

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局  
(43) 国際公開日  
2019年10月3日(03.10.2019)



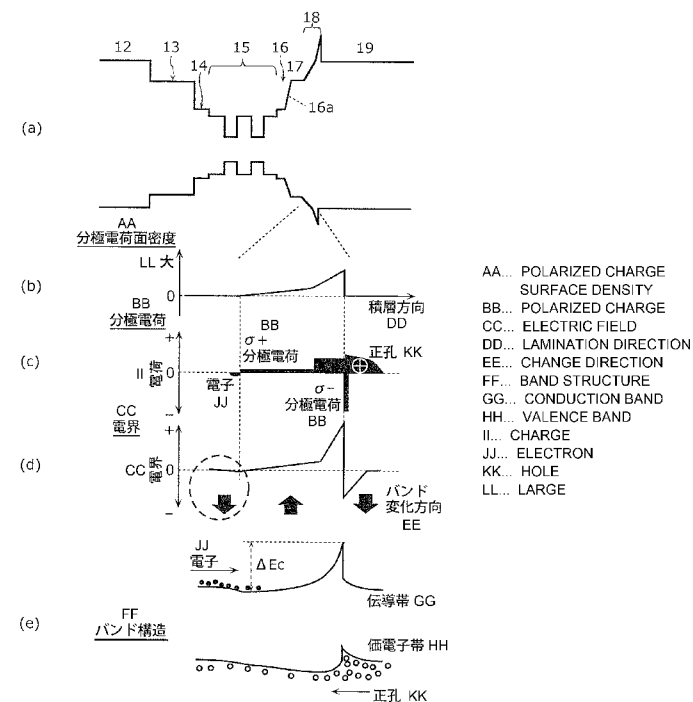
(10) 国際公開番号  
**WO 2019/187583 A1**

- (51) 国際特許分類:  
*H01S 5/343* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/002749
- (22) 国際出願日: 2019年1月28日(28.01.2019)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2018-069125 2018年3月30日(30.03.2018) JP
- (71) 出願人: パナソニックIPマネジメント株式会社 (PANASONIC INTELLECTUAL PROPERTY MANAGEMENT CO., LTD.) [JP/JP]; 〒5406207
- 大阪府大阪市中央区城見2丁目1番61号 Osaka (JP).
- (72) 発明者: 高山 徹 (TAKAYAMA, Toru). 吉田 真治 (YOSHIDA, Shinji). 高橋 邦方 (TAKAHASHI, Kunimasa).
- (74) 代理人: 新居 広守, 外 (NII, Hiromori et al.); 〒5320011 大阪府大阪市淀川区西中島5丁目3番10号タナカ・イトーピア新大阪ビル6階新居国際特許事務所内 Osaka (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,

(54) Title: SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING ELEMENT

(54) 発明の名称: 半導体発光素子

[図3]



(57) Abstract: This semiconductor light emitting element (100) is provided with: a GaN substrate (11); a first semiconductor layer (12) disposed on the GaN substrate (11) and comprising a nitride-based semiconductor of a first conduction type; an active layer (15) disposed on the first semiconductor layer (12) and comprising a nitride-based semiconductor comprising Ga or In; an electron barrier layer (18) disposed on the active layer (15) and comprising a nitride-based semiconductor layer comprising at least Al; and a second semiconductor layer (19) disposed on the electron barrier layer (18)



WO 2019/187583 A1

HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類 :

- 一 国際調査報告 (条約第21条(3))

and comprising a nitride layer of a second conduction type that is different from the first conduction type. The electron barrier layer (18) has: a first area in which the content of Al changes at a first change rate; and a second area which is disposed between the first area and the second semiconductor layer (19) and in which the content of Al changes at a second change rate. In the first area and the second area, the content of Al monotonously increases in the direction from the active layer (15) toward the second semiconductor layer (19), and the second change rate is greater than the first change rate.

(57) 要約: 半導体発光素子 (100)、GaN基板 (11) と、GaN基板 (11) の上方に配置され、第1導電型の窒化物系半導体を含む第1半導体層 (12) と、第1半導体層 (12) の上方に配置され、Ga又はInを含む窒化物系半導体を含む活性層 (15) と、活性層 (15) の上方に配置され、少なくともAlを含む窒化物系半導体を含む電子障壁層 (18) と、電子障壁層 (18) の上方に配置され、第1導電型と異なる第2導電型の窒化物系半導体を含む第2半導体層 (19) とを備え、電子障壁層 (18) は、Al組成比が第1の変化率で変化する第1領域と、第1領域と第2半導体層 (19) との間に配置され、Al組成比が第2の変化率で変化する第2領域とを有し、第1領域及び第2領域において、Al組成比は活性層 (15) から第2半導体層 (19) に向かう方向に対して単調増加し、第2の変化率は第1の変化率よりも大きい。

## 明 細 書

発明の名称：半導体発光素子

### 技術分野

[0001] 本開示は、半導体発光素子に関する。

### 背景技術

[0002] 昨今、LEDよりも発光強度の高い半導体レーザ素子を光源として用いることで、明るさを高めた車載レーザヘッドライト光源が注目されている。

[0003] 車載ヘッドライト光源に使用される半導体レーザ素子として、波長450nm帯において、85℃の高温でワット級の高出力動作を行っても、数千時間以上の長期動作可能な超高出力青色半導体レーザ素子が要望されている。

[0004] このような超高出力の青色レーザ光で蛍光体を励起し、黄色光を得ることができれば、全体として白色の超高出力光源を得ることが可能となる。

[0005] このような高信頼性の超高出力半導体レーザ素子を実現するためには、レーザ発振動作中の自己発熱を可能な限り抑制する必要がある。このため、超高出力半導体レーザ素子において、低動作電流かつ低電圧動作による超低消費電力動作を実現する必要がある。

[0006] 低動作電流を実現するためには、85℃の高温動作時においても、活性層に注入された電子が熱的に励起されて、活性層からp型クラッド層へ漏れ出す無効電流（つまり、漏れ電流）の発生を抑制することが重要である。

[0007] 漏れ電流の発生抑制には、p型クラッド層と活性層との間に、特許文献1及び2に示すように、クラッド層よりもバンドギャップエネルギーの高い電子障壁層を用いることが効果的である。このような構成とすれば、活性層に注入された電子が、熱的に励起されても、バンドギャップエネルギーの高い電子障壁層を超えることが難しくなり、漏れ電流の発生を抑制することが可能となる。

### 先行技術文献

### 特許文献

[0008] 特許文献1：特開2002-270971号公報

特許文献2：国際公開第2017/195502号

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0009] 例えば、特許文献1に開示された半導体発光素子の構造について図33を用いて説明する。図33は、特許文献1に開示された半導体発光素子の層構造を示す模式図である。図33の構造図(a)及びグラフ(b)は、それぞれ、特許文献1に開示された半導体発光素子の積層構造、及び、バンド構造を示す。図33に示すように、特許文献1に開示された半導体発光素子においては、活性層212がn型層211とp型層213とで挟まれている。活性層212と上部クラッド層230の間には、バンドギャップエネルギーが上部クラッド層230よりも高い電子障壁層に相当するp側電子閉じ込め層228が配置されている。この構造によれば、高温動作時においても、活性層212に注入された電子は、AlGaInからなるp側電子閉じ込め層228のエネルギー障壁により上部クラッド層230へ漏れにくくなる。

[0010] 次に、特許文献2に開示された半導体発光素子について図34を用いて説明する。図34は、特許文献2に開示された半導体発光素子のバンドギャップエネルギー分布を示す模式図である。特許文献2には、図34に示すように、AlGaInからなる電子障壁層418の活性層415側の界面においてAl組成比を徐々に変化させている。これにより、当該界面において形成される分極電界を、Al組成比が変化している領域に分散させて、電子障壁層418の分極電界によるバンド構造の変化を低減し、低動作電圧化を図っている。

[0011] ここで、電子障壁層のn型クラッド層側のAl組成比を、活性層側からp型クラッド層側に向けて、徐々に増大させると、分極電界とバンドギャップとを徐々に変化させることが可能となる。この時、分極電界による価電子帯のバンド構造の変化と、バンドギャップエネルギーの変化とを相殺させることができれば、電子障壁層の正孔に対するエネルギー障壁の増大を抑制しつ

つ、電子に対するエネルギー障壁を増大させることが可能となる。

[0012] しかしながら、Al組成比を変化させることで、電子障壁層の正孔に対するエネルギー障壁の増大抑制と電子に対するエネルギー障壁増大効果とは得られるものの、低電圧化の効果が不十分である。

[0013] 上述のとおり、車載ヘッドライト光源用には、85℃の高温でワット級の高出力動作を行っても、数千時間以上の長期動作可能な超高出力青色半導体レーザ素子が要望されており、その消費電力を可能な限り低減する必要がある。このためには、導波路損失の低減、漏れ電流の抑制、動作電圧の低減を同時に行う必要がある。

[0014] 本開示は、上記課題を解決するためになされたものであり、高温動作においても、低消費電力の半導体発光素子を提供することを目的とする。

#### 課題を解決するための手段

[0015] 本開示の一態様に係る半導体発光素子は、GaN基板と、前記GaN基板の上方に配置され、第1導電型の窒化物系半導体を含む第1半導体層と、前記第1半導体層の上方に配置され、Ga又はInを含む窒化物系半導体を含む活性層と、前記活性層の上方に配置され、少なくともAlを含む窒化物系半導体を含む電子障壁層と、前記電子障壁層の上方に配置され、前記第1導電型と異なる第2導電型の窒化物系半導体を含む第2半導体層とを備え、前記電子障壁層は、前記GaN基板の主面と垂直な積層方向においてAl組成比が第1の変化率で変化する第1領域と、前記第1領域と前記第2半導体層との間に配置され、前記積層方向においてAl組成比が第2の変化率で変化する第2領域とを有し、前記第1領域及び前記第2領域において、Al組成比は前記活性層から前記第2半導体層に向かう方向に対して単調増加し、前記第2の変化率は前記第1の変化率よりも大きい。

[0016] 本開示により、電子障壁層に形成される分極電荷面密度は、活性層側から積層方向に、傾きが小さい直線的な変化から、傾きの大きい直線的な変化を伴い増大する。この場合、分極電荷の大きさは分極電荷面密度の変化率に比例するため、電子障壁層内で、活性層側から積層方向に、その大きさが2段

階に増大する正の分極電荷が形成される。

[0017] この結果、電子障壁層の活性層側界面に生じる正の分極電荷面密度が低下する。このとき、活性層側の界面には、電気的中性条件を満足させるために、電子が誘引されるが、電子障壁層内の活性層近傍領域の正の分極電荷密度が小さいため、この界面に電氣的に誘因される電子濃度も小さくなる。

[0018] このため、電子障壁層の活性層側界面に生じた電子の影響によるバンド電位の低下が抑制され、価電子帯に形成される正孔に対する電位障壁が小さくなり、伝導帯に形成される電子に対する電位障壁が増大する。

[0019] この結果、高温高出力動作時において、電子が熱的に励起されて電子障壁層を超えて、第2半導体層に漏れる現象（つまり、電子のオーバーフロー）を抑制する効果が増大する。

[0020] この結果、従来の電子障壁層と比較して、より低動作電圧かつ、漏れ電流の小さい半導体発光素子を実現することができる。また、半導体発光素子の自己発熱が低減される結果、高温動作時においても、低消費電力である半導体発光素子を得ることが可能となる。

### 発明の効果

[0021] 本開示によれば、高温動作においても、低消費電力の半導体発光素子を提供できる。

### 図面の簡単な説明

[0022] [図1A]図1 Aは、実施の形態1に係る半導体発光素子の概略構成を示す模式的な断面図である。

[図1B]図1 Bは、実施の形態1に係る活性層の積層方向に対する伝導帯エネルギー分布を示すグラフである。

[図2]図2は、比較例1に係る半導体発光素子の電子障壁層の構成を示す模式的な断面図である。

[図3]図3は、実施の形態1に係る半導体発光素子の電子障壁層の構成を示す模式的な断面図である。

[図4A]図4 Aは、実施の形態1に係る半導体発光素子の電子障壁層の積層方

向におけるバンドギャップエネルギー分布の第1例を示す模式図である。

[図4B]図4Bは、実施の形態1に係る半導体発光素子の電子障壁層の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の第2例を示す模式図である。

[図5A]図5Aは、実施の形態1に係る半導体発光素子の電子障壁層の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の第3例を示す模式図である。

[図5B]図5Bは、実施の形態1に係る半導体発光素子の電子障壁層の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の第4例を示す模式図である。

[図5C]図5Cは、実施の形態1に係る半導体発光素子の電子障壁層の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の第5例を示す模式図である。

[図5D]図5Dは、実施の形態1に係る半導体発光素子の電子障壁層の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の第6例を示す模式図である。

[図6]図6は、実施の形態1に係る電子障壁層の積層方向におけるA | 組成比分布の一例を示す図である。

[図7]図7は、実施の形態1に係る電子障壁層の積層方向におけるA | 組成比分布の他の一例を示す図である。

[図8]図8は、実施の形態1に係る半導体発光素子の第1の構成例のシミュレーション結果を示す図である。

[図9]図9は、比較例2に係る半導体発光素子のシミュレーション結果を示す図である。

[図10]図10は、実施の形態1に係る半導体発光素子の第2の構成例のシミュレーション結果を示す図である。

[図11]図11は、実施の形態1に係る半導体発光素子の第3の構成例のシミュレーション結果を示す図である。

[図12]図12は、比較例3に係る半導体発光素子のシミュレーション結果を示す図である。

[図13]図13は、シミュレーションにおいて用いた電子障壁層のA | 組成比分布形状を示す模式図である。

[図14]図14は、電子障壁層の膜厚が5 nmである場合のシミュレーション

結果を示すグラフである。

[図15]図15は、電子障壁層の膜厚が15nmである場合のシミュレーション結果を示すグラフである。

[図16]図16は、実施の形態1に係る半導体発光素子における第2半導体層の不純物ドーピングプロファイルを示す模式図である。

[図17A]図17Aは、実施の形態1に係る半導体発光素子における動作電圧の低不純物濃度領域の不純物濃度依存性を示すグラフである。

[図17B]図17Bは、実施の形態1に係る半導体発光素子における導波路損失の低不純物濃度領域の不純物濃度依存性を示すグラフである。

[図18]図18は、実施の形態1に係る低不純物濃度領域の不純物ドーピング濃度を $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ から $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ まで変化させた場合の価電子帯バンド構造及び正孔フェルミレベルの計算結果を示すグラフである。

[図19]図19は、電子障壁層のA1組成比分布形状を、形状a、形状b及び形状cとした場合における半導体発光素子の特性を示すグラフである。

[図20]図20は、実施の形態2に係る半導体発光素子の第3光ガイド層の組成比傾斜領域における分極電荷の形成を説明する模式図である。

[図21]図21は、比較例4に係る半導体発光素子の第3光ガイド層における分極電荷の形成を説明する模式図である。

[図22A]図22Aは、Mgドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 及び $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である場合における実施の形態2に係る半導体発光素子の動作電圧のMgドーピング領域長依存性を示すグラフである。

[図22B]図22Bは、Mgドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 及び $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である場合における実施の形態2に係る半導体発光素子の動作電圧のMgドーピング領域長依存性を示すグラフである。

[図22C]図22Cは、Mgドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 及び $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である場合における実施の形態2に係る半導体発光素子の動作電圧のMgドーピング領域長依存性を示すグラフである。

[図23]図23は、実施の形態2に係る不純物ドーピングの態様を示す模式図

である。

[図24]図24は、実施の形態2に係る半導体発光素子において、バリア層に*S i*ドーピングした場合の伝導帯バンド構造及び価電子帯バンド構造を示すグラフである。

[図25]図25は、実施の形態2に係る半導体発光素子において、バリア層と第2光ガイド層との界面に*S i*ドーピングした場合の伝導帯バンド構造及び価電子帯バンド構造を示すグラフである。

[図26]図26は、実施の形態3に係る不純物ドーピングの態様を示す模式図である。

[図27]図27は、実施の形態3に係る半導体発光素子において、バリア層に*S i*ドーピングした場合の伝導帯バンド構造及び価電子帯バンド構造を示すグラフである。

[図28]図28は、実施の形態3に係る半導体発光素子において、バリア層と第2光ガイド層との界面に*S i*ドーピングした場合の伝導帯バンド構造及び価電子帯バンド構造を示すグラフである。

[図29]図29は、実施の形態4に係る半導体発光素子の不純物ドーピングプロファイルと、禁制帯幅エネルギー分布との関係を示す模式図である。

[図30]図30は、実施の形態4に係る半導体発光素子において、300mA動作時の動作電圧の第1半導体層及び第2半導体層のA | 組成比依存性の計算結果を示すグラフである。

[図31]図31は、実施の形態5に係る半導体発光素子の概略構成を示す模式的な断面図である。

[図32]図32は、実施の形態5に係る半導体発光素子の光閉じ込め係数及び実効屈折率差の計算結果を示すグラフである。

[図33]図33は、特許文献1に開示された半導体発光素子の層構造を示す模式図である。

[図34]図34は、特許文献2に開示された半導体発光素子のバンドギャップエネルギー分布を示す模式図である。

## 発明を実施するための形態

[0023] 以下、本開示の実施の形態について、図面を参照しながら説明する。なお、以下に説明する実施の形態は、いずれも本開示の一具体例を示すものである。従って、以下の実施の形態で示される、数値、形状、材料、構成要素、及び、構成要素の配置位置や接続形態などは、一例であって本開示を限定する主旨ではない。よって、以下の実施の形態における構成要素のうち、本開示の最上位概念を示す独立請求項に記載されていない構成要素については、任意の構成要素として説明される。

[0024] また、各図は模式図であり、必ずしも厳密に図示されたものではない。従って、各図において縮尺等は必ずしも一致していない。なお、各図において、実質的に同一の構成に対しては同一の符号を付しており、重複する説明は省略又は簡略化する。

[0025] また、本明細書において、「上方」及び「下方」という用語は、絶対的な空間認識における上方向（鉛直上方）及び下方向（鉛直下方）を指すものではなく、積層構成における積層順を基に相対的な位置関係により規定される用語として用いる。また、「上方」及び「下方」という用語は、2つの構成要素が互いに間隔をあけて配置されて2つの構成要素の間に別の構成要素が存在する場合のみならず、2つの構成要素が互いに接する状態で配置される場合にも適用される。

[0026] （実施の形態1）

### [1-1. 全体構成]

実施の形態1に係る半導体発光素子の全体構成について図1Aを用いて説明する。図1Aは、本実施の形態に係る半導体発光素子100の概略構成を示す模式的な断面図である。

[0027] 本実施の形態に係る半導体発光素子100は、窒化物系の半導体レーザ素子である。図1Aには、半導体発光素子100の共振方向に垂直な断面が示されている。

[0028] 図1Aに示すように、半導体発光素子100は、Ga<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>基板11と、第1

半導体層 12 と、活性層 15 と、電子障壁層 18 と、第 2 半導体層 19 とを備える。本実施の形態では、半導体発光素子 100 は、さらに、第 1 光ガイド層 13 と、第 2 光ガイド層 14 と、第 3 光ガイド層 16 と、中間層 17 と、コンタクト層 20 と、電流ブロック層 30 と、n 側電極 31 と、p 側電極 32 とを備える。

[0029] 第 1 半導体層 12 は、Ga N 基板 11 の上方に配置され、第 1 導電型の窒化物系半導体を含む層である。本実施の形態では、第 1 導電型は n 型である。第 1 半導体層 12 は、膜厚 1.5  $\mu\text{m}$  の n 型 Al Ga N 層からなる。

[0030] 第 1 光ガイド層 13 は、第 1 半導体層 12 の上方に配置され、膜厚 100 nm の n 型 Ga N からなる第 1 導電型の半導体層である。

[0031] 第 2 光ガイド層 14 は、第 1 光ガイド層 13 の上方に配置され、膜厚 185 nm の In Ga N からなる層である。

[0032] 活性層 15 は、第 1 半導体層 12 の上方に配置され、Ga 又は In を含む窒化物系半導体を含む層である。本実施の形態では、活性層 15 は、第 2 光ガイド層 14 の上方に配置され、アンドープの多重量子井戸を含む。

[0033] 第 3 光ガイド層 16 は、活性層 15 の上方に配置され、膜厚 90 nm の In Ga N からなる層である。

[0034] 中間層 17 は、電子障壁層 18 と活性層 15 との間に配置され、窒化物系半導体を含む層である。本実施の形態では、中間層 17 は、電子障壁層 18 と第 3 光ガイド層 16 との間に配置され、膜厚 3 nm の第 2 導電型の Ga N を含む。第 2 導電型は第 1 導電型と異なる導電型であり、本実施の形態では p 型である。

[0035] 電子障壁層 18 は、活性層 15 の上方に配置され、少なくとも Al を含む窒化物系半導体を含む第 2 導電型の層である。本実施の形態では、電子障壁層 18 は、中間層 17 と、第 2 半導体層 19 との間に配置され、p 型の Al Ga N からなる。

[0036] 第 2 半導体層 19 は、電子障壁層 18 の上方に配置され、第 2 導電型の窒化物系半導体を含む第 2 導電型の半導体層である。本実施の形態では、第 2

半導体層 19 は、膜厚 660 nm の p 型 AlGaIn クラッド層である。

[0037] コンタクト層 20 は、第 2 半導体層 19 の上方に配置され、第 2 導電型の窒化物系半導体を含む層である。本実施の形態では、コンタクト層 20 は、膜厚 0.05  $\mu\text{m}$  の p 型 GaN よりなる。

[0038] 電流ブロック層 30 は、第 2 半導体層 19 の上方に配置され、活性層 15 からの光に対して透過性を有する絶縁層である。本実施の形態では、電流ブロック層 30 は、 $\text{SiO}_2$  からなる。

[0039] n 側電極 31 は、GaN 基板 11 の下方に配置される導電層である。n 側電極 31 は、例えば、Cr、Ti、Ni、Pd、Pt 及び Au の少なくとも一つで形成された単層膜又は多層膜である。

[0040] p 側電極 32 は、コンタクト層 20 の上方に配置される導電層である。本実施の形態では、p 側電極 32 は、コンタクト層 20 及び電流ブロック層 30 の上方に配置される。p 側電極 32 は、例えば、Cr、Ti、Ni、Pd、Pt 及び Au の少なくとも一つで形成された単層膜又は多層膜である。

[0041] 半導体発光素子 100 の第 2 半導体層 19 には、リッジが形成されている。本実施の形態では、リッジ幅  $W$  は、30  $\mu\text{m}$  程度である。また、図 1A に示すように、リッジ下端部と活性層との距離を  $d_p$  としている。

[0042] ここで、本実施の形態においては、活性層 15 に垂直方向（基板法線方向）に光を閉じこめるために、n 型 AlGaIn 層からなる第 1 半導体層 12、及び、p 型 AlGaIn 層からなる第 2 半導体層 19 の Al 組成比を 0.035（3.5%）としている。この結果、第 1 半導体層 12 及び第 2 半導体層 19 の屈折率は、半導体発光素子 100 で発生する光分布の実効屈折率よりも小さくなるため、第 1 半導体層 12 及び第 2 半導体層 19 はクラッド層として機能する。

[0043] n 型 AlGaIn からなる第 1 半導体層 12、及び、p 型 AlGaIn からなる第 2 半導体層 19 の Al 組成比を大きくすると、活性層 15 と、クラッド層として機能する第 1 半導体層 12 及び第 2 半導体層 19 との屈折率差を大きくすることができる。これにより、活性層 15 の積層方向（つまり、G

a N基板 11の主面に垂直な方向)に光を強く閉じ込めることが可能となり、発振しきい電流値を小さくすることが可能となる。しかしながらAlGaIn層とGaIn基板との熱膨張係数の差のために、AlGaInからなる第1半導体層12及び第2半導体層19のAl組成比を大きくしすぎると格子欠陥が生じ信頼性の低下につながる。従って、本実施の形態では、第1半導体層12及び第2半導体層19のAl組成比を0.05(つまり、5%)以下とする。

[0044] 続いて、本実施の形態に係る活性層15について図1Bを用いて説明する。図1Bは、本実施の形態に係る活性層15の積層方向に対する伝導帯エネルギー分布を示すグラフである。活性層15は、波長450nmのレーザ発振を得るために、図1Bに示すように、膜厚3nm、In組成比0.16(つまり、16%)のInGaInからなる2層のウェル層15b及び15dを備えたDQW(Double Quantum Well)構造を有する。バリア層15a、15c及び15eは、それぞれ、膜厚7nm、膜厚7nm及び膜厚5nmでIn組成比0.04(つまり、4%)のInGaInからなる。ウェル層においては、450nm帯のレーザ発振光を得るために、15%以上の高In組成比が必要である。この場合、ウェル層とGaIn基板11との格子不整が1.7%以上となり、その膜厚を厚くしすぎると、格子欠陥が生じてしまう。逆に、薄くしすぎると、ウェル層への積層方向の光閉じ込め係数が小さくなり、発振しきい値及び動作キャリア密度が高くなるため、高温動作時の漏れ電流の増大につながる。従って、本実施の形態では、ウェル層の膜厚は、例えば、2.7nm以上、3.3nm以下である。

[0045] また、第2光ガイド層14、第3光ガイド層16は、Inを含むことで屈折率をn型AlGaInからなる第1半導体層12、及び、p型AlGaIn層からなる第2半導体層19よりも高めた層である。これにより、リッジに対応する導波路を伝搬する光分布の実効屈折率を高め、第1半導体層12及び第2半導体層19による光分布の積層方向への閉じ込め作用を高めることができる。

[0046] ここで、第2光ガイド層14及び第3光ガイド層16のIn組成比が小さいと、ウェル層への垂直方向の光閉じ込めが小さくなるため、発振しきい値及び動作キャリア密度が高くなる。この結果、高温動作時の漏れ電流の増大につながる。逆に、第2光ガイド層14及び第3光ガイド層16のIn組成比が大きいと、GaN基板11との格子不整の増大により、格子欠陥が生じやすくなる。このため、格子欠陥が生じずに、ウェル層への垂直方向の光閉じ込め係数を増大させるために、本実施の形態では、第2光ガイド層14及び第3光ガイド層16のIn組成比は、例えば、0.03（つまり、3%）以上、0.06（つまり、6%）以下である。本実施の形態においては、第2光ガイド層14及び第3光ガイド層16のIn組成比を0.03（つまり、3%）として、格子欠陥の発生の抑制と、ウェル層への垂直方向の光閉じ込め係数の増大とを両立させている。

[0047] また、第1光ガイド層13は、第1半導体層12及び第2光ガイド層14の有する各格子定数の間の大きさの格子定数を有し、かつ、第1半導体層12及び第2光ガイド層14の有する各禁制帯幅エネルギーの大きさの間の大きさの禁制帯幅エネルギーを有するGaN層である。この結果、第2光ガイド層14をAlGaNからなる第1半導体層12の直上に形成する場合と比較して、界面で生じる分極電荷によるバンド構造のスパイク状の変形を抑制でき、電子の活性層15への伝導を容易にすることができる。

[0048] また、中間層17は、電子障壁層18及び第3光ガイド層16の有する各格子定数の間の大きさの格子定数を有し、かつ、電子障壁層18及び第3光ガイド層16の有する各禁制帯幅エネルギーの大きさの間の大きさの禁制帯幅エネルギーを有するGaN層である。

[0049] また、Inを含む圧縮性の格子歪を有する第2光ガイド層14、活性層15、第3光ガイド層16を形成し、その直上に引っ張り性の格子歪を有するAlGaN層を形成すると界面に生じる応力が大きくなり、結晶欠陥が生じる可能性がある。中間層17を、膜厚3nmのGaNとすれば、界面の応力を緩和させることができる。

[0050] また、中間層 17 が厚くなりすぎると、屈折率の低い第 2 半導体層 19 が活性層 15 から離れるため、活性層 15 への積層方向の光の閉じ込め効果が弱まる。そこで、中間層 17 の膜厚を 10 nm 以下のできるだけ薄い膜厚とする。本実施の形態に係る半導体発光素子では、中間層 17 の膜厚を 3 nm としている。

[0051] また、リッジ側面上に、膜厚 0.1  $\mu\text{m}$  の  $\text{SiO}_2$  からなる誘電体の電流ブロック層 30 が形成されている。この構造において、コンタクト層 20 から注入された電流は電流ブロック層 30 によりリッジ部のみに狭窄されるため、活性層 15 のうちリッジ底部下方に位置する領域に集中して電流注入される。これにより、レーザ発振に必要なキャリアの反転分布状態は百 mA 程度の注入電流により実現される。活性層 15 へ注入された電子及び正孔からなるキャリアの再結合により発生した光は、活性層 15 の積層方向へは、第 2 光ガイド層 14、第 3 光ガイド層 16、第 1 半導体層 12 及び第 2 半導体層 19 により閉じ込められる。一方、活性層 15 と平行な方向（積層方向と垂直な方向。以下、水平方向ともいう）に対しては、電流ブロック層 30 が第 1 半導体層 12 及び第 2 半導体層 19 よりも屈折率が低いため、光閉じ込めが可能となる。また、電流ブロック層 30 はレーザ発振光に対する光吸収が小さいため、低損失の導波路を実現することができる。また、導波路を伝播する光分布は電流ブロック層 30 に大きくしみ出すことができるため、高出力動作に適した  $10^{-3}$  のオーダの  $\Delta N$ （リッジ内外の積層方向実効屈折率の差）を精密に実現できる。さらに  $\Delta N$  の大きさを電流ブロック層 30 と活性層 15 との間の距離（ $d_p$ ）の大きさに応じて、同じく  $10^{-3}$  のオーダで精密に制御することができる。このため、光分布を精密に制御しつつ、低動作電流の半導体発光素子 100 を得ることができる。本実施の形態においては、 $\Delta N$  が  $4.8 \times 10^{-3}$  となるように制御することで、水平方向の光閉じ込めを行っている。

[0052] 電子障壁層 18 は、p 型の GaN からなる中間層 17 上に形成され、電子障壁層 18 の禁制帯幅エネルギーの大きさは、p 型 AlGaIn からなる第 2

半導体層 19 のそれよりも大きい。このように設定することで、電子障壁層 18 の伝導帯バンドの電位を高くし、エネルギー障壁を形成することができる。この結果、活性層 15 に注入された電子が熱的に励起されて第 2 半導体層 19 に漏れる現象（つまり、電子のオーバーフロー）を抑制できるため、半導体発光素子 100 の高温動作特性を向上させることができる。

[0053] ここで、AlGaIn からなる層の禁制帯幅エネルギーは Al 組成比に比例して大きくなる。従って、本実施の形態では、電子障壁層 18 の Al 組成比は、p 型 AlGaIn からなる第 2 半導体層 19 の Al 組成比よりも高く、例えば、0.15（つまり、15%）以上である。

[0054] 本実施の形態では、InGaIn からなる第 3 光ガイド層 16 の直上の層のうち、Al を含有しない領域が中間層 17 である。中間層 17 の直上の Al を含む領域のうち、第 2 半導体層 19 より下方の領域が電子障壁層 18 である。電子障壁層 18 においては、Al 組成比が下方から上方に向かって徐々に増大して、15%以上の最大値を有する。電子障壁層 18 においては、当該最大値を有する位置から、さらに上方に向かって Al 組成比は減少し、第 2 半導体層 19 側の界面において、第 2 半導体層 19 の Al 組成比と一致する。

[0055] 電子障壁層 18 の Al 組成比の分布形状については、後で詳細に説明する。

[0056] [1-2. 比較例の電子障壁層の構成]

続いて、本実施の形態に係る電子障壁層 18 の作用及び効果の説明に先立ち、比較例に係る電子障壁層構成について図 2 を用いて説明する。図 2 は、比較例 1 に係る半導体発光素子の電子障壁層 18 A の構成を示す模式図である。模式図 (a)、(b)、(c)、(d) 及び (e) は、それぞれ比較例 1 に係る半導体発光素子のバンドギャップエネルギー分布、電子障壁層 18 A の分極電荷面密度分布、分極電荷分布、電界分布及びバンド構造を示す。

[0057] 比較例 1 に係る半導体発光素子は、電子障壁層 18 A の Al 組成比の分布において本実施の形態に係る半導体発光素子 100 と相違する。図 2 の模式

