戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域
「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」
研究課題
「230-350nm 帯 InAlGaN 系
深紫外高効率発光デバイスの研究」

研究終了報告書

研究期間 平成19年10月～平成25年3月

研究代表者： 平山 秀樹
(独)理化学研究所、主任研究員

§1 研究実施の概要

（1）実施概要

波長が230-350nm帯の深紫外高効率LED・深紫外半導体レーザは、殺菌・浄水、医療、生化学産業、高密度光記録、公害物質の高速浄化、高演色LED照明、各種情報センシングなどの幅広い分野への応用が考えられ、その実現が大変期待されている。本研究では、広い深紫外発光領域を持つAlGaN系半導体を用い、230-350nm帯の深紫外高効率発光素子を実現することを目的として研究を行った。AlGaN系材料では、結晶成長や各種材料物性に起因する問題から、十分な性能を有するバッファー層、発光層、ドーピング層の実現が難しいため、高効率深紫外発光素子の実現が難しい現状であった。本研究では、AlGaN系ワイドギャップ結晶の結晶成長技術とナノ構造形成技術を進化させることにより、低貫通転位 AlN バッファー層、In 組成変調高効率発光層、多重量子障壁による電子リーク抑制法、フォトニック結晶を用いた光取出し改善などを実現し、深紫外発光素子の発光効率を当初に比べ飛躍的に向上させた。これらの手法を用いて、幅広い波長帯（222-351nm）で深紫外LEDの実現を可能にし、さらに、5%程度の高い外部量子効率とシングルチップで 30mW以上の高出力を発する深紫外LEDを実現した。

高効率深紫外LEDの開発は、理研と埼玉大鎌田研究室が連携して行ってきた。当初、高効率深紫外 LED を実現するためには、まず内部量子効率の向上させることが最も重要な課題であった。本研究では、低貫通転位密度AlNバッファーを作製する新手法として我々が独自に発案した「アンモニアパルス供給多段成長法」を展開・最適化させ、サファイア基板上に世界トップクラスの高品質 AlN 結晶を成膜することに成功した。この方法を用い AlN の刃状転位密度を従来比 1/80 程度である $3\times10^{8}cm^{-2}$ 程度に低減し、さらに表面の平坦性も RMS 値0.16nmと世界最高品質を実現した。また大面積（4インチ1枚または2インチ×3枚）均一化も行い、深紫外 LED・LD 用途として実用レベルのテンプレート基板を供給可能とした。低貫通転位 AlN バッファーを用いることで、従来 0.5%程度であった AlGaN 量子井戸の内部量子効率を50%以上まで向上させた。また、ELO（横方向埋め込み成長）法を用いることで、AlNの貫通転位密度を $7\times10^{7}cm^{-2}$ まで低減させ、高効率深紫外LED・LD実現への土台を築いた。

AlGaN に 1%以下の組成で In（インジウム）を混入することにより形成される In 組成変調領域へのキャリア局在効果を用い、80%程度の非常に高い内部量子効率を初めて実現した。また、In混入によりp型AlGaNのホール濃度も向上することを見出した。高品質AlNバッファー上にAlGaN系深紫外LEDを作製し、AlGaN系の最短波長を含む222nm-280nmのLEDを実現した。さらに、InAlGaN系 LEDを作製し、282nm の殺菌用途波長で実用レベル高出力（＞10mW）の深紫外LEDを世界初実現した。

短波長深紫外LEDでは、p型AlGaNのホール濃度が極めて低い（＜$10^{14}cm^{-3}$）ため、発光層への電子注入効率が低いことが問題であった。短波長 LED では、電子ブロック効果の高いAlN電子ブロック層を用いた場合でも、電子注入効率が20%程度と低いことを明らかにした。本研究では、多重量子障壁（MQB）を用いることにより、電子ブロックの実効的な高さを最大で 2 倍程度に高くできることを計算から明らかにした。MQBを用いた深紫外 LED を作製し、波長250nmの深紫外LEDで電子注入効率をは20%程度から80%以上に改善させた。

深紫外LEDの光取出し効率は、p型コンタクト層と電極による光吸収のため、8%程度と非常に小さくなることが問題であり、今後、大幅な改善が必要とされている。本研究では①Al 系高反射p型電極と透明p-AlGaNコンタクト層導入、②2次元フォトニック結晶（2D-PhC）形成、③結合ピラーAlN バッファー導入、による光取出し効率の改善を検討した。サファイア裏面の2D-PhC導入により1.2倍の光取出し効率向上を実現した。また、サファイア基板上の結合ピラーAlN バッファーの形成に成功し、今後、光取出し効率と内部量子効率の改善に大きな効

果が期待できる。本研究ではさらに透明p型AlGaNとAl系高反射p型電極の導入を行うことで、光取出し効率を1.5倍以上増加させることに成功し、外部量子効率5%を達成した。

光取出し向上のための2D-PhCの形成技術開拓はNICTの研究グループが担当し、最近その形成技術は大幅に進歩した。金属マスクとナノインプリントを用いた形成法の開発により、サファイア基板上に周期300nmアスペクト比1程度の大面積2D-PhCの形成ができるようになった。

以上の効果を用いて、本研究では深紫外LEDの飛躍的な効率向上、高出力、及び発光波長の拡大を実現してきた。また、これらの効果で世界をリードしてきた。2010年以降、多くの研究グループが深紫外LED研究に新たに参画し、開発競争は激しさを増し、深紫外LEDの効率は加速的に向上し始めている。本研究では現在、外部量子効率5%程度、シングルチップ出力30mW以上を実現している。本課題では透明p型AlGaNコンタクト層の開発に成功しており、今後光取出し効率の飛躍的な向上が可能であり、深紫外LEDの効率は青色LEDの値に近づいていくものと考えられる。また、p型AlGaNの成功により、本研究で開発が間に合わなかった深紫外LD開発も今後前進すると考えられる。

(2)顕著な成果

(CREST研究で得られた最も顕著な成果を3点挙げ、それぞれについて3行程度で説明してください。成果は論文、特許、試作品、展示などが挙げられます。)

1. 世界最高レベル高品質AlN結晶成長の実現

概要:本研究で発案した「アンモニアパルス供給多段成長法」を用いて、サファイア基板上にAlNの結晶成長を行い、非対称X線半値幅250arcsec以下、刃状転位密度$3\times10^{8}cm^{-2}$程度、表面平坦性のRMS値0.16nmといずれの値も世界最高レベルの高品質AlNバッファー層の成膜に成功した。

2. 深紫外における非常に高い内部量子効率の実現

概要:AlNバッファー層の貫通転移密度を従来比で1/80程度に低減することによりAlGaN量子井戸深紫外発光の内部量子効率を(1%以下から50%程度へ)向上させた。また、AlGaNにInを微量加え、Inの組成変調領域へのキャリア局在効果を用いて80%程度の高い内部量子効率を実現した。

3. 多重量子障壁(MQB)を用いた高出力深紫外LEDの実現

概要:多重量子障壁(MQB)を用いた電子リーク制御法を用いて、深紫外LEDにおける電子注入効率を大幅に向上させた。MQBを用いた深紫外LEDを作製し、270nmで33mW、237nmで5mWなどの高出力動作を実現した。

4. 透明p型AlGaNコンタクト層導入による深紫外LEDの光取出し効率の向上

概要:これまでp型GaNコンタクト層による光吸収によって光取出し効率は8%と低かった。本研究では透明p型AlGaNと高反射Al系電極の導入に成功し、光取出し効率を1.5倍以上向上させ、5%の高い外部量子効率を実現した。

§2. 研究構想

(1)当初の研究構想

本研究では、波長200-360nm帯の発光波長域を持ち深紫外発光素子を実現する上で最有力な材料であるAlGaN系半導体を用い、波長230nm-350nm帯の深紫外高効率発光ダイオード(LED)、深紫外半導体レーザ(LD)を実現することを目標としていた。当初、AlGaN系材料は結

晶成長や各種材料物性に起因する問題から、十分な性能を有するバッファー層、発光層、ドーピング層の実現が難しい状況であった。そのため深紫外発光素子の高効率動作は難しく、また実現波長範囲も限られていた。当初の研究構想では、ナノ構造結晶制御高品質 AlN バッファー層、In 組成変調高効率発光層、自己組織量子ドット発光層、原子層制御高ホール濃度 P 型層、フォトニック結晶光取出し機構等を用いることにより、深紫外発光素子の発光効率を飛躍的に向上させ、これまで不可能であった、波長 300-340nm 帯紫外半導体レーザ、波長 280-350nm 帯紫外 LED の数百 mW出力動作、波長 230-280nm 帯紫外 LED の数十 mW出力動作を実現することを目標としていた。当初の立案では以下の研究項目を実現することで研究目標の達成を予定していた。

①「アンモニアパルス供給多段成長法」を用いて高品質 AlN バッファー層を作製し、貫通転位密度を $1\times10^{8}cm^{-2}$ 程度に低減、さらに AlN を厚膜化することにより最終的に $1\times10^{7}cm^{-2}$ 程度を実現する。
②貫通転位の低減により AlGaN 量子井戸の内部量子効率を 30-50%に向上させる。
③無極性 AlGaN の導入と In 組成変更効果による 80%程度の高い内部量子効率の実現。
④アンチサーファクタント法を用いた AlGaN 量子ドットの形成と高い内部量子効率の実現。
⑤原子層制御コドーピング法の開拓による p 型 AlGaN のイオン化エネルギーの低減、および高 Al 組成 p 型 AlGaN における高ホール濃度の実現。
⑥上記の方法を用いて、深紫外 LED の効率・出力として、230-280nm 深紫外 LED において出力 30mW、外部量子効率（EQE）10%、280-340nm 深紫外 LED で出力 100mW、EQE30%を実現する。
⑦上記の方法を用いて、波長 300-340nm の深紫外 LD の実現する。

（2）新たに追加・修正など変更した研究構想

①ELO 法を用いた AlN バッファーの貫通転位密度の低減：
「アンモニアパルス供給多段成長法」を用いた AlN バッファー形成では貫通転位密度 $3\times10^{8}cm^{-2}$ 程度が得られ、内部量子効率(IQE)は、AlGaN 量子井戸で 50%程度 InAlGaN 量子井戸で 80%程度に向上した。一方、90%以上のさらに高い IQE を得るためには $10^{7}cm^{-2}$ オーダーの転位密度を目指す必要がある。本研究では、さらに転位密度を低減するため、ELO 法を併用して AlN バッファーを作製した。
②無極性 AlGaN 導入と、量子ドット発光層に関する研究の休止：
貫通転位密度の低減とInAlGaN4元混晶量子井戸を用いた高効率化により、80%程度の高い内部量子効率が H21 年までに得られたので、更なる内部量子効率向上を目指した「無極性 AlGaN 導入」と「量子ドットに関する研究」を H22 から休止した。
③多重量子障壁（MQB）を用いた電子注入効率の向上：
H20 年に 10mW出力深紫外 LED を本研究で世界初に実現したが、LED の電子注入効率が 20-30%と低く、その改善が必要であることが明らかになった。本研究では 2010 年に、MQB 導入による電子注入効率の向上を提案し、実験により顕著な効果を明らかにした。H22 年より詳細な効果の調査と深紫外 LED の高効率化のため研究項目に付け加えた。
④高反射電極と透明 p 型 AlGaN コンタクト層導入による光取出し効率の向上：
本研究では 2010 年までに、80%程度の高い IQE と 80%以上の電子注入効率を実現した。しかし光取出し効率は依然 8%程度と低かったため、この研究に着手した。光取出し効率の低減は p 型 GaN コンタクト層と電極における紫外光の吸収が原因である。本研究では Al ベース高反射 p 型電極と透明 p 型 AlGaN コンタクト層の導入による光取出し効率向上に関する研究を H22 年から追加して行った。
⑤フォトニック結晶を用いた光取出し効率の向上：
深紫外 LED の光取出し効率を向上させるためにサファイア裏面にフォトニック結晶（2D-PhC）を形成する研究を H22 年から開始した。ナノインプリント用いた手法により、サファイア基板上へのフ

ォトニック結晶の形成手法の開拓を行った。
⑥結合ピラーAlN バッファーを用いた光取出し効率の向上：
光取出し効率の向上と、貫通転位の低減による内部量子効率の向上のため、ピラー構造AlN バッファーが有用であると考えられる。深紫外 LED の高効率化を目指し、H23 年から PSS（Patterned Sapphire Substrate）上に結合ピラーAlN 構造を形成する研究に着手した。

§3 研究実施体制

(1)「平山秀樹(理化学研究所)」グループ

①研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
平山　秀樹	独立行政法人理化学研究所	チームリーダー	H19.10～
藤川　紗千恵	独立行政法人理化学研究所	基礎科学特別研究員	H19.10～
谷田部 透	埼玉大学大学院理工学研究科	M2 学生(卒業)	H19.10～H20.3
野口 憲路	埼玉大学大学院理工学研究科	M2 学生(卒業)	H19.10～H21.3
乗松 潤	埼玉大学大学院理工学研究科	M2 学生(卒業)	H20.10～H22.3
塚田 悠介	埼玉大学大学院理工学研究科	M2 学生(卒業)	H21.4～H23.3
秋葉 雅弘	埼玉大学大学院理工学研究科	M2 学生(卒業)	H22.4～H24.3
富田優志	埼玉大学大学院理工学研究科	M2学生	H23.4～
水澤克哉	埼玉大学大学院理工学研究科	M1 学生	H24.4～
前田 哲利	独立行政法人理化学研究所	テクニカルスタッフ	H21.4～
川村 麻理子	独立行政法人理化学研究所	テクニカルスタッフ	H21.4～H24.9
寺嶋　亘	独立行政法人理化学研究所	研究員	H19.10～
應　磊瑩	独立行政法人理化学研究所	テクニカルスタッフ	H19.10～H23.2

②研究項目

- 低貫通転位 AlN バッファーの実現
- AlGaN 系、InAlGaN 系量子井戸の深紫外・高内部量子効率の実現
- AlGaN 系 220-280nm 帯深紫外 LED の実現と高効率化
- InAlGaN 系 250-340nm 帯深紫外 LED の実現と高効率化
- ELO 法を用いた AlN の貫通転位低減と LED 実現
- 多重量子障壁を用いた電子注入効率の向上
- 高反射 p 型電極を用いた光取り出し効率の向上
- AlN バンド構造に起因した横方向放射特性の調査
- 紫外量子ドット LED の開発
- 無極性 AlN/AlGaN バッファーの結晶成長
- Mg-酸素コドープと短周期超格子を用いた p 型 AlGaN の高ホール濃度化
- 透明 p 型 AlGaN コンタクト層を用いた光取出し効率向上
- フォトニック結晶を用いた深紫外 LED の光取出し効率の向上
- AlN 単結晶基板を用いた高効率深紫外 LED の検討
- PSS 基板上の結合ピラーAlN バッファーの形成と LED の高効率化
- Si 基板上深紫外 LED の開発
- AlGaN 系深紫外 LD の検討

(2)「鎌田憲彦(埼玉大学)」グループ

①研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
鎌田　憲彦	埼玉大学大学院理工学研究科	教授	H19.10～
福田　武司	埼玉大学大学院理工学研究科	助教	H20.4～
五十嵐　航平	埼玉大学大学院理工学研究科	M1	H22.4～

②研究項目

- AlGaN 系、InAlGaN 系量子井戸の紫外光学特性評価
- 窒化物半導体結晶の深紫外発光メカニズムの解明

(3)「NICT」グループ

①研究参加者

	氏名	所属	役職	参加時期
○	益子　信郎	情報通信研究機構	執行約	H22.4～
	中尾　正史	情報通信研究機構	主任研究員	H22.4～

②研究項目

サファイア基板上へのフォトニック結晶作製と深紫外 LED 光取出し改善

§4　研究実施内容及び成果

4. 1　高効率 AlGaN 系深紫外 LED の実現に関する研究 （理研、埼玉大グループ）

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

波長が 220～350nm の半導体深紫外光源(深紫外 LED: Deep-UV Light-Emitting Diode、及び深紫外 LD: DUV Laser Diode)は、幅広い分野への応用が考えられその実現への期待が高い。図 1 に DUV-LED・LD の今後の応用についてまとめた。DUV-LED・LD は、殺菌・浄水、医療分野・生化学産業などへの応用が考えられるほか、高密度光記録用光源や LED 照明、UV 硬化樹脂等への産業応用、蛍光分析などの各種センシング、酸化チタンとの組み合わせによる環境破壊物質(ダイオキシン、環境ホルモン、PCB 等)の高速分解処理など応用範囲が幅広い。殺菌効果では、DNA の吸収波長と重なる 260-280nm 付近の波長で最も効果が高いことが知られている。半導体 DUV 光源は、今後高効率化が進むにつれ市場規模は飛躍的に拡大すると考えられ、高効率・高出力の DUV-LED・LD の開発は重要な課題である。

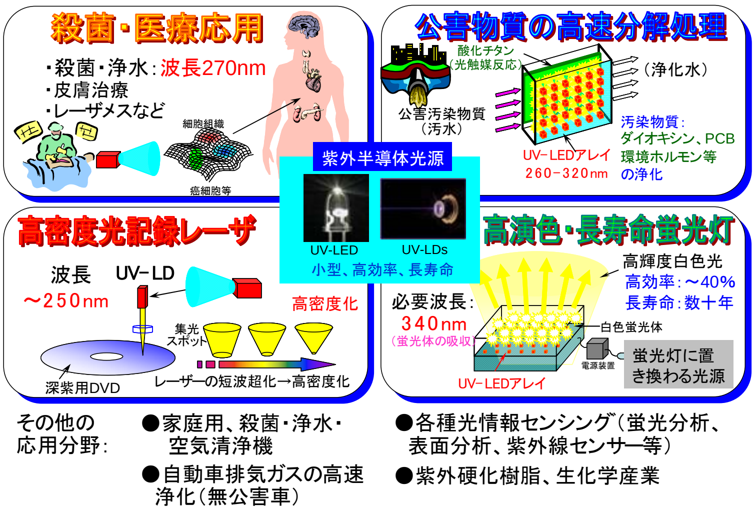

図 1、深紫外 LED・LD の応用分野

図 2 にウルツ鉱結晶窒化物半導体の結晶格子定数とバンドギャップの関係を示す。AlGaN(窒化アルミニウムガリウム)のバンドギャップエネルギーは、GaN の 3.4eV から AlN の 6.2eV まで広い DUV 発光領域をカバーしている。それに加え、①全組成領域において直接遷移型半導体である、②量子井戸からの高効率発光が可能である、③p・n 型半導体の形成が可能である、④材料が堅く素子寿命が長い、⑤砒素、水銀、鉛などの有害な材料を含まず環境に安全である、などの特徴を持つ。これらの理由により、実用可能な DUV 発光素子を実現するための材料として AlGaN 系半導体はもっとも有力である。

本研究では、広い深紫外発光領域を持つ AlGaN 系半導体を用い 230-350nm 帯の深紫外高効率発光素子を実現することを目的とする。AlGaN 系材料では結晶成長や各種材料物性に起因する問題から、十分な性能を有するバッファー層、発光層、ドーピング層の実現が難しく、高効率深紫外発光素子はいまだ実現されていないのが現状である。本研究では、InAlGaN 系ワイドギャップ結晶の結晶成長技術とナノ構造制御技術を進化させることにより、低貫通転位 AlN バッファー層、In 組成変調高効率発光層、原子層制御ドーピング高ホール濃度p型層、フォトニック結晶光取出し機構等を実現し、深紫外発光素子の発光効率を飛躍的に向上させる試みである。これらの手法を用いて、

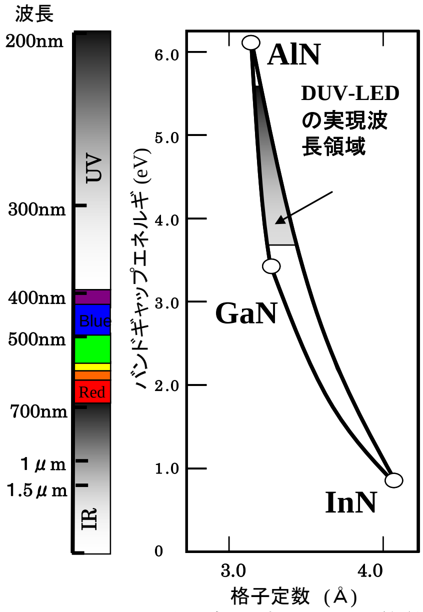

図 2、ウルツ鉱結晶窒化物半導体の結晶格子定数とバンドギャップの関係

波長 230-350nm 帯で数十％の効率を有する深紫外 LED の実現や、波長 300-340nm 帯の紫外 LD の実現を目標としている。

②研究実施の方法と成果

（深紫外 LED 高効率化への問題点と本研究で行ったアプローチ）

深紫外 LED の外部量子効率（EQE）は、量子井戸発光層の内部量子効率（IQE）、電子注入効率（EIE）、及び光取り出し効率（LEE）で決定される。高効率深紫外 LED 、深紫外 LD を実現するためには、これら効率のすべてを向上させる必要がある。しかし、AlGaN 系高効率深紫外 LED、LD は、以下の問題点により、実現が難しい。

1、ワイドギャップ AlN の高品質結晶成長が難しい。また AlGaN の発光は結晶欠陥の影響を受けやすく深紫外発光効率が非常に低い。

2、p 型 AlGaN のホール濃度が低く電子の注入効率が低い

3、コンタクト層や電極における深紫外光吸収により光取出し効率が低い

本研究では、これらの困難を克服するため、窒化物 AlGaN 系混晶半導体の結晶成長技術の開拓を行った。高品質 AlN/AlGaN 系半導体を用いて、上記のそれぞれの効率を向上させるために以下の研究を実施し、深紫外短波長領域において実用レベル高出力を発する深紫外 LED を実現した。

――内部量子効率の向上―― AlGaN 系量子井戸は、InGaN 系と異なり、貫通転位によって発光の内部量子効率が著しく低減する。従来法で作製されたサファイア上 AlN バッファーでは貫通転位密度が高いため、AlGaN 量子井戸の内部量子効率は 0.5%以下と低かった。本研究では低貫通転位 AlN バッファーを作製する新手法として我々が独自に発案した「アンモニアパルス供給多段成長法」を展開・最適化させ、サファイア基板上に世界トップクラスの高品質 AlN 結晶を成膜した。低貫通転位 AlN バッファーを用いることで、AlGaN 量子井戸の内部量子効率を 50%以上まで向上させた。また、ELO（横方向埋め込み成長）法を用いることで、AlN の貫通転位密度を $7\times10^{7}cm^{-2}$ まで低減させ、高効率深紫外 LED・LD 実現への土台を築いた。さらに、AlGaN に微量の In を混入することにより、In 組成変調領域へのキャリア局在効果を用い、深紫外における非常に高い内部量子効率を実現した。高品質 AlN バッファー上に AlGaN 系深紫外 LED を作製し、最短波長領域である 220-280nm 帯 LED を実現した。同様に、InAlGaN 系 LED を作製し、殺菌用途波長で実用レベル高出力の深紫外 LED を世界に先駆け実現した。

