

Oral presentation | 13 Semiconductors : 13.8 Optical properties and light-emitting devices

📅 Tue. Sep 17, 2024 9:00 AM - 12:00 PM JST | Tue. Sep 17, 2024 12:00 AM - 3:00 AM UTC 🏨 C302
(Hotel Nikko 30F)

[17a-C302-1~12] 13.8 Optical properties and light-emitting devices

Kazunobu Kojima(Osaka Univ.), Jun Tatebayashi(Osaka Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[17a-C302-1]

Temperature-Dependent Cathodoluminescence Study on Cs_4PbBr_6

○Tetsuya Kubota¹, Sotatsu Yanagimoto¹, Hikaru Saito^{1,2}, Keiichirou Akiba^{1,3}, Ayumi Ishii⁴,
Takumi Sannomiya¹ (1.Tokyo Tech., 2.Kyushu Univ., 3.QST, 4.Waseda Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[17a-C302-2]

Relationship between sample sizes of lead halide perovskite $\text{CsPbBr}_3/\text{Cs}_4\text{PbBr}_6$
and external quantum efficiency

○Mitsuki Fukuda¹, Ichikawa Shuhei^{1,2}, Oki Takeru³, Yamada Yasuhiro³, Kojima Kazunobu¹
(1.Osaka Univ., 2.Research Center for UHVEM, Osaka Univ., 3.Chiba Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[17a-C302-3]

Enhancement of light absorption for below-bandgap excitation in $\text{CsPbBr}_3/\text{Cs}_4\text{PbBr}_6$

○Naoki Noborio¹, Mitsuki Fukuda¹, Shuhei Ichikawa^{1,2}, Kazunobu Kojima¹ (1.Osaka Univ.,
2.Research Center for UHVEM)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[17a-C302-4]

Solid-state optical refrigeration of halide perovskite quantum dots

○Yasuhiro Yamada¹, Takeru Oki¹, Takeshi Morita¹, Mitsuki Fukuda², Shuhei Ichikawa²,
Kazunobu Kojima², Takumi Yamada³, Yoshihiko Kanemitsu³ (1.Chiba Univ., 2.Osaka Univ.,
3.Kyoto Univ.)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[17a-C302-5]

ESR study on blue light-emitting electrochemical cells using multiple resonance thermally
activated fluorescent materials

○(M1)Yu Takahashi¹, Seira Yamaguchi^{1,2}, Rika Nanto¹, Mika Nakajima¹, Yukihiro Shimoi¹, Takuji
Hatakeyama³, Kazuhiro Marumoto^{1,2,4} (1.Dep. Mater. Sci., Univ. Tsukuba, 2.IQSST, Univ.
Tsukuba, 3.Kyoto Univ., 4.TREMS, Univ. Tsukuba)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[17a-C302-6]

Excitation-efficiency variation of luminescent centers in Eu-doped GaN induced by
anisotropic structures

○Hodaka Kubo¹, Shuhei Ichikawa^{1,2}, Yasufumi Fujiwara^{3,4,5}, Kazunobu Kojima¹ (1.Grad. Sch. Eng., Osaka Univ., 2.Research Center for UHVEM, Osaka Univ., 3.Res. Org. of Sci. and Tech. Ritsumeikan Univ., 4.ISIR, Osaka Univ., 5.R3 Institute of Newly-Emerging Science Design, Osaka Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[17a-C302-7]

Proposal of Eu-doped ZnO red light emitting diodes using AlN as an electron blocking layer

○Riko Masuda¹, Jun Tatebayashi¹, Shuhei Ichikawa^{1,2}, Masakazu Tane¹, Yasufumi Fujiwara¹ (1.Osaka Univ., 2.Research Center for UHVEM)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[17a-C302-8]

Optical characterization of energy transfer process in Tm,Yb-codoped ZnO nanowires

○(M2C)Masato Ida¹, Jun Tatebayashi¹, Shuhei Ichikawa¹, Masakazu Tane¹, Yasufumi Fujiwara¹ (1.Osaka Univ.)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[17a-C302-9]

Non-adiabatic Molecular Dynamics Calculations Combined with Time Series Machine Learning Methods for Analysis of Intermediate Level Carrier Dynamics in Er-doped GaAs

○Yuya Makino¹, Yusuke Oteki², Yoshitaka Okada², Tomah Sogabe¹ (1.Univ. of Electro-Comm, 2.RCAST, Univ. of Tokyo)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[17a-C302-10]

Fabrication of quantum dot spin-polarized light-emitting diode using GaO_x tunnel barrier

○(M2)SEUNGHYEOK SIM¹, Kohei Etou¹, Satoshi Hiura¹, Junichi Takayama¹, Agus Subagyo¹, Kazuhisa Sueoka¹, Akihiro Murayama¹ (1.IST, Hokkaido Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[17a-C302-11]

Polarization dependence of photocurrent at room temperature in a near-infrared photodiode using dilute nitride GaNAs

○Daiki Mineyama¹, Tatsuya Yano¹, Kohei Etou¹, Satoshi Hiura¹, Kaito Nakama², Hidetoshi Hashimoto², Keisuke Minehisa², Junichi Takayama¹, Agus Subagyo¹, Kazuhisa Sueoka¹, Fumitaro Ishikawa², Akihiro Murayama¹ (1.IST, Hokkaido Univ., 2.RCIQE, Hokkaido Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[17a-C302-12]

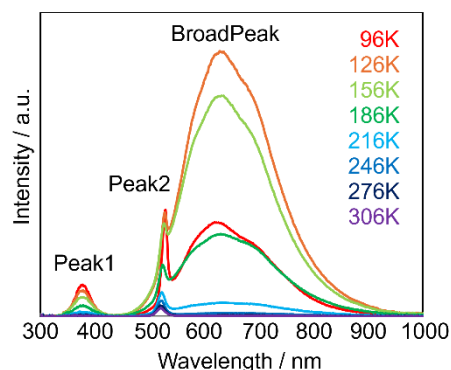
Magnetic field dependence of a near-infrared spin photodiode using dilute nitride GaNAs

○Tatsuya Yano¹, Daiki Mineyama¹, Kohei Etou¹, Kaito Nakama², Hideki Hashimoto², Keisuke Minehisa², Mineto Ogawa¹, Junichi Takayama¹, Humitarou Ishikawa², Tetsuya Uemura¹, Satoshi Hiura¹, Akihiro Murayama¹ (1.IST-Hokkaido Univ., 2.RCIQE-Hokkaido Univ.)

温度可変カソードルミネセンスによる Cs_4PbBr_6 の研究Temperature-Dependent Cathodoluminescence Study on Cs_4PbBr_6 東工大¹, 九大², 量研³, 早大⁴○久保田 哲矢¹, 柳本 宗達¹, 斉藤 光^{1,2}, 秋葉 圭一郎^{1,3}, 石井 あゆみ⁴, 三宮 工¹Tokyo Tech.¹, Kyushu Univ.², QST³, Waseda Univ.⁴○Tetsuya Kubota¹, Sotatsu Yanagimoto¹, Hikaru Saito^{1,2}, Keiichirou Akiba^{1,3}, Ayumi Ishii⁴,Takumi Sannomiya¹

E-mail: kubota.t.ak@m.titech.ac.jp

ハロゲン化金属ペロブスカイトの一種である Cs_4PbBr_6 は、高効率な発光と容易な合成法を両立し、次世代の発光材料として注目を集めている。しかしながら、この高効率発光のメカニズムはまだ完全には明らかにされておらず、引き続き多くの議論が続いている。 Cs_4PbBr_6 のバンドギャップエネルギーは 3.9eV であるのに対し、実際に観測されている発光は 2.3eV であり、バンド間遷移では説明できないものとなっている¹⁾。このため、観測された発光は中間準位によるものであると考えられている。これまでの議論では Cs_4PbBr_6 母相中に析出した CsPbBr_3 ナノ結晶が発光源となっていると考えられている。特に、ナノスケールの空間分解能を有するカソードルミネセンス (CL) 法を用いた研究により、 Cs_4PbBr_6 の母相中に緑色発光を示す微結晶の存在が確認され、 CsPbBr_3 の析出が示唆されている²⁾。しかし、これら微結晶の詳細やその発光メカニズムについてはまだ十分に理解されておらず、局所的な光学特性のさらなる解明が求められている。

