

Oral presentation | 7 Beam Technology and Nanofabrication : 7.2 Applications and technologies of electron beams

📅 Tue. Sep 17, 2024 10:00 AM - 11:30 AM JST | Tue. Sep 17, 2024 1:00 AM - 2:30 AM UTC 🏢 D63
(Bandaijima Bldg)

[17a-D63-1~6] 7.2 Applications and technologies of electron beams

Hidekazu Murata(Meijo Univ.)

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

[17a-D63-1]

[The 56th Young Scientist Presentation Award Speech] Improvement of Monochromaticity Using Electron Diffraction at Single- and Multi-Layer Graphene in Graphene-Insulator-Semiconductor-Structured Electron Source

○Takao Koichi^{1,2}, Shogo Kawashima¹, Hiroshi Miyake¹, Satoshi Abo¹, Fujio Wakaya¹, Masayoshi Nagao², Katsuhisa Murakami² (1.Osaka Univ., 2.AIST)

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

[17a-D63-2]

Interference Effect of Incident Electron in Layered Insulator with Applied Electric Field

Shogo Kawashima¹, ○Takao Koichi^{1,2}, Satoshi Abo¹, Fujio Wakaya¹, Masayoshi Nagao², Katsuhisa Murakami² (1.Osaka Univ., 2.AIST)

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

[17a-D63-3]

Fabrication Process for Planar-type Electron Emission Devices Using Graphene/h-BN/Ni-Sapphire Structure

○(M2)Ren Mutsukawa^{1,3}, Yoshinori Takao¹, Masaya Yamamoto^{2,3}, Yoichiro Neo², Hiromasa Murata³, Masayoshi Nagao³, Katsuhisa Murakami³ (1.YNU, 2.Shizuoka Univ., 3.AIST)

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

[17a-D63-4]

Energy Analysis of electrons emitted from graphene/p-Si Schottky junction electron emission devices

○Katsuhisa Murakami¹, Hiromasa Murata¹, Masayoshi Nagao¹ (1.AIST)

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

[17a-D63-5]

Comparative studies of electron emission characterization of InGaN photocathodes with different alkali metal

○(D)Mikiya Idei¹, Daiki Sato², Atsushi Koizumi², Tomohiro Nishitani^{2,3}, Yoshio Honda³, Hiroshi Amano³ (1.Nagoya Univ., 2.Photo electron Soul, 3.IMaSS Nagoya Univ.)

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

[17a-D63-6]

Development of FEL with deep-ultraviolet phosphors made from hydrothermal synthesis

○(M2)Masahiro Okada¹, Neo Yoichiro^{1,2}, Moon Jonghyun^{1,2}, Matsumoto Takahiro³ (1.Shizuoka Univ., 2.RIE Shizuoka Univ., 3.Nagoya City Univ.)

Graphene-Insulator-Semiconductor 構造電子源中の 単層および多層グラフェンでの電子回折を利用した単色性の向上 Improvement of Monochromaticity Using Electron Diffraction at Single- and Multi-Layer Graphene in Graphene-Insulator-Semiconductor-Structured Electron Source

阪大基礎工¹, 産総研², ○小市 崇央^{1,2}, 河嶋 祥吾¹, 三宅 広士¹, 阿保 智¹, 若家 富士男¹,
長尾 昌善², 村上 勝久²

Osaka Univ.¹, AIST², ○Takao Koichi^{1,2}, Shogo Kawashima¹, Hiroshi Miyake¹, Satoshi Abo¹,
Fujio Wakaya¹, Masayoshi Nagao², Katsuhisa Murakami²

E-mail: u264659i@ecs.osaka-u.ac.jp

Graphene-Insulator-Semiconductor (GIS) 構造の電子源は、48.5%の電子放出効率を達成し [1], タングステン冷陰極のエネルギー幅 0.3 eV [2] より小さい 0.18 eV [3] という単色性を達成している。GIS 構造電子源表面のグラフェンは、金属を蒸着する場合に比べて高い結晶性を持ち、層数を制御して作製することが可能である。また、グラフェンは六角形のハニカム構造を持ち、C 軸配向している。従って、グラフェンからは強い回折波が発生すると考えられる。この回折波のエネルギースペクトルはあるエネルギーに鋭いピークを持つ可能性があるため、本研究では単色性向上の新たな手法として回折波に着目し、数値シミュレーションによる回折波の解析を行った。

