

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5547076号  
(P5547076)

(45) 発行日 平成26年7月9日 (2014.7.9)

(24) 登録日 平成26年5月23日 (2014.5.23)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 L 33/06 (2010.01)	HO 1 L 33/00 1 1 2
HO 1 L 33/32 (2010.01)	HO 1 L 33/00 1 8 6
HO 1 L 33/16 (2010.01)	HO 1 L 33/00 1 6 0
HO 1 L 33/08 (2010.01)	HO 1 L 33/00 1 2 0

請求項の数 17 (全 26 頁)

(21) 出願番号	特願2010-526554 (P2010-526554)	(73) 特許権者	502350504
(86) (22) 出願日	平成21年8月27日 (2009.8.27)		学校法人上智学院
(86) 国際出願番号	PCT/JP2009/004173		東京都千代田区紀尾井町7番1号
(87) 国際公開番号	W02010/023921	(74) 代理人	100110928
(87) 国際公開日	平成22年3月4日 (2010.3.4)		弁理士 速水 進治
審査請求日	平成24年8月23日 (2012.8.23)	(72) 発明者	岸野 克巳
(31) 優先権主張番号	特願2008-224129 (P2008-224129)		東京都千代田区紀尾井町7番1号 学校法
(32) 優先日	平成20年9月1日 (2008.9.1)		人上智学院 上智大学理工学部 機能創造
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		理工学科内
(31) 優先権主張番号	特願2008-224131 (P2008-224131)	(72) 発明者	菊池 昭彦
(32) 優先日	平成20年9月1日 (2008.9.1)		東京都千代田区紀尾井町7番1号 学校法
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		人上智学院 上智大学理工学部 機能創造
			理工学科内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体光素子アレイおよびその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

複数の凹部が形成された主面を有する半導体基板と、  
前記半導体基板の当該主面上に形成され、かつ前記複数の凹部の直上にそれぞれ設けられた複数の開口部を有するマスクパターンと、  
前記複数の凹部から前記複数の開口部を介して前記マスクパターンの上方に向けて成長したIII族窒化物半導体からなる複数の微細柱状結晶と、  
前記複数の微細柱状結晶上にそれぞれ成長した活性層と、  
前記各活性層を被覆する半導体層と、  
を備え、

前記マスクパターンには、前記複数の開口部の配置密度が高い領域と、前記複数の開口部の配置密度が低い領域とがあり、

前記複数の開口部の配置密度が高い前記領域にある前記複数の微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長は、前記複数の開口部の配置密度が低い前記領域にある前記複数の微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長よりも長波長である半導体光素子アレイ。

【請求項 2】

複数の凹部が形成された主面を有する半導体基板と、  
前記半導体基板の当該主面上に形成され、かつ前記複数の凹部の直上にそれぞれ設けられた複数の開口部を有するマスクパターンと、

前記複数の凹部から前記複数の開口部を介して前記マスクパターンの上方向けて成長したIII族窒化物半導体からなる複数の微細柱状結晶と、

前記複数の微細柱状結晶上にそれぞれ成長した活性層と、

前記各活性層を被覆する半導体層と、

を備え、

径が異なる前記複数の前記微細柱状結晶を含み、

径が小さな前記微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長は、径が大きな前記微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長よりも短波長であり、

前記活性層はInGa<sub>N</sub>膜を含み、

前記微細柱状結晶は、ウルツ鉱型結晶構造を有し、先端部にファセット構造を有し、

前記ファセット構造は、直上方を向いた第1の面と、斜め上方を向いた第2の面を有し、

前記第1の面上に形成された前記InGa<sub>N</sub>膜のIn組成比は、前記第2の面上に形成された前記InGa<sub>N</sub>膜のIn組成比率よりも高い半導体光素子アレイ。

【請求項3】

請求項1に記載の半導体光素子アレイであって、

異なる径の前記微細柱状結晶を含み、

径が小さな前記微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長は、径が大きな前記微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長よりも短波長である半導体光素子アレイ。

【請求項4】

請求項1から3のうちのいずれか1項に記載の半導体光素子アレイであって、

前記各微細柱状結晶の径は、10nm以上、1000nm以下である半導体光素子アレイ。

【請求項5】

請求項4に記載の半導体光素子アレイであって、

前記微細柱状結晶の先端部には、ファセット面が形成されており、

前記活性層は、このファセット面を被覆する半導体光素子アレイ。

【請求項6】

請求項1から5のうちのいずれか1項に記載の半導体光素子アレイであって、

前記活性層は、前記半導体層により完全に被覆されている、半導体光素子アレイ。

【請求項7】

請求項1から6のうちのいずれか1項に記載の半導体光素子アレイであって、

前記微細柱状結晶の導電型は、第1導電型であり、

前記半導体層は、前記第1導電型とは逆の第2導電型のIII族窒化物半導体層を含む、半導体光素子アレイ。

【請求項8】

請求項1から7のうちのいずれか1項に記載の半導体光素子アレイであって、

前記複数の微細柱状結晶は、発光波長の異なる複数の柱状結晶群からなる、半導体光素子アレイ。

【請求項9】

請求項8に記載の半導体光素子アレイであって、

前記複数の柱状結晶群は、少なくとも、3原色の波長の光をそれぞれ放出する3つの柱状結晶群を含む、半導体光素子アレイ。

【請求項10】

請求項1から9のうちのいずれか1項に記載の半導体光素子アレイであって、

前記活性層は、量子井戸層と、前記量子井戸層よりも大きなバンドギャップを有し前記量子井戸層を挟み込む障壁層とを含む量子井戸構造を有する、半導体光素子アレイ。

【請求項11】

10

20

30

40

50

請求項 1 から 1 0 のうちのいずれか 1 項に記載の半導体光素子アレイであって、  
前記マスクパターンの構成材料は、チタン (Ti)、タンタル (Ta)、鉄 (Fe)、  
ニッケル (Ni)、白金 (Pt)、金 (Au)、コバルト (Co) およびタングステン (W)、  
モリブデン (Mo) からなる群より選択された 1 種または 2 種以上の金属である、  
半導体光素子アレイ。

【請求項 1 2】

請求項 1 から 1 1 のうちのいずれか 1 項に記載の半導体光素子アレイであって、  
前記 III 族窒化物半導体は窒化ガリウムを含む、半導体光素子アレイ。

【請求項 1 3】

請求項 1 から 1 2 のうちのいずれか 1 項に記載の半導体光素子アレイであって、  
前記 III 族窒化物半導体は  $Al_x Ga_y In_{1-x-y} N$  ( $0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$ 、  
かつ  $0 < x + y < 1$ ) を含む、半導体光素子アレイ。

【請求項 1 4】

半導体基板の上に複数の開口部を有するマスクパターンを形成する工程と、  
前記マスクパターンをエッチングマスクとして前記半導体基板をエッチングすることにより  
前記半導体基板の主面に複数の凹部を形成する工程と、  
前記各凹部から前記各開口部を介して前記マスクパターンの上方に向けて複数の微細柱  
状結晶を成長させる工程と、  
前記微細柱状結晶上に活性層を成長させる工程と、  
前記活性層を被覆する半導体層を形成する工程と、  
を備え、

前記マスクパターンには、前記複数の開口部の配置密度が高い領域と、前記複数の開口  
部の配置密度が低い領域とがあり、

前記複数の開口部の配置密度が高い前記領域にある前記複数の微細柱状結晶上の前記活  
性層から放出される発光のピーク波長は、前記複数の開口部の配置密度が低い前記領域に  
ある前記複数の微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長よりも長波  
長である半導体光素子アレイの製造方法。

【請求項 1 5】

半導体基板の上に複数の開口部を有するマスクパターンを形成する工程と、  
前記マスクパターンをエッチングマスクとして前記半導体基板をエッチングすることにより  
前記半導体基板の主面に複数の凹部を形成する工程と、  
前記各凹部から前記各開口部を介して前記マスクパターンの上方に向けて複数の微細柱  
状結晶を成長させる工程と、  
前記微細柱状結晶上に  $InGaN$  膜を含む活性層を成長させる工程と、  
前記活性層を被覆する半導体層を形成する工程と、  
を備え、

前記マスクパターンを形成する前記工程において、前記マスクパターンは径が異なる前  
記複数の前記開口部を有し、

前記微細柱状結晶を成長させる前記工程において、

前記微細柱状結晶はウルツ鉱型結晶構造を有し、先端部にファセット構造を有し、

前記ファセット構造は、直上方を向いた第 1 の面と、斜め上方を向いた第 2 の面を有  
するよう前記微細柱状結晶を成長させ、

前記活性層を成長させる前記工程において、

前記第 1 の面上に形成された前記  $InGaN$  膜の  $In$  組成比が、前記第 2 の面上に形  
成された前記  $InGaN$  膜の  $In$  組成比率よりも高くなるよう前記活性層を成長させ、

径が小さな前記微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長は、径が  
大きな前記微細柱状結晶上の前記活性層から放出される発光のピーク波長よりも短波長で  
ある半導体光素子アレイの製造方法。

【請求項 1 6】

請求項 1 4 または 1 5 に記載の半導体光素子アレイの製造方法であって、

前記マスクパターンの上方向に向けて複数の微細柱状結晶を成長させる前記工程と同時に、前記微細柱状結晶を前記半導体基板の面内方向に沿った横方向へ成長させる工程をさらに備える半導体光素子アレイの製造方法。

【請求項 17】

請求項 14 から 16 のうちいずれか 1 項に記載の半導体光素子アレイの製造方法であって、

前記微細柱状結晶の導電型は、第 1 導電型であり、

前記半導体層は、前記第 1 導電型とは逆の第 2 導電型の III 族窒化物半導体層を含む半導体光素子アレイの製造方法。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は、半導体光素子アレイおよびその製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、窒化ガリウム (GaN) などの III 族窒化物半導体は、高品質の短波長発光を出力し得る発光ダイオードやレーザダイオードなどの半導体発光素子を実現できる半導体材料として注目されている。半導体発光素子は、有機金属化学気相堆積 (MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法や分子線エピタキシ (MBE: Molecular Beam Epitaxy) 法などの結晶成長技術を用いて、基板上に III 族窒化物半導体からなる積層構造を形成することで作製される。

20

【0003】

MOCVD や MBE などの公知の結晶成長技術は、積層構造を生成する際にその積層方向に良好な制御性を有している。基板の面内方向に沿った構造を形成するためには、結晶加工技術を使用して積層構造を加工する必要がある。結晶加工技術は、大別して、トップダウン型とボトムアップ型とがある。トップダウン型は、結晶成長後に結晶を加工して構造を形成する技術であり、これに対してボトムアップ型は、結晶成長前に下地基板を予め加工しておき、この下地基板上に結晶を成長させることで結晶成長と同時に構造を形成する技術である。トップダウン型のプロセスには、加工により結晶がダメージを受けやすく、特に、微細構造を形成したときにその微細構造の表面積が大きくなるという問題がある。一方、ボトムアップ型のプロセスでは、微細構造と良好な結晶品質とが共に得られやすい。

30

【0004】

特許文献 1 (特開 2008 - 108924 号公報) には、ボトムアップ型のプロセスを用いて、基板上にナノメータスケールの微細柱状結晶 (ナノコラム) を形成する方法が開示されている。この方法は、スピネル基板上に多数の島状の Fe 粒を形成し、各 Fe 粒から基板の上方向に GaN ナノコラムを成長させるというものである。ナノコラムの形成方法に関する先行技術文献は、特許文献 1 の他に、たとえば、非特許文献 1 (M. Yoshizawa et al., Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, No.4B (1997) pp.L459-L462) や非特許文献 2 (H. Sekiguchi et al., Journal of Crystal Growth, 300 (2007) pp.259-262) が挙げられる。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】特開 2008 - 108924 号公報

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献 1】M. Yoshizawa, A. Kikuchi, M. Mori, N. Fujita and K. Kishino, "Growth of Self-Organized GaN Nanostructures on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) by RF-Radical Source Molecular Beam Epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, No.4B (1997) pp.L459-L462.

