

一般セッション(口頭講演) | 7 ビーム応用：7.2 電子ビーム応用

■ 2023年9月20日(水) 13:00 ~ 16:15 | 会 A501 (熊本城ホール)

[20p-A501-1~12] 7.2 電子ビーム応用

村上 勝久(産総研)、若家 富士男(阪大)

◆奨励賞エントリー

13:00 ~ 13:15

[20p-A501-1] Graphene-Insulator-Semiconductor構造電子源におけるエネルギーフィルタ効果

○小市 崇央¹、河島 祥吾¹、阿保 智¹、若家 富士男¹、長尾 昌善²、村上 勝久² (1.阪大基礎工、2.産総研)

13:15 ~ 13:30

[20p-A501-2] 平面型グラフェン電子源への耐酸素保護膜の作製と電子放出特性評価

○六川 蓮^{1,2}、鷹尾 祥典¹、村田 博雅²、長尾 昌善²、村上 勝久² (1.横国大理工、2.産総研)

13:30 ~ 13:45

[20p-A501-3] 真空集積回路実現へ向けた真空トランジスタ二段増幅回路の動作実証

○堀 良輔¹、大住 知暉^{1,2}、長尾 昌善²、村田 博雅²、後藤 康仁¹ (1.京大院工、2.産総研)

13:45 ~ 14:00

[20p-A501-4] 単一分子からの電界放射角度分布 (FAD)の起源

○山田 洋一¹、鶴田 諒平¹、小野 裕太郎¹、延山 知弘¹、佐々木 正洋¹ (1.筑波大)

14:00 ~ 14:15

[20p-A501-5] タングステンカーバイド探針からの電界電子放出電流安定性

○鶴田 諒平¹、柳 俊輔¹、山田 洋一¹ (1.筑波大数理)

14:15 ~ 14:30

[20p-A501-6] Co/Ptナノ突起構造体を用いた電界放出陰極の電界放出電流に対するスピン偏極度

○宮田 啓太郎¹、岩田 達夫¹、永井 滋一¹ (1.三重大院工)

◆奨励賞エントリー

14:45 ~ 15:00

[20p-A501-7] 高温超伝導体Bi2212からの電界放出電子のエネルギー分布のシフト

○大櫃 温仁¹、岩田 達夫¹、畑 浩一¹、永井 滋一¹ (1.三重大院工)

◆奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[20p-A501-8] 液体金属ガリウム被覆したタングステンからの電界放射特性

○小田 陸人^{1,2}、根尾 陽一郎^{1,2}、文 宗鉉^{1,2} (1.静岡大院工、2.静岡大電研)

15:15 ~ 15:30

[20p-A501-9] 転写モールド法によるプラズモニック結晶ホトカソードの作製

○岸本 透弥¹、根尾 陽一郎^{1,2}、文 宗鉉^{1,2} (1.静岡大工、2.静岡大電研)

15:30 ~ 15:45

[20p-A501-10] 貫通転移密度の異なるInGaNフォトカソードの電子放出特性

○(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 (1.名大院工、2.Photo electron Soul、3.名大IMaSS)

15:45 ~ 16:00

[20p-A501-11] GOS構造平面型電子源の光支援電子放出特性

○嶋脇 秀隆¹、長尾 昌善²、村上 勝久² (1.八戸工大、2.産総研)

16:00 ~ 16:15

[20p-A501-12] グラフェン/p-Siショットキー接合からの電子放出

○村上 勝久¹、村田 博雅¹、長尾 昌善¹ (1.産総研)

Graphene-Insulator-Semiconductor 構造電子源における エネルギーフィルタ効果

Filter Effects on Energy in Graphene-Insulator-Semiconductor-Structured Electron Source

阪大院基礎工¹, 産総研², ○小市 崇央¹, 河島 祥吾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 Koichi¹, Shogo Kawashima¹, Satoshi Abo¹, Fujio Wakaya¹,
Masayoshi Nagao², Katsuhisa Murakami²

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

電子源から放出された電子ビームについて、電子顕微鏡などの分野で、より高性能な電子源として求められるのは、その単色性と平行性である [1]。Graphene-Insulator-Semiconductor (GIS) 構造の平面電子源は電子放出効率 48.5 % を達成し [2]、Insulator として六方晶窒化ホウ素 (*h*-BN) を用いることでエネルギー幅を 0.18 eV 程度に抑えた [3]。一方、グラフェン層は結晶構造がよく知られており、膜厚を制御して作製することが可能であり、膜厚や入射する電子のエネルギーを制御することで、単色性、平行性が高い電子を選択的に透過させることができる可能性がある。単層グラフェンに対して、電子透過シミュレーションを行った報告 [4] はあるが、多重反射については言及されていない。本研究の目的は、電子の Graphene 層での層間多重反射によるエネルギーフィルタ効果に着目した GIS 構造電子源の放出特性のシミュレーションを行うことである。

グラフェンの単位胞を、*x* 方向の長さを $L_x = 4.26 \text{ \AA}$ 、*y* 方向の長さを $L_y = 2.46 \text{ \AA}$ とし、*z* 方向を面直方向とした。*x*, *y* 方向は周期境界とし、*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。グラフェン層のポテンシャル $V(\mathbf{r})$ は、第一原理計算から電子密度を求めた後、トーマスフェルミ近似と遮蔽クーロンポテンシャルにより求めた。 $x = 1.775 \text{ \AA}$, $y = 0 \text{ \AA}$ でのポテンシャル $V(\mathbf{r})$ を図 1 に示す。初期波束は、+*z* 方向に進むガウス型の波動関数

$$\Phi(\mathbf{r}, t = 0) = \frac{1}{\sqrt{L_x L_y}} \left(\frac{2}{\pi \alpha_0^2} \right)^{\frac{1}{4}} \exp \left(ik_0 z - \frac{(z - z_0)^2}{\alpha_0^2} \right) \quad (1)$$

とした。ここで、 α_0 はガウス型波束の大きさを表すパラメータ、 $k_0 = \frac{\sqrt{2mE_0}}{\hbar}$ は電子の波数である。この波動関数を時間発展させ、グラフェン層に入射した。波動関数は

$$\Phi(\mathbf{r}, E) = \frac{1}{2\pi} \int \Phi(\mathbf{r}, t) e^{i \frac{Et}{\hbar}} dt \quad (2)$$

により、エネルギー領域に変換し、各エネルギー E に対する透過率と反射率を求めた。GIS 構造のような平面電子源に印加される電圧は 10 V 程度であるが、本研究では数 eV ~ 数百 eV のエネルギー帯での透過率、反射率を計算した。また、様々なグラフェン層数に対して透過率を計算し、グラフェン層による多重反射が起こり、エネルギーフィルタ効果が現れることを確認した。

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] H. Shimoyama and S. Fujita, 顕微鏡, **52** (2017) 160. [2] K. Murakami *et al.*, ACS App. Elect. Mat., **2** (2020) 2265. [3] T. Igari *et al.*, Phys. Rev. App., **15** (2021) 014044. [4] J. A. Yan *et al.*, Phys Rev. B, **84** (2011) 224117.

