

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5488917号

(P5488917)

(45) 発行日 平成26年5月14日(2014.5.14)

(24) 登録日 平成26年3月7日(2014.3.7)

(51) Int.Cl.

H01S 5/18 (2006.01)

F1

H01S 5/18

請求項の数 4 (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2010-172585 (P2010-172585)	(73) 特許権者	000236436
(22) 出願日	平成22年7月30日(2010.7.30)		浜松ホトニクス株式会社
(65) 公開番号	特開2012-33749 (P2012-33749A)		静岡県浜松市東区市野町1126番地の1
(43) 公開日	平成24年2月16日(2012.2.16)	(73) 特許権者	504132272
審査請求日	平成25年5月20日(2013.5.20)		国立大学法人京都大学
			京都府京都市左京区吉田本町36番地1
		(74) 代理人	100088155
			弁理士 長谷川 芳樹
		(74) 代理人	100113435
			弁理士 黒木 義樹
		(74) 代理人	100124291
			弁理士 石田 悟
		(72) 発明者	廣瀬 和義
			静岡県浜松市東区市野町1126番地の1
			浜松ホトニクス株式会社内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体面発光素子及びその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

閃亜鉛構造の第1化合物半導体からなる基本層内に複数の穴を周期的に形成し、前記穴内に、閃亜鉛構造であって第2化合物半導体からなる埋め込み層を成長させてなるフォトリック結晶層と、前記フォトリック結晶層に対して光を供給する活性層と、を備え、

前記基本層の主表面は(001)面であり、

前記穴の側面は、{110}面、又は、この面を前記主表面の法線に回りに±15度未満の回転角度で回転させた面を含んでおり、前記埋め込み層は、前記側面との界面である少なくとも1つの{110}面、又は、これらの面を前記主表面の法線に回りに±15度未満の回転角度で回転させた面から突出した凸部又は凹部を有していることを特徴とする半導体面発光素子。

【請求項2】

前記第1化合物半導体はGaAsであり、

前記第2化合物半導体はAlGaAsである、ことを特徴とする請求項1に記載の半導体面発光素子。

【請求項3】

請求項1又は2に記載の半導体面発光素子を製造する半導体面発光素子の製造方法において、

前記穴を形成する工程と、

前記埋め込み層の成長を行う工程と、
を備えることを特徴とする半導体面発光素子の製造方法。

【請求項 4】

前記成長を行う工程の前に、エッチングにより $\{110\}$ 面、又は $\{1\bar{1}0\}$ を前記主表面の法線回りに ± 10 度以内の回転角度で回転させた面を含むアライメントマークを、前記基本層の形成される半導体基板に形成する工程を備えることを特徴とする請求項 3 に記載の半導体面発光素子の製造方法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、半導体面発光素子及びその製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

フォトリソグラフィは、屈折率が周期的に変化するナノ構造体であり、これを通過する光の波長を制御することができる。次世代の半導体面発光素子として、2次元フォトリソグラフィ結晶（以下2DPCと称す）を用いたフォトリソグラフィ結晶面発光レーザ（以下PCSELと称す）が提案されている。PCSELは、その光学特性が微細構造の寸法・形状により決まり、材料に依らないという特徴を持ち、大面積・単一モード、2次元的な偏光制御、出射角度の制御といった、従来の半導体発光素子単体では実現困難な新しい特性を有し、高出力半導体レーザの可能性を切り拓くポテンシャルを有している。

20

【0003】

実際の2DPCの作製では、ウェハ貼合わせ技術を用いており、次の問題点（1）～（3）を有している。

（1）大面積の2DPC作製が困難である。すなわち、貼合わせるウェハが反りを有している場合、ウェハ間にゴミがある場合、ウェハ表面に大きな凹凸がある場合などの場合には、これらのウェハを上手く貼り合わせるできない。

30

（2）2DPC層に空洞を含んでおり、結合係数 κ が大きく、大面積化に不向きである。その理由は、2DPC層に均一に光を分布させるために、電極長 L に対して面内方向の規格化結合係数 κL を1～2程度とすることが望ましいが、2DPC層に空洞を含む場合、 κ の値が 1000 cm^{-1} 以上の値となり、 L の値が数十 μm に制限されるからである。

（3）貼り合わせられたウェハ間の界面に欠陥が形成されるため、寿命・信頼性に難点がある。

【0004】

上記問題点を解決するための2DPC作製手段として、結晶再成長を利用する再成長型PCSELがあり、これには次の利点がある。

40

（1）大面積の2DPC作製が容易である。すなわち、再成長を用いた場合、結晶を貼り合わせる必要がない。

（2）2DPC層を完全に埋込んだ場合、その結合係数 κ はウェハを貼合せた場合の結合係数の $1/10$ 程度に小さくなるため、大面積化が容易である。

（3）2DPC層界面をエピ層で埋め込むため、欠陥が少なく、信頼性が改善する。

（4）2DPC層に空洞を含まないので、放熱性に優れ、大出力化に向いている。

【0005】

上記の観点から、高出力PCSELの実用化を目指す上では、再成長型PCSELが、貼り合わせ型のPCSELよりも優位である。

【0006】

50

特許文献1は、結晶の再成長において空洞を生じないフォトリック結晶として、六角形の凸部を半導体層内に埋め込むことを提案している。この場合、凸部の主表面(0001)面に対して、側面を(1-100)面としている。

【0007】

特許文献2では、極性面を有する(111)基板または、半極性面を有する(n11)基板($2 \leq n \leq 6$ が望ましい)を用いた閃亜鉛構造(zinc blend structure)の結晶成長において、再成長埋込みを行っており、その手段としてラテラル成長を用いている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開2009-206157号公報

【特許文献2】特開2010-114384号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

しかしながら、本願発明者らが閃亜鉛構造の半導体層に穴を開けて、穴内で結晶の再成長を行った場合、その上に形成される化合物半導体層の表面モフォロジーが十分でなく、結晶内部に大きな転位が発生していることを発見した。すなわち、形成された半導体層の結晶性は十分ではないため、半導体面発光素子の特性が十分ではない。

【0010】

本発明は、このような課題に鑑みてなされたものであり、特性が改善可能な半導体面発光素子及びその製造方法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】

【0011】

上述の課題を解決するため、本発明に係る半導体面発光素子は、閃亜鉛構造の第1化合物半導体からなる基本層内に複数の穴を周期的に形成し、前記穴内に、閃亜鉛構造であって第2化合物半導体からなる埋め込み層を成長させてなるフォトリック結晶層と、前記フォトリック結晶層に対して光を供給する活性層と、を備え、前記基本層の主表面は(001)面であり、前記穴の側面は、{110}面、又は、この面を前記主表面の法線に回りに ± 15 度未満の回転角度で回転させた面を含んでおり、前記埋め込み層は、前記側面との界面である少なくとも1つの{110}面、又は、これらの面を前記主表面の法線に回りに ± 15 度未満の回転角度で回転させた面から突出した凸部又は凹部を有していることを特徴とする。

【0012】

穴の側面が4つの異なる{110}面によって形成されている場合、(110)および(-1-10)の側面に垂直に成長した埋め込み層には(110)および(-1-10)Faceが出現し、これらのFaceが中央部で接触するとき、結晶に乱れが生じ、最終的な結晶性が劣化することが判明した。すなわち、フォトリック結晶層上に形成された半導体層の表面モフォロジーは荒れており、内部に多くの転位が発生している。また、穴の側面に(110)、(-1-10)を含む場合、再成長埋め込み過程の初期に現れるFace(一例として(113)、(-1-13)、すなわち(113)A面)上で複数のFaceの競合が生じ、部分的に不均一に再成長される。この領域が転位形成の核となるという機構も存在する。

【0013】

一方、穴及び埋め込み層の側面形状が、本発明のものの場合、フォトリック結晶層上に形成された半導体層の表面モフォロジーは非常に良好であって、平坦性が高く、相対的に、内部で発生している転位量が減少していることが分かる。このように半導体層の結晶性が改善すると、温度や熱による耐性が高くなるため、寿命を増加させることができ、リーク電流や内部抵抗が低くなるため、発光効率を改善することが可能となる。すなわち、穴の形状を本発明のものとすることで、半導体面発光素子の特性を改善することができる。

10

20

30

40

50

【0014】

また、前記第1化合物半導体はGaAsであり、前記第2化合物半導体はAlGaAsである。これらの閃亜鉛構造の化合物半導体を用いた場合、材料特性がよく知られているので、その形成が容易である。

【0015】

なお、上述の半導体面発光素子を製造する半導体面発光素子の製造方法は、前記穴を形成する工程と、前記埋め込み層の成長を行う工程と、を備えることを特徴とする。なお、前記成長を行う工程の前に、エッチングにより{110}面、又は{110}を前記主表面の法線回りに±10度以内の回転角度で回転させた面を含むアライメントマークを、前記基本層の形成される半導体基板に形成する工程を含んでも良い。この方法によれば、上述の素子を形成する場合において、前記アライメントマークの再成長層に転位が形成されることで再成長表面が荒れ、光学露光の基準位置として利用することができる。

10

【発明の効果】

【0016】

本発明の半導体面発光素子及びその製造方法によれば、これを構成する半導体層の結晶性が改善されているため、発光出力や寿命などの特性を改善することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】半導体面発光素子を一部破断して示す半導体面発光素子の斜視図である。

