

極限発光効率を目指した 半極性 InGaN 発光素子の高品質化

所属： 京都大学 工学研究科 電子工学専攻

助成対象者：松田 祥伸

共同研究者：

概要

窒化物半導体 InGaN をベースとした発光デバイスは、可視領域の光源として重要である。一方で、窒化物半導体に特有の分極電界のために、緑色～赤色(可視長波長領域)の InGaN LED は効率が低下する問題がある。これに対し、分極電界が低減される非極性面上への素子作製が提案されてきたが、結晶成長技術の未熟さにより、非極性面のポテンシャルを十分に発揮できていなかった。本研究では、オフ角をつけた非極性面基板を活用し、ナノ特異構造を導入することで、高品質な InGaN 発光構造の実現に繋がる結晶成長技術の知見の獲得を目指した。その結果、マイクロ構造による局所的なオフ角分布の導入によって、特異な発光波長分布が形成されることを見出した。

abstract

InGaN-based light emitters are crucial for visible light emissions. However, due to the polarization electric field inherent in the nitride semiconductors, the efficiency of the InGaN LEDs in the green to red spectral range (long-wavelength visible spectrum) is low. While non-polar planes with low polarization electric fields has been proposed, the full potential of non-polar planes has not been extracted due to the immaturity of the crystal growth techniques. In this study, we aimed to gain insights into the crystal growth techniques leading to high-quality InGaN light-emitting structures by utilizing non-polar substrates with local off-angle variations introduced by micro- or nano-structures. As a result, we found

that the local off-angle distributions through microstructures lead to the formation of unique emission wavelength distributions.

研究内容

【背景】窒化物半導体を用いた光デバイスの発展は目覚ましく、InGaN系発光ダイオード(LED)は可視域の固体光源としてすでに大きな社会的インパクトをもたらしている。一方で、窒化物半導体に特有の分極電界のために、緑色～赤色(可視長波長領域)のInGaN LEDは効率が低下する問題がある。この問題に対して、2000年代初頭から、従来使用される(0001)極性面に替わり、分極電界が低減される半極性面や無極性面(総称して非極性面)上への素子作製が提案されてきた。活発な研究開発が進められて来た一方で、現状、(0001)極性面LEDの外部量子効率を凌ぐLEDは実現されていない(図1)。長年の研究開発による(0001)極性面での高い結晶成長技術に対して、後発の非極性面は作製技術が未熟であり、優れた物性を発揮出来る結晶品質を実現出来ていないことが原因だと考えられる。

【この研究に至った経緯】

これまでの非極性面上LEDの研究開発では、高効率な長波長発光に有望な結晶面方位の探索が主であった。様々な面方位上へのLED作製が報告され、特に長波長発光においては $\{20\bar{2}1\}$ や $\{11\bar{2}2\}$ 半極性面が有望であることが明らかになってきた。一方で、それらの面は理論的にはほぼ100%の内部量子効率を実現できるが、実際にはまだまだ

及んでいない。結晶成長に問題があるために非発光再結合確率が(0001)面に比べて高く、分極電界の低減による発光再結合確率の増大が相殺されていることが原因である。よって、半極性面における非発光性の結晶欠陥を解明し、それを制御する結晶成長技術の確立が不可欠である。

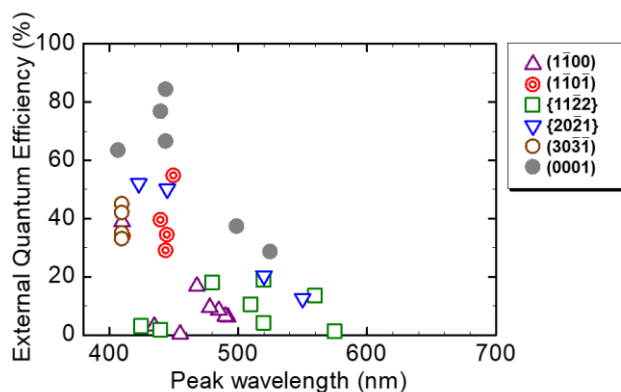


図1. (0001)極性面および様々な半極性面および無極性面上InGaN LEDの外部量子効率の発光波長依存性。

【目的】本研究では、 $\{11\bar{2}2\}$ 半極性面に着目し、特に点欠陥由来の非発光再結合中心の解明を目指すとともに、点欠陥を制御する結晶成長技術を開拓することで、半極性面LEDの物理限界に挑戦することを目的とした。具体的には、① $\{11\bar{2}2\}$ 面上GaIn成長層の基礎物