――電子注入効率の向上―― 短波長深紫外 LED では、p型 AlGaN のホール濃度が極めて低い（$<10^{14}cm^{-3}$）ため、電子が p 側層へリークし、発光層への電子注入効率が非常に低いことが問題である。本来 p 型 AlGaN のホール濃度を、通常用いられる $3\times10^{17}cm^{-3}$ 程度に向上させることが直接的な方法であるが、アクセプターのエネルギー準位は 500meV 程度（Al 組成が 60％の AlGaN に対して）と非常に深いため実現が難しい。本研究では、In 混入により p 型 AlGaN のホール濃度が改善されることを発見し、深紫外 LED 高出力化（数倍程度）は得られた。しかし当初計画していたコドープによる製造方法でも有効な結果が未だ得られておらず、根本的な解決には至っていないのが現状である。

本研究では、電子注入の問題を解決するひとつの手段として、多重量子障壁（MQB）を窒化物発光デバイスとしては初めて導入した。電子の多重反射効果により電子ブロックの実効的な高さが最大で 2 倍程度に高くできることを計算で明らかにし、実際に深紫外 LED に MQB を導入することで電子注入効率を 20％程度から 80％以上に向上させた。

――光取出し効率の改善―― 深紫外 LED の光取出し効率は、p 型コンタクト層と電極による光吸収のため、8％程度と非常に小さいことが問題であり、今後、大幅な改善が必要とされている。本研究では①Al 系高反射 p 型電極と透明 p-AlGaN コンタクト層導入、②2 次元フォトニック結晶（2D-PhC）形成、③結合ピラーAlN バッファー導入、による光取出し効率の改善を検討した。サファイア裏面の 2D-PhC 導入により 1.2 倍の光取出し効率向上を実現した。また、サファイア基板上の結合ピラーAlN バッファーの形成に成功し、今後、光取出し効率と内部量子効率の改善に大きな効果が期待できる。本研究ではさらに透明 p 型 AlGaN と Al 系高反射 p 型電極の導入を行うこ

とで、光取出し効率を 1.5 倍以上増加させることに成功し、外部量子効率 5%を達成した。

（高品質 AlN 結晶成長技術の開拓と、AlGaN 発光の内部量子効率の飛躍的向上）

AlN の貫通転位密度の低減は、DUV 発光デバイスを実現する上で必要不可欠である。本研究では、サファイア上に AlN を高品質に成長するため、2006 年に「アンモニアパルス供給多段成長法」を考案・開発し、その後これまでの研究で従来の 1/80 程度の刃状転位密度を実現した。この方法は、高効率 DUV-LED を実現するために、①低い貫通転位密度、②原子層オーダー平坦性、③クラックの防止、④安定したⅢ族極性（異常核形成の抑制）を一度に満たす AlN バッファー層を作製する方法として考案した。

図 3 にアンモニアパルス供給多段成長法を用いたサファイア基板上の AlN 結晶成長の概念と用いたガスフローシーケンスを示す。まず、パルス供給により高品質 AlN 結晶の核を基板上に形成し、さらに、横方向によく成長するパルス供給成長法を用いてそれを埋め込む。この 2 つの行程を用いて、AlN の貫通転位密度をできるだけ減少させる。パルス供給法による横エンハンス成長により貫通転位密度は大幅に低減できるが、一方、1μm 以上の厚膜を成長するとサファイアとの格子定数差による歪によりクラックが発生する。したがってその後、連続供給による高速縦方向成長を導入し、クラックを防止しながら平坦性を向上させる。その後、パルス及び連続供給 AlN 層を交互に繰り返すことで、クラックを防止しながら原子層オーダーの平坦性と貫通転位の低減を実現する。アンモニアパルス法は、マイグレーションエンハンス成長が可能であるばかりでなく、Al リッチ条件を実現するので、安定した III 族極性を維持しながら成長が可能であり、窒素極性反転による異常核の形成を阻止できる。

この方法は、結晶成長のみの簡単なプロセスで実現でき、また、形成された AlN バッファーは AlGaN 層を含まず DUV の光吸収が無い点で、他の方法と比べ大変に優れている。実際にはパルス及び連続供給 AlN 層を 5 段程度成長する。高効率 DUV-LED 用途として実用レベルのテンプレートを供給でき、すでに大面積（2 インチ×3 枚）均一成長も実現している。

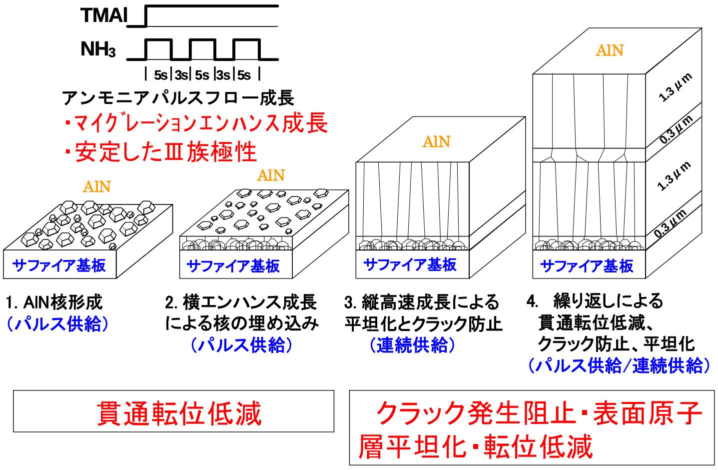

図 3.「アンモニアパルス供給多段成長法」による高品質 AlN バッファー成長の実現
（貫通転位密度を従来の 1/80 程度に低減することに成功した。）

図 4 に、アンモニアパルス供給多段成長法を用いた AlN 各層を導入したときの XRC（10-12）面半値幅の変化、及び AFM による表面平坦性観察を示す。パルス供給の各層を導入することにより刃状転位密度が顕著に低減していく様子が分かる。この手法を用いることで X 線回折（10-12）面 ω スキャンロッキングカーブ（XRC）の半値幅（刃状転位密度に対応）は飛躍的に低減し、以前の 1500arcsec 程度から最小で 250arcsec まで低減した。現在報告されている最高品質の AlN バッファーの実現に成功した。また、クラックは発生せず、層を重ねるに従い、表面の平坦性は改善された。表面 AFM（原子間力顕微鏡）像から成長基板表面には原子ステップが観測され、原子層オ

ーダーの平坦性が実現されていることが分かる。表面平坦性の RMS 値は 0.16nm 程度が得られている。

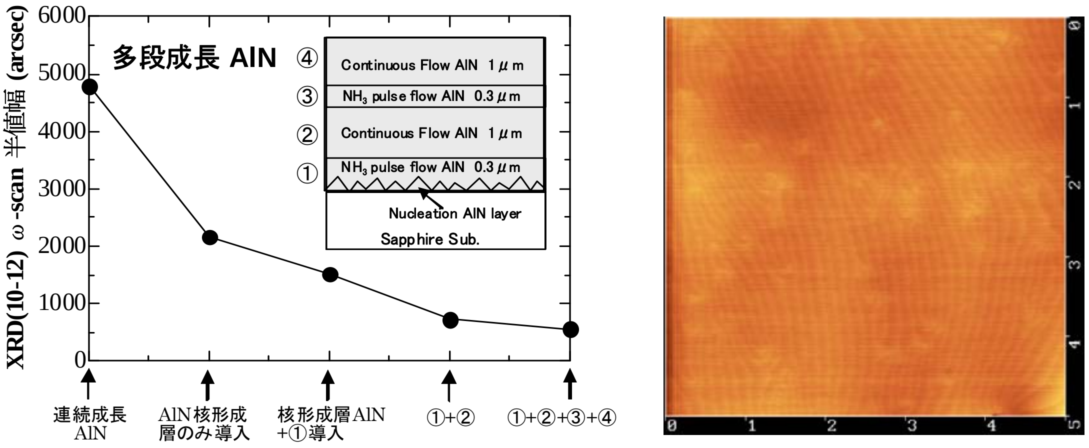

図4 アンモニアパルス供給多段成長法を用いた AlN 各層を導入したときの XRC（10-12）面半値幅（刃状転位密度に対応）の変化と AFM 観測による表面平坦性観測 （AlN 成長段数を重ねるごとに転位密度が低減、5×5μm 観測にて表面平坦性 RMS 値＝0.16nm を実現）

図 5 にアンモニアパルス供給多層成長法により作製した、AlGaN/AlN テンプレートの断面 TEM（透過電子顕微鏡）像とその構造模式図を示す。クラックの発生を抑制しながら刃状転位密度をできるだけ低減させるため、5 段の AlN 層を成長した。断面 TEM 像を見ると、はじめの核形成層と一段目埋込み層付近で貫通転位の減少が顕著に起こっており、その後の多段成長行程において貫通転位密度は緩やかに減少していることが分かる。最終的には刃状転位密度は $3\times10^{8}cm^{-2}$、螺旋転位密度は $2\times10^{7}m^{-2}$ 程度に減少した。従来までの方法を用いた場合、刃状転位密度は $2\times10^{10}cm^{-2}$ 以上と高かったため、本方法が貫通転位の低減に優れていることが分かる。

AlN テンプレートの貫通転位密度を低減することにより、AlGaN 量子井戸発光の飛躍的な増強が観測された。図 6(a)に AlGaN 量子井戸付近の断面 TEM 像、(b)に X 線回折(10-12)ω スキャンロッキングカーブ半値幅(XRC-FWHM)と AlGaN 量子井戸のフォトルミネッセンス発光強度の関係を示す。断面 TEM 像から、非常に薄い量子井戸（1.3nm 厚）が原子 1 層の精度で成長されていることが分かる。量子井戸に自動的に印加されるピエゾ電界の効果で生じる発光効率の低下を抑制するために、極薄（原子 5 層分）の量子井戸を用いている。このような薄い量子井戸を用いて高効率発光を実現するためには原子 1 層精度の平坦性を維持することが非常に重要である。図 6(b)に示すように、XRC （10-12） FWHM が 1500arcsec から 500arcsec 以下になるに従い発光強度は大幅に増加している。従来、AlN の貫通転位密度が $2\times10^{10}cm^{-3}$ 程度の場合、AlGaN 量子井戸発光は弱く IQE は 0.5%以下であったのに対し、貫通転位密度を低減することにより IQE は 50%以上に増強された。

本研究（CREST 研究）開始当初、すでに「アンモニアパルス供給多段成長法」特許を出願済み（H19 年 9 月出願）であったが、その時点ではまだ十分な貫通転位の低減ができておらず（$3\times10^{9}cm^{-2}$ 程度）、また、内部量子効率まだ低い値にとどまっていた。H19-H21 年度、本方法を展開する過程で、最低貫通転位密度の実現と高い内部量子効率を実現した。

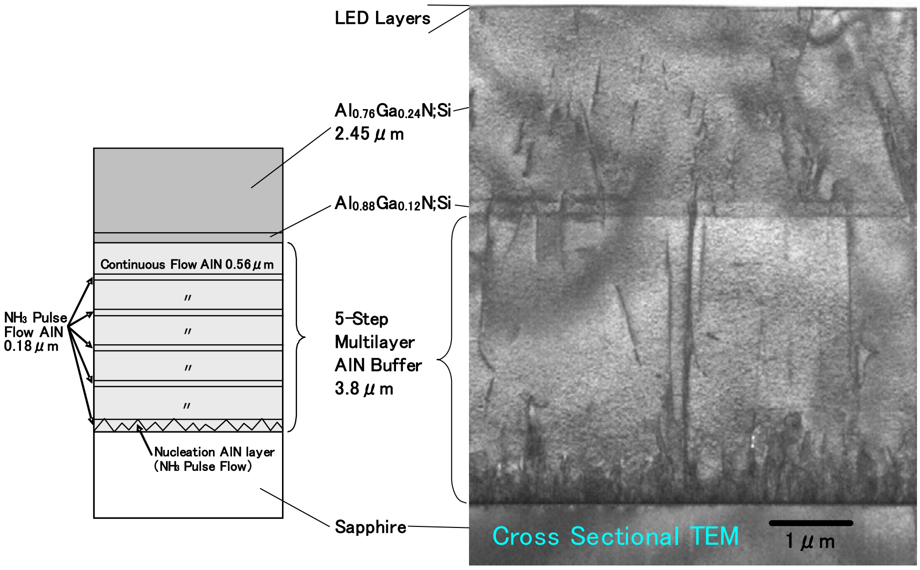

図 5. 多断成長 AlN 層を用いた AlGaN/AlN テンプレート断面 TEM 像と構造模式図
（5 段 AlN バッファーを用い従来比 1/80 程度の 3×10^{8}cm^{-2} 以下の貫通転位密度を実現）

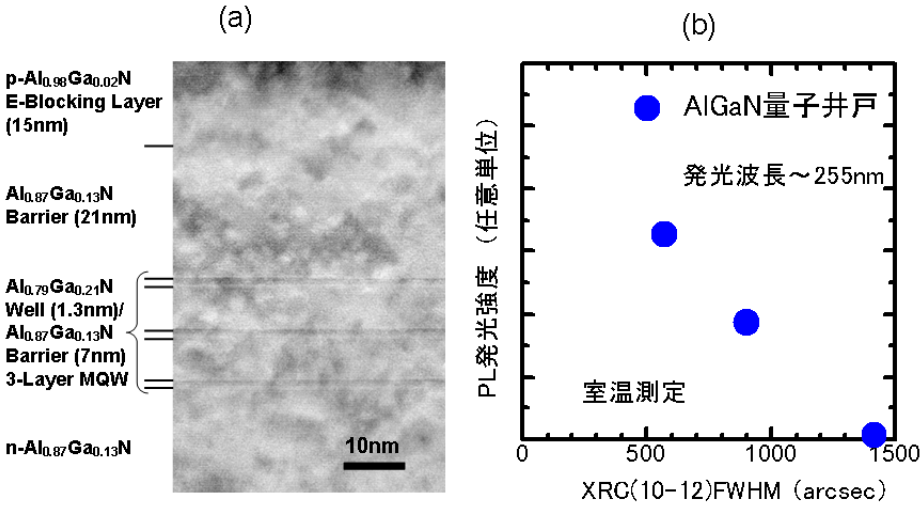

図 6、(a)AlGaN 量子井戸の断面 TEM 像と、(b)X 線半値幅減少（刃状転位密度の低減）に伴う AlGaN 量子井戸発光強度の増加。（内部量子効率の飛躍的改善（0.5%→50%）を観測した。）

（220-350nm 波長帯、実用レベル高出力 AlGaN 系深紫外 LED の実現）

図 7 に AlGaN 量子井戸 DUV-LED の構造と発光の様子、ならびに AlGaN 量子井戸ならびに InAlGaN 量子井戸 LED から得られた電流注入発光（EL）スペクトルを示す。構造はアンモニアパルス供給多段成長法による AlN バッファー層、n-AlGaN 層、i-AlGaN/AlGaN 3 層量子井戸発光層、p-AlGaN 多重量子障壁(MQB)電子ブロック層、p-AlGaN 層、p-GaN コンタクト層からなる。LED の発光波長を変えるために、バリア層、量子井戸層、電子ブロック層に用いる AlGaN の Al 組成を変化させている。波長 220-280nm 帯 LED では、各層に 50-95%の高い Al 組成の AlGaN を用いている。波長 222nm-351nm のすべての LED でシングルピーク動作が得られた。不純物などからのディープレベル発光は、いずれの LED においても、メイン発光ピークに比べ 2 桁以上弱く良好な動作が得られている。222nm は AlGaN 系 LED の最短波長である。AlN バッファー層の貫通転位密度を 3×10^{8}cm^{-2} 程度に低減したため、量子井戸発光層の内部量子効率は 60-80%を実現している。また、p 型 AlGaN 層のホール濃度が 10^{14}cm^{-3} 以下と低いため、p 型層

への電子リークを抑えるために、多重量子障壁(MQB)電子ブロック層を用いている。光取り出し効率はこの構造では 8%程度と低いため、今後の改善が必要である。本研究では、AlN の貫通転位を低減することにより、特に 220-240nm の短波長の DUV-LED の実現に世界で唯一成功している。2008 年には、波長 222-282nm 帯 LED において世界最高出力・最高効率を達成した。また、殺菌用途波長（250-280nm 帯）において実用レベル（＞10mW）出力を世界で初めて実現した。

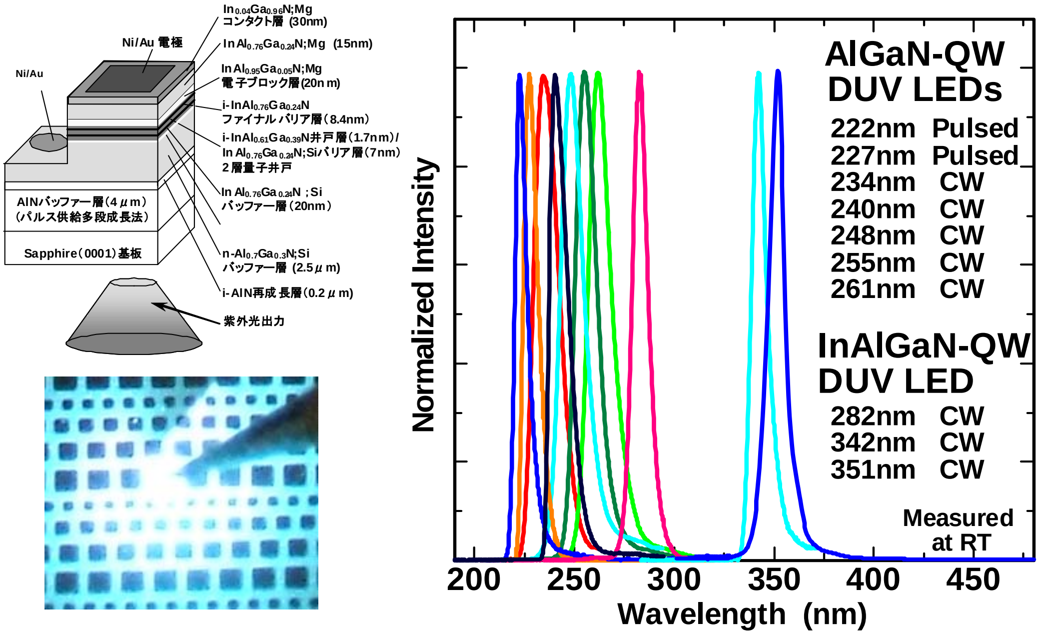

図 7 AlGaN 系深紫外 LED の構造、発光の様子と動作スペクトル（波長 222～351nm を実現）。（2008 年、波長 222-282nm において世界最高出力・効率を実現。また、殺菌用途として実用レベルである 10mW 以上連続出力動作に初めて成功した。）

（In 混入効果による超高効率深紫外発光（IQE＞80%）の実現、ならびに LED の高効率化）

本研究では、AlGaN に In を加えると、混晶内で In 組成変調が起こり、その効果により、深紫外域の発光効率が飛躍的に増強することを初めて見出した。また、In を混入すると、貫通転位密度が比較的高い場合でも、高効率発光が得られることが分かった。In 混入効果を用い、深紫外における非常に高い内部量子効率（IQE～86%）（世界最高値）を実現した（図 9 参照）。さらに、AlGaN への In 混入効果を用いることによりワイドギャップ p 型 AlGaN のホール濃度が増加し、深紫外 LED の高出力動作において大変有利であることを明らかにした。

In をサブ%～数%含む InAlGaN4元混晶では In の組成変調が起こることが確認されている（図 8）。InAlGaN4元混晶は、In 組成変調領域へのキャリアの局在効果により AlGaN よりも高い効率で発光するため、高効率紫外 LED、LD の発光材料として期待されている。我々はこれまで、InAlGaN4 元混晶を用いた 340nm 帯（照明用途波長）の高効率発光を実現し、内部量子効率 50%程度を実現してきた。しかし、波長が 280nm 帯（殺菌用途波長）では、高品質結晶の結晶成長が困難なため高い発光効率が得られなかった。その理由として、Al 組成が 50%以上の高 Al 組成 InAlGaN を比較的低温（約 830℃）で成長するため、高品質が得られる成長レートが変化し、また、酸素、炭素などの不純物濃度が高いこと、表面の平坦性が得られにくいことが問題であった。本研究では、30nm/h という極低速成長を用いることで初めて 280nm で発光する高品質 InAlGaN の成長に成功した。また、$1\times10^{17}cm^{-3}$ 程度のライト Si ドーピングを行うことにより原子層平坦性の改善と酸素不純物濃度の低限を実現した。これらの効果を用いて、高品質な高 Al 組成 InAlGaN 系量子井戸の形成を行い（図 8）、280nm 発光 InAlGaN 量子井戸において推定 80%以上の高い内部量子効率発光を得た（図 9）。また、280nm 帯 LED において CW 出力 10.6mW（2008 年 10 月時点で世界最高値）と高い外部量子効率（1.2%）が得られた（図 10）。これらの高出力紫外 LED は殺菌用小型光源への応用に大変有用である。

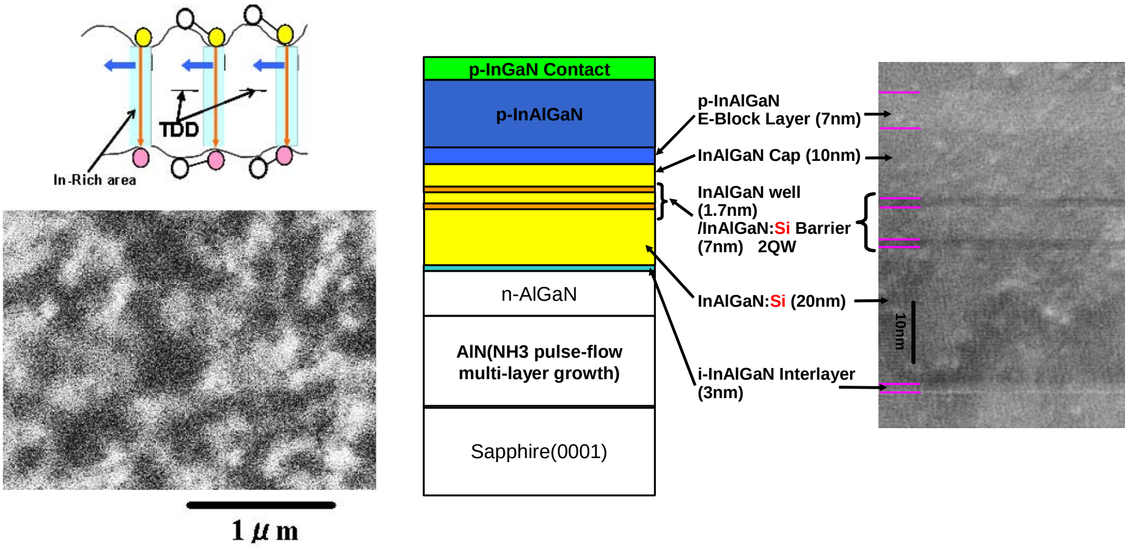

図 8. InAlGaN で観測された In 組成変調効果、及び波長 282nm で発光する InAlGaN4 元混晶量子井戸 LED の構造 (発光層、n 型層、p 型層のすべてに InAlGaN4 元混晶を用いた高効率殺菌波長帯 LED を作製した。)

