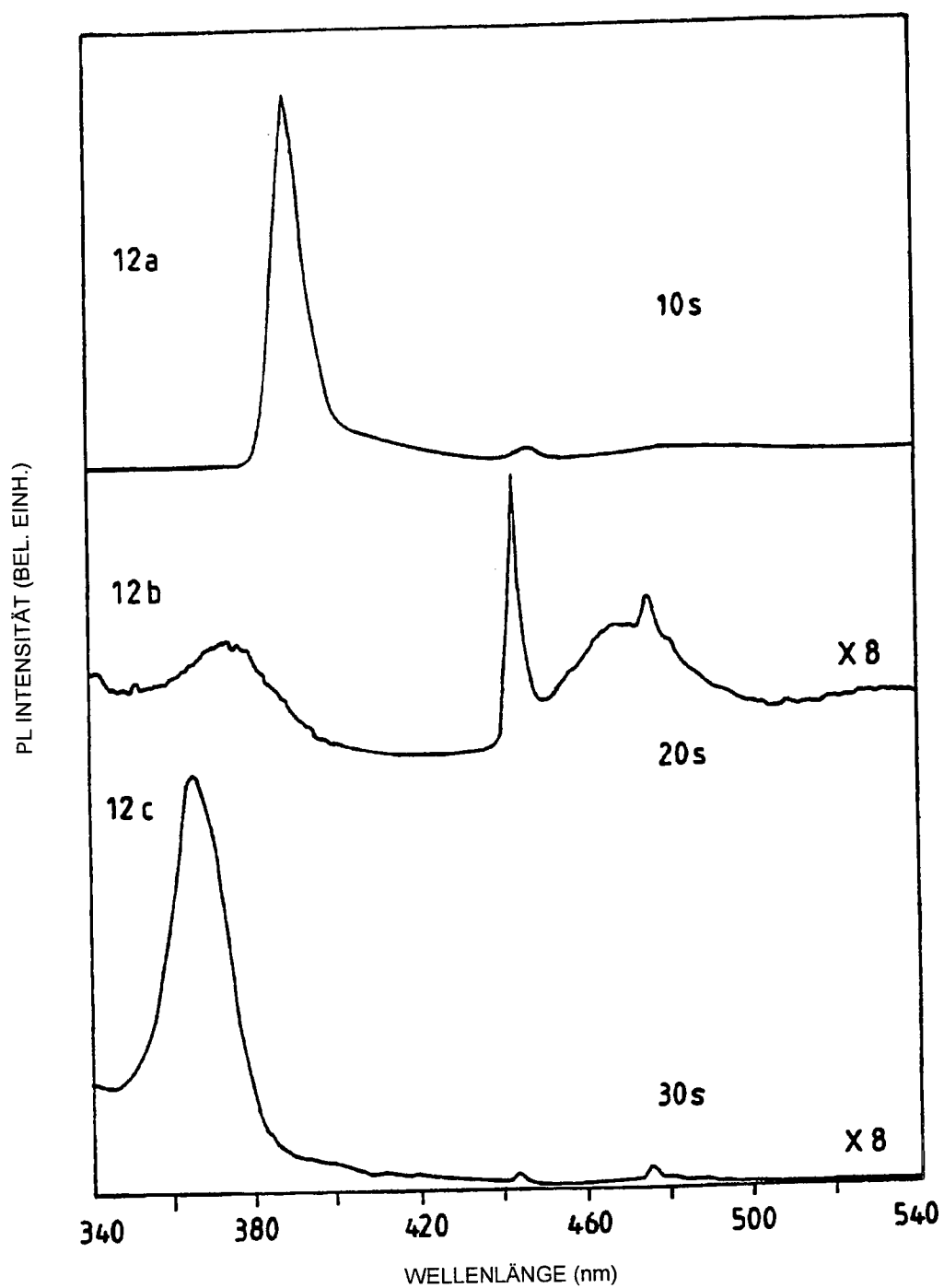


FIG.12

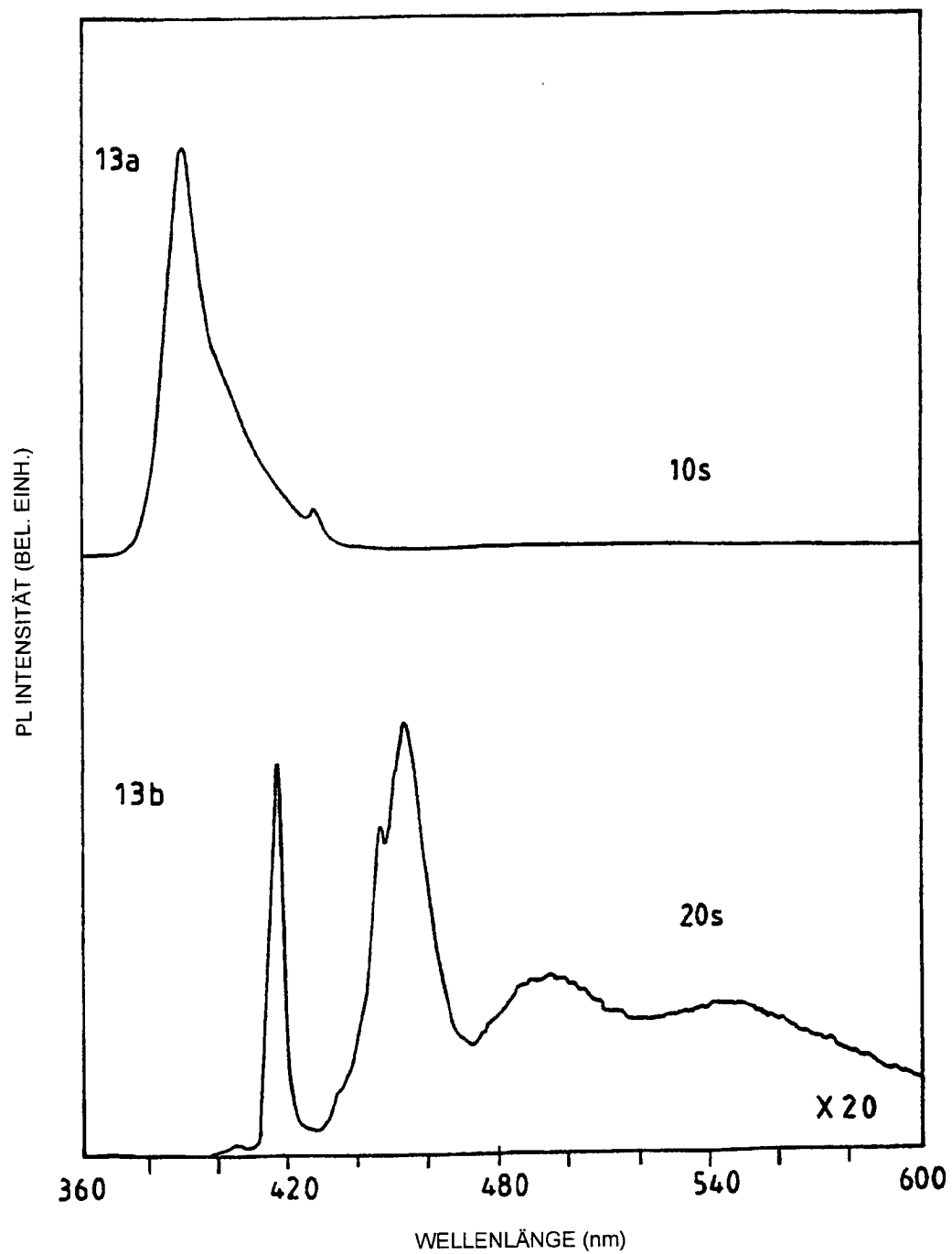


FIG.13

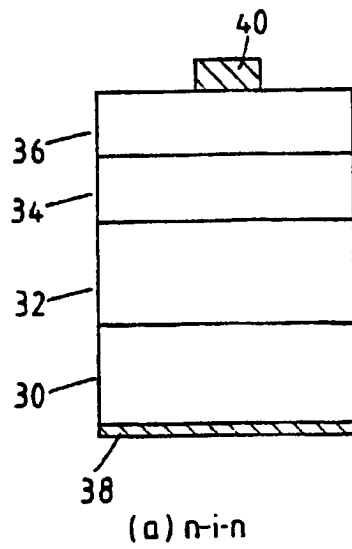