数値シミュレーションは3次元の実空間で行った。グラフェンの単位胞を z 方向と垂直に設置し、図 1 に示すように、z 方向に自由電子を進行させ、グラフェンによる入射電子の回折現象の解析を行った。z 方向には複素吸収ポテンシャルを置いて無反射境界とした。グラフェンのポテンシャル $V(\mathbf{r})$ は Quantum Espresso [4], トーマスフェルミ近似を用いることで作成した。初期波束は +z 方向に進むガウス型の波動関数

$$\psi(\mathbf{r}, t=0) \propto \exp \left\{ ik_0 z - \frac{(z-z_0)^2}{\alpha^2} \right\} \quad (1)$$

とした。ここで、 α はガウス型波束の大きさを表すパラメータ、 $k_0 = \sqrt{2mE_0}/\hbar$ は電子の波数である。この波動関数をシュレディンガー方程式によって時間発展させた。その結果、回折波の透過角度がエネルギーに依存することから、グラフェンをプリズムのように用いて回折波をアパーチャーに通すことで、単色性の高い電子を取り出すことが可能であることが分かった。

最近の進展として、グラフェン層の層数を増やすことで、回折波が強め合う条件を制限出来ることが分かり、これより、回折波をアパーチャーに通すことなく、グラフェン層自体から単色性の高い電子を取り出すことが可能であると分かった。講演会当日は、このような最近の進展も含めて報告する。

本研究の一部は JSPS 科研費 22H01498 24K00954 の助成を受けたものです。

[1] K. Murakami *et al.*, ACS App. Elect. Mat., **2** (2020) 2265. [2] A. Bogner *et al.*, Micron **38** (2007) 390.

[3] T. Igari *et al.*, Phys. Rev. App., **15** (2021) 014044. [4] P. Giannozzi *et al.*, J. Phys. Condens. Matter **21** (2009) 395502.

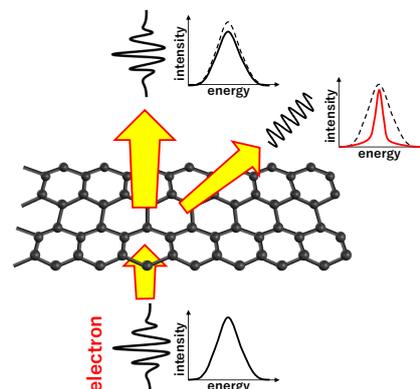


Fig. 1: Schematic drawing of electron diffraction at graphene. The electron wave packet is diffracted into two components, if the energy is higher than 33 eV. One of them travels straight, while the other is diffracted. Highly monochromatic electron beams can be obtained from the diffracted waves.

電界印加された層状絶縁体における入射電子の干渉効果

Interference Effect of Incident Electron in Layered Insulator
with Applied Electric Field阪大基礎工¹, 産総研², 河嶋 祥吾¹, ○小市 崇央^{1,2}, 阿保 智¹, 若家 富士男¹,
長尾 昌善², 村上 勝久²Osaka Univ.¹, AIST², Shogo Kawashima¹, ○Takao Koichi^{1,2}, Satoshi Abo¹, Fujio Wakaya¹,
Masayoshi Nagao², Katsuhisa Murakami²

