

放射顕微鏡による電界放射陰極列からの放射電子線の観察

非会員 山根 康一 (室蘭工業大学)

非会員 武藤 康史 (室蘭工業大学)

非会員 中根 英章 (室蘭工業大学)

正員 安達 洋 (室蘭工業大学)

Emission Microscope observation of FEA field emission patterns
 Kouichi Yamane, Yasufumi Mutoh, Hideaki Nakane, Hiroshi Adachi
 Member (Muroran Institute of Technology)

An emission microscope, which has two electrostatic lenses, has been made at our laboratory in order to observe magnified emission patterns for a FEA (field emission array). The electrostatic lens system consists of a bi-potential lens and an Einzel lens (a three electrode static lens). The lenses focus the emission patterns on a phosphor screen placed at 315 mm from the center plate of the Einzel lens. The total magnification is 100. The microscope enables to separate the field electron emission from each individual cathode as bright spots on the phosphor screen. It is found that the electron beam from slightly non-concentric structure of the individual cathode deviates from the optical axis and gives a comet-like tailed spot. The luminance of the spots fluctuates like pulses.

キーワード: 電界放射陰極列、FEA、微小電子源、放射顕微鏡、電子レンズ

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 Array ; FEA)⁽¹⁾の研究開発が近年盛んに行われている。FEAは図1に示される、とがった先端を有するエミッタ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り、フラットパネルディスプレイ等への応用が期待されている。

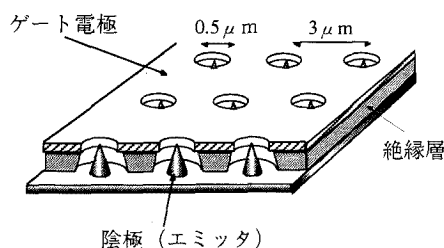


図1 FEAの構造図(一例)

Fig.1. Schematic diagram of a FEA.

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。

FEAの場合においても電子源の表面物性の解明には1チップタイプのFEAが用いられる。1チップタイプのFEAにより電子源の表面物性の解明は可能になるが、アレイ状とした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、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。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、図5に示す放射顕微鏡を製作し観察に用いた⁽²⁾⁽³⁾。放射顕微鏡は本来、試料を加熱することによりその表面か

ら放射される熱電子線を電子レンズで収束させ試料の拡大像を得る装置であり、試料表面を電子ビームで走査することにより拡大像を得る走査型電子顕微鏡や高速の電子ビームを透過させて試料の観察を行う透過型電子顕微鏡とは動作原理を異にする。放射顕微鏡はむしろ光学顕微鏡と多くの共通点をもつ。光学顕微鏡が図2(a)で示すように試料から反射される光線束を光学レンズで収束させ拡大像を得るのに対して、放射顕微鏡は図2(b)の様に試料から放射される電子線束を電子レンズで収束させ拡大像を得る。両者には光線束と電子線束の違いはあるものの、拡大像を得るためのレンズの役割は基本的に同じである。本研究では放射顕微鏡を応用し、放射顕微鏡内でFEAを動作させることにより、個々の陰極から放射された放射電子線を個々のビームスポットに分離、拡大することに成功したので報告する。

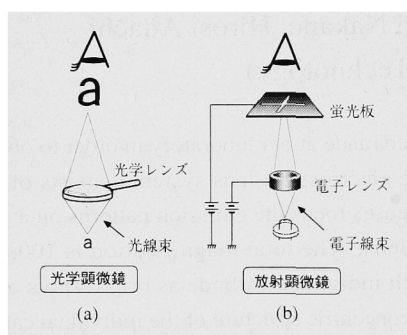


図2 光学顕微鏡と放射顕微鏡
Fig.2. Schematic diagram of a optical microscope and an emission maicroscope.

