(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3974654号
(P3974654)
(45)発行日　平成19年9月12日(2007.9.12)　(24)登録日　平成19年6月22日(2007.6.22)

(51)Int.Cl.		F I		
H01L 33/00	(2006.01)	H01L	33/00	A
H01L 29/66	(2006.01)	H01L	29/66	
H01L 29/861	(2006.01)	H01L	29/91	C
H01L 29/80	(2006.01)	H01L	29/80	
H01L 29/78	(2006.01)	H01L	29/78	301J

請求項の数 21　(全 23 頁)　最終頁に続く

(21)出願番号　特願平8-525137
(86)(22)出願日　平成8年2月14日(1996.2.14)
(65)公表番号　特表平11-500580
(43)公表日　平成11年1月12日(1999.1.12)
(86)国際出願番号　PCT/US1996/002052
(87)国際公開番号　WO1996/025767
(87)国際公開日　平成8年8月22日(1996.8.22)
審査請求日　平成15年2月13日(2003.2.13)
(31)優先権主張番号　08/393,380
(32)優先日　平成7年2月17日(1995.2.17)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者
ペインター，ビー．エイ．，ザ　サード
アメリカ合衆国　２４１７５　バージニア，トラウトビル，ピーオーボックス　４７７，リー　ハイウェイ　ノース
(74)代理人
弁理士　倉内　基弘
(74)代理人
弁理士　風間　弘志
(72)発明者　ブラウン，トマス　ジー．
アメリカ合衆国　１４６２３　ニューヨーク，ロチェスター，ドンカスター　ロード　２０５

審査官　松崎　義邦

最終頁に続く

(54)【発明の名称】フォノン共振装置及びその製造方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
間接バンドギャップ材料より製作され、第１密度の第１帯域を少なくとも１つ、及び第２密度の第２帯域を少なくとも１つを含む実質的に周期的に変動する密度を有する構造体であって、該第１及び第２帯域は互いに近接し且つ交互に配置されることにより該構造体は実質的に周期的に変動する密度を有し、該構造体の前記密度の変動の周期は、該構造体が適当な運動量のフォノンに対して実質的に共鳴して電子－フォノン相互作用に参加するように選択されている構造体。
【請求項２】
前記周期は、前記構造体がほぼ共鳴してフォノンにより補助された予め定められた電子遷移を行うように選択されている請求項１の構造体。
【請求項３】
前記所定の電子遷移は伝導バンドの谷の間の電子散乱の遷移である請求項２の構造体。
【請求項４】
少なくとも１種のドーパントを含有している請求項１～３のいずれかの構造体。
【請求項５】
前記構造体の密度が一次元方向にのみ周期的に変動するように、前記第１帯域が第１層を含み、前記第２帯域が第２層を含む請求項１～３のいずれかの構造体。
【請求項６】
前記構造体の密度が多次元方向に周期的に変動する請求項１～３のいずれかの構造体。

【請求項７】
前記少なくとも１つの第１層が、第１元素の第１同位体で富化された層を少なくとも１つ含み、前記少なくとも１つの第２層が、第２元素の第２同位体で富化された層を少なくとも１つ含む請求項１～３のいずれかの構造体。
【請求項８】
前記第１元素と前記第２元素とが同一であり、前記第１同位体と前記第２同位体とがその元素の異なる同位体である請求項７の構造体。
【請求項９】
前記両元素がシリコンである請求項７の構造体。
【請求項１０】
前記第１同位体はSi^{30}であり、前記第２同位体はSi^{28}である請求項７の構造体。
【請求項１１】
前記第１同位体はSi^{30}であり、前記第２同位体はSi^{29}である請求項７の構造体。
【請求項１２】
請求項１～１１のいずれかの構造体、前記構造体の第１側に配置された第１電極、及び前記構造体の第２側に配置された第２電極を含み、前記第２側は該第１側の反対側にある発光デバイス。
【請求項１３】
ｐ－ドープ領域、該ｐ－ドープ領域とｐ－ｎ接合を形成するｎ－ドープ領域、ｐ－ｎ接合部に配置された請求項１～１１のいずれかの構造体、該ｐ－ドープ領域と接触する第１電極、及び該ｎ－ドープ領域と接触する第２電極を含む光学検出デバイスであって、前記第１電極を通して該構造体内に入射した放射が前記ｐ－ドープ領域を通して前記構造体に吸収され、それにより前記構造体中に電子－ホール対を形成し、前記両電極間に光電流を生じるように構成されている光検出デバイス。
【請求項１４】
少なくとも１つのｐ－ドープ領域と少なくとも１つのｎ－ドープ領域とを備えた請求項１～１１のいずれかの構造体、前記少なくとも１つのｎ－ドープ領域にオーミック接触した少なくとも１つの第１電極、及び前記少なくとも１つのｐ－ドープ領域にオーミック接触した少なくとも１つの第２電極を含んでいる光検出器。
【請求項１５】
微少ドープ型の請求項１～１１のいずれかの構造体、及び前記構造体にショットキー接触した少なくとも２つの電極を含む光検出器。
【請求項１６】
第１の電子デバイスと第２電子デバイスを接続するために使用される請求項１～１１のいずれかの構造体よりなる低抵抗接続導体デバイス。
【請求項１７】
交流トランスを形成する少なくとも２つの導電路を有し、前記同電路の少なくとも一方は請求項１～１１のいずれかの構造体よりなっているトランス。
【請求項１８】
請求項１～１１のいずれかの構造体、前記構造体の第１側に配置された第１電極、及び前記構造体の第２側に配置された第２電極を含み、前記第２側は該第１側の反対側にあるダイオード。
【請求項１９】
第１及び第２のｎ－ドープ領域、及び前記第１及び第２のｎ－ドープ領域の間に配置されたｐ－ドープ領域を含み、前記ｐ－ドープ領域は請求項１～１１のいずれかの構造体より構成されているバイポーラトランジスタ。
【請求項２０】
第１及び第２のｎ－ドープ領域、及び前記第１及び第２のｎ－ドープ領域の間に配置されたｐ－ドープ領域を含み、前記ｐ－ドープ領域は請求項１～１１のいずれかの構造体より構成されている電界効果トランジスタ。

【請求項２１】
前記フォノン－電子相互作用は光学遷移を助けるものである請求項１の構造体。
【発明の詳細な説明】
半導体材料は電子革命の礎石であり、ケイ素はその純度と、製造容易性と、高収率のために、集積回路技術で利用される支配的な素材となっている。より高速でより効果的なデバイスに対する絶えざる要求のため、増大する並列処理及び高いデータ速度に関連した相互結合要求を満足できる新規で低価格のデバイスが要求される。さらに、デバイス寸法及び密度が減少するために、改善された熱放散及び／又は電気伝導特性を有する材料を見いだす集中的な努力がなされている。
超電導体材料は確立されて半導体技術とあいまって、今日の半導体材料に関連して経験される熱放散の問題に対する解決手段として提案されている。具体的に述べると、超電導ワイヤ及び接合部を使用して集積回路の熱放散を減じることが示唆されて居る。残念ながら、極く最近に発見されたいわゆる高温超伝導体は非常に低温でなければ動作しない。さらに、現在使用できる超電導及び半導体技術の経済的及び技術的な困難のためにその実施は不可能でないにしても困難である。
光学通信システムは相互結合に対する可能な解決手段を提示するが、能率的な光源を在来のケイ素回路に集積することに関連した困難により開発努力が妨げられている。ケイ素自体は他の周期率表中の同じ族（第ＩＶ族）の他の元素と同様に、その中心対称結晶構造と、効率的な間接バンド－バンド間放射遷移を介した光子放出を禁止する間接バンドギャップとのために、限られた光学特性しか有しない（以下で説明）。
改善された光学特性を有する半導体材料を開発するために、間接バンドギャップ半導体におけるバンド－バンド間放射遷移を禁止する選択率を回避するために多くの努力がなされている。一つの方法は、適当な不純物をＩＶ族の格子に導入することであった（Ｉｒｅｒ他、Ｓｃｉｅｎｃｅ260:40-46、1993）。励起子（エクシトン。電子－ホール対）の不純物への強力な結合は、もしも充分な量の不純物が導入されるならば、能率的な放射遷移が生じる。これらの努力のうちで最も成功したものは等電子複合体（isoeleotronic complex）と稀土類元素ドープ剤（Dopant）であるエルビウムである。しかしエルビウムは他の不純物複合体と同様に、光利得を与えるに充分な濃度で導入することが困難である。
また、規則配列合金と超格子を成長させるための努力がなされており、これらはブリリュアン帯を折りたたんで準直接ギャップ型材料を得るバンドギャップ技術を使用する着想に基づいている（Presting et al, Semicond.Sci.Technol.7-1127-1148）。これらのうちで最も知られたものはケイ素－ゲルマニウムであり、最近は炭素－ケイ素－ゲルマニウム－スズ四元合金に若干の興味が示されている。これらの材料は直接バンドギャップ材料に見いだされる放出効率を示していない。
光放出の広く研究されている（充分に理解されてはいないが）機構は、電気化学エッチングプロセスを行ったケイ素中で生じる（Tayler et al,.上掲）。エッチングは不動化により効率的なフォトルミネッセンス（発光）を示すナノメータ寸法の粒子を有する多孔質構造を生成する。エッチングしたケイ素はまたエレクトロルミネッセンス励起され、そのためディスプレイの分野で興味を引いている。
さらに、ＬＥＤは炭化ケイ素を使用して製造された。しかし、間接バンドギャップ材料を使用した光学増幅器（例えばレーザ）を製造することはできていない。
従って、改善された光学的、電子的、及び／又は熱放散特性を有する材料を開発する必要がある。特に改良された半導体を提供する必要がある。好ましくは、改良された材料は現在の電子材料（例えばケイ素）と調和する必要がある。
発明の概要
本発明は、改善された光学的、電子的、及び／又は熱放散特性が、ある種の電子－フォノン（音子）相互作用が材料中で抑制され又は増強されたために、修正を受けた改良された材料を提供する。具体的に述べると、本発明は所望の波数を有するフォノンに対する共振器として作用する間接バンドギャップ材料を提供する。本発明のある実施例では、フォノン共振器は、公知の間接バンドギャップ材料に対比して、増強された光子放出又は吸収を

示す。他の実施例では、フォノン共振器は向上した電気特性例えば電気伝導を有する。本発明のフォノン共振器はまた向上した熱伝導特性を有し、熱伝達を向上するために電子デバイスに組み込むことができる。本発明はまた、フォノン共振器である同位体超格子を提供する。

本発明のフォノン共振器は例えばＬＥＤやレーザ等の種々の光学装置に組み込むことができる。本発明のフォノン共振器は例えば光通信、データ蓄積、印刷、紫外線放射、赤外レーザ等に利用することができる。本発明のフォノン共振器の他の実施例は、高い電気伝導を有し、例えば超電導等の電気的な用途に使用することができる。

