

領域略称名：窒化物の新展開  
領域番号：464

平成23年度科学研究費補助金  
「特定領域研究」に係る研究成果等の報告書

「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－」

(領域設定期間)  
平成18年度～平成22年度

平成23年6月

領域代表者 立命館大学・理工学部・教授・名西愷之

## 目次

1. 研究領域の目的及び概要	1
2. 研究領域の設定目的の達成度	2
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	4
4. 主な研究成果	5
5. 研究成果の取りまとめの状況	10
6. 研究成果の公表の状況	11
7. 研究組織と各研究項目の連携状況	22
8. 研究費の使用状況	25
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	26
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	27
11. 総括班評価者による評価の状況	28

# 1. 研究領域の目的及び概要

研究領域名：「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―

研究期間：平成 18 年～22 年

領域代表者所属・職・氏名：立命館大学・教授・名西愷之

補助金交付額：平成 18 年度 357,300,000 円、平成 19 年度 340,200,000 円、

平成 20 年度 231,500,000 円、平成 21 年度 180,900,000 円、平成 22 年度 170,900,000 円

窒化ガリウム (GaN)、窒化アルミニウム (AlN)、窒化インジウム (InN) に代表される窒化物半導体は、その優れた物理的特徴から、青色・緑色発光ダイオード (LED)、白色光源、青紫色レーザー (LD) などを次々と実現し、短期間のうちに実用化を成し遂げ、社会の発展に大きく寄与してきた。しかし、窒化物半導体のもつ材料本来の能力 (ポテンシャル) からすれば、これまで開発された技術の範囲は、そのほんの一部でしかない。本研究領域においては、材料、物性、デバイスの全ての階層での全波長領域 (紫外域～赤外域) にわたる横断的研究に取り組むことによって、「新規結晶成長技術の開発」と「欠陥物理と発光機構、不純物活性化機構の解明」に基づいて、窒化物半導体が本来持つ優れた潜在能力を極限まで引き出し、その適用波長領域の限界を外縁に広げることを目的としている。そして、これにより新領域光エレクトロニクス分野を開拓することによって、21 世紀の課題解決のための重要な科学・技術の基盤を構築しようとするものである。

本研究領域では、上記目的を達成するために、「結晶成長技術」、「物性評価」、「短波長デバイス基盤技術」、「長波長デバイス基盤技術」の 4 つの研究項目を設定している。「結晶成長技術」では、低温成長技術 (InN 系)、高温成長技術 (AlN 系)、その場観察手法、新規基板結晶開発などにより、AlN 系および InN 系窒化物半導体高品質結晶成長への本質の共通課題解決を目標とする。「物性評価」では、極広域分光法、陽電子消滅法、走査型近接場光学顕微鏡といった特徴ある評価技術を駆使して、発光ダイナミクス、点欠陥の物理などに関する研究を行い、超広波長域・超高効率で動作可能な発光デバイス物理解明を目標とする。「短波長デバイス基盤技術」では、高効率活性層、基板材料などの開発を進め、窒化物半導体紫外 LED、LD のさらなる発光波長の短波長化と高効率化の限界追求を目指す。「長波長デバイス基盤技術」では、AlInGaN 系窒化物半導体の優れた材料特性を基礎に、その潜在能力を顕在化させて、ナノコラム LED、サブバンド間遷移光デバイス、超高効率太陽電池など新しい窒化物半導体光デバイスを創成することを目的とする。

本研究領域の遂行により、窒化物半導体材料本来の性能を極限まで引き出すことができれば、今後極めて大きな波長範囲をカバーする新領域光エレクトロニクスが実現できる。具体的には、短波長側では、例えば超高密度光記録装置、殺菌、生物医療機器、固体照明用励起光源など新しい重要な適用領域が大きく広がることになる。一方最近の InN に関する研究から長波長側においても、窒化物半導体のカバーする波長領域が、近赤外領域側にも大きく拡大され、光通信波長帯を含む赤外光デバイスへと適用領域が大きく広がることとなる。さらに窒化物半導体は、太陽光のスペクトルをほぼ完全にカバーすることとなり、変換効率 50%を超えるような超高効率太陽電池実現も夢ではなくなる。窒化物半導体による新しい光エレクトロニクス領域の開拓は、21 世紀のエネルギー、情報通信、環境、健康・医療などの課題解決の観点から、その効果の大きさは計り知れないと言えよう。

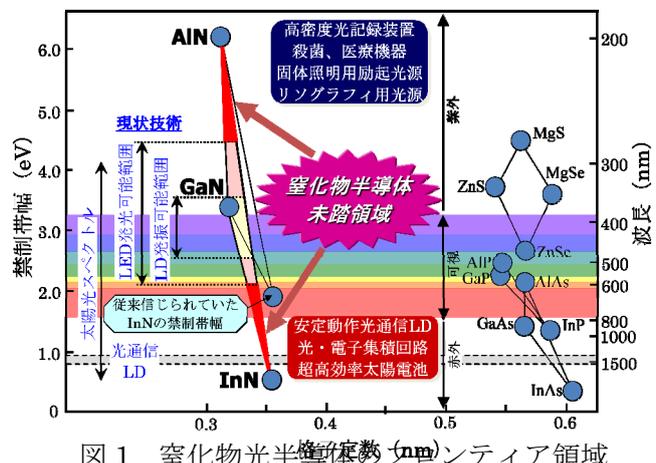


図 1 窒化物光半導体のフロンティア領域

## 2. 研究領域の設定目的の達成度

本研究領域としての全体目標は、材料、物性、デバイスの全ての階層での全波長領域（紫外域～赤外域）にわたる横断的研究に取り組むことによって、「新規結晶成長技術の開発」と「欠陥物理と発光機構、不純物活性化機構の解明」を進め、窒化物半導体が本来持つ優れた潜在能力を極限まで引き出し、その適用波長領域の限界を外縁に広げることであり、この目的実現のため、我が国の研究者が集結・協力して、5年間を通して世界最高レベルの研究活動に取り組んできた。

その結果、新規結晶成長技術を用いた結晶高品質化や伝導制御を実現し、これらの結晶を活用して多岐に渡る高度な評価技術の開発とこれらを用いた研究を進め、多くの新しい物性を解明するとともに、材料のもつ潜在能力と問題点を一層明らかなものとした。またこれらの結晶成長技術および評価技術に関する研究成果の上にたち、デバイス高性能化の研究も進め、短波長領域・長波長領域いずれにおいても世界のトップもしくはトップクラスの性能を実現しており、領域全体としての設定目的を十分に達成したものと考えている。

以下に、研究項目毎の具体的内容を示す。

「結晶成長技術」の項目では、窒化物半導体結晶成長に固有な本質的課題解決を目的とし、結晶成長手法、供給原料、基板材料、その場観察手法などを駆使した結晶成長技術開発を行った。InN 系成長においては、V/III 比制御が簡便に再現性よく行える新しい MBE 成長技術開発に成功し、InN 結晶の高品質化を果たすとともに、p 型伝導の実現、均一な厚膜 InGa<sub>N</sub> 混晶および高品質 InN/InGa<sub>N</sub> ヘテロ構造作製などにも成功した。また結晶成長温度を大幅に低減できるパルス励起堆積法の開発に成功し、室温成長で転位のない GaN や組成分離のない全組成域の InGa<sub>N</sub> 混晶の成長、大面積・新規基板材料上の低温成長が可能であることを示すとともに、可視領域の InGa<sub>N</sub> 系発光ダイオード作製に適用できることも実証した。AlN 系成長においては、原料分子を制御した新しい気相成長法の実現を行い、AlCl<sub>3</sub> を原料分子に用いる原料分子制御 HVPE 法により、高品質かつ厚膜の AlN 自立基板結晶の作製に成功した。また、反射光モニタリングによるその場観察法や選択成長技術を駆使した MOVPE 成長技術を開発し、高 Al 組成 AlGa<sub>N</sub> 結晶の高品質化に成功した。またこれを用いた新しい電子線励起紫外光源の開発にも成功するなど、当初の目的以上の成果も得られた。以上、全く新しい手法による結晶成長技術の開発により、世界最高レベルの高品質結晶実現の目的を達成できただけでなく、波長域拡大に向けて広い波長領域に対応した混晶組成の実現や、発光デバイス応用への新しい可能性を示す成果も得られた。

「物性評価」の項目では、広波長域や局所領域の分光、点欠陥検出、高速過渡応答分光などの評価手法の開発を行って、ナノ構造の輻射効率、結晶欠陥構造とそのエネルギー準位、非輻射性キャリア再結合過程を解明し、デバイス適用波長域拡大、超高機能化への対策を提案することを目的とした。研究成果は、輻射効率・速度の増加および結晶欠陥に起因する非輻射速度の低減の 2 点についてまとめられる。①輻射効率・速度では、極性・非極性・半極性面の成長面方位に依存する振動子強度の解明から高効率輻射を可能とする量子井戸構造や、特に輻射速度の速い AlN の積極的利用などが提案され、赤外域では InGa<sub>N</sub> 系全組成域禁制帯幅解明による光通信帯波長域の量子井戸設計とその発光の実現がなされた。これらを基に設計したデバイスにより、波長 230-580 nm にわたる LED や EL 素子試作が達成された。また、AlGa<sub>N</sub> 系励起子分子結合エネルギー解明や非線形光学定数など次世代の開発に向けた計画も進められ、研究目的が達成された。更に AlGa<sub>N</sub>/AlN 量子井戸構造では高出力(100 mW)電子線励起紫外域発光、半極性面上での橙色域までの LED 発光やマルチファセットを用いた蛍光体を用いない白色 LED の達成など、当初の計画以上の成果が得られた。②結晶欠陥、非輻射再結合過程解明では、AlGa<sub>N</sub> 系全組成域での深い準位の解明が進み、InGa<sub>N</sub> 中のキャリアの拡散を考慮したナノ領域の分光評価により LED の注入電流増加に対する発光強度飽和現象の解明などデバイス性能に直結する成果が得られた。また転位等の欠陥固有の光・電子物性や赤外域での InN の非輻射再結合過程などの解明について計画が遂

行された。高 In 組成域結晶の残留電子低減により p 型伝導、InN の pn 接合による整流特性の達成など、赤外域のデバイス化に向けた進歩がなされた。高 InN モル比 InGaIn 結晶の高品質化について、分光エリプソメトリによる GaN 上 1 分子層 InN 成長過程評価の進展は、pn 接合における漏れ電流低減対策として当初計画になかった  $(\text{InN})_n(\text{GaIn})_m$  短周期超格子の提案と  $(n,m)=(1,4)$  の構造実現に繋がった。

「短波長デバイス基盤技術」の項目では、①ハイパワー紫外 LD 実現のための基幹技術の確立、②AlGaIn エピタキシャル結晶高品質化技術、および③AlGaInN 四元混晶による 250-350nm 帯高効率 LED を実現することを目的として行った。①については、高温成長や溝加工テンプレート上への MOVPE 成長、近接昇華法によるバルク AlN 高速成長による AlN、AlGaIn 結晶の高品質化および Mg ドープ p 型 AlGaIn の正孔濃度の組成依存性や紫外 LD における注入効率評価など、紫外 LD 実現のための基幹技術を数多く確立し、設定目的を達成した。②については、新規アクセプタ C (カーボン) による p 型 AlGaIn を実現し、短波長領域における適用波長領域拡大を可能とする重要技術を見出すに至った。③については、パルス供給成長による貫通転位低減、In 混入効果、多重量子障壁導入による電子注入効率向上などの重要技術開発に基づき、222-351 nm 波長帯の深紫外 LED を実現でき、設定目的以上の成果が得られた。また深紫外 LED を用いた水処理・オゾン検知装置の試作など応用面での成果も得られた。

「長波長デバイス基盤技術」の項目では、AlInGaIn 系窒化物半導体の優れた材料特性を基礎に、その潜在能力を顕在化させて、長波長域での新しい窒化物半導体光デバイス創成を目指した。当初計画の範囲では、rf-MBE による Ti マスク選択成長法を開拓し、この手法を用いて、コラム径の変化による InGaIn ナノコラムの発光色制御法を見出して三原色集積 LED への道を拓き、最長波長 566 nm の光励起レーザー発振を実証し、また赤外域 (1.46  $\mu\text{m}$ ) InGaIn 系 LED の世界初の電流注入動作を達成した。さらに GaN/AlN 量子井戸ナノコラムで光通信波長域の超高速サブバンド間遷移現象を確認して、長波長域ナノデバイス基盤技術の確立を進めた。また MOCVD 法による高 In 組成 InAlN 単結晶薄膜成長技術を確立し、InAlN/InGaIn 系ヘテロ接合太陽電池動作を世界で初めて確認した。さらに GaInNAs 長波長レーザーの成長上の問題の解決を行い、高品質 GaInNAs 結晶の成長法を確立した。また、これに加えて新たに希薄磁性 InGaGdN 成長と発光観測を進め、円偏光長波長半導体レーザー創製の基礎も築いて、これらにより本項目の所期の目的を達成した。

### 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況

本研究領域に対しては、平成 20 年 9 月 19 日に中間評価ヒアリングが実施され、評価結果:A 現行のまま推進すればよい との評価を頂くとともに、「なお、特定領域研究としては、技術的な問題解決等の応用面に偏っており、学術的観点に欠けているという意見や、高い目標設定で進めているが中間評価を得て具体的な目標を決めてその実現を目指すのがよいのではないか、という意見があった。今後は、理論的・学理的な面も含めた、さらなる進展を期待する。」とのコメントも頂いた。これらの評価・コメントを受け、領域として以下の対応を実施した。

「特定領域研究としては、技術的な問題解決等の応用面に偏っており、学術的観点に欠けている」という意見については、技術的課題を解決するにいたる過程で得られた学術的知見（結晶成長のメカニズム、欠陥物理、発光ダイナミクス、デバイス物理など）に対しても重点を置き、さらなる理解を深めて学術的貢献に資する成果を産み出すことを目指し、こうしたテーマを補う課題を平成 21 年度公募研究課題として採択し、学術的観点からの活動を強化した。

「高い目標設定で進めているが中間評価を得て具体的な目標を決めてその実現を目指すのがよいのではないか」という意見については、各年度末成果報告会や公開シンポジウムにおいて本特定領域における到達点、重要検討課題を総括班が中心となって再確認し、最終目標達成に向けた具体的目標の策定、研究の方向性の指南を進めることとした。特に、本研究領域の最終目標達成のため重要な検討課題については、世界の研究レベルの中でその動向を把握し、的確な方針を定め、研究活動を推進する必要があった。そこで、以下について本研究領域として具体的対策に取り組んだ。