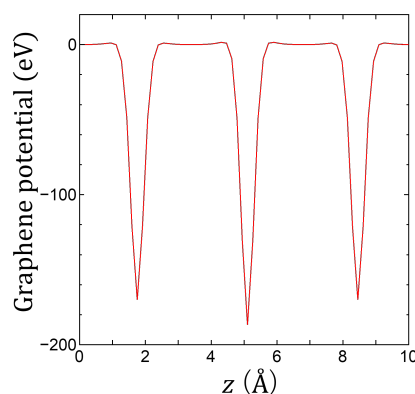


Fig. 1: Potential of 3-layer graphene at $x = 1.775 \text{ \AA}$, $y = 0 \text{ \AA}$.

平面型グラフェン電子源への耐酸素保護膜の作製と電子放出特性評価

Fabrication of Oxygen Resistant Protective Layers on Graphene-oxide-semiconductor Electron Emission Devices and its Emission Properties Evaluation

横国大¹, 産総研² [○](M1) 六川 蓮^{1,2}, 鷹尾 祥典¹, 村田博雅², 長尾 昌善², 村上 勝久²

YNU¹, AIST², [○]Ren Mutsukawa^{1,2}, Yoshinori Takao¹, Hiromasa Murata², Masayoshi Nagao²,

Katsuhisa Murakami²

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

■ 背景と目的

地球低軌道での編隊飛行やコンステレーションなどの高度な宇宙ミッションは、小型推進システムを搭載した小型衛星の登場により、低コストで実現することができる。小型イオンスラスタは、プラズマ源から正イオンを取り出して加速することで推力を発生させる推進機の一つで、小型衛星に搭載することが可能である。イオンスラスタでは、イオンビームを中和するために中和器から電子を放出し、衛星を電氣的に中性に保つことが要求される。従来の中和器、例えばホローカソードでは推進剤を消費してしまう。小型衛星は積載容量の制約があるため、推進剤の消費量を抑える必要がある。そこで、推進剤不要の中和器として、平面型グラフェン電子源(GOS)の利用が期待されている。

平面型グラフェン電子源は、駆動に推進剤を必要とせず、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。図 1 が平面型グラフェン電子源の概略図である。しかし、小型衛星への搭載には課題がある。小型衛星の利用が想定される地球低軌道では、酸素解離により発生する原子状酸素 (Atomic oxygen: AO) によりグラフェン層が酸化・消失し、電子源の機能が失われる恐れがある。そのため、地球低軌道上で平面型グラフェン電子源を中和器として使用するためには、電子放出性能を下げることなく、デバイスのグラフェン層を AO から保護する必要がある。本研究では、平面型グラフェン電子源上に六方晶窒化ホウ素 (h-BN) および酸化アルミニウム (アルミナ) を成膜し、酸素耐性向上を試みた。

■ 実験手法

まず、成膜状況の調査のため、平面型グラフェン電子源と同じ Graphene/SiO₂/n-Si 構造を有する 10 mm × 10 mm サイズの基板上に保護膜を成膜した。h-BN の成膜手法には熱 CVD 法、アルミナの成膜には ALD 法を用いた。

次に、作製した基板に対し、酸素プラズマアッシャーを用いて原子状酸素を含む酸素プラズマの照射を 15 分間行い、その前後でグラフェンのラマンスペクトルの減少の有無を確認した。また、エリプソメトリーを用いた膜厚解析も行い、酸素プラズマによる保護膜・グラフェンの膜厚変化を定量的に評価した。成膜条件のパラメータを繰り返し変更して成膜を繰り返した。上記で酸素プラズマ耐性を確認できた保護膜は、平面型グラフェン電子源上に成膜を行い、電子放出特性の評価も行った。

■ 結果と考察

h-BN とアルミナの保護膜の成膜条件を様々用意し評価を行ったが、最も薄膜で酸素プラズマからグラフェンを保護可能な条件は、ALD 法での膜厚 3.57 nm のアルミナ成膜を行ったものであった。図 2 に示すように 2 回の酸素プラズマ照射を行ってもグラフェン層は減少していない。また、同条件で平面型グラフェン電子源上への成膜を行ったが、電子放出可能であることを確認できた。成膜条件の詳細および電子放出特性については講演において議論する。

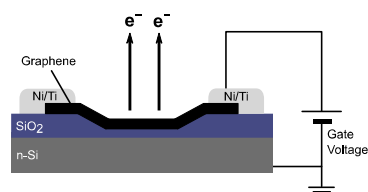


Fig.1 A schematic of GOS electron sources.

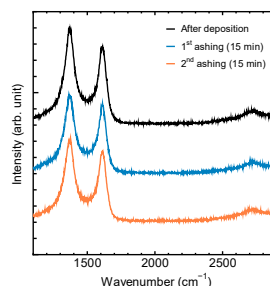


Fig.2 Raman spectra of Graphene/SiO₂/n-Si chip with 3.57 nm aluminum oxide after twice ashing.