【図2】ウェハ上に形成された基本層6Aの平面図である。

20

【図3】ウェハの正面図である。

【図4】穴の形状を示す図である。

【図5】穴の形成された基本層6Aの電子顕微鏡写真(A)及び半導体面発光素子の最表面側に位置する半導体層の表面の光学顕微鏡写真(B)を示す図である。

【図6】穴の形成された基本層6Aの電子顕微鏡写真(A)及び半導体面発光素子の最表面側に位置する半導体層の表面の光学顕微鏡写真(B)を示す図である。

【図7】穴の形成された基本層6Aの電子顕微鏡写真(A)及び半導体面発光素子の最表面側に位置する半導体層の表面の光学顕微鏡写真(B)を示す図である。

【図8】穴の形状の詳細構成を示す図である。

【図9】半導体面発光素子の断面図である。

30

【図10】第1比較例に係るウェハ上に形成された基本層6Aの平面図である。

【図11】第1比較例に係る基本層の表面写真及び半導体面発光素子の断面写真を示す図である。

【図12】第1比較例に係る半導体面発光素子の最表面側に位置する半導体層の表面の光学顕微鏡写真を示す図である。

【図13】結晶性の劣化の状態を説明する図である。

【図14】第2比較例に係る基本層の表面写真及び半導体面発光素子の断面写真を示す図である。

【図15】第2比較例に係る半導体面発光素子の最表面側に位置する半導体層の表面の光学顕微鏡写真を示す図である。

40

【図16】様々な穴の形状について示す図である。

【図17】様々な穴の形状について示す図である。

【図18】フォトリソ法結晶層の第1の製造方法について説明するための図である。

【図19】フォトリソ法結晶層の第2の製造方法について説明するための図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

以下、実施の形態に係る半導体面発光素子及びその製造方法について説明する。なお、同一要素には同一符号を用いることとし、重複する説明は省略する。

【0019】

図1は、半導体面発光素子を一部破断して示す半導体面発光素子の斜視図である。

50

【0020】

半導体面発光素子は、半導体基板1上に順次形成された下部クラッド層2、下部光ガイド層3、活性層4、上部光ガイド層5、フォトニック結晶層6、上部クラッド層7、コンタクト層8を備えている。半導体基板1の裏面側には、電極E1が全面に設けられており、コンタクト層8の中央部には電極E2が設けられている。

【0021】

これらの化合物半導体層の材料／厚みは以下の通りである。なお、導電型の記載のないものは不純物濃度が $10^{15} / \text{cm}^3$ 以下の真性半導体である。なお、不純物が添加されている場合の濃度は、 $10^{17} \sim 10^{20} / \text{cm}^3$ である。また、下記は本実施の形態の一例であって、活性層4およびフォトニック結晶層6を含む構成であれば、材料系、膜厚、層の構成には自由度を持つ。なお、括弧内の数値は、後述の実験で用いた数値であり、MOCVD法によるAlGaAsの成長温度は $500^\circ\text{C} \sim 850^\circ\text{C}$ であって、実験では $550 \sim 700^\circ\text{C}$ を採用し、成長時におけるAl原料としてTMA（トリメチルアルミニウム）、ガリウム原料としてTMG（トリメチルガリウム）およびTEG（トリエチルガリウム）、As原料としては AsH_3 （アルシン）、N型不純物用の原料として Si_2H_6 （ジシラン）、P型不純物用の原料としてDEZn（ジエチル亜鉛）を用いた。

- ・コンタクト層8：P型のGaAs／ $50 \sim 500 \text{ nm}$ （ 200 nm ）
- ・上部クラッド層7：P型のAlGaAs（ $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ）／ $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ （ $2.0 \mu\text{m}$ ）
- ・フォトニック結晶層6：
基本層6A：GaAs／ $50 \sim 200 \text{ nm}$ （ 100 nm ）
埋め込み層6B：AlGaAs（ $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ ）／ $50 \sim 200 \text{ nm}$ （ 100 nm ）
- ・上部光ガイド層5：
上層：GaAs／ $10 \sim 200 \text{ nm}$ （ 50 nm ）
下層：p型または真性のAlGaAs／ $10 \sim 100 \text{ nm}$ （ 50 nm ）
- ・活性層4（多重量子井戸構造）：
AlGaAs／InGaAs MQW／ $10 \sim 100 \text{ nm}$ （ 30 nm ）
- ・下部光ガイド層3：AlGaAs／ $0 \sim 300 \text{ nm}$ （ 150 nm ）
- ・下部クラッド層2：N型のAlGaAs／ $1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ （ $2.0 \mu\text{m}$ ）
- ・半導体基板1：N型のGaAs／ $80 \sim 350 \mu\text{m}$ （ $150 \mu\text{m}$ ）

【0022】

上下の電極E1、E2間に電流を流すと、電極E2の直下の領域Rを電流が流れ、この領域が発光して、レーザ光LBが基板に垂直な方向に向かって出力される。

【0023】

図2は、ウェハ上に形成された基本層6Aの平面図である。なお、平面図では、理解の明確化を目的として、実際のスケールよりも格段に大きく、複数の穴Hを記載しており、また、その数も実際よりは少ない。また、図3は、ウェハの正面図である。

【0024】

ウェハ（基板）の主表面は（001）面であり、同図では、基本層6Aの主表面（001）が表面に露出している状態が示されている。なお、閃亜鉛構造の結晶のa軸、b軸、c軸は、それぞれX軸、Y軸、Z軸として、図面に示されている。X軸、Y軸、Z軸の方向は、それぞれ $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ である。

【0025】

ウェハの一端には、オリエンテーションフラット（以下、オリフラと称す）OFが形成されており、オリフラOFは $[110]$ 方向に垂直である。オリフラOFは（ $-1-10$ ）面を有している。基本層6Aには、複数の穴H（H1～H10）が形成されており、それぞれの穴Hは、半導体基板の厚み方向に深さを有する。

【0026】

穴Hの平面形状における輪郭は、長方形の一辺に凸部を結合させ、凸部に対向する一辺

10

20

30

40

50

を膨らませた形状であり、長方形の各辺はオリフラOFの延びた方向 $[1-10]$ 又は $[110]$ に対して平行である。すなわち、凸部以外の穴Hの5つの側面は、それぞれ、 $(-1-10)$ 面、 (-110) 面、 $(1-10)$ 面、 $(h1k10)$ 面、 $(h2k20)$ 面を有している。なお、結晶学的に等価な面として、 (110) 面、 (-110) 面、 $(1-10)$ 面は、 $\{110\}$ 面として表すことができる。

【0027】

平面内における穴Hの重心位置は、 $[1-10]$ 方向に沿って、等間隔に並んでおり、また、 $[110]$ 方向に沿っても等間隔に沿って並んでいる。同図では前者の間隔（例えばH1とH2の間）が、後者の間隔（例えばH1とH6の間）より短い場合が示されているが、本発明は、これに限定されるものではない。また、前者の間隔（例えばH1とH2の間）の中点位置の $[110]$ 方向に沿った延長線上に、別の穴H4が位置する配置になっている。

10

【0028】

なお、実施の形態における穴Hの重心の $[1-10]$ 方向の間隔は、 335 nm であり、 $[110]$ 方向の間隔は、 580 nm である。また、穴の形状は長方形を含むものであって、この長方形を構成する2辺の長さは 120 nm 、 100 nm 、面積は $1.2 \times 10^4\text{ nm}^2$ である。なお、穴Hの重心位置を結ぶ線群は、正方格子、長方格子、三角格子を構成することができ、ランダムな配置であってもよい。

【0029】

図1に示した埋め込み層6Bは、基本層6Aの穴Hの内部に埋め込まれるため、その側面は穴Hの側面に接触し、その面方位は、穴Hの側面の面方位に一致している。

20

【0030】

このように、上述の半導体面発光素子は、閃亜鉛構造の第1化合物半導体（GaAs）からなる基本層6A内に複数の穴Hを周期的に形成し、穴H内に、閃亜鉛構造であって第2化合物半導体（AlGaAs）からなる埋め込み層6Bを成長させてなるフォトリソ結晶層6を備えている。もちろん、フォトリソ結晶を構成するため、第1化合物半導体と、第2化合物半導体の屈折率は異なる。

【0031】

図4は、穴の形状を示す図である。

【0032】

図4（A）に示す設計値としての穴Hは、長方形部HAと、長方形部HAの一辺から突出した凸部HBと、この一辺に対向する一辺から逆方向に突出した凸部HCとを備えている。長方形HAの4辺をそれぞれ含む穴Hの側面は、 $\{110\}$ 面から構成される。凸部HBの一辺からの突出距離（本例では 50 nm ）は、凸部HCの突出距離（本例では 20 nm ）よりも短い。本例における長方形の各辺の長さは全て 100 nm であって、この穴Hは正方形を構成している。

30

【0033】

図4（B）に示す実際の穴Hは、基本層の凸部を崩して、長方形部HAに対応した本体部HA1に、凸部HBに対応した凸部HB1と、凸部HCに対応した凸部HC1とが結合した形状を有している。換言すれば、埋め込み層6Bは、本体部HA1及び凸部HB1、HC1を有している。本体部HA1の対向する2側面は $[1-10]$ に垂直であって、 $(-1-10)$ 面、 (-110) 面を有しており、残りの面は、 $[110]$ に垂直な (-110) 面を有している。本体部HA1の $(1-10)$ 面と (-110) 面との間の距離は、本例では 120 nm である。凸部HB1の一辺 (110) からの突出距離S1は、凸部HC1の突出距離S2よりも短い。結晶成長においてS1の値の好適範囲は 15 nm 以上である。なお、S2はゼロであってもよい。なぜなら、S1の効果により、図13を用いて説明する $(-1-10)$ に起因する転位発生機構が半減するため、発生する転位が半減するからである。結晶成長においてS2の値の好適範囲は 0 nm 以上である。なお、穴Hの形状はS1とS2が上下逆であってもよく、凸部を凹部としてもよい。また、凸部および凹部は任意の $\{110\}$ の上に複数存在してもよい。この凹部を形成した場合においても、凸部の場合と同様に、転位発生機構が抑制とされるものと考えられる。

40

50

【0034】

上述の半導体面発光素子を形成して評価した。なお、説明において、電子顕微鏡は、走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた。断面SEM像は、断面を、アンモニア過水を用いてステインエッチしてから撮影した。

