

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4922611号
(P4922611)

(45) 発行日 平成24年4月25日(2012.4.25)

(24) 登録日 平成24年2月10日(2012.2.10)

| | | | |
|---------------|-----------|---------------|-------|
| (51) Int.Cl. | | F I | |
| HO 1 L 33/28 | (2010.01) | HO 1 L 33/00 | 1 8 2 |
| C 2 3 C 14/08 | (2006.01) | C 2 3 C 14/08 | C |
| HO 1 L 21/363 | (2006.01) | C 2 3 C 14/08 | D |
| HO 1 S 5/327 | (2006.01) | HO 1 L 21/363 | |
| | | HO 1 S 5/327 | |

請求項の数 10 (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2005-372927 (P2005-372927)
 (22) 出願日 平成17年12月26日(2005.12.26)
 (65) 公開番号 特開2007-173739 (P2007-173739A)
 (43) 公開日 平成19年7月5日(2007.7.5)
 審査請求日 平成20年12月26日(2008.12.26)

(73) 特許権者 803000115
 学校法人東京理科大学
 東京都新宿区神楽坂一丁目3番地
 (74) 代理人 100094547
 弁理士 岩根 正敏
 (72) 発明者 趙 新為
 東京都新宿区神楽坂1丁目3番地 学校法人東京理科大学内
 審査官 土屋 知久

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 酸化亜鉛光デバイス、酸化亜鉛光デバイスの製造方法、および酸化亜鉛光デバイスの利用方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

一方の面に導電薄膜が設けられた p 型シリコン単結晶基板と、上記 p 型シリコン単結晶基板の他方の面に p n 接合された n 型酸化亜鉛薄膜と、上記 n 型酸化亜鉛薄膜の上記 p 型シリコン単結晶基板と反対側の面に形成された第 1 の光透過性導電薄膜とを備える酸化亜鉛光デバイスにおいて、上記 n 型酸化亜鉛薄膜が、酸化亜鉛を、上記 p 型シリコン単結晶基板の (1 0 0) 面上に、Y A G レーザー光によるレーザー・アブレーションの技術を用いて沈積させ、酸素雰囲気中で 6 0 0 ~ 8 0 0 でアニール (第 1 のアニール) して形成された n 型酸化亜鉛薄膜であることと、上記第 1 の光透過性導電薄膜が、I T O を、上記 n 型酸化亜鉛薄膜上に、Y A G レーザー光によるレーザー・アブレーションの技術を用いて積層させ、上記第 1 のアニールより低い温度で、不活性気体雰囲気中でアニール (第 2 のアニール) して形成された第 1 の光透過性導電薄膜であることと、上記導電薄膜が、上記 p 型シリコン単結晶基板に真空蒸着されたアルミニウムの薄膜であることとを特徴とする、酸化亜鉛光デバイス。

【請求項2】

上記 n 型酸化亜鉛に希土類元素がドーブされていることを特徴とする、請求項 1 に記載の酸化亜鉛光デバイス。

【請求項3】

上記希土類元素がエルビウムであることを特徴とする、請求項 2 に記載の酸化亜鉛光デバイス。

【請求項 4】

上記希土類元素の濃度が、0.05 wt% から 5 wt% の範囲であることを特徴とする、請求項 2 に記載の酸化亜鉛光デバイス。

【請求項 5】

一方の面に導電薄膜が設けられた p 型シリコン単結晶基板と、上記 p 型シリコン単結晶基板の他方の面に p n 接合された n 型酸化亜鉛薄膜と、上記 n 型酸化亜鉛薄膜の上記 p 型シリコン単結晶基板と反対側の面に形成された第 1 の光透過性導電薄膜とを備える酸化亜鉛光デバイスの製造方法において、YAG レーザー光を照射し、レーザー・アブレーションの技術を用いて、p 型シリコン単結晶基板の (100) 面に酸化亜鉛を沈積させ、その後、酸素雰囲気中で 600 ~ 800 でアニール (第 1 のアニール) して、n 型酸化亜鉛薄膜を形成する工程と、その後、ITO のペレットに YAG レーザーを照射し、レーザー・アブレーションの技術で ITO を上記 n 型酸化亜鉛薄膜上に積層させ、続いて、上記第 1 のアニールより低い温度で、不活性気体雰囲気中でアニール (第 2 のアニール) して、第 1 の光透過性導電薄膜を形成する工程と、次に、上記 p 型シリコン単結晶基板の上記 n 型酸化亜鉛薄膜及び第 1 の光透過性導電薄膜が形成された面と反対側の面に、アルミニウムの薄膜を真空蒸着し、上記導電薄膜を形成する工程とを含むことを特徴とする、酸化亜鉛光デバイスの製造方法。

10

【請求項 6】

上記酸化亜鉛光デバイスに順電圧を印加し、500 nm から 900 nm の波長の光を発光させることを特徴とする、請求項 3 に記載の酸化亜鉛光デバイスの利用方法。

20

【請求項 7】

上記酸化亜鉛光デバイスに順電圧を印加し、1180 nm の波長の光を発光させることを特徴とする、請求項 3 に記載の酸化亜鉛光デバイスの利用方法。

【請求項 8】

上記酸化亜鉛光デバイスに逆電圧を印加し、536 nm、556 nm、665 nm、980 nm の波長の光を発光させることを特徴とする、請求項 3 に記載の酸化亜鉛光デバイスの利用方法。

【請求項 9】

上記酸化亜鉛光デバイスに逆電圧を印加し、1540 nm の波長の光を発光させることを特徴とする、請求項 3 に記載の酸化亜鉛光デバイスの利用方法。

30

【請求項 10】

請求項 3 に記載の酸化亜鉛光デバイスにおける、上記真空蒸着されたアルミニウムの薄膜が導電ストライプであることと、上記 p 型シリコン単結晶基板の両端に設けられた共振用鏡面を備えることと、上記 p n 接合に順電圧を印加させてレーザー発振をさせることを特徴とする、請求項 3 に記載の酸化亜鉛光デバイスの利用方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、酸化亜鉛薄膜に電流を流すことにより発光させる酸化亜鉛光デバイス、酸化亜鉛光デバイスの製造方法、および酸化亜鉛光デバイスの利用方法に関するものである。

40

【背景技術】

【0002】

特許文献 1 には、単結晶 p 型シリコン基板に酸化亜鉛をヘテロエピタキシャル成長させる方法として、シリコン単結晶の酸化膜をフッ酸で除去してから、スパッタリング技術で酸化亜鉛を堆積してバッファを形成し、そのバッファの上に、アセチルアセトン亜鉛を用いて酸化亜鉛薄膜を気相成長させる方法が開示されている。

【0003】

また、特許文献 1 には、シリコン基板上に酸化亜鉛薄膜を形成することができたときには、シリコン加工技術を使い新規なデバイスを作ることができる等の多大な利点があると述べると同時に、それを実現することの困難性が述べられている。

