フィールドエミッションの最近の進展と 電子源としての期待

石川 順三

京都大学大学院工学研究科電子物性工学専攻 〒606 8501 京都府京都市左京区吉田本町

(2001年7月2日受理)

Current Status of Field Emission Researches and Expectation for New Electron Sources

Junzo ISHIKAWA

Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University
Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606 8501

(Received July 2, 2001)

A new electron source which consists of microsize field emitter arrays attract strong attention for realizing new applications such as flat panel display, super-high frequency vacuum devices etc. Although the conventional field emitter that is usually a single crystal tungsten needle is operated under an ultra-high vacuum condition, new microsize field emitter arrays are required to be prepared by deposition methods and to be operated under a normal vacuum condition. Therefore, the researches on the new materials and structures for the development of microsize field emitter arrays have been needed. The selection of a low work function material as an emitter material is a prospective method to realize a stable operation of microsize field emitter array.

1. はじめに

フィールドエミッション（電界電子放出）は、針状エミッタの先端から高密度のトンネル電流を引き出すことにより得られるため、電子ビームは高輝度でそのエネルギー幅も狭い。そのため、電子顕微鏡、電子線描画装置、電子ビームを用いた分析器などの理想的な電子発生法として利用されてきた。しかし、最近、微小なエミッタアレイからのフィールドエミッションを用いる新しい電子源が開発され、フィールドエミッションの応用領域が一気に拡大しようとしている。

この新たなフィールドエミッタアレイは、ナノメートル～ミクロンメートル法のマルチエミッタ電極を、半導体の微細加工に用いられている露光、蒸着、エッチング技術やマイクロマシーニング技術を駆使して形成する。

安定に動作する微小なフィールドエミッタアレイを用いた電子源ができれば、半導体素子の動作速度を遙かに超える超々高速デバイス、低消費電力・高輝度・高視野角が実現できるフィールドエミッション型フラットパネルディスプレイ（FED）、高速でナノメートル精度の露光が可能な超高速電子ビーム描画装置など、次世代技術やデバイスにおいて数多くのブレイクスルーが期待できる。

本報告では、まず、現在開発されつつある種々の微小フィールドエミッタアレイを用いた微小電子源の構造と性能を概要する。次に、微小フィールドエミッタアレイは従来のフィールドエミッタとどのような点で異なるかについて述べ、最後にそれらの問題点と対処法について概説する。

2. 開発されつつある種々の微小フィールドエミッタ

微小フィールドエミッタを構造で分類すると、基板に

対してエミッタ、ゲート、アノード電極が垂直方向に並ぶ縦型と、横方向に並ぶ横型がある。また、不定形にエミッタが並ぶものとしてカーボンナノチューブがある。エミッタ材料としては金属、半導体、炭素系材料など種々のものが用いられる。

2.1 縦型構造

縦型の典型は、Fig. 1 に示すスピント型である。SRI の Spindt が独特の製作法を用いて開発したもので、フィールドエミッタ型微小電子源の原型である¹⁾。現在試作されているフィールドエミッション型フラットパネルディスプレイの電子源として最も多くのものに利用されている。エミッタに用いる金属はモリブデンが一般的であるが、他の金属が利用されることもある。真空状態やエミッタ材料などが十分に良好な管理下で作製されたエミッタアレイでは、約 100 A/cm^2 の高電流密度で、ほぼ 100 % の高動作率のものが得られる。

シリコン基板材料は、LSI (大規模半導体集積回路) 作製において微細加工法が完成した材料である。したがって、今まで培ってきた Si 微細加工法 (エッチング) を用いてエミッタを形成する方法が多くの研究者によって行われてきた。Fig. 2 は、シリコンを材料としたフィールドエミッタの構造を示す。ただし、半導体からの電界電子放出については、未だに十分な理解が得られているとは言えず、その動作の理解には引き続き研究が必要

Fig. 1 Spindt type microsize field emitter.

Fig. 2 Silicon microsize field emitter.

である。しかし後述するように、半導体本来の性質を利用することにより、動作の安定化を図ることができる特長がある。

どのような材料でも正確な形状のエミッタにできる方法として、モールド法がある。予め、シリコン基板などにエミッタの型 (モールド) をエッチング技術によって作製し、その型の中に好みのエミッタ材料を埋め込み (蒸着)、その後シリコン基板を溶かし去ると、Fig. 3 に示すようなエミッタができる。形状のそろったエミッタを形成できる特長がある。

2.2 横型構造

Fig. 4 に示すような横型の素子は、すべての電極が平面構造なので、MOS あるいは MIS FET 素子の作製法をそのまま適用できる。陰極 (エミッタ電極) のエッジ部分から電子放出させる構造である。しかし、平面電極構造では電子の軌道制御が難しく、電子ビームもかなり拡がるので、特殊用途に限って用いられる。

2.3 不定形型

前述した縦型および横型は、種々の材料を電界放出に適した形状に意図的に加工する方法であるが、材料そのものが電界放出に適したナノメータ径の細い糸状の形状を持つカーボンナノチューブを電界放出に利用する方法がある。

Fig. 3 Microsize field emitter fabricated by the mold method.

