(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第4031008号
(P4031008)
(45)発行日　平成20年1月9日(2008.1.9)　(24)登録日　平成19年10月26日(2007.10.26)

(51)Int.Cl.　F I
H01S 5/343 (2006.01)　H01S 5/343 610

請求項の数 12 (全 26 頁)

(21)出願番号　特願2005-229190(P2005-229190)
(22)出願日　平成17年8月8日(2005.8.8)
(62)分割の表示　特願2004-170221(P2004-170221)の分割
原出願日　平成16年6月8日(2004.6.8)
(65)公開番号　特開2005-354107(P2005-354107A)
(43)公開日　平成17年12月22日(2005.12.22)
審査請求日　平成19年5月30日(2007.5.30)

早期審査対象出願

(73)特許権者　000005821
松下電器産業株式会社
大阪府門真市大字門真１００６番地
(74)代理人　100065868
弁理士　角田　嘉宏
(74)代理人　100106242
弁理士　古川　安航
(74)代理人　100110951
弁理士　西谷　俊男
(74)代理人　100114834
弁理士　幅　慶司
(72)発明者　長谷川　義晃
大阪府門真市大字門真１００６番地　松下電器産業株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】窒化物半導体レーザ素子

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
ｎ型窒化物半導体からなり、かつ凹凸加工がされていない基板と、
前記基板の上に形成され、マグネシウム（Mg）を含む窒化物半導体からなる半導体層と、
前記半導体層の上に形成され、ｎ型窒化物半導体からなる第１のクラッド層と、
前記第１のクラッド層の上に形成された活性層と、
前記活性層の上に形成され、ｐ型窒化物半導体からなる第２のクラッド層と、を備える窒化物半導体レーザ素子。
【請求項２】
前記半導体層の厚さが5nm以上200nm以下である、請求項１に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項３】
前記半導体層が窒化ガリウム（GaN）からなる、請求項１に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項４】
前記基板がGaNからなる、請求項３に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項５】
前記基板の下に形成された第１の電極と、
第２のクラッド層の上に形成された第２の電極と、を備える請求項１に記載の窒化物半

導体レーザ素子。
【請求項６】
前記半導体層が前記基板の上面に接するように形成されている、請求項１に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項７】
前記半導体層がさらにシリコン（Si）を含む窒化物半導体からなる、請求項１に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項８】
前記半導体層がさらに炭素（C）を含む窒化物半導体からなる、請求項１に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項９】
前記半導体層がさらにSi及びCを含む窒化物半導体からなる、請求項１に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項１０】
前記半導体層がGaNからなる、請求項７乃至９いずれかに記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項１１】
前記基板がGaNからなる、請求項１０に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【請求項１２】
前記半導体層が複数形成されている、請求項１に記載の窒化物半導体レーザ素子。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、GaN系発光素子等の窒化物半導体発光素子に関する。
【背景技術】
【０００２】
最近、次世代の高密度光ディスクであるBlu-ray Discが発売された。このBlu-ray Discでは光源として青紫色の光を発する半導体レーザが使用されており、半導体材料として窒化ガリウム（GaN）系のIII-Ｖ族化合物半導体が使用されている。今後のBlu-ray Discの展開を考えた場合、レコーダーとして高密度・高速記録が必要であり、高光出力で信頼性の高いGaN系半導体レーザが必要となってくる。
【０００３】
GaN系レーザの長寿命化には、低消費電力化と低転位密度化が重要である。例えば、非特許文献１では、低消費電力化が長寿命化と強い相関があることが示唆されている。また、非特許文献２および非特許文献３では、転位密度の低減が長寿命化に有効であることが示唆されている。非特許文献２および非特許文献３とも基板としてサファイアを使用しており、サファイア基板上にGaN膜を成長した後、このGaN膜上に絶縁膜を部分的に形成してGaN膜を再度成長する。再度成長したGaN膜は、絶縁膜の形成されていない領域から選択的に成長を開始し、次に絶縁膜上に迫出すように横方向に成長する。かかる技術を、エピタキシャル横方向オーバーグロース（ELO）という。
【０００４】
このELO領域では、サファイアとGaNの物性定数差に起因する貫通転位のGaN膜表面への伝播が抑制されるために、低転位領域が形成される。この場合、低転位領域の転位密度は$10^{6}cm^{-2}$程度である。一方、ELO領域でない高転位密度領域では約2桁高い$10^{8}cm^{-2}$程度となっている。しかしながら、今後の高温度・高出力での長寿命化を目指した場合、現状の$10^{6}cm^{-2}$程度の転位密度では不十分であり、よりいっそうの低転位化が必須である。また、サファイア基板は絶縁性であるため、半導体レーザの電極を基板側に配置することができない。このため、サファイア基板上にELO技術を使用してGaN系レーザを作製した場合、GaN側にレーザのｐ電極とｎ電極の両電極を配置する構成となるため、素子サイズが大きくなり、１枚の基板から作製される素子数が少なくなる。また、製造工程も複雑化するため

歩留りの低下、および製造コストが高くなる課題も残っている。

【０００５】

上記課題を解決するために、最近、導電型（ｎ型）のGaN基板が作製・市販され始めた。例えば特許文献１および特許文献２によるGaN基板の製造方法では、上記ELO技術を用いて、サファイア等の支持基板上に厚膜のGaNを成長した後、支持基板を研磨除去し、GaN厚膜結晶をスライスして鏡面仕上げすることで自立型のGaN基板を作製する方法が開示されている。このGaN基板の作製には、ELO技術を用いるため、低転位領域と高転位領域が形成されるが、低転位領域の転位密度は$10^5 cm^{-2}$程度にまで低減されている。さらに、前記GaN基板上にGaN系レーザを作製する試みがなされている。非特許文献４によれば、低転位密度（$3\times10^5 cm^{-2}$程度）のGaN基板上にGaN系レーザを作製することで、推定寿命時間として100000時間程度が予想され、大幅な長寿命化が図れることが示されている。

【０００６】

特許文献３には、いずれの基板を用いた場合にも共通する、基板の反り、結晶欠陥等の問題を解決すべく、基板の直上に表面の複数の溝を有するGaNからなる第１のバッファー層を形成し、さらに第１のバッファー層上にマグネシウム（Mg）がドープされたGaNからなる第２のバッファー層を形成する技術が開示されている。

【非特許文献１】S.Tomiya et.al, Phys. Stat. Sol.(a), 188(2001)69.

【非特許文献２】S. Nagahama et.al, Jpn. J. Appl. Phys., 39(2000)L647.

【非特許文献３】M.Ikeda et.al, Phys. Stat. Sol.(a), 194(2002)407.

【特許文献１】特開2003-124572号公報

【特許文献２】特開2003-133649号公報

【非特許文献４】O.Matsumoto et.al, Extended Abstracts of the 2002 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, pp.832-833

【特許文献３】特開2003-110197号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００７】

GaN系レーザの基板としてGaN基板を使用する場合には、以下の２点が解決すべき課題となる。

（１）活性層からGaN基板側へ漏出する光（迷光）に起因するレーザのノイズ増加

（２）GaN基板表面の非平坦性に起因するレーザ特性の悪化および歩留り低下

次に、これらの課題について補足説明する。

【０００８】

まず、課題（１）について詳説する。GaN基板のバンドギャップエネルギーに対して、Blu-ray Discで使用するレーザ光のエネルギー（波長）は小さい。このため、GaN系レーザの基板としてGaN基板を使用した場合、活性層で発し基板側へ伝播したレーザ光は基板内で吸収されることなく基板中を伝播し、基板外へ漏出されることになる。この基板外へ漏出した光（迷光）は、自然放出光成分を含んでいるために量子ノイズとなり、レーザの低ノイズ化を妨げる原因となる。

【０００９】

続いて、課題（２）について詳説する。現状、前記のようなGaN基板は、GaN厚膜結晶をスライスして基板として取出し、基板表面を研磨等で鏡面仕上げして作製する。しかしながら、現状のGaN基板は、砒化ガリウム（GaAs）や燐化インジウム（InP）のIII-Ｖ族化合物半導体基板と比較して、ウエットエッチングによるエッチングが困難であるために、ウエットエッチングによる基板表面の清浄化効果およびスクラッチ等の研磨傷の平坦化効果が有効でない。このため、前記GaN基板上にGaN系結晶およびGaN系レーザを成長すると、GaN結晶表面に凹凸を誘発する。このような凹凸は、例えば量子井戸構造等の微細な構造を成長した場合に、量子井戸層の層厚分布で現れ発光特性等に不均一が生じ、レーザの場合はレーザ特性の悪化、面内不均一、歩留り低下となる。したがって、GaN基板上にGaN系結晶を成長する場合には、そのGaN結晶を平坦化する技術が非常に重要となる。

【００１０】
尚、特許文献３には、基板としてGaN基板を用いた例も挙げられているが、まず、基板の直上に表面の複数の溝を有するGaNからなる第１のバッファー層を形成し、さらに第１のバッファー層上にマグネシウム（Mg）がドープされたGaNからなる第２のバッファー層を形成する必要があるため、バッファー層を積層する工程に時間を要し、製造工程の複雑化、歩留り低下、高コスト化は避けられない。
【００１１】
本発明は、GaN基板上に結晶成長したGaN系発光素子等の窒化物半導体発光素子、特にGaN系レーザにおいて、基板から漏出する光（迷光）を抑制することで低ノイズ化を実現し、またレーザ結晶表面の平坦化を促進することで、レーザの特性・歩留りを向上し、高温および高光出力動作においても長寿命化が可能な窒化物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】
【００１２】
前述した目的を達成するために、本発明は、窒化物半導体からなる基板と、前記基板の上面に接するように形成され、ｐ型不純物を含む窒化物半導体からなる半導体層と、前記半導体層の上に形成され、第１の導電型不純物を含む窒化物半導体からなる第１のクラッド層と、前記第１のクラッド層の上に形成された活性層と、前記活性層の上に形成され、第２の導電型不純物を含む窒化物半導体からなる第２の導電型クラッド層と、を備える窒化物半導体発光素子である。
【００１３】
前記発明に係る窒化物半導体発光素子において、前記半導体層は、Mgを含む窒化物半導体からなることが好ましい。さらには、前記半導体層は、Mgを含むGaNからなることが好ましい。このとき、前記基板は、GaNからなることが好ましい。
【００１４】
前記発明に係る窒化物半導体発光素子において、前記半導体層の厚さは、好ましくは5nm以上200nm以下であり、さらに好ましくは5nm以上100nm以下である。
【００１５】
前記発明に係る窒化物半導体発光素子において、例えば前記基板の下に形成された第１の電極と、第２の導電型クラッド層の上に形成された第２の電極と、を備える構成とすることができる。
【００１６】
また、本発明は、窒化物半導体からなる基板と、前記基板の上に形成され、第１の導電型不純物を含む窒化物半導体からなる第１のクラッド層と、前記第１のクラッド層の上に形成された活性層と、前記活性層の上に形成され、第２の導電型不純物を含む窒化物半導体からなる第２の導電型クラッド層と、を備える窒化物半導体発光素子であって、前記基板と前記活性層の間に形成され、ｐ型不純物と、ｎ型不純物及び／又は炭素（C）とを含む窒化物半導体からなる半導体層をさらに備える窒化物半導体発光素子である。
【００１７】
前記発明に係る窒化物半導体発光素子において、前記半導体層は、前記基板と前記第１のクラッド層との間に形成されていることが好ましい。さらには、前記半導体層が、前記基板の上面に接するように形成されていることが好ましい。
【００１８】
前記半導体層は、例えばMgとSiとを含む窒化物半導体からなる。または、前記半導体層は、例えばMgとCとを含む窒化物半導体からなる。または、前記半導体層は、例えばMg、Si、及びCを含む窒化物半導体からなる。尚、前記半導体層の窒化物半導体はGaNであることが好ましい。さらには、前記基板は、GaNからなることが好ましい。
【００１９】
前記発明に係る窒化物半導体発光素子において、前記半導体層は、複数形成されている構成であってもよい。前記発明に係る窒化物半導体発光素子において、例えば前記基板の

