高性能電子源の開発と広がる応用技術

長尾昌善*・村上勝久

産業技術総合研究所 ☎ 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

(2019年9月14日受付；2019年10月11日掲載決定)

Development of High-performance Electron Sources and Its Application

Masayoshi NAGAO* and Katsuhisa MURAKAMI

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

(Received September 14, 2019 ; Accepted October 11, 2019)

Recent progress of the microfabricated field emitter array (FEA) and the planar type electron source is overviewed. The volcano-structured double-gate FEA is promising for obtaining matrix driven and focused electron beams. The beam half angle less than one degree was achieved by using this structure. High current density of more than 25 A/cm² is also achieved by using nickel-based alloy as an emitter material. A major breakthrough in the field of planar type electron sources is a using graphene as a top electrode in Metal/Oxide/Semiconductor type emitter, which is owing to the development of the direct deposition technique of graphene on insulating material. The emission efficiency of more than 30% is achieved. The graphene/oxide/semiconductor type electron source can emit electrons not only in poor vacuum but also in liquid. This unique feature enables new application, such as hydrogen production using non-electrolyte aqueous solution by injecting low energy electrons.

KEYWORDS : volcano-structured double-gate field emitter array, Spindt-type emitter, planer type electron source, graphene, GOS

1. は じ め に

固体のポテンシャル障壁中に閉じ込められている電子を外に取り出す電子源には、大きく分けると、電子にエネルギーを与えることによってポテンシャル障壁を乗り越えさせて取り出す方式と、外部から電界を与えることでポテンシャル障壁を変形させトンネリングで電子を取り出す方式とがある。前者は、エネルギーの与え方により、熱電子放出や光電子放出などの方式がある。後者は主に電界放出である。電界放出では、電子をトンネリングさせるほどにポテンシャル障壁を薄くする必要がある、そのために 10⁹ V/m 程度の強電界が必要となる。その強電界を作る方法として、非常に尖った構造での電界集中を利用する方式と、10 nm 程度の薄い絶縁膜に電界を印加する方式がある。本報告では、電界放出型電子源のうち、半導体の微細加工技術を使って作製する、引

き出しゲート電極が一体となった電界放出型電子源、いわゆるフィールドエミッタアレイ (Field Emitter Array, FEA) と、絶縁膜をトンネリングさせる平面型電子源に注目し、これらの電子源の最近の進展と、それらを使ったユニークなアプリケーションについて紹介する。

2. フィールドエミッタアレイの最近の進展とその応用

2.1 集束電極の一体化

FEA は非常に先鋭な先端から電子を放出させるため、放出された電子ビームは大きな広がり角を持って発散する。ところが、広い範囲に電子を照射したいような場合を除いて、一般には電子ビームを集束させたい場合が多い。したがって、電子ビームの集束機構を一体化するのは重要な課題である。FEA に集束電極を一体化したものはダブルゲートエミッタと呼ばれ、いくつも報告がある¹⁻³⁾。しかし、Fig. 1 (a) に示したような、単純に電極を二段に重ねたものは、電子ビームを集束させた際に

* E-mail : my.nagao@aist.go.jp

Fig. 1. Schematic comparison between conventional double-gate emitter and volcano-structured double-gate emitter.

電流が二桁程度減少するという課題があった。これは、集束電極に印加する電圧によってエミッタ先端の電界集中が弱められてしまうのが原因である。筆者らは、ゲート電極とフォーカス電極の配置を工夫し、ビーム集束時にも電流劣化が少ない構造を開発した^{4,5)}。Fig. 1 (b) に示すように、エミッタに沿うようにゲート電極を配置し、その外側に集束電極を形成し、集束電極の最も高い部分がエミッタ先端やゲート電極開口端よりも低い位置に制御することが特徴である。このような構造を取ることによってゲート電極がシールド電極の役割をも果たし、電界集中を維持しつつ、電子ビームの集束も可能となった。このような構造の電子源を、筆者らは火山型ダブルゲート電子源 (Volcano-structured Double-Gate Field Emitter Array, VDG-FEA) と呼んでいる。

