

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4137999号
(P4137999)

(45) 発行日 平成20年8月20日 (2008. 8. 20)

(24) 登録日 平成20年6月13日 (2008. 6. 13)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 L 31/0232 (2006. 01)	HO 1 L 31/02 D
HO 1 L 27/14 (2006. 01)	HO 1 L 27/14 K

請求項の数 3 (全 12 頁)

(21) 出願番号	特願平9-500221	(73) 特許権者	501297550
(86) (22) 出願日	平成8年6月4日 (1996. 6. 4)		キネティック リミテッド
(65) 公表番号	特表平11-507178		イギリス ロンドン エスタブリッシュ 1 イ
(43) 公表日	平成11年6月22日 (1999. 6. 22)		ー 6 ピーディー バッキンガム ゲート
(86) 国際出願番号	PCT/GB1996/001324		8 5
(87) 国際公開番号	W01996/039719	(74) 代理人	100059959
(87) 国際公開日	平成8年12月12日 (1996. 12. 12)		弁理士 中村 稔
審査請求日	平成15年6月4日 (2003. 6. 4)	(74) 復代理人	100093300
審査番号	不服2006-11347 (P2006-11347/J1)		弁理士 浅井 賢治
審査請求日	平成18年6月5日 (2006. 6. 5)	(74) 代理人	100067013
(31) 優先権主張番号	9511336.1		弁理士 大塚 文昭
(32) 優先日	平成7年6月5日 (1995. 6. 5)	(74) 代理人	100082005
(33) 優先権主張国	英国 (GB)		弁理士 熊倉 禎男
		(74) 代理人	100065189
			弁理士 穴戸 嘉一

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 反射性半導体基板

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

リフレクタが組み込まれている共振空洞が組み込まれている、 $[7.5-9] \times 10^{-6} \text{ m}$ の波長範囲内の電磁輻射用検出器であって、前記リフレクタが、珪素基板と、

二酸化珪素の反射層であって、波長の変化に伴う屈折率変化が、該範囲内で少なくとも一つの局所的最小値を示す屈折率を有し、かつ波長に伴う吸光係数変化が、屈折率における該局所的最小値に関連する、少なくとも一つの局所的最大値を示す吸光係数を有する、反射層と、

更なる珪素の層と、

を含み、該二酸化珪素反射層が、前記珪素基板と、前記更なる珪素層との間にサンドイッチ状に挟まれるように配置されている、ことを特徴とする電磁輻射用検出器。

【請求項 2】

入射光を吸収できる多重量子井戸領域を含み、前記輻射が、前記反射層および前記更なる珪素の層に平行な成分をもつ電場ベクトルを有しかつ前記共振空洞の共振波長に近似する波長を有する、請求項 1 に記載の検出器。

【請求項 3】

前記局所的最小値および局所的最大値がホノン共振により生ずる、請求項 1 に記載の検出器。

【発明の詳細な説明】

本発明は、半導体基板における電磁輻射のリフレクタの製法に関し、該基板上には高性能のエピタキシー膜を成長させることができる。これら基板は電磁輻射の共振空洞を生成するのに利用でき、このような空洞はレーザーエタロンおよび赤外フォトン検出器等の用途にとって重要である。

赤外検出器は、民間および軍事用途に対して重要である。輻射が大気を横切って伝播する場合、有用な波長範囲は、大気による吸収のために、 $[3-5] \times 10^{-6} \text{ m}$ および $[7.5-14] \times 10^{-6} \text{ m}$ に制限される。軍事的用途にとっては、 CO_2 レーザーによる眩惑を回避するように設計されたフィルタのために、この長い波長範囲は、更に $[7.5-9] \times 10^{-6} \text{ m}$ に制限される。多くの個々の検出器エレメントをもつ焦点面アレイ (FPAs) は、これら両範囲における像形成のために使用される。幾つかの技術が、例えば CdHgTe (CMT) または Si 読み取り回路とハイブリッド化した InSb 、またはモノリシックアレイ等のように、該 $[3-5] \times 10^{-6} \text{ m}$ の範囲でFPAsを利用可能である。この技術は、該 $[7.5-14] \times 10^{-6} \text{ m}$ の範囲では、それ程発展されていない。CMTは、長波長の赤外 (LWIR) FPAsに要求される均一性を維持して、成長させることが困難であり、また該 Si 読み取り回路と低温結合する必要がある、これがその製造を更に困難にしている。 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ を利用した多重量子井戸 (MQW) 検出器は、 Si 読み取りチップとのハイブリッド化のための半田バンプ技術 (solder bump technology) を使用して 128×128 アレイまで進んだが、より大きなアレイについての歩留りは未知であった (B.F. レビン (Levine), J. Applied Physics, 1993, 74, R1)。高性能のFPAsは、典型的には液体窒素の温度近傍で動作する。検出器と読み取りチップとの間の熱的な不一致は、 Si 読み取り回路上の、化合物半導体検出器を使用した、ハイブリッドアレイのサイズを制限している。成功した Si モノリシック LWIR FPA 技術は今のところ存在せず、長波長赤外応答をもつ IrSi は低い量子効率をもち、また結果として動作温度も極めて低い。

現在、LWIR技術は、化合物半導体検出器を使用した該ハイブリッド法における固有の制限を解消するために、該 Si 読み取り回路と相容性であるように、開発途上にある。中でも、 Si 基板上にエピタキシャル成長させた珪素 - ゲルマニウム合金 (SiGe/Si) から形成した仮像ヘテロ構造の利用が、最も見込みがある。仮像 SiGe/Si は、該 Si 基板ウエハ上の非常に高い均一性を保証するという利点をもち、これは該FPAにおける固定パターンノイズ (fixed pattern noise) を最小化し、かつ高い製造歩留りを可能とする。

