

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760012

研究課題名(和文) Si基板上半極性Ga<sub>N</sub>の積層欠陥、点欠陥抑制による光学的特性の改善

研究課題名(英文) Optical property improvement of the semipolar GaN on Si by the reduction of stacking faults or point defects.

研究代表者：

本田 善央 (Honda Yoshio)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：60362274

研究成果の概要(和文)：加工Si基板上へGa<sub>N</sub>を選択成長し半極性Ga<sub>N</sub>を作製した。(11-22)Ga<sub>N</sub>を成長する場合、2段階成長を用いることで、転位密度を $10^5/\text{cm}^2$ 以下にすることに成功しほぼ無転位に近い高品質な半極性Ga<sub>N</sub>を得ることに成功した。また、(1-101)Ga<sub>N</sub>においては、転位が成長初期に曲がるため、上部に転位が伝搬しにくく、同様に転位密度を $10^5/\text{cm}^2$ 以下を達成することが可能であった。この結晶を用いて(1-101)Ga<sub>N</sub>ストライプ上にInGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>MQWを用いた導波路を作製し、光励起による光学特性を測定したところ、端面より誘導放出光を得ることに成功した。これはSi基板上では世界初となる結果であり、高品質結晶が得られたことを証明していると考えている。

研究成果の概要(英文)：We made semi-polar GaN on etched Si substrate by selective MOVPE method. In the case of (11-22)GaN, we succeeded the high quality GaN of which dislocation density is less than  $10^5/\text{cm}^2$ . In the case of (1-101)GaN, since the dislocation was vended at the initial growth, it did not propagate to the surface of the GaN crystal. As a result, we also achieved the dislocation density of less than  $10^5/\text{cm}^2$  on this face. We tested the optical property of high quality semi-polar (1-101)GaN. We grew InGa<sub>N</sub>/GaN MQW structure and excited by pulse laser from top side. The optical detector was set at the side edge and we could get stimulated emission. This is the first result in the world, therefore, it prove that we could get high quality semi-polar GaN crystal.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：半導体工学・結晶成長

科研費の分科・細目：応用物性・結晶工学

キーワード：Ga<sub>N</sub>、InGa<sub>N</sub>、半極性、Si基板、光学特性、誘導放出

## 1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体は紫外から緑色領域の発光デバイスとして利用されてきた。しかしながら、緑色領域にまで波長を拡大を試みた場合、発光効率の著しい現象が起きる。これは、窒化物半導体は格子不整合系であるために、発

光層の結晶品質が低下することと、歪により発生したピエゾ電界により電子と正孔が空間的に分離するために、発光再結合確率が著しく低下することにあつた。ピエゾ電界はc面において最大となり、軸を傾けることでその効果が低減可能である。そのため、c面以

外の半極性面、極性面の高品質結晶の作製が必要であった。しかしながら、そのような成長面を得るための基板は確立されておらず、高品質結晶の作製が困難であった。我々はSiを加工し選択成長を行うことで、基本的にどのような成長面でも作製可能な手法を提案してきた。しかしながら、得られる結晶には多くの転位、積層欠陥が導入されることから、高品質光デバイスを作製するためには、この欠陥を低減する必要があった。

## 2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえて、本研究では1) Si基板上に高品質半極性GaNの結晶成長を行うこと、2) 得られた半極性GaNの光学的特性を評価することとした。

## 3. 研究の方法

Si基板上へSiO<sub>2</sub>を堆積し、フォトリソグラフィによりストライプパターンを作製した。この基板をKOH溶液に浸すことで、異方性エッチングを行った。KOHにより自己形成的に(111)Si面を得ることが可能である。この基板上へGaN選択成長を行った。(113)Si基板を用いた場合、得られるGaNストライプは上面が(11-22)であり、側面が(-1-122)及び(000-1)面で囲まれている三角柱である。

(001)Si基板の場合は、同様に(1-101)面が得られる。

### (1) 選択再成長による(11-22)GaNの転位の低減

(11-22)面と(-1-122)面との間には微小な(0001)面が存在している。この結晶上へ、マスク材としてSiO<sub>2</sub>をスパッタリングにより堆積した。スパッタする角度は(0001)方向へ60°傾けて行った。(-1-122)面は影になっているためSiO<sub>2</sub>がほとんど堆積しない。一方、(0001)面も同様にスパッタの陰になっているものの、SiO<sub>2</sub>の回り込みによりわずかにSiO<sub>2</sub>が堆積する条件下で実験を行った。この基板を用いGaN選択再成長を試みた。得られた結晶は、SEM、TEM、CLにて評価を行った。

### (2) Si基板上半極性(1-101)GaNストライプ構造上InGaN/GaNを用いたレーザ構造の作製と光特性評価

加工(001)Si基板上へGaNストライプ選択成長を行った。得られたGaNストライプは上面が(1-101)となり、側面が(-1101)及び(000-1)面で囲まれている三角柱である。続けてInGaN/GaN MQW構造を成長し、表面にはGaNガイド層を200nm程度成長した。この基板を用い半導体レーザー(405nm)を用いて、発光強度の励起強度依存性より内部量子効率(IQE)を評価した。また、N<sub>2</sub>レーザーを用