FIG.14.

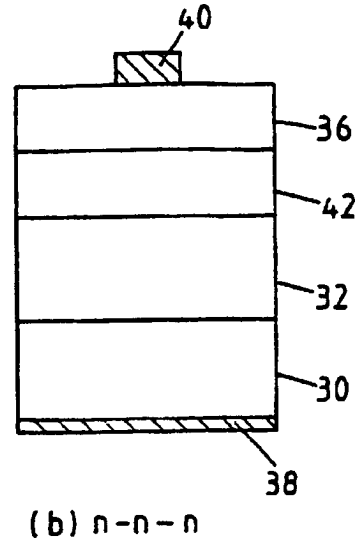


FIG.15.

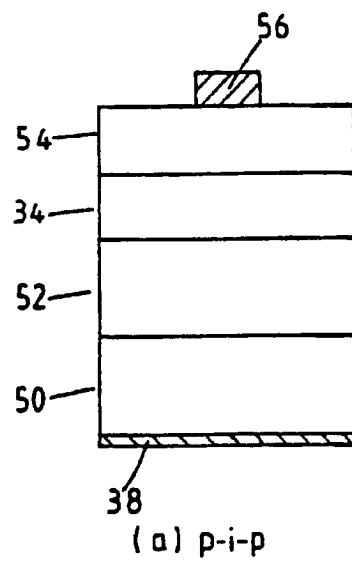


FIG.18.