本研究領域では、InN 系材料を用いた窒化物半導体長波長領域光デバイスの実現に向け、A01 結晶成長技術、A02 物性評価、A04 長波長デバイス基盤技術のグループで連携して検討を進めてきた。その中で A04 長波長デバイス基盤技術グループから、デバイス実現に向けた最重要課題は InN 系材料の p 型化であり、その実現の可否が大きな鍵をにぎっているためさらに重点的に取り組む必要があるとの強い提案がなされた。そこで、A02 吉川グループ、A01 名西グループ、A04 岸野グループが中心となり、領域内の枠を超えて InN の p 型化を実現することに特化した国際ワークショップ Topical Workshop on achieving p-type InN を平成 20 年 3 月 4-5 日、箱根プリンスホテルにおいて開催した。ここでは世界中から InN の p 型化に関する結晶成長、物性評価、理論解析、デバイス応用など各分野の著名なリーダーが一堂に会した。本領域からも 9 グループ 15 名が出席し、現状における問題点、到達点、今後の課題について熱心な議論を行った。

また、特に問題点では無いが、研究期間を通じて、個々の計画研究課題、公募研究課題において得られた成果を有機的に結びつけ、特定領域研究として国内を代表する研究者が結集することによって得られるメリットを活かせるよう、領域運営を行ってきた。具体的には、各年度末に泊まり込みでの成果報告会を実施し、時間にとらわれず、研究者間での自由な議論ができるようスケジュールや会議スタイルの工夫を行ってきた。特に、平成 21 年度および 22 年度の 3 月年度末に開催した研究成果報告会では、最後に各研究項目リーダーをパネラーとしたパネルディスカッションを開催し、それぞれの研究項目における現状の到達点、今後の課題などを領域メンバー全員で議論し、特定領域としての全体成果をどうまとめて仕上げていくのか、これまでに特定領域が世の中に対して何を貢献してきたかなどについて、研究の方向性の意思統一を図った。

#### 4. 主な研究成果

以下、研究項目毎に主な研究成果をまとめて示す。

##### A01 結晶成長技術

InN 系結晶成長においては、RF-MBE 法を駆使して、InN 系窒化物半導体結晶成長における本質的課題の解決を目指した。特に DERI (Droplet Elimination by Radical beam Irradiation) 法の開発により、再現性よく低キャリア濃度の厚膜 InN を得られるようになった他、新しい InN/InGaN ヘテロ構造、InGaN 厚膜作製技術を開発した(図 2)。さらに Mg セル温度、構造の最適化、DERI 法の応用などにより、再現性よく Mg ドープ p 型 InN 成長に成功した。

一方、新しい InN 系半導体低温成長技術として、パルス励起堆積法 (PXD: Pulsed eXcitation Deposition) と呼ばれる成長手法を開発し、EuN、YSZ、ZnO など各種基板上に極めて高品質な InN やその混晶 (InAlN、InGaN) の結晶成長が可能となった(図 3)。また、本手法を用いて pn 制御や急峻なヘテロ接合形成を行い、発光ダイオードを作製したところ、可視光全域をカバーする電流注入発光が観測され、InN 系窒化物半導体薄膜成長技術として極めて有望であることが示された。

AlN 系成長においては、サファイア上の AlN エピタキシャル結晶上への AlN 及び高 Al 組成 AlGaN の低欠陥密度結晶を作製する技術を、反射光モニタリングによるその場観察法や選択成長技術を駆使した MOVPE 成長により確立し、高品質高 Al 組成 AlGaN、無極性 AlGaN、クラックフリー AlN 基板を得ることができた(図 4)。また、サファイア上の AlN エピタキシャル結晶上への高 Al 組成 AlGaN を用いた電子線励起による UV-C の深紫外光源を作製し、強い紫外線発光を得るためのデバイス構造に関する知見を得ることができた。

また、原料分子を制御した新しい HVPE 法により窒化物半導体の高品質基板結晶の実現を目的として、①石英反応管と反応しない Al 原料の利用、②生成の自由エネルギー変化が大きく高温成長や高速成長が期待できる In 原料の利用により、高品質な AlN、InN および AlGaN の厚膜エピタキシャル成長に関する研究を行った。その結果、AlN、AlGaN および InN の高品質・厚膜エピタキシャル成長に成功した(図 5)。

公募研究では、TMIn と DMHy を原料とする InN の MOVPE 成長についても検討し、アダクト形成の寄生反応を抑制する上で原料の分離供給法が有効であることを示した。また、Si 基板上半極性面への InGaN 結晶成長については、(11-22)面において、In 組成が TMI 供給量により大きくコントロール可能であること、ピエゾ電界の影響を抑制することが可能であることなど、半極性面利用に関する重要な知見が得られた。

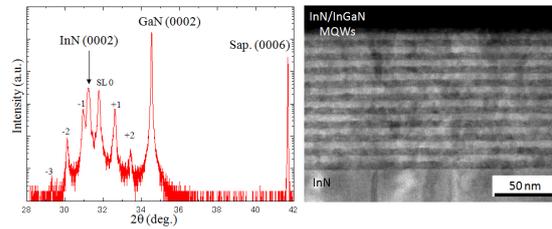


図 2 DERI 法で作製した InN/InGaN 多重量子井戸構造の XRD および TEM 像

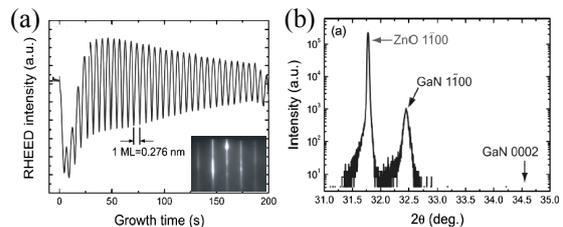


図 3 *m*-ZnO 基板上 In<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N 室温成長の (a)RHEED 強度プロファイルと(b)XRD 結果

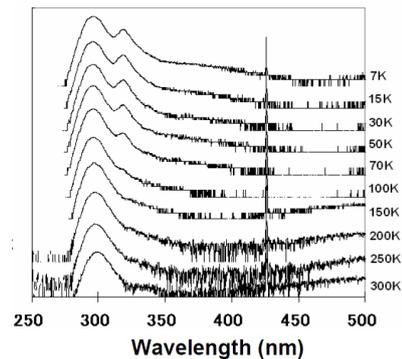


図 4 無極性 AlGaN の PL スペクトル

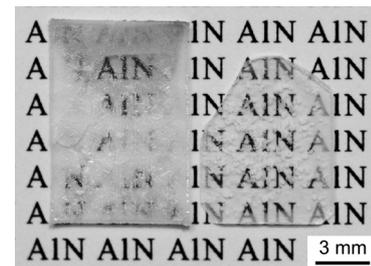


図 5 自立 AlN 基板

## A02 物性評価

### 【紫外領域】

AlGaN/AIN 系量子井戸の偏光特性が、理論的、実験的に解明され(図 6)、高効率発光は c 面上では薄い量子井戸で、無極性面上では c 面上に対して量子井戸内部電界の低減、状態密度低減、特定偏光への振動子強度集中により、紫外半導体レーザのゲインが飛躍的に増加することがわかった。輻射過程の解明では、AIN の輻射性キャリア再結合寿命が低温で 10 ps 程度、室温で 180 ps 程度であることを示し、AIN が極めて輻射性に優れた材料であることを示した。また輻射性寿命が点欠陥や不純物により大きく影響されることが明らかにされた。AlGaN 系励起子、励起子分子の結合エネルギーが解明された。

(AIN:自由励起子 57 meV、励起子分子 19 meV)。また AlGaN 系励起子分子の結合エネルギーの組成依存性(図 7)が励起子分子の局在化によることが解明された。欠陥評価においては、DLTS および光容量法により空孔ペア+逆格子位置欠陥の複合欠陥により形成される midgap 近傍の捕獲準位の存在が示された(図 8)。また転位固有の電氣的・光学的影響が不純物など点欠陥と反応していない「フレッシュ」な転位により評価され、塑性変形固有の発光、転位運動の活性化エネルギー (AIN: 3 eV、InN: 1 eV)、フレッシュな刃状転位での 1 次元的電気伝導等が明らかにされた。III 族空孔型欠陥についても陽電子消滅法により明らかにされた(図 9)。一方、デバイス応用として、AlGaN/AIN-MQW の高効率・高出力(100 mW)電子線励起発光が達成された。

### 【緑色領域】

非輻射再結合過程の解明として、近接場光学顕微鏡 (SNOM)におけるデュアルプローブ法により InGaN の混晶組成不均一性が非輻射再結合過程に及ぼす影響、これと LED の発光強度飽和現象との関連が解明された (図 10)。バンド構造・偏光特性に関しては、GaN の変形ポテンシャルが解明され、立方晶近似が妥当でないことが明らかにされた。また (0002)面から 30-40°傾いた半極性面上の InGaN 系デバイスで

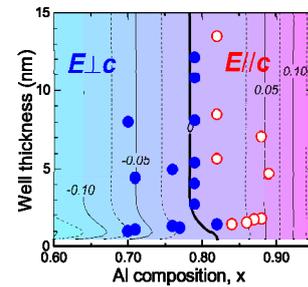


図 6 実験的、理論的に解明された(0001)面成長 AlGaN 量子井戸の偏光特性。

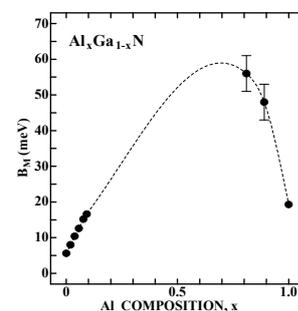


図 7 解明された励起子分子結合エネルギー。

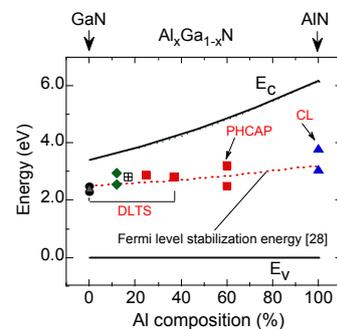


図 8 AlGaN 中 midgap(中間準位)エネルギー位置解明。破線はフェルミ準位安定化エネルギーの計算値。

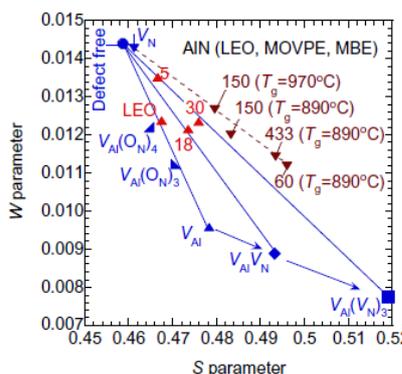


図 9 LEO 成長 AlN の S-W パラメータから III 族空孔関連欠陥構造の解明。

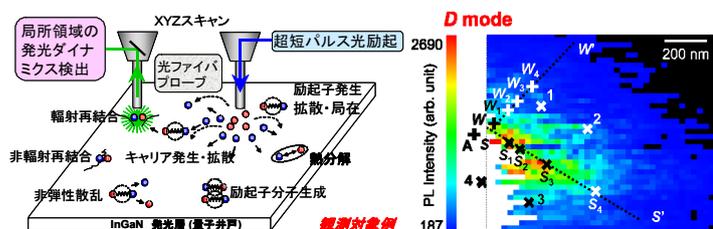


図 10 デュアルプローブ SNOM 概念図と InGaN のキャリア拡散考慮による非輻射再結合過程解明につながった実験データ例。

へき界面を共振器ミラーに用いた低コスト・高性能半導体レーザが製作可能であることが提案された (図 11)。デバイス応用として、半極性面である {11-22}面を利用した緑色、白色・多色 LED の開発に成功した。

### 【赤外領域】

InN の低電子密度化 (最少  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) により、Mg ドープ InN の p 型化に成功し、精密な正孔密度・移動度測定がなされ、正孔有効質量やアクセプタ活性化エネルギー等物性値の解明、pn 接合による整流効果発現が達成された (図 12)。また Mg の過剰ドープによる n 型反転領域で In 空孔およびその複合欠陥の高密度生成がわかった。さらに、極低温では刃状貫通転位周りで非輻射再結合が起き、温度上昇による活性化はそれ以外の欠陥、例えば点欠陥や複合欠陥によるものが支配的であることが解明された。また第一原理計算により、第二近接相互作用である In-In 相互作用が小さなバンドギャップなど InN の特徴的物性の原因であることが解明された。デバイス応用として、InN/InGaN-MQW による光通信帯波長域発光が得られ、本へテロ接合のバンド構造が示された。さらに高 In 組成 InGaN pn 接合のリーク電流低減のため、GaN 上 InN の 1 分子層ごとの成膜過程の分光エリプソメトリ評価に基づいて、 $(\text{InN})_n(\text{GaN})_m$  短周期超格子超構造が提案され、実験的には  $(n,m)=(1,4)$ での成長に成功し、その実現性が示された。これにより、太陽電池応用に有効な“Superstructure Magic Alloys fabricated at Raised Temperature”が提案された (図 13)。

### A03 短波長デバイス基盤技術

本項目では、世界最高水準の高効率・高出力紫外・深紫外 LED の実現、世界最短波長電流注入紫外 LD および光励起深紫外レーザの実現に加え、p 型正孔濃度の組成依存性の問題の指摘、その解決として期待される炭素ドープ p 型 AlGaIn の実現および多重電子障壁層による電子電流の活性層からの漏れ低減など、領域設定当時の目的を凌駕する成果を数多く挙げる事ができた。以下詳細について述べる。

図 14 は発振波長 358 nm の LD の発振の様子である。紫外 LD の特性向上を目指し、p 型 AlGaIn の高正孔濃度化および共振器構造の最

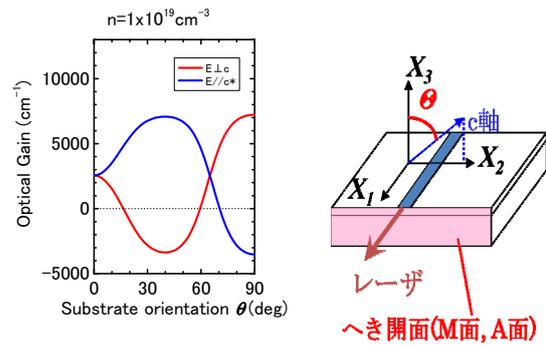


図 11 解明された光学利得の面方位依存性 (In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N-QW) と高効率発光レーザ構造提案。