E-mail: u264659i@ecs.osaka-u.ac.jp

Graphene-Insulator-Semiconductor (GIS) 構造の電子源は、高い電子放出効率と単色性を持つ新世代の電子源として注目されている [1]. GIS 電子源では、絶縁体層として六方晶窒化ホウ素 (*h*-BN) を用いることで 0.7 eV 未満のエネルギー幅を達成している [2]. また、GIS 電子源のグラフェン層を透過する電子のビーム特性が、グラフェン層による回折や多重反射による効果で影響を受けることが、数値シミュレーションによって確認されている [3]. *h*-BN はグラフェンと同様の層状の構造を持っているため、絶縁体層もグラフェン層と同様に、電子ビーム特性に大きな影響を与える可能性がある. GIS 構造電子源の絶縁体層では、数 nm の絶縁体層に 10 V 程度の電圧が印加されており、 10^7 V/cm 程度の電界となっている. つまり、グラフェン層内を移動する電子と異なり、絶縁体層内では、電子は 10^7 V/cm の電界中を移動し、かつ絶縁体層の原子によって散乱されながらグラフェン層まで到達する. tip 先端の強い電界が存在している表面に単原子が吸着している電子源の放出電子ビームの特性についての研究はすでに行われている [4] が、平面電子源の層状の絶縁体層中での、複雑な電子の運動に着目した研究は行われていない. そこで、本研究では絶縁体層での電子散乱に関して、数値シミュレーションを行った.

半導体から絶縁体にトンネル効果によって移動する電子のエネルギーは高々 30 meV 程度であり、波長が ~ 70 Å と、原子に比べて大きいため、シミュレーション領域を大きくする必要があり非常に難しい. そこで本研究ではグラフェンに接する 5 層の *h*-BN のみに着目し、この絶縁体層に数 \sim 数十 eV のエネルギーを持った電子を入射させ、シュレディンガー方程式によって波動関数の時間発展を計算した. また、波動関数をフーリエ変換することで、エネルギー毎の透過率、反射率を求めた. このとき、*h*-BN の単位胞を *x*-*y* 平面方向に設置し、*z* 方向を電子の初期進行方向とした. また、電圧 V_{app} による一様な電界を *z* 方向に印加した. 図 1 に印加電圧 $V_{app} = 10$ V としたときの *z* 方向に対するポテンシャルエネルギーを示す.

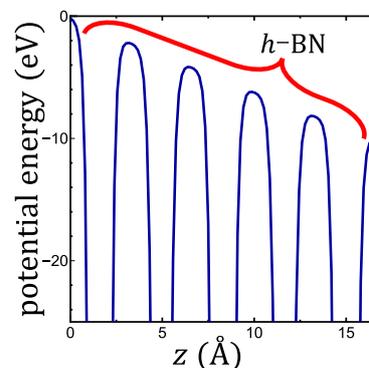


Fig. 1: Potential energy of 5-layer *h*-BN with $V_{app} = 10$ V at a certain (*x*,*y*)-position.

シミュレーション結果から、絶縁体層間の干渉によって、あるエネルギー付近で透過率が減少する効果を確認できた. またこの他に、電子が $V_{app}/5$ の電圧によって加速されたときに得るエネルギーの間隔で、透過率の減少が確認された. これは *h*-BN 層内の干渉によって起こされた効果である.

本研究の一部は JSPS 科研費 22H01498 の助成を受けたものです.

参考文献

- [1] K. Murakami *et al.*, ACS App. Elect. Mat., **2** (2020) 2265. [2] T. Igari *et al.*, Phys. Rev. App., **15** (2021) 014044.
[3] 小市崇央 *et al.*, IEICE Technical Report, **123**(297) (2023) 8. [4] V. T. Binh *et al.*, Phys. Rev. Lett., **69** (1992) 2527.

Graphene/h-BN/Ni-Sapphire 構造を有する 平面型電子源作製プロセスの開発

Fabrication Process for Planar-type Electron Emission Devices

Using Graphene/h-BN/Ni-Sapphire Structure

横国大¹, 静岡大², 産総研³ ◯(M2)六川 蓮^{1,3}, 鷹尾 祥典¹, 山本 将也^{2,3}, 根尾 陽一郎²,
村田 博雅³, 長尾 昌善³, 村上 勝久³

YNU¹, Shizuoka Univ.², AIST³, °Ren Mutsukawa^{1,2}, Yoshinori Takao¹, Masaya Yamamoto^{2,3},