図（a）に示すように、比較例1に係る電子障壁層18AのA1組成比は、活性層15側から第2半導体層19側に向かって直線的に増大する。なお、図2の模式図（a）に示すように、第3光ガイド層16は、組成比傾斜領域16aを含むが、この点においては、本実施の形態に係る半導体発光素子100と相違しない。

[0058] 窒化物半導体に形成される分極電荷面密度は、その構成層に係る歪によるピエゾ分極成分と、原子組成で決まるに自然分極成分の和に依存する。従って、各層に生じる分極電荷の面密度は、歪によるピエゾ分極成分と自然分極成分との和で構成される。各層に生じる歪の大きさと自然分極の大きさは共に、原子組成に比例する。このため、AlGaIn層に形成される分極電荷の面密度は、AlGaIn層のA1組成に比例する。したがって、A1組成比が直線的に増大する比較例1の電子障壁層18Aに形成される分極電荷面密度は、図2の模式図（b）に示すように、直線的に増大する。

[0059] この場合、分極電荷の大きさは分極電荷面密度の変化率に比例するため、図2の模式図（c）に示すように、形成される分極電荷の量は、電子障壁層18A内で一定である。

[0060] 電子障壁層18Aの活性層15側の領域では正の分極電荷が、活性層15から遠い方の界面では負の分極電荷が、それぞれ形成される。この結果、図2の模式図（c）に示すように、両界面には、電気的中性条件を満足させるために、逆極性のキャリアが誘引されるが、電子障壁層18A内の正の分極電荷密度が比較的小さいため、誘引される電子の濃度は比較的小さくなる。例えば、電子障壁層が層内で均一のA1組成比を有する場合より、比較例1では、界面に誘引される電子の濃度は比較的小さくなる。

[0061] このため、図2の模式図（d）に示すように、電子障壁層18Aの活性層15側界面に生じた電子のために負の電界が生じるが、その電子濃度が小さいため、図2の模式図（e）に示すように電子障壁層18Aの活性層15に接する界面の電位の低下を抑制できる。また、電子障壁層18Aの活性層15側のA1組成比が小さく、禁制帯幅エネルギー（つまり、バンドギャップ

エネルギー)が小さい。このため、活性層15側正孔に対して価電子帯に形成される電位障壁を抑制でき、動作電圧を低減できる。

[0062] [1-3. 実施の形態1に係る電子障壁層の構成]

続いて、本実施の形態に係る半導体発光素子100の電子障壁層18の構成について図3を用いて説明する。図3は、本実施の形態に係る半導体発光素子100の電子障壁層18の構成を示す模式図である。模式図(a)、(b)、(c)、(d)及び(e)は、それぞれ本実施の形態に係る半導体発光素子100のバンドギャップエネルギー分布、電子障壁層18の分極電荷面密度分布、分極電荷分布、電界分布及びバンド構造を示す。

[0063] 本実施の形態に係る半導体発光素子100では、電子障壁層18は、活性層15側から順にA1組成比変化率の小さい第1領域と、A1組成比の変化率の大きい第2領域とを有する。

[0064] このため、電子障壁層18に形成される分極電荷面密度分布は、図3の模式図(b)に示すように、比較的小さい傾きで変化する領域と、比較的大きい傾きで変化する領域とを有する。

[0065] この場合、分極電荷の大きさは分極電荷面密度の変化率に比例するため、図3の模式図(c)に示すように、分極電荷は、電子障壁層18内で、図2の模式図(c)に示した分布に対して活性層15側で、その大きさが小さい。また、本実施の形態では、分極電荷の大きさが積層方向の位置に応じて2段階に変化する。

[0066] 電子障壁層18の活性層15側の界面では正の分極電荷が、活性層15から遠い側の界面では負の分極電荷が、それぞれ形成される。この結果、図3の模式図(c)に示すように、両界面には、電気的中性条件を満足させるために、逆極性のキャリアが誘引される。本実施の形態では、電子障壁層18内の活性層15側の領域における正の分極電荷密度が小さいため、図2の模式図(c)に示した場合よりも電子濃度は小さくなる。

[0067] このため、図3の模式図(d)に示すように、電子障壁層18の活性層15側界面に誘引された電子のために負の電界が生じるが、その電子濃度が比

較例 1 より小さくなる。従って、図 3 の模式図 (e) に示すように電子障壁層 18 の活性層 15 に接する界面の電位の低下量が低減する。また、電子障壁層 18 の活性層 15 側の A | 組成比が小さく、禁制帯幅エネルギーが小さい。このため、活性層 15 側正孔に対して価電子帯に形成される電位障壁は図 2 に示される比較例 1 の場合よりもさらに小さくなる。従って、本実施の形態に係る半導体発光素子では、動作電圧がさらに小さくなる。

[0068] また、図 3 の模式図 (d) に示すように電子障壁層 18 の活性層 15 側界面の電界が小さいため、電子障壁層 18 の活性層 15 側での電位の低下が小さく、電子に対する電子障壁層 18 の電位障壁 (図 3 の  $\Delta E_c$ ) が大きくなり、高温高出力動作時において、電子が熱的に励起されて電子障壁層 18 を超えて、第 2 半導体層に漏れる現象 (つまり、電子のオーバーフロー) を抑制する効果が増大する。この結果、従来の電子障壁層と比較して、より低動作電圧かつ、漏れ電流の小さい半導体発光素子 100 を実現することができる。また、半導体発光素子の自己発熱が低減される結果、高温動作時においても、低消費電力である半導体発光素子を得ることが可能となる。具体的には、85℃の高温でワット級の高出力動作を行っても、数千時間以上の長期動作可能な超高出力の青色半導体レーザ素子を実現できる。

[0069] 続いて、本実施の形態に係る半導体発光素子 100 の電子障壁層 18 の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の例について図 4 A 及び図 4 B を用いて説明する。図 4 A 及び図 4 B は、それぞれ本実施の形態に係る半導体発光素子 100 の電子障壁層 18 の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の第 1 例及び第 2 例を示す模式図である。

[0070] 図 4 A は、A | 組成比変化率の小さい第 1 領域と、A | 組成比変化率が第 1 領域より大きい第 2 領域とが接している場合のバンドギャップエネルギー分布を示す。図 4 B は、A | 組成比変化率の小さい第 1 領域と、A | 組成比変化率が第 1 領域より大きい第 2 領域との間に組成比変化率が第 1 領域よりも小さい領域が配置されている場合のバンドギャップエネルギー分布を示す。

[0071] 図4 A及び図4 Bに示すいずれの場合でも、電子障壁層18の活性層側の界面の位置 $x = X_s$ と、電子障壁層18においてA | 組成比が最大となる位置 $x = X_m$ との中点 $x = X_p$ において、そのA | 組成比が、位置 $x = X_s$ におけるA | 組成比と位置 $x = X_m$ におけるA | 組成比との平均値よりも小さい値としている。さらに、位置 $x = X_s$ から位置 $x = X_m$ において、電子障壁層18のA | 組成比の大きさは、図4 A及び図4 Bにおいて位置 $x = X_s$ におけるA | 組成比と、位置 $x = X_m$ におけるA | 組成比とを結ぶ点線の大きさ以下である。このため、位置 $x = X_s$ と位置 $x = X_p$ との間の電子障壁層18のA | 組成比の変化率は、点線で示す変化率以下の値となる。

[0072] また、図4 Bに示す構造では、電子障壁層18を形成し始める第1領域のA | 組成比変化率を、その後に形成する領域のA | 組成比変化率よりも高めている。これは、電子障壁層18の活性層15側界面の位置、つまり、電子障壁層18を形成し始める位置の制御性を高め、半導体発光素子100の動作特性の再現性の安定性を高める効果がある。

[0073] 以上のように、本実施の形態では、電子障壁層18は、Ga N基板11の主面と垂直な積層方向においてA | 組成比が第1の変化率で変化する第1領域と、第1領域と第2半導体層19との間に配置され、積層方向においてA | 組成比が第2の変化率で変化する第2領域とを有する。第1領域及び第2領域において、A | 組成比は活性層15から第2半導体層に向かう方向に対して単調増加し、第2の変化率は第1の変化率よりも大きい。

[0074] これにより、電子障壁層18の活性層15側界面への分極電荷の大きさの影響を、図4 A及び図4 Bで点線で示されたA | 組成比分布を有する電子障壁層よりも小さくすることができる。この結果、電子障壁層18の活性層15側界面でのバンド構造の電位の低下が、点線で示す構造に対して小さくなるため、電位障壁 $\Delta E_c$ が増大する。さらに、価電子帯の正孔に対するバンド障壁を低減できるため、半導体発光素子100の動作電圧を低減できる。これに伴い、半導体発光素子100の温度特性を向上させることが可能となる。従って、高温動作においても低消費電力の半導体発光素子100を実現

できる。

[0075] 続いて、本実施の形態に係る半導体発光素子100の電子障壁層18の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の他の例について図5A～図5Dを用いて説明する。

[0076] 図5A～図5Dは、それぞれ本実施の形態に係る半導体発光素子100の電子障壁層18の積層方向におけるバンドギャップエネルギー分布の第3例～第6例を示す模式図である。

[0077] 図5Aは、A1組成比変化率の小さい第1領域とA1組成比変化率が第1領域より大きい第2領域とが接している場合のバンドギャップエネルギー分布を示す。さらに、A1組成比最大点から第2半導体層19に近づくに従ってA1組成比は減少し、活性層15側から順に、A1組成比減少率の大きい第1減少領域と、A1組成比減少率が第1減少領域よりも小さい第2減少領域とが配置されている。

[0078] 図5Bは、A1組成比変化率の小さい第1領域と、A1組成比変化率が相対的に大きい第2領域との間に、組成比変化率が第1領域よりも小さい領域が形成されている場合のバンドギャップエネルギー分布を示す。さらに、A1組成比最大点から第2半導体層19に近づくに従ってA1組成比は減少し、活性層15側から順に、A1組成比減少率の大きい第1減少領域と、A1組成比減少率が第1減少領域よりも小さい第2減少領域とが配置されている。

[0079] 図5Cは、A1組成比変化率の小さい第1領域とA1組成比変化率が第1領域より大きい第2領域とが接している場合のバンドギャップエネルギー分布を示す。さらに、活性層15側から順に、A1組成比最大点からA1組成比が一定である一定領域と、A1組成比減少率の大きい第1減少領域と、A1組成比減少率が第1減少領域よりも小さい第2減少領域とが配置されている。

[0080] 図5Dは、A1組成比変化率の小さい第1領域とA1組成比変化率が第1領域より大きい第2領域との間に組成比変化率が第1領域よりも小さい領域

が形成されている場合のバンドギャップエネルギー分布を示す。さらに、活性層 15 側から順に、A | 組成比最大点から A | 組成比が一定である一定領域と、A | 組成比減少率の大きい第 1 減少領域と、A | 組成比減少率が第 1 減少領域よりも小さい第 2 減少領域とが配置されている。

[0081] 図 5 A ~ 図 5 D に示すいずれの場合でも、電子障壁層 18 が形成され始める位置  $x = X_s$  と、A | 組成比が最大となる位置  $x = X_m$  との中点  $x = X_p$  において、その A | 組成比が、位置  $x = X_s$  における A | 組成比と位置  $x = X_m$  における A | 組成比との平均値よりも小さい値としている。さらに、位置  $x = X_s$  から位置  $x = X_m$  において、電子障壁層 18 の A | 組成比の大きさは、各図において位置  $x = X_s$  における A | 組成比と、位置  $x = X_m$  における A | 組成比とを結ぶ点線の大きさ以下の範囲で形成されている。このため、位置  $x = X_s$  と位置  $x = X_p$  との間の電子障壁層 18 の A | 組成比の変化率は、点線で示す変化率以下の値となる。

[0082] 以上のように本実施の形態では、電子障壁層 18 の活性層 15 側界面への分極電荷の大きさの影響を、点線で示された A | 組成比分布を有する電子障壁層よりも小さくすることができる。この結果、電子障壁層 18 の活性層 15 側界面でのバンド構造の電位の低下が、点線で示す構造に対して小さくなるため、電位障壁  $\Delta E_c$  が増大する。さらに、価電子帯の正孔に対するバンド障壁を低減できるため、半導体発光素子 100 の動作電圧を低減できる。これに伴い、半導体発光素子 100 の温度特性を向上させることが可能となる。

[0083] また、電子障壁層 18 は、活性層 15 側から順に、位置  $x = X_m$  から第 2 半導体層 19 に向かう方向に A | 組成比が単調に減少する第 1 減少領域と、第 1 減少領域よりも小さい変化率で A | 組成比が単調に減少する第 2 減少領域とを有する。このため、図中の一点鎖線で示された一定の A | 組成比減少率を示す構成よりも A | 組成比が減少する領域での平均 A | 組成比が小さくなる。

[0084] また、電子障壁層 18 の第 2 半導体層 19 側の界面の位置  $x = X_e$  は、第

2半導体層19の平均AⅠ組成比と電子障壁層18のAⅠ組成比とが同一の値となる位置である。第2半導体層19がGaⅠNを含む、AⅠ組成比の異なる2種のAⅠGaⅠN層からなる超格子で形成される場合は、位置 $x = X_e$ は、第2半導体層19の積層方向に対する平均AⅠ組成比と、電子障壁層18のAⅠ組成比とが同一となる位置を意味する。

[0085] ここで、高AⅠ組成比のAⅠGaⅠNにおいては、通常ドーパントとして使用されるMgの活性化率が低い。このため高AⅠ組成比のAⅠGaⅠNは、低AⅠ組成比のAⅠGaⅠNよりも抵抗が高くなる。そのため、電子障壁層18において、高AⅠ組成比となる領域が厚くなると、価電子帯のバンド構造において正孔の活性層15側への電気伝導を阻害する電位障壁を形成する領域の膜厚が厚くなるため、正孔の伝導が阻害される。これに伴い動作電圧が増大する。このため、AⅠ組成比の成長膜厚方向に対し減少する領域である、第2減少領域と第1減少領域との合計膜厚は、できるだけ薄い方がよい。当該合計膜厚は、例えば、4nm以下である。また、当該合計膜厚は、2nm以下であってもよい。

[0086] 図5A～図5Dのいずれの場合でも、図中の一点鎖線で示された一定のAⅠ組成比減少率を示す構成よりもAⅠ組成比が減少する領域での平均AⅠ組成比が小さくなり、半導体発光素子100の動作電圧の増大を抑制することができる。

[0087] また、図5C及び図5Dに示す例では、AⅠ組成比が一定となる領域が形成されている。これは、半導体発光素子100の製造時の同一ウェハ面内のAⅠ組成比のばらつきを考慮して形成されている領域である。これにより、同一ウェハ面内の電子障壁層18において一定の最大AⅠ組成比を得ることができるため、電位障壁 $\Delta E_c$ の大きさのウェハ面内での均一性を高めることができる。ただし、このAⅠ組成比一定領域の膜厚が厚くなりすぎると、高AⅠ組成比となる領域の膜厚が厚くなるため、前述のように動作電圧増大を招いてしまう。このため、組成比一定領域の膜厚は、可能な限り薄い方が良い。当該組成比一定領域の膜厚は、例えば2nm以下である。また、当

該組成比一定領域の膜厚は、1 nm以下であってもよい。

[0088] 以上では、電子障壁層18のA | 組成比分布が複数の一次直線で表される場合について説明したが、以下では一次直線に限定されない関数  $f(x)$  で表される場合について図6を用いて説明する。なお、ここで、Ga N基板11の主面と垂直な積層方向を  $x$  軸方向としている。図6は、本実施の形態に係る電子障壁層18の積層方向におけるA | 組成比分布の一例を示す図である。図6のグラフ(a)は、A | 組成比分布を示す関数  $f(x)$  を示すグラフである。図6のグラフ(b)及び(c)は、それぞれ関数  $f(x)$  の一次導関数  $f'(x)$  及び二次導関数  $f''(x)$  を示すグラフである。

[0089] 図6に示すように、電子障壁層18は、 $X_s < x \leq X_m$ を満足する領域において、 $f''(x) > 0$ 、かつ、 $f'(x) > 0$ となる第1凹領域を有する。この関係を満足することにより、位置  $x = X_s$  と位置  $x = X_m$  との間では、 $f(x)$  は図6のグラフ(a)に示すように凹形状（つまり、下に凸形状）となる。

[0090] また、図6のグラフ(c)に示すように、第1凹領域における位置  $x = X_1$  において、二次導関数  $f''(x)$  が極大となっている。このことにより、第1凹領域に組成比の変化率が最大となる位置  $x = X_1$  が存在し、位置  $x = X_s$  から位置  $x = X_1$  までの間でA | 組成比の変化率が徐々に増大していくことになる。

[0091] この場合、A | 組成比の変化率は活性層15側の方が小さくなり、活性層15側界面近傍領域での分極電荷の大きさを低減することができる。このため、前述のように位置  $x = X_s$  近傍の活性層15側界面に存在する電子濃度を低減することができ、電子障壁層18の価電子帯に形成されるホール障壁電位の増大を抑制できる。この結果、素子の動作電圧の低減及び電位障壁  $\Delta E_c$  の増大を実現できる。

[0092] 図6のグラフ(b)に示すように、 $f'(x)$  の大きさは連続しており、不連続となる位置が存在しない。このため、電子障壁層18内で形成される分極電荷面密度が急峻に変化する位置が存在しない。従って、電子障壁層1

8内で形成される正の分極電荷が急激に増大する位置が発生することを防止することができる。

[0093] この結果、電子障壁層18の活性層15側界面近傍領域での電子濃度を低減することができ、動作電圧を低減することができる。

[0094] また、図6のグラフ(a)に示すように、電子障壁層18は、位置 $x$ について $X_1 < x \leq X_e$ を満足する領域において、 $f''(x) \leq 0$ となる第1凸領域を有する。

[0095] このとき、第1凸領域において、関数 $f(x)$ は上に凸形状となる。従って、関数 $f(x)$ の形状は、下に凸の第1凹領域の第2半導体層19側に、上に凸の第1凸領域が形成された構成となる。A組成比が最大となる位置 $x = X_m$ は、第1凸領域に配置される。

[0096] このA組成比分布形状の場合、電子障壁層18内で形成される分極電荷は $f'(X)$ にほぼ比例するため、分極電荷の大きさは、電子障壁層18の活性層15側界面近傍では小さく、第2半導体層19側よりも小さくなる。

[0097] この場合、活性層15側界面近傍領域での分極電荷の大きさが低減されることから、前述のように位置 $x = X_s$ 近傍の活性層15側界面に存在する電子濃度を低減することができ、電子障壁層18の価電子帯に形成されるホール障壁電位の増大を抑制できる。この結果、素子の動作電圧の低減及び電位障壁 $\Delta E_c$ の増大を実現できる。

[0098] また、第1凸領域のA組成比分布形状は上に凸形状であるため、A組成比が最大となる位置 $x = X_m$ 近傍でのA組成比の変化率が小さくなる。このため、A組成比の最大値の制御性が良い。このことから、半導体発光素子100製造時のウェハ面内の最大A組成比のばらつきを抑制することができる。このため、再現性よく、電位障壁 $\Delta E_c$ の大きい、温度特性に優れた素子を得ることができる。

[0099] 電子障壁層18は、活性層15側から順に、位置 $x = X_m$ から第2半導体層19に向かう方向にA組成比が単調に減少する第1減少領域と、第1減少領域よりも小さい変化率でA組成比が単調に減少する第2減少領域とを

有する。言い換えると、第2減少領域におけるA | 組成比の変化率の絶対値は、第1減少領域におけるA | 組成比の変化率の絶対値より小さい。

[0100] ここで、第1減少領域と第2減少領域との合計膜厚が厚いと、A | 組成比が第2導電型の第2半導体層の平均A | 組成比よりも高いために、ホールの電気伝導を阻害する領域の膜厚増大につながり、動作電圧の増大をもたらす。

[0101] したがって、第2減少領域と第1減少領域との合計膜厚は、できるだけ薄い方がよい。本実施の形態では、当該合計膜厚は、例えば、4 nm以下である。当該合計膜厚は、2 nm以下であってもよい。

[0102] また、図6のグラフ(a)に示すように、点( $X_s$ ,  $f(X_s)$ )を通り、関数 $f(x)$ と第1凸領域の位置 $x = X_t$ で接する一次関数を $g(x)$ とすると、 $X_s < x < X_t$ を満足する位置 $x$ において、関数 $f(x)$ 、関数 $g(x)$ 及び一次導関数 $f'(x)$ は、 $g(x) > f(x)$ 、かつ、 $f'(x) > 0$ の関係を満足している。

[0103] この場合、位置 $x = X_s$ と位置 $x = X_t$ との間で $g(x)$ で決まる三角形形状のA | 組成比分布よりも、 $f(x)$ で決まるA | 組成比の方が値が小さくなる。

[0104] このため、位置 $x = X_s$ と位置 $x = X_t$ との間の電子障壁層18のA | 組成比は、 $g(x)$ で決まるA | 組成比以下の値となる。

[0105] この場合、電子障壁層18の活性層15側界面近傍での分極電荷の大きさを、 $g(x)$ で示されたA | 組成比分布を有する電子障壁層よりも小さくすることができる。この結果、電子障壁層18の活性層15側界面でのバンド構造の電位の低下が、位置 $x = X_s$ と位置 $x = X_t$ との間のA | 組成比が $g(x)$ で示される構成に対して小さくなり電位障壁 $\Delta E_c$ が増大する。さらに、価電子帯の正孔に対するバンド障壁を低減できるため、半導体発光素子100の動作電圧を低減できる。これに伴い、半導体発光素子100の温度特性を向上させることが可能となる。

[0106] 続いて、電子障壁層18のA | 組成比分布が一次直線に限定されない関数

$f(x)$  で表される場合の他の例について図7を用いて説明する。図7は、本実施の形態に係る電子障壁層18の積層方向におけるA1組成比分布の他の一例を示す図である。図7のグラフ(a)は、A1組成比分布を示す関数  $f(x)$  を示すグラフである。図7のグラフ(b)及び(c)は、それぞれ関数  $f(x)$  の一次導関数  $f'(x)$  及び二次導関数  $f''(x)$  を示すグラフである。

[0107] 図7のグラフ(a)～(c)に示すA1組成比分布を示す関数  $f(x)$  を有する電子障壁層18は、位置  $x$  について  $X_s < x \leq X_m$  を満足する領域において、 $f''(x) > 0$  かつ  $f'(x) > 0$  となる第1凹領域を有する。位置  $x = X_s$  と位置  $x = X_m$  との間でこの関係を満足する第1凹領域では、 $f(x)$  は図7のグラフ(a)に示すように凹形状（つまり、下に凸形状）となる。

[0108] また、図7のグラフ(a)～(c)に示すように、第1凹領域で  $f''(x)$  が極大となる位置を位置  $x = X_1$  とする。電子障壁層18は、位置  $x$  について  $X_s \leq x < X_1$  を満足する領域において、 $f'(x)$  が連続的に変化し、 $f'(x) > 0$  かつ二次導関数  $f''(x)$  が極大になる位置を含む第2凹領域を有する。

[0109] この場合、電子障壁層18の活性層15側界面近傍に、第1凹領域の活性層15側よりもA1組成比が増大する割合の大きい領域があるが、急峻なステップ状の変化ではない第2凹領域が形成されている。

[0110] 急峻なステップ状にA1組成比が増大すると、そのステップ状に変化する位置で発生する分極電荷が大きくなり、電子障壁層18と活性層15との界面で発生する電子濃度の増大から前述のように動作電圧の増大につながる。

[0111] 本実施の形態では、電子障壁層18と活性層15との界面近傍でのA1組成比の変化はステップ状でないため、動作電圧の増大を抑制することが可能となる。

[0112] また、図7のグラフ(a)～(c)に示すように、電子障壁層18は、位置  $x$  について  $X_s \leq x < X_1$  を満足する領域において、 $f''(x) \leq 0$  と

なる第2凸領域を有する。これにより、第2凸領域のA | 組成比分布形状は上に凸形状となる。

[0113] 活性層15近傍の界面に、凹形状（つまり、下に凸形状）から上に凸形状に変わる形状の、第2凹領域及び第2凸領域を順次形成すれば、第2凹領域、第2凸領域を順次形成しない場合と比較して、電子障壁層18の形成初期において、A | 組成比の増加率を大きくすることができる。この結果、電子障壁層18を形成し始める位置の制御性を高め、素子の動作特性の再現性を高める効果がある。

[0114] ここで、第2凸領域の第2半導体層19側に、凹形状の第1凹領域を形成する。つまり、第2凸領域は、第2凹領域と、第1凹領域との間に配置される。この場合、A | 組成比が増大する変化率の大きい領域が形成され、大きい分極電荷の発生する領域を活性層15側から遠ざけることができる。

[0115] また、第1凹領域の第2半導体層19側に、上に凸形状の第1凸領域が形成されている。第1凸領域は、A | 組成比が最大となる位置 $x = X_m$ を含む。

[0116] この場合、A | 組成比最大となる位置 $x = X_m$ 近傍でのA | 組成比の変化率が小さくなり、A | 組成比の最大値を制御性良く作製することができる。このことから、半導体発光素子作製時のウェハ面内の最大A | 組成比のばらつきを抑制することができる。このため、再現性よく、電位障壁 $\Delta E_c$ の大きい、温度特性に優れた半導体発光素子を得ることができる。

[0117] また、図7のグラフ(a)に示すように、関数 $f(x)$ と第2凸領域の点 $(X_u, f(X_u))$ で接し、かつ、関数 $f(x)$ と第1凸領域の点 $(X_v, f(X_v))$ で接する一次関数を関数 $h(x)$ とする。 $X_u < x < X_v$ を満足する位置 $x$ において、関数 $f(x)$ 、関数 $h(x)$ 及び一次導関数 $f'(x)$ は、 $h(x) > f(x)$ 、かつ、 $f'(x) > 0$ の関係を満足する。

[0118] この場合、位置 $x = X_u$ と位置 $x = X_v$ との間で $h(x)$ で決まる台形状のA | 組成比分布よりも、 $f(x)$ で決まるA | 組成比の方が値が小さくなる。

- [0119] このため、位置  $x = X_u$  と位置  $x = X_v$  との間の電子障壁層 18 の A | 組成比は、 $h(x)$  で決まる A | 組成比以下の値となる。
- [0120] 電子障壁層内に形成される分極電荷は前述のように  $f'(x)$  に比例する。
- [0121] この場合、正の分極電荷面が相対的に大きく形成される領域は図 7 のグラフ (b) に示すように  $f'(x)$  の極大値近傍の領域であるため、位置  $x = X_u$  よりも位置  $x = X_v$  近傍の正の分極電荷が大きくなる。
- [0122] その結果、位置  $x = X_u$  近傍での正の分極電荷の大きさを、 $h(x)$  で示された A | 組成比分布を有する電子障壁層よりも小さくすることができる。このため、電子障壁層 18 の活性層 15 側界面でのバンド構造の電位の低下が、位置  $x = X_u$  と位置  $x = X_v$  との間の A | 組成比が  $h(x)$  で示される構成に対して小さくなり、電位障壁  $\Delta E_c$  を増大できる。さらに、価電子帯の正孔に対するバンド障壁電位を低減できるため、半導体発光素子 100 の動作電圧を低減できる。これに伴い、半導体発光素子 100 の温度特性を向上させることが可能となる。
- [0123] また、電子障壁層 18 は、活性層 15 側から順に、A | 組成比が最大となる位置  $x = X_m$  から第 2 半導体層に向かう方向に A | 組成比が単調に減少する第 1 減少領域と、第 1 減少領域よりも小さい変化率で A | 組成比が減少する第 2 減少領域とを有する。第 1 減少領域と第 2 減少領域との合計膜厚が厚いと、A | 組成比が第 2 半導体層 19 の平均 A | 組成比よりも高い領域が増大するため、ホールの伝導を阻害する領域の膜厚増大につながり、動作電圧の増大につながる。
- [0124] 従って第 1 減少領域と第 2 減少領域との合計膜厚は、できるだけ薄い方がよい。本実施の形態では、当該合計膜厚は、例えば 4 nm 以下である。当該合計膜厚は、2 nm 以下であってもよい。
- [0125] また、図 6 及び図 7 に示した電子障壁層 18 の A | 組成比分布形状において、位置  $x = (X_s + X_m) / 2$  において、 $f''(x) > 0$ 、かつ、 $f'(x) > 0$  となっている。

- [0126] これにより、位置  $x = X_s$  と位置  $x = X_m$  との midpoint では、 $f(x)$  は凹形状（つまり、下に凸形状）の増加関数となる。 $g(x)$  で決まる三角形形状の A I 組成比分布、又は、 $h(x)$  で決まる台形状の A I 組成比分布よりも  $f(x)$  は小さく、位置  $x = X_s$  における電子障壁層 18 の分極電荷の影響を低減でき、電子濃度が低減される。
- [0127] このため、電子障壁層 18 の活性層 15 側界面でのバンド構造の電位の低下が、 $g(x)$  又は  $h(x)$  で示される構成に対して小さくなり、電位障壁  $\Delta E_c$  が増大する。さらに、価電子帯の正孔に対するバンド障壁電位を低減できるため、半導体発光素子 100 の動作電圧を低減できる。これに伴い、半導体発光素子 100 の温度特性を向上させることが可能となる。
- [0128] 図 6 及び図 7 に示した電子障壁層 18 の A I 組成比分布形状において、第 1 凹領域の幅が、 $(X_m - X_s) / 2$  以上となっている。
- [0129] この場合、位置  $x = X_s$  から位置  $x = X_m$  までの範囲において、分極電荷の大きさが大きくなる領域を A I 組成比最大点  $X_m$  寄りに配置できるため、分極電荷発生位置を電子障壁層 18 の活性層 15 側界面から遠ざけることができる。
- [0130] このため、電子障壁層 18 の活性層 15 側界面でのバンド構造の電位の低下が、 $g(x)$  又は  $h(x)$  で示される構成に対して、より小さくなり、電位障壁  $\Delta E_c$  が増大する。さらに、価電子帯の正孔に対するバンド障壁電位をより低減できるため、半導体発光素子 100 の動作電圧を低減できる。これに伴い、半導体発光素子 100 の温度特性を向上させることが可能となる。
- [0131] また、本実施の形態に係る半導体発光素子 100 の電子障壁層 18 には、Mg がドーピングされている。電子障壁層 18 の第 1 凸領域では、A I 組成比の高い A I Ga N が使用される。これにより、電位障壁  $\Delta E_c$  が大きくなることで電子の第 2 半導体層への漏れを抑制できる。最大 A I 組成比は、例えば 0.2 以上、又は、0.3 以上としてもよい。このように A I 組成比が高くなると Mg のアクセプタ準位のエネルギーと A I Ga N の価電子帯との

エネルギー差が大きくなるため、Mgはアクセプタとして活性化しにくくなる。そこで電子障壁層18へのMgのドーピング濃度は $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上に高め、活性化するアクセプタの濃度を高めてもよい。ただし、Mgのドーピング濃度を $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上と、あまりに高めると電子障壁層18の結晶性の低下が生じ、高温高出力動作時の半導体発光素子100の信頼性の低下につながりかねない。そこでMgのドーピング濃度を、 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 未満としてもよい。

- [0132] 本実施の形態に係る半導体発光素子100では、電子障壁層18には $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下のMgドーピングを行っている。
- [0133] また、Al組成比が相対的に低い位置 $x = X_s$ と位置 $x = (X_s + X_m) / 2$ までの間の領域では、Mgのアクセプタとしての活性化率が高いため、ドーピングするMgの濃度を $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ とし、Al組成比が高くなる第1凸領域近傍ではドーピングするMgの濃度を $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ と相対的に高めてもよい。これにより、Mg濃度の増大による電子障壁層18での結晶性の低下を抑制することができる。
- [0134] また、図4A及び図4B及び図5A～図5Dに示す電子障壁層18の構成において、第1領域の膜厚が電子障壁層18の膜厚の50%より大きく80%以下、かつ、位置 $x = (X_m + X_s) / 2$ でのAl組成比が電子障壁層18におけるAl組成比最大値の50%以下であってもよい。これにより、後述するように、動作電圧の低減、電位障壁 $\Delta E_c$ の増大、及び、漏れ電流の低減を同時に実現することができる。
- [0135] 図4A及び図4Bに示した複数の一次直線で表されるAl組成比分布を有する電子障壁層18の第1領域ではAl組成比の変化率が小さく、その第2半導体層19側の第2領域ではAl組成比の変化率が大きい。
- [0136] これに対し、図6及び図7に示す曲線状のAl組成比分布を有する電子障壁層18では、位置 $x = X_1$ よりも第2半導体層19寄りの領域でAl組成比の変化率の増大する割合( $f'(x)$ )が大きくなるため、曲率が増大し、Al組成比の大きさを示す関数 $f(x)$ の曲率が大きくなるという特徴

