

放射顕微鏡によるFEAの放射特性

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、電界放射陰極列 (Field Emitter Arrays; FEA) ¹⁾がありフラットパネルディスプレイ等への応用が進められている。FEAは図1に示すように、とがった先端を有する陰極と電子を引き出す役割のゲート電極を一体化し、アレイ状に多数配置したものである。

陰極から放射された電子線を加速し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 (Field Emission electron Microscope ; FEM) があり、蛍光板上に得られた放射パターンは電子源の情報となる。この手法は、電子源となる陰極が単針の場合には有効な手段であり、古くから電子源の表面物性などの研究に用いられている。しかし、アレイ状に多数配置されたFEAにこの手法を用いた場合には、微小空間に多数の陰極が配置されているため、各陰極からの放射電子線が重なり合い、図2に表すように一つのビームの束として蛍光板上に映し出され、個々の陰極からの情報は得られない。また、放射電流変動も全陰極からの電流変動の平均としてしか測定することができない。したがって、アレイ状に多数配置した場合の各陰極の動作状態を観察するには、単に蛍光板と電界放射陰極の間に高電圧を印加するだけの、いわゆる電界電子顕微鏡(FEM)では不可能である。そこで本研究では、個々の陰極の動作状態を観察する手段として放射顕微鏡を製作し、FEAからの放射電流について個々の陰極レベルで観察を行った。

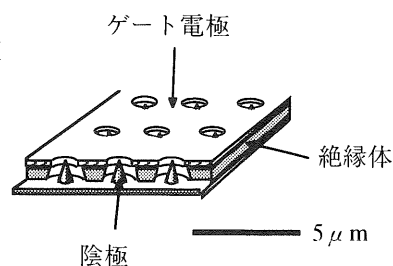


図1 FEAの構造図

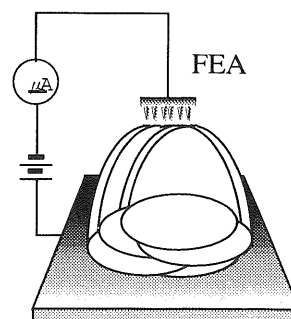


図2 電界電子顕微鏡法

2 実験装置

本研究に用いた放射顕微鏡の電子レンズ部は構造の簡素化のため、電界型電子レンズのみで構成されている²⁾。図3は放射顕微鏡の電子レンズ構成部と伝搬空間の概略図である。電子レンズは2段式の可変倍率構造となっており、前段として第一電極と第二電極による二枚開口レンズ部、後段として第二電極から第四電極によるアインツェルレンズ部により構成されている³⁾。レンズ中心から観察面である蛍光板までの伝搬距離は600mmである。試料 (FEAの各陰極) から出発した電子線は2枚開口レンズにより一度収束結像する。全段レンズでの倍率は第一電極の電位を変化させることによりレンズ強度を可変することが可能であり、2~6倍の倍率を得ることができる。次にアインツェルレンズにより蛍光板上に拡大投射される。このときのアインツェルレンズの倍率は50倍であり、レンズ系全体としては100~300倍を得ている。また、このときの分解能力は約3μmである。FEAを取り付けるための試料台には3軸型のマニピレータが取り付けられており、試料面の

