

令和 2 年 5 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02907

研究課題名(和文) 広禁制帯幅ナノ構造を計測可能な時間・空間同時分解陰極線蛍光計測法の開発と応用

研究課題名(英文) Development and application of spatio-time-resolved cathodoluminescence for wide bandgap nanostructures

研究代表者

秩父 重英 (Chichibu, Shigefusa)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：80266907

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,700,000円

研究成果の概要(和文)：半導体量子構造や蛍光体においてナノメートル領域で起こる発光の動的観測を実現するには、空間分解能と時間分解能を併せ持つ分光計測系が必要である。本研究では、禁制帯幅が大きい半導体を超短時間励起することができる、フェムト秒パルスレーザ励起フェムト～ピコ秒パルス光電子銃の高強度化を行い、それを走査型電子顕微鏡に組み込み微小領域に電子線を集束して発光計測を行う時間・空間同時分解力ソーダカソードルミネッセンス装置の高空間分解能化と高感度化を、リターディング機構の付加や検出系の改善などにより達成した。そして、AlNやAlGaIn、BN、ZnOナノ構造等の微小領域における発光寿命計測に成功し、発光機構モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

サブマイクロメートル台の空間分解能とピコ秒台の時間分解能を併せ持ち、かつ光励起が困難な禁制帯幅が広い半導体物質に対しても使用できるSTRCL計測系は、新奇光デバイスを実現するための光物性研究に必須といえる。本研究で構築した、表面敏感にもできるリターディング機構付きSTRCL装置は、AlNやAlGaIn混晶、h-BN等の深紫外波長領域で発光する材料やZnOをはじめとするナノ構造等の、微小領域における再結合寿命の計測を可能とする。本装置を用いた光物性研究によって新奇発光素子用材料の発光機構の理解が進むことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Spatio-time-resolved cathodoluminescence (STRCL), which uses a femtosecond-laser-driven pulsed photoelectron gun instead of the cw electron gun of spatially resolved cathodoluminescence (CL) combined with scanning electron microscopy (SEM), is an attractive tool for probing local luminescence dynamics in quantum structures and nanostructures of wide-bandgap (WBG) semiconductors. As STRCL is based on SEM, multiscale characterization of a structure with high spatial definition is possible, and the use of pulsed electron-beams allows the sub-picosecond excitation of any WBG semiconductor. In this work, we improved the spatial resolution by introducing a high efficiency photoelectron source made of Au and adding a retarding system around the sample stage. Also we improved the sensitivity and temporal resolution of the detection system. Then we characterized WBG semiconductors such as AlN, AlGaIn, AlInN, BN, ZnO to clarify their emission mechanisms.

研究分野：半導体光物性

キーワード：時間空間同時分解分光 フェムト秒電子線 電子顕微鏡 カソードルミネッセンス

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

固体結晶におけるボイドや積層欠陥、転位等のマクロ欠陥および点欠陥は、ナノメートル台の微小領域で発生し、キャリア散乱中心や非輻射再結合中心¹⁾として働くため低次元構造やバルクの特性さえも左右する。一方、発光性能を司る輻射再結合寿命は活性層構造体の次元性やサイズにより変化し、特に励起子を空間的に局在させた場合には飛躍的に短くなる。すなわち、ナノメートル領域における輻射寿命と非輻射寿命の定量化は、材料本質の評価にも、デバイス高性能化にも必須な物理計測技術である。

上記目的を達成するには、サブマイクロメートル台の空間分解能とピコ秒台の時間分解能を併せ持ち、かつ光励起が困難な禁制帯幅が広い半導体物質に対しても使用できる時間空間同時分解分光計測システムが必要である。フェムト秒チタンサファイヤ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}$) レーザを励起光源に用い、発光を近接場光として観測する走査型近接場光顕微鏡(SNOM)が国内外で市販されていたが、(i)励起可能な材料の禁制帯幅が光源波長に制限され、(ii)空間分解能がプローブ径に依存するため励起領域は最小でも数十ナノメートル径であり、(iii)被測定領域は表面から光の吸収長内である、という制限があった。

報告者は、研究開始当初までにフェムト秒レーザ励起時間分解フォトルミネッセンス(TRPL)法を用いた発光ダイナミクス研究と、空間分解カソードルミネッセンス(SRCL)法を用いた発光の空間分解研究を通じ、InGaN量子井戸やAlInGaN系薄膜、AlGaIn/GaNナノワイヤ、ZnO薄膜、AlN薄膜等の光学遷移過程について知見を得ており、上記の課題を解決するためフェムト秒パルス光電子銃(PE-gun)をいち早く構成して²⁾、それを電子顕微鏡(SEM)の熱電子銃位置に搭載することにより日本に唯一台の時間・空間分解カソードルミネッセンス(STRCL)装置プロトタイプ³⁻⁵⁾を構築してGaInの評価を行った³⁻⁵⁾。しかしながら報告者の装置においても、電子線打ち込み後の衝突発生電子の空間広がりとその後のキャリア拡散だけでは説明できない程度の空間分解能の不足や、表面敏感な計測ができない³⁾等の問題が残っていた。