がある。

[0137] このことから、図6及び図7に示した曲線状のAⅠ組成比分布を有する電子障壁層18では、図4A及び図4Bに示した第1領域は、第1凹領域内で、AⅠ組成比の変化率の変化( $f'(x)$ )が最大になる位置 $x = X_1$ よりも活性層15寄りの領域に相当する。

[0138] 従って、図6及び図7に示した曲線状のAⅠ組成比分布を有する電子障壁層18では、第1領域の膜厚が電子障壁層18の膜厚の50%より大きく80%以下、かつ、位置 $x = (X_m + X_s) / 2$ でのAⅠ組成比が電子障壁層18におけるAⅠ組成比最大値の50%以下であれば、動作電圧の低減、 $\Delta E_c$ の増大、漏れ電流の低減を同時に実現することができる。

[0139] 以上のように、本実施の形態では、電子障壁層18のAⅠ組成比が変化する領域において、AⅠ組成比が連続的に変化する。このような電子障壁層18のAⅠ組成比分布は、例えば、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) を用いて形成できる。MOCVDにおいて、結晶成長させる際、例えば、当該結晶の原料を含むガスの供給量を時間的に変化させることで、組成比分布を自在に調整できる。上述したAⅠ組成比分布の各形状は、時間に対して微小なステップ状にAⅠ供給量を変化させることで実現できる。なお、この場合、AⅠ供給量を時間に対して直線的に変化させても、原料ガスの粘性などの影響により結晶成長面に到達する原料に時間遅延が生じるため、曲線状のAⅠ組成比分布となり得る。

[0140] [1-4. 電子障壁層の作用及び効果]

次に、本実施の形態に係る電子障壁層18の作用及び効果について、図8～図12を用いて説明する。

[0141] 図8は、本実施の形態に係る半導体発光素子100の第1の構成例のシミュレーション結果を示す図である。図9は、比較例2に係る半導体発光素子のシミュレーション結果を示す図である。図10は、本実施の形態に係る半導体発光素子100の第2の構成例のシミュレーション結果を示す図である

。図11は、本実施の形態に係る半導体発光素子100の第3の構成例のシミュレーション結果を示す図である。図12は、比較例3に係る半導体発光素子のシミュレーション結果を示す図である。なお、各シミュレーションにおいては、いずれも半導体発光素子の動作電流を300mAとしている。

[0142] 図8～図12の各グラフ(a)は、電子障壁層近傍の禁制帯幅エネルギー(バンドギャップ)の分布を示し、各グラフ(b)は、電子障壁層近傍の単位体積あたりの分極電荷の分布を示す。図8～図12の各グラフ(c)は、電子障壁層近傍の電子、正孔濃度の分布を示し、各グラフ(d)は、電子障壁層18近傍の電界分布を示す。図8～図12の各グラフ(e)は、電子障壁層18近傍の伝導帯バンド構造と電子のフェルミエネルギーの分布とを示し、各グラフ(f)は、電子障壁層18近傍の価電子帯バンド構造と正孔(つまり、ホール)のフェルミエネルギーの分布とを示す。

[0143] 図8は、電子障壁層18の膜厚を7nmとした場合のシミュレーション結果を示す。本シミュレーションでは、電子障壁層18は、膜厚5nmの第1領域と、膜厚2nmの第2領域とを有する。第1領域においては、活性層15側から第2半導体層19側に進むに従って、Al組成比を0から0.15に直線的に増加させている。第2領域においては、活性層15側から第2半導体層19側に進むに従って、Al組成比を0.15から0.35に増加させている。

[0144] 図8のグラフ(b)に示すように、電子障壁層18の活性層15側には、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の正の分極電荷が生じ、第2半導体層側には $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の正の分極電荷が生じている。図8のグラフ(b)では、正の分極電荷のみ表示している。この分極電荷は、例えば、電子障壁層の均一なAl組成比0.35を有する場合と比較して1%程度に相当する。また、電子障壁層18と第2半導体層19との界面には、図示はしていないが、 $-5.3 \times 10^{-2} \text{ C/m}^2$ の面密度を有する負の分極電荷が形成される。ここで、電子一個当たりの電荷素量が $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ であることから、界面の膜厚をAlGaInのc軸方向格子定数の数十分の一程度となる0.01nmと仮定すれば

、電子濃度に換算して  $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  程度に相当する負の分極電荷が界面に生じていると考えられる。このように本実施の形態に係る電子障壁層 18 によれば、活性層 15 側における分極電荷を抑制できる。本開示において、分極電荷の体積密度は、電子濃度に換算した値である。

[0145] 図8のグラフ(c)に示すように、電子障壁層18界面に生じた正の分極電荷との電気的な中性条件を満足するために電子障壁層18の活性層側界面に  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の濃度の電子が誘引されている。これに伴い、電子障壁層の活性層側界面に電界が生じるが、その強度も  $-0.2 \text{ MV/cm}$  に低減されている。この結果、図8のグラフ(e)及び(f)に示すように電子障壁層18の活性層15側界面の伝導帯及び価電子帯のバンドの電位の低下も抑制されるため、電子に対する電位障壁  $\Delta E_c$  の低下と正孔に対する電位障壁  $\Delta E_v$  の増大とが抑制されている。図8に示す構成では、電位障壁  $\Delta E_c$  は  $0.77 \text{ eV}$ 、電位障壁  $\Delta E_v$  は  $0.22 \text{ eV}$  である。また、図2に示す比較例1のシミュレーション結果なども参照すると、電子障壁層18のAl組成比分布が、図8に示した電子障壁層18のように凹形状(下に凸形状)である方が、電子に対する電位障壁  $\Delta E_c$  は大きく、正孔に対する電位障壁  $\Delta E_v$  が小さくなることがわかった。

[0146] 図9には、本実施の形態に係る半導体発光素子100の比較例2として、電子障壁層18Bの構成だけが本実施の形態と異なる半導体発光素子をシミュレーションした結果を示す。比較例2に係る電子障壁層18Bの膜厚を  $7 \text{ nm}$  とし、電子障壁層18Bの活性層15側から第2半導体層19側に進むに従って、Al組成比を0から0.35に、増加させている。ただし、そのAl組成比の増加率は徐々に減少するようにAl組成比を増加させている。つまり、Al組成比分布のグラフは直線ではなく上に凸形状となる。

[0147] 図9のグラフ(b)に示すように電子障壁層18Bの活性層15側には、  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の正の分極電荷が生じている。図9のグラフ(b)では、正の分極電荷のみ表示している。この値は、図8に示した本実施の形態に係る半導体発光素子100のシミュレーションで生じた値の5倍である。また

、電子障壁層18と第2半導体層19との界面には、図示はしていないが、 $-5.3 \times 10^{-2} \text{C/m}^2$ の面密度を有する負の分極電荷が形成される。ここで、電子一個当たりの電荷素量が $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ であることから、界面の膜厚をAlGaInのc軸方向格子定数の数十分の一程度となる $0.01 \text{nm}$ と仮定すれば、電子濃度に換算して $1 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 程度に相当する負の分極電荷が界面に生じていると考えられる。

[0148] 図9のグラフ(c)には、電子障壁層18B界面に生じた正の分極電荷との電気的な中性条件を満足するために電子障壁層18Bの活性層15側界面に $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の濃度の電子が誘引されている。この濃度は、図8のグラフ(c)に示した値の10倍程度に相当する。このため、電子障壁層18Bの活性層15側界面に生じる電界は $-0.9 \text{MV/cm}$ となり、その絶対値は、図8のグラフ(c)に示した場合の約4.5倍となっている。この結果、図8のグラフ(e)及び(f)に示すように電子障壁層18Bの活性層15側界面の伝導帯、価電子帯のバンドの電位の低下も図8に示した結果と比較して大きくなる。これに伴い、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ が低下し、正孔に対する電位障壁 $\Delta E_v$ が増大している。図9に示す構成では、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ は $0.68 \text{eV}$ 、正孔に対する電位障壁 $\Delta E_v$ は $0.28 \text{eV}$ となっている。

[0149] 図10は、電子障壁層18の膜厚を $7 \text{nm}$ とした場合のシミュレーション結果を示す。本シミュレーションでは、電子障壁層18の活性層15側の膜厚 $5 \text{nm}$ の領域で、活性層15側から第2半導体層19側に進むに従って、Al組成比を0から0.15に徐々に(直線的に)増加させている。また、電子障壁層18の第2半導体層19側の膜厚 $2 \text{nm}$ の領域で、活性層15側から第2半導体層19側に進むに従って、Al組成比の増加率が増大するように、Al組成比を0.35まで増加させている。この場合、電子障壁層18の第2半導体層19側の膜厚 $2 \text{nm}$ の領域で、Al組成比分布が凹形状(下に凸形状)となる。

[0150] 図10のグラフ(b)に示すように電子障壁層18の活性層15寄りの領

域には、活性層 15 から遠ざかるに従って、 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  から  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  へと減少するように分布した正の分極電荷が生じている。図 10 のグラフ (b) では、正の分極電荷のみ表示している。また、電子障壁層 18 と第 2 半導体層 19 との界面には、図示はしていないが、 $-5.3 \times 10^{-2} \text{ C} / \text{m}^2$  の面密度を有する負の分極電荷が形成される。ここで、電子一個当たりの電荷素量が  $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$  であることから、界面の膜厚を AlGaIn の c 軸方向格子定数の数十分の一程度となる  $0.01 \text{ nm}$  と仮定すれば、電子濃度に換算して  $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$  程度に相当する負の分極電荷が界面に生じていると考えられる。

[0151] 図 10 のグラフ (c) には、電子障壁層 18 界面に生じた正の分極電荷との電気的な中性条件を満足するために電子障壁層 18 の活性層 15 側界面に  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の濃度の電子が誘引されている。この濃度は、図 9 のグラフ (c) に示した場合の 10 分の 1 程度に抑制されている。このため、電子障壁層 18 の活性層 15 側界面に生じる電界は  $-0.3 \text{ MV} / \text{cm}$  とその絶対値も抑制されている。この結果、図 10 のグラフ (e) 及び (f) に示すように電子障壁層 18 の活性層 15 側界面の伝導帯、価電子帯のバンドの電位低下も抑制されるため、電子に対する電位障壁  $\Delta E_c$  が増大し、正孔に対する電位障壁  $\Delta E_v$  が低下している。図 10 示す構成では、電子に対する電位障壁  $\Delta E_c$  は  $0.77 \text{ eV}$ 、正孔に対する電位障壁  $\Delta E_v$  は  $0.23 \text{ eV}$  となっている。

[0152] 図 11 に示すシミュレーションにおいては、図 10 に示す電子障壁層の第 2 半導体層 19 側に、活性層 15 側から第 2 半導体層 19 側に進むに従って、Al 組成比が減少する領域（以下、「Al 組成比減少領域」ともいう） $2 \text{ nm}$  を付加した構成を有する電子障壁層 18 を用いている。

[0153] 電子障壁層 18 の Al 組成比減少領域では、活性層 15 側から第 2 半導体層 19 側に進むに従って、Al 組成比の減少率の絶対値が徐々に大きくなり、その後、徐々に小さくなるように Al 組成比が第 2 半導体層 19 と同じになるまで減少していく。つまり、Al 組成比減少領域は、Al 組成比分布形

状が上に凸形状となる領域の第2半導体層19側に、凹形状（つまり、下に凸形状）となる領域が形成されたA1組成比分布を有する。

[0154] 図11のグラフ(b)に示すように電子障壁層18の活性層15側には、活性層15から遠ざかるに従って、 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ から $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ へと減少するように分布した正の分極電荷が生じている。図11のグラフ(b)では、正の分極電荷のみ表示している。また、電子障壁層18の第2半導体層19側におけるA1組成が減少する領域では、図示はしていないが、 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 程度の負の分極電荷が生じている。

[0155] 図11のグラフ(c)には、電子障壁層18界面に生じた正の分極電荷との電気的な中性条件を満足するために電子障壁層18の活性層15側界面に $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の濃度の電子が誘引されている。

[0156] この電子濃度は、図10に示した構成と同等の値であるが、電子障壁層18の第2半導体層19側にA1組成比減少領域を付加したために、図11のグラフ(f)に示すように価電子帯バンド構造の電位の最小値が低下し、正孔に対する電位障壁 $\Delta E_v$ が増大するため、半導体発光素子100の動作電圧が増大する。

[0157] 図11のグラフ(e)及び(f)に示すように電子障壁層18の活性層15側界面の伝導帯及び価電子帯のバンドの電位の低下も図10に示した構成と比較して低減されている。このため、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ が低下し、正孔に対する電位障壁 $\Delta E_v$ が増大している。図11に示す構成では、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ は $0.68 \text{ eV}$ 、正孔に対する電位障壁 $\Delta E_v$ は $0.28 \text{ eV}$ となっている。

[0158] 正孔に対する電位障壁 $\Delta E_v$ は図10に示した構成と比較して $0.05 \text{ eV}$ 程度増大し、半導体発光素子100の電流-電圧特性において、立ち上がり電圧の $0.04 \text{ V}$ 程度の増大を招くことになる。このため、電子障壁層18のA1組成比減少領域は可能な限り薄い方がよい。

[0159] 図12には、本実施の形態に係る半導体発光素子100の比較例3として、電子障壁層18Cの構成だけが本実施の形態と異なる半導体発光素子をシ

ミュレーションした結果を示す。比較例3に係る電子障壁層18Cの膜厚を9nmとし、電子障壁層18Cの活性層15側の膜厚7nmの領域において、電子障壁層18Cの活性層15側から第2半導体層19側に進むに従って、Al組成比を0から0.35に、増加させている。電子障壁層18Cの第2半導体層19側の膜厚2nmのAl組成比減少領域において、活性層15側から第2半導体層19側に進むに従って、Al組成比を第2半導体層19と同じになるまで減少させている。

[0160] 電子障壁層18CのAl組成比減少領域では、活性層15側から第2半導体層19側に進むに従って、Al組成比の減少率の絶対値が徐々に大きくなり、その後、徐々に小さくなるようにAl組成比が減少していく。つまり、Al組成比減少領域は、Al組成比分布形状が上に凸形状となる領域の第2半導体層19側に、凹形状（つまり、下に凸形状）となる領域が形成されたAl組成比分布を有する。

[0161] 図12のグラフ(b)に示すように電子障壁層18Cの活性層側には、 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の正の分極電荷が生じている。図12のグラフ(b)では、正の分極電荷のみ表示している。また、電子障壁層18の第2半導体層19側におけるAl組成が減少する領域では、図示はしていないが、 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 程度の負の分極電荷が生じている。

[0162] 図12のグラフ(c)には、電子障壁層18界面に生じた正の分極電荷との電気的な中性条件を満足するために電子障壁層18Cの活性層15側界面に $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の濃度の電子が誘引されている。

[0163] このように電子濃度が、図11に示す構成の2倍程度に増加している。これは、電子障壁層18Cの活性層15側の膜厚7nmの領域のAl組成比が、図11に示す構成より大きいためである。つまり、図11に示す構成のようにAl組成比分布が凹形状を有する方が、誘引される電子濃度を低減できる。

[0164] 図12のグラフ(e)及び(f)に示すように電子障壁層18Cの活性層15側界面の伝導帯及び価電子帯のバンドの電位の低下も、図11に示す構

成と比較して低減されている。このため、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ が低下し、正孔に対する電位障壁 $\Delta E_v$ が増大している。図12に示す構成では、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ は0.66 eV、正孔に対する電位障壁 $\Delta E_v$ は0.30 eVとなっている。

[0165] 次に、本実施の形態に係る電子障壁層18のA | 組成比分布の形状と、半導体発光素子100の動作電圧及び電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ との関係について、図13～図15を用いて説明する。図13は、シミュレーションにおいて用いた電子障壁層のA | 組成比分布形状を示す模式図である。図14及び図15は、それぞれ電子障壁層の膜厚が5 nm及び15 nmである場合のシミュレーション結果を示すグラフである。

[0166] 本シミュレーションでは、電子障壁層の膜厚が5 nm及び15 nmの各場合について、電子障壁層のA | 組成比最大値、第1領域のA | 組成比最大値、及び、第1領域の膜厚を変化させて、動作電流値300 mAでの動作電圧と、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ とを見積もり、電子漏れ抑制及び低電圧化に効果のある形状の検討を行った。

[0167] まず、図14を用いて電子障壁層の膜厚が5 nmの場合のシミュレーション結果について説明する。

[0168] 図14のグラフ(a)～(e)は、300 mA動作時の動作電圧の、第1領域の膜厚依存性の計算結果を示し、グラフ(f)～(j)は、電子の電位障壁 $\Delta E_c$ の、第1領域の膜厚依存性の計算結果を示す。グラフ(a)及び(f)は、最大A | 組成比が0.15であって、第1領域の最大A | 組成比が0.05、0.1、0.15の各場合における計算結果を示す。グラフ(b)及び(g)は、最大A | 組成比が0.2であって、第1領域の最大A | 組成比が0.05、0.1、0.15、0.2の各場合における計算結果を示す。グラフ(c)及び(h)は、最大A | 組成比が0.25であって、第1領域の最大A | 組成比が0.05、0.1、0.15、0.2、0.25の各場合における計算結果を示す。グラフ(d)及び(i)は、最大A | 組成比が0.3であって、第1領域の最大A | 組成比が0.05、0.1、0

、0.15、0.2、0.25、0.3の各場合における計算結果を示す。グラフ(e)及び(j)は、最大A1組成比が0.35であって、第1領域の最大A1組成比が0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35の各場合における計算結果を示す。

[0169] 各グラフにおいて、白丸で表示している点は、図13に示すA1組成比分布形状が、凹形状(つまり、下に凸形状)となる領域と、凸形状(つまり、上に凸形状)となる領域の境界となる“直線状形状”となる第1領域の膜厚を表している。

[0170] 図15のグラフ(a)~(j)は、それぞれ、電子障壁層の膜厚が15nmである点以外は、図14のグラフ(a)~(j)と同様の計算結果を示すグラフである。

[0171] 各グラフにおいて、白丸で表示している点は、図14の各グラフと同様に“直線状形状”となる第1領域の膜厚を表している。

[0172] 図14及び図15のグラフ(a)~(e)に示すように、電子障壁層における最大A1組成比が0.15以上0.35以下、第1領域の最大A1組成比が0.05以上0.35以下の範囲において、第1領域の最大A1組成比が電子障壁層における最大A1組成比の大きさの50%となる組成比以下であって、第1領域の膜厚が、電子障壁層の膜厚の50%以上あれば、直線状形状の場合の動作電圧以下の値となる。

[0173] 第1領域の膜厚が、電子障壁層の膜厚と同一になった場合は、電子障壁層の最大A1組成比は第1領域の最大A1組成比となる。従って、第1領域の膜厚が電子障壁層の膜厚に近づくにつれて、電子障壁層の禁制帯幅エネルギーが大きい領域の膜厚が薄くなる。このため量子力学的なトンネル効果の影響により、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ は電子障壁層の最大A1組成比を、第1領域の最大A1組成比とした場合の $\Delta E_c$ の値に近づいていく。

[0174] 図14及び図15のグラフ(f)~(g)に示すように、電子障壁層における最大A1組成比が0.15以上0.35以下、第1領域の最大A1組成比が0.05以上0.35以下の範囲において、第1領域の膜厚が電子障壁

層の膜厚の80%以下であれば、電子に対する電位障壁 $\Delta E_c$ の低下を抑制することができる。

[0175] 図14から図15に示した結果より、第1領域の最大A1組成比が電子障壁層における最大A1組成比の大きさの50%となる組成比以下であって、第1領域の膜厚が、電子障壁層の膜厚の50%以上、80%以下あれば、動作電圧を直線状形状の場合より抑制でき、かつ、電子障壁層の高A1組成比領域の薄膜化に伴う $\Delta E_c$ の低下を抑制することができる。

[0176] ここで、電子障壁層の膜厚が2nm以下となると、電子障壁層膜厚の薄膜化により、トンネル電流の発生や、電子障壁層の活性層側界面に存在する電子が、熱的に励起され電子障壁層を超える電子のオーバーフローを招きやすくなる。

[0177] また、電子障壁層のA1組成比の最大値を15%以上に高くすると、Mgを高濃度でドーピングする必要があり、電子障壁層の膜厚を厚くすると、導波路損失の増大を招いてしまう。

[0178] 従って、電子障壁層の膜厚は、3nm以上、20nm以下で作製する必要がある。

[0179] また、電子障壁層の膜厚を、5nm以上、15nm以下の範囲とし、第1領域の最大A1組成比が電子障壁層における最大A1組成比の大きさの50%となる組成比以下であって、第1領域の膜厚が、電子障壁層の膜厚の50%以上、80%以下としてもよい。これにより、導波路損失の増大を招かずに安定してトンネル電流、及び、電子のオーバーフローの発生を抑制しつつ、動作電圧を低減することができる。

[0180] 本実施の形態では、電子障壁層の膜厚を7nm、第1領域の膜厚を4nm、第2領域の膜厚を3nmとして、温度特性の向上と動作電圧の低減を両立させている。

[0181] [1-5. 不純物ドーピングプロファイル]

次に、本実施の形態に係る半導体発光素子100の第2半導体層19における不純物ドーピングプロファイルについて図16を用いて説明する。図1

6は、本実施の形態に係る半導体発光素子100における第2半導体層19の不純物ドーピングプロファイルを示す模式図である。

[0182] 図16に示すように、不純物濃度P1 ( $=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )である電子障壁層18の上方に第2半導体層19が形成される。第2半導体層19は、電子障壁層18側から順に、不純物濃度P2で膜厚X2の低不純物濃度領域19aと、不純物濃度P3の高不純物濃度領域19bとを含む。これにより、光分布が第2半導体層19で被るフリーキャリア損失を低減することで、導波路損失を低減する。

[0183] ただし、不純物濃度P2が小さくなりすぎると抵抗が増大し動作電圧が増大する。そこで、動作電圧の増大を抑制しつつ、低導波路損失を実現するための低不純物濃度領域19aの膜厚X2及び不純物濃度P2を検討する。

[0184] 図16に示すN1は、n型AlGaInからなる第1半導体層12とn型GaInからなる第1光ガイド層13におけるSiからなるn型不純物の濃度であり、ここでは、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ としている。また、図16に示すP4はp型GaInからなるコンタクト層20のMgからなるp型不純物の濃度であり、ここでは $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ としている。このような条件において、低不純物濃度領域19aの膜厚X2及び不純物濃度P2と、動作電圧及び導波路損失との関係について、図17A及び図17Bを用いて説明する。

[0185] 図17A及び図17Bは、それぞれ、本実施の形態に係る半導体発光素子100における動作電圧及び導波路損失の低不純物濃度領域19aの不純物濃度依存性を示すグラフである。図17A及び図17Bは、それぞれ不純物濃度P2が、 $0.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ から $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲である場合における300mA動作時の動作電圧、及び、導波路損失の不純物濃度が示されている。また、図17A及び図17Bでは、低不純物濃度領域19aの膜厚X2が50nm、170nm、270nm及び370nmである場合の依存性の計算結果が示されている。

[0186] 図17Aに示すように、p型不純物であるMgの濃度が $1.5 \times 10^{18} \text{ c}$

$m^{-3}$ 以下となると動作電圧が急激に増大する。

[0187] 図17Bに示すように、低不純物濃度領域19aの膜厚が170nm以上の場合に導波路損失低減効果が大きい。

[0188] そこで、本実施の形態では、低不純物濃度領域19aの膜厚を170nm、Mgのドーピング濃度を $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ として低動作電圧化及び低導波路損失化を実現する。このMgドーピングプロファイルにより、第2半導体層19の不純物ドーピングを $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ で一定とした場合と比較して、300mA動作時の動作電圧の増大を0.1Vに抑制し、かつ、導波路損失を $7 \text{ cm}^{-1}$ から $4 \text{ cm}^{-1}$ へと約半減することができる。

[0189] 続いて、本実施の形態に係る第2半導体層19の低不純物濃度領域19aの不純物ドーピング濃度と、価電子帯バンド構造及び正孔フェルミレベルとの関係について図18を用いて説明する。図18は、本実施の形態に係る低不純物濃度領域19aの不純物ドーピング濃度を $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ から $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ まで変化させた場合の価電子帯バンド構造及び正孔フェルミレベルの計算結果を示すグラフである。ここで、第2半導体層19の高不純物濃度領域19bのMgドーピング濃度を $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ としている。

[0190] 図18に示すように、低不純物濃度領域19aのMgドーピング濃度を小さくすると価電子帯のバンド構造の傾きが大きくなり、正孔が電界により加速され高エネルギー化しやすくなることがわかる。高エネルギー化した正孔は、電子障壁層の活性層側の領域の価電子帯のバンドの傾きでさらに加速されることで高エネルギー化するため、漏れ正孔電流の発生を招く。

[0191] また、高エネルギー化した正孔に、Mgのドーピング濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ と高い電子障壁層を通過させると、結晶欠陥の増殖を招き、半導体発光素子100の信頼性の低下要因となる。

[0192] 図18より、上述した価電子帯のバンド構造の傾きは、低不純物濃度領域19aのMgドーピング濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下になると増大することがわかる。

[0193] 従って、導波路損失及び動作電圧の増大を招かず、かつ、正孔の低不純物

濃度領域 19 a での価電子帯のバンド構造の傾きによる高エネルギーの正孔の発生を抑えるためには、低不純物濃度領域 19 a の Mg ドーピング濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以下の範囲に制御すればよいことがわかる。

[0194] 図 18 の結果と併せて、図 17 A 及び図 17 B に示した結果を考慮すれば、低不純物濃度領域 19 a の膜厚を 150 nm から 200 nm とし、Mg ドーピング濃度を  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以下の範囲に制御すれば導波路損失及び動作電圧の増大を招かず、かつ、価電子帯のバンド構造の傾きによる高エネルギーの正孔の発生を抑えることができる。これにより、高温動作特性の向上、及び、動作電流値の低減を実現できるため、半導体発光素子 100 の動作信頼性を向上させることができる。

[0195] 次に、電子障壁層の A | 組成比分布形状と、半導体発光素子特性との関係について、図 19 を用いて説明する。図 19 は、電子障壁層の A | 組成比分布形状を、形状 a、形状 b 及び形状 c とした場合における半導体発光素子の特性を示すグラフである。ここで、形状 a は、本実施の形態に係る電子障壁層の A | 組成比分布形状に相当し、活性層側の膜厚 4 nm の第 1 領域において A | 組成比は 0 から 0.15 まで直線的に増大し、第 2 半導体層側の膜厚 3 nm の第 2 領域において A | 組成比は 0.15 から 0.35 まで直線的に増大する形状である。形状 b は、活性層側の膜厚 4 nm の領域において、活性層側から第 2 半導体層側に進むに従って、A | 組成比が 0 から 0.35 まで直線的に最大値まで増加し、第 2 半導体層側の膜厚 3 nm の領域において、A | 組成比が最大値 0.35 で一定である形状である。形状 c は、膜厚 7 nm の電子障壁層における A | 組成比分布が 0.35 で一定である形状である。

[0196] 図 19 のグラフ (a) は、25°C における電流—光出力特性を示し、グラフ (b) は、25°C における電流—電圧特性を示し、グラフ (c) は、85°C における電流—光出力特性を示し、グラフ (d) は、85°C における電流—電圧特性の測定結果を示す。

[0197] 図19に示すように、形状aによれば、電子障壁層のA | 組成比分布形状においてA | 組成比変化率の小さい第1領域、A | 組成比変化率の大きい第2領域を形成することで、動作電圧が低減されると共に、電流-光出力特性の温度特性の向上効果があることがわかる。

[0198] 本実施の形態では、電子障壁層の第1領域において、A | 組成比分布形状における膜厚4 nmの領域でA | 組成比を0から0.15へ増大させた形状を採用し、第2領域において、膜厚3 nmの領域でA | 組成比を0.15から0.35へ増大させた形状を採用しているが、形状aの第1領域及び第2領域の各膜厚は、上記の各膜厚に限定されない。

[0199] 図19に示す測定結果は、活性層側がサブマウント側に近くなるようにダイヤモンドからなるサブマウント上にジャンクションダウンで実装された半導体発光素子を用いて取得した。この実装形態により半導体発光素子の熱抵抗が低減するため温度特性が向上するが、ダイヤモンドの熱伝導率は1000 W/m·K以上と、他のサブマウントに使用されている材料例えば熱伝導率200 W/m·K程度のSiC、熱伝導率150 W/m·K程度のAlNなどと比較して非常に大きく、抗熱性を実現するために適している。そのため、高温高出力動作時における半導体発光素子の温度上昇も小さくなる。このため、通常、温度が上昇すると、ドーピングしたp型不純物であるMgの活性化率が高まり、p型層の抵抗が低下するため、動作電圧が低減する。しかしながら、ダイヤモンドサブマウントを使用すると半導体発光素子の温度上昇が抑制されるため、室温から高温に温度を上げた場合の動作電圧の低減幅が小さくなる。従って、本実施の形態に係る電子障壁層のA | 組成比分布を採用することで、ホールの電気伝導性を高めて低動作電圧化を図ることは、放熱性を向上させて熱抵抗を小さくした実装形態で半導体発光素子を動作させる場合、消費電力の低減に、より効果的となる。

[0200] 例えば、熱抵抗を低減する方法として、ダイヤモンドサブマウントにジャンクションダウンで実装する場合に加えて、単結晶SiCサブマウントにジャンクションダウンで実装する場合、あるいは、共振器長を1200 μm以

上、ストライプ幅を40  $\mu\text{m}$ 以上として、放熱性を高めて熱抵抗を低減する  
場合が考えられる。

[0201] 特に10ワット以上の超高出力半導体レーザ素子では、放熱性の観点から  
ストライプ幅を40  $\mu\text{m}$ 以上、共振器長を1500  $\mu\text{m}$ 以上としてもよい。  
これにより、本実施の形態に係る電子障壁層による動作電圧の低減はより一  
層効果的となる。

[0202] (実施の形態2)

実施の形態2に係る半導体発光素子について説明する。本実施の形態に係  
る半導体発光素子は、第3光ガイド層における不純物ドーピング構成、及び  
、活性層の第2光ガイド層側のバリア層又はその界面における不純物ドーピ  
ング構成において実施の形態1に係る半導体発光素子100と相違する。以  
下、本実施の形態に係る半導体発光素子について、実施の形態1に係る半導  
体発光素子100との相違点を中心に説明する。

[0203] [2-1. 全体構成]

上述のとおり、本実施の形態に係る半導体発光素子は、実施の形態1に係  
る半導体発光素子100と同様に図1Aで示されるような層構造を有する。

[0204] 本実施の形態に係る半導体発光素子は、第3光ガイド層16及び活性層1  
5のバリア層15aの構成において、実施の形態1に係る半導体発光素子1  
00と相違する。第3光ガイド層16及びバリア層15aの構成及びその効  
果について説明する。

[0205] [2-2. 第3光ガイド層における不純物ドーピング構成]

本実施の形態に係る半導体発光素子の第3光ガイド層16の中間層17側  
の領域には、組成比傾斜領域16aが配置されている。本実施の形態におい  
ては、組成比傾斜領域16aにMgがドーピングされる。以下、本実施の形  
態に係る半導体発光素子における不純物ドーピング分布について図20及び  
図21を用いて説明する。図20は、本実施の形態に係る半導体発光素子の  
第3光ガイド層16の組成比傾斜領域16aにおける分極電荷の形成を説明  
する模式図である。図20の模式図(a)は、第3光ガイド層16の組成比

傾斜領域 16 a の近傍領域のバンド構造（つまり、禁制帯幅エネルギー）を模式的に示す。図 20 の模式図（b）は、第 3 光ガイド層 16 の組成比傾斜領域 16 a の近傍領域の分極電荷分布を模式的に示す。図 20 の模式図（c）及び模式図（d）は、第 3 光ガイド層 16 の組成比傾斜領域 16 a の近傍領域における Mg ドーピングプロファイルを模式的に示す。模式図（c）が示すプロファイルは、組成比傾斜領域 16 a において Mg ドーピング濃度が均一である。模式図（d）が示すプロファイルは、組成比傾斜領域 16 a において Mg ドーピング濃度が傾斜している。具体的には、組成比傾斜領域 16 a の活性層 15 側から電子障壁層 18 側に向かって、Mg ドーピング濃度が増大する。模式図（e）は、第 3 光ガイド層 16 の組成比傾斜領域 16 a 近傍領域の伝導帯バンド構造を模式的に示す。

