

平成 21 年 3 月 11 日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19760235  
 研究課題名（和文） ナノ・マイクロダブルパターニングポーラス Si 基板上  
 高出力 GaN 系 LED  
 研究課題名（英文） GaN-based LEDs on nano- and micro-patterned porous Si substrates

研究代表者  
 石川 博康 (ISHIKAWA HIROYASU)  
 名古屋工業大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号：20303696

## 研究成果の概要：

廉価・高性能な発光ダイオード(LED)の実現に向け、新たな基板（ポーラス Si (PSi)）を作製し、この上に LED 用半導体材料（GaN）を形成する実験を行った。従来問題となった反りおよび歪みが低減され優れた発光特性を得たが、ヒビやピンホールが観察され平坦性が悪かった。調査したところ PSi 基板が高温時に変形することが原因であることがわかった。この変形を抑制することで上記問題が大幅に改善された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,700,000	0	1,700,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	420,000	3,520,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：結晶成長、電子デバイス・機器、ナノ材料、マイクロ・ナノデバイス

## 1. 研究開始当初の背景

GaN 系半導体は、優れた発光素子材料、電子走行素子材料として世界各国で広く研究が行なわれている。基板としてサファイアが用いられているが、これを Si とすれば、①廉価、②発光素子において上下に p 電極(エピ表面)、n 電極(Si 基板裏面)を形成することができる、③Si 集積回路と窒化物発光素子を一体化した高機能素子の作製ができる、というメリットがある。

従来、Si 基板上に良好な GaN 結晶を得ることができなかったが、本研究代表者らは良好な成長ができない原因が界面の固相反応プロセスにあることを突き止めた。これを解決することで、世界で初めて 2 インチ Si 基板上へクラックのない高品質 GaN の成長に成功した。また、Si と窒化物半導体間のヘテロ障壁の高さを定量的に分析し、極めて薄い中間層を用いることで直列抵抗の低い Si 基板上 GaN 系青色・緑色 LED の作製に成功して

いる。

GaN系LED発光波長に対してSi基板が不透明であり、活性層から基板側に発せられた光は殆どSiに吸収されてしまう問題がある。そこで、3ペアの半導体多層膜反射鏡(DBR)をLED構造とSi基板間に挿入することにより界面での反射率を高め、従来比1.5倍の出力を得た。

しかしながら、DBRのペア数を5以上とするとクラックが発生するため、DBRによるさらなる出力向上は困難である。また、Si基板上GaNの結晶欠陥はサファイア基板上より1桁多く、この結晶欠陥に起因したリーク電流が多いことも問題である。以上、Si基板上GaN系LEDでは結晶欠陥低減、さらに光学的な構造検討が課題である。

## 2. 研究の目的

上記課題に対し、本研究では電気化学エッチングによりポーラスSiを形成したPSi基板(PSi基板)を使用し結晶欠陥・クラックを低減することを試みる。PSi基板は、ナノスケールの孔の形成後、さらにマイクロスケールの孔を形成し、ナノ・マイクロダブルパターンニングとする。このようなPSi基板上にGaN系LED構造を成長させることで、ナノパターンにより格子ミスマッチに起因した転位の低減、マイクロパターンによりサーマルミスマッチに起因したクラックの低減を行う。また、界面に存在するマイクロスケールの孔を利用することでLED光取り出し効率向上が期待できると考えた。電気化学エッチング特有のランダム性やマイクロスケールの孔上の横方向成長の特性上、孔上にオーバーハングしたGaNの基板界面側には傾きが生ずる。孔が多数有ること、孔形状のランダム性から、GaNの基板面側は微細にラフニングされた状態になる。マイクロスケールの孔は結晶成長後も空間として残るため、GaN側から見て高い反射率を有する(GaN/SiのGaN側からみ見た反射率は10%程度、GaN/空気界面のGaN側から見た反射率は約70%と高い)。基板界面側のラフニングおよび高反射率化により、光取り出し面から取り出すことができない全反射成分を減少させることができ、大幅な光取り出し効率向上を見込

まれる。

## 3. 研究の方法

本研究では電気化学エッチング、結晶成長、デバイスプロセスという3つの技術が必要であった。名工大では結晶成長およびデバイスプロセスを行い、電気化学エッチングについては経験豊富な(株)シリコンテクノロジーの協力を得た。

