(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 696 30 387 T2** 2004.07.15

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 838 093 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **696 30 387.6**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US96/02052**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **96 908 469.8**
(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 96/025767**
(86) PCT-Anmeldetag: **14.02.1996**
(87) Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung: **22.08.1996**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **29.04.1998**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **15.10.2003**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **15.07.2004**

(51) Int Cl.[7]: **H01L 29/15**
H01L 29/16, H01S 5/34, H01L 33/00, H01L 31/0352, H01L 39/12

(30) Unionspriorität:
393380 **17.02.1995** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, IE, IT, LI, NL, SE

(73) Patentinhaber:
Painter III, Bland A., Troutville, Va., US

(72) Erfinder:
BROWN, G., Thomas, Rochester, US

(74) Vertreter:
Lange, T., Dipl.-Phys.(Univ.) Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 81673 München

(54) Bezeichnung: **PHONONENRESONATOR**

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

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

Beschreibung

Hintergrund der Erfindung

[0001] Halbleiter-Materialien haben sich als Meilenstein der elektronischen Revolution erwiesen; und dank seiner Reinheit, einfachen Fabrikation und hohen Herstellungsausbeute ist Silizium das in der Technologie integrierter Schaltkreise am meisten genutzte Material. Bei dem anhaltenden Druck, schnellere und effizientere Bauteile zu schaffen, besteht ein großes Interesse in der Entwicklung oder dem Auffinden von neuen, preiswerten Materialien, die die mit der Zunahme der Parallelverarbeitung und höheren Datenraten verknüpften Zwischenverbindungs-Anforderungen erfüllen. Darüber hinaus hat der Druck, die Bauteilabmessungen und -dichte zu reduzieren, zu Anstrengungen geführt, Materialien mit verbesserten Wärmedissipations- und/oder elektrischen Leitfähigkeitseigenschaften zu ermitteln.

[0002] Die Verwendung von supraleitenden Materialien in Kombination mit den bestehenden Halbleiter-Technologien wurde als eine Lösung der Wärmedissipationsprobleme, die bei den Halbleiter-Materialien der heutigen Tage auftreten, vorgeschlagen. Insbesondere wurde vorgeschlagen, die Wärmedissipation durch die Verwendung von supraleitenden Drähten und Verbindungen in integrierten Schaltkreisen zu reduzieren. Unglücklicherweise arbeiten jedoch selbst die kürzlich entdeckten "Hochtemperatur"-Supraleiter nicht oberhalb cryogener Temperaturen. Darüber hinaus lassen die Kosten und die ingenieurtechnischen Schwierigkeiten, die mit der Integration verfügbarer Supraleiter- und Halbleiter-Technologien verbunden sind, diese Möglichkeit unpraktikabel oder sogar unmöglich erscheinen.

[0003] Optische Kommunikationssysteme bieten eine mögliche Lösung für das Zwischenverbindungsproblem, jedoch wurden Entwicklungsanstrengungen durch die mit der Integration von effizienten Lichtquellen in verfügbare Siliziumschaltkreise verbundenen Schwierigkeiten gehemmt. Silizium als solches weist wie die anderen Mitglieder seiner Familie (Gruppe IV) des Periodensystems aufgrund seiner zentralsymmetrischen Kristallstruktur und einer indirekten Bandlücke, die die Photonemission über effiziente Band-zu-Band Strahlungsübergänge (siehe unten) verhindert, beschränkte optische Fähigkeiten auf.

[0004] Große Anstrengung wurde aufgewandt, um die Auswahlregeln zu umgehen, die Band-zu-Band Strahlungsübergänge in Halbleitern mit indirekter Bandlücke verbieten, um Halbleiter-Materialien mit verbesserten optischen Eigenschaften zu entwickeln (Iyer et al., Science 260: 40–46, 1993). Eine Vorgehensweise besteht darin, geeignete Verunreinigungen in das Gitter der Gruppe IV einzubringen. Die enge Bindung eines Exzitons (eines Elektron-Loch-Paars) an eine Verunreinigung kann effiziente Strahlungsübergänge schaffen, wenn ein ausreichend großes Volumen von Verunreinigungen eingebracht wurde. Die erfolgreichste dieser Anstrengungen betrafen isoelektronische Komplexe und den Seltene-Erden Dotierstoff Erbium. Jedoch ist es schwer, Erbium wie auch andere strahlende Verunreinigungskomplexe in einer Konzentration einzubringen, die ausreichend ist, um eine optische Verstärkung zu schaffen.

[0005] Anstrengungen wurden ebenfalls darauf gerichtet, geordnete Legierungen und Übergitter (Superlattices) zu wachsen, und zwar mit dem Gedanken, ein Bandlücken-Engineering zum "Falten" der Brillouin-Zone zu nutzen und ein Material mit einer quasi direkten Lücke zu erzielen (Presting et al., Semicond. Sci. Technol. 7: 1127–1148, 1992). Das populärste dieser Materialsysteme war Silizium-Germanium, sowie ein kürzliches Interesse an der quaternären Legierung Kohlenstoff-Silizium-Germanium-Zinn. Diese Materialien müssen noch die Strahlungseffizienz, die in Materialien mit direkter Bandlücke gefunden wird, zeigen.

[0006] Ein vielfach erforschter (jedoch wenig verstandener) Lichtemissionsmechanismus tritt in Silizium auf, das einen elektrochemischen Ätzprozess unterzogen wurde (Iyer et al., supra). Die Ätzung erzeugt eine poröse Struktur mit Nanometerpartikeln, die bei einer Passivierung eine effiziente, sichtbare Photolumineszenz bieten. Proben von geätztem Silizium wurden auch bei einer Elektrolumineszenz erregt und haben Interesse für Anzeigeeinrichtungen geweckt.

[0007] Darüber hinaus wurden LEDs unter Verwendung von Siliziumkarbid gefertigt. Es war wegen der diskutierten zugrunde liegenden Gründe jedoch nicht möglich, optische Verstärker (beispielsweise Laser) unter Verwendung von Materialien mit einer indirekten Bandlücke herzustellen.

[0008] Es besteht daher ein Bedürfnis für die Entwicklung von Materialien mit verbesserten optischen, elektronischen und/oder Wärmedissipationseigenschaften. Es besteht ein spezielles Bedürfnis für verbesserte Halbleiter-Materialien. Vorzugsweise sollten die verbesserten Materialien kompatibel mit den elektronischen Materialien der heutigen Tage (beispielsweise Silizium) sein.

Darstellung der Erfindung

[0009] Die vorliegende Erfindung schafft ein verbessertes Material, in welchem optische, elektronische und/oder Wärmedissipationscharakteristiken aufgrund bestimmter Elektron-Phonon Wechselwirkungen in dem Material verstärkt oder unterdrückt werden. Insbesondere schafft die vorliegende Erfindung ein Material mit einer indirekten Bandlücke, das als ein Resonator für Phononen einer gewünschten Wellenzahl arbeitet. In

einigen Ausführungsformen zeigt der Phononenresonator der vorliegenden Erfindung eine erhöhte Photonemission oder Photonabsorptionsfähigkeit im Vergleich zu bekannten Materialien mit indirekter Bandlücke. In anderen Ausführungsformen weist der vorliegende Phononenresonator erhöhte elektrische Eigenschaften, wie beispielsweise elektrische Leitfähigkeit, auf. Der Phononenresonator der vorliegenden Erfindung kann ebenfalls verbesserte thermische Leitfähigkeitseigenschaften zeigen und kann in elektronische Geräte eingebaut werden, um eine verbesserte Wärmeableitung zu schaffen. Die vorliegende Erfindung schafft ferner ein Isotopen-Übergitter, das ein Phononenresonator ist.

[0010] Der Phononenresonator der vorliegenden Erfindung kann in jegliche einer Vielfalt von unterschiedlichen optischen Geräten, wie beispielsweise LEDs und Laser, eingebaut werden. Der vorliegende Phononenresonator kann beispielsweise in der optischen Nachrichtenübertragung, Datenspeicherung, beim optischen Drucken, UV-Lichtemission, infraroten Lasern, usw. verwendet werden. Andere Ausführungsformen des Phononenresonators der vorliegenden Erfindung weisen verbesserte elektrische Leitfähigkeit auf und können in elektrischen Anwendungen, wie beispielsweise Supraleitungs-Anwendungen, eingesetzt werden.

[0011] Die vorliegende Beschreibung gibt auch Herstellungsmethoden eines Isotopen-Übergitters, das ein Phononenresonator ist, an.

[0012] Der Phononenresonator der vorliegenden Erfindung ist eine Struktur einer im Wesentlichen periodisch variierenden Dichte, mit zumindest einem ersten Bereich mit einer ersten Dichte; und zumindest einem zweiten Bereich mit einer zweiten Dichte, wobei die ersten und zweiten Bereiche einander benachbart sind und in der Struktur alternieren, so dass die Struktur eine im Wesentlichen periodisch variierende Dichte aufweist. Die Periode der Struktur ist so gewählt, dass die Struktur im Wesentlichen resonant für Phononen eines geeigneten Wellenvektors zum Teilhaben an Elektron-Phonon Wechselwirkungen (beispielsweise Phononen eines für das Teilhaben an strahlenden elektronischen Übergängen geeigneten Wellenvektors, Phononen für das Teilhaben an Interzonen und/oder Intertäler-Streuprozessen von Leitungsbandelektronen geeigneten Wellenvektor) ist.

[0013] In einigen Ausführungsformen ist der Phononenresonator der vorliegenden Erfindung eine Struktur mit entarteten Leitungsbandtälern und im Wesentlichen periodischen Variationen der Materialzusammensetzung, so dass eine Streuung der Elektronen zwischen den entarteten Tälern des Leitungsbandes gegenüber einer Intertäler-Streuung von Elektronen in einer Struktur, die die im Wesentlichen periodischen Variationen nicht aufweist, erhöht ist.

[0014] In einigen Ausführungsformen variiert die Dichte oder die Materialzusammensetzung der Struktur periodisch in mehr als einer Dimension; in anderen Ausführungsformen umfasst jeder Bereich eine Schicht, so dass die Dichte oder Materialzusammensetzung der Struktur lediglich in einer einzigen Dimension periodisch variiert.

[0015] Bei der vorliegenden Erfindung ist der Phononenresonator eine Schichtstruktur, die ein Isotopen-Übergitter umfasst, in welchem jede Schicht mit einem Isotop eines Elements angereichert ist. Vorzugsweise sind die Schichten mit unterschiedlichen Isotopen desselben Elements, beispielsweise Silizium, angereichert. In einigen bevorzugten Ausführungsformen des Silizium-Isotopen-Supergitters der vorliegenden Erfindung weist das Übergitter eine Periode auf, die ein ganzzahliges Vielfaches von fünf Atomlagen ist; in alternativen bevorzugten Ausführungsformen beträgt die Periode ein ganzzahliges Vielfaches von zehn Antomlagen.

[0016] Der Phononenresonator der vorliegenden Erfindung ist in einigen Ausführungsformen auch resonant für (direktionale oder kohärente) Phononen, die durch stimulierte Phononenemission erzeugt werden, so dass der Resonator eine beschleunigte Wärmeableitung ermöglicht. In einigen Ausführungsformen schafft der Phononenresonator eine stochastische Phononenresonanz.

[0017] Die vorliegende Erfindung schafft darüber hinaus eine Vielzahl von Vorrichtungen, die einen Phononenresonator beinhalten. Die Erfindung schafft unter anderem eine lichtemittierende Vorrichtung, die eine erste Elektrode aufweist, die an einer ersten Seite der Struktur angeordnet ist, und eine zweite Elektrode aufweist, die an einer zweiten Seite der Struktur angeordnet ist, wobei die zweite Seite der ersten Seite gegenüberliegt. Wenigstens eine der Elektroden kann transparent sein, sofern dies gewünscht ist. Die lichtemittierende Vorrichtung der vorliegenden Erfindung kann einen p-dotierten Bereich und einen n-dotierten Bereich umfassen, und kann als eine lichtemittierende Diode (LED) arbeiten. Die p- und n-dotierten Bereiche der lichtemittierenden Vorrichtung der vorliegenden Erfindung können eine größere Bandlücke aufweisen als der Phononenresonator, so dass die Elektronen und Löcher innerhalb des Phononenresonators beschränkt sind. Die lichtemittierende Vorrichtung der vorliegenden Erfindung enthält vorzugsweise einen dielektrischen Wellenleiter, der bevorzugt durch den p-dotierten Bereich und den n-dotierten Bereich gebildet ist, die beide einen Brechungsindex aufweisen, der höher als derjenige der Struktur ist. In einigen Ausführungsformen ist die lichtemittierende Vorrichtung der vorliegenden Erfindung ein Laser (beispielsweise Spaltflächenreflektion, verteilte Rückkopplung (distributed feedback) und/oder Vertikalhohlraum-Oberflächen-emittierend).

[0018] Die vorliegende Erfindung betrifft darüber hinaus Vorrichtungen aus der Gruppe, die aus lichtemittierenden Vorrichtungen, lichtemittierenden Dioden, Laserdioden, Spaltflächen-Reflektionslasern, Lasern mit verteilter Rückkopplung, Vertikalhohlraum-Oberflächen-emittierenden Lasern, optischen Detektoren, optischen Modulatoren, nichtlinearen optischen Vorrichtungen, elektrischen Leitern, planaren Transformatoren, Dioden,

bipolaren Transistoren, Feldeffekttransistoren, integrierten Schaltkreisen, SQUIDs, Josephson-Kontakten, Wandlern, Mikrowellen-Detektoren, besteht, welche gegenüber konventionellen Vorrichtungen verbessert sind, da sie einen Phononenresonator enthalten, der im Wesentlichen resonant für Phononen eines für die Teilhabe an Phonon-Elektron Wechselwirkungen geeigneten Wellenvektors ist.

[0019] Die vorliegende Erfindung schafft ferner ein Verfahren zur Herstellung eines Phononenresonators, das die Schritte des Herstellens einer Struktur mit einer im Wesentlichen periodisch variierenden Dichte mit zumindest einem ersten Bereich oder einer ersten Schicht mit einer ersten Dichte und zumindest einem zweiten Bereich oder einer zweiten Schicht mit einer zweiten Dichte aufweist, wobei die ersten und zweiten Bereiche oder Schichten einander benachbart sind und in der Struktur alternieren, so dass die Struktur eine im Wesentlichen periodisch variierende Dichte aufweist, wobei die Periode der Struktur so gewählt ist, dass die Struktur für Phononen eines für die Teilhabe an Elektron-Phonon Wechselwirkungen geeigneten Wellenvektors im Wesentlichen resonant ist. Vorzugsweise wird ein Isotopen-übergitter durch Isotopentrennung und Aufbau des Übergitters hergestellt. Isotopentrennung wird vorzugsweise mittels eines Verfahrens durchgeführt, das aus der Gruppe gewählt ist, welche Destillation, Extraktion, Zentrifugierung, Diffusion, elektrochemische Methoden und elektromagnetische Methoden umfasst; der Aufbau des Isotopen-Übergitters wird vorzugsweise durch ein Verfahren ausgeführt, das aus der Gruppe ausgewählt ist, die chemische Gasphasenabscheidung (CVD), Molekularstrahl-Epitaxie und chemische Strahl-Epitaxie umfasst. In manchen Fällen werden die Schritte des Trennens und des Aufbaus getrennt ausgeführt. In alternativen Fällen werden die Schritte des Trennens und des Aufbaus gleichzeitig ausgeführt. In bevorzugten Fällen wird das Isotopen-Übergitter der vorliegenden Erfindung unter Verwendung einer Laserunterstützten chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) hergestellt.

Beschreibung von bevorzugten Ausführungsformen

Figuren:

[0020] **Fig.** 1 ist ein schematisches Schaubild von Energiebändern in einem Festkörper.

[0021] **Fig.** 2 ist ein Schaubild der Energie über dem Impuls für ein Material mit einer direkten Bandlücke.

[0022] **Fig.** 3 ist ein Schaubild der Energie über dem Impuls für ein Material mit einer indirekten Bandlücke.

[0023] **Fig.** 4 veranschaulicht die drei möglichen Photon-Elektron Wechselwirkungen. Insbesondere veranschaulicht **Fig.** 4A die Absorption eines Photons durch ein Elektron, das einen einzigen von lediglich zwei Energiezuständen besetzen kann; **Fig.** 4B veranschaulicht die spontane Emission eines Photons durch ein Elektron, das einen von lediglich zwei Energiezuständen besetzten kann; und **Fig.** 4C veranschaulicht die stimulierte Emission eines Photons durch ein Elektron, das einen einzigen von lediglich zwei Energiezuständen besetzten kann.

[0024] **Fig.** 5 ist ein schematisches Schaubild von Atomen, die in einem kristallinen Festkörper angeordnet sind.

[0025] **Fig.** 6 zeigt Phonon-unterstützte strahlende Übergänge in einem Material mit einer indirekten Bandlücke. **Fig.** 6A veranschaulicht die spontane Emission eines Phonons als Ergebnis einer Elektron-Phonon Wechselwirkung, die die Photonemission stimuliert; **Fig.** 6B veranschaulicht die stimulierte Phonon-Absorption; und **Fig.** 6C veranschaulicht die stimulierte Phononenemission.

[0026] **Fig.** 7 ist eine schematische Darstellung eines Lasers mit verteilter Rückkopplung (DFB-Laser).

[0027] **Fig.** 8 ist ein Schaubild der Energie über dem Impuls für Silizium.

[0028] **Fig.** 9 zeigt ein schematisches Schaubild eines Bereichs eines Silizium-Isotopen-Übergitters der vorliegenden Erfindung.

[0029] **Fig.** 10 veranschaulicht eine lichtemittierende Vorrichtung, die einen Phononenresonator der vorliegenden Erfindung nutzt.

[0030] **Fig.** 11 repräsentierte vier Ausführungsformen (**Fig.** 11A, 11B, 11C und 11D) einer lichtemittierenden Vorrichtung der vorliegenden Erfindung.

[0031] **Fig.** 12 zeigt eine lichtemittierende Diode (LED) der vorliegenden Erfindung.

[0032] **Fig.** 13 zeigt eine LED der vorliegenden Erfindung, in der eine Ladungsträgerbeschränkung mittels eines Heterokontaktes erreicht wird.

[0033] **Fig.** 14 zeigt eine kantenemittierende LED gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0034] **Fig.** 15 stellt (als **Fig.** 15A und 15B) zwei Ausführungsformen einer Laserdiode gemäß der vorliegenden Erfindung dar. **Fig.** 15A zeigt einen Spaltflächen-Reflektionslaser. **Fig.** 15B zeigt einen DFB-Laser.

[0035] **Fig.** 16 zeigt einen Vertikalresonator-oberflächenemittierenden Laser (VECSEL) gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0036] **Fig.** 17 und 18 zeigen alternative Ausführungsformen eines optischen Photodetektors, der einen Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung beinhaltet.

[0037] **Fig.** 19 zeigt die Absorption und Emission eines Phonons durch ein Elektron des Leitungsbandes in einem Halbleiter-Material.

[0038] **Fig.** 20 zeigt eine kohärente Absorption und Emission eines Phonons durch ein Elektron des Leitungsbandes in einem Halbleiter-Material.
[0039] **Fig.** 21 zeigt einen Phonon-vermittelten Austausch zwischen zwei Elektronen des Leitungsbandes in einem Halbleiter-Festkörper.
[0040] **Fig.** 22 veranschaulicht einen Phonon-vermittelten Austausch zwischen Elektronen in unterschiedlichen, entarteten Leitungsband Minima in einem einzelnen Leitungsband eines Halbleiter-Materials.
[0041] **Fig.** 23 stellt einen Graphen des normierten Elektronenpaar-Potentials als Funktion der Paartrennung, gemessen in Perioden des Übergitters, dar. Für die dargestellte Berechnung beträgt die mittlere freie Weglänge **5** Übergitterperioden.
[0042] **Fig.** 24 ist ein Graph, der die Reduzierung der Elektronenpaar-Bindungsenergie darstellt, die mit abnehmender mittlerer freien Elektronenweglänge auftritt.
[0043] **Fig.** 25 zeigt die Elektronenpaar-Bindungsenergie als Funktion des Streuungspotentials für eine feste mittlere freie Weglänge.
[0044] **Fig.** 26 zeigt die Intertal-Streuung von Elektronen in Leitungsbandminima von benachbarten Brillouin-Zonen.
[0045] **Fig.** 27 zeigt einen elektrischen Leiter mit geringem Widerstand gemäß der vorliegenden Erfindung.
[0046] **Fig.** 28 zeigt eine elektrische Diode gemäß der vorliegenden Erfindung.
[0047] **Fig.** 29 zeigt einen Bipolar-Transistor gemäß der vorliegenden Erfindung.
[0048] **Fig.** 30 zeigt einen Sperrschicht-Feldeffekttransistor (JFET) vom n-ten Typ gemäß der vorliegenden Erfindung.
[0049] **Fig.** 31 zeigt einen Metalloxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET) gemäß der vorliegenden Erfindung.
[0050] **Fig.** 32 zeigt einen integrierten Schaltkreis gemäß der vorliegenden Erfindung.
[0051] **Fig.** 33 zeigt ein Laser-unterstütztes chemisches Dampfphasenabscheidungsverfahren nach der vorliegenden Erfindung.

Phononenresonator

[0052] Die vorliegende Erfindung betrifft einen Phononenresonator. Insbesondere schafft die vorliegende Erfindung einen Phononenresonator eines Materials mit indirekter Bandlücke, wobei der Phononenresonator so entworfen ist, dass bestimmte elektronische, optische und/oder Wärmeübertragungseigenschaften des Materials verstärkt werden.
[0053] Ein Phonon kann als eine gemäß den Prinzipien der Quantenmechanik minimale zulässige Einheit von Vibrationsenergie verstanden werden. Ein Phononenresonator ist eine Struktur, die als ein Resonator für solche Vibrationsanregungen wirkt, die sich als quantenmechanische Vibrations-Wellenpakete verhalten. In Analogie zu optischen Resonatoren benötigt ein Vibrations-Resonator kohärente Beschränkung (confinement) oder Rückkopplung von Vibrationsenergie.
[0054] Es ist möglich, einen elektromagnetischen Resonator (d. h. eine Struktur, die für elektromagnetische Wellen resonant ist) durch Aufbau einer Struktur mit einer periodischen Variation in der Materialimpedanz herzustellen. In ähnlicher Weise kann ein Vibrations-Resonator durch die Schaffung einer Struktur mit einer periodischen Variation in der Materialdichte hergestellt werden, da die Materialdichte die Impedanz einer Vibrationswelle bestimmt.
[0055] Ein Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft die Beobachtung, dass ein Vibrations-Resonator so konstruiert werden kann, dass er mit bestimmten Phonon-Elektron Wechselwirkungen resonant ist, so dass der Resonator eine resonante Verstärkung der für diese Wechselwirkungen erforderlichen Phononen bewirkt. Obgleich Phononenresonatoren bereits früher beschrieben wurden (siehe beispielsweise Klein IEEE J. of Quant. Elec. QE-22: 1760–1779, 1986), beschreibt die vorliegende Erfindung erstmalig einen Phononenresonator, der eine resonante Verstärkung der Phonon-Elektron Wechselwirkungen herbeiführt, mit der sich daraus ergebenden Verbesserung in optischen, elektronischen und/oder Wärmeübertragungseigenschaften in dem Material, aus dem der Resonator aufgebaut ist. Darüber hinaus schafft die vorliegende Erfindung das erste Beispiel für einen Phononenresonator mit einer Kopplungslänge, die kürzer als die mittlere freie Phonon-Weglänge ist.
[0056] Weiter unten diskutieren wir die strukturellen Eigenschaften des Phononenresonators gemäß der vorliegenden Erfindung, und die Wege, mittels welcher der Phononenresonator die optischen, elektronischen und/oder Wärmeübertragungseigenschaften des Materials, aus welchem der Resonator aufgebaut ist, beeinflusst.