2. 研究の目的

(1) 上記1.項の問題を解決し、SNOMでプローブし難い広禁制帯幅物質(特に半導体)を高い位置選択能(高空間分解能)で狙い撃ち励起でき、かつ高感度に発光信号を取得できるSTRCL技術を実現する。

(2) 上記STRCL装置を用い、励起子の持つ特性が顕著に現れると期待できるAlNや高AlNモル分率AlGaIn、AlInN混晶等の窒化物半導体、及び大きな励起子束縛エネルギーを持つZnOやMgZnO等の酸化物半導体ナノ構造における局所発光ダイナミクスを計測し、転位等の構造欠陥や点欠陥が非輻射再結合寿命に与える影響や、ナノ構造サイズが輻射再結合寿命に与える影響を明らかにして光科学創成に貢献する計測系の実力を示す。

3. 研究の方法

(1) 禁制帯幅が広い物質にも超短時間の電子-正孔対励起が可能なフェムト～ピコ秒パルス電子線をより高空間分解能で使用するためには、SEMのレンズ系直上により多くのパルス電子を導入することが望ましい。従って、それを達成する高輝度フェムト秒パルス光電子を発生させるため、励起用フェムト秒パルスレーザの安定化とフォトカソードへの冷却機構導入を行う。

(2) 上記のパルス光電子を直径数nm程度の微細領域に集束して注入するためには加速電圧を下げることは避けたいが、その場合、電子線打ち込み深さや衝突発生電子の空間広がりとその後のキャリア拡散により空間分解能を失う。また、表面近傍の情報を得難くなる。これらの問題を回避するため、リターディング機構STRCL装置に導入し、試料直上での減速によって目的を達成する。

(3) 発光を検出する側からも空間分解能を高める努力をするため、検出器の感度向上を行う。同時にSRCLマッピング速度を向上させ、さらに当初目的には掲げていなかったが時間分解能の向上も行う。

(4) かようにして高性能化したSTRCLを用いて、励起子の持つ特長が顕著に現れると期待できるAlNやAlGaIn量子井戸、AlInN、ZnO等の量子ナノ構造における輻射・非輻射再結合ダイナミクスを明らかにする。

4. 研究成果

(1) フェムト秒パルスレーザ励起光電子銃(PE-gun)の高輝度化のため、表面入射型⁴⁾金フォトカソードの裏面に排熱ホルダを装着して冷却効率を高め、励起用フェムト秒パルスレーザ本体の安定化と、除振台の超微小振動によるレーザ光路のズレを防いでPE-gun全体の時間的、空間的安定性を高めた。その結果、PE-gun直下で前年度比2倍の光電子強度を得た。

(2) リターディング機構を導入して最大2.5kVまでの減速電圧をかけられるようにした。その

結果、試料直上で PE に急制動をかけられるようになり、空間分解能を損なわず表面近傍の形状的特徴を SEM 観測できるようになった。こうして記すと簡単ようであるが、パルス PE-gun を使用する場合、励起レーザの点灯している時間（すなわちそれとほぼ同期する光電子が放出されている時間）は、80MHz で使用した場合でも、毎秒あたり例えば $200 \times 10^{-15}(\text{s}) \times 80 \times 10^6 = 1.6 \times 10^{-5}(\text{s})$ でしかなく、SEM 像を取得する 2 次電子量を稼ぐのは簡単ではない。本装置では、大型の 2 次電子検出器を用いて対応している⁵⁾。

(3) 検出器の感度アップと同時に SRCL マッピングの測定速度を向上させた。さらに、当初目的には掲げていなかったが時間分解能の向上も行い、1 ps 程度の時間分解能での TRCL 計測を可能とした。

(4) 極性面および非極性面 AlN(文献 6)、マクロステップ AlN テンプレート上の高 AlN モル分 AlGaIn 量子井戸⁷⁾、m 面成長させた AlInN 混晶ナノ構造⁸⁾、2 次元物質である六方晶窒化ボロン (h-BN) 微粉末⁹⁾ 及びエピ層、ヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシーによる ZnO/MgZnO、ヘリコン波励起プラズマスパッタ堆積 NiO 薄膜、および水熱合成 ZnO ナノワイヤ構造など、主に深紫外線 (DUV) 波長域での時間空間同時分解分光データを得て、各々の材料や構造体に特有の発光物理現象に関する新たな知見を得た。(5) 以下に、代表的な成果のみを簡単に記す。

