電界放射顕微鏡を用いた電界放射陰極列の 電子放射特性の測定

安達 洋・中根 英章

室蘭工業大学電気電子工学科 ☎ 050 8585 北海道室蘭市水元町 27-1

(2001年8月27日受理)

Measurement of FEA Emission Characteristics by Use of an Emission Microscope

Hiroshi ADACHI and Hideaki NAKANE

Department of Electrical and Electronic Engineering, Muroran Institute of Technology
27-1 Mizumoto-cho, Muroran, Hokkaido 050-8585

(Received August 27, 2001)

Emission characteristics of individual micro emitters on a FEA have been measured by use of a laboratory made emission microscope. It was found that the total emission current is apparently stable, but the individual emitter current is unstable. The fluctuating modes can be classified into two categories: apparent dependence on the IP product, where I is total emission current and P is the residual gas pressure in the vacuum, and no such dependency. The former type of fluctuation is successfully interpreted by our model that ionic hitting from the gate electrode causes the fluctuation.

1. はじめに

電界放射陰極列 (FEA) は多数の極微細な電界放射陰極を並べたもので、微細加工技術の発展に助けられて実現された素子である。FEA は広い面積からの電子放射が可能なので自己発光型の表示素子の電子源としても注目され、あるいは加熱電力が要らないので衛星搭載用の電子管の電力効率を向上できるものとしても注目されている。自己発光型の表示素子は FED の略称と呼ばれていることが多く、すでにいくつかの試作品が作られ、専門家向けのビデオ編集機用の小型モニターとして既に実用機器に組み込まれたとの情報もあるが、広く一般に用いられるには至っていない。

電界放射陰極列の電子放射特性は、電子顕微鏡に用いられている単一の針状電極構造の電界放射陰極とはいくつかの点で性質が異なる。なかでも電界放射陰極列が非

常に安定に動作すると報告されている点は特筆に値する。電界放射現象は表面状態によって大きく変化する。そのために放射電流の安定性は真空雰囲気によって大きく変化し、残留気体の種類や分圧が問題となる。原理的には同じ電界放射現象を利用しているにもかかわらず、電子顕微鏡用の電界放射陰極では考えられない程度に劣悪な真空環境でも FEA は動作が可能であるとの報告例が少なからずある。全放射電流でみているかぎり、FEA がはるかに安定に電子放射することはよく経験することである。

電界放射陰極列の陰極個々の先端径は、電子顕微鏡用陰極の数十分の一程度と小さく、陰極と引き出し電極 (ゲート) 間距離も $1\ \mu\text{m}$ 以下で電子顕微鏡の場合の一万分の一以下である。そのため動作電圧は非常に低く、電子放射に必要なゲート電圧は数十ボルトと約 2 桁も低い。

このような幾何学的条件の違いや動作条件の違いを考慮しても、真空に対する要求がこれほどにまで緩和されることは理解に苦しむことである。みかけ上の安定度だ

けで、実質が伴ったものかも知れられる点であった。FEAの応用範囲を一層拡大するとともに動作の信頼性を高めるためには、真空条件の緩和の理由を理解することが必要なものと考え、放射顕微鏡を用いて個々の陰極の動作状態を分離して観察し、真空中の雰囲気ガスがどのように関係するか確認することを目論んだ。

実際に種々の気体を導入して変動の様子を調べたとき、変動が導入気体の圧力で変化することが観察される。しかし、タングステンループに単一の電界放射陰極を取り付けて実験する、いわゆる電界放射顕微鏡 (FEA) の実験と比較すると、陰極が同種の金属であるにもかかわらず実験の再現性は FEA の方がずっと劣る。

2. FEA と放射顕微鏡

試料として用いた FEA を模式的に Fig. 1 に示す。0.2 × 0.2 mm² の正方形の範囲に 961 個の微小陰極を配列したものである。個々の微小陰極間の距離は 6 μm 程度あ

り、比較的間隔が大きなものである。陰極の材料は Mo で、いわゆる Spindt 型と呼ばれているものである。

FEA の個々の陰極からの電子放射を分離するために、Fig. 2 (a) に示したような放射顕微鏡を自作し使用した¹⁾。電子レンズは 4 個の電極で構成され、前半の 2 つの電極がバイポテンシャルレンズを構成し、第二電極を共有して後半の 3 つの電極がアインツェルレンズを構成してい

Fig. 1 Schematic drawings of a field emitter array (FEA).

