Spindt 型電子源の現状と展望*

伊藤 茂生^{*1}・田中 満^{*1}・小原 有司^{*1}

Current Status of the Spindt-type Field Emitter

Shigeo ITOH^{*1}, Mitsuru TANAKA^{*1} and Yuji OBARA^{*1}

^{*1}Product Development Center, Futaba Corporation. 1080 Yabutsuka, Chosei-mura, Chosei-gun, Chiba-ken, 299-4395

(Received March 14, 2005, Accepted July 2, 2005)

1. はじめに

電子放出機構としては、熱電子放出、電界効果電子（電界放出）（Field Emission）、光電子放出、二次電子放出などがあるが、この中の電界放出電子を用いて電子線励起発光を行わせたディスプレイである Field Emission Display (FED) が、この十年來期待のフラットパネルディスプレイとして話題に上っている。FED は、自発光、高コントラスト、高速応答、映像表現に重要な階調性に優れるなど、CRT の画質を受け継ぐとともに、CRT と異なり大画面化しても周辺部まで画像歪なく良好なフォーカスを保ち、映像芸術の作品鑑賞を可能とさせるポテンシャルを持つフラットパネルディスプレイとして注目されている。

半導体微細加工技術の進歩により、電極間距離が μm レベル、先端が数十 nm 以下の曲率半径を持つ多数の電界放出エミッタを、Si ウエハまたはガラス基板上に、再現性良く形成することが可能となり、数 10 V の電圧印加で真空中、室温において電界放出が行えるようになった。このエミッタを形成したカソード基板と、蛍光面を形成したアノード基板とを、真空気密容器中に対向させて、電子線励起発光させる表示素子が FED である。

マイクロ電界放出素子としては、Spindt 型が良く知られている。Spindt 型エミッタは 1970 年代前半 SRI International (米) の C. A. Spindt 氏により発明されたもので¹⁾、各コーン直下に抵抗を持たせる構造などの提案²⁾を行い、当初は高周波素子用の電子源として検討された。その後、LETI (仏) の R. Meyer 氏などにより、初めてガラス基板上のディスプレイ用電子源へ応用され³⁾、エミッタの安定化や発光部の均一性改善に有効な、薄膜抵抗層を用いた電流安定化構造が提案された⁴⁾。その後 10 年以上にわたり、多くの研究機関や企業が FED の開発に携わってきた。しかしその開発は、必ずしも順調に進んできたわけではなかった。

本質的に FED は真空管であり、エミッタの微細加工と同様に、真空技術が大変重要な役割をもつ。例えば、マイクロメーターレベルの組み立て精度、薄板ガラスの真空パッケージ、小さな空間しか持たないフラットパネル内で安定な電界放出を維持する真空技術、パネル内部の真空条件を維持するために適した材料の選択、FED 画像への悪影響が少ない支

柱構造の開発、不要なエミッションノイズや放電対策などが必要となる。これらの課題は、半導体微細加工技術を用いただけでは解決が困難であった。

当社では、1989 年から Spindt 型 Mo エミッタを FED 用電子源として検討してきた。現在 Mo 金属を用いた Spindt 型エミッタの開発段階は終了しつつある。低電圧モノカラー FED は、高精細グラフィック蛍光表示管 (VFD) の置き換えとして製品化された。当社ではその製品において、FED の信頼性、輝度の均一性や FED が十分実用に耐える定電圧駆動 1 万時間以上の寿命をもつことを初めて実証した。更にこれまでの低電圧 FED 技術をベースに、フルカラー FED の開発に取り組み、現在量産準備の段階である。

また 1995 年より NHK 放送技術研究所と Spindt 型エミッタをディスプレイ以外の用途に用いることにより、これまで実現し得なかった、新しい撮像素子を創生する試みも行っている⁵⁾。