(5) 深紫外発光素子用 m 面自立 AlN 基板・ホモエピタキシャル薄膜の発光特性⁶⁾

地球上には、安全な飲料水にアクセスできない人間が 11 億人、感染症の温床といえる地域に住む人が 28 億人おり、小型省エネ深紫外 (DUV) 光源と太陽電池・蓄電池を用いた浄水・殺菌・消毒はグローバルな住環境改善に貢献することができる。DUV 発光デバイスの実現には、低転位密度 AlN 基板の上に AlGaIn 量子構造発光素子を形成する事が望ましい。報告者らは、世界で唯一 AlN 基板の合成とホモエピタキシャル成長をすることができるノースカロライナ州立大との共同研究にて、m 面 AlN 基板・エピ層における内因性非輻射再結合中心 (NRC) と同定した Al 空孔複合体の濃度を初めて定量し、それが発光ダイナミクスに及ぼす影響 (正孔の捕獲係数) を初めて決定した⁶⁾。また、バンド端励起子発光の偏光特性や発光起源を明らかにした。

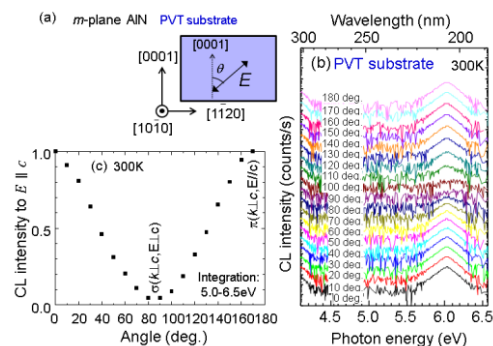


図1 m 面 AlN 基板の (a) 結晶軸と偏光子の電界 E の関係、および室温における (b) 偏光 CL スペクトル及び (c) E || c 偏光時に対する相対強度の偏光子角度依存性⁶⁾

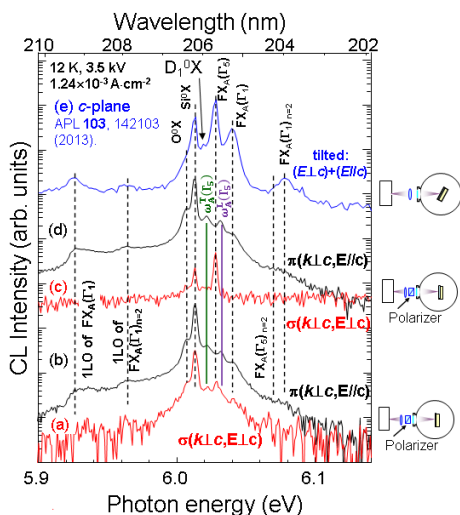


図2 (a)-(d) m 面 AlN ホモエピタキシャル層および (e) 比較のための c 面 AlN ホモエピ層¹⁰⁾ の、12 K における偏光バンド端 CL スペクトル⁶⁾

図 1(a) に、m 面 AlN 基板の結晶軸と偏光子の電界 E の関係を、(b), (c) に室温における偏光 CL スペクトルと E || c 偏光時に対する相対強度の偏光子角度依存性を各々示す。6 eV (波長約 210 nm) 近傍のバンド端発光はほぼ完全に E || c 偏光されており、結晶のコヒーレンシーが非常に高いことがわかる。この基板の上に高温で成長させた AlN ホモエピ層の低温におけるバンド端近傍の偏光 CL スペクトルを図 2(a)-(d) に示す。詳細は文献 6 に譲るが、低温で励起子の特徴が顕れた詳細な構造が見られている。

この m 面 AlN ホモエピ層の時間分解カソードルミネッセンス (TRCL) 測定を低温から室温まで行い、室温における非輻射再結合寿命を約 28 ps と決定した。そして陽電子消滅法により定量した $V_{Al}(V_N)_3$ すなわち NRC の濃度との関係から、NRC の正孔捕獲係数 (C_p) として約 $3 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ を得た。この値は n 型 GaN における NRC ($V_{Ga}V_N$) の C_p ($6 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$) の 5 倍程度の値となっている。これら欠陥濃度の低減による DUV 光源の高性能化が期待されます。

(6) 深紫外 AlGaIn 発光ダイオードにおけるキャリア及び電流局在構造⁷⁾

高効率でデバイス寿命も長い深紫外 AlGaIn 発光ダイオード (LED) における微小構造および光物性の解析を行った。その結果、強い発光を起こす領域の発光波長が長い、すなわち、励起キャ