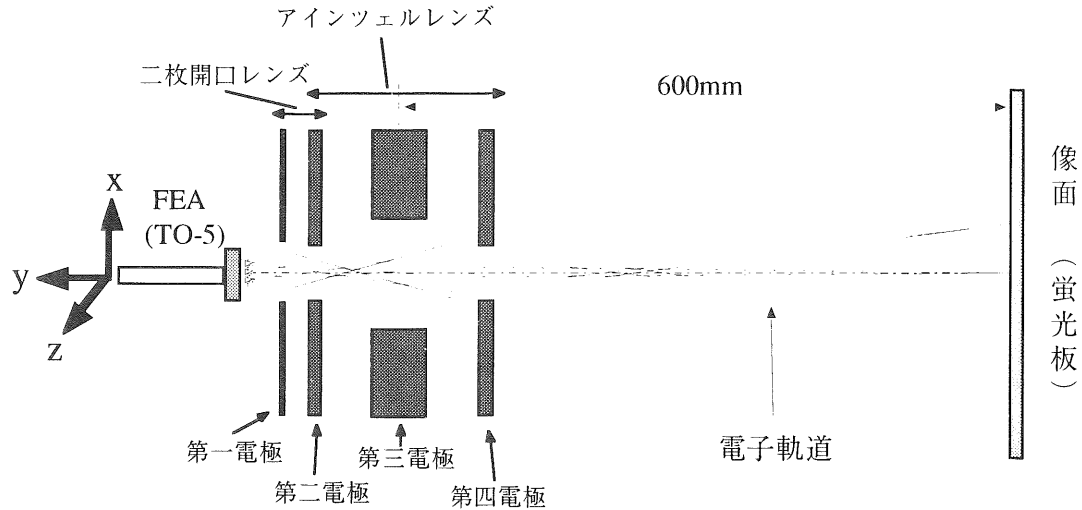


図3 電子レンズ構成と伝搬空間の概略図

移動と焦点調整を行うことが可能である。鏡筒内は真空排気装置により排気され、その到達圧力は 10^{-8} Pa 台である。蛍光面上に映し出された放射電子線像は、ビデオ光学装置によりビデオモニター上に拡大され観察を容易にしている。

3 実験方法

実験に使用するFEAはモリブデン陰極のスプリント型¹⁾であり、TO-5上のシリコン基板に $200 \times 200 \mu\text{m}$ 領域に $6 \mu\text{m}$ 間隔で格子状に900個配置されている。放射顕微鏡にFEAを取付後、真空排気装置により 10^{-8} Pa 台まで排気を行う。電子レンズとFEAの脱ガスを実行後、放射顕微鏡を動作させる。加速電位、第一電極電位(レンズ電位)をそれぞれ3kV、0.6kVに設定し、ゲート電圧を加えてFEAから放射電流を得る。試料ステージのマニピレータによりピントの調整を行い倍率300倍の像を得る。観察に際しては蛍光板に現れたビームスポット像をビデオ光学装置で拡大し画像の記録を行うと共に全放射電流の記録も行う。また、個々のビームスポットの輝度変化を記録するためにビデオモニター上で光センサーによる輝度測定も行い、その変化をレコーダーに記録する。