**Fig. 1 Temperature Dependence of CL Spectra**

本研究では、走査透過電子顕微鏡を用いた CL 法によって、 Cs_4PbBr_6 粉末試料のナノスケール光学特性を評価した。CL スペクトルマッピングにより、母相から Cs_4PbBr_6 の発光および、微結晶から緑色発光が観測された。さらに、温度可変 TEM ホルダを用いて、96K から 306K の温度依存性評価を行った。発光ピークごとの CL 強度に注目すると、Peak1 および Peak2 は温度上昇に伴い単調に減少したが、BroadPeak は約 130K まで増加し、その後減少に転じた (Fig.1)。BroadPeak のこの傾向は、浅い準位にトラップされたキャリアが熱活性化され、発光準位に遷移したことが示唆される。さらに、微結晶に注目すると、発光波長と発光寿命は一般的な半導体材料とは逆の傾向を示したものの、緑色発光の候補である CsPbBr_3 量子ドットと同様の光学特性を示すことが明らかになった。

参考文献

1) Q. Akkerman, S. Park, E. Radicchi, F. Nunzi, E. Mosconi, F. Angelis, R. Brescia, P. Rastogi, M. Prato, L. Manna, Nano Lett. 17, 1924–1930, 2017

2) T. Kubota, S. Yanagimoto, H. Saito, K. Akiba, A. Ishii, T. Sannomiya, Appl. Phys. Express, 17, 015005, 2024

ハロゲン化鉛ペロブスカイト CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ の試料サイズと外部量子効率の関係

Relationship between sample sizes of lead halide perovskite CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ and external quantum efficiency

阪大院工¹, 阪大電顕センター², 千葉大理³

○福田 光希¹, 市川 修平^{1,2}, 大木 武³, 山田 泰裕³, 小島 一信¹

Osaka Univ.¹, Research Center for UHVEM, Osaka Univ.², Chiba Univ.³

○Mitsuki Fukuda¹, Shuhei Ichikawa^{1,2}, Takeru Oki³, Yasuhiro Yamada³, and Kazunobu Kojima¹

E-mail: mitsuki.fukuda@sfm.eei.eng.osaka-u.ac.jp

【はじめに】ハロゲン化鉛ペロブスカイトは、高い外部量子効率(EQE)や高い吸収係数を持つ半導体材料として、太陽電池や発光ダイオード(LED)などへの応用が期待されている。なかでも CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 複合材料は、Cs₄PbBr₆ 結晶内部に埋め込まれた CsPbBr₃ ナノ構造が高効率な緑色発光を示す。この材料では、励起光より高いエネルギーの光での発光であるアンチストークス発光が報告されており、半導体光学冷却への応用が期待されている[1]。光学冷却には 100%に近い EQE が必要であり、EQE は内部量子効率や光取り出し効率、フォトンリサイクリング効果などにより決定される物理量である。そのため、EQE を変化させる要因を特定することは極めて重要である。本研究では、試料サイズを変化させた CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ に対し全方位フォトルミネッセンス(ODPL)測定を実施した結果について報告する。

【実験条件と結果】CsBr 粉末と PbBr₂ 粉末をジメチルホルムアミド(DMF)と HBr 混合溶液に溶解させ、溶液温度降下法により数 mm の CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 結晶を作製した。つづいて、作製した試料を数 100 μm 程度に粉砕し、粉砕前後の試料に対して室温条件下で ODPL 測定を行った(励起エネルギー 2.76 eV、励起パワー密度 1.2 W/cm²)。Fig. 1 に粉砕前後の試料の光学顕微鏡像を、Fig. 2 にその ODPL スペクトルを示す。試料を粉砕することにより、発光ピークエネルギーが 0.01 eV 変化するとともに EQE が 15.1%変化することが明らかとなった。この結果は EQE を用いて CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 結晶を評価する際に、試料サイズを考慮することが重要であることを示唆している。

【謝辞】本研究の一部は、光科学技術研究振興財団、キヤノン財団研究助成の支援を受けたものです。

【参考文献】 [1]Y. Kajino *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **6**, L043001 (2022).

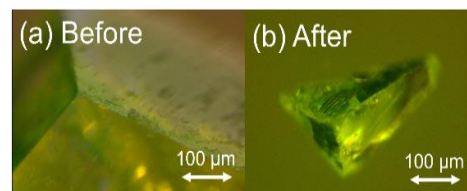


Fig. 2 Nomarski microscopy images of a CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ (a) before grinding and (b) after grinding.

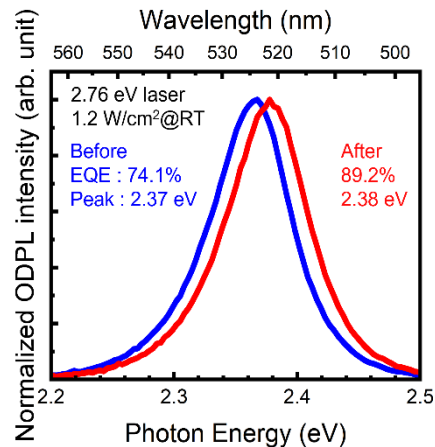


Fig. 1 ODPL spectra, EQEs and peak emission energies before and after sample grinding.

CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆におけるバンド端以下のエネルギーでの光吸収率の向上 Enhancement of light absorption for below-bandgap excitation in CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆

阪大院工¹, 阪大電顕センター², °登尾 尚紀¹, 福田 光希¹, 市川 修平^{1,2}, 小島 一信¹

Osaka Univ.¹, Research Center for UHVEM, Osaka Univ.²

°Naoki Noborio¹, Mitsuki Fukuda¹, Shuhei Ichikawa^{1,2}, and Kazunobu Kojima¹

E-mail: noaki.noborio@sfm.eei.eng.osaka-u.ac.jp

【はじめに】ハロゲン化鉛ペロブスカイト半導体は高い外部量子効率(EQE)や高い光吸収係数といった優れた光学特性から近年注目を集めており、様々な光デバイスへの応用が期待されている。なかでも CsPbBr₃ ナノ結晶が Cs₄PbBr₆ 結晶内部に埋め込まれた CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 複合材料は、高効率な緑色発光を示し、空気や湿気に対しても高い安定性をもつ。この材料系では、励起光よりも高いエネルギーの発光(アンチストークス発光)が明瞭に確認されており[1]、高効率にアンチストークス発光が生じることで、光を照射することで温度を下げる半導体光学冷却への応用が期待されている。これまでに我々は、アンチストークス発光の EQE が 100%であると仮定した場合、2.33 eV の光励起時に最も高い冷却効率が得られることを報告している[2]。アンチストークス発光に基づく光学冷却の現状の課題として、バンド端以下のエネルギー(例えば 2.33 eV)での光吸収率の低さが挙げられる。そこで、吸収率に比例して冷却能が決まることに着目して、本研究では結晶の大型化を行うことで吸収率の増大を試みたので報告する。