本発明はまたフォノン共振器である同位体超格子を製造するのに使用することができる。

ある実施例では、本発明のフォノン共振器は実質的に周期的に変化する密度を有し、その構造は第１密度の第１帯域を少なくとも１つと、第２密度の第２帯域を少なくとも１つ有し、これら第１及び第２帯域は互いに近接且つ交互に配列しており、そのためにこの構造体は実質的に周期的に変動する密度を有する。構造体のこの周期は、構造体が適当な波数ベクトルのフォノンに対して充分に共振して電子－フォノン相互作用に参加するように定められる（例えば、放出電子遷移に参加する適当な波数ベクトルのフォノン、導電バンド電子のバンド間及び／又は谷間散乱に参加する適当な波数ベクトルのフォノン）。

他の実施例では、本発明のフォノン共振器は、縮退導電バンド谷と材料組成のほぼ周期的な変動を有することにより、構造体内の電子の縮退導電バンド谷間の散乱が、周期的変化がほぼ存在しない構造体内の谷間電子散乱に対比して高くなるような構造を有する。

ある実施例では、構造体の材料組成又は密度が二次元以上で周期的に変動するものであり、他の実施例では各領域は構造体の密度又は組成がわずかに一次元で周期的に変動するような層を有する。

本発明の好ましい実施例では、フォノン共振器は、各層がある元素の１つの同位体で富化された同位体超格子を含む多層構造物である。最も好ましくは、層は同一元素（好ましくはケイ素）の異種の同位体に対して富化されている。ある好ましいケイ素同位体超格子の実施例では、超格子は５原子層の整数倍である周期を有し、また他の好ましい例では、周期は１０原子層の整数倍の周期を有する。

本発明のフォノン共振器は、ある実施例ではまた誘導フォノン放出により（指向性又はコヒーレント）フォノンに対して共振するので、この共振器は加速された熱伝達を行う。ある実施例ではフォノン共振器は確率的なフォノン共振を行う。

本発明はまた、フォノン共振器を備えた各種の装置を提供する。本発明は特に、フォノン共振器と、構造体の片側に設けた第１電極と、構造体の他側に設けた第２電極とを含む光放出デバイスを提供する。少なくとも一方の電極は所望により透明とする。本発明の光放出デバイスはｐ－ドープ領域及びｎ－ドープ領域を有し、光放出ダイオード（ＬＥＤ）として使用できる。ｐ－ドープ領域及びｎ－ドープ領域は、フォノン共振器よりも高いバンドギャップ有することができ、その結果電子及びホールはフォノン共振器内に拘束される。本発明の発光デバイスは好ましくは誘電体導波管を有し、最も好ましくは各々が構造体よりも高い屈折率を有するｐ－ドープ領域及びｎ－ドープ領域により構成される誘電体導波管を含む。ある実施例では、発光装置はレーザである（たとえば、開裂（ｃｌｅａｖｅｄ）面反射、分布型フィードバック、及び／または垂直空洞表面放出）。

本発明はまた、光放出装置、光放出ダイオード、レーザダイオード、開裂面反射レーザ、分布型フィードバックレーザ、垂直表面放出レーザ、光検出器、光変調器、非直線光学デバイス、電気導体、平面型トランス、ダイオード、電界効果トランジスタ、集積回路、ＳＱＵＩＤ、ジョセフソン接合、トランジスタ、及びマイクロ波検出器に使用でき、これらはフォノンがフォノン－電子相互作用に参加する適当な波数ベクトルのフォノンに対して充分に共鳴するフォノン共振器を有するため、従来の装置よりも優れた装置である。

本発明はまた、構造体中で、第１密度を有する少なくとも１つの第１領域（または層）と、第２密度を有する少なくとも１つの第２領域（または層）とが、近接且つ交互に配列され、その結果構造体が実質的に周期的に変動する密度を有し、且つ構造体のこの周期が、電気－フォノン相互作用に参加する適当な波数ベクトルのフォノンに共鳴するように選択

されているような構造体を製造する工程を含む、共振器を製造する方法を提供する。好ましい実施例では、本発明の方法は、同位体を分離し次いで超格子の組み立てることよりなる、同位体超格子の製造法を含む。本発明によると、同位体分離は好ましくは蒸留、抽出、遠心分離、拡散、電気化学的方法、及び電気磁気的方法の何れかで行うことができる。同位体超格子の組み立ては好ましくは化学蒸着、分子ビームエピタキシー及び化学ビームエピタキシー法により行うことができる。ある実施例では、分離及び組立工程は別個または同時に行われる。好ましい実施例では、本発明の同位体超格子はレーザで補助した化学蒸着により行われる。

【図面の簡単な説明】

図１は固体のエネルギーバンドの該略図である。

図２は直接バンド材料に対するエネルギーと運動量の関係を示すグラフである。

図３は間接バンド材料に対するエネルギーと運動量の関係を示すグラフである。

図４Ａは３つの電子相互作用の内の一つを示し、２つのみのエネルギー状態の一つを占めることができる電子による光子の吸収を例示する。

図４Ｂは２つのみのエネルギー状態の一つを占める電子の自然放出を例示する。

図４Ｃは２つのみのエネルギー状態の一つを占める電子の誘導放出を例示する。

図５は結晶性固体の原子配列を示す概念図である。

図６Ａはフォノンにより補助された直接バンドギャップに材料の放射遷移を表し、光子放出を誘導する電子－フォノン相互作用の結果としてのフォノンの自然放出を例示する。

図６Ｂは誘導フォノン吸収を例示する。

図６Ｃは誘導フォノン放出を例示する。

図７は分布型フィードバックレーザの該略図である。

図８はケイ素に対するエネルギーと運動量の関係を示す。

図９は本発明のケイ素同位体超格子の一部の概念図である。

図１０は本発明のフォノン共鳴器を利用した光放出装置を例示する。

図１１Ａは本発明の実施例を示す。

図１１Ｂは本発明の他の実施例を示す。

図１１Ｃは本発明のさらに他の実施例を示す。

図１１Ｄは本発明のさらに別の実施例を示す。

図１２は本発明の光放出ダイオード（ＬＥＤ）を示す。

図１３はヘテロ接合によりキャリア拘束が達成される本発明のＬＥＤを示す。

図１４は本発明のエッジ放出ＬＥＤを示す。

図１５Ａは本発明のへき開面反射レーザダイオードの実施例を示す。

図１５Ｂは本発明の分布型フィードバックレーザダイオードの実施例を示す。

図１６は本発明の垂直空洞面放出レーザ（ＶＥＣＳＥＬ）を示す。

図１７及び１８は本発明のフォノン共振器を有する光学光検出器の２つの実施例を示す。

図１９は半導体材料中の導電バンド電子によるフォノンの吸収と放出を示す。

図２０は半導体材料内の伝導バンド電子によるコヒーレント吸収及び放出を示す。

図２１は２つの導電バンド電子間のフォノンにより仲介される交換作用を例示する。

図２２は異なった縮退導電バンド最低部の電子の間のフォノンが仲介する相互作用を例示する。

図２３は超格子周期で測定した、電子対分離に対する基準化電子対ポテンシャルの関係を示す。計算した平均自由光路は５超格子周期である。

図２４は電子の平均自由光路が減少するにつれて電子対結合エネルギーの減少が生じることを示すグラフである。

図２５は一定の平均自由光路に対する散乱ポテンシャルの関数としての電子対結合エネルギーを示す。

図２６は近接ブリリュアンゾーンの導電バンド最小位置の電子の谷間散乱を示す。

図２７は本発明の低抵抗電気導体を示す。

図２８は本発明の電気ダイオードを示す。

図２９は本発明本発明のバポーラトランジスタを示す。
図３０は本発明のｎ型接合電界効果トランジスタ（ＪＦＥＴ）を示す。
図３１は本発明の金属酸化物半導体電界効果トランジスタ（ＭＯＳＦＥＴ）を示す。
図３２は本発明の集積回路を示す。
図３３は本発明によるレーザ補助式化学蒸着方法を示す。
フォノン共振器
本発明はフォノン共振器に関するものであり、特に本発明は間接バンドギャップ材料製のフォノン共振器を提供する。このフォノン共振器は特定の電子、光学、及び／または熱伝達特性を向上させる。
フォノンは量子力学の原理に従って許容される振動エネルギーの最低単位と考えることができる。フォノン共振器は量子力学的振動波束として挙動するこれらの振動の励起のための共振器として機能する装置である。光学共振器とのアナロジーから、振動共振器は振動エネルギーのコヒーレントな閉じ込めまたはフィードバックを必要とする。
電磁共振器（電磁波に対して共鳴する構造体）を、材料インピーダンスの周期的変動を有する構造体から構成することができる。同様に、振動共振器は材料密度の周期的変動を有する構造とすることができる。なぜなら、材料密度は振動波のインピーダンスを決定するからである。
本発明の１つの実施の形態は、本発明の１形態によれば、振動共振器は特定のフォノン－電子相互作用で共鳴するように構成でき、それにより共振器がかかる相互作用に必要なフォノンを増強することができる。フォノン共振器は従来公知であるが（たとえばクライン IEEE Ｊ．of Quant.Elec.QE-22:1760-1779、1986）、本発明はフォノン－電子相互作用の共鳴増強を行うフォノン共振器を初めて提案したものであり、これにより、共振器を構成する材料における光学的、電子的、及び／または熱伝達的な特性を向上するものである。さらに、本発明はフォノンの平均自由行路よりも短い結合長を有するフォノン共振器を初めて提供したものである。
光学特性の向上
本発明は向上した光学特性を有する間接バンドギャップ材料を包含する。本発明の他の実施の形態及び利益を理解し易いように、以下間接バンドギャップ材料の特性の検討から始める。
間接バンドギャップ材料中の電子とホールの能率的な再結合が欠けているために、その光学分野での有用性には限界がある。簡単に述べると、光学デバイスは光学遷移を必要とするが、間接バンドギャップ材料では光学遷移の効率が低い。この問題は特に光子（フォトン）の誘導放出が必要な光学増幅器（レーザ）を使用する光学デバイスに対して大きい。
図４は半導体材料中で起き得る３種の可能な光子－電子相互作用を示す。すなわち、吸収（図４Ａ）と、自然放出（図４Ｂ）と、誘導放出（図４Ｃ）である。誘導による光子の放出では、高エネルギー状態E_2と低エネルギー状態E_1の差に相当するエネルギーを有する入射光子６１は、高エネルギー状態にある電子４０を刺激して、そのエネルギーを第１光子と同一のエネルギーと位相とを有する第２光子６３の形で放出させる。
光学増幅器の有効性は$e^{(gz)}$に比例する光利得に関係する。ここにｚは入力信号が伝播する距離であり、ｇは単位長さあたりの利得であり、ｇは$R_{stim}-R_{abs}$に比例する。但しR_{stim}は光子が誘導放出により放出される割合であり、速度であり、R_{abs}は光子が吸収される割合である。このように、高光利得は吸収を超える誘導光子放出を必要とする。
半導体レーザにおいては、電子－ホール対の形成（たとえば電子を導電バンド（帯）に励起し、それにより価電バンド（帯）にホールを形成する）により反転密度（population）が生成される。直接バンドギャップ材料に対しては、励起電子とホールの増大は増大した誘導光子放出を生じる。しかし、間接バンドギャップ材料では、励起電子は簡単にホールと再結合することができないので、増大したエクシトン密度（たとえば増大した電子－ホール密度）が増大した誘導放出を導く程度は制限される。さらに、より多くの電子が伝導バンドに励起されるにつれて、いわゆる自由キャリアー吸収が増大し、その結果増大した数の光子が導電バンドの電子により吸収される。従って、反転密度が生じても、誘導放出