50

【 0 0 0 4 】

さらに、特許文献 1 には、先行技術として、M . S H I M I Z U 等による、気相成長法により p 型シリコン上に酸化亜鉛薄膜が形成でき、その間に p n 接合が形成されたとの報告がある旨、さらには、A . M I Y A K E 等による、シリコン基板の上に硫化亜鉛を形成し、これを酸素中でアニールすることにより酸化亜鉛薄膜を形成したとの報告がある旨を述べている。

【 0 0 0 5 】

一方、本発明者等が、非特許文献 1 に、「エルビウムをドーブした酸化亜鉛の薄膜中の光学活性中心の局所構造分析」を報告し、また、非特許文献 2 に、「シリコン基板上へのエルビウムをドーブした酸化亜鉛の薄膜の製作、及び光遷移の機構」を報告している。

10

【 0 0 0 6 】

【特許文献 1】特開 2 0 0 3 - 3 1 8 4 6 号公報

【非特許文献 1】J. Appl. Phys. 89(7) 3678 (01 Apr 2001)

【非特許文献 2】J. Luminescence 87-89 (2000) 1254-1256

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 7 】

ここで、酸化亜鉛は光デバイスとしてよく知られている。他方、シリコン基板については高度なシリコン加工技術がある。これ故、シリコン基板の上に p n 接合を形成しながら酸化亜鉛薄膜を形成できると、新規な光集積回路を作ることができると期待されている。しかし、シリコン基板と酸化亜鉛薄膜の間に p n 接合を、容易かつ安価に形成する方法は未だ知られていない。

20

【 0 0 0 8 】

一方、光デバイスが表示用に使われる場合は、そのようなシリコン基板上の光集積回路を、可視光領域で発光させる必要がある。従って、そのような光デバイスは、可視光で発光する光デバイスとして使えることが望まれる。

【 0 0 0 9 】

他方、通信用に使われる場合は、そのような光集積回路に使われる光の周波数は、下記の二つの観点から選ばれる。

その第 1 は、信号の高速処理のために光通信を高速化できる周波数を選ぶ。このためには、光ファイバの屈折率の分散が小さい 1 2 0 0 n m 程度の波長の光を使う必要があり、この帯域で発光する光集積回路用の光デバイスと半導体レーザーが望まれる。

30

その第 2 は、遠距離用光通信のために光ファイバでの損失をできるだけ小さくする。このために、波長が 1 5 0 0 n m 程度の光を使う必要があり、この帯域で発光する光集積回路用の光デバイスと半導体レーザーが要望される。

【 0 0 1 0 】

さらには、緑色で発光する光デバイスと半導体レーザーを、安価に製造する技術が要望されている。

【 0 0 1 1 】

本発明は、上記した課題を、再現可能性をもって、かつ安価に実現し得る光デバイスを提案することにある。

40

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 2 】

上記した課題は、請求項 1 に記載の酸化亜鉛光デバイスによって解決された。

即ち、一方の面に導電薄膜が設けられた p 型シリコン単結晶基板と、上記 p 型シリコン単結晶基板の他方の面に p n 接合された n 型酸化亜鉛薄膜と、上記 n 型酸化亜鉛薄膜の上記 p 型シリコン単結晶基板と反対側の面に形成された第 1 の光透過性導電薄膜とを備える酸化亜鉛光デバイスにおいて、上記 n 型酸化亜鉛薄膜が、酸化亜鉛を、上記 p 型シリコン単結晶基板の (1 0 0) 面上に、Y A G レーザー光によるレーザー・アブレーションの技術を用いて沈積させ、酸素雰囲気中で 6 0 0 ~ 8 0 0 でアニール (第 1 のアニール) し

50

て形成された n 型酸化亜鉛薄膜であることと、上記第 1 の光透過性導電薄膜が、ITO を、上記 n 型酸化亜鉛薄膜上に、YAG レーザー光によるレーザー・アブレーションの技術を用いて積層させ、上記第 1 のアニールより低い温度で、不活性気体雰囲気中でアニール（第 2 のアニール）して形成された第 1 の光透過性導電薄膜であることと、上記導電薄膜が、上記 p 型シリコン単結晶基板に真空蒸着されたアルミニウムの薄膜であることとを特徴とする酸化亜鉛光デバイスによって解決された。

この光デバイスは、酸素雰囲気の中で、シリコン基板と酸化亜鉛薄膜の間に p n 接合を作ることができるという特徴を有する。特に、請求項 2、3、4 に記載されているように希土類、特にエルビウムをドーブした酸化亜鉛を用いると、p n 接合が確実に形成され、同時に、酸化亜鉛の微結晶の結晶性も良くなる。そして、その結果として、電気光学的特性も改善される。

10

【0013】

また、請求項 5 に記載の製造方法によりこの光デバイスを製造することができる。

即ち、一方の面に導電薄膜が設けられた p 型シリコン単結晶基板と、上記 p 型シリコン単結晶基板の他方の面に p n 接合された n 型酸化亜鉛薄膜と、上記 n 型酸化亜鉛薄膜の上記 p 型シリコン単結晶基板と反対側の面に形成された第 1 の光透過性導電薄膜とを備える酸化亜鉛光デバイスの製造方法において、YAG レーザー光を照射し、レーザー・アブレーションの技術を用いて、p 型シリコン単結晶基板の (100) 面に酸化亜鉛を沈積させ、その後、酸素雰囲気中で 600 ~ 800 でアニール（第 1 のアニール）して、n 型酸化亜鉛薄膜を形成する工程と、その後、ITO のペレットに YAG レーザーを照射し、レーザー・アブレーションの技術で ITO を上記 n 型酸化亜鉛薄膜上に積層させ、続いて、上記第 1 のアニールより低い温度で、不活性気体雰囲気中でアニール（第 2 のアニール）して、第 1 の光透過性導電薄膜を形成する工程と、次に、上記 p 型シリコン単結晶基板の上記 n 型酸化亜鉛薄膜及び第 1 の光透過性導電薄膜が形成された面と反対側の面に、アルミニウムの薄膜を真空蒸着し、上記導電薄膜を形成する工程とを含むことを特徴とする、酸化亜鉛光デバイスの製造方法によって製造することができる。さらに、請求項 6 に記載のように、順方向電圧を印加することにより、または、請求項 8 に記載のように、逆方向電圧を印加することにより、可視光で発光させる表示用の光デバイスとすることができる。

20

【0014】

また、請求項 7 に記載のように、順方向電圧を印加すると、光ファイバの屈折率の分散が小さい周波数領域で、光デバイスを発光させることができる。また、請求項 9 に記載のように、逆方向電圧を印加すると、赤外領域で発光させることができ、特に、1540 nm の波長の光を使うと、光ファイバの損失が小さい周波数領域で、光デバイスを動作させることができる。