いた光ポンプによる誘導放出光の測定を試みた。サンプルは壁開により励起長を500μm程度とし、表面から励起を行い、端面からの発光を観察した。励起強度は4MW/cm<sup>2</sup>から上げていき、30MW/cm<sup>2</sup>まで測定を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 選択再成長による(11-22)GaNの転位の低減

得られた結晶をCLにより暗点を観察し転位密度の推定を行った。図1に表面のCL像を示す。2段成長をしない、(11-22)GaN表面には多くのダークスポットがあるのに対して、2段成長後のサンプルにおいてはダークスポットが観測されていない。このことは、貫通した転位は(-1-1-22)面に達すると、試料の下方向に曲げられるため、再成長表面に到達していないためであると考えられる。暗点密度が10<sup>-5</sup>cm<sup>-2</sup>以下を達成することが可能であった。図2に断面のTEM像を示している。TEM観察から上記で述べた転位の伝搬メ

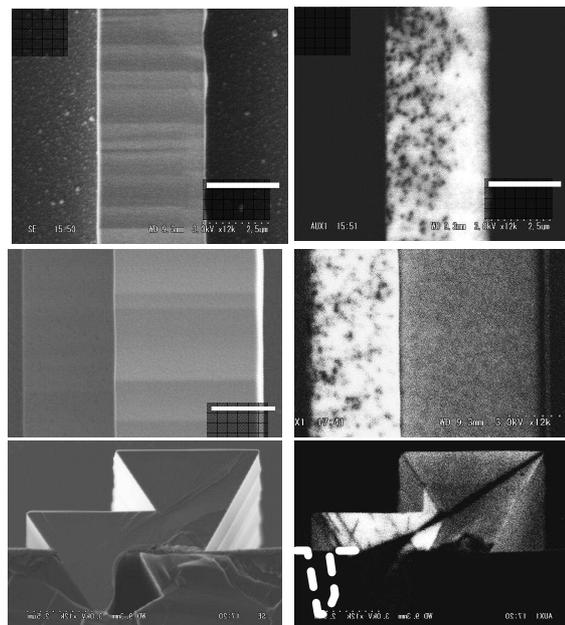


図1 Si基板上(11-22)GaNのSEM像およびCL像、a) 1段階成長の表面像、b) 2段階成長の表面



図2 Si基板上(11-22)GaNの2段階成長の断面TEM像

成長界面での新たな転位の発生、マスクとのカニズムを確認することが出来た。また、再接触部分からの新たな転位の発生は確認されず、非常に低転位密度のGaN結晶を得ることが明らかとなった。

(2) Si基板上半極性(1-101)GaNストライプ構造上 InGaN/GaNを用いたレーザ構造の作製と光特性評価

室温における内部量子効率 (IQE) を測定するために、PLの励起強度依存性を測定した。405nmの半導体レーザーを用い量子井戸のみ選択励起を行った。励起強度を変えて得られた積分発光強度データに対するキャリア生成レート(励起強度に比例)の相関をフィッティングすることでIQEを求めた。図3にキャリア密度に対するIQEの計算結果を示す。Sample Aは青色領域(発光波長430nm)であり、sample Bは発光波長530nmの緑色領域のInGaN量子井戸のサンプルである。比較のために、c面サファイア上のLEDの結果をシメス。図から分かるようにSample Aにおいて

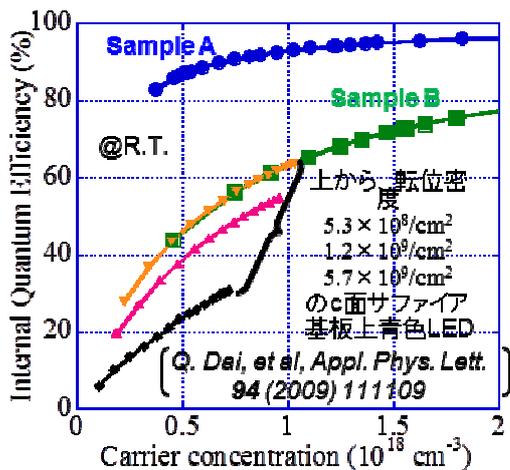


図3 (1-101) GaN上 InGaN発光層の内部量子効率のキャリア密度依存性

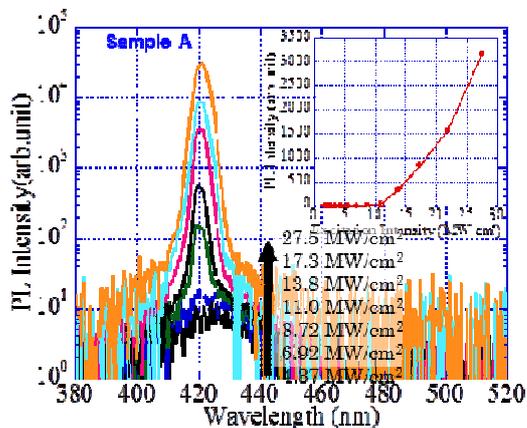


図4 (1-101) GaN上 InGaN発光層の導波路特性

は、キャリア密度が  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程度において80%を超える効率が得られている。この結果は、C面上のLEDの60%程度と比べて非常に高い値であり、本研究で得られたInGaN発光層の品質が非常に高いことを示している。また、緑色領域においても60%以上のIQEの値が得られているが、この値はC面上のLEDと同等な結果であり、半極性面を用いたことで緑色領域までのLEDの作製の可能性が示された結果であるといえる。この事は、半極性面において高輝度の緑色LEDの作製の可能性を示唆しており、今後の発展が期待される。