Yoichiro Neo², Hiromasa Murata³, Masayoshi Nagao³, Katsuhisa Murakami³

E-mail: mutsukawa-ren-cz@ynu.jp

■ 背景と目的

電子源は、宇宙機器のキーデバイスや電気推進における中和器など、宇宙利用において重要な役割を担っている。ホローカソードのような従来の電子源は推進剤を消費し、サイズが小さくなるにつれて性能が急激に低下する。これまでに推進剤非消費の電子源として Graphene/SiO₂/n-Si 構造を有する平面型グラフェン電子源の利用を検討してきた[1]。平面型グラフェン電子源は、30%以上の高い電子放出効率、10–20 V の低印加電圧で 1–100 mA/cm² の高電子電流密度を提供可能である。しかし、デバイスの動作原理から、電子放出中に絶縁層である SiO₂ に 10MV/cm² の高電界が印可される。高電界により加速されたホットエレクトロンの非弾性散乱による絶縁膜の絶縁破壊がデバイスの寿命を決める。そのため、デバイスの長寿命化には非弾性散乱断面積が小さく、絶縁破壊耐性の高い絶縁膜材料の選定が重要となる。

上記を解決するため、絶縁層として SiO₂ の代わりに六方晶窒化ホウ素 (h-BN) を検討した。h-BN は軽い元素で構成されているため非弾性散乱によるエネルギー損失が小さく、グラフェンとの構造的な類似性からグラフェンとの親和性が高い絶縁材料である。本研究では、Ni を金属触媒として h-BN を成膜した Graphene/h-BN/Ni-sapphire 構造を有する平面型電子源の開発を行っている。

■ 実験手法

本研究では、実績のある c 面サファイア基板上に Ni (111) 成膜を試みた。Ni 膜は、500°C の熱スパッタリングによって 500 nm の厚さで成膜した。この Ni 膜を Ar+H₂ 雰囲気中、

1100°C で 30 分間アニールした。このプロセスにより、サファイア基板上に Ni (111) がエピタキシャル成長した。電子放出エリアは tetraethyl orthosilicate (TEOS) を原料として用いた 200 nm の SiO₂ フィールド酸化物層によって規定した。Ni 上の h-BN は、誘導結合プラズマ化学気相成長法 (ICP-CVD) によって合成された。Graphene 電極も ICP-CVD によって h-BN 上に堆積させた。図 1 に、これらのプロセスによって形成されたデバイス構造を示す。

■ 結果と考察

上記プロセスで作製したグラフェン/h-BN/Ni-sapphire 構造を有する平面型電子源の電子放出特性を測定したところ、印加電圧が 25V 付近から電子放出が始まり、最大放出電子密度 1.1 A/cm²、最大電子放出効率 4.4% が得られた。このとき、h-BN の膜厚が 10–15 nm であり、より薄膜化することによって、高い電子放出密度が期待できる。また、h-BN 成膜領域の作製技術の確立により更なる電子放出効率の向上が可能であると考えられる。現在、そのプロセスの最適化に取り組んでいる。

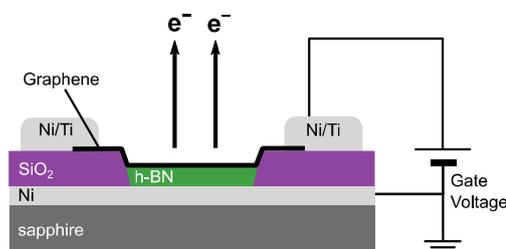


図 1 Graphene/h-BN/Ni-Sapphire 構造を有する平面型電子源の概略図

【参考文献】

[1] K. Murakami et al., Applied Physics Letters, Vol. 114, p.213501, 2019.

