

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

📅 Tue. Sep 9, 2025 1:30 PM - 5:45 PM JST | Tue. Sep 9, 2025 4:30 AM - 8:45 AM UTC | 📍 N403 (Lecture Hall North)

### **[9p-N403-1~16] 7.2 Applications and technologies of electron beams**

Takatoshi Yamada(AIST), Katsuhisa Murakami(AIST)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[9p-N403-1] Dielectric Barrier Discharge Characteristics Using Micro-Protrusion Cathode Arrays by Using Transfer Mold Emitter Fabrication Methods

○(M2)Ryuto Isotani<sup>1</sup>, Jonghyun Moon<sup>1</sup>, Yoichiro Neo<sup>1</sup> (1.Shizuoka Univ.)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[9p-N403-2] Effect of TiN deposition conditions on the emission characteristics of TiN-coated field emitter arrays

○Hiromasa Murata<sup>1</sup>, Tomoaki Osumi<sup>1,2</sup>, Yasuhito Gotoh<sup>2</sup>, Katsuhisa Murakami<sup>1</sup>, Masayoshi Nagao<sup>1</sup> (1.AIST, 2.Kyoto Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[9p-N403-3] Improvement in the number of active tips after reheating in TiN coated volcano-structured field emitter array

○Yusuke Kawasaki<sup>1</sup>, Hidekazu Murata<sup>1</sup>, Hiromasa Murata<sup>2</sup>, Masayoshi Nagao<sup>2</sup> (1.Meijo Univ., 2.AIST)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[9p-N403-4] Sharpening of Nb tip by the Field-assisted Oxygen Etching

○Shuto Horikawa<sup>1</sup>, Junki Shima<sup>1</sup>, Tatsuo Iwata<sup>1</sup>, Shigekazu Nagai<sup>1</sup> (1.Mie Univ.)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[9p-N403-5] Electron emission measurement of a LaB<sub>6</sub> cathode in Schottky mode

○Takaharu Ito<sup>1</sup>, Hidekazu Murata<sup>1</sup>, Takayuki Tanaka<sup>1</sup>, Eiji Rokuta<sup>1</sup> (1.Meijo Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[9p-N403-6] Energy analysis of field emission electron sources using liquid metal

○(M2)Hiroki Sato<sup>1,2</sup>, Yoichiro Neo<sup>1,2</sup>, Jonghyun Moon<sup>1,2</sup> (1.Grad. Sch. of Eng. Shizuoka Univ., 2.RIE, Shizuoka Univ.)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[9p-N403-7] Study on Field-Emission Property from High-T C Superconducting Materials

Hiroshi Miyake<sup>1</sup>, Shiyuu Tanabe<sup>1</sup>, Satoshi Abo<sup>1</sup>, OFujio Wakaya<sup>1</sup>, Shuichi Iwabuchi<sup>2</sup>, Masayoshi Nagao<sup>3</sup>, Katsuhisa Murakami<sup>3</sup> (1.UOsaka, 2.Nara Women's Univ., 3.AIST)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[9p-N403-8] Development of a planar-type electron emission device with a graphene/h-BN/Ni stacked structure

○Katsuhisa Murakami<sup>1</sup>, Ren Mutsukawa<sup>1,2</sup>, Yoshinori Takao<sup>2</sup>, Hiromasa Murata<sup>1</sup>, Masayoshi Nagao<sup>1</sup> (1.AIST, 2.YNU)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[9p-N403-9] Factors causing decreased accuracy in measuring the virtual source size of an electric field emission electron source

○Erina Kawamoto<sup>1</sup>, Soichiro Matsunaga<sup>1,2</sup> (1.Hitachi, Ltd., 2.Hitachi High-Tech.)

---

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[9p-N403-10] Evaluation of Field Emission Stability from Thermally Oxidized CeB<sub>6</sub>

○Ryohei Tsuruta<sup>1</sup>, Motoya Arai<sup>1</sup>, Kosuke Oba<sup>1</sup>, Yoichi Yamada<sup>1</sup> (1.Univ. Tsukuba)

---

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[9p-N403-11] Extending the Lifetime and Improving the Quantum Efficiency of Photocathodes via Work Function Control with Organic Molecules

○Manato Taten<sup>1</sup>, Miyu Moriyama<sup>1</sup>, Masahiro Ohara<sup>4</sup>, Katsuyuki Morii<sup>2,5,6</sup>, Hisao Ishii<sup>1,2,3</sup>, Hirohiko Hukagawa<sup>1,2,3</sup> (1.GSSE Chiba Univ., 2.CFS Chiba Univ., 3.MCRC Chiba Univ., 4.Eng. Shinshu Univ., 5.Osaka Univ., 6.Nippon Shokubai Co., Ltd)

---

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[9p-N403-12] Differences in propagation and properties of ultrashort pulsed electrons from tip and plate photocathode

○(M1)Riyo Nagao<sup>1</sup>, Gael Privault<sup>1</sup>, Yusuke Arashida<sup>1</sup>, Yui Iwasaki<sup>1</sup>, Godai Noyama<sup>1</sup>, Jun-ichi Fujita<sup>1</sup>, Arnaud Arbouet<sup>1,2</sup>, Masaki Hada<sup>1</sup> (1.Univ. Tsukuba, 2.CNRS IRL Dynacom)

---

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[9p-N403-13] Development of Photocathodes Utilizing Metal Metasurfaces

○Keiki Fukumoto<sup>1</sup>, Elizaveta Pyatenko<sup>1</sup>, Tsuyoshi Toyosawa<sup>2</sup>, Atsushi Kubo<sup>2</sup> (1.KEK, 2.Univ. Tsukuba)

---

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[9p-N403-14] Electron beam operating time of NEA-InGaN Photocathodes

○Atsushi Koizumi<sup>1</sup>, Daiki Sato<sup>1,2</sup>, Tomohiro Nishitani<sup>1,2</sup>, Yoshio Honda<sup>2</sup>, Hiroshi Amano<sup>2</sup> (1.Photo electron Soul, 2.IMaSS, Nagoya Univ.)

---

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[9p-N403-15] Charge-reduced SEM imaging by modulating e-beam from an NEA-InGaN semiconductor photocathode

○Mitsunobu Yasuda<sup>1</sup>, Tomohiro Nishitani<sup>2,3</sup>, Atsushi Koizumi<sup>2</sup>, Yuta Arakawa<sup>2</sup>, Kohtaro Niimi<sup>2</sup>, Daiki Sato<sup>2,3</sup>, Sumihisa Ishikawa<sup>1</sup>, Yuji Otsuka<sup>1</sup> (1.Toray Research Centre, 2.Photo electron soul, 3.Nagoya Univ.)

---

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[9p-N403-16] Crystal structure of AlGaAs Molecular Beam Epitaxially Grown on c-plane Sapphire

○Sota Wajima<sup>1,2</sup>, Hidetoshi Hashimoto<sup>1,2</sup>, Daiki Sato<sup>3</sup>, Atsushi Koizumi<sup>3</sup>, Tomohiro Nishitani<sup>3</sup>, Fumitaro Ishikawa<sup>2</sup> (1.Hokkaido Univ., 2.Hokkaido Univ.RCIQE, 3.Photo electron Soul Inc.)

# 転写モールド法微小突起型陰極アレイによる誘電体バリア放電特性評価 Dielectric Barrier Discharge Characteristics Using Micro-Protrusion Cathode Arrays by Using Transfer Mold Emitter Fabrication Methods

静岡大電研 ○(M2) 磯谷 隆斗, 文 宗鉉, 根尾 陽一郎

Shizuoka Univ., Res. Inst. Electronics, ○Ryuto Isotani, Jonghyun Moon, Yoichiro Neo

E-mail: isotani.ryuto.20@shizuoka.ac.jp

【はじめに】紫外線光源として応用されている誘電体バリア放電デバイスなどには、平行平板型や同軸円筒型が用いられますが、いずれも電極の放電面は平面型であり、局所的な異常放電が発生しやすいという課題があります。先行研究では、陰極の表面形状を微小突起型に成形することで、高効率な紫外線源の実現を目指しました[1]。その有効性を検証するため、本研究で提案する微小突起型陰極を有するデバイスと、比較対象である従来の平面型陰極を有するデバイスを試作し、両デバイスの放電電荷量を比較して、さらに等価回路モデルを用いてその電氣的挙動を評価した結果を報告する。

【実験方法と結果】転写モールド法を用いて微小突起型陰極アレイを作製した[1]。アルゴンガス圧力 2 kPa、2 kHz の交流電圧印加条件下における微小突起型陰極アレイの誘電体バリア放電を評価した。この結果を Fig.1 に示す。従来の平面型デバイスの放電電流と比較することで、微小突起構造の有効性を検証した。さらに、電流積分電荷法を用いて微小突起型陰極アレイの誘電体バリア放電電荷量の評価を行った。平面型の放電電荷量 0.087  $\mu\text{C}$  に対し、微小突起型陰極アレイデバイスでは 0.2  $\mu\text{C}$  となり、約 2.3 倍に増加した。これは、突起先端における局所的な電界強度の上昇が、より高強度のマイクロ放電の発生を促進し、結果として放電電荷密度が増大するためと考えられる。突起構造に起因するマイクロ放電による静電容量を平面部におけるグロー放電の静電容量と並列に接続した新たなモデルを提案し、評価した結果を報告する予定である。

【結論】転写モールド法を用いて作製した微小突起型陰極アレイでは、突起先端における局所的な電界強度を上昇させ、より高強度のマイクロ放電の発生を促進し、放電電荷密度が増大させると考え

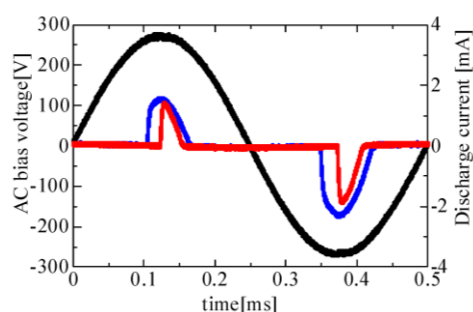


Fig. 1. Time-dependent discharge characteristics of Transfer Mold micro-protrusion cathode arrays (blue line, ---), compared with those of a flat-type cathode (red line, ---). The AC bias with 2 kHz, is shown as a black line (---).