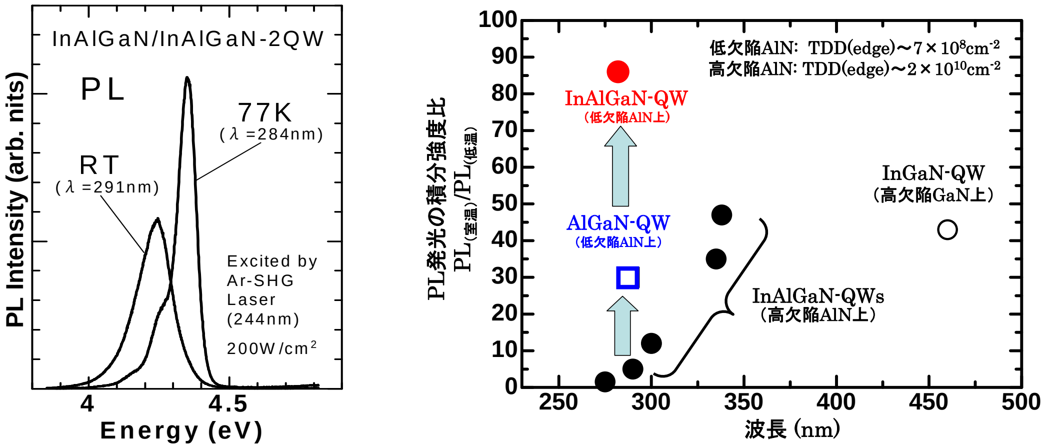

図 9. InAlGaN4 元混晶量子井戸の 77K と室温における PL 発光スペクトル、及び、AlGaN、InAlGaN 量子井戸における低温と室温の PL 積分強度比(内部量子効率に対応)。(InAlGaN 量子井戸で非常に高い IQE(推定値 86%)が得られた。また、InAlGaN 量子井戸では AlGaN 量子井戸に比べ高い IQE が得られることを明らかにした。)

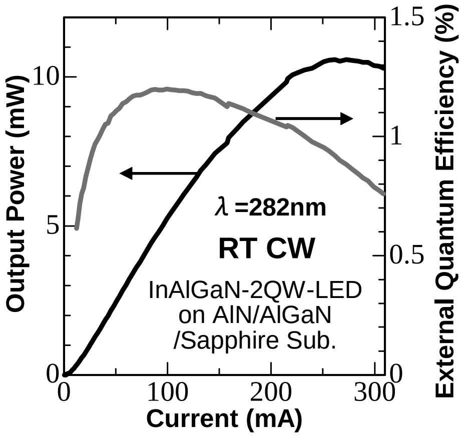

図 10(左). 波長 282nm InAlGaN4 元混晶量子井戸 LED の I-L 及び I-EQE(外部量子効率)特性。(室温 CW 動作で 10mW以上出力を世界初に実現した。外部量子効率は 1.2%だった。)

（深紫外 InAlGaN 量子ドット LED の室温 CW 動作）

アンチサーファクタント法を用いて深紫外 335nm で発光する InAlGaN4 元混晶量子ドットの作製に初めて成功した。単層、高密度の量子ドットを形成し、量子ドットの平均サイズは直径 13nm、高さは 5nm であった。量子ドットからは室温において強いフォトルミネッセンス（PL）発光が観測された。量子ドットを用いた LED を試作し、室温 CW 動作において評価を行った。量子ドット LED としては最短波長である波長 335nm での動作を得た。今後、量子ドット発光層は、低次元量子効果による発光効率の向上が期待されるばかりでなく、貫通転位の無いナノメートルサイズ領域から発光するため高効率発光が期待される（図 11 参照）。

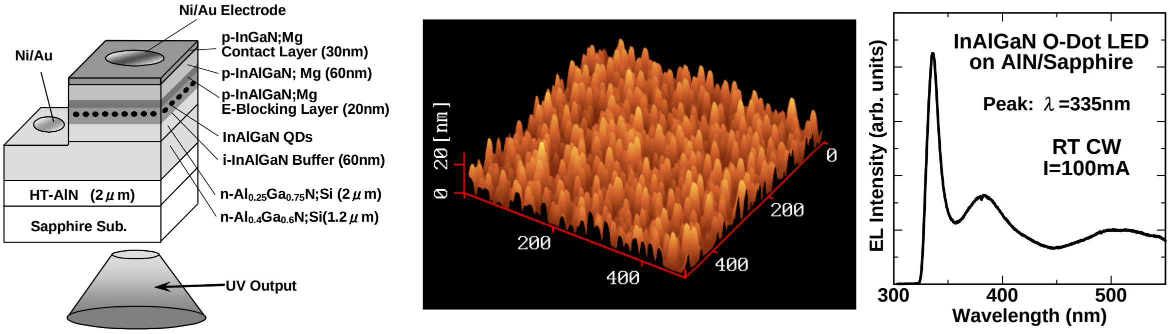

図 11　InAlGaN4 元量子ドット LED の構造、量子ドットの AFM 像と 335nm 発光動作

（ELO 法を用いた AlN 結晶の低転位化）

深紫外高効率 LED、深紫外 LD を実現するためには、AlN バッファーの更なる貫通転位密度の低減が必要不可欠である。本研究では、これまで我々が提案・実現してきた「アンモニアパルス供給多層成長法」によるサファイア基板上低貫通転位 AlN バッファー作製法に加え ELO（Epitaxial Lateral Overgrowth）法を用いて、紫外 LED・LD 対応の低転位 AlN 結晶の実現を行った。これまで、ELO ストライプ周期拡大による AlN 結晶の低貫通転位化と深紫外 LED の試作を行った。

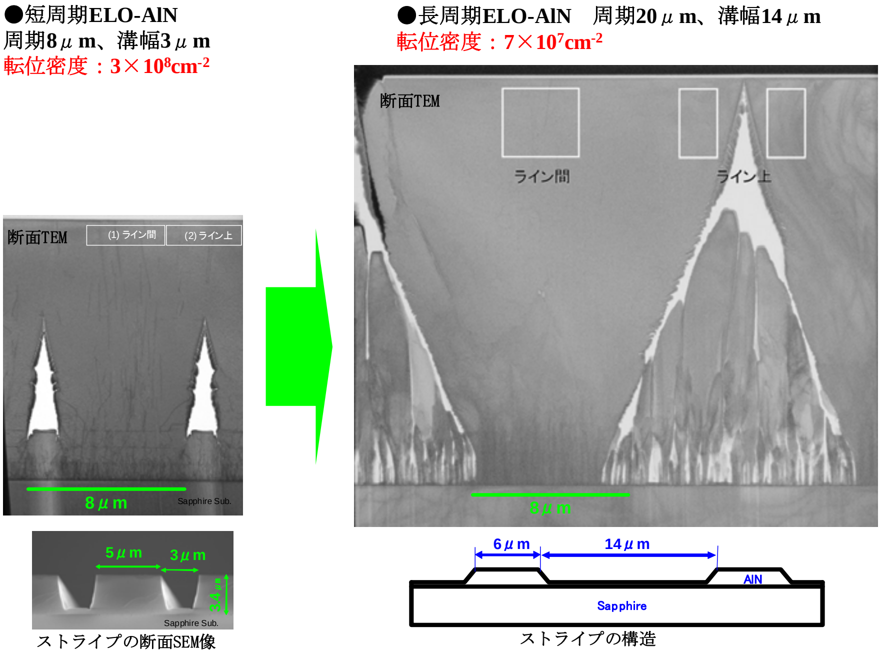

図 12、ELO 法 AlN 成長における横方向成長領域拡大による貫通転移密度の低減（断面 TEM 像）。ストライプ溝領域を 3μm→14μm とすることで貫通転位密度 7×10^7m^{-2} を実現した。

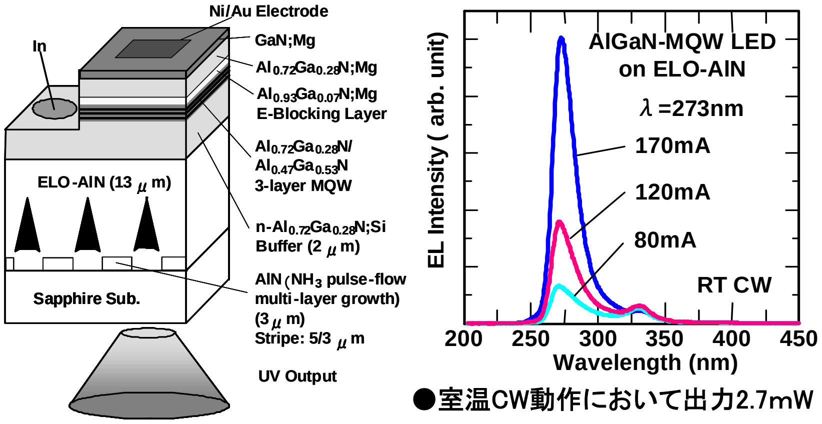

図 13、ELO-AlN 上に作製した 270nm 帯 AlGaN 量子井戸 LED の構造と動作スペクトル。

アンモニアパルス供給多段成長法を用いサファイア基板上に AlN バッファーを成長し、ドライエッチングプロセスにより AlN をストライプ加工した。その後、横エンハンス成長モードを用いて AlN ストライプの埋め込み成長を行った。ELO ストライプの溝部を 3μm から 14μm に増加させることで、横方向成長領域を増加させ、更なる貫通転位密度の低減を行った。その結果さらに低い貫通転位密度 7×10^{7}m^{-2} を実現した（図 12）。作製した ELO-AlN 上に波長 270nm 帯の AlGaN 量子井戸 LED を作製し、CW 動作において最高 2.7mW の出力を得た（図 13）。しかし、ELO バッファー上では表面に異常核成長が多くリーク電流が多く流れるため、LED の外部量子効率は、通常のバッファー上に作製した LED に比べまだ低いのが現状である。今後、MOCVD 埋め込み AlN 成長を最適化することにより、更なる貫通転位の低減とバッファー表面の異常核成長の低減を検討する予定である。これらの技術を用いて、紫外 LED、LD 実現に有用な AlN バッファー形成を進める予定である。

（多重量子障壁（MQB）導入による深紫外 LED の電子注入効率の大幅改善）

GaN 及び AlN における Mg アクセプターの活性化エネルギーはそれぞれ、0.24eV 、0.6eV と大きいため、DUV-LED で用いられる p 型 AlGaN のホール濃度は 1×10^{14}cm^{-3} 以下と大変低い。そのため、注入された電子は、p 層側にリークし、発光領域への電子注入効率（EIE）が著しく低下する。シャローアクセプターを実現するために、現在、カーボンドープやコドープの研究が行われているが、まだ有効な解決策は見つかっていない。p 側への電子リークは、電子ブロック層を量子井戸の p 層側に挿入することにより抑制される。しかし、バリアの高い AlN 電子ブロック層を用いた場合でも電子の反射効果は十分ではなく、250nm 帯 LED では EIE は依然として 20%以下であることが明らかになった。

EIE を大幅に改善するために、我々は多重量子障壁（MQB）を適用した。図 14 に、深紫外 LED の電子ブロック

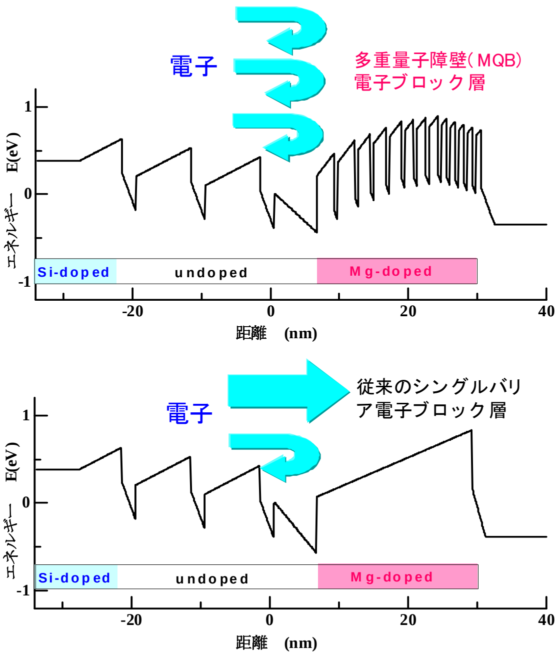

図 14 MQB による電子注入効率改善の概念。
（MQB で電子ブロックの高さが 2 倍程度に増加）

層として(a)MQB を用いた場合と、(b)従来のシングルバリアを用いた場合の電子の反射効果について示す。従来のシングルバリアを用いた場合には、電子ブロック高さ以上のエネルギーの電子は反射されずに p 側にリークし発光層への EIE を低下させた。一方 MQB を用いた場合、電子の多重反射効果により材料限界で決まる障壁高さよりもさらに高い「実効的」障壁高さを実現することができる。シミュレーション計算から、AlGaN 系 MQB では、シングルバリアの場合に比べ 2 倍以上の実効的障壁高さが得られることが分かった。

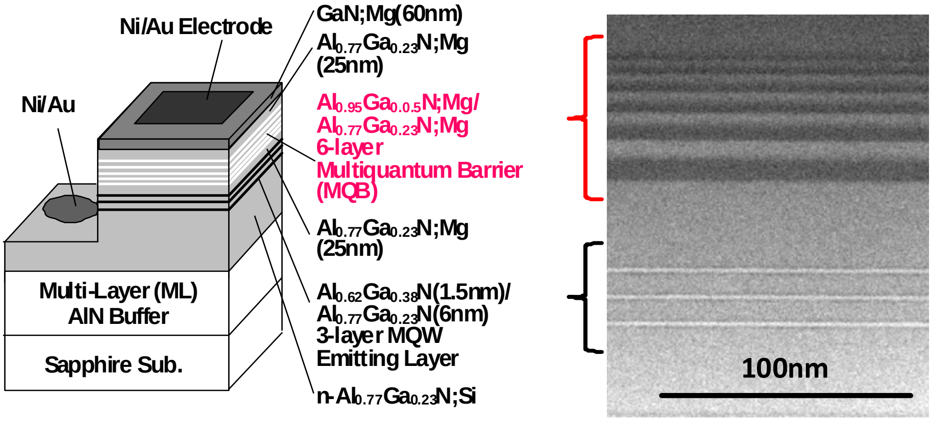

図 15　多重量子障壁(MQB)を有する AlGaN 深紫外 LED の構造と MQB 付近の断面 TEM 像

本研究では MQB を導入した AlGaN 量子井戸 DUV-LED を作製し(図 15)、EQE の大幅な向上を実現した。実際に用いた変調周期 MQB 構造では、周期数、バリア・バレイの各膜厚、MQB 領域のトータル層厚などを、電子反射効果が最も高まるように実験的に最適化した。図 16 に、波長 250nm と 237nm の AlGaN 量子井戸 DUV-LED に MQB を導入した場合の出力の向上を示す。波長 250nm の AlGaN 量子井戸 DUV-LED において、光出力は 2.2mW から 15mW まで(7 倍)向上した。同様に、短波の 237nm では 12 倍の出力向上が観測された。図 17 に、AlGaN 量子井戸 DUV-LED における MQB 効果の波長依存性を示す。MQB の効果はこれまでに 230-270nm 帯の LED で観測され、270nm で約 3 倍、250nm で約 4 倍、235nm では約 8 倍の EQE 向上が確認された。MQB 導入で高い EQE が実現され、270nm で 3.8%、247nm で 1.8%、237nm で 0.4%が得られた。MQB 効果は、バリア高さが小さい短波長 DUV-LED でより顕著であることが分かった。図 18 に MQB を用いた高出力 270nm 帯 AlGaN 量子井戸 DUV-LED の L-I-EQE カーブの例を示す。270nm 帯 LED で最高 CW 出

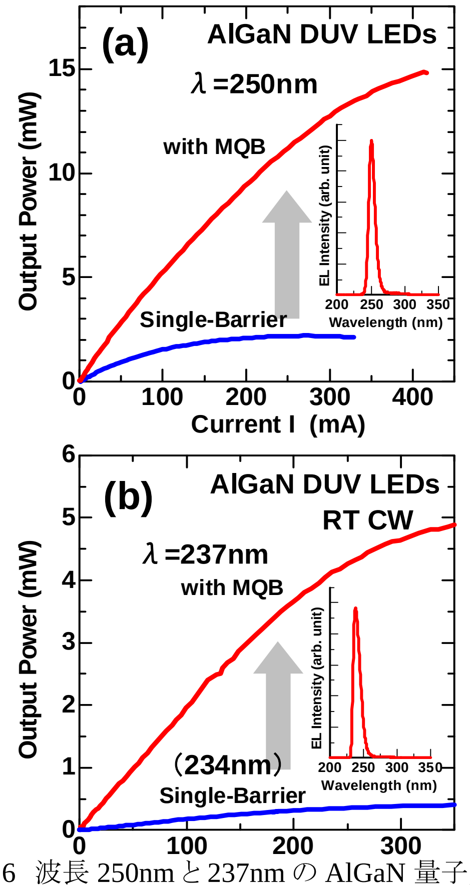

図 16　波長 250nm と 237nm の AlGaN 量子井戸 LED に MQB を導入した時の出力の向上

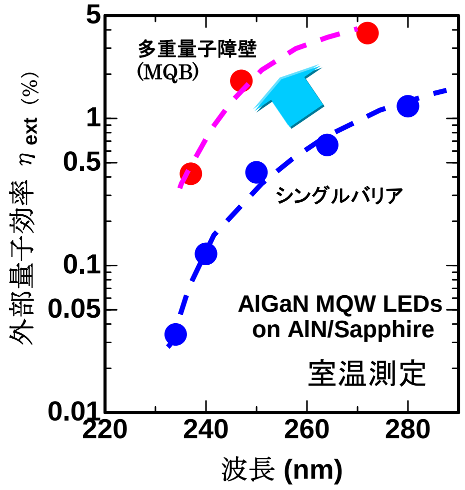

図 17 AlGaN 量子井戸 DUV-LED における MQB 効果の波長依存性

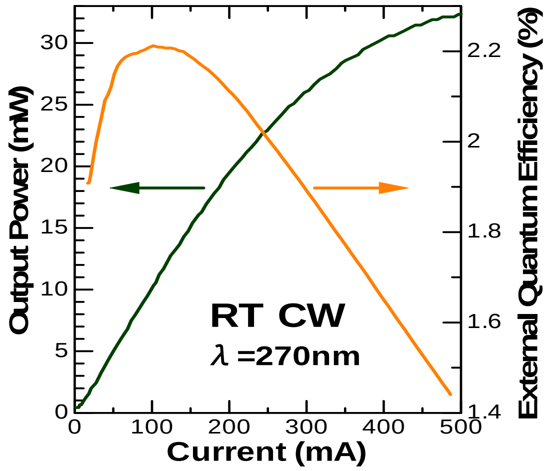

図 18 MQB を用いた高出力 270nm AlGaN DUV-LED の L-I-EQE カーブ

力 33mW、最高 EQE3.8%が得られ(図 17 の例では 2.2%)、MQB の効果の有効性が示された。これらのサンプルはベアチップの状態で測定したものであり、より高効率を得るためにはヒートシンクへの放熱を考慮したフリップチップ(FC)構造が望ましい。今後、本研究の DUV-LED は、FC 加工を行うことで出力と効率が大幅に向上すると考えられる。

DUV-LED の効率の内訳について議論する。内部量子効率(IQE)は PL の温度依存性から、また、光取出し効率(LEE)は LED 層構造の屈折率分布から計算でおおむね求めることができる。したがって、電子注入効率(EIE)については、EQE=IQE×EIE×LEE の関係から逆算で求めることができる。270nm 帯 LED(EQE:3.8%)の内訳は、おおよそ、IQE:60%、EIE:80%、LEE:8%と見積もられた。同様の方法で 250nm 帯 LED の EIE を見積もると、MQB の効果で EIE が約 20%から 80%以上に向上することが見積もられた。このように、MQB 導入で EIE は大幅に向上し、p 型 AlGaN の低濃度に起因する電子リークの問題は、MQB によりおおむね解決できることが分かってきた。さらに、MQB は電流密度が大きい時に効果を発揮するため、LED 高出力動作時の効率低下(効率ドゥループ現象)の抑制や、LD の低閾値・高効率動作において大きな効果が期待できる。

(シリコン基板上での世界初の深紫外 LED の実現)

Si 基板上の深紫外 LED は、安価で大面積・高出力化が期待され、その開発は重要性が高い。本研究では、Si 基板上の高品質 AlN バッファー形成に成功し、Si 基板上の深紫外 LED を初めて実現した。Si 基板上 AlN 成長は結晶の熱膨張差の問題からクラックが入り難しいが、本研究ではパルス供給成長法や ELO 法を用いてクラックの無い高品質 AlN 成長を行い、その上に波長 256-300nm の深紫外 LED を実現した。

安価で大面積 LED の実現が可能な Si 基板を用い、さらにダメージのない基板リフトオフプロセスが可能というメリットを利用して縦型・大面積素子を実現し、光取出し効率とデバイス効率を向上させることにより高出力の深紫外 LED 実現を検討した(図 19)。従来のサファイア基板を用いた場合では、基板を伝搬する導波モードの発生により、光取出し効率が低下する。サファイアは硬くレーザーリフトオフによる AlGaN 層剥離はダメージが大きい。Si 基板を用いた縦型素子は、これらの問題点を克服する方法である。

しかし、Si 基板は AlGaN に比べて熱膨張係数が小さいため、成膜後の降温過程で AlGaN 層に引っ張り歪が生じクラックが入るという問題点があった。またクラックを防ぐため薄いバッファーを用いると貫通転位密度が多く発生し問題であった。本研究では「アンモニアパルス供給法」を用い