は間接バンドギャップ材料では吸収を越えない。
上に見たように、自然及び誘導放射遷移は間接バンドギャップ材料では効果的に禁止されている。なぜなら、間接ギャップ材料の導電バンドの底近くにある電子は、運動量保存則のために価電バンドにあるホールと再結合できないからである。この問題は、もしも放射遷移を可能にするだけの運動量が結晶格子振動またはフォノンから供給されるならば解決できる。
図５を参照すると、結晶格子中の原子は定性的にバネ７５で結合された球としてモデル化できる。このアナロジーに従うと、フォノンは結晶中を波として伝播する、これらの球の量子化された振動に対応する。フォノンと導電バンドの電子の相互作用は「間接」すなわち「フォノン補助（またはフォノンで補助された）」電子の価電バンドへの遷移と光子の放出を可能にするに必要な運動量を供給する。
図６は間接バンドギャップ材料のフォノン補助放射遷移の他の機構を説明する。図６の参照番号は図４と同様である。図６の８１は入射フォノンを表し、８３は放出されたフォノンを表す。図６Ａフォノン８３の自然放出を含むフォノン補助放射遷移の機構を表す。図６Ｂは誘導フォノン吸収の機構を示す。図６Ｃは誘導フォノン放出を含む機構を示す。上に説明したように、運動量とエネルギーの両者が放射遷移において保存されなければならない。図６に示したフォノン補助放射遷移の各型において、フォノンは運動量の必要な変化（$k_2 - k_1$）を提供し、その結果運動量は導電バンド底の電子と価電バンドのホールの再結合の間、保存される。その結果、バンドギャップにほぼ等しいエネルギーを有する光子が放出される。特に、放出された光子はバンドギャップ＋フォノンエネルギーΘ（フォノン放出を伴う場合）、またはバンドギャップ－フォノンエネルギーΘ（フォノン吸収を伴う場合）のエネルギーE_pを有する。すなわち

$$E_p = E_q \pm \Theta$$

である。この場合、特定の運動量（$k_2 - k_1$）を有するフォノンのみが放射遷移を助けることに注意されたい。
残念なことに、フォノン補助放射遷移は通常の半導体構造ではまれである。さらに、間接バンドギャップ材料中の電子は価電バンドのホールと再結合する前に結晶中の欠陥や不純物と結合しがちである。かかる電子トラップ再結合は放射が関係せず、光子の代わりに熱を発生する。これらの問題のため研究者は間接バンドギャップ材料を光学装置に組み込むことができなかった。
光子－電子相互作用を間接バンドギャップ材料で高める方法の一つは、利用可能なフォノンの数を増大することである。本発明の背景には、フォノン共振器が、間接光学遷移を生成するに必要な運動量の振動エネルギー（すなわちフォノン密度）が増大するように周期的に変化する密度を有する構造を作ることにより提供できる、との着想がある。高振動数においてもフォノンは媒体中の物質（すなわち原子）振動波であり、フォノンが伝播する媒質の質量密度の変化は、所望の運動量とエネルギーのフォノンの密度を増大するために使用でき、一方では他の運動量とエネルギーは減衰する。フォノン共振器の概念は新規ではないが（（たとえばクラインIEEE J. of Quant.Elec.QE-22:1760-1779、1986）、フォノン共振器が適当な波数ベクトルのフォノンに対する共鳴によりフォノン－電子相互作用に関与するように設計できるあるいは設計すべきであることは従来認識されていなかった。
本発明のフォノン共振器を製作する際に、フォノンの吸収を伴う放射再結合は、構造体中のフォノン密度の同一材料中の不整構造（周期的な密度を持たないこと）中のフォノン密度に対する比率に比例して高くなる。フォノン共振器は、もしもそれが図６に示した再結合の任意のもの（フォノンの自然放出、誘導フォノン吸収、及び／または誘導フォノン放出）に参加するように適当な運動量に対して共鳴性を有するならば、間接光学遷移の高度の確率が達成できる。
従来から知られているように、自然放出の確率は共振器内で局所的に修正を受ける。典型的には、共振器中のある場所は自然放出の非常に高い確率を有する一方、他の場所は比較的低い確率しか持たない。従って、フォノン共振器を使用することにより、本発明は自然

フォノン放出が増大した材料を提供することになる。共振器はまたそのエネルギー及び運動量が自然放出されるフォノンを引きつけることに影響する。

共振器におけるフォノン生成が高い確率ならば、誘導フォノン吸収、及び誘導フォノン放出はいずれも多くなり得る。ある場合には、誘導フォノン放出により自身を維持する共振器は非平衡フォノン密度を支持することができる。これは同一構造体に対するフォノンは生成速度が散乱損失に等しい場合に達成される。

上記のように、フォノン補助放射遷移で放出される光子のエネルギーは、光子がフォノン吸収により生成される場合には$E_p = E_q + \Theta$であり、フォノン放出により生成される場合には$E_p = E_q - \Theta$である。従ってフォノン吸収ーを伴う機構により生成される光子はバンドギャップよりも大きいエネルギーを有する。このような光子は構造体により容易に吸収される。一方、フォノン放出が関係した機構により生成される光子はバンドギャップよりも小さいエネルギーを有するので、構造体により容易に吸収できない。従って、光利得は、光子放出がフォノン吸収ではなくてフォノン放出を含むプロセスにより生じるような共振器において容易に達成できる。フォノン放出を伴う再結合現象に対しては、フォノン共振器中での放射遷移の増大は、共振器の振動モードあたりのフォノンの数に等しい。

本発明の好ましい態様によれば、比較的高い質量密度を有する層と比較的低い質量密度を有する層が交互になっている構造を作製できる。この層状構造は１／２波長の整数倍が格子周期に一致するような波長を有するフォノンに共振し、他の波長を有するフォノンは共振反射することなく構造内を伝搬する。強い共振の１つの結果として、構造の中心で貯蓄エネルギー（すなわちフォノン密度）が増加する。本発明の層構造の周期Λ_Lは、間接的遷移に参加するのに必要な運動量を有するフォノンに対する共振ブラッグ反射が提供されるように、選択される。

本発明の層構造は、分布型フィードバックレーザーの相同体と考えることができる。図７に示すように、分布型フィードバックレーザーは、第一と第二の屈折率を有する第一の材料７３及び第二の材料７７の層を交互に含む。光がこの層媒体の中を（例えば図７で左から右に）伝搬するにつれ、各界面（図７のi_1・・・・i_n）において、小さな反射が起こる。反射波の位相が同じであれば、この反射は他の反射を強化するので、正味の反射の合計が高くなり共振（例えばブラッグ共振）が起こる。又、光が材料を伝搬することによって、材料を伝搬し層界面で反射することができるフォノンの放射を誘導する。上で述べたように、誘導された放射が材料の吸収を上回ると、「レーザー光」が発せられる。励起エネルギー状態に電子が連続的に供給される限り、分布型フィードバックレーザはレーザー光を発し続ける。

材料を伝搬するのが、光子の代わりに、望ましい運動量を有するフォノンであるということを除いては、本発明の層構造は分布型フィードバックレーザーと同様に作動する。フォノンが構造中を通過していく間に殆ど散乱しないほど十分にフォノンの平均自由行路が長い場合のみ、層構造は効率的な共振器として機能する。入射フォノンと反射フォノンの間のカップリング係数κpが、フォノンの散乱長の逆数αpより大きい場合、フォノンの平均自由行路は十分に長いものとなる。すなわち、下記式が成立しなければならない。

$\alpha_p << \kappa_p$　（π / λ_p）（$\Delta M / M$）

（λpはフォノン波長、ΔMは原子質量の変調、Mは平均原子質量）この関係式が成り立たなければ、ブラッグ反射が起こる前にフォノンは散乱する。

本発明の層構造は、例えば薄い同位元素を富化した層を交互に配置することによって、すなわち「同位体超格子」を作製することによって、結晶質固体の形で実現できる。ここでいう「同位元素を富化した」層とは、天然に見つかる同位体の濃度より大きい同位体濃度を有する層をいう。例えば、自然に起こる形態では、ケイ素は主として以下の組成の三つの同位体からなる。９２．２％Si^{28}、４．７％Si^{29}、３．１％Si^{30}。本発明によれば、同位体を富化したSi^{28}の層は、同位体Si^{28}をその層の原子の９２．２％以上の濃度で含んでいる層である。同様に、同位体を富化したSi^{29}の層及びSi^{30}の層は、同位体原子濃度がそれぞれ４．７％及び３．１％を越える層である。

同位体超格子はこの分野で知られている（例えば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, '93参照）。同位体超格子を、電子－フォノン相互作用に参加するように適当な波数ベクトルのフォノンに対して充分に共振するフォノン共振器に加工できるということは従来わからなかった。一般に、本発明の同位体超格子において、構造内の質量濃度の違いが大きいほど、共振は良い。薄いSi^{28}の層及びSi^{29}の層を交互に並べた構造を有する同位体超格子は、３％を少し越える質量濃度の変調を達成する。Si^{28}の層及びSi^{30}の層を交互に並べた構造を有する同位体格子は、６％を越える質量濃度の変調を達成する。

上記したように、本発明の層構造は１／２波長の整数ｍ倍が格子周期に一致したとき、すなわち$\Lambda_L = m(\lambda_p/2)$の時、共振する。結晶性ケイ素は図８に示すように間接バンドギャップを示す。ここでは伝導バンド最小値が（１００）方向に沿って６倍に縮重されており、ゼロエッジから約８／１０の距離にある。従って、本発明のケイ素同位体超格子の周期ΛＬは、波数$2\pi/\lambda_p = 0.8\pi/a$（ａは格子定数）のブラッグ－共振フォノンから選ばれる。ケイ素の場合、ａは４原子層である。従って、本発明のケイ素同位体超格子の周期は以下の関係式を満たす。

Λ_L＝５ｍ原子層

従って、例えば$Si^{28}{}_n Si^{30}{}_5{}_{m-n}$（ｎ≠０）の超格子は、間接遷移に参加することのできるフォノンに対する共振器が得られる。最も低いブラッグ反射を提供するｍ＝１の場合は、約１．２５格子定数の周期になり、又、ケイ素の場合には、５原子層になる。５原子層の整数倍の周期を有するケイ素同位体超格子は全て、高順位の散乱を用いてブラッグ共振条件を満たす。図９は本発明のケイ素同位体超格子の部分の概略図を示す。本発明の同位体超格子に関連してフォノン密度を増加することで、励起子の安定性を増加させることができる。富化していない材料内では、自由電子の数と励起子のホールに結合した電子の数との間には一定の関係がある（励起子密度）。自由電子にはおよそ１マイクロセカンドかそれより短い寿命（電子がトラップに放射を生じないで再結合するのに要する時間）があり、一方励起電子には１マイクロセカンドよりずっと長い放射寿命がある。本発明によって放射遷移率が増加すれば、励起子放射寿命は減じる。従って、自由電子として存在する伝導電子の数が少ないほど、励起子の形成に用いることのできる電子が多くなる。