50

【非特許文献2】H. Sekiguchi, T. Nakazato, A. Kikuchi and K. Kishino, "Structural and optical properties of GaN nanocolumns grown on (0001) sapphire substrates by rf-plasma-assisted molecular-beam epitaxy", Journal of Crystal Growth, 300 (2007) pp.259-262.

【発明の概要】

【0007】

特許文献1に開示されている方法で形成されたGaNナノコラムの各々は、n型層、発光層およびp型層が積層された発光構造を有している。これらGaNナノコラムの集合体により半導体発光素子が構成される。

【0008】

しかしながら、各GaNナノコラムは、基板上の島状のFe粒を核として形成されるので、GaNナノコラムの位置および形状にバラツキが生じやすく、GaNナノコラムを規則的に配列させることが難しい。このようなバラツキは、半導体発光素子の特性のバラツキを生じさせ得る。たとえば、GaNナノコラムの発光波長にバラツキが生じて所望の発光色が得られないという問題がある。

【0009】

上記に鑑みて本発明は、基板上に形成された微細柱状結晶の位置および形状を高精度に制御して微細柱状結晶の発光波長あるいは光吸収波長を制御し得る構造を有する半導体光素子アレイおよびその製造方法を提供するものである。

【0010】

本発明者らは、III族窒化物半導体からなるナノメータオーダーの微細柱状結晶（「ナノコラム」、「ナノロッド」あるいは「ナノピラー」と呼ばれる。）の位置制御および形状制御に関し、複数の開口部を有するマスクパターンを基板上に形成した後に、これら開口部から微細柱状結晶を選択的に成長させる工程に着目した。本発明者らは、かかる工程を鋭意研究して微細柱状結晶の発光波長あるいは光吸収波長を制御できることを見出し、本発明を完成するに至った。

【0011】

本発明によれば、複数の凹部が形成された主面を有する半導体基板と、前記半導体基板の当該主面上に形成され、かつ前記複数の凹部の直上にそれぞれ設けられた複数の開口部を有するマスクパターンと、前記複数の凹部から前記複数の開口部を介して前記マスクパターンの上方に向けて成長したIII族窒化物半導体からなる複数の微細柱状結晶と、前記複数の微細柱状結晶上にそれぞれ成長した活性層または光吸収層と、前記各活性層または光吸収層を被覆する半導体層と、を備える半導体光素子アレイが提供される。

【0012】

本発明の半導体光素子アレイは、半導体基板の凹部からマスクパターンの開口部を介してマスクパターンの上方に向けて成長したIII族窒化物半導体からなる複数の微細柱状結晶を備えている。このような構成とすることで、微細柱状結晶の径を制御することができ、所望の発光波長あるいは吸収波長の半導体光素子アレイを得ることができる。

特に、発光波長のピーク波長は、前記各微細柱状結晶の径が大きいほど長波長側にシフトし、前記各微細柱状結晶の径が小さいほど短波長側にシフトするように定めることができる。

ここで、微細柱状結晶は、径が10nm以上、1000nm以下であることが好ましい。

【0013】

また、本発明によれば、半導体基板上に複数の開口部を有するマスクパターンを形成する工程と、前記マスクパターンをエッチングマスクとして前記半導体基板をエッチングすることにより前記半導体基板の主面に複数の凹部を形成する工程と、各凹部から各開口部を介して前記マスクパターンの上方に向けて複数の微細柱状結晶を成長させる工程と、前記微細柱状結晶上に活性層または光吸収層を成長させる工程と、前記活性層または光吸収層を被覆する半導体層を形成する工程と、を含む半導体光素子アレイの製造方法も提供で

10

20

30

40

50

きる。

【 0 0 1 4 】

本発明によれば、半導体基板上に形成された微細柱状結晶の位置を、マスクパターンの開口部の位置を調整することで制御することができる。また、各開口部の直下の凹部の径を調整することで微細柱状結晶の径を制御し、これにより、活性層から放出される光のピーク波長、あるいは光吸収層で吸収される光の波長を所望の波長に定めることが可能である。したがって、基板上に形成された微細柱状結晶の位置および形状を高精度に制御して微細柱状結晶の発光波長、あるいは光の吸収波長を制御し得る構造を持つ半導体光素子アレイおよびその製造方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

10

【 0 0 1 5 】

上述した目的、およびその他の目的、特徴および利点は、以下に述べる好適な実施の形態、およびそれに付随する以下の図面によってさらに明らかになる。

【 0 0 1 6 】

【図 1】(A) ~ (D) は、本発明に係る一実施形態の半導体素子の製造工程を概略的に示す断面図である。

【図 2】マスクパターンに形成される開口部のパターンの一例を示す図である。

【図 3】ナノコラムのパターンの一例を示す図である。

【図 4】(A), (B) は、微細柱状結晶の先端部の中心軸に沿った断面形状を概略的に示す図である。

20

【図 5】テンプレート基板に形成された凹部の径とナノコラムの発光波長との間の関係を示すグラフである。

【図 6】PL 発光波長と光強度との間の関係を示すグラフである。

【図 7】ナノコラム径 (Nanocolumn Size) と検出されたピーク波長 (Peak Wavelength) との関係を表すグラフである。

【図 8】FIB 法を用いてテンプレート基板に凹部を形成した場合のドーズ量 (Doze) と凹部の深さ (Nanohole depth) との関係を示すグラフである。

【図 9】ドーズ量 (Doze) と凹部の径 (Nanohole size) との関係を示し、ドーズ量 (Doze) とナノコラムの径 (Nanocolumn size) との関係を示すグラフである。

【図 10】正方格子状に規則的に配列されたナノコラムの走査型電子顕微鏡像を示す図である。

30

【図 11】正方格子状に規則的に配列されたナノコラムの走査型電子顕微鏡像を示す図である。

【図 12】ナノコラムから放出された CL (カソードルミネッセンス) 光のスペクトルの測定結果を示すグラフである。

【図 13】(A) は、ナノコラムの上面視からの SEM 像を示し、(B), (C) は、それぞれ異なる波長の CL 像 (カソードルミネッセンス像) の上面視図である。

【図 14】(A) は、ナノコラムを横方向から撮像した SEM 像を示し、(B), (C), (D) は、それぞれ異なる波長の断面 CL 像を示す図である。

【図 15】(A) は、図 12 と同じ CL スペクトルを示すグラフであり、(B) は、ナノコラムの先端部の構成を模式的に示す図である。

40

【図 16】ナノコラムの径とナノコラムの表面積との関係を示し、ナノコラムの径と発光ピーク波長との関係を示すグラフである。

【図 17】ナノコラムの PL 発光波長に関する光強度分布を示すグラフである。

【図 18】ナノコラムの先端部の高さで発光ピーク波長との関係を示すグラフである。

【図 19】(A) ~ (F) は、三角格子状に規則的に配列されたナノコラム群の上面視での SEM 像を示す図である。

【図 20】図 19 (A) ~ (F) のナノコラム群の PL 発光波長に関する光強度分布の測定結果を示すグラフである。

【図 21】コラム周期と図 20 の光強度分布の発光ピーク波長との関係を示すグラフであ

50

る。

【図 2 2】三角格子状に規則的に配列されたナノコラム群の上面視での S E M 像を示す図である。

【図 2 3】( A ) , ( B ) は、それぞれ、第 2 の実施形態の半導体発光素子の構成の一部を概略的に示す図である。

【図 2 4】本発明に係る第 3 の実施形態の半導体発光素子の構成の一部を示す斜視図である。

【図 2 5】本発明に係る第 3 の実施形態の半導体発光素子の構成の一部を示す斜視図である。

【発明を実施するための形態】

10

【 0 0 1 7 】

以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。

( 第 1 の実施形態 )

図 1 ( A ) ~ ( D ) は、本発明に係る一実施形態の半導体光素子アレイ 1 0 の製造工程を概略的に示す断面図である。図 1 ( D ) には、本実施形態の半導体光素子アレイ 1 0 の構造が概略的に示されている。

【 0 0 1 8 】

図 1 ( D ) に示されるように、半導体光素子アレイ 1 0 は、テンプレート基板、複数の開口部を有するマスクパターン 1 3 P、および複数のナノコラム 2 3 を有している。テンプレート基板は、サファイア基板などの下地基板 1 1 上に III 族窒化物半導体層 1 2 P をエピタキシャル成長させてなる半導体基板である。たとえば、有機金属化学気相堆積 ( M O C V D : Metal-Organic Chemical Vapor Deposition ) 法や M B E 法により、下地基板 1 1 上に窒化ガリウムや窒化アルミニウムなどのバッファ層 ( 図示せず ) を低温プロセスで成長させ、このバッファ層上に III 族窒化物半導体層を成長させることでテンプレート基板が形成される。

20

【 0 0 1 9 】

III 族窒化物半導体層 1 2 P の表面側の主面には複数の凹部 1 4 , ... , 1 4 ( 図 1 ( C ) ) が形成されている。

マスクパターン 1 3 P は、この III 族窒化物半導体層 1 2 P の主面上に形成されており、複数の凹部 1 4 , ... , 1 4 の直上にそれぞれ開口部 ( 以下、マスク開口部と呼ぶ。 ) を有している。すなわち、開口部が凹部 1 4 にかさなりあい、開口部から凹部 1 4 が露出するように凹部 1 4 が形成される。

30

【 0 0 2 0 】

半導体光素子アレイ 1 0 は、微細柱状結晶 2 0 と、この微細柱状結晶 2 0 上に設けられた活性層 2 1 と、活性層 2 1 を被覆する半導体被覆層 2 2 とを含んで構成される半導体素子 ( ナノコラム 2 3 ) を複数備えるものである。

複数の細柱状結晶 2 0 , ... , 2 0 は、III 族窒化物半導体層 1 2 P の凹部 1 4 , ... , 1 4 からマスク開口部を介してマスクパターン 1 3 P の上方に向けて成長した III 族窒化物半導体からなる。微細柱状結晶 2 0 上には活性層 2 1 が形成され、さらに活性層 2 1 を被覆する半導体被覆層 2 2 が形成されている。微細柱状結晶 2 0、活性層 2 1 および半導体被覆層 2 2 によってナノコラム 2 3 が構成される。

40

【 0 0 2 1 】

微細柱状結晶 2 0 および半導体被覆層 2 2 は、窒化ガリウム ( G a N ) などの III 族窒化物半導体からなる。あるいは、微細柱状結晶 2 0 および半導体被覆層 2 2 は、一般式  $Al_xGa_yIn_{1-x-y}N$  (  $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ 、かつ  $0 \leq x + y \leq 1$  ) で表される 4 元混晶材料やボロン窒化物で構成されてもよい。4 元混晶材料は、組成比  $x$  ,  $y$  に応じて、室温で 0.63eV ~ 6.2eV の広いバンドギャップを有するので、4 元混晶を使用すれば、紫外域から可視光域を含み、赤外光域までをカバーする発光ダイオードやレーザダイオードを作製することができる。

