

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔研究進捗評価用〕

平成25年度採択分

平成26年5月30日現在

研究課題名（和文）**分極を有する半導体の物理構築と深紫外発光素子への展開**

研究課題名（英文）**Physics of highly polarized semiconductors and their application to deep ultraviolet light emitting devices**

研究代表者

**天野 浩** (AMANO HIROSHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要：結晶の高品質化及び高純度化、更にナノカーボンとの融合により AlGaInN 系深紫外発光素子の特性を飛躍的に向上し、同材料の特徴である大きな分極を有する半導体の物理を構築する。

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電気・電子材料

キーワード：分極半導体、AlGaInN、ナノカーボン、深紫外 LED、紫外 LD

1. 研究開始当初の背景

平成15年から3年間実施された基盤研究(A)により、サファイア基板上に低転位密度高品質 AlN 成長が可能となった。さらに平成18年から5年間実施された特定領域研究により、AlGaInN 系紫外・深紫外発光素子研究は着実に進んだ。次のステップとして本特別推進研究では、**結晶高品質・高純度化の追求**に加え、**グラフェンと半導体との異種材料融合**、及び**大きな分極を積極的に利用した新しいバンドエンジニアリング**により、“**深紫外発光素子の性能を飛躍的に向上**”させ、出力1ワット/チップ以上の深紫外発光素子を創成する。一方、これら次世代デバイスの実現には、AlGaInN 半導体の特徴である大きな分極を考慮したデバイス設計が必須である。本研究では、その基礎となる“**分極を有する半導体発光デバイス物理基盤の構築**”を目指す。

2. 研究の目的

(1) **深紫外発光素子の高出力化**

基板である AlN 結晶の高品質化及び高純度化、及び透明電極材料として期待されるナノカーボンとの異種材料融合、さらに大きな分極を積極的に利用した新しいバンドエンジニアリングにより、紫外発光素子の出力を1ワット/チップ以上と性能を飛躍的に向上させる。

(2) **分極半導体発光デバイス物理の構築**

次世代デバイスの実現には、III族窒化物半導体の特徴である分極を考慮した新しいデバイス設計指針が必須である。本研究では、その基礎として分極を有する半導体発光デ

バイス物理基盤の構築を行う。

3. 研究の方法

(1) **深紫外発光素子の高出力化**

a. 超高品質 AlN バルク基板の創製：昇華法を用いた AlN 単結晶成長、HVPE 法を用いた SiC 及び昇華法 AlN 基板上への高純度 AlN 成長、サファイア還元法によるサファイア基板上への高品質 AlN の HVPE 成長を行う。

b. AlGaInN 系分極半導体へのナノカーボン電極形成：グラフェンの CVD 成長及び溶液プロセスにより作製したカーボンナノチューブを p 型電極として用いた深紫外 LED の試作を行う。

(2) **分極半導体発光デバイス物理の構築**

a. 分極半導体デバイス物理の構築：アンドープ AlGaIn/GaN 超格子による分極誘起 p 型の物性解析及び縦伝導のためのデバイス構造設計を行う。

b. 分極半導体デバイス物性解析：電子線ホログラフィ (EH) 及び電子ビーム誘起電流 (EBIC) 法を用いて深紫外 LED のポテンシャル分布を解析し、デバイス設計にフィードバックする。

4. これまでの成果

(1) **深紫外発光素子の高出力化**

a. 昇華法を用いて 6H SiC 基板上に AlN 成長を行った。透明で光沢のある AlN の成長に成功した。膜厚は 500  $\mu\text{m}$  程度であった。KOH 高温エッチングより判明した EPD は  $1.4 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  であった。

c. 面サファイア基板上に AlN 緩衝層を堆積さ

せ、N<sub>2</sub>-CO 雰囲気 1700 °C で 2 時間の熱処理を行うことで、図 1 に示す通り(0002)回折の FWHM が 50 arcsec 以下、(10-12)回折の FWHM が 200 arcsec 以下を実現した。この値はサファイア上 AlN では世界最高の結晶性を示す値である。