励起子放射寿命が減じた場合、ケイ素などの間接バンドギャップ材料内で室温励起子相互作用が起きる。ケイ素などの材料内の自由励起子結合エネルギーは１４．７ｍｅＶであり、これはGaAs等の直接ギャップ材料に見られるエネルギーよりかなり大きい。このような事実にも関わらず、励起子は室温でケイ素内に存在しない。この主な理由は、ケイ素内では、放射遷移の速度は非放射バンド－バンド再結合過程の速度よりずっと遅いことにある。従って、本発明のフォノン共振器により提供されるように、放射遷移の増加により、より高い温度においても安定した励起子が得られる。この安定した励起子相互作用により間接バンドギャップ材料などにおける光の放出、吸収、変調及び非線形光学特性の基礎が得られる。例えば、励起子の光子吸収を、電界の存在下に変えることができる（シュタルク効果）。従って、本発明によれば、シュタルク効果に基づく光学変調を間接バンドギャップ材料に設けることができる。

以下の実施例に本発明のフォノン共振器を組み合わせた様々な光学装置について述べる。

実施例１：発光装置

本発明のフォノン共振器を図１０に示すように発光装置に組み込むことができる。図１０では、フォノン共振器１００は電極１１０及び１２０の間に位置している。電極１１０及び１２０は半導体材料又は導体材料を包含しても良い。これらの電極１１０及び１２０は、キャリヤー（すなわち電子又はホール）をこの領域に注入及び／又は閉じ込めるすることによって、フォノン共振器１００内の反転分布の形成を促進する役割を果たす。

本発明の発光装置の好ましい態様にあっては、フォノン共振器１００は同位体超格子である。例えば、図１１は、超格子８６が電極１１０及び１２０の間に位置する、本発明の発光装置の四つの態様を示す。図１１において、装置構造は支持体（substrate）１３０上に形成された電極層１２０を含んでいる。同位体超格子８６は、同位体を富化した層８６

Ａ及び８６Ｂを交互に並べたものからなり、電極１２０上に配置されている。第二の電極１１０は同位体超格子８６の上に形成されている。

図１１Ｂに見られるように、電極１１０及び１２０は、同位体超格子８６の両側面を挟むように配置しても良い。又、当業者には自明のことであろうが、本発明の発光装置を組み立てて、エッジエミッター（図１１Ｃ参照）又はサーフェスエミッター（図１１Ｄ参照）にすることができる。図１１Ｄに示すように、一つの電極１１０が透明であれば、装置はサーフェスエミッターになる。

図１０又は図１１の発光装置で用いられているフォノン共振器がケイ素同位体超格子である場合、超格子８６の厚みｔは振動波のカップリングを可能にするのに適当なものでなければならない。好ましくは、ｔ＞＞１／κ_p（κ_pはカップリング係数（上記参照））である。上記したように、

κ_p （π／λ_p）（ΔＭ／Ｍ）

（λ_pはフォノン波長、ΔＭは原子質量の変調、Ｍは平均原子質量）である。上記したように、

Λ_L＝ｍ（λ_p／２）

である。従って、

ｔ＞＞（２Λ_L／ｍπ）（Ｍ／ΔＭ）

である。超格子周期数Ｎは、厚みを格子周期で割ったものに等しい。すなわち、Ｎ＝ｔ／ΛＬである。従って、下記の関係式を、本発明の好ましいケイ素同位体超格子に適用できる。

Ｎ＞＞（２／π）（Ｍ／ΔＭ）（１／ｍ）

Si^{28}及びSi^{30}の同位体超格子について、（ΔＭ／Ｍ）＝０．０６である。従って、一番目のカップリング（ｍ＝１）に関して、Si^{28}／Si^{30}の超格子周期数は好ましくは約１０より大きくなければならない。これは約５０より多い分子層に相当する。このようなSi^{28}／Si^{30}超格子の厚みは約１００Åより大きい。

このような、本発明のフォノン共振器と組み合わさった発光装置は、発光ダイオード及びダイオードレーザー（双方とも、ファブリーペロー干渉計であり、分布型フィードバックである：下記参照）を含む。本発明の発光装置は単独で用いることも、他の装置に組み込んで用いることも、或いは例えばアレー（array）に組み立ててディスプレーとして用いることもできる。従って本発明は、発光装置及び／又はシステムのワイドアレーを包含し、少なくとも一つの部品が本発明のフォノン共振器と組み合わさった装置又はシステム全てを含む。

実施例２：発光ダイオード

本発明のフォノン共振器を組み込んだ発光ダイオード（ＬＥＤ）は、上記の実施例１で述べたような一般的な発光装置に、電子及びホールを効率的に注入する目的で当分野で知られるｐｎ接合を設けることによって作製することができる。図１２はそのようなＬＥＤの簡略化した態様を示す。

図１２に見られるように、本発明の好ましい態様によるＬＥＤは、ｐｎ接合に同位体超格子８６を有している。単結晶ケイ素のｎ型電極層８４は支持体の上に形成される。同位元素超格子８６は好ましくはｎ型層８４の上に形成される。例えば、同位体超格子は、同位元素例えばSi^{28}及びSi^{30}を富化した層１０枚を交互に並べたものを含んでも良い。単結晶ケイ素を包含するｐ型電極層８２は同位体超格子８６の上に形成される。当分野で知られるように、ドーピングは原則的に、イオン注入又はエピタキシー成長のどちらでも達成することができる。又、ｎ型層８４及びｐ型層８２は、同位体超格子８６のドープ領域であっても良いし、異なる材料（例えば塊状ケイ素）から作製しても良い。層がドープ領域である場合、ドーピングは例えば拡散、成長途中での混和、イオン注入又は中性子変換ドーピングを含む、当分野で用いられるあらゆる方法によって達成することができる（例えば、Haller Semicond. Sci. Tech. 5:319, 1990参照）。

好ましくは、同位体超格子の厚みは、ｐ型層８２及びｎ型層８４の間に同位体超格子がない場合に形成されるであろう空乏層と同じ厚みである。ｎ型領域８４に用いた電圧に対し

て正の電圧をｐ型層８４に用いることによって、電子及びホールを同位体超格子内に注入して、半導体レーザーダイオードに順バイアスをかける。光子６３はサーフェスエミッターの描かれている図１２に示すようにＬＥＤから放射される。
図１２に示すようなＬＥＤの全体的な効率性を得るのに技術的に主に必要なのは、高い量子放射効率（radiative quantum efficiency）（電子－ホール１ペアの注入につき放射される光量子の平均数）である。本発明のＬＥＤの好ましい態様にあっては、高い量子放射効率は、電子とホールを同じ領域に閉じ込める構造により達成される。当分野で知られるように、これはヘテロ接合により達成できる。
図１３は、ヘテロ接合を用いた本発明のＬＥＤを示す。図１３に示すように、ｐ型層８２及びｎ型層８４は、同位体超格子８６の材料より大きなバンドギャップを有するｐ型層９２及びｎ型層９４にそれぞれ置き換えられている。例えば、SiGeC合金の層をケイ素同位体超格子と用いることができる。電子とホールは同位体超格子内に閉じ込められる。
図１４は本発明のＬＥＤの他の態様を示す。より詳しくは、図１４は、光とキャリヤーを閉じ込める誘電導波管９５を含むエッジ放射ＬＥＤを示す。図１４に示すように、フォノン共振器１００の屈折率ｎｆより小さな屈折率ｎｓ及びｎｃをそれぞれ有する支持体１１４及びカバー１１２は、フォノン共振器１００の両面を挟むように位置している。好ましい態様にあっては、フォノン共振器１００は同位体超格子、好ましくはケイ素を包含する。当業者には自明のことであろうが、フォノン共振器１００よりも低い屈折率及び高いバンドギャップを有するカバー１１２及び支持体１１４用の材料を選び、得られるＬＥＤが導波管及びヘテロ接合の両方を有するようにすることができる。

実施例３：レーザーダイオード

本発明のフォノン共振器をレーザーダイオードに用いることができる。キャリヤー及び光を閉じ込める必要に加えて（上記参照）、レーザーはフィードバックを必要とする。フィードバックは反射、分布型フィードバック、又は二者の組み合わせによって達成される。
図１５Ａは、本発明の、ファブリー－ペローレーザーとしても知られる、開裂（cleaved）ファセット反射レーザーを示している。図１５Ａの開裂ファセット反射レーザーは同位体超格子などの共振器１００をｐｎ接合部に有するダイオードからなる（上述の説明参照）。レーザーは、フォノン共振器１００の両端に位置し導波管９５として機能する、二つのファセットリフレクター２１０、２２０を更に含む。もちろん、当業者には自明のことであろうが、誘電導波管は本発明のレーザーの本質的部品ではない。ある状況にあっては、自己案内光学波を提供するように作用する非常に高い利得の領域と共に、装置を構築することができる。
図１５Ｂは本発明の分布型フィードバックレーザーを示す。図１５Ｂに示すように、周期的に変化する導波管が前後に進行する波の間にブラッグ共振を作るように、フォノン共振器１００は、実質的に周期的な光学特性（例えば吸収及び反射指数）を有するフォノン共振器及び導波管の双方として機能する。このように周期的に変化する光学特性は、１以上の波形の導波管層９７によって達成される。又、前後に進行する波の間にブラッグ共振を作るように間隔をあけた多数の近接するフォノン共振器１００Ａ、１００Ｂ等（図１５Ｂ参照）を包含するフォノン共振器を提供することによっても、周期的に変化する光学特性を達成できる。

実施例４：フォノン及び光子についての自己持続発振装置

本発明のフォノン共振器は、光子共振器についての既知の要求を満足し（例えば、光学的増加が空洞損失よりも大きくなるように；例えば、１９８６年、ニューヨーク、ヴァンノストランド ラインホールド、Ａｇｒａｗａｌ等、Ｌｏｎｇ Ｗａｖｅｌｅｎｇｔｈ Ｓｅｍｉｃｏｎｄｕｃｔｏｒ Ｌａｓｅｒｓ；１９９５年、ニューヨーク、マグローヒル、Ｂａｓｓ（編集）、Ｈａｎｄｂｏｏｋ ｏｆ Ｏｐｔｉｃｓ、Ｉ及びＩＩ巻を参照、これらの各々を本明細書中に援用する）、従ってフォノン及び光子の両方について共鳴するように作製することができる。そのような構造体では、フォノン及び光子集団は結合され、構造体は自己持続連成フォノン／光子発振装置として機能する。当分野で知られている通りに、非線形性を示す一般的な連成発振装置は、ヒステリシス、双安定性及びスイッ

