

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560024
 研究課題名（和文） 電界放出素子のその場特性評価装置の開発と素子特性ゆらぎの要因解析
 研究課題名（英文） Development of in situ analyzer of field emitters and analysis of variation in field emission properties
 研究代表者 後藤 康仁 (GOTOH YASUHITO)
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00225666

研究成果の概要：電界放出素子の特性ゆらぎの要因解析のために、電子放出その場特性評価装置の開発を行った。高速 A/D 変換ボードと CCD カメラを PC に接続し、実験装置とのインターフェースの開発を行った。電流と電圧の値をアナログ回路で一旦解析しやすい数値に変換する方法と直接 PC に記録してソフトで解析する方法を検討し、それぞれの長所、短所を明らかにした。また、CCD カメラに記録した電界放射顕微鏡像と電流変動を対応付けた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：真空ナノエレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード：電界放出、その場解析、特性揺らぎ、電界放射顕微鏡像、切片傾きチャート、ファウラー-ノルドハイムプロット、電流変動、同時取り込み

1. 研究開始当初の背景

本研究では、高分解能電子顕微鏡の電子源として利用されている電界放出電子源や電界放出現象を基礎とした真空ナノエレクトロニクスデバイスの評価技術の確立を目指している。これまでも、電流変動の原因は残留気体分子の吸着脱離や電子源からの放射電子により電離した残留気体分子による衝撃、陰極構成材料ないしは残留気体分子の陰極表面の移動などによるものとされてきた。これら電界放出の基礎ともいえる部分については、古い時代の研究によるものが中心である。当時は、電界放射顕微鏡像を得ても、

それを記録する技術に乏しく、また電流変動とあわせて記録することは大変難しかった。近年、著しく進歩したデジタル技術により、これらは容易に実現できるようになって来ている。このように環境が整いつつあるにもかかわらず、依然として放出電流の変動に対する基礎的な取り組み、特に変動を精密に記録することで、従来の議論をより定量的なものとして仕上げるといった試みは皆無であるといつてよい。

そもそも、電界放出電子源の評価の手法は十分確立されているとはいいがたい。一般には、ファウラー-ノルドハイム

(Fowler-Nordheim)プロット(FNプロット)の傾きから仕事関数を調べるのが一般的な手法であった。ここでは形状については既知であり、いわば整えられた条件下での、測定がほとんどである。尖った針の先端は、陰極というよりは、電界放射顕微鏡像(FEM像)や電界イオン顕微鏡像を形成する場として利用され、比較的よく分かったものとして取り扱われてきた。

しかしながら、最近の特に真空ナノエレクトロニクスデバイスのように、デバイス形成後にフラッシングなどを行うことのできない状態では、上記のような「理想的な」陰極表面は存在せず、常に変化する状態がそこにはある。本研究代表者らはこのような条件のもとで電界電子放出がどのような振る舞いをするかについて長い間研究を行ってきた。その結果、これまで評価に用いられてきたFNプロットの傾きについても、測定ごとに異なる値をとり、その値から仕事関数などの物理量を評価するのはきわめて危険であることが明らかとなってきた。また、それと同時に、このFNプロットの変化はある一定の規則に従っていることも明らかとなっている。すなわちFNプロットの切片と傾きをそれぞれ横軸と縦軸にとった二次元の図・切片傾きチャート(SKチャート)を作り、一本のFNプロットをこのSKチャート上の点で表現すると、FN特性の変化はSKチャート上で一本の直線状にのることが分かったのである。このような挙動を示す理由を解析したが、いわゆる滑らかな表面をもつ陰極を仮定した計算ではこのような特性を導出することができず、局所的な構造ないしはその変化がこのような特性を生じるものと考えられる。実際の電界放出陰極表面は原子尺度の凹凸があり、滑らかな面とはいえない。電界放出電子源の電流変動の要因を調べるためには、FEM像と電流の変化を直接比較する必要がある。

2. 研究の目的

以上のような背景の下で、本研究では、これらの電子源の電流変動の原因を定量的に議論するための第一ステップとして電界放出電子源の電流変動とFEM像を同時に記録する装置の開発を目的としている。従来のような一定電圧印加における電流の変動を記録するのでは、従来以上の知見は得られない。本研究の独自性は、いわゆる電界放出素子の特性評価に利用されるFNプロットの形、ないしはそれを発展させたSKプロットの形で記録するところにある。電子源には直流に交流を重畳させた電圧を印加し、それに伴う電流変化をパーソナルコンピュータに記録する。また、FEM像は電荷蓄積素子(CCD)カメラにより記録する。これらを特に電子放出