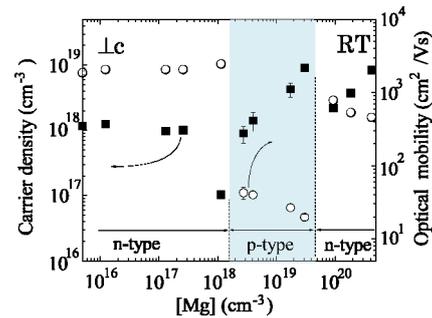


図 12 光学測定による Mg ドープ InN のキャリア密度、移動度精密測定結果。

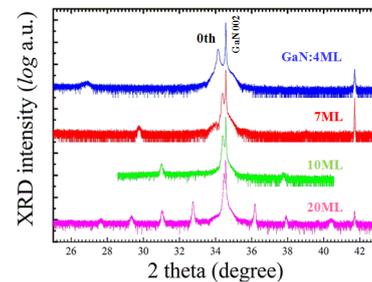


図 13 Smart 構造実現性を示す  $(\text{InN})_1/(\text{GaN})_n$  短周期超格子 X線回折結果

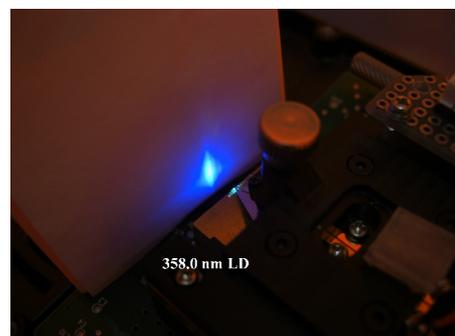


図 14 UV A レーザダイオードの発振の様子

適化に取り組んだ。p 型 AlGaIn 中の Mg の活性加熱処理の最適化、電極熱処理の最適化、および共振器多層反射膜コーティングを導入した結果、閾値電流密度を  $3.02 \text{ kA/cm}^2$  まで低減できることを実証した。

深紫外 LD、LED の実現には、p 型 AlGaIn の高正孔濃度化が必須の課題である。本項目では、AlGaIn に対する新しいアクセプタ原子として、炭素 (C) を提案し検討を進めた。図 15 には、Al 組成 55% の AlGaIn に対する C ドーピング特性を示す。CBr<sub>4</sub> の供給量を増加することにより p 型 AlGaIn が得られるとともに、 $1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上のイオン化アクセプタ密度が達成されている。室温における活性化率は極めて高く、高 Al 組成 AlGaIn の p 型化が容易に可能となる期待が持たれている。

図 16、17 においては、高効率紫外 LED 実現に関わる成果をまとめたものである。本項目では、220–350 nm の高効率・高出力深紫外 LED を実現することを目的として研究を行った。その結果、①貫通転位低減による深紫外 AlGaIn 量子井戸における高い内部量子効率 (IQE) の実現 (>50%)、②In 混入によるさらに高い IQE の実現、③多重量子障壁 (MQB) 導入による電子注入効率 (EIE) の飛躍的向上 (>80%)、④Al 系 p 型電極による光取り出し効率の向上などを実現し、最大で 4% 程度の外部量子効率 (EQE) の深紫外 LED を実現してきた。特に、波長 237 nm で CW 出力 4.8 mW が得られ (世界最高値)、MQB を用いることで、240 nm 以下の短波長で、これまで不可能であった mW 出力を初めて得た。

#### A04 長波長デバイス基盤技術

Ti マスクによる rf-MBE 選択成長法を開発し、GaIn ナノコラムの規則配列化に成功した。規則配列ナノコラムに内在化した InGaIn 層に対し、コラム径の変化による発光色制御法を開拓した。InGaIn 多重量子井戸を内在化した規則配列ナノコラムを作り、最長波長 566 nm の光励起レーザ発振を実証した。一方、規則配列 GaIn ナノコラム上には高品質な高 In 組成 InGaIn 層が成長するので、それに引き続いて、図 18(a) のように、上部に In 組成 20% 程度の Mg ドープ InGaIn を成長させ、pn 接合ダイオード構造を作製したところ、明瞭な整流性が得られ (図 19(a))、室温電流注入下でピーク波長  $1.46 \mu\text{m}$

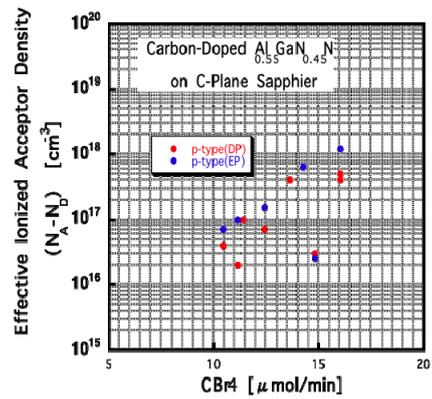


図 15 Al 組成 55% の AlGaIn に対する C ドーピング特性

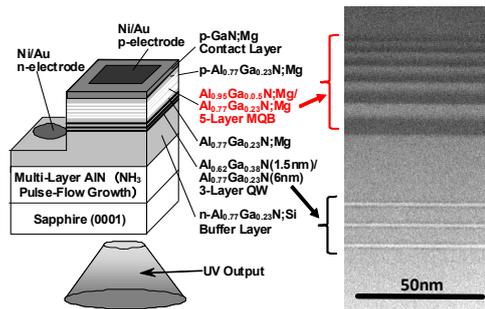


図 16 多重量子障壁層を有する深紫外 LED の構造及び断面 SEM 写真

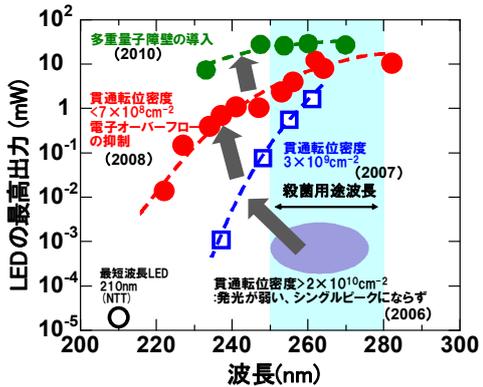


図 17 本研究領域開始当初からの紫外・深紫外 LED の最高出力の推移

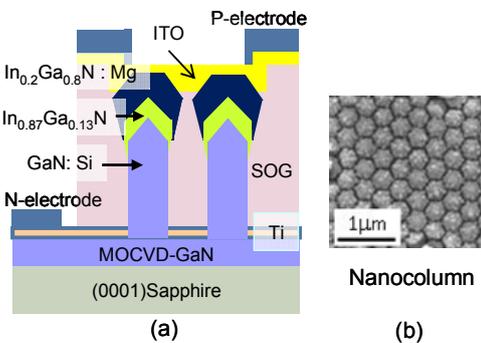


図 18 高 In 組成 In<sub>0.87</sub>Ga<sub>0.13</sub>N 活性層・赤外線ナノコラム LED の構造

の発光スペクトルを得て(図 19(b))、InGaN 系 LED の赤外域電流注入発光に世界で初めて成功した。高品質 InN マイクロ結晶の成長に成功し、ピークエネルギー 0.627 eV、半値幅 39 meV の InN に対する報告値の中で最も良好な室温フォトルミネッセンス(PL)スペクトルを得た。

将来のタンデム太陽電池の作製技術の開拓を目指して、MOCVD 法による In 組成 1~0.3 の InAlN 単結晶薄膜成長技術を確立し、図 20 に示すように n-InAlN/p-InGaN ヘテロ接合太陽電池を作製し、世界で初めてその動作を確認した。さらに成長温度が比較的低い (~600°C) InN 系窒化物半導体の成長に適した白金系金属触媒によるアンモニア分解を利用した新しい MOVPE 技術を発明し、それによる InN および InAlN 結晶の品質向上を実証した。

一方、GaInNAs 系レーザは高 Al 組成 AlGaAs と GaInNAs 活性層で構成され、MBE による GaInNA 成長中の Al 混入によるレーザ特性の劣化が問題であった。その要因を解明し高品質 GaInNAs 結晶の成長法を確立して、GaInNAs 長波長面発光レーザの発展に貢献した。

また、InGaN に希土類金属 Gd を添加した InGaGdN の成長に成功し、室温での強磁性ならびに発光を観測するとともに、その強磁性発現の起源を解明し、InGaGdN/GaN 多重量子井戸(MQW)構造あるいは Si 共添加により、飽和磁化の増大と制御が可能であることを示した。さらに InGaGdN/GaN MQW を活性層に含む発光デバイス(LED)構造での室温 PL 発光の観測にも成功し、長波長円偏光半導体レーザ創製に向けた基盤を築いた。

これら本特定領域における研究成果に基づき、新規結晶成長技術、新規デバイス構造、短波長・長波長デバイス作製基本技術などに関して、国内外あわせて 50 件以上の特許出願もあわせて行っている。

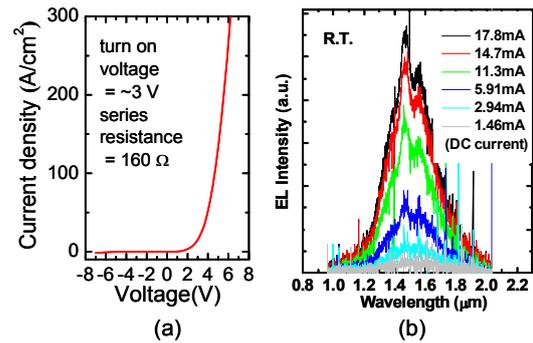


図 19 高 In 組成活性層・ナノコラム LED の赤外発光(波長 1.46 μm)

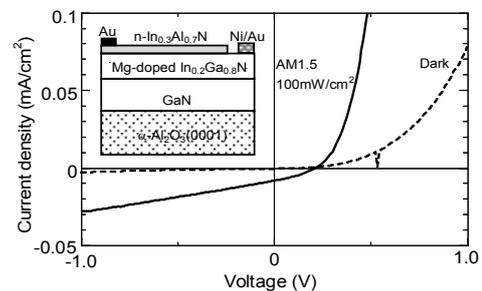


図 20 作製した n-In<sub>0.3</sub>Al<sub>0.7</sub>N/p-In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N ヘテロ構造素子の構造と電流-電圧特性

## 5. 研究成果の取りまとめの状況

本研究領域の成果とりまとめとして、具体的に取り組んだ活動は以下の通りである。

毎年、各研究課題からの研究成果概要、成果リスト（学術論文、国際会議発表）および学術論文の別刷りを集約し、年度毎に300～400ページの冊子体として研究成果報告書を作成した。平成18、19、20、21年度についてはすでに作成しており、現在最終平成22年度の成果分について、集約を終え、平成22年度研究成果報告書の準備を進めている段階である。

また、各年度末3月に開催した研究成果報告会にあわせて、各年度の成果概要をまとめて、研究成果報告会資料として5年間作成を継続した。

研究期間終了後の成果とりまとめの活動として、最終成果報告のための公開シンポジウムを開催すべく、平成23年度文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 成果とりまとめの研究課題に応募した。今年度、この成果とりまとめ研究課題の採択を受け、下記の通り、公開シンポジウムを開催する予定である。

名称：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–」  
最終成果報告 公開シンポジウム

日時：平成23年8月3日（水）～4日（木） 2日間

第1日目：会議 10:00～17:30、ポスターセッション 17:30～19:30

第2日目：会議 9:30～17:45

参加者数：約200名を予定

発表形式:各研究課題代表者による口頭発表および各研究課題参画者（研究分担者、大学院生などを含む）によるポスター発表

5年の研究期間を総じての研究成果報告書については、文部科学省の指示に従い、成果とりまとめ研究課題の終了後、平成24年6月頃に冊子体として作成する予定である。

また、本特定領域研究によって得られた成果を広く国際的にも普及させるため、海外出版社を通じて、英語での成果レビュー書籍を作成する計画を進行中である。

## 6. 研究成果の公表の状況

### (1) 主な論文等一覧について

研究領域全体としての発表論文数は 627 件である。以下に主な論文のリストを示す。

- K. Wang, T. Yamaguchi, T. Araki, E. Yoon, \*Y. Nanishi, “In situ Investigation of Growth Mechanism during Molecular Beam Epitaxy of In-Polar InN”, Jpn. J. Appl. Phys. 50, 01AE02 (2011). 被引用回数 1 回
- K. Wang, N. Miller, R. Iwamoto, T. Yamaguchi, M. A. Mayer, T. Araki, \*Y. Nanishi, K. M. Yu, E. E. Haller, W. Walukiewicz, J. W. Ager III, “Mg Doped InN and Confirmation of Free Holes in InN”, Appl. Phys. Lett. 98, 042104-1 (2011). 被引用回数 1 回
- T. Yamaguchi and \*Y. Nanishi, “New MBE Growth Method for High Quality InN and Related Alloys Using in Situ Monitoring Technology”, phys. stat. sol. (a), 207, 19-23 (2010). 被引用回数 2 回
- \*J. Ibáñez, A. Segura, F. J. Manjón, L. Artús, T. Yamaguchi and Y. Nanishi, “Electronic Structure of Wurtzite and Rocksalt InN Investigated by Optical Absorption under Hydrostatic Pressure”, Appl. Phys. Lett. 96, 201903/1-3 (2010). 被引用回数 3 回
- \*V. Darakchieva, K. Lorenz, N.P. Barradas, E. Alves, B. Monemar, M. Schubert, N. Franco, C.L Hsiao, L.C. Chen, J. Schaff, T. Yamaguchi, and Y. Nanishi, “Hydrogen in InN: A Ubiquitous Phenomenon in Molecular Beam Epitaxy Grown Material”, Appl. Phys. Lett. 96, 081907/1-3 (2010). 被引用回数 3 回
- T. Yamaguchi, D. Muto, T. Araki, and \*Y. Nanishi, “Growth and Characterization of N-Polar and In-Polar InN Films by RF-MBE2, J. Cryst. Growth 311, 2780-2782 (2009). 被引用回数 5 回
- T. Yamaguchi and \*Y. Nanishi, “Indium Droplet Elimination by Radical Beam Irradiation for Reproducible and High-Quality Growth of InN by RF Molecular Beam Epitaxy”, Applied Physics Express 2, 051001-1-3 (2009). 被引用回数 9 回
- T. Araki, D. Fukuoka, H. Tamiya, S. Harui, T. Yamaguchi, H. Miyake, K. Hiramatsu, \*Y. Nanishi, “Fabrication of Position-Controlled InN Nanocolumns by ECR-MBE”, Proc. SPIE 7216, 72160N1-8 (2009). 被引用回数不明
- \*V. Darakchieva, M. Schubert, T. Hofmann, B. Monemar, Ching-Lien Hsiao, Ting-Wei Liu, Li-Chyong Chen, W. J. Schaff, Y. Takagi, and Y. Nanishi, “Electron Accumulation at Nonpolar and Semipolar Surfaces of Wurtzite InN from Generalized Infrared Ellipsometry”, Appl. Phys. Lett. 95, 202103/1-3 (2009) 被引用回数 5 回
- \*L.H. Dmowski, M. Baj, T. Suski, J. Przybytek, R. Czernecki, S.B. Che, A. Yoshikawa, H. Lu, W.J. Schaff, D. Muto, Y. Nanishi, “Search for Free Holes in InN:Mg – Interplay between Surface Layer and Mg-Acceptor Doped Interior”, J. Appl. Phys. 105, 123713 (2009) 被引用回数 6 回
- \*R. Kudrawiec, T. Suski, J. Misiewicz, D. Muto, Y. Nanishi, “Photoreflectance Spectroscopy of the Band Bending and the Energy Gap for Mg-Doped InN Layers”, phys. stat. sol. (c) 6, S739-S742 (2009). 被引用回数 3 回
- S. Harui, H. Tamiya, T. Akagi, H. Miyake, K. Hiramatsu, T. Araki, and \*Y. Nanishi, “Transmission electron microscopy characterization of position-controlled InN nanocolumns”, Japanese Journal of Applied Physics, 47, 5330-5332 (2008) 被引用回数 3 回
- \*T. D. Veal, P. D. C. King, P. h. Jefferson, L. F. J. Piper, C. F. McConville, H. Lu, W. J. Schaff, P. M. Durbin, D. Muto, H. Naoi, Y. Nanishi, “In Adlayers on c-Plane InN Surfaces: A Polarity-Dependent Study by X-Ray Photoemission Spectroscopy”, Phys. Rev. B 76, 075313-1-075313-8 (2007). 被引用回数 25 回
- \*P. D. C. King, T. D Veal, and C. F. McConville, F. Fuchs, J. Futhmuller., and F. Bechstedt, P. Schley and R. Goldhahn, J. Schormann, D. J. As, and K. Lischka, D. Muto, H. Naoi, and Y. Nanishi, H. Lu and W. J. Schaff, “Universality of Electron Accumulation at Wurtzite c-and a-Plane and Zinc-Blende InN Surfaces”, Appl. Phys. Lett. 91, 092101-1-092101-3 (2007). 被引用回数 42 回
- A. Kobayashi, S. Kawano, Y. Kawaguchi, J. Ohta, and \*H. Fujioka, “Room temperature epitaxial