【実験方法・結果】CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 結晶の作製にあたり溶質として CsBr 粉末と PbBr₂ 粉末を、溶媒としてジメチルホルムアミド(DMF)と HBr の混合溶液を用いた。析出した結晶を 80 °C の DMF と HBr の混合溶液に溶解させて過飽和状態の溶液を準備した後、Fig.1 に示す種結晶を容器底に設置した。その後、80 °C から 30 °C まで温度を下げる工程を 2 度繰り返すことで、種結晶の 4 倍以上の質量をもつ大型結晶の作製に成功した。積分球を用いたフォトルミネッセンス(PL)測定(Fig. 2)から、得られた結晶は種結晶と同等の EQE を示し、結晶品質を維持しながら大型化していることが分かった。またサンプルの大型化に伴い、バンドギャップ以下のエネルギーの励起光(2.33 eV)の吸収率は 4.4% から 15.6%程度と約 4 倍増大することも明らかになった(Fig. 3)。以上の結果は、CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 複合結晶の大型化が、アンチストークス発光を利用した発光冷却に向けて、有用な要素技術となることを示している。

【謝辞】結晶の作製方法は千葉大学理学院の山田泰裕教授にご教授いただいたものです。本研究の一部は、光科学技術研究振興財団とキャノン財団研究助成の支援を受けたものです。

[1] Y. Kajino *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **6**, L043001 (2022). [2] 福田 他, 第 42 回電子材料シンポジウム, Th1-22 (2023).

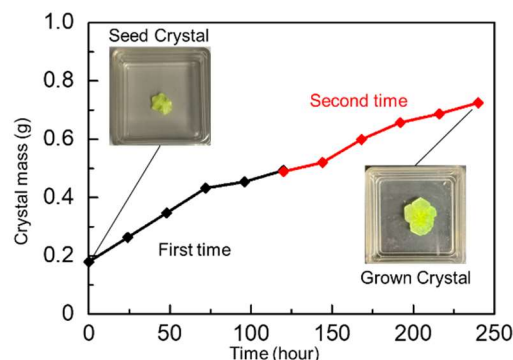


Fig.1 Crystal mass versus growth time. The insets are the photographs of the CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ crystals.

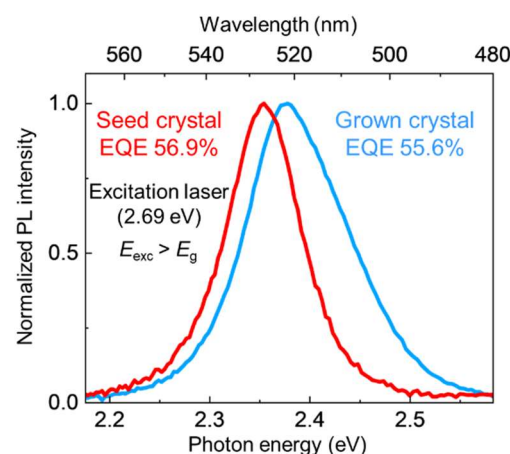


Fig.2 Normalized photoluminescence spectra of seed and grown crystals.

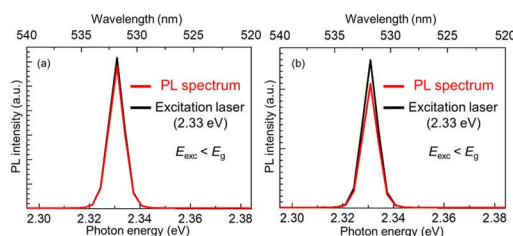


Fig.3 Light absorption of (a) a seed crystal and (b) a grown crystal.

ペロブスカイト量子ドットを用いた固体光学冷却

Solid-state optical refrigeration of halide perovskite quantum dots

千葉大院理¹, 阪大院工², 京大化研³

○山田 泰裕¹, 大木 武¹, 森田 剛¹, 福田 光希², 市川 修平², 小島 一信²,

山田 琢允³, 金光 義彦³

Chiba Univ.¹, Osaka Univ.², Kyoto Univ.³

○Yasuhiro Yamada¹, Takeru Oki¹, Takeshi Morita¹, Mitsuki Fukuda², Shuhei Ichikawa², Kazunobu

Kojima², Takumi Yamada³, Yoshihiko Kanemitsu³,

E-mail: yasuyamada@chiba-u.jp

固体光学冷却とは、アンチストークス(Anti-Stokes: AS)発光—励起光よりも高エネルギーの発光—を用いて固体材料を冷却する手法である。AS 発光の外部量子効率が 100%であれば、材料は内部エネルギーを失い、光の吸収と AS 放出の過程を経て冷却されることになる。AS 冷却は 1995 年に希土類イオンをドーブしたガラスで初めて実現されて以来活発に研究が行われてきた。

一方、極低温冷却や大きな冷却ゲインの実現を目指し、光吸収率の小さい希土類ではなく、高い吸収係数をもつ半導体での光学冷却の試みも多くなされてきた。しかし、100%近い高い発光効率を半導体で実現するのは希土類系と比べるとはるかに困難である。半導体光学冷却についてこれまでにいくつかの報告があるものの、実験結果の妥当性も含めて未だ議論が続いている。

ハロゲン化鉛ペロブスカイトは、光学冷却に必要な強い電子-フォノン相互作用と高い発光効率を兼ね備えており、有望な半導体光学冷却の候補物質である。特に、発光効率が高いペロブスカイト量子ドットでは実際に高効率な AS 発光が観測される[1,2]。しかし、量子ドットの発光量子効率は、高密度光励起下でオージェ再結合によって低下し、これが光冷却ゲインに（したがって光学冷却の実現性に）大きな制限を課すことになる。オージェ再結合が光学冷却に及ぼす影響を評価は光学冷却の実現に必要不可欠である。

そこで本研究では、高い発光効率と安定性を兼ね備えたドットインクリスタル型ペロブスカイト（ペロブスカイト量子ドットがホスト結晶に埋め込まれた複合構造）のオージェ再結合を研究し、最大光冷却ゲインとこれを与える励起光強度を定量的に推定した。さらに、この結果を用いて、光学冷却の実験を行った。発光スペクトルの形状から非接触かつ高精度な温度推定手法を確立し、実際に光励起による温度低下を観測した。講演では、オージェ再結合レートから推定された冷却ゲインの励起光強度依存性と、光学冷却実験の詳細について報告する。

本研究は、キャノン財団研究助成、JST-CREST (Grant No. JPMJCR21B4)、科研費 (Grant No. JP19H05465)の支援による。

[1] Y. Kajino, *et al.*, Phys. Rev. Mater. **6**, L043001 (2022). [2] Y. Yamada and Y. Kanemitsu, NPG Asia Mater. **14**, 48 (2022).

多重共鳴熱活性化蛍光材料を用いた青色発光電気化学セルの ESR 研究

ESR study on blue light-emitting electrochemical cells using multiple resonance thermally activated fluorescent materials

筑波大院数物¹, 筑波大量子スピン研², 京大院理³, 筑波大エネ物質科学セ⁴

○(M1) 高橋優羽¹, 山口世力^{1,2}, 南藤理花¹, 中島美華¹, 下位幸弘¹, 畠山琢次³, 丸本一弘^{1,2,4}

Dep. Mater. Sci., Univ. Tsukuba¹, IQSST, Univ. Tsukuba², Kyoto Univ.³, TREMS, Univ. Tsukuba⁴

°Yu Takahashi¹, Seira Yamaguchi^{1,2}, Rika Nanto¹, Mika Nakajima¹, Yukihiro Shimoi¹,