[0206] 図 21 は、比較例 4 に係る半導体発光素子の第 3 光ガイド層 16 における分極電荷の形成を説明する模式図である。図 21 に示す比較例 4 に係る半導体発光素子は、第 3 光ガイド層 16 が組成比傾斜領域を有さない点において、本実施の形態に係る半導体発光素子と相違し、その他の点において一致する。図 21 の模式図（a）は、第 3 光ガイド層 16 の近傍領域のバンド構造（つまり、禁制帯幅エネルギー）を模式的に示す。図 21 の模式図（b）は、第 3 光ガイド層 16 の近傍領域の分極電荷分布を模式的に示す。図 21 の模式図（c）は、第 3 光ガイド層 16 の電子障壁層 18 側の端部に配置された組成比傾斜領域 16 a の近傍領域における Mg ドーピングプロファイルを模式的に示す。模式図（c）が示すプロファイルでは、第 3 光ガイド層 16 における電子障壁層 18 側の領域において均一な分布で Mg がドーピングされる。模式図（d）は、第 3 光ガイド層 16 の近傍領域の伝導帯バンド構造を模式的に示す。

[0207] 本実施の形態に係る半導体発光素子では、中間層 17 と第 3 光ガイド層 16 との境界にある In の組成比分布が傾斜している組成比傾斜領域 16 a を形成している。なお、比較例 4 に係る半導体発光素子では、組成比傾斜領域 16 a を有さない。

- [0208] 第3光ガイド層16が組成比傾斜領域16aを有さない場合、図21に示すように中間層17と第3光ガイド層16の界面に正の分極電荷が形成される。このため、電気的中性条件を満足するようにバンド構造が変形し、電子が中間層17と第3光ガイド層16との界面に誘引される。この結果、当該界面のバンド構造には、図21の模式図(d)に示すような凹みが生じ、この凹みが正孔に対して電位障壁として働く。このため比較例4に係る半導体発光素子では、動作電圧が増大する。
- [0209] これに対し、第3光ガイド層16が組成比傾斜領域16aを有する場合、図20の模式図(b)に示すように中間層17と第3光ガイド層16との界面に形成された正の分極電荷は、組成比傾斜領域16a全体に小さい密度で分散する。このため、図20の模式図(e)に示すようにバンド構造の変形が小さく、図21に示したような凹みが生じない。このため、半導体発光素子の動作電圧の増大を抑制することができる。
- [0210] さらに、組成比傾斜領域16aにMgをドーピングすれば、活性層15における正孔濃度を高めることができ、さらに動作電圧を低減することができる。
- [0211] 図20の模式図(c)に示すように組成比傾斜領域16a内で均一濃度でMgをドーピングすれば、第3光ガイド層16での正孔の電気伝導性が高まり、動作電圧が低減する。
- [0212] また、図20の模式図(d)に示すように組成比傾斜領域16a内で活性層15側の濃度が低い傾斜濃度とすれば、第3光ガイド層16で光分布が受けるフリーキャリア損失の発生を抑制することができ、低電圧化を図りつつ、導波路損失の増大を抑制することができる。
- [0213] ここで、組成比傾斜領域16aの効果について図22A~図22Cを用いて説明する。図22A、図22B及び図22Cは、それぞれ、Mgドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 及び $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である場合における本実施の形態に係る半導体発光素子の動作電圧のMgドーピング領域長依存性を示すグラフである。各図においては、組成比傾斜領域1

6 aの有る場合と、無い場合における300 mA動作時の動作電圧の計算結果が示されている。組成比傾斜領域16 aがある場合は、Mgドーピング領域は組成比傾斜領域16 aと同じ膜厚として組成比傾斜領域厚を変化させている。また、各図中の実線は、組成比傾斜領域16 a内で均一濃度でMgドーピングした場合を表し、点線は活性層15側のMgドーピング濃度が低い傾斜ドーピングを行った場合を表している。

- [0214] 図22A～図22Cより、Mgのドーピング濃度を高めた方が、動作電圧が0.01 V程度低減されることがわかる。また、Mgドーピング領域長が長いほど動作電圧が低減されるが、Mgドーピング領域長を長くしすぎると導波路損失の増大を招く。Mgドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の場合は、Mgドーピング領域長が10 nm程度あれば動作電圧の低減効果を得ることができる。Mgドーピング濃度が $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の場合は、Mgドーピング領域長が5 nm程度あれば動作電圧の低減効果を得ることができる。
- [0215] Mgドーピング濃度が $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の場合は、Mgドーピング領域長が3 nm程度あれば動作電圧の低減効果を得ることができる。
- [0216] また、組成比傾斜領域16 a内で均一ドーピングした場合も、傾斜ドーピングした場合も、動作電圧の低減効果はほぼ同等である。したがって、導波路損失の増大抑制の観点から、組成比傾斜領域16 aにはMgを傾斜ドーピングしてもよい。
- [0217] 組成比傾斜領域16 aへのMgドーピングによれば低動作電圧化の効果だけでなく、より低い動作電圧で正孔の電気伝導性を高める効果をも奏することができる。このため、ワット級の高温高出力動作時における温度特性の向上、及び、長期動作信頼性保証の観点から、組成比傾斜領域16 aへのMgドーピングは非常に重要である。
- [0218] また、組成比傾斜領域16 aにおいて、電子障壁層18側のIn組成比を、p型GaNからなる中間層17と同じIn組成比まで（つまり、In組成比0まで）変化させる場合について検討する。この場合、組成比傾斜領域16 aの界面に前述のようにMgドーピングを行えば、組成比傾斜領域16 a

の電子障壁層 1 8 側界面は p 型の GaN となっているため、p 型の GaN 層からなる第 2 導電型の間層はなくてもかまわない。

[0219] [2-3. バリア層における不純物ドーピング構成]

次に、本実施の形態に係る活性層 1 5 のバリア層 1 5 a における不純物ドーピング構成について説明する。

[0220] 本実施の形態に係る半導体発光素子は、バリア層 1 5 a か、第 2 光ガイド層 1 4 とバリア層 1 5 a との界面の少なくとも一方に n 型不純物をドーピングした領域を有する。これにより、第 2 光ガイド層 1 4 とバリア層 1 5 a の界面に生じる負の分極電荷の影響を打ち消し、バリア層 1 5 a の価電子帯のバンドの電位を低下させることで、ウェル層 1 5 b、ウェル層 1 5 d の価電子帯のバンド構造の形状を均一化させることができる。これにより、ウェル層 1 5 b 及びウェル層 1 5 d の 2 層で形成される量子波動関数の形状の均一性を向上させることができる。このため、各ウェル層で最も高い増幅利得が得られる波長を近づけることができるため、増幅利得を高めることができる。これにより、レーザ発振に必要な発振しきい電流値を低減することができる。

[0221] さらに、本実施の形態に係る不純物ドーピングによれば、正孔が第 1 光ガイド層に漏れる正孔のオーバーフローの発生を抑制することができる。このため、半導体発光素子の温度特性を向上させることができる。

[0222] ここで、本実施の形態に係る不純物ドーピングについて図 2 3 を用いて説明する。図 2 3 は、本実施の形態に係る不純物ドーピングの態様を示す模式図である。図 2 3 の模式図 (a) は、活性層 1 5 の各層の界面で形成される単位体積あたりの分極電荷を示す。模式図 (b) は、活性層 1 5 近傍領域のバンド構造を示す。模式図 (c) は、バリア層 1 5 a にドーピングする場合の不純物ドーピングプロファイルを示し、模式図 (d) は、バリア層 1 5 a と第 2 光ガイド層 1 4 との界面にドーピングする場合の不純物ドーピングプロファイルを示す。

[0223] 図 2 3 の模式図 (c) 及び (d) に示すように、本実施の形態に係る半導

体発光素子は、バリア層15a、又は、第2光ガイド層14とバリア層15aとの界面の少なくとも一方にn型不純物をドーピングした領域を備えた構造としている。本実施の形態では、不純物としてSiをドーピングしている。

[0224] 続いて、本実施の形態に係る不純物ドーピングの効果について図24及び図25を用いて説明する。図24は、本実施の形態に係る半導体発光素子において、バリア層15aにSiドーピングした場合の伝導帯バンド構造及び価電子帯バンド構造を示すグラフである。図24のグラフ(a)は、伝導帯バンド構造のドーピング濃度依存性の計算結果を示し、グラフ(b)は、価電子帯バンド構造のドーピング濃度依存性の計算結果を示す。

[0225] 第2光ガイド層14とバリア層15aとの界面に生じる負の分極電荷に起因して、この界面での電氣的な中性条件を満足するようバンド構造が変化する。さらに、負の分極電荷に起因して正孔が発生する。したがって、当該界面の電位が上昇する。このため、第2光ガイド層14とバリア層15aとの界面に生じる負の分極電荷を補償することで価電子帯のバンド電位が増大することを抑制するため、この界面の近傍領域にn型不純物をドーピングすることは有効である。

[0226] 図24のグラフ(b)に示すように、バリア層15aへのSiドーピング濃度を増加させると、バリア層15aの価電子帯のバンド構造の電位が低下し、ウェル層15b及びウェル層15dの価電子帯のバンド構造の形状が均一化する。また、バリア層15aの第2光ガイド層14側の価電子帯の電位障壁が増大することにより、正孔の波動関数が第2光ガイド層14側に拡がることを抑制できる。これにより、電子及び正孔の波動関数の相互相関が増大する。これに伴い、ウェル層15bの注入キャリアに対する増幅利得を増大させることができるため、発振しきい電流値を低減することができる。また、正孔が第2光ガイド層14側に漏れる正孔のオーバーフローを抑制することができる。このため、半導体発光素子の温度特性を向上させることができる。

- [0227] バリア層15aへのSiドーピング濃度が大きくなるほど、第2光ガイド層14側の価電子帯の電位障壁を増大する効果が大きくなるが、図24のグラフ(b)に示す結果より、Siドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上あれば、価電子帯の電位障壁が増大すると共に、ウェル層15b、ウェル層15dの価電子帯のバンド構造の均一性を十分高めることができる。
- [0228] 図25は、本実施の形態に係る半導体発光素子において、バリア層15aと第2光ガイド層14との界面にSiドーピングした場合の伝導帯バンド構造及び価電子帯バンド構造を示すグラフである。図25のグラフ(a)は、伝導帯バンド構造のドーピング濃度依存性の計算結果を示し、グラフ(b)は、価電子帯バンド構造のドーピング濃度依存性の計算結果を示す。本計算では、バリア層15aと第2光ガイド層14との界面から $\pm 5 \text{ nm}$ 以内の領域にSiドーピングしている。
- [0229] 図25のグラフ(b)に示すように、バリア層15aと第2光ガイド層14との界面へのSiドーピング濃度を増加させると、バリア層15aの価電子帯のバンド構造の電位が低下し、ウェル層15b及びウェル層15dの価電子帯のバンド構造の形状が均一化する。また、バリア層15aの第2光ガイド層14側の価電子帯の電位障壁が増大することにより、正孔の波動関数が第2光ガイド層14側に拡がることを抑制できる。これにより、電子及び正孔の波動関数の相互相関が増大し、ウェル層15bの注入キャリアに対する増幅利得を増大させることができるため、発振しきい電流値を低減することができる。また、正孔が第2光ガイド層14側に漏れる正孔のオーバーフローを抑制することができる。
- [0230] 正孔のオーバーフロー抑制効果は、図24のグラフ(b)と図25のグラフ(b)を比較すれば、バリア層15aと第2光ガイド層14との界面へSiドーピングした方が、第2光ガイド層14の価電子帯バンドの電位も下がる。このため、正孔の波動関数の第2光ガイド層14への拡がりの抑制、及び、正孔に対するオーバーフロー抑制の効果を高めることができる。
- [0231] バリア層15aと第2光ガイド層14との界面へのSiのドーピング濃度

が大きくなるほど、第2光ガイド層14側の価電子帯の電位障壁が増大する効果が大きくなる。しかしながら、図25のグラフ(b)に示す結果より、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上あれば、価電子帯の電位障壁が増大すると共に、ウェル層15b及びウェル層15dの価電子帯のバンド構造の均一性を十分高めることができる。

[0232] (実施の形態3)

実施の形態3に係る半導体発光素子について説明する。本実施の形態に係る半導体発光素子は、活性層15のバリア層の構成において、実施の形態2に係る半導体発光素子と相違する。以下、本実施の形態に係る半導体発光素子について、実施の形態2に係る半導体発光素子との相違点を中心に説明する。

[0233] 本実施の形態に係る半導体発光素子では、バリア層15a、バリア層15c及びバリア層15eが、In組成比0.04のInGa<sub>N</sub>でなく、Ga<sub>N</sub>からなる。

[0234] 各バリア層をGa<sub>N</sub>とすることで、各ウェル層での価電子帯のバンド障壁を大きくすることができる。しかしながら、この構造においても、第2光ガイド層14とバリア層15aとの界面に生じる負の分極電荷に起因して、この界面での電気的な中性条件を満足するようバンド構造が変化する。さらに、負の分極電荷に起因して正孔が発生する。したがって当該界面の電位が上昇する。このため、第2光ガイド層14とバリア層15aとの界面に生じる負の分極電荷を補償することで、価電子帯のバンド電位が増大することを抑制するため、この界面の近傍領域にn型不純物をドーピングすることは有効である。

[0235] そこで、本実施の形態に係る半導体発光素子では、バリア層15aか、第2光ガイド層14とバリア層15aとの界面の少なくとも一方にn型不純物をドーピングした領域を備えた構造としている。

[0236] これにより、上記実施の形態2と同様に、半導体発光素子の増幅利得を高めることができ、レーザ発振に必要な発振しきい電流値を低減することがで

きる。さらに、正孔が第2光ガイド層14に漏れる正孔のオーバーフローの発生を抑制することができる。このため、半導体発光素子の温度特性を向上させることができる。

[0237] ここで、本実施の形態に係る不純物ドーピングについて図26を用いて説明する。図26は、本実施の形態に係る不純物ドーピングの態様を示す模式図である。図26の模式図(a)は、活性層15の各層の界面で形成される単位体積あたりの分極電荷を示す。模式図(b)は、活性層15近傍領域のバンド構造を示す。模式図(c)は、バリア層15aにドーピングする場合の不純物ドーピングプロファイルを示し、模式図(d)は、バリア層15aと第2光ガイド層14との界面にドーピングする場合の不純物ドーピングプロファイルを示す。

[0238] 図26の模式図(c)及び(d)に示すように、本実施の形態に係る半導体発光素子は、バリア層15a、又は、第2光ガイド層14とバリア層15aとの界面の少なくとも一方にn型不純物をドーピングした領域を備えた構造としている。本実施の形態では、不純物としてSiをドーピングしている。

[0239] 続いて、本実施の形態に係る不純物ドーピングの効果について図27及び図28を用いて説明する。図27は、本実施の形態に係る半導体発光素子において、バリア層15aにSiドーピングした場合の伝導帯バンド構造及び価電子帯バンド構造を示すグラフである。図27のグラフ(a)は、伝導帯バンド構造のドーピング濃度依存性の計算結果を示し、グラフ(b)は、価電子帯バンド構造のドーピング濃度依存性の計算結果を示す。

[0240] 図27のグラフ(b)に示すように、バリア層15aへのSiドーピング濃度を増加させると、バリア層15aの価電子帯のバンド構造の電位が低下し、ウェル層15b及びウェル層15dの価電子帯のバンド構造の形状が均一化する。また、バリア層15aの第2光ガイド層14側の価電子帯の電位障壁が増大することにより、正孔の波動関数が第2光ガイド層14側に拡がることを抑制できる。これにより、電子及び正孔の波動関数の相互相関が増

大する。これに伴い、ウェル層15bの注入キャリアに対する増幅利得を増大させることができるため、発振しきい電流値を低減することができる。また、正孔が第2光ガイド層14側に漏れる正孔のオーバーフローを抑制することができる。このため、半導体発光素子の温度特性を向上させることができる。

[0241] バリア層15aへのSiドーピング濃度が大きくなるほど、第2光ガイド層14側の価電子帯の電位障壁が増大する効果が大きくなるが、図27のグラフ(b)に示す結果より、Siドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上あれば、価電子帯の電位障壁が増大すると共に、ウェル層15b及びウェル層15dの価電子帯のバンド構造の均一性を十分高めることができる。

[0242] 図28は、本実施の形態に係る半導体発光素子において、バリア層15aと第2光ガイド層14との界面にSiドーピングした場合の伝導帯バンド構造及び価電子帯バンド構造を示すグラフである。図28のグラフ(a)は、伝導帯バンド構造のドーピング濃度依存性の計算結果を示し、グラフ(b)は、価電子帯バンド構造のドーピング濃度依存性の計算結果を示す。本計算では、バリア層15aと第2光ガイド層14との界面から $\pm 5 \text{ nm}$ 以内の領域にSiドーピングしている。

[0243] 図28のグラフ(b)に示すように、バリア層15aと第2光ガイド層14の界面へのSiドーピング濃度を増加させると、バリア層15aの価電子帯のバンド構造の電位が低下し、ウェル層15b及びウェル層15dの価電子帯のバンド構造の形状が均一化する。また、バリア層15aの第2光ガイド層14側の価電子帯の電位障壁が増大することにより、正孔の波動関数が第2光ガイド層14側に拡がることを抑制できる。これにより、電子及び正孔の波動関数の相互相関が増大し、ウェル層15bの注入キャリアに対する増幅利得を増大させることができるため、発振しきい電流値を低減することができる。また、正孔が第2光ガイド層14側に漏れる正孔のオーバーフローを抑制することができる。

[0244] 正孔のオーバーフロー抑制効果は、図27のグラフ(b)と図28のグラ

フ（b）を比較すれば、バリア層15aにSiをドーピングした方が、バリア層15aの禁制帯幅エネルギーが大きいため価電子帯バンドの電位が下がる効果大きい。このため、正孔の波動関数の第2光ガイド層14への拡がりの抑制、及び、正孔に対するオーバーフロー抑制の効果を高めることができる。

[0245] バリア層15aと第2光ガイド層14との界面へのSiドーピング濃度が大きくなるほど、第2光ガイド層14側の価電子帯の電位障壁が増大する効果が大きくなるが、図28（b）に示す結果より、Siドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上あれば、価電子帯の電位障壁が増大すると共に、ウェル層15b及びウェル層15dの価電子帯のバンド構造の均一性を十分高めることができる。

[0246] また、実施の形態2及び3では、バリア層15aと第2光ガイド層14との界面か、バリア層15aの一方に不純物をドーピングした結果を示したが、両方にドーピングすれば、より一層、正孔の波動関数の第2光ガイド層14への拡がりの抑制、及び、正孔に対するオーバーフロー抑制の効果を高めることができる。

[0247] （実施の形態4）

実施の形態4に係る半導体発光素子について説明する。本実施の形態に係る半導体発光素子は、第1半導体層12と第1光ガイド層13との界面、及び、第1光ガイド層13と第2光ガイド層14との界面に不純物ドーピングを行う点において、実施の形態1に係る半導体発光素子100と相違する。以下、本実施の形態に係る半導体発光素子について、実施の形態1に係る半導体発光素子100との相違点を中心に図29を用いて説明する。

[0248] 図29は、本実施の形態に係る半導体発光素子の不純物ドーピングプロファイルと、禁制帯幅エネルギー分布との関係を示す模式図である。図29の模式図（a）は、本実施の形態に係る半導体発光素子の不純物ドーピングプロファイルを示し、模式図（b）は、本実施の形態に係る半導体発光素子の禁制帯幅エネルギー分布を示す。

[0249] 本実施の形態に係る半導体発光素子は、図29に示すように、実施の形態1に係る半導体発光素子において、さらに、第1半導体層12と第1光ガイド層13との界面、及び、第1光ガイド層13と第2光ガイド層14との界面から±5nm以内の領域に、Siからなるn型不純物をそれぞれ、濃度N2及びN3の大きさを相対的に高濃度にドーピングした構造である。第1半導体層12及び第1光ガイド層13において、相対的に高濃度にドーピングされていない領域のSiからなるn型不純物のドーピング濃度をN1(=  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )とする。

[0250] このようにドーピングすることで、それぞれの界面に生じる負の分極電荷に電氣的に誘因される正孔によりバンドが変形することで界面の生じるスパイク状の電位障壁の形成を、抑制することができる。また、高濃度ドーピングされている領域が狭いので導波路損失を抑制できる。この結果、導波路損失を低い値の保ったまま、動作電圧をさらに低電圧化することができる。

[0251] 続いて、本実施の形態に係る不純物ドーピングの効果について図30を用いて説明する。図30は、本実施の形態に係る半導体発光素子において、300mA動作時の動作電圧の第1半導体層12及び第2半導体層19のAl組成比依存性の計算結果を示すグラフである。各グラフ内の線が同一動作電圧の座標を示し、当該線に付された数値が動作電圧を示す。図30のグラフ(a)、(b)及び(c)は、それぞれ、第1半導体層12と第1光ガイド層13との界面、及び、第1光ガイド層13と第2光ガイド層14との界面に、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-1}$ 、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-1}$ 及び $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-1}$ のSiドーピングを行った場合の計算結果を示す。

[0252] 界面へのSiドーピング濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-1}$ の場合、n型AlGaNからなる第1半導体層12のAl組成比を0.04以上に高めると動作電圧が増大するが、界面へのSiのドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-1}$ 以上の場合、第1半導体層12のAl組成比を高めても動作電圧は一定となる。このことから、界面へのSiを $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-1}$ 以上ドーピングすることで、Al組成比が0.08以内の範囲であれば、界面で生じる分極電荷によるバン

ド構造の変形の発生を抑制することができるため、さらに低動作電圧化を実現することが可能となる。

[0253] 本実施の形態に係る半導体発光素子においては、界面に $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-1}$ のSiをドーピングすることで、300mA動作時の動作電圧を0.03V程度小さくできる。

[0254] また、このようにドーピングすることで、それぞれの界面に生じる負の分極電荷に電氣的に誘因される正孔によりバンドが変形することで界面の生じるスパイク状の電位障壁の形成を抑制することができる。

[0255] n型層の界面に正孔が誘因されてバンドが変形する場合、n型領域には電子が多数存在するため電子と正孔とのオージェ非発光再結合が界面で生じやすくなる。ヘテロ界面でオージェ非発光再結合が発生すると非発光再結合中心近傍の領域の温度が局所的に増大し、格子定数の違いから格子欠陥の増殖が生じやすくなるため、半導体発光素子の信頼性劣化につながる。

[0256] 導波路損失の増大を招かず、n型半導体のヘテロ界面でのオージェ非発光再結合の発生を抑制するためには、ヘテロ界面近傍領域に高濃度不純物をドーピングすることが有効である。また、濃度N2及びN3は $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-1}$ 以上の大きさであればよく、同じ大きさである必要はない。

[0257] また、不純物を高濃度にドーピングする領域は、ヘテロ界面における分極電荷を、逆の極性の電荷を形成することで打ち消すために形成するものである。したがって、ヘテロ界面に $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上の不純物濃度となるようにドーピングし、ヘテロ界面以外の領域では不純物ドーピング濃度が低下していてもよい。この場合、高濃度の不純物領域幅が等価的に狭まるのでフリーキャリア損失の発生が小さくなり、導波路損失が小さくなる。この結果、動作電流値を低減し、温度特性が向上する。

[0258] (実施の形態5)

実施の形態5に係る半導体発光素子について説明する。本実施の形態に係る半導体発光素子は、導波路損失をより一層低減するための構成を備える点において、実施の形態1に係る半導体発光素子100と相違する。以下、本

実施の形態に係る半導体発光素子について、実施の形態 1 に係る半導体発光素子 100 との相違点を中心に図 31 を用いて説明する。

[0259] 図 31 は、本実施の形態に係る半導体発光素子 500 の概略構成を示す模式的な断面図である。図 31 に示すように、本実施の形態に係る半導体発光素子 500 は、実施の形態 1 に係る半導体発光素子 100 の構成に加えて、さらに、導電性酸化膜 33 を備える。

[0260] 導電性酸化膜 33 は、リッジ上のコンタクト層 20 と p 側電極 32 との間に配置された膜である。導電性酸化膜 33 としては、例えば、錫ドープの酸化インジウム (ITO)、Ga ドープの酸化亜鉛、Al ドープの酸化亜鉛、In と Ga ドープの酸化亜鉛等の可視光に対して透過性を有し、低抵抗の電気伝導性を示す酸化膜である。

[0261] この場合、導電性酸化膜 33 は屈折率が低く、コンタクト層 20 と p 側電極 32 との間に形成することで、導波路を伝搬する光の p 側電極における吸収損失を抑制できる。さらに、その屈折率の低さから、光の閉じ込め作用が強く、図 31 に示すリッジ高さ H を  $0.45 \mu\text{m}$  以下に低くしても、光分布が p 側電極 32 にしみ出すことで吸収損失が発生することを抑制することができる。リッジを形成する p 型 AlGaIn 層は抵抗率が n 型の AlGaIn と比較して高いため、リッジ高さ H (リッジ部における第 2 半導体層 19 の膜厚) を薄くすることは、半導体発光素子 500 の直列抵抗低減に有効である。

[0262] 本実施の形態に係る半導体発光素子 500 では、導電性酸化膜 33 として膜厚  $0.2 \mu\text{m}$  の ITO を用いている。

[0263] 続いて、本実施の形態に係る半導体発光素子 500 の効果について図 32 を用いて説明する。図 32 は、本実施の形態に係る半導体発光素子 500 の光閉じ込め係数及び実効屈折率差の計算結果を示すグラフである。図 32 のグラフ (a)、(b)、(c)、(d) 及び (e) は、それぞれリッジ高さ H を、 $0.25 \mu\text{m}$ 、 $0.35 \mu\text{m}$ 、 $0.45 \mu\text{m}$ 、 $0.55 \mu\text{m}$  及び  $0.65 \mu\text{m}$  とした場合の計算結果を示す。図 32 において、第 2 光ガイド層 1

4及び第3光ガイド層16の膜厚をパラメータとして、導波路損失（各グラフ内の実線）、ウェル層15bとウェル層15dへの積層方向の光分布の光閉じ込め係数（各グラフ内の二点鎖線）、及び、リッジ内外の実効屈折率差 $\Delta N$ （点線）の計算結果を示している。

[0264] リッジ内外の実効屈折率差 $\Delta N$ とは、リッジ内部の積層方向の光分布の実効屈折率とリッジ外の積層方向光分布の実効屈折率との差である。 $\Delta N$ が大きいと光分布のリッジ内外の水平方向（積層界面に平行な方向）の閉じ込めが大きくなり、水平方向の光分布はリッジ内部に強く閉じ込められる。実効屈折率差 $\Delta N$ が小さくなると、導波路を伝搬可能な水平横モードの最高次数が小さくなる。

[0265] 最も次数の低い基本横モードを0次モードとすると、最低でも3種以上の次数の光分布が同時に動作していないと、電流－光出力特性において非線形の折れ曲がり（キंक）が生じやすくなり、半導体発光素子の光出力パワーの安定性が損なわれる。従って、少なくとも2次モードの高次水平横モードがカットオフされないように、ある一定値以上に実効屈折率差 $\Delta N$ を設定する必要がある。

[0266] リッジ幅 $W$ が大きいとカットオフされる水平横モードの最高次数が大きくなるため、必要な実効屈折率差 $\Delta N$ は小さくなる。リッジ幅 $W$ が $10\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ の場合、実効屈折率差 $\Delta N$ が $3 \times 10^{-3}$ 以上ないと安定して3種以上の次数の異なる水平横モードが同時にレーザ発振しにくくなる。リッジ幅 $W$ が $40\mu\text{m}$ 以上ある場合には、実効屈折率差 $\Delta N$ が $1 \times 10^{-4}$ 以上あれば、少なくとも基本横モードから2次の高次水平横モードが安定して同時にレーザ発振し、キंकの発生を抑制できる。 $W$ が $50\mu\text{m}$ 以上ある場合には、リッジストライプを導波可能な水平横モードの次数は急激に多くなり、実効屈折率差 $\Delta N$ が0より大きければ、少なくとも基本横モードから2次の高次水平横モードが安定して同時にレーザ発振する。

[0267] ここでは、導電性酸化膜33としてITO膜を、リッジ上のコンタクト層20とp側電極32の間に形成する。この場合、図32に示すように、リッ

ジ高さHが $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.65\ \mu\text{m}$ 以下の範囲において、実効屈折率差 $\Delta N$ を $1 \times 10^{-4}$ 以上とするためには、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.45\ \mu\text{m}$ 以下とすればよい。また、リッジ高さHが $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.65\ \mu\text{m}$ 以下の範囲において、実効屈折率差 $\Delta N$ を $3 \times 10^{-3}$ 以上とするためには、第2光ガイド層と第3光ガイド層との合計膜厚を $0.3\ \mu\text{m}$ 以下とすればよいことがわかる。リッジ幅Wが $50\ \mu\text{m}$ 以上あれば、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚が厚いほど、導波路損失が小さくなる。ただし、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚が厚くなりすぎると、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16とのアンドープ領域も厚くなり、抵抗が増大する。このため、第2光ガイド層と第3光ガイド層との合計膜厚を $0.6\ \mu\text{m}$ 以下としてもよい。

[0268] また、図32より、リッジ上のコンタクト層20とp側電極32の間にITOからなる導電性酸化膜33を形成すると、リッジ高さを $0.25\ \mu\text{m}$ まで低くしても導波路損失の増大を招かないことがわかる。

[0269] リッジ上のコンタクト層20とp側電極32の間に導電性酸化膜33を形成すると、リッジ高さHを $0.35\ \mu\text{m}$ まで低くしても導波路損失の急激な増大を抑制できるため、リッジ高さを $0.25\ \mu\text{m}$ 以上 $0.45\ \mu\text{m}$ 以下の範囲に設定した場合は、半導体発光素子の直列抵抗を低減できるため、特に有効である。

[0270] 本実施の形態に係る半導体発光素子500においては、実施の形態1に係る半導体発光素子100において、膜厚 $0.2\ \mu\text{m}$ のITOからなる導電性酸化膜33をリッジ上に形成している。この半導体発光素子500において、リッジ高さHを $0.25\ \mu\text{m}$ 、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.25\ \mu\text{m}$ とすることで、導波路損失が $1.6\ \text{cm}^{-1}$ に抑制できる。この半導体発光素子500においては、実効屈折率差 $\Delta N$ が $1 \times 10^{-3}$ 程度に小さいため、リッジ幅Wを $40\ \mu\text{m}$ 以上とすれば、電流-光出力特性におけるキックの発生を抑制することができる。

- [0271] また、実施の形態1に係る半導体発光素子においても、リッジの高さHを $0.45\ \mu\text{m}$ 、第2光ガイド層と第3光ガイド層との合計膜厚を $0.25\ \mu\text{m}$ とすれば、導波路損失が $1.8\ \text{cm}^{-1}$ と $2\ \text{cm}^{-1}$ 以下の非常に損失の少ない導波路の実現を行うことができる。この構成においても、実効屈折率差 $\Delta N$ が $1 \times 10^{-3}$ 程度に小さいため、リッジ幅Wを $40\ \mu\text{m}$ 以上とすれば、電流-光出力特性におけるキクの発生を抑制することができる。
- [0272] また、リッジ上のコンタクト層20とp側電極32との間にITOからなる導電性酸化膜33を形成すると、リッジ高さHが $0.25\ \mu\text{m}$ から $0.65\ \mu\text{m}$ の範囲において、第2光ガイド層と第3光ガイド層との合計膜厚を $0.3\ \mu\text{m}$ 以上とすると、導波路損失は $3\ \text{cm}^{-1}$ 以下となる。第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.39\ \mu\text{m}$ 以上とすると、導波路損失は $2\ \text{cm}^{-1}$ 以下となる。リッジ幅Wが $50\ \mu\text{m}$ 以上の場合、実効屈折率差 $\Delta N$ は小さくなるが、キクが発生しにくくなり、第2光ガイド層と第3光ガイド層との合計膜厚を $0.5\ \mu\text{m}$ 以上とすると、 $1.5\ \text{cm}^{-1}$ 以下の超低損失導波路を実現することができる。
- [0273] また、リッジ上のコンタクト層20とp側電極32との間にITOからなる導電性酸化膜33を形成しない場合は、上記計算と同様の計算から、リッジ高さHが $0.45\ \mu\text{m}$ から $0.65\ \mu\text{m}$ の範囲において、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.31\ \mu\text{m}$ 以上とすると、導波路損失は $4\ \text{cm}^{-1}$ 以下となる。また、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.36\ \mu\text{m}$ 以上とすると、導波路損失は $3\ \text{cm}^{-1}$ 以下となり、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.4\ \mu\text{m}$ 以上とすると、導波路損失は $2\ \text{cm}^{-1}$ 以下となる。リッジ幅Wが $50\ \mu\text{m}$ 以上の場合、実効屈折率差 $\Delta N$ は小さくなるが、キクが発生しにくくなり、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.5\ \mu\text{m}$ 以上とすると、 $1.5\ \text{cm}^{-1}$ 以下の超低損失導波路を実現することができる。
- [0274] リッジ高さHが $0.55\ \mu\text{m}$ 以上 $0.65\ \mu\text{m}$ 以下において、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.25\ \mu\text{m}$ 以上とすると、