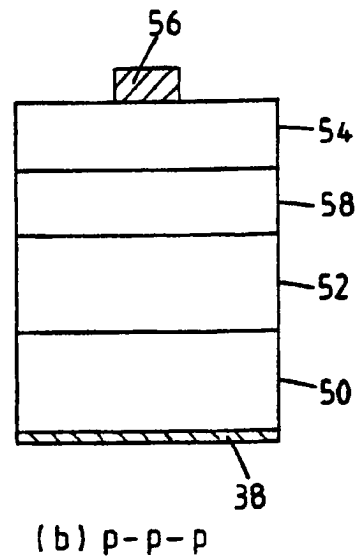


FIG.19

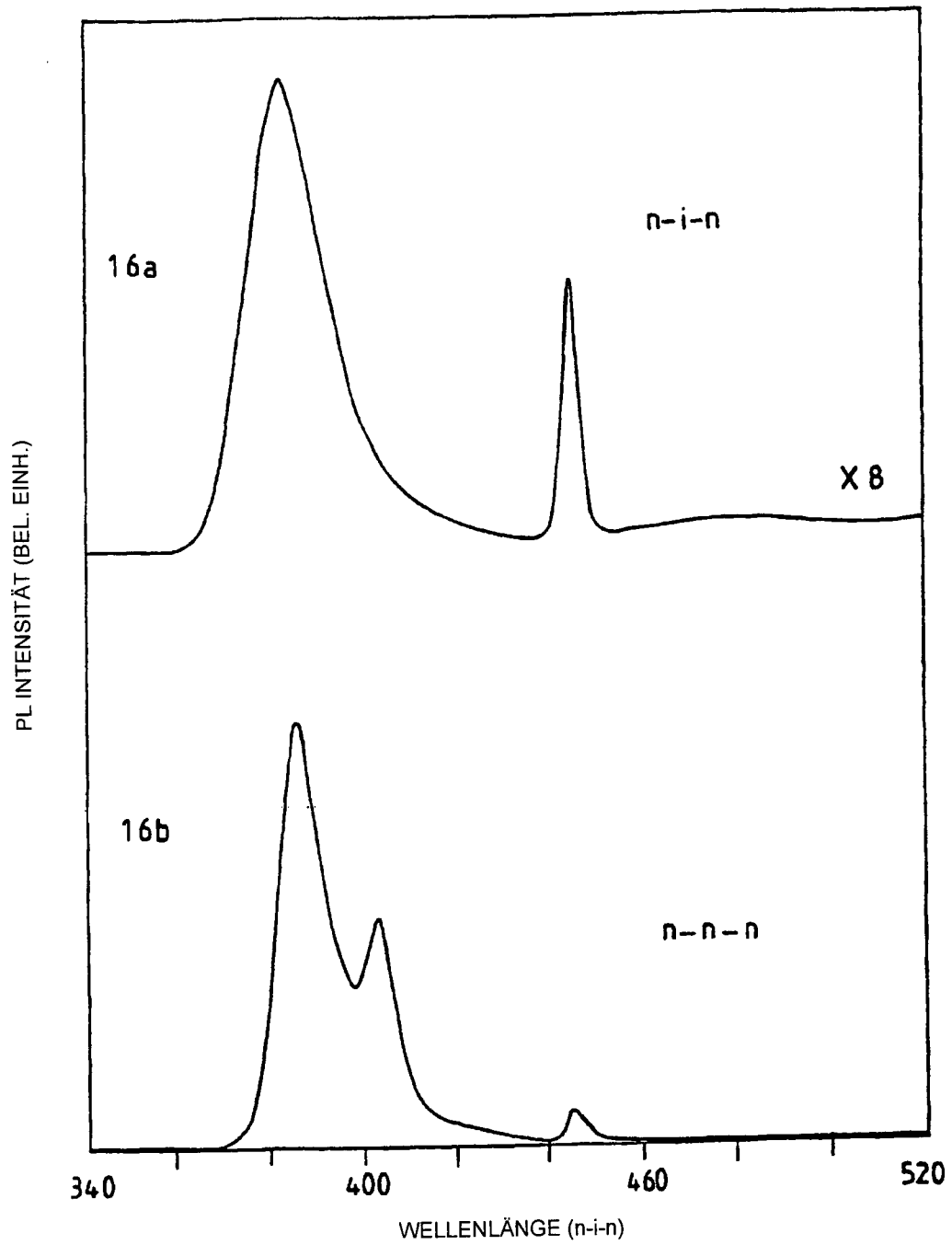


FIG.16.

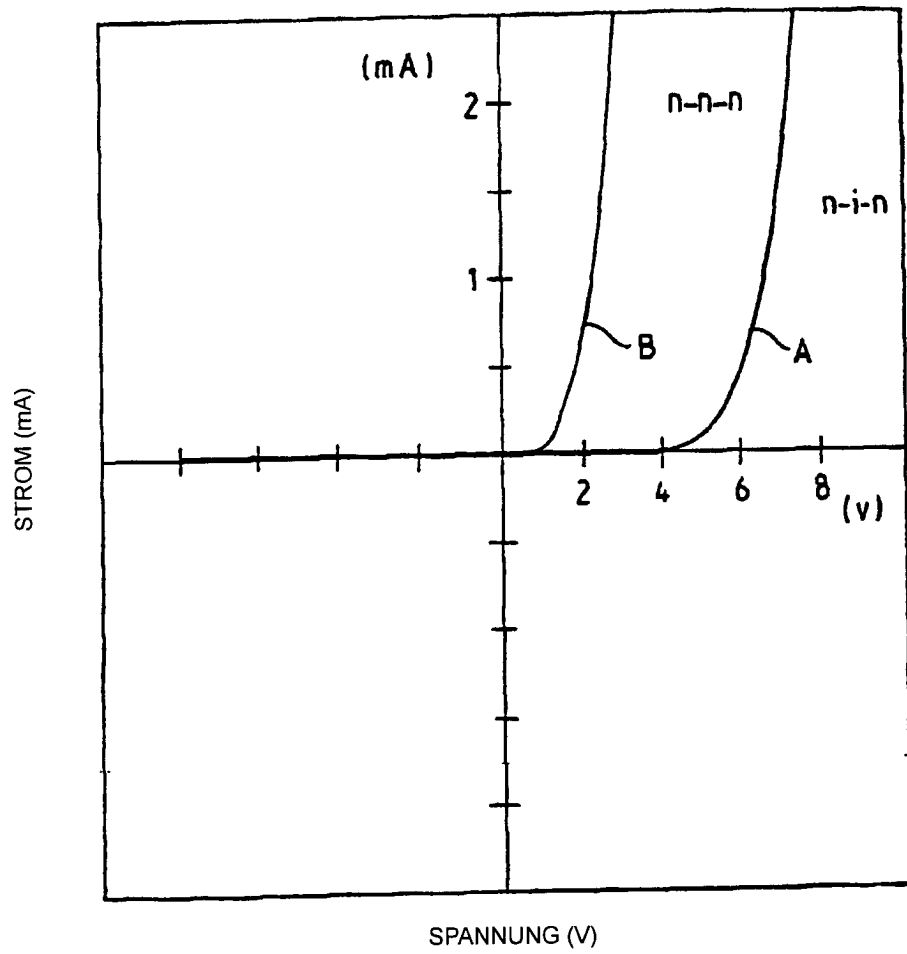


FIG.17.