真空集積回路実現に向けた真空トランジスタ二段増幅回路の動作実証

Operation of FEA-based Two-Stage Amplifier for Vacuum Integrated Circuits

京大院工¹, 産総研², [○](M1)堀 良輔¹, (D)大住 知暉^{1,2}, 長尾 昌善², 村田 博雅²,
後藤 康仁¹

Kyoto Univ.¹, AIST², [○]Ryosuke Hori¹, Tomoaki Osumi^{1,2}, Masayoshi Nagao², Hiromasa Murata²,
Yasuhito Gotoh¹

E-mail: hori.ryosuke.37m@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

冷陰極であるフィールドエミッタアレイ(FEA)を用いた三極構造の真空デバイスは真空トランジスタと呼ばれ、高温や放射線環境下で動作する能動素子として期待されている[1]。これまで、真空トランジスタの差動増幅回路[2]や LC 発振回路などへの応用[3]が報告されている。しかし、応用上重要であるにも関わらず、真空トランジスタを多段に結合させ、動作させたという報告はない。そこで今回は二つの真空トランジスタを結合した回路として二段増幅回路を設計・作製し、その特性の測定を行った。また、その特性は回路シミュレータを用いた解析により再現できることを確認した。

2. 実験方法と結果

まず、5000-tip、10000-tip の FEA を使用した真空トランジスタ各々の静特性や小信号増幅時の周波数特性を測定した。続いて、それらを用いた二段増幅回路の特性の測定を行った。それぞれの真空トランジスタの相互コンダクタンスが、一段目 $20\ \mu\text{S}$ 、二段目 $30\ \mu\text{S}$ となる条件で動作させた結果、回路は設計した通り動作し、全体で最大 18 dB の電圧利得が得られた。また、最終段に様々な値の負荷を接続し、電圧利得の負荷依存性を測定したところ、一段目の利得は負荷の値に対して変化せず、真空トランジスタを多段にした場合の設計が容易であることが分かった。また、それぞれの真空トランジスタのモデルを作成し、回路シミュレータによりシミュレーションを行ったところ、Figure 1 に示すように実験値と近い結果が得られた。これにより、今回作成したモデルが今後の設計に有用であることが確認できた。今後は、真空トランジスタを用いた発振回路を作製し、その特性を評価する予定である。

謝辞 本研究は科研費 21H01860 の補助を受けた。

文献 [1] 後藤康仁, J. Vac. Soc. Jpn. **60** (2017) 55.

[2] Y. M. Wong, *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **25** (2007) 627.

[3] R. Bhattacharya, *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **41** (2023) 023201.

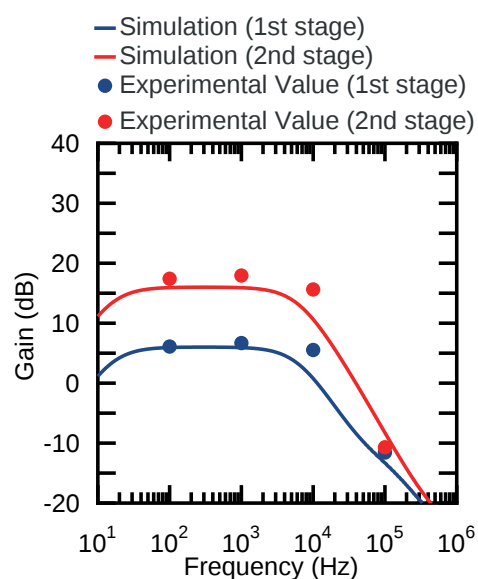


Figure 1. 電圧利得のシミュレーションと実測値の比較

単一分子からの電界放射角度分布 (FAD) の起源

Mechanism of Field-Emission Angular Distribution (FAD) from Single Molecules

筑波大数理, [○]Y. Yamada, R. Tsuruta, Y. Ono, M. Iwasawa, T. Nobeyma, M. Sasaki

Tsukuba Univ., [○]Y. Yamada, R. Tsuruta, Y. Ono, M. Iwasawa, T. Nobeyma, M. Sasaki

E-mail: yamada@bk.tsukuba.ac.jp

緒言 投影型の電界放射顕微鏡 (FEM)において探針に分子を吸着させることで分子を反映したイメージが得られることが知られているが、これまで長くその期限は未解明であった。本研究では複数種類の有機分子の FEM パターン (電界放出角度分布、FAD) および放射電流の位置敏感エネルギー分析、I-V 計測を同時に行うことで、分子からの FAD の起源について詳細に調べた。これをもとに本手法による有機分子の分子軌道の動的観察の可能性を検証した[1]。

結果・考察 分子を微量精密蒸着したタングステン(W)、もしくはタングステンカーバイド(WC)探針からの電界放射パターンには単一分子から由来の特徴的な FAD パターンが現れた (図 1)。分子 FAD は分子種にも探針種類にも依存せず、球面調和関数様の形状を示した。また、同一分子が異なる FAD パターンを示すことがわかった。

FAD イメージングと同時に計測された放出電子のエネルギースペクトルは金属探針のフェルミ準位のみにピークを示した。分子由来の放射電流の I-V 計測では、放出電流量が増加したが、F-N プロットの傾きは変化しなかった。これらのことから、分子の FAD パターンの起源が、分子由来の軌道を介した共鳴トンネルによる電子放出であることがわかった。このとき、分子の FAD パターンの形状が分子種に依存しないため、分子種に依存しない軌道が関与していると考えられるが、そのような特殊な軌道として、超分子原子軌道 (SAMO)があげられる。このとき分子の拡散により共鳴する SAMO が変化すると、FAD パターンも変化することが考えられる。また、SAMO を考えることで、異なる種類の分子で同様の FAD が現れることも説明できる。このように SAMO を介したトンネルにより、これまで不明であった FEM の分子像の起源が説明できた[1]。

FAD イメージングは、単一分子の SAMO のユニークなイメージング手法となるのみならず、新たな分子イメージング、分子スペクトロスコピー手法としても有用である。

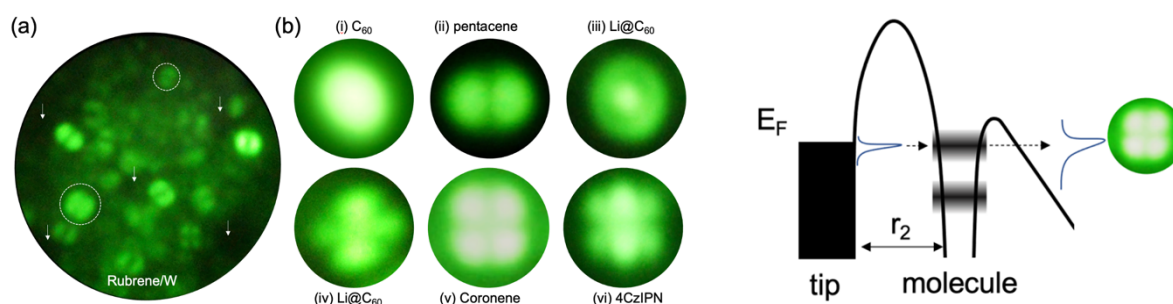


図 1 左: (a)Rubrene/W の FEM 像 (b)さまざまな分子からの FAD パターン 右: 分子の SAMO を介したトンネル放出模式図

[1]Y. Yamada, et al., *Carbon* (2023)

