

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686041

研究課題名(和文)半極性 GaN/Si 上への InGaN 高圧成長及び歪制御による LD の作製

研究課題名(英文) LD fabrication on semipolar GaN/Si by induced pressure InGaN growth and strain control

研究代表者

本田 善央 (HONDA, YOSHIO)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60362274

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,900,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究では、窒化物半導体中で発光を抑制する内部電界(ピエゾ電界)を抑制可能な半極性面を成長面とし、InGaNを用いた青色～緑色領域のLD作製を目指した。Siの加工基板を用いることで半極性面を得る手法を用いた。GaN結晶はストライプ状に作製している。Si基板から熱膨張係数に起因する大きな引っ張り応力を受けるが、ストライプに沿った引っ張り歪となり、一方でストライプに垂直方向に対しては、圧縮歪となる。この歪が原因となり、InGaN発光の偏光方向がc軸と水平になることが分かった。レーザ構造を作製し、強励起で発光測定を行った結果、c軸と水平方向で大きなゲインを得られ、レーザ発振を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focus on the fabrication of the LD from blue to green region, by using semipolar GaN which could eliminate the internal polarization(piezo polarization). We could get semipolar GaN on patterned Si substrate with stripe shape. GaN and InGaN was taken the large stress due to the difference of the thermal expansion coefficient. In this structure, it was tensile stress along the stripe direction, on the other hand, it was compressive perpendicular direction. We found that InGaN luminous polarization direction was controlled to c axis direction owing to this stress. We made the laser structure on this structure and measured the optical property under high optical excitation condition. As a result, we confirm the stimulate emission from edge of the sample.

研究分野：半導体工学

キーワード：Si InGaN GaN レーザ 半極性面

1. 研究開始当初の背景

InGaN 半導体は、原理的に紫外から赤外線まで広い範囲のデバイスの実現が可能である。しかしながら、GaN 系半導体の光デバイスは青色領域を中心に開発が進んでおり、緑色、紫外領域では急激に発光効率が低下する。その原因の一つとして、ピエゾ電界が考えられている。ピエゾ電界は長波長において大きくなるため、この電界が発生しにくい結晶面の利用が有効であると考えられる。各研究機関で様々な結晶面が用いられている。

2. 研究の目的

本研究では、(1-101)面を利用した、InGaN 系のレーザダイオードの作製を目指す。(1-101)面を作製するために、Si 基板の加工技術と GaN の選択成長を用いて得られた結晶を用いる。これまでに、窒素面(N面)上への結晶成長は殆ど行われてきていない。この理由は不純物の取込が多いため、デバイス作製が困難であるためである。一方で、N面は、In の取込が大きいことから、InGaN 成長に適している。(1-101)面は窒素が表面となるN面の一つであり、かつ本成長面は安定面であることから表面平坦性が確保される。上記の理由より、可視光のレーザダイオードを作製するためは、本成長面が有効であると考えられる。ところが、Si 基板上の GaN は結晶性が悪く $10^9/cm^2$ にも及ぶ転位が発生する。また、熱膨張係数差の相違によるクラックの発生も大きな問題となる。本研究では、Si を加工して(111)Si ファセットを形成したうえで GaN 選択成長技術を適用することで、結晶成長領域を制限しクラックの発生を抑制するとともに、転位を効率的に Si/GaN ヘテロ界面近傍で曲げることで表面への転位の伝搬を抑制可能である。結果的に転位密度を $10^7/cm^2$ 以下まで低減した高品質結晶を得ることに成功しており、レーザダイオードへの応用が可能であると考えられる。さらに、加工 Si 基板をもちいることで、GaN 結晶の成長方向を基板から傾けることを可能とし、(1-101)GaN 面という半極性 GaN を利用することで発光効率の向上を実現を目指す。

3. 研究の方法

図1に加工 Si 基板と、GaN 選択成長後の d 鳥瞰模式図を示す。初めに(001)Si 基板上へ SiO₂ をスパッタリングにより堆積し、フォトリソグラフィによりストライプパターンを作製する。ストライプの方向は<1-10>方向である。この基板を 25% 40 の KOH 溶液に浸すと Si 基板が露出されている部分がエッチングされる。KOH は Si に対して異方性のエッチャントであり、(111)Si 面がエッチングの停止面となることが知られている。そのため、図1に示すような(111)Si ファセットを得ることが出来る。Si は立方晶であり GaN は六方晶であるため、結晶構造が異なるが、(111)Si 面と(0001)GaN 面の結晶配置が同じであるた