【0035】

図5～図7は、穴Hの形成された基本層6Aの電子顕微鏡写真（A）及び半導体面発光素子の最表面側に位置する半導体層（コンタクト層）の表面の光学顕微鏡写真（B）を示す図である。

【0036】

なお、図5の場合の本体部HA1（図4参照）の[110]方向長は100nmであり、[1-10]方向長は120nmであり、凸部HB1の[110]方向長は15nmであり、[1-10]方向長は40nmであり、凸部HC1の[110]方向長は15nmであり、[1-10]方向長は60nmである。

10

【0037】

なお、図6の場合の本体部HA1（図4参照）の[110]方向長は100nmであり、[1-10]方向長は120nmであり、凸部HB1の[110]方向長は30nmであり、[1-10]方向長は40nmであり、凸部HC1の[110]方向長は20nmであり、[1-10]方向長は60nmである。

【0038】

なお、図7の場合の本体部HA1（図4参照）の[110]方向長は100nmであり、[1-10]方向長は120nmであり、凸部HB1の[110]方向長は40nmであり、[1-10]方向長は50nmであり、凸部HC1の[110]方向長は30nmであり、[1-10]方向長は50nmである。

20

【0039】

なお、以下の説明では、FFは、Filling Factorを示す。Filling Factorは、フォトリソグラフィ結晶の大きさを測る指標で、2次元構造の単位周期の面積に対するフォトリソグラフィ結晶形状の占める面積（穴の面積）の割合である。以下の例では、2次元構造の単位周期あたりの長さa（格子定数）（[1-10]方向の長さ）は335nmである。

【0040】

図5はFFが12.5%の場合を示し、図6はFFが14.5%の場合を示し、図7はFFが16.7%の場合を示している。いずれの場合も、凸部が比較例（図11、図12、図14、図15）のものよりは良好なモフォロジーと結晶性が得られているが、FFが増加するに伴って、表面モフォロジーが更に改善している。したがって、FFは12.5%以上が好ましく、凸部HB1の[110]方向長は15nm以上、または、凸部HB1、凸部HC1によるFFの増分の合計が1%以上であることが好ましい。仮に、凹部を凸部に代えて設ける場合には、その[110]方向長は15nm以上、または、全ての凹部によるFFの増分の合計が1%以上であることが好ましい。なお、凸部又は凹部の突出量又は引っ込み量は、それぞれを除いた本体部の最大径を超えないことが好ましい。

30

【0041】

図8は、穴Hの形状の詳細構成を示す図である。

40

【0042】

穴H内の埋め込み層6Bは、本体部HA1と、凸部HB1と、凸部HC1を有している。XY平面内において、穴Hの輪郭に外接する多角形（10角形）を設定する。各辺は、（-110）面から左周りに、（-1-10）面、（h6k60）面、（h5k50）面、（h4k40）面、（h3k30）面、（-1-10）面、（1-10）面、（h1k10）面、（h2k20）面を有している。h1～h6、k1～k6は、面方位を表す適当なミラー指数の値である。本体部HA1の形状は四角形であり、

【0043】

埋め込み層6Bにおいて、（hk1）面からの離隔距離が20nm以下のXY平面内の対応辺の合計長さLが、外接する多角形の対応辺の長さの50%以上であって、この条件

50

を満たす辺の連続長が10nm以上の場合、埋め込み層6Bの側面は、(hkl)面を含むこととする。また、埋め込み層6Bの側面が複数の凸部を有する場合、これらの凸部間には凹部が形成されており、この場合には凹部における最深部を結んだ線分(群)を、埋め込み層6Bの側面と見なして、これに外接する多角形の対応辺(hkl)との関係が、上述の関係を満たす場合には、埋め込み層6Bのこの側面は、(hkl)面を含むこととする。

【0044】

すなわち、例えば、(hkl)面が(-110)面である場合、本体部HA1に外接する多角形の図の対角線との交点P1、P2間の長さが、外接多角形の(-110)面を含む辺の長さL1の50%以上であって、上記連続長の条件を満たす場合、本体部HA1は、(-110)面を含むこととする。

10

【0045】

例えば、(hkl)面が(1-10)面である場合、本体部HA1に外接する多角形の図の対角線との交点P3、P6間の長さが、外接多角形の(1-10)面を含む辺の長さL1の50%以上であって、上記連続長の条件を満たす場合、本体部HA1は、(1-10)面を含むこととする。

【0046】

同様に、例えば、(hkl)面が図の左側の(-1-10)面である場合、本体部HA1に外接する多角形の図の対角線との交点P3、P4間の長さが、外接多角形の左側の(-1-10)面を含む辺の長さL3の50%以上であって、上記連続長の条件を満たす場合、本体部HA1は、(-1-10)面を含むこととする。

20

【0047】

同様に、例えば、(hkl)面が図の右側の(-1-10)面である場合、本体部HA1に外接する多角形の図の対角線との交点P5、P1間の長さが、外接多角形の右側の(-1-10)面を含む辺の長さL4の50%以上であって、上記連続長の条件を満たす場合、本体部HA1は、(-1-10)面を含むこととする。また、L3とL4に対応する辺は(-1-10)面に含まれ、 $L3 + L4 < L2 \times 50\%$ である。

【0048】

なお、外接多角形の対向する{110}面間の距離、すなわち、(1-10)面と(-110)面間の距離はL2であり、L2は例えば120nmである。

30

【0049】

図9は、半導体面発光素子の断面図である。本例は、オリフラに平行な断面を示している。

【0050】

上述のように、半導体面発光素子は、半導体基板1上に順次形成された下部クラッド層2、下部光ガイド層3、活性層4、上部光ガイド層5、フォトニック結晶層6、上部クラッド層7、コンタクト層8を備えている。ここで、活性層4は、フォトニック結晶層6に対して光を供給するものであり、上下の半導体層4A、4Cと、これらに挟まれた中央の半導体層4Bとを有している。これらのエネルギーバンドギャップの関係は、通常のレーザと同じであり、4BのQW(量子井戸)層を4A、4Cのガイド層で挟んだ多重量子井戸構造となるように設定されている。フォトニック結晶層6は、光の共振によってレーザ光を生成するために用いられる。すなわち、この半導体面発光素子は、フォトニック結晶面発光レーザであるが、レーザ発振が起きなければ当該構造は、発光ダイオードとして用いることもできる。

40

【0051】

なお、各穴Hは、{110}側面に対して傾斜した傾斜面F3、F4を有していてもよく、F3、F4は曲面でもよい。

【0052】

図10は、第1比較例に係るウェハ上に形成された基本層6Aの平面図である。図1～図9において示した半導体面発光素子を実施例とすると、第1比較例の素子は、穴Hの形

50

状のみが、実施例と異なる。すなわち、穴Hの側面は、それぞれ、 $\{110\}$ 面のみによって構成されている。詳説すれば、それぞれの側面は、 (110) 、 $(1-10)$ 、 $(-1-10)$ 、 (-110) である。

【0053】

図11は、第1比較例に係る穴の形成された基本層6Aの電子顕微鏡写真を示す図である。

【0054】

図11(A)は、穴Hの平面写真を示しており、正方形の穴Hが示されている。図11(B)は、オリフラ平行方向に沿って切った基本層(埋め込み層形成前)の断面像を示しており、図11(C)は、オリフラ平行方向に沿って切った基本層(埋め込み層形成前)の断面像を示している。図11(D)は、オリフラ平行方向に沿って切った基本層(埋め込み層形成後)の断面像を示しており、図11(E)は、オリフラ平行方向に沿って切った基本層(埋め込み層形成後)の断面像を示している。

10

【0055】

埋め込み工程は、上部クラッド層を形成するまで続けられ、その後、コンタクト層を形成する。これらの埋め込み層及び上部クラッド層には、大きな転位は観察され(図11(D)、図11(E)参照)、結晶性が良好ではないことを示している。

【0056】

図12は、第1比較例に係る半導体面発光素子の最表面側に位置する半導体層(コンタクト層)の表面の光学顕微鏡写真を示す図である。

20

【0057】

コンタクト層の表面は荒れており、モフォロジーが悪く、数多くの凹凸が観察される。これは、内部において結晶性が劣っていることを間接的に示している。

【0058】

このように、穴の側面が4つの異なる $\{110\}$ 面によって形成されている場合、結晶性が低いことが判明した。この原理について考察する。

【0059】

図13は、結晶性劣化の概念を示す図である。

【0060】

第1比較例において、 (110) および $(-1-10)$ の側面に垂直に成長した埋め込み層には (110) および $(-1-10)$ Face t が出現し(A)、結晶成長の進行に伴い、これらの Face t が中央部で接触するとき、結晶に乱れが生じ(B)、最終的な結晶性が劣化することが判明した。すなわち、フォトリソ結晶層上に形成された半導体層の表面モフォロジーは荒れており、内部に多くの転位が発生している。また、穴の側面に (110) 、 $(-1-10)$ を含む場合、再成長埋め込み過程の初期に現れる Face t (一例として (113) 、 $(-1-13)$ 、すなわち (113) A面)上で複数の Face t の競合が生じ、部分的に不均一に再成長される。この領域が転位形成の核となるという機構も存在する。

30

【0061】

一方、本発明では、基本層6Aの主表面は (001) 面であって、埋め込み層6Bの側面(穴Hとの界面)は、 $\{110\}$ 面から突出した凸部HB1を有している。したがって、上述の (110) 、 $(-1-10)$ に起因する転位形成の機構が抑制されるため、結晶性が良好となると考えられる。

40

【0062】

また、穴Hの形状を円形とした場合についても、実験を行った。

【0063】

図14は、第2比較例に係る穴の形成された基本層6Aの電子顕微鏡写真を示す図である。第1比較例とは穴Hの形状のみが異なり、他は同一である。穴Hの開口径は、 110 nm である。