Verstärkung der optischen Eigenschaften

[0057] Die vorliegende Erfindung umfasst Materialien mit indirekter Bandlücke mit verstärkten optischen Eigenschaften. Um bestimmte Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung schneller zu würdigen, beginnen

wir mit einer Diskussion der Eigenschaften von Halbleiter-Materialien mit einer indirekten Bandlücke, im Gegensatz zu Materialien mit einer direkten Bandlücke.

[0058] Zunächst weisen wir darauf hin, dass in jedem Halbleiter-Festkörper (d. h. sowohl eines Materials mit direkter oder indirekter Bandlücke), der frei von Defekten und Verunreinigungen ist, Elektronen nur bestimmte Energiewerte annehmen können, die innerhalb von zwei diskreten Bändern liegen: Einem "Valenzband", das den Bereich von Energien umfasst, die von Elektronen in gebundenen Energiezuständen eingenommen werden; und einem "Leitungsband", das den zulässigen Energiezuständen von freien Elektronen oder Elektronen, die ungebunden sind und sich durch das Kristallgitter des Festkörpers bewegen, entspricht. **Fig.** 1 zeigt eine schematische Darstellung eines Valenzbandes **10** und eines Leitungsbandes **20**, die durch eine "Energiebandlücke" **30** getrennt sind, die dem Bereich von verbotenen Energien zwischen dem Valenzband **10** und dem Leitungsband **20** entspricht.

[0059] Für jeden gegebenen Halbleiter-Festkörper sind die meisten Energiezustände innerhalb des Valenzbandes durch Elektronen besetzt, während die meisten Energiezustände innerhalb des Leitungsbandes unbesetzt sind. Wenn jedoch ein Elektron in dem Valenzband Energie aufnehmen kann, die die Energie der Bandlücke überschreitet, kann dieses Valenzband-Elektron einen Energiezustand innerhalb des Leitungsbandes annehmen. Wenn ein solches Valenzband-Elektron in das Leitungsband angeregt wird, lässt das Elektron einen leeren Energiezustand in dem Valenzband zurück. Der leere Energiezustand wird als "Loch" bezeichnet und kann als Teilchen mit einer positiven Ladung betrachtet werden, deren Größe gleich der des Elektrons ist.

[0060] Elektronen im Leitungsband besetzen typischerweise Zustände nahe des Leitungsbandminimums. Löcher befinden sich im Allgemeinen an dem Valenzbandmaximum. Unter bestimmten Umständen können diese Elektronen und Löcher rekombinieren, was zu der Emission eines Photons führt, die auch als ein "strahlender Übergang" bekannt ist. Um einen strahlenden Übergang zu erzielen, müssen sowohl die Energie als auch der Impuls erhalten bleiben.

[0061] Strahlende Übergänge sind in Materialien mit einer direkten Bandlücke erlaubt. Tatsächlich betrifft die Bezeichnung "direkte Bandlücke" die Tatsache, dass das Minimum des Leitungsbandes und das Maximum des Valenzbandes in diesen Materialien entlang dem gleichen Impulswert ausgerichtet sind. Diese Tatsache ist in **Fig.** 2 veranschaulicht, die ein Schaubild der Energie (E)-Impuls (k)-Beziehung eines Elektrons in einem Festkörper mit direkter Bandlücke zeigt. Der Bereich **37** des Schaubildes in der **Fig.** 2 zwischen den Kurven E_c und E_v bezeichnet die verbotenen Energie- und Impulswerte für Elektronen in dem Festkörper. Die Kurve E_c (der Leitungsbandrand) bezeichnet erlaubte Energie- und Impulswerte für Elektronen in dem Leitungsband, und die Kurve E_v (die Valenzbandkante) bezeichnet die erlaubten Energie- und Impulswerte für Elektronen in dem Valenzband. Die Energiedifferenz zwischen dem Minimum **22** des Leitungsbandes der Kurve E_c und dem Minimum **12** des Valenzbandes der Kurve E_v ist die Energiebandlücke **31**.

[0062] Die Ausrichtung des Leitungsbandminimums und des Valenzbandmaximums in einem Material mit direkter Bandlücke erlaubt strahlende Übergänge, da ein Elektron **40** sowohl vor (d. h. in dem Leitungsband) als auch nach (d. h. in dem Valenzband) dem Übergang (d. h. vor und nach der Rekombination mit dem Loch **50**) denselben Impulswert aufweist. Infolgedessen ist das Erfordernis der Impulserhaltung für strahlende Übergänge erfüllt. In ähnlicher Weise ist das Erfordernis der Energieerhaltung erfüllt, da ein Phonon **60** emittiert wird, das eine Energie aufweist, die gleich dem Energieverlust durch das Elektron bei seiner Rekombination mit dem Loch ist. Der Impuls des Photons **60** ist gegenüber demjenigen des Elektrons **40** so klein, dass, wie oben erwähnt, der Impuls des Elektrons durch den Übergang im Wesentlichen unverändert bleibt.

[0063] Im Gegensatz dazu sind das Valenzbandminimum und das Leitungsbandmaximum in Materialien mit indirekter Bandlücke nicht ausgerichtet. Tatsächlich betrifft der Begriff "indirekte Bandlücke" die Tatsache, dass diese Punkte entlang der Impulsachse relativ zueinander versetzt sind. Ein Schaubild des Energiebandes für ein Material mit einer indirekten Bandlücke ist in **Fig.** 3 dargestellt. Das Bezugszeichen **15** identifiziert das Valenzbandmaximum in **Fig.** 3, und das Bezugszeichen **25** identifiziert das Leitungsbandminimum.

[0064] Strahlende Übergänge sind für Materialien mit indirekter Bandlücke effektiv verboten, da, wie oben ausgeführt, Photonen nur dann emittiert werden, wenn ein Elektron in dem Leitungsband mit einem Loch in dem Valenzband rekombiniert und Energie und Impuls erhalten bleiben. Da das Valenzbandmaximum **15** und das Leitungsbandminimum **25** in Materialien mit indirekter Bandlücke relativ zueinander versetzt sind, kann ein nahe dem Leitungsbandminimum **25** lokalisiertes Elektron nicht mit einem Loch nahe dem Valenzbandmaximum **15** rekombinieren, ohne das Erfordernis der Impulserhaltung zu verletzen (es ist zu beachten, dass das emittierte Photon einen nicht signifikanten Impuls aufweist).

[0065] Das Impulserhaltungserfordernis würde für Rekombinationsereignisse zwischen entweder i) einem Elektron mit einer Energie und einem Impuls entsprechend Punkt A entlang dem in **Fig.** 3 gezeigten Leitungsband E_c und einem nahe dem Valenzbandmaximum **15** lokalisierten Loch, oder ii) einem Elektron, das einen Energiezustand nahe dem Leitungsbandminimum **25** einnimmt und einem am Punkt B lokalisierten Loch erfüllt sein. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich, dass ein Elektron für eine signifikante Zeitdauer an dem Punkt A existiert, da ein auf diese Position angeregtes Elektron rasch einen Intraband-Übergang in das Leitungsbandminimum **25** ausführen würde. In ähnlicher Weise ist es unwahrscheinlich, dass ein Loch an der Position B

existiert, da Elektronen praktisch sämtliche Zustände in dem Valenzband um den Punkt B besetzen und für strahlende Übergänge verfügbare leere Zustände oder Löcher prinzipiell nahe dem Valenzbandmaximum **15** lokalisiert sind.

[0066] Das Fehlen einer effizienten Rekombination zwischen Elektronen und Löchern in Materialien mit einer indirekten Bandlücke hat deren Nützlichkeit in optischen Anwendungen beschränkt. Optische Vorrichtungen benötigen ganz einfach optische Übergänge, und optische Übergänge sind in Materialien mit einer indirekten Bandlücke ineffizient. Das Problem ist insbesondere akut für optische Vorrichtungen, die optische Verstärker (beispielsweise Laser) einsetzen, die eine "stimulierte Emission" von Photonen benötigen.

[0067] **Fig.** 4 veranschaulicht die drei möglichen Photon-Elektron Wechselwirkungen, die in Halbleiter-Materialien auftreten können: "Absorption" (**Fig.** 4A), "spontane Emission" (**Fig.** 4B) und "stimulierte Emission" (**Fig.** 4C). Bei der stimulierten Photonemission stimuliert ein einfallendes Photon **61** mit einer Energie gleich der Energiedifferenz zwischen einem Hochenergiezustand E_2 und einem Niedrigenergiezustand E_1 ein Elektron **40** in dem Hochenergiezustand zur Rückkehr in den Niedrigenergiezustand, wobei es seine Energie in der Form eines zweiten Photons **63** abgibt, das in seiner Energie und Phase gleich dem einfallenden Photon **61** ist.

[0068] Die Effektivität eines Zwischenverstärkers ist mit seiner "optischen Verstärkung" verknüpft, die proportional zu $e^{(gz)}$ ist, wobei z die Entfernung angibt, entlang welcher ein Eingangssignal sich ausbreitet und g, die Verstärkung pro Längeneinheit, proportional zu R_{stim}-R_{abs} ist. R_{stim} ist die Rate, mit welcher Photonen durch stimulierte Emission emittiert werden, und R_{abs} ist die Rate, mit welcher Photonen absorbiert werden. Eine hohe optische Verstärkung erfordert infolgedessen, dass die stimulierte Photonemission (**Fig.** 4C) die Absorption (**Fig.** 4A) übertrifft.

[0069] Damit die stimulierte Photonemission die Photonabsorption überschreitet, muss eine bestimmte Anzahl von Elektronen von einem Niedrigenergiezustand in einen Hochenergiezustand angeregt werden, ein Phänomen, das als "Besetzungsumkehr" bekannt ist. Für atomare oder molekulare Übergänge tritt eine Besetzungsumkehr auf, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$N_2 > (B_{12}/B_{21})N_1,$$

wobei N_2 die Anzahl der Elektronen in dem Hochenergiezustand E_2 ist; N_1 die Anzahl der Elektronen in dem Niedrigenergiezustand E_1 ist; B_{12} ein Koeffizient proportional zu der Rate, mit welcher Photonen absorbiert werden, ist; und B_{21} ein Koeffizient proportional zu der Rate, mit welcher Photonen durch stimulierte Emission erzeugt werden, ist.

[0070] Es besteht ein ähnliches Erfordernis für Band-zu-Band-Übergängen in Halbleitern. Falls die Besetzung innerhalb jedes Bands eine Quasi-Gleichgewichts-Verteilung erreicht hat, gibt es eine charakteristische Fermi-Energie, die mit "ϵ_{fV}" für das Valenzband und "ϵ_{fC}" für das Leitungsband bezeichnet wird. Eine Besetzungsumkehr wird für Photonenenergien erreicht, die folgende Beziehung erfüllen:

$$Eg < hv < \epsilon_{fC} - \epsilon_{fV}$$

[0071] Infolgedessen eicht die "Quasi-Fermi-Energie" oder das chemische Intraband-Potential die Besetzungsverteilung in jedem Band.

[0072] In einem Halbleiter-Laser kann eine Besetzungsumkehr durch die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren (d. h. durch das Anregen von Elektronen in das Leitungsband, wobei Löcher in dem Valenzband erzeugt werden) erzeugt werden. Für Materialien mit einer direkten Bandlücke führt eine solche Erhöhung der Dichte von angeregten Elektronen und Löchern zu einer erhöhten stimulierten Photonemission. Für Materialien mit indirekter Bandlücke limitiert jedoch die Unfähigkeit der angeregten Elektronen, ohne weiteres mit Löchern zu rekombinieren, das Ausmaß, mit welchem die erhöhte Exziton-Besetzung (d. h. die erhöhte Elektronen-Loch-Dichte) zu einer erhöhten stimulierten Emission führt. Da mehr Elektronen in das Leitungsband angeregt werden, erhöht sich auch die sogenannte "frei Ladungsträgerabsorption", so dass erhöhte Anzahlen von Photonen durch die Elektronen in dem Leitungsband absorbiert werden. Selbst wenn eine Besetzungsumkehr vorliegt, übertrifft in Materialien mit einer indirekten Bandlücke die stimulierte Emission daher typischerweise nicht die Absorption.

[0073] Wie wir gesehen haben sind sowohl spontane als auch stimulierte strahlende Übergänge in Materialien mit indirekter Bandlücke verboten, da ein nahe dem Leitungsbandminimum lokalisiertes Elektron eines Materials mit einer indirekten Bandlücke nicht mit einem Loch nahe dem Valenzbandmaximum rekombinieren kann, ohne dass Erfordernis der Impulserhaltung zu verletzen. Dieses Problem kann überwunden werden, wenn der Impuls, der benötigt wird, um einen strahlenden Übergang zu erlauben, durch Vibrationen oder Phononen des Kristallgitters zur Verfügung gestellt wird.

[0074] Wie in **Fig.** 5 dargestellt, können Atome in einem Kristallgitter qualitativ in Form von Kugeln **70** modelliert werden, die durch Federn **75** miteinander verbunden sind. Der Analogie folgend entsprechen Phononen den (quantisierten) Vibrationsbewegungen solcher Kugeln, die sich als eine Welle in dem Kristall ausbreiten.

Die Wechselwirkung eines Phonons mit einem Elektron in dem Leitungsband kann den erforderlichen Impuls zur Verfügung stellen, um einen "indirekten" oder "Phonon-unterstützten" Übergang des Elektrons in ein Loch in dem Valenzband zu erlauben, was die Emission eines Photons zur Folge hat.

[0075] **Fig.** 6 veranschaulicht drei verschiedene Mechanismen für Phonon-unterstützte strahlende Übergänge in einem Material mit indirekter Bandlücke. Die Bezugszeichen in **Fig.** 6 sind analog zu jenen in **Fig.** 4, so dass **81** in **Fig.** 6 ein einfallendes Phonon repräsentiert und **83** ein emittiertes Phonon repräsentiert. **Fig.** 6A zeigt einen Phonon-unterstützten strahlenden Übergang, der die spontane Emission eines Phonons **83** umfasst. **Fig.** 6B zeigt einen Mechanismus, der die stimulierte Phononabsorption umfasst; und **Fig.** 6C zeigt einen Mechanismus, der die stimulierte Phononemission umfasst. Wie bereits erwähnt, müssen sowohl der Impuls als auch die Energie in einem strahlenden Übergang erhalten bleiben. In jedem Typ der in **Fig.** 6 dargestellten Phonon-unterstützten Übergängen stellt das Phonon die benötigte Impulsänderung (k_2–k_1) zur Verfügung, so dass der Impuls während der Rekombination eines Elektrons in dem Leitungsbandminimum mit einem Loch in dem Valenzbandmaximum erhalten bleibt. Infolgedessen wird ein Photon mit einer Energie emittiert, die ungefähr gleich der Bandlücke ist. Genauer hat das emittierte Photon eine Energie E_p, die gleich der Bandlücke minus (für jene Mechanismen, die Phononemission beinhalten) oder plus (für Mechanismen, die Phononabsorption beinhalten) der Phononenergie θ ist. D. h.:

$$E_p = E_q \pm \theta.$$

[0076] Es ist zu beachten, dass ausschließlich Phononen mit dem bestimmten Impuls (k_2–k_1) den strahlenden Übergang unterstützen können.

[0077] Unglücklicherweise sind strahlende Phonon-unterstützte Übergänge in konventionellen Halbleiter-Strukturen selten. Darüber hinaus neigen Elektronen in Materialien mit einer indirekten Bandlücke dazu, mit Defekten oder Verunreinigungen (traps) in dem Kristall vor einer Rekombination mit einem Loch in dem Valenzband zu rekombinieren. Solche Elektron-Trap-Rekombinationsereignisse sind nicht strahlend und erzeugen Wärme anstatt Photonen. Diese Probleme haben die Möglichkeiten der Forscher, Materialien mit einer indirekten Bandlücke in optische Vorrichtungen einzubringen, gehemmt.

[0078] Wie können Phonon-Elektron Wechselwirkungen in Materialien mit indirekter Bandlücke verstärkt werden? Ein Weg besteht darin, einfach die Anzahl der verfügbaren Phononen zu erhöhen. Der Gedanke, der der vorliegenden Erfindung zugrunde liegt, besteht darin, dass ein "Phononenresonator" hergestellt werden kann, indem eine Struktur von periodisch variierender Dicht erzeugt wird, in welcher die Vibrationsenergie (d. h. die Phononendichte) bei dem Impuls, der für die Erzeugung eines indirekten optischen Übergangs erforderlich ist, erhöht wird. Da Phononen selbst bei hohen Frequenzen Vibrationswellen von Massen (Atomen) in einem Medium darstellen, können Änderungen in der Massendichte des Mediums, durch das die Phononen sich ausbreiten, verwendet werden, um die Dichte der Phononen eines gewünschten Impulses und einer gewünschten Energie zu erhöhen, während jene Phononen anderer Impulse und Energien vermindert werden. Obgleich das allgemeine Konzept eines Phononenresonators nicht neu ist (siehe beispielsweise Klein, IEEE J. Quant. Elec. QE-22: 1760–1779, 1986), ist bisher nicht erkannt worden, dass ein Phononenresonator entworfen werden kann oder sollte, um für Phononen eines Wellenvektors, der für die Teilnahme in Phonon-Elektron Wechselwirkungen geeignet ist, resonant zu sein.

[0079] Wenn ein Phononenresonator gemäß der Erfindung hergestellt wird, werden strahlende Rekombinationsereignisse, welche Phononabsorption beinhalten, proportional zu dem Verhältnis der Phononendichte in der Struktur zu der Phononendichte in einer ungeordneten (d. h. ohne periodisch variierende Dichte) Struktur desselben Materials erhöht. Ein Phononenresonator wird eine hohe Wahrscheinlichkeit für indirekte optische Übergänge erreichen, wenn er resonant für Phononen des geeigneten Impulses ist, um an einem der in **Fig.** 6 dargestellten Rekombinationsereignisse (d. h. an Rekombinationsereignissen, die die spontane Emission eines Phonons, die stimulierte Phononabsorption und/oder die stimulierte Phononemission enthalten) teilzuhaben.

[0080] Wie in der Technik bekannt, ist die Wahrscheinlichkeit für eine spontane Emission in einem Resonator lokal verändert. Typischerweise haben manche Orte in einem Resonator eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit für eine spontane Emission, während andere Orte vergleichsweise niedrigere Wahrscheinlichkeiten aufweisen. Infolgedessen schafft die vorliegende Erfindung durch das Bereitstellen eines Phononenresonators ein Material, in welchem spontane Phononemission verstärkt ist. Ein Resonator kann auch beeinflussen, welche Energie und welche Impulse die spontane Emission von Phononen wahrscheinlich anziehen werden.

[0081] Wenn in einem Resonator eine hohe Rate für eine Phononerzeugung vorliegt, können sowohl die stimulierte Phononabsorption als die stimulierte Phononemission verstärkt werden. In einigen Beispielen kann der Resonator in der Lage sein, eine Nicht-Gleichgewichts-Phononenbesetzung zu unterstützen, die sich durch stimulierte Phononemission aufrecht hält. Dies wird erreicht, wenn die Erzeugungsrate der Phononen gleich dem Streuverlust für die Struktur ist.

[0082] Wie oben erwähnt, weist die Energie eines in Phonon-unterstützten strahlenden Übergängen emittier-

ten Photons den Wert $E_p = E_q + \theta$ auf, wenn das Photon durch einen Mechanismus, der Phononabsorption enthält, erzeugt wird, und weist den Wert $E_p = E_q - \theta$, wenn das Photon durch einen Mechanismus, der Phononemission enthält, erzeugt wird. Photonen, die durch einen Mechanismus erzeugt werden, der Phonon-Absorption enthält, weisen deshalb eine Energie größer als die Bandlückenenergie auf. Solche Photonen können durch die Struktur ohne weiteres re-absorbiert werden. Auf der anderen Seite weisen Photonen, die durch einen Mechanismus erzeugt werden, der Phononemission aufweist, eine Energie auf, die kleiner als die Bandlücke ist und nicht ohne weiteres durch die Struktur re-absorbiert werden kann. Infolgedessen wird eine optische Verstärkung eher in einem Phononenresonator erzielt, in welchem Photonemission durch einen Prozess auftritt, der Phononemission statt Phononabsorption enthält. Für Rekombinationereignisse, die Phononemission enthalten, ist die Zunahme von strahlenden Übergängen in einem Phononenresonator gleich der Anzahl von Phononen pro Vibrations-Mode des Resonators.

[0083] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine Struktur mit alternierenden Schichten aus relativ hoher Massendichte und relativ niedriger Massendichte geschaffen. Die Schichtstruktur ist resonant für Phononen mit einer Wellenlänge, bei welcher eine ganzzahlige Anzahl von Halb-Wellenlängen in die Gitterperiode passen; Phononen mit anderen Wellenlängen breiten sich ohne jegliche resonante Reflektion durch die Struktur aus. Eine Folge einer starken Resonanz ist eine Zunahme der gespeicherten Energie (d. h. der Phononendichte) in dem Zentrum der Struktur. Die Periode Λ_L der Schichtstruktur der vorliegenden Erfindung wird gewählt, um eine resonante Bragg-Reflektion für Phononen mit dem für die Teilhabe an indirekten Übergängen erforderlichen Impuls bereitzustellen.