導波路損失は $5\text{ cm}^{-1}$ 以下となり、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を $0.33\text{ }\mu\text{m}$ 以上とすると、導波路損失は $4\text{ cm}^{-1}$ 以下となり、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との膜厚を $0.42\text{ }\mu\text{m}$ 以上とすると、導波路損失は $2\text{ cm}^{-1}$ 以下となる。

[0275] また、リッジ上にITOからなる導電性酸化膜33を形成すると、導電性酸化膜33は屈折率が低いため、導波路に形成される光分布のp側電極32への拡がり低減される。この結果、p側電極での光吸収が低減し、導波路損失が低減される。前述のように、導波路損失の低減のためには、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を厚くするとよい。これは、積層方向の光分布が屈折率の高い活性層に集中し、p側電極32への光分布の拡がり抑制されるだけでなく、電子又は正孔濃度の高いn型層又はp型層において光分布の存在する割合が小さくなるためフリーキャリア損失が低減するためである。

[0276] ここで、第2光ガイド層14及び第3光ガイド層16の界面近傍の領域には、分極電荷が発生する。分極電荷の影響を低減するためには、分極電荷の発生する界面近傍領域のみにドーピングすればよい。当該界面近傍を除く領域には意図的に不純物をドーピングしない方が、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16での電子、正孔の濃度が小さくなるため光分布が受けるフリーキャリア損失が小さくなる。

[0277] しかしながら、不純物ドーピングにより、光分布のリッジ内外の実効屈折率差 $\Delta N$ が低下し、水平横方向の光の閉じ込めが低下する。リッジ幅 $W$ が $30\text{ }\mu\text{m}$ 以下の場合、実効屈折率差 $\Delta N$ が $3 \times 10^{-3}$ 以下となると、3種以上の次数の水平横モードが安定して同時にレーザ発振しにくくなり、電流-光出力特性にキックが発生する。

[0278] そこで、第2光ガイド層14と第3光ガイド層16との合計膜厚を厚くした状態で、実効屈折率差 $\Delta N$ を高めるためには第1半導体層12のAl組成比を、第2半導体層19よりも高めることが有効である。これは、AlGaInにおいて、Al組成比を高めると屈折率が低くなるため、光分布が、屈折

率の高い第2半導体層19側に偏る結果、リッジの水平方向内外の構造上に違いによる実効屈折率の違いの影響が増すため、実効屈折率差 $\Delta N$ を高めることができるからである。

[0279] この場合、リッジ上にITOからなる導電性酸化膜33を形成し、リッジ高さHを $0.45\mu\text{m}$ 以下に低く設定すれば、半導体発光素子500の直列抵抗が低減され、積層方向光分布のp型層であるリッジ内部での存在割合が小さくなる。このため、フリーキャリア損失が低減され、さらにp側電極32での吸収損失の発生も抑制することができる。

[0280] この時、図30に示したように、第1半導体層12と第1光ガイド層13との界面、及び、第1光ガイド層13と第2光ガイド層14との界面へのSiのドーピング濃度が $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-1}$ の場合、第1半導体層12のAl組成比を0.04以上に高めると動作電圧が増大する。一方、界面へのSiのドーピング濃度が $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-1}$ 以上の場合、第1半導体層12のAl組成比を高めても動作電圧は一定となる。このことから、界面へのSiを $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-1}$ 以上ドーピングする場合、Al組成比が0.08以内の範囲であれば、界面で生じる分極電荷によるバンド構造の変形の発生を抑制することができる。これにより、さらに低動作電圧化を実現することが可能となる。

[0281] 第1半導体層12のAl組成比を0.04以上に高めた場合、Siを $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-1}$ 以上ドーピングする界面は、第1半導体層12と第1光ガイド層13との界面と、第1光ガイド層13と第2光ガイド層14との界面とのうち、第1半導体層12と第1光ガイド層13との界面のみであっても、低動作電圧化の効果を得ることができる。

[0282] この結果、直列抵抗の低減、実効屈折率差 $\Delta N$ の増大、導波路損失の低減を同時に行うことができる。したがって、低動作電圧特性及び発光効率が高く、キルクの生じない電流-光出力特性を有する半導体発光素子を実現することが可能となる。

[0283] (変形例など)

以上、本開示に係る半導体発光素子について、各実施の形態に基づいて説明したが、本開示は、上記各実施の形態に限定されるものではない。

[0284] 例えば、上記各実施の形態では、発振波長450nm帯の青色レーザ素子についての説明を行ってきたが、本開示は発振波長405nmの青紫レーザ素子にも適用することができる。

[0285] また、上記各実施の形態においては、半導体発光素子が半導体レーザ素子である例を示したが、半導体発光素子は、半導体レーザ素子に限定されない。例えば、半導体発光素子は、スーパーluminescentダイオードであってもよい。

[0286] また、上記各実施の形態及びその変形例に係る半導体発光素子においては、リッジ構造を用いて電流狭窄を実現したが、電流狭窄を実現するための手段は、これに限定されず、電極ストライプ構造、埋め込み型構造などを使用してもよい。

[0287] また、上記各実施の形態に対して当業者が思いつく各種変形を施して得られる形態や、本開示の趣旨を逸脱しない範囲で上記各実施の形態における構成要素及び機能を任意に組み合わせることで実現される形態も本開示に含まれる。

### 産業上の利用可能性

[0288] 本開示の半導体発光素子は、例えば、高温動作においても、低消費電力の光源として車載ヘッドライト光源などに適用できる。

### 符号の説明

- [0289] 11 GaN基板  
12 第1半導体層  
13 第1光ガイド層  
14 第2光ガイド層  
15、415 活性層  
15a、15c、15e バリア層  
15b、15d ウェル層

- 1 6 第3光ガイド層
- 1 6 a 組成比傾斜領域
- 1 7 中間層
- 1 8、1 8 A、1 8 B、1 8 C、4 1 8 電子障壁層
- 1 9 第2半導体層
- 1 9 a 低不純物濃度領域
- 1 9 b 高不純物濃度領域
- 2 0 コンタクト層
- 3 0 電流ブロック層
- 3 1 n側電極
- 3 2 p側電極
- 3 3 導電性酸化膜
- 1 0 0、5 0 0 半導体発光素子
- 2 1 1 n型層
- 2 1 2 活性層
- 2 1 3 p型層
- 2 2 8 p側電子閉じ込め層
- 2 3 0 上部クラッド層

## 請求の範囲

### [請求項1]

G a N基板と、

前記G a N基板の上方に配置され、第1導電型の窒化物系半導体を含む第1半導体層と、

前記第1半導体層の上方に配置され、G a又はI nを含む窒化物系半導体を含む活性層と、

前記活性層の上方に配置され、少なくともA lを含む窒化物系半導体を含む電子障壁層と、

前記電子障壁層の上方に配置され、前記第1導電型と異なる第2導電型の窒化物系半導体を含む第2半導体層とを備え、

前記電子障壁層は、前記G a N基板の主面と垂直な積層方向においてA l組成比が第1の変化率で変化する第1領域と、前記第1領域と前記第2半導体層との間に配置され、前記積層方向においてA l組成比が第2の変化率で変化する第2領域とを有し、

前記第1領域及び前記第2領域において、A l組成比は前記活性層から前記第2半導体層に向かう方向に対して単調増加し、

前記第2の変化率は前記第1の変化率よりも大きい半導体発光素子。

### [請求項2]

前記電子障壁層のA l組成比が変化する領域において、A l組成比が連続的に変化する

請求項1に記載の半導体発光素子。

### [請求項3]

G a N基板と

前記G a N基板の上方に配置され、第1導電型の窒化物系半導体を含む第1半導体層と、

前記第1半導体層の上方に配置され、G a又はI nを含む窒化物系半導体を含む活性層と、

前記活性層の上方に配置され、少なくともA lを含む窒化物系半導体を含む電子障壁層と、

前記電子障壁層の上方に配置され、前記第1導電型と異なる第2導電型の窒化物系半導体を含む第2半導体層とを備え、

前記電子障壁層において、前記GaN基板の主面と垂直な積層方向をx軸方向として、

前記活性層に最も近い前記積層方向の位置を位置 $x = X_s$ 、前記活性層から最も遠い側の前記積層方向の位置を位置 $x = X_e$ とし、

前記位置 $x = X_s$ と前記位置 $x = X_e$ との間においてAⅠ組成比が最も大きい前記積層方向における位置を位置 $x = X_m$ とし、

$X_s \leq x \leq X_e$ を満足する位置 $x$ における前記電子障壁層のAⅠ組成比が関数 $f(x)$ で表され、前記関数 $f(x)$ の $X$ に関する一次導関数を $f'(x)$ 、前記関数 $f(x)$ の $X$ に関する二次導関数を $f''(x)$ として、

前記電子障壁層は、位置 $x$ について $X_s < x \leq X_m$ を満足する領域において、 $f''(x) > 0$ 、かつ、 $f'(x) > 0$ となる第1凹領域を有する

半導体発光素子。

[請求項4] 前記第1凹領域における位置 $x = X_1$ において、前記二次導関数 $f''(x)$ が極大になる

請求項3に記載の半導体発光素子。

[請求項5] 前記電子障壁層のAⅠ組成比が変化する領域において、AⅠ組成比が連続的に変化する

請求項3又は4に記載の半導体発光素子。

[請求項6] 前記電子障壁層は、位置 $x$ について $X_1 < x \leq X_e$ を満足する領域において、 $f''(x) \leq 0$ となる第1凸領域を有する

請求項3～5のいずれか1項に記載の半導体発光素子。

[請求項7] 前記位置 $x = X_m$ は、前記第1凸領域に配置される

請求項6に記載の半導体発光素子。

[請求項8] 点 $(X_s, f(X_s))$ を通り、前記関数 $f(x)$ と前記第1凸領

域の点  $(X_t, f(X_t))$  で接する一次関数を関数  $g(x)$  とすると、 $X_s < x < X_t$  を満足する位置  $x$  において、前記関数  $f(x)$ 、前記関数  $g(x)$  及び前記一次導関数  $f'(x)$  は、 $g(x) > f(x)$ 、かつ、 $f'(x) > 0$  の関係を満足する

請求項 6 又は 7 に記載の半導体発光素子。

[請求項 9] 前記電子障壁層は、位置  $x$  について  $X_s \leq x < X_1$  を満足する領域において、 $f''(x) > 0$ 、かつ、前記二次導関数  $f''(x)$  が極大になる位置を含む第 2 凹領域を有する

請求項 4～8 のいずれか 1 項に記載の半導体発光素子。

[請求項 10] 前記電子障壁層は、位置  $x$  について  $X_s \leq x < X_1$  を満足する領域において、 $f''(x) \leq 0$  となる第 2 凸領域を有する

請求項 4～9 のいずれか 1 項に記載の半導体発光素子。

[請求項 11] 前記電子障壁層は、位置  $x$  について  $X_s \leq x < X_1$  を満足する領域において、 $f''(x) \leq 0$  となる第 2 凸領域を有し、

前記第 2 凸領域は、前記第 2 凹領域と、前記第 1 凹領域との間に配置される

請求項 9 に記載の半導体発光素子。

[請求項 12] 前記電子障壁層は、位置  $x$  について  $X_s \leq x < X_1$  を満足する領域において、 $f''(x) \leq 0$  となる第 2 凸領域を有し、

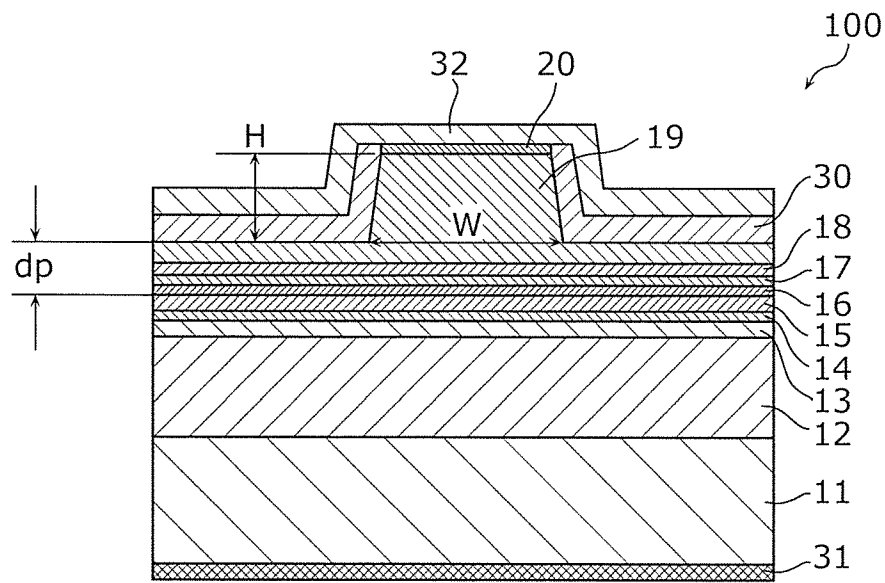
前記関数  $f(x)$  と前記第 2 凸領域の点  $(X_u, f(X_u))$  で接し、かつ、前記関数  $f(x)$  と前記第 1 凸領域の点  $(X_v, f(X_v))$  で接する一次関数を関数  $h(x)$  とすると、 $X_u < x < X_v$  を満足する位置  $x$  において、前記関数  $f(x)$ 、前記関数  $h(x)$  及び、前記一次導関数  $f'(x)$  は、 $h(x) > f(x)$ 、かつ、 $f'(x) > 0$  の関係を満足する

請求項 6 に記載の半導体発光素子。

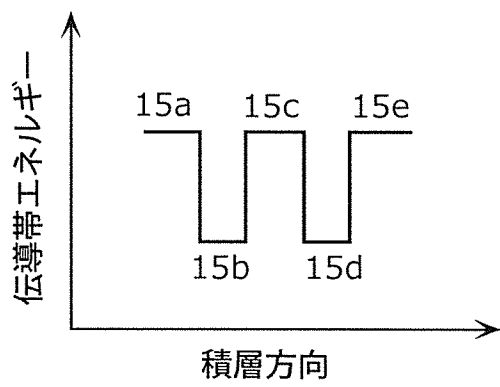
[請求項 13] 位置  $x = (X_s + X_m) / 2$  において、 $f''(x) > 0$ 、かつ、 $f'(x) > 0$  となる

- 請求項3～12のいずれか1項に記載の半導体発光素子。
- [請求項14] 前記第1凹領域の幅は、 $(X_m - X_s) / 2$ 以上である  
請求項3～13のいずれか1項に記載の半導体発光素子。
- [請求項15] 前記第1領域の厚さが前記電子障壁層の膜厚の50%より大きく80%以下、かつ、位置 $x = (X_m + X_s) / 2$ でのAl組成比が前記電子障壁層におけるAl組成比最大値の50%以下である  
請求項1又は2に記載の半導体発光素子。
- [請求項16] 前記電子障壁層において、前記GaN基板の主面と垂直な積層方向をx軸方向として、  
前記活性層に最も近い前記積層方向の位置を位置 $x = X_s$ 、前記活性層から最も遠い側の前記積層方向の位置を位置 $x = X_e$ とし、  
前記位置 $x = X_s$ と前記位置 $x = X_e$ との間においてAl組成比が最も大きい前記積層方向における位置を位置 $x = X_m$ とし、  
前記電子障壁層は、前記活性層側から順に、前記位置 $x = X_m$ から前記第2半導体層に向かう方向にAl組成比が単調に減少する第1減少領域と、前記第1減少領域よりも小さい変化率でAl組成比が単調に減少する第2減少領域とを有する  
請求項1～15のいずれか1項に記載の半導体発光素子。
- [請求項17] 前記第1導電型はn型であり、前記第2導電型はp型である  
請求項1～16のいずれか1項に記載の半導体発光素子。
- [請求項18] 前記電子障壁層は第2導電型である  
請求項1～17のいずれか1項に記載の半導体発光素子。
- [請求項19] 前記電子障壁層と前記活性層との間に配置され、窒化物系半導体を含む中間層をさらに備え、  
前記活性層は、InGaNを含み、  
前記中間層は、第2導電型のGaNを含む  
請求項1～18のいずれか1項に記載の半導体発光素子。

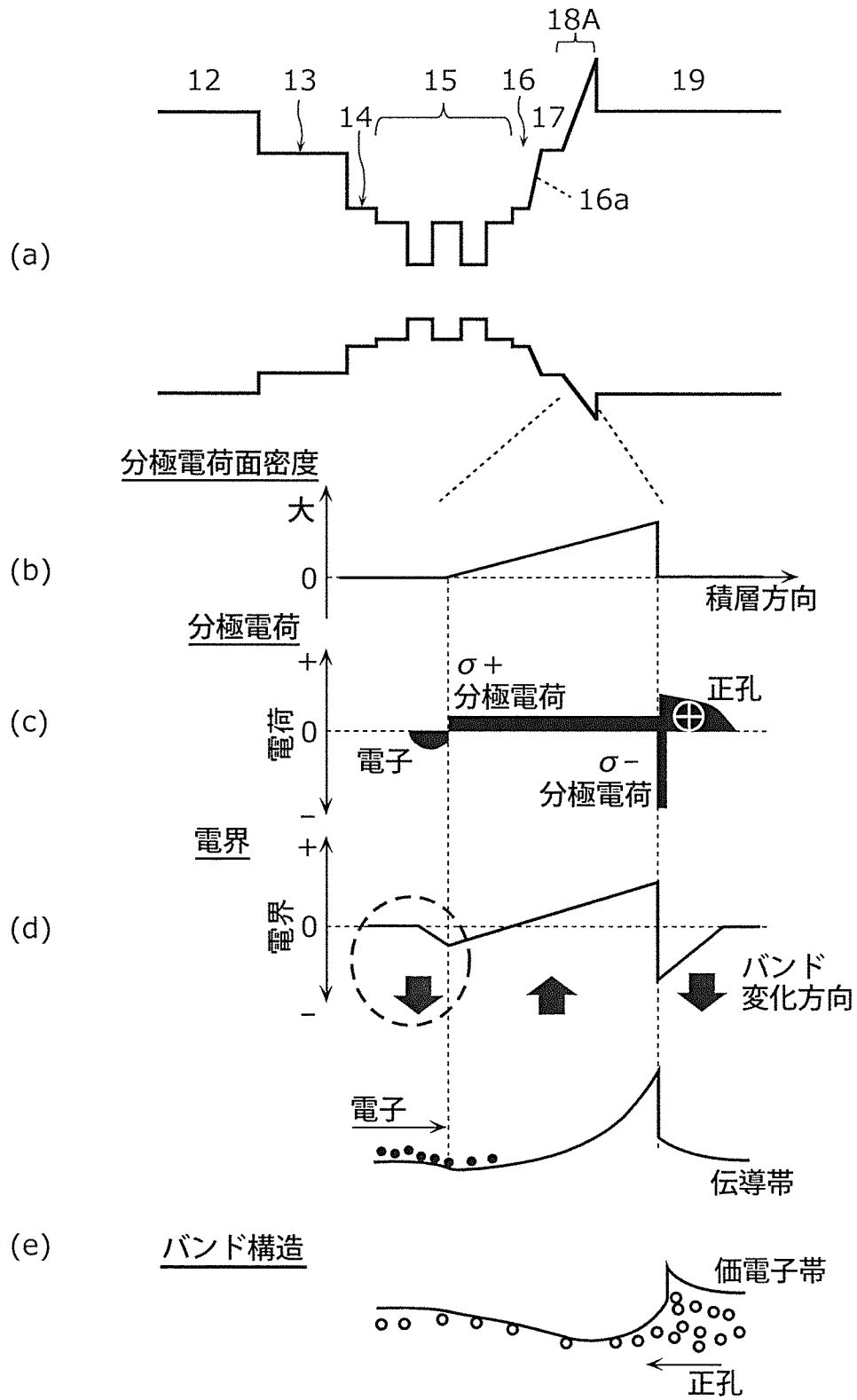
[図1A]



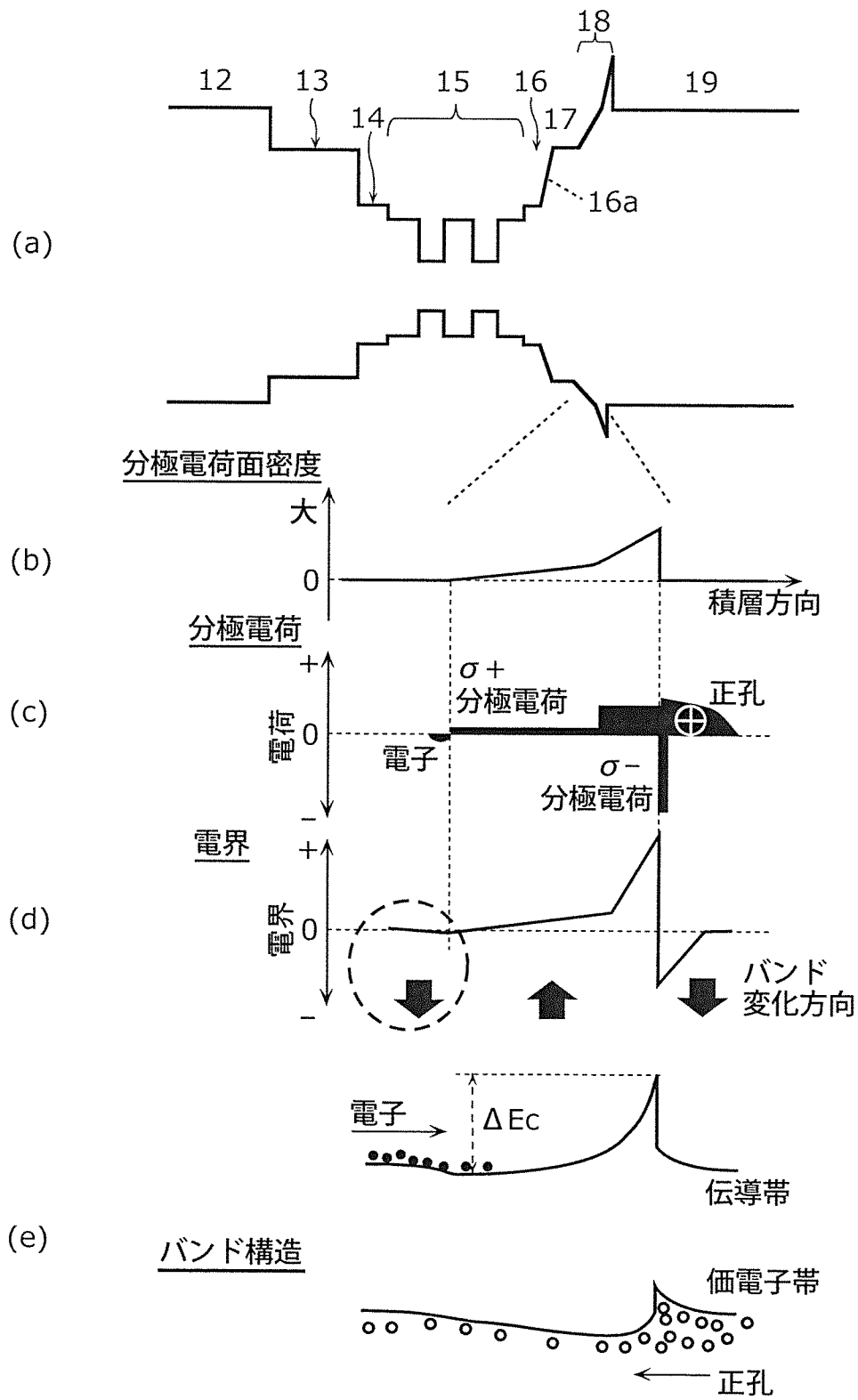
[図1B]



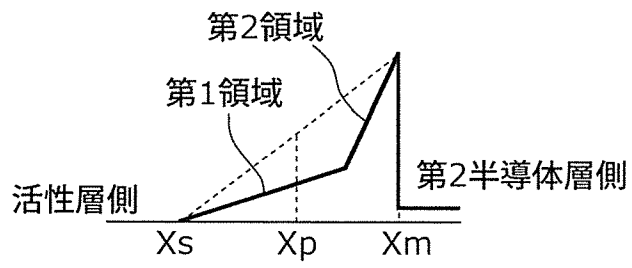
[図2]



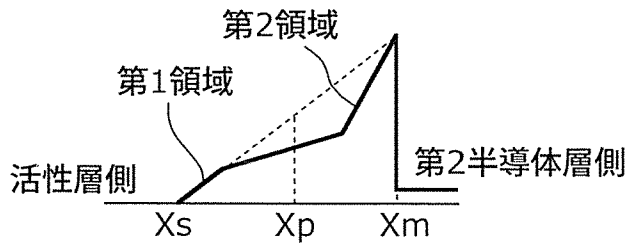
[図3]



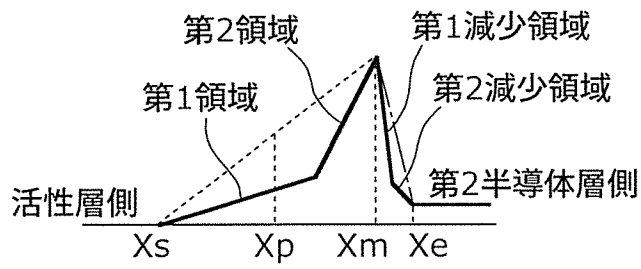
[図4A]



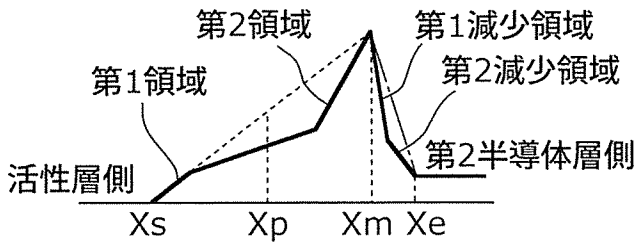
[図4B]



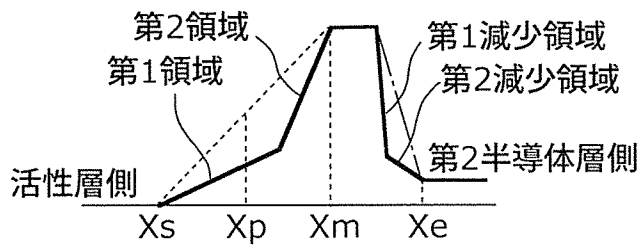
[図5A]



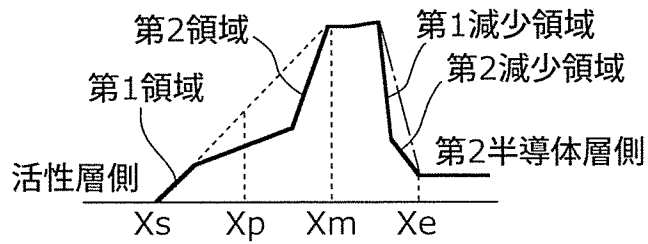
[図5B]



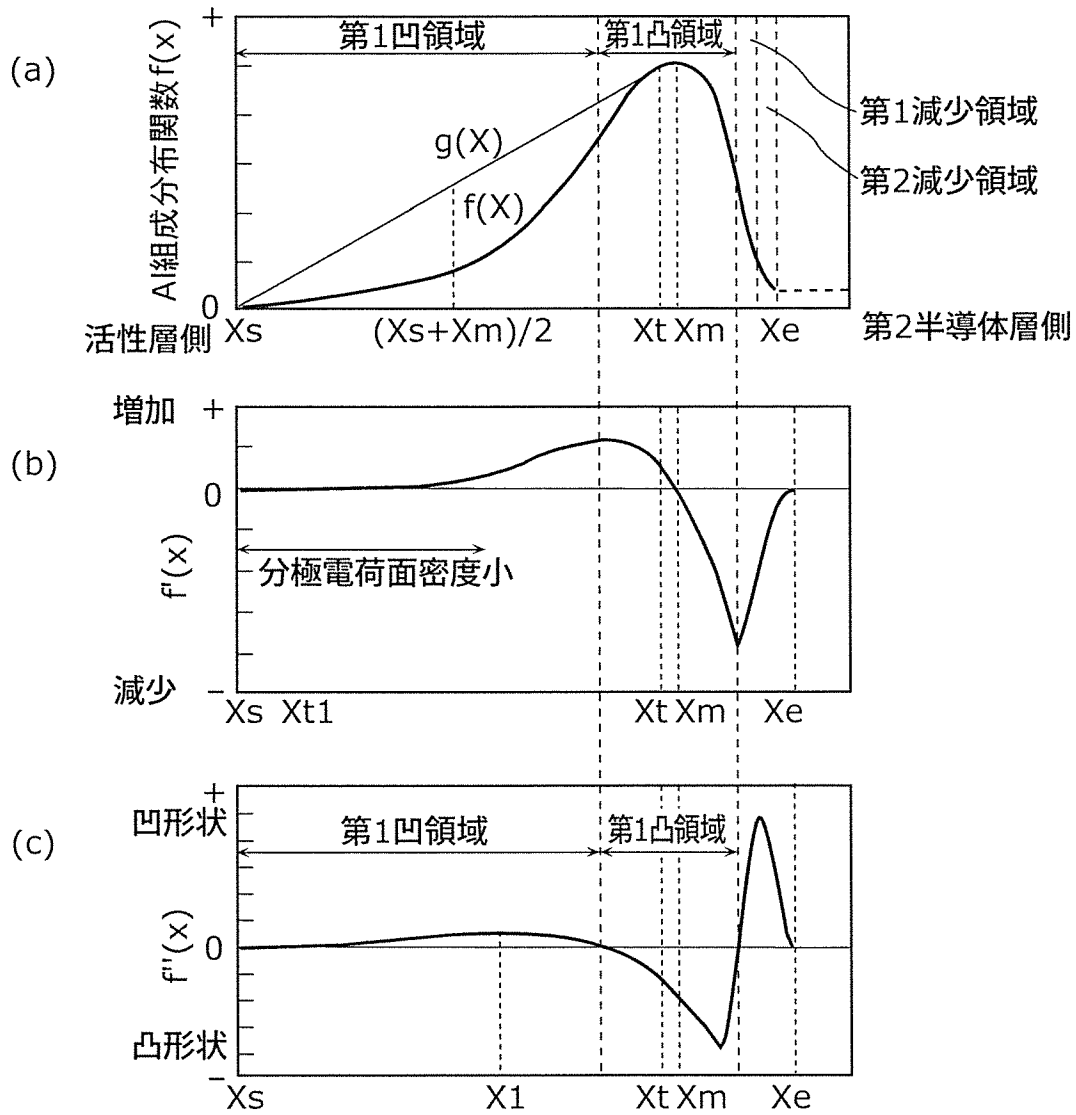
[図5C]