2. 実験装置

< 2.1 > 電子レンズの構成

本研究に用いた放射顕微鏡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。図3は放射顕微鏡の電子レンズの構成図である。配置した電子レンズには第三電極から第五電極で構成される投射型の3枚電極型電界電子レンズ（アインツェルレンズ）を選び、また、前段レン

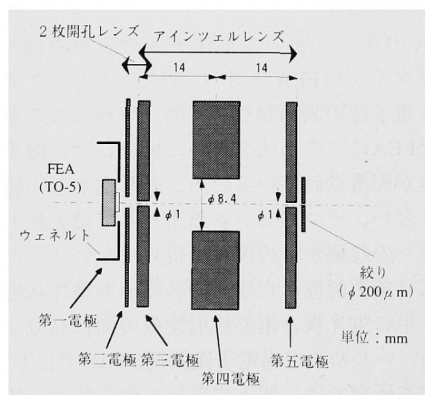


図3 電子レンズの構成図
Fig.3. Diagram of the electrostatic lenses.

ズとして第二電極と第三電極により2枚開口レンズを構成させることにより拡大率の向上を図っている⁽²⁾⁽⁴⁾。電子線を扱う電子レンズの機能上、球面収差の影響から逃れることは不可能である。しかし、電子レンズの軸上に入射電子線の方向成分を制限するための絞りを設置し、レンズ中心軸近傍の近軸軌道のみをを扱うことにより球面収差の影響を軽減することができる⁽⁵⁾。本装置では実験後半から、電子レンズの直後に直径200 μm の絞りを設置し球面収差の軽減を図っている。また、電子レンズの前段にはFEAから放射された電子線を整えるウェネルト電極も配置されている。

< 2.2 > 放射顕微鏡の電位配置と観察系

図4は試料から観察面までの全体図と電子軌道の様子である。レンズ中心から観察面である蛍光板までの距離は315mmである。試料（FEAの各エミッタ）より出発した電子線は2枚開口レンズで一度収束結像する。この時に得られる倍率は2倍である。次にアインツェルレンズにより

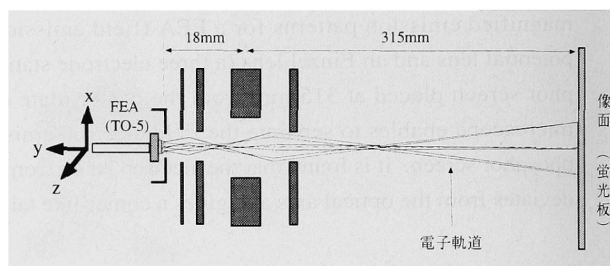


図4 電子レンズと伝搬空間
Fig.4. The electrostatic lenses and drifting space.

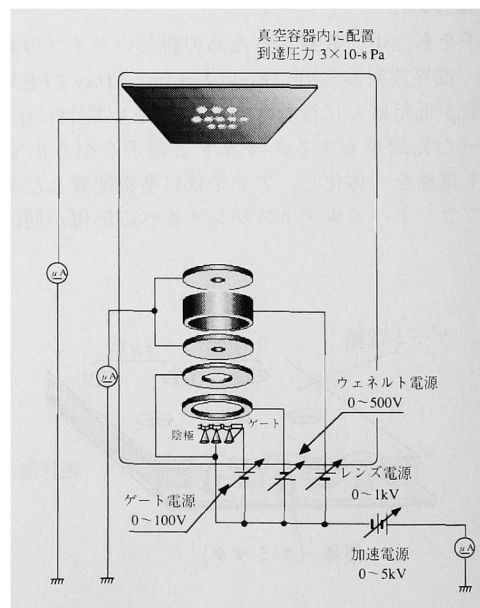


図5 電子レンズと電位配置図
Fig.5. Diagram of the electrostatic lenses and potential arrangement.