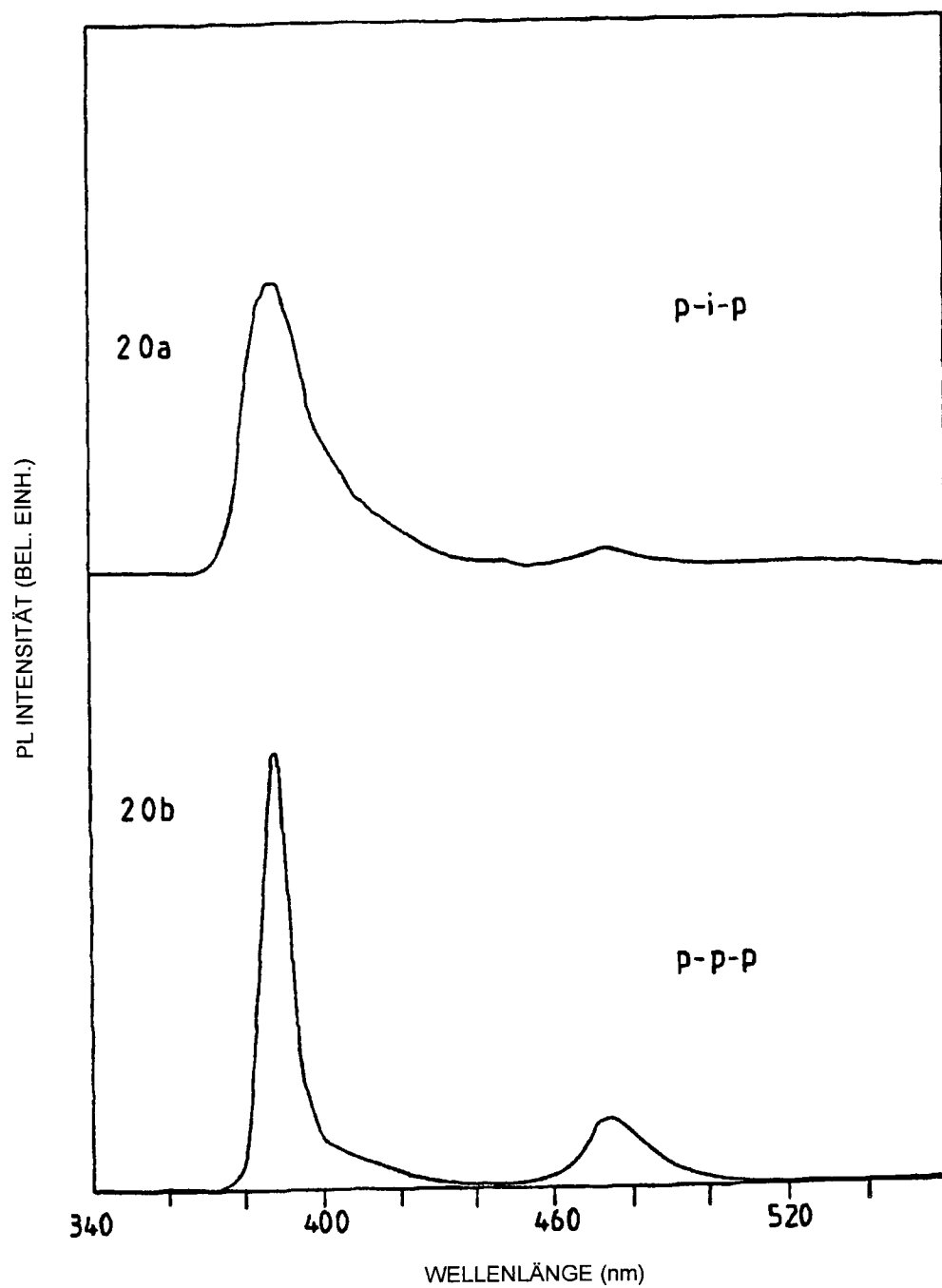


FIG.20.