### (1) 2007年度

転位・反りの低減を目的とし、ポーラスSi基板上に高品質GaNの結晶成長を試み、特性を評価した。PSi基板について、p型Si(111)基板をHF水溶液ベースの電解液中でダブルパターンニング陽極化成したものを使用した。PSi層の膜厚は約20~100μmである。結晶成長は横型MOCVD装置により行った。成長圧力は100 Torrである。1120°CにてAlN中間層50 nm、GaN層1 μmを順次成長した。また、LED応用を目的に20ペアn-GaN/n-AlN(20/5 nm)多層膜を介したn-GaN 0.5 μm構造も結晶成長させた。比較のために同一構造を通常のSi基板(Flat Si基板)上に成長した。

### (2) 2008年度

2007年度の研究の結果、①表面が粗くピットが多い、②メルトバックエッチングがある頻度で起こる、③再現性が乏しいという問題があった。これら原因を調べるため、PSi基板上GaNの断面観察およびSiエピを施したPSi基板上GaNの成長を試みた。

## 4. 研究成果

### (1) 2007年度

PSi基板上GaNは反りがほとんど観察されず、レーザー測長器の測定限界以下であった。室温PLの結果、Flat Si基板上GaNよりバンド端発光が強く、深い準位からの発光が弱かった。GaN基板上、サファイア基板上n-GaNともに、77KにおけるPLスペクトルを図1に示す。GaN基板上のピークに対し(無歪と仮定)、サファイア基板上のピークは高エネルギー側に現れ(面内圧縮歪み)、PSiおよびFlat Si基板上は低エネルギーに現れている(面内伸張歪み)。PSi基板上はFlat Si基板上よりGaN基板上のピークに近く、特にn-AlN/n-GaN多層膜を挿入したPSi基板上が

最も近い。Flat Si 基板上では多層膜の挿入により面内歪みが大きくなったのは対照的である。PSi 基板を結晶成長用基板として用いることで反りおよび面内歪みが低減され、光学的に優れた特性を持つ GaN を得ることができた。

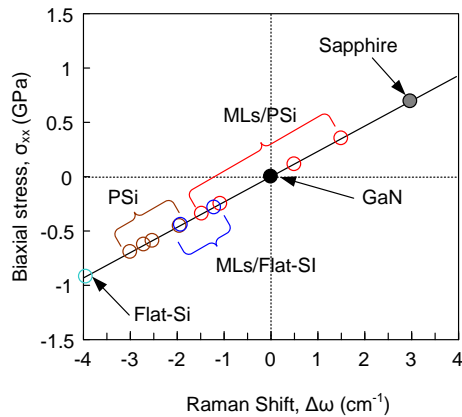


図 1. ラマンシフトによる面内応力の比較

## (2) 2008 年度

断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を図 2(a)に示す。PSi の数~数 10nm スケールの微細構造が失われ、サブミクロンスケールのフォーム状構造に変化していることがわかった。窒化物層と PSi の界面にボイドが存在する箇所の GaN 表面にはピットが現れることもわかった。GaN の成長時間を 0~25min (1μm 相当) 変化させた試料を作製し、変化の過程を調べた。その結果、0min の段階で既に PSi の構造が変形していること、時間と共にフォーム状構造が大きくなっていくことがわかった。さらにピット付近の透過電子顕微鏡による観察を行ったところ、フォームの空洞底に窒化物層/PSi 界面層が下方に移動していることがわかった。これらの結果より、成長中に PSi が窒化物層ごと変形、界面に窪みを形成し、その上に横方向成長する過程でピットが発生することがわかった。そこで、PSi の変形を抑えるために PSi 基板上に 1~2 μm の Si 薄膜をエピタキシャル成長させた Si/PSi 基板の使用を試みた。その断面 SEM 写真を図 2(b)に示す。界面にボイドの発生が全くなくなった。表面観察より、ピットがなく、クラックも大幅に抑制された。成長

機構を調べるために GaN の成長時間を 0~25 min (1 μm 相当) とした試料を作製した。その結果、Si 基板上 GaN と同様、AlN 中間層上ではほぼ擬二次元成長する成長様式であった。AFM による表面粗さ測定の結果、Si 基板上 GaN と同程度に小さく、平坦性も大幅に改善された。顕微ラマン分光により膜中応力の推測を行ったところ、僅かながら応力の低減が認められた。これはエピタキシャル Si の厚さが GaN と同程度の膜厚であり、フレキシブル性が弱められたためと考えている。エピタキシャル Si 層を薄くすることにより、平坦かつ応力の小さな GaN を成長できるものと期待できる。

