

電界放射陰極列のための放射顕微鏡の製作

電気・情報系（電気電子工学科） 山根 康一

1 はじめに

電子を真空中に放射するための新しいタイプの電子源として、FEA(フィールドエミッタアレイ：電界放射陰極列)の研究開発が近年盛んに行われている。FEAはとがった先端を有するエミッタと引き出し電極とを一体化し、アレイ状に多数配置したものであり、フラットパネルディスプレイへの応用が期待されている。加速した電子を蛍光板に当てると放射パターンが得られる。この原理を応用したものに電界電子顕微鏡があり、得られた放射パターンは電子源の情報となる。しかしFEAでは微小空間に多数のチップが配置されているため、各チップからのビームパターンが重なり合い、一つのビームの束として蛍光板に映し出され個々のチップからの情報は得られない。そこで本研究では、個々のチップからのビームパターンを拡大分離して観察するための放射顕微鏡を製作し、その能力を評価した。

2 放射顕微鏡の設計と製作

FEAの基本構造を図1に示す。チップ間隔は $3\mu\text{m}$ で直径 $0.5\mu\text{m}$ の穴の開いた引き出し電極であるゲート電極と対をなしている。このチップとゲート電極がアレイ状となし、直径 $200\mu\text{m}$ の円内に3500個配置されている。放射顕微鏡の設計にあたって、図1の様な間隔 $3\mu\text{m}$ の各チップから放射される電子ビームを明確に分離することが要求される。もし100倍の拡大率が得られれば蛍光板上では 0.3mm 間隔に拡大分離して映し出され、要求を満たすことが可能である。また、その後は光学顕微鏡やビデオ光学装置を導入することにより数百倍から数千倍の拡大率を得ることが可能となる。そこで本研究では倍率100倍の放射顕微鏡を目標に設計製作を進めた。

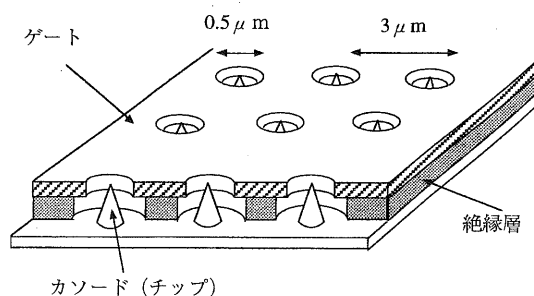


図1 FEA基本構造図

放射顕微鏡に用いる電子レンズには、比較的構造が単純な割には高倍率を得られるアインツェルレンズ(対称型静電レンズ)を用い、また前段レンズを配置し二つのレンズ群を組み合わせることにより高倍率を実現する。尚、この二つのレンズ系は共に電界で作用する静電レンズであり、レンズ界内で電子速度が加減速されることにより電子軌道が曲げられ、光学レンズと同様のレンズ効果を生じさせるものである。二つのレンズ群を組み合わせるためには、試料面から観察面までの間に二つのレンズ中を通る電子軌道を見極め、試料面から放射された電子ビームが観測面で確実に結像するように各レンズを配置し、また適切なレンズ電位を与えなければならない。そこで、はじめに二つのレンズを個別に設計し軌道計算を行った後、二つのレンズを組み合わせる種々の条件でレンズの中心軸近傍を通る電子ビームの軌道計算を行い、最適なレンズ配置を求めた。図2及び図3は設計した電子レンズの断面図とそのレンズ界中を通る電子軌道である。

により焦点の粗調整と観察箇所の変が可能である。図6は製作した放射顕微鏡の各電子レンズへの電位配置図である。放射電子への加速電位は-5kVであり、アインツェルレンズ部のレンズ電位は0~1kVの間で可変する。このレンズ電位を可変することによりレンズ強度が変化し、焦点面と倍率を変化させることが可能となる。この他に引き出された電子ビームを整えるウェネルト電極があり、ウェネルト電位は0~-500Vまで可変させることができる。実験は製作した放射顕微鏡を評価するために、タングステン・フィラメントによる熱電子放射像の観察を初めに行い、その後、FEAからの電子ビームの観察を行った。実験方法は試料をセットし、真空容器内の圧力を 10^{-10} Torr台まで排気した後、最初に加速電圧として-5kVを印加し、蛍光板に映し出された像を見ながらマニピレータによる粗調整、ウェネルト電位、レンズ電位を変化させて最良の結像点を得られるように調整し、観察を行った。