2.2 マトリクス駆動とビーム集束の両立

火山型ダブルゲート電子源は、その作製方法の特徴⁶⁾から、当初はシリコン基板をエッチングして作製する FEA にしか適用できず、マトリクス駆動が可能なスピント型エミッタ (Spindt-type FEA)⁷⁾には適用するのが困難であった。スピント型エミッタは Spindt らにより開発されたゲート電極一体型の FEA で、薄膜プロセスを使ってガラス基板上などにも作製できるためマトリクス駆動が可能であるが、その作製プロセスの特徴から Fig. 1 (a) に示したような構造のゲート電極しか作製できなかった。筆者らは、スピント型エミッタの作製方法を改良し、火山型ダブルゲート構造が適用可能な作製方法を開発した^{8~10)}。Fig. 2 (a) はマトリクス駆動用の VDG-FEA の電子顕微鏡写真である。画素ピッチは 100 μm で、そのうちの 40 μm 四方の領域に FEA を配置してある。エミッタとエミッタの間隔は 3 μm である (挿入図)。Fig. 2 (b) はそのうちのエミッタひとつの断面を拡大したものである。エミッタは Ni で作製し、ゲート電極と集束電極が一体化されている。また、エミッタの下には電子放出を安定化するためのアモルファスシリコンの抵抗層があり、さらにその下に電流を供給する金属のエミッタラインがある。

Fig. 2. Scanning electron micrograph of matrix-driven volcano-structured double-gate FEA (a) and its cross section of emitter tip (b).

Fig. 3. Current-voltage characteristics of VDG-FEA with 120 tips in 20 mm SQ (a) and its beam diameter when changing focus voltage (b).

Fig. 3 は 20 μm 四方に 2 μm ピッチで 120 個のエミッタを配置した VDG-FEA の電圧電流特性 (a) と放出される電子ビームのビーム径を評価した結果である。電圧電流測定の際には、ゲート電極と集束電極には同一の電圧を印加して測定した。20 V 程度から電子放出が確認でき 50~60 V で 1 μA 程度の電子放出が得られる。電子ビーム径の評価には、FEA から 1 mm 程度離れたところに 40 μm 幅のスリットを有するアノード電極を配置し、ステッピングモーターで μm オーダーで動かしながらかスリットを通り抜ける電子電流をファラデーカップで計測する手法を採った¹¹⁾。この方法でビームプロファイルを取得し、その半値幅 (Full width at half maximum, FWHM) を集束電極に印加する電圧 (以下 V_f) 毎にプロットしたものが Fig. 3 (b) である。挿入図は V_f が 65 V と 5 V の時のビームプロファイルである。 V_f が 30 V 以上ではビーム径は約 350 μm と大きい、30 V より低くするとビーム径が徐々に小さくなり 5 V 程度で極小値 50 μm をとった。アレイのサイズが 20 μm であり、1 mm 離れたところで 50 μm のビーム径であるから、単純に計算すると、ビームの開き角は半角で 1 度以下となり、集束電極の効果が確認できる。

2.3 大電流動作

マトリクス駆動が可能なスピント型エミッタを備えるVDG-FEAはどのような材料でもできるわけではなく、そのプロセス上エミッタ材料はNiなどの比較的融点の材料に限られていた¹⁰⁾。そのため大電流を取り出そうとすると、エミッタが溶融するという課題もあった。しかし最近になって、Niをベースとし高融点金属を混ぜた合金をエミッタとして使用する事で、Niと同様の高アスペクト比のVDG-FEAが可能で、尚且つ大電流動作時でもエミッタが溶融することなく駆動できることがわかってきた。94×82 μmの領域に1000個のエミッタを集積したFEAからDC駆動で2 mAの電子放出をさせても破壊が起きないことを確認した¹²⁾。電流密度にすると約25 A/cm²の大電流密度となる。まだ、合金の組成などは最適化できていないので、最適化を行えば、今後のさらなる大電流化が期待できる。