30

【0015】

更にまた、請求項 10 に記載のように、請求項 3 に記載の酸化亜鉛光デバイスにおける、上記真空蒸着されたアルミニウムの薄膜が導電ストライプであることと、上記 p 型シリコン基板の両端に設けられた共振用鏡面を備えることと、上記 p n 接合に順電圧を印加させてレーザー発振をさせることを特徴とする、請求項 3 に記載の酸化亜鉛光デバイスの利用方法に従って、導電ストライプと共振用鏡面を設け、反転状態が発生するように順電圧を印加すると、1180 nm に発光し、逆電圧を印可すると、緑色と 1540 nm に発光する半導体レーザーを実現することができる。

40

【発明の効果】

【0017】

上記した本発明によれば、シリコン基板と酸化亜鉛薄膜の間に p n 接合を容易かつ安価に形成でき、p n 接合における電子・正孔対消滅に起因する発光、および、希土類元素、特にエルビウムのエネルギー準位間遷移に起因して発光する光デバイスを容易に実現することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

50

【 0 0 1 8 】

以下、上記した本発明に係る酸化亜鉛光デバイスの構造及び製作方法等を、詳細に説明する。

【 0 0 1 9 】

< 構造 >

図 1 は、本発明に係る酸化亜鉛光デバイスの好ましい実施の形態を示した概念的斜視図である。

図示したように、p型シリコン単結晶 1 の下面には、一方の電極として使われるアルミニウム薄膜 2 が設けられ、上面には、n型酸化亜鉛薄膜 3 が形成されている。そして、上記酸化亜鉛薄膜 3 の上面には、他方の電極として使われる光透過性導電薄膜 4 が、ITO (Indium Tin Oxide)によって形成されている。

10

なお、上記n型酸化亜鉛薄膜 3 には、希土類元素（エルビウム、イットリウム、ハフニウム等）をドーピングしない場合と、ドーピングした場合がある。また、ITOは、光透過性電気導体として周知のものであるため、ここではその説明を省略する。

【 0 0 2 0 】

< 製作 >

図 2 は、図 1 の酸化亜鉛光デバイスの製作方法の一例のフローチャートである。

本発明の酸化亜鉛光デバイスにおいては、次の手順で、酸化亜鉛薄膜とp型シリコン基板の間にpn接合を形成させる。

なお、以下にエルビウムをドーピングした酸化亜鉛を用いる場合について説明するが、他の希土類元素をドーピングした場合、および希土類元素をドーピングしない場合も同様である。

20

【 0 0 2 1 】

STEP 1 : エルビウムをドーピングした酸化亜鉛ペレットにYAGレーザー光を照射し、レーザー・アブレーションの技術を用いて、p型シリコン単結晶基板の(100)面に、エルビウムをドーピングした酸化亜鉛を沈積させる。その厚さは、200~500nm程度である。この際、レーザー・アブレーションを行う真空室に約 1×10^{-3} Torrの酸素を封じ込めておく。

【 0 0 2 2 】

STEP 2 : 酸素雰囲気中で600~800、好ましくは700程度で、数分間、例えば3分間アニールする。このアニールは、発光を良くするためのものである。STEP 1 でレーザー・アブレーションで積層された状態では、エルビウムの近くに5個の酸素原子があるが、アニールをすることにより対称性が C_{4v} に変わり、6個の酸素原子を引き付けるようになり、その結果、酸化亜鉛中に酸素欠乏箇所が増え、n型が形成しやすく、かつ酸化亜鉛とエルビウムの発光が強くなるものと考えられる。

30

【 0 0 2 3 】

STEP 3 : 次に、透明電極として、ITO (Indium Tin Oxide)を酸化亜鉛の他の面にレーザー・アブレーションの技術で積層させる。ITOのペレットにYAGレーザーを照射し、真空室の酸素分圧を約 1×10^{-3} Torrに保ちながらITOを上記酸化亜鉛薄膜の上に約70nm積層させる。

【 0 0 2 4 】

STEP 4 : 続いて、STEP 2におけるアニールより低い温度、例えば400~600程度で、不活性気体、例えば窒素雰囲気中で、例えば5分間アニールする。

40

【 0 0 2 5 】

STEP 5 : 次に、上記シリコン基板の裏面に、アルミニウムの薄膜（厚さ約100nm）を真空蒸着で形成する（蒸着時の真空度は約 1×10^{-6} Torrで、基板の温度は約250）。

【 0 0 2 6 】

STEP 6 : マスキング法、腐食法等により、上記工程の途中において、あるいは上記工程の後に、上記ITO薄膜とアルミニウム薄膜を電極用の形状に形成し、リード線をそれらの電極に接続しておく。実験用には、銀ペーストを用いて、リード線を接続してもよい

50

。この際、当然にオーミック(Ohmic) 接続が要求される。

【 0 0 2 7 】

なお、上記STEP 2 のアニールを省略して、上記STEP 4 のアニールだけとすることも可能である。

【 0 0 2 8 】

< I T O >

上記のようにして作られた図 1 の酸化亜鉛光デバイスの特性を調べる前に、先ず、光透過性電極として使われる I T O 層の特性を調べた。

【 0 0 2 9 】

I T O 層の特性を評価するために、評価用 I T O 層を石英(Quartz)の上に形成したものを作成し、特性を評価した。形成条件は、基板を石英に変えただけで、図 1 の酸化亜鉛光デバイスにおける I T O 層と同じである。ただし、アニール温度は 3 0 0 、 4 0 0 、 5 0 0 、 6 0 0 と変えたものを作成した。

【 0 0 3 0 】

図 3 の、3 0 0 でアニールした I T O 層の X 線回折スペクトルから、I T O が結晶化していることが分る。

I T O 層の電気的特性は、図 4 に概念的に示されている電気回路で測定された。図 5 は、市販のガラスの上に形成された I T O 層、本実験で石英の上に形成された 7 0 n m の I T O 層、およびシリコン基板について、図 4 の電気回路の電流を変えたときの測定電圧を示すグラフである。この測定結果から、次のように評価された。

【 0 0 3 1 】

$$s = (V / I) \times (w / I n^2) = 22 \times 4.45 = 99.66 \text{ (} \Omega / \text{cm}^2 \text{)}$$

$$w / s = 70 \text{ nm} / (1 \times 10^6 \text{ nm}) = 7 \times 10^{-5} \text{ F (w / s)}$$

$$= s \cdot w \cdot F (w / s) = 99.66 \times 70 \text{ nm} \times 1$$

$$= 7 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

上記計算式から、I T O の比抵抗は、 $7 \times 10^{-4} \text{ cm}$ であった。この値は、金属よりは電気抵抗は大きい、電極用導体として充分使えることが分る。また、市販のものよりよいことも分る。