Takuji Hatakeyama³, Kazuhiro Marumoto^{1,2,4}

E-mail: s2420368@u.tsukuba.ac.jp, marumoto@ims.tsukuba.ac.jp

【序論】有機発光ダイオード (OLED) に代わる発光デバイスのひとつとして、単純な構造を持つ発光電気化学セル (LEC) がある。近年、LEC の性能向上のため、熱活性化遅延蛍光 (TADF) 材料を LEC に導入する試みがなされている。TADF の中でも、多重共鳴熱活性化遅延蛍光 (MR-TADF) 材料は、発光帯域幅の狭い発光が得られる材料として注目されている[1–3]。しかしながら、MR-TADF を用いた LEC の動作原理や電荷状態は詳しく調べられていない。本研究では、MR-TADF を用いた青色発光 LEC のさらなる高性能化の指針を得ることを目指し、電子スピン共鳴 (ESR) 法を用いて素子駆動中の電荷状態を非破壊かつ分子レベルの微視的な視点で研究した。

【実験】ゲスト材料として V-DABNA または ν -DABNA を有する 2 種類の LEC を作製した (Fig. 1)。ホスト材料には F8-arylester を用いた。透明陽極 ITO がパターンニングされた石英基板上に、発光層をスピンコート法により、Ag 陰極を真空蒸着法により成膜した。3 × 20 mm² 基板を用いた素子を窒素雰囲気下にて配線後、ESR 試料管内に封止し、室温で ESR 測定を行った。20 × 20 mm² 基板を用いた素子で電流–電圧–輝度 (J – V – L) 特性、EL スペクトルを測定した。

【結果】本研究で作製した 2 種類の LEC はどちらも青色発光を示し、 J – V – L 測定において電圧の増加に伴う輝度の増加と電気二重層の形成および電荷ドーピングや電荷注入に起因すると考えられる電流の増加が確認された。V-DABNA をゲスト材料に用いた LEC の ESR 測定では、印加電圧の増加とともに信号強度の増加が観測され (Fig. 2)、4 V から 5 V でスピン数 (N_{spin}) が大きく増加した (Fig. 3)。 N_{spin} の大幅な増加は、電荷ドーピングの進行によるものだと考えられる。密度汎関数理論計算による g 因子と実験で得られた g 因子の比較により、これらの信号は主にホスト材料に由来する信号だと考えられる。現在、信号の解析を進めており、詳細は当日報告する。

参考文献: [1] Y. Tanaka *et al.*, *Adv. Opt. Mater.* **11**, 2301119 (2023)., [2] T. Hatakeyama *et al.*, *Adv. Mater.* **28**, 2777 (2016)., [3] S. Oda *et al.*, *Adv. Sci.* **10**, 2205070 (2023).

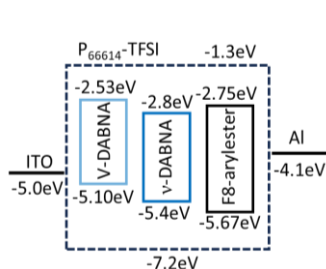


Fig. 1. Energy levels of the guest, host, and electrolyte materials used in this work.

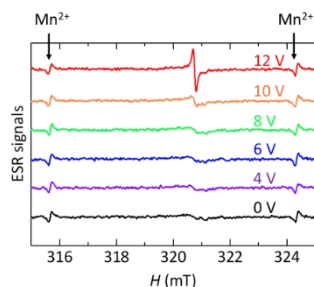


Fig. 2. Driving voltage dependence of the ESR spectra of the MR-TADF LEC with V-DABNA.

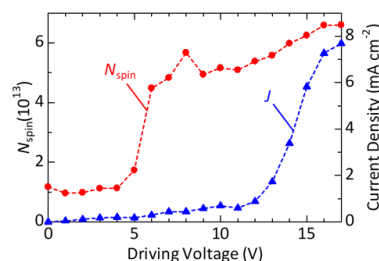


Fig. 3. Driving voltage dependence of the N_{spin} and the J of the MR-TADF LEC with V-DABNA.

異方的構造の導入による Eu 添加 GaN の発光中心の励起効率変化

Excitation-efficiency variation of luminescent centers in Eu-doped GaN induced by anisotropic structures

阪大院工¹, 阪大電顕センター², 立命館大総研³, 阪大産研⁴,

阪大エマージングサイエンスデザイン R³ センター⁵

○久保 穂高¹, 市川 修平^{1,2}, 藤原 康文³⁻⁵, 小島 一信¹

Grad. Sch. Eng., Osaka Univ.¹, Research Center for UHVEM, Osaka Univ.²,

Res. Org. of Sci. and Tech. Ritsumeikan Univ.³, ISIR, Osaka Univ.⁴,

R³ Institute of Newly-Emerging Science Design, Osaka Univ.⁵

○Hodaka Kubo¹, Shuhei Ichikawa^{1,2}, Yasufumi Fujiwara³⁻⁵, Kazunobu Kojima¹

E-mail: hodaka.kubo@sfm.eei.eng.osaka-u.ac.jp

【はじめに】Eu 添加 GaN(GaN:Eu) を発光層とした赤色発光ダイオード(LED)は、InGaN 青/緑色 LED とモノリシックに集積可能なことからマイクロ LED への応用が注目されている。GaN:Eu の発光は、添加された Eu イオンの $4f$ 殻内遷移に起因しており、その発光特性は Eu イオンの周辺局所構造に強く影響を受けることが知られている。有機金属気相成長(MOVPE)法によって成長した GaN:Eu には、主に 8 つの発光中心(OMVPE1-8)が存在し[1]、なかでも OMVPE7 は、低濃度でありながら極めて高い励起効率を示すことから、弱励起のエレクトロルミネッセンスにおいて支配的な発光中心となることが報告されている。Eu イオンの励起効率は周辺局所構造により変化するため、歪や不純物添加の影響を受ける。LED 素子をマイクロサイズにまで微細化した際には、素子側面の自由表面の露出により、表面体積比が増えるため、異方的な歪緩和が生じて Eu イオンの励起効率が増える可能性がある。一方で、微細構造と GaN:Eu の光学特性の相関に関する知見は、十分に得られていない現状にある。本研究では、GaN:Eu マイクロ LED を模した異方的構造を作製し、素子構造が光学特性へ与える影響を評価した。

【実験・結果】(0001) GaN 基板上に、MOVPE 法により AlInN 層を 300 nm 成長させた後、GaN:Eu 層を 200 nm 成長させた。その後、 $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ 方向(m 軸方向)および $\langle 1\bar{2}10 \rangle$ 方向(a 軸方向)に沿った長軸をもつサンプル M ($690 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$)とサンプル A ($50 \mu\text{m} \times 690 \mu\text{m}$)を、フォトリソグラフィと誘導結合プラズマ反応性イオンエッチングによりそれぞれ作製した。また、従来の等方的構造を持つサンプル I ($250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$)も同様にして作製した(Fig. 1)。作製した試料に対し、10 K 下でフォトルミネッセンス(PL)測定を行った。励起光源に Nd:YAG レーザの第 4 高調波(266 nm, 2 kHz)を用い、励起パワー密度を $0.8 \sim 202 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ で変化させて測定を行った(Fig. 2)。

上記 3 サンプルにおいて得られた、OMVPE7 起因の PL 強度の励起パワー依存性を Fig. 3 に示す。この際、発光強度を励起強度で除した値を縦軸にとることで、擬似的に OMVPE7 の発光効率の励起強度依存性を評価した。図より、サンプル A は $320 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 付近の励起強度において、最大効率を示すことが分かる。強励起下での発光効率の低下は、OMVPE7 の励起効率は高い一方でその濃度が低く、発光が飽和することに起因している。サンプル M、I では、明瞭な効率ピークは見られないものの、サンプル A と同様に強励起下で効率低下を示すことから、より弱励起側で発光飽和を示すことが予測される。同一基板のサンプル間で OMVPE7 濃度が不変であることを考慮すると、 a 軸方向を長軸にもつ異方的構造では、OMVPE7 の励起効率が低下することを示唆している。この結果は、マイクロ LED の素子設計において重要な知見となり得る。

[1] R. Wakamatsu *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JM03 (2013).