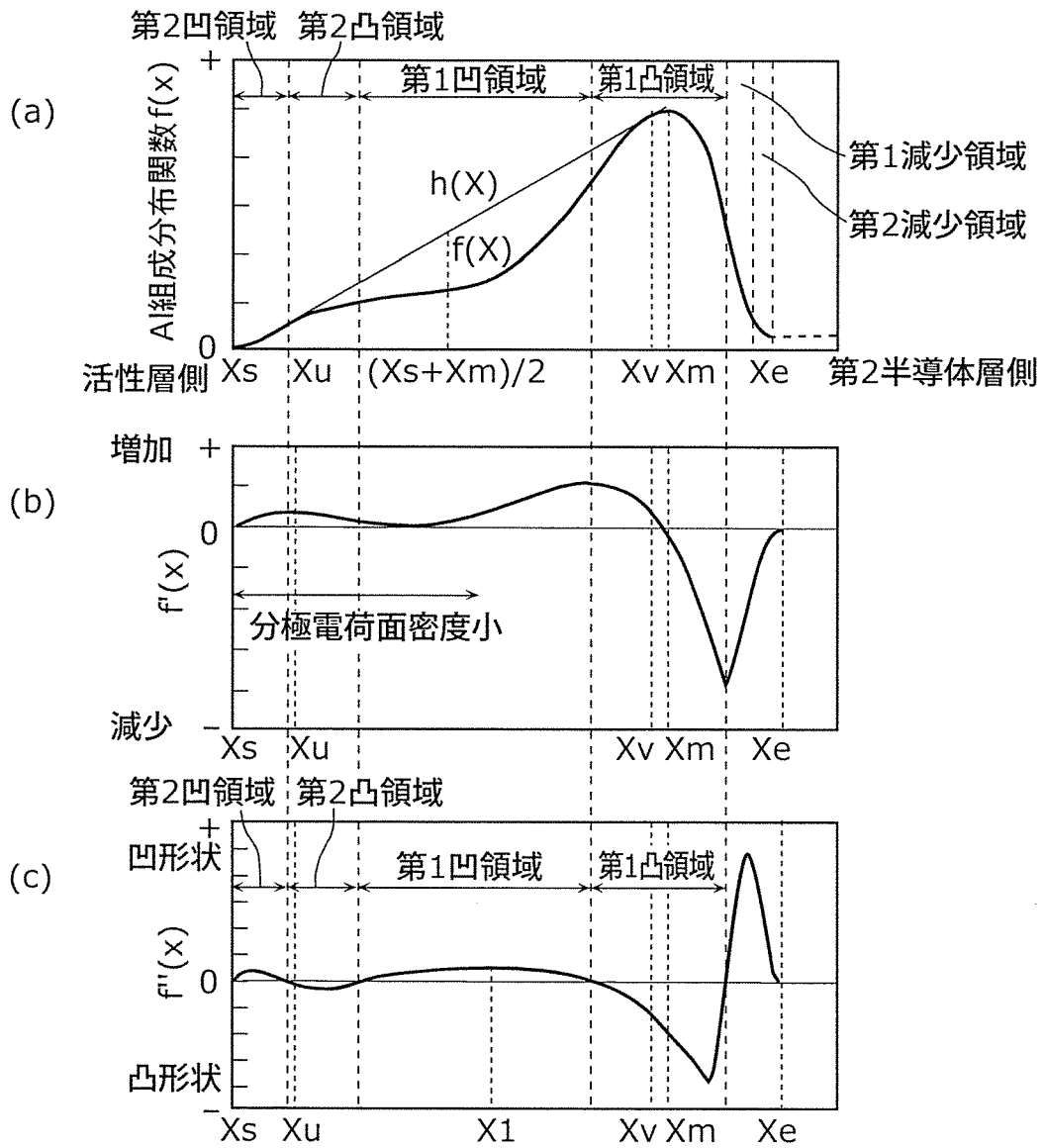
[図5D]



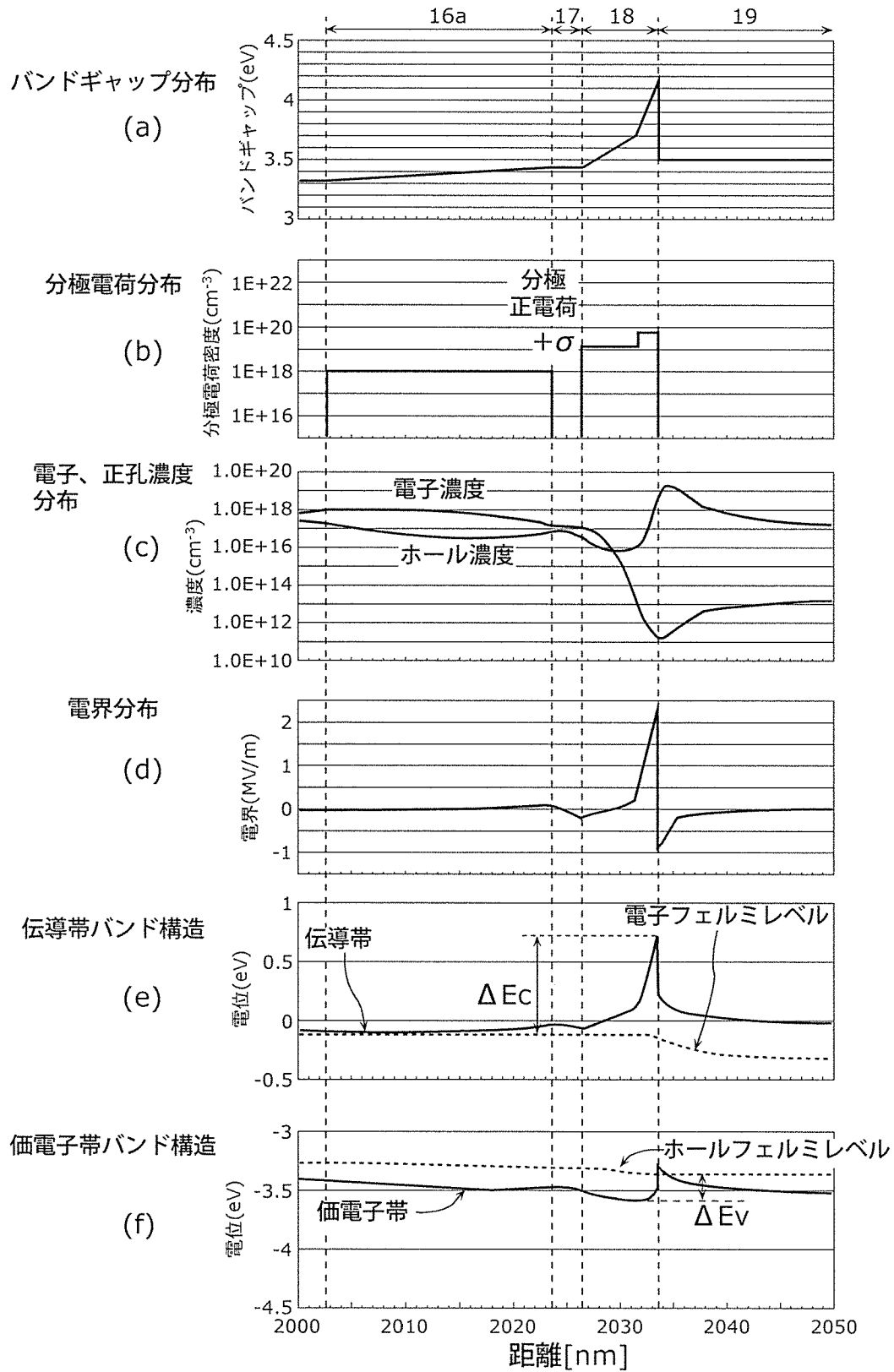
[圖6]



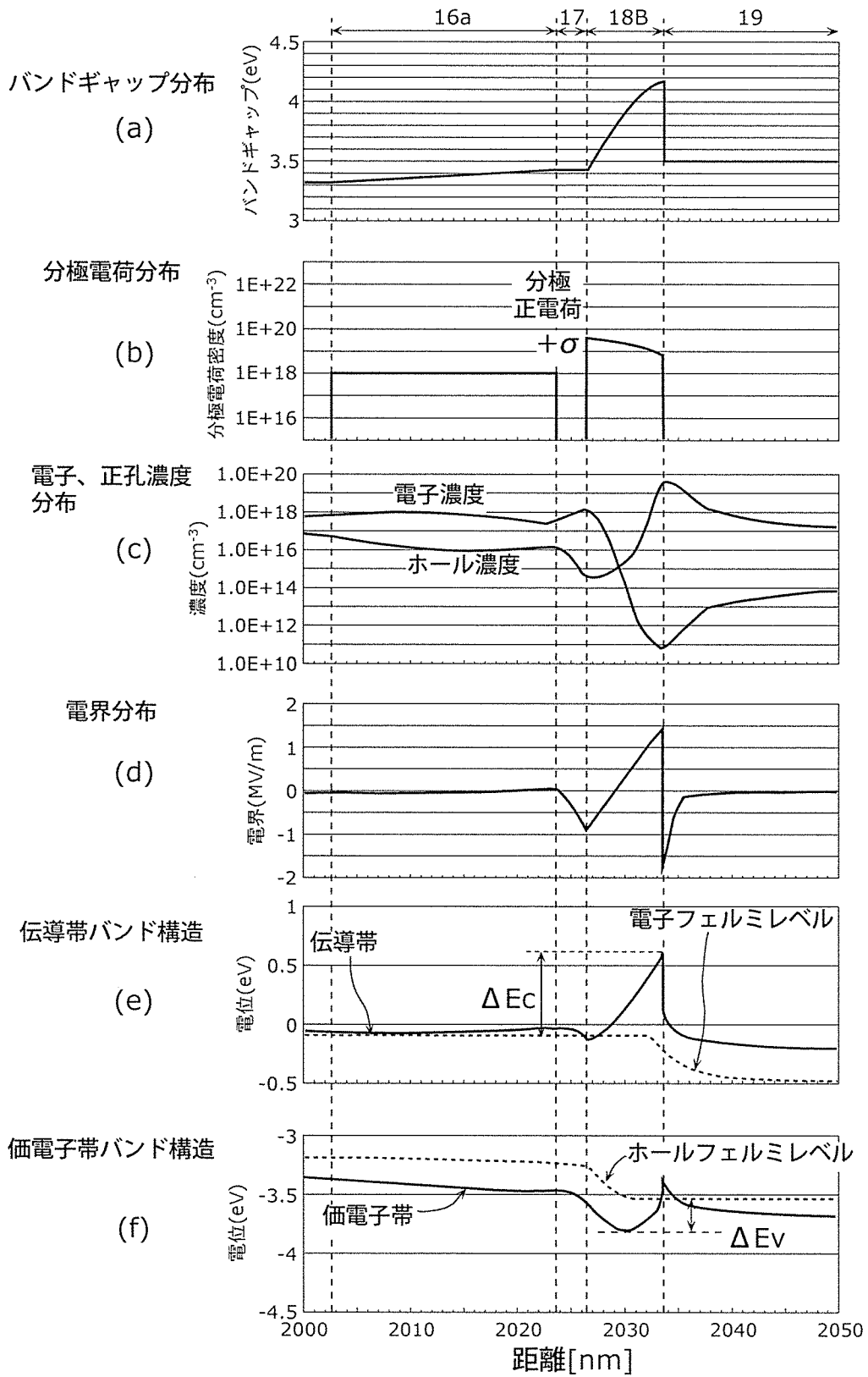
[圖7]



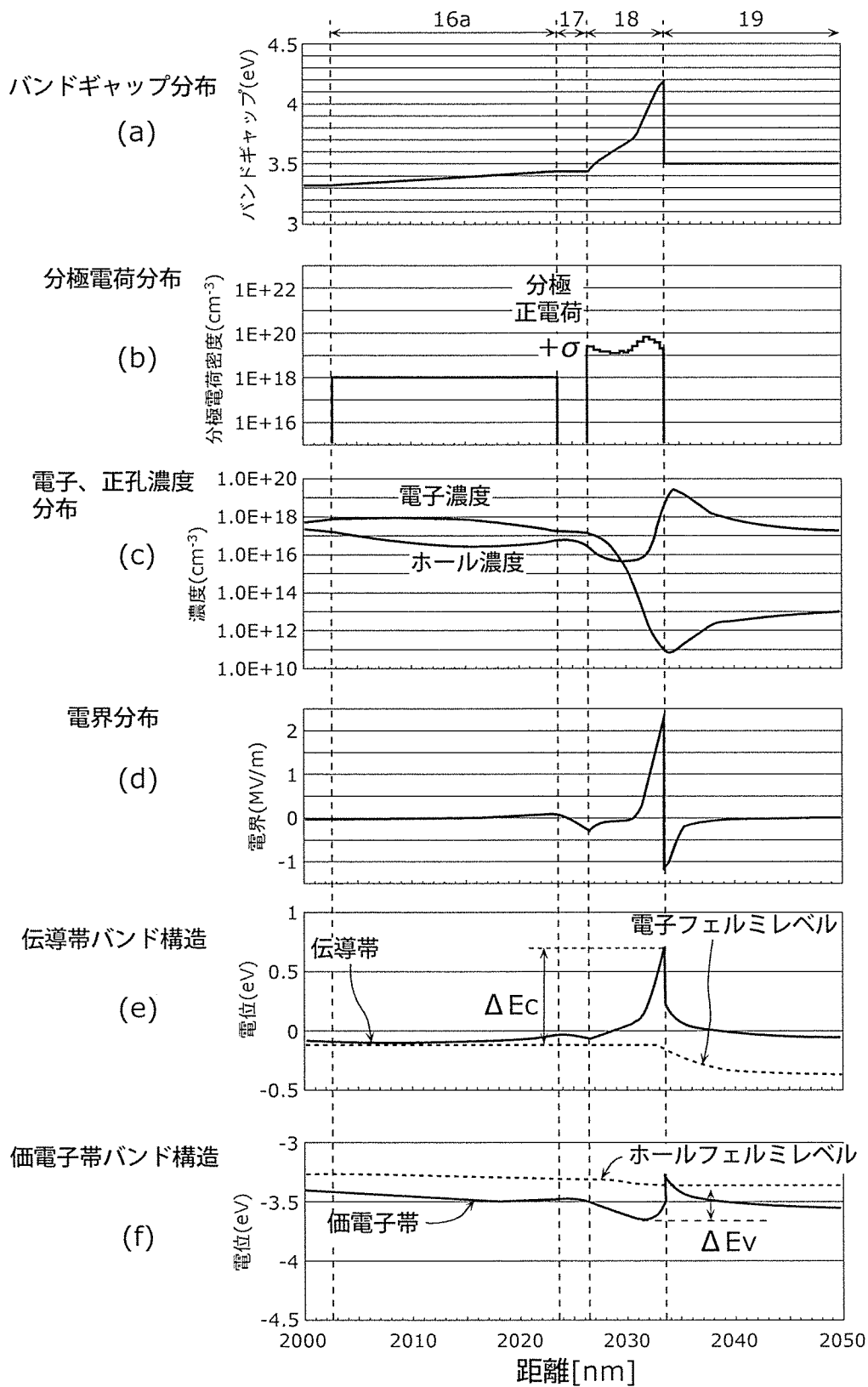
[図8]



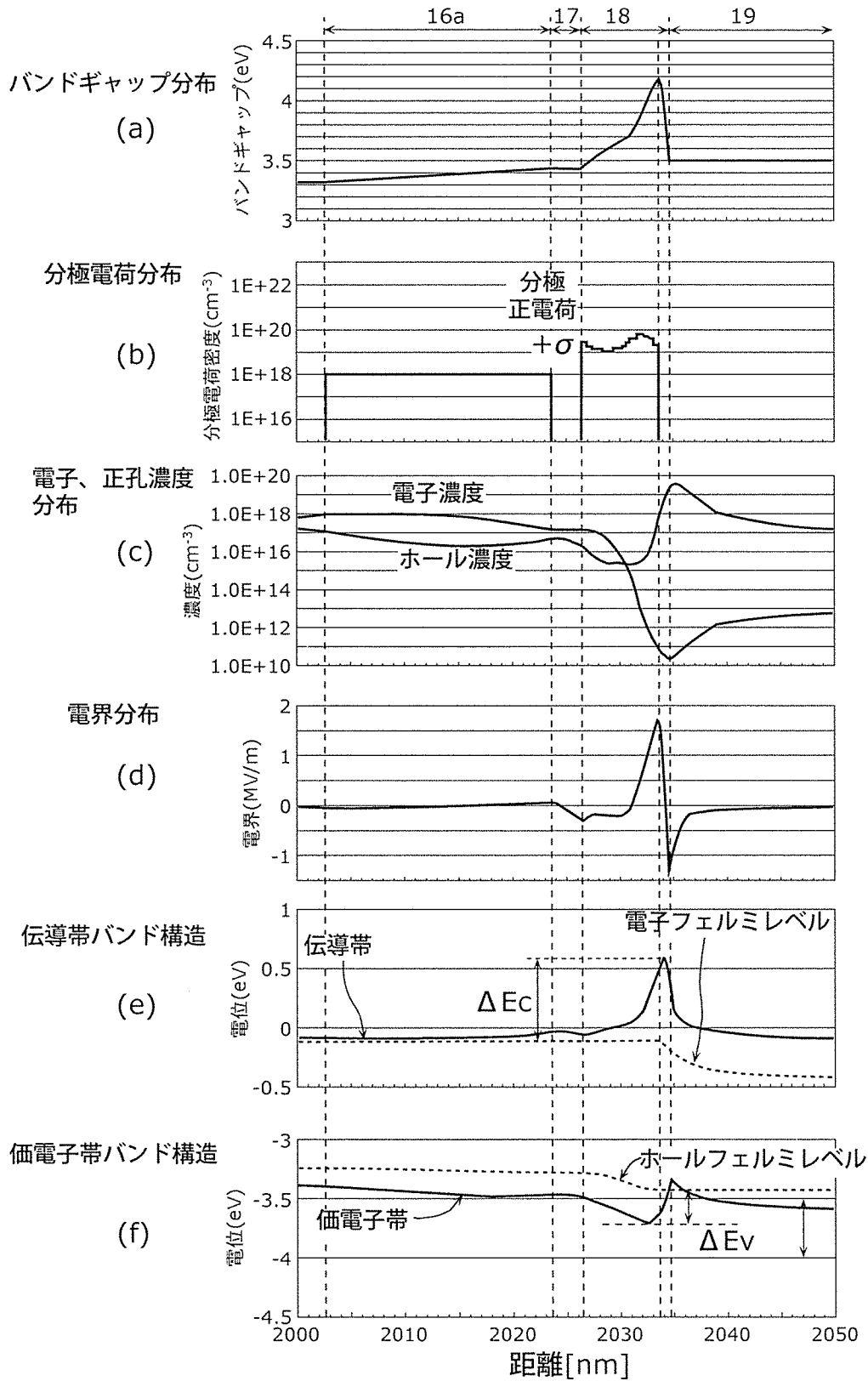
[図9]



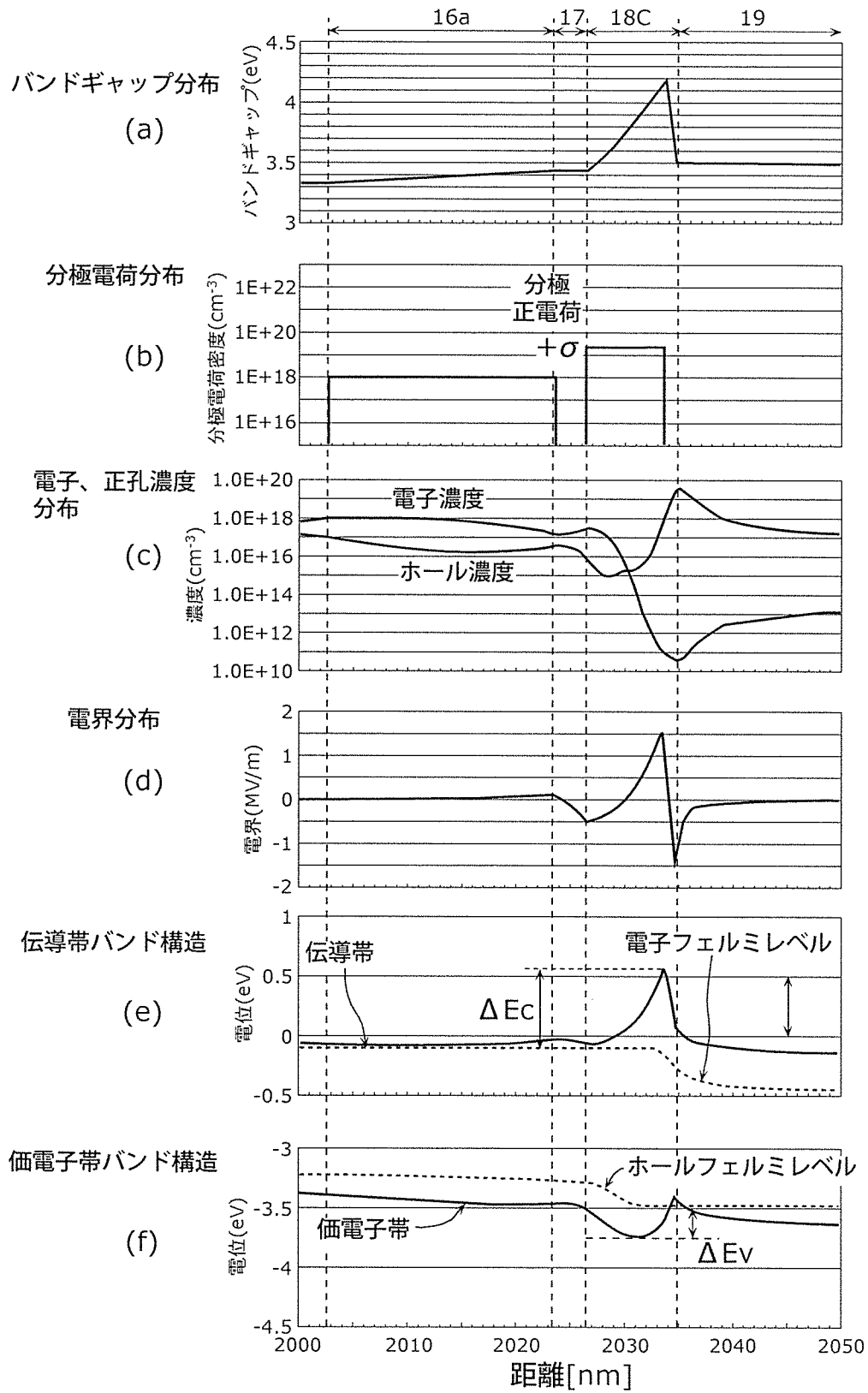
[図10]



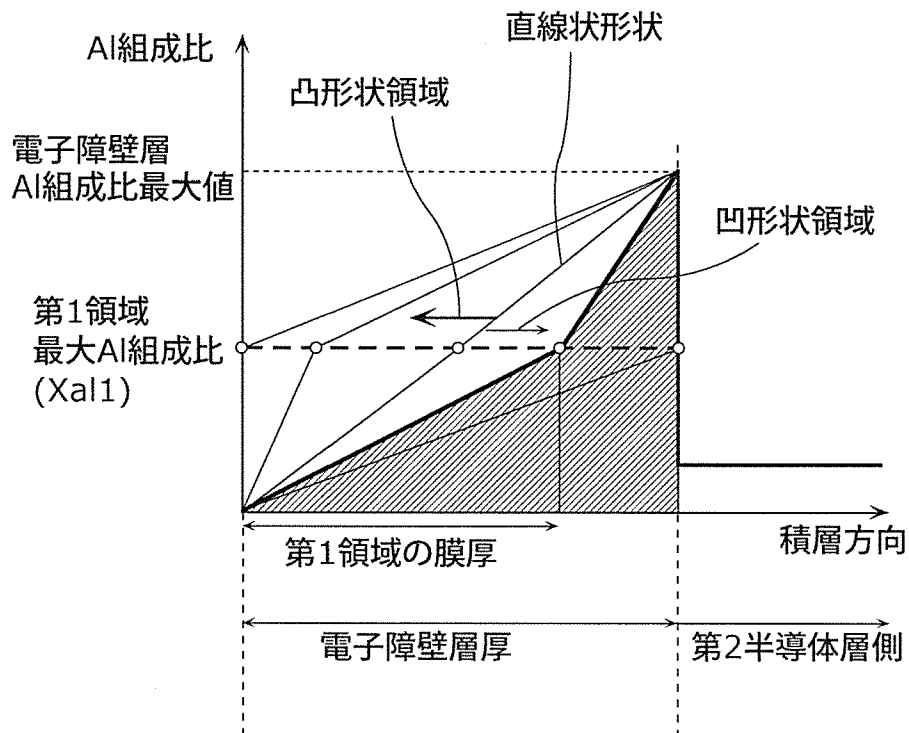
[図11]



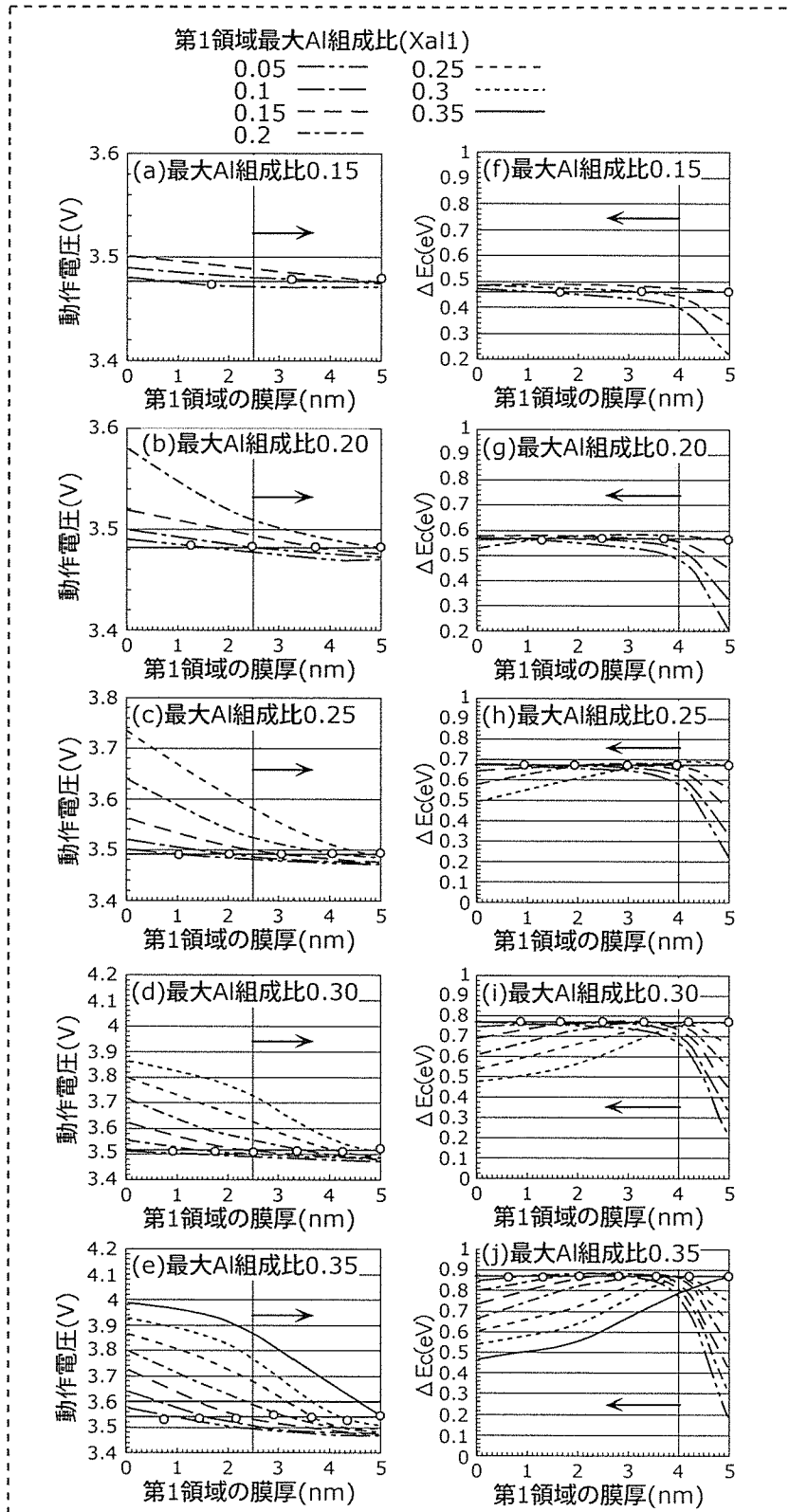
[図12]



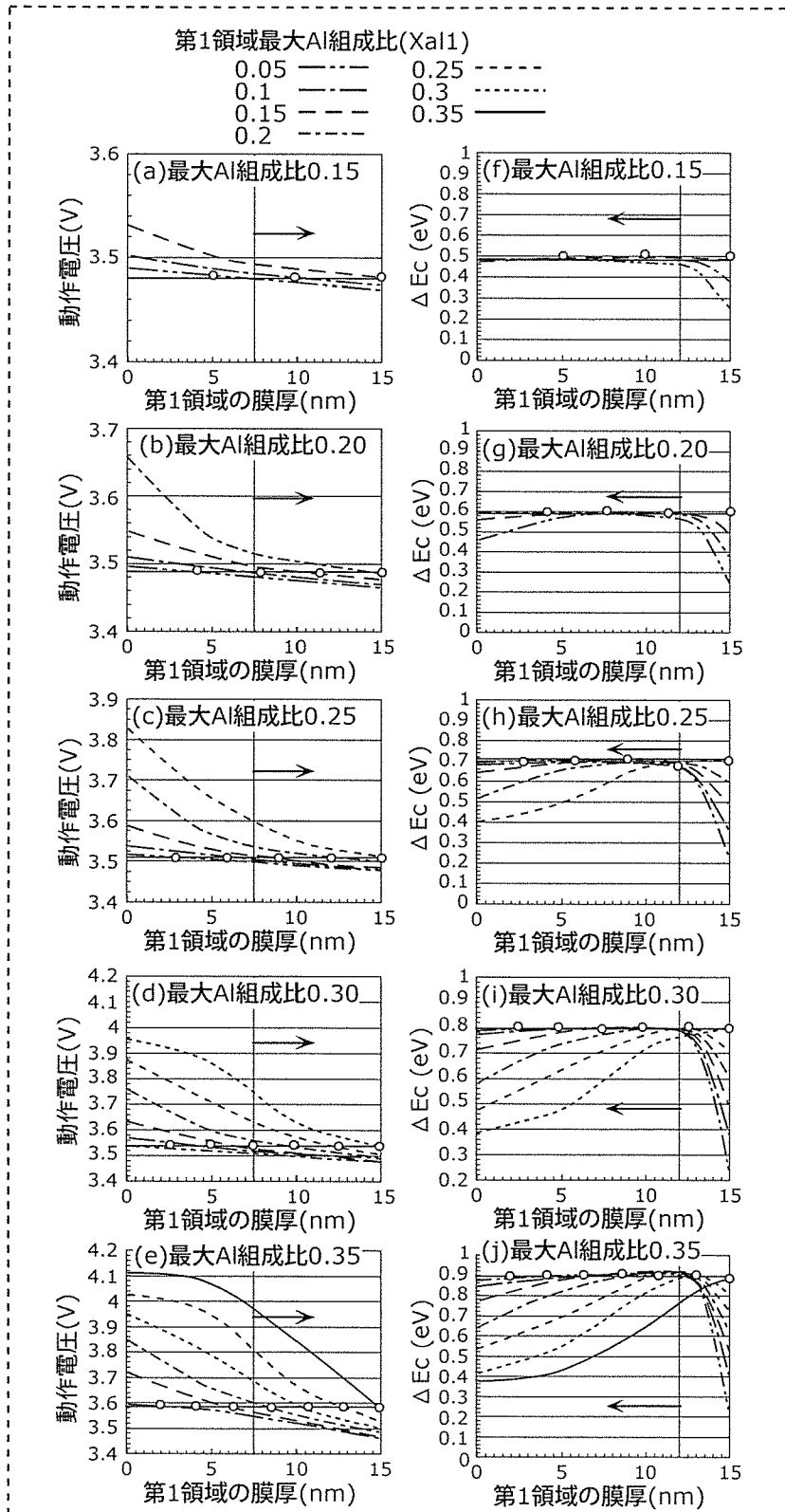
[図13]