チングを示す（例えば、Ｔｓａｎｇ等、ＩＥＥＥ Ｊ．Ｑｕａｎｔ．Ｅｌｅｃ．１９：１６２１、１９８３；サンジエゴ（１９８８）、アカデミックプレス、Ｈａｕｇ著、Ｏｐｔｉｃａｌ Ｎｏｎｌｉｎｅａｒｉｔｉｅｓ ｉｎ Ｓｅｍｉｃｏｎｄｕｃｔｏｒｓの１５章、及び本明細書中に援用する参考文献を参照）。これより、当分野で知られている原理に従い、本発明の教示を組み合わせて、フォノン及び光子集団が、非線形力学が振動及び／又は光学出力においてヒステリシス、双安定性及びスイッチングに至るように結合される自己持続連成フォノン／光子発振装置を製造することができる。本発明の自己持続連成フォノン／光子発振装置の好適な実施態様では、レーザを実施例３か又は実施例４のいずれかに記載する通りに作り、非線形性をレーザ中に集団によって供給する。

実施例５：光学的検出装置／変調装置

本発明のフォノン共振器は、また、光学的光検出装置又は光学的変調装置中に組み込むこともできる。図１７及び１８は、本発明の光検出装置／変調装置の２つの異なる実施態様を表わす。

図１７を参照すると、少しばかりドープされたフォノン共振器１００をｐ－ｎ接合で作る。透明な電極１１０及び電極１２０をヘテロ接合の反対側に、流入する放射が透明な電極１１０及びＰ－型領域８２を通過し、フォノン共振器１００において吸収され、それで電子－ホール対が生成され、電極１１０及び１２０の間で光電流が誘発されるように位置させる。

図１８を参照すると、電極１１１及び１２１は、フォノン共振器の表面上で互いにかみ合ったパターンを形成し、光検出装置／変調装置は、図１７に表わす実施態様に比べて実質的に水平な形状を有する。電極は近隣のｐドープト及びｎドープト領域へのオーミックコンタクトを形成しても、又は均一にドープされたフォノン共振器へのショットキーコンタクトを形成してもいずれでもよい。このデザインの利点の一つは、電極が極めて接近することにより、従ってそれらの間を連絡するのに要する走行時間が短くなることにより、高速スイッチング又は検出を可能にすることである。

電気的性質の向上

本発明は、また、電気的性質の向上した間接バンドギャップ物質にも関する。特には、発明は、結合電子対が存在することにより、超電導を含む導電性の向上した物質を包含する。本発明の所定の態様及び利点を一層容易に認識してもらうために、半導体材料における伝導バンド電子の性質、及び電子－フォノン相互作用の検討で始める。

図１９に示す通りに、伝導バンド電子は、フォノンを吸収又は放出することができる。電子とフォノンとの間の相互作用は、電子を一つのエネルギー／運動量状態から別のエネルギー／運動量状態に「散乱させる」。特には、フォノンの吸収は、電子のエネルギーを、フォノンのエネルギーに等しい量E_p増大させ、かつ電子の運動量を、フォノンの波数に等しい量変化させる。同様に、フォノン放出は、電子のエネルギーを減少させ、かつまた電子運動量も変化させる。

単一の電子によるフォノンの「コヒーレント吸収及び放出」もまた起きることができ（図２０を参照）、それのエネルギーが、もし凍結格子において真に自由ならばそうであったであろうものに比べて電子のエネルギーの正味の小さい減少を生じる。図２０を参照すると、排他原理は、状態Ｂが占有されていなければ、状態Ａにある電子がフォノンのコヒーレント吸収及び放出を受けることができるだけであることを求める。すなわち、状態Ｂにある電子の存在又は不存在は、状態Ａにある電子のエネルギーに、それらの状態にある２個の電子の間の静電（例えば、クーロン）相互作用に関係なく、影響を与えることができる。

２個又はそれ以上の電子が存在するならば、フォノン－電子相互作用は、電子－電子相互作用を生じることができ、電子－電子相互作用は、電子の「結合対」を形成するに至ることができる。図２１に示す通りに、状態Ａ及び状態Ｂの両方が電子によって占有され、かつ波数ｑのフォノンが利用可能であるならば、電子－フォノン相互作用は、電子「交換」状態を生じることができる。排他原理は、交換に伴われる２つの事象（すなわち、初めに点Ａにある電子の点Ｂへの転移、及び初めに点Ｂにある電子の点Ａへの転移）が独立した

ものではないことを指示する；故に、有効な電子－電子相互作用が存在する。相互作用する電子の有効な対ポテンシャルＶ（r_1-r_2）が負であるならば、電子の「束縛対」を生成し得る。

所定の物質における谷間散乱のレベルが、適した運動量を有するフォノンの利用可能性に依存するのはもちろんである。従って、本発明は、直接の及び／又は帯域間谷間散乱を生成するのに必要な運動量における振動エネルギー（すなわち、フォノン密度）を高めるフォノン共振器を提供する。先に検討した通りに、そのようなフォノン共振器は、構造体の周期を、谷間散乱を生成するのに適した運動量値及び波長を有するフォノンの密度を増大させるように選ぶ周期的に変動する密度の構造体を提供することによって製造する。

図８に示しかつ先に検討した通りに、結晶シリコンは、伝導バンド最小値が（１００）方向に沿って６倍縮退し、ブリリアン帯のエッジまでの間隔のおよそ十分の８において生じる間接バンドギャップを示す。単一の伝導バンドの縮退伝導バンド最小値は、従ってシリコンにおいて１．６π／ａ離される。すなわち、シリコン同位体超格子が、単一の伝導バンドの縮退伝導バンド最小値の間の谷間散乱に参加することができるフォノンについて共鳴するためには、超格子は、下記の周期を有しなければならない：

Λ_L＝２．５ｍ原子層。

最も低い順位のブラッグ反射をもたらす場合であるｍ＝１について、これは、格子定数約０．６２５、又は２．５原子層の周期を生じる。実際的に見て、単に超格子周期が小さ過ぎるために、そのような構造体を製造することはできそうもない。

他方、図８は、隣接するブリリアン帯の伝導バンド最小値が、シリコンにおいて０．４π／ａだけ離されることを示す。これより、電子は、運動量ｑ＝０．４π／ａのフォノンとの相互作用によってある伝導バンド最小値から最も近い隣接する伝導バンド最小値に散乱することができる。シリコン同位体超格子が、そのような帯域間谷間散乱に参加することができるフォノンについて共鳴するためには、超格子は、下記の周期を有しなければならない：

Λ_L＝１０ｍ原子層。

最も低い順位のブラッグ反射をもたらす場合であるｍ＝１について、これは、格子定数約２．５、又はシリコンの１０原子層の周期を生じる。

このように、帯域間谷間散乱に参加することができるフォノンについての共振器として作用する本発明の最も低い順位のシリコン同位体超格子は、間接的放射遷移に参加することができるフォノンについて共振器である発明の最も低い順位のシリコン同位体超格子の倍の周期を有する。最も低い順位の共振器の周期の整数倍である周期を有する格子もまた、最も低い順位の共振器が共鳴する同じフォノンについての共鳴することから、帯域間谷間散乱に参加することができるフォノン及び間接的放射遷移に参加することができるフォノンの両方について共鳴する本発明の同位体超格子を製造することが可能であることは明らかである。

実施例６：低抵抗導体

本発明のフォノン共振器は、低抵抗導体中に組み込むことができる。そのような低抵抗導体の一実施態様を図２７に表わす。図２７に表わす通りに、２つのデバイス２３０ａ、ｂを、フォノン共振器１００によって接続し、デバイス２３０ａ、ｂ間の電子信号を運ぶ。当業者に容易に明らかなように、本発明の低抵抗導体、或は本明細書中で検討するその他のデバイスをドープするのが望ましいかもしれない。そのような場合に、ドーピングは、例えば拡散、成長する間の組み込み、イオン移植、又は中性子変換ドーピングを含む当分野で利用可能な任意の方法（例えば、１９９０年、Ｈａｌｌｅｒ　Ｓｅｍｉｃｏｎｄ．Ｓｃｉ．Ｔｅｃｈ．５：３１９を参照、これを本明細書中に援用する）によって、行ってもよい。

実施例７：プレーナートランスフォーマ

当分野で知られている通りに、プレーナートランスフォーマは、交互電流をもたらすために、少なくとも２つの通電路を互いに対して、例えば、曲がりくねった構造で配置する場合に形成される。本発明のフォノン共振器を通電路の内の１つ又はそれ以上に組み込んで

導電性の高められた、従って磁性の高められたプレーナートランスフォーマを製造することができる。本発明のフォノン共振器は、また、磁性が導電性から生じるその他のデバイス中に組み込むことができるのはもちろんである。

フォノン共振器の製造方法

本発明のフォノン共振器は、種々の方法の内の任意の方法によって加工することができる。ここに、同位体超格子フォノン共振器の製法について記載する。同位体超格子を製造する任意の方法に２つの態様が存在する：ｉ）別の、実質的に純な同位体を準備し；ｉｉ）実質的に純な同位体を発明の層をなした構造体にアセンブルする。これらの２つの態様は、別々に又は同時に行うことができる。

同位体分離に利用可能な方法は、取り分け下記を含む：ガス拡散、ガス遠心分離、分留、空力分離、化学的交換、電気磁気的分離、及びレーザ解離／イオン化（例えば、Ｌｏｎｄｏｎ Ｓｅｐａｒａｔｉｏｎ ｏｆ Ｉｓｏｔｏｐｅｓ、ロンドン：Ｇｅｏｒｇｅ Ｎｅｗｎｅｓ，Ｌｔｄ．、１９６１；Ｓｐｉｎｄｅｌ等、Ｊ．Ｃｈｅｍ．Ｅｎｇｉｎ．、５８、１９９１；Ｏｌａｎｄｅｒ Ｓｃｉ．Ａｍ．２３９：３７，１９７８；Ｓｔｅｖｅｎｓｏｎ等、Ｊ．ＡＭ Ｃｈｅｍ．Ｓｏｃ．１０８：５７６０，１９８６；Ｓｔｅｖｅｎｓｏｎ等、Ｎａｔｕｒｅ ３２３：５２２，１９８６；Ｂｉｇｅｌｅｌｓｅｎ Ｓｃｉｅｎｃｅ １４７：４６３、１９６５；タナカ等、Ｎａｔｕｒｅ ３４１：７２７，１９８９；Ａｍｂａｒｔｚｕｍｉｏｎ Ａｐｐｌｉｅｄ Ｏｐｔｉｃｓ、１１、３５４頁、１９７２；Ｎ．Ｒ．Ｉｓｅｎｏｒ等、Ｃａｎ．Ｊ．Ｐｈｙｓ．５１：１２８１、１９７３；Ｅｐｌｉｎｇ等、Ａｍ．Ｃｈｅｍ．Ｓｏｃ．１０３：１２３８、１９８１；カミオカ等、Ｊ．Ｐｈｙｓ．Ｃｈｅｍ．９０：５７２７、１９８６；Ｌｙｍａｎ等、Ｊ．Ａｐｐ．Ｐｈｙｓ．４７：５９５、１９７６；アライ等、Ａｐｐ．Ｐｈｙｓ．Ｂ５３：１９９、１９９１；Ｃｌａｒｋ等、Ａｐｐ．Ｐｈｙｓ．Ｌｅｔｔ．３２：４６、１９７８を参照、これらの各々を本明細書中に援用する）。また、半導体を精製するために、フロートゾーン凝離を利用してもよい。