【謝辞】本研究は、JSPS 科研費 No. 23H05449 の支援を受けたものです。

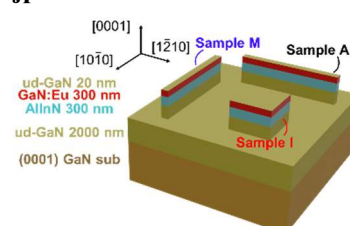


Fig.1 Schematic of three types of GaN:Eu-based micro structures.

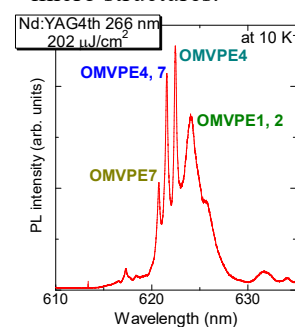


Fig. 2 Typical PL spectrum of GaN:Eu.

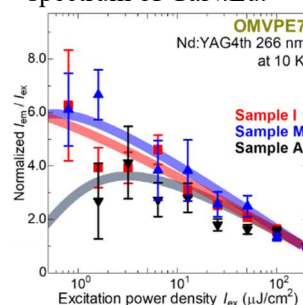


Fig. 3 Excitation power (I_{ex}) dependences of OMVPE7-related PL intensities (I_{em}), divided by I_{ex} , normalized at $202 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. The lines are to guide the eyes.

AlN を電子ブロック層に用いた Eu 添加 ZnO 赤色発光ダイオード構造の提案

Proposal of Eu-doped ZnO red light emitting diodes
using AlN as an electron blocking layer阪大院工¹, 阪大電顕センター²○増田 莉子¹, 館林 潤¹, 市川 修平^{1,2}, 多根 正和¹, 藤原 康文¹Osaka Univ.¹, Research Center for UHVEM, Osaka Univ.²○R. Masuda¹, J. Tatebayashi¹, S. Ichikawa^{1,2}, M. Tane¹ and Y. Fujiwara¹E-mail: riko.masuda@mat.eng.osaka-u.ac.jp

【はじめに】希土類添加半導体を用いた発光素子は、超狭帯域発光かつ周辺環境に対する発光波長安定性が高いことから注目を集めており、我々のグループはこれまでに、Eu 添加 GaN(GaN:Eu)を活性層とする赤色発光ダイオード(Light Emitting Diode: LED)の開発に世界に先駆けて成功している[1]。更に近年、希土類添加母体として大きな励起子結合エネルギーを有し(~60 meV)、GaN 同様直接遷移型のワイドバンドギャップ半導体である ZnO に着目し、これまでに、電子ブロック層(Electron Blocking Layer: EBL)として Al₂O₃ を用いた、p-GaN/Al₂O₃/Eu 添加 ZnO(ZnO:Eu)/n-ZnO ヘテロ接合型 LED を試作し、逆バイアス下において衝突励起に起因する Eu 発光を観測することに成功している[3]。しかしながら、p-GaN 上に成膜した Al₂O₃ は、格子不整合の大きさから非晶質になっており、Al₂O₃ 上の ZnO:Eu の結晶性や発光特性が低下する結果、順バイアス下での ZnO 母体からのエネルギー輸送に起因した Eu 発光強度が弱いことが課題であった。今回、GaN や ZnO との格子不整合が小さく、且つ同様のウルツ鉱型結晶構造をもつ AlN を EBL として用い、ZnO:Eu を活性層に用いた p-GaN/AlN/ZnO:Eu/n-ZnO ヘテロ接合型 LED 構造を提案するとともに、AlN 上 ZnO 膜および ZnO:Eu 層の光学・構造特性を評価したのでこれを報告する。

【実験方法と結果】本研究で提案する試料構造を図(a)に示す。本研究では、(0001)サファイア基板上に、有機金属気相エピタキシャル法により低温成長(Low-temperature: LT)した GaN 上に、無添加 GaN(ud-GaN)、p-GaN および AlN を成長した AlN テンプレート基板を用意した。その後、スパッタリング援用有機金属化学気相堆積法により ZnO および ZnO:Eu 層を成膜した。原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope: AFM)によって表面を観察した結果、ZnO 成長温度上昇に伴い表面平坦性が向上した(図(b))。また、X 線回折測定によって AlN テンプレート上に成膜した ZnO 膜の結晶性の評価を行った結果、GaN に対し ZnO の歪が緩和していることが確認された(図(c))。この結果をもとに ZnO:Eu 膜を AlN 上に成膜し、He-Cd レーザを用いて室温フォトルミネッセンス測定を行った結果、表面平坦性を保ちながら、これまで報告してきた Al₂O₃ 上 ZnO:Eu[3]と比して遜色のない発光が得られた(図(d))。

【謝辞】本研究は科研費「特別推進 (No.18H05212)」、「基盤(A) (No.23H00185)」、「基盤(S) (No.23H05449)」およびキャノン財団の支援を受けた。

【参考文献】[1] A. Nishikawa, Y. Fujiwara *et al.*, *Appl. Phys. Exp.* **2**, 071004 (2009). [2] T. Tsuji, Y. Fujiwara *et al.*, *J. Lumines.* **132**, 3125 (2012). [3] J. Tatebayashi *et al.*, *ECS J. of Solid State Sci. and Technol.* **12**, 076017 (2023).

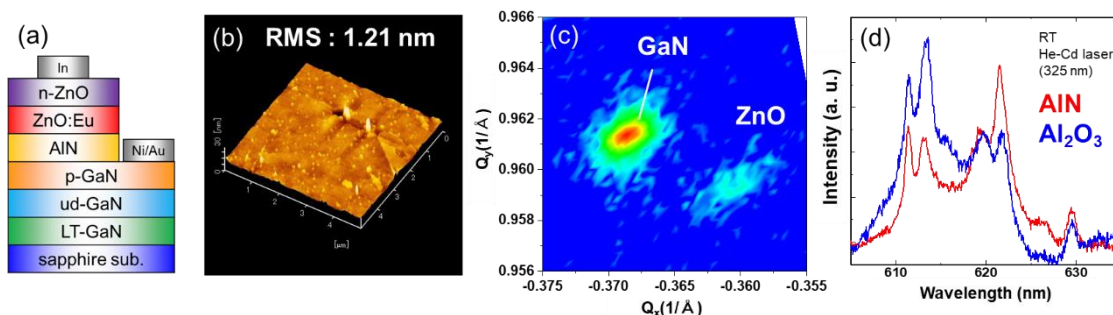


Figure (a) Schematic of the proposed n-ZnO/ZnO(or ZnO:Eu)/AlN/p-GaN heterostructure LED. (b) AFM image of the ZnO film on AlN/p-GaN templates. (c) Reciprocal space map of GaN and ZnO layers. (d) Photoluminescence spectrum of ZnO:Eu on AlN and Al₂O₃ at RT.