2.4 FEAの応用

ビーム集束とマトリクス駆動が両立できるようになり、新たな応用の可能性が広がってきた。難波らは以前からFEAとHARP (High-gain Avalanche Rushing Photoconductor) 膜を組み合わせた超高感度撮像素子を提案していた¹³⁾が、電子ビームの集束のために永久磁石を使っており撮像素子が巨大になると言う課題があった。VDG-FEAの開発により、FEA上に集積した集束電極のみでビーム集束が可能となり、永久磁石が不要となった^{14, 15)}。また、筆者は後藤らと共同で、光電変換膜をCdTeとすることで、耐放射線性の高い撮像素子を提案した¹⁶⁾。CCD (Charge Coupled Device) やCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) などの固体撮像デバイスは累積吸収線量10 kGyほどで動作しなくなるのに対し、FEAは真空デバイスであるから放射線の影響を受けにくいことを利用したものである。これまでに、1 MGyの非常に高い吸収線量のガンマ線に対してもFEAや光電変換膜の特性劣化がないことを確認している¹⁷⁾。福島第一原子力発電所での核燃料デブリ取り出しでは、耐放射線性の高い撮像素子が必要と思われるので、そのような場所での貢献が期待される。

mA級の電子放出が可能でかつ電子ビームの集束ができるようになり、マトリクスエクス線源への応用の可能性が出てきた。Schwoebelらは、スピント型電子源を使い、マトリクスではないが一次元のリニアエクス線源を作製し、複数のエクス線源からの映像を再構成することで、エクス線トモグラフィシステムを試作している^{18, 19)}。その光源(線源)が二次元になることで、より情報量が増え、高速で正確な画像再構成が可能となる。被写体を動かしたり線源を動かしたりする必要がなくな

り、かつ、短時間での撮像が期待できるので、応用範囲はさらに広がると期待できる。

3. 平面型電子源のブレイクスルーと応用

3.1 平面型電子源の構造と特徴

平面型の電子源はFig. 4に示すように金属/絶縁物/金属 (Metal/Insulator/Metal 以下MIM) もしくは、金属/絶縁物/半導体 (Metal/Insulator/Semiconductor 以下MIS) のサンドイッチ構造をつくり、上部電極と下部電極の間に電圧を印加することで絶縁物中に強電界を作り、電子をトンネリングさせる。それらの電子のうち、上部電極の仕事関数を超えるエネルギーを持つ電子が真空中に放出されるもので、それ以外の電子はダイオード電流として上部電極に回収される。下部電極から流れる総電流量とエミッションとして真空中に放出される電流の比を電子放出効率という (Fig. 4中の矢印は電子の流れる向きを示している)。絶縁膜の厚さにもよるが動作電圧が10 V程度とFEAにくらべても非常に低く、電子がトンネリングする部分が固体中であるので真空度の影響を受けず、平面から電子が放出できるため電子の発散角が小さいという、他の方式の電子源には無い様々な特徴がある。その原理は1960年代にすでに提案された^{20, 21)}が、当時は欠陥のない良質な絶縁膜を作る技術が確立されていなかったため、再現性に乏しくあまり多くの報告例はない。その後、1990年代になって良質な絶縁膜の形成技術の向上により、再び注目されている。横尾らは金属/酸化膜/シリコン (MOS) 構造を使って動作メカニズムを詳細に調べている。電子放出効率は高いもので1%程度である^{22~24)}。また、楠らはMIM構造を使って上部電極にCsを添加することで仕事関数を下げ電子放出効率約3%を達成している²⁵⁾。その他、電子放出効率を上げるために、厚いSiO_x層²⁶⁾や陽極酸化したポラスシリコン (ナノクリスタルシリコン) 層^{27~32)}などを用いてトンネル層を多段にすることで電子のエネルギーを高くすることが試みられ、最大で28%の効率²⁶⁾が報告されているが、平均的には10%に満たないものが多い。

Fig. 4. Schematic structure of planer type electron source.

