

(202) ナノデバイス

先端方位の異なったタングステン針状電子源の電界放射特性評価

Field Emission Characteristics of Tungsten Needle Emitters with Different Tip Orientations

真鍋 美乃里[†]

中川 晴香^{††}

川久保 貴史[†]

Minori Manabe[†]

Haruka Nakagawa^{††}

Takashi Kawakubo[†]

[†]香川高等専門学校 通信ネットワーク工学科

^{††}香川高専 電子情報通信工学専攻

1 背景

電子源は、金属中から真空中へ電子を放出するためのデバイスで、電子顕微鏡などの電子ビーム装置に用いられている。電子ビーム装置の性能向上のためには、高性能な電子源が必要である。電子源の材料には、タングステン等の高融点金属が用いられる。また、金属中の電子にエネルギーを与えて電子放射を引き起こす方法（電子放射モード）によって、数種類の電子源に分類することができる。

電界放射とは、電子源の電子放射面に高電界を印加することで、金属中のフェルミ準位近傍のエネルギーを持った電子が、電位障壁をトンネリングして真空中へ放出される現象を用いたものである。電界放射電子源のうち、すでに実用化されているものに、タングステン(310)電子源がある。これは鋭い針状に加工されたタングステン(310)面からの電界放射を利用する電子源で、電界放射型走査型電子顕微鏡(FE-SEM)に広く用いられている。この他にも電界放射現象はディスプレイ等への応用も考えられ、研究されている。電界放射の放射電流は Fowler-Nordheim の式で表され、この式を変形した F-N プロットが電界放射電子源の特性評価に用いられてきた。F-N プロットは印加電圧と放射電流から作製可能なグラフである。電子源で電界放射が起こっていると、このグラフのプロット点が直線状に並び、その傾きから電子源の仕事関数が算出できる。しかし F-N プロットを用いた仕事関数算出だけでは、電子源の特性評価としては不十分である。そのため現在、F-N プロットの傾きだけでなくその直線の切片も解析に用いる Seppen-Katamuki chart(S-K チャート)が提唱されてきている。^{[1][2]} F-N プロットの切片には仕事関数のみならず電子放射面積や電子源形状で決まる幾何学因子といった情報も含まれており、電子源の特性評価に対して新たな知見を得ることができると考えられる。

本研究では仕事関数が既知であるタングステン材料を用いた針状電子源を作製し、その電子源先端の結晶方位の変化が S-K チャートでの評価にど

のような影響を与えるか実験したので報告する。

2.実験

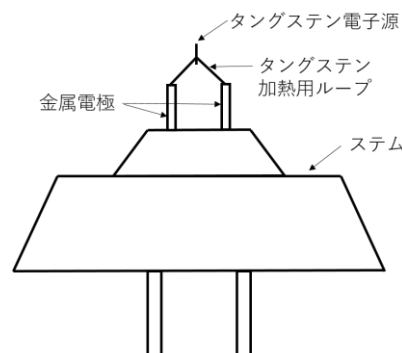


図1.電子源の構造

(1) 電子源の作製

今回は、図 1 のような市販のタングステンの多結晶ワイヤー（直径 0.15mm）と、多結晶圧延板から 45 度に切り出したタングステン片を電子源の母材として用いた。タングstenは高融点金属であり、市販のタングsten材は線引き加工や圧延加工で形成されている。これら多結晶のタングsten材は、加工時に結晶粒塊の方位が揃うことが知られており、電子源に加工したときに特定の面方位を得ることができた。タングstenワイヤーで作製した電子源先端は<110>方位、45 度に切り出した材料で作製した電子源先端は<100>方位を向いた。^[3]

電子源は、タングsten材料をスポットウェルダーで溶接し、電子源先端の電解研磨を行うことで、先端曲率半径 0.1 μm 程度の針状電子源とする。加工後、デシケータに保管し、加工時に電子源に付着した水分やアルコール分を蒸発させた。十分乾燥させた後、電子源先端が鋭く加工されていることを本キャンパスの電子顕微鏡で確認し、実験に使用できる試料を選別した。

(2)電界放射実験

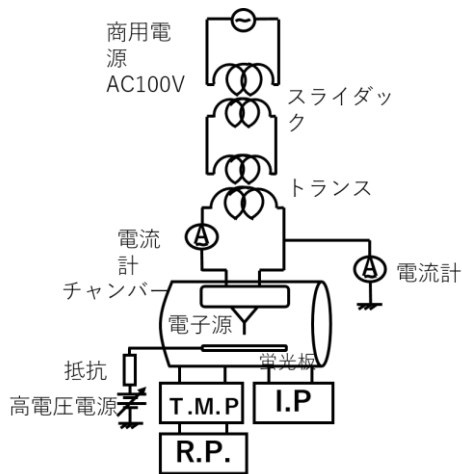


図2.電界放射実験回路

図2に実験装置を示す。作製した電子源試料をチャンバー内にセットした。チャンバー内はロータリーポンプ (R.P.)、ターボ分子ポンプ(T.M.P.)、イオンポンプ(I.P.)を用いて排気し、またチャンバーには電熱線を巻き付け 200℃程度で 11 時間ベーキングする。ベーキングが終了し、室温程度へ冷却されたチャンバー内の到達圧は、 10^{-7} Pa オーダの超高真空である。超高真空への到達が確認されたのち、チャンバー内の電子源を通電加熱し、電子放射面の清浄化を行った。加熱温度は約 2200K、加熱時間は 10 秒程度である。清浄化後、加熱を止め、電子源試料とそれに対向する蛍光板の間へ数 kV の高電圧を印加することで電子源先端へ高電界を集中させた。電子源から電界放射によって放出された電子が蛍光板へ到達すると電子放射像が得られた。この状態で、印加電圧を変化させながら放射電流を測定した。得られた印加電圧と放射電流の特性から、S-K チャートを描き、特性を評価した。