[0084] Die Schichtstruktur der vorliegenden Erfindung kann als Analogon eines DFB-Lasers verstanden werden. Wie in **Fig.** 7 gezeigt, enthält ein DFB-Laser alternierende Schichten von ersten **73** und zweiten **77** Materialien mit ersten und zweiten Reflektionsindizes. Sobald sich Licht durch dieses Schichtmedium (beispielsweise in **Fig.** 7 von links nach rechts) ausbreitet, werden an jedem Übergang (i_1 ... i_n in **Fig.** 7) kleine Reflektionen erzeugt. Wenn jede reflektierte Welle in Phase ist, verstärkt sie die anderen, so dass die gesamte Netto-Reflektion hoch ist und eine Resonanz (beispielsweise eine Bragg-Resonanz) auftritt. Die Ausbreitung des Lichtes durch das Material resultiert also in einer stimulierten Emission von zusätzlichen Photonen, die sich ebenfalls durch das Material ausbreiten und an den Übergängen reflektiert werden können. Wie vorstehend diskutiert, tritt "Lasern" auf, wenn die stimulierte Emission die Absorption in dem Material übertrifft. Ein DFB-Laser wird solange Laserwirkung zeigen, wie Elektronen kontinuierlich in angeregte Energiezustände gepumpt werden.

[0085] Die Schichtstruktur der vorliegenden Erfindung arbeitet in einer ähnlichen Weise wie der DFB-Laser, außer dass es statt Photonen Phononen sind, die sich mit dem gewünschten Impuls durch das Material ausbreiten. Die Schichtstruktur wird nur dann als ein wirksamer Resonator funktionieren, wenn die mittlere freie Phonon-Weglänge ausreichend lang ist, so dass die Phononen nur sehr wenig gestreut werden, während sie durch die Struktur hindurch laufen. Die mittlere freie Phonon-Weglänge wird ausreichend lang sein, wenn die Kopplungskonstante κ_p zwischen den einfallenden und den reflektierten Phononen größer als die inverse Phonon-Streulänge α_p ist. D. h., die folgende Beziehung muss erfüllt sein:

$$\alpha_p << \kappa_p \approx (\pi/\lambda_p)(\Delta M/M),$$

wobei λ_p die Phonon-Wellenlänge ist, ΔM die Modulation der atomaren Masse ist und M die durchschnittliche atomare Masse ist. Wenn diese Beziehung nicht erfüllt ist, streuen die Phononen bevor Bragg-Reflektion auftreten kann.

[0086] Die Schichtstruktur der vorliegenden Erfindung kann in einem kristallinen Festkörper beispielsweise durch ein Abwechseln von dünnen, Isotopen-angereicherten Schichten, d. h. durch die Erzeugung eines "Isotopen-Übergitters", realisiert werden. Eine "Isotopen-angereicherte" Schicht, wie sie hier definiert ist, ist eine Schicht mit einer Konzentration eines Isotops, die größer als die Konzentration des natürlich auftretenden Isotops ist. Beispielsweise ist Silizium in seiner natürlich auftretenden Form hauptsächlich aus drei Isotopen in der folgenden Zusammensetzung 92,2% Si^{28}, 4,7% Si^{29} und 3,1% Si^{30} zusammengesetzt. Nach der vorliegenden Erfindung ist eine Isotopen-angereicherte Schicht von Si^{28} eine Schicht, die das Isotop Si^{28} in einer Konzentration von mehr als 92,2% der Atome in dieser Schicht enthält. In ähnlicher Weise sind Isotopen-angereicherte Schichten von Si^{29} und Si^{30} Schichten, die atomare Konzentrationen dieser Isotope enthalten, die 4,7% bzw. 3,1% überschreiten.

[0087] Isotopen-Übergitter sind in der Technik bekannt (siehe beispielsweise Berezin Solid State Comm. 65: 819–821, 1988; Berezin J. Phys. C. 20: L219–L221, 1987; Fuchs Sup. and Microstruct. 13: 447–458, 1993; Haller GADEST, '93). Es wurde bisher jedoch nicht erkannt, dass Isotopen-Übergitter als Phononen-Resonatoren konzipiert werden können, die für Phononen eines für die Teilnahme an Phonon-Elektron Wechselwirkungen geeigneten Wellenvektors resonant sind. Allgemein gesagt ist in einem Isotopen-Übergitter der vorliegenden Erfindung die Resonanz um so besser, je größer die Differenz der Massendichte innerhalb der Struktur ist. Ein Isotopen-Übergitter mit alternierenden dünnen Schichten von Si^{28} und Si^{29} erzielt ein wenig über 3%

Modulation der Massendichte. Das Alternieren von Si^{28} mit Si^{30} Schichten liefert über 6% Modulation.

[0088] Wie vorstehend erwähnt, ist eine Schichtstruktur der vorliegenden Erfindung resonant, wenn eine ganzzahlige Zahl m von Halb-Wellenlängen in die Gitterperiode passt, d. h. wenn $\Lambda_L = m(\lambda_p/2)$ ist. Kristallines Silizium zeigt, wie in **Fig.** 8 dargestellt, eine indirekte Bandlücke, in welcher das Leitungsbandminimum entlang der (**100**) Richtung sechsfach entartet ist, und welche ungefähr bei 8-Zehnteln der Entfernung zu dem Zonenrand auftritt. Infolgedessen wird die Periode Λ_L des Silizium-Isotopen-Übergitters der vorliegenden Erfindung für Bragg-resonante Phononen einer Wellenzahl $2\pi/\lambda_p = 0.8\pi/a$ gewählt, wobei a die Gitterkonstante ist. Für Silizium beträgt a 4 atomare Schichten. Die Periode eines Silizium-Isotopen-Übergitters der vorliegenden Erfindung folgt deshalb der Beziehung:

Λ_L = 5m atomare Schichten.

[0089] Infolgedessen stellen beispielsweise Übergitter der Form $Si^{28}{}_nSi^{30}{}_{5m-n}$ mit $n \neq 0$ eine Resonanz für Phononen, die in der Lage sind, an einem indirekten Übergang teilzunehmen, zur Verfügung. Für m = 1, dem Fall, in dem die Bragg-Reflektion mit der niedrigsten Ordnung geschaffen wird, ergibt dies eine Periode von etwa 1,25 Gitterkonstanten oder, im Fall von Silizium, 5 atomaren Schichten. Jedes Silizium-Isotopen-Übergitter mit einer Periode, die ein ganzzahliges Vielfaches von 5 atomaren Schichten ist, wird die Bragg-Resonanzbedingung unter Verwendung von Streuung höherer Ordnung erfüllen. **Fig.** 9 zeigt eine schematische Darstellung eines Bereichs eines Silizium-Isotopen-Übergitters der vorliegenden Erfindung.

[0090] Die mit einem Isotopen-Übergitter der vorliegenden Erfindung verbundene erhöhte Phononendichte kann dazu dienen, die Exzitonen-Stabilität zu erhöhen. In einem nicht angereicherten Material besteht eine feste Beziehung zwischen der Anzahl freier Elektronen und der Anzahl von an Löchern gebundenen Elektronen in einem Exziton ("Exzitonen-Besetzung"). Freie Elektronen weisen eine Lebensdauer (die Zeit, die von einem Elektron benötigt wird, um nicht strahlend mit einem Trap (Fehlstelle) zu rekombinieren) der Größenordnung von einer Mikrosekunde oder weniger auf, während exzitonische Elektronen strahlende Lebenszeiten haben, die wesentlich länger als eine Mikrosekunde sind. Wenn die Rate der strahlenden Übergänge gemäß der vorliegenden Erfindung erhöht wird, vermindert sich die strahlende Lebensdauer der Exzitonen. Demgemäß existieren weniger Leitungselektronen als freie Elektronen, und es sind mehr Elektronen für die Bildung von Exzitonen verfügbar.

[0091] Wenn die strahlende Lebensdauer von Exzitonen vermindert wird, können bei Raumtemperatur exzitonische Wechselwirkungen in Materialien mit indirekter Bandlücke, wie beispielsweise Silizium, auftreten. Die freie Exzitonen-Bindungsenergie in Materialien, wie beispielsweise Silizium, ist 14,5 meV, also viel größer als diejenige, die in Materialien mit einer direkten Bandlücke wie beispielsweise GaAs beobachtet wird. Trotz dieser Tatsache existieren keine Exzitonen bei Raumtemperatur in Silizium. Der hauptsächliche Grund dafür besteht darin, dass in Silizium die Rate von strahlenden Übergängen viel kleiner als die Rate von nicht-strahlenden Band-zu-Band Rekombinationsprozessen ist. Infolgedessen wird eine Zunahme von strahlenden Übergängen, wie sie durch einen Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung herbeigeführt wird, zu stabilen Exzitonen bei viel höheren Temperaturen führen. Diese stabilen exzitonischen Wechselwirkungen können die Basis für Lichtemission, Absorption, Modulation und nicht-lineare optische Eigenschaften in solchen Materialien mit indirekter Bandlücke schaffen. Beispielsweise kann sich die Photonabsorption eines Exzitons in der Gegenwart eines elektrischen Feldes verändern (Stark-Effekt). Deshalb kann gemäß der vorliegenden Erfindung ein optischer Modulator basierend auf dem Stark-Effekt aus Materialien mit einer indirekten Bandlücke hergestellt werden.

[0092] Die folgenden Beispiele beschreiben verschiedene optische Vorrichtungen, die einen Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung beinhalten.

BEISPIEL 1: Lichtemittierende Vorrichtung

[0093] Ein Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung kann in einer lichtemittierenden Vorrichtung untergebracht werden, wie dies in **Fig.** 10 gezeigt ist. In **Fig.** 10 ist der Phononenresonator **100** zwischen den Elektroden **110** und **120** angeordnet. Die Elektroden **110** und **120** können Halbleiter-Materialien oder Leitermaterialien umfassen. Diese Elektroden **110** und **120** dienen dazu, die Bildung einer Besetzungsumkehr in dem Phononenresonator **100** durch Injektion und/oder Beschränkung von Ladungsträgern (d. h. Elektronen oder Löchern) in diesem Gebiet bzw. Bereich zu erleichtern.

[0094] In bevorzugten Ausführungsformen der lichtemittierenden Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung ist der Phononenresonator **100** ein Isotopen-Übergitter. Beispielsweise zeigt **Fig.** 11 vier Ausführungsformen einer lichtemittierenden Vorrichtung der vorliegenden Erfindung, in denen ein Isotopen-Übergitter **86** zwischen Elektroden **110** und **120** angeordnet ist. In **Fig.** 11A enthält die Vorrichtungsstruktur eine Elektrodenschicht **120**, die auf einem Substrat **130** gebildet ist. Das Isotopen-Übergitter **86** besteht aus alternierenden Isotopenangereicherten Schichten **86A** und **86B** und ist auf der Elektrode **120** angeordnet. Die zweite Elektro-

de **110** ist auf dem Isotopen-Übergitter **86** gebildet.
[0095] Wie in **Fig.** 11B erkennbar, können die Elektroden **110** und **120** seitlich nebeneinander an gegenüberliegenden Seiten des Isotopen-Übergitters **86** angeordnet sein. Wie für einen Durchschnittsfachmann erkennbar, kann eine lichtemittierende Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung als Kanten-Emitter (siehe **Fig.** 11C) oder als Oberflächen-Emitter (siehe **Fig.** 11D) ausgeführt sein. Wie in **Fig.** 11D gezeigt, wird die Vorrichtung ein Oberflächen-Emitter sein, wenn eine der Elektroden **110** transparent ist.
[0096] Wenn der in der lichtemittierenden Vorrichtung der **Fig.** 10 oder **Fig.** 11 verwendete Phononenresonator ein Silizium-Isotopen-Übergitter ist, sollte die Dicke t des Übergitters **86** geeignet sein, um Vibrationswellenkopplung zu ermöglichen. Vorzugsweise ist $t >> 1/\kappa_p$, wobei κ_p der Kopplungskoeffizient (siehe oben) ist. Wie oben angegeben, ist

$$\kappa_p \approx (\pi/\lambda_p)(\Delta M/M),$$

wobei λ_p die Phonon-Wellenlänge ist, ΔM die Modulation der atomaren Masse ist und M die durchschnittliche atomare Masse ist. Wie oben erwähnt, gilt

$$\Lambda_L = m(\lambda_p/2).$$

[0097] Es folgt

$$t >> (2\Lambda_L/m\pi)(M/\Delta M).$$

[0098] Die Anzahl N von Übergitter-Perioden ist gleich der Dicke geteilt durch die Gitterperiode, d. h. $N = t/\Lambda_L$. Die folgende Beziehung gilt deshalb für bevorzugte Silizium-Isotopen-Übergitter gemäß der vorliegenden Erfindung:

$$N >> (2/\pi)(M/\Delta M)(1/m)$$

[0099] Für ein Isotopen-Übergitter aus Si^{28} und Si^{30} ist $(\Delta M/M) = 0{,}06$. Insofern sollte für eine Kopplung erster Ordnung (m = 1) die Anzahl von Si^{28}/Si^{30} Übergitter-Perioden vorzugsweise größer als ungefähr 10 sein, was mehr als ungefähr 50 atomaren Schichten entspricht. Ein solches Si^{28}/Si^{30} Übergitter ist mehr als etwa 10 nm (100 Å) dick.
[0100] Solche einen Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung enthaltenden lichtemittierenden Vorrichtungen umfassen lichtemittierende Dioden und Diodenlaser (sowohl Fabry-Perot und DFB; siehe unten). Lichtemittierende Vorrichtungen gemäß der vorliegenden Erfindung können alleine, aufgenommen in andere Vorrichtungen oder beispielsweise in einem als Anzeigeeinrichtung verwendeten Array zusammengebaut verwendet werden. Die vorliegende Erfindung umfasst mithin ein weites Feld von lichtemittierenden Vorrichtungen und/oder Systemen, das sämtliche Vorrichtungen oder Systeme enthält, in welchen zumindest eine Komponente einen Phononenresonator der vorliegenden Erfindung enthält.

BEISPIEL 2: Lichtemittierende Diode

[0101] Eine einen Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung enthaltende lichtemittierende Diode (LED) kann hergestellt werden, indem eine gattungsgemäße lichtemittierende Vorrichtung, wie sie beispielsweise im obigen Beispiel 1 beschrieben ist, mit einem p-n Kontakt versehen wird, wie dies in der Technik bekannt ist, um wirksam Elektronen und Löcher zu injizieren. **Fig.** 12 zeigt eine einfache Ausführungsform einer solchen LED.
[0102] Wie in **Fig.** 12 erkennbar, bildet eine LED gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung eine Diode mit einem Isotopen-Übergitter **86** an dem p-n Kontakt. Eine Elektrodenschicht **84** aus einkristallinem Silizium vom n Typ wird auf einem Substrat aufgewachsen. Ein Isotopen-Übergitter **86** wird dann vorzugsweise auf der Schicht **84** vom n-Typ aufgewachsen. Das Isotopen-Übergitter kann beispielsweise zehn alternierende Isotopen-angereicherte Schichten, beispielsweise Si^{28} und Si^{30}, enthalten. Eine Elektrodenschicht **82** vom p-Typ, die ein kristallines Silizium enthält, wird dann auf dem Isotopen-Übergitter **86** gebildet. Wie im Stand der Technik bekannt, kann die Dotierung im Prinzip entweder durch Ionenimplantation oder durch epitaktisches Wachstum erfolgen. Die Schichten **84** vom n-Typ und **82** vom p-Typ können ebenfalls dotierte Bereiche des Isotopen-Übergitters **86** sein, oder können alternativ aus unterschiedlichen Materialien (beispielsweise Festkörper-Silizium) konstruiert sein. Wenn die Schichten dotierte Bereiche sind, kann die Dotierung durch jedes in der Technik verfügbare Verfahren einschließlich beispielsweise Diffusion, Einbringung während des Wachstums, Ionenimplantation oder Neutronen-Transmutations-Dotierung (siehe beispielsweise Haller Semicond. Sci. Tech. 5: 319, 1990) vorgenommen werden.

[0103] Vorzugsweise ist das Isotopen-Übergitter genau so dick wie die Verarmungsschicht, die ansonsten zwischen der Schicht **82** des p-Typs und der Schicht **84** des n-Typs gebildet wäre. Elektronen und Löcher können durch Anlegen einer positiven Spannung an die Schicht **82** des p-Typs relativ zu der Spannung, die an den Bereich **48** des n-Typ angelegt ist, in die Isotopen-Übergitterschicht **86** injiziert werden, wobei die Halbleiter-Laserdiode in Durchlassrichtung gepolt ist. Photonen **63** können dann aus der in **Fig.** 12 gezeigten LED emittiert werden, welche eine Oberflächen-emittierende Vorrichtung darstellt.

[0104] Das hauptsächliche technische Erfordernis für die Gesamteffizienz einer LED, wie beispielsweise der in **Fig.** 12 gezeigten LED, ist eine hohe strahlende Quantenausbeute (die mittlere Anzahl der pro injiziertem Elektron-Loch-Paar emittierten Photonen). In bevorzugten Ausführungsformen der LED gemäß der vorliegenden Erfindung wird eine hohe strahlende Quantenausbeute durch das Schaffen einer Struktur, in welcher Elektronen und Löcher in demselben Bereich bzw. Gebiet beschränkt sind, erreicht. Wie dies im Stand der Technik bekannt ist, kann dies durch einen Heterokontakt erreicht werden.

[0105] **Fig.** 13 zeigt eine Darstellung einer LED gemäß der vorliegenden Erfindung, die einen Heterokontakt verwendet. Wie in **Fig.** 13 gezeigt, sind p- und n-Schichten **82** und **84** durch p- und n-Schichten **92** bzw. **94** ersetzt, die eine größere Bandlücke als das Material in dem Isotopen-Übergitter **86** aufweisen. Beispielsweise können Schichten einer SiGeC Legierung mit einem Isotopen-Übergitter aus Silizium verwendet werden. Elektronen und Löcher sind innerhalb des Isotopen-Übergitters beschränkt.

[0106] **Fig.** 14 liefert eine weitere Ausführungsform einer LED gemäß der vorliegenden Erfindung. Genauer zeigt **Fig.** 14 eine Kanten-emittierende LED, die einen dielektrischen Wellenleiter **95** umfasst, um sowohl eine optische Beschränkung (Begrenzung) als auch eine Ladungsträger-Beschränkung (Begrenzung) zu erzielen. Wie in **Fig.** 14 gezeigt, sind ein Substrat **114** und eine Abdeckung **112**, welche einen Brechungsindex n_s bzw. n_c aufweisen, der kleiner als der Brechungsindex n_f des Phononenresonators **100** ist, an gegenüberliegenden Seiten des Phononenresonators **100** angeordnet. In bevorzugten Ausführungsformen umfasst der Phononenresonator **100** ein Isotopen-Übergitter, das vorzugsweise aus Silizium besteht. Wie für einen Fachmann offensichtlich, ist es häufig möglich, die Materialien für die Abdeckung **112** und das Substrat **114** so zu wählen, dass beide einen kleineren Brechungsindex und eine höhere Bandlücke aufweisen als der Phononenresonator **100**, so dass die resultierende LED sowohl einen Wellenleiter als auch einen Heterokontakt aufweist.

BEISPIEL 3: Laserdiode

[0107] Ein Phononenresonator der vorliegenden Erfindung kann in einer Laserdiode verwendet werden. Zusätzlich zu dem Erfordernis einer Ladungsträger-Beschränkung und einer optischen Beschränkung (siehe oben) benötigt ein Laser eine Rückkopplung. Rückkopplung wird durch Reflektion, verteilte Reflektion oder eine Kombination von diesen beiden erreicht.

[0108] **Fig.** 15A zeigt einen Spaltflächen-Reflektionslaser, der auch als Fabry-Perot-Laser bekannt ist, gemäß der vorliegenden Erfindung. Der in **Fig.** 15A gezeigte Spaltflächen-Reflektionslaser stellt eine Diode mit einem Phononenresonator **100**, wie beispielsweise einem Isotopen-Übergitter, an dem p-n Kontakt (siehe obige Beschreibung) dar. Der Laser enthält ferner zwei Flächenreflektoren **210**, **220**, die an gegenüberliegenden Enden des Phononenresonators **100** angeordnet sind, der als ein Wellenleiter **95** wirkt. Wie für einen Durchschnittsfachmann erkennbar, ist der dielektrische Wellenleiter natürlich keine wesentliche Komponente eines Lasers gemäß der vorliegenden Erfindung. Unter bestimmten Umständen kann eine Vorrichtung mit einem Bereich sehr hoher Verstärkung konstruiert werden, dessen Wirkung darin besteht, eine selbstführende optische Welle zu schaffen.

[0109] **Fig.** 15B zeigt einen DFB-Laser der vorliegenden Erfindung. Wie in **Fig.** 15B gezeigt, arbeitet der Phononenresonator **100** sowohl als Phononenresonator als auch als Wellenleiter mit im Wesentlichen periodischen optischen Eigenschaften (beispielsweise Absorption oder Brechungsindex), so dass der periodisch variierende Wellenleiter eine Bragg-Resonanz zwischen vorwärts- und rückwärts-laufenden Wellen liefert. Solche periodisch variierenden optischen Eigenschaften werden durch die Welligkeit **97** von einer oder mehreren Wellenleiter-Schichten hervorgerufen. In alternativer Weise können die periodisch variierenden optischen Eigenschaften auch durch das Vorsehen eines Phononenresonators **100** erzielt werden, der eine Mehrzahl von benachbarten Phononenresonatoren **100A**, **100B**, usw. (siehe **Fig.** 15C) umfasst, die so beabstandet sind, dass eine Bragg-Resonanz zwischen vorwärts- und rückwärts-laufenden Wellen vorhanden ist.

BEISPIEL 4: Vertikalresonator-Oberflächen-Emissionslaser

[0110] Ein Phononenresonator der vorliegenden Erfindung kann auch in einem Vertikalresonator-Oberflächen-Emissionslaser (VECSEL) aufgenommen sein. Wie in **Fig.** 16 dargestellt, umfasst ein VECSEL gemäß der vorliegenden Erfindung einen oberen Reflektor **122** und einen unteren Reflektor **124**, die um einen Phononenresonator **100** als ein p-n Kontakt (siehe oben) positioniert sind. Die Elektroden **110** und **120** sind über dem p-n Kontakt positioniert und dienen dazu, Strom in den Phononenresonator **100** zu injizieren, wobei eine opti-

sche Verstärkung erzeugt wird.

[0111] Der untere Reflektor reflektiert ungefähr 100% der einfallenden Strahlung und umfasst alternierende Schichten von Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes n_1 und n_2. Jede Schicht weist eine Dicke gleich λ/2 auf, wobei λ die Wellenlänge der verstärkten Strahlung ist. Die Dicke t_{124} des unteren Reflektors **124** folgt der Beziehung:

$$\mathrm{Tanh}^2\left(\frac{\pi\,|n_2 - n_1|\,t_{124}}{\lambda}\right) \approx 1\,,$$

so dass der untere Reflektor **124** ungefähr eine Reflexivität von 100% hat.