SiGe/Si MQWから作成されたLWIRフォトン検出器は、低応答性および暗電流熱ノイズのために制限される。デバイスは、許容されるシグナル/ノイズ比を得るために、低温にて作動する必要がある。このことは、その利用性を制限し、かつ該像形成システムのコストを増大する。入射光の吸収に関する量子効率の増大はこのシグナル/ノイズ比を改善するはずであり、従って高温での作動を可能とするはずである。

より短波長 ($< 2 \times 10^{-6} \text{ m}$) における検出器の量子効率は、共振空洞を使用して、高められた (例えば、 R クチボトラ (Kuchibhotla), JC キャンベル (Campbell), JC ビーン (Bean), L ベチコーラス (Peticolas) および R フル (Hull), Appl. Phys. Lett., 1993, 62, p. 2215を参照のこと)。共振空洞 (resonant cavity) は、高電場の局所的領域を生成する。吸収が電場に依存する場合、該量子効率は、デバイスの吸収領域を共振空洞に位置させることにより高めることができる。

このような共振空洞を生成するために、波長 λ の入射光を、2枚のリフレクタ間に拘束する。該空洞における電場の増強は、波長 λ における拘束ミラーの反射率が増大するにつれて、増大する。幅 L_c および屈折率 n の空洞に対して、該空洞内に拘束される光は光学的厚み nL_c/λ 、および該拘束ミラーにおける位相によって決定される波長で共振する。従って、該リフレクタの該空洞幅 - 並びに波長 - 依存性は、 nL_c/λ と一致するように注意深く選択する必要がある。該リフレクタおよび吸収領域が、十分にブロードなバンドであれば、 λ を越える波長における共振を利用することができる。

共振空洞で利用されるリフレクタは、しばしば多数の、屈折率 n_1 (該空洞に関する n よりも高い) および n_2 (該空洞に関する n よりも低い) を有し、かつ個々の層の厚み $d_i/4n_i$ (

10

20

30

40

50

$i=1$ または 2)を有する、層の対からなる、誘電または半導体の積層体である。このようなリフレクタの重要な性質の一つは、該積層体および該空洞の透過を可能とする、入射光の高い透過率である。しかしながら、LWIR用途に対するこのようなブラッグ反射の利用は、大きな波長と一致するように、高性能の厚い層の対を製造することの困難さにより制限される。例えば、SiGe/Siについて、該層の一つが歪みをもつ場合、厚い層における歪みの緩和により欠陥が導入され、該ブラッグリフレクタの効率を減じてしまう。

半導体共振構造体は、しばしば単結晶基板上でエピタキシャル成長される。従って、重要な要件は該デバイスの該エピタキシャル活性領域下部に埋設される高効率のリフレクタに関するものである。エピタキシャルブラッグリフレクタはLWIR用途には不适当であるので、別の型の埋設リフレクタを開発し、一方で該基板の適合性を維持して、高性能のエピタキシャル構造体を形成する必要がある。該活性領域上部の該リフレクタは、単に半導体/空気界面、あるいはエピタキシャル成長させたもしくはエピタキシー後に堆積させた他の層であってもよい。

赤外波長領域に渡り約1.45の屈折率(一方、Siは赤外領域において約3.45の屈折率をもつ)をもつ、SiO₂の単一の絶縁層が提案され、短波長におけるSi中の埋設リフレクタとして立証されている(例えば、VPケザン(Kesan), PGメイ(May), FKルグーズ(LeGoues)およびSSアイヤー(Iyer), J. Cryst. Growth, 1991, 111, p. 936; DKナヤク(Nayak), Nウサミ(Usami), S. フカツ(Fukatsu)およびY. シラキ(Shiraki), Appl. Phys. Lett., 1994, 64, p. 2373を参照のこと)。SIMOXウエハ(酸素の注入による分離)を基板として使用した。該酸化物を覆う高性能のSiは、SiおよびSiGeエピタキシャル層(epilayers)のエピタキシャル異常成長を可能とする。しかしながら、SIMOXウエハ内に生成し得る埋設SiO₂の厚みは制限される。

Si中に高性能の埋設酸化物を生成するもう一つの技術は、絶縁体上でのボンドアンドエッチシリコン(bond-and-etch silicon)生成法(BESOI)であり、ここでは厚みに関する制限はそれ程厳密ではない。これは長波長域においては重要であり、該長波長域においては、ミクロンオーダーのSiO₂の厚みが、所定の反射率を得るのに必要である。

7.5×10^{-6} mよりも短波長の赤外域において、SiO₂中の弱い吸収は、該SiO₂の厚みにより決定される波長において、最大および最小を示す単一の層の、波長依存性反射率を与える。しかしながら、SiO₂は、約 9.2×10^{-6} mおよび約 21.5×10^{-6} mにおける、強いホノン吸収バンドを示す。各ピークの短波長側の波長領域において、屈折率が局所的最小値を示すことは、かかる吸収バンドの一特徴である。この特性の結果として、これらのスペクトル領域においては、Si環境内に埋設された単一の厚いSiO₂層の反射率は、該吸収バンドから除去される透明な波長領域と比較して、増強される。更に、これらの特定の領域において、該反射率はほんの僅かに波長に依存するに過ぎず、重要な波長領域 $[7.5-9] \times 10^{-6}$ mにおいて、該反射率は該酸化物の厚みにより制御され、厚み $>1.5 \times 10^{-6}$ mの層については、酸化物の厚みとは殆ど無関係である。このことは、誘電体透明性の短波長範囲における該特性と対照をなし、該短波長範囲では、反射率は全く厚みおよび波長両者の関数である。

原理的には、ウエハ結合技術は、異なる波長における吸収バンドおよび高い反射率を有する、他の埋設層の使用を可能とする。同様に、埋設された誘電体リフレクタおよび異なる半導体材料を使用した共振空洞は、該材料を、表面上に該誘電体を有するSiウエハに結合することにより作成できる。