Fig. 2 (a) Lens structure for the emission microscope. (b) A typical emission pattern.

る。FEAからの電子線は最初のレンズで拡大し収束結像され、さらにアインツェルレンズにより蛍光板上に拡大投影される。蛍光板はレンズから約600 mm離れたところにある。総合拡大率は100倍から300倍程度で、個々の陰極を点状に結像することができる。入射開口角は非常に大きく、実測してはいないが軌道計算からは半角が 20° 以上もあるものと評価できる。また、電子顕微鏡では結像の質を向上させるために開口しぼりを使用して視野角を制限するが、この放射顕微鏡では開口しぼりを全く使用していない。真空は 10^{-8} Pa台に排気されている。

Moを陰極材料としたSpindt型のFEAは空気中に保存した場合、動作させる前に真空中で加熱しないと電子放射しない。ここでは、500 で約2時間加熱した。室温に戻した陰極に電圧を徐々に加え、放射電流が極めて小さな状態を保ちながら数時間エージングを行い、動作が安定化するのを待った。その後レンズ系に電圧を印加して放射像を得る。結像した例をFig. 2 (b) に示す。一様には動作していないことが見て取れる。蛍光板上の画像をCCDカメラでビデオ撮影し、CRTモニター画面に現れる個々の輝点の発する光量をオプティカルガイドで光センサに導いて、輝度の時間変化を測定した。このようにして、個々の陰極から放射される電流の時間変動を評価するとともに、陰極の動作状態を評価した。このような測定系の制限から数Hz以上の周波数成分をもつ変動は、たとえ観察されたとしても意味を持たないものである。また、放射電流量と検出信号の間の線形性について、未だ実験的な保証が得られていないので、光検出器の信号からすぐに放射電流量を評価することはいまのところできていない。

3. 放射特性

Fig. 3 の はゲート電圧の関数として全放射電流を測定した結果の一例である。全放射電流は961個の微小陰極すべてから放射される放射電流の総計で、右側の軸に値が目盛ってある。Fig. 2 (b) に示したエミッションパターンの例にも見られるように、すべての陰極が同じように動作している訳ではない。つまり、電界放射理論が暗に仮定している単一系ではないので、厳密に考えたとき単にこの結果にFowler Nordheim プロットなどを行っても、電界放射に関する情報は得られないことになる。個々の微小陰極の特性を分離測定しないかぎり、電界放射理論を真の意味で適用することはできないことを示している。電子顕微鏡用陰極として開発されてきた一個の電界放射陰極では、その特性が電界放射理論で良く説明できるが、FEAをそれと同列に対比して扱うことはできないことを意味している。

Fig. 3 Emission current I_e —, the number rate of active emitters to the total number of emitters —, and the number rate of twincing spots to the number of active spots — against the gate voltage V_g .

Fig. 2 (b) に示したエミッションパターンの例に見られるように動作している個々の陰極は、FEAの面内で一様ではない。Fig. 3 の が蛍光スクリーン上で輝点として観測される、いわゆる動作している陰極数の陰極総数に対する割合である。放射電流が増加するとともに動作するエミッタの数も増加するが、飽和傾向にあり、あるところから放射電流が増えているにもかかわらず放射する陰極数に変化がなくなる。この飽和陰極数は、このFig. 3 の場合には総陰極数の64%であるが、試料のFEAによってこの割合は変化し、良いものでは95%を超えたものもあったが、大方のものは数十%であった。飽和したあとでは、放射電流の増加に伴い、個々のスポットの輝度が増加した。この飽和する点での活性な陰極数の割合が、FEAの製造上の問題に起因するものか、あるいは保存状態に起因するものか、解析できていない。

放射電流が変動すると、蛍光板上のスポットはきらめくことになる。きらめきを示すスポットの数を、視認できるスポットの総数に対して比をとってみた結果がFig. 3 に で示したものである。全放射電流とほぼ平行な変化をしていることに気づく。すなわち、放射電流の大部分に寄与している電流成分は、放射電流が変動するような動作状態になっていることを示している。このような傾向は非常に再現性よく観察できる。

4. 放射電流の変動態様

光検出器で測定したスポット輝度の時間変化の測定例をFig. 4 に示す。(a) はほとんど変動していないものの

Fig. 4 Typical fluctuations of individual emission currents I , (a) stable, (b) steps, (c) spikes and (d) pulses.