微細柱状結晶 2 0 は、径が 1 0 n m 以上、1 0 0 0 n m 以下であることが好ましい。な

50

かでも、700 nm以下、さらには、650 nm以下、より好ましくは600 nm以下であることが好ましい。700 nm以下、特に600 nm以下とすれば、貫通転位の発生を抑制しやすくなる。

微細柱状結晶20の径とは、マスク開口部から露出した柱状部201の径である。柱状部201の径は、柱状部201が円柱形状の場合には、その径である。円柱形状以外の場合には、柱状部201を半導体基板の基板面側から平面視した際の重心点（平面中心）を通るとともに、柱状部201と2点で交差する直線のうち、交点間の距離が最も長い直線の長さをいう。

微細柱状結晶20は、柱状部201と、この柱状部201の先端に設けられたファセット構造202とを備える。柱状部201の形状は、特に限定されないが、たとえば、円柱形状、四角柱形状、六角柱形状等とすることができる。

また、微細柱状結晶20は、製造安定性の観点から、結晶構造が六方晶の材料で構成されていることが好ましい。

#### 【0022】

活性層21は、微細柱状結晶20のファセット構造202を覆うように設けられている。この活性層21は、たとえば、InGa<sub>N</sub>、Ga<sub>N</sub>、AlGa<sub>N</sub>、AlInGa<sub>N</sub>、InGaAs<sub>N</sub>、InNからなる。より具体的には、活性層21は、たとえば、InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>（障壁層：InGa<sub>N</sub>、井戸層：Ga<sub>N</sub>）、In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N（0 < x < 1, 0 < y < 1）、Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub>（障壁層：AlGa<sub>N</sub>、井戸層：Ga<sub>N</sub>）、またはAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N（0 < x < 1, 0 < y < 1）からなる多重量子井戸（MQW）構造または単一量子井戸（SQW）構造を有していればよい。ここで、量子井戸構造とは、量子井戸層と、この量子井戸層を挟み込む障壁層を含むものである。障壁層のバンドギャップは、量子井戸層のそれよりも大きい。

半導体被覆層22は、活性層21上に設けられており、活性層21を完全に被覆している。

#### 【0023】

本実施形態では、活性層21から放出される光のピーク波長を、活性層21が形成される直前の微細柱状結晶20の径に応じた波長に定めることができる。活性層21から放出される光のピーク波長は、各微細柱状結晶20の径が大きいほど長波長側にシフトし、各微細柱状結晶20の径が小さいほど短波長側にシフトするように定めることが可能である。すなわち、径が大きな微細柱状結晶20上の活性層21から放出される光のピーク波長は、径が小さな微細柱状結晶20上の活性層21から放出される光のピーク波長よりも長波長である。

よって、微細柱状結晶20の径を制御することで所望の発光波長を得ることができる。後述するようにこの微細柱状結晶20の径は、テンプレート基板のIII族窒化物半導体層12Pに形成された各凹部14の径（図1（C））を調整することで所望の値にすることができる。凹部14の径は、マスク開口部の大きさに依存するので、予めマスク開口部の大きさを定めておけば、この大きさに応じた径を得ることができる。

#### 【0024】

さらに、活性層21から放出される光のピーク波長は、各ナノコラム23の微細柱状結晶20の先端部（ファセット構造202）の表面積に応じた波長に定めることができる。活性層21から放出される光のピーク波長は、ファセット構造の表面積が大きいほど長波長側にシフトし、ファセット構造の表面積が小さいほど短波長側にシフトするように定めることができる。すなわち、ファセット構造の表面積が大きな微細柱状結晶20上の活性層21から放出される光のピーク波長は、ファセット構造の表面積が小さな微細柱状結晶20上の活性層21から放出される光のピーク波長よりも長波長である。

よって、微細柱状結晶20の先端部におけるファセット構造の表面積を制御することで所望の発光波長を得ることが可能である。

#### 【0025】

また、図2に示されるように、マスクパターン13Pに形成される開口部13g, ...,



13gは、マスクパターン13Pの面内方向において周期的に配列されている。

ここで、マスクパターンには、複数の開口部の配置密度が高い領域と、前記複数の開口部の配置密度が低い領域とを形成した場合、開口部の配置密度が高い領域にある複数の微細柱状結晶20上の活性層21から放出される光のピーク波長は、開口部の配置密度が低い領域にある複数の微細柱状結晶20上の活性層21から放出される光のピーク波長よりも長波長となる。

すなわち、活性層21から放出される光のピーク波長は、微細柱状結晶20, ..., 20の面内密度が高いほど長波長側へシフトし、かつ微細柱状結晶20, ..., 20の面内密度が低いほど短波長側へシフトするように定めることができる。面内密度は、微細柱状結晶20, ..., 20の空間的な周期が短いほど高くなり、あるいは、微細柱状結晶20の径が

10

#### 【0026】

次に、図1(A)~(D)を参照して、本実施形態における半導体光素子アレイ10の好適な製造方法を以下に説明する。

#### 【0027】

まず、MOCVD法やMBE法により、下地基板11上に窒化ガリウムや窒化アルミニウムなどのバッファ層(図示せず)を低温プロセスで成長させ、このバッファ層上に窒化ガリウムや窒化アルミニウムなどのIII族窒化物半導体層12を成長させる(図1(A))。この結果、基板11とIII族窒化物半導体層12とを含むテンプレート基板が作製される。次に、テンプレート基板の主面の所定領域に、チタン(Ti)を含む金属マスク層13を形成する(図1(B))。この金属マスク層13は、チタンの自然酸化膜でもよいし、あるいは、酸化チタン膜でもよい。

20

#### 【0028】

なお、金属マスク層13の構成材料は、微細柱状結晶20を選択成長させる点でチタンが好適であるが、これに限らず、チタン(Ti)、タンタル(Ta)、鉄(Fe)、ニッケル(Ni)、白金(Pt)、金(Au)、コバルト(Co)、タングステン(W)、モリブデン(Mo)よりなる群から選択された1種または2種以上の金属を含むものでもよい。

#### 【0029】

次に、金属マスク層13をパターニングして、図1(C)に示すように、III族窒化物半導体層12Pの表面を露出させる複数の開口部を有するマスクパターン13Pを形成する。このパターニングは、リソグラフィ工程により実行できる。すなわち、金属マスク層13上にレジストパターンを形成し、このレジストパターンをエッチングマスクとするエッチングを実行することでマスクパターン13Pを形成できる。あるいは、FIB(Focused Ion Beam)法を用いて集束イオンビームを金属マスク層13に所定のドーズ量(単位面積当たりの照射イオン量)で照射することでマスクパターン13Pを形成することができる。

30

#### 【0030】

金属マスク層13をパターニングする際に、金属マスク層13だけでなく、開口部の直下にあるIII族窒化物半導体層12も加工されるので、図1(C)に示すようにマスクパターン13Pの開口部の直下にドット状の凹部(ホール)14, ..., 14が形成される。マスクパターン13Pの開口部の上面視形状(すなわち、凹部14の上面視形状)は、特に限定されるものではなく、図2に示した正形状のほか、円形状や多角形状などの軸対称形状でもよい。

40

#### 【0031】

その後、MOCVD法やMBE法により、複数の凹部14からマスク開口部を介してマスクパターン13Pの上方へ微細柱状結晶20、活性層21および半導体被覆層22を連続的に成長させる(図1(D))。微細柱状結晶20は、マスクパターン13Pの上方に成長すると同時に、テンプレート基板の面内方向に沿った横方向にも成長する。それ故、ナノコラム23の径は、凹部14の径よりも大きくなる。また、半導体被覆層22は

50

活性層 2 1 を完全に被覆するように形成されるので、活性層 2 1 は外部空間への露出部を持たない。言い換えれば、活性層 2 1 は、ナノコラム 2 3 の先端部の中に完全に埋め込まれた状態にある。それ故、その露出部に起因する非発光再結合準位の形成が抑制され、高い内部量子効率を実現することが可能となる。

また、微細柱状結晶 2 0 を横方向成長させることで、以下のような効果がある。

マスク開口部径を小さくすることで、微細柱状結晶 2 0 の成長初期での貫通転位の発生が抑制される。その後に横方向成長で径を太くすれば貫通転位のない比較的、径の大きな微細柱状結晶（例えば、直径1000nm）を得ることが可能となる。

なお、微細柱状結晶 2 0 を横方向成長させるためには、相対的に窒素供給量を増加する方法や、Al を添加する方法（たとえば、AlGaIn とする方法）等がある。

10

#### 【0032】

ウルツ鉱型結晶構造のIII族窒化物半導体を、c 面（=（0001）面）と呼ばれる極性面の方向に成長させて微細柱状結晶 2 0 を形成した場合、ナノコラム 2 3（または微細柱状結晶 2 0）の上面視形状は、図 3 に示されるように六角形となる。図 4（A）、（B）は、微細柱状結晶 2 0 の先端部の中心軸に沿った断面形状を概略的に示す図である。図 4（A）に示される先端部は、ファセット構造となっており、斜め上方を向いたファセット面として、ウルツ鉱型結晶構造の半極性面 2 0 a からなる傾斜面を有している。

この先端部の形状は六角錐形状である。ここで、半極性面 2 0 a としては、たとえば、（10-1-1）面、（10-1-3）面、（11-22）面、（11-24）面、（10-12）面が挙げられる。一方、図 4（B）に示される先端部もファセット構造となっているが、斜め上方を向いたファセット面、および、直上方を向いた面として、ウルツ鉱型結晶構造の半極性面 2 0 a からなる傾斜面と平坦な極性面 2 0 b とを有している。結晶の成長条件に応じて、図 4（A）の先端部形状あるいは図 4（B）の先端部形状のいずれかが形成される。

20

なお、ファセット構造とは、下地基板 1 1 水平面に対して斜めに位置するファセット面を側面とする多面体構造のことである。

#### 【0033】

微細柱状結晶 2 0 の径が小さければ、図 4（A）に示す六角錐形状を持つ先端部が形成されやすく、微細柱状結晶 2 0 の径が大きくなれば、図 4（B）に示すような先端部が形成されやすい。結晶の成長条件にもよるが、微細柱状結晶 2 0 の径を約 300 nm 以上にとると、微細柱状結晶 2 0 の先端部に平坦な極性面 2 0 b を明確に出現させることができる。また、微細柱状結晶 2 0 の径が約 300 nm を超えて大きくなるほど平坦な極性面 2 0 b の面積は拡大する。

30

#### 【0034】

MBE 法を用いて微細柱状結晶 2 0 を成長させる場合、高周波プラズマ励起により生成された活性窒素とIII族金属とを含む原料ガスをテンプレート基板の表面上に導入して微細柱状結晶 2 0 を成長させる。この際の成長条件は、III族金属に比べて活性窒素の実効的な供給量比を大きくして微細柱状結晶 2 0 が成長する条件とすればよい。たとえば、窒化ガリウム（GaIn）からなる微細柱状結晶 2 0 を成長させる場合は、結晶成長温度を 600 以下とするとマスク開口部以外の成長抑制領域にも GaIn 結晶が成長することが多い。一方、成長温度を高くするほど成長抑制領域に成長する GaIn 結晶の空間密度が減少する。温度をある一定温度以上にすることにより、成長抑制領域に GaIn を成長させないことも可能である。成長抑制領域に GaIn を成長させない温度は、III族金属と活性窒素の供給量や比率にも依存するが、一例として、850 以上である。