BESOI基板は、 $[7.5-9] \times 10^{-6}$ mの波長範囲における共振空洞デバイスを製造するための重要な利点を有する。まず、厚い($>1.5 \times 10^{-6}$ m)酸化物層が、該デバイスの背面リフレクタとして使用でき、これは高い反射率を与える。第二に、厚い層の反射率は、厚みにおける変動に対してそれ程敏感ではない。第三に、該反射率は、合理的に、該波長領域に渡り一定であり、従って該空洞の幅がその設計値、 L_c と僅かに違って、強い共振が観測できる。結果として、このデバイスの性能は、酸化物の厚みおよび空洞の幅両者の変動に対して、より短波長における場合よりも、許容度が高くなる。

SiO₂の埋設層は、また該空洞の基板側から、該Si/SiO₂層に入射する光について、前部リフレクタとして使用できる。この場合、吸収バンド近傍の高い反射率をもつ有用な波長領

10

20

30

40

50

域は、該 SiO_2 層内での入射光の吸収により減少し、そのためにその最適の厚みは背面リフレクタとして使用される酸化物に対するよりも、小さいであろう。反射防止被膜を使用して、該基板に入射する光を多くすることができる。

S. フカツ (Fukatsu), D.K. ナヤク (Nayak) および Y. シラキ (Shiraki), Applied Physics Letters, 1994, 65, p. 3039は、 $2 \times 10^{-6}\text{m}$ 以下の波長における共振空洞用のリフレクタを得るための、 SiO_2 の単一層の使用を報告している。しかしながら、屈折率 n および吸光計数 k のスペクトル依存性については、何等記載していない。この文献の第2図は、 Si 環境内に埋設された単一の SiO_2 層上の SiGe/Si エピタキシャル層の反射率を示している。

この反射率の波長依存性は、2つの共振、即ち該上部 SiGe/Si 層中の共振と、該 SiO_2 リフレクタ自体内の共振に対応する振動挙動を示す。後者の共振は、該 SiO_2 層の吸光係数が低い値であるために起こり、結果として下部の SiO_2/Si 界面からの光の反射をもたらす、これは該 SiO_2 内での干渉を生じ、従って該層の反射率の強い波長依存性をもたらす。

フカツ等は、それぞれ Si および SiO_2 に対する屈折率 $n_{\text{Si}}=3.45$ および $n_{\text{SiO}_2}=1.45$ を使用し、かつ低吸収を仮定 (即ち、 k は非常に小さい) して、これらの反射率の結果を説明している。かれらのモデルを長波長にも拡張して、該反射率の連続的な振動挙動を予想している。該重要な波長領域、即ち $[7.5-9] \times 10^{-6}\text{m}$ において、かれらのモデルは、高 k 値の領域近傍で生じ、かつ本発明において活用している、該反射率の改善された大きさおよび波長 - 並びに厚み - 非感受性を予想できない。

本発明によれば、ある波長範囲内の電磁輻射用のリフレクタが提供され、該リフレクタは、

第一の材料製の半導体基板と、

第二の材料製の反射層と、ここで該第二の材料は、波長に伴う屈折率変化が、該範囲内で少なくとも一つの局所的最小値を示す屈折率を有する、および

該第一の材料と同一であっても、異なってもよい、第三の半導体材料の層とを含み、該層が、該反射層が他の2つの層間にサンドイッチ状に挟まれるように配置されている、ことを特徴とするリフレクタ。

好ましい態様において、該第二の材料は、波長に伴う吸光係数変化が、屈折率における該局所的最小値に関連する、少なくとも一つの局所的最大値を示す吸光係数を有する。

更に好ましい態様において、該局所的最小値および局所的最大値はホノン共振により生ずる。

更に好ましい態様においては、該波長範囲は、 $[7.5 \sim 14] \times 10^{-6}\text{m}$ の範囲である。

更に好ましい態様において、該波長範囲は $[7.5 \sim 9] \times 10^{-6}\text{m}$ の範囲である。

更に好ましい態様において、該第一の材料は珪素であり、かつ該第二の材料は二酸化珪素である。

更に好ましい態様においては、該リフレクタは、共振空洞内に組み込まれている。

更に好ましい態様においては、該共振空洞は、電磁輻射用の検出器内に組み込まれている。

更に好ましい態様においては、該検出器は、入射光を吸収することのできる、多重量子井戸領域を包含し、該輻射は、該層に平行な成分をもつ電場ベクトルを有し、かつ該空洞の共振波長に近似した波長を有する。

本発明は、例示の目的でのみ与えられた添付図を参照しつつ、説明する。ここで、

第1図は、 SiO_2 に関する屈折率および吸光係数の、波長の変化に伴う変動を示す図である。

第2図は、一定の屈折率をもつ理想化された誘電体であると仮定した場合の、 Si 環境内での、 SiO_2 の予測された反射率を示す図である。

第3図は、誘電体関数スペクトル (dielectric function spectra) から算出したある範囲の厚みに対する、波長の変化に伴う、 Si 環境内での、 SiO_2 の反射率の実際の変化を示す図である。

第4図および第5図は、それぞれ Si 空洞を含む構造中の、電場の深さ依存性を示す図であ

10

20

30

40

50

る。

第6a図は、本発明の共振空洞検出器（一定比率にはない）を模式的に示す図であり、第6b図は、該デバイスの電場の深さ依存性を示す図である。

第7図は、第二の本発明の共振空洞検出器（一定比率にはない）を示す図である。

第8図は、共振空洞およびコントロールデバイスの頂部表面に垂直に入射したIR輻射に関する、反射率スペクトルを示す図である。

第9a図は、上部表面から照明した該共振空洞検出器およびコントロールに関する絶対応答スペクトルおよび該共振デバイスについての反射率を示す図であり、第9b図は基板側から照明された共振空洞検出器の絶対応答スペクトルおよび反射率を示す図である。

第10図は、有用な波長範囲、 $[8-9] \times 10^{-6} \text{ m}$ において、応答度のピークを与えるように設計された第二の共振空洞検出器の絶対応答スペクトルおよび反射率を示す図である。