め、ヘテロ成長が可能である。GaN を(111)Si 面に選択成長を行う事で、図1(右)に示すような結晶を得ることが可能となる。この結晶は(1-101)面が上面となっており、この結晶面上へ InGaN/GaN MQW 構造を作製し、各種特性の評価を行った。

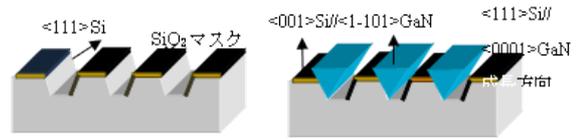


図1 .Si 加工基板上 MOVPE 選択成長による半極性 (1-101) GaN の結晶成長

レーザを作製するために、必要な光学特性として、発光の偏光方向が挙げられる。これまでに偏光方向が c 軸に水平になる場合に高い利得が得られることが分かっている。そこで、偏光に関しては、InGaN 層の In 組成、膜厚を変えながら測定を行い、適正な変更が得られる条件の探索を行った。このようにして得られた結晶を用いて、強励起下で励起を行い端面からの発光を観測することで、レーザ特性の評価を行った。

4. 研究成果

はじめに選択成長によって得られた半極性面 GaN の断面 TEM 像を図1に示す。通常 GaN と Si の界面において大きな格子定数差から多くの転位が発生する。図1においても界面が黒く見えており、転位が集中していることが分かる。しかしながら、この転位は成長方向(<0001>方向)へは殆ど伝搬していないことが分かる。<1101>方向へは転位は伝搬しているものの、C 面方向へ曲がる転位は観測されていない。結果として、(1-101)面での欠陥密度は非常に低いことが分かる。表面の CL によるダークスポットを観測すると、 $10^7/cm^2$ 以下まで低減した高品質結晶を得ることが可能であることがわかる。この結晶を用いて、次に InGaN/GaN MQW 構造を作製した。

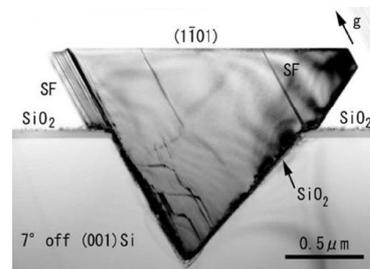


図1 Si 基板上(1-101)GaN の断面 TEM 像

InGaN/GaN 層を作製するにあたり、In 組成を約 15~35%程度と変化した。これにより発光波長が 430nm ~ 550nm 程度と変化している。また、同様に InGaN 層の井戸層厚を 2,3,5,9nm と変化した。得られた結晶に対して、結晶表面より 405nm 半導体レーザを用い、InGaN 層

のみを選択励起した PL 測定を行った．表面からディテクタの間に偏光板を挿入し，偏光方向を測定した．偏光方向を結晶の c 軸にした場合と，c 軸に水平にした場合の発光波長を測定し，長波長側のピークが得られた場合の偏光方向を測定した．得られた結果を図 2 に示す．440 ~ 480nm 程度で且つ InGaN 膜厚が 2,3nm の場合には偏光方向は c 軸に対して垂直である．一方，それ以外の部分では水平方向の偏光が得られた．この結果は，通常のサファイア基板で成長した場合とは異なっており，基板からの歪が大きく影響していると考えられる．結晶は Si 基板からは大きな引っ張り応力を受けるが，本構造では，ストライプ方向に沿って，引っ張り歪がかかり，ストライプに垂直方向では圧縮歪がかかることになる．また，InGaN 自体は GaN より圧縮歪を受けている．通常，InGaN は偏光方向が c 軸に対して垂直であるため，この一軸性の c 軸方向に対する圧縮歪によって，偏光がスイッチしていると考えられる．In 組成が小さく，膜厚が薄い場合に偏光のスイッチが起きていないことから，In 組成が低い場合は GaN からの圧縮歪が小さく，また，膜厚が薄い時は，価電子帯の量子準位が大きく分裂しているため，偏光のスイッチが起きにくいと考えられる．