40

#### 【0035】

微細柱状結晶 2 0 を成長させるために、MBE は以下の条件で行うことが望ましい。温度は、成長させるIII族窒化物半導体の種類に応じて適宜選択されるが、350 以上、1200 以下の範囲である。たとえば、GaIn 結晶を成長させる場合は 400 以上 1000 以下であり、AlN 結晶を成長させる場合は 500 以上 1200 以下であり、InN を成長させる場合は 350 以上 600 以下であることが好ましい。上記の温

50

度範囲で、窒素リッチの条件下でMBEを行うことにより、III族窒化物半導体の微細柱状結晶20を成長させることができる。

#### 【0036】

本実施形態では、マスク開口部が形成されていないマスクパターン13P上の領域は、微細柱状結晶20の成長が抑制される領域（成長抑制領域）である。成長抑制領域で横方向の結晶成長が抑制される理由は、必ずしも明らかではなく、推測の域を出ないが、マスクパターン13Pの表面におけるガリウム（Ga）などの離脱がテンプレート基板の露出表面上よりも促進されるため、横方向成長が抑制されると推測される。あるいは、TiおよびPtの物性に着目した場合、これらは他の金属に比べて融点や沸点が高く、共有結合あたりの結合エネルギーが高く、また、熱伝導率が他の金属に比べて低い。TiおよびPtは、共有結合の強さから、表面における未結合の手が少ない。このことから、結合のしやすさが期待できず、III族窒化物微細柱状結晶の成長開始を抑制したと推測することもできる。

10

#### 【0037】

また、結晶成長工程において、金属膜表面には活性窒素が単独またはIII族金属と同時に照射される。窒化物形成能を有する金属の場合には、金属窒化物（たとえば、TiN、WN）が形成されると推測される。これらの金属窒化物は化学的に安定、すなわち表面には活性な未結合手が少ないので、GaやGaNなどとの結合が弱い。したがって、GaやGaNなどが表面から脱離するに十分な成長温度の場合、供給されたGaやGaNなどが結晶成長を持続するに足る十分な大きさとなる前に脱離してしまい、GaNなどの成長が抑制されるとも考えられる。

20

#### 【0038】

以上より、成長抑制領域で横方向の結晶成長が抑制される理由としては、特に、成長抑制領域における温度が基板表面に比べて高い点と、成長抑制領域上にGaNの成長核が形成されにくい点との相乗効果が予想される。

#### 【0039】

一方、テンプレート基板のIII族窒化物半導体層12Pの露出表面上では、結晶成長の抑制が生じない。テンプレート基板およびマスクパターン13Pの表面上に形成される微細柱状結晶20は、テンプレート基板やマスクパターン13Pの材質、マスクパターン13Pの膜厚あるいは成長条件に依存して変化し得るが、テンプレート基板の主面またはマスクパターン13Pの表面に対して略垂直方向に起立して成長する。

30

#### 【0040】

本実施形態の方法によって成長するIII族窒化物半導体からなる微細柱状結晶20は、ナノメータオーダーの径を有する柱状構造の単結晶である。微細柱状結晶20の直径は、たとえば、10nm以上1000nm以下の範囲内の大きさに定められる。微細柱状結晶20の高さは、マスクパターン13Pの厚さや結晶の成長条件によっても変動し得るが、たとえば、0.2μm以上5μm以下の範囲内である。マスクパターン13Pの膜厚は、特に限定されないが、好ましくは、2nm以上100nm以下の範囲内である。ただし、微細柱状結晶20の直径および高さは、結晶の成長条件により変動し得る。

その後、各微細柱状結晶20上に活性層21を設け、さらに、活性層21上に半導体被覆層22を形成する。活性層21、半導体被覆層22は、MOCVD法や、MBE法により形成することができる。

40

なお、活性層21や、半導体被覆層22を構成する材料は、マスクパターン13P上にも堆積することとなる。

また、半導体被覆層22を形成する際には、横方向成長させて、活性層21上面のみならず、側面を被覆することが好ましい。

#### 【0041】

（発光波長の結晶径依存性）

図5は、III族窒化物半導体層12Pに形成された凹部14の径（以下「ホール径」と呼ぶ。）とナノコラム23の発光波長との間の関係を示すグラフである。

50

## 【 0 0 4 2 】

図5のグラフを得るために作製されたナノコラム23の製造条件は以下の通りである。サファイア基板11の(0001)面上にGaN層12P(厚み:約3.5 $\mu$ m)をMOCVD法で成長させてテンプレート基板を形成した。このテンプレート基板上にチタン薄膜(厚み:約5nm)を成膜した後、FIB法を用いて、このチタン薄膜に、三角格子状に配列された複数の開口部(空間周期(開口部の中心間の距離):400nm)を設けることでマスクパターン13Pを形成した。マスク開口部の形成と同時に、GaN層12Pには凹部14が形成された。次に、RF-MBE法により、900の温度条件下で、テンプレート基板の凹部14からマスク開口部を介してGaN柱状結晶20(高さ:2.5 $\mu$ m)を成長させた。続けて、各微細柱状結晶20上にInGaN膜(厚み:1nm)を含む多重量子井戸構造を持つ活性層21を形成した。続けて、この活性層21上にGaN結晶の半導体被覆層22(厚み:10nm)を形成した。

10

## 【 0 0 4 3 】

このような製造条件で、50nm~265nmの範囲内の異なるホール径を持つ半導体発光素子のサンプルを13個作製し、各サンプルについて、凹部14の深さ(以下「ホール深さ」と呼ぶ。)と、PL(photoluminescence)発光波長と、ナノコラム23の径(以下「ナノコラム径」と呼ぶ。)とを測定した。この測定結果を示すグラフが図5である。

## 【 0 0 4 4 】

図5のグラフから、ホール径が大きいほど、ホール深さが深く、ホール径が大きく、発光波長が長くなる傾向が確認された。逆に、ホール径が小さいほど、ホール深さが浅く、ナノコラム径が小さく、発光波長が短くなる傾向が確認された。

20

## 【 0 0 4 5 】

次に、図6は、166nm, 192nm, 203nm, 226nm, 242nm, 298nm, 236nmというナノコラム径をそれぞれ持つ半導体素子について測定されたPL発光波長(単位:nm)と光強度(単位:任意単位)との間の関係を示すグラフである。このグラフを得るために作製されたナノコラム23の製造条件は、図5のグラフを得るために作製されたナノコラム23の製造条件と同じである。

## 【 0 0 4 6 】

図6の光強度分布から各ナノコラム径についてピーク波長を検出した。図7は、ナノコラム径(Nanocolumn Size)と検出されたピーク波長(Peak Wavelength)との関係を表すグラフである。ナノコラム径が大きいほどピーク波長が長くなり、ナノコラム径が小さいほどピーク波長が短くなることが分かる。

30

## 【 0 0 4 7 】

以上、光を放出する活性層21の構造が微細柱状結晶20の先端形状に依存することを考慮すれば、図5乃至図7のグラフから明らかなように、活性層21から放出される光のピーク波長は、活性層21が形成される直前の微細柱状結晶20の径が大きいほど長波長側にシフトし、微細柱状結晶20の径が小さいほど短波長側にシフトすることが理解される。

## 【 0 0 4 8 】

次に、図8は、FIB法を用いてテンプレート基板に凹部(ホール)14を形成した場合のドーズ量(Dose( $\text{cm}^{-2}$ ))と凹部14の深さ(Nanohole depth(nm))との関係を示すグラフである。また、図9は、ドーズ量(Dose( $\text{cm}^{-2}$ ))と凹部14の径(Nanohole size(nm))との関係を示し、ドーズ量(Dose( $\text{cm}^{-2}$ ))とナノコラム23の径(Nanocolumn size(nm))との関係を示すグラフである。

40

## 【 0 0 4 9 】

図8および図9のグラフを得るために作製されたナノコラム23の製造条件は以下の通りである。サファイア基板11の(0001)面上にGaN層12P(厚み:約3.5 $\mu$ m)をMOCVD法で成長させてテンプレート基板を形成した。このテンプレート基板上にチタン薄膜(厚み:約5nm)を成膜した後、FIB法を用いて、このチタン薄膜に、

50

複数のマスク開口部を設けることでマスクパターン 1 3 P を形成した。マスク開口部の形成と同時に、G a N 層 1 2 P には凹部 1 4 が形成された。次に、R F - M B E 法により、9 0 0 の温度条件下で、テンプレート基板の凹部 1 4 からマスク開口部を介して G a N 柱状結晶 2 0 (高さ: 2 . 5  $\mu$  m) を成長させた。続けて、各微細柱状結晶 2 0 上に I n G a N 膜 (厚み: 1 n m) を含む多重量子井戸構造を持つ活性層 2 1 を形成した。続けて、この活性層 2 1 上に G a N 結晶の半導体被覆層 2 2 (厚み: 1 0 n m) を形成した。

#### 【 0 0 5 0 】

このような製造条件と、異なるドーズ量とで半導体発光素子のサンプルを 1 4 個作製し、各サンプルについて、凹部 1 4 の深さ、凹部 1 4 の径 およびナノコラム 2 3 の径を測定した。その測定結果を示すグラフが図 8 および図 9 である。

10

#### 【 0 0 5 1 】

図 8 のグラフに示されるように、金属マスク層 1 3 に集束イオンビームを照射したときのドーズ量が多くなるほど凹部 1 4 の深さも大きくなる。また、図 9 のグラフに示されるように、ドーズ量が多くなるほど、凹部 1 4 の径 (nanohole size) が大きくなるとともにナノコラム 2 3 の径 (nanocolumn size) も大きくなることが分かる。したがって、凹部 1 4 の径の増大とともに微細柱状結晶 2 0 の径 も増大することが理解される。

#### 【 0 0 5 2 】

図 1 0 および図 1 1 は、正方格子状に規則的に配列された、異なる径を持つナノコラム 2 3 , ... , 2 3 の走査型電子顕微鏡像 (S E M 像) を示す図である。図 1 0 は、ナノコラム 2 3 , ... , 2 3 の上面視からの S E M 像を示し、図 1 1 は、これらナノコラム 2 3 , ... , 2 3 を斜めから俯瞰したときの S E M 像である。図 1 0 および図 1 1 に示すナノコラム群は、凹部 1 4 , ... , 1 4 の径を個別に制御することにより作製された。

20

#### 【 0 0 5 3 】

(発光波長の先端形状依存性)

次に、図 1 2 は、ナノコラム 2 3 から放出された C L (カソードルミネッセンス) 光のスペクトルの測定結果を示すグラフである。このグラフの横軸は発光波長に対応し、グラフの縦軸は C L 強度 (任意単位) に対応している。図 1 3 (A) は、ナノコラム 2 3 の上面視からの S E M 像を示し、図 1 3 (B) , (C) は、それぞれ異なる波長 4 0 5 n m , 5 1 0 n m の C L 像 (カソードルミネッセンス像) の上面視図である。図 1 4 (A) は、ナノコラム 2 3 を横方向から撮像した S E M 像を示し、図 1 4 (B) , (C) , (D) は、それぞれ異なる波長 3 6 5 n m , 4 3 5 n m , 5 0 0 n m の断面 C L 像 (図 1 4 (A) のナノコラム 2 3 の断面 C L 像) を示す図である。