て貫通転位の少ない AlN を Si 基板上に成膜することに成功し深紫外 LED を実現した。発光効率を向上させるために LED 層は InAlGaN4元混晶を用いている（図 19）。今後、ウェットエッチングを用いてエピ層にダメージのない Si 基板リムーブを実現し、縦型大面積・高出力深紫外 LED を実現する予定である。

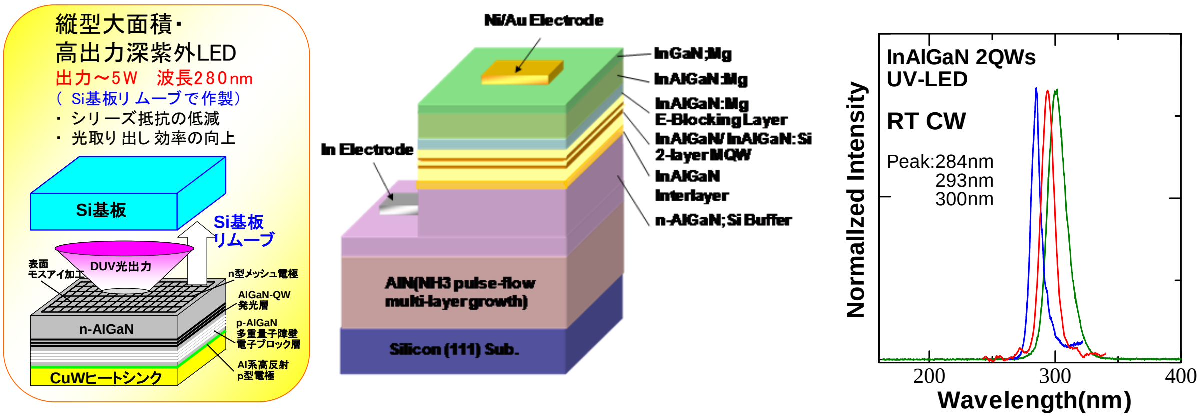

図 19　Si 基板を用いた縦型・大面積高出力・深紫外 LED 開発の概念、及び、本研究で世界初実現した Si 基板上深紫外 LED （パルス供給法を用いて Si 基板上低転位 AlN を実現、また、InAlGaN 量子井戸発光層を用いて高効率発光を実現）

（p-GaN コンタクト層の薄膜化と高反射 p 型電極による光取出し効率の向上）

本研究では、深紫外 LED の内部量子効率（IQE）と電子注入効率（EIE）の向上を実現してきた。しかし、光取出し効率（LEE）は未だ 8%程度と低く、その向上は今後の大きな課題である。本研究では、LEE の向上に関して現在全力で検討を行っている。

光取出し効率向上の試みについて図 20 にまとめる。本研究では、①極薄 p-GaN あるいは透明 p-AlGaN コンタクト層と高反射 p 型電極の導入、②サファイア裏面への 2 次元フォトニック結晶（2D-PhC）形成、③結合ピラーAlN 構造の導入による LEE 向上の試みを行った。これらの方法を用いて LEE を現在の 10%程度から 60%以上に向上させることを目指している。

図 21 に、極薄 p-GaN コンタクト層と高反射 p 型電極の導入による光取出し効率向上の概念を示す。AlGaN 深紫外 LED では p-GaN コンタクト層で紫外光がほぼ完全に吸収され、また p 電極の反射率が低い（25%）ために LEE が 8%程度と低い。深紫外に対応した透明電極も開発が難しい。LEE を向上させるために我々は、コドーピングによる p-AlGaN の高ホール濃度化と透明コン

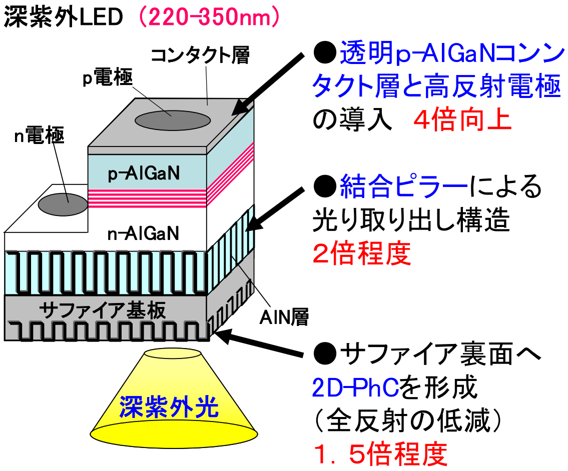

図 20（左）、AlGaN 深紫外 LED の光取出し効率（LEE）を向上させるための手段。LEE を現在の 10%程度から 60%以上に向上させることを目指している。

タクト層の開発、p-GaN 薄膜化、Ni/Al 系高反射p型電極の開発を現在行っている。

本研究では、p-GaN コンタクト層を極薄膜化して光吸収を低減し、また、Al 系電極を用いることで p 型高反射を実現し、トータルで 3 倍程度の効率向上を検討した。p-GaN コンタクト層を 16nm 程度にすることで、光吸収を 30%程度に抑えられることを実験的に明らかにした。10nm 程度の薄い p-GaN コンタクト層で良好な LED 動作の実現に成功した。Al は深紫外光に対して反射率 92%程度であるがオーミックコンタクトが取れない。我々は、極薄(1nm)の Ni を導入することでコンタクトを取りながら高反射を実現した。従来の Ni/Au 電極では約 25%の反射率であったのに対し、Ni(1nm)/Al(100nm)では 65%程度の反射率が得られた。図 21 に、深紫外 LED の LEE 向上の結果を示す。電極を Ni/Au から Al 系に変更する事によって、最高 EQE は約 1.3 倍向上した。今後更なる効率向上が期待される。

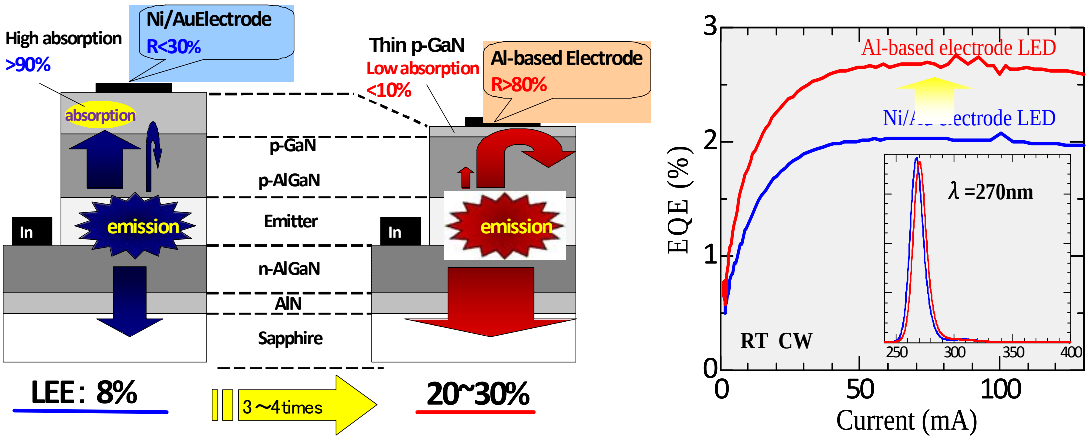

図 21 p-GaN コンタクト層薄膜化と Al 系高反射電極を用いた光取出し効率の改善の概念、及び、Al 系高反射電極を用いた 270nm 帯深紫外 LED の高出力化

(2 次元フォトニック結晶(2D-PhC)を用いた光取出し効率の向上)

本研究では、ナノインプリントを用いたサファイア上 2D-PhC の形成と深紫外 LED の LEE 向上に関する開発を進めてきた。2D-PhD をサファイア基板裏面に形成することで最大で 1.6 倍程度の LEE 向上が、FDTD 法を用いた計算から予測されている。ナノインプリントと ICP ドライエッチング技術を用い、サファイア基板上に周期数 250-300nm、アスペクト比が 1 程度の三角格子状 2D-PhC パターンを形成し(図 22 参照)、深紫外 LED の LEE の向上を行った。2D-PhC を有する 270nm 帯深紫外 LED の構造とその効果を図 23 に示す。フォトニックパターンのアスペクト比を 1 程度にすることで、1.2 倍程度の光り取り出し効率向上を実現した。2D-PhC のホールパターンの断面が台形になることが、実効的なアスペクト比を低減させる原因となっている。今後、垂直に近いエッチングを実現しアスペクト比を向上させることで、LEE の増加率は 1.6 倍程度まで向上すると考えられる。

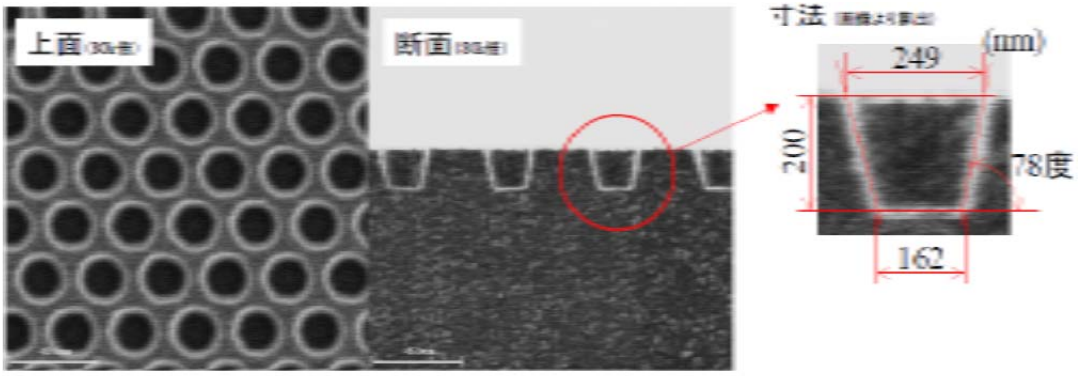

図 22　ナノインプリントと ICP エッチングにより形成された、サファイア裏面への 2D-PhC 構造

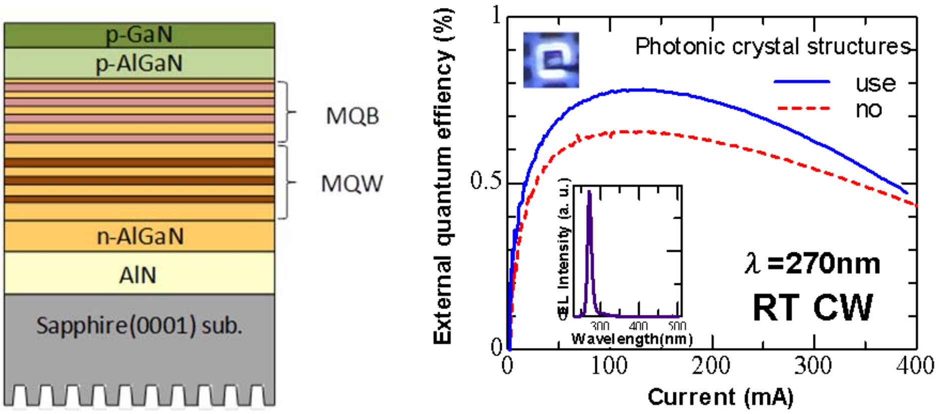

図 23　2D-PhC を有する 270nm 帯深紫外 LED の構造と PhC 効果による光取出し効率の向上

（結合ピラー構造を用いた光取出し効率の向上の検討）

サファイア上の AlN を結合ピラー構造とすることで、貫通転位密度低減による内部量子効率（IQE）の向上、ならびに光取出し効率（LEE）の飛躍的向上が期待される。本研究では、サファイア加工基板（PSS；Patterned Sapphire Substrate）上に、「アンモニアパルス供給多段成長」と横エンハンス成長を組み合わせることで、結合ピラー構造を制御よく形成することに世界初成功した。

図 24 に、PSS 上 AlN 成長の概念と、成長された AlN 結合ピラーの断面 TEM 像を示す。また図 25 には、PSS パターンの SEM 像、PSS 上 AlN のバードビューならびに上面 SEM 像を示す。PSS 上に貫通転位の少ない AlN 核を形成するために、本研究で考案した「アンモニアパルス供給多段成長法」を用いた。その後、高温（~1400℃）、低 V/III 比（＜10）成長による AlN の横エンハンス成長を行った。横エンハンス成長モードの成膜条件をコントロールすることにより、結合ピラー構造が形成された。10μm 程度成長されたピラー上部では貫通転位密度はほとんど無いことが、断面 TEM 像から確認された。結合ピラー構造は縦方向に光伝搬するために、深紫外 LED の光取り出し効率の向上に極めて有利である。またピラーは貫通転位を含まないため、今後高い IQE を得るために有効である。本研究では横エンハンス成長モードをさらにコントロールし、結合ピラー構造を埋め込み、平坦な AlN テンプレートを作製した（図 25）。作成した AlN テンプレート上に LED を作製し、外部量子効率（EQE）が 0.5%程度の動作に成功した。今後、AlN 埋め込み層を最適化すれば LED の高効率化が可能であると考えられる。

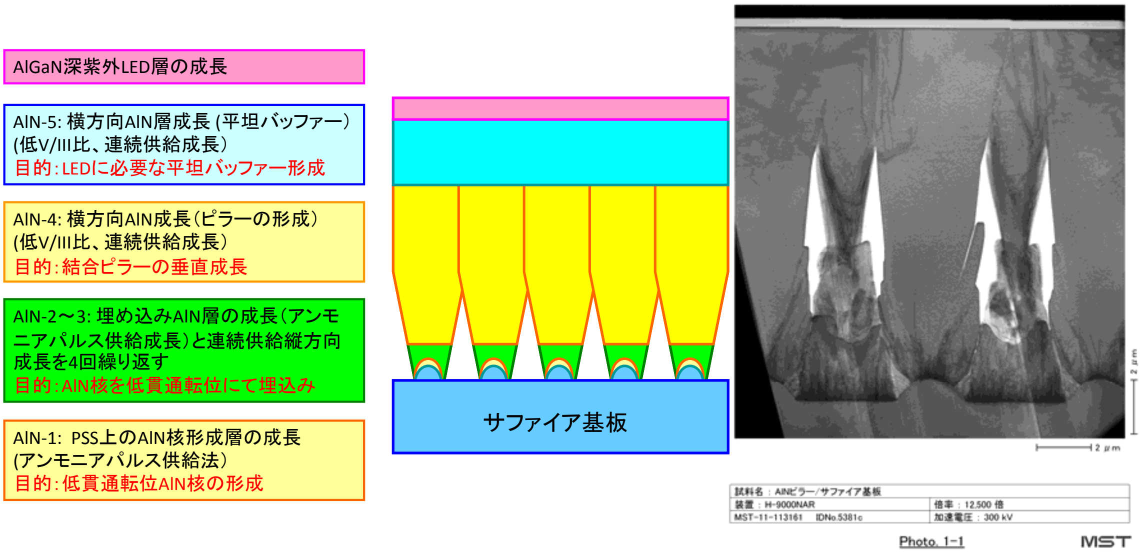

図 24 サファイア加工基板(PSS)上 AlN 結晶成長の概念。(「アンモニアパルス供給多段成長」と横エンハンス成長を複合して使用)と、成長された AlN 結合ピラー構造の断面 TEM 像

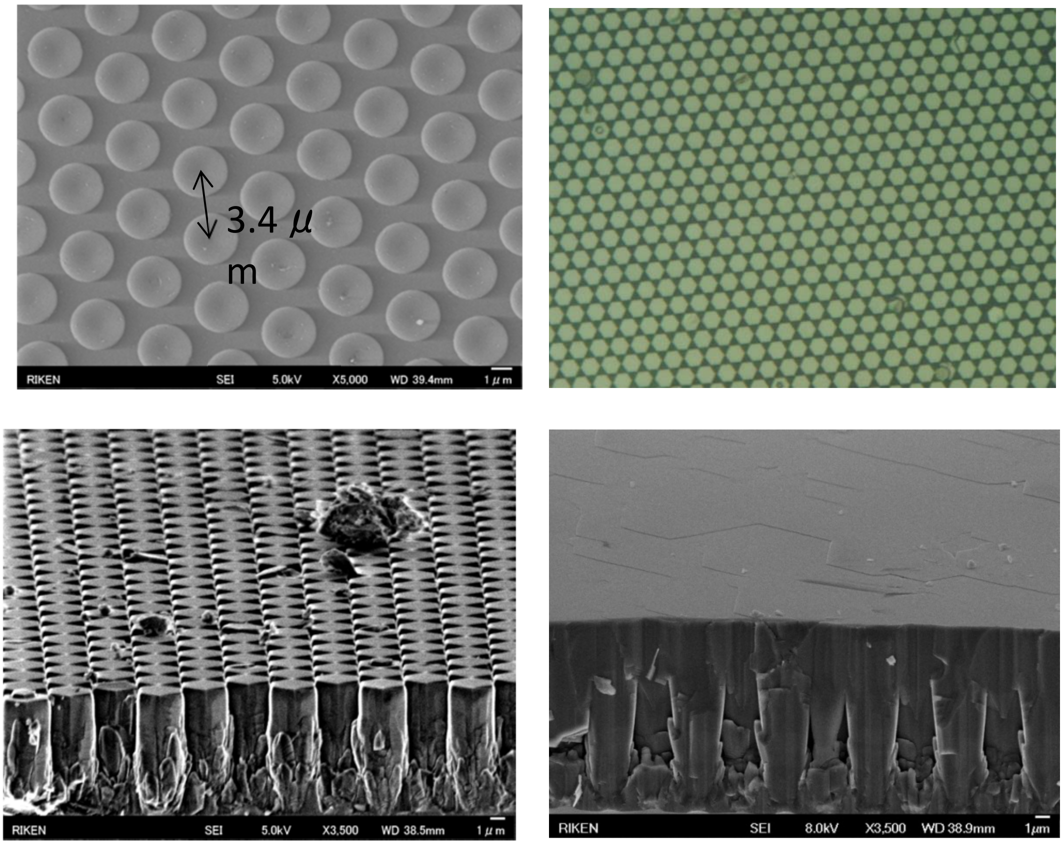

図 25 PSS パターンの SEM 像(左上)、及び、PSS 上に成長された AlN 結合ピラー構造の上面 SEM 像(右上)ならびにそのバードビュー(左下)、AlN 結合ピラーをさらに AlN 横エンハンス成長を用いて埋め込み平坦な AlN テンプレートとした構造(右下)

（サファイア基板傾斜方向変化による深紫外 LED の高効率化）
深紫外 LED に用いているサファイア基板は、AlN バッファー層を安定して結晶成長させるために(0001)面に対して 0.15 度オフ角を持たせた基板を用いている。本研究では、傾斜方向が a 軸傾斜及び m 軸傾斜サファイア基板上の AlN 成膜において、a 軸傾斜サファイア基板を用いた方が欠陥の少ない AlN バッファーを形成できることを明らかにした。

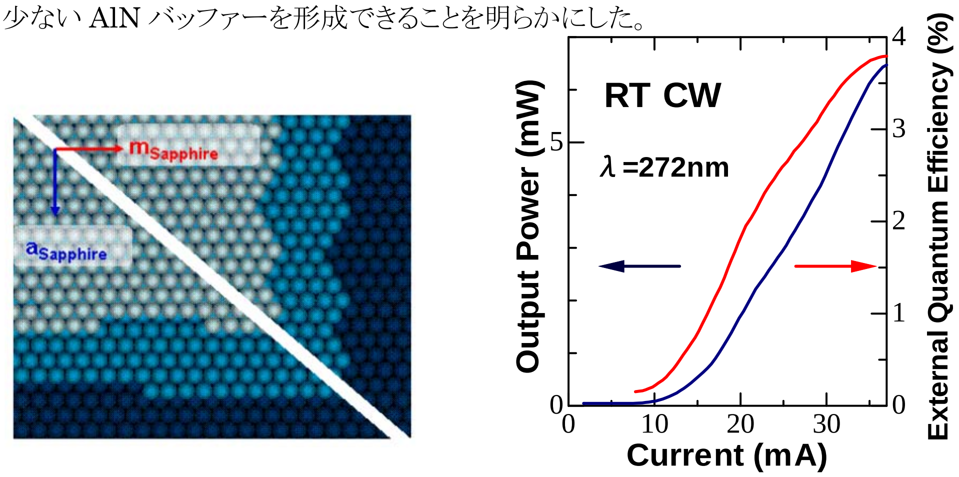

図 26　a 軸傾斜及び m 軸傾斜サファイア基板上の AlN 成長時の原子配列、及び、a 軸傾斜サファイア基板上に作製した深紫外 LED の動作特性。

図 26 に、a 軸傾斜及び m 軸傾斜サファイア基板上の AlN 成長時の原子配列、及び、a 軸傾斜サファイア基板上に作製した深紫外 LED の動作特性を示す。図 26 に示すように、m 軸傾斜の場合のステップの原子配列はジグザグなのに対し、a 軸傾斜の場合はフラットである。このことが a 軸傾斜を用いた方で平坦かつ転位の少ない AlN バッファーを形成を可能にすると考えられる。本研究では、a 軸傾斜サファイア基板を用いることで、貫通転位密度（刃状転位）の低減、表面の平坦性、n 型 AlGaN の伝導特性の改善を実現した。a 軸傾斜サファイア基板上に作製した深紫外 LED から、外部量子効率 3.8%が得られ、m 軸傾斜上に作製した場合の 3.1%に比べ高い値が得られた。また、CW 動作における最高出力 33mW が得られ、従来の値を更新した。本研究により、AlN バッファー作製において a 軸傾斜サファイア基板上の使用がより有利であることが明らかになった。

（透明 p 型 AlGaN コンタクト層導入による深紫外 LED の光取出し効率の向上）
これまで p 型 GaN コンタクト層による光吸収によって深紫外 LED の光取出し効率は決定的に低下することが問題であった。本研究では透明 p 型 AlGaN を用いた LED の動作に成功し、さらに高反射 Al 系電極を導入することで光取出し効率を 1.5 倍以上向上させ、5%の高い外部量子効率を実現した。図 27 に透明 p 型 AlGaN コンタクト層を導入したときの深紫外 LED の光取出し効率向上の概念と 280nm 帯 LED における効果の実証について示す。p-GaN コンタクト層を用いた発光層の上側に放射された光はほぼすべて吸収される。また、発光層の下側に放射された光はサファイア/空気の界面などで反射され外部にはわずかにしか取り出せない。一方、透明コンタクト層を用いた場合は、上部への光は電極で反射され、その後多重反射されるうちに外部への取り出しが可能である。フォトニックナノ構造を用いて光の反射を抑えれば非常に高い光取出し効率が得られる。したがって、透明コンタクト層を用いることで大幅な光取出し効率の向上が可能であり、深紫外 LED の効率を青色 LED の効率に近づけることが可能である。本研究ではまだ電極反射率が 60%程度と低かったため十分な効率向上に結びついていないが、今後反射率を 90%程度まで向上させ、さらにフォトニックナノ構造を導入することにより 50%程度の外部量子効率の実現が可能になると考えられる。

