

平成 30 年 5 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26706003

研究課題名(和文) 発光現象を強く増強・抑制できる光ナノ構造の提案と作製

研究課題名(英文) Exploring optoelectronic nanostructures for the enhancement and inhibition of luminescence

研究代表者

小島 一信 (Kojima, Kazunobu)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：30534250

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：非発光の要因となる結晶欠陥が低減された、酸性アモノサル法にて作製したGaN結晶上にハライド気相エピタキシ法にて成長させたm面自立GaN結晶を、時間分解分光法に用いて評価した。本結晶の室温発光寿命は、GaN結晶として極めて長い2.07 nsであった。これをさらに定量解析するために、全方位フォトルミネセンス(ODPL)法を提案し内部量子効率を評価したところ、励起密度60 W/cm²にて70%に達する高い値を得た。また、発光が抑制されている例として厚い井戸幅を持つAlGaIn量子井戸について、適切な構造を設計し、実際にそれを作製することにより確かに発光効率を増加できることを実験的に示した。

研究成果の概要(英文)：A long fast-component photoluminescence lifetime of 2.07 ns at room temperature was obtained for the near-band-edge emission in an m-plane freestanding GaN crystal grown by hydride vapor phase epitaxy on a bulk GaN seed wafer synthesized by the ammonothermal method using an acidic mineralizer. Omnidirectional photoluminescence (ODPL) measurement was proposed to absolutely quantify the quantum efficiency of radiation (η) in crystals. A methodology for quantifying internal quantum efficiency from such experimentally obtained η is derived. A strategy for increasing the square of an overlap integral of electron and hole wavefunctions in polar c-plane AlGaIn multiple quantum wells (MQWs) is proposed. By applying quadratic modulation to AlN mole fractions along the c-axis, local bandgap energies and concentrations of immobile charges induced by polarization discontinuity are simultaneously controlled throughout the MQW structure, and optimized band profiles are eventually achieved.

研究分野：半導体光物性

キーワード：発光増強 半導体光物性 窒化物半導体 量子効率

1. 研究開始当初の背景

発光体の発光割合は、通常、発光体固有のダイポールモーメント（光と物質の相互作用の強さを表す指数）によって決まる。しかし、よく光る、すなわちダイポールモーメントの大きな発光体の発光割合は当然大きい（真空中の半導体量子ドット (QD) であれば ~ 1 GHz) ため、時間スケールが比較的長い機械振動や核スピンなど (< 1 MHz) の物理と相互作用することは困難である。これは、発光体中の励起電子が他の状態と相互作用する前に、エネルギーを光として系外へ散逸するからである。一方、非発光過程も発光体のエネルギー散逸を加速する要因であるため、光と異なるエネルギー形態との相互作用を露わに発現させるためには、発光・非発光両者の定量計測および非発光の要因を極力取り除く必要がある。したがって、発光量子効率の定量計測技術開発が極めて重要であると言える。もし、発光体中の励起電子が、機械振動や核スピンと強く相互作用できれば、光をエネルギー源とする微小電気機械素子や光による核磁場の制御など、光が異なる形態の状態と相互作用することに基づいた、新奇光現象の発見や、従来の考え方や原理・デバイス構造の常識を打ち破るような、光デバイス創出の新たな道を切り開くことができる。

研究代表者は、半導体をベースとした高品質な光ナノ構造の設計および作製技術確立すると同時に、発光体の発光を増強し外部から制御する技術、さらには光ナノ構造と発光体を自在に結合する技術（ナノメートル精度の位置合わせ技術、Appl. Phys. Lett. 98, 10 (2013) など、発光現象の積極的な制御に必要な、原理の実証および、要素技術の開発を推進しており、物質制御および光ナノ構造による本格的な発光現象の制御とその応用研究に取り掛かろうとしている状況にある。

2. 研究の目的

発光現象を量子構造のような物質制御と、光ナノ構造のような場の制御とにより増強および抑制できることを理論的・実験的に検証する。また、発光現象を定量評価するために、絶対発光量子効率測定技術を開発する。