30

#### 【 0 0 5 4 】

図 1 2、図 1 3 (A) ~ (C) および図 1 4 (A) ~ (D) を得るために作製されたナノコラム 2 3 の製造条件は以下の通りである。サファイア基板 1 1 の (0 0 0 1) 面上に G a N 層 1 2 P (厚み: 約 3 . 5  $\mu$  m) を M O C V D 法で成長させてテンプレート基板を形成した。このテンプレート基板上にチタン薄膜 (厚み: 約 5 n m) を成膜した後、F I B 法を用いて、このチタン薄膜に、三角格子状に配列された複数の開口部 (空間周期: 4 0 0 n m) を設けることでマスクパターン 1 3 P を形成した。マスク開口部の形成と同時に、G a N 層 1 2 P には凹部 1 4 が形成された。次に、R F - M B E 法により、9 0 0 の温度条件下で、テンプレート基板の凹部 1 4 からマスク開口部を介して G a N 柱状結晶 2 0 (高さ 1.8  $\mu$  m、径 180 ~ 495 nm) を成長させた。続けて、各微細柱状結晶 2 0 上に I n G a N 膜 (厚み: 3 n m) を含む多重量子井戸構造を持つ活性層 2 1 を形成した。続けて、この活性層 2 1 上に G a N 結晶の半導体被覆層 2 2 (厚み: 1 0 n m) を形成した。

40

#### 【 0 0 5 5 】

図 1 2 のグラフに示されるように、C L 強度分布には、G a N からの発光のピークと、I n G a N からの 2 つの発光のピーク (波長: 4 0 4 n m、5 1 0 n m) とがある。

#### 【 0 0 5 6 】

図 1 3 (B) に示される波長 4 0 5 n m の C L 像は、ナノコラム 2 3 の活性層 2 1 の全体からの発光を示している。この C L 像は、微細柱状結晶 2 0 の先端部の側面 (半極性面

50

）20a（図4（B））上に形成されたInGaNからの発光を示すものと考えられる。これに対し、図13（C）に示される波長510nmのCL像は、ナノコラム23の活性層21のうち頂上付近のみからの発光を示している。このCL像は、微細柱状結晶20の先端部の平坦面（極性面）20b（図4（B））上に形成されたInGaNからの発光を示すものと考えられる。

【0057】

さらに、図14（B）に示される波長365nmの断面CL像は、ナノコラム23の全体に分布するGaInNからの発光を示している。図14（C）に示される波長435nmの断面CL像は、ナノコラム23の先端部全体のInGaInNからの発光を示している。この断面CL像は、主に、微細柱状結晶20の先端部の側面（半極性面）20a（図4（B））上に形成されたInGaInNからの発光を示すものと考えられる。また、図14（D）に示される波長500nmの断面CL像は、ナノコラム23の頂上付近のInGaInNからの発光を示している。この断面CL像は、主に、微細柱状結晶20の先端部の平坦面（極性面）20b（図4（B））上に形成されたInGaInNからの発光を示すものと考えられる。

【0058】

図12、図13（A）～（C）および図14（A）～（D）から理解される通り、微細柱状結晶20の先端部の側面（半極性面）20a上に形成されたInGaInNの発光波長と、当該先端部の平坦面（極性面）20b上に形成されたInGaInNの発光波長とは異なる。その理由は、以下のように考えられる。

【0059】

図15（B）に示されるように、微細柱状結晶20の側面20a上に形成されたInGaInN結晶21sと平坦面20b上に形成されたInGaInN結晶21tとでは、InGaInN結晶中へのInの取り込みやすさが異なるので、平坦面20bに形成されたInGaInN結晶21t中のIn組成比は比較的高く、側面20aに形成されたInGaInN結晶21s中のIn組成比は比較的低いと考えられる。このため、図15（A）に示されるCLスペクトル（図12と同じCLスペクトル）が形成される。また、キャリアは、先端部付近のバンドギャップの狭いInGaInN結晶21tに閉じ込められるので、先端部付近のInGaInN結晶21tが量子ドットを形成し得る。これが、側面20aに形成されたInGaInNの発光波長と、平坦面20bに形成されたInGaInNの発光波長との差を生じさせていると

【0060】

図12のCL強度分布を得るために作製されたサンプルを用いてPL（フォトルミネッセンス）強度を測定した。励起光として波長405nmのCW（Continuous Wave）光を使用した。また、励起光密度は0.29kW/cm<sup>2</sup>であった。PL強度分布のピーク波長は、4Kの低温条件で486.2nm、300Kの高温条件で486.7nmであり、PL強度分布の半値全幅（FWHM：Full Width at Half Maximum）は、4Kの低温条件で151.3meVに相当し、300Kの高温条件で187.2meVに相当した。したがって、低温条件と高温条件との間のPL積分強度比すなわち内部量子効率、波長486nmに対して約77%であり、非常に良好な結晶性が確認された。このような高い内部量子効率の実現された1つの理由は、活性層21（21s，21t）の外部空間への露出部が無くなり、非発光再結合による注入キャリアの損失が抑制されたからだと考えられる。図15（B）に示されるように、狭いバンドギャップを持つInGaInN結晶21s，21tは広いバンドギャップを持つGaInNにより完全に被覆されてナノコラム23中に埋め込まれた状態にある。それ故、InGaInN結晶21s，21tの外部空間への露出部が無くなるので、非発光再結合準位の形成が抑制されたと考えることができる。仮に露出部が存在すれば、この露出部の表面のバンドギャップ内に非発光再結合準位が形成され、この非発光再結合準位を介して電子と正孔とが再結合することにより発光効率が低下する。

なお、ここでは、InGaInN結晶21s，21tを有するナノコラム23について言及したが、InGaInN結晶21tはなくてもよい。

このようなナノコラムであっても、ナノコラムの径により、発光波長を制御することができることが確認されている。すなわち、径が小さなナノコラムの活性層から放出される光のピーク波長は、径が大きなナノコラム上の活性層から放出される光のピーク波長よりも低波長となることが確認されている。

#### 【0061】

図16は、ナノコラム23の径(コラム径)とナノコラム23の先端部のファセット構造の表面積との関係を示すとともに、コラム径と発光ピーク波長との関係を示すグラフである。発光ピーク波長は、PL光の強度分布から検出された波長である。グラフ中、記号「 $\square$ 」が発光ピーク波長の測定値を、記号「 $\triangle$ 」がナノコラム23の先端部の平坦面(SurfaceC)の面積を、記号「 $\diamond$ 」がナノコラム23の先端部の傾斜側面(SurfaceSemi)の面積を、記号「 $\circ$ 」がナノコラム23の先端部の平坦面の面積と傾斜側面の面積との合計を、それぞれ示している。

10

#### 【0062】

この図16のグラフを得るために作製されたナノコラム23の製造条件は以下の通りである。サファイア基板11の(0001)面上にGaN層12P(厚み:約3.5 $\mu$ m)をMOCVD法で成長させてテンプレート基板を形成した。このテンプレート基板上にチタン薄膜(厚み:約5nm)を成膜した後、FIB法を用いて、このチタン薄膜に、三角格子状に配列された複数の開口部(空間周期:400nm)を設けることでマスクパターン13Pを形成した。マスク開口部の形成と同時に、GaN層12Pには凹部14が形成された。次に、RF-MBE法により、900の温度条件下で、テンプレート基板の凹部14からマスク開口部を介してGaN柱状結晶20(高さ:2.5 $\mu$ m)を成長させた。続けて、各微細柱状結晶20上にInGaN膜(厚み:1nm)を含む多重量子井戸構造を持つ活性層21を形成した。続けて、この活性層21上にGaN結晶の半導体被覆層22(厚み:10nm)を形成した。

20

#### 【0063】

このような製造条件で、135nm~350nmの範囲内の異なるコラム径を持つナノコラム群のサンプルを複数個作製し、各サンプルについて、ナノコラム23の先端部の表面積と、発光ピーク波長とを測定した。この測定結果を示すグラフが図16である。

#### 【0064】

図16のグラフに示されるように、コラム径の増大とともに、ナノコラム23の先端部のファセット構造の表面積(傾斜側面(ファセット面)と平坦面の合計面積)は増大する。また、コラム径が約135nm~約288nmの範囲内では、コラム径の増大とともに発光ピーク波長の値も単調に増大している。よって、ナノコラム23の先端部のうち上方を向いたファセット面の合計面積の増大とともに、発光ピーク波長の値が増大する。活性層21の膜厚と半導体被覆層22の膜厚は薄いので、実質的に、微細柱状結晶20の先端部のうち上方を向いたファセット面の面積の増大とともに発光ピーク波長が長くなるということができる。したがって、微細柱状結晶20の先端部のうち上方を向いたファセット面の面積を制御することで、所望の発光ピーク波長を得ることが可能である。

30

#### 【0065】

また、図16のグラフに示されるように、コラム径が約135nm~約260nmの範囲では、ナノコラム23の先端部の傾斜側面(SurfaceSemi)の面積の増大とともに発光ピーク波長の値も増大するという正の相関関係が成立するが、コラム径が約260nmを超えると、この相関関係が成立しなくなる。この代わりに、コラム径が約260nm~約288nmの範囲では、ナノコラム23の先端部の平坦面(SurfaceC)の面積の増大とともに発光ピーク波長の値が増大する。

40

#### 【0066】

次に、図17は、200nmのコラム径を持つナノコラム23のPL発光波長に関する光強度分布(単位:任意単位)を示すグラフである。グラフ中、実線は、ナノコラム23の先端部の傾斜側面の高さhが2.1 $\mu$ mの場合の測定曲線を、破線は、ナノコラム23の先端部の傾斜側面の高さhが1.25 $\mu$ mの場合の測定曲線を、それぞれ示している。

50

図 1 8 は、同じナノコラム 2 3 についての高さ  $h$  と発光ピーク波長との関係を示すグラフである。図 1 8 のグラフの横軸は高さ  $h$  に対応し、縦軸は発光ピーク波長に対応している。

#### 【 0 0 6 7 】

図 1 7 および図 1 8 のグラフを得るために作製されたナノコラム 2 3 の製造条件は以下の通りである。サファイア基板 1 1 の ( 0 0 0 1 ) 面上に  $GaN$  層 1 2 P ( 厚み : 約 3 . 5  $\mu m$  ) を MOCVD 法で成長させてテンプレート基板を形成した。このテンプレート基板上にチタン薄膜 ( 厚み : 約 5 nm ) を成膜した後、FIB 法を用いて、このチタン薄膜に、三角格子状に配列された複数の開口部 ( 空間周期 : 4 0 0 nm ) を設けることでマスクパターン 1 3 P を形成した。マスク開口部の形成と同時に、 $GaN$  層 1 2 P には凹部 1 4 が形成された。次に、RF-MBE 法により、900 の温度条件下で、テンプレート基板の凹部 1 4 からマスク開口部を介して  $GaN$  柱状結晶 2 0 ( 高さ : 2 . 5  $\mu m$  ) を成長させた。続けて、各微細柱状結晶 2 0 上に  $InGaN$  膜 ( 厚み : 1 nm ) を含む多重量子井戸構造を持つ活性層 2 1 を形成した。続けて、この活性層 2 1 上に  $GaN$  結晶の半導体被覆層 2 2 ( 厚み : 1 0 nm ) を形成した。

