



第71回 応用物理学会春季学術講演会 注目講演プレスリリース

2024年 3月 18日

空間電荷制限電流領域で動作可能な新しい電界放射陰極におけるジュール熱の影響
Effects of Joule heating on a new field-emitting cathode operated under the Child-Langmuir law

強放射電流と長時間動作を実現する電界放射陰極を開発 高輝度電子源として半導体微細加工に応用の可能性示す

静大工¹, 静大電研²
(M2)小田 陸人¹, (B4)佐藤 宏樹¹, 文 宗鉉^{1,2}, ○根尾 陽一郎^{1,2}
E-mail: neo.yoichio@shizuoka.ac.jp

【発表概要】

- ・ 電界放射陰極の放射電流の上限を大幅に増加させる、ガリウム液体金属の気化熱を用いたジュール熱の影響を抑制する方法を提案
- ・ 同手法による電界放射陰極で従来よりも二桁高い放射電流（5mA）を得ること、および長時間の動作（2mA、60時間）も実証
- ・ 電子線マルチビーム半導体微細加工・検査に使われる、電子源へ応用可能である。

静岡大学 電子工学研究所の根尾陽一郎准教授らの研究グループは、ジュール熱の影響を抑制する新たな方法を提案し、電界放射陰極（Field Emitter）の性能向上に関する研究を行った。電界放射陰極は電子顕微鏡や半導体プロセスにおけるパターニング工程の電子線露光（リソグラフィ）の光源として用いられキーデバイスだが、放射電流の増加に伴って発生するジュール熱によるエミッションサイト（電界放射エリア）の温度上昇が上限を決定していた。本研究ではガリウム液体金属を陰極表面に拡散させ、その気化熱によってエミッションサイトのジュール熱を効果的に排熱し、陰極の温度上昇を抑制することに成功した。この手法による電界放射陰極では従来よりも高い放射電流を得ることが可能となり、結果として空間電荷制限電流領域で動作する事および長時間の動作を実証した。この技術は、電界放射陰極を用いる多様なシステムの性能向上に寄与する可能性がある。

【詳細】

電界放射における輝度と電流量のトレードオフを克服する

電界放射陰極 (Field Emitter) は、非常に鋭い先端を持つ、タングステンなどに代表される材料 (※) の先端部: 100nm (ナノメートル) 程度の微小面積に、真空下で高電圧をかけ、「トンネル現象」という量子力学的効果により、その表面から高密度の電子を放出 (電界放射) させる技術だ。

この技術は、電子顕微鏡や半導体プロセスにおけるパターンニング工程の露光 (リソグラフィ) の光源として用いられる。その他にも医療、生体分野での高スループット大面積検査手法など、多様な技術への応用が進められている。この技術においてもっとも重要な指標となるのが輝度だ。高輝度かつ大電流放射が可能な電子源は、高解像度化や高精細化など、あらゆる応用において利点となる。しかし従来の電子源では、母材金属の温度の限界から、輝度と電流量はトレードオフの関係にある。

「例えば放射電流 1 μ A (マイクロアンペア) のとき、エミッションサイト (電界放射エリア) の電流密度は 10⁴A/cm² 程度となります。1mA (ミリアンペア) 以上の放射電流では電流密度は 10⁴A/cm² となり、数ナノ秒 (5 nsec) 以内に母材金属タングステンの融点を超えてしまい、破壊に至ることが実験、計算により報告されています。この温度の限界が電界放射陰極の応用可能性を制限しています」と根尾陽一郎准教授は話す。非常に鋭い先端を持つ材料の微小面積からの高電流・高密度の電子放射は「ジュール熱 (電気が導体を通過する際に発生する熱エネルギー)」を発生させ、エミッションサイトは非常に高温になる。それがフィードバックループを形成することで、最終的にはエミッションサイト (電界放射エリア) の母材金属が溶解・破壊され、機能不全に陥ってしまうのだ。

「私たちはタングステンの融点を克服し、上限が決まっていた放射電流量を上昇させることを目指しました。その中で注目したのが、液体金属を用いた気化熱による放熱です。電界放射陰極表面にガリウム液体金属を表面拡散させ、エミッションエリアにおいてガリウムの気化熱を放熱に利用し、ジュール熱による温度上昇を抑制を目的としました」 (根尾)