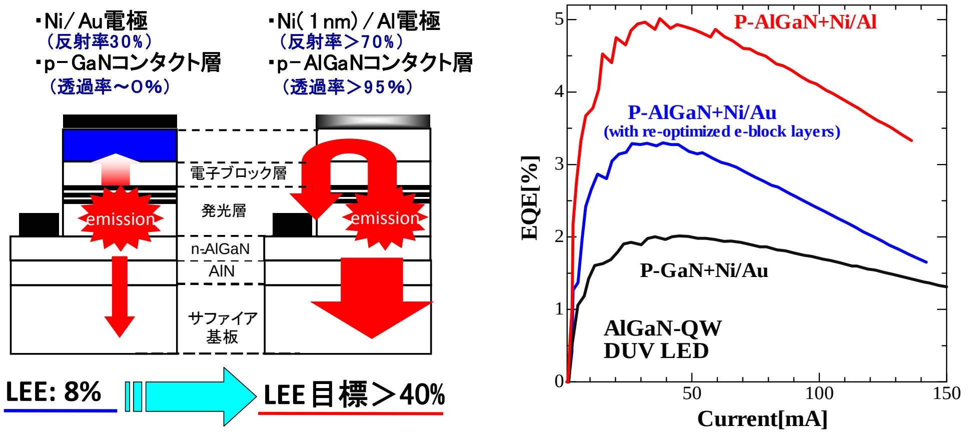

図 27 透明 p 型 AlGaN コンタクト層を導入したときの深紫外 LED の光取出し効率向上の概念図（左）と 280nm 帯 LED における光取出し効果の実証。（光取出し向上により、最高外部量子効率 5%を達成した。）

（まとめ）

最後に、図 29 に、本研究で達成した AlGaN 系深紫外 LED の出力の向上についてまとめる。2006 年以前では AlN バッファーの貫通転位密度が高かったため、深紫外 LED の発光は弱くシングルピークが得られなかった。2007 年になり「アンモニアパルス供給多段成長法」を用いることで貫通転位の低減を実現し、230-260nm 帯深紫外 LED のシングルピーク動作を実現した。その後、2008 年には、AlN 貫通転位の更なる低減と電子ブロック層の最適化により出力は飛躍的に高まり、AlGaN 系最短波長 LED（222nm）を実現するとともに、波長 222-265nm で世界最高出力・効率を樹立した。また殺菌用途波長（280nm）で世界初の 10mW 出力を達成し、実用レベルを満たす深紫外 LED を実現した。2010 年には MQB を用いて電子注入効率の大幅な改善を行い、高出力化を達成した。現在 280nm 殺菌波長帯ではシングルチップで 33mW、最高外部量子効率 5%が得られている。また 237nm の短波長では世界を大きくリードし 4.8mW を実現した。

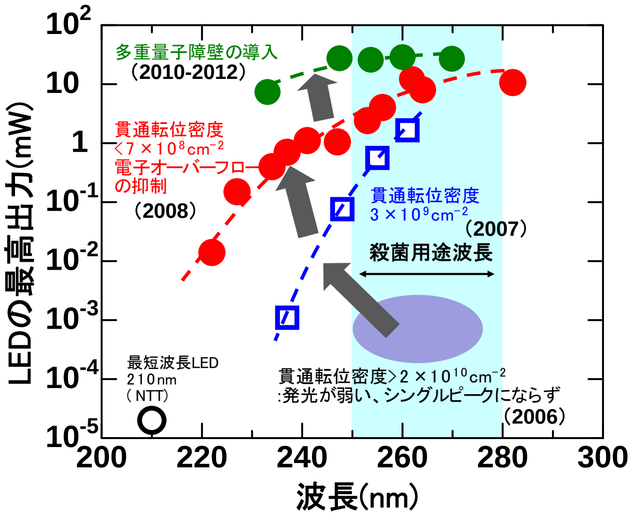

図 29、本研究で 2007 年から 2012 年の間に得られた InAlGaN 系深紫外 LED の出力向上

(2)研究成果の今後期待される展開

本研究では、AlN バッファーの貫通転位密度を低減することにより AlGaN 量子井戸の IQE を飛躍的に向上させ、それを用いて 222-351nm の幅広い波長の LED を実現した。また、In 混入効果を用いさらに高い IQE（80％程度）を実現した。p 型 AlGaN の低いホール濃度に起因して解決が難しかった電子注入効率(EIE)の問題は、多重量子障壁(MQB)の導入により大幅に向上させた。これらの効果で DUV-LED の高効率・高出力化を行い、250-280nm 殺菌用途 LED で 20-30mW 程度の実用レベル高出力を達成した。

今後は、光取出し効率を現在の 10％以下の値から 60％程度に大幅に改善することが期待される。そのためには高ホール濃度 p 型 AlGaN の実現が強く望まれる。高ホール濃度 p 型 AlGaN は今後、Mg-酸素コドーピングや短周期超格子の導入などにより実現ができると考えられる。Al 組成 60％程度の AlGaN でホール濃度が向上すれば殺菌用途波長帯で透明でかつ低コンタクト抵抗のコンタクト層が実現し、光取出し効率、ならびにデバイス効率は飛躍的に向上する。今後の研究で、AlGaN 系 DUV-LED の発光効率が、青色 LED と同様の歴史をたどり、近い将来数十％に向上することは充分可能であると考えられる。また、DUV-LD 実現も可能になると考えられる。

殺菌・浄水、医療、高密度 DVD、照明などの応用分野で今後予測される市場規模は非常に大きいため、高効率 DUV-LED の実現により産業、経済の活性化が大いに期待でき、波及効果も大きい。また、未開拓領域の光デバイス開発技術は、学術的にも大きな意義があると考えられる。

４．２ 深紫外 LED の光取出し効率向上を目的としたサファイア基板上高アスペクトフォトニック周期構造作製に関する研究 （NICT グループ）

(1)研究実施内容及び成果

①研究のねらい

AlGaN 系深紫外では光取出し効率が低いことが大きな問題となっている。深紫外 LED の光取り出し効率の向上のためには、サファイア基板上に 2 次元フォトニック結晶（2D-PhC）パターンを形成し、反射を抑えることで光取出しを向上させる手法が大変有効である。本研究では、AlGaN 紫外 LED の光取出し効率向上を目的として、サファイア基板上への高アスペクト周期構造を形成するための新たな技術開発を実施する。高規則性アルミナナノホール構造マスクやメタルマスクを利用し、高密度 ICP ドライエッチング技術により、周期 300nm、アスペクト比 1 以上の 2D-PhC をサファイア上に形成することで、深紫外 LED の光取出し効率を 1.5 倍程度向上させることが目的である。

②研究実施方法

（ナノインプリントとメタルマスクを用いた高アスペクトフォトニック結晶構造作製技術の確立）

本研究では、大面積、低コスト、高スループットといったメリットを持つ UV ナノインプリント技術を用いて、サファイア基板上にフォトニックナノパターンを転写する。サファイア基板上に直接レジストを塗布しそれをマスクにした場合には、ドライエッチングにより変質したレジストの完全除去やホール構造の形状と深さの制御などの点で課題が多い。本研究ではこれらの問題を除去するためにメタルマスクを用いた形成法を開拓した。メタルマスクを用いると、レジストを直接マスクとした場合に比べ高アスペクト比のエッチングが可能である。メタルマスクを用いた転写プロセスを確立することで、高アスペクト比でレジスト残留物が残らないエッチング技術を可能とした。

メタルマスクを用いたフォトニックナノ構造形成プロセスを図 30 に示す。UV インプリント法によるレジストパターン形成の後、リフトオフ及びエッチングプロセスを用いて、メタルマスクを形成する。メタルとして Ni、Cr などを用いた。メタルをマスクとし、塩素系ガスを用いた ICP ドライエッチングにより、フォトニックナノパターンをサファイア基板に形成した。各行程におけるナノパターンの SEM 像

を図 31 に示す。これまでの研究で、三角格子の周期が 250nm 程度、アスペクト比 1 以上のフォトニックナノパタンの形成に成功した。

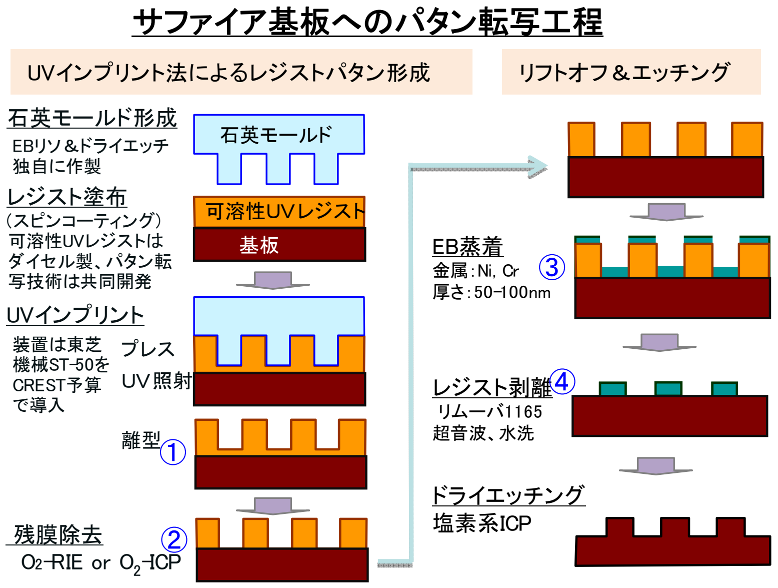

図 30　UV ナノインプリントとメタルマスクを用いたフォトニックナノ構造形成プロセス

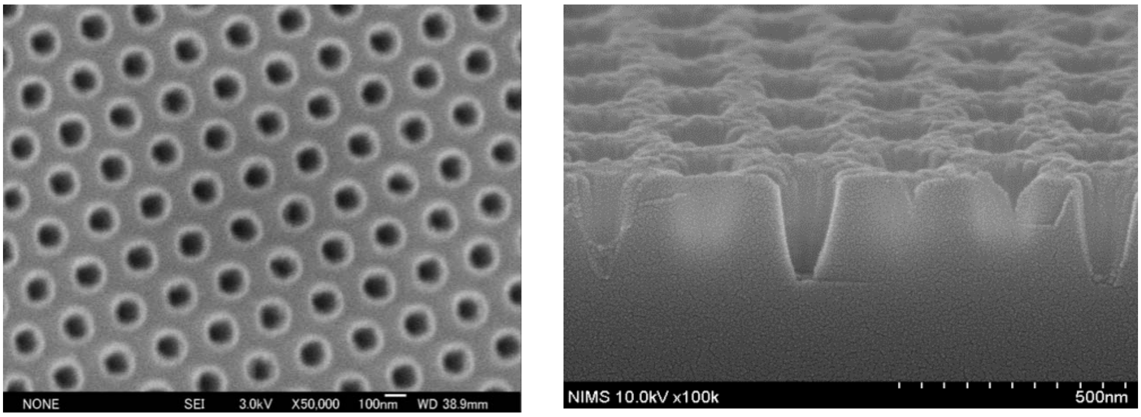

図 31　パターンが形成されたメタルマスク（左）と、エッチング後のサファイア表面の SEM 像（右）

(2)研究成果の今後期待される展開

今後、周期 300nm、アスペクト比 1 以上の 2D-PhC が形成されたサファイア基板上に深紫外 LED を作製することにより、光取出し効率を最大で 1.6 倍程度向上させることが期待できる。また、本方法は、サファイアのみならず SiC、Si など硬い半導体材料に、ナノスケール周期構造を大面積均一に作製する方法として大変優れている。LED の光取出し向上以外の用途にも幅広い応用可能であると考えられる。

§5 成果発表等

(1)原著論文発表 （国内(和文)誌 13 件、国際(欧文)誌 32 件）

1. H. Hirayama, N. Noguchi, T. Yatabe and N. Kamata, “227 nm AlGaN light-emitting diode with 0.15 mW output power realized using thin quantum well and AlN buffer with reduced threading dislocation density”, Appl. Phys. Express, **1**, 051101 (2008).

2. H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi, T. Ohashi and N. Kamata, “226-273 nm AlGaN deep-ultraviolet light-emitting diodes fabricated on multilayer AlN buffers on sapphire”, Physica Status Solidi (c), **5**, 2969 (2008).

3. H. Hirayama, T. Yatabe, T. Ohashi and N. Kamata, “Remarkable enhancement of 254-280 nm deep ultraviolet emission from AlGaN quantum wells by using high-quality AlN buffer on sapphire”, Physica Status Solidi (c), **5**, 2283 (2008).

4. H. Hirayama and S, Fujikawa, “Quaternary InAlGaN quantum-dot ultraviolet light-emitting diode emitting at 335 nm fabricated by an anti-surfactant method”, Physica Status Solidi (c), **5**, 2312 (2008).

5. H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi and N. Kamata, “227-261 nm AlGaN-based deep ultraviolet light-emitting diodes fabricated on high-quality AlN buffers on sapphire”, Journal of Light and Visual Environment (JLVE), **32**, 79 (2008).

6. H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi and N. Kamata, “Development of 220-270 nm AlGaN-based deep UV-LEDs”, Electrical Engineering of Japan, **128**, 748 (2008).

7. H. Hirayama, “Recent progresses of 220-270 nm AlGaN-based deep-UV LEDs”, J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. **92**, No. 6, pp. 311-315 (2008).

8. S, Fujikawa, T. Takano, Y. Kondo and H. Hirayama, “Realization of 340-nm-band high-output-power (7mW) InAlGaN quantum well ultraviolet light-emitting diode with p-type InAlGaN”, Jap. J. Appl. Phys. **47**, 2941 (2008).

9. N. Noguchi, T. Ohashi, N. Kamata and H. Hirayama, “Improvement of surface roughness and reduction of threading- dislocation density in AlN/AlGaN templates on sapphire by employing trimethylaluminum pulsed supply growth”, Physica Status Solidi (c), **5**, 1968 (2008).

10. S. Fujikawa, T. Takano, Y. Kondo and H. Hirayama, “Realization of 340 nm-band high-power InAlGaN-based ultraviolet light-emitting diodes by the suppression of electron overflow”, Physica Status Solidi (c), **5**, 2260 (2008).

11. S. Fujikawa, T. Takano, Y. Kondo and H. Hirayama, “340 nm-band high-power InAlGaN quantum well ultraviolet light-emitting diode using p-type InAlGaN layers”, Physica Status Solidi (c), **5**, 2280 (2008).

12. T. Takano, S, Fujikawa, Y. Kondo and H. Hirayama, “Remarkable improvement of output power for InAlGaN based ultraviolet LED by improving the crystal quality of AlN/AlGaN templates”, Physica Status Solidi (c), **5**, 2102 (2008).

13. S. Fujikawa, T. Takano, Y. Kondo and H. Hirayama, “Realization of 340 nm-band high-power UV-LED using p-type InAlGaN”, Journal of Light and Visual Environment (JLVE), **32**, 83 (2008).

14. 平山秀樹、谷田部透、野口憲路、鎌田憲彦、「230-270nm 深紫外 AlGaN 系 LED の進展」、電気学会論文誌 C、2008 年 6 月号、特集「パワー半導体レーザとその応用」、Vol. 128, No. 5, pp. 748-756 (2008)

15. 平山秀樹、藤川 紗千恵、高野隆好、椿健治、「280nm 帯 InAlGaN 高出力紫外 LED」、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.108、No.321、LQE2008-113, pp. 83-88, 2008 年

16. 野口憲路、平山秀樹、乗松潤、鎌田憲彦、「230nm 帯 AlGaN 紫外 LED の高出力化」、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.108、No.321、LQE2008-111, pp. 71-76, 2008 年

17. 乗松潤、平山秀樹、藤川紗千恵、野口憲路、高野隆好、椿健治、鎌田憲彦、「ELO-AlNテンプレート上に作製した 270nm 帯 AlGaN 紫外 LED」、電子情報通信学会技術研究報告、Vol.108、No.321、LQE2008-112, pp. 77-82, 2008 年

18. H. Hirayama, N. Noguchi, S. Fujikawa, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki and N. Kamata, "222-282nm AlGaN and InAlGaN based high-efficiency deep-UV-LEDs fabricated on high-quality AlN on sapphire", Physica Status Solidi (a), **206**, pp. 1176-1182 (2009).

19. H. Hirayama, J. Norimatsu, N. Noguchi, S. Fujikawa, T. Takano, K. Tsubaki and N. Kamata, "Milliwatt power 270 nm-band AlGaN deep-UV LEDs fabricated on ELO-AlN template", Physica Status Solidi (c), **5**, pp. S474-S477 (2009).

20. H. Hirayama, S. Fujikawa, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki and N. Kamata, "Fabrication of low threading dislocation density ELO-AlN template for the application to deep-UV LEDs", Physica Status Solidi (c), **6**, pp. S356-359 (2009).

21. N. Noguchi, H. Hirayama, T. Yatabe and N. Kamata, "222 nm single-peaked deep-UV LED with thin AlGaN quantum well layers", Physica Status Solidi (c), **6**, pp. S459-S461 (2009).

22. T. Takano, S. Fujikawa, K. Tsubaki and H. Hirayama, "Realization of 280 nm band AlGaN based UV-LED on large area AlN template with high crystalline quality", Physica Status Solidi (c), **6**, pp. S462-465 (2009).

23. S. Fujikawa, H. Hirayama, T. Takano and K. Tsubaki, "Extremely high efficiency 280 nm-band emission from quaternary InAlGaN QWs realized by controlling Si-doped layers", Physica Status Solidi (c), **6**, pp. S784-S787 (2009).

24. H. Hirayama, N. Noguchi, S. Fujikawa, J. Norimatsu and N. Kamata, T. Takano and K. Tsubaki, "222-282nm AlGaN and InAlGaN based deep-UV-LEDs fabricated on high-quality AlN template", SPIE 7216-58, (2009).

25. H. Hirayama, Y. Tsukada, T. Maeda and N. Kamata, “Marked Enhancement in the Efficiency of Deep-Ultraviolet AlGaN Light-Emitting Diodes by Using a Multiquantum-Barrier Electron Blocking Layer”, Appl. Phys. Express, **3**, 031002 (2010).

26. H. Hirayama, N. Noguchi and N. Kamata, “222 nm Deep-Ultraviolet AlGaN Quantum Well Light-Emitting Diode with Vertical Emission Properties”, Appl. Phys. Express, **3**, 032102 (2010).

27. M. Nakao, M. Yamaguchi and S. Yabu,“Regeneration of Imprint-Molds using Vacuum Ultraviolet Light”, Proc. SPIE 7972, 79722M(2011).

28. M. Nakao, M. Yamaguchi and S. Yabu, “Imprint-Mold-Cleaning by Vacuum Ultraviolet Light”, Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials,, 19, pp. 773-779(2010).

29. 平山秀樹、“AlGaN 系殺菌用途紫外 LED の進展と今後の展望”、表面技術、特集「LED 照明と表面技術」、61 巻 10 号、2010 年 10 月号

30. 平山秀樹、"AlGaN 系深紫外 LED の進展と今後の展望"、未来材料 Review、Vol. 11, No. 10, pp. 22-32, 2011 年 10 月号

31. H. Hirayama, "Recent Progress of 220-280 nm-band AlGaN-based deep-UV LEDs”, SPIE 7617-52（2010）(Invited Paper).

32. T. Mino, H. Hirayama, T. Takano, K. Tsubaki and M. Sugiyama: “Realization of 256-278 nm AlGaN-based Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes on Si Substrates Using Epitaxial Lateral Overgrowth AlN Templates”, Appl. Phys. Express 4, 092104 (2011).

33. S. Fujikawa and H. Hirayama: “284-300 nm Quaternary InAlGaN-based Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes on Si(111) Substrates”, Appl. Phys. Express, 4 061002 (2011) .

34. 平山秀樹、「AlGaN 系深紫外光源の進展と展望」、光学、第 40 巻第 9 号 2011 年.

35. 平山秀樹、藤川紗千恵、塚田悠介、鎌田憲彦、「AlGaN 系深紫外 LED の進展と展望」、応用物理、2011 年 4 月号, vol. 80, no. 4, pp. 319-324, (2011).

36. 美濃卓哉、平山秀樹、高野隆好、椿健治、杉山正和：“ELO-AlN テンプレートを用いた Si 基板上 AlGaN 系 UV-LED の 256nm 発光”、信学技報、Vol. 111、No. 290、113-116、2011 年

37. 美濃卓哉、平山秀樹、高野隆好、野口憲路、椿健治：“2 インチ×3 枚対応 MOCVD を用いた 260nm 帯 AlGaN 系 UV-LED の開発”、信学技報、Vol. 111、No. 290、103-106、2011 年

38. 前田哲利、藤川紗千恵、平山秀樹、"m 軸および a 軸オフ角 C 面サファイア基板上の AlN 結晶成長の特徴と高出力 AlGaN 深紫外 LED の作製"、信学技法、Vol. 111、No. 290、107-112、2011 年

39. 平山秀樹、"AlGaN 系深紫外 LED の進展"、セラミックス、“特集：LED を支えるセラミックス”、Vol. 47, No. 3, pp. 167-173, 2012 年 3 月号

40. M. Akiba, H. Hirayama, Y. Tomita, Y. Tsukada, N. Maeda, and A. Kamata: "Growth of flat p-GaN contact layer by pulse flow method for high light-extraction AlGaN deep-UV LEDs with Al-based electrode", Phys. Status Solidi C, Vol. 9, No. 3-4, pp. 806-809 (2012).

41. T. Mino, H. Hirayama, T. Takano, K. Tsubaki, and M. Sugiyama: "Characteristics of epitaxial lateral overgrowth AlN templates on (111) Si substrates for AlGaN deep-UV LEDs fabricated on different direction stripe patterns", Phys. Status Solidi C, Vol. 9, No. 3-4, pp. 802-805 (2012).

42. T. Mino, H. Hirayama, T. Takano, N. Noguchi, and K. Tsubaki: "Highly-uniform 260 nm-band AlGaN-based deep-ultraviolet light-emitting diodes developed by 2-inch×3 MOVPE system", Phys. Status Solidi C, Vol. 9, No. 3-4, pp. 749-752 (2012).