蛍光板上に拡大投射される。この時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有効倍率100倍を得ている。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、試料面の移動と焦点調整の粗動を行うことが可能である。図5は電子レンズとその電位配置図である。加速電源はFEAのゲート電極により引き出された電子線を加速すると共に、各電子レンズの基本動作を担う役割をもつ。レンズ電源はアインツェルレンズの焦点距離を設定する。この他に、引き出された電子線を整えるウェネルト電源、および、ゲート電源が設置されている。これらの電源は加速電源の加速電位を基準にして動作させている。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光学顕微鏡やビデオ光学装置により拡大され観察を容易にしている。

3. 実験方法

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。その後、FEAのエージングのため電子レンズの第二電極をアノードとして使い、500V程度の低加速電圧でFEAのエージングを実行する。この行程はFEAからの放射電流が約 $100\mu\text{A}$ に到達し、さらに放射電流の電流変動率が10パーセント以下になるまで5～6時間実行する。その後、放射顕微鏡を動作させる。加速電圧を3kVから5kVの間に設定し、試料ステージのマニピレータによりピントの粗調整を行う。その後、ウェネルト電位とレンズ電位を最良の画像が得られるように調整し、FEAからの放射電子像の観察を行う。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。

実験に使用したFEAは図1に示すような典型的なスピント型¹⁾であり、直径 $200\mu\text{m}$ の円内に $3\mu\text{m}$ 間隔で3500個配置されている。

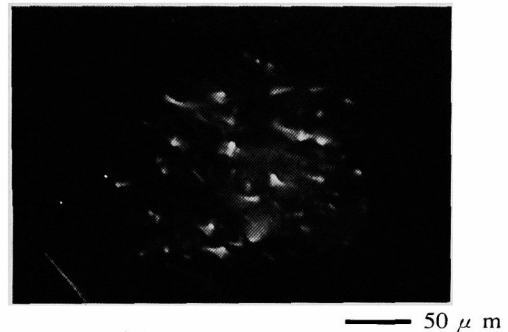
4. 実験結果および考察

<4.1> FEAからの放射電子像 1 ～絞り未設置～

今回、FEAから得られた放射電子線像について、その結果を図6に示す。FEAの各陰極から放射された放射電子線は蛍光板上でビームスポットとして結像、分離することができた。しかしながら、得られた画像には激しい収差がみられた。現段階ではレンズ内に絞りを設置していないので、球面収差の影響が現れることは予想されていた。

放射顕微鏡を製作した段階での予備実験として、タングステン・フィラメントによる熱電子像の観察を行っている。尚、観察に用いたタングステン・フィラメントは直径 0.1mm のワイヤーを形状が認識しやすいように中央を十字形に溶接したものである。このときは図7の様に視野中心から放射状の収差が発生しているのが確認されている。著者らはFEAから得

られるスポット像に対しても球面収差による一般的な影響として、レンズ視野の中心を起点とした放射状(こま収差等)のスポット像が現れると考えていた。しかし、実際に観察された収差の形は彗星のような尾を引くタイプであり、また、各スポットから発生する収差方向には著しい不均一性がみられた。



加速電圧 3kV、ゲート電圧 62.2V、放射電流 $0.23\mu\text{A}$

図6 FEAからの放射電子線像

Fig.6. The emission electron beam image from FEA.

収差の発生が電子レンズに起因することは明白であるが、観察された彗星状の収差はFEAの陰極から引き出された電子線束に起因している。すなわち図9(a)で示すように、FEAのゲート電極によって陰極より電子線束が引き出された時点で、その放射方向に著しい偏りが発生しているということである。その結果、レンズ内を通る電子線束の電子軌道がレンズの光軸から大きくずれ、また、一方向に偏りをもった電子線束のため彗星状の収差が発生したものと考えられる。また、今回観察されたビームスポット数は全体の5%程度であった。このことは放射電流を低く抑えたためであり、放射電流の増加とともにスポットの数は増加することが確認されている。