いずれも Spindt 型エミッタが電子源として使用され、これまで従来の熱電子源では実現出来なかった課題が解決されると共に、冷陰極電子デバイスの応用が現実のものになりつつある。ここでは、現在最も完成度の高い Spindt 型エミッタの当社での現状とその応用について述べる。

2. Spindt 型エミッタについて

Spindt 型エミッタの構造を図 1 に示す。また、図 2 に、Spindt 型エミッタの断面 SEM 写真を示す⁶⁾。

Spindt 型電界放出素子は、SRI International の C. A. Spindt 等が蒸着エミッタとして開発したのが最初であり、そのユニークな製法などから Spindt 型エミッタと呼ばれている¹⁾。その作製方法は巧みに真空蒸着法の特徴を生かしたもので、その作製手順を図 3 に示す。Si 基板の場合、表

図1 Spindt 型エミッタの基本構造

* 平成17年2月7日 日本真空協会2月研究例会で発表

^{*1} 双葉電子工業(株) 商品開発センター (〒299-4395 千葉県長生郡長生村藪塚1080)

図2 Spindt 型エミッタの断面 SEM 写真

図3 Spindt 型エミッタの作製工程

面に膜厚約 $1\mu\text{m}$ の SiO_2 熱酸化膜を形成し、その上に Mo, Nb 膜などのゲート層を形成する。その後ゲート穴をパターンニングし、斜蒸着で Al などの剥離層を形成する。ここで剥離膜の形成に斜め蒸着を用いるのは、剥離膜材料がゲート穴内へ付着するのを、極力避けるためである。その後 Mo などのエミッタ材料を基板に対して垂直方向から蒸着する。ゲート上の堆積膜が厚くなるに伴い、開口径が縮まり、ゲート穴底部に蒸着されたエミッタ堆積膜の径が縮まりながら円錐台形状が形成され、完全にゲート穴径が塞がった時、ゲート穴内部にエミッタ材料の円錐コーンが形成される。最後に剥離層をゲート上の堆積層と一緒に剥離除去して完了となる。ガ

ラス基板の場合は、カソード電極層などを形成した後、スパッタリング蒸着法や CVD 法により絶縁層を形成した後は Si 基板の場合と同じプロセスである。

Spindt 型エミッタは以下のような特長をもっている。

- ① 理想的な電界集中構造を持ち、分配率（アノード電流/カソード電流）は98%以上。
- ② エミッタの配置などによりエミッション領域の設計が可能。
- ③ 電子ビームの広がり小さい（約30度）。
- ④ ガラス基板が使える大型化に有利。
- ⑤ 薄膜プロセスが主であるため、放出ガスが少ない。
- ⑥ カソード材料・構造による低電圧化が可能。

一方ディスプレイ用電子源としては、そのエミッションポイント毎の放出の均一性が重要であり、カーボンナノチューブや DLC などを使用する場合でも、微細加工や薄膜プロセスを多用することを前提にした構造では、カソード基板のコスト面では、大きなメリットは見出されなくなる。現時点では、Spindt 型エミッタは、依然として特性的に最も安定で実用的な電子源である。

その一方、Spindt 型の場合、カスタム化した製造設備を必要とし、生産に対する取り組みが現在行われている⁷⁾。

3. Spindt 型エミッタ使用 FED

3.1 FED の特長

FED は他のディスプレイでは実現できない優れた特長をいくつか持つ。例えば、パネル厚さは約数 mm であり、自発光で、そのサイズに関係無く原理上画面歪みを生じず、上下左右約170度以上の広視野角を持ち、電子源は能動素子なしに、直接アナログやデジタル信号で μs 台の高速応答を行い、受信管と同様に耐環境性に優れ、周囲環境の磁気や地磁気の影響を受けず、熱電子源と異なり、発熱が無く、瞬時点灯が可能、表示部以外のデッドスペースが小さい。またエミッション電流が輝度に対応し、電力は主に発光部で消費されるため、低消費電力ディスプレイとして期待されている⁸⁾。FED はこのような多くの特長を持っているが、なんと言っても最大の特徴は、FED が真空デバイスであることである。FED の基本的な機能は、原理的に CRT や VFD と同じであり、そのため、厳しい環境条件下で安定に機能を発揮することができる。