43. S. Fujikawa, H. Hirayama and N. Maeda: "High-efficiency AlGaN deep-UV LEDs fabricated on a- and m-axis oriented c-plane sapphire substrates", Phys. Status Solidi C, Vol. 9, No. 3-4, pp. 790-793 (2012).

44. N. Maeda, H. Hirayama and S. Fujikawa: "Characteristics of AlN crystal growth depending on m- and a-axis oriented off-angle of c-sapphire substrate", Phys. Status Solidi C, Vol. 9, No. 3-4, pp. 810-813 (2012).

45. 富田優志, 藤川紗千恵, 水澤克哉, 豊田史朗, 鎌田憲彦, 平山秀樹:"AlGaN 深紫外 LED の高効率化への取り組み"、信学技報, vol. 112, no. 329, LQE2012-112, pp. 87-92, 2012 年 11 月.

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

1. 平山秀樹:"320-350nm 帯 AlGaN 系深紫外高輝度 LED の進展と応用"、オプトロニクス「'最近の LED の応用展開」、2007 年 10 月.

2. 平山秀樹:"深紫外半導体発光素子および THz 量子カスケードレーザの開発"、電気学会、光・量子デバイス研究会資料、OQD-07-60、pp. 1-10, 2007 年 12 月、

3. 平山秀樹:"紫外 LED の短波長化と高効率化"、光産業技術振興協会、平成 19 年度光技術動向調査、2008 年 3 月.

4. 平山秀樹:"280nm 帯高出力紫外 LED"、テクノタイムズ社月刊ディスプレー「LED とデバイス技術」、2009 年 2 月号.

5. 平山秀樹:"THz 領域量子カスケードレーザ"、パワー半導体レーザ産業技術調査専門委員会編、第 2 章 2 節「パワー半導体レーザ産業技術調査報告」(第 1170 号)、pp. 40-44、2009 年 9 月.

6. 平山秀樹:"紫外領域"、パワー半導体レーザ産業技術調査専門委員会編、第 2 章 3 節「パワー半導体レーザ産業技術調査報告」(第 1170 号)、pp. 45-50、2009 年 9 月.

7. H. Hirayama: "Recent Progress and Applications of Nitride-Based Deep-UV LEDs", Display(韓国誌)pp. 63-72, 2009 年 4 月.

8. 平山秀樹:"AlGaN 系深紫外 LED の進展と展望"、光技術コンタクト特集「紫外光学系の動向」、48 巻 8 号、2010 年 8 月.

9. 平山秀樹:"AlGaN 系深紫外 LED の進展"、ファインセラミックスレポート、Vol. 28, No. 4, 2010 年秋号.

10. 平山秀樹:"220-350nm 帯 AlGaN 系深紫外 LED の進展と今後の展望"、LED-UV 硬化技術と硬化材料の現状と展望、第 2 章、pp. 27-34、2010 年 10 月.

11. 平山秀樹:"殺菌・医療用途を目指した深紫外 LED 光源の開発"、近接場光のセンシング・イメージング技術への応用、第 21 章、pp. 221-234、2010 年 10 月.

12. 中尾正史、"インプリントリソグラフィのフォトニクスへの応用:総論"、オプトロニクス、2010年2月号.

13. 中尾正史、水野潤、"UV インプリントによる各種基板上への回折格子形成技術"、オプトロニクス、2010年2月号.

14. 平山秀樹:"AlGaN 系深紫外 LED の進展と展望"、テクノタイムズ社月刊ディスプレー「LED と

デバイス技術」、2011 年 6 月号.

15. 平山秀樹:"AlGaN 系深紫外 LED の高効率・高出力化技術"、オプトロニクス(OPTRONICS)「ここまで進んだ紫外発光素子」、2011 年 9 月号、pp. 122-128, 2011 年 9 月.

16. 平山秀樹、「近未来光エコデバイスへの展開」、「ワイドギャップ半導体」、監修:吉川明彦、編著:赤崎勇・松波弘之、第 3.5 章、pp. 242-250、培風館、2013 年 3 月、ISBN 978-4-563-06787-8

(3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 45 件、国際会議 29 件)

1. 平山秀樹、「深紫外半導体発光素子および THz 量子カスケードレーザの開発」、電気学会、光・量子デバイス研究会、「次世代光源に関する提案」、九州大学、2007 年 12 月 14 日

2. 平山秀樹、「窒化物半導体による深紫外およびテラヘルツ発光素子開発の現状と展望」、ワイドギャップ半導体光・電子デバイス、日本学術振興会第 162 委員会、特別講演会(第 56 回研究会)、「光ファイバ通信用半導体レーザの先駆的研究に関連して」、主婦会館プラザエフ、2008 年 1 月 25 日

3. H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi and N. Kamata, "222-273 nm AlGaN deep ultraviolet light-emitting diodes fabricated on high-quality AlN buffer on sapphire", International Symposium on Semiconductor Light emitting devices (ISSLED2008), Phoenix, USA, April 27-May 2, 2008.

4. 平山秀樹、「220-350nm 窒化物半導体紫外発光素子の進展と今後の展望」、日本学術振興会、光エレクトロニクス第 130 委員会、(第 260 回研究会)、森戸記念館、2008 年 5 月 12 日

5. 平山秀樹、「220-280nm 窒化物深紫外 LED の進展と今後の展望」、電気学会パワー半導体レーザ応用システム調査専門委員会、市ヶ谷、2008 年 5 月 22 日

6. 平山秀樹、「230-350nm 紫外 LED の進展と今後の展望」、伯東株式会社「伯東セミナー」、新宿伯東講堂、2008 年 7 月 2 日

7. 平山秀樹、「窒化物紫外 LED の進展と実用化へ向けた課題」、技術情報協会セミナー、「紫外 LED、開発動向と実用化へ向けた課題」、東京テレコムセンター、2008 年 9 月 26 日

8. H. Hirayama, N. Noguchi, S. Fujikawa, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki and N. Kamata, "222-282nm AlGaN and InAlGaN based high-efficiency deep-UV-LEDs fabricated on high-quality AlN", International Workshop on Nitride Semiconductors 2008 (IWM2008), Montreux, Switzerland, Oct. 6-10, 2008.

9. 平山秀樹、「窒化物半導体紫外発光デバイスの進展と MEMS への融合の可能性」、第 25 回「センサー・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム、2008 年 10 月 22-24 日

10. 平山秀樹、「窒化物を用いた殺菌用途高出力紫外 LED の開発と今後の展望」、電子ジャーナル講演会、「次世代の超高輝度 LED」、2008 年 11 月 19 日

11. 平山秀樹、「220-280nm 帯 AlGaN、InAlGaN 系紫外 LED の進展」、ワイドギャップ半導体光・電子デバイス、日本学術振興会第 162 委員会、(第 61 回研究会)、伊東、2008 年 12 月 15 日

12. 平山秀樹、「220-280nm 帯深紫外 LED の最新動向」、全日本科学機器展、東京ビッグサイト、

2008年11月27日

13. H. Hirayama, "Recent progresses of AlGaN and InAlGaN based deep-UV-LEDs”, Display & Solid State Lighting Conference & Exhibition (DSSL2009), Seoul, Korea, Jan.20-23, 2009.

14. H. Hirayama, N. Noguchi, S. Fujikawa, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki and N. Kamata, "222-282nm AlGaN and InAlGaN based high-efficiency deep-UV-LEDs fabricated on high-quality AlN template”, SPIE-Photonic West, Semiconductor Lasers and LEDs, Gallium Nitride Materials and Devices IV, San Jose, USA, Jan.24-29, 2009.

15. 平山秀樹、「220-280nm 帯深紫外 LED の最新動向」、国際ナノテクノロジー総合展・技術会議、東京ビッグサイト、2009年2月18-20日

16. 平山秀樹、「窒化物紫外LEDの進展と今後の展望」、光技術動向調査委員会研究会、幕張、2009年1月9日

17. 平山秀樹、「AlGaN系半導体を用いた深紫外LEDの進展」、エクストリームフォトニクスシンポジウム、理化学研究所、2009年5月20-21日

18. H. Hirayama, "Progresses of 220-280 nm-band AlGaN and InAlGaN based deep-UV-LEDs”, Asian Pacific Workshop on Nitride Semiconductors (APWS2009), China, May 24-28, 2009.

19. H. Hirayama, "Recent progresses of AlGaN and InAlGaN based deep-UV-LEDs”, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2009, Baltimore, USA, May 31-June 5, 2009.

20. H. Hirayama, "Progresses of 220-280 nm-band deep-UV-LEDs”, Taiwan Display & Solid State Lighting Conference & Exhibition (TSSL2009), Taiwan, June 11-12, 2009.

21. 平山秀樹、「最短波長領域・高効率紫外 LED の開発」、(社)日本オプトメカトロニクス協会、光センシング技術部会研究会、機会振興会館、2009年9月7日

22. 平山秀樹、“In 混入 AlGaN の発光及び p 型特性と高効率深紫外 LED への応用”、第70回応用物理学会学術講演回シンポジウム、「紫外発光素子の進展」、特定領域研究企画「窒化物光半導体のフロンティア」－材料潜在能力の極限発現－、富山大学、2009年9月9日

23. H. Hirayama, "Recent progress of AlGaN based deep-UV LEDs”, SPIE-Photonics West, Materials, Devices and Applications for Solid State Lighting, San Francisco, USA, Jan. 23-28, 2010.

24. 平山秀樹、“InAlGaN 深紫外発光ダイオードと将来展開”JST、戦略的イノベーション創出推進シンポジウム、「無機発光素子を用いた高機能照明・次世代レーザ技術の開発」、東京、2010年4月26日

25. 平山秀樹、“AlGaN 系深紫外 LED の進展と展望”、応用物理学会・応用電子物性分科会研究例会、「紫外光デバイスの進展：材料物性と応用」、大阪大学銀杏会館、2010年5月21

26. 平山秀樹、“近未来の光、テラヘルツ光・深紫外光の魅力—くらしを変える新しい光と応用の広がり－”仙台市・市民講座、(講座仙台学 2010)「仙台とくらし」、仙台、2010年7月24日

27. 平山秀樹、「AlGaN系材料界面制御技術と深紫外LEDの進展」、アモルファス・ナノ材料、日

本学術振興会第 147 委員会、(第 108 回研究会)、主婦会館、東京 2010 年 7 月 9 日

28. H. Hirayama, "Recent progress of AlGaN based deep-UV LEDs", LG Innotek Forum, LG Innotek Co., Ltd. Seoul, Korea, Aug. 18-19, 2010.

29. 平山秀樹、"AlGaN 系深紫外 LED の高効率化"、電子情報通信学会ソサイエティ大会シンポジウム、レーザ量子エレクトロニクス研究会、大阪府立大学、2010 年 9 月 17 日

30. 平山秀樹、"220-280nmAlGaN 系紫外 LED の進展"、第 71 回応用物理学会学術講演回シンポジウム、「ワイドギャップ窒化物 AlGaN の結晶評価と深紫外光デバイス応用」、結晶工学分科会企画、長崎大学、2010 年 9 月 16 日

31. H. Hirayama, "Short-wavelength high-efficiency deep-UV LEDs realized by improving injection efficiency", International Workshop on Nitride Semiconductors 2010 (IWM2010), Florida, USA, Sept. 16-20, 2010.

32. 平山秀樹、"AlGaN 系紫外 LED の進展と展望"、サムコ株式会社セミナー、京都、2010 年 10 月 5 日

33. H. Hirayama, "Recent progress of AlGaN based deep-UV LEDs", 7th China International Exhibition and Forum on Solid State Lighting (CHINASSL2010), Shinzhen, China, Oct. 14-16, 2010.

34. 平山秀樹、"AlGaN 系紫外 LED の進展と展望"、月刊 OPTRONICS 主催グリーンフォトニクス特別セミナー、東京都立産業貿易センター、2010 年 11 月 12 日

35. 平山秀樹、"AlGaN 系紫外 LED の進展と展望"、JEITA(電子情報技術産業協会)、ワイドバンドギャップ半導体デバイス技術分科会研究会、東京、2010 年 11 月 10 日

36. 平山秀樹、「230-350nm 帯 InAlGaN 系深紫外高効率発光デバイスの研究」、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域、光・光量子科学技術の進展開、第 3 回公開シンポジウム、日本科学未来館、2010 年 11 月 26 日

37. H. Hirayama, "Recent progress of AlGaN based deep-UV LEDs", Seoul Optodevice Forum, Seoul Semiconductor/Optodevice Co., Ltd. Seoul, Korea, Dec. 2, 2010.

38. H. Hirayama, "Advances of AlGaN-based High-Efficiency deep-UV LEDs", Asia Communications and Photonics (ACP2010) , Shanghai, China, Dec. 8-12, 2010.

39. 平山秀樹、"AlGaN 系紫外 LED の進展と展望"、同志社大学、界面現象研究センター研究会、同志社大学・京田部キャンパス、2011 年 1 月 6 日

40. 平山秀樹、「AlGaN 系深紫外 LED の進展と展望」、電気学会パワー半導体レーザ、パワー LED 応用技術調査専門委員会研究会、市ヶ谷、2011 年 2 月 18 日

41. H. Hirayama, "Recent progress and future prospects of AlGaN based deep-UV LEDs", German-Japanese-Spanish Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices, Granada Spain, March 16-18, 2011.

42. 平山秀樹、「AlGaN 系深紫外 LED の高効率化、進展と展望」、ワイドギャップ半導体光・電子デバイス、日本学術振興会第 162 委員会、(第 74 回研究会)、東京、2011 年 4 月 22 日

43. H. Hirayama, "High-Efficiency Short-Wavelength AlGaN DUV LEDs Realized by Improving Injection Efficiency with MQB", 5th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS-2011), Toba, Mie, Japan, May 22-26, 2011.

44. 藤川紗千恵、平山秀樹:";窒化物半導体を用いた深紫外 LED の開発"、第 3 回窒化物半導体結晶成長講演会【奨励賞受賞講演】、九州大学、2011 年 6 月

45. 平山秀樹、"AlGaN 系深紫外 LED の開発"、光交流会オプトフォーラム、東京、板橋、2011 年 10 月 12 日

46. H. Hirayama, "Marked Increase of Injection Efficiency in AlGaN deep-UV LEDs using multi-quantum barrier (MQB)", China International Exhibition and Forum on Solid State Lighting (CHINASSL2011), Shinzhen, China, Nov. 8-10, 2011.

47. 平山秀樹、「UV-LED の現状と将来展望」、電子ジャーナルテクニカルセミナー、御茶ノ水、総評会館、2011 年 11 月 16 日

48. 平山秀樹、"AlGaN 系深紫外 LED の開発(ベンチャー起業の可能性に関して)"、理研ベンチャーの会第 2 回交流会、理研・東京連絡事務所、2011 年 11 月 18 日

49. 平山秀樹、"ナノプロセスを用いた高効率深紫外 LED"、理研・ナノサイエンス研究施設研究交流会、理化学研究所、2011 年 11 月 25 日

50. H. Hirayama, "High-Efficiency AlGaN DUV LEDs", The 7th International Conference on Advanced Materials and Devices (ICAMD2011), Jeju, Korea, Dec. 7-9, 2011.

51. M. Nakao, "Grating Fabrication on Ti-diffused Waveguides in LiNbO3 by Imprint Lithography"", Workshop on New integrated technologies for next generation ICT, Roma, June 4, 2012.

52. M. Nakao, "Selective Grating Fabrication on Ti-diffused Waveguides in LiNbO3 by Imprint Lithography"", Nano Sciences & Technologies 2012, Qingdao, China, Oct. 26-28, 2012.

53. H. Hirayama, "Recent progress and future prospects of AlGaN-based deep-UV LEDs", LED and solid state lighting conference, Pusan, Korea, February 23-24, 2012.

54. 平山秀樹、"最新 LED 技術の展開と加工技術への課題"、砥粒加工学会先進テクノフェア(ATF2012)講演会「省エネルギー社会を支える先進加工技術」、都立産業技術高等工業専門学校、2012 年 3 月 2 日

55. 平山秀樹、「AlGaN へのドーピング制御と深紫外 LED の高効率化」、ワイドギャップ半導体光・電子デバイス、日本学術振興会第 162 委員会、(第 78 回研究会)、東京、2012 年 3 月 2 日

56. 平山秀樹、"原子層ヘテロ構造制御による窒化物発光デバイス新領域の開拓"、第 59 回応用物理学関係連合講演会、早稲田大学、2012 年 3 月 15 日

57. 平山秀樹、"深紫外 LED の開発と今後の展望"、OPTICS & PHOTONICS International 2012「赤外・紫外特別セミナー:紫外線技術の基礎」パシフィコ横浜アネックスホール、2012 年 4 月 25 日

58. 平山秀樹、"新しい光りデバイスを目指して"、東芝機械㈱セミナー、沼津、2012 年 5 月 25 日

59. H. Hirayama, M. Akiba, Y. Tomita, S. Fujikawa and N. Kamata, "High-Efficiency AlGaN-based Deep -V LEDs Realized by Improving Injection and Light-Extraction

Efficiency", 13th International Symposium on the Science and Technology of Lighting (LS13), Troy, New York, June 24-29, 2012.

60. H. Hirayama, "Recent Progress and Future Prospects of AlGaN-based Deep-UV LEDs", 2012 German-Japanese-Spanish Joint Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices, Berlin, Germany, July 21-22, 2012.

61. 平山秀樹、"深紫外・テラヘルツ半導体発光デバイス"、理化学研究所、チュートリアルサイエンス道場、和光市、埼玉、2012 年 10 月 11 日

62. 平山秀樹、"テラヘルツ量子カスケードレーザと深紫外 LED の進展と展望"、古河電工㈱セミナー、横浜、2012 年 9 月 25 日

63. H. Hirayama, "Development of AlGaN Deep-UV LEDs for Greentechnology Applications", BIT's 1st Annual World Congress of Greentech, Baiyun, China, Oct. 19-21, 2012.

64. 平山秀樹、"深紫外 LED の進展と今後の展望"、電気学会、光・量子デバイス研究会、パワー半導体光源とその応用技術、東工大キャンパスロイアルブルーホール、大岡山、2012 年 10 月 22 日

65. H. Hirayama, "Recent Progress and Future Prospects of AlGaN-based Deep-UV LEDs", LED, 50th Anniversary Symposium, Illinois, USA, Oct. 24-25, 2012.

66. 平山秀樹、"AlGaN 系深紫外 LED の進展と展望"、レーザー学会、東京支部セミナー、第 14 回先進レーザー応用技術セミナー「半導体光源デバイス研究とその応用技術開発」、慶応義塾大学理工学部矢上キャンパス、横浜、2012 年 11 月 2 日

67. 平山秀樹、「深紫外 LED の現状と展望」、電子ジャーナルテクニカルセミナー、御茶ノ水、総評会館、2012 年 11 月 7 日

68. T. Mino and H. Hirayama, "Development of 260 nm band deep-UV light-emitting diodes on Si substrates" , Gallium Nitride Materials and Devices VIII in OPTO SPIE Photonic West, The Moscone Center, San Francisco, California, USA, Feb. 6 (2013).

69. H. Hirayama, S. Fujikawa, N. Maeda, W. Terashima, T. Lin and N. Kamata, "Development of Deep-UV LEDs and THz-QCLs and their Applications", The 2nd Advanced Lasers & Photon Source Conference (ALPS' 13), Makuhari, Chiba, April 23-25, 2013.

70. H. Hirayama, N. Maeda, S. Fujikawa and N. Kamata, "Progresses of AlGaN Deep-UV LEDs by Improving Light-Extraction Efficiency", Asian Pacific Workshop on Nitride Semiconductors (APWS2013), Taiwan, May 12-15, 2013.

71. S. Fujikawa, Kamata and H. Hirayama, "Recent Progress of AlGaN based Deep-UV LEDs", European Materials Research Society 2013 (E-MRS 2013) Spring Meeting, Strasbourg, France, May 27-31, 2013.

72. H. Hirayama, "Recent Progress of AlGaN Deep-UV LEDs", LED and Green Lighting Conference, Kintex, Korea, June 25-27, 2013.

73. 平山秀樹、光協会セミナー、財団法人光産業技術振興協会、「未開拓波長半導体光デバイス技術の最新動向、―深紫外、テラヘルツ―」、2013 年 6 月 18 日、東京

74. 平山秀樹、オプトロニクス社　赤外・紫外特別セミナー、紫外線技術の基礎、「深紫外 LED の開発と今後の展望」、2013 年 4 月 24 日、パシフィコ横浜アネックスホール

② 口頭発表　　　　(国内会議 63 件、国際会議 45 件)

1. 藤川紗千恵、高野隆好、近藤行廣、平山秀樹:"p-InAlGaN と高品質 AlN を用いた 340nm 帯高出力 LED"、 電子情報通信学会、レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE)「窒化物半導体光・電子デバイス・材料、及び関連技術」、福井大学、2007 年 10 月 11-12.

2. S. Fujikawa, T. Takano, Y. Kondo and H. Hirayama: "340 nm band high-power (>7mW) InAlGaN quantum well UV-LED using p-type InAlGaN layers", International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2007), Kyoto, Oct. 15-18, 2007.

3. H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi, T. Ohashi and N. Kamata: "231-261 nm AlGaN quantum well deep ultraviolet light-emitting diodes fabricated on high-quality AlN buffer on sapphire", International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2007), Kyoto, Oct. 15-18, 2007.

4. 平山秀樹:"230-350nm 帯 InAlGaN 系深紫外高効率発光デバイスの研究"、 CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」領域、平成 19 年度新規採択課題キックオフミーティング、日本科学未来館、2007 年 10 月 27 日.

5. H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi and N. Kamata: "227-261 nm AlGaN-based ultraviolet light-emitting diodes fabricated on high-quality AlN buffer on sapphire", International Conference on White LEDs and Solid State Lighting (White LEDs-07), Tokyo, Nov. 26-60, 2007.

6. S. Fujikawa, T. Takano, Y. Kondo and H. Hirayama: "Realization of 340 nm band high-power UV-LED using p-type InAlGaN", International Conference on White LEDs and Solid State Lighting (White LEDs-07), Tokyo, Nov. 26-60, 2007.

7. 藤川紗千恵、高野隆好、椿健治、平山秀樹:"p-InAlGaN と高品質 AlN を用いた 340nm 帯紫外高出力 LED"、 応用物理学会・結晶工学分科会研究会、学習院創立百周年記念会館、2007 年 12 月 14 日.

8. 平山秀樹:"InAlGaN 窒化物4元混晶を用いた紫外 LED の高出力化"、 文部省科研費、特定領域研究、「窒化物光半導体のフロンティア――材料潜在能力の極限発現――」、平成 18 年度研究成果報告会、熱海後楽園ホテル、2008 年 3 月 5-6 日.