Tm,Yb 共添加 ZnO ナノワイヤにおけるエネルギー輸送プロセス評価 Optical characterization of energy transfer process in Tm,Yb-codoped ZnO nanowires

阪大院工 °井田 聖人, 館林 潤, 市川 修平, 多根 正和, 藤原 康文

Osaka Univ. °M. Ida, J. Tatebayashi, S. Ichikawa, M. Tane, and Y. Fujiwara

E-mail: masato.ida@mat.eng.osaka-u.ac.jp

[はじめに] 近年、Si 太陽電池のエネルギー変換効率向上のための方法として、希土類イオン間のダウンコンバージョン (Down Conversion: DC)による波長変換が注目されている[1]。DC とは、1つの高エネルギー光子を複数の低エネルギー光子へ分割する波長変換の一種である。実際に希土類イオン間の DC による 170%以上の内部量子効率が報告されている[2]が、希土類イオンの光吸収係数が低く、吸収できる波長帯も狭いために実用化には至っていない。我々のグループは、紫外領域において高い光吸収係数を示す半導体 ZnO を添加母体とした高効率な希土類イオンへのエネルギー輸送による DC を目指している。これまでに、Tm,Yb 共添加 ZnO(ZnO:Tm,Yb)を成膜する下地にナノワイヤ構造を導入し、DC に必要な Tm の $^1G_4 \rightarrow ^3H_6$ 遷移に起因する 490 nm 付近の発光の観測に成功した[3]。さらに、Yb の複数ある発光センターのうち Tm から Yb へのエネルギー輸送に寄与し得る発光センターの同定に成功した[4]。今回、希土類イオン間のエネルギー輸送機構を詳細に解明すべく、Yb から Tm へのエネルギー輸送過程の評価を行ったのでこれを報告する。

[実験・結果] サファイア基板に無添加 ZnO ナノワイヤ層を形成後、我々が独自開発したスパッタリング援用 MOCVD 法にて ZnO:Tm,Yb の結晶成長を行った。Tm,Yb の添加比率を変化させた試料に対し、He-Cd レーザ (波長 325 nm)を用いて ZnO 母体を励起した際、および半導体レーザ (波長 980 nm)を用いて Yb を励起した際の Tm 発光について低温フォトルミネッセンス (Photoluminescence: PL)測定を行った結果をそれぞれ Fig. 1(a)および(b)に示す。Tm を添加した試料を母体励起した場合、ZnO 母体からのエネルギー輸送により Tm の発光が 490 nm、800 nm 付近に観測されている。一方 Yb を励起した場合、Tm および Yb を単独添加した試料では Tm 発光が観測されなかったが、Tm,Yb を共添加した試料では Tm 発光が観測された。これらの結果は Fig. (c)に示すような Yb から Tm へのエネルギー輸送過程、つまりアップコンバージョンが生じていることを示しており、MOCVD 法で形成した ZnO:Tm,Yb においては世界で初めての立証となる。

[謝辞] 本研究は科研費「基盤(B) (No.24K00925)」「特別推進 (No.18H05212)」、「基盤(A) (No.23H00185)」、「基盤(S) (No.23H05449)」、キャンノン財団の支援を受けた。

[参考文献] [1] T. Trupke *et al.*, J. Appl. Phys. **92**, 1168 (2002). [2] J. Li, J. Zhang *et al.*, J. Alloy. Compd. **99**, 583 (2014).

[3] J. Tatebayashi *et al.*, J. Crys. Growth **503**, 13 (2018). [4] J. Tatebayashi *et al.*, J. Soc. Mater. Sci. **71**, 811 (2022).

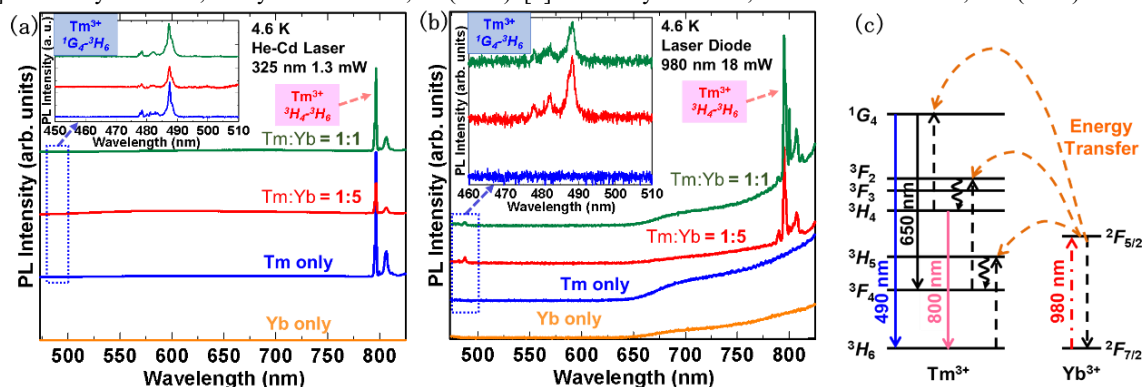


Fig. 1 PL spectra at 4.6 K excited by (a) a He-Cd laser and (b) a laser diode. (c) Up conversion process from Yb³⁺ to Tm³⁺.

時系列機械学習手法を融合した非断熱分子動力学計算による Er ドープした GaAs の中間準位キャリアダイナミクス解析

Non-adiabatic Molecular Dynamics Calculations Combined with Time Series Machine Learning

Methods for Analysis of Intermediate Level Carrier Dynamics in Er-doped GaAs

¹ 電通大 i-PERC&基盤理工, ² 東大先端研

°(M2) 牧野 侑矢¹, 樗木 悠亮², 岡田 至崇², 曾我部 東馬¹

¹Univ. of Electro-Comm, ²RCAST, Univ. of Tokyo

E-mail : sogabe@uec.ac.jp

はじめに 太陽電池や発光ダイオード、センサーなど様々なデバイスにおいて、非断熱分子動力学 (NAMD) は材料におけるキャリアの遷移プロセスを知るために非常に有用なシミュレーション方法である。しかし、計算には分子動力学軌道に沿った *ab initio* 電子構造計算によって得られる励起エネルギー及び非断熱カップリング(NAC)が必要であり、十分な時間スケールにかかるコストは非常に高くなっている[1]。本研究では、Fig.1 のようなバルクの(a)GaAs 及びそこに Er をドープした(b)Ga_{0.75}Er_{0.25}As に対して NAMD シミュレーションの励起エネルギー及び NAC の予測を行う。第一原理計算を用いて生成された、励起エネルギー及び NAC をサンプリングし、ニューラルネットワークでデータを補完することによって大幅な計算コストの削減を目指す。

実験結果 Fig.2(a), (b)は GaAs に対して CP2K を使用して得られた励起エネルギーと NAC の時間変化を示している。また、そのデータから 8 ステップごとにサンプリングされたデータを用いて、Bi-LSTM によって補完された結果も合わせて示している。得られた励起エネルギー、NAC は複数回反復された。Fig.2(c)は、Libra に実装されているデコヒーレンス誘起表面ホッピング法(DISH)法を使用して実行された NAMD シミュレーションの結果から得られた基底状態における占有率の時間変化である。結果から、補完されたデータは *ab initio* 計算に比べてピーク値が過小評価され、その影響から基底状態の占有率変化が緩やかになっていると考えられる。今後、Transformer を用いた時系列データ補完のモデルを作成し、計算速度と精度への影響について当日報告する。

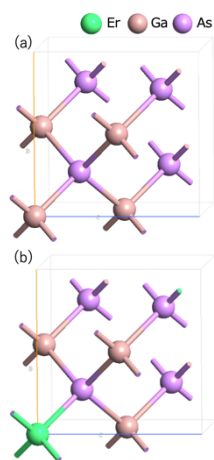


Fig.1 (a)GaAs(b)Ga_{0.75}Er_{0.25}As の構造

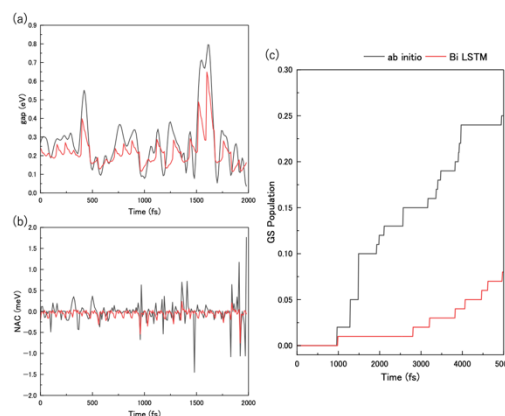


Fig.2 (a) *ab initio* 計算と Bi LSTM による励起エネルギー

(b)NAC(c)NAMD 計算によって得られた基底状態の

[1] Wang, Bipeng, et al. *The Journal of Physical Chemistry Letters* 14.31 (2023): 7092-7099

GaO_x トンネルバリアを持つ量子ドットスピン偏極発光ダイオードの作製

Fabrication of quantum dot spin-polarized light-emitting diode

using GaO_x tunnel barrier

北大院情報科学 ○沈 承赫, 江藤 亘平, 樋浦 諭志, 高山 純一, スバギョ アグス,
末岡 和久, 村山 明宏

Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido Univ.