[0112] Der obere Reflektor **122** ist ebenfalls aus alternierenden Schichten mit einer Dicke t_{122} λ/2 aus Materialien mit Brechungsindizes n und n_2 aufgebaut, und die Dicke der oberen Schicht ist so gewählt, dass zwischen ungefähr 90% und 100% der einfallenden Strahlung reflektiert wird. D. h.:

$$\mathrm{Tanh}^2\left(\frac{\pi\,|n_2 - n_1|\,t_{122}}{\lambda}\right) \approx 0{,}9\,.$$

[0113] Infolgedessen ermöglicht der obere Reflektor **122**, dass zwischen ungefähr 0% und 10% der einfallenden Strahlung als Photonen **63** emittiert werden.

BEISPIEL 5: Optischer Verstärker

[0114] Ein Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung kann als optischer Verstärker ausgestaltet werden, indem beispielsweise der Phononenresonator in einen p-n Kontakt und einen optischen Wellenleiter eingebracht wird, wie dies oben (siehe Beispiel 2) beschrieben ist. Der p-n Kontakt wird dann mit einem injizierten Strom in einer solchen Weise gepumpt, dass der Phononenresonator eine optische Verstärkung über stimulierte Emission von Photonen zeigt. Ein optisches Signal mit einer Photonenenergie, die ungefähr gleich der Band-zu-Band Übergangsenergie des Phononenresonators ist, wird dann in den Wellenleiter injiziert. Das optische Signal erfährt beim Durchlaufen des Bereichs des Wellenleiters, der den Phononenresonator beinhaltet, eine Verstärkung.

BEISPIEL 6: Optisches Kommunikationssystem

[0115] Wie für einen Durchschnittsfachmann erkennbar, können optische und/oder optoelektronische Vorrichtungen, die einen Phononenresonator der vorliegenden Erfindung beinhalten, miteinander und/oder mit anderen Vorrichtungen, die Komponenten eines optischen Kommunikationssystems bilden, kombiniert werden. Beispielsweise nutzt eine Ausführungsform eines optischen Kommunikationssystems der vorliegenden Erfindung eine Lichtquelle (d. h. eine lichtemittierende Vorrichtung) und/oder einen optischen Detektor, der bzw. die einen Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung beinhaltet. Die Lichtquelle ist so verändert, dass Information in die Intensität, Phase oder Frequenz des Lichtes kodiert wird. Der Detektor seinerseits ist entworfen, um Information in elektrische Impulse zu wandeln, die für eine weitere Signalverarbeitung geeignet sind. In anderen Ausführungsformen des vorliegenden optischen Kommunikationssystems ist ein Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung in einen Laser, einen optischen Verstärker, einen Modulator, einen Schalter, einen Deflektor und/oder einen Scanner aufgenommen.

[0116] Wie im Stand der Technik bekannt, können optische Kommunikationen für Kommunikationen über lange Distanzen, Lokalbereichsnetzwerke, optische Datenspeicherung und/oder Übertragungsdienste, wie beispielsweise Kabelfernsehen, nützlich sein. Solche Systeme sind ebenfalls für Zwischenverbindungen unter und innerhalb Leiterplatten und integrierten Schaltungen nützlich.

BEISPIEL 7: Selbsterhaltender Oszillator für Phononen und Photonen

[0117] Ein Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung kann so gebildet sein, dass er bekannte Anforderungen für Photonenresonatoren erfüllt (beispielsweise derart, dass die optische Verstärkung größer als der Resonatorverlust ist; siehe beispielsweise Agrawal et al., Long Wavelength Semiconductor Lasers, Van Nostrand Reinhold New York 1986; Bass (ed) Handbook of Optics, Bände I und II, McGraw-Hill, New York, 1995), und ist daher sowohl für Phononen als auch für Photonen resonant. In einer solchen Struktur sind die Besetzungen der Phononen und Photonen gekoppelt und die Struktur arbeitet als ein sich selbsterhaltender, gekoppelter Phononen/Photonen-Oszillator. Wie in der Technik bekannt, zeigen generisch gekoppelte Oszillatoren, die eine Nicht-Linearität aufweisen, Hysterese, die Stabilität und Schaltvorgänge (siehe beispielsweise Tsang et al., IEEE J. Quant. Elec. 19: 1621, 1983; Kapitel 15 in Optical Nonlinearities in Semiconductors von

Haug, Academic Press, San Diego (1988), und darin zitierte Referenzen). Infolgedessen kann unter Verfolgung von bekannten Prinzipien in Kombination mit den Lehren der vorliegenden Erfindung ein sich selbsterhaltender, gekoppelter Phononen/ Photonen-Oszillator hergestellt werden, in welchem die Phononen- und Photonen-Besetzungen in einer solchen Weise gekoppelt sind, dass nicht-lineare Dynamiken zu Hysterese, Bistabilität und Schaltvorgängen in dem Vibrationsausgang und/oder dem optischen Ausgang führen. In bevorzugten Ausführungsformen des sich selbsterhaltenden, gekoppelten Phononen/ Photonen-Oszillators gemäß der vorliegenden Erfindung ist ein Laser so wie entweder im Beispiel 3 oder im Beispiel 4 ausgeführt konstruiert, und die Nicht-Linearität wird durch die Besetzung in dem Laser bewirkt.

BEISPIEL 8: Optischer Detektor/Modulator

[0118] Ein Phononenresonator der vorliegenden Erfindung kann auch in einem optischen Photodetektor oder optischen Modulator enthalten sein. **Fig.** 17 und 18 zeigen zwei unterschiedliche Ausführungsformen eines Photodetektors/Modulators der vorliegenden Erfindung.

[0119] Unter Bezugnahme auf **Fig.** 17 wird ein schwach dotierter Phononenresonator **100** in einem p-n Kontakt gebildet. Eine transparente Elektrode **100** und eine Elektrode **120** sind an gegenüberliegenden Seiten des Heterokontaktes positioniert, so dass die einlaufende Strahlung durch die transparente Elektrode **110** und durch den Bereich **82** des p-Typs hindurch läuft und in dem Phononenresonator **100** absorbiert wird, so dass ein Elektron-Loch-Paar geschaffen wird und ein Photostrom zwischen den Elektroden **110** und **120** induziert wird.

[0120] Unter Bezugnahme auf **Fig.** 18 bilden Elektroden **111** und **112** ein verschachteltes Muster auf der Oberfläche des Phononenresonators, und der Photodetektor/Modulator weist eine im Wesentlichen horizontale Geometrie verglichen mit der in **Fig.** 17 gezeigten Ausführungsform auf. Die Elektroden können entweder ohmsche Kontakte zu benachbarten p-dotierten und n-dotierten Bereichen bilden, oder sie können Schottky-Kontakte zu einem gleichmäßig dotierten Phononenresonator bilden. Ein Vorteil dieses Entwurfs besteht darin, dass er aufgrund der unmittelbaren Nähe der Elektroden und demzufolge aufgrund der kurzen zur Kommunikation zwischen diesen benötigten Übertragungszeit Hochgeschwindigkeits-Schaltvorgänge oder -Detektionsvorgänge erlaubt.

Verstärkung der elektrischen Eigenschaften

[0121] Die vorliegende Erfindung betrifft auch Materialien mit einer indirekten Bandlücke, die verstärkte bzw. erhöhte elektrische Eigenschaften aufweisen. Insbesondere umfasst die Erfindung Materialien mit erhöhter Leitfähigkeit, einschließlich Supraleitfähigkeit, infolge des Vorhandenseins von gebundenen Elektronenpaaren. Damit bestimmte Aspekte und Vorteile der vorliegenden Erfindung besser gewürdigt werden können, beginnen wir mit einer Diskussion der Eigenschaften von Leitungsband-Elektronen und Elektron-Phonon Wechselwirkungen in Halbleiter-Materialien.

[0122] Wie in **Fig.** 19 veranschaulicht, kann ein Leitungsband-Elektron ein Phonon absorbieren oder emittieren. Die Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einem Phonon "streut" das Elektron von einem Energie/Impuls-Zustand in einen anderen. Genauer gesagt, erhöht die Absorption eines Phonons die Energie des Elektrons um einen Betrag E_p gleich der Energie des Phonons, und ändert den Impuls des Elektrons um einen Betrag gleich der Wellenzahl des Phonons. In ähnlicher Weise vermindert eine Phononemission die Energie des Elektrons und ändert ebenfalls den Impuls des Elektrons.

[0123] Eine "kohärente Absorption und Emission" eines Phonons durch ein einzelnes Elektron kann ebenfalls auftreten (siehe **Fig.** 20), und führt zu einer kleinen Netto-Verminderung in der Energie des Elektrons relativ dazu, was seine Energie gewesen wäre, wenn es tatsächlich in einem gefrorenen Gitter frei wäre. Unter Bezugnahme auf **Fig.** 20 erfordert das Ausschließungsprinzip, dass ein Elektron im Zustand A nur dann eine kohärente Absorption und Emission eines Phonons vollziehen kann, wenn der Zustand B besetzt ist. Infolgedessen kann das Vorhandensein oder die Abwesenheit eines Elektrons in einem Zustand B die Energie eines Elektrons in dem Zustand A unabhängig von einer elektrostatischen (beispielsweise Coulomb) Wechselwirkung zwischen zwei Elektronen in diesen Zuständen beeinflussen.

[0124] Wenn zwei oder mehr Elektronen vorhanden sind, können Phonon-Elektron Wechselwirkungen zu Elektron-Elektron Wechselwirkungen führen, die ihrerseits zu einer Bildung von "gebundenen Paaren" der Elektronen führen können. Sofern beide Zustände A und B durch Elektronen besetzt sind, und Phononen einer Wellenzahl q verfügbar sind, können, wie in **Fig.** 21 gezeigt, Elektron-Phonon Wechselwirkungen zu "Austausch"-Zuständen der Elektronen führen. Das Ausschließungsprinzip bestimmt, dass die beiden bei dem Austausch involvierten Ereignisse (d. h. der Transfer des ursprünglich an der Position A befindlichen Elektrons auf die Position B und der Transfer des ursprünglich an der Position B befindlichen Elektrons auf die Position A) nicht unabhängig voneinander sind; infolgedessen gibt es eine effektive Elektron-Elektron Wechselwirkung. Falls das effektive Paar-Potential $V(r_1–r_2)$ der wechselwirkenden Elektronen negativ ist, kann ein "gebundenes

Paar" von Elektronen erzeugt werden.

[0125] Angenommen, dass die Streurate proportional zu dem Matrixelement der Störung V zwischen den Zwei-Elektronen-Zuständen $|k_1, -k_1>$ (Zustand "A") und $|k_2, -k2>$ (Zustand "B") ist, dann kann das effektive Paar-Potential zwischen Elektronen in dem Zustand A und dem Zustand B folgendermaßen berechnet werden:

$$V(r_1-r_2) = \iint dk_1 dk_2 <k_1, -k_1|V|k_2, -k_2> \exp(-i(k_1-k_2)\cdot(r_1-r_2))$$

[0126] Tatsächlich ist es unwahrscheinlich, dass ein Austausch zwischen einem Leitungsband-Elektron im Zustand A und einem Elektron im Zustand B, wie in **Fig.** 21 dargestellt, auftritt, und zwar einfach deswegen, da, wie oben erwähnt, Elektronen in dem Leitungsband typischerweise Zustände nahe dem Leitungsbandminimum einnehmen. Daher ist es unwahrscheinlich, dass der Zustand B besetzt ist. Wie jedoch oben diskutiert, weisen manche Halbleiter-Materialien (beispielsweise Silizium) ein entartetes Leitungsbandminimum auf. Jedes der Minima des entarteten Leitungsbandes ist mit gleicher Wahrscheinlichkeit besetzt. Infolgedessen kann ein elektronischer Austausch zwischen Elektronen in verschiedenen, entarteten Leitungsbandminima auftreten, wenn ein geeigneter Elektronen-Streuungsmechanismus verfügbar ist. In bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung wird eine Elektronenstreuung durch eine Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einem Phonon einer geeigneten Wellenzahl herbeigeführt. **Fig.** 22 zeigt ein Beispiel eines solchen Austauschereignisses, das zwischen gegenüberliegenden, entarteten Leitungsbandminima auftritt und "Intertal-Streuung" bezeichnet wird.

[0127] In dem in **Fig.** 22 dargestellten Fall wird ein Elektron durch Wechselwirkung mit einem Phonon der Wellenzahl $2\pi/\Lambda_L$, wobei Λ_L die Periode des Gitters des Halbleiter-Materials ist, von einem Zustand A (Wellenzahl k) in einen Zustand B (Wellenzahl –k) gestreut. Infolgedessen kann das Matrixelement folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$<k_1, -k_1|V|k_2, -k_2> = g(k_1)\delta(k_1 + k_2),$$

und das entsprechende Paar-Potential wird gegeben durch:

$$V(r_1-r_2) = \int g(k_1)\exp(-2ik_1\cdot(r_1-r_2))dk_1.$$

[0128] Wenn die Gitterstruktur unendlich ist, wird g(k) nur schmale Komponenten nahe $\pm(\pi/\lambda)e_z$ aufweisen und das Paar-Potential die folgende Form haben:

$$V(z_1-z_2) = V_0\cos[2\pi(z_1-z_2)/\Lambda_L],$$

wobei z die Gitterrichtung angibt, e_z der Einheitsvektor in der z-Richtung ist und V_0 ein Maß der Streustärke ist. Wir können grob die Effekte einer Klein-Wellenvektor-Streuung jedes Elektrons durch das Postulieren einer "Abschirmung" des Paar-Potentials einbeziehen, welches eine Funktion der mittleren freien Weglänge des Elektrons ist. Das Paar-Potential hat die Form:

$$V(z_1-z_2) = V_0\exp(-\alpha|z_1-z_2|\cos[2\pi(z_1-z_2)/\Lambda_L],$$

wobei α die inverse mittlere freie Weglänge eines Einzelelektrons bezeichnet. Dieses Potential ist in Einheiten von V_0 (der maximal möglichen Streustärke) in **Fig.** 23 dargestellt. Das Paar-Potential ist oszillatorisch und wird mit der elektronischen mittleren freien Weglänge gedämpft. Ein Elektronenpaar mit einer Wellenfunktion mit Maxima, die die Potentialminima überlappen, sieht ein Energieminimum. Falls die Größe von V_0 vergleichbar mit der Coulomb-Abstoßung ist und sich die mittlere freie Weglänge über mehrere Übergitter-Perioden erstreckt, können gebundene Elektronenpaare existieren. Die elektronische mittlere freie Weglänge, die dazu neigt, sich mit der Temperatur zu vermindern, stellt daher einen wichtigen begrenzenden Faktor für die Bildung von gebundenen Elektronenpaaren dar.

[0129] Die Größe der Coulomb-Wechselwirkung zwischen Elektronen mit einer großen Wellenvektor-Abweichung ist proportional zu $1/q^2$, wobei q die Größe der Abweichung ist. Die Coulomb-Wechselwirkung zwischen Elektronen in gegenüberliegenden Tälern eines entarteten Leitungsbands wird daher etwas schwächer sein als diejenige, die zwischen Elektronen in demselben Leitungsbandtal beobachtet wird. Infolgedessen ist die Wahrscheinlichkeit einer Bildung von gebundenen Zwischental-Paaren sehr viel höher als die Wahrscheinlichkeit der Bildung von gebundenen Elektronenpaaren innerhalb eines einzelnen Leitungsbandtals.

[0130] Gebundene Zwischental-Paare bilden sich nur dann, wenn die Paarbindungsenergie größer als Null ist. Wir können eine Variationsberechnung des gebundenen Zustands des Paars durchführen und zeigen, dass ein gebundener Zustand zwischen Elektronen sogar bei Vorhandensein einer Ladungsträger-Streuung existieren kann.

[0131] Genauer postulieren wir eine ein-dimensionale Wellenfunktion (in z), die in Schwerpunkts- $(z_1 + z_2)/2$ und Differenz- $(z_1 – z_2)$ Koordinaten separierbar ist. Wir untersuchen dann die Schrödinger-Gleichung der Paar-Wellenfunktion

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*_{ee}}\frac{d^2}{d\xi^2}\psi(\xi) + \left(V(\xi) + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\xi}\right)\psi(\xi) = E\,\psi(\xi)$$

in welcher m^*_e die reduzierte Masse des Paars bezeichnet und ξ die Paarseparation bezeichnet; V(ξ) bezeichnet das in **Fig.** 2 gezeigte Paar-Potential (Gleichung 10) und der zweite Potential-Energieterm ist die Coulomb-Abstoßung. Wir führen die folgenden Variablenänderungen ein, normieren alle Längenskalen auf q, welcher die Hälfte des Wellenvektor-Abstands zwischen Leitungsbandminima bezeichnet:

$z' = q\xi$

$\tilde{\alpha} = \alpha/q$

$q = \pi/\Lambda$

$$E_0 = \frac{\hbar^2 q^2}{2m^*_{ee}}$$

$$V_c = \frac{e^2 q}{4\pi\epsilon}$$

[0132] Die folgende Wellenfunktion dient dann als eine Versuchs-Wellenfunktion:

$\psi(z') = (2\beta(1 + \beta))^{1/2}\exp(-\beta z')\sin(z')$,

in welcher β so gewählt ist, dass der Erwartungswert der Energie minimiert ist. Nach Fertigstellung der Berechnung ergibt sich als Ergebnis, dass β eine Lösung der Gleichung ist:

$$V_0 = 2\frac{(2\beta + \alpha)^2}{\alpha})\,[E_0\beta - V_c(\ln(\beta) + 1)]]$$

[0133] Wenn wir α erlauben, sich dem Wert Null anzunähern (die Grenze einer sehr kleinen Ladungsträger-Ladungsträger-Streuung), nähert sich die Grundzustandsenergie in Abwesenheit einer Coulomb-Abstoßung der folgenden Grenze an:

$\langle E\rangle = E_0 – V_0/2$.

[0134] Der erste Term ist die Energie eines nicht-wechselwirkenden Paars, während der zweite Term die Bindungsenergie angibt. Infolgedessen stellt $V_0/2$ die Bindungsenergie im Grenzfall niedriger Temperaturen dar.

[0135] **Fig.** 24 zeigt die Verminderung der Bindungsenergie mit zunehmendem α (abnehmender elektronischer mittlerer freier Weglänge), während **Fig.** 25 die Bindungsenergie als eine Funktion des Streupotentials V_0 für eine feste mittlere freie Weglänge von 100 nm zeigt. Aus diesen Berechnungen und Figuren erkennen wir, dass wenn die mittlere freie Weglänge sehr viel länger als die Übergitterperiode ist, die elektronische Paar-Bindungsenergie durch $V_0/2$ gegeben ist.

[0136] Wie oben erwähnt, können Elektronen durch Wechselwirkung mit Phononen gestreut werden. Wir haben zwei unterschiedliche Typen von Phonon-Elektron-Streuung diskutiert: (i) Streuung innerhalb eines einzelnen Leitungsbandtals; und (ii) Zwischentalstreuung zwischen unterschiedlichen entarteten Leitungsbandminima in demselben Leitungsband. Für einige Halbleiter-Materialien gibt es einen zusätzlichen verfügbaren Typ von Phonon-Elektron-Streuung. Einige Halbleiter-Materialien, wie beispielsweise Silizium (siehe **Fig.** 8), weisen eine verschachtelte fcc Struktur auf, aus der sich verdoppelte, benachbarte Brillouin-Zonen ergeben. In solchen Materialien kann eine "Interzonen" Intertal-Streuung zwischen Leitungsbandminima benachbarter Brillouin-Zonen auftreten, wie dies in **Fig.** 26 dargestellt ist, und kann zu der Bildung von Interzonen-Intertal gebundenen Elektronenpaaren führen.

[0137] Es ist gut bekannt, dass die Bildung von gebundenen Elektronenpaaren innerhalb eines Materials die Leitfähigkeit des Materials erhöht, da gebundene Elektronenpaare sich als Bosonen und nicht als Fermionen verhalten, und daher nicht dem Ausschließungsprinzip unterliegen. Die vorliegende Erfindung schafft ein Material mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit durch Bereitstellung eines Materials mit gebundenen Elektronenpaaren, vorzugsweise durch Erhöhung der Rate der Intertal-Streuung (entweder direkt oder Interzone) in dem Material.

[0138] Der Grad der Interzonen-Streuung in einem gegebenen Material hängt selbstverständlich von der Verfügbarkeit von Phononen mit einem geeigneten Impuls ab. Die vorliegende Erfindung schafft deshalb einen Phononenresonator, in welchem die Vibrationsenergie (d. h. die Phononendichte) an dem Impuls, der für die Erzeugung direkter und/oder Interzonen-Intertal-Streuung erforderlich ist, verstärkt ist. Wie oben diskutiert, wird ein derartiger Phononenresonator durch Bereitstellung einer Struktur mit periodisch variierender Dichte geschaffen, wobei die Periode der Struktur so gewählt ist, dass die Dichte der Phononen mit einem Impulswert und einer Wellenlänge, welche geeignet sind, eine Intertal-Streuung herbeizuführen, erhöht wird.

[0139] Wie in der **Fig.** 8 gezeigt und oben diskutiert, zeigt kristallines Silizium eine indirekte Bandlücke, bei welcher das Leitungsbandminimum sechsfach entlang der (**100**) Richtung entartet ist, und etwa unter einer Entfernung von 8-Zehnteln von dem Rand der Brillouin-Zone auftritt. Die entarteten Leitungsbandminima eines einzelnen Leitungsbandes sind deshalb in Silizium unter 1,6π/a beabstandet. Für ein Silizium-Isotopen-Übergitter, welches resonant für Phononen ist, die an einer Intertal-Streuung zwischen entarteten Leitungsbandminima eines einzelnen Leitungsbands teilnehmen können, würde das Übergitter die folgende Periode aufweisen:

Λ_L = 2,5 m atomare Schichten.

[0140] Für m = 1, denjenigen Fall, der die Bragg-Reflektion niedrigster Ordnung bildet, ergibt sich eine Periode von etwa 0,625 Gitterkonstanten oder 2,5 atomaren Schichten. In der Praxis ist es unwahrscheinlich, dass eine solche Struktur hergestellt werden kann, und zwar einfach deswegen, weil die Übergitterperiode zu klein ist.

[0141] Auf der anderen Seite zeigt **Fig.** 8, dass die Leitungsbandminima benachbarter Brillouin-Zonen in Silizium nur durch 0,4π/a beabstandet sind. Infolgedessen kann ein Elektron von einem Leitungsbandminimum in das nächste benachbarte Leitungsbandminimum durch Wechselwirkung mit einem Phonon des Impulses q = 0,4π/a gestreut werden. Für ein Silizium-Isotopen-Übergitter, das resonant für Phononen ist, die in einer solchen Interzonen-Intertal-Streuung teilnehmen können, würde das Übergitter daher die folgende Periode aufweisen:

Λ_L = 10 m atomare Schichten.

[0142] Für m = 1, demjenigen Fall, der die Bragg-Reflektion der niedrigsten Ordnung herbeiführt, ergibt sich eine Periode von etwa 2,5 Gitterkonstanten oder 10 atomaren Schichten von Silizium.