第1図を参照すると、波長の変化に伴う、 SiO_2 の屈折率 n および吸光係数 k の変動が示されている。該屈折率における局所的最小値1は、波長約 $9 \times 10^{-6} \text{ m}$ および $20 \times 10^{-6} \text{ m}$ に見られる。該吸光係数における局所的最大値2は、波長約 $9.2 \times 10^{-6} \text{ m}$ および $21.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ に見られる。これらのデータは、ハンドブックオブオプティカルコンスタンツオブソリズ（Handbook of Optical Constants of Solids），EDパリク（Palik）編，アカデミックプレス刊，1985から援用したものである。

第2図は、理想化された誘電体（局所的吸収バンドをもたない）であると仮定した場合の、 $5 \times 10^{-7} \text{ m} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ m}$ の範囲の厚み d_{ox} に対して、波長の関数としての、 SiO_2 の計算された反射率を示す図である。該屈折率は一定とし、透明な波長領域における SiO_2 の特徴的な値を当てた。

波長範囲、 $[7.5-9] \times 10^{-6} \text{ m}$ に対して、該屈折率は波長および厚みの変化に応じて大幅に変動し、かつ僅かに約0.5の最大値を示す。

第3図を参照すると、 $5 \times 10^{-7} \text{ m} \sim 2 \times 10^{-6} \text{ m}$ の範囲の厚み d_{ox} に対する、波長の変化に伴う、 SiO_2 の屈折率の実際の変化を示している。 $d_{ox} > 1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$ に対して、 SiO_2 の反射率は、 $[7.5-9] \times 10^{-6} \text{ m}$ の範囲の波長に対して、該酸化物の厚みに殆ど依存せず、この波長範囲における最大値は約0.76である。これらのデータはJAウーラムカンパニー（Woolam Company），V.A.S.E. インテグレートッドデータアキュジション&アナリシスソフトウェアフォーバリアブルアングルスペクトロスコピックエリプソメトリー（Integrated Data Acquisition and Analysis Software for Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry），バージョン1.3および上記のハンドブックオブオプティカルコンスタンツオブソリズから採用した標準誘電体関数スペクトルを使用して算出した。

第4図は、 $2.4 \times 10^{-6} \text{ m}$ 厚のSi空洞中の、波長 $8 \times 10^{-6} \text{ m}$ の輻射についての、深さ依存性電場の計算値を示す。このグラフの領域3、4、5および6はそれぞれ空気、珪素、 SiO_2 および珪素の層に対応する。従って、前面側（入射側）のリフレクタは、Si / 空気界面であり、かつ該背面リフレクタは SiO_2 ($2 \times 10^{-6} \text{ m}$) / Si界面である。

このグラフの水平軸は、光学的厚みを表し、ここで該構造内の各層の光学的厚みは、 $n_i d_i / \lambda$ で与えられ、ここで n_i および d_i はそれぞれ層 i の屈折率および物理的厚みであり、また λ は共振波長である。

第5図は、 $1.84 \times 10^{-6} \text{ m}$ 厚のSi空洞中の、波長 $8 \times 10^{-6} \text{ m}$ の輻射についての、深さ依存性電場の計算値を示す。このグラフの領域7、8、9、10および11は、それぞれ珪素、 SiO_2 、珪素、金属および空気の層を表す。かくして、前面リフレクタは SiO_2 ($0.8 \times 10^{-6} \text{ m}$) / Si界面であり、かつ背面リフレクタはSi / Al界面である。

第4および5図をえるための計算は、H.A. マクロード（MacLeod）（シンフィルムデザインソフトウェアフォーアップルマッキントッシュバージョン（Thin Film Design Software for Apple Macintosh Version）2.1（1983-1990）および前に言及した標準誘電体関数スペクトルを利用して実施した。

共振空洞用途に対する、埋設型 SiO_2 リフレクタの使用を、 $[7.5-9] \times 10^{-6} \text{ m}$ の範囲の波長をもつ輻射に対する共振空洞赤外検出器製造の説明により、以下に例示しよう。この検出器は多重p-SiGe/Si量子井戸を使用して、入射光を吸収し、かくして該入射輻射エネルギー

10

20

30

40

50

ギーを電気信号に変換する。この共振空洞の目的は、所定の波長範囲における、該入射光と吸収MQWとの結合性を高めることにある。これは、該MQWを、該共振空洞により生成された増強電場領域内に、該MQWを配置することにより行われる。該MQW吸収におけるピークの波長、全空洞幅および該リフレクタは、該入射光と整合するように注意して選択する必要がある。

本例において、これは、該デバイスの設計をもたらす、詳細な理論モデルを使用して達成され、シンエツ半導体社 (Shin-Etsu Handotai Co., Ltd.) から市販品として得たBESOIウエハ上での、該空洞のエピタキシャル成長 (該SiGe/Si MQWおよびドーピングした電気コンタクトを含む) を利用することにより実施した。

次いで、簡単なデバイス構造を作成し、かつ光導電率測定技術を利用して、スペクトル輻射に対するその電氣的応答性を測定した。次に、これらの結果を、スペクトル反射率によって測定される、該共振空洞の光学特性と比較して、非 - 共振型コントロールデバイスと比較した場合の、該空洞の共振波長におけるデバイス性能の増強程度を示した。

該基板は、僅かにドーピングしたSi (約 10^{-6} m) の層の下に埋設された 2×10^{-6} m のSiO₂ 層で構成されていた。その空洞幅は、前に述べたものと同様なソフトウエアパッケージおよび基準誘電体関数スペクトルを使用して、第4および5図を得るのに利用したものと同様な方法で、提案された共振空洞における電場プロファイルをシミュレートし、かつ該SiGeおよびSi層両者におけるドーピング作用を許容 (近似的方法で) することにより、決定した (D.K. シュローダ (Schroder), R.N. トーマス (Thomas) およびJ.C. シュバルツ (Swartz), IEEEトランスアクションズオンエレクトロニクスデバイス (IEEE Transactions on Electron Devices), 1978 (2月), Vol. Ed-25, No. 2, p. 254)。