下に形成された第１の電極と、第２の導電型クラッド層の上に形成された第２の電極と、を備える構成とすることができる。

【発明の効果】

【００２０】

本発明によると、GaN基板上に結晶成長したGaN系発光素子等の窒化物半導体発光素子、特にGaN系レーザにおいて、基板から漏出する光（迷光）を抑制することで低ノイズ化を実現し、またレーザ結晶表面の平坦化を促進することで、レーザ素子の特性・歩留りを向上し、高温および高光出力動作においても長寿命化が可能な窒化物半導体発光素子を提供することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【００２１】

以下、図面を参照しつつ本発明の実施の形態について説明する。なお、図面においては説明をしやすくするため、各層の倍率を変えて示している場合がある。

（第１の実施形態）

本発明の第１の実施形態の窒化物半導体発光素子は、GaN系のレーザ素子である。図１は、本実施形態のレーザ素子１の構成を模式的に示す断面図である。図１に示すように、レーザ素子１は、GaN基板１１の上に、Mgをドーピングしたn型GaNよりなる迷光抑制平坦化層１２、n型GaN層１３、n型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｎ型クラッド層１４、ｎ型GaNよりなる第１の光ガイド層１５、$In_{0.10}Ga_{0.90}N$／$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる多量子井戸活性層１６、$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる中間層１７、ｐ型$Al_{0.18}Ga_{0.82}N$よりなるキャップ層１８、p型GaNよりなる第２の光ガイド層１９、p型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｐ型クラッド層２０、p型GaNよりなるp型コンタクト層２１がこの順で積層されてなる。そして、特定の領域において活性層１６より上方に位置するｐ型クラッド層２０及びｐ型コンタクト層２１が除去されており、除去されていない領域がリッジとなっている。リッジ上を除いて、SiO_2膜２２が堆積されており、リッジ上およびSiO_2膜２２上に、パラジウム（Pd）と白金（Pt）と金（Au）からなるｐ電極２３が形成されている。また、基板１１の裏面に、チタン(Ti)と白金（Pt）と金（Au）からなるn電極２４が形成されている。

【００２２】

次に、本実施形態のレーザ素子１の製造方法について説明する。図２は、結晶成長工程まで終了したレーザ素子１（以下、各素子に分離する前の状態であってもレーザ素子と称することとする）の構成を模式的に示す断面図である。まず、図２を参照しながら、結晶成長工程について説明する。（0001）面を主面とするGaN基板１１を酸溶液で洗浄する。その後、GaN基板１１を有機金属気相成長（MOVPE）装置（図示せず）の反応炉内のサセプタに保持し、反応炉を真空排気する。続いて、反応炉内の圧力を39.9kPaの窒素雰囲気とし、温度を約800℃にまで昇温してGaN基板１１を加熱し表面のサーマルクリーニングを行なう。このサーマルクリーニング工程では、酸洗浄では除去できなかったGaN基板１１表面の異物および酸化物を除去することができる。尚、この工程では、水素も添加して窒素と水素の混合雰囲気としてもよい。ただし、水素の分圧が過剰になると、GaN基板１１表面でエッチング反応が進行し、スクラッチ等の研磨傷の凹凸が激しくなり、またGaドロップレットが発生するなど結晶性も劣化するので、好ましくない。

【００２３】

次に、反応炉を約1000℃にまで昇温した後、GaN基板１１の主面上に、供給量7sccmのトリメチルガリウム（TMG）、供給量が7.5slmのアンモニア（NH_3）ガス、および窒素と水素の混合ガスをキャリアガスとして供給すると同時に、ｐ型不純物ドーパントであるビスシクロペンタジエニルマグネシウム（Cp_2Mg）ガスも供給する。

【００２４】

結晶成長初期の上記工程により、GaN基板１１上にMgがドープされたGaNよりなる迷光抑制平坦化層１２が形成される。本実施形態では、Cp_2Mgガスの供給量と時間を制御して、厚さが約20nmでMg不純物濃度が約$2\times10^{17}cm^{-3}$のGaNよりなる迷光抑制平坦化層１２を成長する。このp型GaNよりなる迷光抑制平坦化層１２は、レーザ動作において、活性層１６か

らGaN基板１１側へ漏出する光（迷光）を吸収する役割を担う。尚、本実施形態では、GaN迷光抑制平坦化層１２の層厚を約20nmとしたがこの層厚に限定されることはない。層厚が5nm程度以上であれば、GaN基板１１から漏出する迷光の抑制、およびGaN基板１１表面の凹凸の平坦化に対する効果がある。したがって、迷光抑制平坦化層１２の層厚は、好ましくは、5nm以上200nm以下とする。さらに好ましくは、5nm以上100nm以下とする。迷光抑制平坦化層１２の層厚が200nmより大きい場合、結晶中に点欠陥が導入される等の結晶性劣化と、厚膜化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。尚、迷光抑制平坦化層１２は一層のみでなく、GaN基板１１と活性層１６との間に複数層形成するようにしてもよい。

【００２５】

さらに、迷光抑制平坦化層１２におけるMg不純物の濃度は、$1\times10^{17}cm^{-3}$以上$2\times10^{18}cm^{-3}$以下が好ましい。不純物の濃度が2×10^{18} cm^{-3}より大きい場合、不純物の高濃度化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。

【００２６】

続いて、Cp_2Mgガスの供給のみを停止して、ｎ型不純物ドーパントとしてシラン（SiH_4）ガスを供給することにより、厚さが約0.3μｍでSi不純物濃度が約$5\times10^{17}cm^{-3}$のｎ型GaN層１３を成長する。次に、トリメチルアルミニウム（TMA）も供給することで、厚さが約1.2μｍでSi不純物濃度が約$5\times10^{17}cm^{-3}$のｎ型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｎ型クラッド層１４を成長する。続いて、厚さが約120nmでSi不純物濃度が約$5\times10^{17}cm^{-3}$のn型GaNよりなる第１の光ガイド層１５を成長した後、温度を約800℃にまで降温し、キャリアガスを窒素のみに変更して、トリメチルインジウム（TMI）とTMGを供給して厚さが約3nmの$In_{0.10}Ga_{0.90}N$よりなる量子井戸層（3層）と、厚さが約7nmの$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなるバリア層（2層）からなる多重量子井戸活性層１６を成長する。

【００２７】

引き続いて、厚さが約100nmの$In_{0.02}Ga_{0.98}N$ よりなる中間層１７を成長する。尚、この中間層１７は、不純物を添加しないアンドープ層とする。中間層１７は、活性層１６中にp型ドーパントであるMgが拡散等で混入することを防止する役割と、レーザ動作時にMgによる光吸収損失を低減する役割を担っている。

【００２８】

その後、再び反応炉内の温度を約1000℃にまで昇温しキャリアガスに水素も混合して、Cp_2MgガスとTMGガスを供給した後、TMAガスも供給して厚さが約20nmでMg不純物濃度が約$1\times10^{19}cm^{-3}$のp型 $Al_{0.18}Ga_{0.82}N$ よりなるキャップ層１８を成長する。尚、本実施形態では、Cp_2Mgガスをキャップ層１８の成長前から供給する。ｐ型AlGaN層は、キャップ層１８のようにAl組成が増加する程、高抵抗化することが知られている。さらに、MOVPE装置の反応管が石英で構成されている場合、反応管に供給したMgが石英と反応することで、所望のMg濃度を含んだ半導体が得られないことがある（メモリー効果）。このため、本実施形態のように、Cp_2Mgガスをキャップ層１８の成長前に供給しておくことで、上記メモリー効果によるMgドーピング遅れを緩和して、キャップ層１８の高抵抗化を抑制できる。さらに、キャップ層１８の成長前に供給するCp_2Mgガスを、成長時に供給するCp_2Mgガスよりも多く設定することで、上記メモリー効果をさらに緩和することができる。また、前記キャップ層１８は、引き続くｐ型クラッド層２０の成長中に活性層１６からInが蒸発することを防止する役割と、電流注入時にｎ型層から活性層へ注入された電子がｐ型層へオーバーフローすることを防止する役割を担っている。

【００２９】

尚、本実施形態では、前記キャップ層１８の層厚を約20nmとしたが、層厚はこれに限定されることはない。キャップ層１８は、その層厚が約10nm程度までは電子オーバーフロー防止効果が顕著であったので、好ましくは10nm以上とする。また、本実施形態では、前記キャップ層１８のAl組成を18%としたが、Al組成はこれに限定されることはない。キャップ層１８のAl組成は、10%程度までは電子オーバーフロー防止効果が顕著であったので、好ましくは10%以上とする。

【００３０】
次に、厚さが約100nmでMg不純物濃度が約$1\times10^{19}cm^{-3}$のp型 GaNよりなる第２の光ガイド層１９を成長する。続いて、厚さが約0.5μmでMg不純物濃度が約$1\times10^{19}cm^{-3}$のｐ型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｐ型クラッド層２０を成長する。最後に、厚さが約60nmでMg不純物濃度が約$1\times10^{19}cm^{-3}$のp型GaNよりなるｐ型コンタクト層２１を成長する。ここで、好ましくはｐ型コンタクト層２１の約10nm程度の最表面のMg濃度をさらに増加する（例えば約$1\times10^{20}cm^{-3}$）。このようにすると、ｐ電極２３とのコンタクト抵抗を大幅に低減することが可能となり、レーザ素子１の動作電圧の低減、すなわち長寿命化に寄与することになる。

【００３１】
尚、本実施形態では、ｎ型クラッド層１４及びｐ型クラッド層２０の各Al組成を7%としたが、各Al組成を3～5%に低減してもよい。クラッド層のAl組成を低減することで、GaN及びInGaNとの格子不整合度を緩和することができ、活性層１６に印加される歪を緩和でき、レーザ素子の信頼性をさらに改善することができる。

【００３２】
次に、レーザ素子１の構成を模式的に示す断面図である図１を参照しながら、電極形成工程について説明する。結晶成長工程終了後、まずｐ型半導体層の活性化加熱処理を行う。加熱処理は750℃の窒素雰囲気中で、10分程度行う。その後、レーザ結晶表面に二酸化珪素（SiO_2）よりなる絶縁膜を堆積させる。続いて、この絶縁膜上にレジスト膜を堆積させ、フォトリソグラフィー法によりp型コンタクト層２１のリッジ形成領域（リッジ幅は約2μm）のみにレジスト膜が残るようにする。この後、レジスト膜をエッチングマスクとして、レジスト除去部のSiO_2膜をフッ酸溶液で除去しｐ型コンタクト層２１を露出させる。続いて、リッジ形成領域以外をドライエッチング装置（図示せず）でエッチングし、活性層１６上の残し層厚を0.1μm程度に制御する。結果、リッジ形成領域以外のｐ型クラッド層２０とｐ型コンタクト層２１が除去される。尚、このドライエッチングで使用するガスは塩素（Cl_2）とする。その後、アセトンなどの有機溶液によりリッジ上のレジスト膜を除去し、フッ酸溶液でリッジ上のSiO_2膜を除去する。次に、リッジ上のｐ電極２３形成領域を所定のマスク層で覆い、リッジ上のp電極２３形成領域以外をSiO_2膜２２で堆積した後、リッジ上及びSiO_2膜上にパラジウム（Pd）と白金（Pt）と金（Au）を蒸着し、p電極２３を形成する。

【００３３】
続いて、基板１１の裏面を研磨し総層厚を100μm程度に薄膜化する。その後、基板１１の裏面（研磨面）に、チタン（Ti）と白金（Pt）と金（Au）を蒸着し、ｎ電極２４形成する。この際、ｎ電極２４を基板１１の全面に形成せずに、レーザ素子ごとに対応するように分離して形成する。この電極分離により、へき開によるレーザ素子の分離が容易になる。