られる。突起型誘電体バリア放電デバイスの紫外線発光強度は従来の平面型デバイスと比べて約 1.9 倍増加した[1]。誘電体バリア放電の電気等価回路モデルに突起先端付近に生じるマイクロ放電に対応するキャパシタンス成分のパラメータを用いて、微小突起アレイによる放電電荷量の増加することが説明できた。講演では、電氣的挙動の評価について議論する。

[1] 文宗鉉他, 2021 年第 82 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集, 10p-N401-5 (2021)

# TiN コート層の成膜条件がフィールドエミッタアレイの電子放出特性に与える影響

## Effect of TiN deposition conditions on the emission characteristics of TiN-coated field emitter arrays

産総研<sup>1</sup>, 京大院工<sup>2</sup> °村田 博雅<sup>1</sup>, 大住 知暉<sup>1,2</sup>, 後藤 康仁<sup>2</sup>, 村上 勝久<sup>1</sup>, 長尾 昌善<sup>1</sup>

AIST<sup>1</sup>, Kyoto Univ.<sup>2</sup>, °Hiromasa Murata<sup>1</sup>, Tomoaki Osumi<sup>1,2</sup>, Yasuhito Gotoh<sup>2</sup>, Katsuhisa Murakami<sup>1</sup>, Masayoshi Nagao<sup>1</sup>

E-mail: murata.hiromasa@aist.go.jp

【はじめに】 エックス線源や進行波管などの用途に向けては、フィールドエミッタアレイ(FEA)の大電流動作が求められる。我々はこれまでの研究で、TiとN<sub>2</sub>ガスの反応性スパッタリングによりSi-FEAにTiNコーティングを施すことで約1000 tipのFEAから約8 mAという大電流動作を実証した[1]。一方で、TiNのスパッタリング成膜条件と電子放出特性の関係は明らかになっていない。本研究では、Ar/N<sub>2</sub>ガス比を変えてTiNコート層を成膜し、電子放出特性の評価および仕事関数の解析を行った。

【実験方法】 Siウエハ上にドット状のSiO<sub>2</sub>を形成し、反応性イオンエッチングによりSiコーンを作製した。その後、TiターゲットとAr/N<sub>2</sub>ガス(Ar/N<sub>2</sub> = 20/1-5, 0/20 sccm)を用いた反応性スパッタリングによりTiN膜をSiコーン上に被覆した。絶縁層(SiO<sub>2</sub>)およびゲート電極層(Nb)を成膜した後、レジストのエッチバック法によりゲート電極を開ロし、BHFによりSiO<sub>2</sub>を除去してTiNエミッタ先端を開ロした。

【実験結果】 作製したTiN-FEAについて、エミッタをGND、アノードを1000 Vに固定し、ゲート電極に電圧を印加してI-V測定を行ったところ、Ar/N<sub>2</sub>比によって動作電圧が大幅に変化した。そこで、先端曲率半径15 nm、電子放出角30°、動作チップ数1000 tipsと仮定した上で、仕事関数を変数としてFowler-Nordheim(FN)の式を計算し(直線)、実験データ(プロット)と比較することで、各成膜条件における仕事関数を推定した(Fig. 1)。その結果、Ar/N<sub>2</sub> = 0/20, 20/5, 20/3 sccmで作製したFEAの仕事関数は、それぞれ3.05, 4.30, 4.60 eVと見積もられた。XPSの評価結果からN<sub>2</sub>ガス流量が少ないほどTiN膜中の酸素濃度が上昇する傾向が示されており、今回推定された仕事関数の差はこのTiN膜中の酸素含有量の違いを反映している可能性がある。

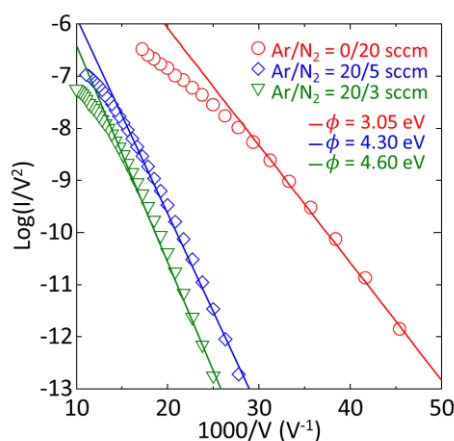


Fig. 1. FN plots of TiN-FEA.

【謝辞】 本研究においてご支援を賜りました株式会社 島津製作所に心より感謝申し上げます。

[1] H. Murata, K. Murakami, M. Nagao, J. Vac. Sci. Technol. B 42, 013203 (2024).

# TiN コーティングを施したボルケーノ構造フィールドエミッタアレイ の再加熱後の動作 tip 数の改善

## Improvement in the number of active tips after reheating in TiN coated volcano-structured field emitter array

名城大学<sup>1</sup>, 産業技術総合研究所<sup>2</sup> ○川崎 祐輔<sup>1</sup>, 村田 英一<sup>1</sup>, 村田 博雅<sup>2</sup>, 長尾 昌善<sup>2</sup>

Meijo Univ.<sup>1</sup>, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology<sup>2</sup>,

○Yusuke Kawasaki<sup>1</sup>, Hidekazu Murata<sup>1</sup>, Hiromasa Murata<sup>2</sup>, Masayoshi Nagao<sup>2</sup>

E-mail: 243427012@ccmailg.meijo-u.ac.jp

前回の応用物理学会では、反応性スパッタにより Si エミッタに TiN コーティングを施したボルケーノ構造フィールドエミッタアレイ（以下 FEA）[1]を用いてエージング（long time DC drive）処理および加熱処理前後での各 tip のエミッション電流値の変化について報告した[2]。FEA を動作すると徐々に全体エミッション電流が減少するが再加熱により初期動作に近い水準まで回復することが分かっている。今回は、再加熱後の動作 tip 数の改善について観察を行ったので報告する。

評価に用いた FEA は、TiN コーティング・ボルケーノ構造 Si-FEA  $10 \times 10 = 100$  tips である。この FEA をマルチエミッタ評価装置[3]の「光電子放出モード（PEEM）」+「電界電子放出モード（FEEM）」+「ファラデーカップ」により、各チップの動作状況を確認する。真空準備室内（ $10^{-7}$  Pa）にてコンディショニング（初期電圧掃引）後、同準備室で加熱（ $250^{\circ}\text{C}$  24 時間）、エージング 3 時間、エージング 24 時間行う。観察室での PEEM+FEEM 観察では、MCP スクリーン手前にファラデーカップを配置することで、観察対象の個々の tip を選択して、そのエミッション電流を計測できる。図 1 は加熱処理後のゲート電圧  $V_g = 50$  V 動作の FEEM 像である。ここでは MCP の増幅電圧を最大 Gain よりも低い電圧に固定しているため、実際には図 1 で確認できる動作 tip 数よりも多く動作している（同じ Gain に固定することで動作 tip 数の比較が可能）。この条件下において、加熱処理により動作 tip 数が 15 から 91（図 1 (a)から(b)）に増加した。そしてエージング 24 時間（図 1 (c)）行うと動作 tip 数は減少したが、再加熱（ $250^{\circ}\text{C}$  24 時間）（図 1 (d)）により動作 tip 数という観点でも 1 回目の加熱処理後の水準にまで回復した。図 2 はゲート電圧  $V_g$  の変化に対する動作 tip 数の推移を示す。処理の手順は図の数字の順に行った。加熱処理後（図 2 ②）は初期動作（図 2 ①）から大幅に増加した。エージング 24 時間後（図 2 ④）は動作 tip 数が減少したが、再加熱によって（図 2 ④から⑤）数  $V$  ほど低電圧側に移動していることが分かる。

[1] H. Murata, K. Murakami, M. Nagao, J. Vac. Sci. Technol. B **42**, 013203 (2024).

[2] Y. Kawasaki, H. Murata, H. Murata, M. Nagao, The 72nd JSAP 15p-K507-5.

[3] H. Murata et al., e-J. Surf. Sci. Nanotech. **8**, 266 (2010).

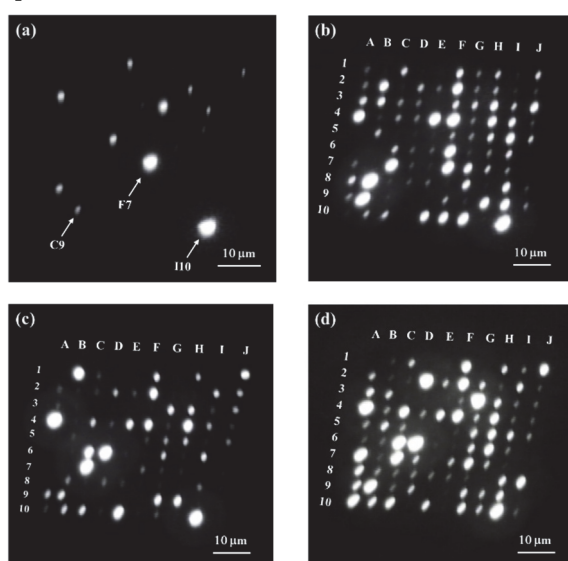


Fig. 1. FEEM images at  $V_g = 50$  V, initial (a) after thermal treatment(b), after 24h aging(c), and after 2<sup>nd</sup> thermal treatment(d)