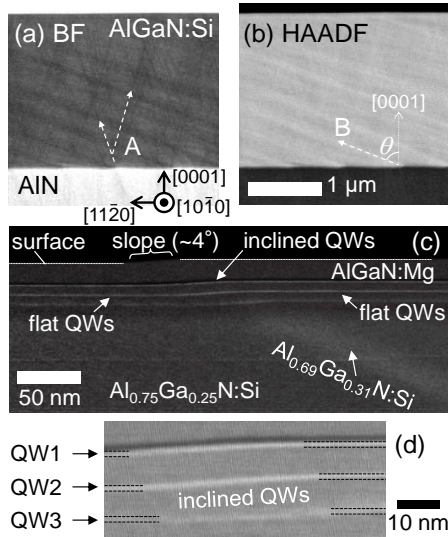


図3 AlGaIn LED 試料の低倍率断面 TEM(a) 明視野 (BF) および (b) 高角度環状暗視野 (HAADF) 像. (c) 高倍率断面 HAADF-STEM 像 (d) QW 層の拡大像⁷⁾

近年、高効率固体 DUV 光源の開発が盛んになっている。特に、波長 265 nm の光は殺菌能力が高く、当該波長の LED を作製すれば、省エネルギー・省スペース性に優れた貴重な光源となる。しかしながら、樹脂封止がない場合の 265 nm 帯 AlGaIn LED の外部量子効率も最大でも 3% にとどまっている。そこで、DUV 波長帯の AlGaIn LED 構造の物性を調べるため、構造解析および発光特性を評価した。AlGaIn 多重量子井戸 (MQW) は、サファイア基板上的 AlN 層と Si 添加 AlGaIn (AlGaIn:Si) 層上に形成されており、図 3(a)、3(b) の断面透過電子顕微鏡 (TEM) 像に見られる通り、AlN には特有のマクロステップが、AlGaIn:Si 層にはそのマクロステップを起点とする斜線コントラストが観測された。ここで、図 3(a)、3(b) はそれぞれ明視野像 (BF) と高角度環状暗視野 (HAADF) 像であり、それぞれを詳細に分析した結果、図 3(a) の A で示される斜線は貫通転位、図 3(b) の B で示される斜線は組成変調であることが分かった。図 3(c) は、AlGaIn:Si 層上に形成された MQW の高倍率 TEM 像である。図 3(b) の B で示された組成変調領域は相対的に AlN モル分率が低く、これと連動して QW が傾斜した部分が存在することが分かる [拡大図を図 3(d) に示す]。図 4(a) はこの試料表面の SEM 像、(b) はバンド端発光の空間分解 CL 発光強度像であり、例えば場所 P1 のように、図 3(a) における構造の稜線 (図 3 で見た QW の傾斜部に相当) は強く発光している。図 4(c)、4(d) は各々発光エネルギーの低い領域と高い領域を示す。この結果から、強く光る地点の発光は低エネルギーつまり長波長であることが明らかとなった。

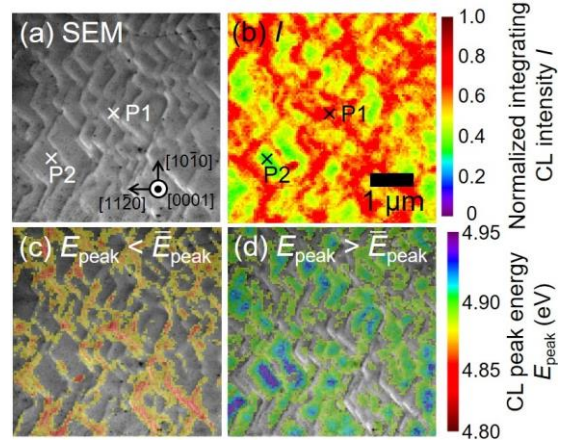


図4 AlGaIn LED 試料表面の (a) SEM 像、(b) CL 強度像. (c) および (d) は各々比較的低および高エネルギーで発光する領域を表す⁷⁾

リアがより低いポテンシャルエネルギー領域で優先的に発光することが分かった。さらにそのような領域は、転位と相関がないこと、優先的に電流注入が行われうることも判明した。

(7) 六方晶 BN 微結晶の発光ダイナミクス⁹⁾

グラファイト状の 2 次元網目構造をとる安定相六方晶 h-BN の禁制帯幅 E_g は約 6 eV と大きく、比較的明るい発光を呈するため、AlN 同様に DUV 波長の発光素子用材料として期待できる。以前は h-BN バルク結晶を用いた波長 215 nm の光励起レーザー発振や電子線励起 DUV 発光素子、320 nm 帯蛍光体材料としての研究が報告されていたが、高品質バルク単結晶は一般には入手し難く、物性研究の面でも不明点が多かった。例えば、直接遷移型であると報告されていた一方、第一原理計算では殆どの報告例で間接遷移型と予測されており、ごく最近のモンペリエ大 Cassabois らの報告でも間接遷移型を実証するデータが示された。したがって、構造欠陥に関与するとされる発光群を含め、時間分解や空間分解分光評価により発光ダイナミクスを吟味する必要がある。この目的のためには STRCL 装置の使用が最適である。

市販の h-BN 粉末 (>99%) を 900°C で 2 時間、 O_2 雰囲気中で熱処理を行うことにより約 10 マイクロメートル直径程度の h-BN 微結晶を作製し、X 線回折、赤外線吸収、CL 測定、STRCL 測定等を行った。