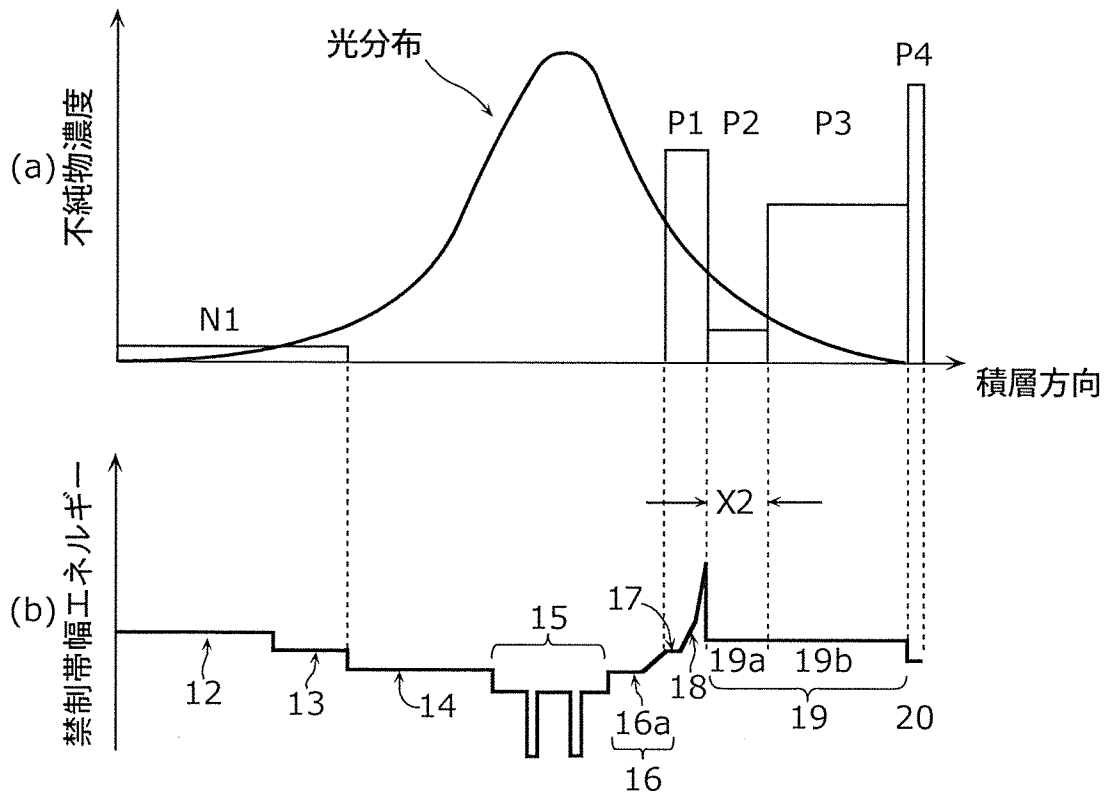
[図14]



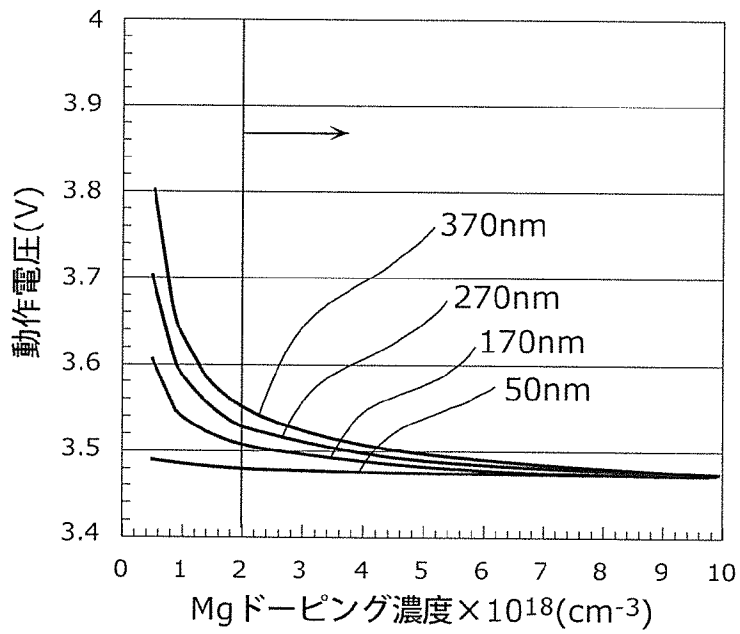
[図15]



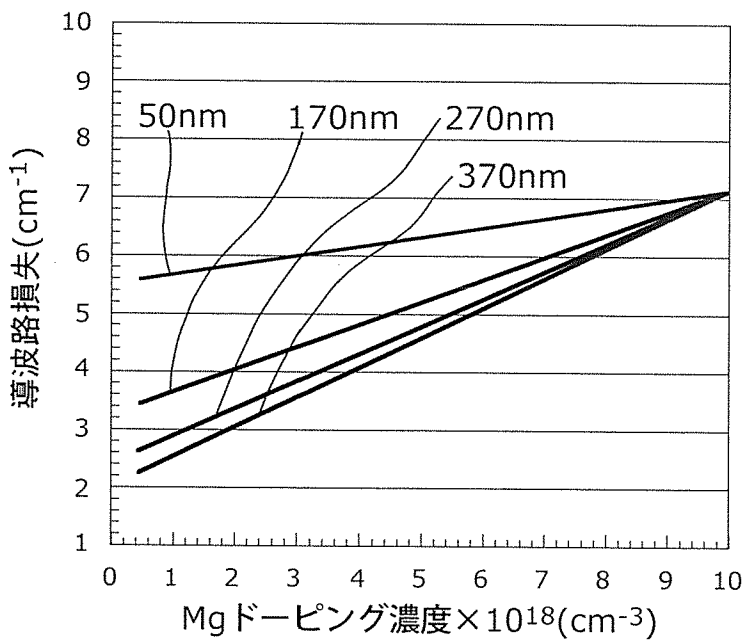
[図16]



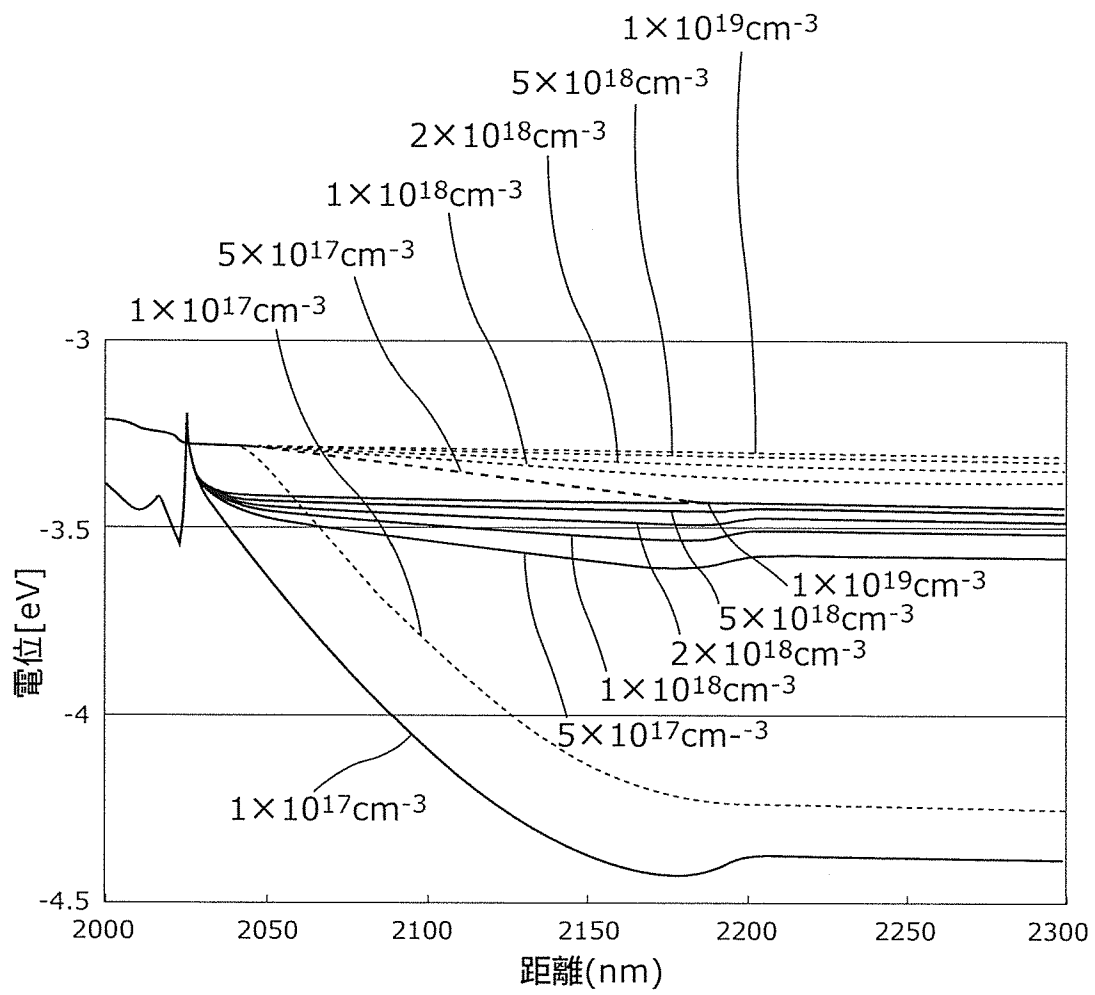
[図17A]



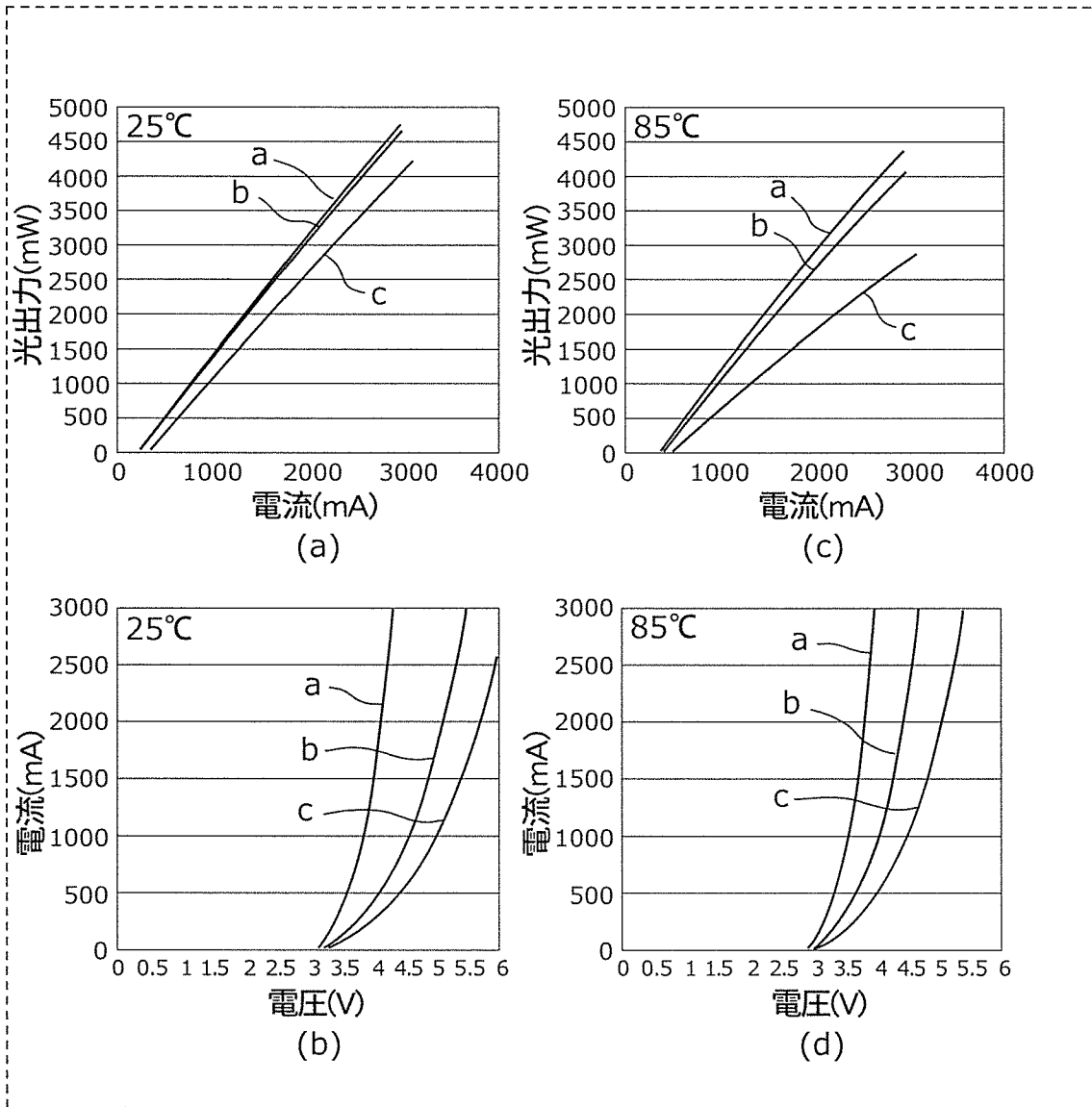
[図17B]



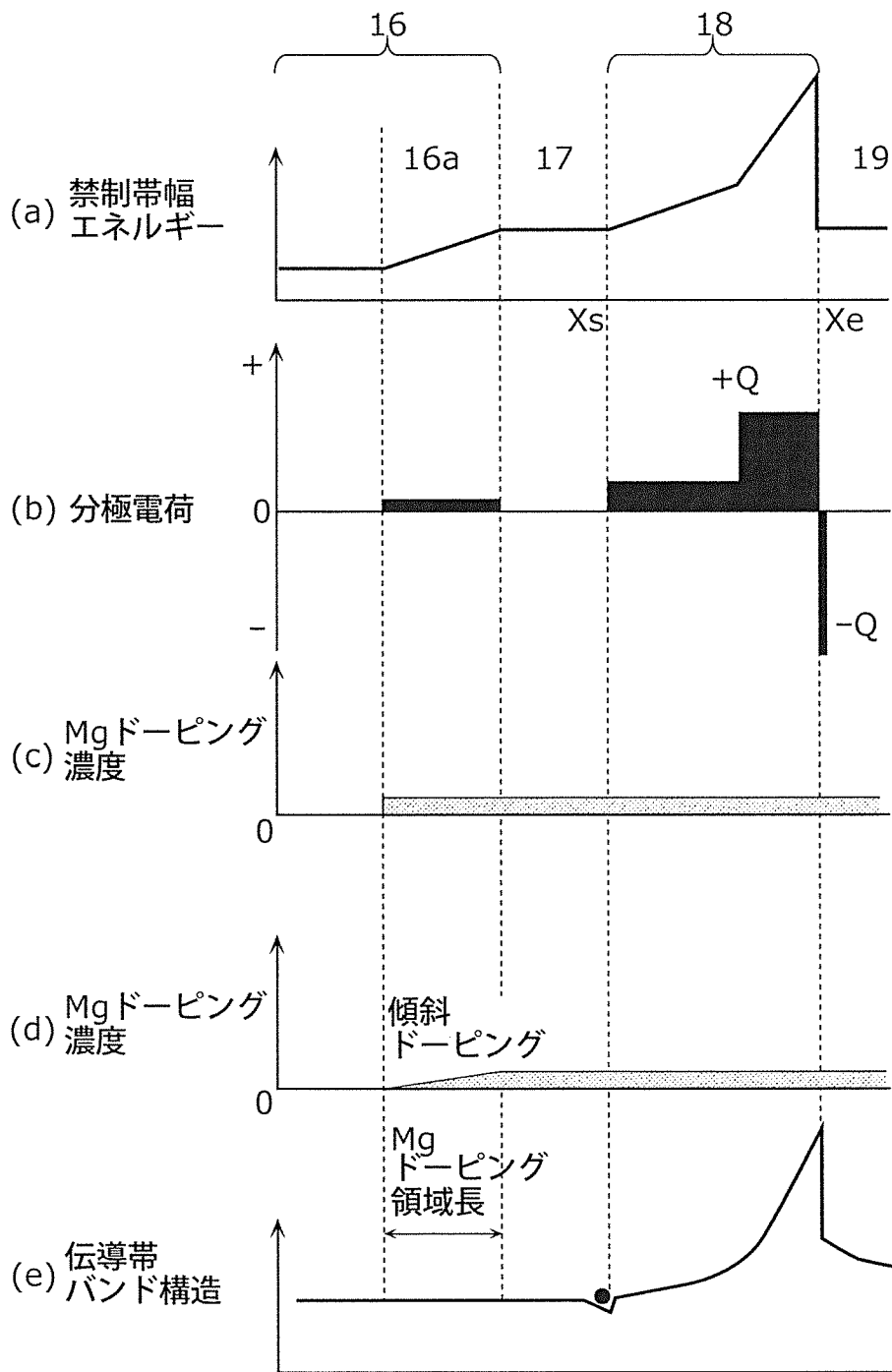
[圖18]



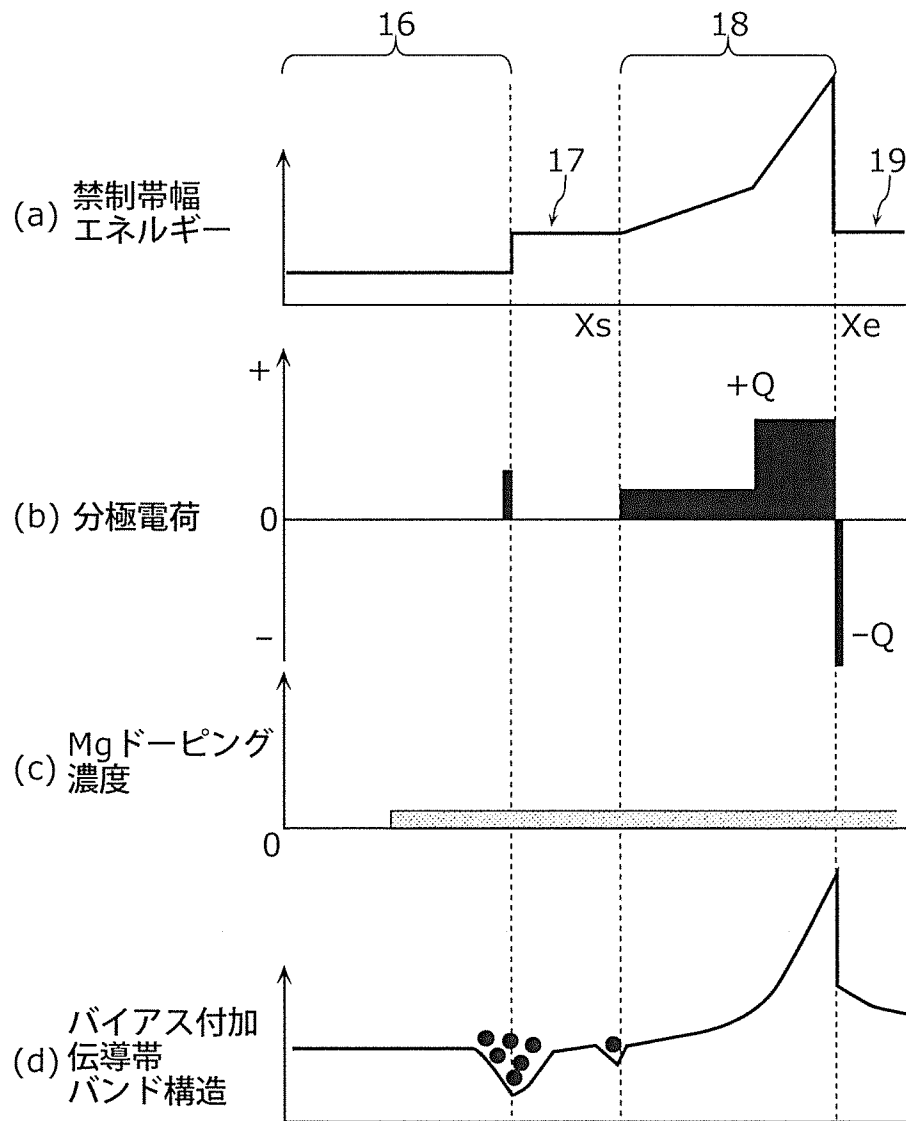
[図19]



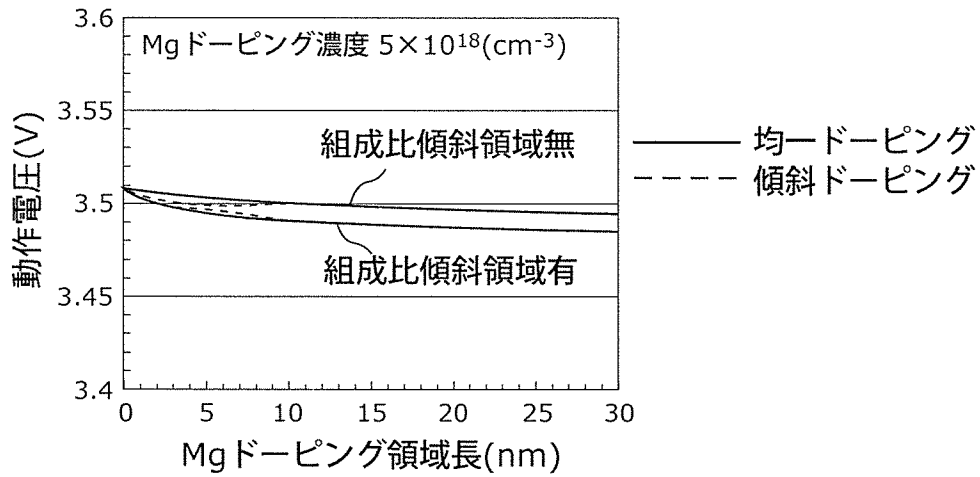
[図20]



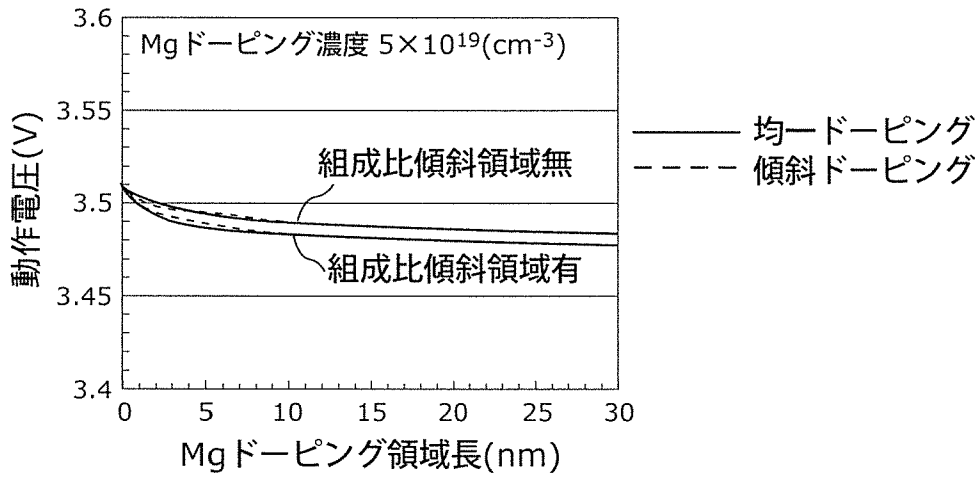
[図21]



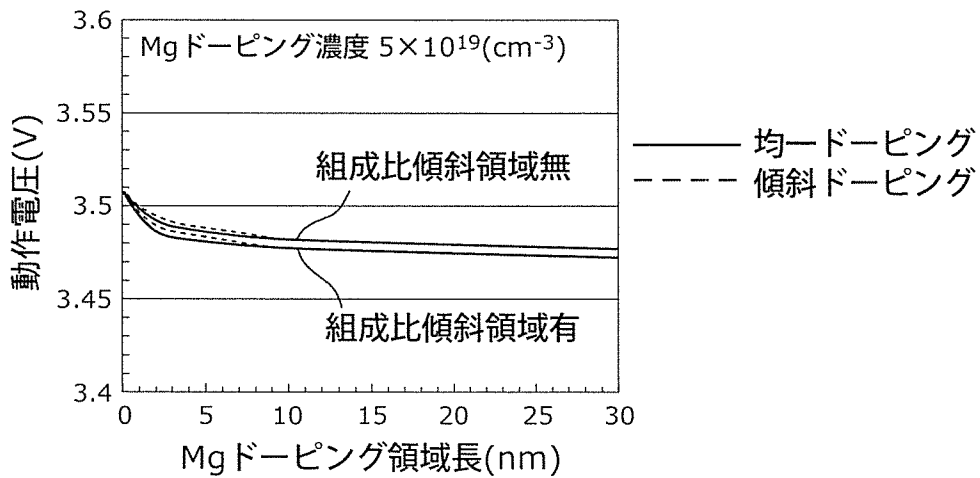
[図22A]



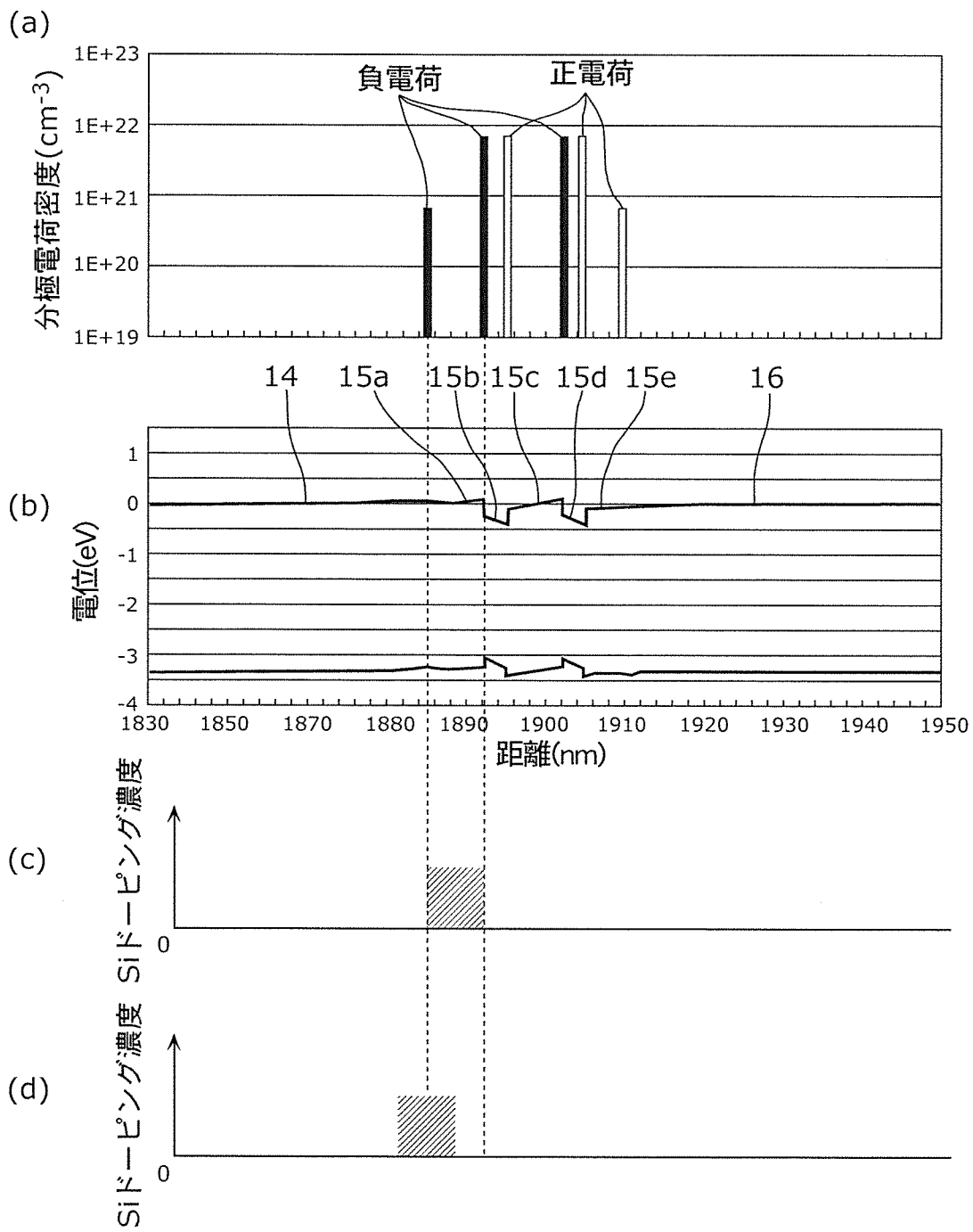
[図22B]



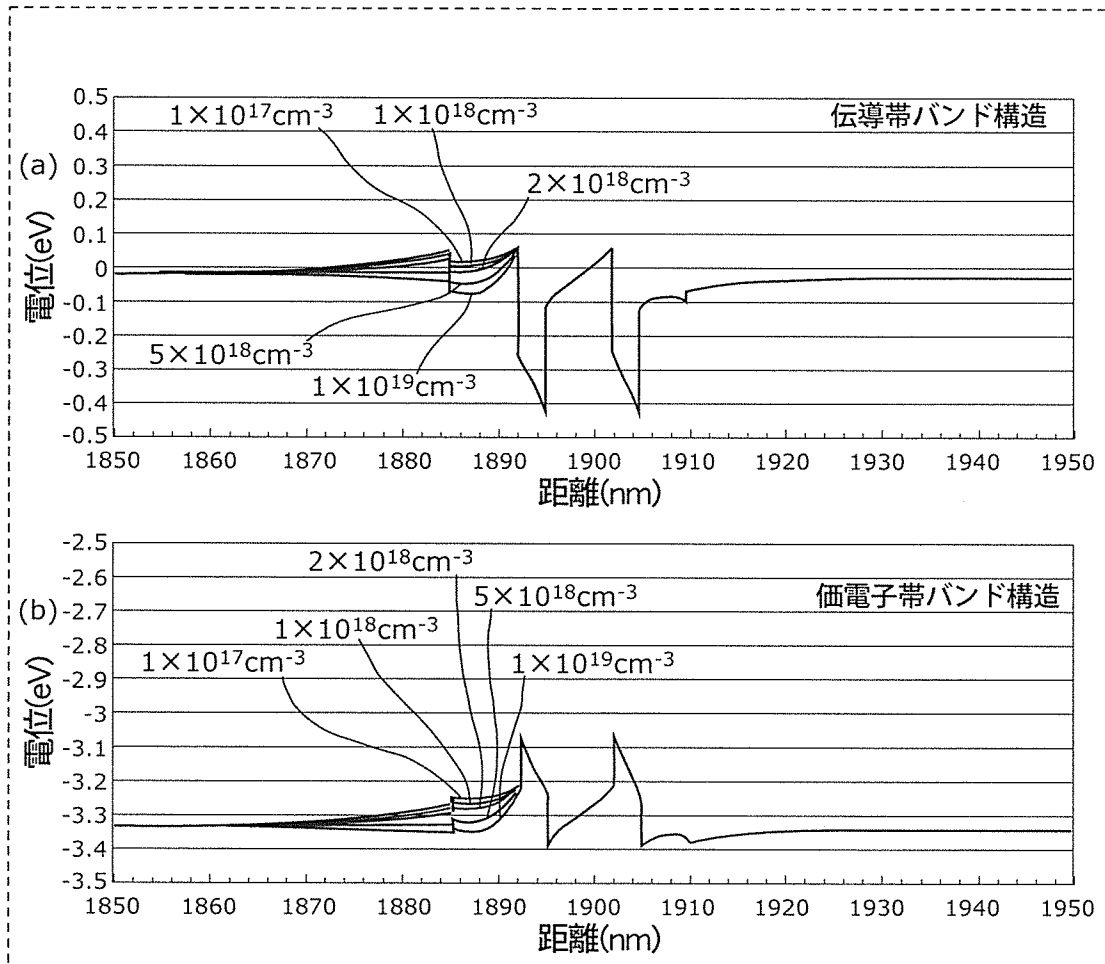
[図22C]