2 結果と考察

(1) 電子放射像



図 3(a)電子放射像 1

図 3(b)電子放射像 2

図 3(a)に線材タングステンで作製した電子源の電子放射像、図 3(b)に圧延板から 45 度で切り出したタングステンで作製した電子源の電子放射像をそれぞれ示す。図 3(a)の輝点は、電子源先端が{110}方位

を向いていることを考えると、三角形の輝点 2 つは{111}面からの電子放射、円形の輝点 2 つは{100}面周囲からの電子放射である。

図 3(b)の輝点は、電子源先端が{100}方位を向いているため、三角形の輝点 4 つが{111}面からの電子放射、電子源直下に現れる円形の輝点 1 つが{100}面周囲からの電子放射である。

本実験系では、試料からの電子放射を、輝点ごとの放射に分けて測定していないため、どちらの試料も、{111}や{100}周囲からの電子放射特性が合算されて表れ、このような結果となっていると考えられる。

(2) S-K チャート

図4に実験から得られた S-K チャートを示す。グラフの横軸に F-N プロットの切片、縦軸に F-N プロットの傾きの値を示し、1つのプロット点が1つの電子源試料に対する F-N プロットである。Fowler-Nordheim の式による電界放射の電流は自然指数関数で示されるため、F-N プロットを描く際には自然対数を用いて処理されることが多い。しかし、S-K チャートの慣例では常用対数で描いた F-N プロットの切片と傾きの値が用いられるので、このグラフも常用対数で処理した値を用いている。

線材タングステンで作製した電子源と、圧延板から 45 度で切り出したタングステンで作製した電子源では、S-K チャート上でプロットが表れる位置が異なっていることが分かる。[6]両方ともタングステン材であり、また、針状に加工された電子源であるので、仕事関数および幾何学因子は大きく変わらないとすると、このプロット点の差は、電界放射時の輝点数の差、すなわち、電子放射面積の違いによるものであると考えられる。

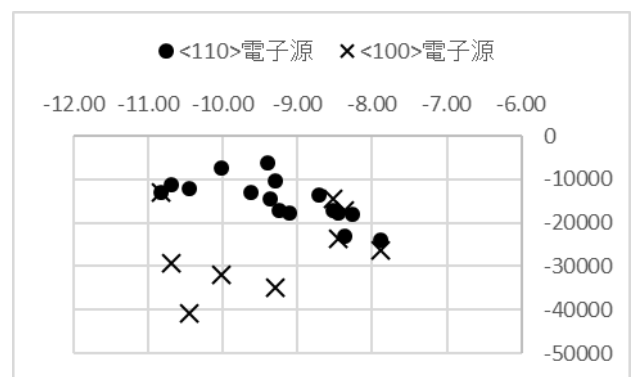


図 4.S-K チャート

3 まとめ

本研究では、仕事関数が既知であるタングステン材料を用いた針状電子源を作製し、その電子源先端の結晶方位の変化が S-K チャートでの評価にどのような影響を与えるか実験した。線材タングステンで作製した電子源、及び、圧延板から 45 度で切り出

したタングステンで作製した電子源からの電界放射を行い、電子放射像から、それぞれ電子源先端の方位の違いを確認した。既知であるタングステンの仕事関数によく一致した。これらのデータから S-K チャートを作製し、プロットを確認すると、S-K チャート上でプロットが表れる位置が異なっていた。これは、電界放射時の輝点数の差、すなわち、電子放射面積の違いによるものであると考えられる。これらの結果から、S-K チャートは、電界放射電子源の仕事関数以外の特性を明らかにすることができる分析法であることが分かった。

参考文献

- [1] Influences of Ambient Gases on the Emission Characteristics of Nickel-Deposited Field Emitters for Vacuum Microelectronics, J. Ishikawa, H. Tsuji, K. Inoue, M. Nagao, T. Sasaki, T. Kaneko, and Y. Gotoh, Jpn. J. Appl. Phys., Part 232, L342 (1993)
- [2] Relationship between work function and current fluctuation of field emitters: Use of SK chart for evaluation of workfunction, Y. Gotoh, H. Tsuji, J. Ishikawa, J. Vac. Sci. Technol. B 19(3): 992 (2001)
- [3] 圧延タングステンをを用いた熱電界放射陰極の作製, 安達洋, 曹涵清, 矢田慶治, 真空, 34 巻, 4 号, p. 447-451, 1991
- [4] CHEMISTRY and PHYSICS, 91ST EDITION, W.M. Haynes, Editor-in-Chief, 2010-2011
- [5] モリブデンおよびタングステン電界放射電子源の SK チャートによる評価, 大西亮, 川久保貴史, The 19th IEEE Hiroshima Section Student Symposium, 2017