【 0 0 3 2 】

図 6 は、石英の上に形成された、厚さ 7 0 n m の I T O 層にアニールを施さない場合 (a) と、アニールを施した場合 (b) の、光透過率スペクトルである。このスペクトルは、5 0 0 で 5 分間のアニールのものである。可視光領域と、近赤外領域でほぼ均一な高い光透過率が認められる。

【 0 0 3 3 】

図 7 は、石英の上に形成された、厚さ 7 0 n m の I T O 層にアニールを施さない場合 (丸印) と、施した場合 (四角印) の、電流・電圧特性の測定値を示すグラフである。いずれの場合も、オーミック(Ohmic) ・コンタクトが形成されていることが分る。アニールを施すと、電気抵抗が少なくなることも分る。

【 0 0 3 4 】

図 8 は、石英の上に形成された、厚さ 7 0 n m の I T O 層にアニール温度を変えてアニールを施した場合の、電気抵抗 (丸印) と、波長 3 2 5 n m の光の透過率 (四角印) と、波長 1 5 4 0 n m の光の透過率 (菱形) の測定値を示すグラフである。アニール温度が高い程、電気抵抗が小さく、透過率が高いことが分る。

【 0 0 3 5 】

< ダイオード特性 >

続いて、製作された酸化亜鉛光デバイスに対し、図 1 に示すようにアルミニウム電極と I T O 電極の間に電圧を印加して、本発明に係る酸化亜鉛光デバイスの特性を調べた。

なお、順方向に電圧を印加するとは、図 9 (a) に示すように p 型シリコン 2 側から n 型酸化亜鉛 3 の方向に電流が流れるように電圧を印加することを言い、逆方向に電圧を印加するとは、図 9 (b) に示すように n 型酸化亜鉛 3 側から p 型シリコン 2 の方向に電流

10

20

30

40

50

が流れるように電圧を印加することを言う。

【0036】

図1の酸化亜鉛光デバイスの電圧/電流特性を、図1の回路で測定した結果を、図10に示す。図10のグラフは典型的なダイオード特性を示し、図1の酸化亜鉛光デバイスのp型シリコン基板と酸化亜鉛薄膜の間にpn接合が形成されていることを示している。

なお、図10は、エルビウムをドーピングしている場合を示すが、ドーピングしていない場合も同様な結果であった。

【0037】

<順方向電圧特性>

本発明に係る酸化亜鉛光デバイスについて、図11の測定システムを用いて、発光特性を測定した。この測定システムの概略は、次の通りである。

まず、発信器からのクロック信号に同期して試験電圧が増幅器を介して試料に印加され、試料を流れる電流に対応する信号が抵抗器(100Ω)を介してオシロスコープに送られ、一方の信号となる。試料に印加された電圧信号に反応して発光した光は、分光器で分光され上記発信器からの信号に同期しているディテクタで検出され、発信器の信号と同期しているロックインアンプを使って微弱信号が増幅されて、上記オシロスコープに送られ、他方の信号となる。このようにして得られた発光スペクトルは、狭義のエレクトロルミネッセンスにより発光したものを除き、電子・正孔の対消滅等の他のメカニズムで発光するものをも含むが、この明細書では、この発光スペクトルを総称してEL発光スペクトルと呼ぶ。

【0038】

図12は、図1の酸化亜鉛光デバイスに図9(a)の回路で順電圧を印加した時の、1000nmまでのEL発光スペクトルの一例である。図13は、図12のEL発光スペクトルから、電流密度と全光量の関係性を求めたグラフである。図14は、図12のEL発光スペクトルから、印加電圧と全光量の関係性を求めたグラフである。これらの図から、波長500nmから1000nmまで連続スペクトルになり、全光量は電流密度に比例し、約7ボルトに閾値を有する発光ダイオードが形成されていることが分る。

【0039】

図15は、図1の酸化亜鉛光デバイスに図9(a)の回路で順電圧を印加した時の、1000nm以上でのEL発光スペクトルの一例である。赤外領域の1180nm付近にピークを有する。この波長領域は、光ファイバの屈折率の分散が最小で、信号波形が崩れない波長領域に対応する。従って、この光は高速光通信の光源として使用することができる。図16は、発光スペクトルの1180nm付近のピーク波長の印加電圧依存性を示すグラフである。このピーク・シフト特性を利用して、光通信をさらに最適化することもできる。

なお、図17のウィーンの変位則を表すグラフから分るように、波長1180nmのピークが黒体放射によるとすれば、温度は2400K以上になってしまう。従って、この波長1180nmにおけるピークは黒体放射によるものではない。

【0040】

図18は、図15のEL発光スペクトルから、電流密度と波長1000~1300nmの光の全光量との関係と、電流密度と波長1300~1700nmの光の全光量との関係を別々に求めたグラフである。図19は、図15のEL発光スペクトルから、印加電圧と波長1000~1300nmの光の全光量との関係と、印加電圧と波長1300~1700nmの光の全光量との関係を別々に求めたグラフである。これらの図から、1180nmの発光に関し、発光が電流密度の2乗に比例し、可視よりも発光が増加しやすいことが分かる。また、電圧の閾値は約3ボルトであり、優先して発光することが分かる。

【0041】

図20は、図1の酸化亜鉛光デバイスに順方向に電圧を印加したときの、p型シリコン基板とn型酸化亜鉛の間のpn接合の模式図である。可視光領域(602~914nm)

における広帯域の発光は、ドナー準位 E_D とアクセプタ準位 E_A の間の遷移として説明できる。赤外領域の 1180 nm 付近の発光はトンネル効果による、 p 型シリコン基板からの正孔と、 n 型酸化亜鉛からの電子の対消滅によるものである。

【0042】

< 逆方向電圧特性 >

図21は、図1の酸化亜鉛光デバイスに図9(b)のように逆電圧を印加した時の、電流をパラメータとする、 900 nm までの発光スペクトルの一例である。図の各スペクトルは、下から順に 5 mA 、 10 mA 、 15 mA 、 20 mA 、 25 mA 、 30 mA 、 35 mA 、 40 mA 、 45 mA 、 50 mA の電流を流したときのスペクトルである。 536 、 556 、 665 nm に鋭いピークがあることが分る。

10

【0043】

図22は、図1の酸化亜鉛光デバイスに図9(b)のように逆電圧を印加した時の、 1000 nm 以上の発光スペクトルの一例である。図の各スペクトルは、下から順に 5 mA 、 10 mA 、 15 mA 、 20 mA 、 25 mA 、 30 mA 、 35 mA 、 40 mA 、 45 mA 、 50 mA の電流を流したときのスペクトルである。波長 1538 nm にピークがあることが分る。