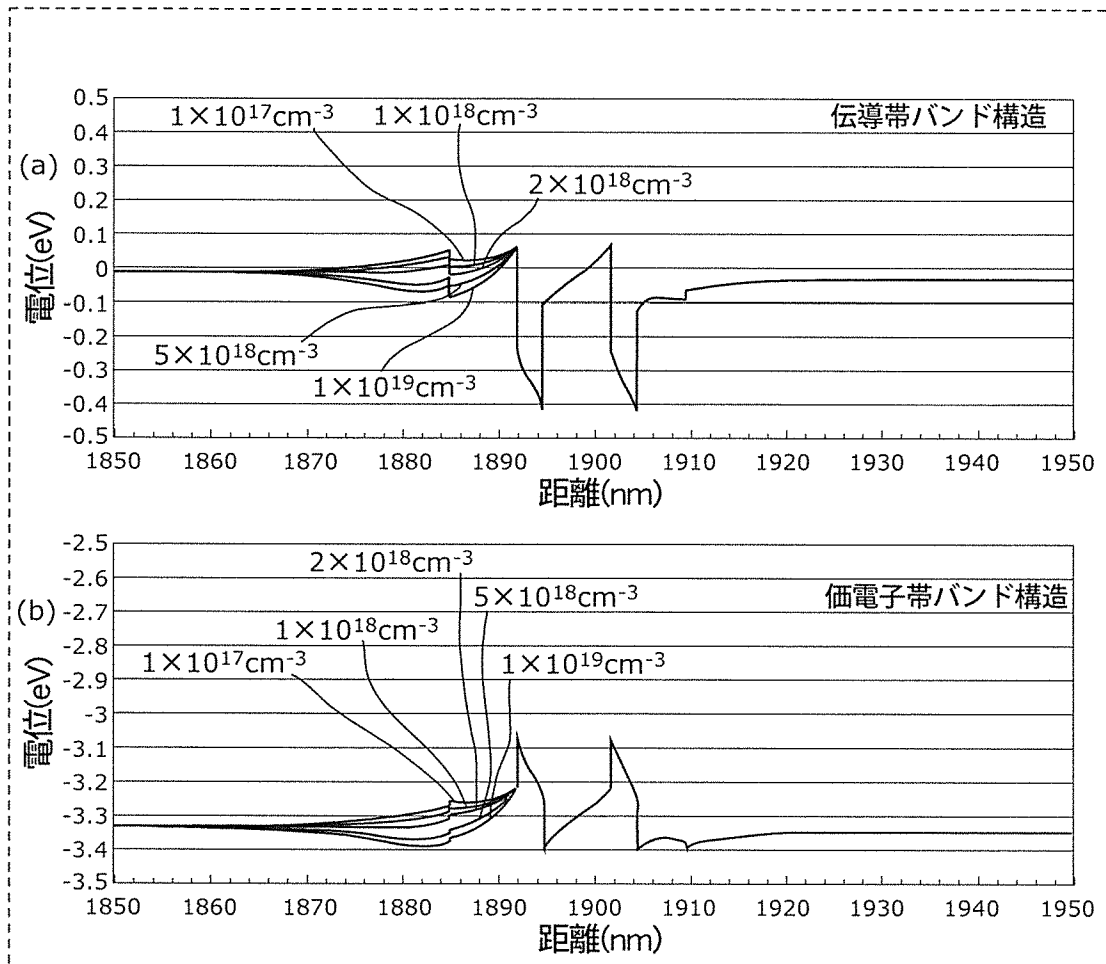
[図23]



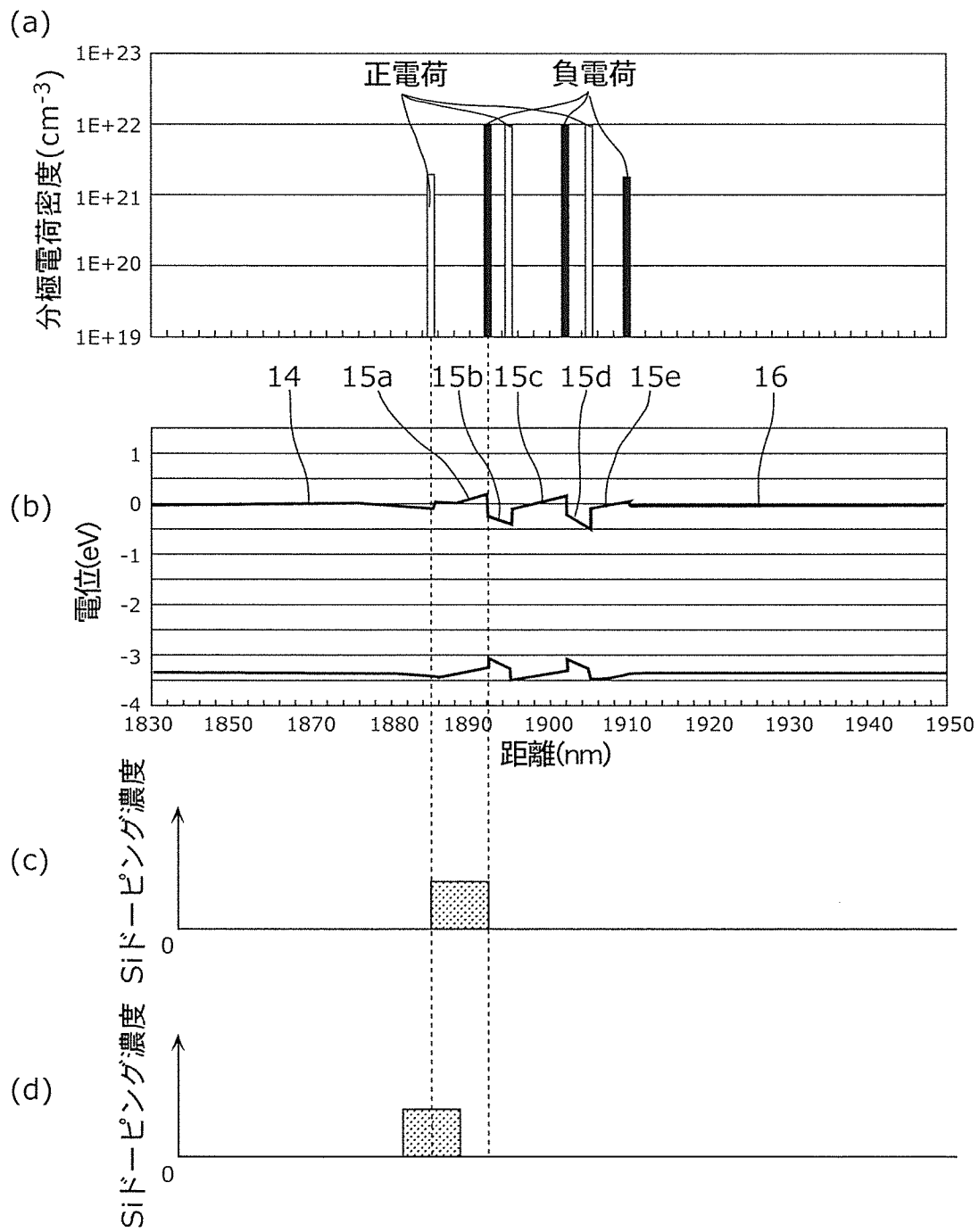
[図24]



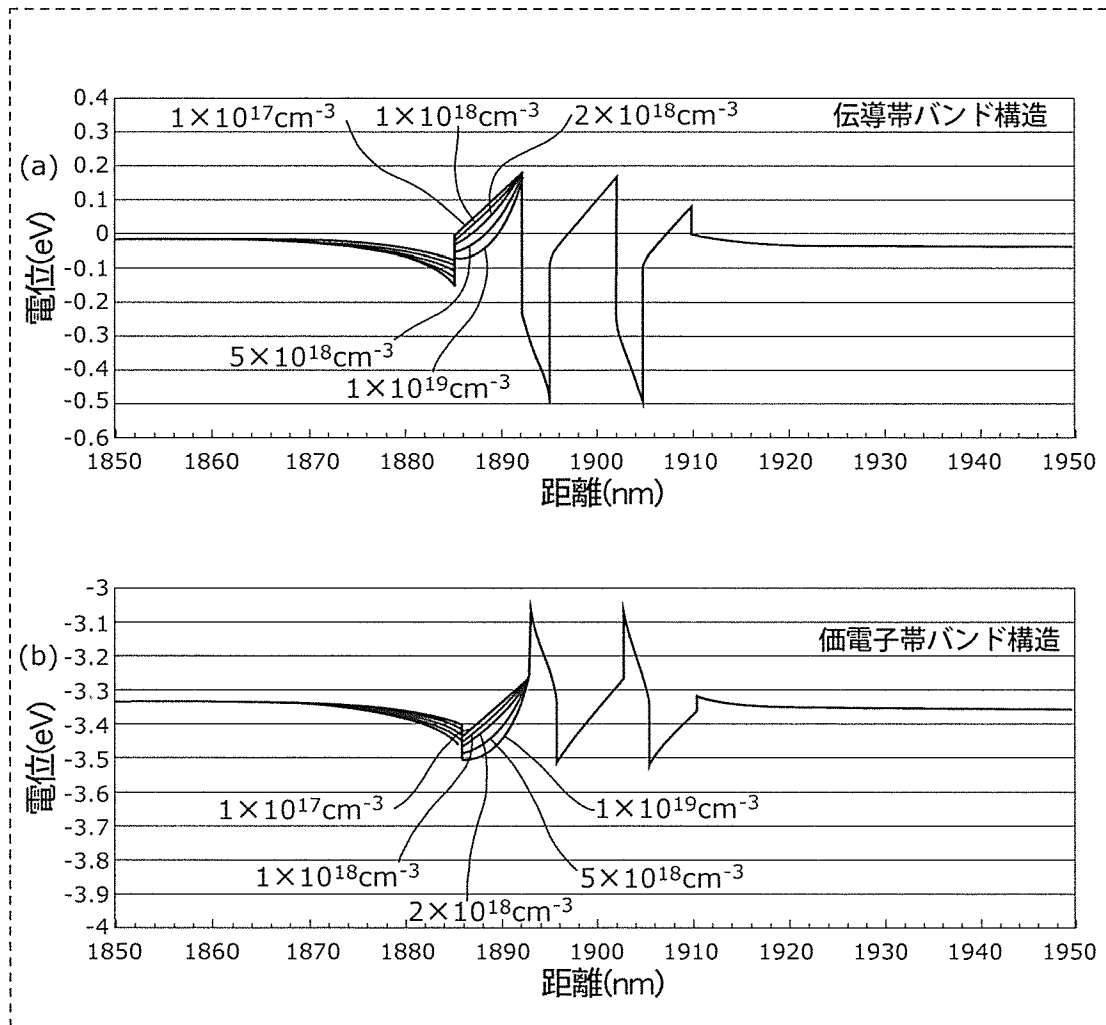
[図25]



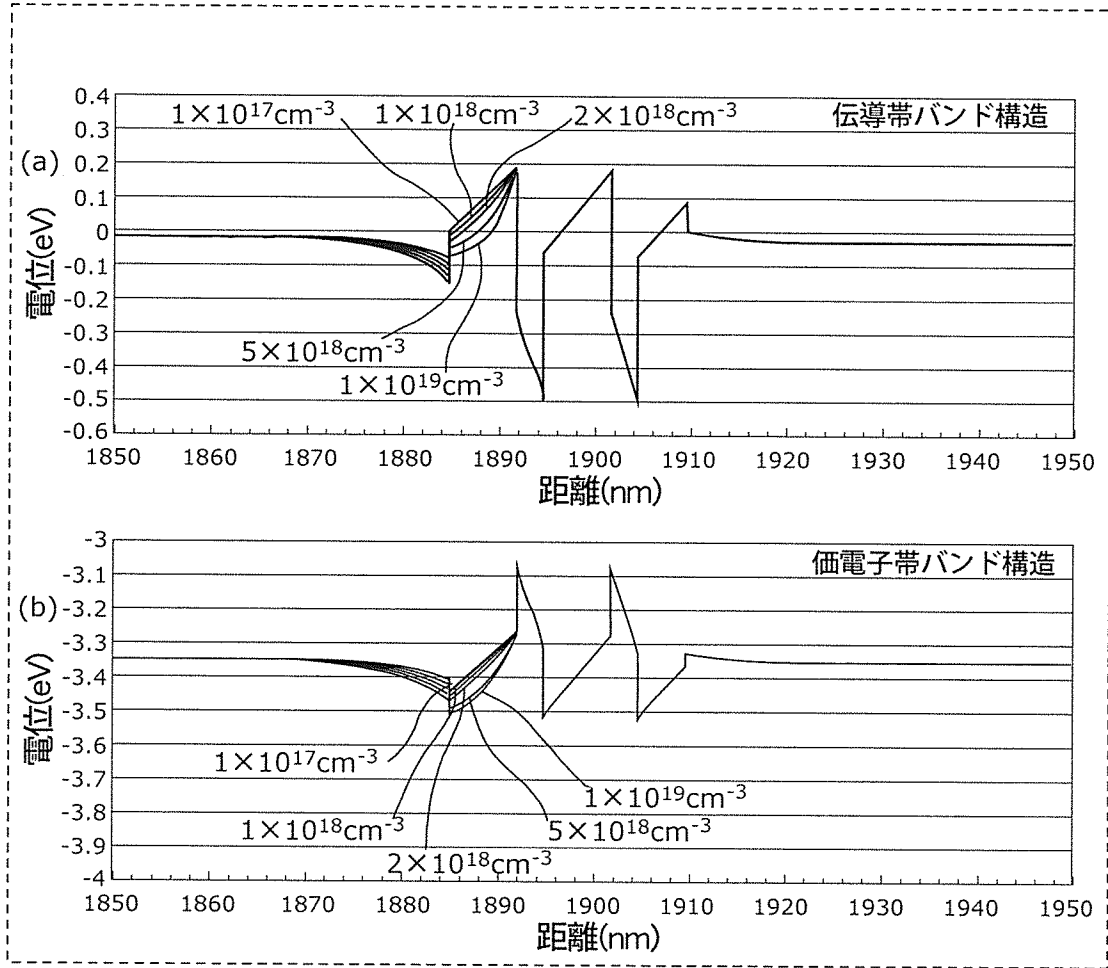
[図26]



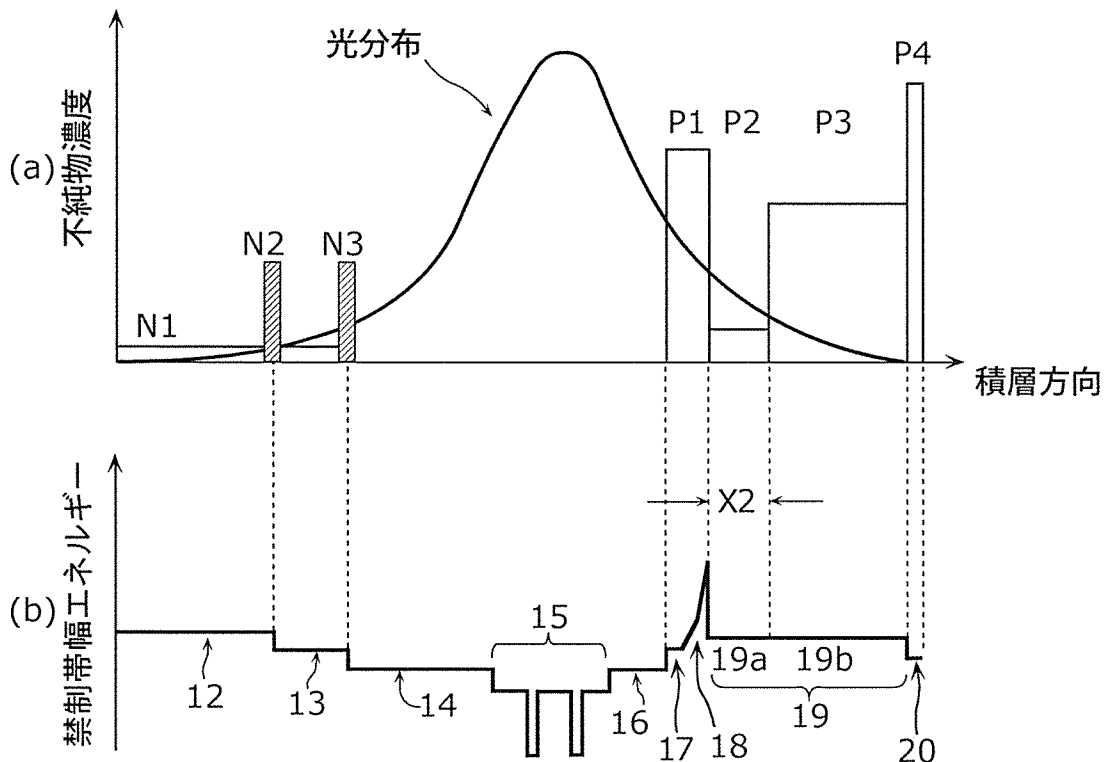
[図27]



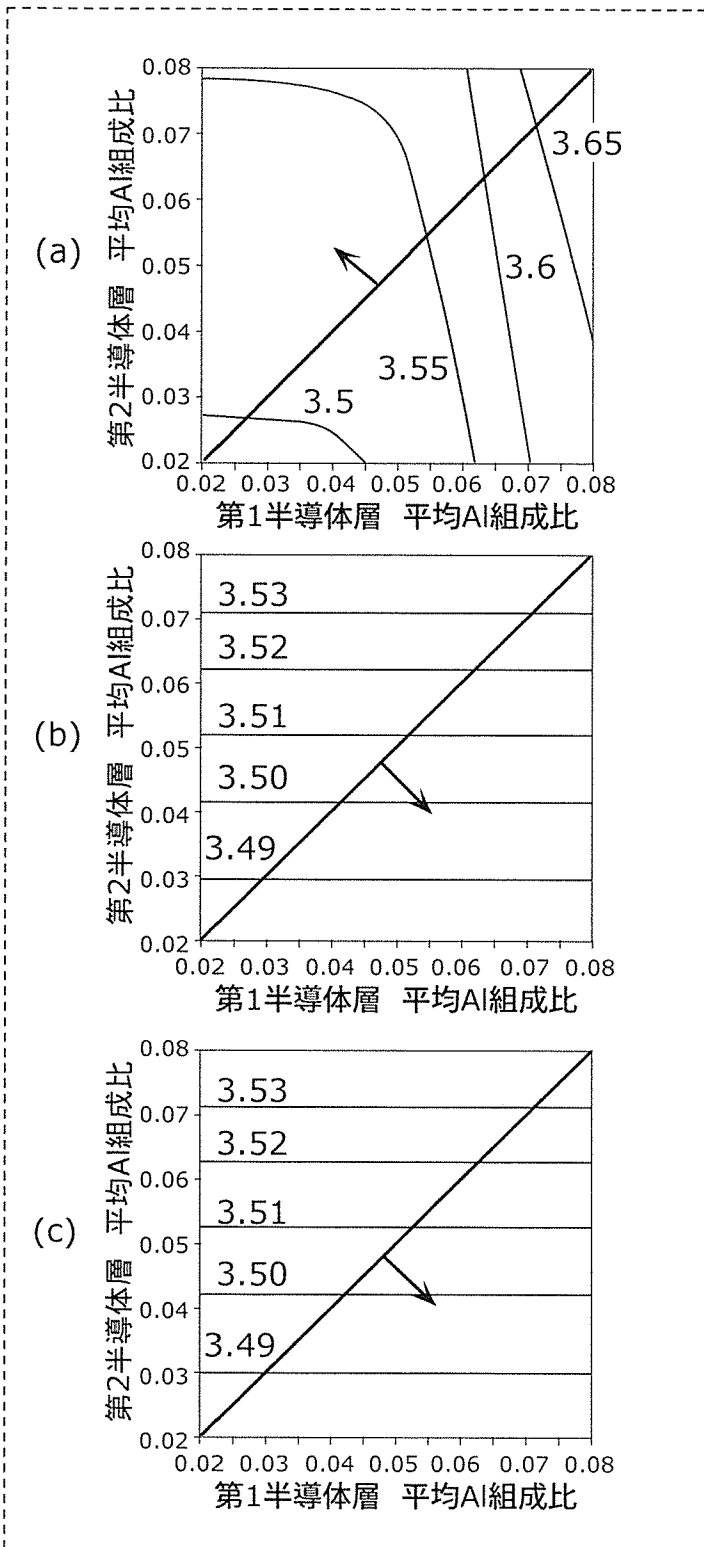
[図28]



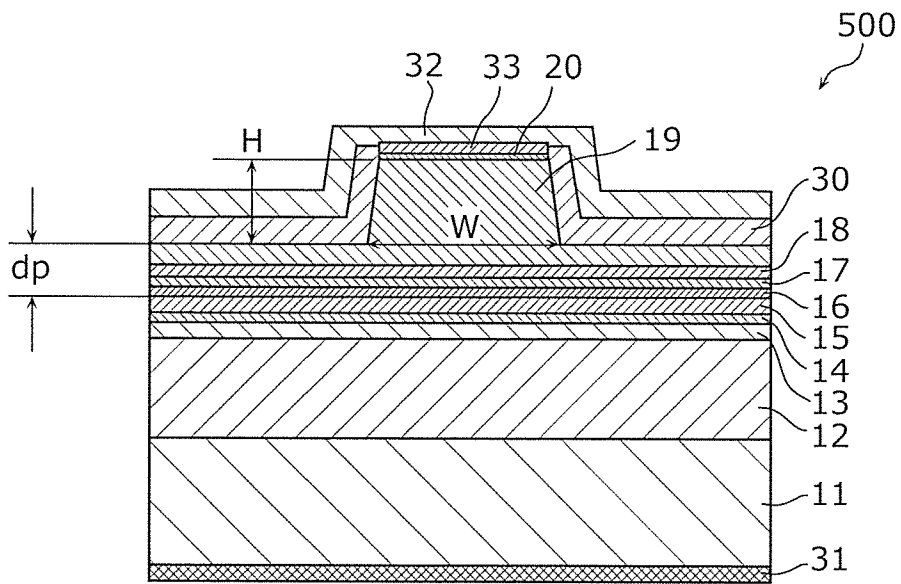
[図29]



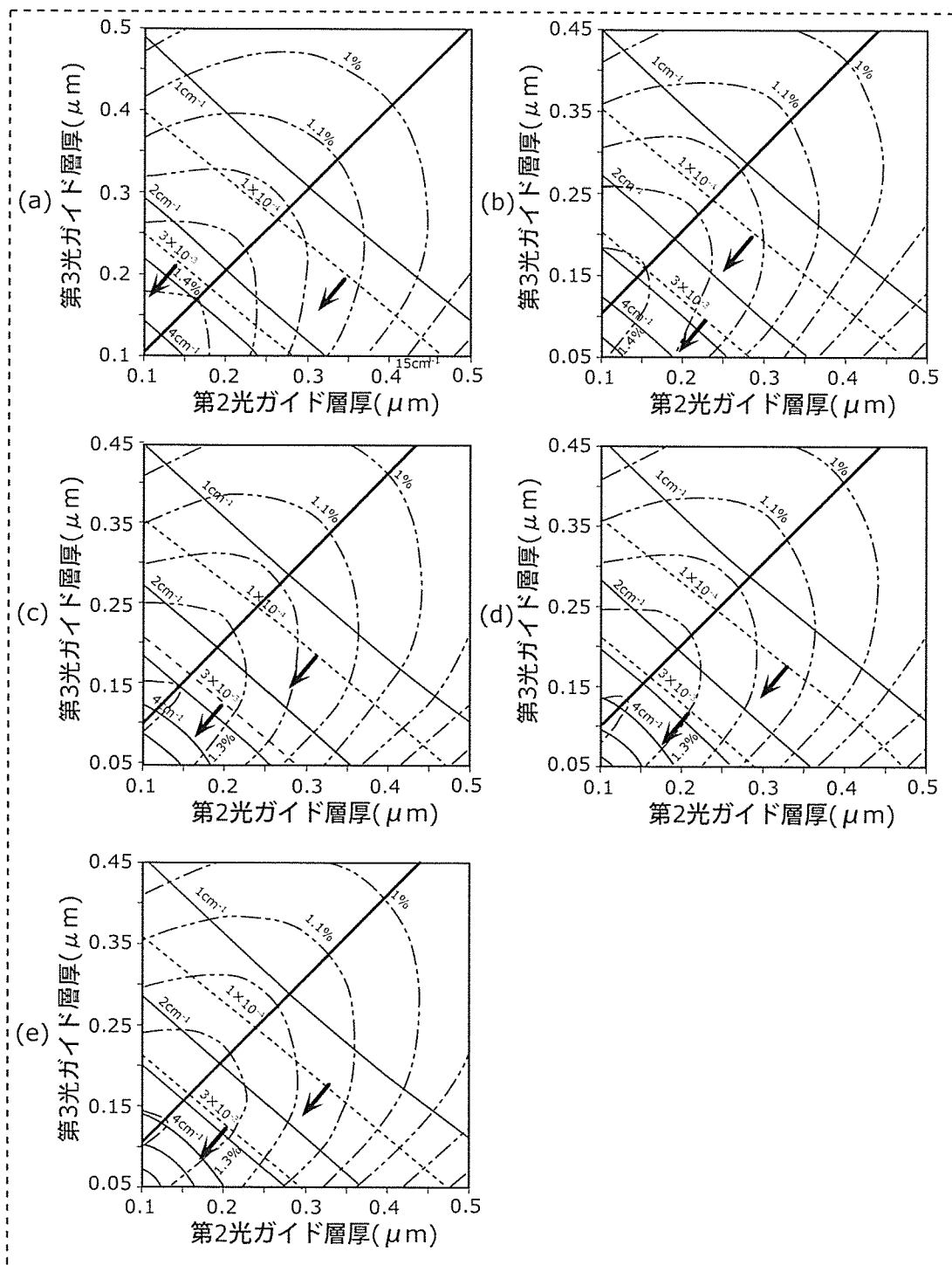
[圖30]



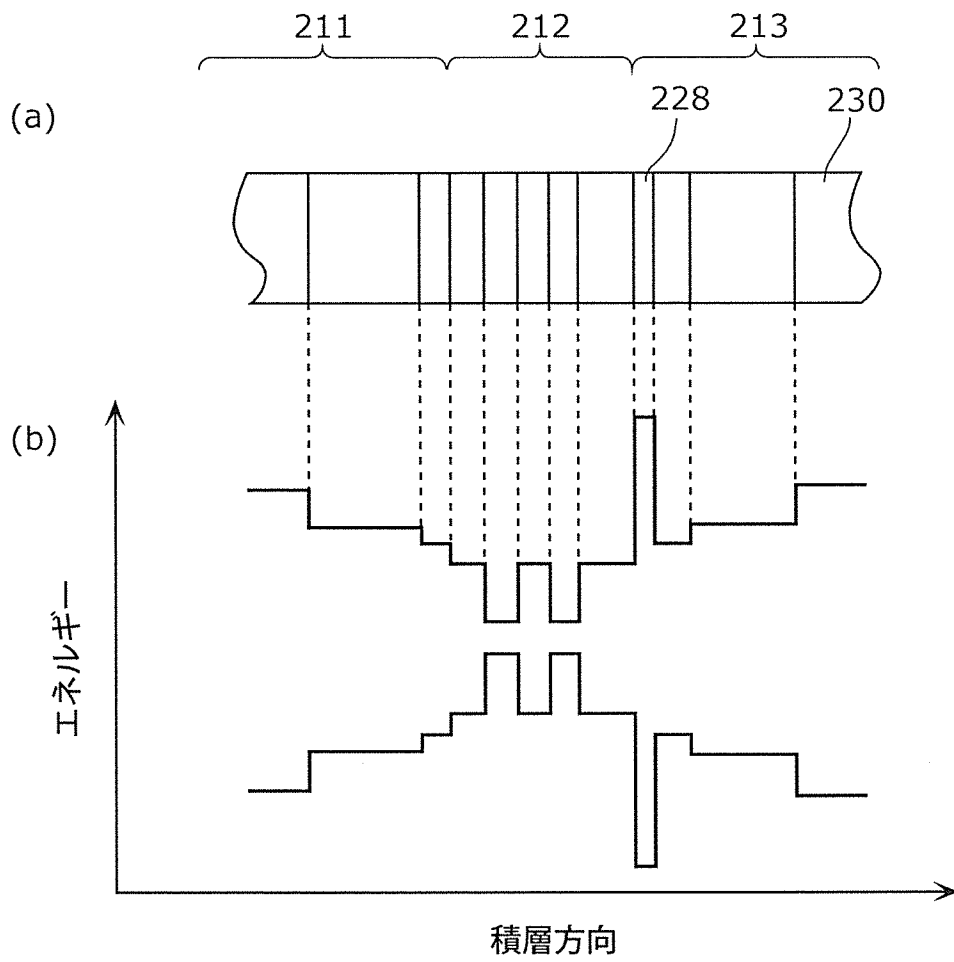
[図31]



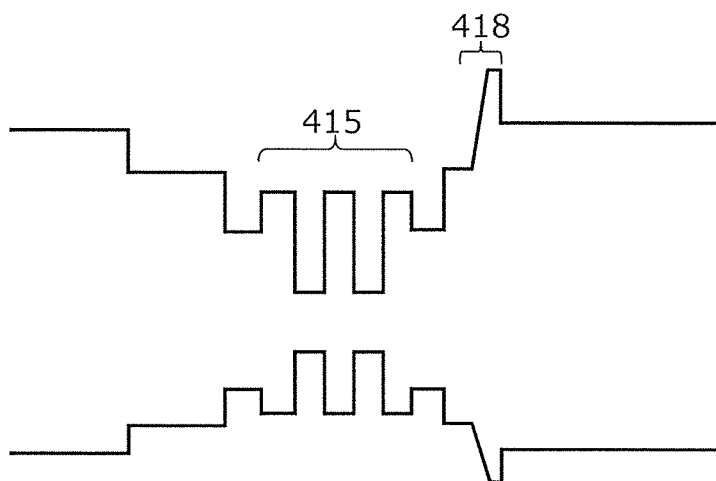
[図32]



[図33]



[図34]



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2019/002749

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

Int.Cl. H01S5/343 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. H01S5/343

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 2014-130897 A (TOSHIBA CORPORATION) 10 July 2014, paragraphs [0048], [0049], [0053], [0078], [0081], fig. 4(c) & US 2014/0183447 A1, paragraphs [0065], [0066], [0070], [0101], [0104], fig. 4C & EP 2772950 A1 & CN 103915531 A & KR 10-2014-0086848 A & TW 201442282 A	1-7, 9-15, 17-18 19 8, 16

Further documents are listed in the continuation of Box C.       See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 05.04.2019	Date of mailing of the international search report 23.04.2019
---	--

Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer  Telephone No.
--	---

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/002749

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2017/195502 A1 (PANASONIC INTELLECTUAL PROPERTY MANAGEMENT CO., LTD.) 16 November 2017, paragraph [0032] & CN 109075530 A	19
A	WO 2016/199363 A1 (PANASONIC INTELLECTUAL PROPERTY MANAGEMENT CO., LTD.) 15 December 2016, paragraphs [0058]-[0126], fig. 1 & US 2018/0109076 A1, paragraphs [0071]-[0143], fig. 1 & CN 107615602 A	1-19
A	JP 2005-150568 A (SHARP CORPORATION) 09 June 2005, paragraphs [0055], [0056] (Family: none)	1-19
A	US 2008/0247435 A1 (CHOI, Y. H.) 09 October 2008, paragraphs [0052], [0058], fig. 3-7 & KR 10-2008-0090669 A	1-19

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01S5/343(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01S5/343

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2014-130897 A (株式会社東芝) 2014.07.10, [0048]-[0049], [0053], [0078], [0081], 図4(c)	1-7, 9-15, 17-18
Y	& US 2014/0183447 A1, [0065]-[0066], [0070], [0101], [0104],	19
A	FIG. 4C & EP 2772950 A1 & CN 103915531 A & KR 10-2014-0086848 A & TW 201442282 A	8, 16

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

\* 引用文献のカテゴリー

- 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
- 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
- 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
- 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
- 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

- 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
- 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
- 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
- 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

05.04.2019

国際調査報告の発送日

23.04.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)  
郵便番号 100-8915  
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

皆藤 彰吾

電話番号 03-3581-1101 内線 3255

2K

6204

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	WO 2017/195502 A1 (パナソニック I P マネジメント株式会社) 2017. 11. 16, [0032] & CN 109075530 A	19
A	WO 2016/199363 A1 (パナソニック I P マネジメント株式会社) 2016. 12. 15, [0058]-[0126], 図 1 & US 2018/0109076 A1, [0071]-[0143], FIG. 1 & CN 107615602 A	1-19
A	JP 2005-150568 A (シャープ株式会社) 2005. 06. 09, [0055]-[0056] (ファミリーなし)	1-19
A	US 2008/0247435 A1 (CHOI Yoon Ho) 2008. 10. 09, [0052], [0058], FIGS. 3-7 & KR 10-2008-0090669 A	1-19