多段のトンネリングを利用して電子のエネルギーを高くすると、散乱を受ける過程も増えるため、放出される電子のエネルギー幅が広くなるという課題がある。単純な MOS 型の場合電子のエネルギー半値幅は 1 eV 程度²³⁾であるのに対し、多段のトンネルを利用する場合は 3 eV 以上という報告が多い^{27, 31, 32)}。

3.2 グラフェン電極によるブレイクスルー

電子放出効率を制限しているのは、主に絶縁膜と上部電極中での電子の散乱である。特に上部電極は酸化などの影響を防ぐため貴金属を含む原子番号の大きな金属が使われることが多いため、電子の散乱も大きい。そこで我々は、上部電極による散乱を抑えるためにグラフェンを用いることを提案した³³⁻³⁵⁾。グラフェンの成膜は、銅箔などの触媒金属上に成膜する技術は多数報告があるが、絶縁膜上に直接成膜する技術はこれまで報告例がなかった。我々は、Ga 蒸気を触媒とする化学気相合成法 (CVD) により絶縁膜上にグラフェンを成膜する技術を開発した³⁶⁾。Ga は成膜中には触媒として機能するが、CVD 中の熱により再蒸発するためグラフェンの中に残ることがないという特徴が有る。この手法により絶縁膜上に直接グラフェンが成膜可能となりグラフェン/酸化膜/シリコン (Graphene/Oxide/Semiconductor, GOS) 積層構造の電子源が可能となった。GOS 電子源の電子放出効率は、発表当初は 1% 程度であったが、グラフェン表面のクリーニング手法の確立などにより現在では 30% 程度³⁵⁾の効率の電子源を再現性よく作製できるようになっている。また、当初は Ga 触媒を使った CVD により成膜していたが、現在では触媒を使わなくても絶縁基板上に成膜可能となっている³⁵⁾。

Fig. 5 (a) は 50 μm 四方の電子放出面を持つ GOS 電子源の電子放出特性および電子放出効率の一例である。7 V 付近から真空中への電子放出 (Anode current) が確

認でき、電子放出効率は最大で 32% を上回る。Fig. 5 (b) は放出された電子のエネルギー分布であり、下部電極である n 型シリコンのフェルミ準位を基準として測定したものである。このエネルギー分布は GOS 電子源のメカニズムの重要な情報を示している。通常 MOS 型電子源の場合、上部電極の仕事関数以下のエネルギーの電子がカットされるのでピークの左側 (低エネルギー側) が急峻に減少するカーブを描く²²⁾。一方、GOS 電子源の場合、左右対称である。シリコン中の電子はトンネリングした後、酸化膜を走行するあいだに散乱をうけ熱平衡状態となるため Maxwell-Boltzmann 分布となる。しかも、エネルギー帯は下部 Si 電極のフェルミ準位付近にあり、上部電極のグラフェンの仕事関数よりも高いエネルギーをもっていることも確認できる。つまり、電子はグラフェンの仕事関数よりも高いエネルギーをもったまま真空中に放出されているために、左右対称の分布が保たれていると理解できる。GOS 電子源の酸化膜は従来の MOS 電子源と同じであるので、MOS 型電子源の非対称なエネルギー分布は主に上部電極での散乱に起因することになり、その影響がグラフェンの使用によって効果的に抑制されたと言える。

GOS 電子源のこのメカニズムが電子源としては非常にユニークな性質を示すことになる。通常電子源の場合、電子放出特性は表面の仕事関数に敏感であるので、真空中の残留ガスの影響で電流が変動したり、特性が劣化したりする。一方、GOS 電子源は、残留ガスの吸着脱離によりグラフェンの仕事関数が多少変化しても、電子はそれを上回るエネルギーをもったまま放出されるので、その影響を殆ど受けないことになる。実際、 10^{-6} Pa の超高真空中であっても、10 Pa 程度の低真空中であっても全く同じ電子放出特性を示し、真空度に影響されないことが実証されている³⁴⁾。さらに、電子放出も非常に安定で電子放出の変動率は 0.1% 未満である。