#### 【 0 0 6 8 】

図 1 7 に示されるようにナノコラム 2 3 の先端部の傾斜側面の高さ  $h$  が 1 . 2 5  $\mu m$  から 2 . 1  $\mu m$  に変化すると、光強度分布のピークも長波長側にシフトしている。図 1 8 にもその傾向が示されている。

#### 【 0 0 6 9 】

( 発光波長の面内密度依存性 )

図 1 9 ( A ) ~ ( F ) は、三角格子状に規則的に配列されたナノコラム群の上面視での SEM 像を示す図である。図 1 9 ( A ) , ( B ) , ( C ) , ( D ) , ( E ) , ( F ) は、それぞれ、空間周期 ( 各微細柱状結晶 2 0 の中心間の距離 ) 4 0 0 nm , 6 0 0 nm , 8 0 0 nm , 1  $\mu m$  , 2  $\mu m$  , 4  $\mu m$  の場合の配列を示している。また、空間周期 4 0 0 nm , 6 0 0 nm , 8 0 0 nm , 1  $\mu m$  , 2  $\mu m$  , 4  $\mu m$  の配列に対応する PL 発光のピーク波長は、それぞれ、5 0 8 nm , 5 0 0 nm , 4 9 0 nm , 4 8 0 nm , 4 8 0 nm , 4 7 9 nm と測定された。

#### 【 0 0 7 0 】

図 1 9 の SEM 像を得るために作製されたナノコラム 2 3 の製造条件は以下の通りである。サファイア基板 1 1 の ( 0 0 0 1 ) 面上に  $GaN$  層 1 2 P ( 厚み : 約 3 . 5  $\mu m$  ) を MOCVD 法で成長させてテンプレート基板を形成した。このテンプレート基板上にチタン薄膜 ( 厚み : 約 5 nm ) を成膜した後、FIB 法を用いて、このチタン薄膜に、三角格子状に配列された複数のマスク開口部 ( 各マスク開口部の径 : 1 6 7 nm ) を設けることでマスクパターン 1 3 P を形成した。マスク開口部の形成と同時に、 $GaN$  層 1 2 P には凹部 1 4 が形成された。次に、RF-MBE 法により、900 の温度条件下で、テンプレート基板の凹部 1 4 からマスク開口部を介して  $GaN$  柱状結晶 2 0 ( 高さ 1.5  $\mu m$  、径 190nm ) を成長させた。続けて、各微細柱状結晶 2 0 上に  $InGaN$  膜 ( 厚み : 3 nm ) を含む多重量子井戸構造を持つ活性層 2 1 を形成した。続けて、この活性層 2 1 上に  $GaN$  結晶の半導体被覆層 2 2 ( 厚み : 1 0 nm ) を形成した。

#### 【 0 0 7 1 】

図 1 9 ( A ) ~ ( F ) に示されるように、ピーク波長は、ナノコラム 2 3 , ... , 2 3 の空間周期 ( コラム周期、配置密度 ) が短いほど長波長側へシフトし、かつナノコラム 2 3 , ... , 2 3 の空間周期が長いほど短波長側へシフトしている。

#### 【 0 0 7 2 】

図 2 0 は、図 1 9 ( A ) ~ ( F ) のナノコラム群の PL 発光波長に関する光強度分布 ( 単位 : 任意単位 ) の測定結果を示すグラフである。また、図 2 1 は、コラム周期と図 2 0 の光強度分布の発光ピーク波長との関係を示すグラフである。ここで、各ナノコラム 2 3 のコラム径は 1 6 0 nm にされた。

#### 【 0 0 7 3 】



図 2 1 に示されるように、コラム周期が約  $1 \mu\text{m}$  以下の範囲では、コラム周期の増大とともに発光ピーク波長の値が減少している。コラム径が一定のままコラム周期を長くすると、ナノコラム 2 3 , ... , 2 3 の面内密度が小さくなるので、面内密度の減少とともに発光ピーク波長が短くなり、面内密度の増大とともに発光ピーク波長が長くなる。

【 0 0 7 4 】

図 2 2 は、三角格子状に規則的に配列されたナノコラム群の上面視での S E M 像を示す図である。図 2 2 ( A ) , ( B ) , ( C ) , ( D ) は、それぞれ、空間周期 2 4 2 nm , 2 6 9 nm , 2 9 8 nm , 3 3 6 nm の場合の配列を示している。また、空間周期 2 4 2 nm , 2 6 9 nm , 2 9 8 nm , 3 3 6 nm の配列に対応する P L 発光のピーク波長は、それぞれ、6 0 7 nm , 6 4 3 nm , 6 4 9 nm , 6 5 0 nm と測定された。

10

【 0 0 7 5 】

図 2 2 ( A ) ~ ( D ) の S E M 像を得るために作製されたナノコラム 2 3 の製造条件は、マスク開口部の径を除いて、図 1 9 の S E M 像を得るために作製されたナノコラム 2 3 の製造条件と同じである。図 2 2 の S E M 像を得るために作製されたナノコラム 2 3 の径は、空間周期の増大とともに大きくなるように設定された。

【 0 0 7 6 】

図 2 2 ( A ) ~ ( D ) に示されるように、ナノコラム 2 3 の径の増大とともに、ピーク波長の値が増大している。ナノコラム 2 3 の径の増大とともに、ナノコラム 2 3 , ... , 2 3 の面内密度 ( 配置密度 ) が大きくなるので、面内密度の増大とともに発光ピーク波長が長くなり、面内密度の減少とともに発光ピーク波長が短くなる。

20

【 0 0 7 7 】

各ナノコラム 2 3 の半導体被覆層 2 2 の膜厚は薄く、横方向の結晶成長が抑制されることを考慮すれば、活性層 2 1 から放出される光のピーク波長は、微細柱状結晶 2 0 , ... , 2 0 の面内密度が高いほど長波長側へシフトし、かつ微細柱状結晶 2 0 , ... , 2 0 の面内密度が低いほど短波長側へシフトする。したがって、微細柱状結晶 2 0 の径を制御することで所望の発光波長を得ることが可能である。

【 0 0 7 8 】

以上説明した通り、第 1 の実施形態の半導体光素子アレイ 1 0 は、テンプレート基板上に形成された微細柱状結晶 2 0 の位置を、マスクパターン 1 3 P の開口部の位置を調整することで制御することができる。また、各開口部の直下の凹部 1 4 の径を調整することで微細柱状結晶 2 0 の径を制御し、これにより、活性層 2 1 から放出される光のピーク波長を所望の波長に定めることが可能である。また、各微細柱状結晶 2 0 の径を大きくしてピーク波長を長波長側にシフトさせ、各微細柱状結晶 2 0 の径を小さくしてピーク波長を短波長側にシフトさせることができる。

30

【 0 0 7 9 】

また、微細柱状結晶 2 0 の先端部のファセット構造の表面積を制御することで、活性層 2 1 から放出される光のピーク波長を所望の波長に定めることが可能である。ファセット構造の表面積を大きくしてピーク波長を長波長側にシフトさせ、ファセット構造の表面積を小さくしてピーク波長を短波長側にシフトさせることができる。

【 0 0 8 0 】

40

さらに、周期的に配列された微細柱状結晶 2 0 , ... , 2 0 の面内密度を高くすることでピーク波長を長波長側へシフトさせ、微細柱状結晶 2 0 , ... , 2 0 の面内密度を低くすることでピーク波長を短波長側へシフトさせることができる。面内密度の制御は、微細柱状結晶 2 0 , ... , 2 0 の空間周期 ( すなわち、マスクパターン 1 3 P に形成される開口部の空間周期 ) の調整、あるいは、各微細柱状結晶 2 0 の径 ( すなわち、マスクパターン 1 3 P に形成される開口部の径 ) の調整により高精度で行うことが可能である。

【 0 0 8 1 】

( 第 2 の実施形態 )

次に、本発明に係る第 2 の実施形態について説明する。図 2 3 ( A ) , ( B ) は、それぞれ、第 2 の実施形態の半導体発光素子の構成の一部を概略的に示す図である。図 2 3 (

50

A), (B)に示される構造は、上記第1の実施形態の半導体光素子アレイ10の構造を含むものである。

【0082】

図23(A)を参照すると、下地基板11上に形成されたIII族窒化物半導体層12Pは、n型不純物が導入されたn型半導体層である。マスクパターン13Pは、n側電極(図示せず)と接続されている。このIII族窒化物半導体層12P上には、n型AlGaInなどのn型クラッド層を含む微細柱状結晶20と、活性層21と、p型AlGaInなどのp型クラッド層を含むp型半導体層24とからなるナノコラムが形成されている。これらナノコラム間の空間には、酸化珪素などの絶縁膜30が埋め込まれている。そして、p型半導体層24, ..., 24に電氣的に接続されるように、Ni/Au多層膜やITO(Indium Tin Oxide)などのp側電極31が成膜されている。p側電極から注入された正孔とn側電極からの電子とが活性層21で再結合することにより活性層21は光を放出する。

10

微細柱状結晶20は、n型半導体層で構成されており、たとえば、GaIn/AlGaIn/GaInの3層構成であってもよい。

【0083】

一方、図23(B)を参照すると、下地基板11上に形成されたIII族窒化物半導体層12Pは、n型不純物が導入されたn型半導体層である。マスクパターン13Pは、n側電極(図示せず)と接続されている。このIII族窒化物半導体層12P上には、n型AlGaInなどのn型クラッド層を含む微細柱状結晶20と、活性層21と、p型AlGaInなどのp型クラッド層を含むp型半導体層25とからなるナノコラム23が形成されている。p型半導体層25は、横方向の結晶成長の促進により横方向に連続的に形成されている。

20

p型半導体層25を横方向成長を促進させるためには、Mgをドーピングする方法、成長温度を下げる方法、Alを添加する方法等がある。そして、p型半導体層25に電氣的に接続されるように、Ni/Au多層膜やITO(Indium Tin Oxide)などのp側電極32が成膜されている。p側電極から注入された正孔とn側電極からの電子とが活性層21で再結合することにより活性層21は光を放出する。

【0084】

図23(A)および図23(B)の構造をレーザダイオードとして構成する場合には、活性層21から放出された光を閉じ込める光共振器を形成すればよい。たとえば、活性層21よりも上方と下方とにそれぞれ多層膜反射鏡を形成して、これら多層膜反射鏡で光共振器を構成することができる。

30

【0085】

なお、p型半導体層25に光導波路を形成することもできる。

また、図23(A)または図23(B)の構造を、太陽電池などの光電変換素子に変形することも可能である。たとえば、各ナノコラム23において、活性層21の代わりにpin構造(光吸収構造)を形成すればよい。このpin構造では、i型半導体層を量子ドット構造とすることができる。複数の量子ドット層を中間層を介して積層してi型半導体層を構成することにより、変換効率を向上させることができる。上述の通り、微細柱状結晶20の径、微細柱状結晶20, ..., 20の面内密度あるいは微細柱状結晶20の先端形状を制御することにより、pin構造を所望の吸収波長に適合させることが可能である。

40

【0086】

(第3の実施形態)