【００３４】
続いて、レーザ共振器端面のへき開工程に移る。共振器端面がGaN基板１１の（1-100）面となるように、GaN基板１１をへき開装置（図示せず）でへき開し、バー状態に分離する。尚、レーザ共振器長は600μmとする。続いて、レーザ共振器の後端面にスパッタ装置（図示せず）を用いて、SiO_2と二酸化チタン（TiO_2）の３対で構成される誘電体多層膜を堆積させ、90%程度の反射率を有する高反射膜コートとする。

【００３５】
最後に、バー状態のレーザ素子の２次へき開をおこなってレーザチップに分離し、レーザキャンとｐ電極２３側が接するように実装する。

【００３６】
［実施例］
実施例１として、上述の第１の実施形態のレーザ素子１を作製し、比較例１として、レーザ素子１とはGaN迷光抑制平坦化層１２を備えない点のみ異なるレーザ素子１‘を作製し、これらを下記の試験ａ）～ｄ）の試験対象として用いた。

【００３７】
図３は、結晶成長工程まで終了した比較例１のレーザ素子１’の構成を示す断面図である。レーザ素子１’は、GaN基板２７の上に、n型GaN層２８、n型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｎ型クラッド層２９、ｎ型GaNよりなる第１の光ガイド層３０、$In_{0.10}Ga_{0.90}N$／$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる多量子井戸活性層３１、$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる中間層３２、ｐ型$Al_{0.18}Ga_{0.82}N$よりなるキャップ層３３、p型GaNよりなる第２の光ガイド層３４、p型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｐ型クラッド層３５、p型GaNよりなるp型コンタクト層３６がこの順で積層されてなる。結晶成長方法は、GaN迷光抑制平坦化層１２を結晶成長する工程を含まない以外は、第１の実施形態のレーザ素子１と同じなので、説明を省略する。また、結晶成長後にSiO_2絶縁膜及び電極を形成工程、へき開工程についても、第１の実施形態のレーザ素子１と同じなので図示及び説明を省略する。

【００３８】
ａ）結晶積層断面の透過電子顕微鏡による観察
実施例１と比較例１のレーザ素子の製造工程における結晶成長後の積層断面を透過電子顕微鏡（TEM）で観察した（図示せず）。

【００３９】
実施例１においては、GaN基板１１の表面にはスクラッチ等の研磨傷に起因する凹凸が見られるが、迷光抑制平坦化層１２の表面では凹凸が大幅に減少していることが確認された。具体的には、GaN基板１１表面で高さ10nm程度の凹凸箇所が、迷光抑制平坦化層１２の積層後ではその高さが2nm程度に減少していた。

【００４０】
一方、比較例１においては、GaN基板２７の表面にはスクラッチ等の研磨傷に起因する凹凸が見られ、この凹凸に起因する各層の厚み方向の位置変動（以下、「層厚揺らぎ」ともいう）が活性層３１を含むレーザ構造全体に及んでいることが確認された。具体的には、活性層３１で確認された層厚揺らぎは約3nmであり、これは活性層３１の量子井戸層厚（約3nm）と同等である。即ち、量子井戸層厚と同程度の層厚揺らぎが活性層に存在することになり、レーザ特性の発光特性の悪化、GaN基板面内でのレーザ特性の不均一化および製造での歩留り低下を招くことになる。

【００４１】
実施例１の迷光抑制平坦化層１２において表面の凹凸が大幅に低減された理由について、本発明者は、GaN基板１１上にGaN結晶を成長する際にMgをドーピングすることで、基板に平行方向の横方向の成長が顕著に促進されるために、GaN基板１１の表面に形成されている凹凸が成長初期段階で平坦化されることに起因していると考える。この結晶表面平坦化は、活性層１６である量子井戸層を平坦化し量子効果を顕著化することになるため、閾値電流の低減等のレーザ特性向上に寄与する。

【００４２】
ｂ）レーザ特性の測定
実施例１及び比較例１のレーザ素子に電流を注入し、電流－光出力特性を測定した。

【００４３】
図４は、実施例１のレーザ素子１の電流－光出力特性を示す図である。図４に示すように実施例１のレーザ素子１は、電流注入により室温で連続発振に到った。この際の閾値電流およびスロープ効率の平均は各々35mA、1.4W/Aであった。

【００４４】
比較例１のレーザ素子１‘は、電流注入により室温連続発振に到った。この際の閾値電流およびスロープ効率の平均は各々55mA、0.8W/Aであった。実施例１のレーザ素子１と比較すると、レーザ特性としての閾値電流およびスロープ効率がともに悪化していることがわかる。これは、比較例１のレーザ素子１’ではGaN基板２７の表面凹凸による各層の層厚揺らぎが内在していることに起因しているものと推測される。ここで、比較例１のレーザ素子１‘の作製工程において、実施例１のレーザ素子１と同程度のレーザ特性を有する素子をGaN基板２７全体から選別できる歩留りはおおよそ30%程度の低歩留りであった。

【００４５】
ｃ）相対雑音強度の測定
実施例１及び比較例１のレーザ素子において、各光出力（1～10mW）での相対雑音強度（RIN）を測定した。
【００４６】
図５は、実施例１のレーザ素子１の光出力－相対雑音強度（RIN）を示す図であり、図６は比較例１のレーザ素子１‘の光出力－相対雑音強度を示す図である。ただし、レーザ光を光ディスクに照射した際に発生する戻り光による雑音を低減するために、RIN測定時にはレーザ素子に印加するバイアス（電流）に400MHz程度の高周波重畳を印加した。図５からも明らかなように、一般的に光出力が小さい程、自然放出光の影響が大きくなるため、RINが大きくなる。実際に、Blu-ray Discの再生時には、レーザ光として2.5mW程度の低出力が必要であり、その際のRINとしては-130dB/Hz以下が要望されている。実際、実施例１のレーザ素子１では、光出力が2.5mWにおけるRINは、上記要望を充分に満たす-135dB/Hz程度であった（図５参照）。一方、比較例１のレーザ素子１’では光出力が２．５ｍWにおけるRINは、-125dB/Hz程度であった（図６参照）。
【００４７】
比較例１のレーザ素子１‘と比較して、実施例１のレーザ素子１の低ノイズ化は、活性層１６からGaN基板１１側へ漏出する自然放出光（迷光）がGaN迷光抑制平坦化層１２で吸収されることに起因していると考えられる。逆に、比較例１のレーザ素子１‘の高ノイズ化は、ｐ型GaN迷光抑制平坦化層が存在しないために、自然放出光（迷光）がGaN基板２７から漏出し、量子ノイズが増加したことに起因していると考えられる。
【００４８】
ｄ）一定光出力寿命試験
光出力50mWにおける消費電力（動作電流と動作電圧の積）が0.4W程度の実施例１のレーザ素子１を選別して、60℃の高温において50mWの高光出力での一定光出力（APC）寿命試験を実施した。その結果、実施例１のレーザ素子１での劣化率（動作電流の増加率）は１時間当たり0.001mA程度であり、3000時間以上の安定動作を確認した。
【００４９】
次に、上記と同じく、光出力が50mWのときの消費電力が、上記と同程度（0.4W）の比較例１のレーザ素子１’を選別して、50mWの高光出力でのAPC寿命試験を実施した。実施例１と比較例１とのレーザ素子に関し、同程度の消費電力でレーザ素子を選別した理由は、GaN系レーザの寿命時間は消費電力に大きく依存するために、同程度の消費電力でレーザ素子を比較しないと、内部応力と寿命時間との相関関係が明確にならないためである。
【００５０】
比較例１のレーザ素子１’の劣化率は実施例１のレーザ素子１の20倍程度であり、急速に劣化が進行することがわかった。
【００５１】
これは、比較例１のレーザ素子１’ではGaN迷光抑制平坦化層が存在しないために、活性層３１を含む各層に層厚揺らぎが生じ、微小な結晶歪（格子歪）が活性層に印加され、劣化加速に繋がったものと推測される。
【００５２】
ｅ）迷光抑制平坦化層での光吸収の見積もり試験
GaN迷光抑制平坦化層での光吸収を見積もる試験を行った。試験用の試料として、試料１と試料２のを準備した。図７は、試料１の構成を示す断面図である。試料１は、第１の実施形態と同じ結晶成長方法を用いて、GaN基板２５上にGaN迷光抑制平坦化層１２と同量のMg不純物濃度（約$2\times10^{17}cm^{-3}$）を有するMgドーピングGaN層２６を結晶成長したものである。ただし、第１の実施形態ではGaN迷光抑制平坦化層１２の層厚を約20nmとしたが、本試験では光吸収量を定量的に見積もるために意図的に厚くし、その層厚を約500nmとした。試料２は、GaN基板上にMgドーピングを施さないアンドープGaN層を層厚が約500nmとなるように結晶成長したものである（図示せず）。

【００５３】
試料１及び試料２を用いて、吸収スペクトルを測定した。ただし、吸収スペクトルはキセノン（Xe）ランプを用いて、光干渉を抑制するような角度（ブリュースター角度）で測定した。図８に、測定結果である試料１、２の吸収スペクトルを示す。図８から、第１の実施形態のレーザ素子１の発振波長405nmでの吸収係数は、試料１において40cm^{-1}程度、試料２において1cm^{-1}程度以下であったことがわかる。すなわち、試料１においては、MgドーピングGaN層２６（第１の実施形態の迷光抑制平坦化層１２に相当）を有することにより、レーザ光の吸収が非常に大きかったといえる。以上より、第１の実施形態のレーザ素子１においては、迷光抑制平坦化層１２を有することにより活性層１６からGaN基板１１方向へ漏出する光を吸収抑制する効果が十分にあることが確認された。

【００５４】
試料１でのレーザ光吸収効果は、GaN層２６にドーピングされているMgがGaNの禁制帯幅中に深い準位のアクセプターレベルを形成することに起因していると考られる。

【００５５】
以上の試験結果から、GaN基板上のGaN系レーザにおいて、GaN基板上にｐ型不純物をドーピングした層を最初に結晶成長することで、
（１）活性層からGaN基板側へ漏出する光（迷光）に起因するレーザのノイズ増加（２）GaN基板表面の非平坦性に起因するレーザ特性の悪化および歩留り低下が改善されることが明らかとなった。

【００５６】
（第２の実施形態）
本発明の第２の実施形態の窒化物半導体発光素子は、GaN系のレーザ素子である。図９は、結晶成長工程まで終了した本実施形態のレーザ素子２の構成を模式的に示す断面図である。本実施形態のレーザ素子２は、第１の実施形態のレーザ素子１とは迷光抑制平坦化層の組成が異なる点以外は同じ構成である。すなわち、図９に示すように、レーザ素子２は、GaN基板４１の上に、Mg及びSiをドーピングしたGaNよりなる迷光抑制平坦化層４２、n型GaN層４３、n型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｎ型クラッド層４４、ｎ型GaNよりなる第１の光ガイド層４５、$In_{0.10}Ga_{0.90}N$／$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる多量子井戸活性層４６、$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる中間層４７、ｐ型$Al_{0.18}Ga_{0.82}N$よりなるキャップ層４８、p型GaNよりなる第２の光ガイド層４９、p型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるp型クラッド層５０、p型GaNよりなるp型コンタクト層５１がこの順で積層されてなる。

【００５７】
本実施形態のレーザ素子２の結晶成長方法は、GaN迷光抑制平坦化層の結晶成長工程が異なる点以外は、第１の実施形態のレーザ素子１と同じなので、GaN迷光抑制平坦化層４２の結晶成長工程のみを説明する。また、結晶成長後にSiO_2絶縁膜及び電極を形成する工程、へき開工程についても、第１の実施形態のレーザ素子１と同じなので図示及び説明を省略する。