グラフェン/p-Si ショットキー接合型電子放出デバイスから 放出する電子のエネルギー分析

Energy Analysis of electrons emitted from graphene/p-Si Schottky junction electron emission devices

産総研 °村上 勝久, 村田 博雅, 長尾 昌善

AIST, °Katsuhisa Murakami, Hiromasa Murata, Masayoshi Nagao

E-mail: murakami.k@aist.go.jp

我々の研究グループでは、Metal/Insulator/Semiconductor 積層構造の平面型電子放出デバイスで実用化に向けて課題となっている、電子加速層である絶縁層の劣化による放出電流減少を解決するために、電子加速層に半導体空乏層を利用したグラフェン/p-Si ショットキー接合型電子放出デバイスの開発を推進している。これまでに、デバイスの動作を実証し[1]、更に放出電流密度 15 mA/cm²、電流変動率 0.9% (標準偏差) の安定性で、160 時間以上の連続動作を達成した[2]。

過去に報告されている半導体空乏層を用いた平面型電子放出デバイスの動作原理では、半導体空乏層に印可された強電界により、コンダクションバンド中の少数キャリアが半導体空乏層で雪崩増倍を起こし、そのホットエレクトロンの一部が真空中に放出されると考えられてきた[3]。このようなデバイスの動作原理を調査するためには、放出電子のエネルギー分布を調べるのが重要である。本研究では、グラフェン/p-Si ショットキー接合型電子放出デバイスの動作原理を調べることを目的として、デバイスから放出する電子のエネルギースペクトルを、静電半球型エネルギー分析装置を用いて分析した。

エネルギースペクトルの形状は高エネルギー側にテールを引く特徴的な形状であった。これは Graphene/h-BN/Si 接合型デバイスと同様のスペクトル形状であり、下部 Si 基板中の電子の密度分布を反映した形状であった[4]。エネルギーピークはフェルミ準位から約 1.25eV 高い準位に位置し、エネルギー半値幅は最小 0.18 eV であり、タングステン冷陰極のエネルギー半値幅 0.3eV を凌駕する単色性であった。これらの結果は、グラフェン/p-Si ショットキー接合型平面電子源では p-Si 基板のコンダクションバンド中の少数キャリアがほぼ散乱することなく空乏層で加速されグラフェンを貫通して放出していることを示唆しており、従来考えられていた雪崩増倍により生じた電子ではない可能性があることが分かった。また、グラフェン/p-Si ショットキー接合型電子放出デバイスは、長寿命、高エネルギー単色性、低真空動作、マルチ電子ビーム可能な次世代電子光源として高いポテンシャルを有することが分かった。

参考文献

- [1] 村上勝久 他, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-A501-12 (2023).
- [2] 村上勝久 他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 25a-12M-11 (2024).
- [3] G. G. P. van Gorkom, et al, *J. Vac. Sci. Technol. B* **4**, 108 (1986).
- [4] T. Igari, et al., *Phys. Rev. Applied* **15**, 014044 (2021).

異なるアルカリ金属を用いた InGaN フォトカソードの電子放出特性

Comparative studies of electron emission characterization of InGaN photocathodes with different alkali metal

名大院工¹, (株) Photo electron Soul², 名大 IMASS³

◎(D)出射 幹也¹, 佐藤 大樹², 小泉 淳², 西谷 智博^{2,3}, 本田 善央³, 天野 浩³

Nagoya Univ.¹, Photo electron Soul Inc.², IMASS Nagoya Univ.³

◎(D)Mikiya Idei¹, Daiki Sato², Atsushi Koizumi², Tomohiro Nishitani^{2,3}, Yoshio Honda³ and Hiroshi Amano³