- growth of m-plane GaN on lattice-matched ZnO substrates”, Appl. Phys. Lett., 90, 041908 (2007). 被引用回数 37 回
- A. Kobayashi, J. Ohta, \*H. Fujioka, K. Fujiwara, and A. Ishii, “Polarity control of GaN grown on ZnO (000-1) surfaces”, Appl. Phys. Lett., 88, 181907 (2006). 被引用回数 36 回
  - M. H. Kim, M. Oshima, H. Kinoshita, Y. Shirakura, K. Miyayama, J. Ohta, A. Kobayashi, and \*H. Fujioka, “Investigation of the Initial stage of GaN epitaxial growth on 6H-SiC (0001) at room temperature”, Appl. Phys. Lett., 89, 031916 (2006). 被引用回数 23 回
  - A. Kobayashi, J. Ohta, and \*H. Fujioka, “Low temperature epitaxial growth of InGaN on lattice-matched ZnO by pulsed laser deposition”, J. of Appl. Phys., 99, 123513 (2006). 被引用回数 20 回
  - A. Kobayashi, J. Ohta, and \*H. Fujioka, “Characteristics of single crystal ZnO annealed in a ceramic ZnO box and its application for epitaxial growth of GaN”, Jpn. J. of Appl. Phys., 45, 5724 (2006). 被引用回数 17 回
  - K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, \*H. Fujioka, H. Amanai, S. Nagao, and H. Horie, “Epitaxial growth of nonpolar AlN films on ZnO substrates using room temperature grown GaN buffer layers”, Appl. Phys. Lett. 91, 081915 (2007). 被引用回数 13 回
  - K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, and \*H. Fujioka, “Growth temperature dependence of structural properties for AlN films on ZnO (000-1) substrates”, Appl. Phys. Lett., 90, 141908 (2007). 被引用回数 12 回
  - K. Ueno, A. Kobayashi, J. Ohta, and \*H. Fujioka, “Layer-by-layer Growth of AlN on ZnO (000-1) Substrates at Room Temperature”, Jpn. J. of Appl. Phys. Express Letters, 45, L1139, (2006). 被引用回数 12 回
  - A. Kobayashi, Y. Kawaguchi, J. Ohta, and \*H. Fujioka, “Room temperature epitaxial growth of AlGaIn on ZnO by pulsed laser deposition”, Appl. Phys. Lett., 89, 111918 (2006). 被引用回数 12 回
  - R. Miyagawa, M. Narukawa, B. Ma, H. Miyake and \*K. Hiramatsu, “Reactor-pressure dependence of growth of a-plane GaN on r-plane sapphire by MOVPE”, Journal of Crystal Growth, 310, 4979-4982 (2008) 被引用回数 12 回
  - B. Ma, R. Miyagawa, W. Hu, D. Li, H. Miyake and \*K. Hiramatsu, “Structural and electrical properties of Si-doped a-plane GaN grown on r-plane sapphire by MOVPE”, Journal of Crystal Growth, 311, 2899-2902 (2009) 被引用回数 5 回
  - K. Tsujisawa, S. Kishino, D. Li, H. Miyake, \*K. Hiramatsu, T. Shibata and M. Tanaka, “Suppression of crack generation using high-compressive-strain AlN/Sapphire template for hydride vapor phase epitaxy of thick AlN film”, Japanese Journal of Applied Physics, 46, L552-L554 (2007) 被引用回数 4 回
  - \*H. Miyake, N. Masuda, Y. Ogawahara, M. Narukawa, K. Hiramatsu, T. Ezaki and N. Kuwano, “Growth of crack-free AlGaIn on selective-area-growth GaN”, Journal of Crystal Growth, 310, 4885-4887 (2008) 被引用回数 3 回
  - J. Wu, K. Okuura, K. Okumura, H. Miyake, \*K. Hiramatsu, Z. Chen, and T. Egawa, “In-plane structural anisotropy and polarized Raman-active mode studies of nonpolar AlN grown on 6H-SiC by low-pressure hydride vapor phase epitaxy”, Journal of Crystal Growth, 312, 490-494 (2008) 被引用回数 2 回
  - M. Narukawa, R. Miyagawa, B. Ma, H. Miyake, and \*K. Hiramatsu, “Optical properties of MOVPE-grown a-plane GaN and AlGaIn”, Journal of Crystal Growth, 311, 2903-2905 (2009) 被引用回数 2 回
  - W. Hu, B. Ma, D. Li, H. Miyake and \*K. Hiramatsu, “In-plane electric field induced by polarization and lateral photovoltaic effect in a-plane GaN”, Applied Physics Letters, 94, 231102-1 – 231102-3 (2009) 被引用回数 2 回

- J. Wu, Y. Katagiri, K. Okuura, D. Li, H. Miyake and \*K. Hiramatsu, “Effects of initial stages on the crystal quality of nonpolar a-plane AlN on r-plane sapphire by low-pressure HVPE”, *Journal of Crystal Growth*, 311, 3801-3805 (2009) 被引用回数 2 回
- B. Ma, W. Hu, H. Miyake and \*K. Hiramatsu, “Nitriding r-plane sapphire to improve crystal qualities and surface morphologies of a-plane GaN grown by metalorganic vapor phase epitaxy”, *Applied Physics Letters*, 95, 083504-1 – 083504-3 (2009) 被引用回数 2 回
- Y. Kumagai, J. Tajima, M. Ishizuki, T. Nagashima, H. Murakami, K. Takada, \*A. Koukitu, “Self-Separation of a Thick AlN Layer from a Sapphire Substrate via Interfacial Voids Formed by the Decomposition of Sapphire”, *Appl. Phys. Express*, **1**, 2008, 045003-1-3. 被引用回数 9 回
- \*A. Koukitu, F. Satoh, T. Yamane, H. Murakami, Y. Kumagai, “HVPE growth of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ternary alloy using  $\text{AlCl}_3$  and  $\text{GaCl}$ ”, *J. Cryst. Growth*, **305**, 2007, 335-339. 被引用回数 1 回
- Y. Kumagai, T. Nagashima, \*A. Koukitu, “Preparation of a Freestanding AlN Substrate by Hydride Vapor Phase Epitaxy at 1230°C Using (111)Si as a Starting Substrate”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, 2007, L389-L391. 被引用回数 10 回
- Y. Kumagai, J. Kikuchi, Y. Nishizawa, H. Murakami, \*A. Koukitu, “Hydride vapor phase epitaxy of InN by the formation of  $\text{InCl}_3$  using In metal and  $\text{Cl}_2$ ”, *J. Cryst. Growth*, **300**, 2007, 57-61. 被引用回数 8 回
- T. Tanikawa, T. Hikosaka, \*Y. Honda, M. Yamaguchi, and N. Sawaki, “Growth of semi-polar (11-22)GaN on a (113)Si substrate by selective MOVPE”, *phys. stat. sol. (c)* **5**, 2966-2968 (2008) 被引用回数 17 回
- T. Tanikawa, D. Rudolph, T. Hikosaka, \*Y. Honda, M. Yamaguchi, N. Sawaki, “Growth of non-polar (11-20)GaN on a patterned (110)Si substrate by selective MOVPE”, *J. Cryst. Growth*, 310, 4999-5002 (2008) 被引用回数 10 回
- N. Sawaki, T. Hikosaka, N. Koide, S. Tanaka, \*Y. Honda, M. Yamaguchi, “Growth and properties of semi-polar GaN on a patterned silicon substrate”, *J. Cryst. Growth*, 311, 2867-2871, (2009) 被引用回数 14 回
- \*A. Yoshikawa, X. Wang, Y. Ishitani, and A. Uedono, “Recent advances and challenges for successful p-type control of InN films with Mg acceptor doping by molecular beam epitaxy”, *physica status solidi (a)*, 207, 1011-1023 (2010) 被引用回数 2 回
- M. Fujiwara, Y. Ishitani, X. Wang, S. B. Che, and \*A. Yoshikawa, “Infrared analysis of hole properties of Mg-doped p-type InN films”, *Applied Physics Letters*, 93, 231903-(1-3) (2008) 被引用回数 8 回
- \*A. Yoshikawa, S. B. Che, N. Hashimoto, H. Saito, Y. Ishitani, and X. Q. Wang, “Fabrication and characterization of novel monolayer InN quantum wells in a GaN matrix”, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 26, 1551-1559 (2008) 被引用回数 5 回
- X. Wang, S. B. Che, Y. Ishitani, and \*A. Yoshikawa, “Hole mobility in Mg-doped p-type InN films”, *Applied Physics Letters*, 92, 132108-(1-3) (2008) 被引用回数 19 回
- Y. Ishitani, X. Wang, S. B. Che, and \*A. Yoshikawa, “Effect of electron distribution in InN films on infrared reflectance spectrum of longitudinal optical phonon - plasmon interaction region”, *Journal of Applied Physics*, 103, 053515-(1-10) (2008) 被引用回数 6 回
- X. Wang, S.B. Che, Y. Ishitani, and \*A. Yoshikawa, “Systematic study on p-type doping control of InN with different Mg concentrations in both In and N polarities”, *Applied Physics Letters*, 91, 242111 (2007) 被引用回数 25 回
- X. Wang, S. B. Che, Y. Ishitani, \*A. Yoshikawa, H. Sasaki, T. Shinagawa, and S. Yoshida, “Polarity inversion in high Mg-doped In-polar InN epitaxial layers”, *Applied Physics Letters*, 91, 081912-(1-3) (2007) 被引用回数 8 回
- X. Wang, S. B. Che, Y. Ishitani, and \*A. Yoshikawa, “Growth and properties of Mg-doped In-polar InN films”, *Applied Physics Letters*, 90, 201913-(1-3) (2007) 被引用回数 20 回
- X. Wang, S. B. Che, Y. Ishitani, and \*A. Yoshikawa, “Threading dislocations in In-polar InN films and

- their effects on surface morphology and electrical properties”, Applied Physics Letters, 90, 151901-(1-3) (2007) 被引用回数 21 回
- \*A. Yoshikawa, S. B. Che, W. Yamaguchi, H. Saito, X.Q. Wang, Y. Ishitani, and E. S. Hwang, “Proposal and achievement of novel structure InN/GaN multiple quantum wells consisting of one monolayer and fractional monolayer InN wells inserted in GaN matrix”, Applied Physics Letters, 90, 073101-(1-3) (2007) 被引用回数 10 回
  - W. Terashima, S. B. Che, Y. Ishitani, and \*A. Yoshikawa, “Growth and Characterization of AlInN Ternary Alloys in Whole Composition Range and Fabrication of InN/AlInN Multiple Quantum Wells by RF Molecular Beam Epitaxy”, Japanese Journal of Applied Physics, 45, L539-L542 (2006) 被引用回数 38 回
  - X. Wang, S. B. Che, Y. Ishitani, \*A. Yoshikawa, “Step-Flow Growth of In-Polar InN by Molecular Beam Epitaxy”, Japanese Journal of Applied Physics, 45, 28, L730-L733 (2006) 被引用回数 8 回
  - X. Wang, S. B. Che, Y. Ishitani, and \*A. Yoshikawa, “Growth of In-polar and N-polar InN nanocolumns on GaN templates by molecular beam epitaxy”, physica status solidi (c), 3, 1561-1565 (2006) 被引用回数 9 回
  - Y. Ishitani, W. Terashima, S. B. Che, \*A. Yoshikawa, “Conduction and valence band edge properties of hexagonal InN characterized by optical measurements”, physica status solidi (c), 3, 1850-1853 (2006) 被引用回数 11 回
  - R. Ishii, A. Kaneta, M. Funato, \*Y. Kawakami and A. A. Yamaguchi, “All deformation potentials in GaN determined by reflectance spectroscopy under uniaxial stress: definite breakdown of the quasicubic approximation”, Physical Review B, 81, 155202/1-11 (2010). 被引用回数 3 回
  - \*M. Funato, D. Inoue, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Strain states in semipolar III-nitride semiconductor quantum wells”, Journal of Applied Physics, 107, 123501/1-5 (2010) 被引用回数 3 回
  - K. Kojima, M. Funato, \*Y. Kawakami and S. Noda, Valence band effective mass of non-*c*-plane nitride heterostructures, Journal of Applied Physics, 107, 123105/1-7 (2010) 被引用回数 2 回
  - T. Oto, R. G. Banal, K. Kataoka, M. Funato and \*Y. Kawakami, “100 mW deep ultraviolet emission from aluminum nitride based quantum wells pumped by an electron beam”, Nature Photonics, 4, 767-771 (2010) 被引用回数 3 回
  - \*Y. Kawakami, A. Kaneta, L. Su, Y. Zhu, K. Okamoto, M. Funato, A. Kikuchi and K. Kishino, “Optical properties of InGaN/GaN nanopillars fabricated by postgrowth chemically assisted ion beam etching”, Journal of Applied Physics, 107, 023522/1-7 (2010) 被引用回数 5 回
  - \*M. Funato, A. Kaneta, Y. Kawakami, Y. Enya, K. Nishizuka, M. Ueno and T. Nakamura, “Weak Carrier/Exciton Localization in InGaN Quantum Wells for Green Laser Diodes Fabricated on Semi-Polar {20-21} GaN Substrates”, Applied Physics Express, 3, 021002/1-3 (2010) 被引用回数 6 回
  - R. Bardoux, A. Kaneta, M. Funato, \*Y. Kawakami, A. Kikuchi and K. Kishino, “Positive binding energy of a biexciton confined in a localization center formed in a single  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  quantum disk”, Physical Review B, 79, 155307/1-6 (2009) 被引用回数 9 回
  - \*M. Funato and Y. Kawakami, “Excitonic properties of polar, semipolar, and nonpolar InGaN/GaN strained quantum wells with potential fluctuations”, Journal of Applied Physics, 103, 093501/1-7 (2008) 被引用回数 7 回
  - A. Kaneta, M. Funato and \*Y. Kawakami, “Nanosopic recombination processes InGaN/GaN quantum wells emitting violet, blue, and green spectra”, Physical Review B, 78, 125317/1-7 (2008) 被引用回数 12 回
  - M. Ueda, M. Funato, K. Kojima, \*Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Polarization switching phenomena in semipolar  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  quantum well active layers”, Physical Review B, 78, 233303/1-4 (2008) 被引用回数 26 回