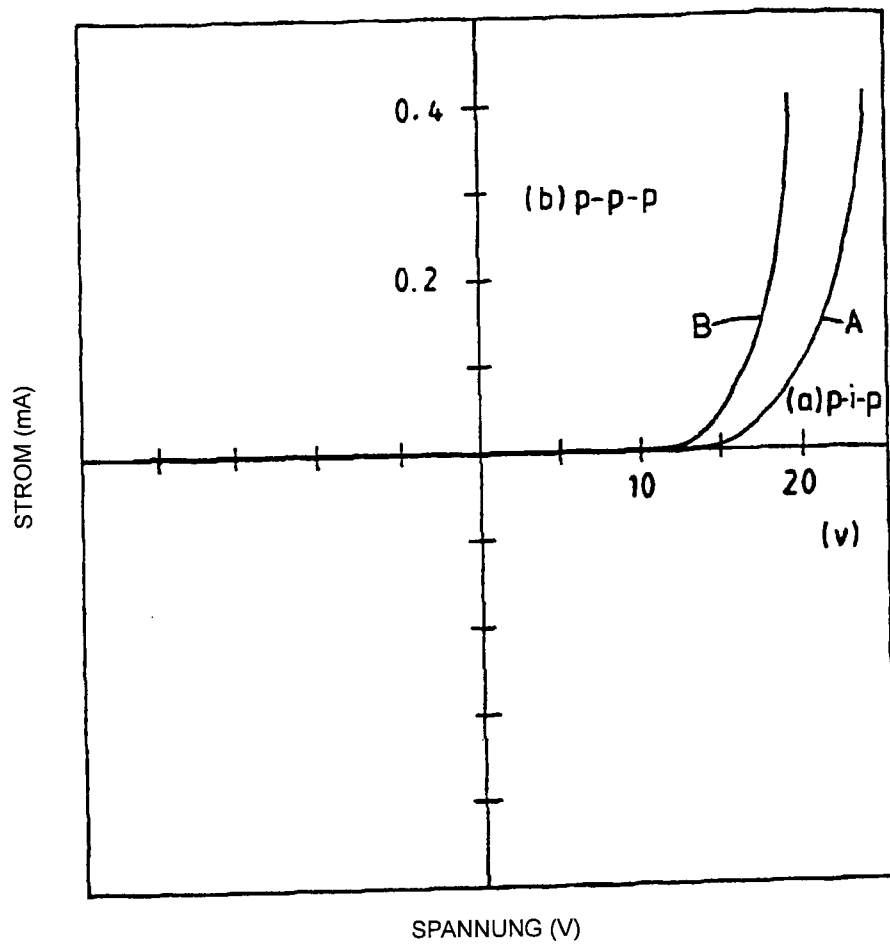


FIG. 21.

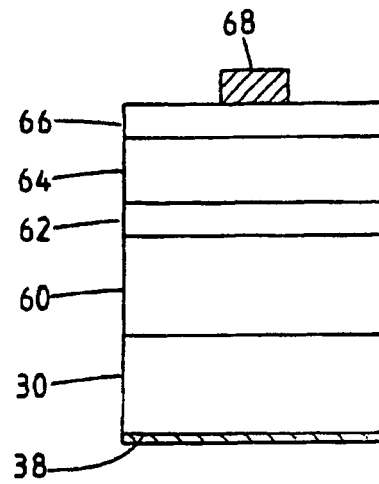


FIG.22.

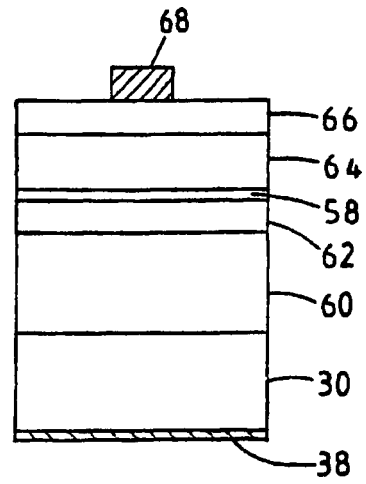


FIG.23.

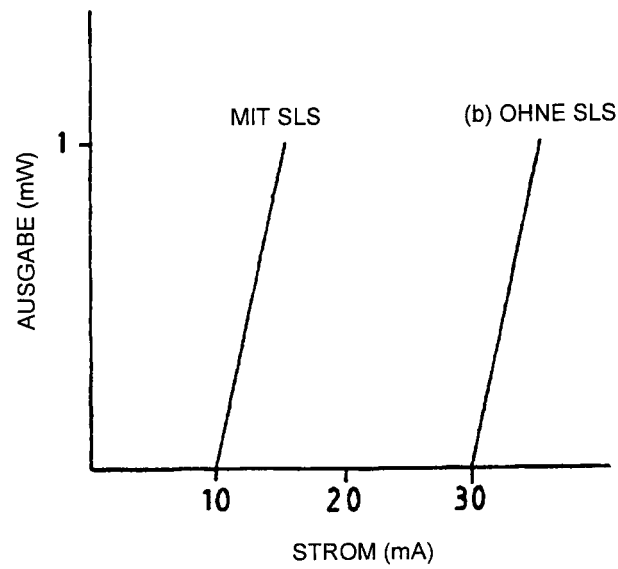


FIG.24.

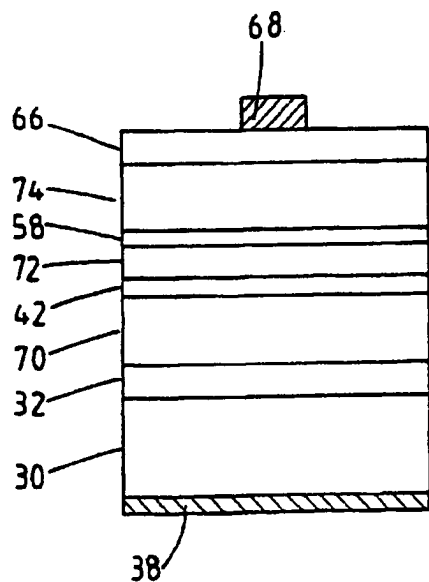


FIG.25.

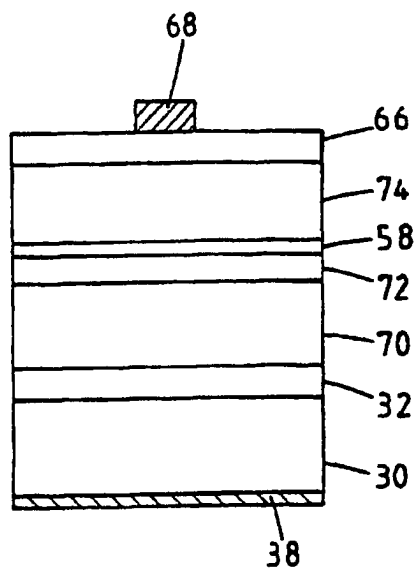


FIG.26.