E-mail: idei.mikiya.j4@s.mail.nagoya-u.ac.jp

【研究背景】半導体フォトカソードは、p型半導体表面にアルカリ金属を蒸着することで、負の電子親和力(NEA)状態の表面を形成し、半導体のバンドギャップエネルギー以上の光照射によって、真空中に電子を放出する。半導体フォトカソード電子源では、これまでに mA オーダーの大電流 [1]や室温エネルギーレベルの単色性[2]、パルス電子ビーム[3]やマルチ電子ビーム[4]の生成が示されている。これらの特徴に加えて、高輝度化による電子顕微鏡への応用が進んでいる[5]。NEA表面のアルカリ金属には、電気陰性度の低いCsがよく用いられ、CsとO₂を交互供給することで、Csのみの供給よりも高い量子効率(QE)と耐久性を得るYo-Yo法が行われている。しかしながら、NEA表面は残留ガス吸着やイオンバックボンバードメントにより劣化するため、その耐久性の向上が課題となっている。高耐久化に関しては、複数のアルカリ金属を用いたマルチアルカリが検討されている[6]。そこで本研究では、従来のGaAsよりも高耐久性の高いInGaNフォトカソードにおけるNEA表面のさらなる高耐久化を目的として、InGaNフォトカソード上に形成したCsによるNEA表面と、これまでに研究報告のないCs以外のアルカリ金属を用いてInGaNフォトカソード上に形成した表面の電子放出特性を比較した。

【実験】有機金属気相成長法により、(0001)サファイア基板上にInGaNフォトカソードを作製した。作製したフォトカソードは、酸洗浄後にフォトカソード評価装置に入れ、超高真空中での加熱洗浄により表面を清浄化した。その後、Cs又はNaとO₂を交互供給することで、表面の活性化を行った。その際、励起波長404 nmのレーザーを電子放出側から照射し、加速電圧-100 Vにおける放出電流を100 kΩのシャント抵抗により測定してQEの時間変化を測定した。

【結果】図1にCsを用いたNEA表面活性化におけるQEの時間変化を示す。QEは、CsとO₂の供給を繰り返すことで増大した。これはYo-Yo法を用いたNEA活性化における典型的な結果である。図2にNaを用いた表面活性化におけるQEの時間変化を示す。QEは、最初のNa供給で最大値を示し、NaとO₂の供給を繰り返すことで減少した。また、到達QEは、Csの場合と比較して1桁程度低かった。このことから、Naを用いたYo-Yo法では、仕事関数が十分に低下しないために、QEの増大が生じないことが分かった。

【謝辞】本研究は、科研費(24H00319)の助成を受けたものです。

【参考文献】[1] J. Grames *et al.*, in Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference (2005), p. 2875. [2] D. A. Orlov *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **532**, 418 (2004). [3] D. Sato *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **40**, 064204 (2022). [4] D. Sato *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **39**, 062209 (2021). [5] T. Nishitani, *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **40**, 064203 (2022). [6] A. V. Lyashenko *et al.*, JINST **4** P07005 (2009).

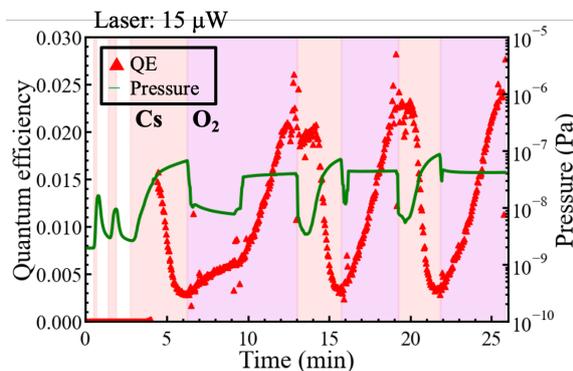


Fig. 1: QE during NEA activation using Cs.

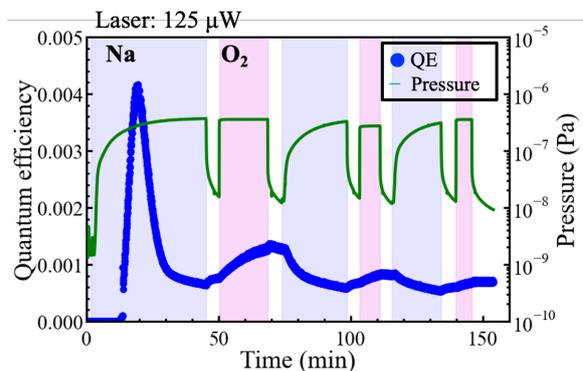


Fig. 2: QE during NEA activation using Na.