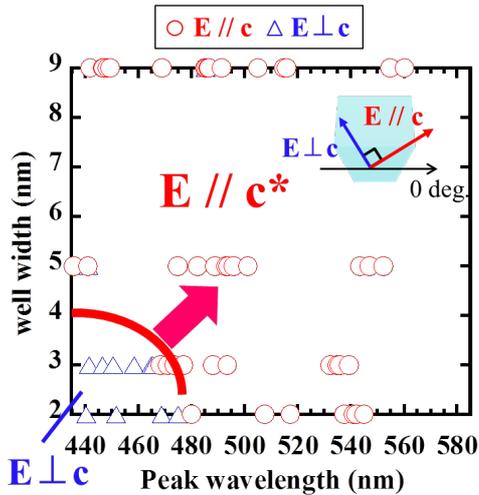


図 2 InGaN MQW の偏光特性の In 組成（発光波長）と InGaN 井戸層厚依存性

このような InGaN/GaN MQW 結晶を 100nm の GaN ガイド層，200nm の AlGaIn クラッド層にて挟み込み，光閉じ込め構造を作製した．断面 REM 像を図 3 に示している．得られた構造に対して，強励起における発光特性を観察した．励起光源として，N₂ レーザをストライプ状に成形し，1MV/cm² 程度の励起強度において基板表面に照射し，断面からの発光特性を測定した．得られた発光強度を励起強度に対してプロットした結果が図 3 になる．励起強度が 1MV/cm² 程度を境に急激に発光強度が増加している様子が見取れる．この時，発光の半値幅が 30nm 程度から 0.8nm 程度まで急激に減少していることを同時に観測してい

る．この結果から，本構造を用いてレーザ発振が可能であることが明らかとなった．この結果は，Si 上 InGaN 系のレーザとしては世界初の結果であり，本研究の得られているベースとなる結果であり，大きな成果と言える．

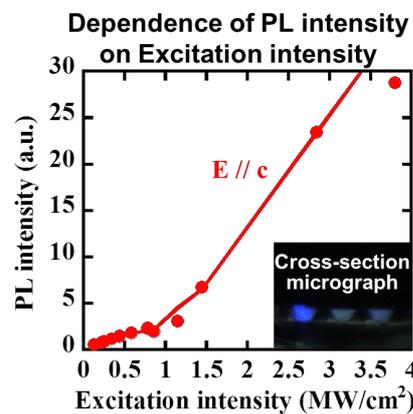
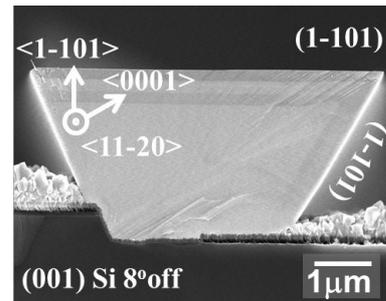


図 3 PL 発光強度の励起強度依存性

得られたレーザ発光のスペクトルを図 4 に示す．比較のため(0001)に成長した結果を示す．(1-101)GaN 面の場合，偏光方向が E//c になる場合に利得が大きくなるという計算結果が報告されている．図 4 を見ると計算結果通り，E//c の偏光方向で大きな発光強度を示しており，計算結果と良い一致を示している．(0001)面では，E ⊥ c 方向 (TE 偏光) において高い利得を示しており，構造の違いに，E//c が優先的に発光しており，結晶欠陥の密度も低いことから，閾値が 1MV/cm² 程度と比する発光特性の違いを確認した．また，先に図 2 に関して述べたように本構造では較的低い値が得られていると考えられる．また，特筆すべき事は，通常導波路の中を伝搬する光は反射を繰り返して，TE 偏光になって外部に放出される．しかしながら，図 4 の挿入図に偏光方向を示しているが，E//c の偏光を保ったまま，外部に光が放出されていることが分かる．この原因としては，歪の影響によりストライプに水平方向に反射を介さない発光が支配的に発光している可能性がある．もしくは，内部での複屈折によりモードが選択されている可能性も考えられる．現在，この結果については原因がはっきりしておらず，バンド解析，光伝搬シミュレーション等を用いた検討が必要である．