3. 研究の方法

非発光の要因となる結晶欠陥が低減されつつある窒化ガリウム (GaN) を例にとり、非発光の程度を時間分解分光法にて評価する。また、絶対発光量子効率測定が可能な測定系を提案・構築し、実際に GaN 結晶を用いて効率評価を行う。次に、発光が抑制されている典型例として、厚い井戸幅を持つ窒化アルミニウムガリウム (AlGaN) 量子井戸を例にとり、発光増強が可能な構造をシュレディンガー方程式およびポアソン方程式を連立させる数値計算的手法により設計、実際に発光が増強されるかどうかを実験的に調べる。並

行して、場の制御手段としての光ナノ構造を数値的に設計し、これを観察・評価するに適した実験系の構築を行う。

4. 研究成果

酸性アモノサーマル法にて作製した GaN 結晶上にハライド気相エピタキシー法にて成長させた m 面自立 GaN 基板の発光減衰曲線の測定結果を図 1 に示す。試料の貫通転位と積層欠陥の密度は、それぞれ $\sim 10^4$ cm^{-2} および 10^0 cm^{-1} と低いため、本結晶における主たる非発光の要因は点欠陥と考えられる。本結晶の室温発光寿命を時間分解分光法にて評価された値である 2.07 ns は、研究代表者が評価した中では、GaN 結晶として最も長い発光寿命である。ここで、発光寿命は発光減衰寿命を速い寿命と遅い寿命の 2 成分を持つ exp 型関数でフィッティングを行い、その結果として得られる速い寿命を意味する。

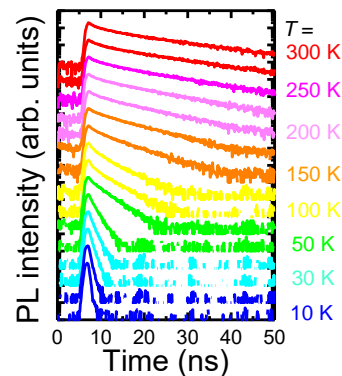


図 1 GaN 結晶の各測定温度における発光減衰曲線。

室温における発光寿命は非発光再結合寿命とみなされることがあり、その場合、発光寿命が長いことは非発光過程が抑制されていると読み替えることができる。しかし、これは発光体の内部量子効率 (IQE) が低いことを前提とした論理であり、本試料のように品質が高い結晶において成立するか否かは慎重に議論する必要がある。

そこで研究代表者は、通常的光ルミネセンス (PL) 測定に加え、全方位光ルミネセンス (ODPL) 法を用いて半導体結晶の IQE を計測する方法を提案し、高品質 GaN 結晶の品質評価の可能性を模索している。半導体結晶は一般に屈折率が高く、半導体と空気の界面で全反射が生じるため光取り出し効率 (LEE) が低い。図 2(a) に、PL と ODPL を比較した結果を載せる。積分球にて全方位、すなわち、試料の端面や裏面から放たれる光を含めて評価する ODPL スペクトルには、通常の PL スペクトルには見られない、低エネルギー側に発光ピークが観測される。吸収端エネルギー (図 2(b) 参照) より高いエネルギー