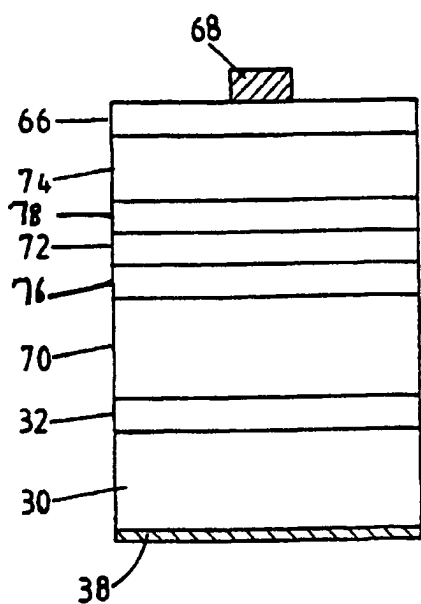
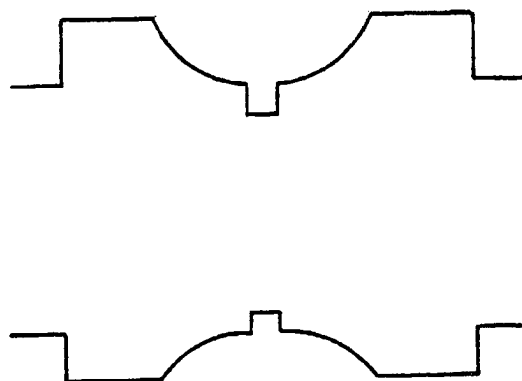
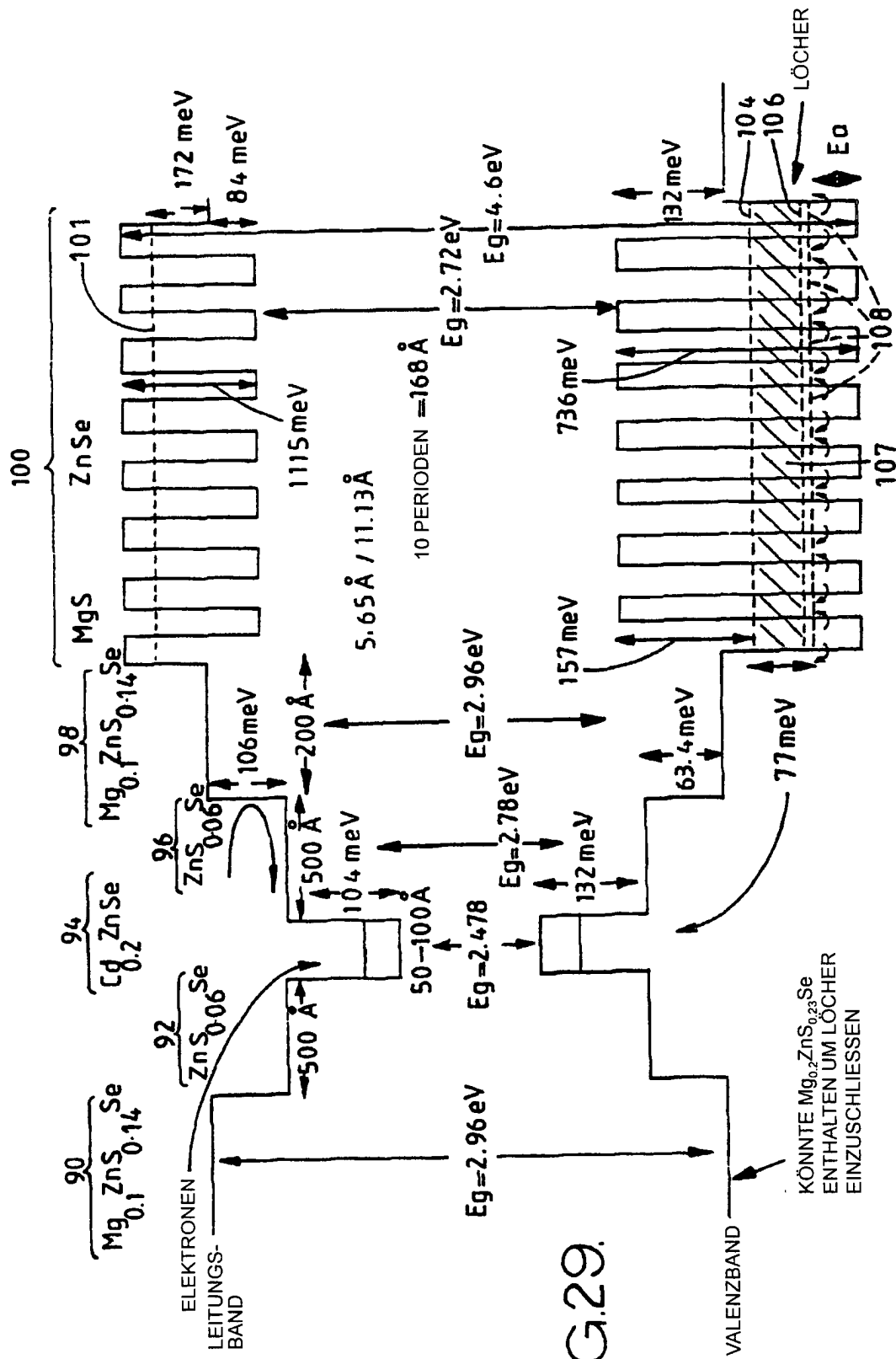


FIG.27.



GRIN - SCH

FIG.28.