- \*M. Funato, T. Kondou, K. Hayashi, S. Nishiura, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Monolithic polychromatic light-emitting diodes based on InGaN microfacet quantum wells toward tailor-made solid-state lighting”, *Applied Physics Express*, 1, 011106/1-3 (2008) 被引用回数 17 回
- \*M. Funato, K. Hayashi, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Emission color tunable light-emitting diodes composed of InGaN multifacet quantum wells”, *Applied Physics Letters*, 93, 021126/1-3 (2008) 被引用回数 14 回
- K. Kojima, U. T. Schwarz, M. Funato, \*Y. Kawakami, S. Nagahama and T. Mukai, “Optical gain spectra for near UV to aquamarine (Al,In) GaN laser diodes”, *Optics Express*, 15, 7730-7736 (2007) 被引用回数 24 回
- M. Ueda, T. Kondou, K. Hayashi, M. Funato, \*Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Additive color mixture of emission from InGaN/GaN quantum wells on structure-controlled GaN microfacets”, *Applied Physics Letters*, 90, 171907/1-3 (2007) 被引用回数 10 回
- \*Y. Kawakami, K. Nishizuka, D. Yamada, A. Kaneta, M. Funato, Y. Narukawa and T. Mukai, “Efficient green emission from (11-22) InGaN/GaN quantum wells on GaN microfacets probed by scanning near field optical microscopy”, *Applied Physics Letters*, 90, 261912/1-3 (2007) 被引用回数 8 回
- \*M. Funato, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa, T. Kosugi, M. Takahashi, and T. Mukai, “Blue, green, and amber InGaN/GaN light-emitting diodes on semipolar (11-22) GaN bulk substrates”, *Japanese Journal of Applied Physics (Express Letter)*, 45, L659-L662 (2006) 被引用回数 114 回
- M. Ueda, K. Kojima, M. Funato, \*Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Epitaxial growth and optical properties of semipolar (11-22) GaN and InGaN/GaN quantum wells on GaN bulk substrates”, *Applied Physics Letters*, 89, 211907/1-3 (2006) 被引用回数 44 回
- \*M. Funato, T. Kotani, T. Kondou, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, “Tailored emission color synthesis using microfacet quantum wells consisting of nitride semiconductors without phosphors”, *Applied Physics Letters*, 88, 261920/1-3 (2006) 被引用回数 28 回
- K. Kojima, M. Funato, \*Y. Kawakami, S. Nagahama, T. Mukai, H. Braun, and U. T. Schwarz, “Gain suppression phenomena observed in  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  quantum well laser diodes emitting at 470 nm”, *Applied Physics Letters*, 89, 241127/1-3 (2006) 被引用回数 21 回
- J. S. Speck and S. F. Chichibu: “Nonpolar and Semipolar Group III Nitride-Based Materials”, *MRS Bulletin*, 34, 304-309 (2009) 被引用回数 37 回
- T. Onuma, T. Shibata, K. Kosaka, K. Asai, S. Sumiya, M. Tanaka, T. Sota, \*A. Uedono, and S. F. Chichibu: “Free and bound exciton fine structures in AlN epilayers grown by low-pressure metalorganic vapor phase epitaxy”, *J. Appl. Phys.* 105, 023529 1-7 (2009) 被引用回数 17 回
- H. Ikeda, T. Okamura, K. Matsukawa, T. Sota, M. Sugawara, T. Hoshi, P. Cantu, R. Sharma, J. F. Kaeding, S. Keller, U. L. Mishra, K. Kosaka, K. Asai, S. Sumiya, T. Shibata, M. Tanaka, J. S. Speck, S. P. DenBaars, S. Nakamura, T. Koyama, T. Onuma, and \*S. F. Chichibu: “Impact of strain on free-exciton resonance energies in wurtzite AlN”, *J. Appl. Phys.* 102, 12, 123707 1-5 (2007) Erratum *ibid.* 103, 089901 (2008) 被引用回数 17 回
- Y. Gohda and \*A. Oshiyama: “Intrinsic ferromagnetism due to cation vacancies in Gd-doped GaN: First-principles calculations”, *Phys. Rev. B*, 78, 16201(R) 1-4 (2008) 被引用回数 15 回
- \*S. F. Chichibu, H. Yamaguchi, L. Zhao, M. Kubota, K. Okamoto, and H. Ohta: “Optical properties of nearly stacking-fault-free *m*-plane GaN homoepitaxial films grown by metalorganic vapor phase epitaxy on low defect density free-standing GaN substrates”, *Appl. Phys. Lett.* 92, 9, 091912 1-3 (2008); Erratum *ibid.* 93, 129901 1 (2008) 被引用回数 12 回
- \*S. F. Chichibu, A. Uedono, T. Onuma, B. A. Haskell, A. Chakraborty, T. Koyama, P. T. Fini, S. Keller, S. P. DenBaars, J. S. Speck, U. K. Mishra, S. Nakamura, S. Yamaguchi, S. Kamiyama, H. Amano, I. Akasaki, J. Han, and T. Sota: “Origin of localized excitons in In-containing three-dimensional bulk (Al,In,Ga)N alloy films probed by time-resolved photoluminescence and monoenergetic positron

- annihilation techniques”, *Philosophical Magazine*, 87, 2019-2039 (2007) 被引用回数 12 回
- T. Onuma, H. Amaike, M. Kubota, K. Okamoto, H. Ohta, J. Ichihara, H. Takasu, and \*S. F. Chichibu: “Quantum-confined Stark effects in the *m*-plane  $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$  / GaN multiple quantum well blue light-emitting diode fabricated on low defect density free-standing GaN substrate”, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 181903 1-3 (2007) 被引用回数 11 回
  - T. Onuma, K. Okamoto, H. Ohta, and \*S. F. Chichibu, “Anisotropic optical gain in *m*-plane  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN multiple quantum well laser diode wafers fabricated on the low defect density free-standing GaN substrates”, *Appl. Phys. Lett.*, 93, 091112 1-3 (2008) 被引用回数 10 回
  - N. Shiozaki, T. Sato and \*T. Hashizume, “Formation of Thin Native Oxide Layer on n-GaN by Electrochemical Process in Mixed Solution with Glycol and Water”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, 1471-1473(2007) 被引用回数 8 回
  - E. Ogawa, \*T. Hashizume, S. Nakazawa, T. Ueda and T. Tanaka, “Chemical and Potential-Bending Characteristics of  $\text{SiN}_x/\text{AlGaN}$  Interfaces Prepared by *In Situ* Metal-Organic Chemical Vapor Deposition”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 46, L590-592 (2007) 被引用回数 4 回
  - J. Kotani, M. Tajima, S. Kasai and \*T. Hashizume, “Mechanism of surface conduction in the vicinity of Schottky gates on  $\text{AlGaN}/\text{GaN}$  heterostructures”, *Appl. Phys., Lett.* 91, 093501(2007) 被引用回数 15 回
  - K. Ooyama, H. Kato, M. Miczek, and \*T. Hashizume, “Temperature-dependent interface-state response in an  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$  structure”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 47, 5426-5428 (2008) 被引用回数 6 回
  - M. Miczek, C. Mizue, \*T. Hashizume, and B. Adamowicz, “Effects of interface states and temperature on the C-V behavior of metal/insulator/ $\text{AlGaN}/\text{GaN}$  heterostructure capacitors”, *J. Appl. Phys.*, 103, 104510-1-11(2008) 被引用回数 13 回
  - \*I. Yonenaga, Y. Ohno, T. Taishi, and Y. Tokumoto, “Recent knowledge on strength and dislocation mobility in wide bandgap semiconductors”, *Physics B*, 404, 4999 (2009) 被引用回数 1 回
  - \*M. Abe, I. Shoji, J. Suda, and T. Kondo, “Comprehensive analysis of multiple-reflection effects on rotational Maker-fringe experiments”, *J. Opt. Soc. Am. B*, 25, 1616-1624 (2008) 被引用回数 2 回
  - \*R. Ishii, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, and A. A. Yamaguchi, “All deformation potentials in GaN determined by reflectance spectroscopy under uniaxial stress: Definite breakdown of the quasi-cubic approximation”, *Physical Review B*, 81, 155202 (2010) 被引用回数 3 回
  - \*A. A. Yamaguchi, “Theoretical Investigation of Optical Polarization Properties in Al-rich  $\text{AlGaN}$  Quantum Wells with Various Substrate Orientations”, *Applied Physics Letters*, 96, 151911 (2010) 被引用回数 1 回
  - \*Y. Yamada, K. Choi, S. Shin, H. Murotani, T. Taguchi, N. Okada, and H. Amano, “Photoluminescence from highly-excited  $\text{AlN}$  epitaxial layers”, *Appl. Phys. Lett.*, 92, 131912 (2008) 被引用回数 9 回
  - \*H. Murotani, Y. Yamada, T. Taguchi, A. Ishibashi, Y. Kawaguchi, and T. Yokogawa, “Temperature dependence of localized exciton transitions in  $\text{AlGaIn}$  ternary alloy epitaxial layers”, *J. Appl. Phys.*, 104, 053514 (2008). 被引用回数 5 回
  - D. Hirano, T. Tayagaki, Y. Yamada, and \*Y. Kanemitsu, “Dynamics of biexciton localization in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  mixed crystals under exciton resonant excitation”, *Phys. Rev. B*, 77, 193203 (2008) 被引用回数 3 回
  - \*H. Murotani, T. Kuronaka, Y. Yamada, T. Taguchi, N. Okada, and H. Amano, “Temperature dependence of excitonic transitions in a-plane  $\text{AlN}$  epitaxial layers” *J. Appl. Phys.*, 105, 083533 (2009) 被引用回数 3 回
  - D. Hirano, T. Tayagaki, Y. Yamada, and \*Y. Kanemitsu, “Composition dependent dynamics of biexciton localization in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  mixed crystals”, *Phys. Rev. B*, 80, 075205 (2009) 被引用回数 2 回

- T. Kamohara, M. Akiyama, N. Ueno and \*N. Kuwano, “Influence of aluminum nitride thin films prepared on titanium electrodes”, *Thin Solid Films*, 515, 4565-4569 (2007) 被引用回数 7 回
- T. Kamohara, M. Akiyama, \*N. Kuwano, “Influence of polar distribution on piezoelectric response of aluminum nitride thin films”, *Applied Physics Letters*, 92, 093506 (2008) 被引用回数 4 回
- \*M. Tsuda, H. Furukawa, A. Honshio, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano and I. Akasaki, “Anisotropically biaxial strain in a-plane AlGa<sub>N</sub> on GaN grown on r-plane sapphire”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 45, 2509-2513 (2006) 被引用回数 12 回
- N. Okada, N. Fujimoto, T. Kitano, G. Narita, M. Imura, K. Balakrishnan, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, K. Shimono, T. Noro, T. Takagi and A. Bandoh, “Thermodynamic aspects of growth of AlGa<sub>N</sub> by high-temperature metal organic vapor phase epitaxy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 45, 2502-2504 (2006) 被引用回数 14 回
- K. Nakano, M. Imura, G. Narita, T. Kitano, Y. Hirose, N. Fujimoto, N. Okada, T. Kawashima, K. Iida, K. Balakrishnan, M. Tsuda, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano and I. Akasaki, “Epitaxial lateral overgrowth of AlN layers on patterned sapphire substrates”, *physica status solidi (a)*, 203, 1632-1635 (2006) 被引用回数 14 回
- M. Imura, K. Nakano, T. Kitano, N. Fujimoto, N. Okada, K. Balakrishnan, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, K. Shimono, T. Noro, T. Takagi and A. Bandoh, “Microstructure of thick AlN grown on sapphire by high-temperature MOVPE”, *physica status solidi (a)*, 203, 1626-1631 (2006) 被引用回数 23 回
- M. Imura, K. Nakano, N. Fujimoto, N. Okada, K. Balakrishnan, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, T. Noro, T. Takagi and A. Bandoh, “High-Temperature Metal-Organic Vapor Phase Epitaxial Growth of AlN on Sapphire by Multi Transition Growth Mode Method Varying V/III Ratio”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 45, 8639-8643 (2006) 被引用回数 19 回
- N. Okada, N. Kato, S. Sato, T. Sumii, T. Nagai, N. Fujimoto, M. Imura, K. Balakrishnan, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, H. Maruyama, T. Takagi, T. Noro and A. Bandoh, “Growth of high-quality and crack free AlN layers on sapphire substrate by multi-growth mode modification”, *Journal of Crystal Growth*, 298, 349-353 (2007) 被引用回数 10 回
- T. Kawashima, T. Nagai, D. Iida, A. Miura, Y. Okadome, Y. Tsuchiya, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano and I. Akasaki, “Epitaxial lateral growth of m-plane GaN and Al<sub>0.18</sub>Ga<sub>0.82</sub>N on m-plane 4H-SiC and 6H-SiC substrates”, *Journal of Crystal Growth*, 298, 261-264 (2007) 被引用回数 12 回
- M. Imura, K. Nakano, G. Narita, N. Fujimoto, N. Okada, K. Balakrishnan, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, T. Noro, T. Takagi and A. Bandoh, “Epitaxial lateral overgrowth of AlN on trench-patterned AlN layers”, *Journal of Crystal Growth*, 298, 257-260 (2007) 被引用回数 10 回
- N. Okada, N. Kato, S. Sato, T. Sumii, N. Fujimoto, M. Imura, K. Balakrishnan, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, T. Takagi, T. Noro and A. Bandoh, “Epitaxial lateral overgrowth of a-AlN layer on patterned a-AlN template by HT-MOVPE”, *Journal of Crystal Growth*, 300, 141-144 (2007) 被引用回数 15 回
- K. Balakrishnan, A. Bandoh, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano and I. Akasaki, “Influence of high temperature in the growth of low dislocation content AlN bridge layers on patterned 6H-SiC substrates by metalorganic vapor phase epitaxy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, L307-L310 (2007) 被引用回数 11 回
- M. Imura, K. Nakano, N. Fujimoto, N. Okada, K. Balakrishnan, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, T. Noro, T. Takagi, and A. Bandoh, “Dislocations in AlN epilayers grown on sapphire substrate by high-temperature Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 46, 1458-1462 (2007) 被引用回数 13 回
- D. Iida, A. Miura, Y. Okadome, Y. Tsuchiya, T. Kawashima, T. Nagai, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, “One-step lateral growth for reduction in defect density of a-plane GaN on r-sapphire substrate and its application in light emitters”, *physica status solidi A*, 204, 2005-2009