3.2 FED の構造

Spindt 型エミッタ使用フルカラー FED パネルの基本構造を図4に示す。カソード基板とアノード基板ガラス厚はそれぞれ1.1 mm、支柱長は0.6 mm であるため、総パネル厚は2.8 mm になる。カソードとしては、ゲート電極と集束電極は Nb、エミッタは Mo、支柱材料としてはガラスファイバーが用いられている。カソード基板において、ゲート電極とカソード電極の交差部に Spindt 型エミッタが形成され、X-Y マトリックス選択駆動が行われる。カソードは漏れ発光を防止するため、ゲート電極の上に、集束電極を持つ。

図5にカソード基板の SEM 写真を示す。ゲート-カソード電圧は40 V~65 V で駆動している。図6にカソードの断面概念図を示す⁹⁾。

図4 Spindt型エミッタ使用カラーFEDパネルの基本構造

図5 エミッタアレイのSEM写真

図6 カソードの断面概念図

図7 アノード基板の蛍光体ドットのレイアウトおよびそのSEM写真

アノード基板は、蛍光体被着部を窓状に開口したAlアノード電極、カラー蛍光体および支柱から形成されている。アノード電極は、その各開口部に各カラー蛍光体の画素が形成され、開口部を通してアノード基板外側から、発光部が観察される。蛍光体下部のAlアノード電極は、漏れ発光を抑える「ブラックマトリックス」として機能する。アノード電圧は現在3kV以下であるため、本FEDはメタルバック層は持たず、シンプルなアノード構造を実現している。

我々は低電圧モノカラーFED以来、独特の形成法を用いた支柱構造をとっているため、蛍光面に載置しても観察面側

からは見え難い構造を実現している。支柱は50μm径のガラスファイバーから作製されており、アノードとカソード間の距離に合わせた0.6mm長にカットされている。蛍光体ドットと支柱の配置を図7に示す⁹⁾。

3.3 Spindt型エミッタ使用FEDの信頼性

FEDの寿命を決める要因は、エミッション電流と蛍光体発光効率の劣化である。FEDの開発初期の最大の問題はエミッションの寿命問題であった。我々はエミッション劣化が主にエミッタ雰囲気中のガス組成に影響されることを既に報告した^{10,11)}。図8にモノカラーFEDパネルのFowler-

図8 モノカラー FED パネルの定電圧駆動時間による F-N プロットの変遷

図9 モノカラー FED パネルのエミッション寿命特性例

Nordheim プロットの定電圧駆動時間による変遷および 3,700時間定電圧駆動テスト劣化後のパネルの200℃-2 h 加熱処理後のプロットを示す。

図8よりエミッション特性が駆動時間に応じて劣化し、それが200℃-2 h 加熱処理により寿命試験の初期状態に回復出来ることを示している^{6,12)}。この回復現象はカラー FED においても生じることが確認された。この結果は、少なくともアノード電圧 3 kV 以下では、エミッション劣化がエミッタのイオンダメージなどによる構造的破壊ではなく、単なるガス吸着による劣化であることを示している。

我々はモノカラー FED の開発初期において、FED の内部構成材料やプロセスを検討することにより、定電圧駆動で輝度の初期値からの半減が 1 万時間以上を保証しうるモノカラー FED をプロ用映像製品のモニターとして供給できるに至った。モノカラー FED のエミッション寿命特性の 1 例を図9に示す。このことから FED の優れた信頼性や特性が実証されたと考えている。

FED の寿命特性の第 2 の要因は、蛍光体の発光効率の劣化である。Y₂SiO₅: Tb の場合、積算電荷量から計算すると、蛍光体の寿命は実使用において 6,000 時間以上となる。