アイソトープ的に純な物質をアセンブルして本発明の同位体超格子にするのに利用可能な方法は、例えば下記を含む：化学蒸着（ＣＶＤ）、分子ビームエピタキシー（ＭＢＥ）、及び化学ビームエピタキシー法（ＣＢＥ）（例えば、Ｓｅｄｗｉｃｋ等、Ｊ．Ｖａｃ Ｓｃｉ．Ｔｅｃｈｎｏｌ．Ａ１０（４）、１９９２を参照、これを本明細書中に援用する）。上に挙げる方法を含む任意の利用可能な方法によって造られるアイソトープ的に純な物質を、標準のＣＶＤ、ＭＢＥ、又はＣＢＥ技術と組み合わせて用いて本発明の同位体超格子を製造してもよい。

加えて、本発明の同位体超格子は、同位体分離及び層付着を同時に行うことによって製造してもよい。本発明の特に好適な実施態様では、単一のチャンバーにおいて、レーザ解離同位体分離技術をＣＶＤプロセスと組み合わせて（すなわち、「レーザ補助ＣＶＤ」プロセスとして）用いて、本発明の同位体超格子を製造する（実施例８を参照）。

実施例８：レーザ補助ＣＶＤ

本発明のシリコン同位体超格子は、図３３に表わすようなチャンバーにおいてシラン（SiH_4）ガスを赤外線に暴露させることによって製造してもよい。ウエファー３００を、チャンバー内にシランを自然分解させるのに要するよりも低い温度に保つ。ウエファー３００をヒーター３５０上に位置させてもよい。第一レーザ３１０を、第一の所望のシリコン同位体（例えば、Si^{28}）の振動遷移周波数に合わせる。レーザ励起は、所望の同位体と他の同位体との間に大きな温度差をもたらし、所望の同位体だけをウエファー３００上に付着させることになる。別法として、第一レーザ３１０を、第一の所望のシリコン同位体だけを励起させるのに使用することができ、かつ第二レーザ３２０は、高エネルギー光子を供して励起させたシラン分子（すなわち、所望のシリコン同位体を含有するそれらのシラン分子）を光イオン化させ、ウエファー３００の表面との高い反応性を有するイオンを生成することができる。

第一シリコン同位体の適した数の原子層を置いた後に、第一レーザ３１０を調節して第二の所望のシリコン同位体（例えば、Si^{30}）の振動遷移周波数に合わせる。次いで、第二

シリコン同位体の適した数の原子層を置く。そのプロセスを、所望の同位体超格子構造体が製造されるまで、繰り返す。
同位体超格子を成長させた後に、層厚みのキャリブレーションをＳＩＭＳ分析によって行うことができる。また、例えば、大多数の同位体層が少数の同位体層に比べて著しく速い速度で成長するかどうかを求めるのに、標準の現場モニタリング（例えば、ＲＨＥＥＤ）を実施することができる。そうならば、例えばレーザ動力を調節する（例えば、大多数の同位体層を付着させるために、レーザ動力を低下する）ことによって、相違を補正することができる。
本発明の同位体超格子を成長させる間常に、エピタクシアル成長を確実にするために、チャンバー内の温度は、付着されたシリコン原子の表面移動性を保つ程に高くすべきである。また、同位体超格子を最も低い伝導バンド最小値の方向に成長させるのが好適である。シリコンについて、これは成長面の（１００）（０１０）（００１）系統に相当し；ゲルマニウムについて、（１１１）超格子が望ましい。ダイヤモンドは、シリコンに一層近いバンド構造を有し、従って同様の成長方向を要する。当業者に明らかな通りに、適した方向での（例えば、シリコンの（１００）方向での）周期性が本明細書中で検討する基準を満足しさせえすれば、その他の成長方向が可能である。
本発明の同位体超格子の同位体純度は、例えば二次イオン質量分光学又はラマン散乱のような任意の利用可能な方法を用いてテストすることができる。
当業者ならば認識する通りに、本発明のアイソトープ的に純な超格子を製造するための重要な要件は、ウエファー３００が原子的に清浄であること、レーザ周波数のスイッチングが「混合」同位体層を付着するに至らないこと、及びチャンバーが実質的に衝突のない環境をもたらすことの要件を含む。
これらの要件の各々を順に検討する。まず第一に、ウエファー３００を、標準方法を用いて清浄にすることができ、酸化物除去を行うべきである。
レーザ調整の間に生成される混合同位体超格子に付随する問題を回避するために、本発明の方法の内の一つの特定の実施態様は、回転円形コンベヤーにアセンブルした複数のウエファー３００を提供するものであり、円形コンベヤーの回転を、純な同位体層だけをウエファー上に付着させるように時間を調整する（すなわち、それで、ウエファーの代わりにギャップをシラン流に暴露させる時間の間混合集団が生成される）。
図２１に表わす通りに、第一３１０及び第二３２０層をウエファー３００の表面に近い点で交差させることによって、本発明の方法において実質的に衝突のない環境を確実にする。
また、当業者ならば認識する通りに、本発明の好適な方法を実施する場合に、シリコン層を、チャンバーのウエファーと異なる他の部分上でなく、ウエファー３００上のみでないとしても優先的に確実に付着させることが望ましい。これより、第一及び第二レーザビームを通して向ける赤外ウインドー３３０及び３４０を、励起した後のシリコンを塗被しない物質で造ることが望ましい。
その他の実施態様
下記は、本発明の所定の好適な実施態様の記述を挙げるもので、かかる記述は、制限することを意味するものではない。本発明のその他の集施態様は、下記の請求の範囲の範囲の内である。
特に、本発明は、半導体材料に限らない。ダイヤモンドのような材料もまた用いてよい。加えて、当業者ならば容易に認識する通りに、フォノン共振器をその他の種々の光学又は電気デバイスのいずれか中に組み込んでよい。例えば、フォノン共振器を、超電導クオンタムインターフィアレンスデバイス（ＳＱＵＩＤ）、ジョセフソン接合、高周波トランジスタ、又はマイクロウエーブ検出装置に、それらのデバイスの電気的及び／又は熱的性質を高めるために、組み込んでよい。
また、本明細書は、周期的に変動する密度の構造体（例えば、同位体超格子）について記載する。上に記載する好適な構造体の密度は、質量密度の異なる物質の交互層を設置することによって変える。構造体の質量密度を周期的に変える別の方法は、定常波を構造体中

に導入することである。しかし、フォノンは、通常１００～１０００Åだけを散乱なしで伝播することから、必要な定常波を生じさせるには、１０００Åよりもずっと短い波長を有する音波を必要とすることになる。そのような音波は、実際には発生させることができない。これより、本発明の周期的に変動する密度の構造体の好適な実施態様は、密度の異なる物質の層、最も好ましくは本明細書中に記載する通りの同位体超格子を有する構造体である。

当業者に明らかな通りに、本明細書中に記載するような周期的に変動する密度の構造体は、特定の波数ベクトルのフォノンを増進させるよりもむしろ抑制するようにデザインすることができよう。例えば、クオンタムウエル又はクオンタムワイヤ構造体において結合される電子のイオン化を生じるフォノン－電子相互作用を回避するのが時には望ましい。本発明の構造体は、本明細書中に記載する通りにアセンブルすることができ、電子をイオン化させるのに要するエネルギーでフォノンについて共鳴する、従ってフォノンを抑制することをしないようにデザインした。そのような構造体は、クオンタムウエル又はワイヤの性能を向上させることになる。

また、当業者に明らかな通りに、本発明の同位体超格子は、総括構造体をフォノン－電子相互作用に参加するのに適した波数ベクトルのフォノンについて共鳴するようにデザインさえすれば、２つ又はそれ以上の異なる元素又は化合物のアイソトープ的に冨化された層から造ることができる。例えば、シリコン同位体の３つの原子層と交互するカーボン同位体の２つの原子層を含む構造体をアセンブルすることができる。そのような構造体は、大きな（およそ２．５ｅＶよりも大きい）間接バンドギャップを示すことになり、例えば本明細書中に記載するような発光デバイスにおいて使用するのに適することになる。

発明の方法の上記した好適な実施態様は、シラン（SiH_4）を出発原料として利用して発明のシリコン同位体超格子をレーザ補助同位体分離によって製造する。また、例えばSiH_2Cl_2、SiF_4、又はハライド－シラン系統のガスのその他の任意のメンバーのようなその他の出発原料も使用することができるが、ジクロロシラン（SiH_2Cl_2）のような一層重い分子は、複雑な振動スペクトルを有し、これは、単一のシリコン同位体に明らかに付随する振動吸収周波数の識別を一層困難なものにする。これより、本発明の目的から、シランは、レーザ補助同位体分離用の好適なガス源である。

また、本明細書中に提示する例は、一次元フォノン共振器の加工及び用途について記載するが、当業者ならば、一よりも多くでの（例えば、二又は三次元での）周期性の構造体もまた本教示に従って造りかつ用いることができることを認識しよう。そのような構造体は、結晶中で三次元までのフォノンについて共鳴をもたらす。二又は三次元での共振器周期を求める方法は、一次元について用いる方法と精確に似ている。三次元周期性は、一次元でのフォノンスペクトルよりもむしろ結晶全体のフォノンスペクトルを改変する作用を有する。