次に、本発明の第3の実施形態について説明する。図24および図25は、それぞれ、第3の実施形態の半導体発光素子の構成の一部を示す斜視図である。第3の実施形態の半導体発光素子は、上記第1の実施形態の半導体光素子アレイ10の構造を含むものである。

【0087】

図24を参照すると、下地基板11上に形成されたIII族窒化物半導体層12Pは、n型不純物が導入されたn型半導体層である。マスクパターン13P上にはn側電極40が

50

形成されている。このIII族窒化物半導体層12P上には、発光波長の異なる複数種のナノコラム群23R, 23G, 23Bが形成されている。これらナノコラム群23R, 23G, 23Bを構成するナノコラムは、図23(B)に示したような、n型AlGaInなどのn型クラッド層を含むn型(第1導電型)の微細柱状結晶20と、活性層21と、p型AlGaInなどのp型クラッド層を含むp型(第2導電型)の半導体層25とからなるナノコラムと同じ構造を有していればよい。ナノコラム群23R, 23G, 23Bは、それぞれ、R(赤色), G(緑色), B(青色)の3原色の波長の光をそれぞれ放出する結晶構造を有している。

【0088】

さらに、図25に示すように、ナノコラム群23R, 23G, 23B上には、それぞれ、p型半導体層25R, 25G, 25Bが成膜されている。そして、これらp型半導体層25R, 25G, 25Bには、それぞれ、p側電極42R, 42G, 42Bが接続されている。p側電極42R, 42G, 42Bは、Ni/Au多層膜やITO(Indium Tin Oxide)で構成すればよい。

10

【0089】

p側電極42R, 42G, 42Bから注入された正孔とn側電極からの電子とがナノコラム群23R, 23G, 23Bの活性層で再結合することにより活性層は光を放出することができる。

【0090】

図25の構造をレーザダイオードとして構成する場合には、活性層から放出された光を閉じ込める光共振器を形成すればよい。たとえば、活性層よりも上方と下方とにそれぞれ多層膜反射鏡を形成して、これら多層膜反射鏡で光共振器を構成することができる。

20

【0091】

第3の実施形態の半導体発光素子は、3原色の波長の光を放出する発光体を同一の基板11上に集積することができる。さらに、R、G、Bの光をそれぞれ放出するナノコラム群23R, 23G, 23Bの面内密度を個別に調整することで光強度分布を制御して、全体のスペクトル分布を太陽光のスペクトル分布に近似することが可能である。この結果、理想的な白色発光ダイオードを作製することができる。

【0092】

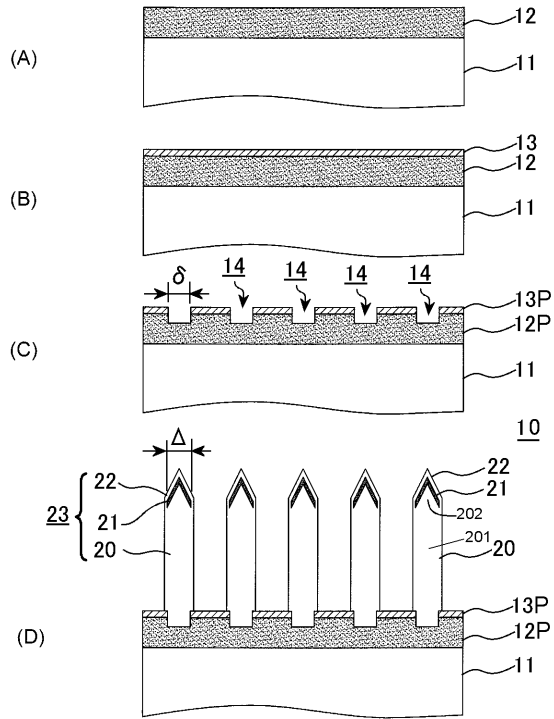
以上、図面を参照して本発明の実施形態について述べたが、これらは本発明の例示であり、上記以外の様々な構成を採用することもできる。たとえば、上記実施形態では、下地基板11としてサファイア基板が使用されるが、これに限定されず、たとえば、シリコン基板やSiC基板を使用してもよい。テンプレート基板の代わりに、窒化ガリウム基板などのIII族窒化物半導体基板を使用してもよい。

30

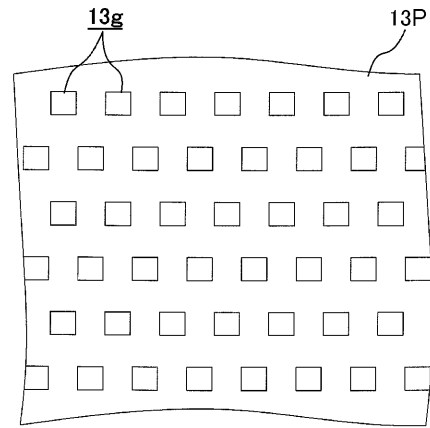
【0093】

本発明に係る半導体光素子アレイは、電子デバイスおよび光デバイスの分野において応用可能である。微細柱状結晶は優れた発光特性を持ち、発光デバイスへの応用が期待される。本発明に係る半導体光素子アレイは、たとえば、蛍光体、発光ダイオード、レーザダイオードあるいは光電変換素子に適用することができる。