【0064】

50

図14 (A)は、穴Hの平面写真を示しており、円形の穴Hが示されている。図14 (B)は、オリフラ平行方向に沿って切った基本層（埋め込み層形成前）の断面像を示しており、図14 (C)は、オリフラ平行方向に沿って切った基本層（埋め込み層形成前）の断面像を示している。図14 (D)は、オリフラ平行方向に沿って切った基本層（埋め込み層形成後）の断面像を示しており、図14 (E)は、オリフラ平行方向に沿って切った基本層（埋め込み層形成後）の断面像を示している。

【0065】

埋め込み工程は、上部クラッド層を形成するまで続けられ、その後、コンタクト層を形成する。これらの埋め込み層及び上部クラッド層には、大きな転位は観察されない（図14 (D)、図14 (E) 参照）。

10

【0066】

しかしながら、表面のモフォロジーは、悪化している。

【0067】

図15は、第2比較例に係る半導体面発光素子の最表面側に位置する半導体層の表面の光学顕微鏡写真を示す図である。コンタクト層の表面は荒れており、モフォロジーが悪化し、数多くの凹凸が観察される。これは、図14の観察範囲には転位が見られないが、より広域で調べると転位が形成されており、表面モフォロジーの悪化を招いている。

【0068】

図16、様々な穴（埋め込み層6B）の形状について示す図である。図中の点線は、 $\{110\}$ 面を示している。また、図17における各図は、図16の各図をXY平面内において90度回転させたものであるが、結晶学的には、これらは同一である。

20

【0069】

図16又は図17の(A)は、上述の実施形態の形状から上側の凸部の位置を若干左側に変更し、下側の凸部を除いたものである。なお、上側の凸部は凹部であってもよい。

(B)は、(A)の1辺の一部が欠けて埋め込み層の側面が凹部（凹面）を有しているものである。(C)は、(A)の2辺の一部が欠けて埋め込み層の側面が凹部（凹面）を有すると共に、下側の辺にも凸部を有するものである。(D)は、(A)の本体部形状を台形としたものである。(E)は、(A)の本体部形状を平行四辺形にしたものである。(F)は、(A)の本体部の角部を滑らかにしたものである。(G)は、(A)の本体部形状を三角形としたものであり、(H)は、(A)の本体部形状を五角形としたものであり、これらの図では、上下が(A)とは反対となるように示されているが、結晶学的には反対であることには意味がない。(I)は、(A)の本体部形状を六角形としたものである。(J)は、実施形態にける対向する2辺から延びるそれぞれの凸部形状を大きくし、これらの凸部の形状を非対称としたものである。一方の凸部の平面形状は長方形である。(K)は、 (110) および $(-1-10)$ 面に1辺の長さが5nm以上の適当な側面(hk0)からなる1つ以上の凹凸形状で覆った四角形を示す。なお、(hk0)面は $\{100\}$ であることが望ましい。(L)は(K)の形状で一部凹凸形状に欠けを有する形状を表す。(M)は(K)の形状において片方の $\{110\}$ 面のみに凹凸形状を有する形状を表す。(N)は(K)の形状において側面が曲面である形状を表す。(O)は(K)において同じ $\{110\}$ 面を2つ以上含む形状の例を表す。なお、(K)～(O)において、一辺が (110) 、または $(-1-10)$ を含めば、穴Hの側面における凸部の頂点（埋め込み層6Bにおける凹部の最深部）の各点を結んだ包絡線の形状は、四角形でなくてもよい。

30

40

【0070】

これらの場合においても、図13を用いて述べた (110) 、 $(-1-10)$ に起因する転位形成の機構が抑制されるという理由で、上述の効果を奏するものと考えられる。

【0071】

以上、説明したように、上述の実施形態では、穴Hの側面は、 $\{110\}$ 面を有しており、埋め込み層6Bは、穴Hの側面との界面である少なくとも1つの $\{110\}$ 面から突出した凸部HB1を有している。この場合、フォトニック結晶層上に形成された半導体層

50

の表面モフォロジーは非常に良好であって、平坦性が高く、相対的に、内部で発生している転位量が減少していることが分かる。このように半導体層の結晶性が改善すると、温度や熱による耐性が高くなるため、寿命を増加させることができ、リーク電流や内部抵抗が低くなるため、発光効率を改善することが可能となる。すなわち、穴の形状の上述の実施形態のものとするすることで、半導体面発光素子の特性を改善することができる。

【0072】

なお、上述の穴の形状で(110)、(-1-10)を含む側面は、XY平面内において、主平面(001)の法線の回りに、回転(±15度以内)を許容しても同様の効果が得られるものと考えられる。

【0073】

なお、上述の第1化合物半導体はGaAsであり、前記第2化合物半導体はAlGaAsである。これらの閃亜鉛構造の化合物半導体を用いた場合、材料特性がよく知られているので、その形成が容易である。

【0074】

図18は、フォトリソニック結晶層の第1の製造方法について説明するための図である。

【0075】

N型(第1導電型とする)の半導体基板(GaAs)1上に、N型のクラッド層(AlGaAs)2、ガイド層(AlGaAs)3、多重量子井戸構造(InGaAs/AlGaAs)4、光ガイド層(GaAs/AaGaAs)又はスペーサ層(AlGaAs)5、フォトリソニック結晶層となる基本層(GaAs)6Aを、MOCVD(有機金属気相成長)法を用いて順次、エピタキシャル成長させる。

【0076】

エピタキシャル成長後のアライメントをとるため、PCVD(プラズマCVD)法により、SiN層AGを基本層6A上に形成しI(B)、次に、レジストRを、SiN層AG上に形成する(C)。更に、レジストRを露光・現像し(D)、レジストRをマスクとしてSiN層AGをエッチングし、SiN層AGを一部残留させて、アライメントマークを形成する(E)。残ったレジストは除去する(F)。

【0077】

次に、基本層6AにレジストR2を塗布し、レジストR2上に電子ビーム描画装置で2次元微細パターンを描画し、現像することでレジストR2上に2次元微細パターンを形成する(H)。その後、レジストR2をマスクとして、ドライエッチングにより100nm程度の深さを持つ2次元微細パターンを基本層6A上に転写し(穴Hを形成する)(I)、レジストを除去する(J)。穴Hの深さは、100nmである。

【0078】

その後、MOCVD法を用いて再成長を行う。

【0079】

再成長工程では、埋め込み層(AlGaAs)6Bが穴H内に成長し、続いて、P型のクラッド層(AlGaAs)7、P型のコンタクト層(GaAs)8が順次エピタキシャル成長する(K)。次に、P型コンタクト8上に正方形の孔Hを持つレジストR3を形成し(L)、レジストR3をパターニングして(M)、電極EをレジストR3の上から蒸着し(N)、リフトオフにより電極(Cr/Au)E2のみを残して、電極材を除去する(O)。そして、N型の半導体基板1の裏面を研磨し、N型の電極(AuGe/Au)E1を形成する(P)。

【0080】

図19は、フォトリソニック結晶層の第2の製造方法について説明するための図である。

【0081】

N型(第1導電型とする)の半導体基板(GaAs)1上に、N型のクラッド層(AlGaAs)2、ガイド層(AlGaAs)3、多重量子井戸構造(InGaAs/AlGaAs)4、光ガイド層(GaAs/AaGaAs)又はスペーサ層(AlGaAs)5、フォトリソニック結晶層となる基本層(GaAs)6Aを、MOCVD(有機金属気相成長

10

20

30

40

50

）法を用いて順次、エピタキシャル成長させる。

【0082】

次に、基本層6A上にレジストR2を塗布し（B）、電子ビーム描画装置で2次元微細パターンを描画し、現像することでレジスト上に2次元微細パターンを形成する（C）。このとき、使用するフォトマスクのアライメントマーク位置に（110）Facetで囲まれた1辺120nmの正方形を330nm間隔で配置し、領域全体の面積を100μm×100μmとする。後述するが、このパターンは再成長後の光学露光の位置合わせの基準として利用する。

【0083】

その後、ドライエッチングにより100nm程度の深さを持つ2次元微細パターンを基本層6A上に転写し（D）、レジストを除去する（E）。目印の位置もエッチングされるため、この位置にパターン（アライメントマーク）が形成される。このパターンは4つの{110}面で囲まれた側面を有するが、若干の回転（±10度以内）をさせてもよい。このパターンは、再成長によっても転位が形成されるため、再成長表面が荒れる。したがって、荒れた表面を再成長後の光学露光における位置合わせの基準として利用することが出来る。その後、MOCVD法を用いて再成長を行う。このように、埋め込み層の再成長を行う工程の前に、エッチングにより{110}面、又は{110}を前記主表面（001）の法線回りに±10度以内の回転角度で回転させた面を含むアライメントマークを、基本層6Aの形成される半導体基板の適当な箇所（発光素子形成予定領域の外側領域）に形成しておくことで、通常のアライメントマーク形成工程を省略することができる。

【0084】

再成長工程では、埋め込み層（AlGaAs）6Bが穴H内に成長し、続いて、P型のクラッド層（AlGaAs）7、P型のコンタクト層（GaAs）8が順次エピタキシャル成長する（F）。次に、P型コンタクト8上に正方形の孔Hを持つレジストR3を形成し（G）、レジストR3を光学露光によりパターンニングして（H）、電極EをレジストR3の上から蒸着し（I）、リフトオフにより電極（Cr/Au）E2のみを残して、電極材を除去する（J）。そして、N型の半導体基板1の裏面を研磨し、N型の電極（AuGe/Au）E1を形成する（K）。

【0085】

この方法によれば、上述の素子を形成する場合において、再成長前に{110}面で囲まれたパターンを形成しておくことで、これを再成長後の光学露光の位置合わせの基準位置として利用することができる。