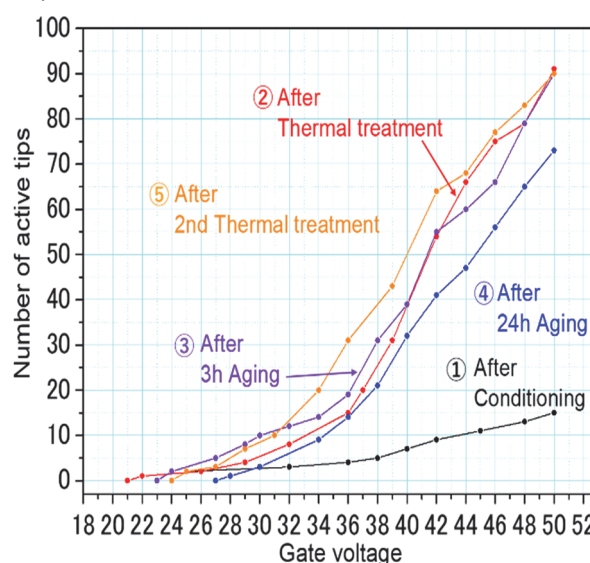


Fig. 2. Transition in the number of active tips after each treatment

## 電界誘起酸素エッチングによる Nb tip の先鋭化

### Sharpening of Nb tips by the Field-assisted Oxygen Etching

三重大院工 <sup>○</sup>堀川愁斗, 志摩惇紀, 岩田達夫, 永井滋一

Grad. Sch. of Eng., Mie Univ. <sup>○</sup>Shuto Horikawa, Junki Shima, Tatsuo Iwata, Shigekazu Nagai

E-mail: 425m238@m.mie-u.ac.jp

顕微分析装置の空間分解能向上の観点から、電子源の輝度および電界放出電子のエネルギー幅は重要な性能である。電子源の高輝度化の手法の一つとして、エミッタ先端の先鋭化およびナノ突起構造体の形成する電界誘起酸素エッチングが挙げられる。本研究では、高輝度特性に加えてエネルギー幅狭小化を目的に、超伝導体 Nb tip に W<sup>[1]</sup>, Ir<sup>[2]</sup>と同様に電界誘起酸素エッチングによる先鋭化が可能か検証した。

市販の Nb ワイヤ(0.127 mm $\Phi$ )の結晶粒を粗大化させるため、1300 K で 3 時間通電加熱し、先端を 5 mol/L の KOH 水溶液で交流電圧で電解研磨した。電解研磨で先鋭化した Nb tip を電界イオン顕微鏡(FIM)に導入し、液体窒素で 110 K に冷却して、電界蒸発によって表面を清浄化した。FIM の結像ガスとして、Nb の蒸発電界(40V/nm)よりもイオン化電界が低い Ne(37V/nm)を  $1.0 \times 10^{-3}$  Pa を用いた。その後、O<sub>2</sub>( $1.0 \times 10^{-5}$  Pa)を導入し、Nb tip 先端の電界強度を一定に保つために最良像電圧(BIV)から段階的に電圧を下げ、電界誘起酸素エッチングを行った。

Fig. 1 は表面清浄後、BIV 8.2 kV で観察した Ne-FIM 像である。リングカウント法により、曲率半径は約 6.4 nm と推定される。また、スクリーン全体に FIM 像が投影されていないことから、突起形状であることが判る。酸素エッチングを 250 秒施した後、BIV 7.4 kV で観察した Ne-FIM 像を Fig. 2 を示す。酸素エッチング後の曲率半径約 3.8 nm であり、エッチング前よりも個々の輝点が大きくなっていることから曲率半径が縮小していることが判る。これらの結果より、本報告での酸素圧条件下で Nb に対しても制御可能な速度で電界誘起酸素エッチングによって先鋭化可能であることが示された。

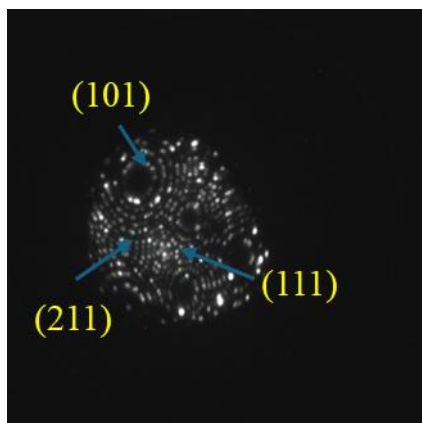


Fig. 1. Ne-FIM image of a clean Nb tip observed at 8.2 kV(BIV) before the oxygen etching

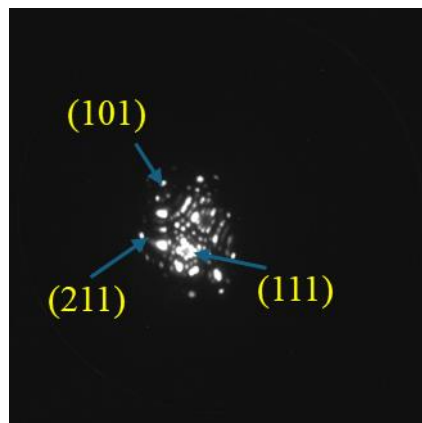


Fig. 2. Ne-FIM image observed at 7.4 kV(BIV) after the oxygen etching

[1] F. Rahman, *et al*, Surf. Sci. **602**, 2128 (2008).

[2] J. A. Wood, *et al*, Surf. Sci. **367**, 277 (2016).

# ショットキーモードでの $\text{LaB}_6$ エミッタの電子放出測定

## Electron emission measurement of a $\text{LaB}_6$ cathode in Schottky mode

名城大理工 ○伊藤 昂陽, 村田 英一, 田中 崇之, 六田 英治

Meijo Univ., ○ T. Ito, H. Murata, T. Tanaka, E. Rokuta

E-mail: 253427001@meijo-u.ac.jp

### 1. はじめに

次世代の電子線リソグラフィ装置の性能向上には、高性能電子源が必要不可欠である。これの実現には、高輝度・大電流・高安定性・長寿命の条件を満たす電子銃を開発することが必要である。長寿命化には動作温度の低下が必要だが輝度は低下する。これまで我々は、低い加熱温度での熱電子放出の評価を行ってきた[1]。今回は、低下した輝度を補償するために、ショットキーモードで  $\text{LaB}_6$  エミッタの評価を行ったので報告する。

### 2. 実験方法

Fig. 1 は実験系の模式図を示す。実験装置内の真空度は約  $10^{-7} \sim 10^{-6}$  [Pa] である。エミッタには  $\text{LaB}_6$  を使用する。負の高圧に浮かせた電流源を用いて、エミッタを通電加熱し、電子放出させる。スクリーン電流  $I_s$  と、スクリーン後方に設置したファラデーカップを用いてスクリーン中央部のビーム電流  $I_F$  を測定できる。エミッタ温度を一定にした条件の下で、エミッタの印加電圧を変化させてファラデーカップ電流  $I_F$  を測定する。

### 3. 実験結果およびまとめ

エミッタ温度を 1535 [K] に固定し、印加電圧を 0.05~2.0 [kV] の間で変化させて  $I_F$  を測定した。Fig. 2 は  $I_F$  の電圧-電流特性を示す。印加電圧が 500 [V] を超えたあたりから本来増加する電流値が減少していく。この原因はエミッタ先端の曲率半径が大きいので、電子がスクリーン方向ではなく引出電極に直接流れ込むためである。またエミッタ側面からの放出電子も引出電極に直接流れ込んでいる。次に、引出電極を取り外し二電極系に変えて、エミッタ温度を 1558 [K], 1395 [K] の二つの条件の下で、印加電圧を 0.4~5.0 [kV] の間で変化させて  $I_F$  を測定した。Fig. 3 は測定した  $I_F$  より作成したショットキープロットを示す。漸近直線の切片から仕事関数は、エミッタ温度が 1558 [K] のとき 2.62 [eV]、エミッタ温度が 1395 [K] のとき 2.53 [eV] と算出できた。 $\text{LaB}_6$  の仕事関数の理論値とほぼ一致している。引出電極を取り外すと、高電界側での漸近線が直線的になっていることからショットキー効果が正常に働いていることが分かる。しかし、これ以上の高電界を印加するためには引出電極を取り付けなければならない。引出電極を取り付けた状態での、ショットキー電子放出の改善策として、エミッタ先端

を除いて密着性が良く仕事関数の高い材料で  $\text{LaB}_6$  エミッタをコーティングすることと、エミッタ先端の曲率半径を小さくすることが考えられる。

[1] 梶田 他：第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 21a-C306-7(2022)

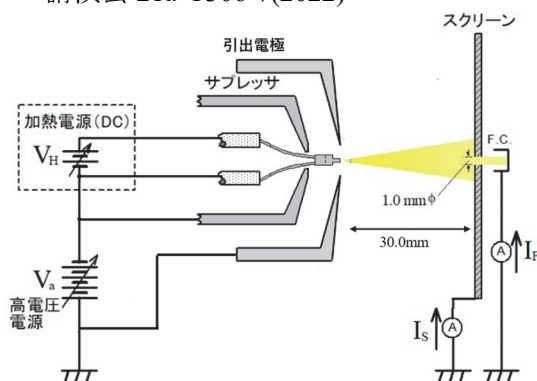


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system

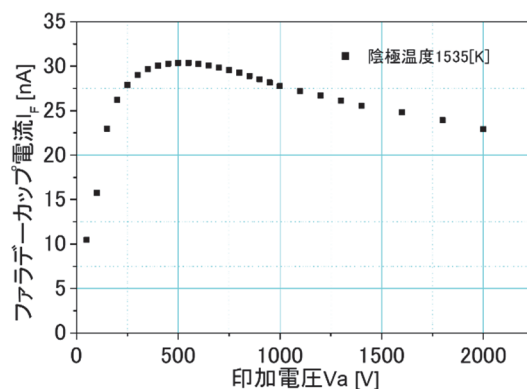


Fig. 2. Voltage-current characteristics of  $\text{LaB}_6$  emitter with extraction electrode