【図１】

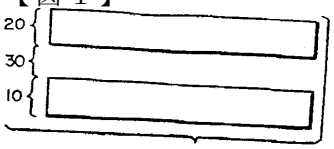


FIG. 1

【図２】

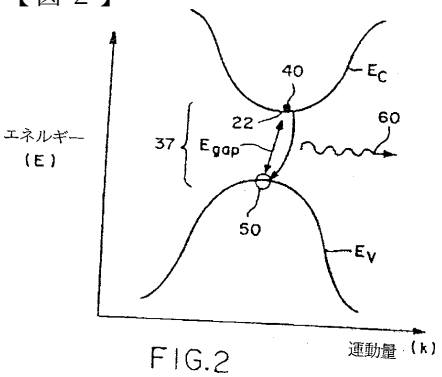


FIG. 2

【図３】

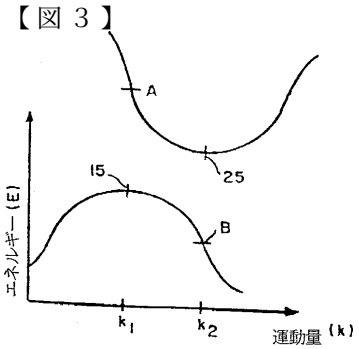


FIG. 3

【図５】

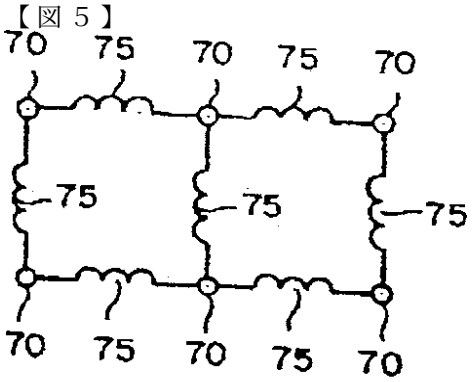


FIG. 5

【図４Ａ】

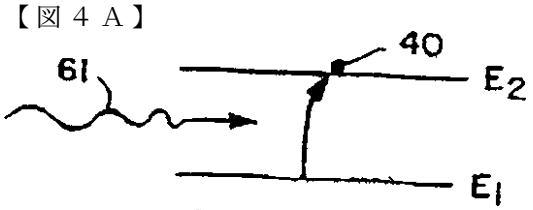


FIG. 4A

【図４Ｂ】

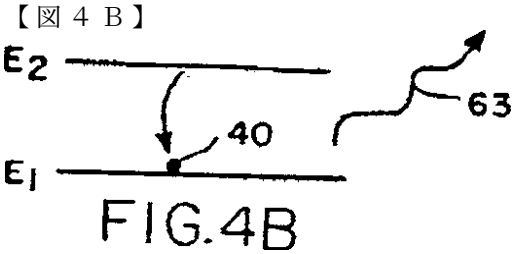


FIG. 4B

【図４Ｃ】

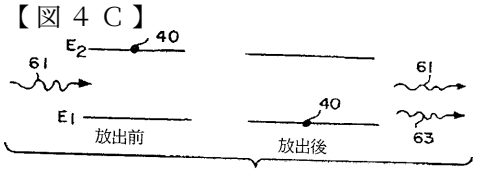


FIG. 4C

【図７】

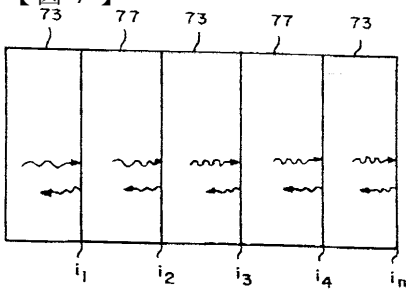
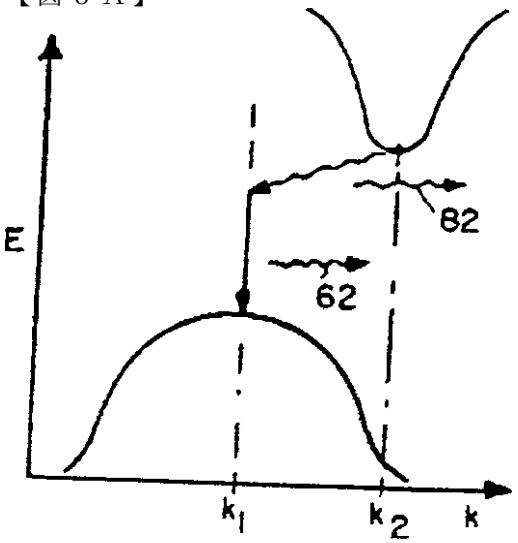


FIG. 7

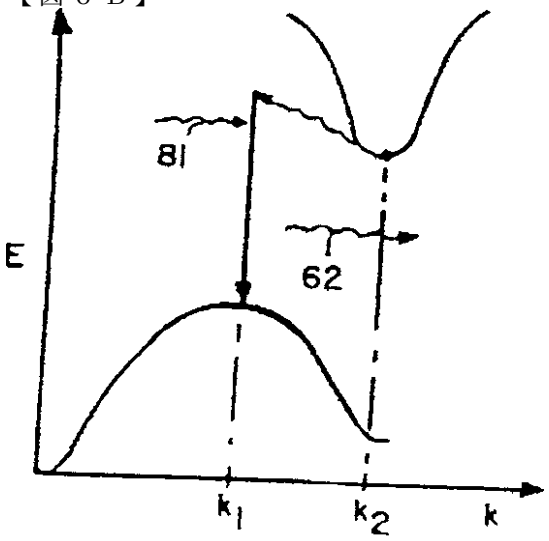
【図６Ａ】



自然放出

FIG.6A

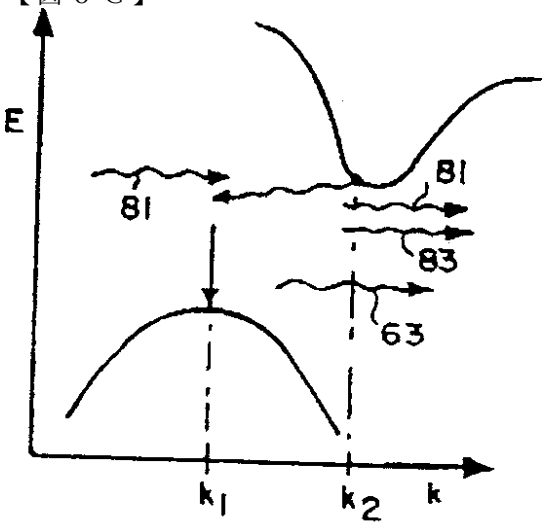
【図６Ｂ】



誘導放出と吸収

FIG.6B

【図６Ｃ】



誘導放出

FIG.6C

【図８】

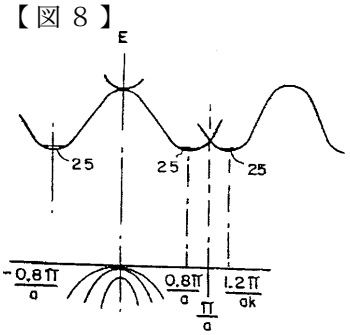
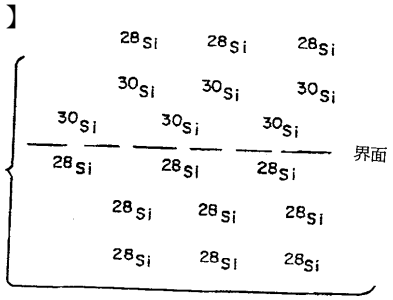