該MQWの設計は、初期の非 - 共振型デバイスについて実施した測定から選択され、該非 - 共振型デバイスは、 $[10^{-11}] \times 10^{-6}$ m の範囲を遮断した 5×10^{-6} m 以上の輻射に対して光伝導応答を与え、 8×10^{-6} m 近傍にそのスペクトル応答のピークを有していた。一つの共振型デバイスにおいては、上部Si / 空気界面が全部リフレクタを形成し、かつ埋設された酸化物が背後のリフレクタを形成した。この場合、 8×10^{-6} m における共振についての全空洞幅の発見 (該MQW、コンタクト層およびSiスペースを含む) は、金属上の反射防止膜の正確な厚みの測定と等価であると推定された。ここで、該「金属」とは、SiO₂ であり、また該反射防止膜とは該金属上の空洞である (S.L. デリアナニ (Daryanani) およびG.W. テイラー (Taylor), Optical and Quantum Electronics, 1993, 25, p. 123を参照)。

これをソフトウエアを使用して行い、単色光の入射光の反射率を、該共振空洞の厚みを変えることにより最小化する。この選択された厚みは、最も薄い空洞に相当し、そこで該コンタクト層が収容される可能性があった。この活性領域は、20 - 周期のMQWであり、これは約 50×10^{-9} m の厚みのSi障壁層を含み、かつ約 $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ の濃度でアクセプタを含む、厚み約 8×10^{-9} m のSi_{0.87}Ge_{0.13}量子井戸を含んでいた。

第6a図を参照すると、本発明のリフレクタを特徴とする、多重 - 量子井戸IR共振空洞検出器は、BESOI領域12および多重 - 量子井戸領域13を含む。領域12は、順にp⁻ドーピングされたSi基板15と、更にエピタキシャル成長を行うのに適したSi層16の間に挟まれたSiO₂の反射層14を含む。

領域13は、p⁺ドーピングされたSi層18と、更にエピタキシャル成長を行うのに適したSi層19との間に挟まれた、SiGe/Siの多数の層17を含む。これは、電気コンタクト (図示せず) を付着するのに適したp⁺ドーピングされた珪素の層20で覆われている。最適の共振の増大は、頂部表面 (Si / 空気表面) に垂直に入射する、適当な波長の光を使用して達成されるが、吸収は、該空洞の垂直な内面に近接して屈折される垂直でない入射光に対して増強されるであろう。

第6b図を参照すると、前に言及した市販のソフトウエアを使用して得た、第6a図のデバイスの電場のプロファイルが図示されている。

第4および5図におけるように、該水平軸は光学的厚みを表す。

該電場の極大値は、該コンタクト層における吸収のために、約25%減衰され、 30 Vm^{-1} と 35 Vm^{-1} との間にピーク強度を有する。等価なSi基板における該ピーク電場は、 12.5 Vm^{-1} であ

10

20

30

40

50

り、これは、該共振および非共振事象における該電場の比の二乗により与えられるように、5～8倍の電場強度の増強を示す。この例において、ピーク21は第6a図に示したMQW領域17と一致する。

第7図を参照すると、同様な参照番号を、第6a図に示したものに対応する層を表すのに使用する。アルミニウム電気コンタクト22は p^+ ドーピングされた層18および20に取付けられている。

第二の共振デバイスを、同一のエピタキシャル構造を利用して、基板側から垂直に入射する輻射を検出するように作成した。この場合、 2×10^{-6} mの埋設された酸化物が、該空洞の前部リフレクタを形成し、かつAlを該エピタキシャル層のSi表面上に堆積して、背面のリフレクタを形成した。該入射光に暴露された該基板の表面は、研磨されて、透過率が改善されているが、反射防止被膜は適用されていなかった。

等価な活性MQWおよびコンタクト構造を、 p^+ -Si基板上にエピタキシャル成長させ、非共振型のコントロールデバイスを作成した。

該活性デバイス層は、超高真空バックグラウンドを利用して、ステンレススチール反応器内で、低圧気相エピタキシー（Low Pressure Vapour Phase Epitaxy: LPVPE）によって成長させた。使用したガス源は、SiおよびSiGeエピタキシャル層（エピ層）に対しては、シランおよびゲルマンであり、 p -型ドーピングのためにジボランが含まれていた。これらの源を、典型的には13-130Paの圧力で、水素と混合した。表面酸化物は、900-920℃にて脱着され、かつ 5×10^{-8} mのSiバッファを750℃にて堆積させた。該デバイス層の成長は、名目上は610℃にて実施した。

第8図を参照すると、該デバイス空洞における光学的共振の存在が、該デバイスのスペクトル反射率における最小値を観察することにより確定された。成長直後（as-grown）の共振空洞上の反射率スペクトルは、100%標準として金を使用したパーキン-エルマー（Perkin-Elmer）983G赤外分光光度計を使用して測定した。該上部面に垂直に入射する光を使用し、またスペクトルは、該ウエハの中心23、中心+0.01m 24および中心+0.02m 25において得た。共振の生ずる波長は、該共振空洞の反射率がコントロール27の反射率よりも低い領域26におけるものとして同定した。該測定位置は、該共振デバイスウエハの中心から、更に移動されるので、該共振はより低波長側にシフトする。

これは、成長中の該ウエハ温度における放射方向の変動により生ずる、該基板を横切る該空洞幅の変化によるものである。

多数の共振の存在および該共振空洞の幅を利用する同調性両者が、第8図において明らかにされている。

このデバイスは、該基板の中央部近傍の 8×10^{-6} mに中心をもつ空洞共振を与えるように設計された。第8図において、これは 7.25×10^{-6} m 26bにシフトされていることが分かる。これは、該基板内における埋設された SiO_2 層の存在に基づくものであり、その存在はバルクSi基板に比して、該BSOIウエハの放射率を変える。この放射率は、エピ層の堆積中の該ウエハの温度を測定するのに利用され、かくしてこの共振空洞デバイスは、意図した温度610℃よりも僅かに低い温度にて成長した。結果として、該空洞は予想よりも薄く、これはより短波長で共振する。