X 線回折測定により単相であることを確認した h-BN 微結晶の CL スペクトルの温度依存性を図 5 に示す。高エネルギー側から、5.93 eV のショルダー、5.86 eV ダブルレット、5.76 eV ダブルレット、5.5 eV 帯、4 eV 帯と記す発光が観測さ

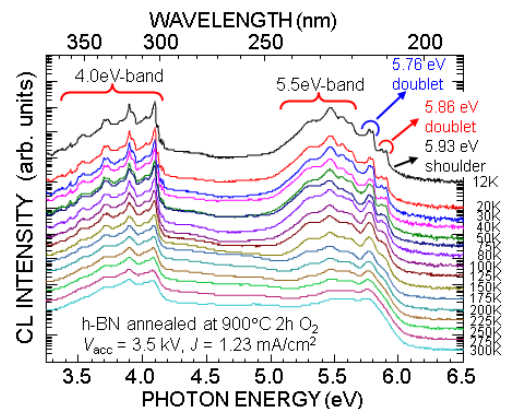


図5 O_2 熱処理により形成した h-BN 微結晶の CL スペクトルの温度依存性⁹⁾

れた。5.93 eV ショルダー、5.86 eV ダブルレット、5.76 eV ダブルレットは、各々間接遷移バンドギャップに由来する励起子 (iX) の、ブリルアンゾーンの T 点における ZA フォノン、LA/TA フォノン、LO/TO フォノンレプリカと同定された。すなわち、*h*-BN は間接遷移型半導体でありながら、iX のフォノンレプリカ群の発光効率は非常に高いことが明らかとなった。

図 6 に、*h*-BN 微結晶の STRCL 測定結果のダイジェストを示す。(a) SEM 像、(b) 低温における全色 CL 強度像、(c) 数十マイクロメートル四方の広域バンド端 CL スペクトル、(d)-(g) 各発光ピークの単色 CL マッピング像、(h)-(k) 各々の発光の時間分解 CL 信号の温度依存性、(l) 各発光ピークの発光寿命の温度依存性を示す。図 6(j), (k) に示す iX のフォノンレプリカ群の発光寿命は短く、また温度に殆ど依存せず 34 ps 程度であったが、それらが積層ミスマッチ等の構造的欠陥に束縛された 5.5 eV の発光ピークの場合、図 6(h), (i) に示すように第 2 成分は長く、温度の上昇に従って NRC に捕獲されるため、非輻射再結合寿命は短くなり発光強度も減少した。従って、欠陥ではないエネルギー極小部への励起子局在は望ましいが、欠陥への捕獲を避けて発光効率を高める必要があることが明らかとなった。