○S. Sim, K. Etou, S. Hiura, J. Takayama, A. Subagyo, K. Sueoka, and A. Murayama

E-mail: sizu@eis.hokudai.ac.jp

近年、IoT および AI の発展により情報処理に必要な演算量が増加し、情報システムの消費電力増大に伴う電力不足が懸念されている。そこで、電力消費なく情報を保持できる電子スピンと、熱損失なく情報を伝送できる光を用いた光電スピン情報変換基盤の実現が期待されている。電子スピンの光変換には、強磁性体電極から電子スピンを注入し光学活性層で発光再結合させるスピン偏極発光ダイオード(スピン LED)が適している[1]。スピン注入トンネルバリアにはこれまで MgO が主に用いられてきたが、MgO と GaAs の界面には高密度の界面準位が存在することが知られている[2]。そこで、新たなトンネルバリア材料として GaO_x に着目した。GaO_x と GaAs の界面準位密度は MgO と比べて 2 桁以上低く[3]、スピン LED のトンネルバリアとして有望である。しかし、GaO_x を用いたスピン LED は 2 K という極低温での評価に留まっている[4]。そこで本研究では、GaO_x をスピン注入トンネルバリア、優れた光学特性とスピン特性を持つ量子ドット(QD)を光学活性層に用いたスピン LED を作製し、QD からの電流注入円偏光発光(EL)特性を評価した。

図 1(a)に作製したスピン LED の模式図を示す。p-GaAs(100)基板上に In_{0.5}Ga_{0.5}As QD を光学活性層とする LED 構造を分子線エピタキシー法により作製した。その後、超高真空搬送トンネルを介して別のチャンバーへ試料を移し膜厚 2.5 nm の GaO_x を電子ビーム蒸着により室温で成膜した。強磁性体 Fe と Au から成る電極層は酸素雰囲気下での加熱処理を施した後に電子ビーム蒸着法により成膜した。図 1(b),(c)に+3.0 T の印加磁場下における 15 K と 70 K での円偏光 EL スペクトルと円偏光度(CPD)スペクトルを示す。ここで、CPD は右(左)回り円偏光 EL の強度比であり、QD の発光準位における電子スピン偏極率を反映する。15 K では 25%のスピン注入効率に相当する +10 %の EL-CPD を観測した。一方で、70 K では EL 強度が大きく低下したとともに CPD がほぼ 0%であった。CPD の減少は温度上昇に伴う半導体中でのスピン緩和が影響していると考えられる。

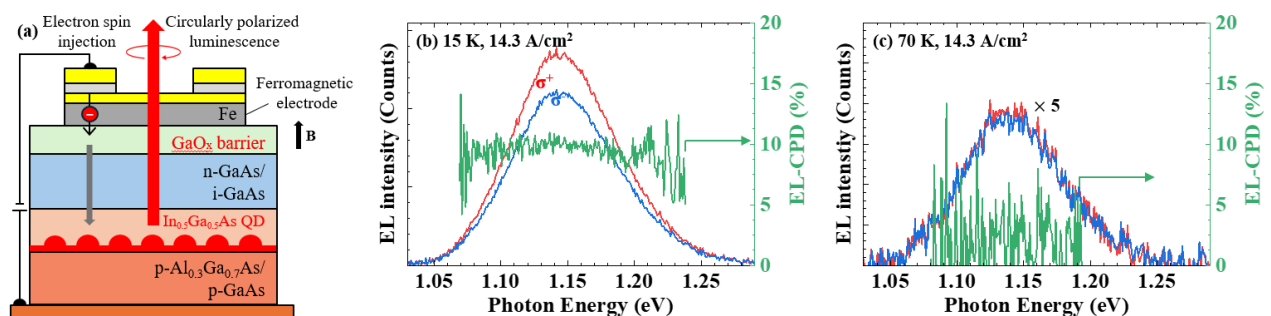


Fig. 1 (a) Schematic illustration of quantum dot spin-polarized emitting diode using GaO_x tunnel barrier. Circularly polarized EL spectra and corresponding EL-CPD spectra measured at (b)15 K and (c) 70 K, with a current density of 14.3 A/cm² under a magnetic field of +3.0 T perpendicular to the sample plane.

References:

- [1] K. Etou et al., Phys. Rev. Appl. **16**, 014034 (2021). [2] M. Passlack et al., Appl. Phys. Lett. **68**, 3605 (1996). [3] H. Saito et al., Appl. Phys. Express **2**, 083003 (2009). [4] H. Saito et al., Appl. Phys. Lett. **96**, 012501 (2010).

希薄窒化 GaNAs を用いた近赤外フォトダイオードにおける 室温での光電流の偏光依存性

Polarization dependence of photocurrent at room temperature in a near-infrared photodiode using dilute nitride GaNAs

北大院情報科学¹, 北大量子集積² ○峯山 大輝¹, 矢野 龍弥¹, 江藤 亘平¹, 樋浦 諭志¹,
中間 海音², 橋本 英季², 峰久 恵輔², 高山 純一¹, スバギョ アグス¹, 末岡 和久¹,
石川 史太郎², 村山 明宏¹

IST, Hokkaido Univ.¹, RCIQE, Hokkaido Univ.²,

○D. Mineyama¹, T. Yano¹, K. Etou¹, S. Hiura¹, K. Nakama², H. Hashimoto², K. Minehisa²,

J. Takayama¹, A. Subagy¹, K. Sueoka¹, F. Ishikawa², and A. Murayama¹

E-mail: mineyama.daiki.i0@elms.hokudai.ac.jp

光の偏光状態を高速変調するスピン偏極レーザーは、従来の強度変調レーザーと比べて低消費電力かつ高速に動作するため光通信への応用が期待されている[1]。このような偏光情報通信の実現には偏光状態を検出する受光素子が必要不可欠であり、最近では希薄窒化 GaNAs を用いたフォトコンダクタが開発され、900 nm 以下のレーザー光の偏光状態を検出することに成功している[2]。この方法では、窒素添加によって生じる深い局在準位を介したスピン依存再結合(SDR)効果によって、直線偏光励起下と円偏光励起下の伝導電子数に差が生じることを利用している。しかし、実用を見据えた低い暗電流や雑音の観点ではフォトダイオード型の方が望ましく、また、より広い波長帯域で動作する必要がある。そこで、本研究では GaNAs を光学活性層に用いた pin 型フォトダイオードを作製し、1075 nm の近赤外域で入射光の偏光状態に依存した光電流特性を調べた。

試料構造を図 1 に示す。測定は光チョッパーと光弾性変調器を用いて試料に入射するレーザー光の強度と偏光状態を異なる周波数で変調し、偏光状態に依存しない光電流 I_{photo} と依存する光電流 Δi をロックイン検出した。測定結果を図 2 に示す。ここで、偏光状態の識別性能指標として、 $F = \Delta i / (2I_{photo})$ と定義した。 F 値は試料へ入射するレーザー光の強度の増加とともに向上し、負バイアスの増加に伴って減少した。 F 値の系統的な変化が観測されたことから GaNAs 系フォトダイオードによる偏光検出に成功したと言える。当日の発表では F 値の変化について議論する。

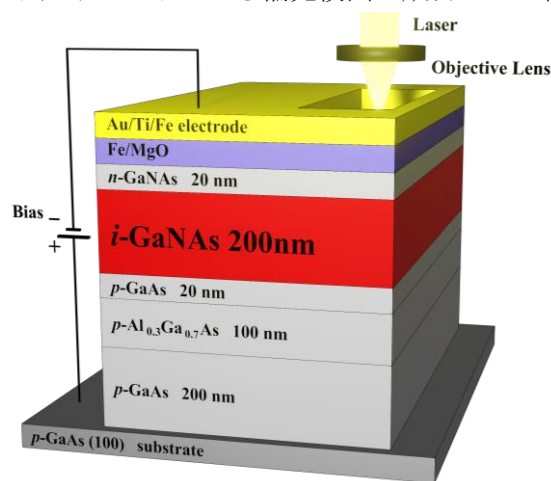


Fig. 1 Schematic illustration of GaNAs photodiode.