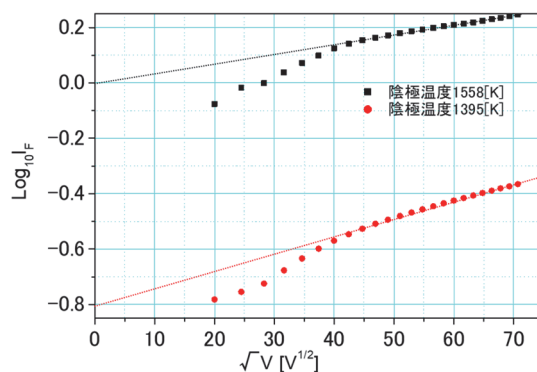


Fig. 3. Typical examples of Schottky plot of  $\text{LaB}_6$  emitter

液体金属を用いた電界放射電子源のエネルギー分析

Energy analysis of field emission electron sources using liquid metal

静大院工<sup>1</sup>, 静岡大電研<sup>2</sup>

○(M2)佐藤 宏樹<sup>1,2</sup>, 根尾 陽一郎<sup>1,2</sup>, 文 宗鉉<sup>1,2</sup>

Grad. Sch. of Eng. Shizuoka Univ.<sup>1</sup>, RIE, Shizuoka Univ.<sup>2</sup>,

◦Hiroki Sato<sup>1,2\*</sup>, Yoichiro Neo<sup>1,2</sup>, Jonghyun Moon<sup>1,2</sup>

\*E-mail: sato.hiroki.20@shizuoka.ac.jp

【研究背景】本研究では大電流放出による輝度向上を目的としている。ガリウム液体金属を表面拡散した電界放射陰極（Ga/W-tip）は、放射エリアを変えずに 10mA 以上の安定した電流放射を可能とする。その時の電流密度は  $10^9\text{A/cm}^2$  に到達する。[1].W-tip の輝度を決定する主な要因は電流密度である。そして高電流密度はジュール熱により W の融点を超える温度上昇を引き起こし、動作上限を決定する。Ga/W-tip は Ga の気化熱を放熱過程に利用することでエミッションサイトの温度を融点以下の制御を可能とした。これにより従来、W-tip では不可能であった空間電荷制限電流まで到達することを確認した。加えて、3mA を超える空間電荷制限下での長時間動作実験では 100 時間以上の動作に成功した。本報告では,Ga/W-tip のエネルギー分布と理論計算との比較による温度測定の結果を報告する。

【実験・結果】

本研究では,液体金属として Ga を選択し、線径 0.1mm の多結晶 W(011)ワイヤを用いてヘアピンループを作製し、その頂点に陰極材料をスポット溶接した。その後、FE チップ先端を 25%KOH 溶液によって交流法で電解研磨した。FE チップの根元に Ga リザーバーを付着させた後、 $10^{-7}\text{Pa}$  の超高真空チャンバー内にセットし Ga を表面拡散するため W-FIL に通電し加熱を行った後、実験を行った.エネルギー分析はリターディング法を用いて行った。スクリーン上のピンホールに電子を通過させ、阻止電位の大きさを調整することで、コレクタでは阻止電位を超えるエネルギーを持つ電子だけが検出される。この時のコレクタ電流からエネルギー分析を行った。従来の W-tip でエネルギー分析を行った結果を fig.1 に示す図中の表にはエネルギーの分布を正規分布と仮定したときの半値幅を併記している。エネルギー分布幅は電流量とともに広がっていることが確認できた。また, $10\mu\text{A}$  の測定の際はジュール熱が小さく室温で動作していると仮定すると電子放出はフェルミレベル近傍に限られるため、図中の 5V 付近がフェルミレベルに相当すると考えられる。液体金属電子源について同様の実験を行った結果についても報告する予定である。

【参考文献】

[1] Yoichiro Neo, et al., J. Vac. Sci. Technol. A 41, 063104 (2023) [2] D. V. Glazanov, et al., Zh. Tekh. Fiz. 59(5), 60-68(1989).

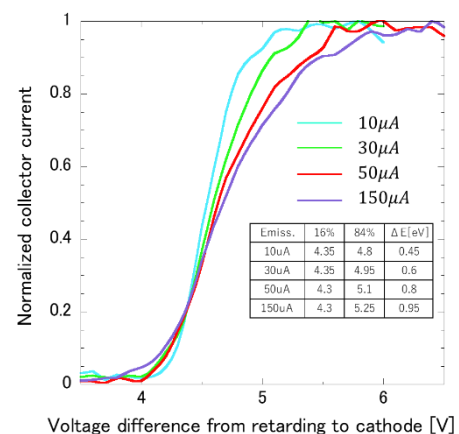


Fig 1: Energy distribution of the W-tip

## 高温超伝導体からの電界電子放出特性に関する考察

### Study on Field-Emission Property from High- $T_C$ Superconducting Materials

阪大基礎工<sup>1</sup>, 奈良女子大<sup>2</sup>, 産総研<sup>3</sup> 三宅 広士<sup>1</sup>, 田邊 詩祐<sup>1</sup>, 阿保 智<sup>1</sup>,

○ 若家 富士男<sup>1</sup>, 岩渕 修一<sup>2</sup>, 長尾 昌善<sup>3</sup>, 村上 勝久<sup>3</sup>

UOsaka<sup>1</sup>, Nara Women's Univ.<sup>2</sup>, AIST<sup>3</sup> Hiroshi Miyake<sup>1</sup>, Shiyuu. Tanabe<sup>1</sup>, Satoshi Abo<sup>1</sup>,

○Fujio Wakaya<sup>1</sup>, Shuichi Iwabuchi<sup>2</sup>, Masayoshi Nagao<sup>3</sup>, Katsuhisa Murakami<sup>3</sup>

E-mail: wakaya.f.es@osaka-u.ac.jp

#### 1. はじめに

電子源から単色性の高い電子ビームを得るために、超伝導体からの電界電子放出を利用する手法が以前から検討されている [1–4]。Gadzuk は BCS 理論と Fowler-Nordheim 理論を用いて、BCS 超伝導体から電界電子放出された電子のエネルギー分布 (Total-Energy Distribution, TED) を理論的に導いた [1]。Nagaoka らは 実際に Nb の tip を用いて、超伝導金属から電界電子放出された電子の TED を評価し、実験の都合でブロードになっているものの、Gadzuk の理論と一致する傾向の結果を得ている [2,3]。Nb の nanotip を使って、さらに単色性を向上させた報告もある [4]。しかし、高温超伝導体を用いた実験については、いくつかの報告があるが、超伝導に起因した単色性の向上の報告はない [5–7]。高温超伝導体からの電界電子放出に関する理論の報告もない。そこで、本研究では、高温超伝導体から電界電子放出された電子の TED を理論的に予測することを目的とした。

#### 2. 手法

Gadzuk の理論では、常伝導金属や超伝導金属から電界電子放出された電子の TED は、

$$\text{TED}(\varepsilon) \propto f(\varepsilon) \int d\varepsilon_{\mathbf{k}} A(\mathbf{k}, \varepsilon) \exp\left(\frac{\varepsilon_{\mathbf{k}}}{d}\right) \quad (1)$$

と表される [1]。ここで、 $f(\varepsilon)$  は Fermi 分布関数、 $A(\mathbf{k}, \varepsilon)$  は金属中の電子の Green 関数のスペクトル関数である。また、 $d$  は Fowler-Nordheim 理論に出てくるエネルギーの次元をもったパラメータである。このスペクトル関数をどのように選ぶかによって、常伝導金属や超伝導金属からの TED を求めることができる。高温超伝導体のスペクトル関数については、角度分解光電子分光 (ARPES) によって調べられている [8]。ただ、実験で得られるものはスペクトル関数そのものではないため、式 (1) に直接代入することはできない。そこで、本研究では、ARPES の実験によって得られた高温超伝導体の方向に依存したエネルギーギャップだけを利用して、スペクトル関数の広がり仮定してスペクトル関数を作り、式 (1) に代入することによって、高温超伝導体からの TED を求めた。

#### 3. 結果

報告されている Bi2223 の ARPES の実験結果 [9] を用いて、上述の手法で TED を求めた結果、結晶の方位に依存した TED が得られた。最も単色性の高い電子が放出できるのは、 $a$  軸から  $10^\circ$  程度傾いた軸と垂直な面から電子を取り出したときであった。また、 $a$  軸から  $45^\circ$  傾いた軸と垂直な面から取り出すと、超伝導性に起因する単色性の向上は期待できないことも分かった。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 22H01498, 24K00954 の助成を受けたものです。

文献 [1] J. W. Gadzuk, Surf. Sci., **15**, 466 (1969). [2] K. Nagaoka *et al.*, Nature, **396**, 557 (1998). [3] K. Nagaoka *et al.*, Ultramicroscopy, **79**, 51 (1999). [4] C. W. Johnson *et al.*, Phys. Rev. Lett., **129**, 244802 (2022). [5] S. I. Shkumatov, Surf. Sci., **266**, 88 (1992). [6] S. I. Shkumatov *et al.*, Surf. Sci., **266**, 224 (1992). [7] H. Obitsu *et al.*, e-Journal Surf. Sci. Nanotechnol., **22**, 220 (2024). [8] A. Damascelli *et al.*, Rev. Mod. Phys., **75**, 473 (2003). [9] H. Matsui *et al.*, Phys. Rev. B, **67**, 2 (2003).