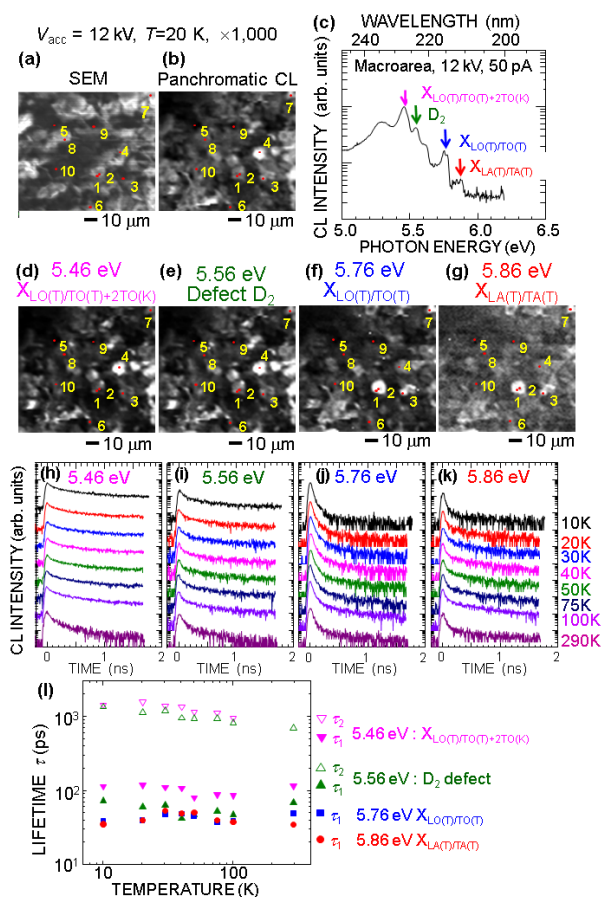


図 6 *h*-BN 微結晶の STRCL 測定結果⁹⁾

<引用文献>

- 1) S. F. Chichibu, A. Uedono, K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, S. Takashima, M. Edo, K. Ueno, and S. Ishibashi, *J. Appl. Phys.* **123**, 161413 (2018).
- 2) T. Onuma, Y. Kagamitani, K. Hazu, T. Ishiguro, T. Fukuda, and S. F. Chichibu, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 043905 (2012).
- 3) Y. Ishikawa, M. Tashiro, K. Hazu, K. Furusawa, H. Namita, S. Nagao, K. Fujito, and S. F. Chichibu, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 212106 (2012).
- 4) K. Furusawa, Y. Ishikawa, M. Tashiro, K. Hazu, S. Nagao, H. Ikeda, K. Fujito, and S. F. Chichibu, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 052108 (2013).
- 5) S. F. Chichibu, Y. Ishikawa, K. Hazu, and K. Furusawa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **59**, 020501 (2020).
- 6) S. F. Chichibu, K. Kojima, K. Hazu, Y. Ishikawa, K. Furusawa, S. Mita, R. Collazo, Z. Sitar, and A. Uedono, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 151903 (2019).
- 7) K. Kojima, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ippommatsu, Y. Honda, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu, *Appl. Phys. Lett.* **114**, 011102 (2019).
- 8) S. F. Chichibu, K. Kojima, A. Uedono, and Y. Sato, *Adv. Mater.* **29**, 1603644 (2017).
- 9) S. F. Chichibu, Y. Ishikawa, H. Kominami, and K. Hara, *J. Appl. Phys.* **123**, 065104 (2018).
- 10) S. F. Chichibu, K. Hazu, Y. Ishikawa, M. Tashiro, T. Ohtomo, K. Furusawa, A. Uedono, S. Mita, J. Xie, R. Collazo, and Z. Sitar, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 142103 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 K. Kojima, K. Ikemura, K. Matsumori, Y. Yamada, Y. Kanemitsu, and S. F. Chichibu	4. 巻 7
2. 論文標題 Internal quantum efficiency of radiation in a bulk CH ₃ NH ₃ PbBr ₃ perovskite crystal quantified by using the omnidirectional photoluminescence spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 071116 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5110652	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, K. Hazu, Y. Ishikawa, K. Furusawa, S. Mita, R. Collazo, Z. Sitar, and A. Uedono	4. 巻 115 (15)
2. 論文標題 In-plane optical polarization and dynamic properties of the near-band-edge emission of an m-plane freestanding AlN substrate and a homoepitaxial film	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 151903 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5116900	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 S. F. Chichibu, Y. Ishikawa, K. Hazu, and K. Furusawa	4. 巻 59 (2)
2. 論文標題 Spatio-time-resolved cathodoluminescence studies of wide-bandgap group-III nitride semiconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 020501 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/ab5ef4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 K. Kojima, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ippommatsu, Y. Honda, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu	4. 巻 114
2. 論文標題 Carrier localization structure combined with current micropaths in AlGa _N quantum wells grown on an AlN template with macrosteps	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 011102 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5063735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chichibu Shigefusa F., Ishikawa Youichi, Kominami Hiroko, Hara Kazuhiko	4. 巻 123
2. 論文標題 Nearly temperature-independent ultraviolet light emission intensity of indirect excitons in hexagonal BN microcrystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 065104 ~ 065104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5021788	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chichibu S. F., Uedono A., Kojima K., Ikeda H., Fujito K., Takashima S., Edo M., Ueno K., Ishibashi S.	4. 巻 123
2. 論文標題 The origins and properties of intrinsic nonradiative recombination centers in wide bandgap GaN and AlGaN	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 161413 ~ 161413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5012994	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計42件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 K.Hara, N. Umehara, K. Shima, K. Kojima, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Improvement in the luminescence property of hexagonal boron nitride grown by CVD on a c-plane sapphire substrate
3. 学会等名 The 4th International Conference on Physics of 2D Crystals (ICP2C4) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. F. Chichibu, K. Shima, K. Kojima, S. Ishibashi, and A. Uedono