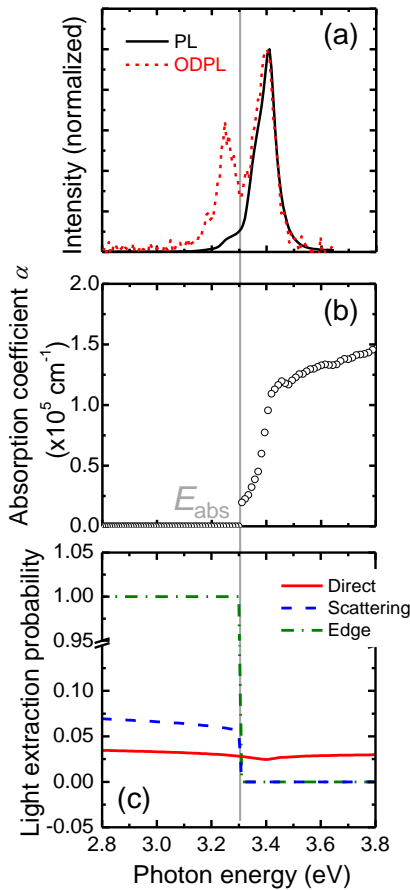


図2 GaNの(a) PLおよびODPLスペクトル、(b) 吸収スペクトル、(c) LEE (計算値)。

を持つ光子の一部は自己吸収される一方、吸収端エネルギーより低いエネルギーを持つ光子は自己吸収されず試料内を周回したのちに外部へ出てくる可能性があることから、LEEは強い光子エネルギー(波長)依存性を持つ(図2(c)参照)。したがって、計測可能な量である外部量子効率(EQE)から、結晶品質に直接かかわるIQEを直接知ることは、一般的に困難である。しかしながら、我々の提案する方法に依れば、簡便な方法でLEEのエネルギー依存性を補正することが可能であり、EQEからIQEを知ることが可能となる。このような方法を用いて、例えば図1に示したようなGaN結晶のIQEを評価すると、その値は強く励起条件に依存することが分かり、発光現象の定量は慎重に実験条件を整える必要があることが分かった(励起密度 60 W/cm^2 にてIQEが70%に達することに対し、励起密度 0.01 W/cm^2 ではIQEは9%)。特に、励起を弱くすればIQEがほぼ一定になることも見いだされたため、このようなIQE一定条件を選べば、ODPL法を活用することにより、IQEによる結晶間の直接比較ができると考えられる。