次に、 $\text{N}_2$ レーザーを用いた強励起下における断面からの発光を測定し、導波路の伝搬特性を評価した。図4に示すように、励起強度が低い場合、430nmをピークとするブロードな発光スペクトルを示している。一方、 $10 \text{ MW/cm}^2$ を境に発光波長は420nm程度にシフトすると共に、鋭いピークが観察されるようになった。これとともに、積分発光強度も急激に立ち上がっている。この現象は誘導放出の特長とよく一致しており、Si基板上の半極性面において、世界で初めてInGaN量子井戸の誘導放出光を得ることに成功したと言える。ピーク付近での光学ゲインは  $280 \text{ cm}^{-1}$  になっており、非常に大きい値が得られていることから、結晶品質及び半極性を用いたことによる高い発光再結合確率が実現されていると考えている。

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4件)

- ① T. Murase, T. Tanikawa, Y. Honda, M. Yamaguchi, H. Amano, and N. Sawaki, Drastic Reduction of Dislocation Density in Semipolar (11-22) GaN Stripe Crystal on Si Substrate by Dual Selective Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy, Jpn. J. Appl. Phys., 50, 2010, 01AD04\_1-01AD04\_3 査読 有
- ② T. Tanikawa, N. Suzuki, Y. Honda, M. Yamaguchi, and N. Sawaki, HVPE growth of a  $\bar{c}$ -plane GaN on a GaN template (110)Si substrate, phys. stat. sol. (c), 7, 2010, 1760-1763 査読 有
- ③ N. Sawaki, T. Hikosaka, N. Koide, S. Tanaka, Y. Honda, and M. Yamaguchi, Growth and properties of semi-polar GaN on a patterned silicon substrate, J. Cryst. Growth, 311, 2009, 2867-2874 査読 有

- ④ T. Tanikawa, Y. Kagohashi, Y. Honda, M. Yamaguchi, and N. Sawaki, Reduction of dislocations in a (11-22)GaN grown by selective MOVPE on (113)Si, J. Cryst. Growth 311 2009 2879-2882 査読 有

名古屋大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60362274

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

〔学会発表〕(計 12 件)

- ① Y. Honda, GaN growth on patterned Si/GaN template by HVPE, 7th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductor (IWBNS-7) Mar.6-9,2011, Koyasan(高野山)
- ② T. Tanikawa, T. Murase, T. Tabata, Y. Kawai, Y.Honda, M.Yamaguchi, and H. Amano, Recent development of nitride-based micro- and nano-rod structure on Si and their application to high performance light emitters, 9th International Akasaki Research Center Symposium Nov. 26, 2010, Nagoya(名古屋)
- ③ 山下康平, 谷川智之, 本田善央, 山口雅史, 天野 浩、加工 Si 基板上(1-101)GaN の不純物取り込み、第 71 回応用物理学会学術講演会、2010/9/14-9/17、長崎大学文教キャンパス
- ④ 谷川智之, 本田善央, 山口雅史, 天野 浩、半極性面 GaN ストライプ上 InGaN/GaN MQW の MOVPE 選択成長(II)、第 71 回応用物理学会学術講演会、2010/9/14-9/17、長崎大学文教キャンパス
- ⑤ 村瀬 輔, 谷川智之, 本田善央, 山口雅史, 天野 浩、Si 基板上(1-101)InGaN/GaN MQW ストライプレーザー構造の光学特性、第 71 回応用物理学会学術講演会、2010/9/14-9/17、長崎大学文教キャンパス
- ⑥ 村瀬 輔, 谷川智之, 本田善央, 山口雅史, 澤木宣彦、選択 MOVPE 法を用いた Si 基板上(11-22)GaN の転位低減、第 70 回応用物理学会学術講演会 2009/9/8-9/11 富山大学(富山市)
- ⑦ Y. Honda, T. Tanikawa, B. J. Kim, M. Yamaguchi, and N. Sawaki, GaN/InGaN hetero growth on (1-101) and (11-22) GaN on Si substrate、第 28 回電子材料シンポジウム July 8-10, 2009, Shiga (滋賀)
- ⑧ 本田善央、Si 基板上半極性面 GaN への InGaN ヘテロ成長、第 1 回窒化物半導体結晶成長講演会 2009/5/15-5/16 日東京農工大(東京)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

本田 善央 (Honda Yoshio)