## Graphene/h-BN/Ni 積層構造平面型電子放出デバイスの開発

### Development of a planar-type electron emission device with a graphene/h-BN/Ni stacked structure

産総研<sup>1</sup>, 横国大<sup>2</sup> ○村上 勝久<sup>1</sup>, 六川 蓮<sup>1,2</sup>, 鷹尾 祥典<sup>2</sup>, 村田 博雅<sup>1</sup>, 長尾 昌善<sup>1</sup>

AIST.<sup>1</sup>, YNU<sup>2</sup>, °Katsuhisa Murakami<sup>1</sup>, Ren Mutsukawa<sup>1,2</sup>, Yoshinori Takao<sup>2</sup>, Hiromasa Murata<sup>1</sup> and Masayoshi Nagao<sup>1</sup>

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

我々の研究グループでは、金属/絶縁体/半導体積層構造の平面型電子放出デバイスの上部金属電極および絶縁膜中での電子散乱の抑制による放出電子のエネルギー単色化を目的として、上部電極に電子の非弾性散乱断面積が小さく原子レベルの薄膜化が可能なグラフェンを、絶縁層にグラフェンと類似した結晶構造の絶縁体である六方晶窒化ホウ素(h-BN)を用いた Graphene/h-BN/Si 積層構造の平面型電子放出デバイスの開発を推進している[1]。これまでに、Graphene/h-BN/Si 積層構造を用いることで、放出電流密度  $9 \text{ A/cm}^2$  と放出電子のエネルギー幅  $0.18 \text{ eV}$  (半値幅) を達成した[2]。これは、従来最もエネルギー単色性の高い電子顕微鏡用の電子銃であるタングステン冷陰極のエネルギー幅( $0.3 \text{ eV}$ )を凌駕するエネルギー単色性である。しかし、この研究では h-BN 絶縁層は銅箔に成膜した h-BN を Si 基板に転写して形成していたため量産性に課題があった。そのため、誘導結合型プラズマ化学気相成長法による Si 基板上への多結晶 BN 直接成膜手法を用いて [3]、Graphene/BN/Si 積層構造平面型電子源を試作し電子放出特性の評価を実施した。その結果、放出電流密度  $1.25 \text{ A/cm}^2$  の電子放出を確認したが、多結晶 BN 絶縁層でのリーク電流により電子放出効率は  $0.0005\%$  程度と低く、大電流密度動作と高効率電子放出の両立のためには BN 絶縁層の高結晶化によるリーク電流の抑制が重要であることが分かった。

本研究では、サファイア基板上にエピタキシャル成膜した Ni(111)基板上にエピタキシャル成長した高結晶多層 h-BN を絶縁層に用いた Graphene/h-BN/Ni 積層構造の平面型電子放出デバイスを試作した(図 1)。その結果、放出電流密度  $6.42 \text{ A/cm}^2$  の大電流密度動作と電子放出効率  $2.32\%$  の高効率電子放出の両立を達成した。

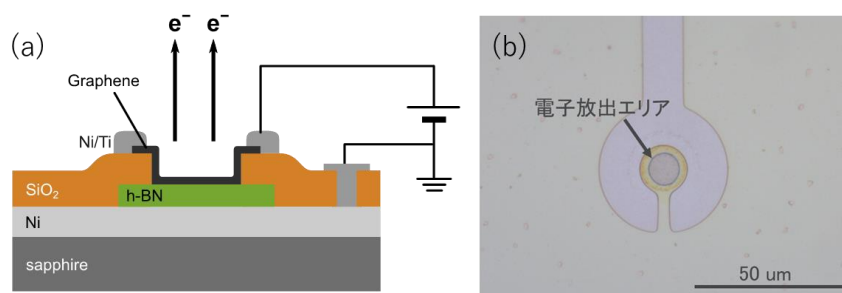


図 1(a)Graphene/h-BN/Ni 積層構造デバイスの模式図、(b)試作したデバイスの光学写真

【参考文献】 [1] K. Murakami et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12**, 4061 (2020). [2] T. Igari et al., *Phys. Rev. Applied* **15**, 014044 (2021). [3] M. Yamamoto et al., *ACS Omega* **8**, 5497 (2023).

## 電界放出電子源の光源径測定の精度低下要因の検証

### Factors causing decreased accuracy in measuring the virtual source size of an electric field emission electron source

日立製作所<sup>1</sup>, 日立ハイテク<sup>2</sup>, <sup>○</sup>川本絵里奈<sup>1</sup>, 松永宗一郎<sup>1,2</sup>

Hitachi, Ltd., R&D Group.<sup>1</sup>, Hitachi High-Tech.<sup>2</sup>, Erina Kawamoto<sup>1</sup>, Soichiro Matsunaga<sup>1,2</sup>

E-mail: erina.kawamoto.rm@hitachi.com

電界放出電子源の光源径は走査型電子顕微鏡(SEM)の空間分解能を決める要因の一つであるが、標準的な実測方法は整備されておらず理論値の実証が困難になっている。このため本発表では、光源計測として、仮想光源(虚像)を試料上に投影する手法を利用した高精度な測定方法を提案する。本来の光源径は投影したビーム径を拡大率で割ることで得られる(fig.1)[1,2]。報告者らはこれまでに、その測定精度の検証方法を提案し、精度が低下する主な原因である拡大率の精度を評価した[3]。今回、その他の測定精度が低下する原因である非点と振動の影響を評価した。

まず非点収差について述べる。非点収差は、光軸と直交する2軸(x、y軸)でビーム径が最小になる収束条件が異なることで生じる収差である。本装置の場合、収束条件は第二コンデンサレンズの励磁電流量を意味する。非点収差がある場合とない場合の収束条件を fig.2(a)(b)中の矢印に示す。非点収差がある場合(fig.2(a))は、ない場合(fig.2(b))と比較して、収束条件のずれが大きく、かつx軸とy軸方向のビーム径の差が大きい。つまり、非点収差により測定精度が低下する。

次は振動について述べる。振動は電気ノイズや機械振動で生じる。振動がある場合、測定するビーム径に振動振幅が重畳されるため、測定精度が低下する。

今回はこの非点と振動振幅の影響を定量評価した。発表では評価方法と結果について報告する。

[1] T. Kawasaki et. al., Ultramicroscopy **202**, 107 (2019).

[2] A. H. V. van Veen et al., J. Vac. Sci. Technol. B **19**, 2038 (2001).

[3] E. Kawamoto et al., Rev. Sci. Instrum. **96**, 063701 (2025).

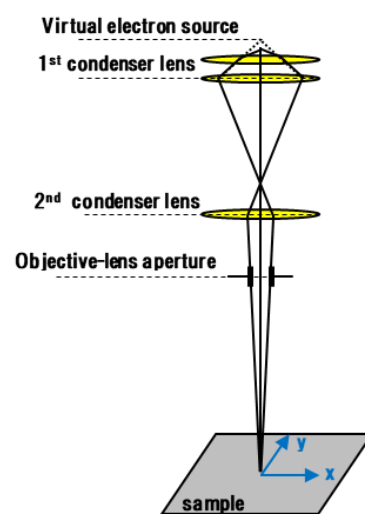


Fig.1. Schematic representation of magnification projection optics

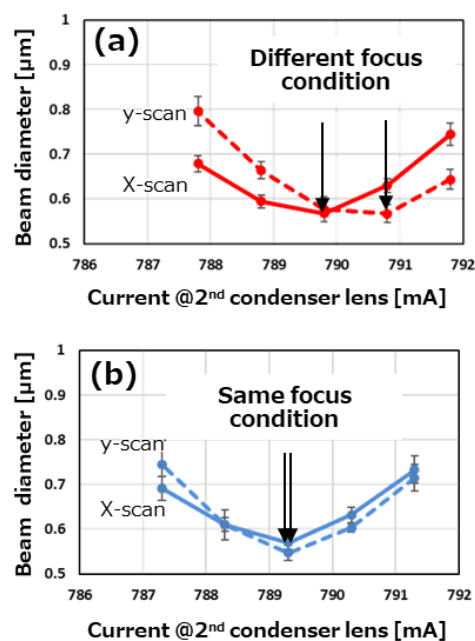


Fig.2. Beam diameters (a) before and (b) after astigmatism adjustment.

## 熱酸化 CeB<sub>6</sub> からの電界放出の安定性評価

### Evaluation of Field Emission Stability from Thermally Oxidized CeB<sub>6</sub>

筑波大数理<sup>1</sup> °鶴田 諒平<sup>1</sup>, 荒井 元哉<sup>1</sup>, 大場 宏祐<sup>1</sup>, 山田 洋一<sup>1</sup>

Univ. Tsukuba<sup>1</sup>, °Ryohei Tsuruta<sup>1</sup>, Motoya Arai<sup>1</sup>, Kosuke Oba<sup>1</sup>, Yoichi Yamada<sup>1</sup>

E-mail: tsuruta.ryohei.gm@u.tsukuba.ac.jp

**[背景]** 低仕事関数を有する六ホウ化セリウム (CeB<sub>6</sub>) は、新たな低電界放出電子源材料として注目されている。しかし、酸素との高い反応性により安定した電界放出の実現が困難であり実用化には至っていない。我々はこれまでに、加熱による清浄化を施した CeB<sub>6</sub> 表面の仕事関数が酸素暴露により敏感に増加し、1 L の酸素暴露で飽和することを報告した[1]。一方で CeB<sub>6</sub> 単結晶を熱酸化することによって表面が不活性化し、仕事関数が安定化することが明らかになった[2]。また、熱酸化後の表面ではストイキオメトリーの変化が起きる B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のサブレイヤーが生成することが示唆された。本研究では熱酸化によって不活性化した CeB<sub>6</sub> からの電界電子放出特性を評価し、電界電子放出電流の安定化を目指した。

**[実験]** CeB<sub>6</sub> 電界放出エミッター (CeB<sub>6</sub> tip) は棒状の CeB<sub>6</sub> 単結晶を電界研磨エッチングによって先鋭化することで作製した。これを  $1 \times 10^{-8}$  Pa の真空中でフラッシングによって清浄化しサンプルとして用いた。このサンプルを  $1 \times 10^{-5}$  Pa の酸素分圧中で 800°C に加熱することで熱酸化処理を行った。熱酸化後の電界放出パターンおよびその特性を評価した。

**[結果・考察]** Fig.1 に、CeB<sub>6</sub> tip からの電界放出におけるパターンおよびその特性について示す。Fig.1(a) 図中に示すように清浄な CeB<sub>6</sub> からの電子放出では先行研究[3]同様に(100)が等価な(310)に囲まれた四ツ葉状のパターンを示した。一方で熱酸化後では(310)等価面からの電子放出が弱くなり、その間の(311)面からの電子放出が新たに現れた。これは熱酸化によってストイキオメトリー変化が起こり、仕事関数が低下した新たな面からのエミッションである考えられる。また、熱酸化前後の電流電圧特性を計測したところ、電子放出の閾値電圧が清浄化 tip で、1.00 kV であったのに対して、熱酸化 tip では 0.85 kV となった。また、この電流-電圧特性から Fowler-Nordheim (FN) プロットを作成した。いずれの場合もプロットは直線的であり、電子放出が電界放出によるものであることが確認された。熱酸化後では、FN プロットの傾きが小さくなっており、電界放出効率の向上が示唆される。