次に、発光増強に関する研究として、厚い井戸幅を持つAlGaIn量子井戸について、発光増強が可能な構造をシュレディンガ方程式およびポアソン方程式を連立させる数値計

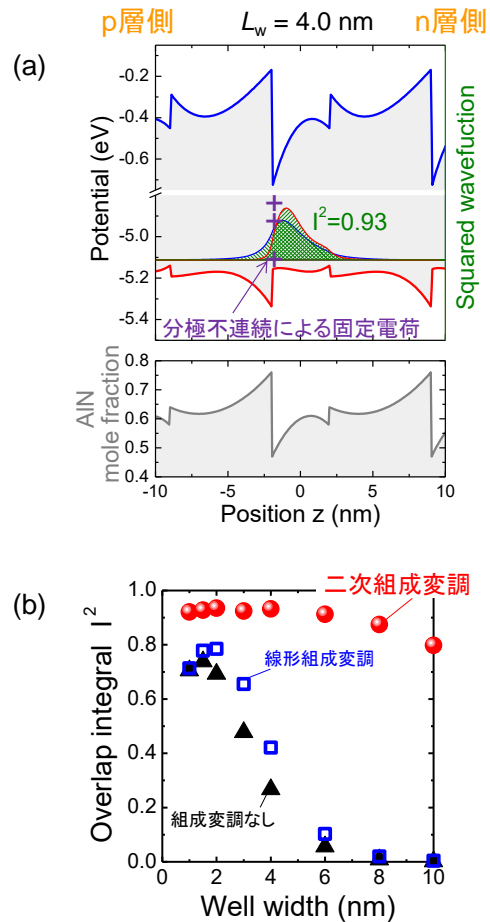


図3 (a) 数値計算によって最適化した厚い井戸幅を持つAlGaIn量子井戸の例、(b) 最適化量子井戸の井戸幅依存性。

算的手法により設計した。pおよびn層に挟まれたAlGaIn多重量子井戸(MQW)を仮定し、井戸層と障壁層のAlNモル分率(それぞれ x と y)を簡単な規則に従い変化させ、重なり積分値 I^2 が最も大きくなる条件を数値的に探索した。AlNモル分率変調の規則は、(i)各層内の位置に応じて x や y が線形に変化するもの(一次変調)、および、(ii)それらが2次関数的に変化するもの(二次変調)を、それぞれ試行した。また、実験事実としてIQEの向上が明らかであるため、井戸層と障壁層ともSiがドーピングされている。計算では、そのような外因性不純物と、組成変調によって生じる分極不連続にともなう固定電荷の、双方の静電ポテンシャルを考慮した。図3(a)は、井戸内の平均 x を0.6に固定した場合の、AlGaInMQWにおける I^2 の井戸幅依存性である。図3(b)には変調規則ごとに、最適した結果を載せているが、二次変調の結果は井戸幅が1nmから10nmの広い範囲で、90%以上の I^2 を達成している。このように、厚い井戸でも大きな I^2 を得ることができるので、発光ダイオードだけでなく、レーザダイオードの光閉じ込め係数の向上に寄与するものと考えられ

る。

次に、二次組成変調を行った *c* 面 AlGaIn QW (井戸幅 4.0 nm、試料 A) と参照用として組成変調がない QW (井戸幅 4.0 nm、試料 B) を有機金属気相成長法にて実際に成長させた。各試料の EQE を室温にて測定 (励起エネルギー: 5.06 eV、励起光 (パルス) 密度: 16 nJ/cm²/pulse) した結果、試料 A および B (発光ピーク波長 252~253 nm) にて各々 3.04% および 0.84% となった。このことから、確かに二次組成変調が発光を増強し、結果として飛躍的な発光効率の向上につながったと言える。

最後に、光ナノ構造を用いた発光現象の制御を目指して、構造作製に必要な半導体ドライプロセスの確立、ならびに深紫外~近赤外の広い波長範囲をカバーする顕微分光評価系を構築した。これらを用いて、上記で説明したような非発光が極めて抑制され、また、発光が増強された発光体の光物性をさらに高度に制御する研究を推進していく予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. K. Kojima, K. Furusawa, Y. Yamazaki, H. Miyake, K. Hiramatsu, and S. F. Chichibu, "A design strategy for achieving more than 90% of the overlap integral of electron and hole wavefunctions in high-AlN-mole-fraction Al_xGa_{1-x}N multiple quantum wells", *Appl. Phys. Express* 10, 015802 (2017).
査読有、DOI: 10.7567/APEX.10.015802
2. K. Kojima, T. Ohtomo, K. Ikemura, Y. Yamazaki, M. Saito, H. Ikeda, K. Fujito, and S. F. Chichibu, "Determination of absolute value of quantum efficiency of radiation in high quality GaN single crystals using an integrating sphere", *J. Appl. Phys.* 120, 015704 (2016).
査読有、DOI: 10.1063/1.4955139
3. K. Kojima, Y. Tsukada, E. Furukawa, M. Saito, Y. Mikawa, S. Kudo, H. Ikeda, K. Fujito, A. Uedono, and S. F. Chichibu, "Electronic and optical characteristics of an *m*-plane GaN single crystal grown by hydride vapor phase epitaxy on a GaN seed synthesized by the ammonothermal method using an acidic mineralizer", *Jpn. J. Appl. Phys.* 55, 05FA03 (2016).
査読有、DOI: 10.7567/JJAP.55.05FA03
4. K. Kojima, Y. Tsukada, E. Furukawa, M. Saito, Y. Mikawa, S. Kubo, H. Ikeda, K. Fujito, A. Uedono, and S. F. Chichibu, "Low resistivity *m*-plane freestanding GaN substrate with very low point-defect concentrations grown by hydride vapor phase epitaxy on a GaN seed crystal

synthesized by the ammonothermal method", *Appl. Phys. Express* 8, 095501 (2015).