2. 発表標題 Impact of vacancy complexes on the nonradiative recombination processes in III-N devices
3. 学会等名 The 13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, H. Miyake, and A. Uedono
2 . 発表標題 Role of Al-vacancy complexes in AlN and high AlN mole fraction AlGa _N alloys
3 . 学会等名 th International Workshop on UV Materials and Devices (IWUMD-IV) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kojima, K. Watanabe, T. Taniguchi, and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Quantification of external quantum efficiency for near-band-edge emission of freestanding h-BN crystals under photo-excitation
3 . 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW 2019), Spectroscopy & growth of h-BN II (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Shima, H. Iguchi, T. Narita, K. Kataoka, K. Kojima, A. Uedono, and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Photoluminescence studies of sequentially Mg and H ion-implanted GaN with various implantation depths and crystallographic planes
3 . 学会等名 The 13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, N. Umehara, K. Takiguchi, K. Shima, K. Kojima, Y. Ishitani, and K. Hara
2 . 発表標題 Time-resolved luminescence studies of indirect excitons in h-BN epitaxial films grown by chemical vapor deposition using carbon-free precursors
3 . 学会等名 The 13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 秋父重英
2. 発表標題 時間空間分解カソードルミネッセンスによるワイドバンドギャップ半導体の所発光ダイナミクス評価
3. 学会等名 日本表面真空学会 2019年6月研究例会「電子ビーム技術の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋父重英
2. 発表標題 窒化物半導体の時間空間分解カソードルミネッセンス評価
3. 学会等名 応用物理学会薄膜・表面物理研究会 第47回薄膜・表面物理セミナー「半導体GaNの基礎と応用」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島一信, 秋父重英
2. 発表標題 全方位フォトルミネッセンス(ODPL)法を用いた半導体結晶の光物性評価
3. 学会等名 ナノテスト学会「第25回P & A解析研究会」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋父重英, 小島一信, 羽豆耕治, 石川陽一, 古澤健太郎, 三田清二, R. Collazo, Z. Sitar, 上殿明良
2. 発表標題 気相成長m面自立AlN基板およびホモエピタキシャル層の偏光特性と発光ダイナミクス
3. 学会等名 2019年秋季応用物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋父重英, 嶋紘平, 小島一信
2. 発表標題 MOVPE成長m面AlInN/GaNヘテロ構造における特異構造(3)-断面CL-
3. 学会等名 2020年春季応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 嶋紘平, 中須大蔵, 正直花奈子, 上杉謙次郎, 小島一信, 上殿明良, 三宅秀人, 秋父重英
2. 発表標題 高温アニールしたスパッタAIN上に成長させたAINの陰極線蛍光評価(1)
3. 学会等名 2020年春季応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中須大蔵, 嶋紘平, 正直花奈子, 上杉謙次郎, 小島一信, 上殿明良, 三宅秀人, 秋父重英
2. 発表標題 高温アニールしたスパッタAIN上に成長させたAINの陰極線蛍光評価(2)
3. 学会等名 2020年春季応用物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋父重英, 嶋紘平, 小島一信, Baxter Moody, 三田清二, Ramon Collazo, Zlatko Sitar, 熊谷義直, 上殿明良
2. 発表標題 PVT成長AIN上にHVPE成長させたSi添加AIN基板の陰極線蛍光評価
3. 学会等名 2020年春季応用物理学会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, N. Umehara, K. Shima, K. Kojima, and K. Hara
2 . 発表標題 Luminescence spectra of hexagonal BN thin films grown by chemical vapor deposition on a c-plane sapphire substrate
3 . 学会等名 The 3rd International Conference on Physics of 2D Crystals (ICP2C3) (招待講演)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Kojima, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ipponmatsu, Y. Honda, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Current localization structure observed in AlGa _N -based deep-ultraviolet light-emitting diodes grown on AlN templates with macrosteps
3 . 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN2018)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, N. Umehara, K. Shima, K. Kojima, and K. Hara
2 . 発表標題 Luminescence dynamics of indirect excitons in h-BN epitaxial films grown by BC13-NH ₃ chemical vapor deposition on a c-plane sapphire substrate
3 . 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN2018),
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Nagasawa, K. Kojima, A. Hirano, M. Ipponmatsu, Y. Honda, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Microscopic structure of boosting IQE for AlGa _N -based UV-B (285 nm) LED grown on macrosteps
3 . 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (IWN2018)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 S. F. Chichibu, N. Umehara, K. Shima, K. Kojima, and K. Hara
2. 発表標題 Luminescence dynamics of indirect excitons in h-BN epitaxial films grown by BC13-NH3 chemical vapor deposition on a c-plane sapphire substrate
3. 学会等名 Materials Research Society, 2018 Fall Meeting
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Nagasawa, K. Kojima, R. Sugie, A. Hirano, M. Ippommatsu, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Different nonradiative recombination between on the terraces and macrosteps of uneven QW for 285 nm-LED grown on AlN template with dense macrosteps
3. 学会等名 The International Workshop on UV Materials and Devices (IWUMD)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秩父重英, 上殿明良