Fig. 4 Lateral structure type microsize field emitter.

(a)

(b)

Fig. 5 (a) Frog type carbon nanotube emitter and (b) printed carbon nanotube emitter.

現在, Fig. 5 (a) に示すようにカーボンナノチューブを剣山のように成長させて電界放出させようとする試み²⁾や, Fig. 5 (b) に示すようにカーボンナノチューブを印刷技術で塗布しエミッタを形成しようとする方法³⁾が, 多くの研究機関で研究されている。

3. 微小フィールドエミッタを用いた電子源の電流密度性能と応用

3.1 電流密度

Fig. 6 は, 米国で開発中のクライストロード (Klystrode) (電界放出の非線形性を使って電子ビームを集群させてマイクロ波増幅や発振を行う超高周波電子管) のために開発された微小フィールドエミッタアレイの写真を示す⁴⁾。クライストロードには非常に高い電流密度の電子ビームが要求されることに対応して, パッキング密度の高い微小電子源が開発されている。特に MIT で開発された微小フィールドエミッタアレイは, $1\ \mu\text{m}$

(a)

(b)

(c)

Fig. 6 Refractory metal microsize field emitter arrays developed by (a) MIT and (b) SRI, and (c) silicon microsize field emitter array for Klystrode.

の間に 3 個のエミッタが入るほど密度が高く, 6000 個 ($25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$) のエミッタで, その電流密度はパルス動作ではあるが $2400\ \text{A}/\text{cm}^2$ と極めて高い値を実現している。

高電流密度の微小フィールドエミッタアレイとして, 日本では小沼らが, Fig. 7 に示すような CRT のためのマルチエミッタ微小電子源を開発している⁵⁾。 $50\ \mu\text{m}$ 直径の中に, 868 個のエミッタアレイがあり, 連続動作で, $50\ \text{A}/\text{cm}^2$ の電流密度が得られる。

このように, 微小フィールドエミッタアレイの最大動作電流密度は, 熱電子放出型陰極の最大動作電流密度より 2~3 桁高い電流密度での動作が可能であることが実証されている。

Fig. 7 Microsize field emitter array for cathode ray tubes developed by NEC.

3.2 応用への展開

3.2.1 フラットパネルディスプレイ

微小フィールドエミッタアレイを使用したフラットパネルディスプレイは一般に FED と呼ばれ、微小フィールドエミッタアレイを利用した応用の中で最も早く実用化が実現するであろうとされている。高輝度、高視野角などブラウン管のもつ長所をそのまま活かして、低消費電力で平面状の表示が可能となる。

Fig. 8 に示すように、数百個の微小フィールドエミッタから放出された電子ビームを、エミッタから数百 μm 離れた位置にある RGB それぞれの蛍光体に照射し、発光させる。Fig. 8 のものでは電子の最終加速電圧が数百 V の低電圧型であるが、エミッタと蛍光体との間隙を数 mm とし数 kV の電圧を印加する高電圧型も開発されている。

3.2.2 超高周波デバイス

前述したクライストロードは、フィールドエミッションの電流電圧特性が非線形であることを積極的に利用する。引き出し電界に増幅しようとする高周波信号を重畳して引き出された電子ビームが高周波に応じて集群する性質を使う。理論的には数十%の高周波への変換効率が一

Fig. 8 Illustration of full color and low voltage field emitter display.

予測されているが、試作されたものでは効率が 1 % 以下である。

微小フィールドエミッタアレイが高電流密度でヒータ不要の電子源である特長を活かして、微小フィールドエミッタアレイから引き出された電子ビームを、そのまま従来の進行波管に使用する応用も行われている。ヒータ電力が不要になるため、全体の電力効率が改善される。

3.2.3 微小フィールドエミッタアレイを用いた電子ビーム露光

従来より 2~3 桁高い処理速度をもつ電子ビーム露光が実現できる可能性がある。電子ビーム露光用の超高輝度電子源としての性能は、電流密度に加えてエネルギー幅や電流変動が小さい必要がある。フィールドエミッション電子のエネルギー幅は潜在的には熱電子放出より小さい。したがって、電流変動の極めて少ないフィールドエミッタアレイの開発が、この応用を実現に導くための課題である。