該基板の中心近傍の厚みは、該デバイスを得るのに使用した、未ドーブのSiおよび SiO_2 に対する層屈折率を使用し、前に述べた市販のソフトウエアを利用し、該反射スペクトルをモデル化することにより測定した。得られた厚みは、約 3.2×10^{-6} mであり、該設計値より 0.37×10^{-6} m小さな値であった。この補正した空洞の厚みを利用して、該デバイス構造の電場プロファイルを、各波長においてモデル化し、そこにおける反射率の最小値を観測した。共振のために、該空洞における増強された電場を与えるものの中で、最大の増強は 7.25×10^{-6} mにおけるものであった。

所定の波長範囲 $[7.5-9] \times 10^{-6}$ mにおける、頂部表面についての主な共振の位置を変えるためには、該エピタキシャル成長条件を調節して、厚み 3.57×10^{-6} mの空洞を形成することだけが必要とされる。また、より薄い空洞内での該共振位相条件を、該基板側から照明し、該頂部Si表面上に堆積されたAlのブラックリフレクタを使用して、変更することが

できる。

従って、該ウエハの中心部近傍の対応する空洞共振は、 $7.8 \times 10^{-6} \text{ m}$ に中心をもつ。

これら原理に基づいて、共振空洞検出器の動作を明らかにするために、簡単な光伝導デバイスを、該共振空洞およびコントロールサンプル両者から製造した。これらのデバイスは、蒸着Alを使用して作成した電気コンタクトをもつメサ構造体であった。以下の段階を利用して、酸化物ブラックリフレクタを備えた作動空洞デバイスおよび頂部表面照射用のコントロールデバイスを製造した。

i) ウエハの劈開により得た各サンプルの一片から、希薄HF溶液を使用して、その表面酸化物を除去した。この工程を、メサエッチングの前およびAlの蒸着前に、繰り返した。該サンプルをメタノール中に浸漬して、後の加工工程前の、再度の酸化を防止した。

ii) 次いで、ワックスのドットを該表面に適用し、径約2 mmのエッチングマスクを形成した。これらが該メサ領域を画成する。

iii) 高さ約 $3 \times 10^{-6} \text{ m}$ のメサを、30mlの0.825M濃度の Cr_2O_3 溶液および20mlの40% HFを含む水性エッチング溶液を使用して、形成した。

iv) 該ワックスのマスクを除去し、Alを該サンプル表面上に蒸着した。

v) 次いで、2つのワックスドットを該Al蒸着膜上に適用して、2つの電気コンタクトを画成した。各デバイス上で、一つのコンタクトは該メサ表面の頂部にあり、該メサ領域の大部分を正常なままに維持して、入射光の該空洞への入射を可能とした。第二のコンタクトは、該エッチングされた表面上にあり、該MQW活性領域の下部に電気コンタクトを形成する。

vi) 次いで、Alエッチング液を使用して、不要なAlを除去した。次いで、該ワックスを除去した。

vii) 次に、該サンプルを、窒素雰囲気内で385 °Cにて5分間加熱して、該Al中での合金化により、オームコンタクトを与えた。

viii) 次いで、該サンプルを個々のパッケージに搭載し、かつ電気コンタクトを、該Alコンタクトと、該パッケージの適当な部分とをボールボンディングすることにより形成した。

第9a図を参照すると、頂部表面照明による、コントロールデバイスおよび該共振空洞デバイスの光導電率測定を、温度20Kにて実施した。相対的応答性スペクトルは、単色光赤外輻射に対する、各サンプルのスペクトル応答を、パイロ電気検出器の同様な輻射に対する応答で割ることにより得た。ここで、該パイロ電気検出器は、対象とする波長域に渡り、一定の応答を示すものと仮定される。

該単色光の輻射は、格子モノクロメータおよび適当なロングパスフィルタを通過させたグローバー源により与えられる。この輻射は裁断された。該サンプルからの電気信号が、プリアンプを介して、基準周波数として使用した、入射光のチョッパー周波数をもつロックイン増幅器に供給される。該パイロ電気検出器からの信号は、直接該ロックイン増幅器に供給される。このロックイン出力のスペクトル依存性を、光伝導度スペクトル列として記録した。

絶対応答度スペクトルは、500Kの黒体オープンによる光電流測定を利用して、該相対的応答度から得た。該共振空洞デバイス28および該コントロール29両者に関する絶対応答度スペクトルは、第9a図に示されており、ここで該スペクトルは該共振空洞サンプルからの基準30と比較されている。該数値は、赤外検出器が、共振により増強された動作をもつことを立証している。該コントロールサンプルと比較した場合に、該共振空洞デバイスの、ピークをもつ構造および応答度における著しい増強が明らかである。

該共振空洞デバイスの応答度においては、同一の構造について測定した反射率と比較することにより、 $7.25 \times 10^{-6} \text{ m}$ なるピーク31が、該波長をもつ入射光の空洞共振によって発生することを理解することができる。反射率における局所的最小値32が、該波長において見られる。共振による該応答度ピーク31は、屈折率における局所的最小値と関連した、該 SiO_2 リフレクタの増強された反射率による、他の波長におけるピーク33、34および35よりも強力である。