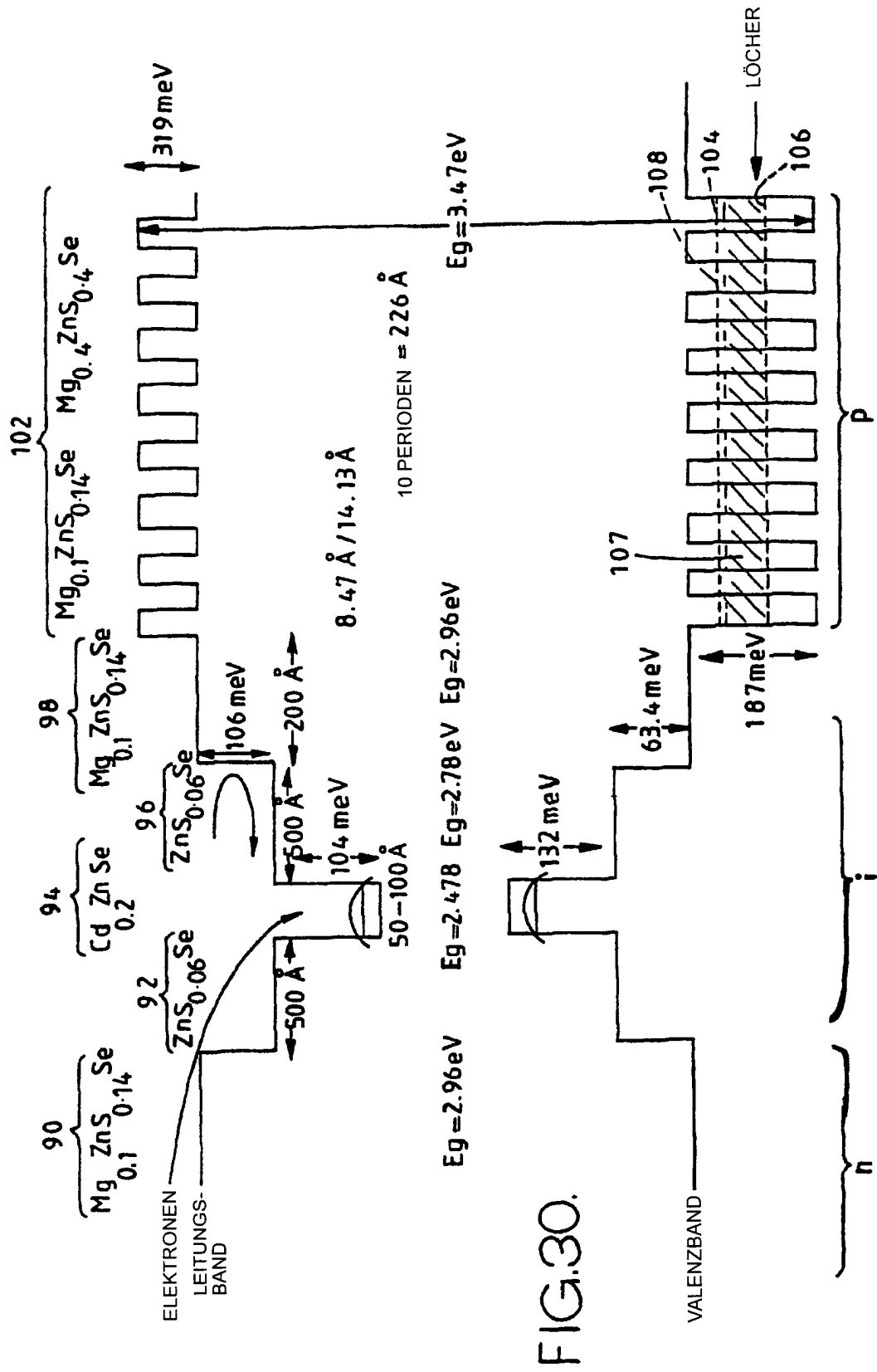
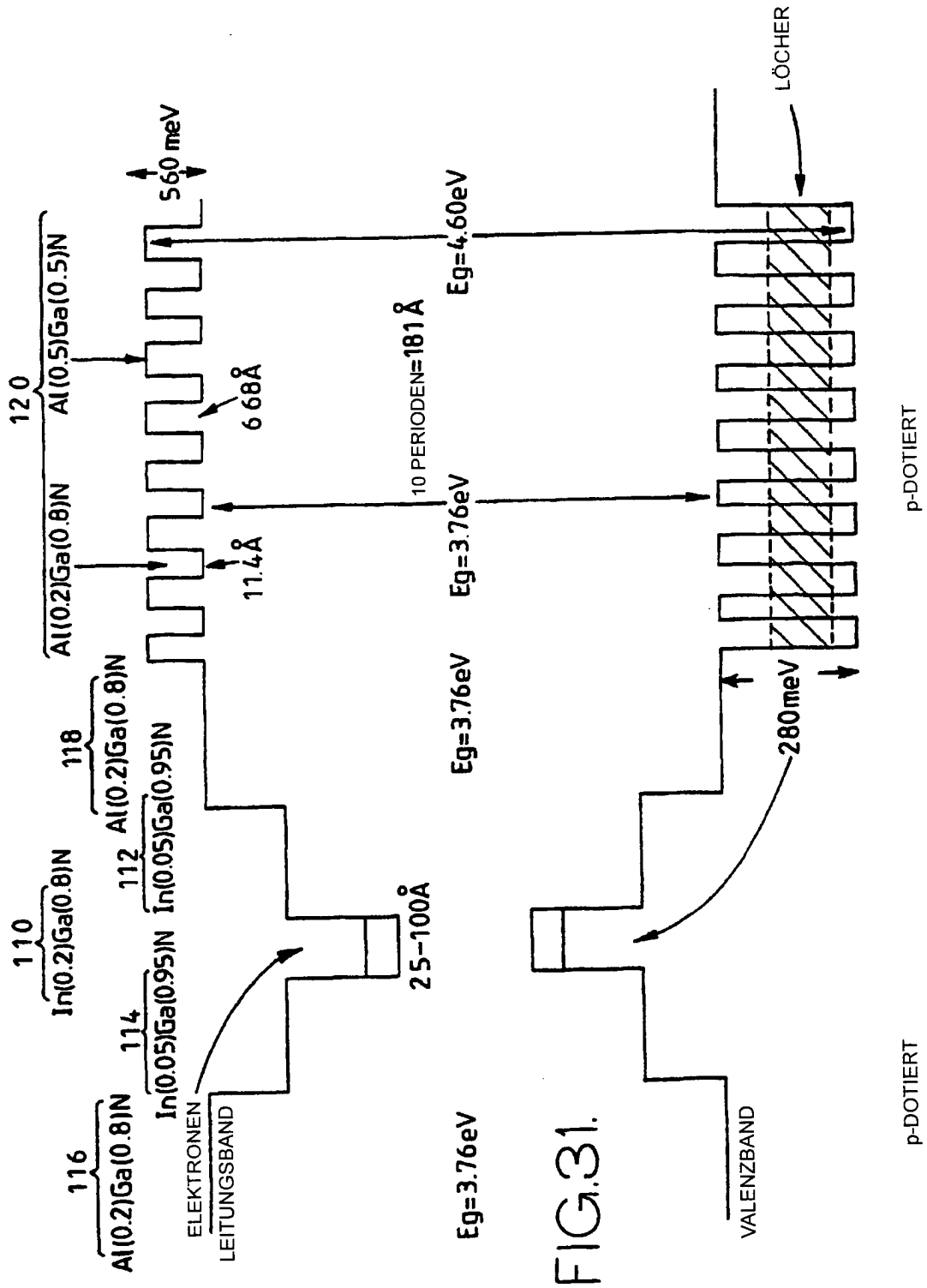