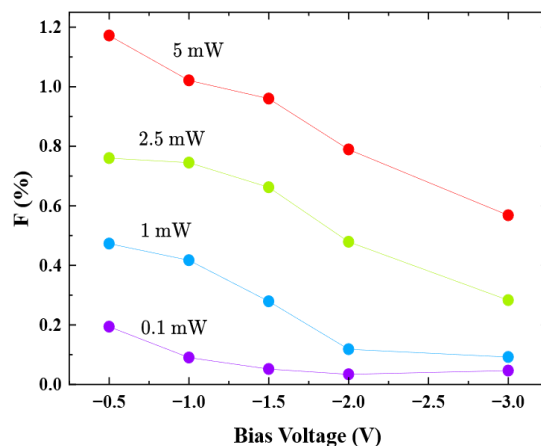


Fig. 2 Bias voltage dependence of F values measured with laser powers of 0.1, 1, 2.5, and 5 mW at room temperature.

References:

- [1] M. Lindemann et al., Nature **568**, 212 (2019). [2] R. Joshya et al., Adv. Funct. Mater. **31**, 1900684 (2021).

希薄窒化 GaNAs を用いた近赤外スピン受光ダイオードの磁場特性

Magnetic field dependence of a near-infrared spin photodiode using dilute nitride GaNAs

北大院情報科学¹, 北大量子集積² ○矢野 龍弥¹, 峯山 大輝¹, 江藤 亘平¹, 中間 海音², 橋本 英季², 峰久 恵輔², 小川 峰登¹, 高山 純一¹, 石川 史太郎², 植村 哲也¹, 樋浦 諭志¹, 村山 明宏¹

IST, Hokkaido Univ.¹, RCIQE, Hokkaido Univ.²,

○T. Yano¹, D. Mineyama¹, K. Etou¹, K. Nakama², H. Hashimoto², K. Minehisa², M. Ogawa¹, J. Takayama¹, F. Ishikawa², T. Uemura¹, S. Hiura¹, and A. Murayama¹

E-mail: yano.tatsuya.u9@elms.hokudai.ac.jp

近年の情報処理に係る消費電力低減の観点から、不揮発性の電子スピンにより情報を保持し、情報伝送に光のスピン状態である円偏光を利用する光電スピン融合技術が注目されている[1]。円偏光情報の送受信を実現するには、左右円偏光を光電流で電氣的に検出するスピン受光ダイオード(スピン PD)が必須である[2]。現状のスピン PD では、受光層で生成されたスピン偏極電子が半導体スピン輸送層を介して強磁性体電極に到達するまでにスピン偏極が緩和してしまうという課題がある。そこで、特異な光スピン特性を持つ希薄窒化 GaNAs に着目した。GaNAs は近赤外領域に受光感度を持ち、バンドギャップ中の深い局在準位が持つスピントラップ効果により伝導電子のスピン偏極を室温で効率的に増幅できる[3]。しかし、スピン PD を構成する半導体層の大部分に GaNAs を用いた報告例はない。そこで、本研究では受光層およびスピン輸送層に GaNAs を用いたスピン PD を作製し、室温かつ磁場中での円偏光依存光電流特性を評価した。

図 1 に作製したスピン PD の試料構造を示す。 $i\text{-GaN}_{0.02}\text{As}_{0.98}$ と $n\text{-GaN}_{0.02}\text{As}_{0.98}$ を含む半導体層は分子線エピタキシー法により作製し、MgO トンネル酸化膜は電子ビーム蒸着法、CoFeB/Ta から成る電極層はスパッタ法により作製した。光弾性変調器を用いて円偏光を変調したレーザー光をスピン PD に入射し、右回り・左回り円偏光受光時の光電流の差に対応する $\Delta i = i_{\sigma+} - i_{\sigma-}$ をロックイン検出した。入射光波長は $\text{GaN}_{0.02}\text{As}_{0.98}$ のバンドギャップに相当する 1075 nm に設定した。図 2 に -0.4 V で得られた Δi の磁場依存性を示す。0~0.2 T において、 Δi が減少する特異な振る舞いが観測された。これは印加磁場方向と逆向きに働く有効核磁場が影響していると考えられる[4]。0.2 T 以上では、磁場の増加とともに Δi が単調に増加した。これは、CoFeB の磁化配向に伴うスピン検出効率の増加および磁場印加により半導体層でのスピン緩和が抑制されたためと考えられる。

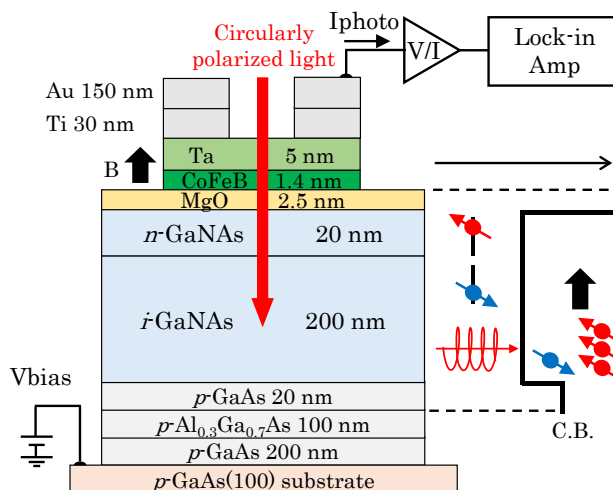


Fig. 1 Schematic illustration of a near-infrared spin photodiode using dilute nitride GaNAs.

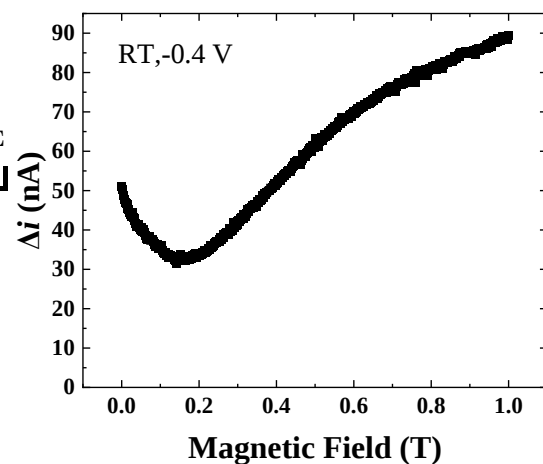


Fig. 2 Δi ($i_{\sigma+} - i_{\sigma-}$) as a function of magnetic field with a bias voltage of -0.4 V at room temperature.

References:

- [1] P. Dainone et al., Nature **627**, 783 (2024). [2] R. C. Roca et al., Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 04CN05 (2017). [3] Y. Huang et al., Nat. Photonics **15**, 475 (2021). [4] R. S. Joshya et al., Adv. Funct. Mater. **31**, 1900684 (2021).