3.4 フルカラー FED の特性

当社の Spindt 型エミッタを用いた各種フルカラー FED の特性を表 1 に示す¹³⁾。

4. 冷陰極 HARP 撮像板

1995 年より、NHK 放送技術研究所と、次世代の超高感度・小型撮像デバイスをめざして、新しいタイプの撮像デバイス「冷陰極 HARP 撮像板 (Field Emitter Array Image Sensor with a HARP Target, 以下 FEIS と略す)」の開発に取り組んでいる。FEIS は、光を電荷に変換し増幅する HARP 膜と、その電荷を読み出すための電子ビームを放出する冷陰極アレイとを組み合わせたものである。入射光量に応じて HARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 膜上に形成された電荷 (正孔) パターンを、冷陰極アレイから放出した電子ビームで順次読み出すことで、映像信号を得ることができる。その概念図を図10に示す。今回、画素面積を 50 μm × 50 μm にした 25.4 mm (1 インチ)、256 × 192 画素撮像板と、新たに永久磁石を用いた電子ビーム集束系を開発し、画質の飛躍的改善が確認された。各画素に対応するエミッタアレイから、4 μA/アレイ以上の電子ビームが射出され、HARP 膜内面上をラスタースキャンする。HARP 膜厚は 4 μm、HARP 膜と FEA 間のギャップは約 1.8 mm、中間にあるメッシュ電極には 300~350 V を印加し、集束用磁界は磁束密度約 0.11 テスラがかけられている¹⁴⁾。メッシュ電極は電子ビームの引き出しと余剰電子の吸収を行う。従来の HARP 管と FEIS の外観を図11に示す。またこれまでの開発経過を図12に示す。FEIS の技術推移に伴い、撮像画質の改善が実現された。

FEIS に期待される特性としては、小型化以外に超高感度 (CCD の 100 倍以上)、高精細、低消費電力、広ダイナミックレンジなどが挙げられる。高感度化においては、感度を左右する HARP 膜への印加電圧として、固体素子と異なり高電圧がかけられるという真空管の特長が生かされ、HARP 撮像管の次世代デバイスとして開発を進めている。

今後更に FEIS の性能向上を目指しての開発が進められるが、その実現により、超高感度の電子の眼として、医療・安全・科学技術などの分野で社会に貢献出来る機会は、益々広がるものと思われる。

表1 Spindt 型エミッタを用いた各種フルカラー FED の特性

	11V.VGA	8V. Wide	5.9V.QVGA	2DIN	1DIN
画面サイズ (mm)	230.4×172.8	177.12×98.28	120.0×90.0	97.92×49.15	97.92×24.58
パネル外形 (mm)	243.3×190.7	190.0×116.5	133.5×108.5	110.2×65.1	114.3×36.0
画素数	640 × (RGB) × 480	480 × (RGB) × 240	320 × (RGB) × 240	240 × (RGB) × 128	240 × (RGB) × 64
画素ピッチ	0.12 (RGB) × 0.36	0.123 (RGB) × 0.42	0.125 (RGB) × 0.375	0.136 (RGB) × 0.384	0.136 (RGB) × 0.384
輝度 (cd/m ²)	350	500	800	1000	1000
消費電力 (W ave.)	11	7	5	3	2
ディスプレイ の写真

図10 冷陰極 HARP 撮像板の概念図

5. おわりに

Spindt 型モノカラー FED は既に製品化されて市場に供給され、高い信頼性と優れた特性を持つことを証明した。フルカラー FED は量産準備に入っている。また FED は他のフラットパネルディスプレイでは実現できない低消費電力デバイスとしても期待されている。FED は今後、小型・中型サイズのパネルだけではなく、大画面サイズのパネルとしても開発が進み、21世紀の社会生活に相応しいフラットパネルディスプレイデバイスの1つとして社会に寄与でき得る製品になるものと思われる。また、冷陰極撮像板のように、これまで熱電子源では実現できなかった新しい電子デバイスが創生されようとしている。