【００５８】
酸洗浄後にMOVPE装置に搬送された（0001）面を主面とするGaN基板４１に対して、温度を約800℃にまで昇温してGaN基板４１表面のサーマルクリーニングを行なう。次に、反応炉を約1000℃にまで昇温した後、GaN基板４１の主面上に、TMGとNH_3ガス、および窒素と水素の混合ガスをキャリアガスとして供給すると同時に、Cp_2MgとSiH_4ガスも供給する。結晶成長初期の上記工程により、GaN基板４１上にGaN迷光抑制平坦化層４２が形成される。本実施形態では、Cp_2Mg およびSiH_4ガスの供給量と時間を制御して、厚さが約20nmでMg不純物濃度が約$2\times10^{17}cm^{-3}$およびSi不純物濃度が約$1\times10^{18}cm^{-3}$のGaN迷光抑制平坦化層４２を成長する。このGaN迷光抑制平坦化層４２は、レーザ動作において、活性層４６からGaN基板４１側へ漏出する光（迷光）を吸収する役割を担う。
尚、本実施形態では、GaN迷光抑制平坦化層４２の層厚を約20nmとしたがこの層厚に限定されることはない。層厚が5nm程度以上であれば、GaN基板から漏出する迷光の抑制、およびGaN基板表面の凹凸の平坦化に対する効果がある。したがって、迷光抑制平坦化層４２

の層厚は、好ましくは、5nm以上200nm以下とする。さらに好ましくは、5nm以上100nm以下とする。迷光抑制平坦化層４２の層厚が200nmより大きい場合、結晶中に点欠陥が導入される等の結晶性劣化と、厚膜化により結晶表面の平坦性悪化が確認されるので好ましくない。また、迷光抑制平坦化層４２におけるMg不純物の濃度は、1×10^{17} cm^{-3}以上 $1\times10^{18}cm^{-3}$以下が好ましい。Mg不純物の濃度が$1\times10^{18}cm^{-3}$より大きいと、不純物の高濃度化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となることから好ましくない。さらに、Si不純物の濃度は、$2\times10^{17}cm^{-3}$以上$5\times10^{18}cm^{-3}$以下が好ましい。Si不純物の濃度が$5\times10^{18}cm^{-3}$より大きいと、不純物の高濃度化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となることから好ましくない。

【００５９】

本実施形態では、GaN迷光抑制平坦化層４２をGaN基板４１直上に配置したが、GaN基板４１と活性層４６の間、若しくはGaN基板４１とn型クラッド層４４の間に配置してもよい。このような構成であっても、GaN基板４１から漏出する迷光の抑制、およびGaN基板４１表面の凹凸の平坦化に対して同程度な効果がある。ただし、GaN基板４１の平坦化を図るという点のみからは、迷光抑制平坦化層４２は基板４１に近い位置に配置した方が好ましい。尚、迷光抑制平坦化層４２は一層のみでなく、GaN基板４１と活性層４６との間に複数層形成するようにしてもよい。

【００６０】

本実施形態では、ｎ型クラッド層４４及びｐ型クラッド層５０の各Al組成を7%としたが、各Al組成を3～5%に低減してもよい。クラッド層のAl組成を低減することで、GaN及びInGaNとの格子不整合度を緩和することができ、活性層４６に印加される歪を緩和でき、レーザ素子の信頼性をさらに改善することができる。

【００６１】

［実施例］

実施例２として、上述の第２の実施形態のレーザ素子２を作製し、下記の試験ａ）～ｅ）の試験対象として用いた。また、実施例１のレーザ素子１も試験対象として用いた。

【００６２】

ａ）Mg及びSi濃度分布の測定

実施例２のレーザ素子２において、GaN迷光抑制平坦化層４２付近のMgおよびSi濃度分布を２次イオン質量分析法（SIMS）により測定した。図１０に測定結果を示す。図１０は、レーザ素子２（試料）の表面からの深さに対するMg、Siの濃度を示す図である。図１０に示すように、GaN迷光抑制平坦化層４２において、Mg濃度ピークが約$2\times10^{17}cm^{-3}$、およびSi濃度ピークが約$1\times10^{18}cm^{-3}$であり、MgとSiが同時にドープされていることを確認できた。尚、実施例１のレーザ素子１をSIMS分析した結果、図１０のMg濃度分布と同等であった。

【００６３】

ｂ）レーザ特性の測定

実施例２のレーザ素子２に電流を注入し、電流－光出力特性を測定した。実施例２のレーザ素子２は、電流注入により室温で連続発振に到った。この際の閾値電流およびスロープ効率の平均は、実施例１のレーザ素子１と同様、各々35mA、1.4W/Aであった。

【００６４】

ｃ）動作電圧の測定

レーザ素子の動作電圧について、実施例２のレーザ素子２と、実施例１のレーザ素子１とを比較検討した。電流値50mAでの動作電圧は、レーザ素子１で4.8Vに対し、レーザ素子２では4.5Vであった。

【００６５】

レーザ素子１およびレーザ素子２ともに、n電極がGaN基板の研磨面側に形成されている。このため、n電極側から活性層へ注入される電子は、途中で迷光抑制平坦化層を通過する必要がある。この際、レーザ素子１と比較して、レーザ素子２ではMgドーピング（ｐ型不純物）だけでなくSi（n型不純物）も同時ドーピングされているために、電子の電気伝

導が容易な構造となっている。このため、レーザ素子２の方が、動作電圧が低減されることになると考えられる。

【００６６】

ｄ）相対雑音強度の測定

実施例２のレーザ素子２の各光出力（1～10mW）での相対雑音強度（RIN）を評価した。ただし、レーザ光が光ディスクに照射した際に発生する戻り光による雑音を低減するために、RIN測定時にはレーザに印加するバイアス（電流）に400MHz程度の高周波重畳を印加した。実施例２のレーザ素子２では、光出力が2.5mWにおけるRINは-135dB/Hz程度であった。

【００６７】

実施例２のレーザ素子２では、比較例１のレーザ素子１’と比較して低ノイズ化が達成されているといえる（第１の実施形態における試験ｃ）の結果参照）。この低ノイズ化は、活性層４６からGaN基板４１側へ漏出する自然放出光（迷光）がGaN迷光抑制平坦化層４２で顕著に吸収されることに起因していると推測される。

【００６８】

ｅ）一定光出力寿命試験

光出力50mWにおける消費電力（動作電流と動作電圧の積）が0.4W程度の実施例２のレーザ素子２を選別して、60℃の高温において50mWの高光出力での一定光出力（APC）寿命試験を実施した。その結果、実施例２のレーザ素子２での劣化率（動作電流の増加率）は１時間当たり0.001mA程度であり、3000時間以上の安定動作を確認した。また、レーザ素子１と同様に、この長寿命レーザ素子をGaN基板４１から選別できる歩留りはおおよそ70%程度である。

【００６９】

実施例２のレーザ素子２の長寿命化および高歩留り化は、GaN迷光抑制平坦化層４２の導入に起因していると考えられる。つまり、実施例１のレーザ素子１と同様に、GaN迷光抑制平坦化層４２の導入により、GaN基板表面の非平坦性が大幅に改善され（Mgドーピングによる平坦化効果）、レーザ特性の悪化および歩留り低下が解決できたものと推測される。

【００７０】

ｆ）迷光抑制平坦化層での光吸収の見積もり試験

GaN迷光抑制平坦化層での光吸収を見積もる試験を行った。試験用の試料として、第１の実施形態の試験ｅ）の試料１と試料２と、その他に試料３を準備した。試料３は、第２の実施形態と同じ結晶成長方法を用いて、GaN基板４１上にGaN迷光抑制平坦化層４２と同量のMg不純物濃度（約$2\times10^{17}cm^{-3}$）およびSi不純物濃度（約$1\times10^{18}cm^{-3}$）を有するGaN層を結晶成長した。ただし、第２の実施形態ではGaN迷光抑制平坦化層４２の層厚を約20nmとしたが、本試験では光吸収量を定量的に見積もるために意図的に厚くし、その層厚を約500nmとした。

【００７１】

試料１～試料３の吸収スペクトルを各々測定した。ただし、吸収スペクトルはキセノン（Xe）ランプを用いて、光干渉を抑制するような角度（ブリュースター角度）で測定した。図１１に、測定結果である試料１～３の吸収スペクトルを示す。図１１から、第２の実施形態のレーザ素子２の発振波長405nmでの吸収係数は、試料３において$100cm^{-1}$程度であったことがわかる。一方、試料１、２においては、その吸収係数はそれぞれ40 cm^{-1}および$1cm^{-1}$程度以下であった。

【００７２】

すなわち、本試験により、試料３、つまりｐ型不純物とn型不純物を同時にドーピングしたGaN迷光抑制平坦化層では、レーザ光の吸収が非常に大きく、活性層からGaN基板方向へ漏出する光を吸収抑制する効果が十分にあることが確認された。以上より、第２の実施形態のレーザ素子２においては、迷光抑制平坦化層４２を有することにより活性層４６からGaN基板４１方向へ漏出する光を吸収抑制する効果が十分にあることが確認された。

【００７３】
試料３でのレーザ光吸収効果は、GaN迷光抑制平坦化層にドーピングされているMgおよびSiがGaNの禁制帯幅中にアクセプター準位およびドナー準位を同時に形成することに起因していると考えられる。
【００７４】
（第３の実施形態）
本発明の第３の実施形態の窒化物半導体発光素子は、GaN系のレーザ素子である。図１２は、結晶成長工程まで終了した本実施形態のレーザ素子３の構成を示す断面図である。本実施形態のレーザ素子３は、第１の実施形態のレーザ素子１とは迷光抑制平坦化層の組成が異なる点以外は同じ構成である。すなわち、図１２に示すように、レーザ素子３は、GaN基板６１の上に、Mg及びCをドーピングしたGaNよりなる迷光抑制平坦化層６２、n型GaN層６３、n型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｎ型クラッド層６４、ｎ型GaNよりなる第１の光ガイド層６５、$In_{0.10}Ga_{0.90}N$／$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる多量子井戸活性層６６、$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる中間層６７、ｐ型$Al_{0.18}Ga_{0.82}N$よりなるキャップ層６８、p型GaNよりなる第２の光ガイド層６９、p型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｐ型クラッド層７０、p型GaNよりなるp型コンタクト層７１がこの順で積層されてなる。
【００７５】
本実施形態のレーザ素子３の結晶成長方法は、GaN迷光抑制平坦化層の結晶成長工程が異なる点以外は、第１の実施形態の半導体レーザ１と同じなので、GaN迷光抑制平坦化層６２の結晶成長工程のみを説明する。また、結晶成長後にSiO_2絶縁膜及び電極を形成する工程、へき開工程についても、第１の実施形態のレーザ素子１と同じなので図示及び説明を省略する。
【００７６】
酸洗浄後にMOVPE装置に搬送された（0001）面を主面とするGaN基板６１に対して、温度を約800℃にまで昇温して基板表面のサーマルクリーニングを行なう。次に、反応炉を約1000℃にまで昇温した後、GaN基板６１の主面上に、TMGとNH_3ガス、および窒素と水素の混合ガスをキャリアガスとして供給すると同時に、Cp_2Mgとプロパン（$CH_3CH_2CH_3$）ガスも供給する。$CH_3CH_2CH_3$ガスはGaN結晶への炭素ドープ源として用いる。
【００７７】
結晶成長初期の上記工程により、GaN基板６１上にGaN迷光抑制平坦化層６２が形成される。本実施形態では、Cp_2Mg および$CH_3CH_2CH_3$ガスの供給量と時間を制御して、厚さが約20nmでMg不純物濃度が約$2\times10^{17}cm^{-3}$およびC不純物濃度が約$1\times10^{18}cm^{-3}$のGaN迷光抑制平坦化層６２を成長する。このGaN迷光抑制平坦化層６２は、レーザ動作において、活性層６６からGaN基板６１側へ漏出する光（迷光）を吸収する役割を担う。
【００７８】
尚、本実施形態では、GaN迷光抑制平坦化層６２の層厚を約20nmとしたがこの層厚に限定されることはない。層厚が5nm程度以上であれば、GaN基板から漏出する迷光の抑制、およびGaN基板表面の凹凸の平坦化に対する効果がある。したがって、迷光抑制平坦化層６２の層厚は、好ましくは、5nm以上200nm以下とする。さらに好ましくは、5nm以上100nm以下とする。迷光抑制平坦化層６２の層厚が200nmより大きい場合、結晶中に点欠陥が導入される等の結晶性劣化と、厚膜化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。
【００７９】
さらに、迷光抑制平坦化層６２におけるMg不純物の濃度は、$1\times10^{17}cm^{-3}$以上$1\times10^{18}cm^{-3}$以下が好ましい。Mg不純物の濃度が$1\times10^{18}cm^{-3}$より大きいと、不純物の高濃度化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。また、迷光抑制平坦化層６２におけるC不純物濃度は、$2\times10^{17}cm^{-3}$以上$5\times10^{18}cm^{-3}$以下が好ましい。C不純物濃度が$5\times10^{18}cm^{-3}$より大きいと、不純物の高濃度化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。本実施形態では、GaN迷光抑制平坦化層６２をGaN基板６１直上に配置したが、GaN基板６１と活性層６６の間、若しくはGaN基板６１とn型クラッド層６４の間に配