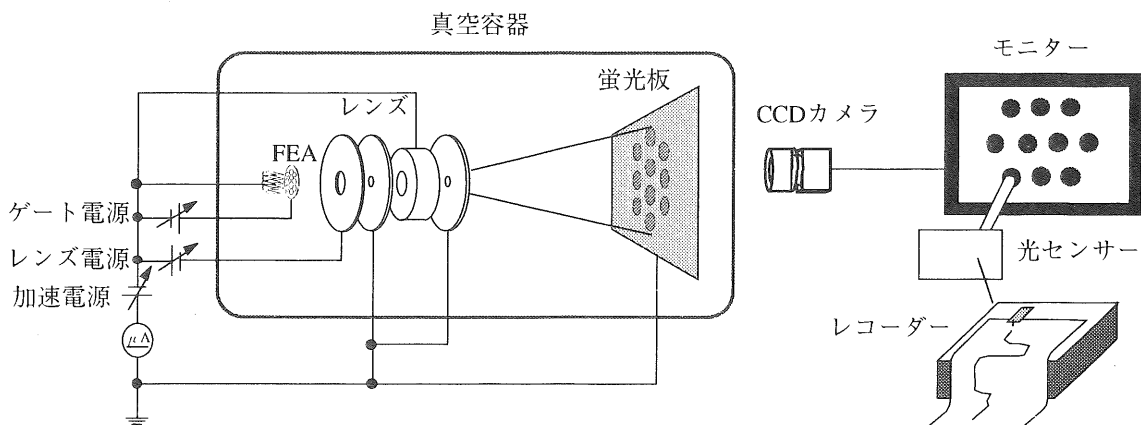


図4 実験装置構成図

4 実験結果および考察

4.1 放射電流均一性

FEAの各陰極から放射された電子線は電子レンズにより拡大、分離され、蛍光板上にスポット像として結像した。その結果を図5に示す。図5より基板上的の陰極配置を忠実に再現していることがわかる。このときの全放射電流は $10\mu\text{A}$ であり、全陰極数の約60%がスポット像として観察された。図5において彗星状のスポットが多数みられるが、これはゲート孔と陰極の幾何学的な中心軸のずれに起因する。すなわち、ゲート電極により陰極から放射電流が引き出される時点である方向に偏りを持って引き出され、その結果、引き出された放射電子線の電子軌道が放射顕微鏡の近軸軌道から大幅にずれ、彗星状の収差となって現れたものである。放射電流量とスポット数の関係は、図6において示される。プロットaはゲート電圧に対する放射電流量であり、プロットbはゲート電圧に対するスポット数である。この二つのプロットを対比させることにより、スポット数は放射電流増加の初期段階において急激に増えることが確認され、その増加は陰極数の50~60%を過

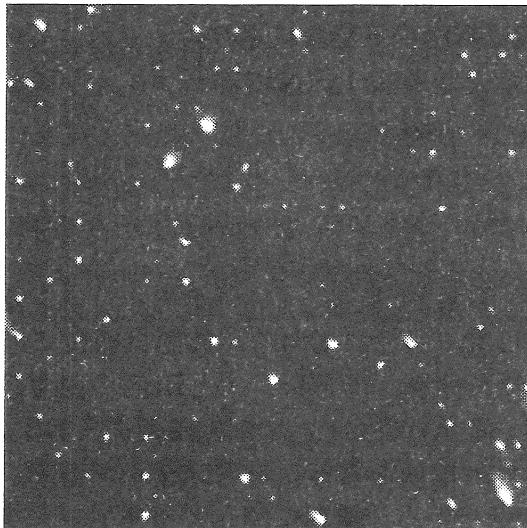


図5 FEAからの放射スポット像

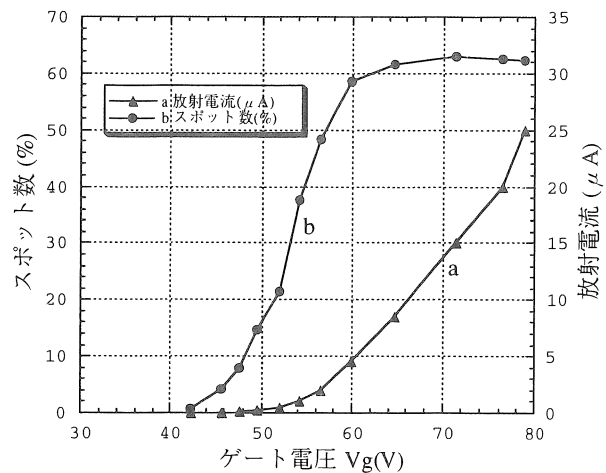


図6 ゲート電圧-スポット数、放射電流特性

ぎたところで飽和傾向となり、以後は放射電流だけが增加することがわかった。図7は得られたスポット像について、各スポットの輝度分布を表したヒストグラムである。輝度分布は暗い方へ偏っているが、ガウス分布に近い形を持っていることがわかる。スポットの輝度は各点での放射電流密度と密接な関係があり、その放射電流は各陰極の先端半径の鋭さと関係がある。FEAは多数の陰極の集合体であり、製造プロセスにおいて陰極先端半径のばらつきがガウス分布に従うことは推察され、得られた輝度分布もほぼ同様の分布を示したものと考えられる。