素子の特性変化を把握しやすいFNプロットやSKプロットの時間変化とFEM像を比較する必要がある。この研究では、上記のような交流成分が重畳した信号をそのまま取り込み、ソフト的にFNプロットやSKプロットに変換する、あるいは、一旦アナログ回路でFNプロットやSKプロットに変換してからPCに取り込むのいずれに利点があるかを検討した。具体的には

- (1) すでに本研究開始以前から着手していた電子放出特性その場解析装置(アナログ)の特性改善と精度評価
- (2) A/D変換ボードによる電流電圧値の直接取り込みの精度評価
- (3) CCDカメラによる発光パターン記録と画像解析
- (4) 開発した装置により、実際の電界放射陰極の特性評価を試みた。

(1)及び(2)については、その場評価装置の性能を評価するものである。(1)については従来の手法の改善、(2)は新しい記録・解析方法の検討である。(3)のCCDカメラによるFEM像の記録と画像解析は今回の研究で新たに採用した手法である。(4)は以上の結果を総合的に活用するものである。

3. 研究の方法

- (1) 電界放出特性その場解析装置の特性改善と精度評価

従来の電界放出特性その場特性評価装置は、オペアンプを用いて、回路演算的に、電界放射素子の電圧電流特性を、FNプロットやSKプロットに変換するというものである。過去に開発したその場解析装置を改良するものとして、オペアンプの精度向上(オフセットのないオペアンプの利用など)と温度補償機能の付いた回路による対数・指数アンプの製作・性能評価を行った。本来の電流電圧は、微小電流・高電圧であるが、それぞれ増幅、分圧して低電圧回路で取り扱っている。まず低電圧信号に対する性能を評価する。実際の測定上の性能は項目(4)で検討した。

- (2) A/D変換ボードによる電流電圧の直接取り込みの精度評価

16ビットのA/D変換ボードを利用して高精度(最小電圧0.3mV)で電圧・電流値をPCに取り込み、PC内でソフト的にFNプロットやSKプロットを実現するものである。本研究補助金により、高電圧電源を含み出力信号をPCに記録する装置を購入した。直流に正弦波が重畳した電圧・電流(電流は電界放出素子の特性のために歪を生じており正弦波ではない)をPCに取り込む精度を確認、変化

する信号から直流分、及び交流分の振幅を導き出す方法を検討した。この場合も、本来の微小電流・高電圧を取り扱いやすい電圧に変換している。実際の計測の条件下での精度については項目(4)で検討した。

(3) CCD カメラによる発光パターンの記録と解析

これまでビデオカメラを用いてきた FEM 像の記録を、IEEE1394 インターフェースを持つ CCD カメラに置き換え、画像の取り込みとその解析方法の検討を行った。画像は bitmap 形式で保存される。各画像間の変化をデータの差分を取ることで読み取ることができるかどうか検討した。

(4) 電界放射陰極の特性評価

実際に、電界研磨したタングステン針の電界放出素子から放出される電流と、蛍光板に映った電界放射顕微鏡像をその場特性評価装置により取り込み、それぞれのデータを比較、電流変動と FEM 像を対応付けた。実験は超高真空下($2\sim 10\times 10^{-7}\text{Pa}$)で行った。

4. 研究成果

(1) 電界放出特性その場解析装置の特性改善と精度評価

まず、対数・指数アンプに単純なダイオードを用いた回路において、オペアンプを高精度化することで、測定精度がどこまで向上するか調べた。使用したオペアンプは LF412 である。最も誤差を生じやすい指数アンプについても実用上の電圧範囲では誤差 5%以内で値の変換を行うことができることが明らかとなった。対数アンプについてはこれより若干精度が高いが、FN プロットの縦軸となる $\log(I V^2)$ を作る回路は電流と電圧の対数を加算するところで両者の誤差が加算され、指数アンプの誤差 5%と同程度になることが明らかとなった。これらは回路の定数を決める抵抗については炭素皮膜抵抗を利用したので、金属皮膜抵抗を用いることでさらに精度が向上する可能性がある。

上記回路は一定の条件下では高性能を発揮するが、温度変化に対して値が変化するという欠点を有している。そこで、対数アンプの回路に温度変化を補償する回路を用いて FN プロットを実現する回路を製作した。この回路は、温度安定性はきわめて良好であったが、交流動作時に反応が遅く、実際の FN プロット生成には向かないことが明らかとなった。