9. 平山秀樹、谷田部透、野口憲路、乗松潤、鎌田憲彦:"アンモニアパルス供給多層成長法を用いた深紫外 LED 用 AlN バッファーの進展"、 2008 年春応用物理学会(第 65 回)、日本大学、2008 年 3 月 27-30 日.

10. 平山秀樹、谷田部透、野口憲路、乗松潤、鎌田憲彦:"248nmAlGaN 深紫外 LED の室温 CW ミリワット出力動作"、 2008 年春応用物理学会(第 65 回)、日本大学、2008 年 3 月 27-30 日.

11. 藤川紗千恵、平山秀樹、高野隆好、椿健治:"InAlGaN4 元混晶を用いた 280nm 帯深紫外 LED"、 2008 年春応用物理学会(第 65 回)、日本大学、2008 年 3 月 27-30 日.

12. 高野隆好、藤川紗千恵、椿健治、平山秀樹:"量産対応型 MOCVD による 270nm 帯高出力深紫外 LED の検討"、 2008 年春応用物理学会(第 65 回)、日本大学、2008 年 3 月 27-30

日.

13. 野口憲路、平山秀樹、谷田部透、鎌田憲彦:"222nmAlGaN 深紫外 LED のシングルピーク発光動作"、 2008 年春応用物理学会(第 65 回)、日本大学、2008 年 3 月 27-30 日.

14. 寺嶋亘、平山秀樹:"窒化物半導体を用いたTHz帯量子カスケードレーザ構造の量子設計と作製"、 2008 年春応用物理学会(第 65 回)、日本大学、2008 年 3 月 27-30 日.

15. S. Fujikawa, H. Hirayama, T. Takano and K. Tsubaki: "280 nm-band quaternary InAlGaN quantum well deep-UV LEDs with p-InAlGaN layers", International Symposium on Semiconductor Light emitting devices (ISSLED2008), Phoenix, USA, April 27-May 2, 2008.

16. H. Hirayama, N. Noguchi, T. Yatabe and N. Kamata: "High-quality AlN buffer fabricated by NH_3 pulse-flow multilayer growth method used for 220-270 nm-band UV-LEDs", Second International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-2), Laforet Shuzenji, Izu, July 6-9, 2008.

17. N. Noguchi, H. Hirayama, T. Yatabe and N. Kamata: "Growth of high-Al-content AlGaN QWs used for 220-250nm-band high-brightness UV-LEDs", Second International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-2), Laforet Shuzenji, Izu, July 6-9, 2008.

18. S. Fujikawa, H. Hirayama, T. Takano and K. Tsubaki: "Extremely high efficiency PL emission from 280 nm-band InAlGaN QWs realized by Si-doped layer control", Second International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-2), Laforet Shuzenji, Izu, July 6-9, 2008.

19. J. Norimatsu, H. Hirayama, T, Takano, S. Fujikawa, N. Noguchi, K. Tsubaki and N. Kamata: "270 nm-band AlGaN deep-UV-LEDs fabricated on ELO-AlN buffer", 27th Electronic Materials Symposium (EMS-27), Laforet Shuzenji, Izu, July 9-11, 2008.

20. H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi and N. Kamata: "Over 1mW output power 247-254 nm AlGaN deep-UV-LEDs realized by reducing threading dislocation density of AlN buffer", 27th Electronic Materials Symposium (EMS-27), Laforet Shuzenji, Izu, July 9-11, 2008.

21. S. Fujikawa, H. Hirayama, T. Takano and K. Tsubaki: "High-efficiency 280 nm-band InAlGaN quantum well deep-UV LEDs with Si-doped barrier layers", 27th Electronic Materials Symposium (EMS-27), Laforet Shuzenji, Izu, July 9-11, 2008.

22. N. Noguchi, H. Hirayama, T. Yatabe and N. Kamata: "222 nm single-peaked operation of deep-UV AlGaN MQW LED", 27th Electronic Materials Symposium (EMS-27), Laforet Shuzenji, Izu, July 9-11, 2008.

23. 平山秀樹:"220-280nm 帯 AlGaN、InAlGaN 系紫外 LED の進展"、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究、「窒化物光半導体のフロンティア」－材料潜在能力の極限発現—、公開シンポジウム、2008 年 8 月 1-2 日.

24. 平山秀樹、野口憲路、乗松潤、鎌田憲彦:"264nm 紫外 AlGaN 量子井戸 LED の CW11W 出力動作"、 2008 年秋応用物理学会(第 69 回)、中部大学、2008 年 9 月 2-5 日.

25. 平山秀樹、藤川紗千恵、乗松潤、高野隆好、椿健治、鎌田憲彦:"紫外 LED 用低貫通転位密度 ELO-AlNテンプレートの作製"、 2008年秋応用物理学会(第69回)、中部大学、2008 年 9 月 2-5 日.

26. 藤川紗千恵、平山秀樹、高野隆好、椿健治:"Si モジュレーションドープ InAlGaN 発光層を用いた 280nm 帯紫外 LED の 10mW 出力動作"、2008 年秋応用物理学会(第 69 回)、中部大学、2008 年 9 月 2-5 日.

27. 乗松潤、平山秀樹、野口憲路、藤川紗千恵、高野隆好、椿健治、鎌田憲彦:"ELO-AlN テンプレート上に作製した 270nm 帯 AlGaN-LED の CW ミリワット出力動作"、2008 年秋応用物理学会(第 69 回)、中部大学、2008 年 9 月 2-5 日.

28. 野口憲路、平山秀樹、乗松潤、鎌田憲彦:"AlN 電子ブロック層を用いた 230nm 帯 AlGaN-LED の CW 動作"、2008 年秋応用物理学会(第 69 回)、中部大学、2008 年 9 月 2-5 日.

29. H. Hirayama, S. Fujikawa, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki and N. Kamata: "Fabrication of low threading dislocation density ELO-AlN template for the application to deep-UV LEDs", International Workshop on Nitride Semiconductors 2008 (IWM2008), Montreux, Switzerland, Oct. 6-10, 2008.

30. H. Hirayama, J. Norimatsu, N. Noguchi, S. Fujikawa, T. Takano, K. Tsubaki and N. Kamata: "Milliwatt power 270 nm-band AlGaN deep-UV LED fabricated on ELO-AlN template", International Workshop on Nitride Semiconductors 2008 (IWM2008), Montreux, Switzerland, Oct. 6-10, 2008.

31. S. Fujikawa, H. Hirayama, T. Takano and K. Tsubaki: "Extremely high efficiency 280 nm-band emission from quaternary InAlGaN quantum wells realized by controlling Si-doped layers", International Workshop on Nitride Semiconductors 2008 (IWM2008), Montreux, Switzerland, Oct. 6-10, 2008.

32. 平山秀樹、藤川紗千恵、高野隆好、椿健治:"280nm 帯 InAlGaN 高出力 LED"、電子情報通信学会、レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE)「窒化物半導体光・電子デバイス・材料、及び関連技術」、名古屋工業大学、2008 年 11 月 27-28.

33. 野口憲路、平山秀樹、乗松潤、鎌田憲彦:"230nm 帯 AlGaN 紫外 LED の高出力化"、電子情報通信学会、レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE)「窒化物半導体光・電子デバイス・材料、及び関連技術」、名古屋工業大学、2008 年 11 月 27-28.

34. 乗松潤、平山秀樹、野口憲路、藤川紗千恵、高野隆好、椿健治、鎌田憲彦:"ELO-AlN テンプレート上に作製した 270nm 帯紫外 LED"、電子情報通信学会、レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE)「窒化物半導体光・電子デバイス・材料、及び関連技術」、名古屋工業大学、2008 年 11 月 27-28.

35. 奥浦一輝、片桐祐介、三宅秀人、平松和政、乗松潤、平山秀樹:"減圧 HVPE 法による周期溝加工 AlN テンプレート上への AlN 厚膜成長"、2009 年春応用物理学会(第 56 回)、筑波大学, 2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日.

36. 平山秀樹、乗松潤、野口憲路、鎌田憲彦:"紫外 LED 用 ELO-AlN テンプレートの作製(横成長領域の拡大)"、2009 年春応用物理学会(第 56 回)、筑波大学, 2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日.

37. 野口憲路、平山秀樹、乗松潤、鎌田憲彦:"230nm 帯 AlGaN 量子井戸紫外 LED の放射特性"、2009 年春応用物理学会(第 56 回)、筑波大学, 2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日.

38. 塚田悠介、平山秀樹、藤川紗千恵、野口憲路、鎌田憲彦:"250nm 帯 InAlGaN 量子井戸紫外 LED のサブミリワット出力動作"、2009 年春応用物理学会(第 56 回)、筑波大学, 2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日.

39. 高野隆好、藤川紗千恵、平山秀樹、杉山正和："InAlGaN4 元混晶半導体を用いた深紫外発光量子ドットの作製"、2009 年春応用物理学会（第 56 回）、筑波大学, 2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日.

40. 山口朋彦、福田武司、野口憲路、塚田悠介、平山秀樹、鎌田憲彦："MOCVD 法で作製した InAlGaN-MQW におけるPLスペクトルの温度依存性"、2009年春応用物理学会（第56回）、筑波大学, 2009 年 3 月 30 日-4 月 2 日.

41. 高野隆好、平山秀樹、藤川紗千恵、椿健治："アンモニアパルス供給多段成長法の最適化による 2 インチ 3 枚対応高品質 AlN テンプレートの作成と紫外 LED の作製"、 第一回窒化物半導体結晶成長講演会、東京農工大、2009 年 5 月 15-16 日.

42. 高野隆好、平山秀樹、杉山正和："高 Al 組成 InAlGaN4 元混晶を用いた深紫外発光量子ドットの結晶成長と発光特性"、 第一回窒化物半導体結晶成長講演会、東京農工大、2009 年 5 月 15-16 日.

43. 塚田悠介、平山秀樹、野口憲路、乗松潤、鎌田憲彦："220-250nm 帯 AlGaN 量子井戸紫外 LED からの垂直放射の確認"、 第一回窒化物半導体結晶成長講演会、東京農工大、2009 年 5 月 15-16 日.

44. 塚田悠介、平山秀樹、野口憲路、鎌田憲彦："高 Al 組成 InAlGaN4元混晶の結晶成長と 250nm 帯深紫外高効率 LED の実現"、 第一回窒化物半導体結晶成長講演会、東京農工大、2009 年 5 月 15-16 日.

45. 藤川紗千恵、平山秀樹、高野隆好、椿健治："低速成長による高 Al 組成 InAlGaN4 元混晶の高品質結晶成長・評価と280nm 帯深紫外高出力LEDの実現"、 第一回窒化物半導体結晶成長講演会、東京農工大、2009 年 5 月 15-16 日.

46. 藤川紗千恵、乗松潤、平山秀樹、鎌田憲彦："大周期ストライプを用いた深紫外 LED 用 ELO-AlN テンプレートの貫通転位の低減"、 第一回窒化物半導体結晶成長講演会、東京農工大、2009 年 5 月 15-16 日.

47. 藤川紗千恵、平山秀樹、高野隆好、椿健治："280nm 帯紫外 LED における InAlGaN の極低速成長の重要性"、2009 年秋応用物理学会（第 70 回）、富山大学、2009 年 9 月 8-11 日.

48. 塚田悠介、藤川紗千恵、平山秀樹、乗松潤、鎌田憲彦："Siドーピングによる 250nm 帯 In ドープ AlGaN 量子井戸 LED 高効率化の検討"、2009 年秋応用物理学会（第 70 回）、富山大学、2009 年 9 月 8-11 日.

49. 乗松潤、平山秀樹、塚田悠介、鎌田憲彦："240nm AlGaN-LED の CW1.2mW 出力動作"、2009 年秋応用物理学会（第 70 回）、富山大学、2009 年 9 月 8-11 日.

50. 高野隆好、藤川紗千恵、平山秀樹、椿健治："2"×3MOCVD を用いた核形成層制御によるサファイア基板上 AlN の高品質化"、2009 年秋応用物理学会（第 70 回）、富山大学、2009 年 9 月 8-11 日.

51. 藤田浩平、奥浦一輝、三宅秀人、平松和政、乗松潤、平山秀樹："周期溝構造 AlN/サファイア上への減圧 HVPE 法による AlN 成長"、2009 年秋応用物理学会（第 70 回）、富山大学、2009 年 9 月 8-11 日.

52. H. Hirayama, J. Norimatsu, S. Fujikawa, and N. Kamata: "Low threading dislocation density ELO-AlN for deep-UV LEDs fabricated using large period (>20μm) AlN stripes", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009.

53. H. Hirayama, Y. Tsukada, N. Noguchi, J. Norimatsu, and N. Kamata: "Surface emitting property of 220-250 nm-band AlGaN-based deep-UV LEDs", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009.

54. Y. Tsukada, H. Hirayama, N. Noguchi, and N. Kamata: "250nm-band high-efficiency AlGaN LEDs using In-doped quantum well and p-type layers", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009.

55. S. Fujikawa, H. Hirayama, T. Takano and K. Tsubaki: "High-efficiency 280 nm InAlGaN quantum well LEDs fabricated using quite low growth rate epitaxy", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009.

56. T. Takano, H. Hirayama, S. Fujikawa and K. Tsubaki: "Low threading dislocation density 4-inch area uniform AlN on sapphire fabricated by controlling AlN nuclei", 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009.

57. S. Penna, A. Reale, G. M. Tosi Beleffi, P. S. B. Andre, H.V. Baghdasaryan, M. Nakao, S. Shinada, N. Wada, A. L. J. Teixeira, "Towards the implementation of an Organic Inorganic Laser for Next Generation Optical Applications", CLEO2010 (San Jose, California, May 18-20, 2010).

58. M. Nakao, M. Yamaguchi and S. Yabu, "Imprint-Mold-Cleaning by Vacuum Ultraviolet Light", The International Conference on Nanophotonics 2010, O-01(5/30-6/3/2010).

59. 平山秀樹、塚田悠介、前田哲利、鎌田憲彦:"多重量子障壁電子ブロック層を用いた 250nm 帯深紫外 LED の高効率化"、2010 年春応用物理学会(第 57 回)、東海大学、2010 年 3 月 17-20 日.

60. 平山秀樹、塚田悠介、前田哲利、鎌田憲彦:"MQB を用いた高効率 250nm 帯 AlGaN 系深紫外 LED"、 第 2 回窒化物半導体結晶成長講演会、三重大学、2010 年 5 月 14-15 日.

61. 塚田悠介、平山秀樹、鎌田憲彦:"AlGaN 深紫外 LED の電子注入効率改善のための MQB 設計"、 第 2 回窒化物半導体結晶成長講演会、三重大学、2010 年 5 月 14-15 日.

62. 藤川紗千恵、平山秀樹:"Si 基板上 290 nm 帯 InAlGaN 深紫外 LED の実現"、 第 2 回窒化物半導体結晶成長講演会、三重大学、2010 年 5 月 14-15 日.

63. H. Hirayama, Y. Tsukada, N. Maeda and N. Kamata: "Efficiency Enhancement in 250 nm-band AlGaN Deep-UV LEDs using Multiquantum-Barrier", The 3rd International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-3), Montpellier, France, July 3-7, 2010.

64. S. Fujikawa and H. Hirayama: "280 nm-band InAlGaN Deep-UV LED on Silicon (111) Substrate", The 3rd International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-3), Montpellier, France, July 3-7, 2010.

65. H. Hirayama, Y. Tsukada, N. Maeda and N. Kamata: "247-262 nm AlGaN Deep-UV LEDs using Multiquantum-Barrier", The 8th International Symposium on Semiconductors Light Emitting Devices (ISSLED2010), Beijing China, May 16-21,

2010.

66. Y. Tsukada, H. Hirayama and N. Kamata: "Design of Multiquantum-barrier Electron-Blocking Layer for 230-280 nm-band AlGaN Deep-UV LEDs", The 8th International Symposium on Semiconductors Light Emitting Devices (ISSLED2010), Beijing China, May 16-21, 2010.

67. K. Fujita, K. Okuura, H. Miyake, K. Hiramatsu, J. Norimatsu and H. Hirayama: "HVPE growth of crack-free thick AlN film on trench-patterned AlN template", The 8th International Symposium on Semiconductors Light Emitting Devices (ISSLED2010), Beijing China, May 16-21, 2010.

68. 藤川紗千恵、平山秀樹:"Si 基板上 280nm 帯 InAlGaN 深紫外 LED"、 2010 年秋応用物理学会(第 71 回)、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日.

69. 秋葉雅弘、平山秀樹、塚田悠介、前田哲利、鎌田憲彦:"Ni/Al 高反射 p 型電極を用いた AlGaN 深紫外 LED の高効率化"、2010 年秋応用物理学会(第 71 回)、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日.

70. 塚田悠介、平山秀樹、秋葉雅弘、前田哲利、鎌田憲彦:"多重量子障壁(MQB)を用いた高出力 AlGaN 系深紫外 LED"、2010 年秋応用物理学会(第 71 回)、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日.

71. 寺嶋亘、平山秀樹:"GaN/AlGaN THz-QCL からの電流注入による自然放出光の観測"、2010 年秋応用物理学会(第 71 回)、長崎大学、2010 年 9 月 14-17 日.

72. H. Hirayama, Y. Tsukada, M. Akiba, N. Maeda and N. Kamata, "High-Power Short-Wavelength AlGaN Deep-UV LEDs Realized by Improving Injection Efficiency", International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2010), Tampa, Florida, USA, Sept. 19-24, 2010.

73. Y. Tsukada, H. Hirayama and N. Kamata, "Optimization of Multiquantum-barrier (MQB) Structure of AlGaN Deep-UV LEDs for Realizing High Injection Efficiency", International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2010), Tampa, Florida, USA, Sept. 19-24, 2010.

74. H. Hirayama, Y. Tsukada and N. Kamata, "Progress of AlGaN-based Deep-UV LEDs using High-Quality AlN on Sapphire", 22th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2010), Kyoto, Sept. 26-30, 2010.

75. Y. Tsukada, H. Hirayama and N. Kamata, "Marked Efficiency Enhancement of AlGaN-based Deep-UV LEDs using Multiquantum-Barrier", 22th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2010), Kyoto, Sept. 26-30, 2010.

76. S. Fujikawa and H. Hirayama, "First Achievement of Deep-UV LED on Si Wafer", 22th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2010), Kyoto, Sept. 26-30, 2010.

77. M. Nakao, M. Yamaguchi and S. Yabu, "Regeneration of imprint molds using vacuum ultraviolet light", SPIE Advanced Lithography, 7972-93(San Jose, California, 27 February-3 March 2011).

78. M. Yamaguchi, M. Nakao and S. Matsuzawa, "Fast dry cleaning of resins by high-power vacuum ultraviolet light,", SPIE Advanced Lithography, 7972-49(San Jose, California, 27 February-3 March 2011).

79. 舘林潤,佐久間芳樹, 池沢道男,曽根良則,落合雅幸,池田直樹,舛本泰章,中尾正史,杉本喜正, 迫田和彰,“窒素を導入した GaP ナノワイヤの結晶成長及び光学特性”, 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 4A-BQ-9 (東京,2011).

80. 中島慎也、中尾正史、 品田聡、川西哲也,”インプリント法による LN への回折格子形成とそのフィルター特性“, 2012 年電子情報通信学会総合大会, C-3-78(岡山,2012).

81. 塚田悠介、平山秀樹、秋葉雅弘、富田優志、前田哲利、鎌田憲彦:“MQB を用いた 230nm 帯短波長深紫外 LED の効率改善”、2011 年春応用物理学会(第 58 回)、神奈川工科大学、2011 年 3 月 24-27 日.

82. 藤川紗千恵、平山秀樹、前田哲利:“a 軸方向傾斜 c 面サファイア上に作製した高効率深紫外 LED”、2011 年春応用物理学会(第 58 回)、神奈川工科大学、2011 年 3 月 24-27 日.

83. 美濃卓哉、高野隆好、椿健治、平山秀樹、杉山正和:“多重量子障壁(MQB)を用いた短波長深紫外 LED の飛躍的高出力化”、2011 年春応用物理学会(第 58 回)、神奈川工科大学、2011 年 3 月 24-27 日.

84. H. Hirayama, Y. Tsukada, M. Akiba, Y. Tomita, S. Fujikawa, N. Maeda and N. Kamata: “High-Efficiency Short-Wavelength AlGaN DUV LEDs Realized by Improving Injection Efficiency with MQB”, Asian Pacific Workshop on Nitride Semiconductors (APWS2011), Toba, Mie、Japan, May 22-26, 2011.

85. S. Fujikawa, H. Hirayama and N. Maeda: “High-Efficiency AlGaN Deep-UV LEDs fabricated on a- and m-axis oriented c-plane sapphire substrates”, Asian Pacific Workshop on Nitride Semiconductors (APWS2011), Toba, Mie、Japan, May 22-26, 2011.

86. M. Akiba, Y. Tomita, Y. Tsukada, H. Hirayama, N. Maeda and N. Kamata: “Growth of Flat p-GaN Contact Layer by Pulse-Flow Method for High Light-Extraction AlGaN Deep-UV LEDs with Al Electrode”, Asian Pacific Workshop on Nitride Semiconductors (APWS2011), Toba, Mie、Japan, May 22-26, 2011.

87. H. Hirayama, Y. Tsukada, M. Akiba, Y. Tomita, S. Fujikawa, N. Maeda and N. Kamata: “Marked Increase of Injection Efficiency in AlGaN Deep-UV LEDs”, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, July 10-15, 2011.

88. T. Mino, T. Takano, K. Tsubaki, H. Hirayama and M. Sugiyama: “Realization of 256 nm AlGaN-based Deep-UV LEDs on Si Substrates using Epitaxial Lateral Overgrowth AlN Templates”, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, July 10-15, 2011.

89. M. Akiba, Y. Tomita, H. Hirayama, Y. Tsukada, N. Maeda and N. Kamata: “Growth of Flat and Thin p-GaN Contact Layer by NH_3 Pulse-flow Method for High Light-Extraction AlGaN Deep- UV LEDs”, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, July 10-15, 2011.

90. S. Fujikawa, H. Hirayama and N. Maeda: “High- Efficiency AlGaN Deep-UV LEDs Fabricated on a- and m-axis Oriented c-plane Sapphire Substrates”, 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, July 10-15,

2011.

91. 藤川紗千恵:“AlGaN 系高効率深紫外 LED の開発”、日本学術会議公開シンポジウム 第 2 回先端フォトニクスの展望、東京、2011 年 10 月.