(2007) 被引用回数 25 回

- H. Tsuzuki, F. Mori, K. Takeda, T. Ichikawa, M. Iwaya, S. Kamiyama, \*H. Amano, I. Akasaki, H. Yoshida, M. Kuwabara, Y. Yamashita, and H. Kan, “High-performance UV emitter grown on high-crystalline-quality AlGa<sub>N</sub> underlying layer”, *physica status solidi (a)*, 206, 1199 - 1204 (2009) 被引用回数 10 回
- \*H. Kawanishi, “Structure and properties of Deep-UV AlGa<sub>N</sub> MQW laser”, 2008 Int. Nano-Optoelectronics Workshop, iNOW 2008 in Cooperation With Int. Global-COE Summer School (Photonics Integration-Core Electronics: PICE) and 31st Int. Symposium on Optical Communications, 4634427, 36-37 (2008) 被引用回数 0 回
- E. Niikura, K. Murakawa, F. Hasegawa, and \*H. Kawanishi, “Improvement of crystal quality of AlN and AlGa<sub>N</sub> epitaxial layers by controlling the strain with the (AlN/GaN) multi-buffer layer”, *Journal of Crystal Growth*, 298, 345-348 (2007) 被引用回数 3 回
- \*H. Kawanishi, E. Niikura, M. Yamamoto, and S. Takeda, “Experimental energy difference between heavy- or light-hole valence band and crystal-field split-off-hole valence band in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N”, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 251107-1 – 251107-3 (2006) 被引用回数 5 回
- \*H. Kawanishi, M. Senuma, M. Yamamoto, E. Niikura, and T. Nukui, “Extremely weak surface emission from (0001) c-plane AlGa<sub>N</sub> multiple quantum well structure in deep-ultraviolet spectral region”, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 8, 081121-1 – 081121-3 (2006) 被引用回数 10 回
- \*H. Kawanishi, M. Senuma, and T. Nukui, “Anisotropic polarization characteristics of lasing and spontaneous surface and edge emissions from deep-ultraviolet ( $\lambda \approx 240$  nm) AlGa<sub>N</sub> multiple-quantum-well lasers”, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 041126-1 – 041126-3 (2006) 被引用回数 13 回
- \*Y. Kawakami, S. Suzuki, A. Kaneta, M. Funato, A. Kikuchi and K. Kishino, “Origin of high oscillator strength in green-emitting InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> nanocolumns”, *Appl. Phys. Lett.*, 89, 163124.1-163124.3. (2006) 被引用回数 21 回
- \*K. Kishino, A. Kikuchi, H. Sekiguchi and S. Ishizawa, “InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> nanocolumn LEDs emitting from blue to red”, *Proceedings of SPIE*, 6473, 64730T.1- 64730T.12. (Invited Paper) (2007) 被引用回数不明
- H. Sekiguchi, T. Nakazato, A. Kikuchi and \*K. Kishino, “Structural and optical properties of Ga<sub>N</sub> nanocolumns grown on (0001) sapphire substrates by rf-plasma-assisted molecular-beam epitaxy”, *Journal of Crystal Growth*, 300, 259-262 (2007) 被引用回数 24 回
- S. Ishizawa, H. Sekiguchi, A. Kikuchi and \*K. Kishino, “Selective growth of Ga<sub>N</sub> nanocolumns by Al thin layer on substrate”, *physica stat solidi (b)*, 244, 1815-1819 (2007) 被引用回数 8
- S. Ishizawa, \*K. Kishino and A. Kikuchi, “Selective-Area Growth Ga<sub>N</sub> Nanocolumns on Si (111) Substrates Using Nitrided Al Nanopatterns by RF-Plasma-Assisted Molecular-Beam Epitaxy”, *Applied physics Express* 1, 1, 015006(2008) 被引用回数 12 回
- H. Sekiguchi, \*K. Kishino and A. Kikuchi, “Ga<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub> nanocolumn ultraviolet light-emitting diodes grown on n-(111) Si by RF-plasma-assisted molecular beam epitaxy”, *Electronics Letters*, 44, 2, 151-152(2008) 被引用回数 22 回
- \*K. Kishino, T. Hoshino, S. Ishizawa and A. Kikuchi, “Selective-area growth of Ga<sub>N</sub> nanocolumns on titanium-mask-patterned silicon (111) substrates by RF-plasma-assisted molecular-beam epitaxy”, *Electronics Lett.*, 44, 13, 819-821 (2008) 被引用回数 8 回
- \*V. Darakchieva, M.-Y. Xie, F. Tasnádi, I.A. Abrikosov, L. Hultman, B. Monemar, J. Kamimura and K. Kishino, “Lattice parameters, deviations from Vegard’s rule, and E<sub>2</sub> phonons in InAlN”, *Applied Physics Letters*, 93, 261908 (2008) 被引用回数 13 回
- H. Sekiguchi, \*K. Kishino and A. Kikuchi, “Ti-mask selective-area growth of Ga<sub>N</sub> by RF-plasma-assisted molecular-beam epitaxy for fabricating regularly arranged InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> nanocolumns”, *Appl. Phys. Express*, 1, 124002 (2008). 被引用回数 14 回
- \*K. Kishino, H. Sekiguchi and A. Kikuchi, “Improved Ti-mask selective-area growth (SAG) by

- rf-plasma-assisted molecular beam epitaxy demonstrating extremely uniform GaN nanocolumn arrays”, *Journal of Crystal Growth*, 311, 2063-2068 (2009) 被引用回数 18 回
- H. Sekiguchi, \*K. Kishino, and A. Kikuchi, “Emission color control from blue to red with nanocolumn diameter of InGaN/GaN nanocolumn arrays grown on same substrate”, *Appl. Phys. Lett.*, 96, 231104 (2010) 被引用回数 12 回
  - M. Sakai, Y. Inose, K. Ema, T. Ohtsuki, H. Sekiguchi, A. Kikuchi, and \*K. Kishino, “Random laser action in GaN nanocolumns”, *Appl. Phys. Lett.*, 97, 151109.1-151109.3 (2010). 被引用回数 3 回
  - \*A. Yamamoto, H. Miwa, Y. Shibata, A. Hashimoto, “NH<sub>3</sub>/TMI molar ratio dependence of electrical and optical properties for atmospheric-pressure MOVPE InN”, *phys. stat. sol. (c)*,3, 1527-1530 (2006) 被引用回数 9 回
  - \*W.J. Wang, H. Miwa, A. Hashimoto, A. Yamamoto, “A comparative study on MOVPE InN grown on Ga- and N-polarity bulk GaN”, *phys. stat. sol. (c)*,3, 1519-1522 (2006) 被引用回数 4 回
  - H. Miwa, A. Hashimoto, \*A. Yamamoto, “Deterioration of MOVPE InN films on sapphire during growth and post-growth annealing”, *phys. stat. sol. (c)*,3, 1536-1539 (2006) 被引用回数 5 回
  - S. D. Wu, M. Kato, M. Uchiyama, K. Higashi, F. Ishikawa, and \*M. Kondow, “Nitrogen Gas Flow Driven Unintentional Incorporation of Al during the Growth of Dilute Nitride Semiconductor by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy” *Applied Physics Express* 1, 035004-1-035004-3 (2008) 被引用回数 4 回
  - M. Morifuji, Y. Nakaya, T. \*Kondow: “Novel Design of Current Driven Photonic Crystal Laser Diode” *IEEE Photonics Technology Letters* 21, 513 - 515 (2009) 被引用回数 3 回
  - Y. K. Zhou, S. W. Choi, S. Kimura, S. Emura, S. Hasegawa and \*H. Asahi, “High Gd concentration GaGdN grown at low temperatures”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 20, 429-432 (2007) 被引用回数 5 回
  - S. Kimura, S. Emura, Y. Yamauchi, Y. K. Zhou, S. Hasegawa and \*H. Asahi, “Low temperature molecular-beam epitaxy growth of cubic GaCrN”, *J. Cryst. Growth* 310, 40-46 (2008) 被引用回数 4 回
  - S. Kimura, S. Emura, H. Ofuchi, Y. Zhou, S. Hasegawa and \*H. Asahi, “Growth and Characterization of Ferromagnetic Cubic GaCrN: Structural and magnetic properties”, *J. Cryst. Growth*, 301-302, 651-655 (2007) 被引用回数 2 回
  - S. Kimura, S. Emura, K. Tokuda, Y. K. Zhou, S. Hasegawa and \*H. Asahi, “Structural properties of AlCrN, GaCrN and InCrN”, *J. Crystal Growth* 311, 2046-2048 (2009) 被引用回数 2 回
  - S. Kobayashi, S. Shanthi, S. Kimura, Y.K. Zhou, S. Emura, S. Hasegawa and \*H. Asahi, “Molecular-beam epitaxy growth and characterization of ferromagnetic cubic GaCrN on GaAs substrate”, *J. Cryst. Growth*, 308, 58-62 (2007) 被引用回数 1 回
  - G. S. Song, M. Kobayashi, J. I. Hwang, T. Kataoka, M. Takizawa, A. Fujimori, T. Ohkouchi, Y. Takeda, T. Okane, Y. Saitoh, H. Yamagami, F.-H. Chang, L. Lee, H.-J. Lin, D. J. Huang, C. T. Chen, S. Kimura, M. Funakoshi, S. Hasegawa, and \*H. Asahi, “Electronic structure of Ga<sub>1-x</sub>Cr<sub>x</sub>N and Si-doping effects studied by photoemission and X-ray absorption spectroscopy”, *Phys. Rev. B*78, 033304-1 – 033304-4 (2008) 被引用回数 1 回
  - H. Tambo, S. Kimura, Y. Yamauchi, Y. Hiromura, Y.K. Zhou, S. Emura, S. Hasegawa and \*H. Asahi, “Crystal growth and characterization of GaCrN nanorods on Si substrate”, *J. Cryst. Growth*, 311, 2962-2965 (2009) 被引用回数 1 回
  - Y. K. Zhou, M. Takahashi, S. Emura, S. Hasegawa and \*H. Asahi, “Annealing effect in GaDyN on optical and magnetic properties”, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism* 23, 103-105 (2010)被引用回数 1 回

## (2) ホームページについて

研究成果公表の手段として、本特定領域研究ホームページを開設し、領域の概要、研究項目、組織、研究会情報、各年度の研究成果概要、成果（学術論文、国際会議発表）リストなどを公開している。ホームページアドレスは以下の通りである。

<http://www.bkc.ritsumeai.ac.jp/~tara/tokutei/index.htm>

## (3) 公开发表について

本特定領域においては、これまで、本研究領域によって得られた研究成果の公开发表の場として、以下 3 回の公開研究会を開催した。いずれの機会においても、口頭講演、ポスターセッションを通じて各講演に対して質疑応答も活発に行われ、本特定領域研究の進展に対する関心が非常に高いことを示すものであった。また「7. 研究成果のとりまとめの状況」においてすでに示した通り、平成 23 年 8 月 3, 4 日に最終成果報告の公開シンポジウムを開催予定である。

### ・ 2007 年秋季 第 68 回応用物理学会学術講演会シンポジウム

「窒化物の新展開」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－

平成 19 年 9 月 5 日 北海道工業大学

参加者：約 300 名

### ・ 文部科学省 科学研究費補助金 特定領域研究 公開シンポジウム(図 21)

平成 20 年 8 月 1 日、2 日 東京 学士会館

参加者：約 150 名

### ・ 2009 年秋季 第 70 回応用物理学会学術講演会シンポジウム

「窒化物の新展開」特定領域研究企画 「紫外発光素子の進展」

平成 21 年 9 月 9 日 富山大学

参加者：約 300 名



図 21 特定領域研究 公開シンポジウムの様子（平成 20 年 8 月 1 日、2 日）

表 1 には、本特定領域成果による国内外会議での年度毎の招待講演数を示す。招待講演の総数は 455 件で、このうちプレナリー講演数は 18 件である。研究の進展に伴い、成果が顕著となり、研究期間の後半においては、毎年 100 件を超える招待講演を受けるにいたったことは特筆すべき成果であろう。

表 1 国内外会議での招待講演数

	H18 年度	H19 年度	H20 年度	H21 年度	H22 年度	総数
招待講演数	48	73	99	107	128	455

#### (4)「国民との科学・技術対話」について

本特定領域においては、「国民との科学・技術対話」の活動として、以下の内容を実施した。

- LED 総合フォーラム in 徳島 2010 にて、阿波銀ホールにて、「窒化物光半導体フロンティア領域開拓の現状」と題して招待講演を行った。(2010年4月17日)
- LED 総合フォーラム in 徳島 2011 にて、徳島グランヴィリオホテルにて、「窒化物光半導体デバイスの新しい可能性を求めて -InN と関連混晶の新しい成長技術の開発と現状-」と題して招待講演を行った。(2011年6月25日)
- 岐阜東高等学校で “LED が照らす地球”と題して授業 約 30 名 高校 1-2 年生 (2010年11月10日)
- あいちトリエンナーレ 2010 パートナシップ事業、～ゆめほたる LED イルミネーション・ワークショップ～ 青色 LED について、名古屋大学 小学生 18 名 (2010年10月31日)
- 名城大学にて 平成 22 年度東海工学教育協会地区大会プログラム、次世代・照明太陽電池創成に向けた取り組み 名城大学天白キャンパス 11 号館 504 号室 70 名程度、近隣大学関係者 (2010年10月28日)
- 名古屋大学市民開放講座で“LED が照らす地球”と題して講演 120 名 定年退職後の方や近所の方 (2010年9月7日)
- 能開予備校 福山校 約 40 名、高校 1-2 年生、“世界を照らす LED ～その開発の歴史と今後の展望～” (2010年6月11日)
- 東海ラジオ ラジオ放送講座「名古屋大学リレーセミナー」、(2010年9月5日)
- 名城大学市民開放講座で “LED で世界を照らす!”と題して講演 250 名 定年退職後の方や近所の方 (2010年4月24日)
- 奈良県・西大和学園にて、文科省・スーパーサイエンスハイスクール「固体照明が拓く明るい未来 -新しい発光ダイオードの開発-」の講義 (2009年10月10日)
- 京都大学ジュニアキャンパス 2008 にて、京都大学・桂キャンパス・桂大会議室において、中学生 14 名と保護者 4 名に対して、ゼミ「光と量子を自由にあやつる」を行った。(2008年9月20日)
- 仙台市・市民講座、(講座仙台学 2010)「仙台とくらし」、 “近未来の光、テラヘルツ光・深紫外光の魅力ーくらしを変える新しい光と応用の広がりー”、仙台市民会館(2010年7月24日)
- 三重大学オープンキャンパス 研究室見学 (2008, 2011)
- 第 2 回三重大学先端研究シンポジウム 講演 (2008)
- みえ産学官研究交流フォーラム 2008 ブース展示 (2008)
- (株)三重 TLO 主催 新春産学官連携講演会 講演 (2009)
- (財)三重北勢地域地場産業振興センター主催 産学連携製造中核人材事業 研究室見学 (2009)
- 応用物理学会東海支部主催 リフレッシュ理科教室 (2006~2010)
- スーパーサイエンスハイスクール (津西高校、松阪高校) (2007~2010)
- 出前理科教室 身障者への理科実験教室 (2007)
- 三重県立宇治山田高校出前授業 (2006)
- 三重県立津高等技術学校出前授業 (2009)
- 三重県立川越高等学校出前授業 (2006, 2008~2010)
- 三重県立神戸高等学校出前授業 (2006)
- 三重県立津西高等学校出前授業 (2010)