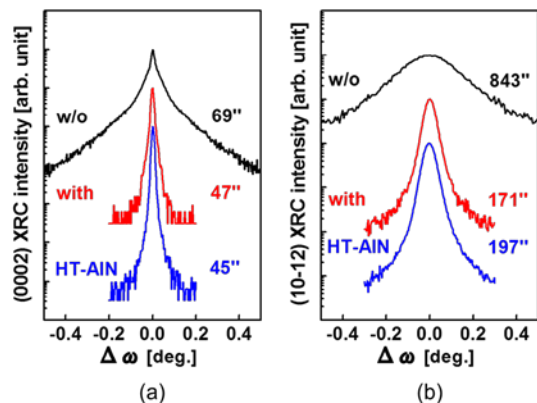


図 1 AlN 緩衝層アニール後及び AlN 2 μm 成長後の(0002)回折と(10-12)回折の X 線ロックンングカーブ

b. アルコール CVD 法と析出法を組み合わせたハイブリッド法を用い、多層構造でありながら、結晶完全性の高い多層グラフェン層を得ることに成功した。溶液プロセスにより CNT 薄膜をメンブレンフィルタ上に形成し、続いて LED 構造のメサ上に選択的に転写を行った。作製した素子において図 2 に示す通り発光を観測し、CNT からの正孔注入を確認した。また、化学ドーピングより、立上り電圧の低下を実現した。当初の目論見の通り、CNT 薄膜の仕事関数制御による正孔注入の改善を実証した。

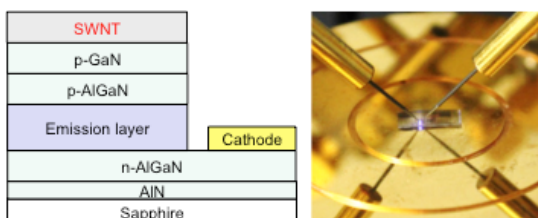


図 2 CNT 電極深紫外 LED の素子構造と発光動作時の写真。

## (2) 分極半導体発光デバイス物理の構築

a. アンダードープ AlGaIn/GaN 超格子と p-GaN コンタクト層の積層構造を MOVPE 成長し、Hall 効果により解析し、またシミュレーションとも比較した結果、低温では二次元正孔ガスによって p 型伝導が生じること、高温では p-GaN 中のアクセプタ活性化による p 型伝導を確認した。縦伝導特性評価のため、分極誘起アンダードープ p 型超格子層を有する pn 接合ダイオード構造を試作した。試作した試料と Mg ドープ超格子層及び p 型 GaN 層を有する pn 接合ダイオードについて、それぞれの電流電圧特性を比較した。直列抵抗は 2 倍

程度と若干高いものの、ほぼ同等の電流-電圧特性を確認した。これにより、アンダードープ超格子 p 型層による縦伝導を世界で初めて実証できた。

イオン化した不純物濃度のイオン化エネルギーおよび分極固定電荷濃度依存性を解析し、分極固定電荷濃度との相互作用により、そのイオン化率が 100%にまで上昇した。一方で、同符号電荷領域では、キャリアが空乏化するデメリットが生じることも明らかとなった。その問題の回避のため「高濃度ドーピングによる遮蔽」と「組成傾斜による分極電荷濃度の希釈」に基づくデバイス設計を行い、活性層への正孔注入効率 100%の見通しを得た。

b. 深紫外 LED の EBIC 像を観察した。EBIC 像と SEM 像を p-n 接合に沿った方向に詳細に比較して見ると、EBIC の変化に対応して SEM のコントラストが変化しており、SEM 像のみから pn 接合の完全性に対する知見が得られる可能性があることが分かった。

## 5. 今後の計画

### (1) 深紫外発光素子の高出力化

a. 昇華法を用いて大型 AlN バルク成長を行い、スライス及び研磨技術を構築する。MOVPE 法及び HVPE 法で作製された高品質 AlN の透過率測定を行い、深紫外透明基板を実現する。外部励起による深紫外レーザを検討する。

b. ハイブリッド法を用いて p 型 GaN 上にグラフェン成長を行い、電流電圧特性を評価する。CNT の仕事関数制御により、p 型 AlGaIn へのオーミック電極形成を検討する。

### (2) 分極半導体発光デバイス物理の構築

a. アンダードープ AlGaIn/GaN 超格子 p 型層及び組成傾斜・不純物スクリーニング p 型層による正孔注入効率改善を実証する。

b. EH 及び SEM・EBIC による深紫外 LED 内部ポテンシャル評価法を構築し、デバイス設計にフィードバックして構造最適化を図る。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線)

(1) B. O. Jung, S. Y. Bae, Y. Kato, M. Imura, D. S. Lee, Y. Honda and H. Amano, "Morphology development of GaN nanowires using a pulsed-mode MOCVD growth technique", CrysEngComm., 16, 2273-2282, 2014 ほかに 12 件

ホームページ等

<http://www.semicond.nuee.nagoya-u.ac.jp/index.html>

[amano@nuee.nagoya-u.ac.jp](mailto:amano@nuee.nagoya-u.ac.jp)