FIG.8

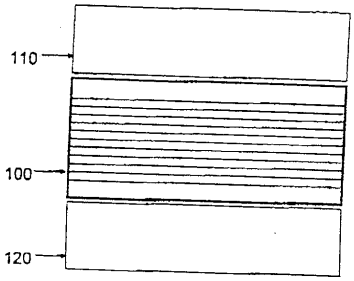
【図９】

FIG.9



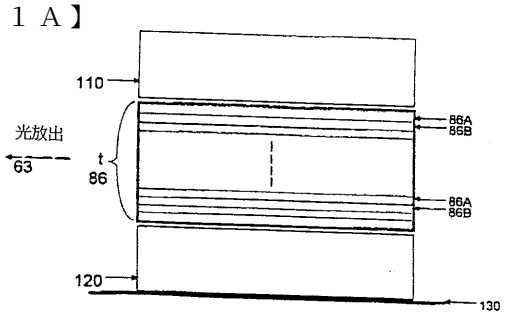
【図１０】

FIG.10



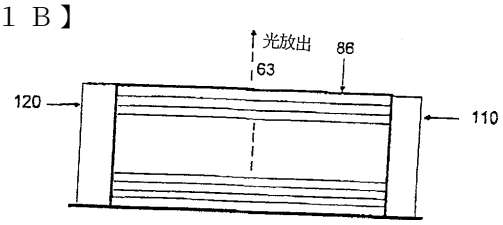
【図１１Ａ】

FIG.11A



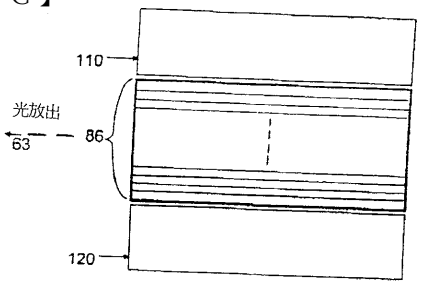
【図１１Ｂ】

FIG.11B



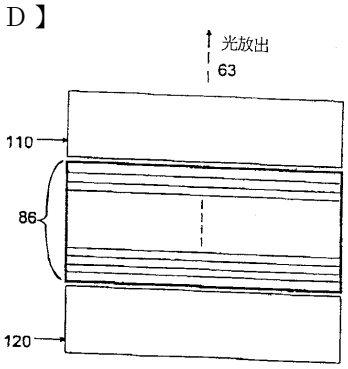
【図１１Ｃ】

FIG.11C



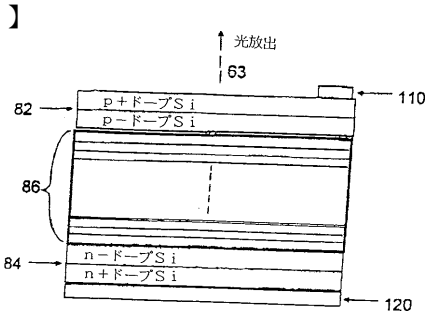
【図１１Ｄ】

FIG.11D



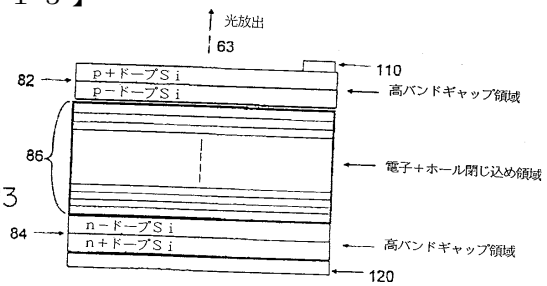
【図１２】

FIG.12



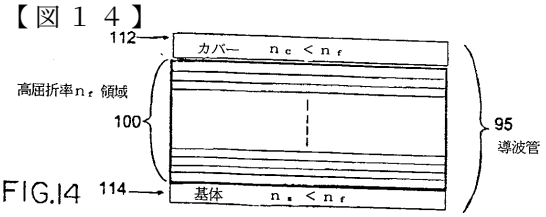
【図１３】

FIG.13



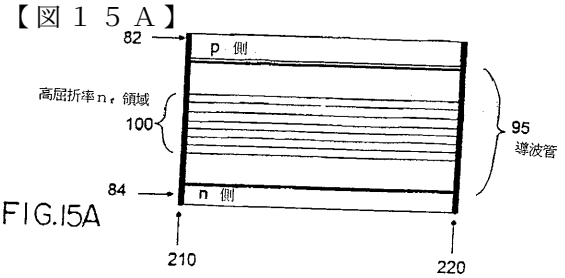
【図１４】

FIG.14



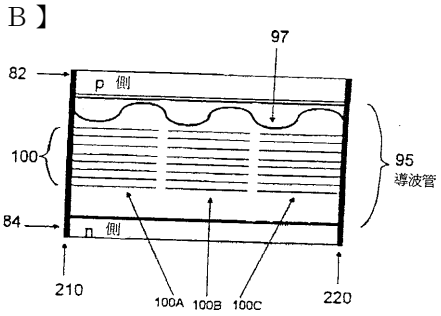
【図１５Ａ】

FIG.15A



【図１５Ｂ】

FIG.15B



【図１７】

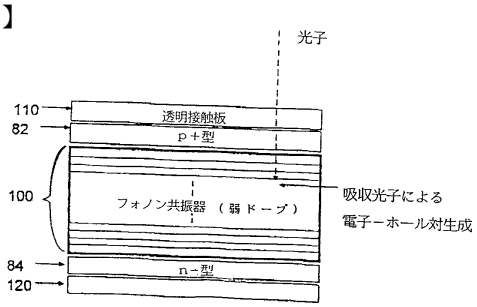


FIG. 17

【図１６】

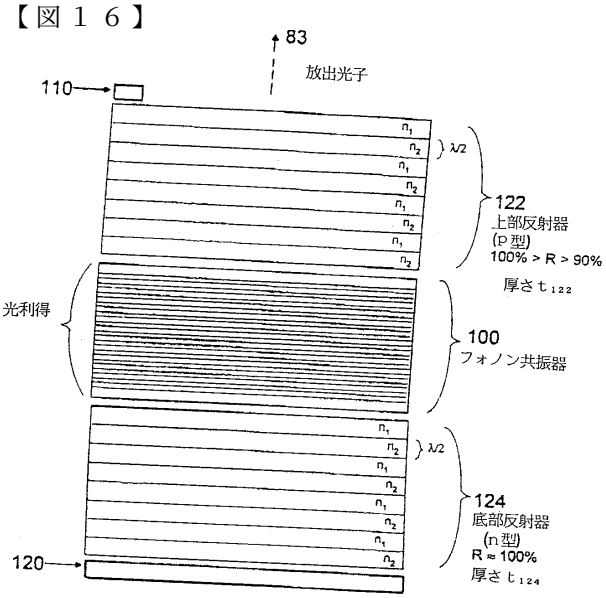


FIG. 16

【図１８】

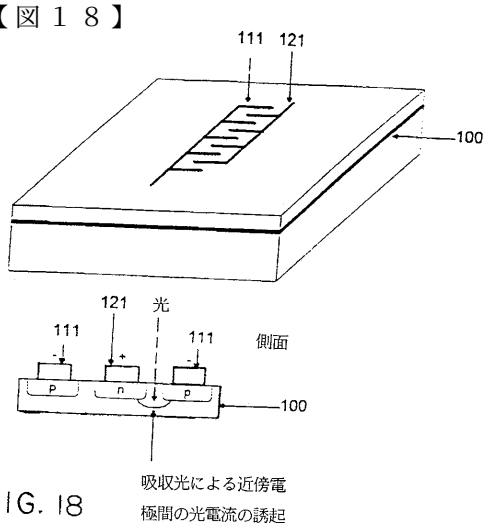


FIG. 18

【図１９】

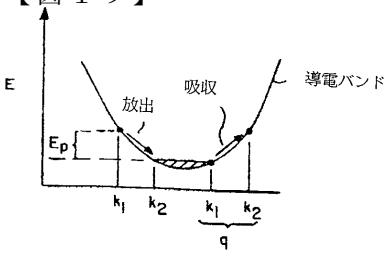


FIG. 19

【図２０】

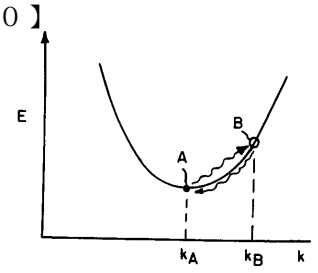


FIG. 20

【図２１】

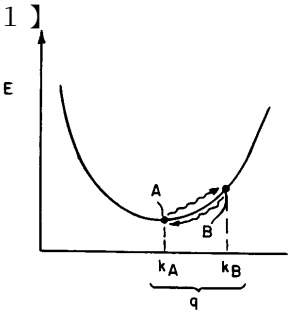


FIG. 21

【図２２】

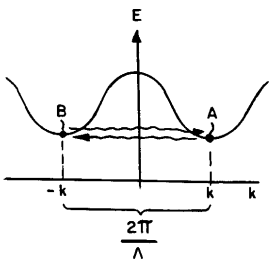


FIG. 22

【図２３】

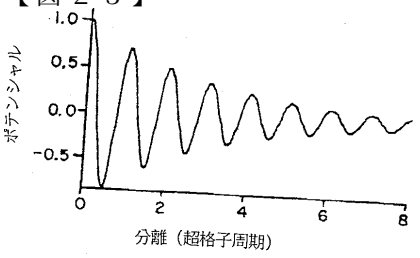


FIG.23

【図２４】

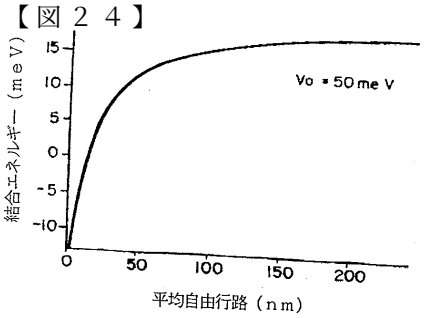


FIG.24

【図２５Ａ】

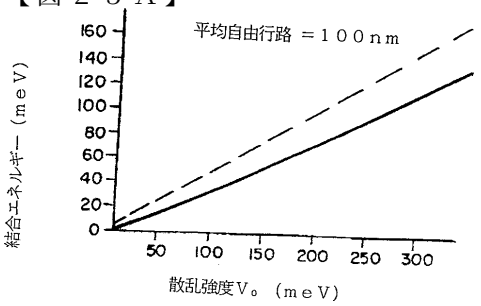


FIG.25A

【図２５Ｂ】

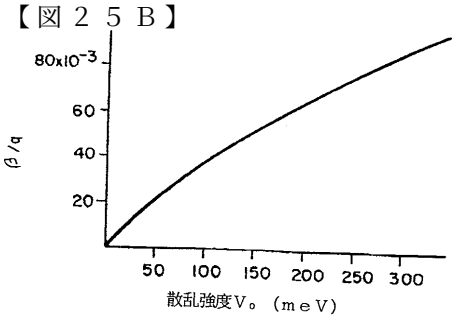


FIG.25B

【図２６】

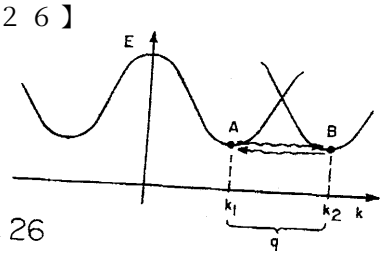


FIG.26

【図２７】

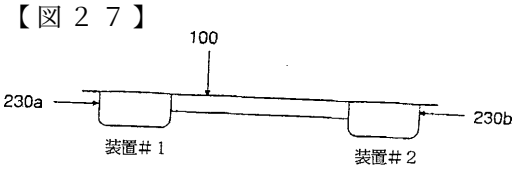


FIG.27

【図２８】

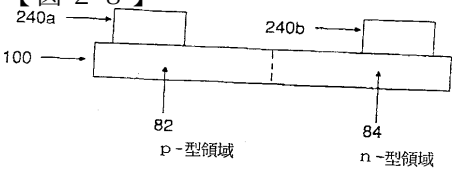


FIG.28

【図２９】

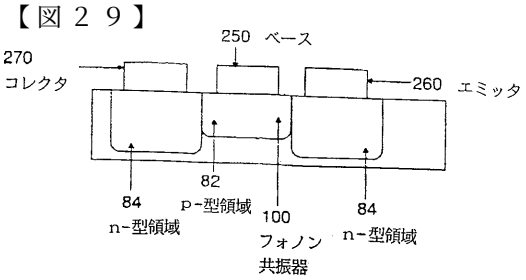


FIG.29

【図３０】

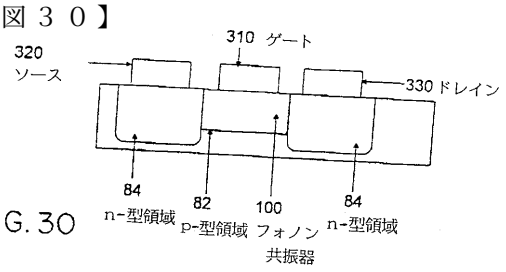


FIG.30

【図３１】

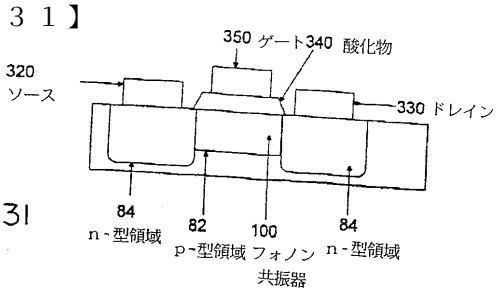


FIG.31

【図３２】

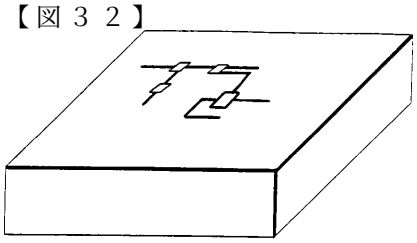


FIG. 32

【図３３】

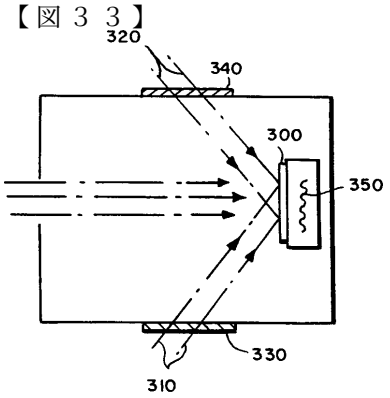


FIG. 33

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I

H01L 31/10	***(2006.01)***	Ｈ０１Ｌ	31/10	Ａ
H01S 5/30	***(2006.01)***	Ｈ０１Ｓ	5/30	

(56)参考文献 米国特許第０４４６９９７７（ＵＳ，Ａ）
米国特許第０４３４９７９６（ＵＳ，Ａ）
特開昭６１－２６２１６７（ＪＰ，Ａ）
特開平０４－２２６０１５（ＪＰ，Ａ）
特開昭６３－２６９５７３（ＪＰ，Ａ）
特開平０４－２３００４３（ＪＰ，Ａ）
特開昭６３－１１５３８５（ＪＰ，Ａ）
特開昭６４－０１５６８７（ＪＰ，Ａ）
J.Spitizer 他, Raman Scattering by Optical Phonons in Isotopic 70(Ge)n74(Ge)n Superlattices, Physical Review Letters, 米国, The American Physical Society, １９９４年 3月 7日, Vol72, No.10, 1565-1570ページ

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)

H01L 33/00
H01S 5/00 - 5/50
JST7580(JDream2)
JSTPlus(JDream2)