置してもよい。このような構成であっても、GaN基板６１から漏出する迷光の抑制、およびGaN基板６１表面の凹凸の平坦化に対して同程度の効果がある。ただし、GaN基板６１の平坦化を図るという点からは、迷光抑制平坦化層６２は基板６１に近い位置に配置した方が好ましい。尚、迷光抑制平坦化層６２は一層のみでなく、GaN基板６１と活性層６６との間に複数層形成するようにしてもよい。

【００８０】

本実施形態では、ｎ型クラッド層６４及びｐ型クラッド層７０の各Al組成を7%としたが、各Al組成を3～5%に低減してもよい。クラッド層のAl組成を低減することで、GaN及びInGaNとの格子不整合度を緩和することができ、活性層６６に印加される歪を緩和でき、レーザ素子の信頼性をさらに改善することができる。

【００８１】

尚、本実施形態では、$CH_3CH_2CH_3$ガスをGaN結晶への炭素ドープ源として用いたが、四臭化炭素（CBr_4）を用いてもよい。

【００８２】

［実施例］

実施例３として、上述の第３の実施形態のレーザ素子３を作製し、下記の試験ａ）～ｃ）の試験対象として用いた。

【００８３】

ａ）レーザ特性の測定

実施例３のレーザ素子３に電流を注入し、電流－光出力特性を測定した。実施例３のレーザ素子３は、電流注入により室温連続発振に到った。この際の閾値電流およびスロープ効率の平均は、実施例１のレーザ素子１と同様、各々35mA、1.4W/Aであった。

【００８４】

ｂ）相対雑音強度の測定

実施例３のレーザ素子３の各光出力（1～10mW）での相対雑音強度（RIN）を評価した。ただし、レーザ光が光ディスクに照射した際に発生する戻り光による雑音を低減するために、RIN測定時にはレーザに印加するバイアス（電流）に400MHz程度の高周波重畳を印加した。実施例３のレーザ素子３では、光出力が2.5mWにおけるRINは-135dB/Hz程度であった。

【００８５】

実施例３のレーザ素子３では、比較例１のレーザ素子１’と比較して低ノイズ化が達成されているといえる（第１の実施形態における試験ｃ）の結果参照）。この低ノイズ化は、活性層６６からGaN基板６１側へ漏出する自然放出光（迷光）がGaN迷光抑制平坦化層６２で顕著に吸収されることに起因していると推測される。

【００８６】

ｂ）一定光出力寿命試験

光出力50mWにおける消費電力（動作電流と動作電圧の積）が0.4W程度の実施例３のレーザ素子３を選別して、60℃の高温において50mWの高光出力での一定光出力（APC）寿命試験を実施した。その結果、実施例３のレーザ素子３での劣化率（動作電流の増加率）は１時間当たり0.001mA程度であり、3000時間以上の安定動作を確認した。

【００８７】

（第４の実施形態）

本発明の第４の実施形態の窒化物半導体発光素子は、GaN系のレーザ素子である。本実施形態のレーザ素子は、GaN迷光抑制平坦化層にMgとCと同時にSiもドーピングすること以外は、上記第３の実施形態のレーザ素子３と同様である。GaN基板上に形成するGaN迷光抑制平坦化層は、Cp_2Mg と$CH_3CH_2CH_3$ガスおよびSiH_4ガスの供給量と時間を制御して、厚さが約20nmでMg不純物濃度が約$2\times10^{17}cm^{-3}$、Si不純物濃度が約$1\times10^{18}cm^{-3}$、およびC不純物濃度が約$5\times10^{17}cm^{-3}$のGaN迷光抑制平坦化層を成長する。このGaN迷光抑制平坦化層は、レーザ動作において、活性層からGaN基板側へ漏出する光（迷光）を吸収する役割を担う。他の構成、及び作製方法については、第３の実施形態と同じなので、説明を省略する

。

【００８８】

本実施形態では、GaN迷光抑制平坦化層の層厚を約20nmとしたがこの層厚に限定されることはない。層厚が5nm程度以上であれば、GaN基板から漏出する迷光の抑制、およびGaN基板表面の凹凸の平坦化に対する効果がある。したがって、迷光抑制平坦化層の層厚は、好ましくは、5nm以上200nm以下とする。さらに好ましくは、5nm以上100nm以下とする。迷光抑制平坦化層の層厚が200nmより大きい場合、結晶中に点欠陥が導入される等の結晶性劣化と、厚膜化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。

【００８９】

さらに、迷光抑制平坦化層におけるMg不純物の濃度は、$1\times10^{17}cm^{-3}$以上$1\times10^{18}cm^{-3}$以下が好ましい。Mg不純物の濃度が、$1\times10^{18}cm^{-3}$より大きいと、不純物の高濃度化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。Si不純物の濃度は、2×10^{17} cm^{-3}以上$5\times10^{18}cm^{-3}$以下が好ましい。Si不純物の濃度が$5\times10^{18}cm^{-3}$より大きいと、不純物の高濃度化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。C不純物の濃度も同様に$2\times10^{17}cm^{-3}$以上5×10^{18} cm^{-3}以下が好ましい。本実施形態では、GaN迷光抑制平坦化層をGaN基板直上に配置したが、GaN基板と活性層の間、若しくはGaN基板とn型クラッド層の間に配置してもよい。このような構成であっても、GaN基板から漏出する迷光の抑制、およびGaN基板表面の凹凸の平坦化に対して同程度な効果がある。ただし、GaN基板の平坦化を図るという点からは、迷光抑制平坦化層は基板に近い位置に配置した方が好ましい。尚、迷光抑制平坦化層は一層のみでなく、GaN基板と活性層との間に複数層形成するようにしてもよい。

【００９０】

尚、本実施形態では、$CH_3CH_2CH_3$ガスをGaN結晶への炭素ドープ源として用いたが、四臭化炭素（CBr_4）を用いてもよい。

【００９１】

［実施例］

実施例４として、上述の第４の実施形態のレーザ素子を作製し、下記の試験ａ）～ｃ）の試験対象として用いた。試験結果については、実施例３のレーザ素子３と比較して記載する。

【００９２】

ａ）レーザ特性の測定

実施例４のレーザ素子に電流を注入し、電流－光出力特性を測定した。実施例４のレーザ素子は、電流注入により室温連続発振に到った。この際の閾値電流およびスロープ効率の平均は、実施例３のレーザ素子３と同様、各々35mA、1.4W/Aであった。

【００９３】

ｂ）相対雑音強度の測定

実施例４のレーザ素子の各光出力（1～10mW）での相対雑音強度（RIN）を評価した。ただし、レーザ光が光ディスクに照射した際に発生する戻り光による雑音を低減するために、RIN測定時にはレーザに印加するバイアス（電流）に400MHz程度の高周波重畳を印加した。実施例４のレーザ素子では、光出力が2.5mWにおけるRINは-138dB/Hz程度であった。

【００９４】

実施例３のレーザ素子３と比較して、実施例４のレーザ素子のいっそうの低ノイズ化は、活性層からGaN基板側へ漏出する自然放出光（迷光）がGaN迷光抑制平坦化層で顕著に吸収されることに起因していると推測される。

【００９５】

ｃ）一定光出力寿命試験

光出力50mWにおける消費電力（動作電流と動作電圧の積）が0.4W程度の実施例４のレーザ素子を選別して、60℃の高温において50mWの高光出力での一定光出力（APC）寿命試験を実施した。その結果、実施例４のレーザ素子での劣化率（動作電流の増加率）は１時間当たり0.001mA程度であり、3000時間以上の安定動作を確認した。

【００９６】
ｄ）迷光抑制平坦化層での光吸収の見積もり試験
GaN迷光抑制平坦化層での光吸収を見積もることを試みた。試験用の試料として、第３の実施形態のレーザ素子３における光吸収を見積もるための試料４と、第４の実施形態のレーザ素子における光吸収を見積もるための試料５を準備した。
【００９７】
試料４は、第３の実施形態と同じ結晶成長方法を用いて、GaN基板６１上にGaN迷光抑制平坦化層６２と同量のMg不純物濃度（約$2\times10^{17}cm^{-3}$）およびC不純物濃度（約$1\times10^{18}cm^{-3}$）を有するGaN層を結晶成長した。試料５は、第４の実施形態と同じ結晶成長方法を用いて、GaN基板上に第４の実施形態のGaN迷光抑制平坦化層と同量のMg不純物濃度（約$2\times10^{17}cm^{-3}$）とC不純物濃度（約$1\times10^{18}cm^{-3}$）およびSi不純物濃度（約$1\times10^{18}cm^{-3}$）を有するGaN層を結晶成長した。ただし、第３及び第４の実施形態のレーザ素子ではGaN迷光抑制平坦化層の層厚を約20nmとしたが、本補足実験例では光吸収量を定量的に見積もるために意図的に厚くし、その層厚を約500nmとした。
【００９８】
試料４及び試料５の吸収スペクトルを各々測定した。ただし、吸収スペクトルはキセノン（Xe）ランプを用いて、光干渉を抑制するような角度（ブリュースター角度）で測定した。図１３に、測定結果である試料４，５の吸収スペクトルを示す。図１３から、試料４において、第３の実施形態のレーザ素子３の発振波長405nmでの吸収係数は$100cm^{-1}$程度にもなることがわかる。また、試料５において、第４の実施形態のレーザ素子の発振波長405nmでの吸収係数は$200cm^{-1}$程度にもなることがわかる。
【００９９】
すなわち、本試験により、試料４、すなわちｐ型不純物と炭素とを同時にドーピングしたGaN迷光抑制平坦化層では、レーザ光の吸収が非常に大きく、試料５、すなわちｐ型不純物と炭素およびn型不純物を同時ドーピングしたGaN迷光抑制平坦化層では、レーザ光の吸収がさらに大きく、活性層からGaN基板方向へ漏出する光を吸収抑制する効果が十分にあることが確認された。
【０１００】
試料４でのレーザ光吸収効果は、GaN迷光抑制平坦化層にドーピングされているMgおよびSiがGaNの禁制帯幅中にアクセプター準位およびドナー準位を同時に形成することに起因していると推測され、試料５でのレーザ光吸収効果は、GaN迷光抑制平坦化層にドーピングされているMg、CおよびSiがGaNの禁制帯幅中に複雑で多数のアクセプター準位およびドナー準位を同時に形成することに起因していると推測される。
（第５の実施形態）
本発明の第５の実施形態の窒化物半導体発光素子は、GaN系のレーザ素子である。図１４は、本実施形態のレーザ素子５の構成を模式的に示す断面図である。図１４に示すように、レーザ素子５は、GaN基板８１を有している。GaN基板８１の表面に凹凸が形成されており、その凹部を被覆するように選択成長のマスキング膜としてのSiO_2膜が被覆されている。GaN基板８１の凸部は、GaNが露出しており、かかる露出部分に横方向に選択成長したGaN膜８３が形成されている。そして、GaN膜８３上に、Mgをドーピングしたn型GaNよりなる迷光抑制平坦化層８４、n型GaN層８５、n型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｎ型クラッド層８６、ｎ型GaNよりなる第１の光ガイド層８７、$In_{0.10}Ga_{0.90}N$／$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる多量子井戸活性層８８、$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなる中間層８９、ｐ型$Al_{0.18}Ga_{0.82}N$よりなるキャップ層９０、p型GaNよりなる第２の光ガイド層９１、p型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｐ型クラッド層９２、p型GaNよりなるp型コンタクト層９３がこの順で積層されてなる。そして、活性層８８上の一部の層が特定の領域において除去されており、除去されていない領域がリッジとなっている。リッジ上を除いて、SiO_2膜９７が堆積されており、リッジ上およびSiO_2膜９７上に、パラジウム（Pd）と白金（Pt）と金（Au）からなるｐ電極９８が形成されている。また、ｎ型GaN層８５の一部が露出されて、チタン(Ti)と白金（Pt）と金（Au）からなるn電極９９が形成されている。GaN基板８１の上面には凹凸が形成され、凸部の頂