3.3 平面型電子源の応用

平面型電子源は、上記したように、低真空やガス雰囲気中でも動作し、さらには、液体中であっても動作可能である。また、熱も必要とせず 10 V 程度の低電圧で電子放出可能で、基板に垂直に電子が加速されるので電子ビームの発散角も非常に小さい。これらの特徴を生かして様々な応用が考えられる。

例えば、電子顕微鏡の電子源を GOS 型電子源に置き換えると、ビームは基板に垂直に放出されるので、初段のレンズが省略できる可能性もあり、低真空中で動作するので簡便な SEM 用の電子源として低コスト化に繋がる可能性がある。それでいて、熱電子源よりはエネルギー分散が小さいので色収差の影響が少なく、タングステン

Fig. 5. Current-voltage characteristics (a) and electron energy distribution (b) of graphene/oxide/semiconductor structures planer-type electron sources.

ヘアピンを電子源とする SEM よりも高性能なものを実現できる可能性も秘めている。

半導体の微細加工を使って作製する平面型電子源は、基板上に多数集積することが可能で、その特徴を活用すれば、並列電子ビームを形成でき、電子線描画のスループットを劇的に向上させることが可能である。江刺らはナノクリスタルシリコン層を使った平面型電子源と MEMS で作製した静電レンズを組み合わせて超並列電子ビーム描画装置を開発している³⁷⁾。最近では、ナノクリスタルシリコン電子源の上部電極にもグラフェンを用い、尚且つ、150 K まで冷却することで放出電子のエネルギー分布の狭小化を図っている³⁸⁾。

また、宇宙推進機の中和銃としての応用も期待されている。小型の人工衛星の姿勢制御などを行うイオン推進機は、真空中にイオンを放出することで運動量保存則を利用して衛星の推進機として使われている。ところが、正のイオンを放出し続けていると衛星自身がチャージアップしてしまうので、電子を放出しチャージバランスを保つ必要がある。電子は放出しても推進力には寄与しないので、できるだけ省電力で電子放出することが望まれる。カーボンナノチューブを用いた電界放出型も検討されているが動作電圧が高いという課題がある。GOS 型電子源は低電圧で電子放出可能で、シリコン基板上に多数並べればいくらかでも電流量は増やせるという特徴もあり注目を集めつつある³⁹⁾。

液体中での動作を積極的に利用する事も可能である。越田らは、上部電極として Au 薄膜を用いたナノクリスタルシリコン電子源を水中で動作させ、水中に放出された電子により水を分解し、水素発生を確認している⁴⁰⁾。また、液体の SiCl_4 のなかで電子源を動作させ、上部電極の Au 表面にシリコンが成長することを示している⁴¹⁾。筆者らも非電解質のエタノール溶液中で GOS 型電子源を動作させ、高効率で水素発生が可能であることを確認した⁴²⁾。平面型電子源は、電子を加速して、いわば強制的に液体中に電子を注入するので電解質でなくても分解する事ができるのが特徴である。また、分子の散乱断面積は通常 10 eV 程度にピークが有ることが多いので、数十 keV の高エネルギーに加速した電子を、薄膜などを介して液体中に照射するような方法に比べて、効率よく分解が可能である。分解するだけでなく、今後はこの手法を用いた新物質の創成などにも期待がもてる。

4. ま と め

半導体の微細加工を用いて作製するフィールドエミッタレイと、絶縁膜中をトンネリングさせて電子を取り出す平面型電子源に注目し、これらの電子源の最近の進

展と広がりつつある応用分野について、筆者らの研究を中心に紹介した。特に、グラフェンを用いた平面型電子源は、その動作原理から考えて、従来から電子源が使われている分野への置き換えによる性能向上だけにとどまらず、これまで電子源が使われていなかったような分野へも応用先が広がりつつあり、新しい応用分野の開拓が期待される。