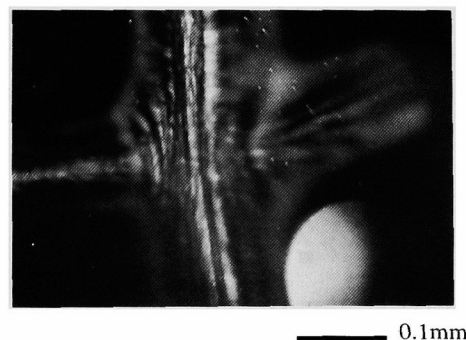


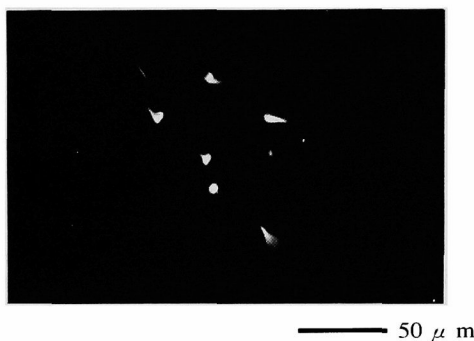
図7 タングステン・フィラメントからの熱電子像

Fig.7. The thermionic emission image from W filament.

<4.2> FEAからの放射電子像 2 ～絞り設置後～

収差を軽減して明瞭なビームスポット像を得るために電子レンズの直後に直径 $200\mu\text{m}$ の絞りを設置し、観察を

行った。絞り設置後のFEAからの放射電子線像を図8に示す。絞りの設置により収差が軽減し明瞭なビームスポット像が得られた。しかし、絞り設置前と比較して現れたスポットの数は著しく減少した。図8のFEAは<4.1>節のFEAとは同じでないが、絞り設置後の他のFEAから得られるスポット像は皆同じ傾向にある。このことは図9(b)のようにFEAの陰極から放射された電子線束の大部分が絞りによって遮られ、蛍光板を発光させる十分な電子線電流が得られなかったためと考えられる。今回製作した放射顕微鏡の立体入射角は絞り設置前で43度であり、絞り設置後も10度と電子レンズとしてはかなり広角である。しかし、放射電子線の大部分が絞りにより遮られ結果より、FEAの陰極から放射された電子線の大部分はレンズ軸方向から5度以上の偏りを持っていたことになる。偏りの主な原因は陰極とゲート孔の幾何的な位置関係の非対称性によるものと考えられる。



加速電圧 4kV、ゲート電圧 67.1V、放射電流 $0.35 \mu A$

図8 絞り設置後のFEAからの放射電子像

Fig.8. The magnified emission patterns image from FEA with a diaphragm

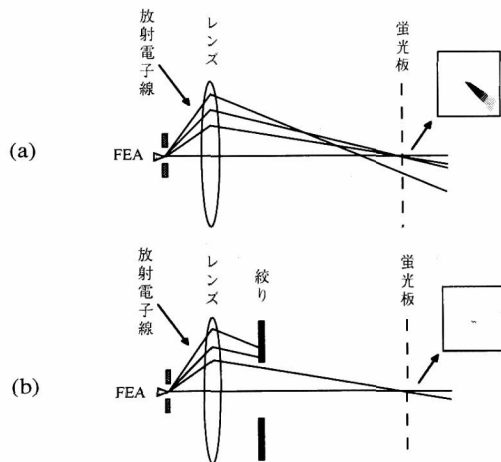


図9 電子軌道と収差

(a) 絞り無しの場合、(b) 絞り有りの場合

Fig.9. A trajectory and an aberration.

(a) Without a diaphragm, (b) With a diaphragm

< 4.3 > 放射電子像の時間変動

図10は現れたスポットの特定箇所について、30秒間の放射電流の変動による輝度変化をグラフに表したものである。また、図11は輝度変化が起こった時のスポットの様子である。図11(a)は各スポットから安定して放射電流が届いている場合である。スポット1は常に放射電流が安定している部分である。スポット2は放射電流がパルスの的に減少するパターンであり図11(c)で表される。またスポット3は放射電流がパルスの的に増加するパターンであり図11(b)で表される。この他に激しく点滅を繰り返すスポットも観察されている。放射電流変動による各スポットの激しい輝度変化は、FEAの脱ガスが不十分なことによる陰極周辺からのガス放出が多大な影響を及ぼしていると考えられる。