面以外はSiO_2膜が形成されている。GaN基板８１のかかる構成については、後から詳述する。

【０１０１】

次に、本実施形態のレーザ素子５の製造方法について説明する。図１５は、結晶成長過程まで終了したレーザ素子５の構成を模式的に示す断面図であり、図１６は、GaN基板８１の加工工程を模式的に示す断面図である。図１６（ａ）に示すように、（0001）面を主面とするGaN基板８１上にSiO_2からなる絶縁膜９４をスパッタ法で堆積する。その後、図１６（ｂ）に示すようにレジスト膜９５を堆積し、図１６（ｃ）に示すようにフォトリソグラフィー法により開口幅15μmでマスク幅3μmのみにレジスト膜９５が残るようなラインアンドスペースの周期を形成する。その後、図１６（ｄ）に示すようにレジスト膜９５をエッチングマスクとして、レジスト除去部のSiO_2膜９４をフッ酸溶液で除去し、GaN基板８１主面を露出させる。

【０１０２】

次に、図１６（ｅ）に示すようにアセトン溶液でレジスト膜９５を除去した後、SiO_2膜９４をマスクとして、ドライエッチングによりGaN基板８１を深さ１μm程度エッチングすることで、図１６（ｆ）に示すようにGaN基板８１の主面に周期的な凹凸を形成する。続いて、図１６（ｇ）に示すように、GaN基板８１の凸部上のSiO_2膜９４をフッ酸溶液で除去する。この後、図１６（ｈ）に示すように、凹凸が形成されたGaN基板８１の主面上に選択成長用マスキング膜であるSiO_2膜８２をスパッタ法で堆積する。次に、図１６（ｉ）に示すように、SiO_2膜８２上にレジスト膜９６を塗布した後、レジストエッチバック法により凸部上のSiO_2膜８２のみを露出させる。続いて、図１６（ｊ）に示すように、レジスト膜９６をエッチングマスクとしてレジスト除去部の凸部上のSiO_2膜８２をフッ酸溶液で除去し、GaN基板８１主面を露出させた後、図１６（ｋ）に示すように、アセトン溶液でレジスト膜９６を除去する。この結果、GaN基板８１の主面には凹凸が形成され、凸部の頂面以外はSiO_2膜８２が堆積された状態となる。

【０１０３】

次に、結晶成長工程に移行する。上記のGaN基板８１をMOVPE装置の反応炉内のサセプタに保持し、反応炉を真空排気する。続いて、反応炉内を圧力300Torrの窒素雰囲気とし、温度を約800℃にまで昇温して基板８１を加熱し表面のサーマルクリーニングを行なう。このサーマルクリーニング工程により、GaN基板８１表面の異物および酸化物を除去することが可能である。尚、この工程では、水素も添加して窒素と水素の混合雰囲気としてもよい。

【０１０４】

次に、反応炉を約1000℃にまで昇温した後、供給量7sccmのTMG、供給量が7.5slmのNH_3ガス、および窒素と水素の混合ガスをキャリアガスとして供給する。この段階で、GaN膜８３の結晶成長が基板８１の頂面（SiO_2膜除去領域）から選択的に開始する。やがて、GaN膜８３は、基板８１の凹部に空間（エアギャップ）を形成しながら基板平行方向にELO成長し、最終的にGaN膜８３が凹部中央付近で合体し平坦化する。

【０１０５】

尚、GaN基板８１上の結晶成長において、微小に制限した領域から選択的にELO成長させる上記技術を適用することにより、GaN基板８１主面に存在するスクラッチ等の研磨傷による凹凸の影響を軽減することが可能になる。

【０１０６】

続く結晶成長工程では、GaN膜８３上にｐ型GaN迷光抑制平坦化層８４が形成される。本実施形態では、Cp_2Mgガスの供給量と時間を制御して、厚さが約20nmでMg不純物濃度が約$2\times10^{17}cm^{-3}$のp型GaN迷光抑制平坦化層８４を成長する。このp型GaN迷光抑制平坦化層８４は、レーザ動作において、活性層８８からGaN基板８１側へ漏出する光（迷光）を吸収する役割を担う。

【０１０７】

続いて、Cp_2Mgガスの供給のみを停止して、SiH_4ガスを供給することにより、厚さが約3

μｍでSi不純物濃度が約5×$10^{17}$$cm^{-3}$のｎ型GaN層８５を成長する。次に、TMAも供給することで、厚さが約1.2μｍでSi不純物濃度が約5×$10^{17}$$cm^{-3}$のｎ型$Al_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｎ型クラッド層８６を成長する。続いて、厚さが約120nmでSi不純物濃度が約5×$10^{17}$$cm^{-3}$のn型GaNよりなる第１の光ガイド層８７を成長した後、温度を約800℃にまで降温し、キャリアガスを窒素のみに変更して、トリメチルインジウム（TMI）とTMGを供給して厚さが約3nmの$In_{0.10}Ga_{0.90}N$よりなる量子井戸層（3層）と、厚さが約7nmの$In_{0.02}Ga_{0.98}N$よりなるバリア層（2層）からなる多重量子井戸活性層８８を成長する。

【０１０８】

引き続いて、厚さが約100nmの$In_{0.02}Ga_{0.98}N$ よりなる中間層８９を成長する。尚、この中間層８９は、不純物を添加しないアンドープ層とする。アンドープ中間層８９は、活性層８８中にp型ドーパントであるMgが拡散等で混入することを防止する役割と、レーザ動作時にMgによる光吸収損失を低減する役割を担っている。

【０１０９】

その後、再び反応炉内の温度を約1000℃にまで昇温しキャリアガスに水素も混合して、Cp_2MgガスとTMGガスを供給した後、TMAガスも供給して厚さが約20nmでMg不純物濃度が約1×$10^{19}$$cm^{-3}$のp型 $Al_{0.18}Ga_{0.82}N$ よりなるキャップ層９０を成長する。

【０１１０】

尚、本実施形態では、Cp_2Mgガスをキャップ層９０の成長前に供給する。ｐ型AlGaN層は、キャップ層９０のようにAl組成が増加する程、高抵抗化することが知られている。さらに、MOVPE装置の反応管が石英で構成されている場合、反応管に供給したMgが石英と反応することで、所望のMg濃度を含んだ半導体が得られないことがある（メモリー効果）。このため、本実施形態のように、Cp_2Mgガスをキャップ層９０の成長前に供給しておくことで、上記メモリー効果によるMgドーピング遅れを緩和して、キャップ層９０の高抵抗化を抑制できる。さらに、キャップ層９０の成長前に供給するCp_2Mgガスを、成長時に供給するCp_2Mgガスよりも多く設定することで、上記メモリー効果をさらに緩和することができる。また、前記キャップ層９０は、引き続くｐ型クラッド層の成長中に活性層８８からInが蒸発することを防止する役割と、電流注入時にｎ型層から活性層へ注入された電子がｐ型層へオーバーフローすることを防止する役割を担っている。

【０１１１】

本実施形態では、前記キャップ層９０の層厚を約20nmとしたが、層厚はこれに限定されることはない。層厚が約10nm程度までは電子オーバーフロー防止効果が顕著であったので、好ましくは10nm以上とする。また、本実施形態では、前記キャップ層９０のAl組成を18%としたが、Al組成はこれに限定されることはない。キャップ層９０のAl組成は、10%程度までは電子オーバーフロー防止効果が顕著であったので、好ましくは10%以上とする。

【０１１２】

次に、厚さが約100nmでMg不純物濃度が約1×$10^{19}$$cm^{-3}$のp型 GaNよりなる第２の光ガイド層９１を成長する。続いて、厚さが約0.5μｍでMg不純物濃度が約1×$10^{19}$$cm^{-3}$のｐ型$l_{0.07}Ga_{0.93}N$よりなるｐ型クラッド層９２を成長する。最後に、厚さが約60nmでMg不純物濃度が約1×$10^{19}$$cm^{-3}$のp型GaNよりなるｐ型コンタクト層９３を成長する。ここで、好ましくはｐ型コンタクト層９３の約10nm程度の最表面のMg濃度をさらに増加する（例えば約1×$10^{20}$$cm^{-3}$）。このようにすると、ｐ電極９８とのコンタクト抵抗を大幅に低減することが可能となり、レーザ素子５の動作電圧の低減、すなわち長寿命化に寄与することになる。

【０１１３】

引続く電極形成等のプロセスは、リッジ構造をGaN膜８３の低転位領域に形成すること、およびn電極９９をp電極９８側で形成すること以外は上記第１の実施形態と同様である。尚、リッジ構造をGaN膜８３の低転位領域に形成する理由は、レーザ動作時に電流が供給される領域がリッジ部であるために、リッジ部の活性層領域が低転位であれば、転位に起因する非発光再結合が抑制され発光に寄与しないリーク電流が減少し、長寿命化できるためである。また、n電極９９をp電極９８側で形成する理由は、GaN基板８１とGaN膜８３

との間には空間（エアギャップ）が存在しているために、電極を基板８１の研磨面に形成した場合は電流通路が制限され動作電圧が顕著に増加するためである。

【０１１４】

尚、本実施形態では、空間（エアギャップ）を形成して低転位化を図ったが、GaN基板に凹凸加工を施すことなく、基板上に絶縁膜を形成するのみでELO選択成長させて低転位化させてもよい。

【０１１５】

また、本実施形態では、ｐ型GaN迷光抑制平坦化層８４の層厚を約20nmとしたがこれに限定されることはない。層厚が5nm程度以上であれば、GaN基板から漏出する迷光の抑制、およびGaN膜８３の表面の凹凸を平坦化する効果がある。したがって、迷光抑制平坦化層８４の層厚は、好ましくは、5nm以上200nm以下とする。さらに好ましくは、5nm以上100nm以下とする。迷光抑制平坦化層８４の層厚が200nmより大きい場合、結晶中に点欠陥が導入される等の結晶性劣化と、厚膜化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。

【０１１６】

さらに、迷光抑制平坦化層８４におけるMg不純物の濃度は、$1\times10^{17}cm^{-3}$以上$1\times10^{18}cm^{-3}$以下が好ましい。Mg不純物の濃度が、$1\times10^{18}cm^{-3}$より大きいと、不純物の高濃度化により結晶表面の平坦性悪化が顕著となるので好ましくない。

【０１１７】

尚、本実施形態では、ｐ型GaN迷光抑制平坦化層８４をGaN膜８３上に配置したが、これに限定されることはない。また、迷光抑制平坦化層８４は一層のみでなく、GaN基板８１と活性層８８との間に複数層形成するようにしてもよい。

【０１１８】

図１７に迷光抑制平坦化層８４を他の位置に配置したレーザ素子５’の例を示す。図１７は、結晶成長工程まで終了したレーザ素子５’の構成を示す断面図である。図１７に示すように、ｐ型GaN迷光抑制平坦化層８４をGaN基板８１の凸部の頂面に配置することで、GaN膜８３の成長初期からの表面平坦化が顕著に促進され、レーザ特性改善が可能になる。