査読有、DOI: 10.7567/APEX.8.095501

5. J. Upham, H. Inoue, Y. Tanaka, W. Stumpf, K. Kojima, T. Asano, and S. Noda, "Pulse capture without carrier absorption in dynamic Q photonic crystal nanocavities", *Optics Express* 22, 15459 (2014).
査読有、DOI: 10.1364/OE.22.015459

[学会発表] (計 41 件)

1. S. F. Chichibu, K. Kojima, and A. Uedono, "Origin of Shockley-Read-Hall nonradiative recombination centers in (Al,Ga)N", SPIE Photonics West 2017, San Francisco, USA, January (2017) (invited).
2. 小島一信, 齊藤真, 池田宏隆, 藤戸健史, 秩父重英, "窒化物半導体の絶対輻射量子効率計測", 第4回アライアンス若手研究交流会, 北海道大学, 札幌市, 2016年11月 (招待講演).
3. M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro, and S. F. Chichibu, "High Quality Bulk GaN Crystal Grown by Acidic Ammonothermal Method", IWN2016, Orland, USA, October (2016) (invited).
4. K. Kojima, T. Ohtomo, M. Saito, H. Ikeda, K. Fujito, and S. F. Chichibu, "Quantifying absolute value of quantum efficiency of radiation in high quality GaN single crystals", IWN2016, Orland, USA, October (2016).
5. K. Kojima, T. Harada, A. Tsukazaki, and S. F. Chichibu, "Quantification of absolute value of quantum efficiency of radiation in ZnO single crystals using an integrating sphere", IWZnO2016, Taipei, Taiwan, October (2016).
6. M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro, and S. F. Chichibu, "High Quality Bulk GaN Crystal Grown by Acidic Ammonothermal Method", ICCGE-18, Nagoya, Japan, August (2016).
7. M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro, and S. F. Chichibu, "High Quality Bulk GaN Crystal Grown by Acidic Ammonothermal Method", HTCMC-9 and GFMT2016, Toronto, Canada, June (2016) (invited).
8. Q. Bao, M. Saito, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro and S. F. Chichibu, "High Quality Bulk GaN Crystal Grown by Acidic Ammonothermal Method", ISCS 2016, Toyama, Japan, June (2016).
9. 齊藤真, 包全喜, 栗本浩平, 富田大輔, 小島一信, 鏡谷勇二, 茅野林造, 石黒徹, 秩父重