[0143] Das Silizium-Isotopen-Übergitter der niedrigsten Ordnung gemäß der vorliegenden Erfindung, das als ein Phononenresonator wirkt, der in der Lage ist, an Interzonen-Intertal-Streuung teilzunehmen, hat infolgedessen eine Periode, die doppelt so groß wie diejenige des Silizium-Isotopen-Übergitters der niedrigsten Ordnung gemäß der Erfindung ist, das ein Resonator für Phononen darstellt, welcher in der Lage ist, an indirekten strahlenden Übergängen teilzunehmen. Da Gitter mit Perioden, die ganzzahlige Vielfach der Periode des Resonators niedrigster Ordnung sind, ebenfalls für dieselben Phononen resonant sind, für welche der Resonator niedrigster Ordnung resonant ist, ist es klar, dass es möglich ist, ein Isotopen-Übergitter gemäß der vorliegenden Erfindung herzustellen, das sowohl für Phononen, die in der Lage sind, an Interzonen-Intertal-Streuung teilzunehmen, als auch für Phononen, die in der Lage sind, an indirekten strahlenden Übergängen teilzunehmen, resonant ist.

BEISPIEL 9: Leiter mit niedrigem Widerstand

[0144] Ein Phononenresonator der vorliegenden Erfindung kann in einem Leiter mit niedrigem Widerstand enthalten sein. Eine Ausführungsform eines solchen Leiters mit niedrigem Widerstand ist in **Fig.** 27 gezeigt. Wie in **Fig.** 27 gezeigt, sind zwei Vorrichtungen **230a**, b mittels eines Phononenresonators **100** verbunden, welcher elektrische Signale zwischen den Vorrichtungen **230a**, b überträgt. Wie für einen Durchschnittsfachmann erkennbar ist, kann es wünschenswert sein, den Leiter mit niedrigem Widerstand gemäß der vorliegenden Erfindung oder andere hier diskutierte Vorrichtungen zu dotieren. In solchen Fällen kann die Dotierung durch jedes in der Technik verfügbare Verfahren einschließlich beispielsweise Diffusion, Einbringen während des Wachstums, Ionen-Implantation oder Neutronen-Transmutations-Dotierung (siehe beispielsweise Haller Semicond. Sci. Tech. 5: 319, 1990, durch Bezugnahme in diesen Text aufgenommen) durchgeführt werden.

BEISPIEL 10: Planarer Transformator

[0145] Wie in der Technik bekannt ist, wird ein planarer Transformator gebildet, wenn zumindest zwei Leitungswege in Bezug zueinander angeordnet sind, beispielsweise in einer Serpentinen-Konfiguration, so dass ein alternierender Stromfluss geschaffen wird. Ein Phononenresonator der vorliegenden Erfindung kann in einem oder mehreren der Leitungswege enthalten sein, um einen planaren Transformator mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit und infolgedessen erhöhten magnetischen Eigenschaften zu schaffen. Natürlich könnte ein Phononenresonator der vorliegenden Erfindung auch in anderen Vorrichtungen enthalten sein, deren magnetische Eigenschaften von der elektrischen Leitfähigkeit stammen.

BEISPIEL 11: Diode

[0146] Ein Phononenresonator gemäß vorliegender Erfindung kann in einer Diode enthalten sein, wie sie in **Fig.** 28 dargestellt ist. Der Phononenresonator **100** ist in einen p-n Kontakt integriert, um eine Diode mit erhöhten elektrischen Eigenschaften zu bilden. Kontakte **240a** und b sind an gegenüberliegenden Seiten des Kontaktes positioniert dargestellt.

BEISPIEL 12: Dipolartransistor

[0147] **Fig.** 29 zeigt einen npn Dipolartransistor, der einen Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung enthält. Die Basis **250** des Transistors umfasst einen Phononenresonator **100**, der die Leitfähigkeit zwischen dem Emitter **260** und dem Kollektor **270** erhöht.

BEISPIEL 13: Feldeffekttransistor

[0148] **Fig.** 30 zeigt einen Sperrschicht-Feldeffekttransistor (JFET) vom n-Typ, der einen Phononenresonator gemäß der vorliegenden Erfindung enthält. Das Gate **310** umfasst einen Phononenresonator **100**, der die Leitfähigkeit zwischen der Source (Quelle) **320** und der Drain (Senke) **330** verstärkt. Wie für einen Durchschnittsfachmann erkennbar, kann ein Phononenresonator auch in einen n-Kanal Metalloxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (MOSFET) eingebaut werden (siehe **Fig.** 31).

BEISPIEL 14: Integrierter Schaltkreis

[0149] **Fig.** 32 zeigt einen integrierten Schaltkreis, der eine Kombination der oben beschriebenen Komponenten (beispielsweise einen Leiter mit niedrigem Widerstand, eine Diode, einen Dipolartransistor, einen JFET und/oder MOSFET) verwendet, welcher einen Phononenresonator enthält. Jede nützliche Kombination von Komponenten kann verwendet werden, und verwandte Komponente, die keinen Phononenresonator beinhalten, können in Kombination mit Komponenten, die einen Phononenresonator verwenden, zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit eingesetzt werden.

Beschleunigte Wärmeableitung von einem Phononenresonator

[0150] Elektron-Phonon-Wechselwirkungen können als Quelle verstanden werden, aus welcher Nicht-Gleichgewichts-Phononen erzeugt werden. Infolgedessen können Elektron-Phonon-Wechselwirkungen den Verstärkungsmechanismus schaffen, der erforderlich ist, um das Schwingungs-Analogon zu einer Lasertätigkeit in einem Resonator zu erzielen. Sobald ein solcher Phononenresonator den Schwellwert erreicht, wird die emittierte Energie sowohl kohärent als auch in hohem Maße gerichtet sein. Ein oberhalb des Schwellwertes arbeitender Phononenresonator kann daher über die kohärente, gerichtete Emission von Schwingungsenergie zu dem Substrat eine beschleunigte Wärmeableitung von dem Resonator zu dem Substrat, auf welchem sich der Resonator befindet, schaffen.

[0151] Da ferner eine Vielfalt von Systemen bei Vorhandensein von Nicht-Linearitäten eine Vielfalt von stochastischen Resonanzen zeigen, ist zu erwarten, dass Schwingungs-Anharmonizitäten kombiniert mit einem Phononenresonator stochastische Resonanzen zeigen. Diese Resonanzen sind sowohl kohärent als auch gerichtet und schaffen eine beschleunigte Wärmeleitung von (oder durch) ein Isotopen-Übergitter.

Verfahren zur Herstellung eines Phononenresonators

[0152] Ein Phononenresonator der vorliegenden Erfindung kann durch eine Vielzahl von Verfahren hergestellt werden. Wir beschreiben hier die Präparation eines Isotopen-Übergitter-Phononenresonators. Bei jedem Herstellungsverfahren eines Isotopen-Übergitters gibt es zwei Gesichtspunkte: i) das Bereitstellen getrennter, im

Wesentlichen reiner Isotopen; und ii) den Zusammenbau der im Wesentlichen reinen Isotope in einer Schichtstruktur gemäß der Erfindung. Diese zwei Gesichtspunkte können getrennt oder gleichzeitig durchgeführt werden.

[0153] Verfügbare Verfahren zur Isotopentrennung enthalten unter anderem Gasdiffusion, Gaszentrifuge, fraktionale Destillation, aerodynamische Trennung, chemischer Austausch, elektromagnetische Trennung und Laser-Dissoziation/Ionisierung (siehe beispielsweise London Separation of Isotopes, London: George Newnes, Ltd., 1961; Spindel et al., J. Chem. Engin. 58, 1991; Olander Sci. Am. 239: 37, 1978; Stevenson et al., J. AM Chem. Soc. 108: 5760, 1986; Stevenson et al., Nature 323: 522, 1986; Bigelelsen Science 147: 463, 1965; Tanaka et al., Nature 341: 727, 1989; Ambartzumion Applied Optics, 11, S. 354, 1972; N. R. Isenor et al., Can. J. Phys. 51: 1281, 1973; Epling et al., Am. Chem. Soc. 103: 1238, 1981; Kamioka et al., J. Phys. Chem. 90: 5727, 1986; Lyman et al., J. App. Phys. 47: 595, 1976; Arai et al., Appl. Phys. B53: 199, 1991; Clark et al., Appl. Phys. Lett. 32: 46, 1978). Darüber hinaus kann auch eine (tiegelfreie) Schmelzzonentrennung für die Reinigung eines Halbleiters verwendet werden.

[0154] Verfahren, die zum Zusammenbau eines isotopenreinen Materials zu einem Isotopen-Übergitter gemäß der vorliegen Erfindung verfügbar sind, enthalten beispielsweise chemische Gasphasenabscheidung (CVD), Molekularstrahl-Epitaxie (MBE) und chemische Strahl-Epitaxie (CBE) (siehe beispielsweise Sedwick et al., J. Vac Sci. Technol. A 10(4), 1992). Isotopenreine Materialien, die durch irgendein verfügbares Verfahren einschließlich der oben erwähnten hergestellt werden, können in Kombination mit Standard CVD-, MBE- oder CBE-Technologien verwendet werden, um ein Isotopen-Übergitter gemäß der vorliegenden Erfindung herzustellen.

[0155] Zusätzlich kann ein Isotopen-Übergitter gemäß der vorliegenden Erfindung geschaffen werden, indem eine Isotopentrennung und eine Schichtablagerung gleichzeitig durchgeführt werden. In einem besonders bevorzugten Verfahren wird die Laser-Dissoziations-Isotopentrennungstechnik in Kombination mit einem CVD-Prozess (d. h. ein "Laser-unterstützter CVD"-Prozess) in einer einzelnen Kammer eingesetzt, um ein Isotop-Übergitter gemäß der vorliegenden Erfindung herzustellen (siehe Beispiel 18).

[0156] Die Beispiele 15–18 bieten jeweils spezielle Beschreibungen von fraktionaler Destillation, chemischem Austausch, Laser-Dissoziation und Laser-unterstützten CVD-Techniken. Fraktionale Destillation kann beispielsweise bei der Herstellung von Festkörper-Vorgängerstoffen für das epitaktische Wachstum oder Czochralski-Wachstum verwendet werden. Laserunterstütztes CVD schafft in situ Isotopentrennung und Laserwachstum. Diese Beispiele sind Beschreibungen bevorzugter Verfahren und sollen nicht den Umfang der Gesamterfindung beschränken.

BEISPIEL 15: Fraktionale Destillation

[0157] Es ist bekannt, dass geringe Unterschiede der Verdampfungswärme unterschiedlicher in einer Flüssigkeit enthaltener Isotopen-Spezien bestehen. Das Verfahren der fraktionalen Destillation bewirkt, dass nach der Prozessierung eine Isotopen-Spezie in der Flüssigphase verbleibt, während die andere in einer Dampfphase herausgezogen wird. Ein bevorzugtes Trennverfahren für Silizium-Isotope wäre die fraktionale Destillation von $SiCl_4$, ein Material, das bei Raumtemperatur flüssig ist, das aber auch einen relativ hohen Dampfdruck aufweist. Da $SiCl_4$ ein Standard-Vorgängerstoff für die Herstellung sowohl von Silan als auch von elementarem Silizium ist, weist dieses Verfahren geringe Verluste (Vergeudung) auf.

BEISPIEL 16: Chemischer Austausch

[0158] Chemischer Austausch schafft eine Trennung verschiedener Isotopen-Spezien kraft Isotopen-Unterschieden in der freien Energie und dem entsprechenden Einfluss auf chemische Gleichgewichtsreaktionen. Es wurde gezeigt, dass unter geeigneten Bedingungen Isotopen-Spezien für bestimmte Gleichgewichtsreaktionen unterschiedliche Verhältnisse der Mischungen bei Reaktionsstoff und Reaktionsprodukt zeigen. Die wichtigsten Anforderungen für die Effizienz solcher chemischen Austausch-Mechanismen sind:

– Die Verwendung von nicht mischbaren Reaktionsstoff/ Reaktionsprodukt-Phasen (nicht mischbare Flüssigkeiten oder Flüssigkeits-Gas-Reaktionen);
– elektronische Orbitale, die ähnlich den delokalisierten Orbitalen sind, die in aromatischen Verbindungen gefunden werden; und
– ein geeigneter Katalysator, um die Reaktion zum Gleichgewicht zu beschleunigen.

BEISPIEL 17: Laser-Dissoziation und Isotopen-selektives Erwärmen

[0159] Laser-Dissoziation und Isotopen-selektives Erwärmen ist das bevorzugte Verfahren für in situ Trennung und Wachstum von isotopenreinen Schichten.

[0160] Die Laser-Dissoziationstechnik der Isotopentrennung beruht auf der Tatsache, dass viele Moleküle

Schwingungsübergänge in dem nahen bis mittleren Infrarotbereich zeigen. Die Bombardierung von Molekülen mit Strahlung, die auf ihre Schwingungsübergänge abgestimmt ist, dissoziiert die Moleküle. Da die Schwingungsübergänge von Molekülen abhängig von den Massen der Atome sind, zeigen Moleküle, die unterschiedliche Isotope eines Atoms enthalten, unterschiedliche Übergangsenergien. Infolgedessen werden Moleküle, die unterschiedliche Isotopen eines gegebenen Atoms enthalten, durch Bombardement mit einer Strahlung unterschiedlicher Frequenzen dissoziiert.

[0161] Für den Zugang zum nahen oder mittleren Infrarotbereich sind eine Vielzahl von Laserquellen verfügbar, die verwendet werden können, um Moleküle mit Schwingungsübergängen in dieser Region zu dissoziieren. Beispielsweise sind Übergänge in dem Bereich von 9–10 μm durch Verwendung eines CO_2-Lasers zugänglich; verschiedene Festkörperlaser können den Nah-Infrarotbereich abdecken; und optische parametrische Oszillatortechnologie kann verwendet werden, um eine breite Abstimmbarkeit zu erreichen.

[0162] Um durch Verwendung von Laser-Dissoziation ein Isotop eines Atoms von einem anderen zu trennen, wird eine Mischung von Molekülen, die die unterschiedlichen Isotope enthält, mit Strahlung (beispielsweise von einem Laser) bombardiert, die auf eine Schwingungs-Übergangsfrequenz eines ein erstes Isotop enthaltenden ersten Moleküls abgestimmt ist. Das erste Molekül wird daher angeregt und kann kraft seiner höheren Temperatur oder seiner erhöhten Empfindlichkeit für Photodissoziation (siehe unten) von den anderen Molekülen in der Mischung getrennt werden. Nachdem das erste Isotop isoliert wurde, kann die Strahlungsfrequenz beispielsweise durch Abstimmen des Lasers auf eine neue Frequenz oder durch Bereitstellung einer alternativen Laserquelle so eingestellt werden, dass die Strahlungsfrequenz auf die Schwingungsübergangsfrequenz eines zweiten Moleküls, das ein zweites Isotop enthält, abgestimmt ist, und das zweite Molekül kann isoliert werden. Diese Vorgehensweise wird solange wiederholt, bis alle gewünschten Isotope isoliert sind.

BEISPIEL 18: Laser-unterstützte CVD

[0163] Ein Silizium-Isotopen-Übergitter gemäß der vorliegenden Erfindung kann dadurch hergestellt werden, dass Silan-Gas (SiH_4) infraroter Strahlung in einer Kammer, wie sie in **Fig.** 21 dargestellt ist, ausgesetzt wird. Ein Wafer **300** wird in der Kammer bei einer Temperatur unterhalb der für die spontane Versetzung von Silan erforderlichen Temperatur gehalten. Der Wafer **300** kann sich auf einem Heizer **350** befinden. Ein erster Laser **310** wird auf die Vibrationsübergangsfrequenz des ersten gewünschten Silizium-Isotops (beispielsweise Si^{28}) abgestimmt. Die Laser-Anregung erzeugt eine große Temperaturdifferenz zwischen dem gewünschten Isotop und den anderen Isotopen, was zur Folge hat, dass nur das gewünschte Isotop auf dem Wafer **300** abgeschieden wird. Alternativ kann der erste Laser **310** verwendet werden, um nur das erste Silizium-Isotop anzuregen, und ein zweiter Laser **320** kann ein Photon mit höherer Energie bereitstellen, um die angeregten Silan-Moleküle (jene Silan-Moleküle, die das gewünschte Silizium-Isotop enthalten) zu photoionisieren, wodurch Ione, die eine hohe Reaktivität mit der Oberfläche des Wafers **300** aufweisen, erzeugt werden.

[0164] Nachdem die geeignete Anzahl von Atomschichten des ersten Silizium-Isotops abgelegt wurden, wird der erste Laser **310** auf die Schwingungsübergangsfrequenz des zweiten gewünschten Silizium-Isotops (beispielsweise Si^{30}) eingestellt und abgestimmt. Es wird dann die geeignete Anzahl von Atomschichten des zweiten Silizium-Isotops abgelegt. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Isotopen-Übergitterstruktur hergestellt ist.

[0165] Nach dem Wachsen des Isotopen-Übergitters kann eine Kalibrierung der Schichtdicke durch eine SIMS-Analyse durchgeführt werden. Eine Standard in situ Überwachung (beispielsweise RHEED) kann ebenfalls ausgeführt werden, um beispielsweise festzustellen, ob die Majoritäts-Isotopenschichten mit einer dramatisch schnelleren Rate wachsen als die Minoritäts-Isotopenschichten. Falls dies der Fall ist, kann die Ungleichheit beispielsweise durch Einstellen der Laserleistung (beispielsweise der Erniedrigung der Laserleistung für das Ablagern der Majoritäts-Isotopenschichten) korrigiert werden.

[0166] Über die gesamte Zeit während des Wachsens des Isotopen-Übergitters gemäß der vorliegenden Erfindung sollte die Temperatur in der Kammer hoch genug sein, um die Oberflächen-Mobilität von abgelagerten Silizium-Atomen aufrechtzuerhalten, um ein epitaktisches Wachstum zu gewährleisten. Es ist ebenfalls bevorzugt, dass das Isotopen-Übergitter in der Richtung des niedrigsten Leitungsbandminimums gewachsen wird. Für Silizium entspricht dies der (100)(010)(001)-Familie von Wachstumsebenen; für Germanium ist ein (**111**) Übergitter wünschenswert. Diamant weist eine Bandstruktur auf, die näher derjenigen von Silizium ist, und benötigt deshalb vergleichbare Wachstumsrichtungen. Wie für einen Durchschnittsfachmann erkennbar, sind andere Wachstumsrichtungen möglich, vorausgesetzt dass die Periodizität in der geeigneten Richtung (beispielsweise in der (**100**) Richtung für Silizium) die hier diskutierten Kriterien erfüllt.

[0167] Die Isotopen-Reinheit des Isotopen-Übergitters der vorliegenden Erfindung kann unter Verwendung jedes verfügbaren Verfahrens, wie beispielsweise Sekundärionen-Massenspektroskopie oder Raman-Streuung, getestet werden.

[0168] Wie für den Fachmann erkennbar, umfassen wichtige Erfordernisse für die Herstellung eines isotopenreinen Übergitters gemäß der vorliegenden Erfindung das Erfordernis, dass der Wafer **300** atomar rein ist, dass

das Schalten der Laserfrequenzen nicht zu einer Ablagerung von "gemischten" Isotopenschichten führt und dass die Kammer eine im Wesentlichen kollisionsfreie Umgebung bietet.

[0169] Jedes dieser Erfordernisse wird nacheinander diskutiert. Zunächst kann der Wafer **300** durch Standardverfahren gereinigt werden und es sollte eine Oxidentfernung durchgeführt werden.

[0170] Um Probleme, die mit während der Laserabstimmung hergestellten gemischten Isotopen-Populationen verbunden sind, zu vermeiden, verwendet eine bestimmte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens eine Mehrzahl von Wafern **300**, die auf einem rotierenden Karussell angebracht sind, dessen Rotation zeitlich so gesteuert wird, dass nur reine Isotopenschichten auf den Wafern abgelagert werden (d. h. so, dass gemischte Populationen während denjenigen Zeiten, in welchen Lücken anstelle von Wafern dem Silan-Strom ausgesetzt sind, erzeugt werden).

[0171] Eine im Wesentlichen kollisionsfreie Umgebung wird durch das in **Fig.** 21 dargestellte Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung sichergestellt, indem der erste **310** und der zweite **320** Laser sich an einem Punkt nahe der Oberfläche des Wafers **300** schneiden.

[0172] Wie für einen Fachmann erkennbar, ist es beim Ausführen des bevorzugten Verfahrens der vorliegenden Erfindung wünschenswert, sicherzustellen, dass Siliziumschichten vorzugsweise, wenn nicht ausschließlich, auf dem Wafer **300** und nicht auf anderen Teilen der Kammer abgelagert werden. Es ist deshalb wünschenswert, dass die Infrarotfenster **330** und **340**, durch die die ersten und zweiten Laserstrahlen gerichtet werden, aus einem Material sind, das nicht mit dem aus der Anregung resultierenden Silizium beschichtet wird.

Andere Ausführungsformen

[0173] Im Vorangegangen wurde eine Beschreibung von bestimmten bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung präsentiert, wobei die Beschreibung nicht als beschränkend zu verstehen ist. Andere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung liegen innerhalb des Umfangs der folgenden Ansprüche.

[0174] Insbesondere ist die vorliegende Erfindung nicht auf Halbleiter-Materialien beschränkt. Materialien wie beispielsweise Diamant können ebenfalls verwendet werden. Darüber hinaus kann ein Phononenresonator in eine Vielfalt von anderen optischen und elektrischen Vorrichtungen eingebaut werden, wie dies für den Durchschnittsfachmann ohne weiteres erkennbar ist. Beispielsweise kann ein Phononenresonator in eine supraleitende Quanteninterferenz-Vorrichtung (SQUID), einen Josephson-Kontakt, einen Hochfrequenztransistor oder einen Mikrowellen-Detektor eingebaut werden, um die elektrischen und/oder thermischen Eigenschaften dieser Vorrichtungen zu erhöhen bzw. zu verbessern.

[0175] Darüber hinaus beschreibt die vorliegende Erfindung eine Struktur periodisch variierender Dichte (beispielsweise ein Isotopen-Übergitter). Die Dichte der oben beschriebenen bevorzugten Struktur wird durch Bereitstellung von alternierenden Lagen von Material unterschiedlicher Massendichte variiert. Eine andere Möglichkeit, die Massendichte der Struktur periodisch zu variieren, besteht darin, eine stehende Welle in die Struktur einzubringen. Da sich Phononen normalerweise ohne Streuung nur 100–1000 Å ausbreiten, würde eine akustische Welle mit einer Wellenlänge von sehr viel weniger als 1000 Å benötigt werden, um die erforderliche stehende Welle aufzubauen. Solche akustische Wellen können praktisch nicht erzeugt werden. Infolgedessen ist die Struktur periodisch variierender Dichte gemäß der vorliegenden Erfindung eine Struktur mit Materialschichten von verschiedenen Dichten in der Form eines hier beschriebenen Isotopen-Übergitters.