2. 発表標題 GaN結晶成長技術の進展と発光特性向上の現状
3. 学会等名 日本結晶成長学会 ナノ構造エピタキシャル成長分科会, プレIWN2018第10回窒化物半導体結晶成長講演会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秩父重英, 小島一信, 三宅秀人, 平松和正, 上殿明良,
2. 発表標題 AlN, AlGaIn薄膜および量子井戸の発光特性
3. 学会等名 日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会 第110回研究会・特別公開シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秋父重英, 嶋紘平, 小島一信
2. 発表標題 窒化物半導体特異構造の時間空間分解カソードルミネッセンス評価
3. 学会等名 窒化物半導体特異構造の科学 - ナノ物性評価技術の進展と物性制御 2019年春季応用物理学会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋父重英, 嶋紘平, 梅原直己, 小島一信, 原和彦
2. 発表標題 サファイア基板に気相成長させたh-BN薄膜の発光ダイナミクス
3. 学会等名 2018年秋季応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信, 吉田悠来, 白岩雅輝, 淡路祥成, 菅野敦史, 山本直克, 秋父重英
2. 発表標題 280nm帯深紫外AlGaIn発光ダイオードを用いた日光下における1.6 Gbps光無線伝送
3. 学会等名 2018年秋季応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信, 長澤陽祐, 平野光, 一本松正道, 本田善央, 天野浩, 赤崎勇, 秋父重英,
2. 発表標題 マクロステップを持つc面AlN/サファイアテンプレート上に成長させたAlGaIn量子井戸の構造解析(1)
3. 学会等名 2019年春季応用物理学会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, Y. Ishikawa, Y. Kominami, and K. Hara
2 . 発表標題 Spatio-time-resolved cathodoluminescence studies on hexagonal BN microcrystals
3 . 学会等名 The 2nd International Conference on Physics of 2D Crystals (ICP2C2) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, S. Takashima, M. Edo, K. Ueno, M. Shimizu, T. Takahashi, S. Ishibashi, and A. Uedono
2 . 発表標題 Origin and properties of intrinsic Shockley-Read-Hall nonradiative recombination centers in GaN
3 . 学会等名 29th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu and K. Kojima
2 . 発表標題 Periodic compositional undulation in the m-plane Al _{1-x} In _x N epilayers grown by metalorganic vapor phase epitaxy on a GaN substrate
3 . 学会等名 European Materials Research Society, 2017 Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, and A. Uedono
2 . 発表標題 Optical and defect characteristics of m-plane Al _{1-x} In _x N epitaxial nanostructures
3 . 学会等名 8th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS-2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, A. Uedono, and Y. Sato
2 . 発表標題 Vacuum-fluorescent-display devices emitting polarized deep-ultraviolet and visible lights using m-plane Al _{1-x} In _x N epitaxial nanostructures
3 . 学会等名 11th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED 2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, K. Shima, A. Uedono, and S. Ishibashi
2 . 発表標題 Consideration of Shockley-Read-Hall nonradiative recombination centers in wide bandgap (Al,Ga)N and ZnO
3 . 学会等名 Materials Research Society, 2017 Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, Y. Ishikawa, H. Kominami, and K. Hara
2 . 発表標題 Spatio-time-resolved cathodoluminescence of h-BN microcrystals
3 . 学会等名 The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Photonics West 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, N. Umehara, K. Shima, K. Kojima, and K. Hara
2 . 発表標題 Luminescence spectra of hexagonal BN thin films grown by chemical vapor deposition on a c-plane sapphire substrate
3 . 学会等名 The 3rd International Conference on Physics of 2D Crystals (ICP2C3) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 S. F. Chichibu, Y. Ishikawa, Y. Kominami, and K. Hara
2. 発表標題 Spatio-Time-Resolved Cathodoluminescence studies of h-BN microcrystals
3. 学会等名 The 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. F. Chichibu, Y. Ishikawa, H. Kominami, and K. Hara
2. 発表標題 Spatio-time-resolved cathodoluminescence studies of hexagonal BN microcrystals
3. 学会等名 International Workshop on UV Materials and Devices (IWUMD) 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 小島一信, 上殿明良
2. 発表標題 GaN中の非輻射再結合中心の正体とその特性
3. 学会等名 応用物理学会結晶工学分科会, 第147回結晶工学分科会研究会「ワイドバンドギャップ半導体デバイス～窒化物・SiCにおける成長・プロセス欠陥の評価と制御～」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 上殿明良, 嶋紘平, 小島一信, 石橋章司
2. 発表標題 GaNの低転位密度化・高純度化と主要な非輻射再結合中心
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第3回個別討論会 「GaN縦型パワーデバイスのドリフト層成長技術」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 石川陽一, 小南裕子, 原和彦
2. 発表標題 六方晶BN微結晶の発光ダイナミクス評価(3)
3. 学会等名 2017年秋季応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 石川陽一, 小南裕子, 原和彦
2. 発表標題 六方晶BN微結晶の発光ダイナミクス評価(4)
3. 学会等名 2017年秋季応用物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 小島一信
2. 発表標題 MOVPE成長m面AlInN/GaNヘテロ構造における特異構造(1)
3. 学会等名 2018年春季応用物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秩父重英, 梅原直己, 小島一信, 原和彦
2. 発表標題 サファイア基板に気相成長させた六方晶BN薄膜の発光スペクトル
3. 学会等名 2018年春季応用物理学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 秩父重英	4. 発行年 2020年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 14
3. 書名 2020版 薄膜作製応用ハンドブック	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	小島 一信 (Kojim Kazunobu) (30534250)	東北大学・多元物質科学研究所・准教授 (11301)	