例, (d) は激しく変動している例である。(b) と (c) はその中間の変動態様のものである。変動の様子は大きくステップ状やスパイク状, あるいはパルス状に変化するもののほかに, 細かくランダムに変動している部分がある。これらの変動は同一の FEA で同時に観察されたものであり, 個々の微小陰極が違った態様で動作していることが見て取れる。

単一の電界放射陰極では, ランダムに細かく変動するものは吸着気体が陰極の先端付近をランダムに動いていて, それに伴って放射電流がランダムに変動するため発生するものとして考えられていた。事実, 吸着気体分子

Fig. 5 Fluctuating frequencies against the IP product, where I is the total emission current and P is the residual gas pressure.

が少ないとされるカーボンファイバーや遷移金属の炭化物などでは, このようなランダムな変動成分がほとんど観察されない²⁾。単一の電界放射陰極では, 陰極先端半径が非常に大きく $0.5 \mu\text{m}$ もあり, 吸着気体分子が二次元気体のように振るまって, 電流変動が統計的な現象として現れるとするモデルも納得できるものであった。しかし FEA での個々の陰極の先端半径はこれよりはるかに小さく, 10 nm 程度あるいはそれ以下である。このように極めて小さな半径の陰極でも, 吸着気体に対しては大きな先端半径の陰極と基本的には同じ挙動を示すことは興味深いことである。

ステップ状あるいはスパイク状の変動は, 従来の大きな先端半径の陰極で行われた FEM の実験では, 金属の場合ほとんど観察されなかった。カーボンファイバーや遷移金属の炭化物などでは, ランダム成分が見られない反面, このようなステップ・スパイク状の変動がよく観察された。なぜ, このようなステップ状あるいはスパイク状になるのか, その詳しいことはわかっていないが, 真空中の残留気体の分子がイオン化して, 高速で陰極先端に衝突することで誘起されることは確かのようにである。それは, このような変動に対して, その発生頻度を残留気体の圧力 P とともに, 放射電流 I の関数として測定してみると, ある臨界を越えた点から発生頻度が IP 積にほぼ比例して増加することが観察されるからである³⁾。

変動の発生頻度を IP 積に対してプロットしてみると, Fig. 5 に示すように, なんらの傾向も見えてとることができない。Fig. 4 に戻って変動の様子を見ると, (b) や (c) に分類されるものと, (d) に分類されるものとの間に明らかに変動の様子に違いがある。(d) に分類されるもの

の変動頻度が極端に多く、またパルス状の変動だけで、大きなステップが見られない。そこで (d) に分類されるような変動をパルス状変動と呼ぶことにして他と区別し、(b) や (c) に区分されるものをステップ・スパイク状変動と呼ぶことにする。

ステップ・スパイク状に変動するものだけについて、変動の発生頻度を IP 積に対してプロットした結果が Fig. 6 の (a) である。明らかに IP 積に対して傾向性が見てとれる。パルス状に変化するものに対して、おなじような整理をした結果が Fig. 6 の (b) で、なんらの傾向も見取ることができない。すなわち、ステップ・スパイク状の変動と、パルス状の変動とは、その発生の原因が異なるものと考えられ、ステップ・スパイク状の変動には明らかにイオンの衝突が関与しているものと考えられる。

さて、ステップ・スパイク状の変動をよく見てみると、大部分の変動において、変動の後の電流レベルが変動の発生する直前の電流レベルに戻っていることが見て取れる。変動の発生する直前の電流レベルになぜ戻るのかは、議論の分かれるところであるが、衝突するイオンのエネ

ルギーが小さくて、陰極先端に永久的な変化をもたらすほどではなく、単に吸着気体分子の離脱のみが関与しているものと現在のところ理解している。

イオンの発生する可能性のある電極は、ゲートと陽極であって、ゲートから発生するイオンのもつエネルギーは、陽極から発生するイオンのもつエネルギーよりも格段に小さく、せいぜい数十 eV 程度と見積もられる。アノードからのイオンは数 keV 程度の運動エネルギーをもつので、陰極先端に衝突したときに永久的な変化をもたらす可能性が高く、放射電流が変動の後で元に戻る可能性は少ないのではないかと考えている。