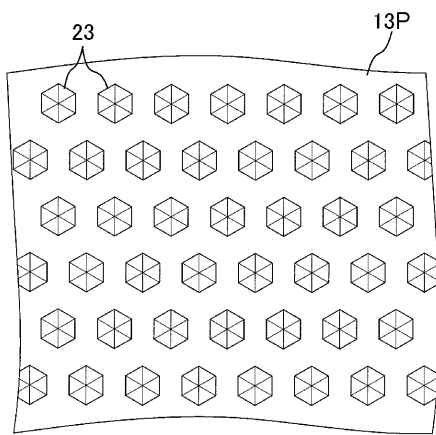
【図 1】



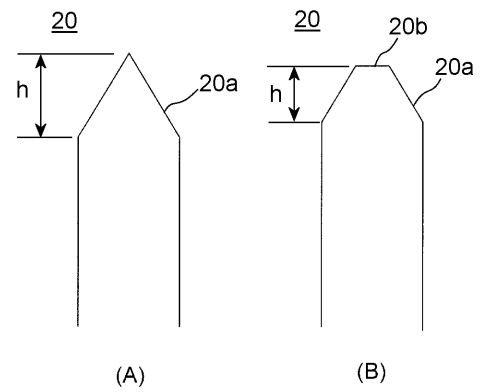
【図 2】



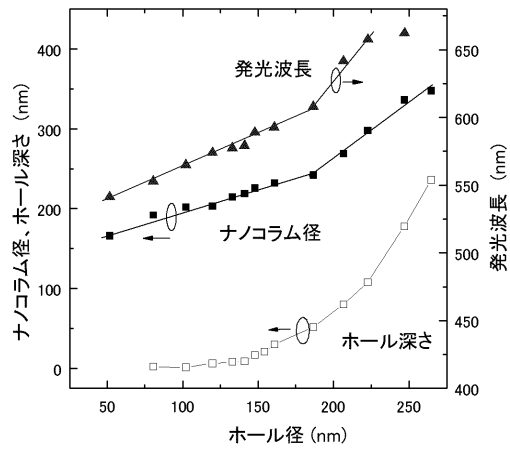
【図 3】



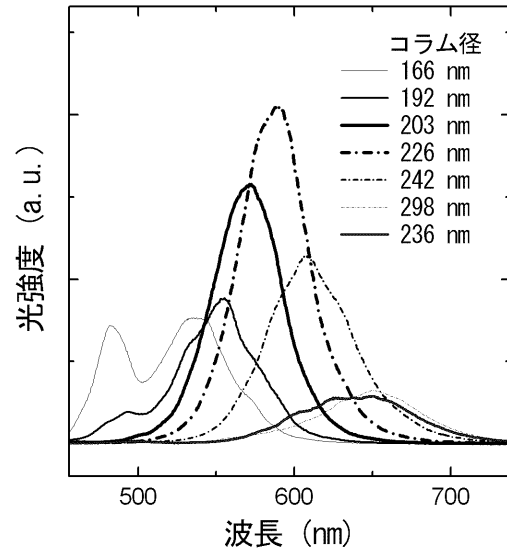
【図 4】



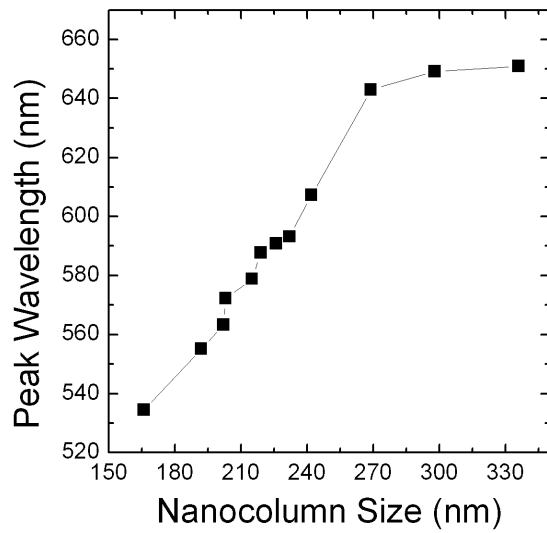
【図 5】



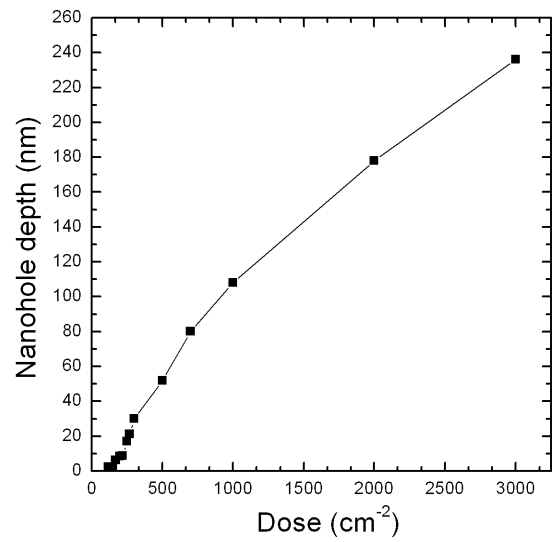
【図 6】



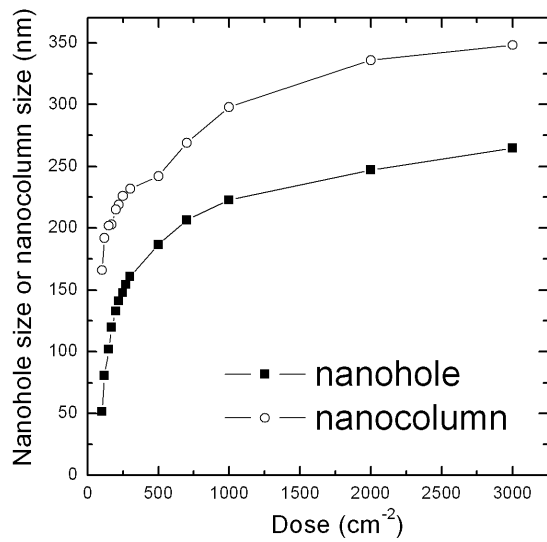
【図 7】



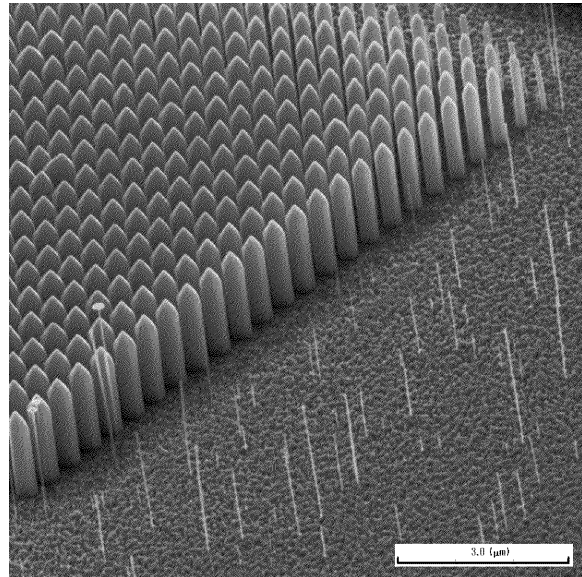
【図 8】



【図 9】



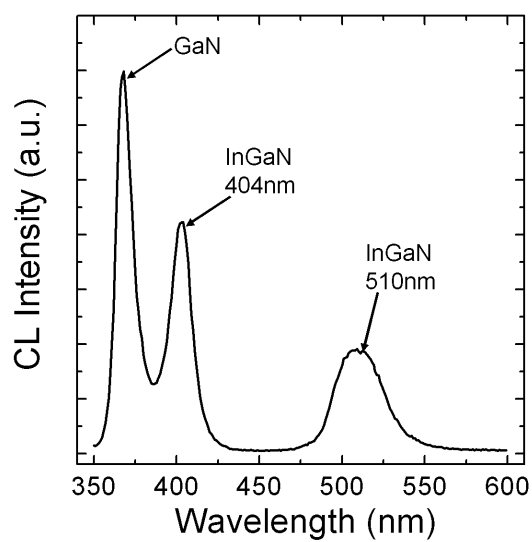
【図 11】



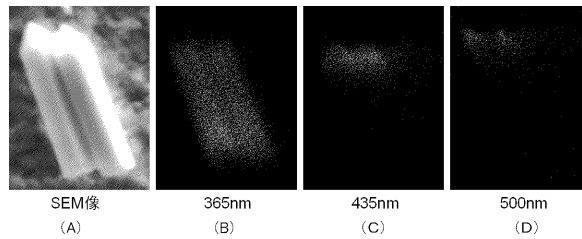
【図 10】



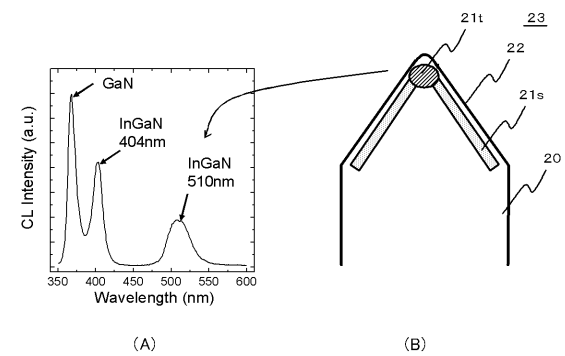
【図 12】



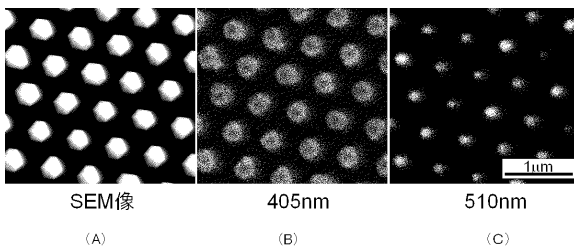
【図 14】



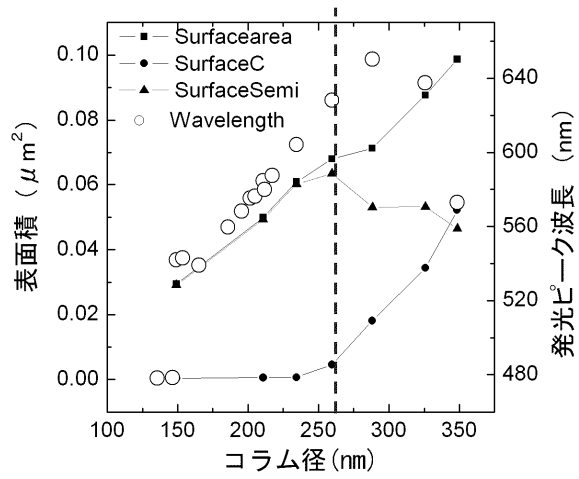
【図 15】



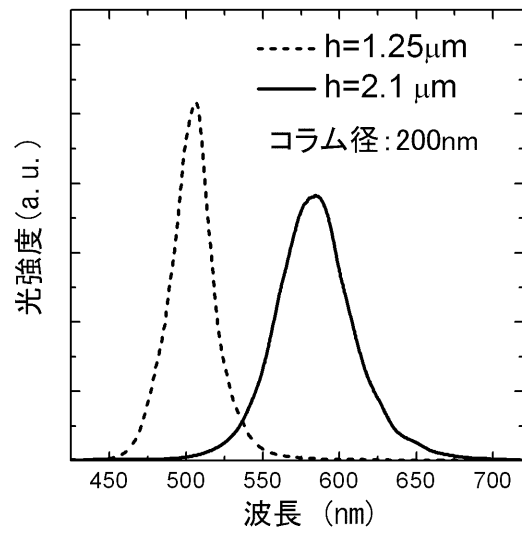
【図 13】



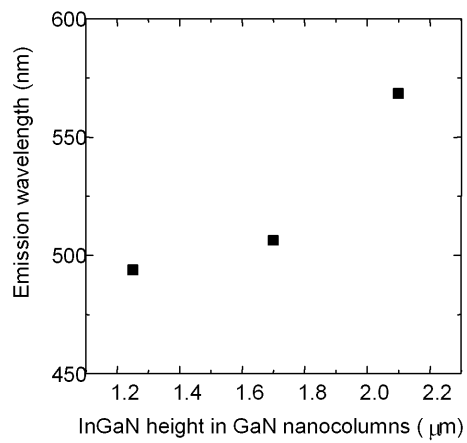
【図 16】



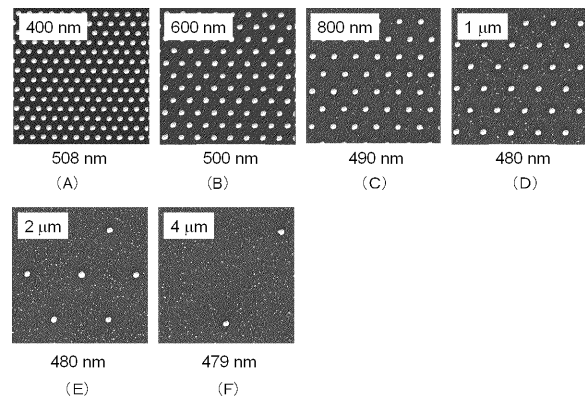
【図 17】



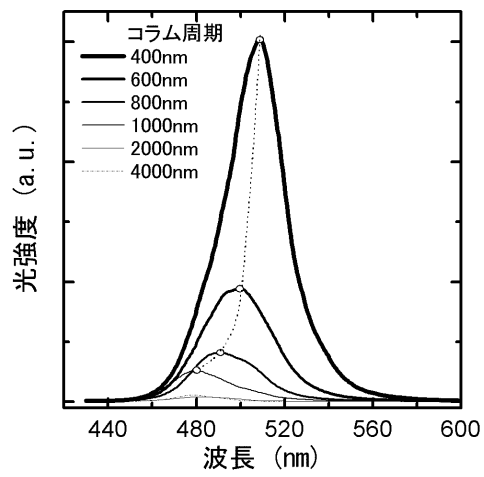
【図 18】



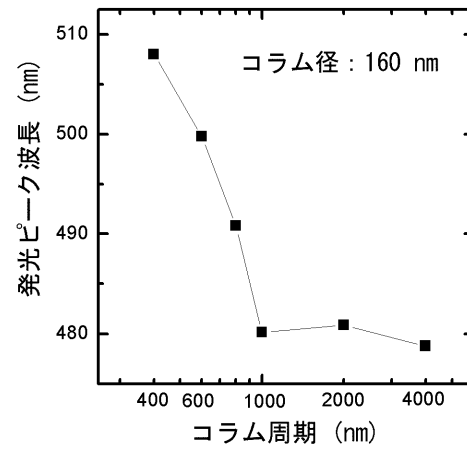
【図 19】



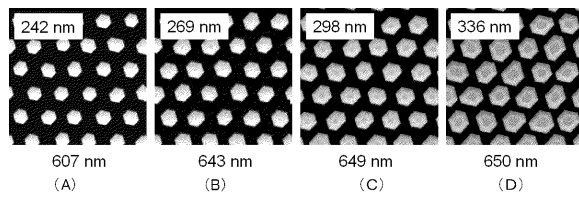
【図 20】



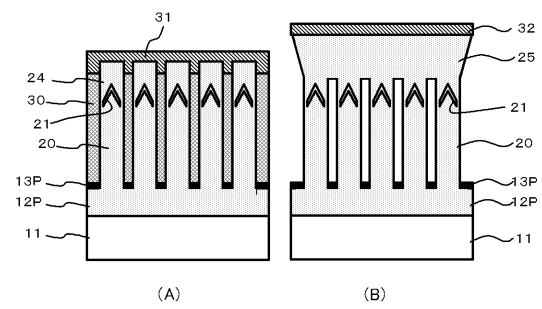
【図 21】



【図 22】

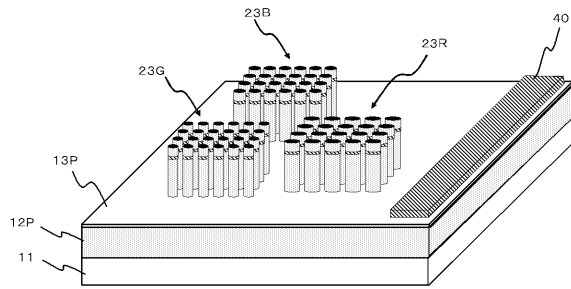


【図 23】

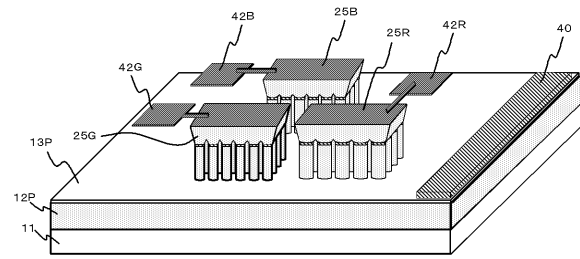




【図 24】



【図 25】



---

フロントページの続き

(72)発明者 関口 寛人

東京都千代田区紀尾井町7番1号 学校法人上智学院 上智大学理工学部 機能創造理工学科内

審査官 百瀬 正之

(56)参考文献 国際公開第2006/025407(WO, A1)

特開2007-027298(JP, A)

特開2003-282942(JP, A)

特開2008-034482(JP, A)

特開2008-034483(JP, A)

特開2008-108757(JP, A)

特開2008-022014(JP, A)

国際公開第2008/048704(WO, A2)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 33/00-33/64