タングステンカーバイド探針からの電界電子放出電流安定性

Stable Field-Emission Current from Tungsten Carbide Tip

筑波大数理[○]鶴田 諒平, 柳俊輔, 山田洋一Univ. of Tsukuba,[○] Ryohei Tsuruta, Shunsuke Yamnagi, Yoichi Yamada¹

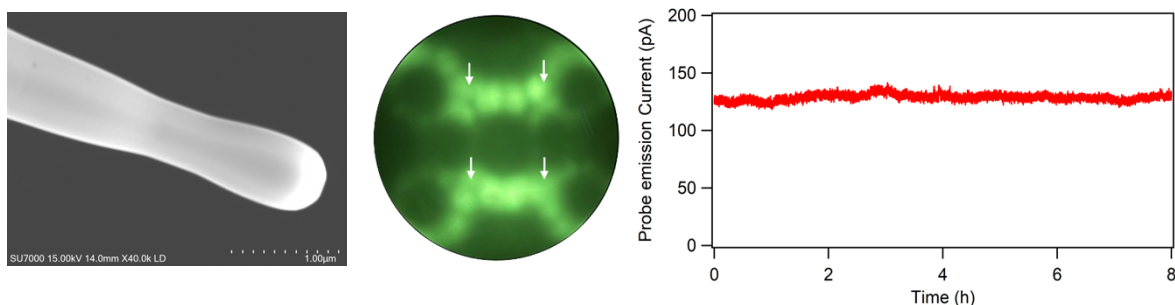
E-mail: tsuruta.ryohei.gm@u.tsukuba.ac.jp

緒言 タングステンカーバイド (WC) は比較的仕事関数が低く、高硬度で安定性の高い材料であるため、電界電子放出源としての応用可能性が検討されてきているが、系統的な研究は多くはない。一方で、WC 電界放出源は既存のタングステン (W) 電界放出源を真空中で表面炭化処理することにより比較的簡便で安定的に得られることから、応用のフィージビリティが高いといえる。本研究では、電子源応用を視野に入れ、WC 探針に関して放出電流の安定性を含めた系統的な研究をおこなっている。

実験 実験は全て超高～極高真空雰囲気下でおこなった。WC 探針は、電界研磨により曲率半径 10 nm 程度に先鋭化した W 探針を、 1×10^{-4} Pa のエチレン雰囲気下で 1200°C 程度に加熱処理することで作製した。先端形状は FEM, FIM で確認した。放出電流は全電流および部分電流を計測し、放出電流のエネルギー分析は半球アナライザーを用いている。

結果・考察 Fig.1 に作製した WC 探針の SEM 像を示す。エチレン雰囲気下での表面炭化処理により、曲率半径が 200 nm 程度の探針先端形状が安定的に得られることが確認された。先端はファセット化しており、稜線への電界集中により特徴的な FEM パターンを示す。また、放出電流の F-N プロットにより仕事関数は約 3.2 eV であった。これらの結果は過去の報告例と概ね一致する。

放出電流の時間変動を計測したところ、W 探針と異なり、時間による放射電流の減衰がほとんど見られないことが明らかになった。図には、10 μ A/Sr 程度の放射角電流密度で計測した 8 時間の電流安定性を示した。電流にわずかな増減は見られるものの、ある程度一定の電流を放出し続けることがわかった。講演では、この探針の系統的に評価した結果を述べる。



図：WC 探針の SEM 像、FEM 像、放出電流安定性

Co/Pt ナノ突起構造体を用いた電界放出陰極の 電界放出電流に対するスピン偏極度

Spin polarization of field emitter with a Co/Pt nano protruded structure
with respect to emission current

三重大院工¹, °宮田 啓太郎¹, 岩田 達夫¹, 永井 滋一¹

Graduate School of Eng. Mie Univ.¹, °Keitaro Miyata¹, Tatsuo Iwata¹, Shigekazu Nagai¹

E-mail: 422M251@m.mie-u.ac.jp

スピン偏極電子源は、表面および界面の磁区構造観察のプロープとして利用されており、更なる性能向上が求められている。当研究グループでは、高輝度特性と高偏極度を両立するため、磁性金属である Co を蒸着した Pt tip を 1000 K で 2 時間アニールすることで形成されたナノ構造体からの電界放出電子のスピン偏極度を測定した^[1]。本講演では、動作条件の最適化に向け、室温におけるスピン偏極度の放出電流依存性を測定したので報告する。

Fig. 1(a)に示すような電界蒸発によって表面清浄化した Pt<001> tip に、電子ビーム蒸着法によって Co を 7 ML 堆積させた。その後、2 時間 1000 K の加熱によって形成されたナノ突起構造体を電界放出顕微鏡(FEM)で観察した像を Fig. 1(b)に示す。ナノ突起構造体からの電界放出電子のスピン偏極度を Mott 散乱スピン検出器で測定した。

室温での放出電流に対する電界放出電子のスピン偏極度の大きさを Fig. 2 に示す。放出電流の低下に伴って、放出電子のスピン偏極度が増加した。電界強度の減少に伴ってトンネル電流の低エネルギー側の寄与が減少し、より仕事関数の低いアップスピンの割合が大きくなることによって、スピン偏極度が増加したと推察できる。今後、さらにスピン偏極度を増加させるため、低温での測定を進める予定である。

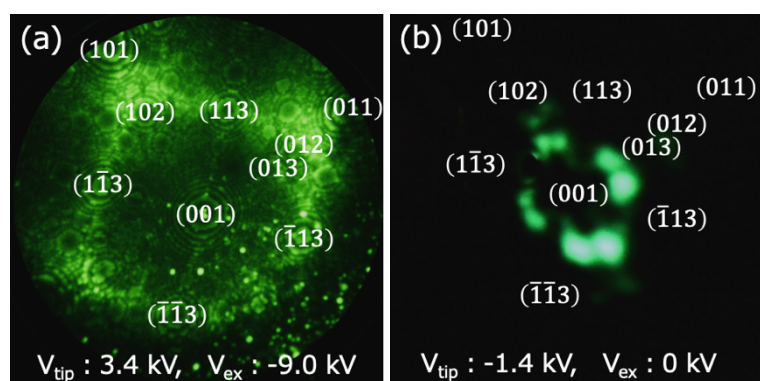


Fig. 1. (a) Ne-FIM image of a substrate (001) oriented Pt tip. (b) FEM image of surface of a Co thin film deposited on the Pt tip after annealing at 1000 K for 60 min.