謝 辞

本文で紹介した実験結果は、静岡大学三村秀典教授・根尾陽一郎准教授、京都大学後藤康仁准教授、木更津工業高等専門学校岡本保教授、筑波大学佐々木正洋教授・山田洋一准教授、横浜国立大学鷹尾祥典准教授らとの共同研究の成果を含んでいる。関係各位に感謝いたします。

文 献

- 1) J. Itoh, Y. Tohma, K. Morikawa, S. Kanemaru and K. Shimizu : *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 13**, 1968 (1995).
- 2) A. Hosono, S. Kawabuchi, S. Horibata, S. Okuda, H. Harada and M. Takai : *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 17**, 575 (1999).
- 3) L. Dvorson and A.I. Akinwande : *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 20**, 53 (2002).
- 4) T. Soda, M. Nagao, C. Yasumuro, S. Kanemaru, T. Sakai, N. Saito, Y. Neo, T. Aoki and H. Mimura : *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, 5252 (2008).
- 5) Y. Neo, M. Takeda, T. Soda, M. Nagao, T. Yoshida, S. Kanemaru, T. Sakai, K. Hagiwara, N. Saito, T. Aoki and H. Mimura : *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 27**, 701 (2009).
- 6) M. Nagao, T. Yoshida, S. Kanemaru, Y. Neo and H. Mimura : *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, 06FK02 (2009).
- 7) C.A. Spindt : *J. Appl. Phys.* **39**, 3504 (1968).
- 8) M. Nagao and T. Yoshida : *Microelectron. Eng.* **132**, 14 (2015).
- 9) M. Nagao, Y. Gotoh, Y. Neo and H. Mimura : *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 34**, 02G108 (2016).
- 10) M. Nagao : *J. Vac. Soc. Jpn.* **59**, 108 (2016). (in Japanese).
- 11) A. Koike, T. Tagami, Y. Takagi, T. Yoshida, M. Nagao, T. Aoki, Y. Neo and H. Mimura : *Appl. Phys. Express* **4**, 026701 (2011).
- 12) Y. Nabuchi, M. Nagao, K. Murakami, Y. Neo and H. Mimura : Technical Digest of 32nd International Vacuum Nanoelectronics Conference, Cincinnati, U.S.A. (2019) P1-30.
- 13) M. Nanba, Y. Takiguchi, Y. Honda, T. Watabe, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh and A. Kobayashi : *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 28**, 96 (2010).
- 14) Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa, M. Kubota, M.