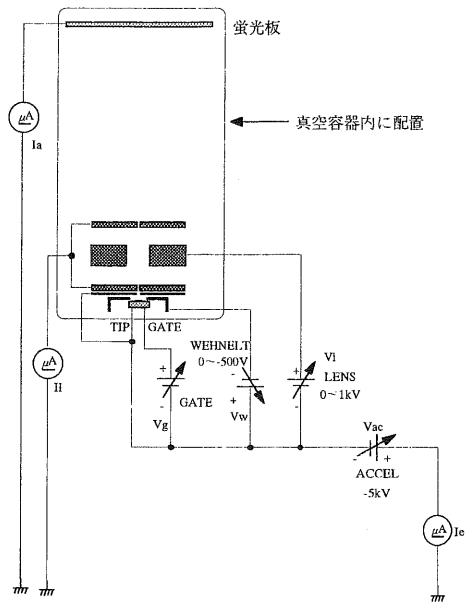


図6 電位配置図

4. 結果および考察

4.1 タングステン・フィラメントによる熱電子像

図7は直径0.1mmのタングステン・フィラメントによる熱電子像の結像の様子である。尚、タングステン・フィラメントは観察し易いように中心を十字形にスポット溶接してある。この時の試料距離とレンズ電位の関係を表1に示す。また、観察に用いたタングステン・フィラメントのSEM像を図8に示す。

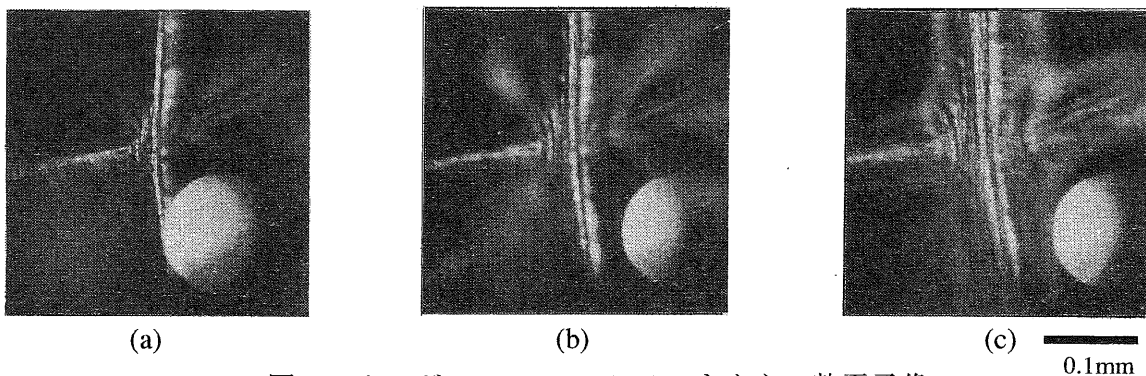
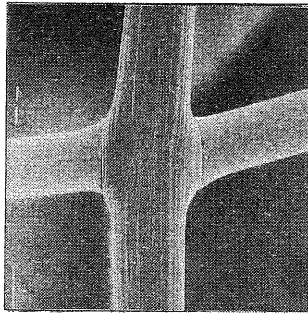


図7 タングステン・フィラメントからの熱電子像

表1 試料距離とレンズ電位表

	試料距離 (mm)	加速電位 (kV)	ウェネルト電位 (V)	レンズ電位 (V)
(a)	2.34	-5	0	0
(b)	1.93	-5	-187	0
(c)	1.43	-5	-450	0