性評価による点欠陥の解明と、②点欠陥低減に向けたステップフロー成長の実現と InGaN 下地層の導入、の2点を主要課題とした。

【結果】

①オフ角を有する半極性基板上への結晶成長

本研究の始めに、微傾斜 $\{11\bar{2}2\}$ 面 GaN 基板の詳細設計を検討した。申請者はこれまでに、 $\{11\bar{2}2\}$ 面上に選択成長法によって形成される三次元マイクロ構造の研究を行っていた{図 2}[1]。その結果より、通常の平坦な $\{11\bar{2}2\}$ 面基板において、 $[1\bar{1}00]$ 方向にオフ角をつければ、結晶成長後に図 2 に見られるマイクロファセットがナノ構造として現れるのではないかと考えた。その概要図を図 3 に示す。そこで具体的には、 $[1\bar{1}00]$ 方向に 1 度、3 度、5 度のオフ角をつけた $\{11\bar{2}2\}$ 面基板を基板メーカーに作製いただき、その表面状態をノーマルスキ顕微鏡および原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy: AFM) によって評価した。その結果、オフ角に関わらず原子レベルで平坦な表面が得られていることが確認された。AFM 像の一例を図 4 に示す。また化学機械研磨後の段階では、表面モフォロジーにオフ角依存性は無く同様に平坦であった。次に、これらの基板の上に GaN 薄膜をエピタキシャル成長し、オフ角の効果を検証することを試みた。しかしながら、成長後の表面状態が悪く、結晶成長に不十分であることが判明した。この課題について、基板メーカーと加工条件の検討を重ねたが、本研究期間内では原因の特定に至らなかった。

②マイクロ構造による局所的なオフ角分布導入への試み

オフ角をつける別のアプローチとして、マイクロスケールの凸レンズ状構造を基板に形成することを試みた。これにより、局所的にオフ角が変化する基板が得られる。図 5 にその

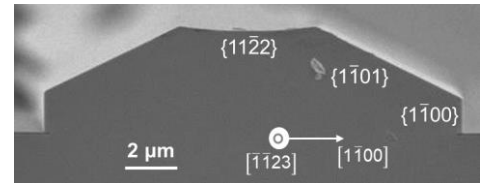


図 2. $\{11\bar{2}2\}$ 面上に選択成長により形成した三次元マイクロ構造。

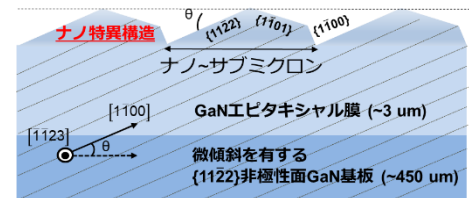


図 3. 微傾斜を有する $\{11\bar{2}2\}$ 面上のナノ特異構造。

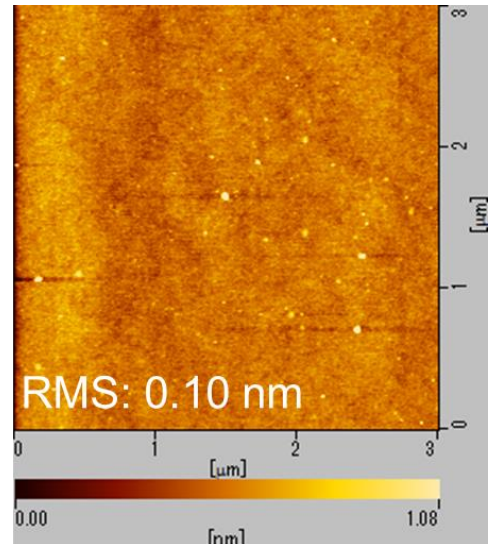


図 4. オフ角 3° の $\{11\bar{2}2\}$ 面 GaN 基板の AFM 像。

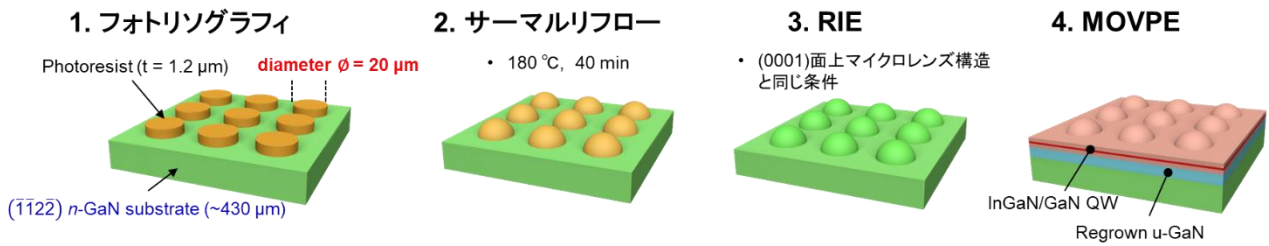


図 5. サーマルリフロー法を用いた凸レンズ形状の GaN マイクロ構造上 InGaN 量子井戸の作製方法.