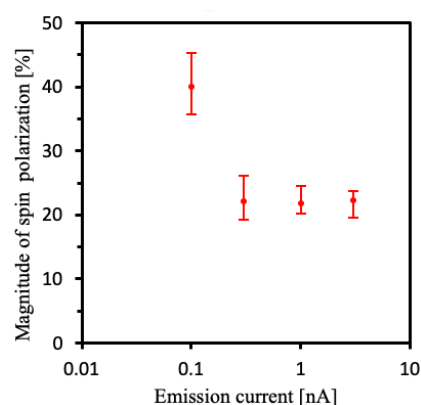


Fig. 2. Emission current dependence of spin polarization of field-emitted electrons from a Co/Pt nano protruded structure.

[1]宮田啓太郎：信学技報, vol. 122, no. 298, ED2022-51, pp. 8-10, (2022).

高温超伝導体 Bi2212 からの電界放出電子のエネルギー分布のシフト

Shift in Energy Distribution of Field Emitted Electrons from

High-Tc Superconductor Bi2212

三重大院工 ○大櫃 温仁, 岩田 達夫, 畑 浩一, 永井 滋一

Graduate School of Eng., Mie Univ. °Haruto Obitsu, Tatsuo Iwata, Koichi Hata, Shigekazu Nagai

E-mail: 422m214@m.mie-u.ac.jp

Bi2223^[1]や YBa₂Cu₃O_{6.9}^[2]等の酸化物高温超伝導体からの電界放出電子のエネルギー分布が報告されているが、その電界放出機構には不明な点も多い。これまで当研究グループは、転移温度が 85 K の Bi2212 を用いた電界放出陰極の作製および阻止電位型エネルギー分析の結果を報告した。本講演では、Bi2212 からの電子放出特性を詳細に解明するため、共軸円筒型電子分光器^[3]による放出電子のエネルギー分布の測定結果について報告する。

フローティングゾーン法により作製された Bi2212 単結晶をピンセットで 1 mm 程度の大きさに加工し、W フィラメントにグラファイトボンドで接着することで陰極を作製した。作製した陰極を到達圧力 1.5×10^{-7} Pa のエネルギー分析装置に導入し、陰極温度および印加電圧に対するエネルギー分布の変化を測定した。

室温および転移温度以下である 40.5 K での Bi2212、および標準試料として用いた室温での W(111)からの電界放出電子のエネルギー分布を Fig. 1 に示す。Bi2212 のエネルギー分布の半値幅は、室温と 40.5 K とともに室温での W(111)のエネルギー分布に比べて 200 meV 以上大きく、フェルミエッジを有しないガウス分布に近い形状を示した。また、室温での Bi2212 のスペクトルのピークは W(111)のフェルミ準位より 1.8 eV 低エネルギー側に現れ、40.5 K ではさらに 0.4 eV 低下した。加えて、Fig. 2 に示すように、印加電圧に対してもスペクトルのピーク位置の変化が観測され、40 K の方が印加電圧に対して顕著に現れた。現段階では、この結果は Bi2212 を劈開した表面の突出した原子の局在準位を介した共鳴トンネル効果に起因すると推察している。講演当日は、エネルギーのシフトが生じる要因の詳細と温度依存性についても議論する。

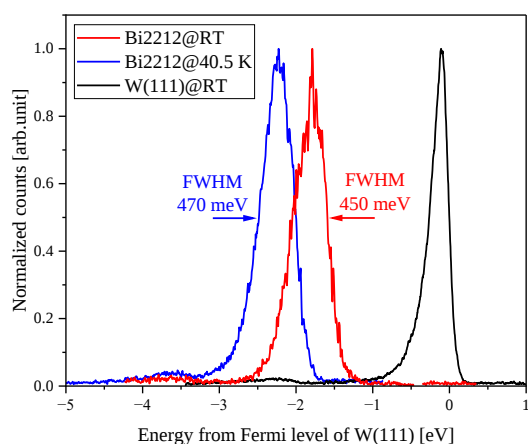


Fig. 1. Comparison of field emission energy distribution of Bi2212 and W(111).

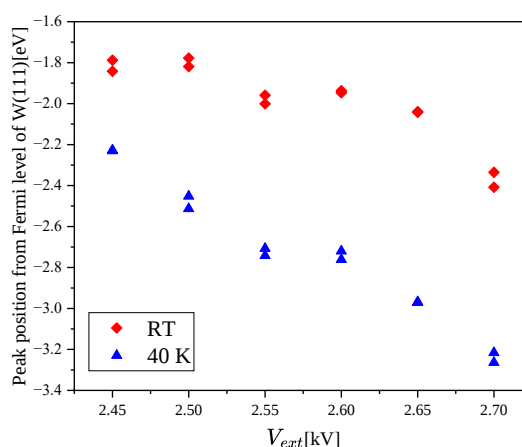


Fig. 2. Extraction voltage dependence of peak position of energy spectra obtained from Bi2212.

謝辞：本研究で用いた Bi2212 は、豊田工業高等専門学校 塚本 武彦教授よりご提供頂いた。

[1] N. Ernst, *et al.*, Physica C **213**, 495 (1993).

[2] S. Ivanov, and S. Shkuratov, J. de Phys. IV **6**, C5-135 (1996).

[3] C. Oshima, *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **56**, 227 (1985).