- Nagao, Y. Neo, H. Mimura and N. Egami : *IEEE Trans. Electron Dev.* **63**, 2182 (2016).
- 15) Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa, M. Kubota, M. Nagao, Y. Neo, H. Mimura and H. Egami : *J. Vac. Sci. Technol., B* **34**, 052201 (2016).
 - 16) Y. Gotoh, M. Nagao, T. Masuzawa, Y. Neo, H. Mimura, T. Okamoto, M. Akiyoshi and I. Takagi : Technical Digest of 28th International Vacuum Nanoelectronics Conference, Guangzhou, China (2015) p. 240.
 - 17) Y. Gotoh, H. Tsuji, M. Nagao, T. Masuzawa, Y. Neo, H. Mimura, T. Okamoto, N. Sato, M. Akiyoshi and I. Takagi : Proc. 63rd Spring Meeting of Japan Society of Applied Physics, Tokyo (2016) 21p-H137-15. (in Japanese).
 - 18) P.R. Schwoebel : *Appl. Phys. Lett.* **88**, 113902 (2006).
 - 19) P.R. Schwoebel, J.M. Boone and J. Shao : *Phys. Med. Biol.* **59**, 2393 (2014).
 - 20) C.A. Mead : *J. Appl. Phys.* **32**, 646 (1961).
 - 21) J. Cohen : *Appl. Phys. Lett.* **1**, 61 (1962).
 - 22) K. Yokoo, H. Tanaka, S. Sato, J. Murota and S. Ono : *J. Vac. Sci. Technol., B* **11**, 429 (1993).
 - 23) K. Yokoo, S. Sato, G. Koshita, I. Amano, J. Murota and S. Ono : *J. Vac. Sci. Technol., B* **12**, 801 (1994).
 - 24) K. Yokoo, G. Koshita, S. Hanzawa, Y. Abe and Y. Neo : *J. Vac. Sci. Technol., B* **14**, 2096 (1996).
 - 25) T. Kusunoki, M. Suzuki, M. Sagawa, Y. Mikami, E. Nishimura, M. Ikeda, T. Hirano and K. Tsuji : *J. Vac. Sci. Technol., B* **30**, 041202 (2012).
 - 26) N. Negishi, T. Chuman, S. Iwasaki, T. Yoshikawa, H. Ito and K. Ogasawara : *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, L939 (1997).
 - 27) X. Sheng, H. Koyama and N. Koshida : *J. Vac. Sci. Technol., B* **16**, 793 (1998).
 - 28) N. Koshida, X. Sheng and T. Komoda : *Appl. Surf. Sci.* **146**, 371 (1999).
 - 29) K. Nishiguchi, X. Zhao and S. Oda : *J. Appl. Phys.* **92**, 2748 (2002).
 - 30) T. Ichihara, Y. Honda, K. Aizawa, T. Komoda and N. Koshida : *J. Cryst. Growth* **237–239**, 1915 (2002).
 - 31) H. Shimawaki, Y. Neo, H. Mimura, K. Murakami, F. Wakaya and M. Takai : *J. Vac. Sci. Technol., B* **26**, 864 (2008).
 - 32) T. Ichihara, T. Hatai, K. Aizawa, T. Komoda, A. Kojima and N. Koshida : *J. Vac. Sci. Technol., B* **22**, 57 (2004).
 - 33) K. Murakami, S. Tanaka, A. Miyashita, M. Nagao, Y. Nemoto, M. Takeguchi and J. Fujita : *Appl. Phys. Lett.* **108**, 083506 (2016).
 - 34) K. Murakami, S. Tanaka, T. Iijima, M. Nagao, Y. Nemoto, M. Takeguchi, Y. Yamada and M. Sasaki : *J. Vac. Sci. Technol., B* **36**, 02C110 (2018).
 - 35) K. Murakami, J. Miyaji, R. Furuya, M. Adachi, M. Nagao, Y. Neo, Y. Takao, Y. Yamada, M. Sasaki and H. Mimura : *Appl. Phys. Lett.* **114**, 213501 (2019).
 - 36) K. Murakami, S. Tanaka, A. Hirukawa, T. Hiyama, T. Kuwajima, E. Kano, M. Takeguchi and J. Fujita : *Appl. Phys. Lett.* **106**, 093112 (2015).
 - 37) 江刺正喜, 宮口 裕, 小島 明, 池上尚克, 越田信義, 菅田正徳, 大井英之 : “超並列電子ビーム描画装置の開発” (東北大学出版会, 2018).
 - 38) A. Kojima, R. Suda and N. Koshida : *Appl. Phys. Lett.* **112**, 133102 (2018).
 - 39) R. Furuya, K. Murakami, M. Nagao and Y. Takao : 36th International Electric Propulsion Conference, Vienna, Austria (2019) IEPC-2019-153.
 - 40) N. Koshida, T. Ohta and B. Gelloz : *Appl. Phys. Lett.* **90**, 163505 (2007).
 - 41) T. Ohta, B. Gelloz, A. Kojima and N. Koshida : *Appl. Phys. Lett.* **102**, 022107 (2013).
 - 42) 村上勝久, 宮路丈司, 古家 遼, 安達 学, 長尾昌善, 根尾陽一郎, 鷹尾祥典, 山田洋一, 佐々木正洋, 三村秀典 : 第 16 回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, 2019/3/1 東京 (2019).