【0044】

図23は、酸化亜鉛の中のエルビウムの子なエネルギー準位の模式図である。可視光領域の 536 、 556 、 665 nm における鋭いピーク、および赤外領域の波長 1538 nm のピークは、それぞれエルビウムのエネルギー準位間の遷移として説明できる。すなわち、逆電圧のとき p 型シリコン基板からの電子、あるいは n 型酸化亜鉛からの正孔の少数キャリアが電界より加速され、衝突励起によりエルビウムイオンが励起され、それが低い準位に落ちる時の発光である。逆電圧を印加した場合は、酸化亜鉛はエルビウムを保持する媒体として機能している。なお、赤外領域の 1100 nm から 1500 nm までの連続スペクトルは、電流による酸化亜鉛の微結晶の表面の活性化、局所的温度上昇、格子欠陥等、酸化亜鉛が単結晶でなく微結晶であることに起因するものであると考えられる。 1180 nm のピークは、 pn 接合における少数キャリアの正孔・電子の再結合による発光である。

20

【0045】

図24の可視光領域の発光スペクトルの強度の電流密度依存性の例、図25の可視光領域の発光スペクトルの強度の印加電圧依存性の例、図26の可視光領域の発光スペクトルの強度の電界強度依存性の例、および図27の赤外領域におけるピーク波長における発光スペクトルの強度の電流密度依存性の例、図28のピーク波長における発光スペクトルの強度の印加電圧依存性の例は、いずれも、この発光メカニズムにより説明される。

30

【0046】

図29は、図1の酸化亜鉛光デバイスの赤外領域におけるフォトルミネッセンス (PL) のスペクトルである。PLでは、赤外領域では、波長 1538 nm にだけ大きなピークがあることが分る。

【0047】

図30は、図1の酸化亜鉛光デバイスの、フォトルミネッセンス (PL) と、順電圧のエレクトロルミネッセンス (EL) と、逆電圧エレクトロルミネッセンス (EL.R) との、 20 K における赤外領域のスペクトルである (光強度は、ピーク値を1に規格化されて示されている)。フォトルミネッセンス (PL) スペクトルでは、 1540 nm にだけに大きいピークがあり (これはエルビウムのエネルギー準位間遷移に起因する)、順電圧のエレクトロルミネッセンス (EL) スペクトルでは、 1180 nm にだけに大きいピークがあり (これは pn 接合における電子・正孔の対消滅に起因する)、逆電圧エレクトロルミネッセンス (EL.R) スペクトルでは、両方が観測される。

40

【0048】

< 半導体レーザー >

図1の酸化亜鉛光デバイスの発光機構を用いて、半導体レーザーを実現することができ

50

る。

図31は、図1の酸化亜鉛光デバイスを用いて作られる半導体レーザーの概念的斜視図である。

この半導体レーザーは、図示したようにp型シリコン基板1の上に、エルビウムがドーブされていない、あるいはドーブされたn型酸化亜鉛層3を形成し、さらにその上に導体ストライプ(Pt/Ti)5を形成する。そして、アルミニウム電極2と導体ストライプ5の間に順電圧を印加すると、酸化亜鉛の導体ストライプとシリコン基板の間の部分が発光する。十分に電流を供給し、電子状態分布の反転を実現すると、放射された光は酸化亜鉛層とシリコン基板の境界領域に沿って伝播し、シリコン基板のへき開面を利用して光反射面(図示せず)をシリコン基板の両端に形成しておくことにより、半導体レーザーが実現される。

10

【0049】

導体ストライプ(Pt/Ti)は、厚さ数10nm(例えば30nm)のTi層の上に厚さ数10nm(例えば50nm)のPt層を重ねた導電薄膜である。導体ストライプの下にさらにSn薄膜を設ける場合もある。導体ストライプおよび酸化亜鉛の形状・寸法は、プラズマ・エッチング等の公知に技術を用いて調節することができる。

【0050】

エルビウムがドーブされていない場合は、電子・正孔の対消滅に起因して波長1180nmの赤外線半導体レーザーが実現される。一方、エルビウムがドーブされている場合は、緑色の可視光半導体レーザー、および波長1540nmの赤外線半導体レーザーが実現される。

20

【0051】

<他の実施の形態の発光デバイス>

図32は、本発明に係る酸化亜鉛光デバイスの他の実施の形態を示した概念的斜視図である。

この実施形態においては、石英(Quartz)基板またはシリコン基板6の上面に、第2のITO薄膜7を形成したものに、さらにエルビウムをドーブした酸化亜鉛薄膜層3を形成したものである。そして、上記酸化亜鉛薄膜3の上面には、他方の電極として使われる光を透過する第1の光透過性導電性薄膜4が、ITO(Indium Tin Oxide)によって形成されている。

30

【0052】

この実施の形態は、図1の実施の形態におけるシリコン基板1に代えて、石英(Quartz)基板またはシリコン基板6の上面に第2の導電薄膜7を形成したものが使われている点以外は、図1の実施の形態と同じであるので、対応する部材には同じ参照番号を付して説明を省略する。

【0053】

この実施の形態においては、pn接合は形成されていないので、pn接合に起因する発光はなく、第2の導電薄膜7と第1の導電薄膜4の間に電圧を印加することにより、エルビウムイオンを励起した後、下の順位に落ちる際のエネルギー準位間の遷移による光放出により発光する。

40

【0054】

EL発光スペクトルは、図1の実施の形態によるものと同じで、波長536nmと556nmの緑色発光、波長665nmの赤色発光、および、波長980nmと1540nmにおける赤外発光が起こる。従って、可視光領域の発光デバイス、赤外領域では、光ファイバの損失が少ない帯域(1540nm)での発光デバイスとして使うことができる。また、石英(Quartz)基板を使うと、デバイスの両面からの発光を利用することができる。

【0055】

以上、本発明に係る酸化亜鉛光デバイスの実施の形態について説明したが、本発明は、既述の実施の形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載した本発明の技術的思想の範囲内において、更に種々の変形、変更を加えた酸化亜鉛光デバイスとすることが

50

できることは当然である。

【図面の簡単な説明】

【0056】

【図1】本発明に係る酸化亜鉛光デバイスの好ましい実施の形態を示す概念的斜視図である。

【図2】図1の酸化亜鉛光デバイスの製作方法のフローチャートである。

【図3】ITO層のX線回折スペクトルである。

【図4】ITO層の特性測定のために回路図を示す概念図である。

【図5】ガラスの上に形成されたITO層、石英の上に形成されたITO層、およびシリコン基板について、図4の電気回路の電流を変えたときの測定電圧を示すグラフである。

10

【図6】石英の上に形成された、厚さ70nmのITO層にアニールを施さない場合(a)と、アニールを施した場合(b)の透過率スペクトルである。

【図7】石英の上の形成された厚さ70nmのITO層にアニールを施さない場合(丸印)と施した場合(四角印)の、電流・電圧特性の測定値を示すグラフである。

【図8】石英の上の形成された厚さ70nmのITO層にアニール温度を変えてアニールを施した場合の、電気抵抗(丸印)と、波長325nmの光の透過率(四角印)と、波長1540nmの光の透過率(菱形)の測定値を示すグラフである。