液体金属ガリウム被覆したタングステンからの電界放射特性

Field emission from tungsten coated with Ga liquid metal

静岡大院工¹, 静岡大電研²

○小田 陸人^{1,2*}, 根尾 陽一郎^{1,2}, 文 宗鉉^{1,2}

Grad. Sch. of Eng. Shizuoka Univ.¹, RIE, Shizuoka Univ.²,

○Rikuto Oda^{1,2*}, Yoichiro Neo^{1,2}, Jonghyun Moon^{1,2}

*E-mail: oda.rikuto.18@shizuoka.ac.jp

【研究背景】電子顕微鏡をはじめとした集束電子ビーム応用において、空間分解能の向上に最も効果がある電子源の輝度の向上のため、エネルギー分散が小さく、大電流が放射可能な高輝度電子源への要求がある。収束電子ビームは、走査型電子顕微鏡など多くの装置に利用されており、その空間分解能は電子源の輝度により主に決定されるため、近年では、大電流かつ高輝度の電子源が要求されている。その中、畑らによって Li や Ga を被覆しテイラーコーンを形成させることで大電流を放射可能な電子源が発表された。¹⁻³

我々は、現状の電子線顕微鏡の電子銃部の構成を変えことなく液体金属電子源を用いたカソードをその場形成する方法を見出し、数 mA 程度の大電流が放出されることを報告した。今回、Ga 液体金属電子源の大電流放出時の放出機構の考察について報告する。

【実験・結果】本研究では、液体金属として Ga(融点 30 度)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 溶液を用い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^{-6} 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、電界電子放出の実験を行った。

電界放射特性を評した結果を Fig.1 に示す。2.4kV 付近にて電流が放出され、指数関数的に上昇を続け、最終的には、1mA 程度の大電流を観測した。Ga を被覆していないときと比較し、閾値が低減されると同時に大幅な電流増加が観測された。放射特性は 3 段階で変化した。現在、各領域での動作に関する研究を行っている。その進捗も報告する予定である。

【参考文献】

- [1] K.Hata, et al, Ultramicroscopy 73 (1998) 73-77.
- [2] K.Hata, M.Kumamura, T.Yasuda and Y.Saito, Jpn. J. Appl. Phys. 33(1994) L1431-L1434.
- [3] Y Gotoh, et al, Applied Surface Science 146 (1999) 377-381

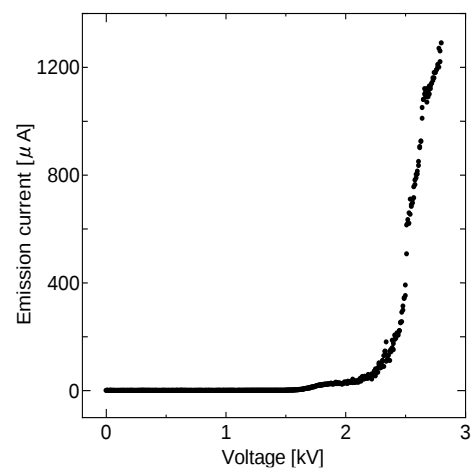


Figure 1. Field emission

転写モールド法によるプラズモニック結晶ホトカソードの作製

Fabrication of plasmonic crystal photocathode using transfer molding method

静岡大工¹, 静岡大電研²

○岸本 透弥¹, 根尾 陽一郎^{1,2}, 文 宗鉉^{1,2}

ng. Shizuoka univ.¹, RIE Shizuoka univ.²

○T.Kishimoto^{1,2}, Y.Neo^{1,2}, J.Moon^{1,2}

E-mail:kishimoto.toya.18@shizuoka.ac.jp

【研究背景】金属ホトカソードは、カソード材料に仕事関数以上のエネルギーの光を照射し、光電効果により発生した光電子を真空中に放出する陰極である。金属ホトカソードは励起光に対して高い耐性を持ち、長寿命である。しかしカソード材料の反射率が高いため、入射する光子数に対して放出する電子数が少ないという量子効率の低い課題がある。そこで量子効率向上のため表面プラズモン共鳴を用いたホトカソードの開発が取り組まれた[1]。ATR 結合した金属薄膜とエバネッセント波の伝搬定数が一致した場合に、光のエネルギーがプラズモン振動に消費される事を利用したホトカソードである。カソード材料として Al 薄膜を蒸着した石英ガラスプリズムを使用している。その結果最大で 9 倍の量子効率を得られた。しかし予想を大きく下回る結果であった。この理由として考えられるのは、プラズモンの振動方向と放出方向が 90 度異なっており、散乱過程を経なければ放射に至らない為と考えられる。本研究では表面プラズモン共鳴ホトカソードにプラズモニック結晶を利用する事で ATR 結合を不要とし、形状効果により更なる量子効率の向上を目的としている。プラズモニック結晶ホトカソードは電子の放射方向とプラズモンの運動方向とが一致する構造を持つため、高効率化が期待できると考えた。

【実験方法・結果】凹型及び V 字型プラズモニック結晶ホトカソードの作製手順を以下に示す。Si (110) 及び Si (100) 基板上に酸化膜を厚さ 30 nm を形成した後、ZEP をスピコートする。そして電子線描画装置により所望のパターンを直接描画する。描画後の基板を現像した後、Si 酸化膜エッチングし、レジストを除去した。これにより Si 酸化膜のマスクを形成し、異方性エッチングを行った。凹型の場合は、(110) に対して垂直に (111) が存在するため、矩形の溝形状が作製できる(図 1(a))。V 字型は、(100) に対して 54.74° の角度で (111) が存在するため、V 字型の溝形状が形成される(図 2(b))。最後に表面の酸化膜を除去し、Si モールドを作製する。この Si モールドに紫外光領域で表面プラズモン共鳴に適している Al を真空蒸着することでホトカソードに応用可能なプラズモニック結晶を作製した。この作製した V 字型プラズモニック結晶に対して、P 偏光の波長 266nm レーザーを入射し、反射強度を測定した結果を図 2 に示す。入射光角度 22°, 44° で表面プラズモン共鳴による反射強度の減少を確認し、ホトカソードとしての可能性を示した。

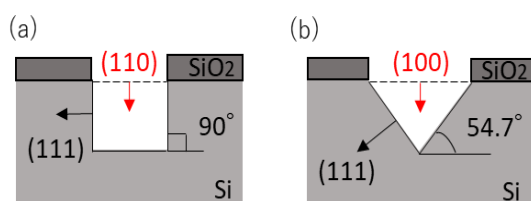


Fig.1 Si anisotropic etching

(a) Concave (b) V-shaped

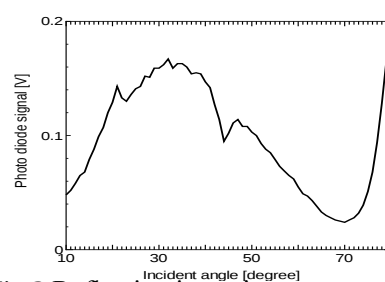


Fig.2 Reflection intensity measurement of V-shaped plasmonic crystal

[1] Y. Watanabe, W. Inami, and Y. Kawata., J. Appl. Phys. 109, 023112 (2011)