4. 従来のフィールドエミッタと新たな微小フィールドエミッタアレイの違い

従来から利用されているフィールドエミッタと新たな微小フィールドエミッタ（アレイ）の材質および動作雰囲気の違いを、Table 1 に示す。

電子顕微鏡などに使用されてきている従来のフィールドエミッタは、一本だけの単独針で利用する。そのため、電界放出に適した理想的な材質や結晶状態のエミッタで作製することができる。良く用いられるエミッタは、先端の曲率半径を 0.1 μm 程度としたタングステン単結晶針あるいはその表面に Zr-O 単原子層を付けたものである。タングステンをを用いるのは強電界やジュール熱に耐えイオン衝撃にも強いためである。また単結晶を使用するのは、安定な電子放出が期待できる特定の結晶面を利用するためである。このようなエミッタにおいては、Fig. 9 (a) に示すように、数 mm 離れた位置に引き出し電極

Table 1 The difference in material and operating vacuum condition between conventional field emitter and microsize field emitter array.

	Conventional field emitter	Microsize emitter array
Material (Crystallinity)	Tungsten (single crystal)	Deposition film (amorphous) Si (single crystal) Carbon nanotube
Operating vacuum condition	Ultra-high vacuum (10^{-8} Pa)	Normal vacuum ($10^{-5} \sim 10^{-4}$ Pa)

を設置し数 kV の電圧を印加し電子を引き出す。エミッタ先端近傍の等電位面は球形状をしているが、印加電圧が高いためその球面状内の電位は引き出された電子が残留ガスを十分電離できるだけのエネルギーに加速される。残留ガスがイオン化されると、イオンは電位分布が球形状のため、電子と同じ軌道を逆流してエミッタを衝撃しその先端を破壊する。このエミッタ先端の破壊を防ぐためには、真空度を 10^{-8} Pa より良い状態で動作させなければならない。

微小フィールドエミッタアレイでは、数多くのミクロン寸法のエミッタ電極をアレイ状に形成しなければならないので、蒸着法によってエミッタを作製する方法が主流である。蒸着法によって作製するエミッタは非晶質であり、またかなり多くの欠陥を多く含んでいる。そのため表面状態は理想的な単結晶とは著しく異なっているが、そのような表面から電子放出を行わなければならない。

また、微小フィールドエミッタの電極間距離は、Fig. 9 (b) に示すように、 μm 程度のため、電界放出に必要な印加電圧は数十 V と非常に低い。このとき、エミッタ先端近傍の等電位面が球形状の領域は電位が数 V 以内である。エミッタから放出された球形状内の電子はイオン化に必要なエネルギーを持つことはないので残留ガスと衝突してもイオンを生じない。すなわち、電子軌道を逆流するイオンは生じないので、この機構によるエミッタの破壊はない。このことから、微小フィールドエミッタアレイの動作真空度は上記の単独針に比べて数桁悪い $10^{-5} \sim 10^{-4}$ Pa でも大丈夫である。

このように、従来の単結晶針構造のエミッタと新たな微小フィールドエミッタアレイでは、エミッタ材料および電極構成に大きな隔たりがあるため、従来のエミッタの研究成果をそのまま転用できない。すなわち、微小フィールドエミッタアレイに適した材料の研究と、新たな構造に対する研究が必要になってきた。

(a)

(b)

Fig. 9 Electric field distributions around an emitter tip head. (a) conventional field emitter and (b) microsize field emitter.

5. 微小フィールドエミッタアレイの問題点

微小電子源の動作特性において最も問題となるのは、その電流変動、すなわち、安定性である。

Fig. 10 は微小フィールドエミッタからの放出電流の時間経過の例を示したものである。電流にはフリッカ雑音やステップ・スパイク状雑音が頻繁に観測される。この原因は、動作真空度があまり良くないことによる残留ガスやエミッタを高温で脱ガスできないために吸蔵ガスが放出し、エミッタ表面に吸着して表面の仕事関数が変動したり、残留ガスの電離によってできたイオンが逆流しイオン衝撃によって先端構造が変化して電流変動が起こるためである。

したがって、微小フィールドエミッタによる実用的な

Fig. 10 Typical noise spectrum of a current extracted from a microsize field emitter.

Fig. 11 Silicon microsize field emitter with MOSFET structure.