このほか、FN プロット生成回路の誤差が、FN プロットから計算される SK プロットに与える影響についても定量的に議論した。

(2) A/D 変換ボードによる電流電圧の直接取

り込みの精度評価

16 ビットの高速 A/D 変換ボードを PC に搭載し、電流、電圧の計測と、その値から信号の直流分、交流分の振幅を求める手法を検討した。高速で瞬時値から振幅の値を計測できる手法として特定の点とその両隣の点から振幅を計算するアルゴリズムを製作した。交流に対しては、振幅を求めるアルゴリズムは有効に機能したが、直流に交流が重畳した場合には、同じ手法では大きく精度が落ちることが明らかとなった。理想的な状態、すなわち実験的に取得した電圧の値ではなく、ソフトにより数式で与えた離散的なデータを解析する場合においてすでに以下のような誤差が生じることを見出した。すなわち、直流分に変化がなく、交流分がわずかに変化する時では、交流信号の最大値となる部分で最大 10%の誤差が生じることが明らかとなった。また交流分に変化がなく、直流分に変化がある場合はさらに大きな誤差を含むことが明らかとなった。

さらに、電流値は素子の非線形性により正弦波にならないことから、これらの値を求める方法については、さらに検討する必要があることがわかった。

回路全体が高インピーダンスであることから懸念された雑音については、低電圧の実験を行う上では問題ないことが明らかとなった。

(3) CCD カメラによる発光パターンの記録と解析

CCD カメラによる FEM 像の取り込みにおいては、当初、蛍光板の発光の強弱によって、得られる画像がうまく解析できないのではないかと懸念があったが、ソフトにより画像を調整すると、輝度の高いところと低いところも明確に観察することができることが明らかとなった。

(4) 電界放射陰極の特性評価

開発した装置を用いて、電流変動と FEM 像の比較を行った。FEM 像にはタングステン針表面の仕事関数分布を反映した特有のパターンが見られるが、時々、これに加えて輝度の高い部分が発生する。本装置により、これを記録し、電流変動との関連を調べた。まず、精度向上した FN プロットを用いた計測では、FEM 像の輝点の生成消滅に対応して FN プロットが変化することが明らかとなった。電流・電圧を直接 PC に取り込む方式においても、類似の傾向を得ることができた。

細かい解析をするためには長い時間を要するため、これについては今後の課題となった。また、実際に素子に高電圧を印加してその低圧部分の電圧を取り出すと、A/D 変換ボ

ードで取り込んだ場合に雑音が乗り、振幅等の計算の信頼性が低下することが明らかとなった。上記(1), (2)では問題なかったことから、高電圧配線の引き回し等により、雑音を拾った可能性もある。この原因については現在のところ不明である。

また、素子のインピーダンスが極めて高い(2~5GΩ)ため、若干の並列容量により電圧と電流の位相がずれてしまうことが明らかとなった。特に電流が少ない領域では、相対的にインピーダンスが高く、この容量の影響を大きく受ける。SKチャートを作図する時にこの点問題となる。これについても今後の課題となった。

上記のように、若干課題は残されたものの、FEM像と電流変動を同時に記録し、電界放出素子の特性解析を行うことができる装置が完成した。A/D変換で直接電圧・電流をPCに取り込むよりは、予め若干変換をしておいたほうがよいことがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

- ① Y. Gotoh, M. Kawasaki, H. Tsuji, and J. Ishikawa: "Improvement of in situ analyzer of field emission properties", Proceedings of the 15th International Display Workshops, FED4-5, December 5, 2008, Niigata (2008) pp. 2073-2076.
- ② 河崎道人, 後藤康仁, 辻 博司, 石川順三: "タングステンエミッタのFowler-Nordheimプロットの変動と電界放射顕微鏡像の同時観察", 第49回真空に関する連合講演会, 30 連合 a-3, 2008.10.30., 松江 (2008) 講演予稿集 p. 89.
- ③ 河崎道人, 後藤康仁, 辻 博司, 石川順三: "タングステンエミッタの電界放射顕微鏡像の変化と切片傾きチャート上の電界放出特性", 第69回応用物理学会学術講演会, 2008.9.2. 春日井, 2a-N-6, 講演予稿集 p. 630.
- ④ 後藤康仁, 河崎道人, 辻 博司, 石川順三: "電界電子放出特性その場解析アナログ回路の改良", 電子情報通信学会電子デバイス研究会, 2008.8.5., 浜松電子情報学会技術報告 ED2008-118 (2008) p. 45-48.

- ⑤ Y. Gotoh, M. Kawasaki, H. Tsuji, and J. Ishikawa: "Observation of change in field emission microscope image and Fowler-Nordheim plot with in situ analyzer of field emission properties", Technical Digest of the 21st International Vacuum Nanoelectronics Conference, July 16, 2008, Wroclaw (2008) p.60-61.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 康仁 (GOTOH YASUHIITO)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00225666