92. 藤川紗千恵、平山秀樹、鹿嶋行雄:“フォトニックナノ構造を用いた深紫外 LED の光取り出し効率の向上”、 理研シンポジウム、2011 年 11 月 17-18 日.

93. 前田哲利、藤川紗千恵、平山秀樹:“m 軸および a 軸オフ角 C 面サファイア基板上の AlN 結晶成長の特徴と高出力 AlGaN 深紫外 LED の作製”、電子情報通信学会レーザー・量子エレクトロニクス研究会、京都大学、2011 年 11 月 17-18 日.

94. 平山秀樹、秋葉雅弘、藤川紗千恵、鎌田憲彦:“220-350nm 帯 AlGaN 系深紫外 LED の最近の進展”、戦略的創造研究推進事業(CREST)研究領域「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」第 4 回公開シンポジウム、日本科学未来館、2011 年 12 月 2 日.

95. 藤川紗千恵、平山秀樹、前田哲利:“マイクロステップ制御による深紫外 LED の作製”、応用物理学会結晶工学分科会 2011 年・年末講演会「究極の結晶成長と分析&若手ポスター発表」、東京、2011 年 12 月.

96. 前田哲利、平山秀樹:“高 Al 組成 AlGaN への C ドープの試みと 250nm 帯深紫外 EL 発光”、2012 年春応用物理学会(第 59 回)、早稲田大学、2012 年 3 月 15-18 日.

97. 藤川紗千恵、平山秀樹、鹿嶋行雄、西原浩巳、田代貴晴、大川貴史、尹成圓、高木秀樹:“フォトニック結晶を用いた AlGaN 系深紫外 LED の高効率化”、2012 年秋応用物理学会(第 73 回)、愛媛大学, 2012 年 9 月 11-14 日.

98. 平山秀樹:“InAlGaN4 元混晶を用いた高効率深紫外発光デバイスの研究”、 CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域、光・光量子科学技術の進展開、第 5 回シンポジウム、アキバホール、2012 年 11 月 23 日.

99. 藤川紗千恵、平山秀樹:“フォトニックナノ構造を用いた深紫外 LED の高効率化”, 先端光科学領域シンポジウム 2012、理研、2012 年 12 月 4 日.

100. 前田哲利、藤川紗千恵、水澤克哉、平山秀樹:“p-AlGaN 透明コンタクト層を用いた高効率深紫外 LED の検討”、先端光科学領域シンポジウム 2012、理研、2012 年 12 月 4 日.

101. 富田優志、藤川紗千恵、豊田史朗、鎌田憲彦、平山秀樹:“結合ピラーAlN バッファーを用いた高効率深紫外 LED の開拓”、先端光科学領域シンポジウム 2012、理研、2012 年 12 月 4 日.

102. 前田哲利、藤川紗千恵、平山秀樹:“p-AlGaN 透明コンタクト層を用いた深紫外 LED の高効率化の実現”、2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大, 3 月(2013).

103. 富田優志、豊田史朗、藤川紗千恵、鎌田憲彦、平山秀樹:“結合ピラーAlN バッファーを用いた高効率深紫外 LED の検討”、2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大, 3 月(2013).

104. 豊田史朗、富田優志、藤川紗千恵、鎌田憲彦、平山秀樹:“深紫外 LED バッファー用結合ピラーAlN の結晶成長”、2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大, 3 月(2013).

105. N. Maeda and H. Hirayama, "Realization of High-Efficiency Deep-UV LEDs using

Transparent p-AlGaN Contact Layer", The 40th International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2013), Kobe, Japan, May 19-23, 2013.

106. N. Maeda and H. Hirayama, "Improvement of Light-Extraction Efficiency of Deep-UV LEDs using Transparent p-AlGaN Contact Layer", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, The 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLRO-PR & OECC/PS 2013), Kyoto, Japan, June 30 –July 4, 2013.

107. T. Mino, H. Hirayama, N. Noguchi, T. Takano and K. Tsubaki, "Development of Highly-Uniform 270 nm Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, The 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLRO-PR & OECC/PS 2013), Kyoto, Japan, June 30 –July 4, 2013.

108. H. Hirayama, Y. Tomita, S. Toyoda, S. Fujikawa and N. Kamata, "AlGaN-based Deep-UV LEDs Fabricated on Connected-Pillar AlN Buffer", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, The 18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (CLRO-PR & OECC/PS 2013), Kyoto, Japan, June 30 –July 4, 2013.

③ ポスター発表　　（国内会議 6 件、国際会議 14 件）

1. N. Noguchi, T. Yatabe, T. Ohashi, N. Kamata and H. Hirayama: “High-quality AlN buffer fabricated on sapphire by NH_3 pulsed-flow multi-layer growth method for application to deep-UV LEDs”, International Conference on White LEDs and Solid State Lighting (White LEDs-07), Tokyo, Nov. 26-30, 2007.

2. T. Yatabe, N. Noguchi and N. Kamata, and H. Hirayama: “Remarkable enhancement of 254-288 nm deep UV emission from AlGaN quantum wells by using high-quality AlN buffer on sapphire”, International Conference on White LEDs and Solid State Lighting (White LEDs-07), Tokyo, Nov. 26-30, 2007.

3. N. Noguchi, H. Hirayama, T. Yatabe and N. Kamata: “222 nm single-peaked deep-UV LED with thin AlGaN quantum well layers”, International Workshop on Nitride Semiconductors 2008 (IWM2008), Montreux, Switzerland, Oct. 6-10, 2008.

4. T. Takano, H. Hirayama, S. Fujikawa and K. Tsubaki: “Realization of 270 nm-band AlGaN based UV-LEDs on large area AlN template with high crystalline quality”, International Workshop on Nitride Semiconductors 2008 (IWM2008), Montreux, Switzerland, Oct. 6-10, 2008.

5. T. Takano, H. Hirayama, S. Fujikawa and K. Tsubaki: “Low threading dislocation density AlN on sapphire for DUV-LEDs realized by using multi-AlN-nucleus layers grown by NH_3 pulsed-flow epitaxy”, 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009.

6. T. Takano, H. Hirayama, M. Sugiyama: “Deep-UV bright emission from high-Al-content InAlGaN quantum dots-growth and optical properties”, 8th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-8), Jeju, Korea, Oct. 18-23, 2009.

7. S. Fujikawa and H. Hirayama: “Realization of InAlGaN QW Deep-UV LEDs on Si

(111) Substrates", International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2010), Tampa, Florida, USA, Sept. 19-24, 2010.

8. M. Akiba, H. Hirayama, Y. Tsukada, N. Maeda and N. Kamata: "Efficiency Enhancement in AlGaN Deep-UV LEDs using High-Reflectivity Al-based p-type Electrode", International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2010), Tampa, Florida, USA, Sept. 19-24, 2010.

9. 塚田悠介、平山秀樹、秋葉雅弘、鎌田憲彦："低貫通転位密度 AlN の結晶成長法開拓と 220-280nm 帯深紫外 LED の進展"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域、光・光量子科学技術の進展開、第 3 回シンポジウム、日本科学未来館、2010 年 11 月 26 日.

10. 藤川紗千恵、平山秀樹："InAlGaN4 元混晶を用いた 280nm 帯殺菌用途深紫外 LED の進展"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域、光・光量子科学技術の進展開、第 3 回シンポジウム、日本科学未来館、2010 年 11 月 26 日.

11. 塚田悠介、平山秀樹、秋葉雅弘、鎌田憲彦："多重量子障壁(MQB)を用いた短波長深紫外 LED の飛躍的高出力化"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域、光・光量子科学技術の進展開、第 3 回シンポジウム、日本科学未来館、2010 年 11 月 26 日.

12. 秋葉雅弘、平山秀樹、塚田悠介、鎌田憲彦："光取り出し効率改善による AlGaN 系深紫外 LED の高効率化"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域、光・光量子科学技術の進展開、第 3 回シンポジウム、日本科学未来館、2010 年 11 月 26 日.

13. N. Maeda, H. Hirayama, M. Akiba and N. Kamata: "Reduction of Macro-Step Geometry and Abnormal Nuclei on AlN/Sapphire for use as Deep-UV LED Templates", 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, July 10-15, 2011.

14. T. Mino, T. Takano, N. Noguchi, K. Tsubaki and H. Hirayama: "Development of 260 nm AlGaN- based Deep-UV LEDs using 2inch×3 MOVPE System", 9th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, July 10-15, 2011.

15. 藤川紗千恵、平山秀樹："Si 基板上 InAlGaN 系深紫外 LED の進展"、 戦略的創造研究推進事業（CREST）研究領域「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」第 4 回公開シンポジウム、日本科学未来館、2011 年 12 月 2 日.

16. 藤川紗千恵、前田哲利、平山秀樹："a 軸および m 軸傾斜サファイア基板上に作製した高効率 AlGaN 深紫外 LED"、戦略的創造研究推進事業（CREST）研究領域「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」第 4 回公開シンポジウム、日本科学未来館、2011 年 12 月 2 日.

17. M. Nakao, S. Nakajima, S. Shinada and T. Kawanishi, "Selective Grating Fabrication on Ti-diffused Waveguides in Linbo3 by Imprint Lithography", 25th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2012), Kobe, Oct.30-Nov.2, 2012.

18. S. Fujikawa, H. Hirayama, Y. Kashima, H. Nishihara, T. Tashiro, T. Ohkawa, S. W. Youn and H. Takagi: "Improvement of Light Extraction Efficiency of AlGaN Deep-UV LED using 2-Dimensional Photonic Crystal (2D-PhC)", The 4th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-4), St. Petersburg,

Russia, July 15-19, 2012.

19. T. Mino, H. Hirayama, N. Noguchi, T. Takano, A. Murai, M. Yasuda and K. Tsubaki: "Development of High-Efficiency and Highly-Uniform AlGaN-Based Deep-UV Light-Emitting Diodes by 2-inch×3 Metalorganic Vapor Phase Epitaxy System", International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2012), Sapporo, Japan, Oct. 14-19, 2012.

20. S, Fujikawa, H. Hirayama, Y. Kashima, H. Nishihara, T. Tashiro, T. Ohkawa, S. W. Youn and H. Takagi: "Improvement of Light Extraction Efficiency of AlGaN Deep-UV LED using 2-Dimensional Photonic Crystal (2D-PhC)", International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2012), Sapporo, Japan, Oct. 14-19, 2012.

21. 藤川紗千恵、平山秀樹："2次元フォトニック結晶を用いた深紫外LEDの高効率化"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域 第5回公開シンポジウム、東京、2012年11月23日.

22. 平山秀樹、藤川紗千恵、鎌田憲彦："多重量子障壁を用いた230nm帯短波長・高効率深紫外LEDの実現"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域 第5回公開シンポジウム、東京、2012年11月23日.

23. 前田哲利、藤川紗千恵、水澤克哉、平山秀樹："p-AlGaN透明コンタクト層を用いた高効率深紫外LEDの検討"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域 第5回公開シンポジウム、東京、2012年11月23日.

24. 富田優志、藤川紗千恵、豊田史朗、鎌田憲彦："結合ピラーAlNバッファーを用いた高効率深紫外LEDの検討"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域 第5回公開シンポジウム、東京、2012年11月23日.

25. 富田優志、藤川紗千恵、豊田史朗、鎌田憲彦："深紫外LEDバッファー用結合ピラーAlNの結晶成長技術の開拓"、CREST「新機能創成に向けた光・光量子科学技術」研究領域 第5回公開シンポジウム、東京、2012年11月23日.

(4)知財出願

①国内出願 (9件)

1. 「光半導体素子およびその製造方法」、平山秀樹、柴田智彦、独立行政法人理化学研究所、DOWAエレクトロニクス㈱、2009/2/27、2009-046434
2. 「発光素子形成用複合基板、発光ダイオード素子及びその製造方法」、平山秀樹、市園泰之、独立行政法人理化学研究所、宇部興産㈱、2009/3/3、2009-049833
3. 「発光素子形成用複合基板、発光ダイオード素子及びその製造方法」、平山秀樹、市園泰之、独立行政法人理化学研究所、宇部興産㈱、2009/3/3、2009-049823
4. 「発光素子形成用複合基板、発光ダイオード素子及びその製造方法」、平山秀樹、市園泰之、独立行政法人理化学研究所、宇部興産㈱、2009/3/3、2009-049822
5. 「窒化物半導体発光素子」、平山秀樹、藤川紗千恵、椿健治、高野隆好、独立行政法人理化学研究所、パナソニック電工㈱、2009/4/22、2009-104407
6. 「窒化物半導体の製造方法、窒化物半導体発光素子の製造方法および窒化物半導体発光素子」、平山秀樹、藤川紗千恵、椿健治、高野隆好、独立行政法人理化学研究所、パナソニック電工㈱、2009/4/22、2009-104408
7. 「窒化物半導体多重量子障壁を有する発光素子及びその製造方法」、平山秀樹、独立行政法人理化学研究所、2010/2/24、2010-0.38912
8. 「発光素子系形成用複合基板、発光ダイオード素子及びその製造方法」(韓国)、平山秀樹、

市園泰之、独立行政法人理化学研究所、宇部興産㈱、2010/3/2、2011-502832

9. 「発光素子及びその製造方法」、平山秀樹、藤川紗千恵、鹿嶋行雄、松浦恵里子、西原浩巳、田代貴晴、大川貴史、尹成圓、高木秀樹、独立行政法人理化学研究所、丸文㈱、東芝機械㈱、独立行政法人産業技術総合研究所、2011/7/12、2011-154276

②海外出願（12 件）

1. 「光半導体素子およびその製造方法」（米国）、平山秀樹、大橋智昭、鎌田憲彦、独立行政法人理化学研究所、埼玉大学、2008/3/26、12/055977
2. 「光半導体素子およびその製造方法」（米国）、平山秀樹、大橋智昭、鎌田憲彦、独立行政法人理化学研究所、埼玉大学、2008/3/26、12/055949
3. 「発光素子形成用複合基板及びその製造方法」（台湾）、平山秀樹、古内史人、独立行政法人理化学研究所、宇部興産㈱、2008/9/4、97133884
4. 「発光素子形成用複合基板及びその製造方法」(PCT)、平山秀樹、古内史人、独立行政法人理化学研究所、宇部興産㈱、2008/9/3、PCT/JP2008/066272
5. 「光半導体素子およびその製造方法」（米国）、平山秀樹、柴田智彦、独立行政法人理化学研究所、DOWA エレクトロニクス㈱、2009/8/28、12/550329
6. 「発光素子系形成用複合基板、発光ダイオード素子及びその製造方法」（韓国）、平山秀樹、市園泰之、独立行政法人理化学研究所、宇部興産㈱、2010/3/2、10-2011-7020628
7. 「発光素子系形成用複合基板、発光ダイオード素子及びその製造方法」（米国）、平山秀樹、市園泰之、独立行政法人理化学研究所、宇部興産㈱、2010/3/2、13/203853
8. 「窒化物半導体多重量子障壁を有する発光素子及びその製造方法」、平山秀樹、独立行政法人理化学研究所、2010/11/25、JP2010-071524
9. 「発光素子及びその製造方法」（米国）、平山秀樹、秋田勝史、中村孝夫、独立行政法人理化学研究所、住友電工㈱、2011/4/25、13/093246
10. 「発光素子及びその製造方法」（台湾）、平山秀樹、秋田勝史、中村孝夫、独立行政法人理化学研究所、住友電工㈱、2011/11/28、100143615
11. 「発光素子及びその製造方法」（PCT）、平山秀樹、藤川紗千恵、鹿嶋行雄、松浦恵里子、西原浩巳、田代貴晴、大川貴史、尹成圓、高木秀樹、上村隆一郎、独立行政法人理化学研究所、丸文㈱、東芝機械㈱、独立行政法人産業技術総合研究所、アルバック㈱、2012/5/25、JP2012/064251
12. 「発光素子及びその製造方法」（台湾）、平山秀樹、藤川紗千恵、鹿嶋行雄、松浦恵里子、西原浩巳、田代貴晴、大川貴史、尹成圓、高木秀樹、上村隆一郎、独立行政法人理化学研究所、丸文㈱、東芝機械㈱、独立行政法人産業技術総合研究所、アルバック㈱、2012/7/4、101124099

(5)受賞・報道等

①受賞

1. 応用物理学会編集貢献賞受賞　平山秀樹　2010年4月
2. 日本結晶成長学会、研究奨励賞受賞　藤川紗千恵 「InAlGaN系深紫外高効率発光ダイードの開発に関する研究」 2010年5月
3. IWN国際会議ベストポスター賞受賞　M. Akiba, H. Hirayama, Y. Tsukada N. Maeda and N. Kamata　"Efficiency Enhancement in AlGaN Deep-UV LEDs using High-Reflectivity Al-based p-type Electrode"、2010年9月
4. 第24回日本IBM科学賞エレクトロニクス部門受賞　平山秀樹 「AlGaN系半導体結晶の高品質化と深紫外LEDの先導的開発」、2010年11月

5. 第43回市村学術賞　平山秀樹 「AlGaN系精密結晶成長技術の開拓と深紫外LEDの先駆的研究」、2011年4月

6. 理化学研究所　平成23年度基礎科学・国際特別研究員研究成果発表会 ポスター賞：藤川紗千恵、「Study of light emitting diode on nitride semiconductor」 2012年1月25日

②マスコミ（新聞・TV等）報道

・2008 年 7 月 4 日、深紫外殺菌波長 LED において実用レベル高出力（10mW以上）を世界初に実現したので、プレス発表を行った。

・2010 年 2 月 25 日、多重量子障壁（MQB）を用いて深紫外 LED の電子注入効率を飛躍的に改善し、大幅な出力増強（従来比 7 倍）を実現したので、プレス発表を行った。

1. OPTRONICS、No.310、2007年10月号、「実用可能な最短波長深紫外LEDを開発」

2. Compound Semiconductor, Sept. 11, 2007, "Multilayer AlN boosts deep-UV LED power"

3. セラミックス、2007年12月号、「実用強度の深紫外LEDを開発」

4. Compound Semiconductor, July 11, 2008, "RIKEN makes record bug-busting UV LED"

5. 理研プレスリリース　2008.7.4　（殺菌用途に最適な深紫外光を10mWで発する高出力LED）

6. 日経産業新聞、2008年7月7日、「紫外線LED最高出力、10mWで殺菌効果」

7. 日経新聞、2008年7月5日、「殺菌用LED世界最高出力」

8. 日刊工業新聞、2008年7月7日、「LED殺菌作用」

9. 化学工業日報、2008年7月7日、「高出力深紫外LED、殺菌医療などへ応用へ」

10. 電波新聞、2008年7月7日、「深紫外光を10mWで発光、殺菌用途に最適な高出力LED開発」

11. NIKKEI NET、2008年7月4日、「殺菌用途に最適な深紫外光を10mWで発する発光ダイオードを開発」

12. IP NESTニュース、2008年7月7日、「殺菌効果の高い高出力な紫外光LED開発」

13. Tech-On、2008年7月7日、「高出力・高効率の紫外LEDを開発」

14. フジサンケイビジネスアイ、2008年7月10日、「殺菌発光ダイオード開発」

15. Scan　Snap、2008年7月7日、「世界最高出力の殺菌ダイオードが誕生」

16. Science　Portal、2008年7月7日、「世界最高出力の深紫外線発光ダイオード」

17. 光の情報、2008年7月4日、「殺菌用途に最適な深紫外光を10mWで発する発光ダイオードを開発」

18. The Chemical Daily, 2008年7月7日、「高出力の深紫外LEDを開発」

19. オートミ建築資材NEWS、2008年7月4日、「殺菌用途に最適な深紫外光を10mWで発する発光ダイオード登場」

20. 日経エレクトロニクス、2008年8月25日、「10mW越の深紫外LED－殺菌システムを小型・高効率にー」

21. 毎日新聞、「殺菌力強いLED、紫外光実用化レベル」、2010年2月26日

22. 日刊工業新聞、「深紫外LED・理研、世界最高出力を達成」、2010年2月26日

23. 日経産業新聞、「深紫線LED出力7倍達成、理研、殺菌灯向け」、2010年2月26日

24. 化学工業日報、「深紫外LEDの出力7倍に、理研とJST」、2010年2月26日

25. 科学新聞、「深紫外LEDの出力7倍に、実用レベルをクリア、殺菌・医療など応用へ」、2010年3月12日

26. 日本経済新聞社、化学・先端技術情報サイト、ケミカルブティック・インタビュー記事、第4回「深紫外発光ダイオード（LED）の実用化へ向けて高効率・高出力を実現」、2010年5月17日

27. NIKKEI NET、「深紫外発光ダイオードの出力が従来の7倍である15mWを達成」、2010年2月25日

28. Semiconductor Today, "Multi-quantum Blocking Raises deep-UV LED Efficiency", March 2nd, 2010.

29. Semiconductor Today, "Technology focus: UV LED", "Going deep for UV sterilization LEDs", Vol. 5, Issue 3, April, 2010.

30. 理研プレスリリース 2010.2.25 （深紫外LEDの出力が7倍（15mW）の世界最高値を達成）

31. 理研ニュース、「世界最高出力の深紫外LEDを開発」、2010年5月号

32. JST-CREST 平成21年度実績報告書 （研究課題：230m-350m帯InAlGaN系深紫外高効率発光デバイスの研究）

33. サムコナウ Samco NOW 2010.7月 Vol.70, インタビュー記事

34. Semiconductor TODAY: "Deep ultraviolet goes deeper on silicon", September 13, 2011

35. 理研、基幹研究所2011年リーフレット、平山秀樹、"殺菌・浄水、環境汚染物質の分解など幅広い応用が期待される深紫外光を発するLEDの開発への取り組み"、2011年11月

36. "RIKEN RESEARCH", Frontlines、"Developing the world's highest output in deep-UV light-emitting diode technology", 20 January 2012 (Volume 7 Issue 1) Hideki Hirayama

37. 理研ニュース 2011.6月号 （世界最高水準の深紫外発光ダイオードを開発）

④ その他
なし

(6)成果展開事例

①実用化に向けての展開

- 深紫外 LED の商品化に関して、1 社と共同研究中。
- AlN 単結晶基板上深紫外 LED に関して、1 社と共同研究中。
- サファイア上フォトニック結晶による深紫外 LED の光取り出し効率改善に関して、5 社と共同研究中。
- パターンサファイア基板上深紫外 LED に関して、1 社と共同研究中。
- 高品質 AlN テンプレート上の深紫外 LED について、1 社共同研究実施。2010 年 9 月に終了。
- MGC 基板上深紫外 LED を用いた白色 LED について、1 社共同研究実施。2008 年 9 月に終了。