【0086】

なお、穴Hの深さは、基本層6Aよりも浅くてもよく、若干深くてもよい。また、（001）ウェハはオフ基板であってもよい。

【0087】

なお、穴Hの作製方法として、実施の形態では電子ビーム露光法による作製法を説明したが、ナノインプリント、干渉露光、FIB、ステッパなどの光学露光といった、その他の微細加工技術を用いてもよい。

【符号の説明】

【0088】

6A・・・基本層、6B・・・埋め込み層、H・・・穴。

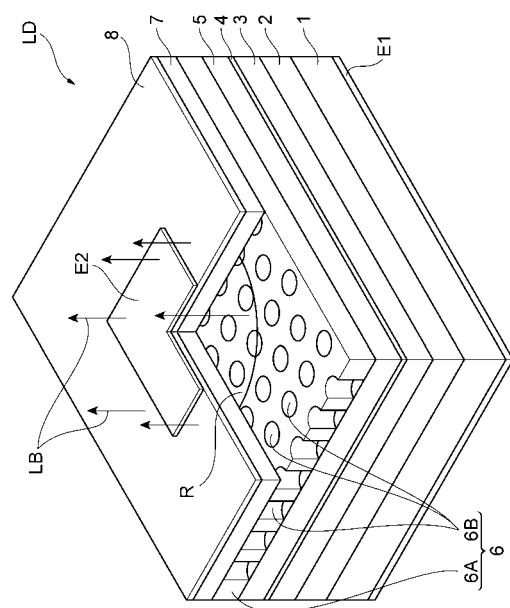
10

20

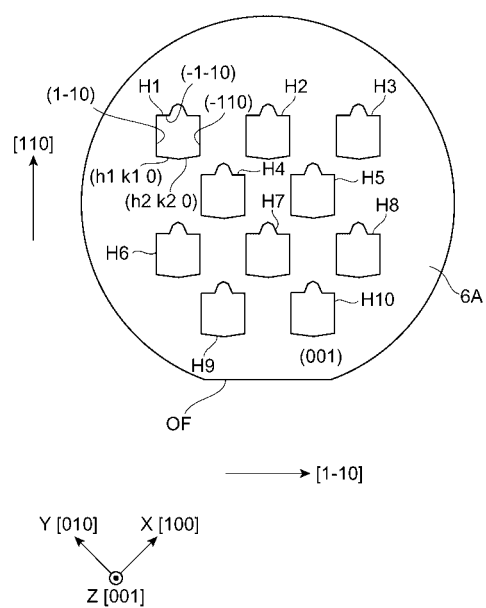
30

40

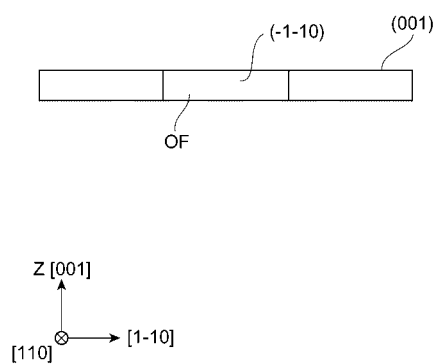
【図 1】



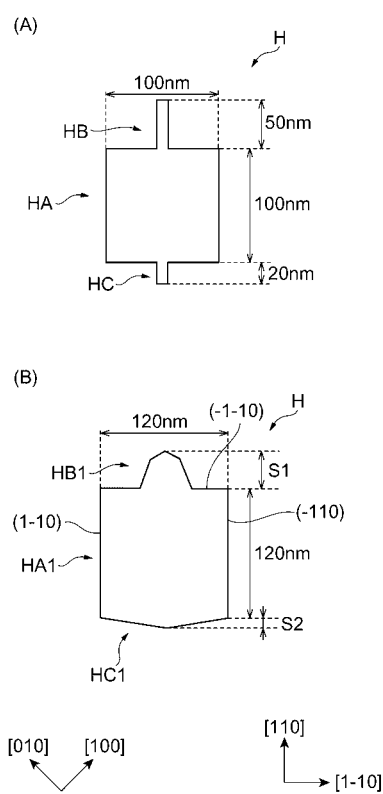
【図 2】



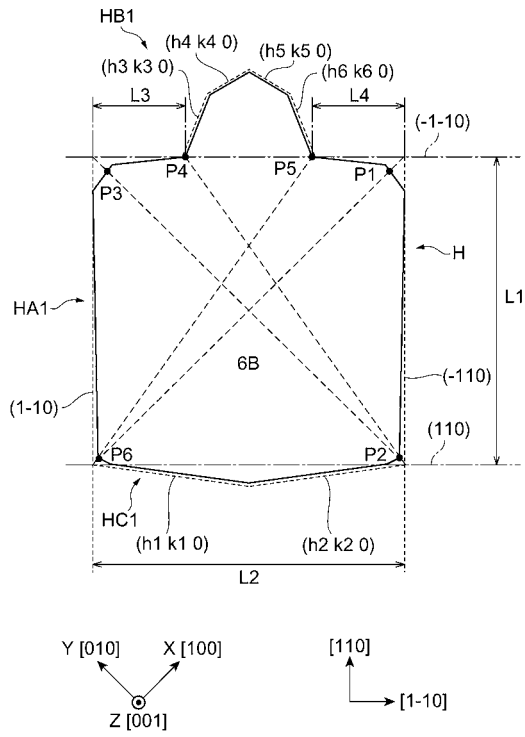
【図 3】



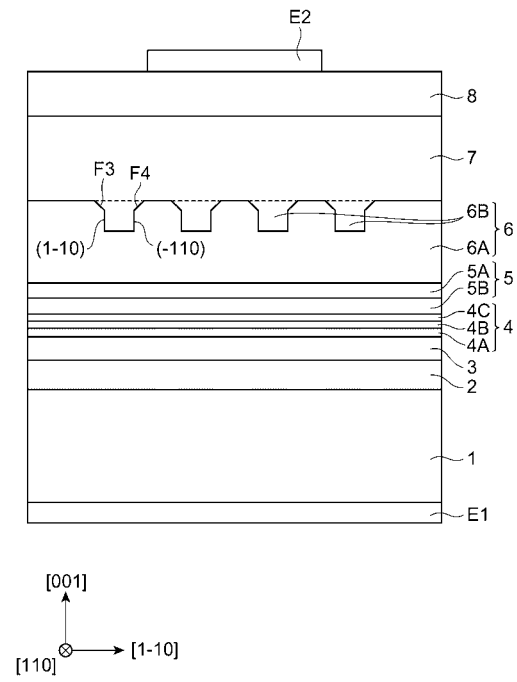