Alブラックリフレクタと、基板側の照明に対する埋設された酸化物製前部リフレクタを備えた、作動空洞デバイスを製造するために、以下の段階を利用した。

i) 該BESOI基板上的の該共振空洞サンプルの一片は、透過性を改善するために研磨された、該基板の粗い底部表面を有していた。この研磨表面はワックスにより保護された。

ii) 酸化物を、希薄なHF溶液を使用して、該頂部表面から除去した。メサエッチングの前におよびAl蒸着前に、この段階を繰り返す。このサンプルをメタノールに浸漬して、後の加工段階に先立つ、表面の再度の酸化を阻止できる。

iii) 該頂部表面にAlを蒸着し、次いでワックスドットを該表面に適用して、径約2mmのエッチングマスクを形成した。これらは該メサ領域を画成し、かつ頂部コンタクトが該領域全体を覆っていた。

iv) 露出しているAlをエッチングにより除去し、高さ約 3×10^{-6} mのメサを、30mlの0.825M濃度の Cr_2O_3 溶液および20mlの40% HFを含む水性エッチング溶液を使用して、形成した。

v) 第二のAl層を、該表面上に蒸着し、かつワックスドットを該エッチング領域に適用して、該底部コンタクトを画成した。

上記の段階vi)、vii)およびviii)を実施した。但し、搭載用パッケージに孔を開けて、該研磨表面側からの照明を可能とした。

第9b図を参照すると、第9a図に記載のように、20Kにて行った絶対応答度測定36を、該共振空洞の基板側照明に対する反射率スペクトル37と比較する。該基準37は第9a図におけるよりも大きく、これは主として高度に反射性のAlブラック層によるものである。 7.8×10^{-6} mにおける反射率38の最小値が存在し、これは SiO_2 前部リフレクタとAlブラックリフレクタとの組み合わせが、第9a図における最小値32と比較して、該空洞共振を長波長側に移動することを示している。

該空洞共振に関連した、第9b図における光導電性応答度36は、該所定の波長範囲内の、 7.5×10^{-6} mに39を示す。このピーク応答度の絶対的大きさは、 SiO_2 / SiおよびSi / 空気リフレクタ対と比較して、 SiO_2 / SiおよびSi / Alリフレクタ対に対する電場強度のより大きな増強のために、第9a図に示した頂部照明された空洞デバイスのピーク31に対するピーク応答度の大きさよりも大きい。

この効果は、第4図と比較して、第5図における該空洞内の、より高い計算されたピーク電場において明らかである。

第9b図における該応答度ピーク39は、厚み 2×10^{-6} mの前部 SiO_2 リフレクタにおける吸収による入射光の減衰のために、応答度37における該最小値38と同一の波長では起こらない。ピーク応答度の更なる増強は、この構造における該誘電体前部リフレクタの最適化により達成可能であるはずである。

第10図は、第9a図のデバイスを誘導した方法と同一の方法で製造したもう一つのデバイスについての、光導電率測定を示す図である。このデバイスは約 4.1×10^{-6} mの厚みをもつ空洞を有し、これはその頂部表面において照明される。このデバイスの絶対応答度スペクトル40が、測定された反射率41およびシミュレートされた反射率42（前に記載したものと同様な方法により）両者と共に示されている。測定は、2Vバイアスにて実施した。

第10図は、該デバイスが、該有用な波長範囲 $[8-9] \times 10^{-6}$ mにおける応答度にピーク43をもつことを示している。ピーク43は、反射率の最小値44と一致している。

10

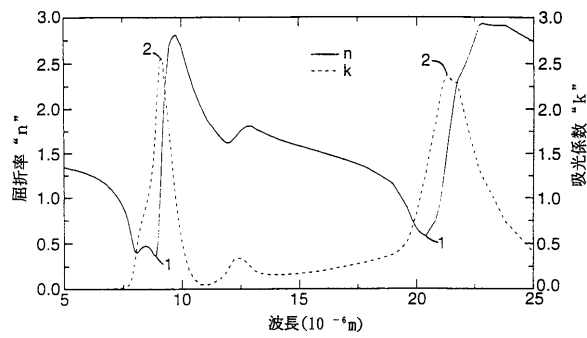
20

30

40

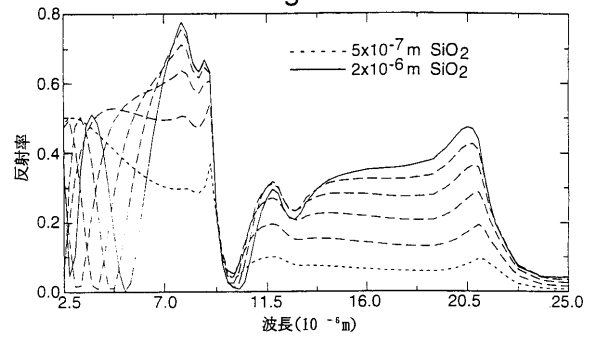
【図 1】

Fig.1.



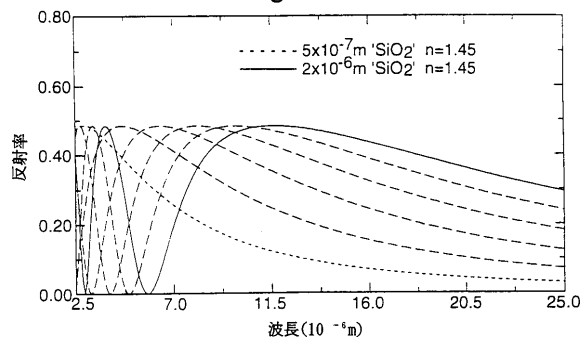
【図 3】

Fig.3.



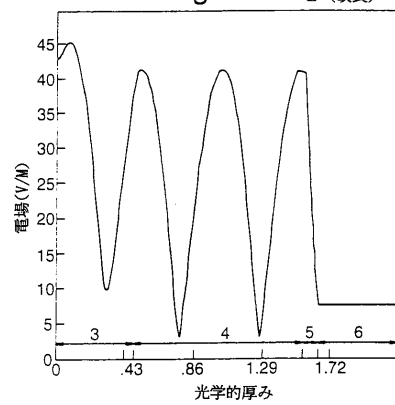
【図 2】

Fig.2.