- 英, “酸性アモノサーマル法による高品位バルク GaN 結晶成長”, 第 145 回結晶工学分科会研究会, 名古屋大学, 名古屋市, 2016 年 6 月 (招待講演).
10. 秩父重英, 小島一信, 上殿明良, “時間分解ルミネッセンス法による GaN のキャリア寿命の評価”, 日本学術振興会先端ナノデバイス・材料テクノロジー第 151 委員会研究会, 早稲田大学, 新宿区, 2016 年 5 月 (招待講演).
 11. 包全喜, 齊藤真, 栗本浩平, 小島一信, 山崎芳樹, 富田大輔, 喬焜, 鏡谷勇二, 茅野林造, 石黒徹, 横山千昭, 秩父重英, “酸性アモノサーマル法による高品質 GaN 結晶の育成”, 化学工学会 第 81 年会, 関西大学, 吹田市, 2016 年 3 月.
 12. 栗本浩平, 包全喜, 齊藤真, 茅野林造, 小島一信, 石黒徹, 秩父重英, “酸性アモノサーマル法による高品位バルク GaN 結晶の高速成長”, 日本金属学会 2016 年春季大会, 東京理科大学, 葛飾区, 2016 年 3 月.
 13. 小島一信, 大友友美, 齊藤真, 池田宏隆, 藤戸健史, 秩父重英, “高品質 GaN 単結晶の絶対輻射量子効率測定”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 目黒区, 2016 年 3 月.
 14. 小島一信, 池田宏隆, 藤戸健史, 秩父重英, “高キャリア濃度 n 型 m 面 GaN 単結晶におけるホットキャリアの輻射再結合ダイナミクス”, 2016 年 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 目黒区, 2016 年 3 月.
 15. 小島一信, 秩父重英, “高品質窒化物半導体の光学特性”, 真空ナノエレクトロニクス 158 委員会 3 月定期研究会, 機械振興会館, 港区, 2016 年 3 月 (依頼講演).
 16. K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, and S. F. Chichibu, “Recombination dynamics of hot carriers excited in a highly-doped m-plane GaN single crystal”, PLMCN17, Nara, Japan, March (2016).
 17. M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro, and S. F. Chichibu, “High quality bulk GaN crystal grown by acidic ammonothermal method”, SPIE Photonics West 2016, OPTO, San Francisco, USA, February (2016) (invited).
 18. 秩父重英, 齊藤真, 包全喜, 栗本浩平, 富田大輔, 小島一信, 鏡谷勇二, 茅野林造, 石黒徹, “酸性鉍化剤を用いたアモノサーマル法によるバルク GaN 結晶成長”, 化学工学会反応工学部会 CVD 反応分科会主催第 24 回シンポジウム, 早稲田大学, 新宿区, 2015 年 12 月 (招待講演).
 19. K. Kojima, K. Furusawa, E. Furukawa, M. Saito, Y. Tsukada, Y. Mikawa, S. Kubo, H. Ikeda, K. Fujito, A. Uedono, and S. F. Chichibu, “Low resistivity m-plane freestanding GaN substrate with very low point defect concentration grown by hydride vapor phase epitaxy on an ammonothermal GaN seed crystal”, ISGN6, Hamamatsu, Japan, November (2015) (invited).
 20. 小島一信, 塚田悠介, 古川えりか, 齊藤真, 三川豊, 久保秀一, 池田宏隆, 藤戸健史, 上殿明良, 秩父重英, “酸性アモノサーマル法合成 GaN 種結晶上にハイドライド気相エピタキシャル成長させた m 面自立 GaN 基板の電気的・光学的特性”, 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), 大阪市立大学, 大阪市, 2015 年 11 月.
 21. M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro, and S. F. Chichibu, “High Quality Bulk GaN Crystal Grown by Acidic Ammonothermal Method”, ISGN6, Hamamatsu, Japan, November (2015).
 22. 齊藤真, 包全喜, 栗本浩平, 富田大輔, 小島一信, 鏡谷勇二, 茅野林造, 石黒徹, 秩父重英, “酸性アモノサーマル法による高品位 GaN 結晶成長”, 第 45 回結晶成長国内会議 (NCCG-45), 北海道大学, 札幌市, 2015 年 10 月 (招待講演).
 23. 齊藤真, 包全喜, 栗本浩平, 富田大輔, 小島一信, 山崎芳樹, 鏡谷勇二, 茅野林造, 石黒徹, 秩父重英, “酸性アモノサーマル法による高品位 GaN 高速育成”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2015 年 9 月.
 24. 小島一信, 齊藤真, 池田宏隆, 藤戸健史, 秩父重英, “高品質 GaN 単結晶における自由励起子とドナー束縛励起子の発光ダイナミクス”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2015 年 9 月.
 25. 小島一信, 塚田悠介, 古川えりか, 齊藤真, 三川豊, 久保秀一, 池田宏隆, 藤戸健史, 上殿明良, 秩父重英, “酸性アモノサーマル法合成 GaN 種結晶上にハイドライド気相エピタキシャル成長させた m 面自立 GaN 基板の電気的・光学的特性”, 2015 年 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋市, 2015 年 9 月.
 26. M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Yamazaki, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro, and S. F. Chichibu, “High Quality Bulk GaN Crystal Grown by Acidic Ammonothermal Method”, ICNS-11, Beijing, China, August (2015).
 27. S. F. Chichibu, M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Yamazaki, Y. Kagamitani, R. Kayano, and T. Ishiguro, “High-Quality Bulk Crystal Growth of GaN by the Ammonothermal Method in a Supercritical NH₃ Using Acidic Mineralizers”, Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices 2015 German-Japanese-Spanish Joint Workshop, Kyoto, Japan, July (2015)