【図9】順方向電圧印加(a)と、逆方向電圧印加(b)を示す概念図である。

【図10】図9の回路で測定した電圧/電流特性である。

【図11】発光特性を測定する測定システムの概念図である。

20

【図12】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で順電圧を印加した時の、1000nmまでに発光スペクトルの一例である。

【図13】図12の発光スペクトルから、電流密度と全光量の関係を求めたグラフである。

【図14】図12の発光スペクトルから、印加電圧と全光量の関係を求めたグラフである。

【図15】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で順電圧を印加した時の、1000nm以上での発光スペクトルの一例である。

【図16】発光スペクトルの1180nm付近のピーク波長の印加電圧依存性を示すグラフである。

【図17】黒体放射のピーク波長が温度に反比例するというウィーンの変位則を表すグラフである。

30

【図18】図15の発光スペクトルから、電流密度と波長1000~1300nmの光の全光量との関係と、電流密度と波長1300~1700nmの光の全光量との関係を別々に求めたグラフである。

【図19】図15の発光スペクトルから、印加電圧と波長1000~1300nmの光の全光量との関係と、印加電圧と波長1300~1700nmの光の全光量との関係を別々に求めたグラフである。

【図20】図1の酸化亜鉛光デバイスに順方向に電圧を印加したときの、p型シリコン基板とn型酸化亜鉛の間のpn接合の模式図である。

【図21】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で逆電圧を印加した時の、900nmまでに発光スペクトルの一例である。

40

【図22】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で逆電圧を印加した時の、1000nm以上の発光スペクトルの一例である。

【図23】酸化亜鉛の中のエルビウムを主なエネルギー準位の模式図である。

【図24】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で逆電圧を印加した時の、波長536(丸印)、556(四角印)、665nm(菱形)の発光スペクトルの強度の電流密度依存性の一例である。

【図25】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で逆電圧を印加した時の、波長536(丸印)、556(四角印)、665nm(菱形)の発光スペクトルの強度の印加電圧依存性の一例である。

【図26】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で逆電圧を印加した時の、波長536

50

(丸印)、556(四角印)、665nm(菱形)の発光スペクトルの強度の電界強度依存性の一例である。

【図27】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で逆電圧を印加した時の、赤外領域におけるピーク波長における発光スペクトルの強度の電流密度依存性の一例である。

【図28】図1の酸化亜鉛光デバイスに図9の回路で逆電圧を印加した時の、赤外領域におけるピーク波長における発光スペクトルの強度の印加電圧依存性の一例である。

【図29】図1の酸化亜鉛光デバイスの赤外領域におけるフォトルミネッセンス(PL)のスペクトルである。

【図30】図1の酸化亜鉛光デバイスの、フォトルミネッセンス(PL)と、順電圧エレクトロルミネッセンス(EL)と、逆電圧エレクトロルミネッセンス(EL.R)との、20Kにおける赤外領域のスペクトルである。

10

【図31】図1の酸化亜鉛光デバイスを用いて作られる半導体レーザーを示す概念的斜視図である。

【図32】本発明に係る酸化亜鉛光デバイスの他の好ましい実施の形態を示す概念的斜視図である。

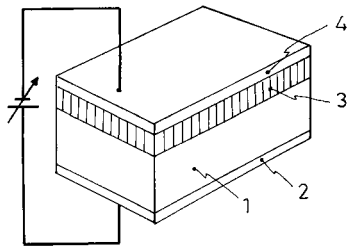
【符号の説明】

【0057】

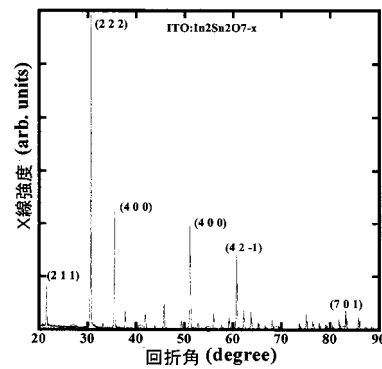
- 1 p型シリコン基板
- 2 アルミニウム薄膜(導電薄膜)
- 3 酸化亜鉛薄膜
- 4 第1の光透過性導電薄膜
- 5 導電ストライプ
- 6 石英(Quartz)基板またはシリコン基板
- 7 第2の光透過性導電薄膜

20

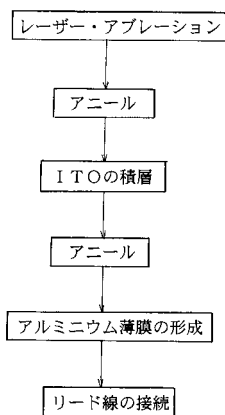
【図1】



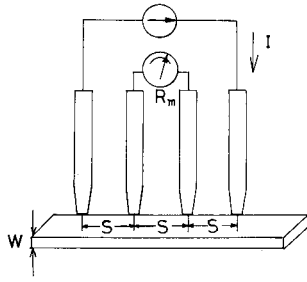
【図3】



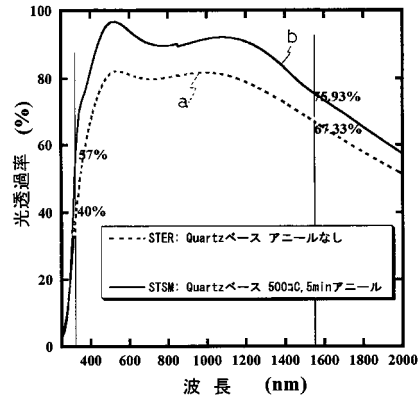
【図2】



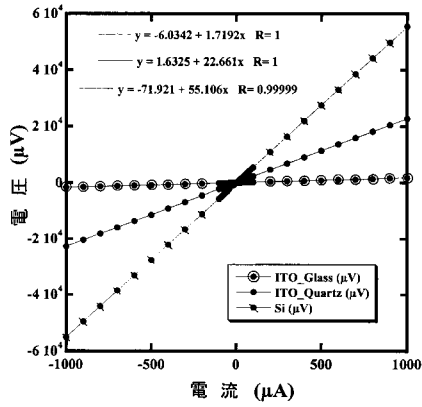
【 図 4 】



【 図 6 】

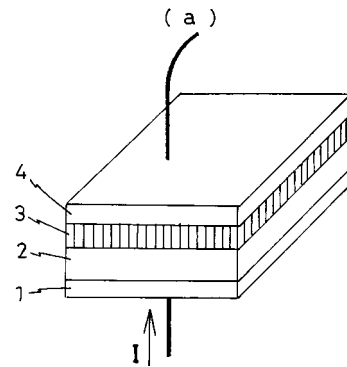
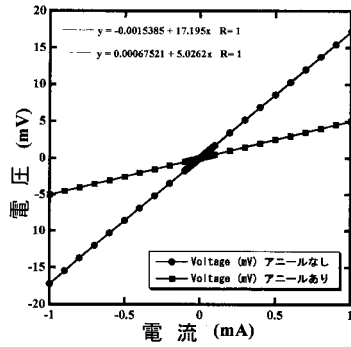