【図 4】



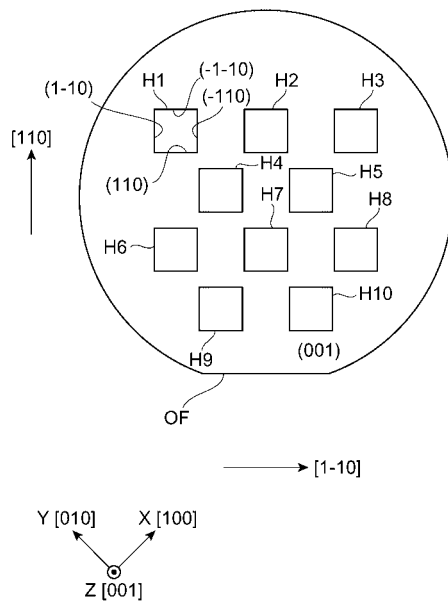
【図 8】



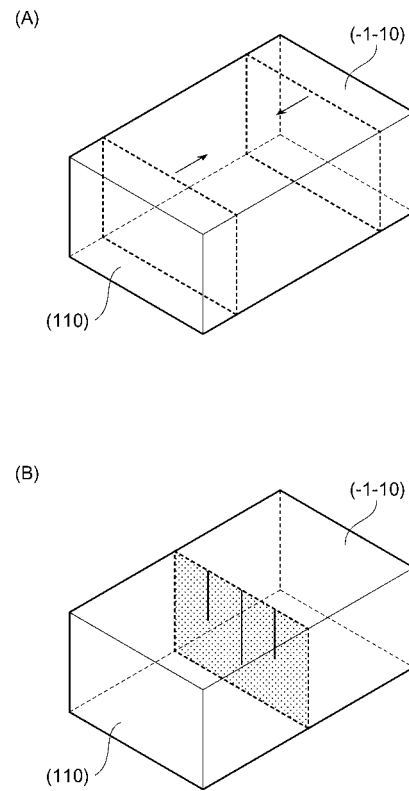
【図 9】



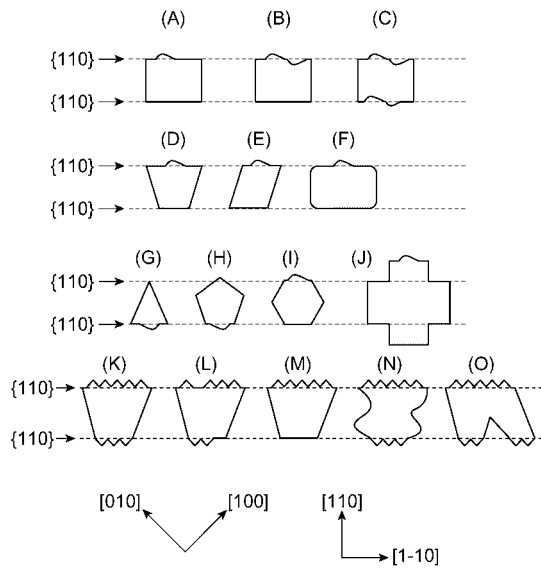
【図 10】



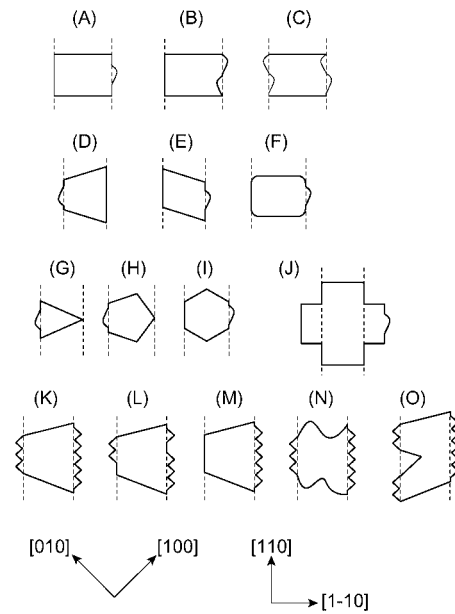
【図 13】



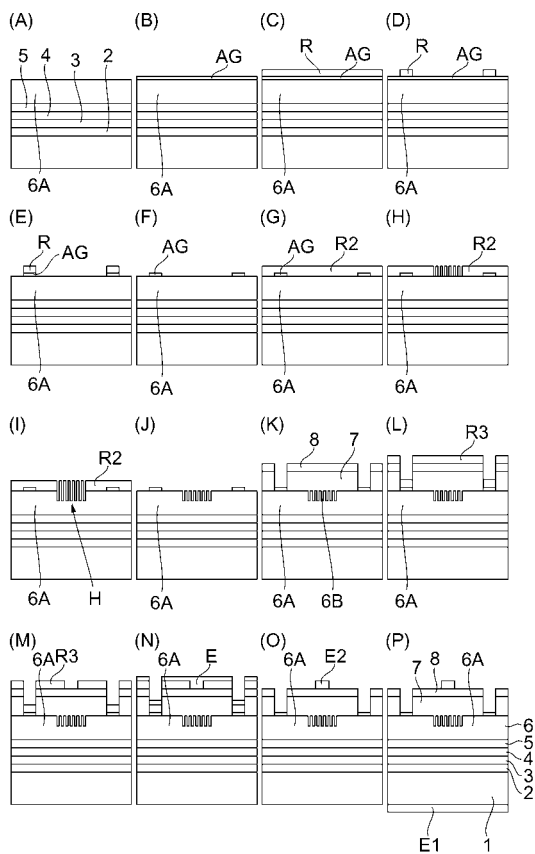
【図 16】



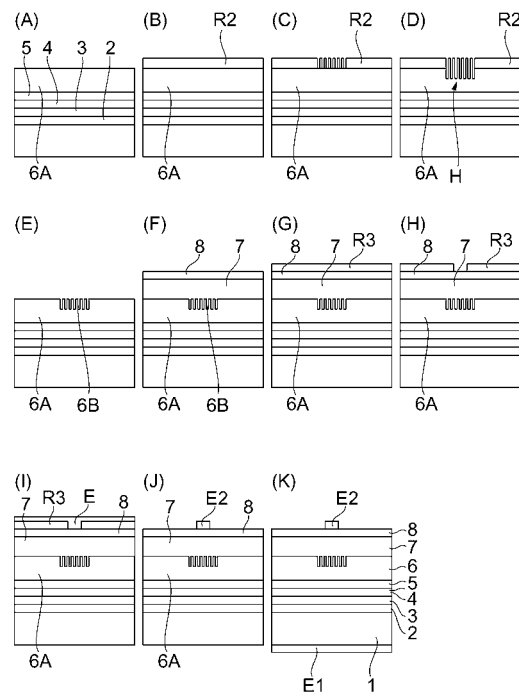
【図 17】



【図 18】

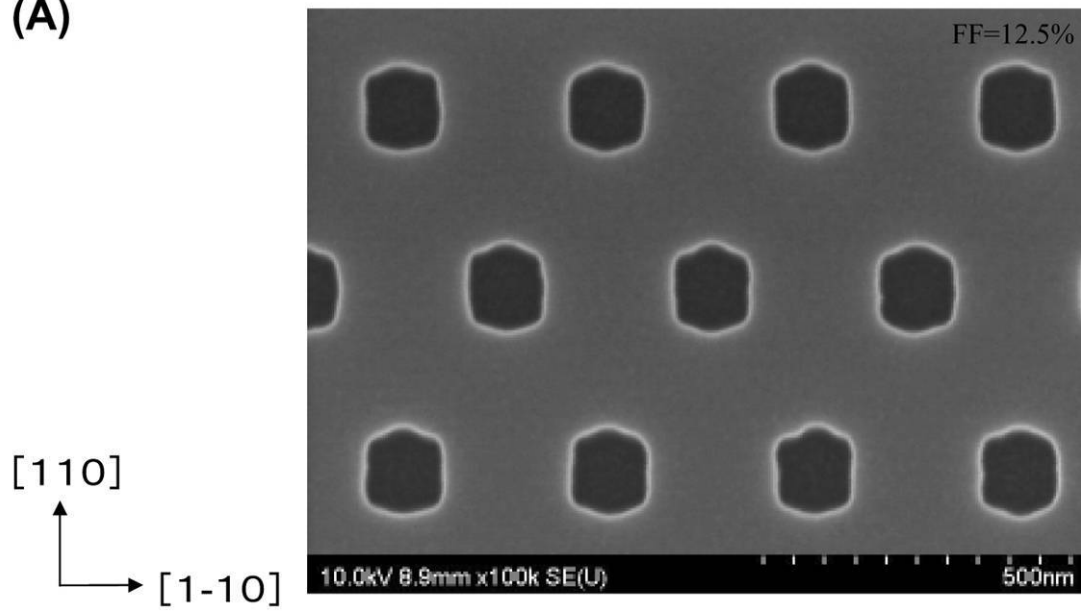


【図 19】

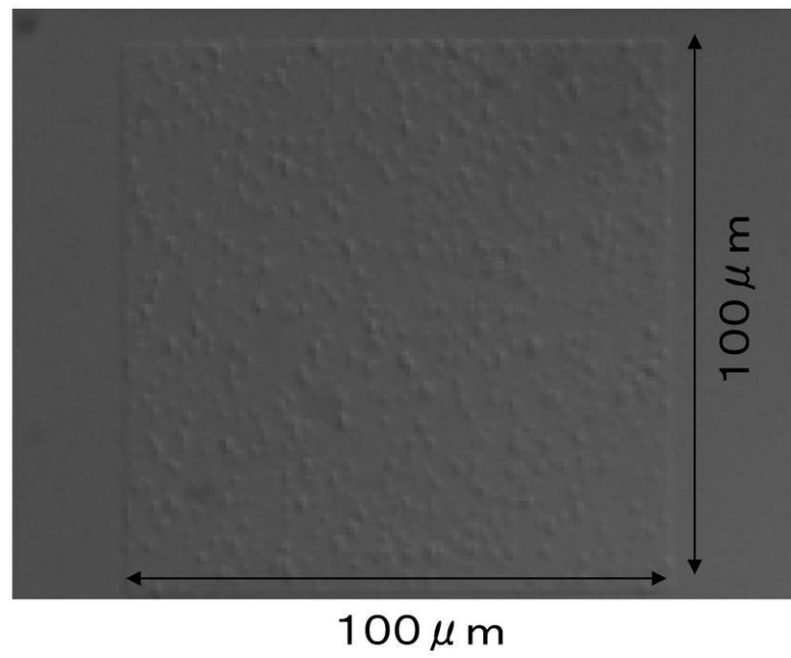


【図 5】

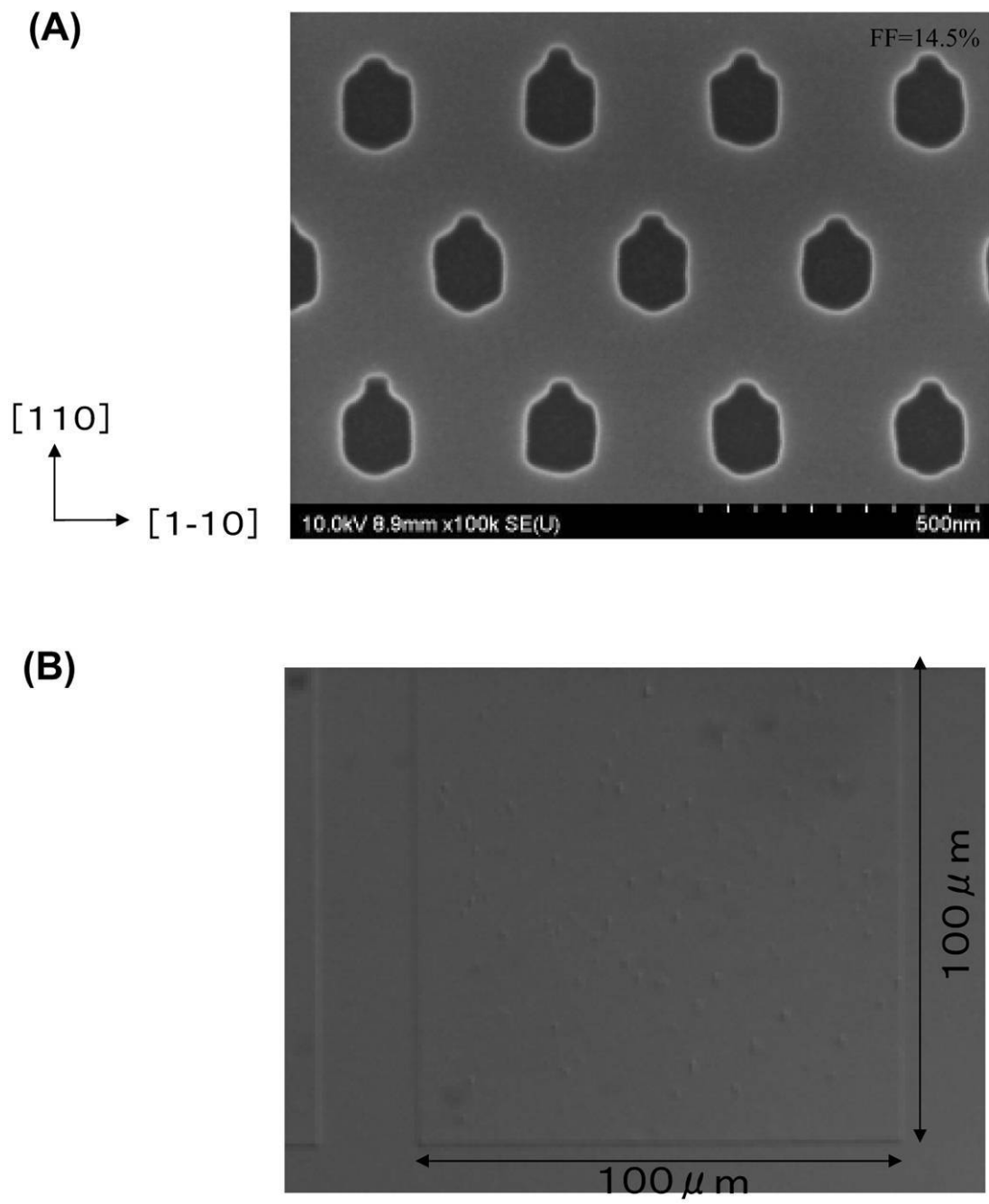
(A)