真空技術は17世紀から社会に科学として取り入れられた古い技術であるが、熱陰極真空管を生み出し、それが CRT やマイクロ波管に展開する一方、その間発達した真空技術が薄膜形成技術などを生み出した。またそれがトランジスタなどの固体素子を生み出し、またその固体素子の製造過程で発達した半導体微細加工技術が新たにフラットパネルディスプレイや Spindt 型エミッタに代表される冷陰極素子を生み出した。すべて真空技術を中心として螺旋展開しながら電子デバイスが発展してきたかのように見える (図13)。今後も、真空技術を基調として、Spindt 型電子源を用いた新たな電子デバイスが生み出されると共に、その関連技術から生まれた新技術もまた社会に貢献するという展開が続くものと思われる。

なお冷陰極撮像板の開発については NHK 放送技術研究所

図11 従来の HARP 管 (左上) と FEIS (右下)

図12 FEIS の開発経過

図13 真空技術の展開

の谷岡健吉放送デバイス部長、江上典文主任研究員ほか関係者との共同研究として実施された。

〔文 献〕

- 1) C. A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey and E. R. Westerberg: J. Appl. Phys., Vol. 47, No. 12 (1976) pp. 5248-5263.

- 2) C. A. Spindt and L. N. Heynick: United States Patent, 3665241, May 23 (1972).
- 3) R. Meyer, A. Ghis, P. Rambaud and F. Muller: Tech. Digest of Japan Display '86 (1986) pp. 513-515.
- 4) M. Borel, JF. Boronat, R. Meyer and P. Rambaud: United States Patent, 4940916, Jul. 10 (1990).
- 5) 難波, 山岸, 岡崎, 江上, 谷岡, 阿部, 高山, 田中, 伊藤: 映像情報メディア学会誌 Vol. 54, No. 2 (2000) pp. 242-247.
- 6) S. Itoh, T. Watanabe, T. Yamaura and K. Yano: Tech. Digest of Asia Display '95, Hamamatsu, (1995) pp. 617-620.
- 7) 伊藤: 7. 電界放出ディスプレイ (FED), 「フラットパネルディスプレイ大辞典」工業調査会, (2001) 969.
- 8) S. Itoh and M. Tanaka: "Current Status of Field-Emission Displays" *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, Vol. 90, No. 4, April, (2002) pp. 514-520.
- 9) M. Tanaka, Y. Obara, Y. Naito, H. Kobayashi, M. Toriumi, T. Niiyama, Y. Sato, S. Itoh and H. Kawasaki: Tech. Digest of SID '04, Seattle, (2004) pp. 832-835.
- 10) S. Itoh, T. Niiyama and M. Yokoyama: J. Vac. Sci. Technol. B 11(3), May/Jun, (1993) pp. 647-650.
- 11) S. Itoh, H. Toki, F. Kataoka, Y. Sato, K. Tamura and Y. Kagawa: IEICE TRANS ELECTRON., Vol. E82-C, No. 10, Oct, (1999) pp. 1808-1813.
- 12) S. Itoh, M. Tanaka and T. Tonegawa: J. Vac. Sci. Technol. B 22(3), May/Jun, (2004) pp. 1362-1366.
- 13) S. Itoh, M. Tanaka, T. Tonegawa, Y. Obara, Y. Naito, T. Niiyama, H. Kobayashi, Y. Sato, M. Toriumi, Y. Takeya, M. Taniguchi, M. Namikawa, T. Yamaura and H. Kawasaki: *Proceedings of the IDW '04, Niigata*, (2004) pp. 1189-1192.
- 14) N. Egami, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Osada, T. Watabe, S. Okazaki, Y. Obara, M. Tanaka and S. Itoh: *Proceedings of the IVNC '04, Cambridge, Massachusetts*, 4.1, (2004) pp. 228-229.