[0176] Wie für einen Durchschnittsfachmann offensichtlich, kann eine Struktur periodisch variierender Dichte wie die hier beschriebene Struktur entworfen sein, Phononen bestimmter Wellenvektoren zu unterdrücken, anstatt diese zu verstärken. Beispielsweise ist es manchmal wünschenswert, Phonon-Elektron Wechselwirkungen zu vermeiden, die zu einer Ionisation eines in einer Quantenwannen- oder Quantendraht-Struktur gebundenen Elektrons führen. Eine Struktur, die ausgelegt ist, nicht für Phononen bei den für eine Ionisierung eines Elektrons benötigten Energien resonant zu sein und diese deshalb zu unterdrücken, kann in der hier beschriebenen Weise aufgebaut werden. Eine solche Struktur würde das Leistungsverhalten einer Quantenwanne oder eines Quantendrahtes verbessern.

[0177] Wie für einen Durchschnittsfachmann ebenfalls erkennbar, kann ein Isotopen-Übergitter gemäß der vorliegenden Erfindung aus Isotopen-angereicherten Schichten aus zwei oder mehreren unterschiedlichen Elementen oder Verbindungen hergestellt werden, vorausgesetzt, dass die Gesamtstruktur ausgelegt ist, für Phononen eines für die Teilnahme an Phonon-Elektron Wechselwirkungen geeigneten Wellenvektors resonant zu sein. Beispielsweise kann eine Struktur aufgebaut werden, die zwei atomare Schichten eines Kohlenstoffs-Isotops alternierend mit drei atomaren Schichten eines Silizium-Isotops umfasst. Eine solche Struktur würde eine große (größer als etwa 2,5 eV) indirekte Bandlücke zeigen und würde beispielsweise für die Verwendung in einer lichtemittierenden Vorrichtung, wie sie hier beschrieben wurde, geeignet sein.

[0178] Die oben beschriebene bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens verwendet Silan (SiH_4) als Ausgangsmaterial zur Herstellung eines erfindungsgemäßen Silizium-Isotopen-Übergitters durch eine Laser-unterstützte Isotopentrennung. Andere Ausgangsmaterialien, wie beispielsweise SiH_2Cl_2, SiF_4 oder andere Mitglieder der Wasserstoff-Silan-Familie von Gasen, können ebenfalls verwendet werden,

obgleich schwerere Moleküle, wie beispielsweise Dichlorsilan (SiH_2Cl_2) kompliziertere Schwingungsspektren aufweisen, was die Identifizierung einer Schwingungsabsorptions-Frequenz, die klar mit einem einzelnen Silizium-Isotop im Zusammenhang steht, schwieriger macht. Insofern ist zum Zwecke der vorliegenden Erfindung Silan das bevorzugte Ausgangsgas für eine Laser-unterstützte Isotopentrennung.

[0179] Während die hier beschriebenen Beispiele die Herstellung und Anwendung von ein-dimensionalen Phononenresonatoren beschreiben, ist für den Durchschnittsfachmann erkennbar, dass Strukturen, die in mehr als einer Dimension (beispielsweise in zwei oder drei Dimensionen) periodisch sind, ebenfalls gemäß den vorliegenden Lehren hergestellt und verwendet werden können. Solche Strukturen schaffen Resonanzen für Phononen in bis zu drei Richtungen in dem Kristall. Das Verfahren zur Bestimmung der Resonatorperiode in zwei oder drei Dimensionen ist exakt analog zu dem für eine Dimension verwendeten Verfahren. Eine drei-dimensionale Periodizität hat die Wirkung, das Phononenspektrum des gesamten Kristall anstatt dem Phononenspektrum in einer einzelnen Dimension zu verändern.

Patentansprüche

1. Struktur mit einer im Wesentlichen periodisch variierenden Dichte, mit:
zumindest einem ersten Bereich mit einer ersten Dichte aufgrund einer Anreicherung durch ein erstes Isotop eines ersten Elements; und
zumindest einem zweiten Bereich mit einer zweiten Dichte aufgrund einer Anreicherung mit einem zweiten Isotop eines zweiten Elements, wobei die ersten und zweiten Bereiche benachbart zueinander und alternierend in der Struktur angeordnet sind, so dass die Struktur eine im Wesentlichen periodisch variierende Dichte aufweist, wobei die Periode der Struktur so gewählt ist, dass die Struktur für Phononen eines Wellenvektors, der einem vorgegebenen Phonon-unterstützten, indirekten Elektronenübergang innerhalb der Struktur entspricht, im Wesentlichen resonant ist.

2. Struktur nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der vorgegebene, Phonen-unterstützte, indirekte Elektronenübergang die Streuung von Elektronen zwischen Tälern des Leitungsbandes betrifft.

3. Struktur nach den Ansprüchen 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Struktur ferner wenigstens einen Dotierstoff umfasst.

4. Struktur nach den Ansprüchen 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der erste Bereich eine erste Schicht umfasst und der zweite Bereich eine zweite Schicht umfasst, so dass die Dichte der Struktur periodisch lediglich in einer Dimension variiert.

5. Struktur nach den Ansprüchen 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Dichte der Struktur periodisch in mehr als einer Dimension variiert.

6. Struktur nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Element und das zweite Element dieselben Elemente sind und dass das erste Isotop und das zweite Isotop unterschiedliche Isotope dieses Elements darstellen.

7. Struktur nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Element ein Material mit indirekter Bandlücke ist.

8. Struktur nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Element Silizium ist.

9. Struktur nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Isotop Si^{30} und das zweite Isotop Si^{28} ist.

10. Struktur nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Isotop Si^{30} und das zweite Isotop Si^{29} ist.

11. Lichtemittierende Vorrichtung, die aufweist:
die Struktur nach Anspruch 1; eine erste Elektrode, die an einer ersten Seite der Struktur angeordnet ist; und
eine zweite Elektrode, die an einer zweiten Seite der Struktur angeordnet ist, wobei die zweite Seite der ersten Seite gegenüberliegt.

12. Optische Detektorvorrichtung, die aufweist:
einen p-dotierten Bereich;

einen n-dotierten Bereich, der einen p-n Übergang mit dem p-dotierten Bereich bildet;
die Struktur nach Anspruch 1, positioniert an dem p-n Übergang; eine erste Elektrode, die in Kontakt mit dem p-dotierten Bereich steht; und
eine zweite Elektrode, die in Kontakt mit dem n-dotierten Bereich steht, wobei der optische Detektor ausgelegt und so konstruiert ist, dass Strahlung durch die erste Elektrode in die Vorrichtung einfällt, den p-dotierten Bereich durchläuft und in der Struktur absorbiert wird, wobei in der Struktur ein Elektronen-Lochpaar erzeugt und ein Photostrom zwischen den Elektroden produziert wird.

13. Optische Detektorvorrichtung, die aufweist:
die Struktur nach Anspruch 1, wobei die Struktur wenigstens einen p-dotierten Bereich und wenigstens einen n-dotierten Bereich umfasst;
wenigstens eine erste Elektrode, die in ohmschen Kontakt mit dem wenigsten einen n-dotierten Bereich steht; und
wenigstens eine zweite Elektrode, die in ohmschen Kontakt mit dem wenigsten einen p-dotierten Bereich steht.

14. Optische Detektorvorrichtung, die aufweist:
die Struktur nach Anspruch 1, wobei die Struktur schwach dotiert ist; und
wenigstens zwei Elektroden, die in Schottky-Kontakt mit der Struktur stehen.

15. Vorrichtung, die aufweist:
eine erste elektrische Vorrichtung;
eine zweite elektrische Vorrichtung; und
eine Verbindung mit niedrigen Widerstand, die die erste Vorrichtung und die zweite Vorrichtung verbindet, wobei die Verbindung mit niedrigem Widerstand die Struktur nach Anspruch 1 umfasst.

16. Planarer Übertrager, der aufweist:
wenigstens zwei Leitpfade, wobei die Leitpfade zueinander so angeordnet sind, dass ein alternierender Stromfluss in dem Übertrager vorliegt, wobei wenigstens einer der wenigstens zwei Leitpfade die Struktur nach Anspruch 1 umfasst.

17. Elektrische Diode, die aufweist:
die Struktur nach Anspruch 1;
eine erste Elektrode, die an einer ersten Seite der Struktur angeordnet ist; und
eine zweite Elektrode, die an einer zweiten Seite der Struktur angeordnet ist, wobei die zweite Seite der ersten Seite gegenüberliegt.

18. Bipolarer Transistor, der aufweist:
einen ersten und einen zweiten n-dotierten Bereich;
einen p-dotierten Bereich, der zwischen den ersten und zweiten n-dotierten Bereichen angeordnet ist, wobei der p-dotierte Bereich die Struktur nach Anspruch 1 umfasst.

19. Feldeffekttransistor, der aufweist:
einen ersten und einen zweiten n-dotierten Bereich;
einen p-dotierten Bereich, der zwischen den ersten und zweiten n-dotierten Bereichen angeordnet ist, wobei der p-dotierte Bereich die Struktur nach Anspruch 1 umfasst.

20. Metalloxyd-Halbleiter-Feldeffekttransistor, der aufweist:
einen ersten und einen zweiten n-dotierten Bereich;
einen p-dotierten Bereich, der zwischen den ersten und den zweiten n-dotierten Bereichen angeordnet ist, wobei der p-dotierte Bereich die Struktur nach Anspruch 1 umfasst.