これらの実験結果から放射電流均一性についてヒスト

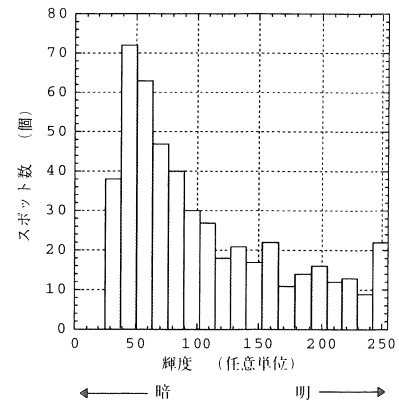


図7 スポットの輝度分布

グラム分布幅と図6のプロットbの立ち上がり部分の傾きによって評価することが出来る。プロットbの傾きはゲート電圧、すなわち電子の引き出し電圧に対する動作陰極数を現すものであり、その傾きが大きい程均一性の良好なFEAであるといえる。また、均一性の良好なFEAならば各陰極からの放射電流密度も均一になるので、輝度で現すヒストグラム分布幅も狭くなる。したがって、理論的に均一な陰極を持つFEAとはプロットbの傾きが無限大、すなわちステップ状に立ち上がり、ヒストグラム分布幅も限りなく細いものになる。本研究では多数のFEAについて測定を行っているが、現在のところ本報告に掲載したFEAが最良のものであった。

4.2 放射電流安定性

FEAの放射電流安定性について、従来は各陰極から得られた放射電流の合計による安定性、すなわち各陰極からの放射電流変動の平均として測られていた。しかし、本研究では放射顕微鏡を用いることにより、個々の陰極についての放射電流変動を輝度変化によって測定することができた。図8は、従来からの測定方法である全放射電流で現した放射安定性である。このときの放射電流量は $13\mu\text{A}$ であり、電流変動率は約1%である。平均化された放射電流は、一見各陰極が安定して放射しているように見える。しかし、各スポットに分離された放射像より、多くの陰極の放射電流は激しく変動していることがわかった。図9に輝度変化の代表的な例を示す。図9(a)は比較的安定なスポットの輝度変化グラフであるが、時折パルス状の輝度変化が見られる。図9(b)は輝度変化がステップ状の場合のグラフである。図9(c)も輝度変化がステップ状の場合であるが、前半で輝度が完全に消失している。一方、図9(d)は常時激しく変動しているスポットの輝度変化の様子である。我々は蛍光板上に写しだされた数多くのスポット像について輝度変化を測定したが、ほとんどの陰極に変化の差異はあるものの輝度変化が見られた。このように、トータル電流では一見安定して放射しているように見受けられるFEAも、各陰極レベルでは激しく変動していることがわかった。