【 図 5 】

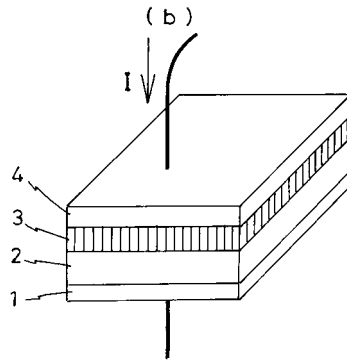
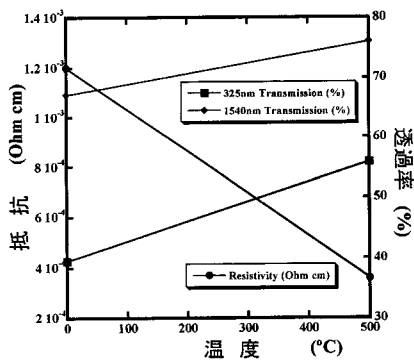


【 図 9 】

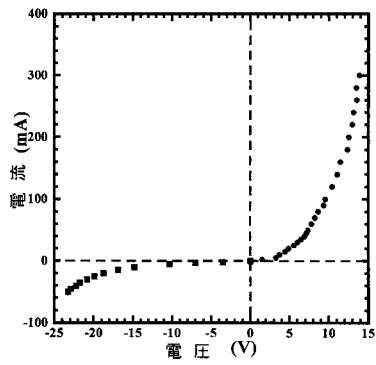
【 図 7 】



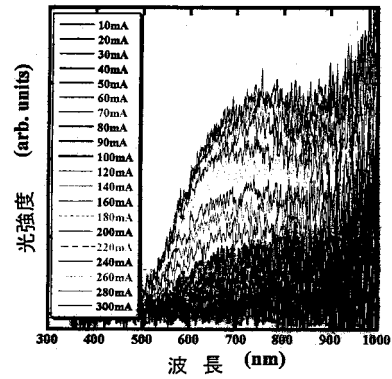
【 図 8 】



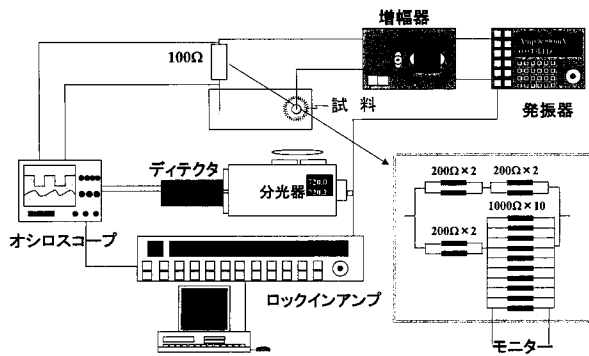
【図10】



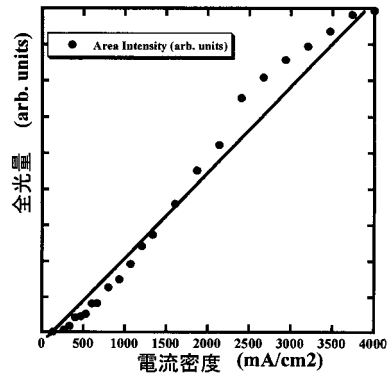
【図12】



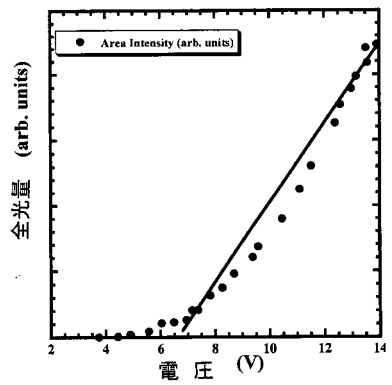
【図11】



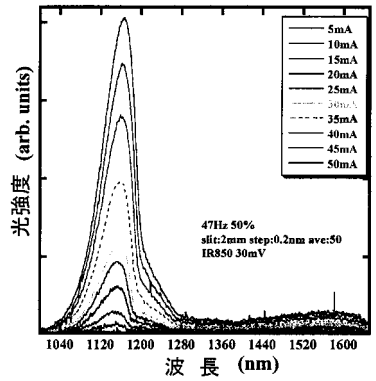
【図13】



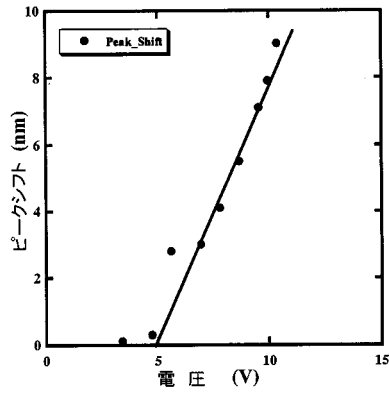
【図14】



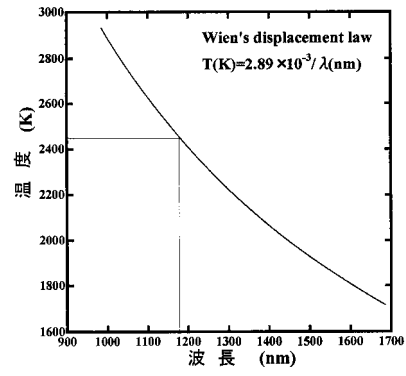
【図15】



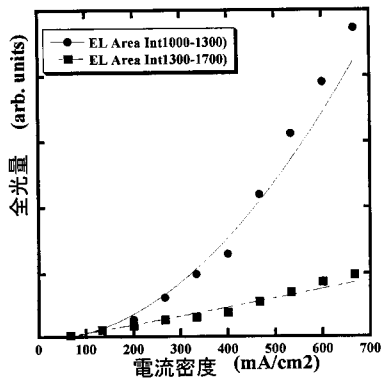
【図16】



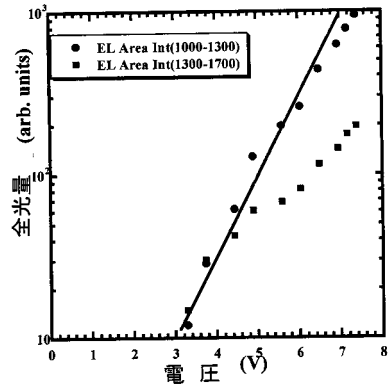
【図17】



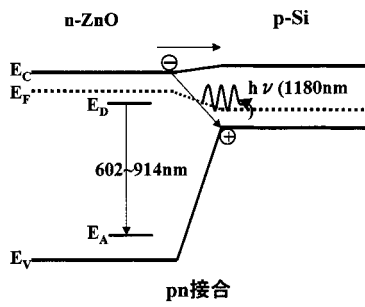
【図18】



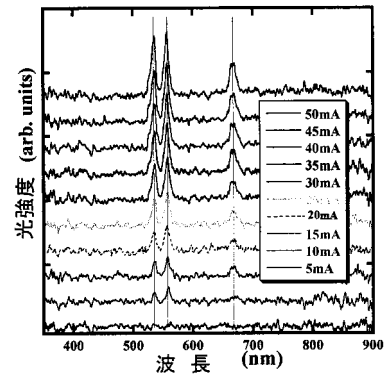
【図19】



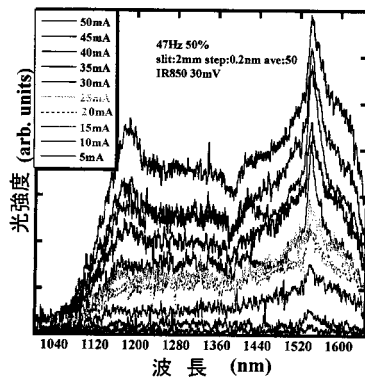
【 図 2 0 】