- (invited).
28. 小島一信, 池田宏隆, 藤戸健史, 秩父重英, "自立 GaN 基板上 m 面 $Al_{1-x}In_xN$ エピタキシャル薄膜の発光特性(III)", 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 平塚市, 2015 年 3 月.
 29. 栗本浩平, 包全喜, 齊藤真, 富田大輔, 伊藤みずき, 山崎芳樹, 小島一信, 鏡谷勇二, 茅野林造, 石黒徹, 秩父重英, "酸性アモノサーマル法による GaN 結晶育成に及ぼす圧力の効果", 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 平塚市, 2015 年 3 月.
 30. 山崎芳樹, 古澤健太郎, 岩橋咲弥, 小島一信, 秩父重英, "水熱合成 ZnO ターゲットを用いた ZnO 薄膜のヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシー(3): 浅い不純物に関する考察", 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 平塚市, 2015 年 3 月.
 31. 岩橋咲弥, 山崎芳樹, 小島一信, 古澤健太郎, 上殿明良, 秩父重英, "水熱合成 ZnO ターゲットを用いた ZnO 薄膜のヘリコン波励起プラズマスパッタエピタキシー(4): 遷移金属不純物に関する考察", 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 平塚市, 2015 年 3 月.
 32. 加賀谷大樹, 山崎芳樹, 池田宏隆, 藤戸健史, 小島一信, 秩父重英, " m 面 $Al_{1-x}In_xN$ 薄膜の分光エリプソメトリーによる評価", 2015 年 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学, 平塚市, 2015 年 3 月.
 33. K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, and S. F. Chichibu, "Optical Polarization Properties of $Al_{1-x}In_xN$ Epilayers Grown on m -Plane Freestanding GaN Substrates", 2014 MRS Fall Meeting, Boston, U.S.A., December (2014).
 34. M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Yamazaki, Y. Kagamitani, R. Kayano, K. Qiao, T. Ishiguro, C. Yokoyama, and S. F. Chichibu, "High Quality and High Rate Bulk GaN Crystal Growth by Acidic Ammonothermal Method", 2014 MRS Fall Meeting, Boston, U.S.A., December (2014).
 35. Y. Yamazaki, K. Furusawa, K. Kojima, K. Nakahama, H. Miyake, K. Hiramatsu, and S. F. Chichibu, "A Strategy to Improve the Emission Efficiency of Si-Doped AlGaIn Multiple Quantum Wells by Out-of-Plane Compositional Modulations", 2014 MRS Fall Meeting, Boston, U.S.A., December (2014).
 36. K. Kojima, Y. Yamazaki, and S. F. Chichibu, "Optical characteristics of nonpolar and semipolar nitride heterostructures", IDGN2, Sendai, Japan, October (2014) (invited).
 37. 秩父重英, 石川陽一, 山崎芳樹, 小島一信, "フェムト秒集束パルス電子線を用いた特異構造界面の発光ダイナミクス解析", 2014 年秋季第 75 回応用物理学会学術講演会, 北海道大学, 札幌市, 2014 年 9 月 (招待講演).
 38. 小島一信, 池田宏隆, 藤戸健史, 秩父重英, " m 面 GaN 基板上に成長した $Al_{1-x}In_xN$ エピタキシャル薄膜の偏光特性", 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 札幌市, 2014 年 9 月.
 39. 齊藤真, 包全喜, 栗本浩平, 富田大輔, 小島一信, 山崎芳樹, 鏡谷勇二, 茅野林造, 喬焜, 石黒徹, 横山千昭, 秩父重英, "酸性アモノサーマル法による高品位 GaN 高速育成", 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 札幌市, 2014 年 9 月.
 40. 山崎芳樹, 古澤健太郎, 小島一信, 中濱和大, 三宅秀人, 平松和政, 秩父重英, "混晶組成変調による Si 添加 AlGaIn 多重量子井戸の発光効率向上", 2014 年 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 札幌市, 2014 年 9 月.
 41. K. Kojima, "Optical characteristics of deep ultraviolet nitride semiconductors with various crystal orientations", IUMRS2014, Fukuoka, Japan, August (2014) (invited).
- [図書] (計 0 件)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)
- [その他]
- なし
6. 研究組織
- (1)研究代表者
- 小島 一信 (KOJIMA, Kazunobu)
- 東北大学・多元物質科学研究所・准教授
- 研究者番号: 30534250