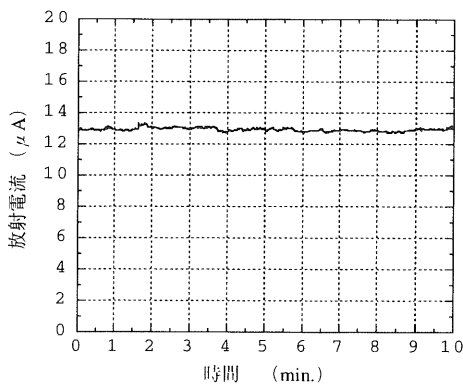


図8 放射電流安定性

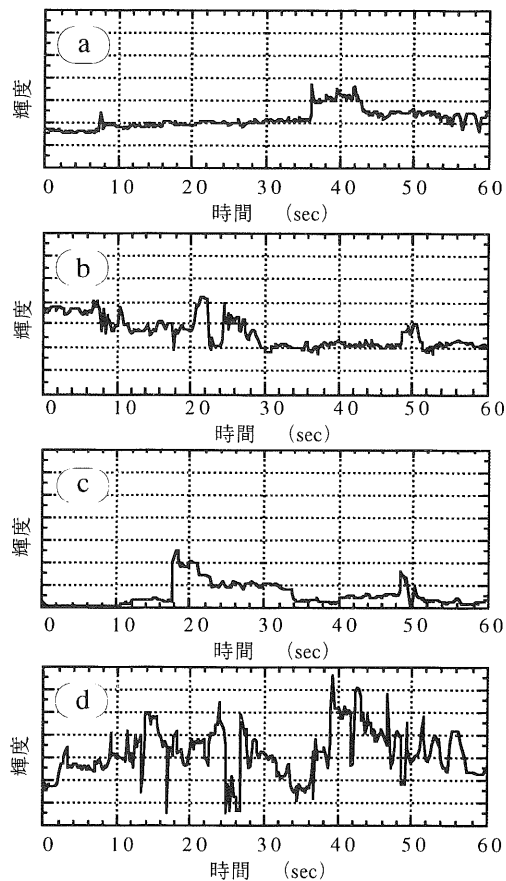


図9 スポットの輝度変化

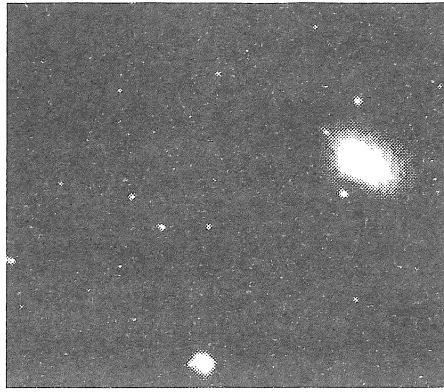


図10 強烈な輝度のスポット像

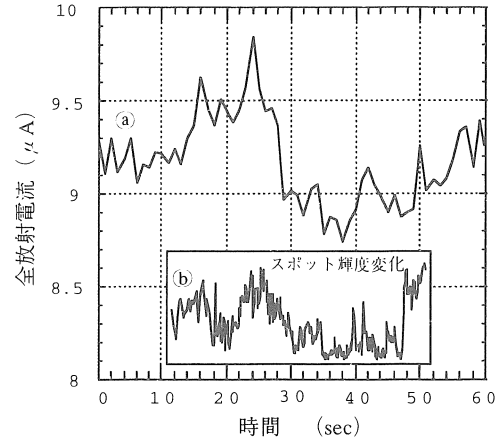


図11 放射電流安定性と輝度変化

また、全電流での変動はランダムノイズのように現れているが、個々のスポットの輝度変化はパルス、ステップ状の変動であった。一方、放射電流変動が極端に大きくなる場合として、図10のような強烈な輝度のスポットが現れることがあった。このような場合には、放射電流安定性は著しく失われる。図11 (a) は全放射電流安定性であり、この時の電流変動率は約10%である。図11 (b) は図10の強烈な輝度スポットの輝度変化である。共に時間軸は一致しており、1つのスポットの輝度変化が電流変動を大きく支配していることがわかる。このように、電流変動が激しいときは、高輝度スポットが発生している場合であることがわかった。

5 まとめ

FEAの各陰極から放射された電子線は、放射顕微鏡を用いることにより蛍光板上にスポット像として拡大、分離することができた。スポット数は、放射電流が得られる初期段階で急激に増加し、その後は飽和傾向を示した。また、蛍光板上で確認できたスポット数は、全陰極数の50~60%であった。スポット像の多くは、パルス、ステップ状の輝度変化を示した。強烈な輝度スポットは放射電流均一性と安定性を著しく損なうことがわかった。

参考文献

- (1) A. Spindt, E. Holland and D. Stoewl, FILED EMISSION CATHODE ARRAY DEVELOPMENT FOR HIGH-CURRENT-DENSITY APPLICATIONS, Applications of Surface Science.16, 1983, pp.268-276
- (2) P. Grivet, P.W. Hawakes, A. Septier, ELECTRON OPTICS, (PERGAMON PRESS, 1972)
- (3) A. Septier, TYPES D' OBJECTIFS ELECTROSTATIQUES A IMMERSION A FORT GRANDISSEMENT, Ann. Radiel.9, 1954, pp.374-410