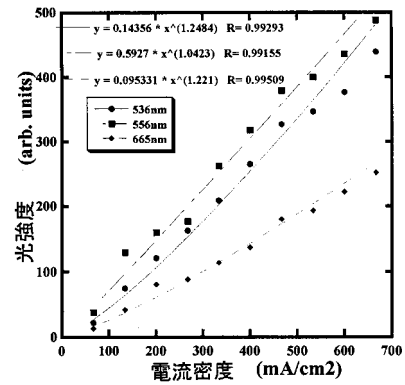
【 図 2 1 】



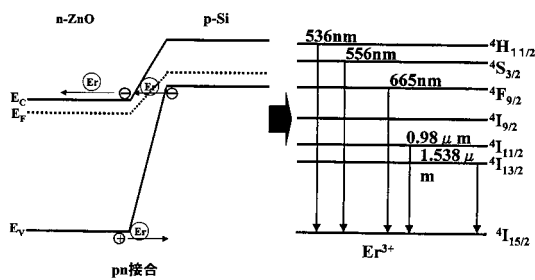
【 図 2 2 】



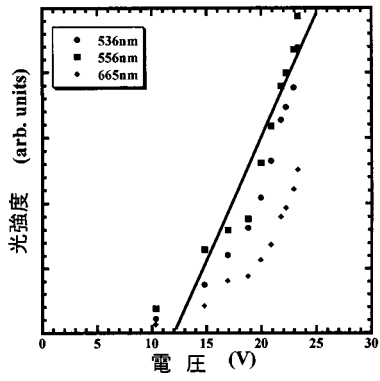
【 図 2 4 】



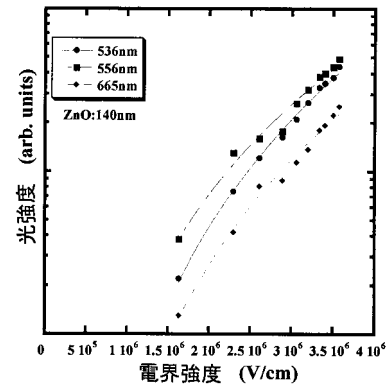
【 図 2 3 】



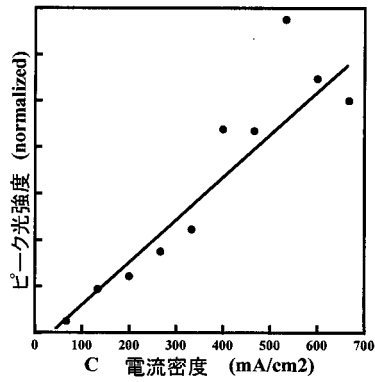
【 図 2 5 】



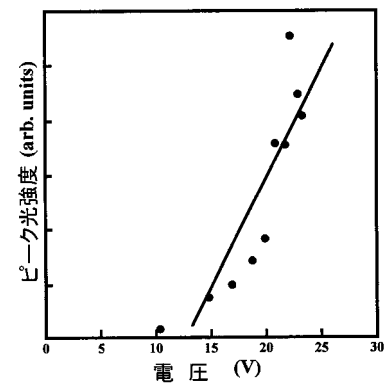
【 図 2 6 】



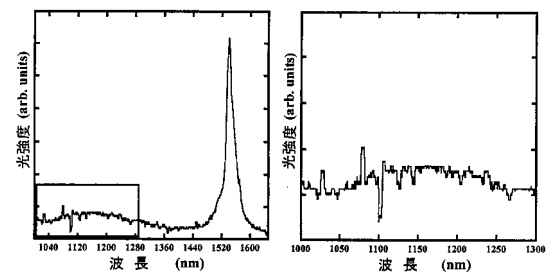
【 図 2 7 】



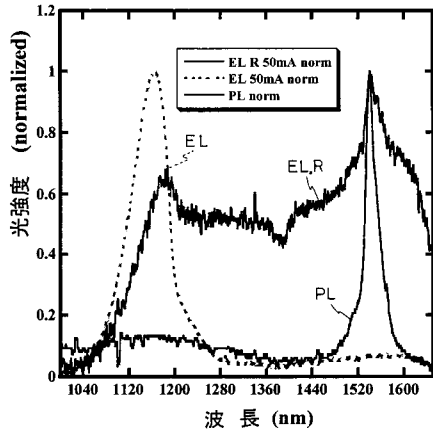
【 図 2 8 】



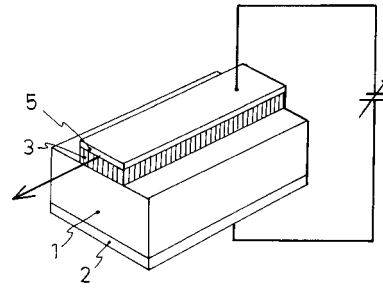
【 図 2 9 】



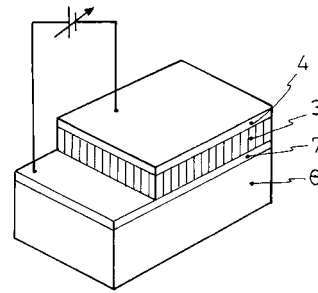
【図 30】



【図 31】



【図 32】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2003-031846(JP,A)
特開2005-005421(JP,A)
特開2005-150504(JP,A)
特開2001-237460(JP,A)
特開昭62-268169(JP,A)
国際公開第2005/069388(WO,A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01L 33/00 - 33/64