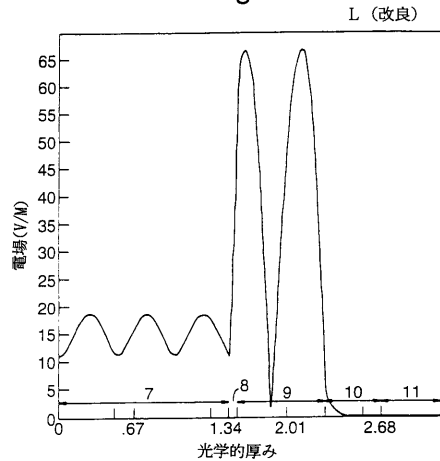
【図 4】

Fig.4.



【図 5】

Fig.5.



【図 6】

Fig.6a.

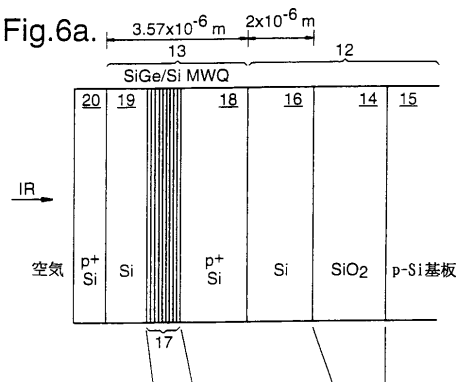
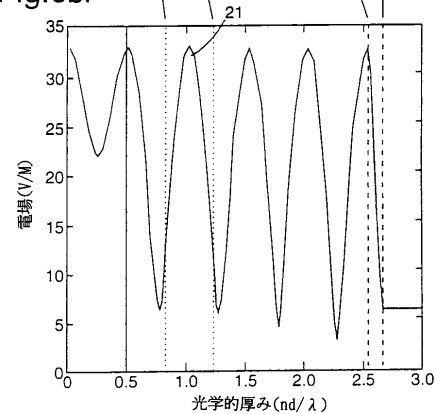
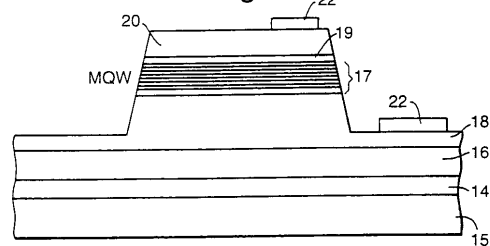


Fig.6b.



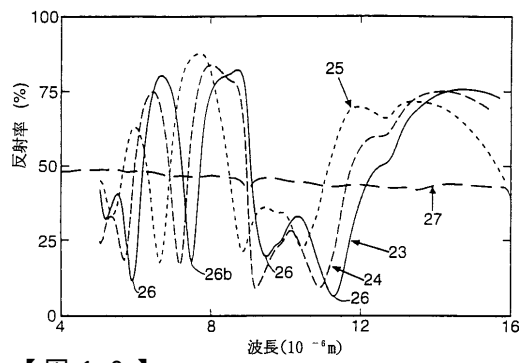
【図 7】

Fig.7.



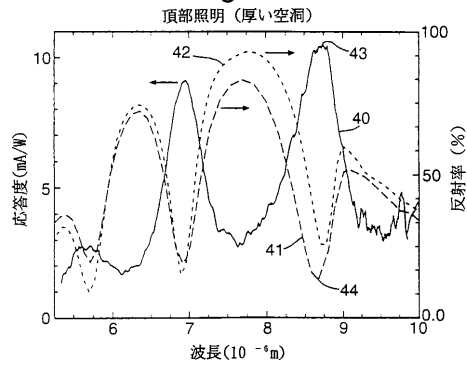
【図 8】

Fig.8.



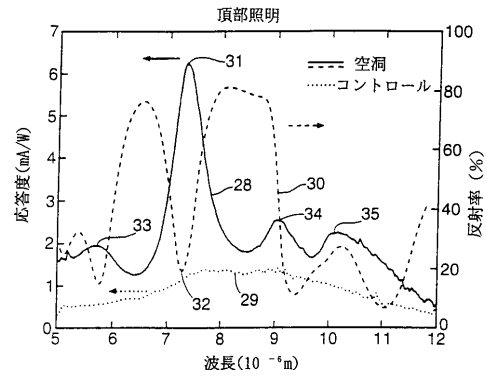
【図 10】

Fig.10.



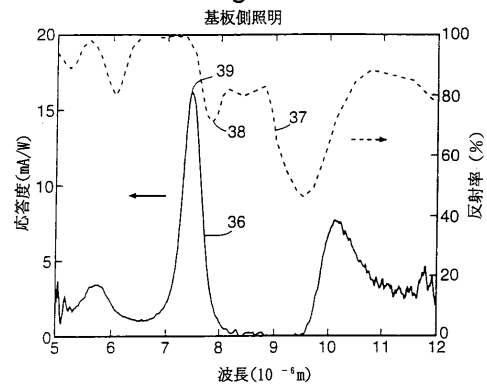
【図 9 a】

Fig.9a.



【図 9 b】

Fig.9b.



フロントページの続き

(74)代理人 100084009

弁理士 小川 信夫

(74)代理人 100086771

弁理士 西島 孝喜

(74)代理人 100084663

弁理士 箱田 篤

(72)発明者 カーリン ロジャー ティモシー

イギリス国 ウースターシャー ダブリューアール14 3ピーエス モルヴァーン セント ア
ンドリュース ロード (番地なし) ディフェンス リサーチ エージェンシー

(72)発明者 ロビンス ディヴィッド ジョン

イギリス国 ウースターシャー ダブリューアール14 3ピーエス モルヴァーン セント ア
ンドリュース ロード (番地なし) ディフェンス リサーチ エージェンシー

合議体

審判長 稲積 義登

審判官 山村 浩

審判官 吉野 公夫

(56)参考文献 特開平7-74240(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)

H01L31/00-31/119