(B)

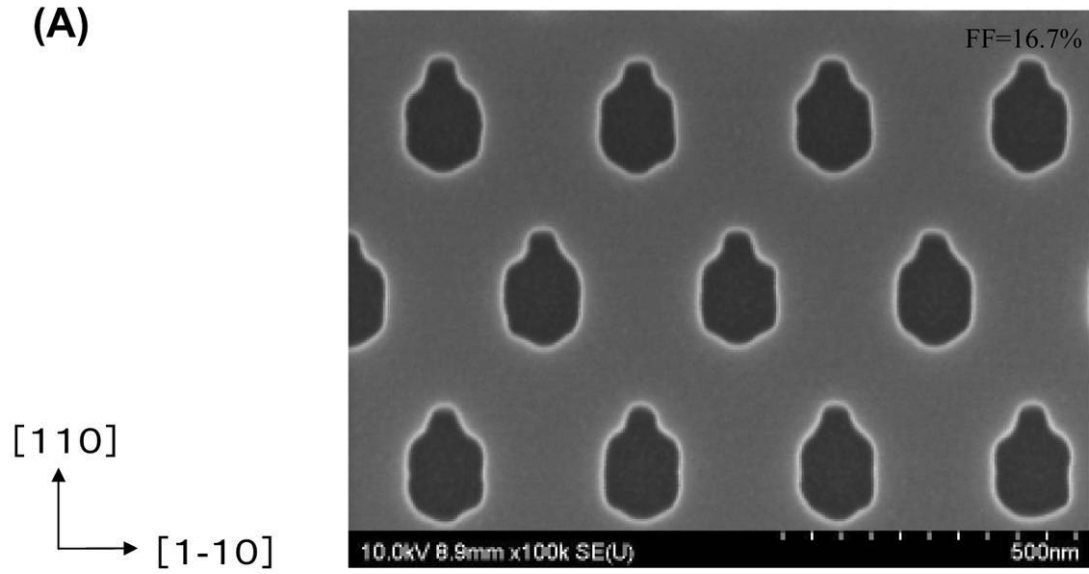


【図 6】

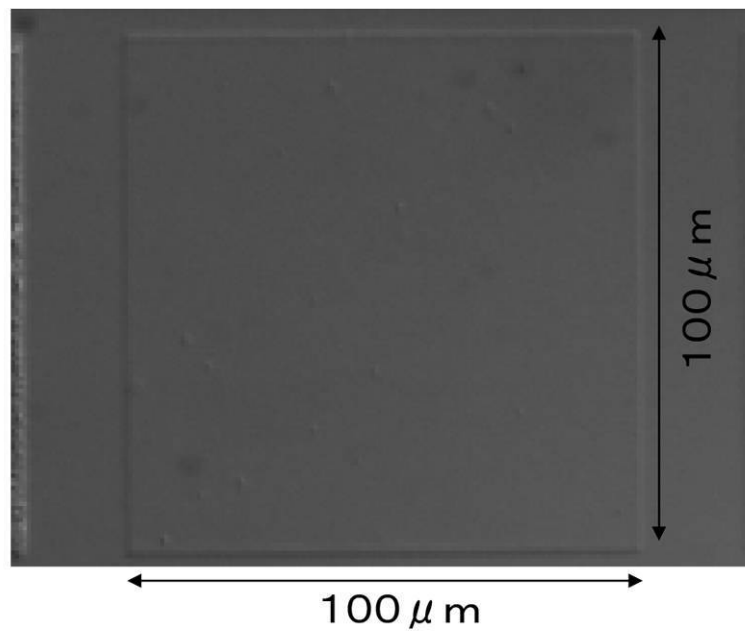


【図 7】

(A)

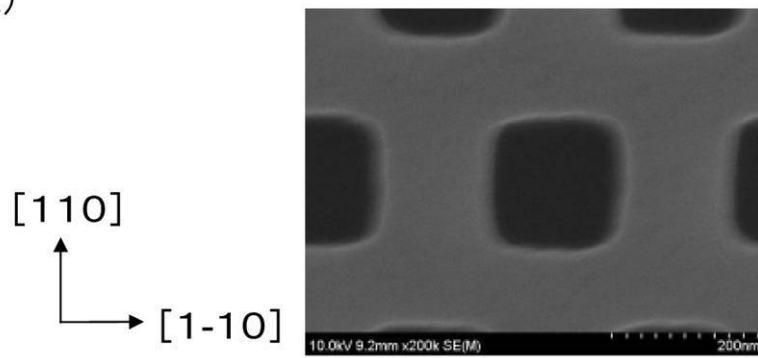


(B)

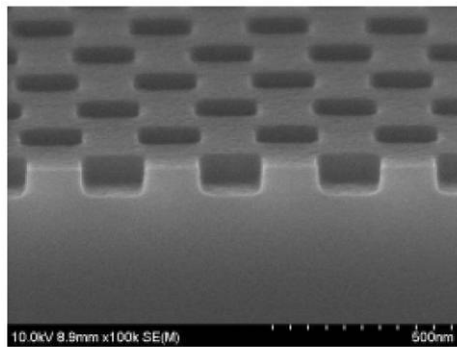


【図 11】

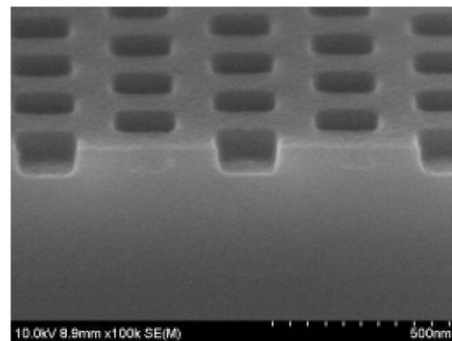
(A)