さらに、SEM 像からは熱酸化によって tip の形状に変化がないことが確認されており、この効率向上は仕事関数の低下によるものと考えられる。この CeB<sub>6</sub> の熱酸化によって形成されるパッシベーション層と、新たな高効率電子放出サイトを活用することで、CeB<sub>6</sub> を用いた新たな高効率電界放出エミッターの開発に向けた有用な指針が得られる。

- [1] 鶴田、他、第 71 回応用物理学会春期学術講演会、25a-12M-4 (2024)  
 [2] 鶴田、他、第 72 回応用物理学会春期学術講演会、15p-K507-3 (2025)  
 [3] K. Kasuya, et al., Appl. Phys. Lett., 117, 213103 (2020)

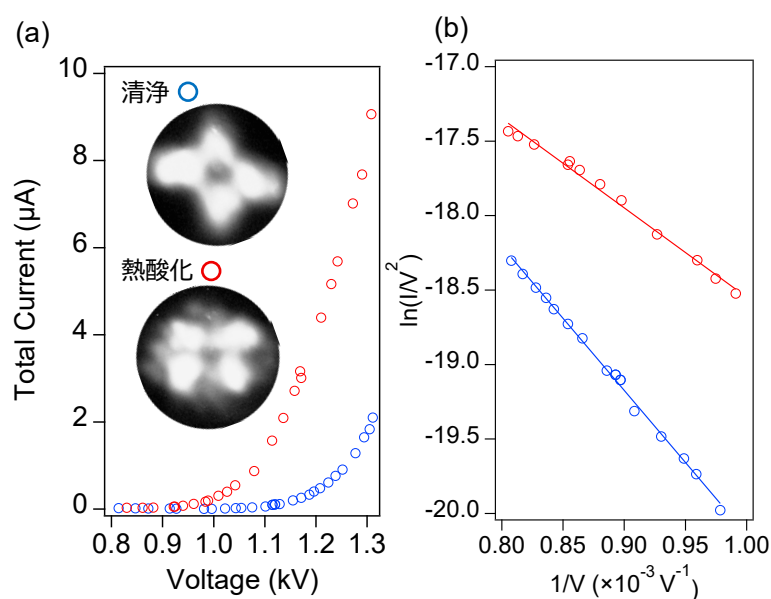


Fig.1. Field emission characteristics from a CeB<sub>6</sub> tip: (a) Current voltage (I-V) characteristics and (b) Fowler-Nordheim (F-N) plot.

# 有機分子による仕事関数制御を通じたフォトカソードの寿命延伸と量子効率改善 Extending the Lifetime and Improving the Quantum Efficiency of Photocathodes via Work Function Control with Organic Molecules

千葉大融合理工<sup>1</sup>, 千葉大先進<sup>2</sup>, 千葉大 MCRC<sup>3</sup>, 信州大工<sup>4</sup>, 大阪大<sup>5</sup>, 日本触媒<sup>6</sup>  
 ○館農 真斗<sup>1</sup>, 森山 美優<sup>1</sup>, 大原 正裕<sup>4</sup>, 森井 克行<sup>2,5,6</sup>, 石井 久夫<sup>1,2,3</sup>, 深川 弘彦<sup>1,2,3</sup>  
 GSSE<sup>1</sup>, CFS<sup>2</sup>, MCRC<sup>3</sup>, Chiba Univ., Eng. Shinshu Univ<sup>4</sup>, Osaka Univ.<sup>5</sup>, Nippon Shokubai Co., Ltd.<sup>6</sup>  
 ○Manato Tateno<sup>1</sup>, Miyu Moriyama<sup>1</sup>, Masahiro Ohara<sup>4</sup>, Katsuyuki Morii<sup>2,5,6</sup>, Hisao Ishii<sup>1,2,3</sup>,  
 Hirohiko Fukagawa<sup>1,2,3</sup>

E-mail: 25wd2202@student.gs.chiba-u.jp

フォトカソードは光電子増倍管の第一カソードや放射光施設の電子源等、様々な産業・研究機器に必要な構成要素である。この光電変換量子効率 (QE) を向上させるために、仕事関数 (WF) が実用的な元素中で最も低いセシウム (Cs) が広く用いられている。一方、Cs は極めて反応性が高く、そのため多くのフォトカソードは、動作寿命の短さや高真空度を要求する動作環境といった課題を抱えている。特に可視光領域で高い QE を持つ、負の電子親和力 (NEA) フォトカソードは、表面を Cs で低 WF 化する必要があるために、寿命が数十～数百時間程度と極めて短い<sup>1</sup>。本研究では、これら問題の根本的な解決を目指し、電極金属と配位結合を形成することで、電荷移動および配向分極による界面分極を形成し、WF を 2 eV 以上減少させることができるフェナントロリン (Phen) 誘導体 (図 1a)<sup>2</sup>に着目した。この低 WF 表面はダングリングボンドを持たず、Phen 誘導体が広いバンドギャップを持つため、Cs に比べて優れた WF 安定性が期待できる。

本研究では、Phen 誘導体を用いたフォトカソードの特性評価を目的として、超高真空 (UHV) 及び高真空 (HV) の二つの真空環境下での WF と、その時間安定性を測定した。さらに、UHV 環境での QE と光電子放出過程を評価した結果、これらが Cs よりも優れた安定性と高い QE を持つことを明らかにした。

酸化インジウムスズ (ITO) 基板上にアルミニウム (Al) を 1 nm、Phen 誘導体を 3 nm 真空蒸着し、測定サンプルとした。HV での WF の評価には、製膜中の WF を測定できる回転型ケルビンプローブ (RKP) を用い、UHV での WF 評価には、紫外光電子分光 (UPS) を用いた。QE の評価は、ソースメジャー電源と光電子増倍管を用い、7.7–1.5 eV の励起光エネルギー範囲で行った。

RKP を用いて成膜中および成膜後の WF を評価した結果を図 1b に示す。Phen 誘導体の膜厚が 3 nm に達するまで WF は連続的に低下し、*p*-Pyrrd-Phen では 2.2 eV まで低下した。HV 環境下においても Phen 誘導体蒸着表面の WF は安定しているのに対し、Cs では成膜中および成膜後の WF が極めて不安定であることが確認された。また、図 1c に示す通り、*p*-Pyrrd-Phen は 2.7–3.5 eV の波長領域において、Cs の 2 倍以上の QE を示した。これらの結果は、Phen 誘導体の活用により、フォトカソードの長寿命化および動作環境の真空度に対する制約の緩和が可能となることを示唆している。

<sup>1</sup> X. Wang, *et al.*, *J. Mater. Chem. C* 9(38), 13013–13040 (2021).

<sup>2</sup> H. Fukagawa, *et al.*, *Nat. Commun.* 11(1), 3700 (2020).

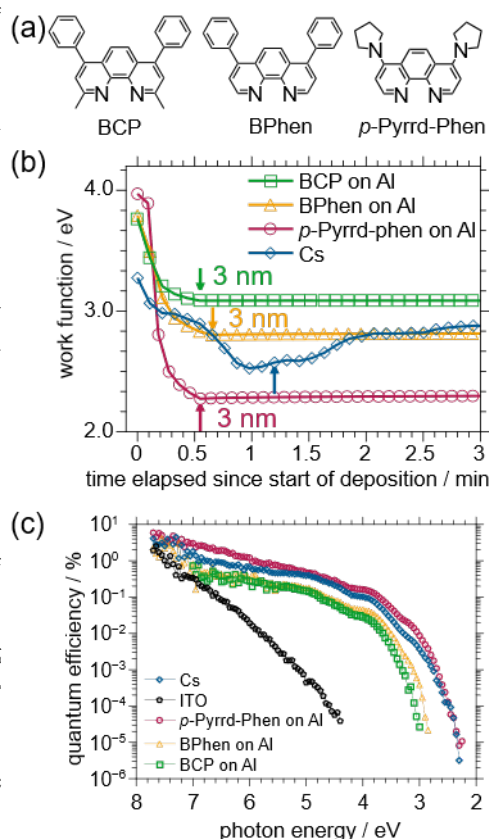


Figure 1. (a) Phen derivatives. (b) Work functions measured by RKP during the deposition of Phen derivatives and Cs onto Al/ITO and ITO in HV conditions. The arrows indicate the end points of the deposition. (c) Quantum efficiencies of bare ITO, Cs deposited on ITO and Phen derivatives deposited on Al/ITO. Adapted from M. Tateno *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* (2025), licensed under CC BY 4.0. © 2025 American Institute of Physics.