※ タングステンの単結晶を電解研磨し、先端が 100nm 程度に先鋭化させた針状の材料が用いられる。

放射電流 5mA を超えても安定的に動作

根尾氏らの研究グループは、ガリウム液体金属を用いた電界放射陰極 (図1) を作成し、実験によって放射電流特性を測定した。「Fowler-Nordheimの理論式 (電界放射を説明する理論) に照らし合わせると、一般的な電界放射においては、電圧と放射電流は一定の関係を持っていると考

えられていました。しかし、この新しい電界放射陰極では従来の理解から逸脱する動作を示し、電圧と放射電流の関係が、電磁気学で決定される電流密度の物理限界（空間電荷制限電流）を示す関数(印加電圧の2分の3乗)に漸近することがわかりました（図2）」と根尾氏は話す。この電界放射陰極は、放射電流の実測値が5mAを超えても安定的に動作した。従来の常識では考えられない放射電流量を実現したのだ。

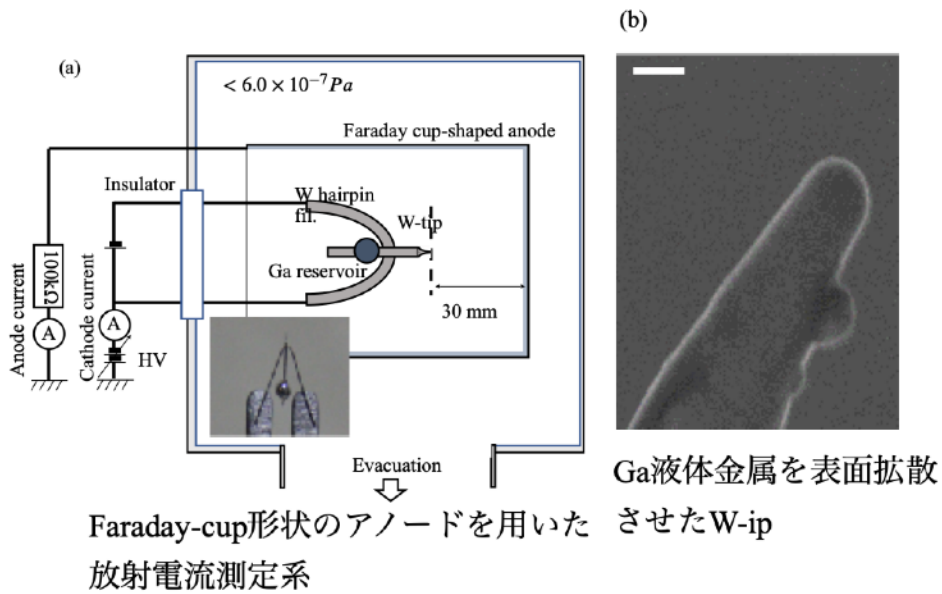


図1: a: 作成された電界放射陰極の性能評価実験装置の概念図。挿入写真の中央の灰色点がガリウム液体金属のリザーバー（塊）。b: ガリウム液体金属を表面拡散させた、タングステンによる電界放射陰極の先端をSEM（走査電子顕微鏡）でとらえたもの。

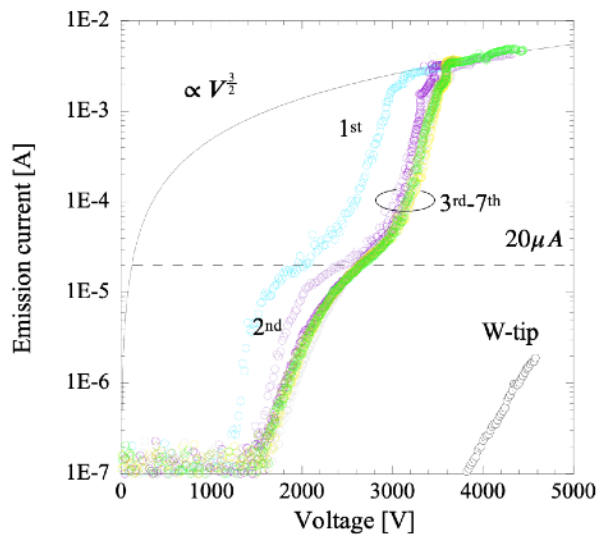


図2: 作成された電界放射陰極による電界放射特性。すべての試行（1回目～7回目）において放射電流が空間電荷制限電流に漸近している。

さらに根尾氏らは、この電界放射陰極を用いて長時間で安定な動作を確認する事にも成功した（図3）。「電界放射陰極で放射電流2mAを出し続け、60時間を超える長時間動作するという事は、到底今までの常識では考えられません。温度抑制する事で従来の限界を大きく超える電界放射を目の当たりにしていると考えられます」。根尾氏らは、さらなる長時間動作を行い、現在のところ200時間を超える動作を確認しているという。