電子源を得るためには、電流変動をできるだけ少なくする工夫が必要である。

5.1 電子回路的な帰還回路による安定化

最も簡単な帰還方法は、十分大きな抵抗を回路に直列に入れることである。この方法は安価な方法であるため、スピント型の安定化によく用いられている。

Si エミッタの場合には、半導体の長所を活かし、シリコン基板に、Fig. 11 に示すように MOSFET 構造を組み込むことにより、制御性の高い負帰還回路を形成することができる⁶⁾。トランジスタの増幅特性すなわち電流制御特性が入るため、電流の安定性は高い。しかし、電流変動の制御に伴いエミッタ先端の電位が変化するので、放出電子のエネルギーが変化する可能性がある。

5.2 エミッタ材料の選択（高融点、不活性材料）による安定化

エミッタ材料そのものの選択により電流の安定化を図ることも重要な手法である。この方法はより本質的な方法なので、複雑な構造を必要とせず安定化を図ることができ、コスト面での低減にも役立つ。

エミッタ動作時にはエミッタの表面温度はかなり高くなっている。したがって、表面原子のマグレーションはできるだけ少ないことが雑音低減には重要である。これ

Fig. 12 Contact potential difference related to work function as a function of nitrogen composition of NbN film prepared by ion beam assisted deposition.

はすなわち耐高温材料、高融点材料を意味する。類似のスピント型構造の電子源において、エミッタ材料を変えたときの雑音電力を測ると、融点の高いものの雑音電力が少ない。

さらに、不活性な材料ほど表面に雑音の原因となるガスの吸着が少ないので、安定なエミッタが得られる。不活性な材料としては、炭素系材料が代表的であるが、この理由もあって、ダイヤモンド膜、DLC 膜、カーボンナノチューブなどがエミッタ材料として好んで用いられている。

5.3 エミッタ材料の選択（低仕事関数材料）による電流安定化

仕事関数の低い材料ほど雑音電力が少なくなる。窒化物も不活性な材料であるが、その中でも、NbN や ZrN は窒素組成によって仕事関数が変化する。Fig. 12 は、イオンビームアシスト蒸着法で作製した NbN 膜の窒素組成に対する接触電位差（仕事関数と相対関係がある）の関係を示す⁷⁾。接触電位差が低いほど仕事関数も低い。Fig. 13 は、NbN を用いたフィールドエミッタの放出電流の雑音電力を示す。仕事関数が低いほど雑音電力が少なくなることがわかる。このように、仕事関数の低い材料をエミッタに用いるのも 1 つの選択肢である。

仕事関数が低いという意味では、負の電子親和力表面をもつ材料、ダイヤモンドや AlN⁸⁾ もエミッタ材料として非常に期待できる材料である。

5.4 多数のエミッタ動作の平均による電流の安定化

1 個のエミッタを動作している場合の雑音よりも、多数個 (N 個) のエミッタを動作しているときには、統計

Fig. 13 Normalized noise power as a function of nitrogen composition of NbN film prepared by ion beam assisted deposition.

的な平均がなされ、雑音は $1/\sqrt{N}$ になる。したがって、エミッタアレイが全て動作し同程度の平均電流を放出しているものを用いると仮定すれば、この方法により雑音の少ないエミッタを実現できることになる。

しかし、エミッタアレイの中で十分な電流を放出しているものの数は少ないので、多数のエミッタを動作させる利点は、確実にエミッタを動作させることにある。

6. おわりに

微小フィールドエミッタアレイは、ヒータ不要で通常の真空中で動作できるだけでなく、超高電流密度あるいは平面状の構造が実現できるため、今後応用において多くの可能性を秘めた電子源である。実現に向けての最大の課題は個々のエミッタの安定性であるが、その解決の糸口としてエミッタの材料選択が鍵となるかも知れない。

文 献

- 1) C.A. Spindt: J. Appl. Phys. **39**, 3504 (1968).
- 2) 村上 裕彦: 学振 158 委員会第 29 回研究会資料 (1999) p. 20.
- 3) J.M. Kim: 学振 158 委員会第 29 回研究会資料 (1999) p. 9.
- 4) R.K. Parker, K.L. Jensen and R.H. Abrams: Technical Digest of 10th Int. Vacuum Microelectronics Conference (1997) p. 92.
- 5) K. Konuma, Y. Okada, A. Okamoto, Y. Tomihari and S. Miyano: Proc. 6th Int. Display Workshops (1999) p. 903.
- 6) S. Kanemaru, K. Honda, T. Kobayashi, K. Ehara and J. Itoh: Proc. 4th Int. Display Workshops (1997) p. 735.
- 7) Y. Gotoh, H. Tsuji and J. Ishikawa: Proc. 7th Int. Display Workshops (2000) p. 991.
- 8) M. Kasu and N. Kobayashi: Proc. 7th Int. Display Workshops (2000) p. 987.