FIG.30.



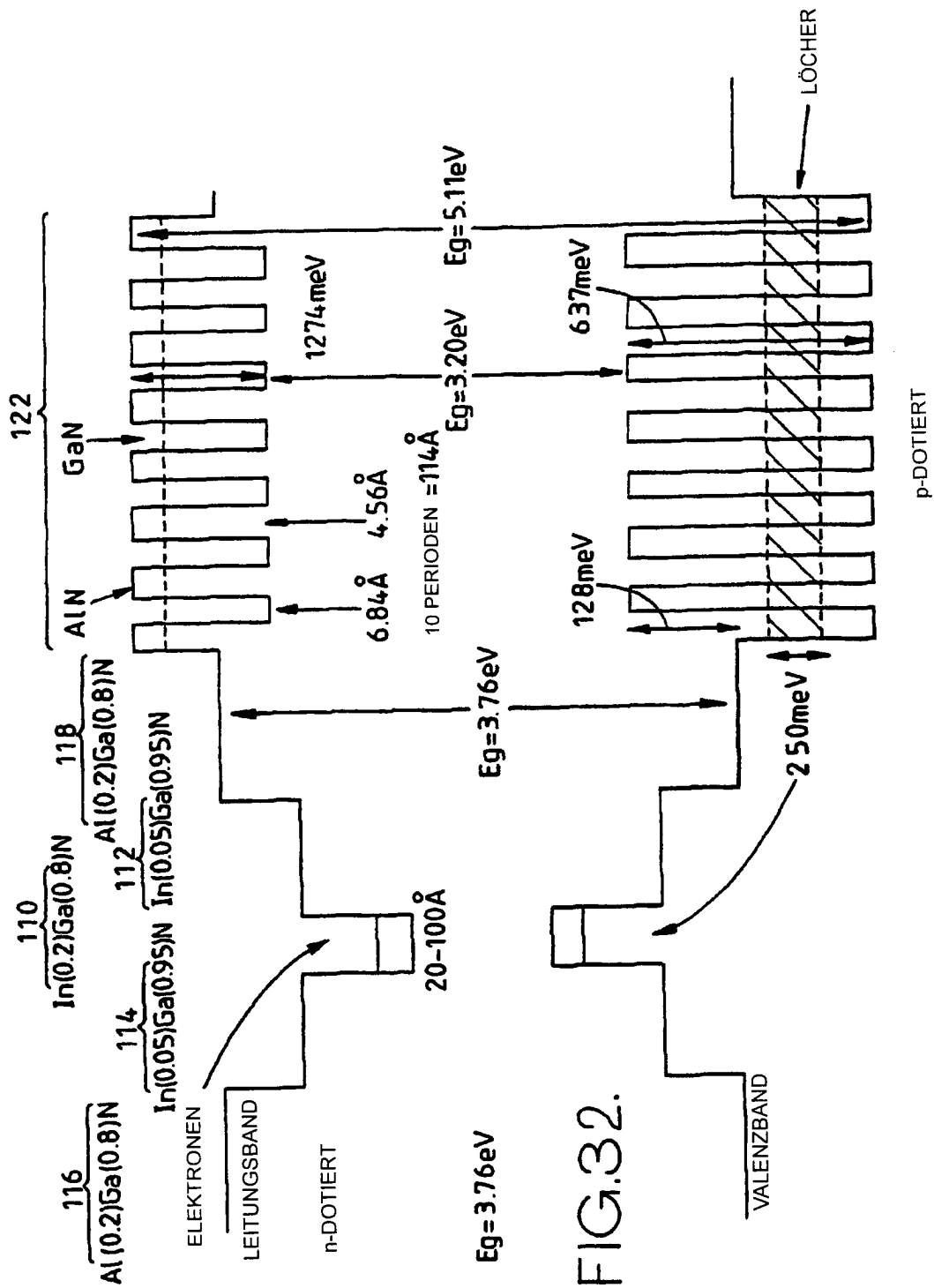


FIG.32.