

|          |   |
|----------|---|
| 氏名       | あきた かつし<br><b>秋田 勝史</b>                         |
| 学位(専攻分野) | 博 士 (工学)  |
| 学位記番号    | 博乙第 155 号                                       |
| 学位授与の日付  | 平成 19 年 3 月 26 日                                |
| 学位授与の要件  | 学位規則第 3 条第 4 項該当                                |
| 学位論文題目   | 低転位 GaN 基板上のエピタキシャル成長と発光デバイスに関する研究<br>(主査)      |
| 審査委員     | 教授 更家淳司<br>教授 吉本昌広<br>教授 山田正良<br>(独)理化学研究所 平山秀樹 |

### 論文内容の要旨

窒化ガリウム (GaN) 系半導体を用いた発光デバイスとして、発光ダイオード (LED) (青、緑) と半導体レーザ (LD) (青、青紫) が実用化され、案内板や信号機などの表示用として、あるいは蛍光体と組み合わせた白色 LED は液晶ディスプレイのバックライトとして、広く利用されている。GaN 系 LED はサファイア基板上に形成され、サファイアと GaN の結晶系と格子定数の不整合に起因して、高密度の貫通転位を含んでいる。一方、近年低転位自立 GaN 基板が作製され、サファイア基板上に比べて 3 衍程度貫通転位の少ない成長層が得られるようになり、これを用いた高機能デバイスの出現が期待されている。

本論文ではまず、この低転位 GaN 基板実現に向けて GaAs 基板上への低転位 GaN のエピタキシャル成長と、低転位 GaN 基板上へのホモエピタキシャル成長について検討を行い、それらに基づいて、InAlGaN 紫外 LED の高効率化と、InGaN 青色 LED の高電流密度での高効率化を図っている。

第 1 章は序論であって、GaN 系発光ダイオードの歴史と問題点や低転位 GaN 基板について概説している。

第 2 章では、エピタキシャル成長と評価・デバイス作製の方法について記述している。

第 3 章では、GaAs 基板上への有機金属塩化水素気相成長 (MOHVPE) 法による GaN のエピタキシャル成長について述べている。GaAs(111)A 基板上に、成長温度 900 °C 以上で単一相の六方晶・GaN のエピタキシャル成長に成功しており、この成果は低転位自立 GaN 基板実現の基礎となつた。

第 4 章では、低転位 GaN 基板を、成長前に適切な条件で熱処理することにより、GaN 基板表面の凹部を埋め込み、また突起の発生を抑制できることを示した。低転位 GaN 基板の転位集中領域上の成長層には、ピットが形成されるが、GaN ホモエピタキシャル層の成長速度の増加と成長温度の上昇によって、デバイス特性に悪影響を与えないまでにピット密度とサイズを大幅に減少させることができた。

第 5 章では、発光層に 4 元混晶 InAlGaN を用いて、低転位 GaN 基板上で 350 nm 帯の紫外 LED の高効率化を検討している。基板として、低転位 GaN 基板上とサファイア基板上 GaN テンプレートを比較し、GaN 基板上 LED で約 30 倍の出力を得ている。GaN テンプレート上 LED

では、貫通転位に沿ったリーク電流が LED 特性を悪化させることを示した。高効率発光のメカニズムとなっている InAlGaN 発光層の In 組成揺らぎは、低転位 GaN 基板上でも発生し、組成揺らぎの発生が転位の有無にかかわらないことを示した。

第 6 章では、InGaN 系青色 LED について、高電流密度下の高効率化を検討している。発光層の InGaN の欠陥を減少させるために In 組成を小さくし、同じ発光波長とするために井戸層厚を広げると、低転位 GaN 基板上では高電流密度でも高効率・高出力になったが、サファイア基板上では効率が大きく低下した。この原因が p-AlGaN の高温成長により発光層内に非発光領域が形成されるためであり、この非発光領域が基板の転位の増加と共に広く形成されることを実験的に検証し、低転位 GaN 基板の効果を明らかにした。

第 7 章は結論である。

## 論文審査の結果の要旨

GaN 系 LED は、これまでサファイア基板を用いて作製され、 $10^8\text{-}10^{10} / \text{cm}^2$  程度の高い貫通転位密度にもかかわらず高い発光効率を示している。しかし、360 nm 付近の紫外 LED の発光効率は、青色あるいは緑色 LED に比べ極端に低く、また 450 nm 付近の青色 LED は高電流密度では発光効率がかなり低下する。申請者は、低転位密度の成長層の得られる低転位自立 GaN 基板に向けて、まず GaAs 基板上の六方晶 GaN の成長を検討し、次に低転位 GaN 基板上の高品質 GaN のホモエピタキシャル成長に関する研究を報告している。これらに基づいて、4 元混晶 InAlGaN を発光層とする紫外 LED の構造の最適化に取り組み、高効率 LED の作製に成功した。サファイア基板上では、InAlGaN を発光層に用いて同様の構造の LED を作製しても、高密度の転位が電流リークの原因となり、低転位 GaN 基板の 1/10 程度の出力しか得られなかった。InGaN を発光層とする青色 LED については、発光層の欠陥を減少させる目的で In 組成を減少させた。この場合、同じ発光波長を得るために発光層を厚くする必要がある。成長条件の最適化を通じて、低転位 GaN 基板上では、高電流密度でも高効率が保たれる LED が作製された。サファイア基板上では、低い In 組成の発光層を用いた構造では発光効率が大きく低下した。この原因が、発光層の上に p-AlGaN を高温で成長する際に、転位が多いと発光層の InGaN が一部分解し、大きな非発光領域が生じるためであることを実証し、低転位 GaN 基板の効果を明らかにした。

このように、本論文は、低転位 GaN 基板を用いて高機能発光ダイオードの作製に成功し、サファイア基板と比較して、その差異の原因を実験的に明らかにした。貫通転位が発光効率に影響しないとされてきた GaN 系発光ダイオードにおいて、基板の転位の影響を明確にした点でも、工学的に極めて高く評価できる。

本論文は、審査の結果掲載された以下の 4 編の論文を基礎としている。

- 1) K.Akita, T.Kyono, Y.Yoshizumi, H.Kitabayashi and K.Katayama, "Improvements of external quantum efficiency of InGaN-based blue light-emitting diodes at high current density using GaN substrates", Journal of Applied Physics, 101(2007)033104.
- 2) K.Akita, T.Kyono, Y.Yoshizumi, H.Kitabayashi and K.Katayama, "Characteristics of InGaN light-emitting diodes on GaN substrates with low threading dislocation densities",

- physica status solidi (a), 204(2007)246.
- 3) K.Akita, T.Nakamura and H.Hirayama, “Effects of GaN substrates on InAlGaN quaternary UV LEDs”, physica status solidi (a), 201 (2004)2624.
- 4) H.Hirayama, K\_Akita, T.Kyono and T.Nakamura, “Milliwatt Power 350 nm-band Quaternary InAlGaN UV-LEDs on GaN Substrates”,  
physica status solidi (a), 201 (2004)2639.