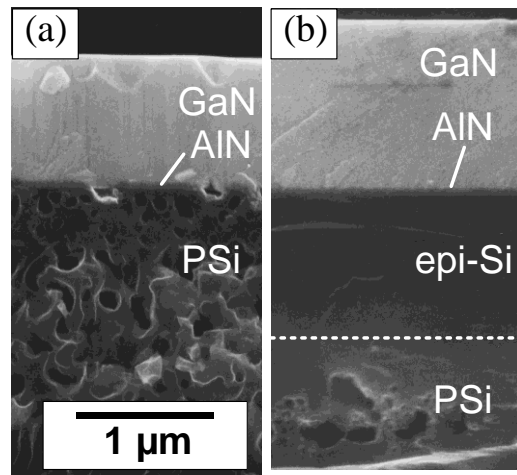


図 2. (a)PSi 基板上および(b)Si/PSi 基板上 GaN の断面 SEM 写真

## 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)

1. H. Ishikawa, T. Jimbo, T. Egawa, GaInN light emitting diodes with AlInN/GaN distributed Bragg reflector on Si, physica status solidi (c) Vol.5, pp.2086-2088 (2008), 査読有.
2. H. Ishikawa, K. Shimanaka, F. Tokura, Y. Hayashi, Y. Hara, M. Nakanishi, MOCVD growth of GaN on porous silicon substrates, Journal of Crystal Growth Vol. 310, pp.4900-4903 (2008), 査読有.

〔学会発表〕（計 10 件）

1. 石川博康、嶋中啓太、十倉史行、林靖彦、原陽介、中西正美、ポーラス Si 基板上への GaN の MOCVD 成長, 第 68 回秋季応用物理学会学術講演会, 北海道工業大学, 2007 年 9 月 7 日.
2. H. Ishikawa, T. Egawa, and T. Jimbo, GaInN Light Emitting Diodes with Lattice-Matched AlInN/GaN Distributed Bragg Reflector on Si, 7th International Conference on Nitride Semiconductors (ISNS7), Lasvegas, 2007 年 9 月 21 日.
3. 嶋中啓太、石川博康、十倉史行、林靖彦、原陽介、中西正美、ポーラス Si 基板上 GaN の諸特性, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会, 愛知県女性総合センター, 2007 年 11 月 29,30 日.
4. 嶋中啓太、石川博康、十倉史行、林靖彦、原陽介、中西正美, MOCVD 法によるポーラス Si 基板上 GaN の諸特性, 応用物理学会結晶工学分科会 2007 年年末講演会, 学習院大学, 2007 年 12 月 14 日.
5. 嶋中啓太、広森公一、森直人、石川博康, MOCVD 法による Si(110)基板上への GaN 成長, 第 55 回春季応用物理学会学術講演会, 日本大学, 2008 年 3 月 30 日.
6. 石川博康、十倉史行、嶋中啓太, In-situ メルトバックエッチングを施した Si 基板上 GaN, 第 55 回春季応用物理学会学術講演会, 日本大学, 2008 年 3 月 30 日.
7. H. Ishikawa, K. Shimanaka, F. Tokura, Y. Hayashi, Y. Hara, M. Nakanishi, MOCVD growth of GaN on porous silicon substrates, 14th International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, Metz, 2008 年 6 月 4 日.
8. H. Ishikawa, K. Shimanaka, Kouichi Hiromori, Naoto Mori, Tomohiko Morimoto, MOCVD growth of c-axis oriented GaN on Si substrates, Second International Symposium on Growth on III-Nitrides (ISGN-2), ラフォーレ修善寺, 2008 年 7 月 8 日
9. 石川博康、嶋中啓太、M. Azfar .bin M. Amir, 原陽介、中西正美, Si エピを施したポ

ーラス Si 基板上への GaN の MOCVD 成長, 第 55 回春季応用物理学会学術講演会, 筑波大学, 2008 年 3 月 31 日.

10. 森直人、嶋中啓太、広森公一、石川博康, Si 基板上 GaInN MQW LED における n 型層のドーピング濃度の影響, 第 55 回春季応用物理学会学術講演会, 筑波大学, 2008 年 4 月 1 日

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

1. 窒素化合物半導体形成用基板、該基板を用いてなる窒化物半導体及びその製造法、出願人 (株) シリコンテクノロジー、名古屋工業大学、発明者 原陽介、中西正美、石川博康、特願 2007-53129

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 博康 (ISHIKAWA HIROYASU)  
名古屋工業大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：20303696

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

原 陽介 (HARA YOUSUKE)  
(株) シリコンテクノロジー  
中西 正美 (NAKANISHI MASAMI)  
(株) シリコンテクノロジー