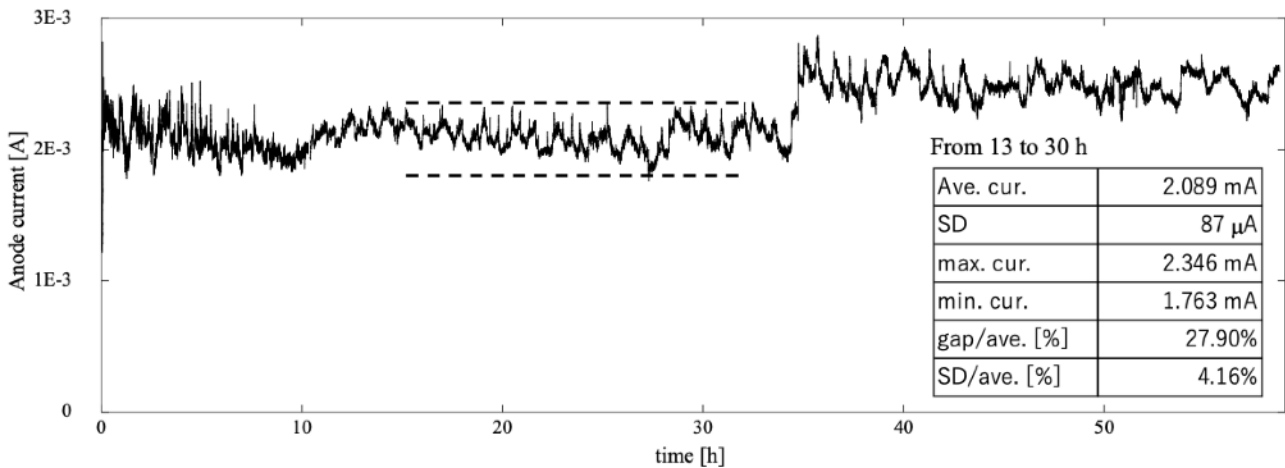


図3: 放射電流2mAによる60時間連続動作

陰極材料としてタングステンを用いた場合、ガリウムの表面拡散と蒸発のバランスが保たれる限り、エミッションエリアの温度がタングステンの融点3695K（ケルビン）よりも低く保たれることが示された。これにより、長時間の安定動作が可能になっていると考えられるという。また、根尾氏らは陰極材料にモリブデンを用いて実験を試みた。すると20時間を超える動作は困難であることが示されたという。これは、エミッションエリアの温度がモリブデンの融点2893Kに近づくことで、陰極の形状が変化するためだという。また、電圧-電流特性は陰極材料がタングステンの場合、複数回行うと収束するのに対し、モリブデンの場合は収束せず電界集中係数が減る傾向が続くことが確認されたという。

電子線マルチビームの電子光源としてのポテンシャル

根尾氏は、この電界放射陰極の「電子線マルチビーム」への応用を検討している。電子線マルチビームは、ひとつの電子源から発生した電子ビームを複数（例えば26万本：リソグラフィの場合）に分割し、それぞれを独立して制御することにより、対象の複数箇所を同時に照射することができる。半導体ウェハの大口径化に伴うパターンング工程において有望視される技術であり、電子顕微鏡によるサンプルの高速解析なども実現する。「従来の電子源で、輝度を分割すると、1本あたりの輝度は輝度保存則に従い分割数分の1倍に落ちてしまいます。これにより空間分解能とビーム電流の確保の両立は困難な課題でありました。ビームの輝度を保つためには、もともと

る電子源の輝度を上げる必要がある。電子線マルチビームは電子源の輝度さえ確保されれば有望な技術です。今回の技術が応用できるのではないか」と根尾氏は話す。

「ガリウムの蒸発を放熱に用いることから、不純物を嫌う半導体のプロセスで使うにはまだまだ越えなければいけないハードルがあると思います。さらに半導体ウェハのパターニング工程などに使うためには、放射電流の長期的な安定性が必要です。また、ガリウムの供給と蒸発には、アンバランスがあり、先端の温度が安定しないことによって電流量の不安定な振動に繋がっていると考えられます。今後はこれらの改善点を克服することで、応用につなげていきたいと思えます」（根尾氏）

応用物理学会の注目講演では、この電界放射陰極の測定値の詳細が解説される。