プロセスフローを示す. 本手法によって作製した GaN マイクロレンズ構造上に InGaN 量子井戸を結晶成長し, その光学特性を評価した. 電子線励起法 (Cathodoluminescence: CL) によって評価した結果を図 6 に示す. 中心対称な三次元形状に, 特徴的な InGaN 量子井戸の発光波長分布が見られた. すなわち, オフ角をつける

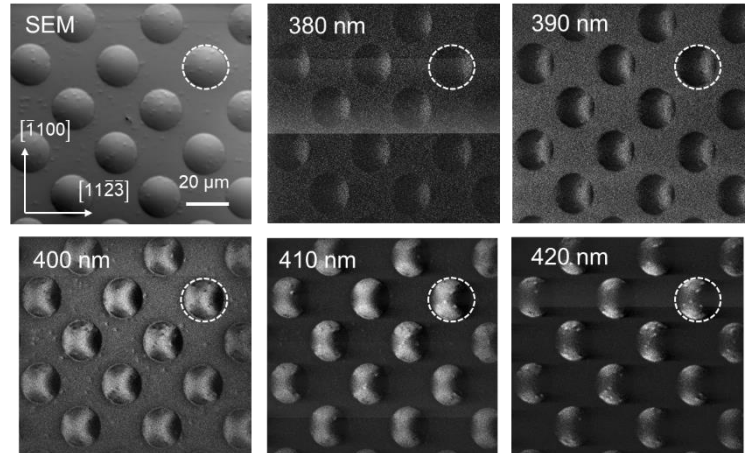


図 6. {11-22} 半極性面上に形成した GaN マイクロレンズ構造上 InGaN 量子井戸の発光波長分布.

る結晶方位 ([1-100] と [11-2-3] 方向) に応じて発光波長が変化し, 中心対称性なマイクロレンズ構造内で異方的な波長分布が確認された. 本成果は国際学会にて発表済みであり, 論文文化を進めている.

【今後】 オフ角基板については, 引き続き研磨工程の最適化をメーカーと協力して進めて, 高品質なエピタキシャル膜が得られる体制の確立を目指す. それと同時に, 興味深い物性を示すマイクロレンズ構造の研究にも手を広げていき, InGaN 発光層の詳細な構造解析などによって, 高効率な非極性面 InGaN に繋がる物理的知見の獲得を進めていく.

【引用文献】

1. Y. Matsuda, M. Funato, and Y. Kawakami, Applied Physics Express **10**, 071003 (2017).

【本助成に関わる成果物】

[論文発表]

1. Yoshinobu Matsuda, Mitsuru Funato, and Yoichi Kawakami, “InGaN-based LEDs

on convex lens-shaped GaN arrays toward multiwavelength light emitters” , Applied Physics Express **16**, 0155110 (2023).

2. Yoshinobu Matsuda, Souta Funato, Mitsuru Funato, and Yoichi Kawakami, “Multiwavelength-emitting InGaN quantum wells on convex-lens-shaped GaN microstructures” , Applied Physics Express **15**, 105503 (2022). アメリカの半導体業界紙「SemiconductorToday」に掲載 (2022年10月12日)

[口頭発表]

1. Y. Matsuda, S. Funato, M. Funato, and Y. Kawakami, Multiwavelength emission from InGaN quantum wells on GaN microlens structures, The 20th Intern. Conf. on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, Stuttgart, Germany (July 10-14, 2022).
2. Y. Matsuda, S. Funato, M. Funato, and Y. Kawakami, InGaN-based LEDs on GaN microlens arrays for multi-wavelength emission, Intern. Workshop on Nitride Semiconductors, Berlin, Germany (October 09-14, 2022).
3. Y. Matsuda, M. Funato, and Y. Kawakami, Anisotropic emission wavelength distribution of InGaN quantum wells on GaN microlens structures formed on semipolar (-1-12-2) plane, The 10th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, Taoyuan, Taiwan (Hybrid) (November 13-18, 2022).
4. 松田祥伸, 船戸充, 川上養一, 自在な構造制御による多波長発光を目指した GaN マイクロレンズ構造上 InGaN LED, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 東北大学 (Hybrid) (2022年9月20-23日).
5. 松田祥伸, 船戸充, 川上養一, サーマルリフロー法を用いた InGaN 系多波長発光構造の作製と LED デバイス動作, 電子情報通信学会研究報告 ED2022-43/CPM2022-68/LQE2022-76, pp. 1-4, 2022年11月25日.
6. 松田祥伸, 宮脇啓嘉, 船戸充, 川上養一, 発光スペクトルの電気制御を目指した InGaN 系多波長発光構造の設計と作製, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学 (Hybrid) (Invited), (2023年3月15日-18日).
7. 松田祥伸, 船戸充, 川上養一, {11-22}面 GaN 基板上 InGaN 系マイクロレンズ構造における異方的な発光波長分布, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学 (Hybrid) (2023年3月15日-18日).

8. 福重翔吾, 松田祥伸, 船戸充, 川上養一, 半極性面上 InGaN 系マイクロレンズ構造の広帯域発光に向けた作製条件の検討, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 上智大学 (Hybrid), (2023 年 3 月 15 日-18 日).