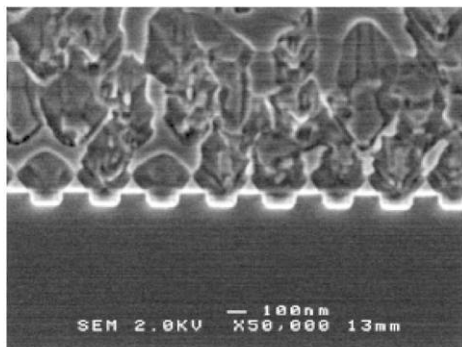
(B) オリフラ平行方向



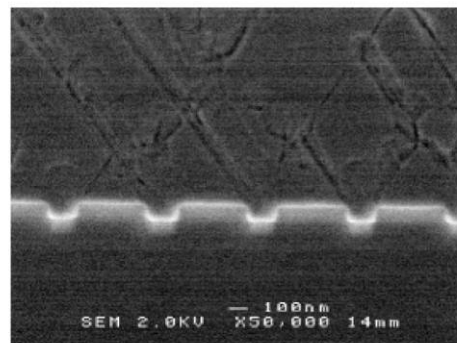
(C) オリフラ垂直方向



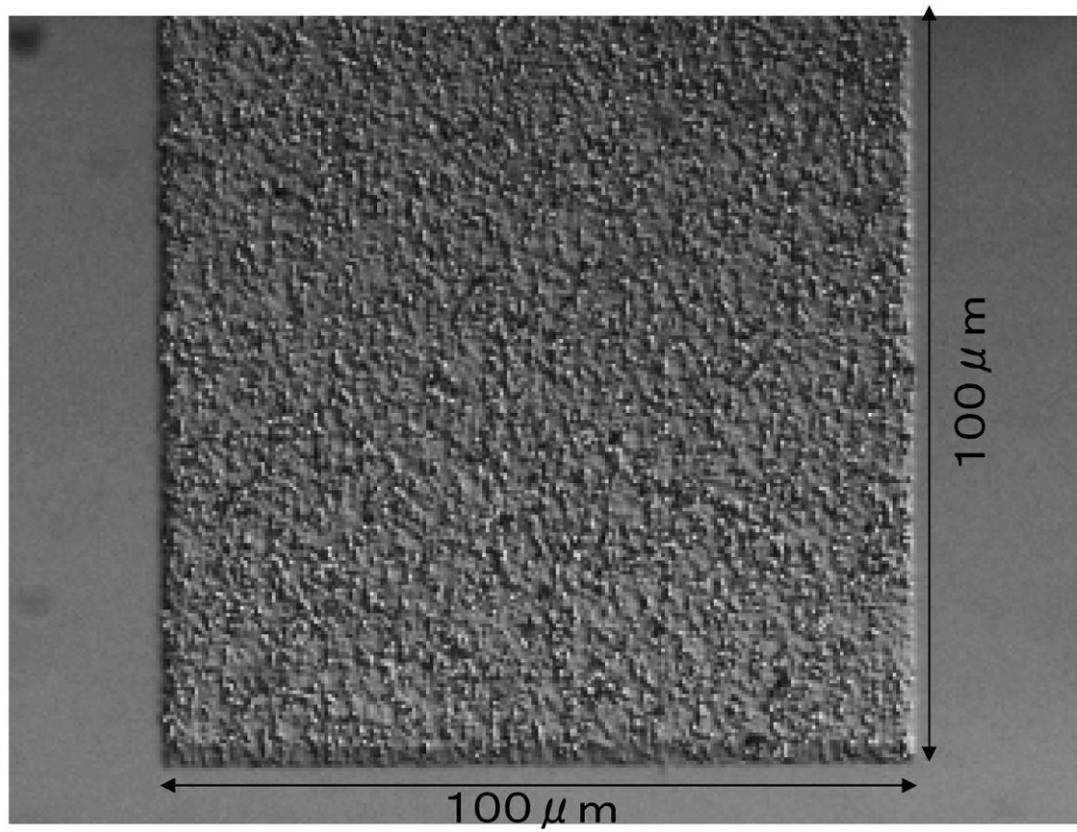
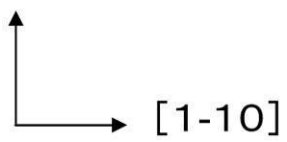
(D)



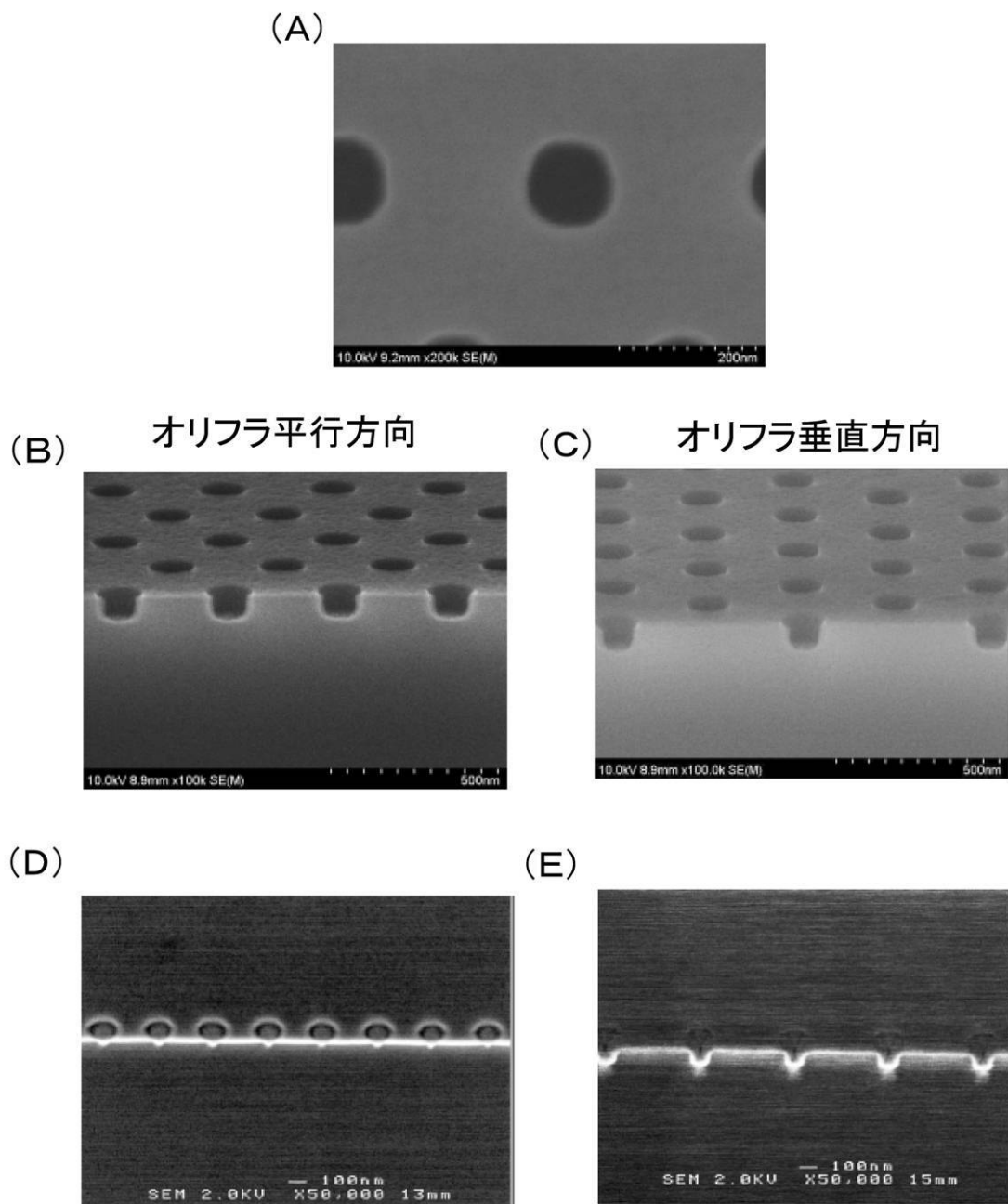
(E)



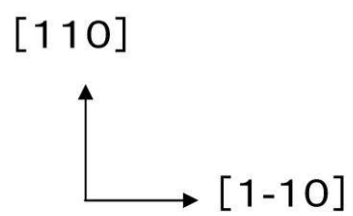
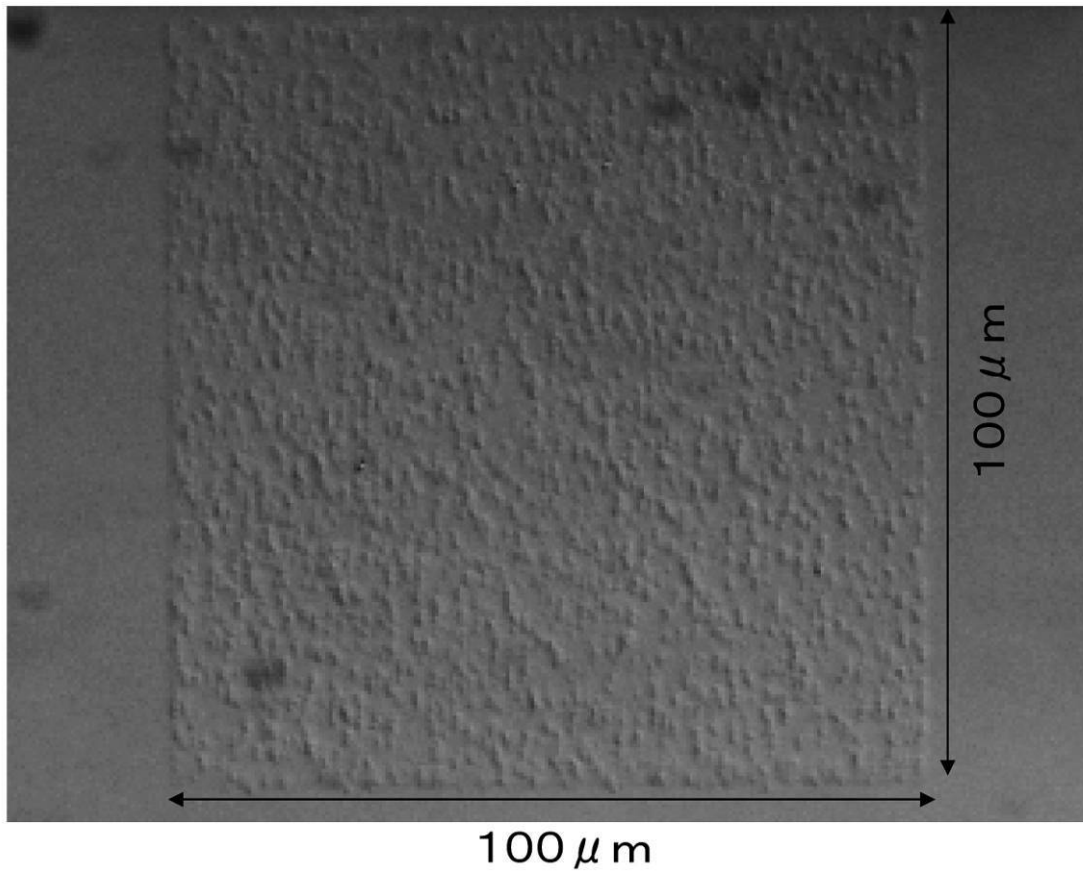
【図 12】

 $[110]$ 

【図 1 4】



【図 15】



フロントページの続き

- (72)発明者 古田 慎一
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 渡邊 明佳
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 杉山 貴浩
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 柴田 公督
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 黒坂 剛孝
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 野田 進
京都府京都市西京区京都大学桂 国立大学法人京都大学大学院工学研究科内

審査官 杉山 輝和

- (56)参考文献 特開 2 0 1 0 - 1 1 4 3 8 4 (J P , A)
国際公開第 2 0 0 7 / 0 7 2 8 0 7 (W O , A 1)
特開 2 0 0 9 - 2 0 6 1 5 7 (J P , A)
特開 2 0 0 6 - 1 5 6 9 4 4 (J P , A)
特開 2 0 0 6 - 2 6 1 3 1 6 (J P , A)
特開平 4 - 1 3 7 5 2 1 (J P , A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H 0 1 S 5 / 0 0 - 5 / 5 0
H 0 1 L 3 3 / 0 0 - 3 3 / 6 4