【０１１９】

尚、上記第２および上記第３の実施形態と同様に、ｐ型GaN迷光抑制平坦化層８４にSiおよびCも同時ドーピングしてもよい。このような構成であっても、十分な迷光抑制効果を得ることができる。

【０１２０】

また、本実施形態では、ｎ型クラッド層８６及びｐ型クラッド層９２の各Al組成を7%としたが、各Al組成を3～5%に低減してもよい。クラッド層のAl組成を低減することで、GaN及びInGaNとの格子不整合度を緩和することができ、活性層８８に印加される歪を緩和でき、レーザ素子の信頼性をさらに改善することができる。

【０１２１】

［実施例］

実施例５として、上述の第５の実施形態のレーザ素子５を作製し、下記の試験ａ）～ｅ）の試験対象として用いた。

【０１２２】

ａ）GaN膜での貫通転位密度の測定

SEMを用いたカソードルミネッセンス法で転位密度を評価すると、基板８１の凸部では暗点が$2\times10^{6}cm^{-2}$程度であるが、凹部では$7\times10^{4}cm^{-2}$程度になっていた（転位は暗点として観察される）。この結果、GaN膜８３は、基板８１の凸部では基板８１の欠陥（貫通転位）を引継ぐことになるが、凹部のELO領域では転位が激減していることがわかる。

【０１２３】

ｂ）結晶積層断面の透過電子顕微鏡による観察

実施例５のレーザ素子５の結晶成長終了後の積層断面を透過電子顕微鏡（TEM）で観察

した（図示せず）。その結果、GaN膜８３の表面には選択成長（ELO成長）に起因する凹凸が見られるが、ｐ型GaN迷光抑制平坦化層８４の表面では凹凸が大幅に減少していることが確認された。

【０１２４】

これは、GaN膜８３上にGaN結晶を成長する際にMgをドーピングすることで、基板に平行方向のELO成長が顕著に促進されるために、GaN膜８３の表面に形成されている凹凸が成長初期段階で平坦化されることに起因していると推測される。この結晶表面平坦化は、活性層８８である量子井戸層を平坦化し量子効果を顕著化することになるため、閾値電流の低減等のレーザ特性向上に寄与する。

【０１２５】

ｃ）レーザ特性の測定

実施例５のレーザ素子５に電流を注入し、電流－光出力特性を測定した。実施例５のレーザ素子５は、電流注入により室温連続発振に到った。この際の閾値電流およびスロープ効率の平均は、各々30mA、1.5W/Aであった。実施例１のレーザ素子１と比較して、転位密度が減少した結果、各特性が向上したものと推測される。

【０１２６】

ｄ）相対雑音強度の測定

実施例５のレーザ素子５について、各光出力（1～10mW）での相対雑音強度（RIN）を評価した。ただし、レーザ光が光ディスクに照射した際に発生する戻り光による雑音を低減するために、RIN測定時にはレーザに印加するバイアス（電流）に400MHz程度の高周波重畳を印加した。実施例５のレーザ素子５は、実施例１のレーザ素子１と同様に、光出力が2.5mWにおけるRINは-135dB/Hz程度であった。このレーザ素子６の低ノイズ化（例えば、比較例１のレーザ素子１’との比較）は、活性層８８からGaN基板８１側へ漏出する自然放出光（迷光）がｐ型GaN迷光抑制平坦化層８４で吸収されることに起因していると推測される。

【０１２７】

ｅ）一定光出力寿命試験

光出力50mWにおける消費電力（動作電流と動作電圧の積）が0.4W程度の実施例５のレーザ素子５を選別して、60℃の高温において50mWの高光出力での一定光出力（APC）寿命試験を実施した。その結果、実施例５のレーザ素子５での劣化率（動作電流の増加率）は１時間当たり0.001mA程度以下であり、5000時間以上の安定動作を確認した。GaN迷光抑制平坦化層８４の導入により、GaN膜８３表面の非平坦性が大幅に改善され（Mgドーピングによる平坦化効果）、レーザ特性の悪化および歩留り低下が解決できたものと推測される。

【０１２８】

上記各実施形態の迷光抑制平坦化層１２，４２，６２，８４は、さらに酸素(O)がドーピングされている構成であっても良い。このような構成の場合では、Mgが酸化反応を起こし光吸収効果が増加するため、さらなる迷光抑制効果を得ることができる。

【産業上の利用可能性】

【０１２９】

本発明は、低ノイズ化、長寿命化が図られ、高い特性を有する窒化物半導体素子を提供できるので有用である。また、高い歩留まりで、上記窒化物半導体素子を提供することができるので、さらに有用である。

【図面の簡単な説明】

【０１３０】

【図１】第１の実施形態のレーザ素子の構成を模式的に示す断面図。

【図２】結晶工程まで終了した第１の実施形態のレーザ素子の構成を模式的に示す断面図。

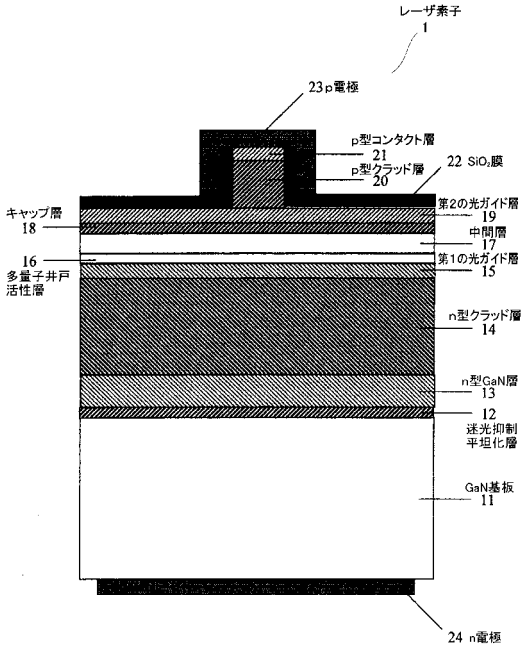
【図３】結晶工程まで終了した比較例１のレーザ素子の構成を模式的に示す断面図。

【図４】実施例１のレーザ素子の電流－光出力特性を示す図。

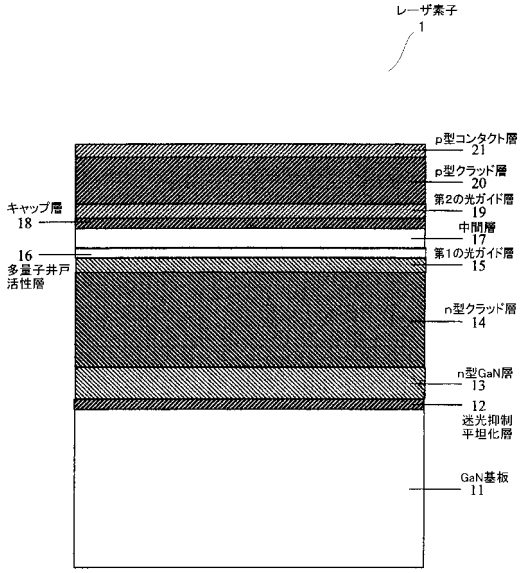
【図５】実施例１のレーザ素子の光出力－RINを示す図。

【図６】比較例１のレーザ素子の光出力－RINを示す図。
【図７】試料１の構成を示す断面図。
【図８】試料１、２の吸収スペクトルを示す図。
【図９】結晶成長工程まで終了した第２の実施形態のレーザ素子の構成を模式的に示す断面図。
【図１０】実施例２のレーザ素子の表面から深さに対するMg、Siの濃度を示す図。
【図１１】試料１～３の吸収スペクトルを示す図。
【図１２】結晶成長工程まで終了した第３の実施形態のレーザ素子の構成を模式的に示す断面図。
【図１３】試料４、５の吸収スペクトルを示す図。
【図１４】第５の実施形態のレーザ素子の構成を模式的に示す断面図である。
【図１５】結晶成長工程まで終了した第５の実施形態のレーザ素子の構成を模式的に示す断面図。
【図１６】第５の実施形態のGaN基板の加工工程を模式的に示す断面図。
【図１７】結晶成長工程まで終了した第５の実施形態の図１５とは異なる形態のレーザ素子の構成を模式的に示す断面図。
【符号の説明】
【０１３１】
１，１’，２，３，５，５’　レーザ素子
１１，２７，４１，６１，８１　GaN基板
１２，４２，６２，８４　迷光抑制平坦化層
１３，２８，４３，６３，８５　n型GaN層
１４，２９，４４，６４，８６　n型クラッド層
１５，３０，４５，６５，８７　第１の光ガイド層
１６，３１，４６，６６，８８　多量子井戸活性層
１７，３２，４７，６７，８９　中間層
１８，３３，４８，６８，９０　キャップ層
１９，３４，４９，６９，９１　第２の光ガイド層
２０，３５，５０，７０，９２　p型クラッド層
２１，３６，５１，７１，９３　p型コンタクト層
２２　SiO_2膜
２３，９８　p電極
２４，９９　n電極
２５　GaN基板
２６　MgドーピングGaN層
８２　SiO_2膜
８３　GaN膜
９４　絶縁膜
９５，９６　レジスト膜
９７　SiO_2膜

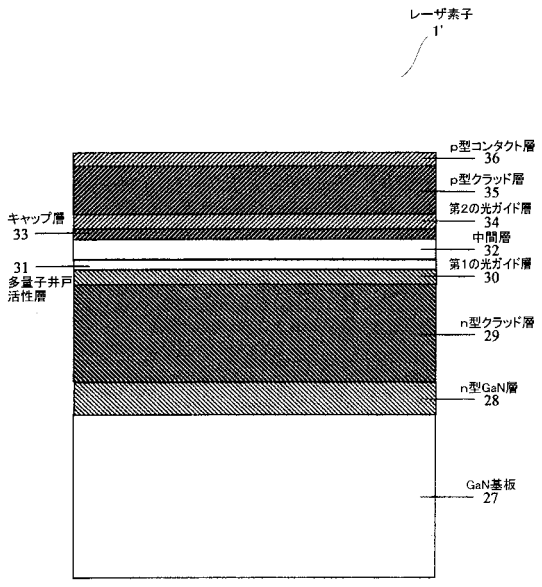
【図１】


レーザ素子
1
23 p電極
p型コンタクト層
21
p型クラッド層
20
22 SiO_2膜
キャップ層
18
第2の光ガイド層
19
中間層
17
16
多量子井戸
活性層
第1の光ガイド層
15
n型クラッド層
14
n型GaN層
13
12
迷光抑制
平坦化層
GaN基板
11
24 n電極

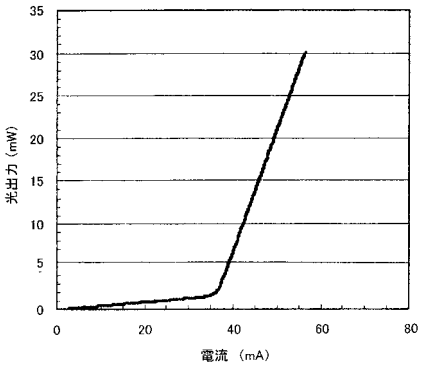
【図２】


レーザ素子
1
p型コンタクト層
21
p型クラッド層
20
キャップ層
18
第2の光ガイド層
19
中間層
17
16
多量子井戸
活性層
第1の光ガイド層
15
n型クラッド層
14
n型GaN層
13
12
迷光抑制
平坦化層
GaN基板
11