Es folgen 15 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

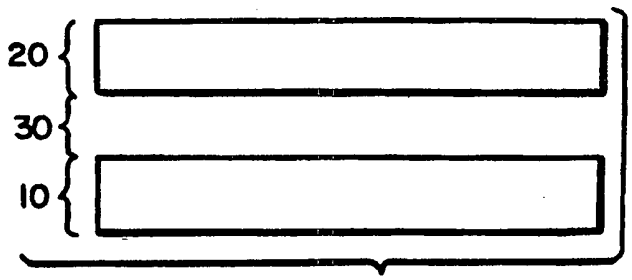


FIG. 1

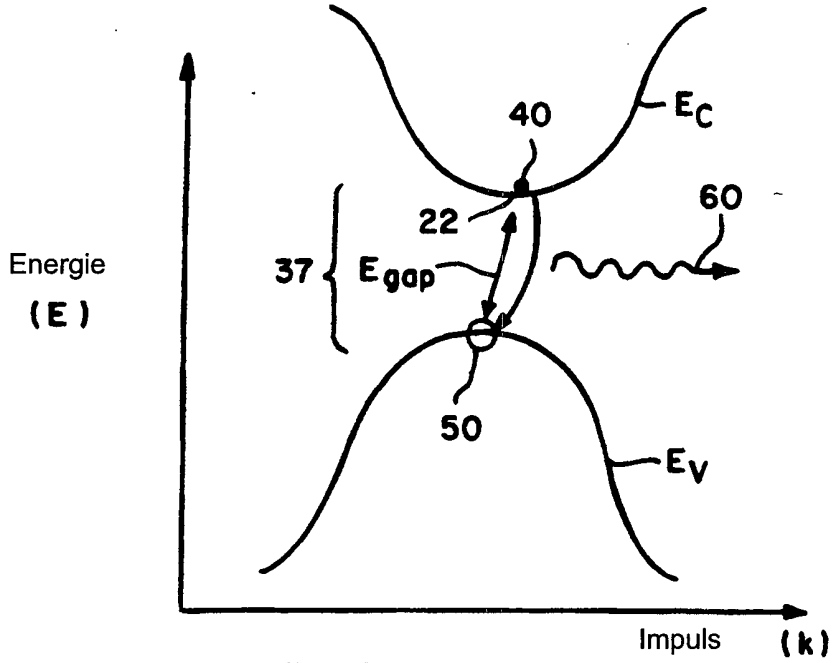


FIG.2

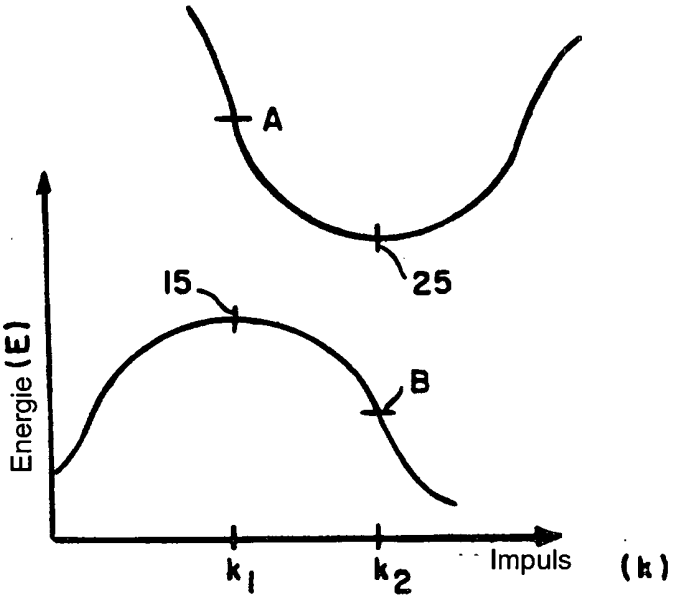


FIG. 3

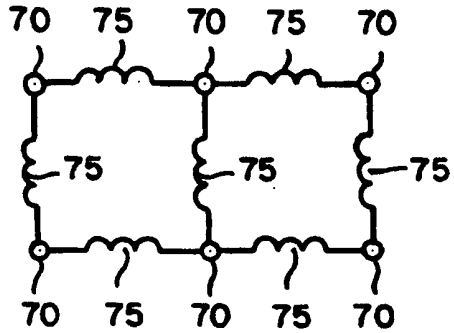


FIG. 5

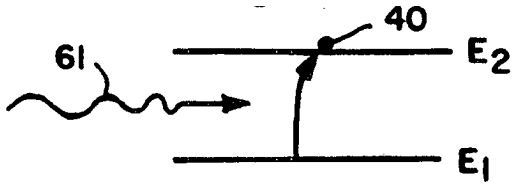


FIG.4A

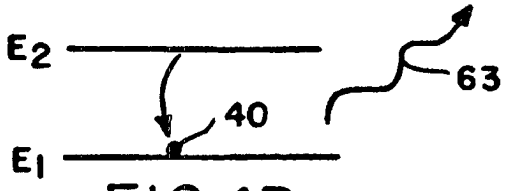


FIG.4B

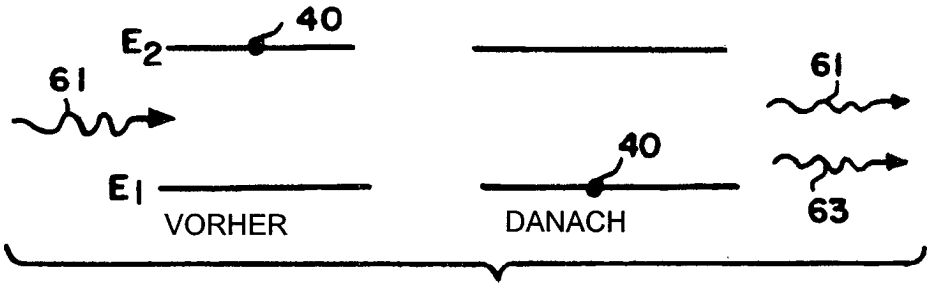


FIG. 4C

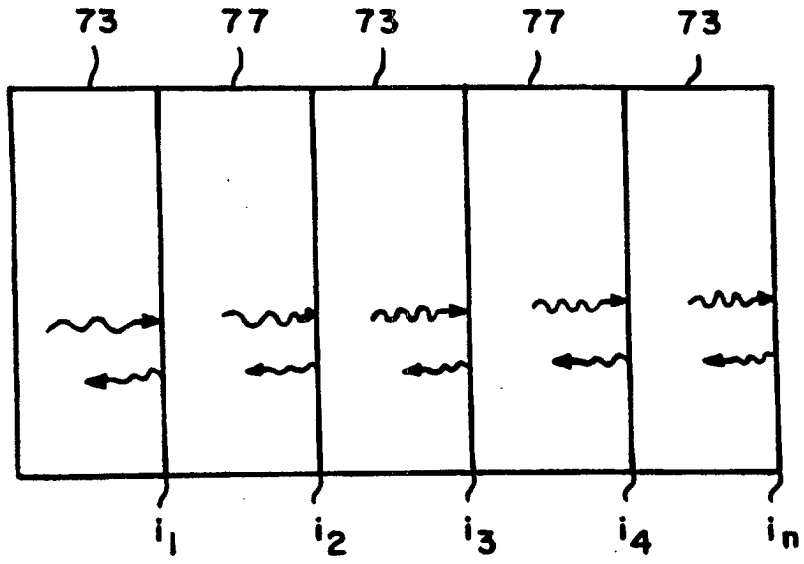


FIG. 7

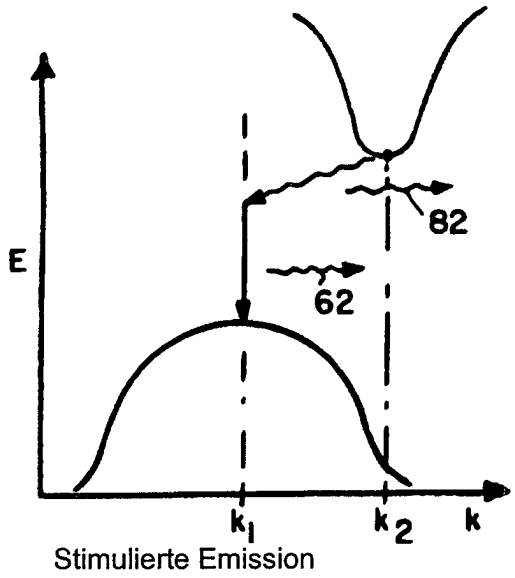


FIG.6A

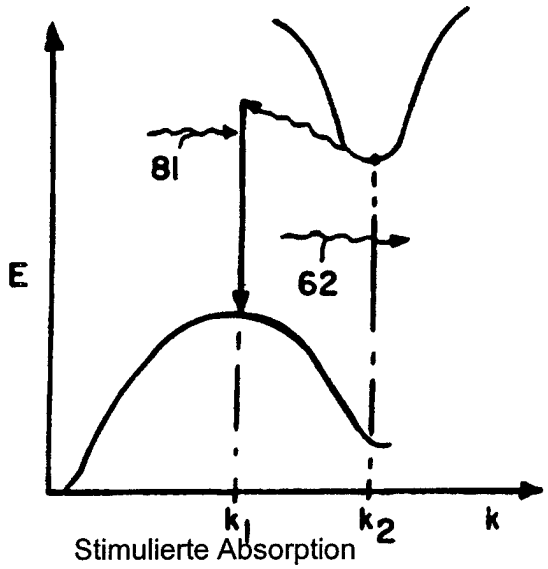


FIG.6B

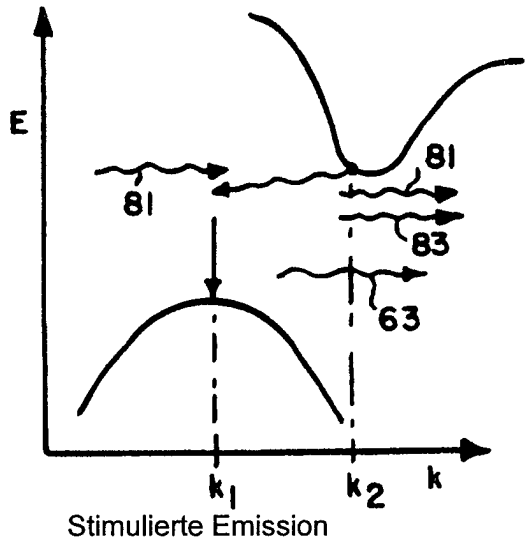


FIG.6C

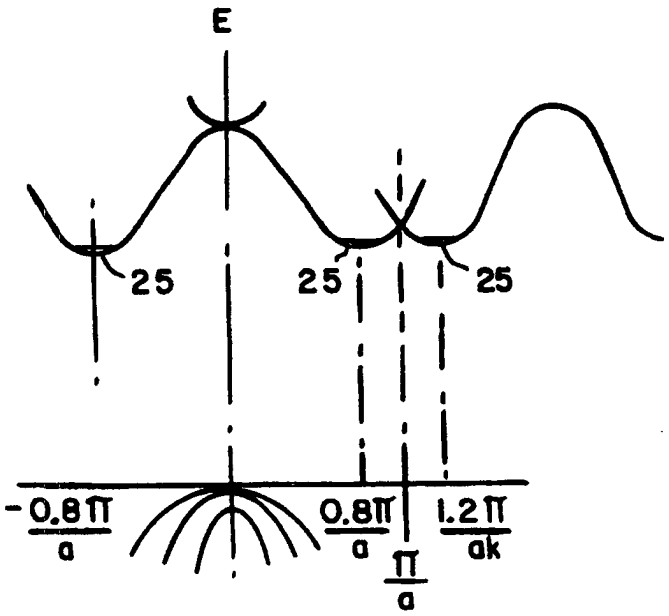


FIG. 8

FIG.9

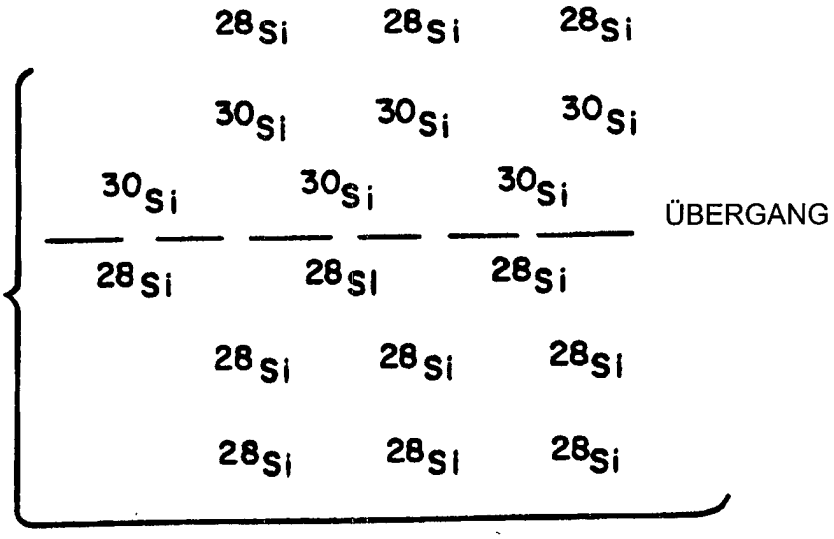


FIG.10

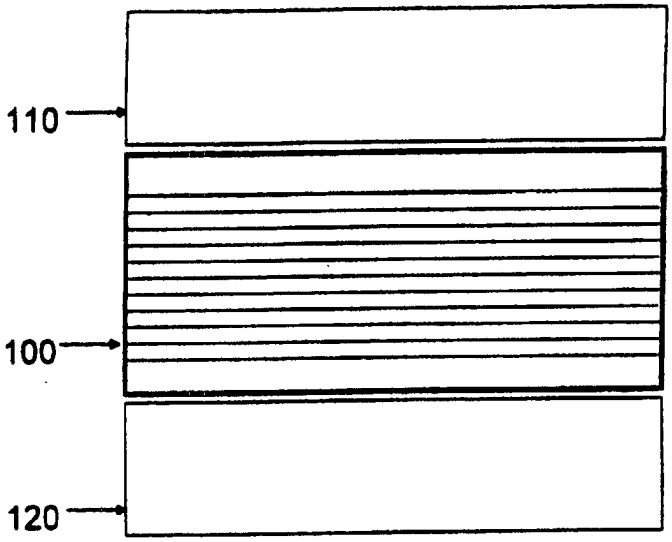


FIG.11A

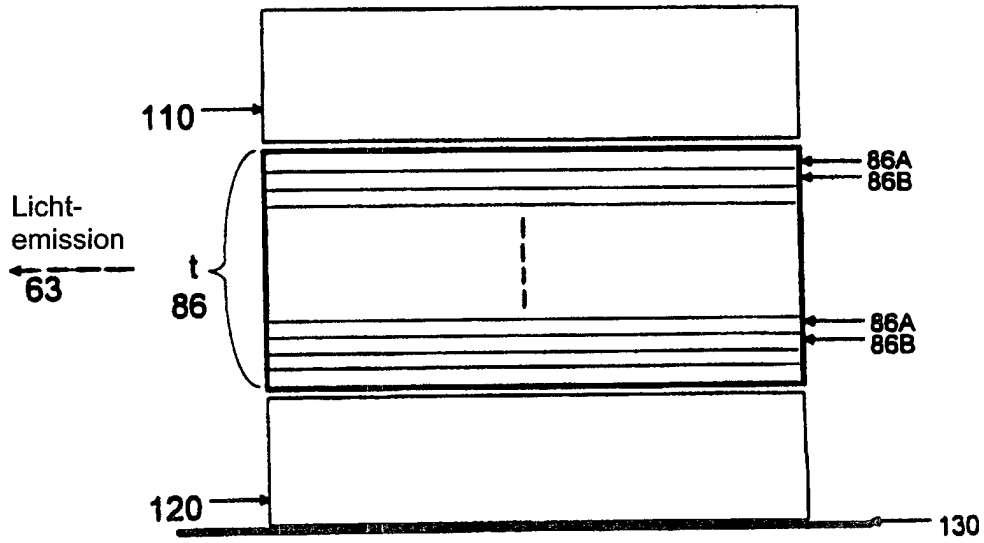


FIG.11B

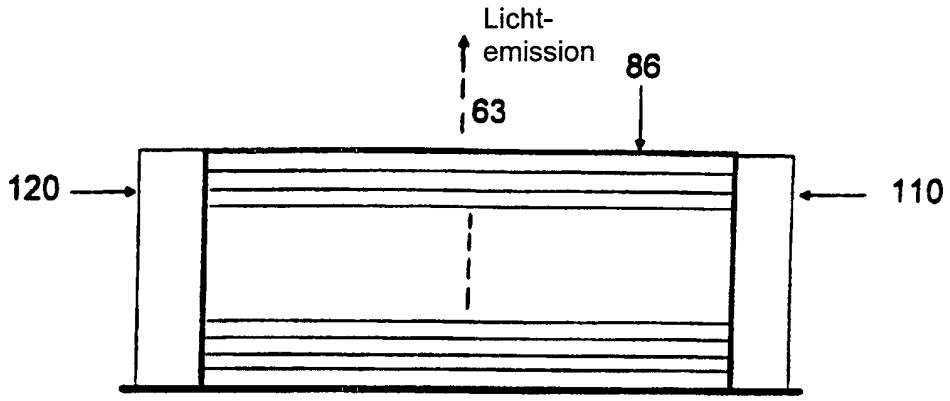


FIG.11C

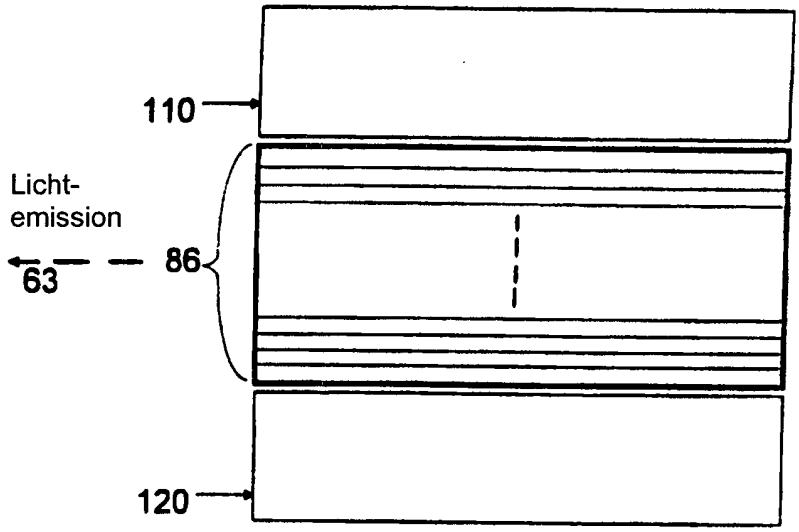
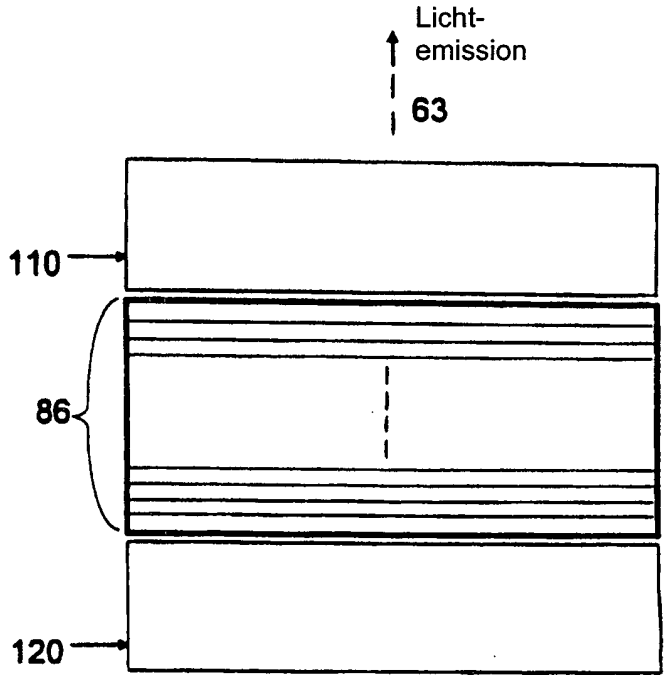


FIG.11D



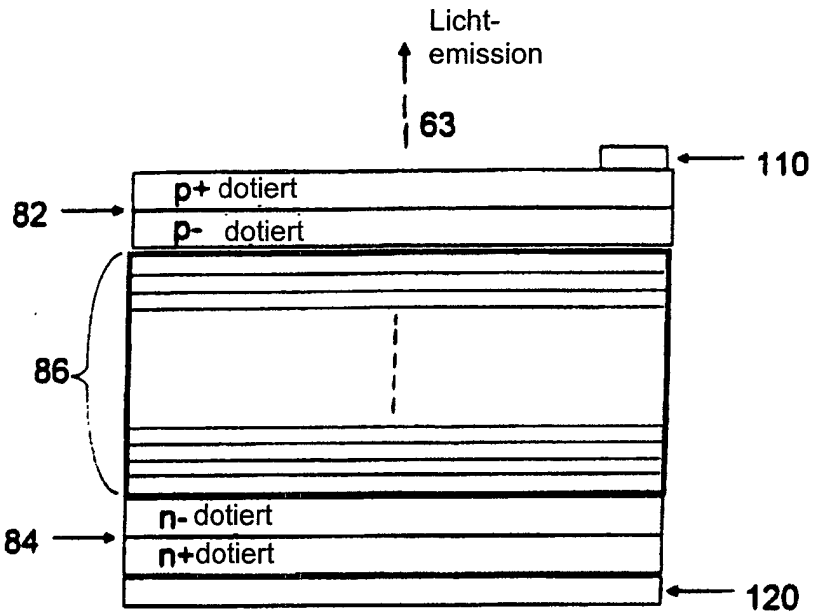


FIG.12

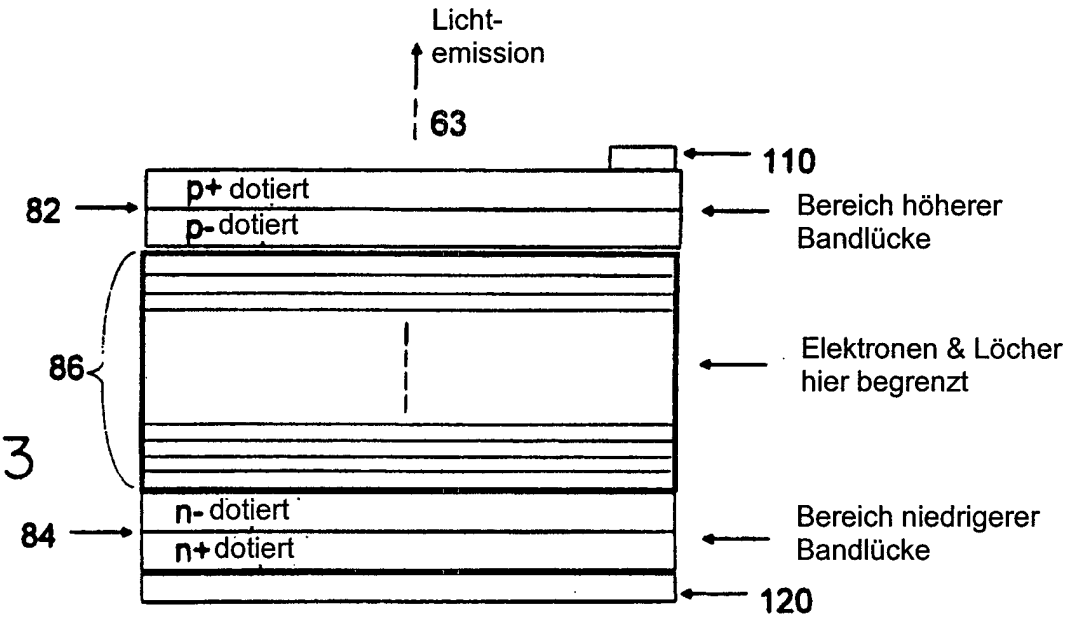


FIG.13

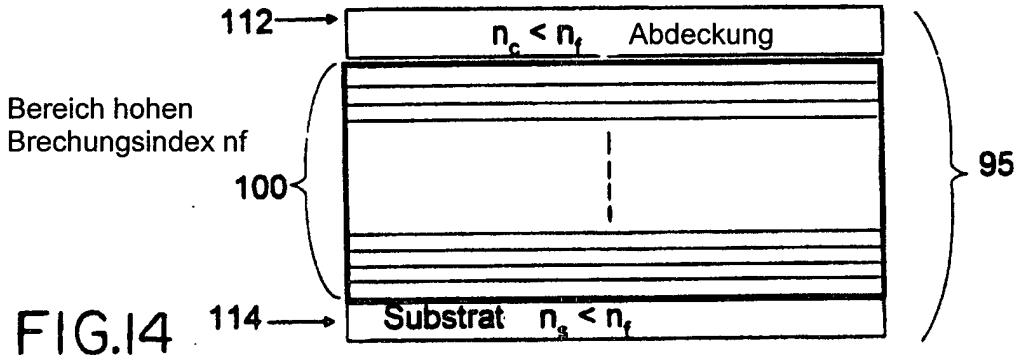


FIG.14

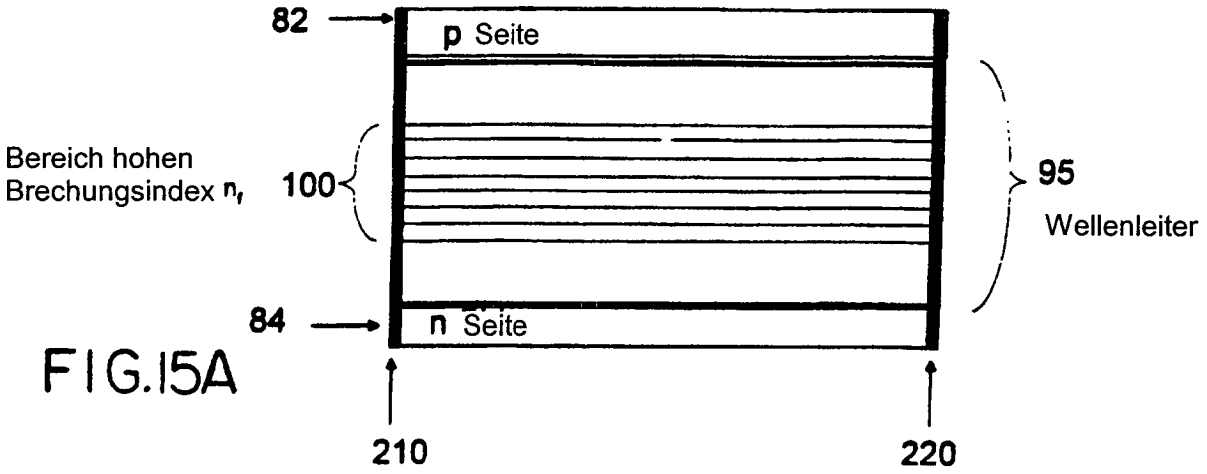


FIG.15A

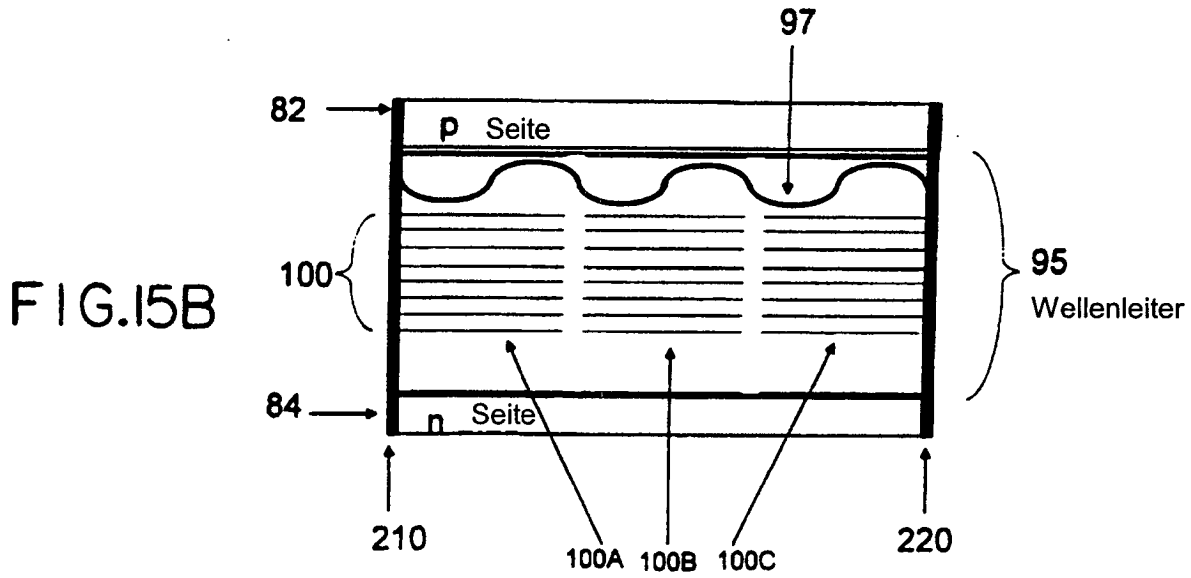


FIG.15B

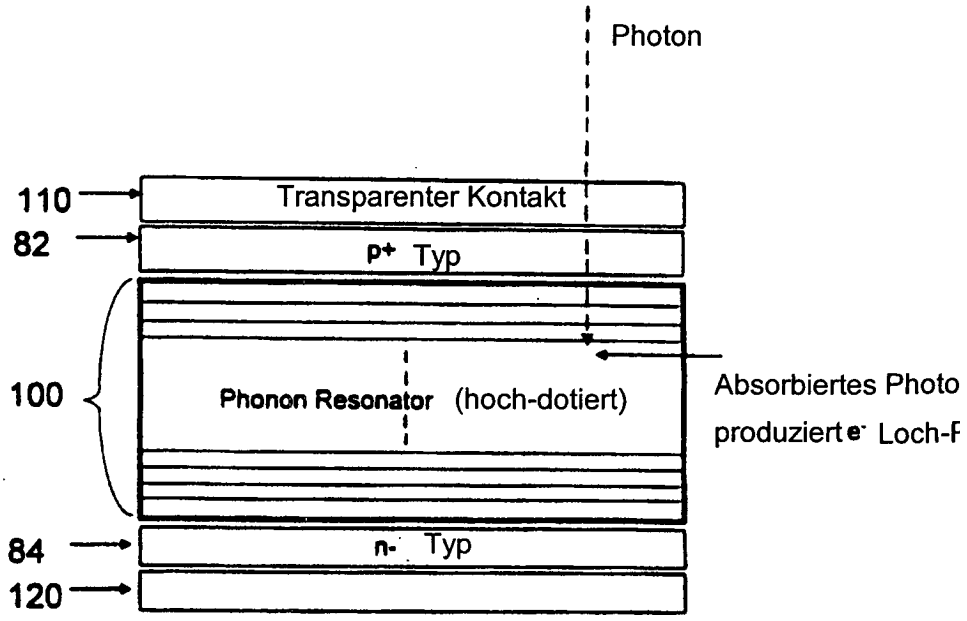


FIG. 17

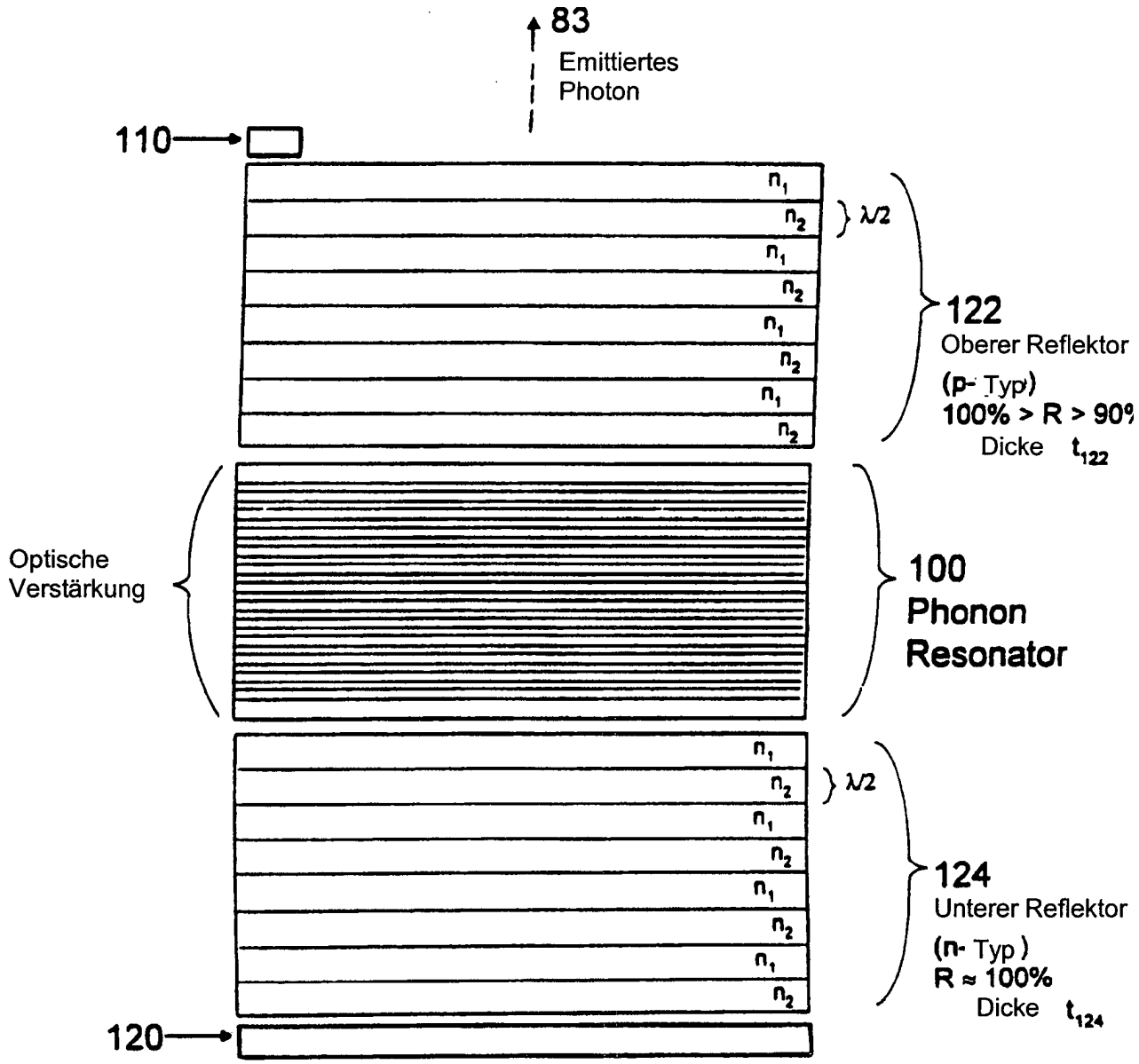

83
Emittiertes
Photon
110
n1
n2
λ/2
122
Oberer Reflektor
(p- Typ)
100% > R > 90%
Dicke t122
Optische
Verstärkung
100
Phonon
Resonator
124
Unterer Reflektor
(n- Typ)
R ≈ 100%
Dicke t124
120