## 7. 研究組織と各研究項目の連携状況

本研究領域は、総括班のもと、A01「結晶成長技術」（項目総括：立命館大学 名西徳之）、A02「物性評価」（項目総括：千葉大学 吉川明彦）、A03「短波長デバイス基盤技術」（項目総括：名古屋大学 天野浩）、A04「長波長デバイス基盤技術」（項目総括：上智大学 岸野克巳）の4研究項目にて構成されている。5年間の研究期間を通して13件の計画研究課題を実施した。また平成19年度より7件の公募研究課題（研究期間2年）を本研究領域に加え、研究を推進した。平成21年度より公募研究の更新を行い、継続4件、新規3件 合計7件の公募研究を採択した。のべ27件の研究課題（計画研究13件、公募研究14件）が本研究領域に参画した。以下の表2に、研究組織一覧を示す。

表2 研究組織一覧

### 計画研究課題

研究項目	研究課題名	研究者氏名	研究者所属
X00	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－	名西 徳之	立命館大学
		吉川 明彦	千葉大学
		天野 浩	名古屋大学
		岸野 克巳	上智大学
		川上 養一	京都大学
		船戸 充	京都大学
		荒木 努	立命館大学
A01	RF-MBE 法による InN および関連混晶の成長と 量子ナノ構造の形成	名西 徳之	立命館大学
		荒木 努	立命館大学
		山口 智広	立命館大学
		金子 昌充	立命館大学
		王 科	立命館大学
A01	パルス励起堆積法による窒化インジウム系半導体の 低温成長	藤岡 洋	東京大学
		太田 実雄	東京大学
A01	高 Al 組成 AlGa <sub>N</sub> のエピタキシャル成長と 欠陥制御技術	平松 和政	三重大学
		三宅 秀人	三重大学
		元垣内 敦司	三重大学
A01	原料分子制御法による AlN および AlGa <sub>N</sub> 混晶の 厚膜エピタキシャル成長	纈纈 明伯	東京農工大学
		熊谷 義直	東京農工大学
		村上 尚	東京農工大学
A02	極広域分光による窒化物半導体ナノデバイス構造の 精密評価	吉川 明彦	千葉大学
		石谷 善博	千葉大学
		草部 一秀	千葉大学
A02	高 In 組成 InGa <sub>N</sub> および高 Al 組成 AlGa <sub>N</sub> の 輻射・非輻射再結合過程の解明と制御	川上 養一	京都大学
		船戸 充	京都大学
A02	III 族窒化物半導体の点欠陥と発光ダイナミックスの 研究	上殿 明良	筑波大学
		秩父 重英	東北大学
		押山 淳	東京大学
		白石 賢二	筑波大学

A03	ワットクラス超高出力紫外レーザダイオードの実現	天野 浩	名古屋大学
		上山 智	名城大学
		岩谷 素顕	名城大学
A03	高品質 AlGaIn 結晶の成長と紫外・深紫外発光デバイス	川西 英雄	工学院大学
		本田 徹	工学院大学
A03	InAlGaIn 窒化物 4 元混晶を用いた紫外高効率発光デバイスの研究	平山 秀樹	理化学研究所
A04	赤色～赤外域 AlGaInN 系光デバイス基盤技術の開拓	岸野 克巳	上智大学
		菊池 昭彦	上智大学
		野村 一郎	上智大学
A04	InAlN 系多接合タンデム太陽電池の研究	山本 あき勇	福井大学
		橋本 明弘	福井大学
		福井 一俊	福井大学
A04	再現性に優れる GaInNAs 結晶技術の確立および長波長半導体レーザへの適用	近藤 正彦	大阪大学
		森藤 正人	大阪大学
		石川 史太郎	大阪大学

#### 公募研究課題（平成 19 年度～平成 20 年度）

研究項目	研究課題名	研究代表者氏名	研究代表者所属
A01	有機 N 原料による InN 薄膜の MOVPE 成長	尾鍋 研太郎	東京大学
A01	加工 Si 基板上(1-101)及び(11-22)GaInN への InGaInN ヘテロ成長	本田 善央	名古屋大学
A02	III 族窒化物半導体混晶の欠陥準位・表面準位の評価と制御	橋詰 保	北海道大学
A02	窒化物半導体の非線形光学定数の精密評価と内部電界による制御	近藤 高志	東京大学
A02	窒化アルミニウム系深紫外半導体における高密度励起子系の光物性評価と光機能性	山田 陽一	山口大学
A02	窒化物半導体結晶のナノレベル構造評価解析技術の革新	桑野 範之	九州大学
A04	InN をベースとした長波長円偏光半導体レーザ創製に関する研究	朝日 一	大阪大学

#### 公募研究課題（平成 20 年度～平成 21 年度）

研究項目	研究課題名	研究代表者氏名	研究代表者所属
A01	有機 N 原料による InN および関連混晶薄膜の MOVPE 成長	尾鍋 研太郎	東京大学
A02	窒化物半導体混晶のバルク準位評価とナノ構造表面制御	橋詰 保	北海道大学
A02	ナイトライド半導体結晶中の転位の運動特性と電子・光学物性の解明	米永 一郎	東北大学

A02	深紫外混晶半導体における高密度励起子系の光物性評価と光機性能	山田 陽一	山口大学
A02	窒化物半導体の電子状態・光学特性の理論解析とデバイス構造提案	山口 敦史	金沢工業大学
A03	2 光束成長その場観察技法を用いた縦型深紫外発光素子の高出力化に関する研究	武内 道一	立命館大学
A04	InGaN ベース強磁性半導体による長波長円偏光半導体レーザ創製に関する研究	朝日 一	大阪大学

本研究領域においては、毎年以下に示す研究会を開催し、計画研究、公募研究に参画する研究者が一堂に会する機会を設け、研究項目間の連携を積極的に図ってきた。

- ・ キックオフミーティング（平成 18 年 9 月 2 日、立命館大学）
- ・ 平成 18 年度研究成果報告会（平成 19 年 3 月 5、6 日、熱海後楽園ホテル）
- ・ 平成 19 年度研究会（公募研究課題紹介）（平成 19 年 7 月 7 日、立命館大学）
- ・ 平成 19 年度研究成果報告会（平成 20 年 3 月 12、13 日、熱海後楽園ホテル）
- ・ 公開シンポジウム（平成 20 年 8 月 1、2 日、学士会館）
- ・ 平成 20 年度研究成果報告会（平成 20 年 3 月 12、13 日、鳥羽シーサイドホテル）
- ・ 平成 21 年度研究会（公募研究課題紹介）（平成 21 年 7 月 11 日、立命館大学）
- ・ 平成 21 年度研究成果報告会（平成 22 年 3 月 15、16 日、長浜ロイヤルホテル）
- ・ 平成 22 年度研究成果報告会（平成 23 年 3 月 1、2 日、長浜ロイヤルホテル）

これらの研究会においては、各研究課題からの成果発表を行い、その場で議論された内容をもとに、共同研究を提案・実施するなど、研究項目間の連携を強化することができた。以下に具体的連携内容についてまとめたものを図 22 に示す。

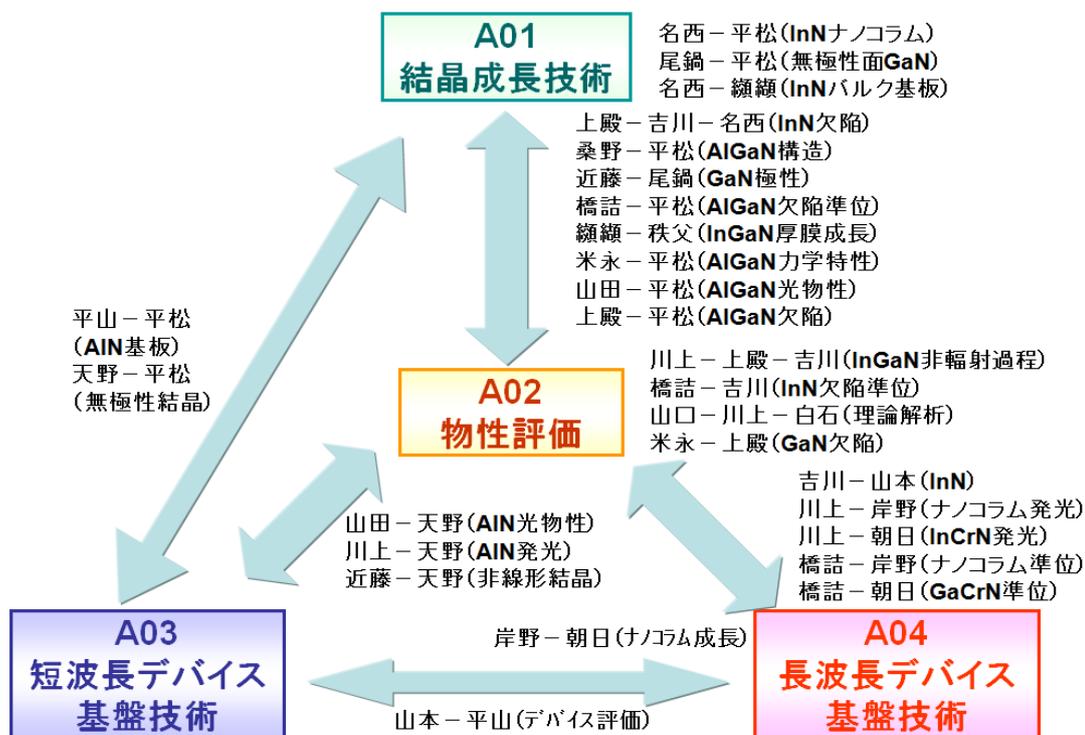


図 22 本特定領域における研究連携関係一覧

## 8. 研究費の使用状況

表 3 に、本研究領域における研究費使用状況を示す。

表 3 研究費使用状況 (単位:千円)

	平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	平成 21 年度	平成 22 年度	総額
総括班	2,100	4,300	4,300	4,300	4,300	19,300
計画研究	355,200	307,700	199,200	152,600	142,600	1,157,300
公募研究	0	28,200	28,000	24,000	24,000	104,200
合計	357,300	340,200	231,500	180,900	170,900	1,280,800

研究開始当初年度は、大型設備の購入にその用途を主に充て、以後の研究計画の遂行に有効に活用した。また特に、平成 20 年度、平成 21 年度に実施された特定領域研究 追加配分予算については、各研究課題からの研究進捗状況に応じた要望内容を総括班において詳細に検討し、研究の加速に対し真に効果が期待できるもの、領域全体の多数のテーマに対し効果が期待できるもの、研究項目間のバランスにも配慮することの観点から、各年度 2 件の選定を行い、追加配分予算を使用した。表 4 に本研究領域において購入した主な設備およびその活用状況についてまとめる。

表 4 購入した主な設備とその活用状況

項目	設置機関	購入設備	活用状況
A01	立命館大	MBE 装置用 ロードロック システム	InN および InGa <sub>N</sub> 混晶の結晶成長における本質的課題を解決するための、その場観察装置を導入した MBE 装置開発において、試料導入室として利用した。
A01	東京大	窒素プラズマ ソース	パルス励起堆積法を用いた III 族窒化物成長時の窒素ラジカル源として利用した。金属と窒素の供給比制御が容易になり、高品質な窒化物薄膜の製膜が可能となった。
A01	三重大	雰囲気制御 熱処理装置	AlGa <sub>N</sub> および AlN について、窒素、水素、アンモニア雰囲気中での表面状態について調べ、活性層成長時の成長中断や交互供給成長時のガス雰囲気に関する知見を得た。
A01	農工大	極部加熱ヒータ	本加熱装置により 2 インチ基板結晶を 1500℃にて長時間の加熱が可能となり、高温を必要とする Al 系窒化物結晶の高品質化および厚膜化に大きく貢献した。
A02	千葉大	赤外域多入射角 分光エリプソ メーター	InN およびその混晶における電子蓄積部分を除いたバルク領域電子濃度および移動度の精密測定が可能となり、InN では刃状貫通転位が電子発生原因である可能性を示した。
A02	京都大	ArF エキシマ レーザ	発振波長 193 nm の高出力パルスレーザを用いたフォトルミネッセンス観察システムを構築し、AlN や高 Al 組成 AlGa <sub>N</sub> からのフォトルミネッセンスを観察した。
A03	名城大	昇華法 AlN 成長 装置	バルク AlN 基板上への成長を目的として、昇華法による単結晶バルク AlN の成長を試み、2 インチ SiC 基板上に高品質 AlN 厚膜成長を実現した。
A03	理研	高純度半導体材 料供給装置	高純度半導体材料供給部を増設し、窒化物結晶成長を制御よく行う機構を構築することで、InAlGa <sub>N</sub> 系紫外 LED の短波長化、高効率・高出力化を目指した。
A04	上智大	高感度近赤外 検出器	様々な金属マスクパターン上に選択成長した InN ナノ結晶光学特性を迅速かつ系統的に評価することが可能となり、高品質 InN ナノ結晶成長条件把握に大きく貢献した。

## 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度

本研究領域において得られた成果は、前述のように国際的にも高く評価されており（国際会議招待講演 455 件、うちプレナリー講演 18 件）、本特定領域研究が国際社会のリーダーとして本分野を牽引し、学術的にも技術的にもその発展に多大な貢献を果たしたと言えよう。特にインパクトや波及効果の大きい項目について、以下に具体的に示す。