## フォトカソード形状の違いによる極短パルス電子線の伝播・特性の変化

### Differences in propagation and properties of ultrashort pulsed electrons from tip and plate photocathode

筑波大数理<sup>1</sup>, CNRS IRL Dynacom<sup>2</sup> <sup>◦</sup>(M1)長尾 梨代<sup>1</sup>, Gael Privault<sup>1</sup>, 嵐田 雄介<sup>1</sup>, 岩崎 ゆい<sup>1</sup>,

野山 豪大<sup>1</sup>, 藤田淳一<sup>1</sup>, Arnaud Arbouet<sup>1,2</sup>, 羽田真毅<sup>1</sup>

Univ. Tsukuba<sup>1</sup>, CNRS IRL Dynacom<sup>2</sup> <sup>◦</sup>(M1)Riyo Nagao<sup>1</sup>, Gael Privault<sup>1</sup>, Yusuke Arashida<sup>1</sup>,

Yui Iwasaki<sup>1</sup>, Godai Noyama<sup>1</sup>, Jun-ichi Fujita<sup>1</sup>, Arnaud Arbouet<sup>1</sup>, Masaki Hada<sup>1</sup>

E-mail: s2520312@u.tsukuba.ac.jp

我々は、高いコヒーレンスを持つ極短パルス電子線を用いて、超分子やたんぱく質などナノメートルオーダーの周期構造を持つ分子・材料の構造ダイナミクス計測を目指している。そのため、コヒーレンス長が 10 nm 程度、パルス幅が 10 ps 程度の超高速時間分解電子線回折装置の開発を通して、実測データと数値シミュレーションの両面から極短パルス電子線の真空中における伝播、電子線の持つ特性（パルス幅、ビーム径、電子密度、コヒーレンス長など）を比較検討している。本発表では、特に数値シミュレーションから得られた本研究で開発している探針型と従来から超高速時間分解電子線回折装置に用いられてきた金属平板型のフォトカソードによる電子線の伝播様式の違いやその特性の違いを明らかにする。

シミュレーションには粒子追跡ソフト ASTRA 及び電場解析用 Python モジュール Netgen/NGSolve を利用した。探針型、金属平板型の両フォトカソードにおいて、電子を針先端またはプレート表面からアノードまでの間で 45 keV まで加速する条件とし、有限要素法により装置内の静電場を計算した。探針型では直径 1  $\mu\text{m}$  の半球状先端表面に、プレート型では平面上に電子の初期分布を配置した。従来型装置ではフォトカソードからサンプルまでの間に磁気レンズは存在しない。一方、探針型フォトカソードを用いた装置では 2 つの磁気レンズを有し、1 つ目のレンズで電子線を平行化、2 つ目のレンズで集光する。これらの磁気レンズ条件はベル型近似磁場を用いて設定した。シミュレーションの結果、サンプル位置における電子線パルスのコヒーレンス長は、探針型で約 10 nm、プレート型で約 2 nm となった。また、電子線パルス幅と電子数の関係は、探針型で電子線パルス幅は電子数の 1/3 乗に比例したのに対し、プレート型では電子数に対して線形に近い増加を示し、異なる空間電荷効果の支配機構を示唆している。これは探針型では三次元的な空間電荷効果が、プレート型では電子線パルスの進行方向への二次元的な効果が支配的であることによると考えられる。以上の結果から、初期電子の放出形態の違いがサンプル位置での電子線特性に強く影響を与えることが明らかになった。透過型電子顕微鏡や走査型電子顕微鏡では探針型のフォトカソードが用いられることが多く、この結果は極短電子線パルスを用いた電子顕微鏡開発へ大きく貢献すると期待される。

## 金属メタ構造を利用するフォトカソードの開発

### Development of Photocathodes Utilizing Metal Metasurfaces

高エネ研<sup>1</sup>, 筑波大物理<sup>2</sup> ○福本 恵紀<sup>1</sup>, エリザベス ピアテンコ<sup>1</sup>, 豊澤 剛<sup>2</sup>, 久保 敦<sup>2</sup>  
 KEK<sup>1</sup>, Univ. Tsukuba<sup>2</sup>, ○Keiki Fukumoto<sup>1</sup>, Elizaveta Pyatenko<sup>1</sup>, Tsuyoshi Toyosawa<sup>2</sup>, Atsushi Kubo<sup>2</sup>

E-mail: keiki@post.kek.jp

材料に仕事関数より大きな光子エネルギーをもつ光を照射すると、光電効果により電子を取り出すことができる。本研究では、仕事関数よりも小さなエネルギーであっても、その光が材料表面に大きな電場を誘起することで、効率良く光電効果を誘起する方法を発見した。さらに、電場はナノスケールの局所的に発生するため、この原理は電子線源の集束に適している。

金属メタ構造は、近赤外光領域の光電場周期と共鳴するアンテナとなる。これにより、誘起される自由電子の集団振動を表面プラズモンと呼ぶ。弱い光強度であっても、電子の粗密波である表面プラズモンが誘起する分極振動をナノスケールに集中するようにメタ構造を最適化することで、局所的に大きな電場を発生させることができる。さらに、この局所に光電効果が誘起されやすい構造欠陥が存在すると、膨大な量の光電子が放出される。

図 1(a) は、金属メタ構造の模式図である。Si 基板上に厚さ 100 nm の Au 均一膜、その上に厚さ 60 nm の正三角形の Au メタ構造が電子線リソグラフィーでパターンニングされている。一辺の長さが 400 nm、重心距離が 500 nm で、2 次元的に配列されている。

この試料は、780 nm

の波長の光に共鳴することが FDTD 法によるプラズモニックバンド計算により推測されている。正確な共鳴波長を観測するために、入射光の波長を 730 nm から 860 nm まで 2 nm ステップで掃引しながら、光電子顕微鏡を検出器として光電子の放出箇所、また、同時に試料に供給される電流量を計測した。図 1(b) の左軸は光電子顕微鏡像から見積もった光電子放出量、右軸は試料に供給された電流量であり、同じスペクトル形状をしている。図中に、励起波長が 780 nm の時の光電子顕微鏡像を示す。図中の明るい点がメタ構造の頂点から放出された光電子である。放出電子線のエネルギー幅が約 40 meV と非常に狭いことが特徴であり、この点からも集束に適した電子線源と言える。

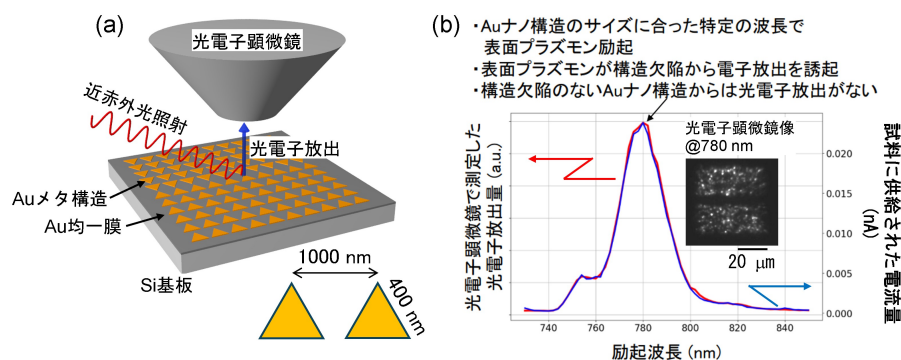


図 1: (a) Au メタ構造と実験手法の模式図。(b) フェムト秒レーザーの波長に依存する光電子放出量 (赤プロット) と試料に供給された電流量 (青プロット)。

[1] 「フォトカソード及びその評価方法」、福本・久保・足立、出願日：2023 年 5 月 17 日、特許番号：第 7629672 号

# NEA-InGaN フォトカソードにおける電子ビーム動作時間の現状

## Electron beam operating time of NEA-InGaN Photocathodes

PeS<sup>1</sup>, 名大未来研<sup>2</sup> ○小泉 淳<sup>1</sup>, 佐藤大樹<sup>1,2</sup>, 西谷智博<sup>1,2</sup>, 本田善央<sup>2</sup>, 天野 浩<sup>2</sup>

Photo electron Soul Inc.<sup>1</sup>, IMaSS, Nagoya Univ.<sup>2</sup>

○Atsushi Koizumi<sup>1</sup>, Daiki Sato<sup>1,2</sup>, Tomohiro Nishitani<sup>1,2</sup>, Yoshio Honda<sup>2</sup>, Hiroshi Amano<sup>2</sup>

E-mail: a.koizumi@photoelectronsoul.com

【背景・目的】半導体フォトカソード電子銃は、励起光強度に応じたプローブ電流をナノ秒程度の時間スケールで容易に制御できる[1]。半導体フォトカソード電子銃を搭載した走査型電子顕微鏡(PC-SEM)では、試料の蓄積電荷量を空間的に制御して観察することで、配線することなく MOSFET のデバイス動作を可視化する[2]などを実現し、電子ビームの産業応用に貢献しつつある。その一方で、半導体フォトカソードは、「脆弱な NEA 表面を使うので短寿命」というイメージを持たれている。そこで、本研究では、我々が開発している NEA-InGaN フォトカソードの電子ビーム動作時間、及び、窒素導入によるイオンバックボンバードメントを用いた加速劣化試験の影響を調べた。

【実験方法】フォトカソードに使用した InGaN は、MOCVD 法によりサファイア基板上に成長した[3]。動作時間は、アノード・カソード間距離が約 20 mm の半導体フォトカソード評価専用の電子銃にて励起光強度のフィードバック制御を行い、放出電流を固定して測定した。加速電圧は、10 kV または 5 kV とした。加速劣化試験では、通常動作によるフォトカソードの劣化に時間を要するため、電子銃室が  $5 \times 10^{-7}$  Pa となるようにリークバルブから窒素ガスを導入し、加速電圧 10 kV、電子放出サイズ  $\sigma = 1.8 \mu\text{m}$ 、初期ビーム電流 50  $\mu\text{A}$  の制御条件にて数時間動作させ、イオンバックボンバードメントにより劣化を促進させた。その後、電子銃内で加熱洗浄(HC)と Cs, O<sub>2</sub> による NEA 活性化、カソード上の量子効率(QE)分布と高励起密度における QE 測定、加速劣化試験を繰り返して行い、QE の変化を調べた。

【結果】ビーム電流 20  $\mu\text{A}$  (カソード面上での電流密度 196 A/cm<sup>2</sup> に相当)での QE の時間変化を図 1 に示す。点線は、最大励起パワーでビーム電流を維持できる QE を示している。この試験では、およそ 30 時間維持できていることが分かる。図 2 に放出電荷量に対する動作試験後、及び、各加速劣化試験後の QE の変化を示す。加速劣化試験後は、イオンバックボンバードメントの影響で急激な QE の低下が観察された。その後の加速劣化試験における QE の低下は、0.04%程度で飽和する傾向が観察された。さらに、全ての加速劣化試験後に HC と NEA 活性化して動作試験を行ったところ、10  $\mu\text{A}$  を 30 時間維持した。

[1] D. Sato *et al.*, JVST **B40**, 064204 (2022). [2] D. Sato *et al.*, Proceedings Volume 12955, Metrology, Inspection, and Process Control XXXVIII; 1295529 (2024); DOI: 10.1117/12.3009947 [3] A. Koizumi *et al.*, JVST **B40**, 062202 (2022).