貫通転移密度の異なる 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 threading dislocation density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³Nagoya 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では、p 型半導体表面に Cs 等のアルカリ金属を蒸着すると、負の電子親和力(Negative electron affinity: NEA)を有する表面が得られ、バンドギャップエネルギー程度の波長の光照射により、真空中に電子を放出できる。この電子源としての特徴は、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]、パルスやマルチ構造までの電子ビーム生成が可能なことである。他の電子源にはない、これらの高度かつ多彩な特徴から、様々な電子顕微鏡への応用が進んでいる[3, 4]。半導体フォトカソードの高輝度化のためには、高い励起光パワー密度[5]での動作が求められる。しかしながら、高い励起光パワー密度下での動作は、表面光起電力効果により、放出電流が励起光パワー密度に比例して増加しないという現象がある[6]。従来の InGaN フォトカソードはサファイア基板上に作製されており、InGaN 層に 10^8 cm^{-2} 程度の貫通転位がある。半導体中で光励起された電子は、表面に拡散して真空中に放出される過程で、貫通転位に捕獲され、非発光再結合により失われると考えられる。そこで、本研究では InGaN 系フォトカソードの特性改善を目指して、GaN 基板を用いて貫通転位密度(Threading dislocation density: TDD)を 2 桁程度減らした InGaN フォトカソードを作製し、サファイア基板上に作製した InGaN フォトカソードと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、GaN 基板上と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、加熱洗浄により表面を清浄化した。その後、Cs と O_2 を交互供給することで、NEA 表面を作製した。励起光は、波長 404 nm のレーザーを電子放出側から照射した。また、レンズによる集光位置と、励起光出力を変えることで、加速電圧-500 V における放出電流の励起光パワー密度依存性を評価した。

【結果】図 1 に放出電流密度、図 2 に量子効率(Quantum efficiency: QE)の励起光パワー密度依存性を示す。励起光パワー密度が低い場合、2 つの試料において、得られた放出電流密度と QE は同程度であった。励起光パワー密度が高い場合、TDD が少ない方が放出電流密度と QE が高かった。以上より、励起光パワー密度が高い場合、TDD が少ない方が QE と放出電流密度が高い傾向が得られた。一方で、2 つの試料における TDD の差に対して、得られた QE と放出電流密度の差は小さく、TDD の依存性は大きくないことが分かった。

【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] 西谷智博(研究代表者), “高速 1 ショット観測を実現するフォトカソード電子源の開発”, 国立研究開発法人科学技術振興機構 先端計測分析技術・機器開発プログラム, https://www.jst.go.jp/sentan/hyouka/h29jigo/4_02nishitani.html [4] T. Nishitani, *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **40**, 064203 (2022). [5] 佐藤大樹, 半導体フォトカソードの高量子化、高耐久化による電子ビーム技術の刷新, 名古屋大学, 2020, 博士論文. [6] A. Koizumi, *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **40**, 062202 (2022).

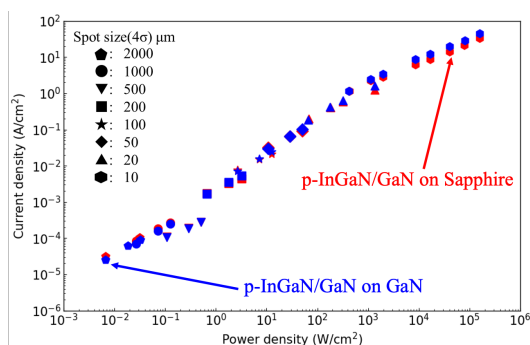


Fig. 1: Excitation light power density dependence of current density

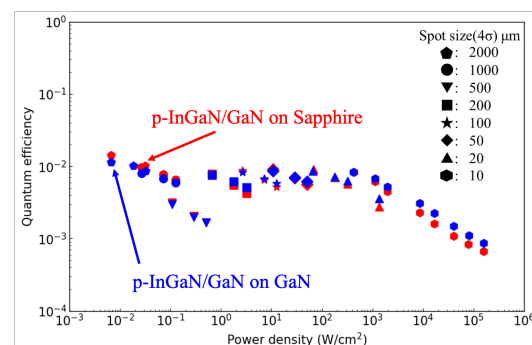


Fig. 2: Excitation light power density dependence of quantum efficiency

GOS 構造平面型電子源の光支援電子放出特性

Laser-assisted Electron Emission from GOS-type Electron Source

八戸大工¹, 産総研² ◯嶋脇 秀隆¹, 長尾 昌善², 村上 勝久²Hachinohe Inst. Technol.¹, AIST² ◯Hidetaka Shimawaki¹, Masayoshi Nagao², Katsuhisa Murakami²

E-mail: simawaki@hi-tech.ac.jp

p 型 GaAs などの III-V 族半導体表面を負の電子親和力 (NEA) 状態に処理した半導体フォトカソードは、量子効率が高く (1%以上)、放出電子のエネルギー幅が狭い、励起光に低エネルギーの可視光レーザーが利用できるなど優れた特性を有する。一方で、NEA 処理が不可欠で、NEA 処理・維持のための超高真空環境 (10^{-7} Pa 以下) が必要不可欠、NEA 表面の寿命・耐久性が低い、空間電荷によるビーム特性劣化など、長寿命化・大電流化に向けた課題がある。

Graphene/oxide/semiconductor (GOS) 構造からなる平面型電子源 (GOS 電子源) は、動作電圧が低く (10V 程度)、低真空 (~ 10 Pa)・液中環境下で動作可能、高電子放出効率 (20%以上)・高電流密度 (~ 100 mA/cm²) など優れた特長を有している。GOS 電子源では、電子は、デバイスの絶縁層内で内部電界により加速され、グラフェン電極内を大きな散乱を受けずに走行し、グラフェンの仕事関数以上のエネルギーを持って表面から放出される。したがって、p 型半導体基板を用いた GOS 電子源は、NEA 表面処理を施さなくてもエネルギー単色性と低エミッタンスを備えた微細電子ビームの生成可能な半導体フォトカソードとして期待される。さらに、グラフェンは可視光領域 (400nm $\sim$ 800nm) の透過性 (吸収率約 2% @ 550nm) に優れ、波長依存性が低いため、励起光源の選択性が高く、量子効率の高い電子放出が期待される。