FIG. 16

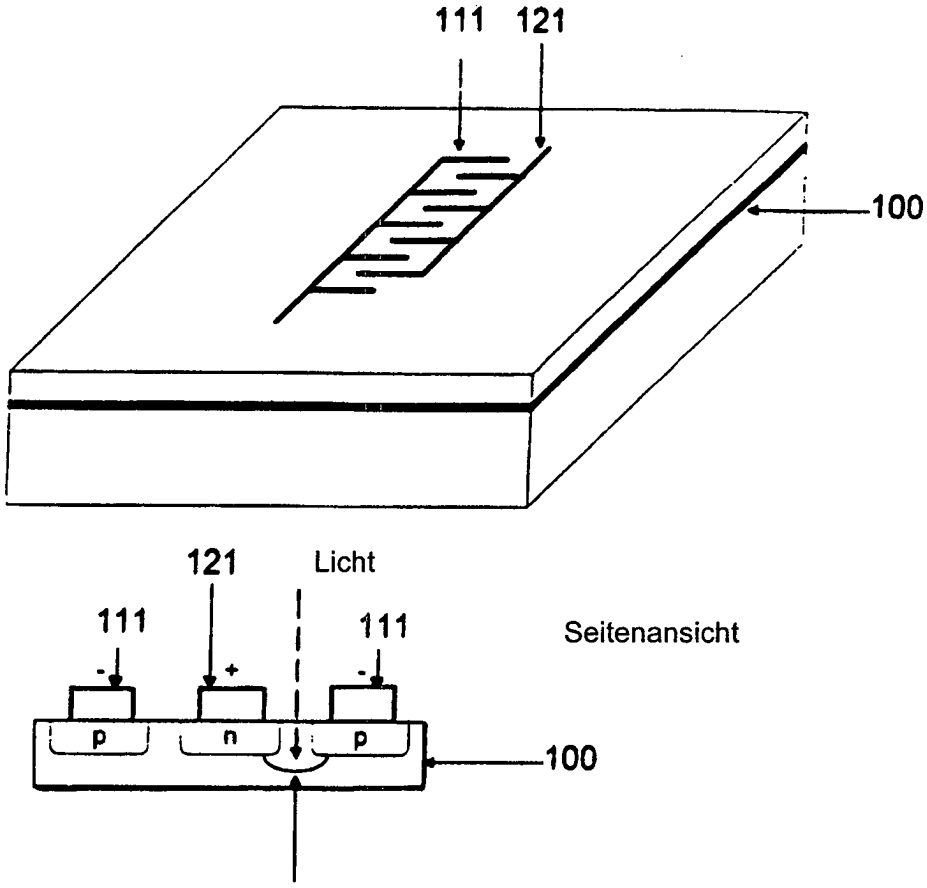

111
121
100
121
Licht
111
111
Seitenansicht
-
+
-
p
n
p
100
Lichtabsorption
induziert Photostrom zwischen
benachbarten Elektroden

FIG. 18

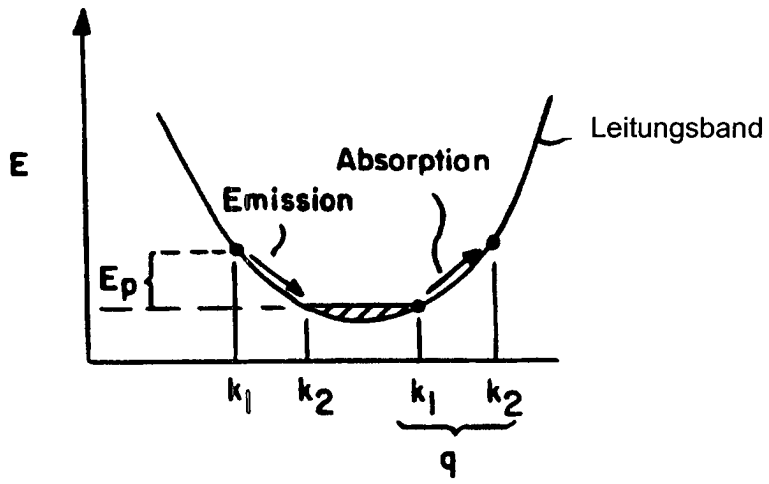

E
Leitungsband
Absorption
Emission
Ep
k1
k2
k1
k2
q

FIG. 19

FIG. 20

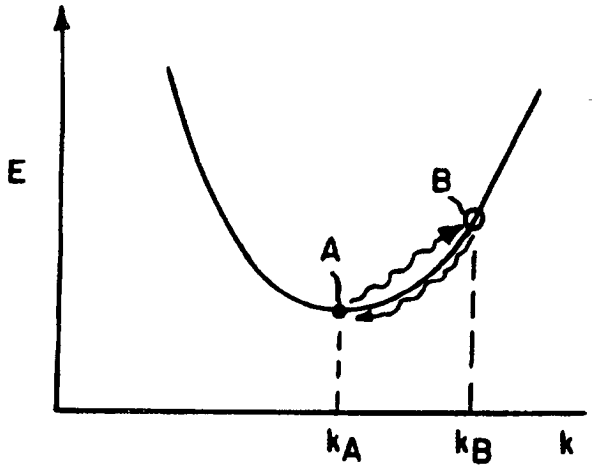


FIG. 21

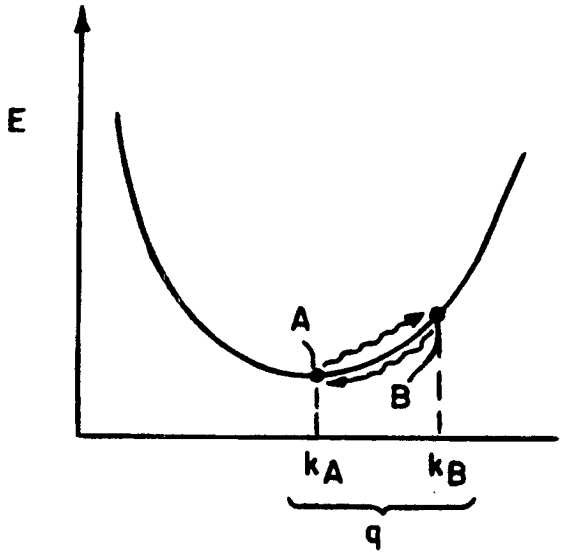
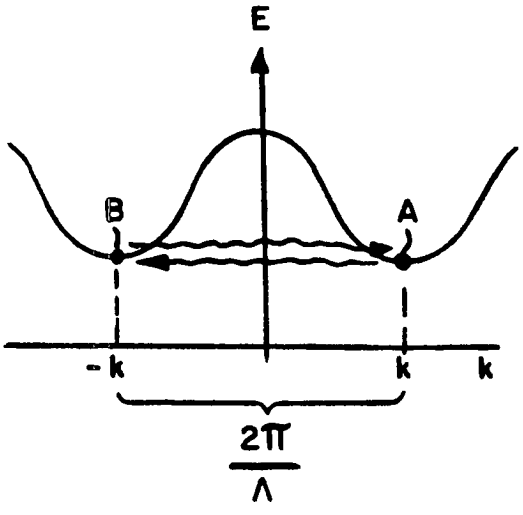


FIG. 22



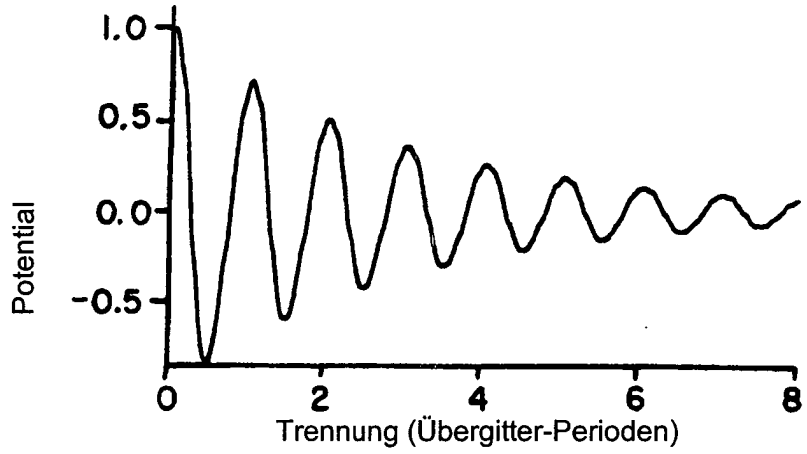

1.0
0.5
0.0
-0.5
Potential
0
2
4
6
8
Trennung (Übergitter-Perioden)

FIG. 23

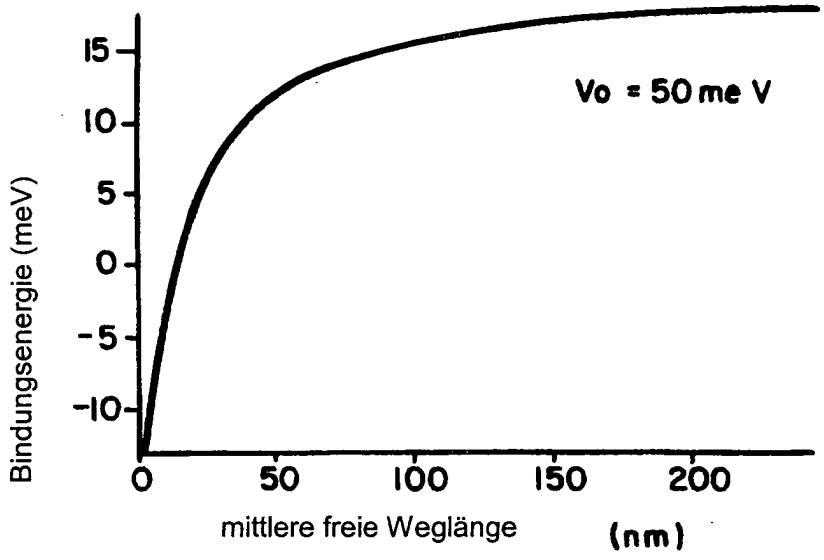

15
10
5
0
-5
-10
Bindungsenergie (meV)
Vo = 50 me V
0
50
100
150
200
mittlere freie Weglänge
(nm)

FIG. 24

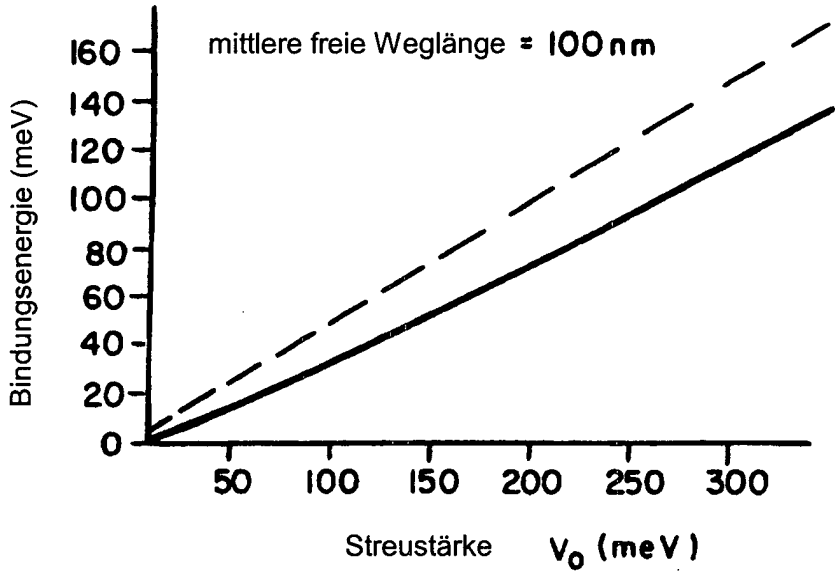


FIG. 25A

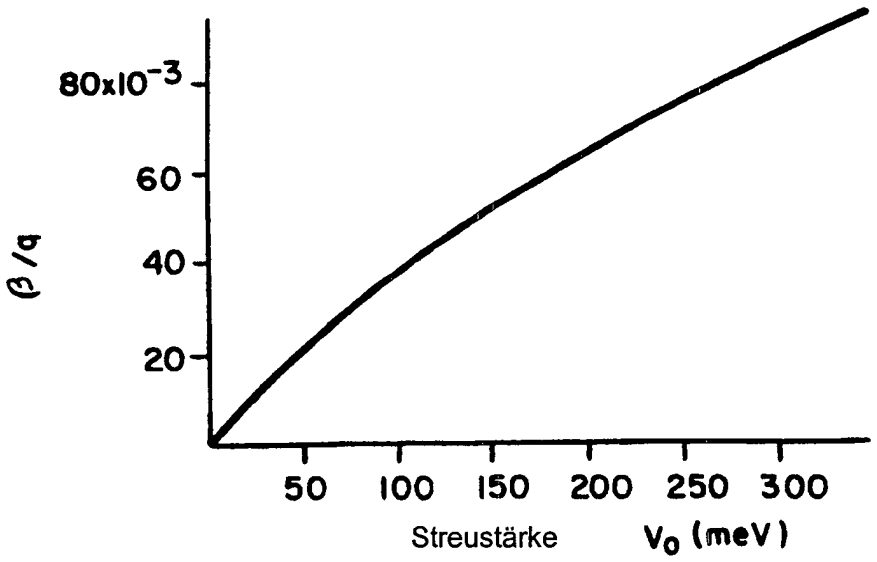


FIG. 25B

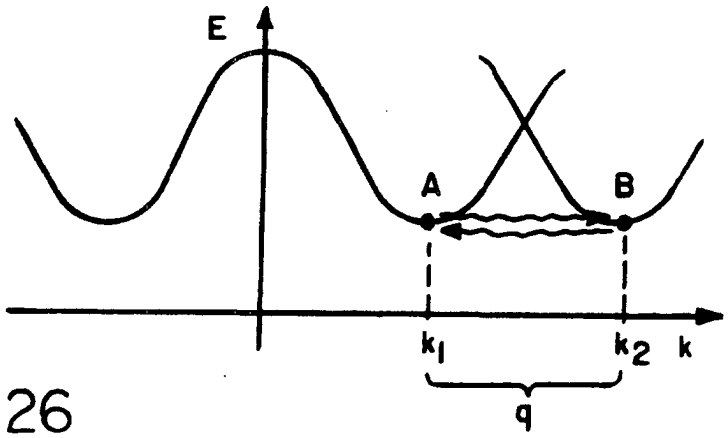


FIG. 26

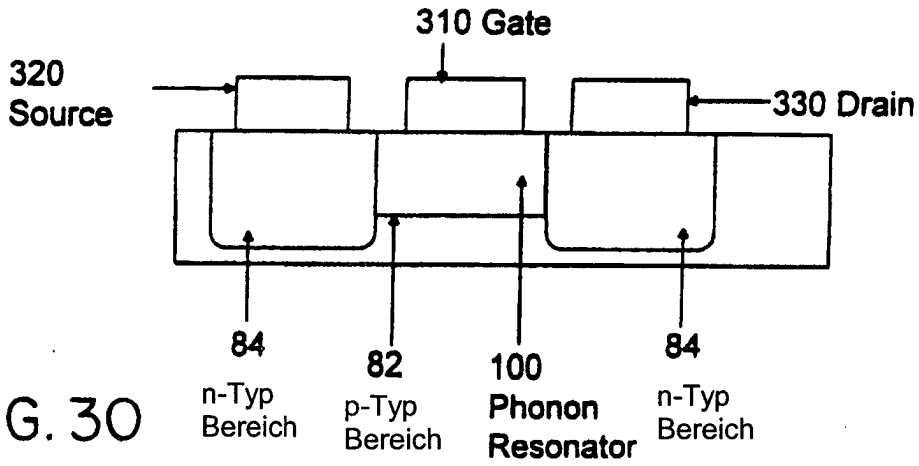


FIG. 30

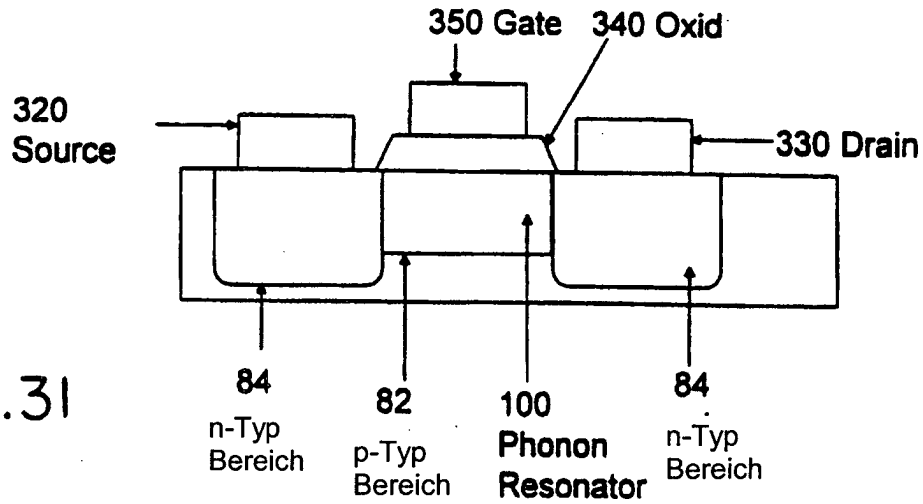


FIG. 31

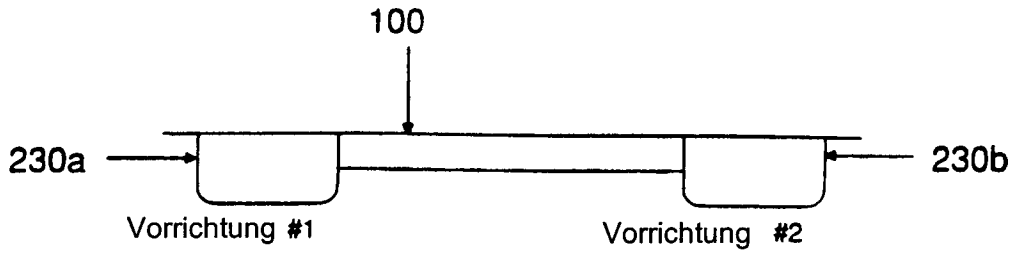


FIG. 27

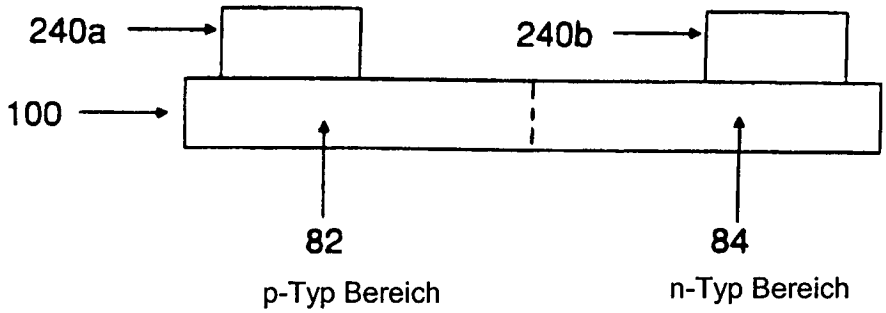


FIG. 28

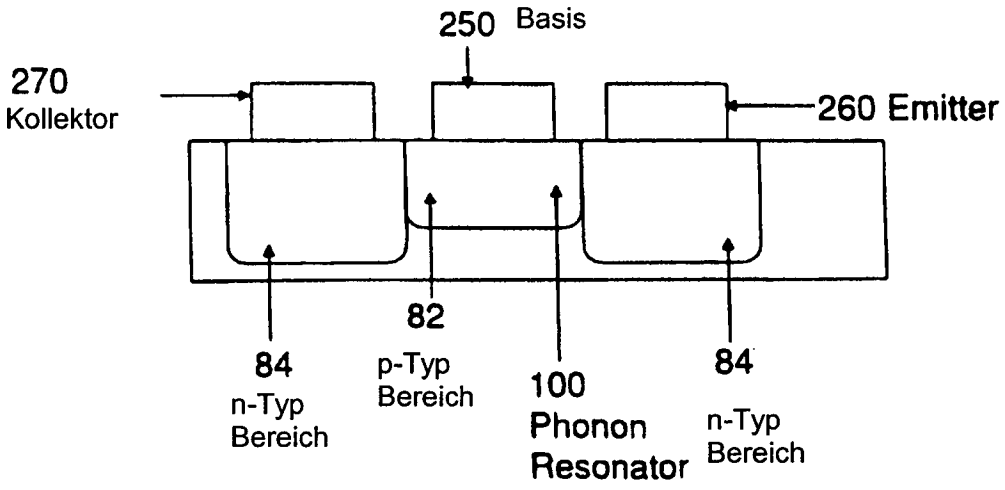


FIG. 29

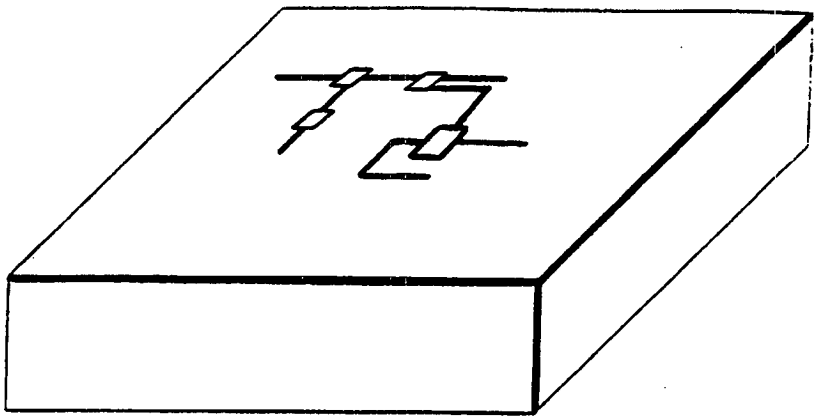


FIG. 32

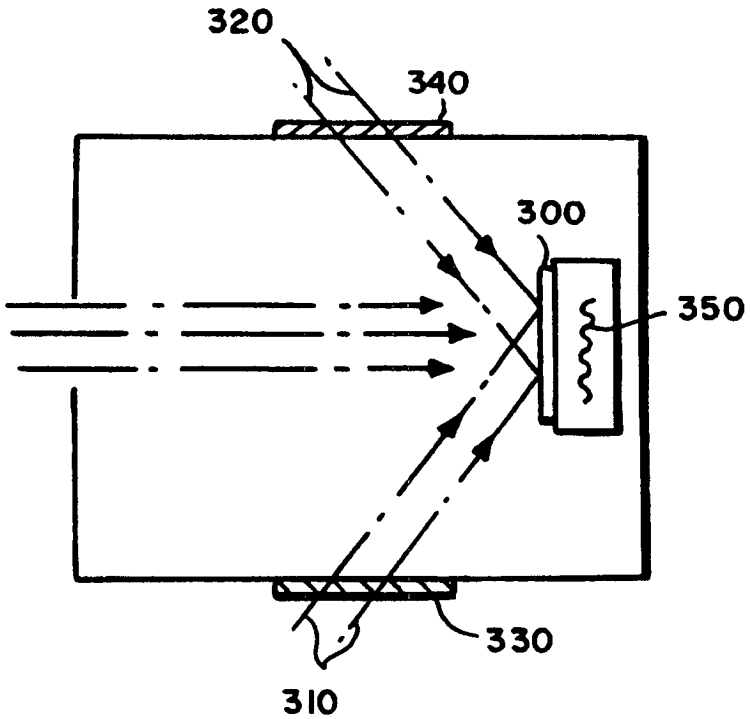


FIG. 33