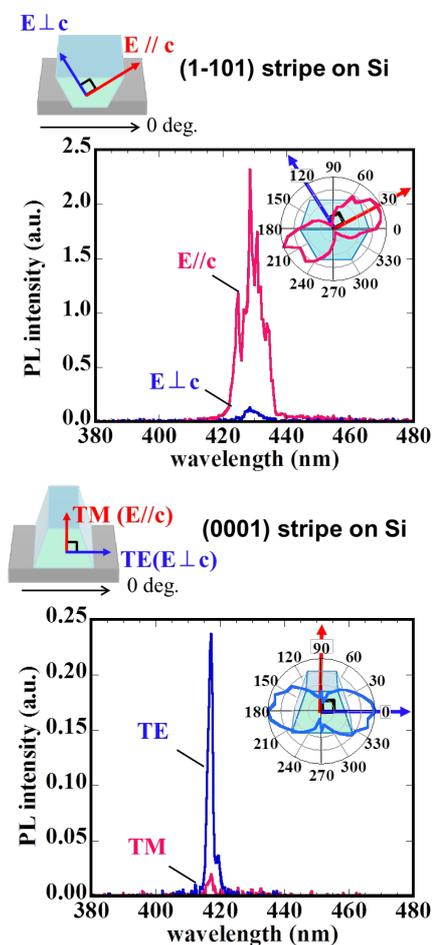


図4 レーザ発振時の(1-101)面と(0001)面での発光スペクトルの比較

得られた波形を見ると、(1-101)面において、ブロードな発光スペクトルになっている。これは、立体構造による現象である。(1-101)ファセットは上面と、下側の側面にも存在する。また、c面の頂点ではInの取込、成長速度が異なる特異点となっている。そのため、それぞれの面にて発振が起きてしまい結果的にブロードなスペクトルになっていると考えられる。そこで、横方向の閉じ込め効率を向上するために、リッジ構造の作製を試みた。図5にリッジ構造作製前後の断面SEM像を示す。(1-101)上面に約2μmのリッジをICPにより作製した。エッチング深さは100nm程度とし、再表面のクラッド層のおよそ半分程度をエッチングした。この構造によりエッチングした部分下での光の閉じ込め係数が強くなり、結果としてエッチングしていない部分に光が集中し横方向への閉じ込めを実現することが可能となる。この構造に対して、光学特性を測定した結果を図6に示す。上図においては、リッジ構造を作製しておらず、沢山のモードの発振が見られる。また、それぞれのピークが分離していないため全体としてブロードなピークを形成していることが分かる。これは先に述べたように沢山の場所から異なるIn組成、膜厚、閉じ込め係数のInGaInが発光・発振をしているために、

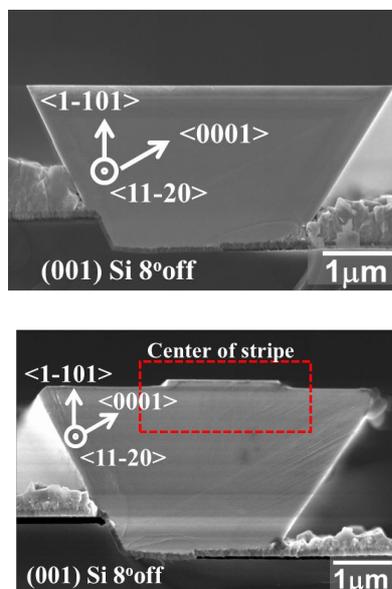
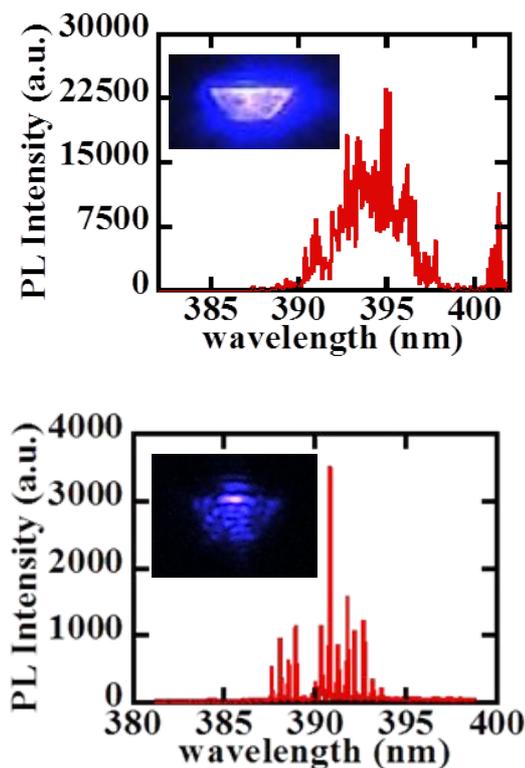