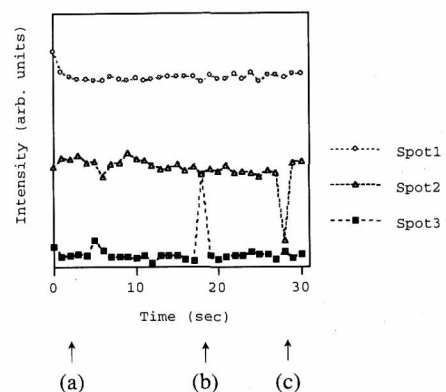


図10 スポットの輝度変化グラフ

Fig.10. Time dependency of emission intensities.

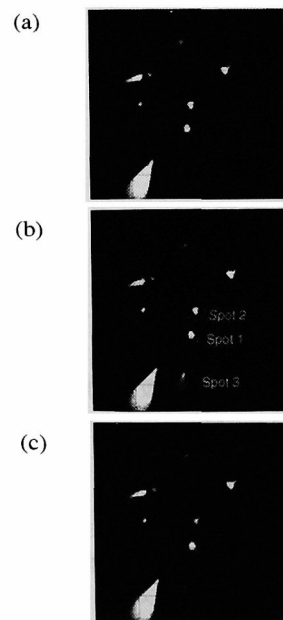


図11 スポットの輝度変化

Fig.11. Variation of emission intensities.

5. まとめ

放射顕微鏡内でFEAを動作させることにより、FEAの各陰極から放射された放射電子線束と蛍光板上にビームスポットとして結像、分離させることに成功した。観察された放射電子線像より次のことが明らかになった。

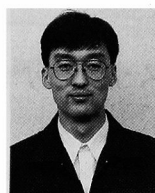
- ・観察されたスポット像より各陰極から引き出された電子線には著しい偏りが発生していることが分かった。
- ・電子レンズの立体入射角より、放射電子線束の偏りはFEAの陰極軸方向から5度以上あることが分かった。
- ・スポットの輝度変化にはパルスの増加するもの、パルスの減少するもの、また激しく点滅を繰り返すものが観察された。

(平成10年4月27日受付、平成10年7月21日再受付)

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, p.268-276 (1983)
- (2) P. Grivent : "ELECTRON OPTICS PART2", PREGAMON PRESS Ltd. (1972)
- (3) A. Septier : "QUELQUES TYPES D'OBJECTIFS ELECTROSTATIQUES A IMMERSION A FORT GRANDISSEMENT", Ann. Radiel., 9, p.374-410 (1954)
- (4) K. Kanaya, H. Kawakatsu, H. Yamazaki and S. Sibata : "Electron optical properties of three-electrode electron lenses", J. SCI. INSTRUM., VOL.43, p.416-429 (1966)
- (5) 裏 克己 著: 電子・イオンビーム光学, 共立出版株式会社 (1994)

山根 康一



(非会員) 1965年1月30日生まれ。昭和60年室蘭工業大学理科教室文部技官。平成5年室蘭工業大学第2部電気工学科卒業。同年室蘭工業大学電気電子工学科文部技官へ移籍。

武藤 康史



(非会員) 1974年11月19日生まれ。平成10年室蘭工業大学電気電子工学科卒業。同大学院博士前期課程在学中。

中根 英章



(非会員) 1954年2月10日生まれ。昭和56年北大大学院工学研究科博士課程電子工学専攻了。日立製作所中央研究所主任研究員を経て、平成3年室蘭工業大学電気電子工学科助教授。電界放射電子源、走査型プローブ顕微鏡、および超伝導磁気センサの研究に従事。工博。

安達 洋



(会員) 1942年6月7日生まれ。昭和46年東北大大学院工学研究科博士課程電子工学専攻了。東北大学工学部電子工学科助手、昭和56年室蘭工業大学応用物性学科助教授を経て、平成元年室蘭工業大学電気電子工学科教授。高電界下での物性、走査型プローブ顕微鏡、電界放射電子源等の研究に従事。また、センサ技術の研究調査にも従事。工博。