以前に走査型トンネル顕微鏡の電流変動を考察したことがある。その発端は、走査型トンネル顕微鏡を流れる電流が非常に安定で、電界放射陰極の電流変動を見慣れている者にとっては、それが画像として記録できることが奇異に感じられたからであった。事実、走査型トンネル顕微鏡で探針と試料との間の距離が短くて、原子の分解能が得られる程度に接近すると電流が非常に安定であるが、距離を少し離して電界放射電流が流れる程度にすると、電流は途端に変動するようになる。この現象を解明すべく、金属板と探針を対向させた実験装置を作り、電流変動を系統的に調べるとともに、その変動原因について考察した。このときの解析手法をゲートと陰極チップとの間に適用して、電流変動の頻度について検討した⁴⁾。

陰極先端をたたくイオンは、ゲート金属に吸着している気体分子が入射してくる電子でイオン化されて発生するものとする。このようにして発生するイオンが陰極先端を照射する単位時間あたりの数 N_i は、

$$N_i = N_g \cdot S \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \quad [\text{molecules/sec}]$$

で評価できる。ここで、 N_g はゲートから離脱する分子数で入射電子電流の関数となる。 S はイオン化率で、入射電子のエネルギーの関数になる。 Ω はイオンの発生点からみた陰極チップの先端をみる立体角である。代表的な数値をこの式に代入し、大雑把に電流変動の発生頻度を算出してみた。その結果全放射電流が 20 μA のとき 1 分間に 30 回程度、2 μA のとき 12 回程度、0.2 μA のときに 2 回程度と見積もることができた。Fig. 4 の例の場合、全放射電流が 10 μA 程度であり、その発生頻度はここでの評価と桁が合っている。

Fig. 4 (d) に区分されるパルス状の激しい電流変動については、ゲート電極から発生するイオンによるものとする考えが適用できない。放射顕微鏡の系を考えたとき、イオンの発生する可能性のある電極は多くある。レンズを構成する電極は陽極も兼ねていると考えることがで

Fig. 6 Fluctuating frequencies against the IP product, (a) steps and spikes, and (b) pulses.

き，そこから発生するイオンのもつエネルギーはゲートから発生するイオンとは比べものにならない位に大きなエネルギーをもつ。したがってそのようなイオンが極微小な個々の陰極に衝突したときに受けるダメージは無視できない程度に大きなものではないかと推定される。そのことがパルス状の激しい電流変動の原因ではないかと考えてはいるが現状では定かなものがない。

5. ま と め

電界放射陰極列 (FEA) の動作状態を，放射顕微鏡を作って解析している。その結果わかってきたことは，全体として放射電流が安定しているように見えていても，個々の微小陰極の放射電流は変動している。ステップ・スパイク状あるいはパルス状の大きな変動の間には微少なランダム変動も含まれている。その大きな変動の様子は，ステップ・スパイク状で発生頻度の比較的小さいものと，パルス状の激しい変動とに大きく分けられる。

微少とはいえランダム状の変動が含まれることは，個々の陰極先端での吸着気体の移動が電流変動に関与し

ていることを示している。大きく変動するステップ・スパイク状あるいはパルス状の電流変動は，イオン衝撃が関与しているものと推定される。発生頻度の比較的小さいステップ・スパイク状の変動は，ゲート電極からの吸着気体分子のイオンが衝突するものとしてモデルをたてるときちゃんと説明できる。しかし，パルス状の激しいものについては，このモデルでは説明できず，陽極 (レンズ系も含めて) からの離脱イオンの衝撃がその原因と推定される。

文 献

- 1) H. Nakane, K. Yamane, Y. Muto, S. Kawata and H. Adachi: Appl. Surf. Sci. **146**, 169 (1999).
- 2) H. Adachi, K. Fujii, S. Zaima, Y. Shibata, C. Oshima, S. Otani and Y. Ishizawa: Appl. Phys. Lett. **43**, 702 (1983).
- 3) H. Todokoro, N. Saitou and S. Yamamoto: Jpn. J. Appl. Phys. **21**, 1513 (1982).
- 4) K. Ashihara, H. Nakane and H. Adachi: J. Vac. Sci. Technol. B **16**, 1180 (1998).