- ・ 深紫外 LED の世界トップクラスの短波長化・高出力化実現については、一般紙を含め多数の新聞報道がなされるなど、当該分野へのインパクトは非常に大きく、世界的な技術競争も活発化している。水の浄化やオゾンの検出など、深紫外 LED の応用技術を生み出すなどの波及効果も得られている。
- ・ 半極性面上の LED のデモンストレーションや半極性面上量子井戸の偏光特性が理論的・実験的解明されたことにより、産業界においては LED および LD の長波長化が飛躍的に進歩し、純緑色 LD が実用化されるまでに至った。
- ・ マルチファセットを利用した蛍光体フリーの多色・白色 LED 開発成果に関しては、LED の新しい展開を示す革新的技術として、一般紙、ニュースに多数報道されるだけでなく、日本発のトレンド技術として外務省ホームページにも紹介され、産業界にも大変大きなインパクトを与えた。また、本成果に関する論文(APEX)は 2008 年のダウンロード数第 2 位の論文となっており、学会・産業界への強い影響を示したことがうかがえる。
- ・ デュアルプローブ SNOM 法開発により、キャリアの拡散過程を考慮した非輻射性キャリア再結合過程の解明が進んだことにより、緑色 LED の発光強度飽和現象の原因がほぼ解明され、産業界への重要な情報提供がなされた。また本計測手法は不均一系の材料評価に広く応用でき注目度は高い。
- ・ 電子線励起による AlGaIn/AIn-量子井戸の高強度 100 mW 発光達成や AIn の輻射再結合速度の速さの実証は、AIN 系材料の深紫外発光材料としてのポテンシャルの高さを示し、AlGaIn 系深紫外発光素子開発促進への波及効果は非常に高い。
- ・ p 型 InN および InGaIn が作製され、InN の正孔密度、移動度、正孔物性が詳細に解明された。これにより InN 系デバイス設計の基盤データや InGaIn 物性解明の基盤データが提供され、InN 系窒化物半導体を用いたデバイス実用化へ向けた研究開発も活発となり、ホットエレクトロニクスデバイス、THz デバイスなど新たな応用展開が産み出されることとなった。
- ・ InN/GaN-SMART 超構造の提案により、組成不均一性に起因する結晶欠陥とデバイスにおける漏れ電流低減の具体策が提案され、また超格子の実現性の実証がなされたことにより、太陽電池を含む長波長系窒化物デバイスの新展開の方向性が示された。
- ・ DERI 法の開発により、再現性のよい高品質結晶の成長と InN をベースとした多重量子井戸構造などのナノ構造の作製が可能となったことにより、赤色から赤外領域の光デバイス応用に向けて、さらに大きな前進が期待される。
- ・ 発光素子のエネルギー変換効率を内部量子効率、電流注入効率、光取り出し効率およびジュール損失に分け、特に電流注入効率と言う新しい概念を導入して紫外 LD および紫外・深紫外 LED の解析を行った。紫外～深紫外領域において貫通転位密度と内部量子効率の関係を実験的に明らかにし、内部量子効率向上の指標を得た。
- ・ 短波長化に伴う効率低下の原因として p 型 AlGaIn の正孔濃度減少による電流注入効率の低下の問題を指摘し、更にその課題を解決する方法として、Mg に代わる新しいアクセプタドープメントである炭素を提唱し、実際に高 Al 組成 p 型 AlGaIn の実現に成功した。
- ・ GaIn ナノコラムとナノデバイスで先導的に研究を進め、ナノコラム LED で欧州プロジェクト (Smart Nanostructured Semiconductors for Energy-Saving Light Solutions (SMASH)2009-2012) が開始されるなど、ナノコラム研究の世界的拡大に寄与した。

- ・ InGaN ナノコラムの発光色制御法を見出して、三原色集積型 LED 実現への道を拓き、最長波長 566 nm の光励起レーザ発振を得て、ディスプレイ分野への波及性を示し、また InGaN 系赤外 LED の世界初の電流注入発光は、InGaN 系長波長デバイス実現への第一歩としてインパクトを与えよう。

領域全体としては、公開シンポジウムなどの成果公開以外にも、下記の学会を主催・共催として開催し、当該・関連分野における研究活動のさらなる発展に大きく貢献した。

- ・ プレ ISGN-2 シンポジウム「未来を切り開く窒化物半導体結晶」(共催)  
平成 19 年 12 月 19 日、田町キャンパスイノベーションセンター  
参加者：90 名
- ・ Topical Workshop on achieving p-type InN (千葉大、日本学術振興会との共催)  
平成 20 年 3 月 4-5 日、箱根プリンスホテル  
参加者：43 名 (うち外国人 15 名)
- ・ Second International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-2) (主催)  
平成 20 年 7 月 6-9 日、伊豆ラフォーレ修善寺  
参加者：258 名 (うち外国人約 80 名)
- ・ 第 1 回窒化物半導体結晶成長講演会「窒化物半導体結晶成長の未来を展望する」(共催)  
平成 21 年 5 月 15-16 日、東京農工大学  
参加者：約 190 人
- ・ 第 2 回窒化物半導体結晶成長講演会「窒化物半導体結晶成長の新しい流れ」(共催)  
平成 22 年 5 月 14-15 日、三重大学  
参加者：約 150 人

## 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況

表 5 特定領域に参画した若手研究者、学生数 (延べ数)

	H18 年度	H19 年度	H20 年度	H21 年度	H22 年度	総数
博士学位取得者	5	13	12	9	14	53
博士課程学生	28	36	38	31	25	158
修士課程学生	113	132	117	119	129	610
学部学生	78	71	83	77	73	382
ポスドク	17	18	21	23	23	102
助教	5	10	13	16	13	57

表 5 に、本研究計画に参画した若手研究者、学生の数をまとめたものを示す。5 年の研究期間を通じて延べ数として、若手研究者 (助教、ポスドク) 159 名、大学院生 (修士、博士課程) 768 名、学部生 382 名が本特定領域研究に参画し、優れた成果の輩出に多大な貢献を果たした。博士学位取得者も 53 名輩出することができた。これらの成果は対外的にも高く評価され、以下に示すような若手研究者による国際会議招待講演 (12 件)、各種学会賞受賞などが数多く本特定領域から生まれることとなった。

### 若手研究者の主な招待講演リスト

- ・ T. Yamaguchi, A. Uedono, T. Suski and Y. Nanishi, Proposal of Droplet Elimination Process by Radical Beam Irradiation for Reproducible Growth of High-quality InN and InGaN, The 8th

- International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS 2009), Jeju, Korea (2009.10).
- A. Kaneta, T. Hashimoto, K. Nishimura, M. Funato and Y. Kawakami, Visualization of the local carrier dynamics in InGaN SQW using dual probe scanning near field optical microscope, Intern. Workshop on Nitride Semicond., Tampa, Florida, USA. (2010. 9).
  - T. Onuma, K. Kosaka, K. Asai, S. Sumiya, T. Shibata, M. Tanaka, T. Sota, A. Uedono, and S. F. Chichibu, Exciton fine structures in AlN epilayers grown by metalorganic vapor phase epitaxy, 7th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED 2008), Phoenix, Arizona, USA (2008.4).
  - K. Hazu, T. Hoshi, K. Oshita, M. Kagaya, K. Fujito, H. Namita, T. Onuma, and S. F. Chichibu, Polarized and Spatially-Resolved Cathodoluminescence Studies of m-plane Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N Films Grown on Low Defect Density Free-Standing GaN Substrates, International Workshop on Nitride Semiconductors 2008 (IWN2008), Montreux, Switzerland (2008.10).
  - S. Ishizawa, K. Kishino, R. Araki, S. Sugimoto, K. Yamano and A. Kikuchi, Optical Pumped Green-range Stimulated Emission from InGaN/GaN MQW Nanocolumn Regular Arrays, International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2010), Tampa, Florida, USA (2010.9).

#### 若手研究者の受賞リスト

- 第 29 回電子材料シンポジウム EMS 賞 (立命館大学 山口智広氏)
- 第 7 回日本結晶成長学会奨励賞 (立命館大学 山口智広氏)
- 日本学術振興会特別研究員 DC2 (三重大学 宮川鈴衣奈氏)
- 日本学術振興会特別研究員 DC1 (三重大学 馬ベイ氏)
- 第 29 回 (2010 年秋季) 応用物理学会講演奨励賞受賞 (三重大学 宮川鈴衣奈氏)
- 日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会 窒化物半導体研究会 発表奨励賞 (三重大学 生川満久氏、宮川鈴衣奈氏、名城大学 飯田大輔氏、松原哲也氏、浅井俊晶氏、野中健太郎氏)
- The 37th Intern. Symp. on Compound Semiconductors Student Award (京都大学 石井氏)
- IWN 国際会議ベストポスター賞 (理化学研究所 秋葉雅弘氏)
- 日本結晶成長学会 研究奨励賞 (理化学研究所 藤川紗千恵氏)
- 平成 22 年度福井大学大学院工学研究科博士前期課程最優秀学生表彰

さらに、これら若手研究者の多くは、国内外の大学・研究機関でのアカデミックポジション(准教授、ポスドクなど)や LED 関連産業などをはじめとする大手企業に進路を得て、研究終了後もそれぞれの分野において、第一線で活躍を続けており、教育・研究・産業界での活躍が今後も期待される。

以上に示すように、本特定領域の遂行が日本の若手研究者の育成・成長に果たした役割は計り知れないものと言えよう。

## 11. 総括班評価者による評価の状況

本研究領域においては、客観的且つ公正な内部評価を行うため、以下の 4 名の総括班評価者を配してきた。

赤崎 勇	名城大学大学院・教授、名古屋大学・特別教授、名誉教授
佐々木 昭夫	京都大学・大阪電気通信大学 名誉教授
高橋 清	東京工業大学・名誉教授、最高裁判所・専門委員
西永 頌	東京大学・豊橋技術科学大学 名誉教授

これまでに、本研究領域が開催した研究会・年度成果報告会などを通じて、各年度の研究計画

および研究の進捗状況を報告し、意見・評価を聴取することにより、本研究領域へのフィードバックを有機的に行ってきた。さらに総括班ミーティングを下記の通り、毎年開催し、本研究領域の運営に関して意見を聴取し、領域全体運営方針、今後のスケジュールなどについて調整を行ってきた。

第1回：平成18年8月31日	於：立命館大
第2回：平成19年3月5日	於：熱海後樂園ホテル
第3回：平成19年7月7日	於：立命館大
第4回：平成20年3月12日	於：熱海後樂園ホテル
第5回：平成20年8月2日	於：学士会館
第6回：平成21年3月12日	於：鳥羽シーサイドホテル
第7回：平成21年7月11日	於：立命館大学
第8回：平成22年3月15、16日	於：長浜ロイヤルホテル
第9回：平成23年3月1、2日	於：長浜ロイヤルホテル

平成20年度に実施された中間評価ヒアリングにおいて、評価結果:A「現行のまま推進すればよい」との評価を受けたが、これに基づき中間年度では総括班評価者より「本特定領域研究は平成18年度に発足しほぼ2年を経過したが、窒化物半導体の潜在能力を十分に活用するため、広範囲の組成で良質な結晶を成長させる技術をはじめ成長結晶の評価および短波長/長波長素子の開発などで成果を上げ始めている。四つの研究課題間の連携も良く機能し、期待以上の成果があがりつつある。折り返し点を迎えるにあたり今後は、これらの研究をいっそう進めるとともに、各班内外の連携・協力をさらに推し進め、窒化物半導体における未踏分野を開拓し、大きな成果を上げて頂きたい。」との評価・助言を頂いた。

本特定領域研究期間の終了に伴い、各総括班評価者より頂いた評価・助言などを以下に記す。

#### 赤崎 勇 (名城大学大学院・教授、名古屋大学・特別教授、名誉教授)

世界を先導する学術的成果や産業界に大きな影響を与える成果を数多く挙げられたことに対して敬意を表するとともに、本研究領域をまとめられた名西教授及び精力的に研究を遂行された分担者の方々の労を多とする。窒化物半導体研究において我が国を代表する研究グループが結集し、特に薄膜及びナノ構造成長技術、物性解析およびデバイス応用について最高水準の成果を上げられた。一方、本研究領域の推進により同材料系における本質的な課題も明らかになり、今後の研究の方向性を明らかにした点でも大きな意義があった。

#### 佐々木 昭夫 (京都大学・大阪電気通信大学 名誉教授)

本研究において、良質の結晶を実現し、p型伝導体の可能性を見出して、狭いバンド幅のInN系の潜在能力を引き出している。他方、深紫外発光で、世界的な性能を実現して、広いバンド幅のAlN系の潜在能力を活用している。発光の機構を解明して、可視光域のInGaN系の発光の潜在能力を明らかにしている。またナノ寸法柱状の成長により、他より良好な結晶と特異な特性を示すことにより潜在能力を掘り起こしている。数多くの国際会議に招待されている所からも、それらの成果は十分なものと考えられる。

#### 高橋 清 (東京工業大学・名誉教授、最高裁判所・専門委員)

所期の目標であった窒化物半導体の、短波長(深紫外)から長波長(赤外)領域までをカバーすることに対しての成果は十分に達成されたと思われる。

① 窒化物半導体はこれまで短波長用材料として注目されていたが、今まで困難視されていたInNの、伝導性の制御を可能にしたことは特筆に価しよう。その結果長波長領域をカバーできるようになった。

- ② 従来は個別の材料についての特性の説明を、一般論として、全ての材料に適用できるように拡張された。
- ③ 幾つかの Serendipity があったが、その一つとして InN の熱電特性を上げることができる。これまでの半導体の理論では、ゼーベック係数は、最高理論値が約 200  $\mu\text{V}/\text{K}$  であるが、今回の研究で InN で 800  $\mu\text{V}/\text{K}$  という大変大きな値が報告された。今後このメカニズムを研究することによって、新しい窒化物半導体の熱電材料としての新領域が拓かれることを期待したい。
- ④ この研究を通しての特筆すべきことは、窒化物半導体の「世界に冠たる研究集団」が形成されたことであろう。今後ともこの集団を更に強固なものに育てたい。

西永 頌（東京大学・豊橋技術科学大学 名誉教授）

本研究は発足当時、窒化ガリウム結晶中心であった研究領域を大きく拡大し、バンドギャップのより大きい窒化アルミニウム、バンドギャップがより小さい窒化インジウムの結晶成長技術を開拓するとともに、その間の合金組成を持つ結晶の高品質成長技術を開拓した。窒化ガリウムの高品質結晶成長は世界に先駆けてわが国で初めて成功したものであり、その高い実力を合金結晶にまで高めた功績は大きい。