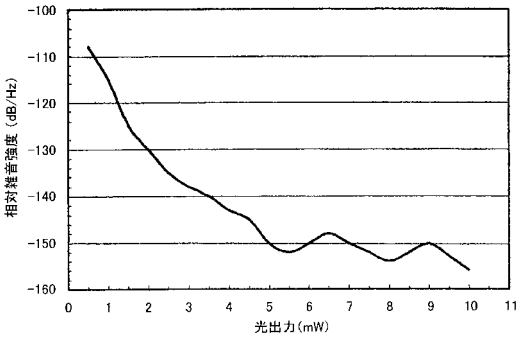
【図３】


レーザ素子
1'
p型コンタクト層
36
p型クラッド層
35
キャップ層
33
第2の光ガイド層
34
中間層
32
31
多量子井戸
活性層
第1の光ガイド層
30
n型クラッド層
29
n型GaN層
28
GaN基板
27

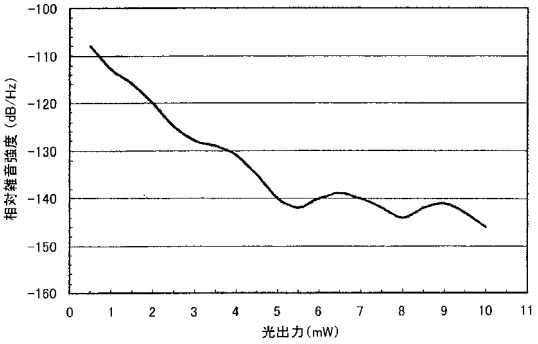
【図４】


光出力（mW）
35
30
25
20
15
10
5
0
0
20
40
60
80
電流（mA）

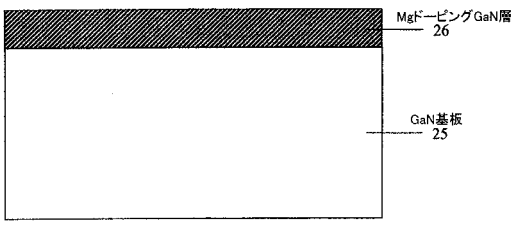
【図５】


相対雑音強度（dB/Hz）
光出力（mW）

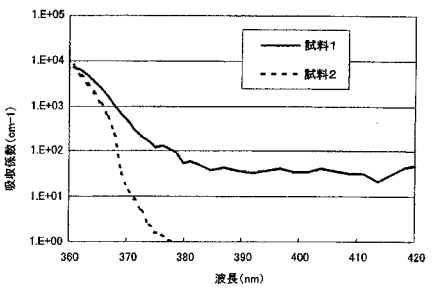
【図６】


相対雑音強度（dB/Hz）
光出力（mW）

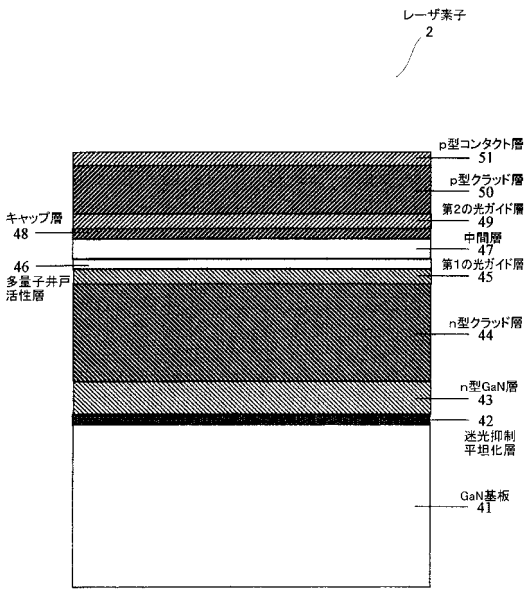
【図７】


Mgドーピング GaN層
26
GaN基板
25

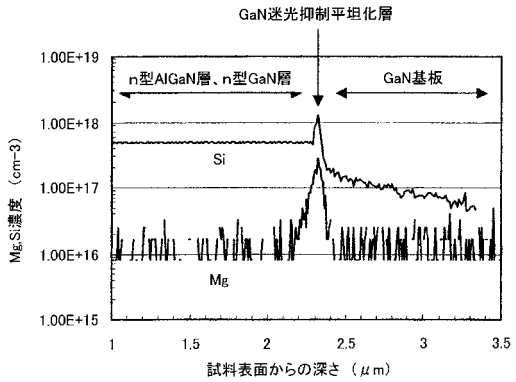
【図８】


試料1
試料2
吸収係数（cm-1）
波長（nm）

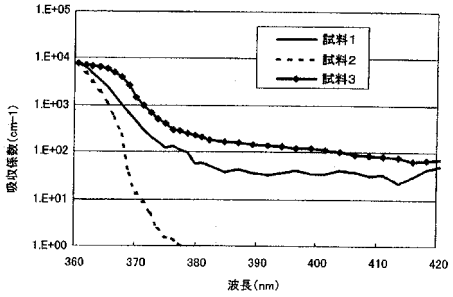
【図９】


レーザ素子
2
p型コンタクト層
51
p型クラッド層
50
第2の光ガイド層
49
キャップ層
48
中間層
47
46
第1の光ガイド層
45
多量子井戸
活性層
n型クラッド層
44
n型GaN層
43
42
迷光抑制
平坦化層
GaN基板
41

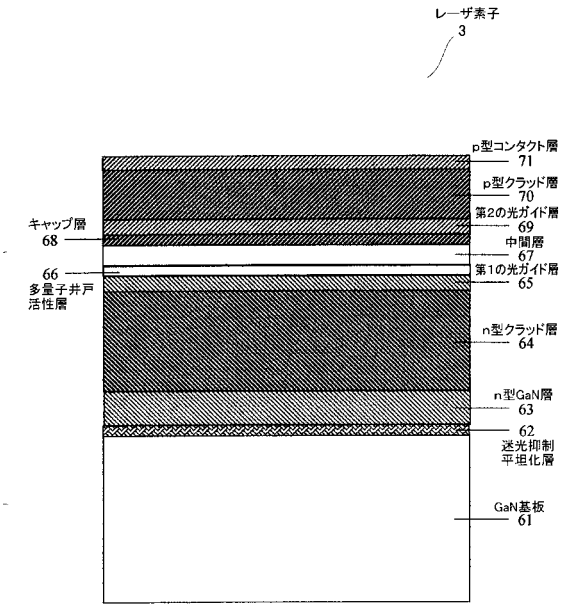
【図１０】



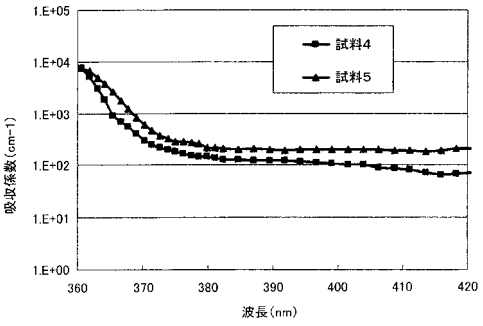
【図１１】



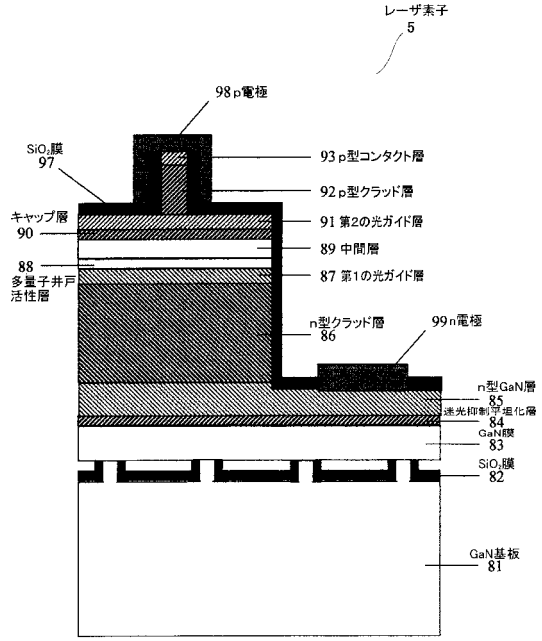
【図１２】



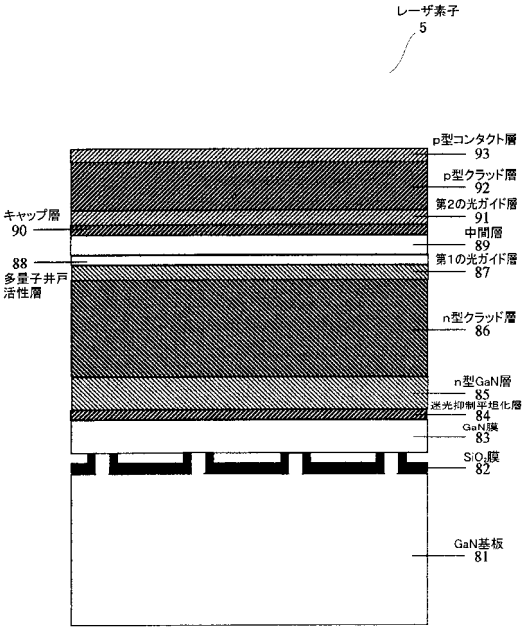
【図１３】



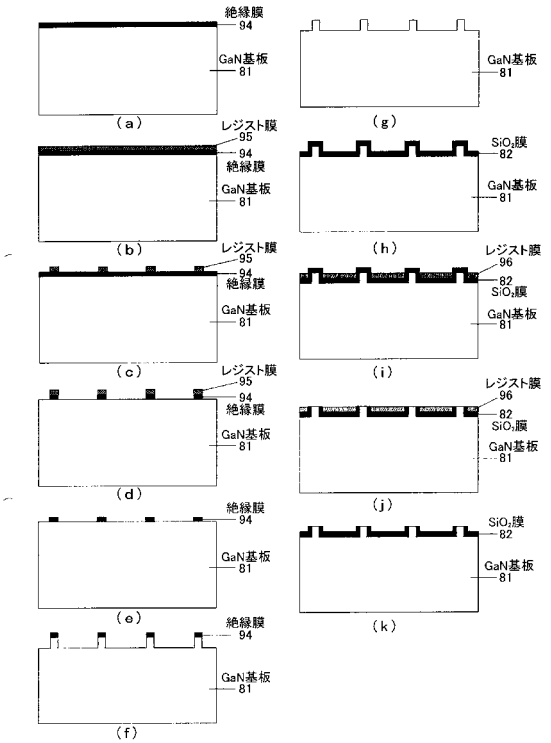
【図１４】



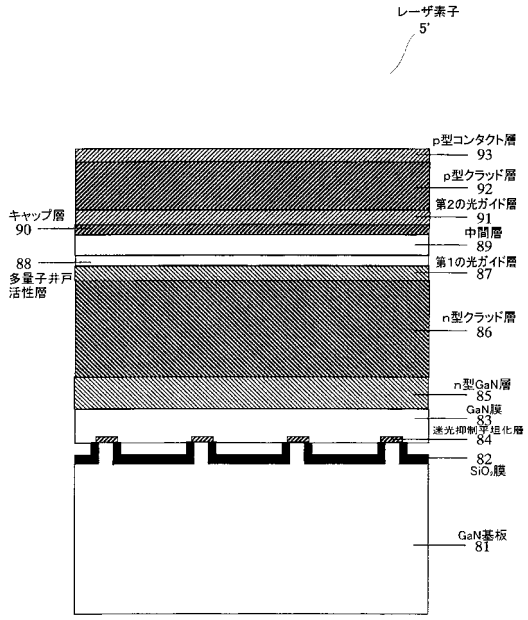
【図１５】



【図１６】



【図１７】



フロントページの続き

(72)発明者　横川　俊哉
大阪府門真市大字門真１００６番地　松下電器産業株式会社内
(72)発明者　石橋　明彦
大阪府門真市大字門真１００６番地　松下電器産業株式会社内

審査官　金高　敏康

(56)参考文献　特開２００２－１４１６１３（ＪＰ，Ａ）
特開２０００－３２３７５２（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－２１７４９８（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－３６７９０９（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－２４２５８６（ＪＰ，Ａ）
特開２００１－２６７６９２（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－１２４７３７（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－１３０３２７（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－０９７５０８（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０１Ｓ　　５／００　－　５／５０