× 200 0.1mm

図 8 フィラメントSEM像

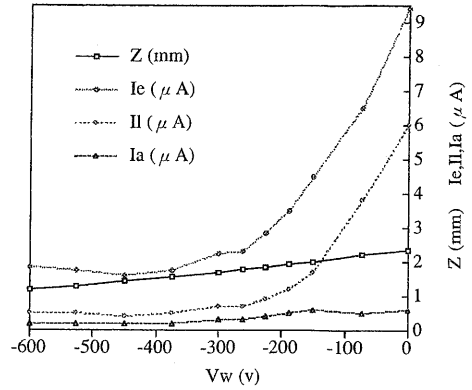


図 9 ウェネルト電位に対する各電流値
Z:試料距離 Ie:放射電流 II:レンズ電流 Ia:蛍光板到達電流

図7および表1より試料距離1.43mm、ウェネルト電圧-450Vの時に最良の結像が得られた。これは先に計算した焦点距離3.3mm(レンズ中心からの値)とほぼ一致する結果となった。蛍光板上に結像したフィラメント像の実測値は線径が約1cmとなり、設計どおり100倍の拡大率が得られている。また、図8のSEM像と図7(C)を比較すると、解像度は劣るがフィラメントの形状は十分に確認できる性能を有していることが分かった。図9はウェネルト電位をパラメータとしたときの試料距離と各電流値の関係である。放射電流とレンズ電流はウェネルト電位の増加と共に減少し-450Vで最小値をとり、このとき最良の結像を得た。これに対して蛍光板上に到達する到達電流は放射電流の1/10位であり、放射電流に従って減少するが、その減少傾向はわずかであり-350Vからはほぼ一定となった。このことは試料から放射された放射電子のうち蛍光板上に到達しうる電子は、レンズ軸方向近傍のごく一部の放射電子であり、その放射電子はウェネルト電位による減少を受けないものであると言える。

4.2 FEAからの放射電子像

図10はFEAからの放射電子像(電子ビーム像)であり、表2はそのときの試料距離と各レンズの電位である。FEAからの放射電子像の観察にあたっては高電界によるFEAの破壊を防ぐために加速電圧を-3kVに下げて観察している。表2の条件のときに各チップから放射された電子ビームは蛍光板上で結像し、その分離に成功した。この時の試料距離は2.18mmとなった。タングステン・フィラメントの場合と比較して試料距離が伸びたのは、加速電圧を下げて動作させているため、レンズ効果が弱まったからである。得られた画像には収差が残り、特に球面収差とコマ収差の影響が目立った。タングステン・フィラメントでは目立たなかった収差の影響が克明に現れた原因は、放射電子源が点光源であるためである。一般に点光源からの像は、光源の周囲が暗いため収差の影響が克明に現れることになる。しかし、図10をよく観察すると、電子レンズの影響とは考

表 2 試料距離とレンズ電位表

試料距離 (mm)	加速電位 (kV)	ウェネルト電位 (V)	レンズ電位 (V)
2.18	-3	-210	0

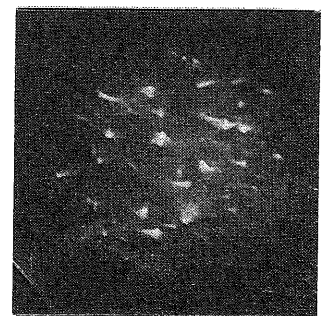


図 10 FEAからの放射電子像

えがたい収差が多数観察された。一般に収差は中心から放射状か、もしくは一方向に広がるが、図10では各チップで収差方向に違いが見られた。このことは各チップから放射されるビーム方向に一様性が無いことを意味している。しかし、このことは当研究報告とは別問題の事象であるので詳しくは述べない。

5 まとめ

今回製作した放射顕微鏡は、二段式の静電レンズ型を用いて100倍の拡大率を得ることができた。FEAから放射されたビームの束は蛍光板上に結像し、各チップごとの電子ビームとして分離された。しかし、FEAからの放射像は収差が残るものとなった。今後の検討課題として、収差の軽減および分解能の向上のための絞りの導入とレンズ軸系の精度の向上が望まれる。また、さらなる拡大率を得るためにレンズ系による基本倍率の増大、また、これに起因する地磁気による影響軽減のための消磁回路の導入などの検討が望まれる。

参考文献

- 1) P. Grivet , P.W. Hawakes , A. Septir , ELECTRON OPTICS , (PERGAMON PRESS , 1972)
- 2) K. Kanaya , H. Kawakatsu , H. Yamazaki , S. Sibata , Electron Optical properties of three-electrode electron lenses , J. SCI. INSTRUM., 1966, VOL.43 , pp.416-427
- 3) A. Septier , TYPES D' OBJECTIFS ELECTROSTATIQUES A IMMERSION A FORT GRANDISSEMENT , Ann. Radiel.9 , 1954 , pp.374-410
- 4) 裏 克彦、電子・イオンビーム光学、(共立出版、1994)
- 5) 菅田 栄治、電子・イオンビームハンドブック、(日本学術振興会第132委員会編、1973)
- 6) 伊藤 順司、真空マイクロエレクトロニクス、電子情報通信学会誌、V1077 No.11, 1994 , pp.1182-1186
- 7) 高木 俊宜、電子・イオンビーム工学、(電気学会、1995)