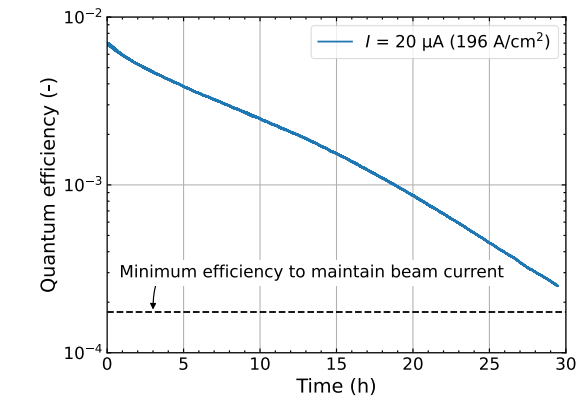


Fig. 1. Quantum efficiency evolution with 20  $\mu\text{A}$  beam current operation.

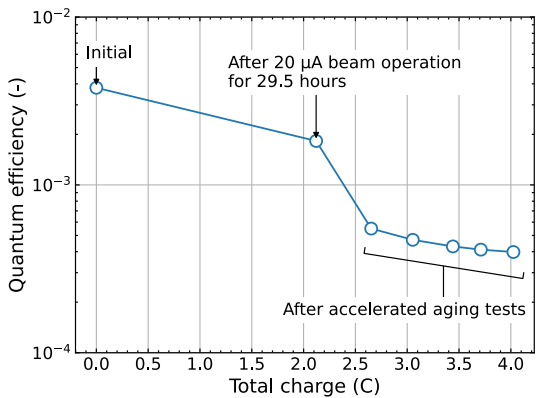


Fig. 2. Dependence of quantum efficiency after NEA activation on total emission charge.

# NEA-InGaN フォトカソード電子銃を用いた帯電抑制 SEM 撮像

## Charge-reduced SEM imaging by modulating e-beam from an NEA-InGaN semiconductor photocathode

東レリサーチセンター<sup>1</sup>, Photo electron soul<sup>2</sup>, 名古屋大学 未来材料・システム研究所<sup>3</sup>

○安田光伸<sup>1</sup>, 西谷智博<sup>2,3</sup>, 小泉淳<sup>2</sup>, 荒川裕太<sup>2</sup>, 新美浩太郎<sup>2</sup>, 佐藤大樹<sup>2,3</sup>,  
石川純久<sup>1</sup>, 大塚祐二<sup>1</sup>

Toray Research Centre, Inc.<sup>1</sup>, Photo electron soul Inc.<sup>2</sup>, Nagoya University<sup>3</sup>

○Mitsunobu Yasuda<sup>1</sup>, Tomohiro Nishitani<sup>2,3</sup>, Atsushi Koizumi<sup>2</sup>, Yuta Arakawa<sup>2</sup>, Kohtaro Niimi<sup>2</sup>,  
Daiki Sato<sup>2,3</sup>, Sumihisa Ishikawa<sup>1</sup> and Yuji Otsuka<sup>2</sup>

E-mail: mitsunobu.yasuda.n3@trc.toray

現在、極めて高い耐久性を持ち、ナノ秒パルス電子ビームが生成可能な GaN 系半導体フォトカソード[1]を搭載した半導体フォトカソード (PC) 電子銃の電子ビーム利用機器への応用が進んでいる。電界放出型電子銃から PC 電子銃に置き換えられた SEM(PC-SEM)により、電子ビーム走査に対してパルス電子ビームによる変調を組み込んだ Digital Selective e-Beaming (DSeB)技術が開発されている[2]。これまで我々は、SEM 撮像時に生じる電子線照射時の電池材料内のフッ素抜けが、PC-SEM を用いたパルス電子ビームによる間欠照射により抑制されることを報告してきた[3]。本間欠照射方式で視野全体の像取得のために、間欠照射のタイミングをピクセル単位でずらした DSeB 技術による SEM 撮像 (二次電子像、Vacc = 0.8 kV) を行った。Figure 1(b)は、視野全体を 9 分割した間欠照射像 9 枚を、照射箇所のみ重ね合わせた SEM 像であり、Pt と Glass の界面が明瞭になると共に、Glass 側で顕著な正帯電による黒色のコントラストが抑制された。

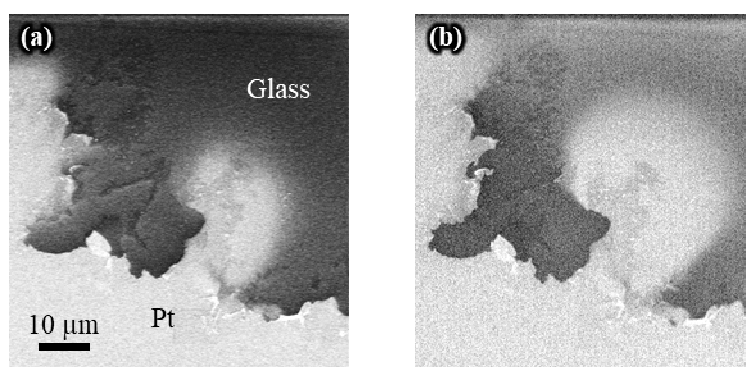


Figure 1. SEM image of a Pt thin film with defects on glass (scanning speed 200 ns/pix):

(a) continuous electron beam image and (b) composite image of nine delays from pulsed imaging in which only one pixel out of nine was electron irradiated.

[1] T. Nishitani et al., J. Vac. Sci. Technol. B 32, 06F901 (2014).

[2] T. Nishitani et al., J. Vac. Sci. Technol. B 40, 064203 (2022).

[3] 石川純久ら, 日本顕微鏡学会第 80 回学術講演会 3amF\_I-2-02 (2024).

# c 面サファイア基板上 AlGaAs 分子線エピタキシャル成長層の 結晶構造評価

## Crystal structure of AlGaAs Molecular Beam Epitaxially Grown on c-plane Sapphire

北大情科院<sup>1</sup>, 北大量集セ<sup>2</sup>, フォトエレクトロンソウル<sup>3</sup>

○(M1)和島 颯汰<sup>1,2</sup>, (D)橋本 英李<sup>1,2</sup>, 佐藤 大樹<sup>3</sup>, 小泉 淳<sup>3</sup>, 西谷 智博<sup>3</sup>, 石川 史太郎<sup>2</sup>

Hokkaido Univ.<sup>1</sup>, Hokkaido Univ. RCIQE.<sup>2</sup>, Photo electron Soul Inc.<sup>3</sup>

○Sota Wajima<sup>1,2</sup>, Hidetoshi Hashimoto<sup>1,2</sup>, Daiki Sato<sup>3</sup>, Atsushi Koizumi<sup>3</sup>,

Tomohiro Nishitani<sup>3</sup>, Fumitaro Ishikawa<sup>2</sup>

E-mail: wajima.sota.d0@elms.hokudai.ac.jp

サファイアは紫外から赤外まで高い光学的透明性を示し、その機械的強度、高温安定性、絶縁性と相まって、フォトニクスやエレクトロニクスの多様な用途への応用が期待されている。一方、GaAs は直接遷移型の半導体材料であり、優れた光源として広く利用されている。サファイアと III-V 族半導体は熱膨張係数が近く、GaAs は Si より高い電子移動度を持つ。最近 Kumar らは、サファイア基板上に高品質の GaAs を成長させることに成功した[1]。彼らの方法は、成長の初期段階で AlAs バッファ層を採用し、その後の GaAs の成長を最適化した。AlGaAs は一般に GaAs よりも高い成長温度で形成できるため、サファイア基板上へのヘテロエピタキシャル成長に有利に働くと期待される。本研究では、GaAs よりもバンドギャップが大きく、良質なヘテロ接合を形成する可能性のある AlGaAs をサファイア基板上に成長した試みについて報告する。

サファイア(0001)基板上に分子線エピタキシー(MBE)法で  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  を成長させ、その結晶特性と表面形態を評価した。成長は、基板温度  $650^\circ\text{C}$  の熱処理後、 $560^\circ\text{C}$  で 5nm の AlAs バッファ層を成長し、 $730^\circ\text{C}$  で  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  層 (厚さ 30 nm, 100 nm, 200 nm, 500 nm) を成長させた。 $\theta$ - $2\theta$  X 線回折測定の結果から、AlGaAs(111)回折ピークが観察され、サファイア基板上にエピタキシャル成長された薄膜形成が示唆された。また AlGaAs(022)面を測定対象として  $\Phi$  スキャンを行った結果、基板配向を反映してエピタキシャル成長した AlGaAs(111)面に特徴的な三回対称性を示した。加えて AlGaAs(022)ピークの間に微小なピークが確認され、一部に双晶欠陥が存在することが示唆された。

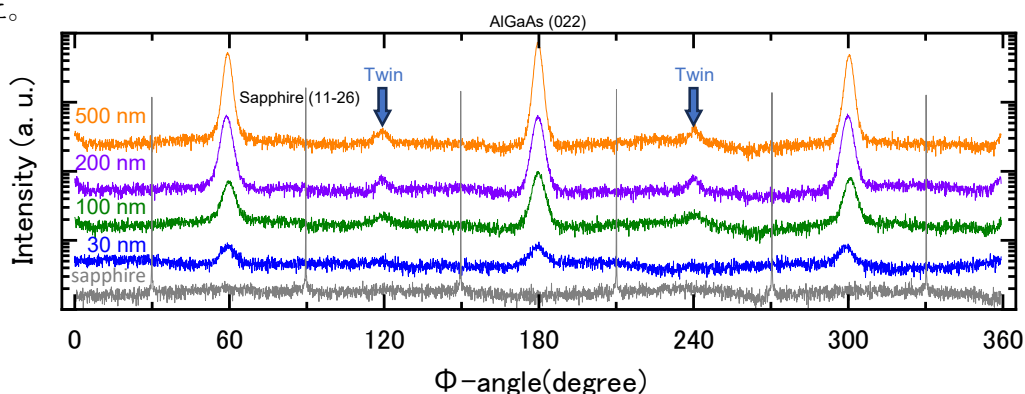


Figure 1. Off-Axis phi scan of AlGaAs(022) and Sapphire(11-26)

1. R. Kumar et al., Cryst. Growth Des., 23, 7385 (2023).