図5 ICPエッチングによるリッジ構造の作製

このようなブロードなピークが得られていると考えられる。一方で、下図でみられるように、リッジ構造を作製した場合には、横方向の閉じ込めが強くなり、発光はリッジの下においてのみ見られた。挿入図には断面の発光パターンを示しているが、明らかに光の閉じ込めが強くなっており、その結果として発光特性が向上していることが分かる。



以上、本研究では(1-101)面を用いてレーザー構造を目指し実験を行った。本来の目的であったSi基板上の発光の偏光制御が可能で

あることを明らかとし、強励起におけるレーザ発振を観測した。また、リッジ構造におけるレーザ発振特性の向上を明らかとしたことで、本構造がレーザ応用可能であることを示すことが出来た。一方で、本研究では、光励起による誘導放出しか確認できておらず、電流注入による誘導放出の確認が残された課題となっている。また、偏光方向が TE 偏光になっていない発振モードの原因と、問題点、利点の解析が不十分であり、更なる研究の必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Maki Kushimoto, Tomoyuki Tanikawa, Yoshio Honda, Hiroshi Amano “Optically pumped lasing properties of (1-101) InGa_N/Ga_N stripe multiquantum wells with ridge cavity structure on patterned (001) Si substrates”, Applied Physics Express 8 (2), 022702

Tomoyuki Tanikawa, Tomotaka Sano, Maki Kushimoto, Yoshio Honda, Masahito Yamaguchi, Hiroshi Amano
Fabrication of InGa_N/Ga_N Multiple Quantum Wells on (1bar 101) Ga_N
Japanese Journal of Applied Physics 52 8s 08JC05

[学会発表](計 6 件)

久志本 真希, 本田 善央, 天野浩, ”(001)Si 基板上半極性面 InGa_N 光共振器の誘導放出特性”, 第 52 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 11 日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市)

久志本 真希, 本田 善央, 天野浩, ”(001)Si 基板上半極性面 InGa_N 光共振器の誘導放出特性”, 第 52 回応用物理学会春季学術講演会, 2014 年 9 月 16 日, 北海道大学(北海道札幌市)

Maki Kushimoto, Yoshio Honda, Hiroshi Amano, “Optical gain spectra of (1-101)InGa_N stripe cavity structures”, IWN2014(International Workshop on Nitride semiconductor 2014),2014 年 8 月 25 日, Wroclaw Centennial Hall conference center(Poland)

久志本 真希, 本田 善央, 天野浩, ”(1-101)InGa_N マイクロキャビティの誘導放出”, 第 34 回電子材料シンポジウム, 2014 年 7 月 10 日, ラフォーレ修善寺(静岡県伊豆市)

Yoshio Honda, Tomohiro Doi, Masahito

Yamaguchi, Hiroshi Amano, “High pressure InGa_N growth on Sapphire substrate by MOVPE”, 2013 JSAP-MRS Joint symposia, 2013 年 9 月 15 日, 同志社大学(京都府京田辺市)

Maki Kushimoto, Tomoyuki Tanikawa, Yoshio Honda, Masahito Yamaguchi, Hiroshi Amano, “Light Emission Polarization Properties of (1-101)InGa_N/Ga_N MQWs with Cavity Structure on Patterned Si Substrate”, 10th International Conference of Nitride Semiconductors(ICNS-10), 2013 年 8 月 24 日, Washington DC, (USA)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者
本田 善央(HONDA, Yoshio)
名古屋大学大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60362274

(2)研究分担者
()
研究者番号:

(3)連携研究者
()
研究者番号:

(4)研究協力者
久志本 真希(Kushimoto, Maki)