本稿では、p 型シリコン ($10\sim 14\ \Omega\cdot\text{cm}$) 基板を用いて製作した GOS 電子源の 633nm レーザー (CW, 1 mW_{max}) 照射下での光支援電子放出特性について報告する。

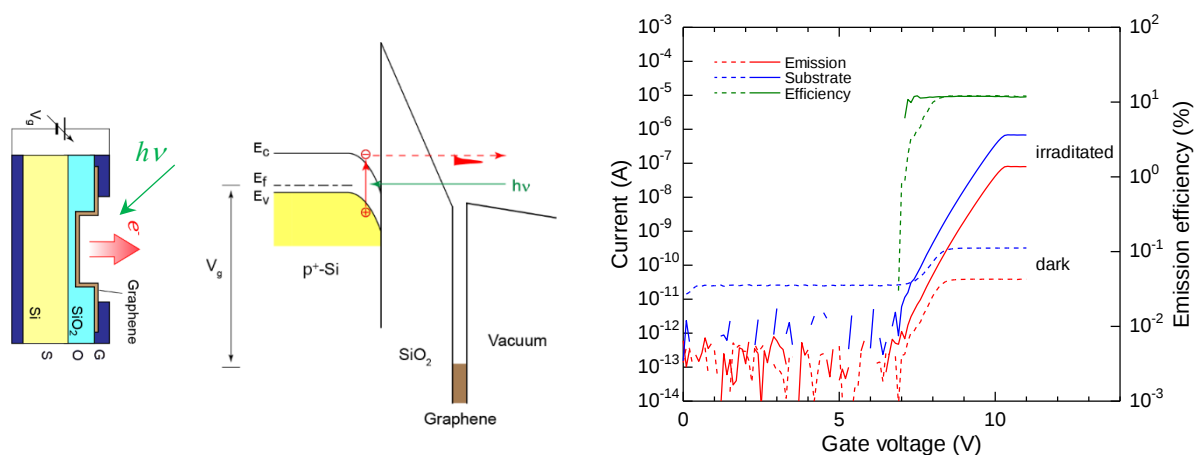


図1 p-GOS 電子源の光支援電子放出機構とレーザー照射なし・ありにおける電子放出特性

グラフェン/p-Si ショットキー接合からの電子放出

Electron emission from graphene/p-Si Schottky junction

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/Oxide/Semiconductor 構造の平面型電子放出デバイスの上部金属電極での電子散乱の抑制による電子放出効率の改善を目的として、金属と比較して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、グラフェンを上部電極とした Graphene/SiO₂/n-Si 積層構造の超高効率平面電子放出デバイスの開発を推進している[1-5]。これまでに、上部電極にグラフェンを用いることで、電子放出効率最大48.5%と、放出電流密度100mA/cm²以上を達成した[5]。これは、上部電極に金属を用いた従来型 MOS 構造の平面型電子放出デバイスと比較して、最大約1万倍の特性向上である。

しかしながら MOS 構造をベースとした平面型電子放出デバイスではその動作原理により、電子放出中に電子加速層の酸化膜に約10 MV/cmの強電界が印可される。この強電界による絶縁層の劣化や絶縁破壊が平面型電子放出デバイスの寿命を決める主要因である。そのため、デバイス寿命の向上には絶縁破壊耐性の高い絶縁材料の探索や、絶縁層を用いない新規デバイス構造の実現が重要である。本研究では、グラフェン/p-Si ショットキー接合へ逆バイアスを印可した際に形成される空乏層を電子加速層に用いた、絶縁層レスの平面型電子放出デバイスの開発について報告する。図1にデバイス構造の模式図と実際の電子放出特性を示す。印可電圧10Vから電子放出を開始し、駆動電圧50Vで放出電流密度2.6mA/cm²に到達し、グラフェン/p-Si ショットキー接合から電子放出可能であることが分かった。

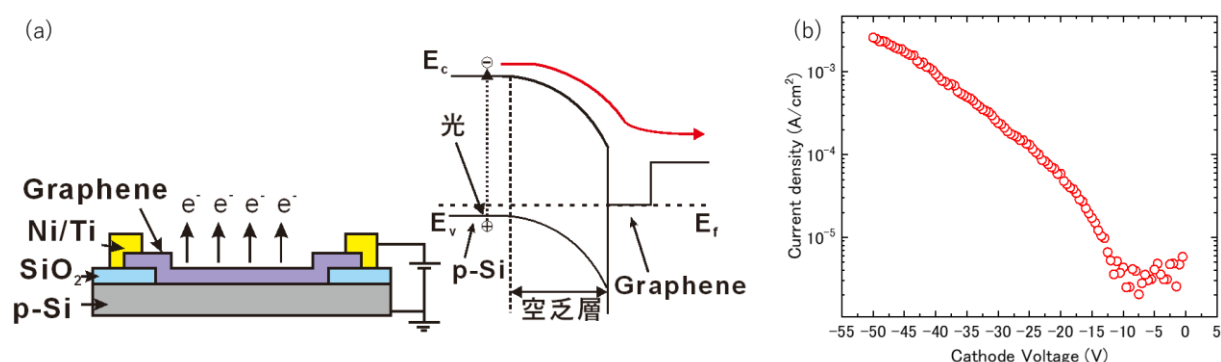


Fig.1 (a) Schematic diagram and (b) current-voltage curve of the electron emission device using a graphene/p-Si junction.

【参考文献】

1. K. Murakami et al., *Appl. Phys. Lett.* **108**, 083506 (2016).
2. K. Murakami et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* **36**, 02C110 (2018).
3. K. Murakami, et al., *Appl. Phys. Lett.* **114**, 213501 (2019).
4. R. Furuya, et al, *Acta Astronaut.* **174**, 48 (2020).
5. K. Murakami, et al, *ACS Appl. Electron. Mater.* **2**, 2265 (2020).