水熱合成法による深紫外線蛍光体を用いたフィールドエミッションランプの開発

Development of FEL with deep-ultraviolet phosphors made from hydrothermal synthesis

静岡大・院工¹, 静岡大・電研², 名古屋市立大³○(M2)岡田 昌大¹, 根尾 陽一郎^{1,2}, 文 宗鉉^{1,2}, 松本 貴裕³¹ Grad. Sch. of Eng. Shizuoka Univ. ² RIE Shizuoka Univ. ³ Nagoya City Univ.○Masahiro.Okada^{1,2}, Yoichiro.Neo^{1,2}, Moon.Jonghyun^{1,2}, Takahiro.Matsumoto³

E-mail : okada.masahiro.19@shizuoka.ac.jp

【研究背景】 本研究の目的は、Far-UVC 光源としての電界放射型ランプ (FEL) の開発である[1].

波長 200-230nm の Far-UVC は、人体に非侵入である一方でウィルスの不活化に効果がある特徴をもつ[2]. 従来の UVC 殺菌では、DNA の損傷を伴い皮膚がんや白内障の危険性があり、人がいる環境下では使用する事が出来ない。2019 年以降の Covid-19 パンデミックにより、効果的な感染拡大の予防策が求められてきた。FEL は紫外線蛍光体を加速電子線で励起発光させるものであり、発光波長は蛍光体の電子状態に、発光輝度は放出電流量と加速電圧に依存する。これまで電子源には大電流が放射可能且つ、安価で取り扱いが容易である炭素系電子源を用い、固相反応で合成した $MgAl_2O_4$ により、波長 229nm の深紫外線を確認した。本報告では、更なる高輝度、短波長化のため、水熱合成法に注目した。これにより結晶成長の大きさ、形状の制御が可能となる。実験的に求めた理想的な不純物濃度、発光波長について報告する。

【実験】 蛍光体は、 $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (0.03mol) と任意の量の $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ を NaOH (0.1M) 溶液に溶解させ、30 分攪拌した。180°C の温度条件で 18 時間の水熱合成を行い、得られた沈殿物をろ過し、大気中で 90°C、4 時間の乾燥により、水酸化物の粉末を得た。脱水のため、550°C、6 時間の焼成を、更に大気雰囲気中で 1000°C、12 時間の再焼成を行った。以下、Al の添加量は Mg に対するモル比でのパーセントで示す。

【結果】 図 1 より、純粋な MgO では、F 中心とされる約 250nm の発光が確認できる。0.1% の Al 不純物を添加し、脱水における 550°C の焼成に加え、再度 1000°C での焼成をした場合、目的の Fra-UVC 波長域である 222nm の発光中心を確認した。これにより、固相反応による $MgAl_2O_4$ 蛍光体からの短波長化を実現した。当日は、再焼成の温度、不純物濃度変化による発光中心の短波長化についても議論する。

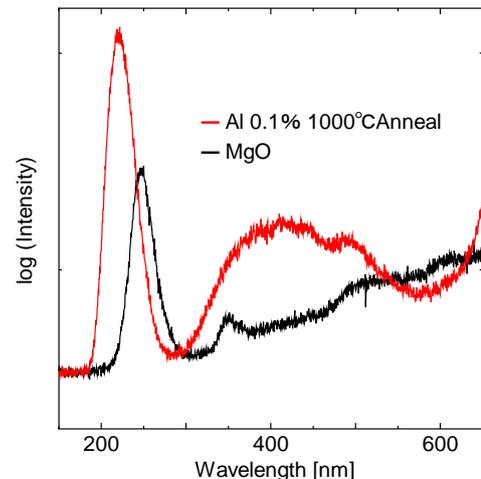


図 1 MgO と Al を 0.1% 加えて 1000°C で焼成した CL スペクトル

[1] Yoko Aida, et al. UVC disinfects SARS-CoV-2 by induction of viral genome damage without apparent effects on viral morphology and proteins, Scientific Reports volume 11, Article number : 13804 (2021)

[2] Hiroki Kitagawa, et al., Effectiveness of 222-nm ultraviolet light on disinfecting SARS-CoV-2 surface contamination (2020)