強誘電体セラミック材料を用いた電子放出素子の開発

A Novel Electron Emitter Utilizing Ferroelectric Ceramic Material

武内 幸久[†], 七瀨 努[†], 大和田 巖[†], 赤尾 隆嘉[†]
Yukihisa Takeuchi[†], Tsutomu Nanataki[†], Iwao Ohwada[†] and Takayoshi Akao[†]

Abstract A novel electron emitter utilizing the characteristics of ferroelectric ceramic materials has been developed. The electron emitter has a simple structure formed by using a thick film process, a small emission angle dispersion and its own memory function. The electron-emitting portion of the electron emitter has a unique micro-structure. This micro-structure produces a novel two-step electron emission process by combining field emission characteristics with the ferroelectric characteristics of ceramic materials. To evaluate the electron emitter, a 4.3-inch prototype display panel was built that displayed a moving colored image using 128 gray scales per color.

キーワード：強誘電体，電子放出，分極反転

1. ま え が き

日本ガイシは、強誘電体材料と厚膜形成技術を基盤としたセラミック技術をもとに電子デバイス開発を行ってきた。この度、強誘電体セラミック材料を利用した新しい電子放出素子 (FEED: Field Effect-Ferroelectric Electron Emitter Device) を開発したので、ここに御紹介する。FEEDは、①厚膜形成プロセスで作製できるシンプルな構造、②良好な電子ビーム直進性、③電子放出素子自体に付与されたメモリー機能、という特徴をもっている。我々は、4.3インチプロトタイプディスプレイを試作し、FEEDの性能評価を行った。

2. 電子放出素子の構造

FEEDは、図1に示すように、セラミック基板上に下部電極、強誘電体層、上部電極の順に成膜することで、強誘電体層が電極でサンドイッチされた構造を有している。上部電極には、その全体にわたって、微細な貫通孔 (概ね直径 $0.01 \sim 10 \mu\text{m}$) が高密度に分布しており、その数は数百万～数千万個/ mm^2 に達する。これら微細貫通孔から強誘電体層表面が露出している。電子は、この強誘電体露出面から微細貫通孔を通して真空中へ放出される。以降、これら微細貫通孔を電子放出孔、強誘電体露出面を電子放出面と呼ぶこととする。さらに、各々の電子放出孔の周縁部では上部電極が強誘電体層表面からわずかに浮いており、 $1 \mu\text{m}$ に満

図1 FEEDの構造 (断面図)

The structure of the electron emitting portion.

たない大きさの微小なギャップを有している。我々は、この構造を「庇構造」と呼んでいる。これによって、後述する独自の電子放出プロセスが実現されると考えている。FEEDは、厚膜プロセスによって形成することが可能である。すなわち、微細な電子放出孔と庇構造は、エッチング等の薄膜プロセスに依らず、スクリーン印刷にて厚膜形成した上部電極ペーストを焼成する際に自動的に形成される。

3. 電子放出モデル

次に、我々が想定している電子放出プロセスのモデルについて、図2を参照しながら、以下に詳細を述べる。

電子放出プロセスは2段階からなる。第1段階で電子放出面に電子を蓄積し、第2段階で電子放出面から電子を放出する。電子放出素子の初期状態として、強誘電体層はすでに分極しており、電気双極子の負極が電子放出面に現れているものとする。

2005年3月3日受付，2006年7月21日最終受付，2006年8月23日採録

[†] 日本ガイシ株式会社

(〒467-8530 名古屋市瑞穂区須田町2-56, TEL 052-872-7789)

[†] NGK Insulators, LTD.

(2-56, Suda-cho, Mizuho-ku, Nagoya-city, Aichi-pref., 467-8530, Japan)

(0)データレベル 0.00の保持

(1-1)データ書き込み前段階

(1-2)データ書き込み

(2)データレベル 1.00の保持

(3-1)電子放出前段階

(3-2)電子放出

図2 メモリー機能を利用した電子放出モデル

The electron emission model utilizing memory function.

(1) 第1段階 (電子の蓄積)

上部電極と下部電極との間に抗電界以上の電界 (上部電極：負極，下部電極：正極) を印加することによって，強誘電体層の分極反転が起こる．その瞬間，電気双極子の正極が電子放出面に現れる．このとき，微細なギャップにおいて，電界集中が発生する．さらに，誘電体層と上部電極および真空空間とのトリプルジャンクションにおいても電界集中が起こる．これらの電界集中部においてフィールドエミッションが起こり，電子放出面に電子が蓄積される．

その後，上下電極間の電界を取り除いても，電子放出面上の電子は安定に保持される．また，上下電極間に再び電

界が印加されても，それが抗電界以下であれば，強誘電体層の分極反転が起きないため電子は保持される．これは，電子放出素子がメモリー機能を備えていることを示している．

(2) 第2段階 (電子の放出)

次に，抗電界より大きな電界 (上部電極：正極，下部電極：負極) を印加して，強誘電体層に分極反転を生じさせる．電気双極子の負極が電子放出面に現れ，電子放出面上の電子はクーロン斥力によって放出される．初速を有する電子が電子放出面に垂直に放出されるため，放出角度の広がりが小さく，良好な電子ビーム直進性が得られる．

以上述べたように，FEEDは，第1段階を行う電界と第2段階を行う電界とを交互に印加することによって，電子放出を行う．電子放出は，第2段階の電界を印加したときのみ観測される．このときの放出電子量は，第1段階の電界によって制御することができ，第1段階の電界を印加しないときには電子放出は観測されない．これらの実験結果から，FEEDは，第1段階においてアナログデータを電子の蓄積量で記憶することを確認し，上述の電子放出モデルを想定した．

4. ディスプレイパネルの駆動方法

メモリー機能を有する電子放出を利用して，パッシブマトリックスディスプレイパネルの駆動方法 (メモリー駆動方式) を開発した．図3に示す通り，1フレーム時間 (例：1/60秒) を二つの段階に分割する．これらはデータ書き込み段階と電子放出段階である．まず，データ書き込み段階では上述した電子放出プロセスの第1段階を行う．パッシブマトリックスディスプレイパネルに対し，行順次選択を行いながら，選択行の電子放出素子 (画素) への画像に応じたデータの書き込みを行っていく．素子の上下電極間に印加する電圧は，上部電極側が負となる極性である．電子放出素子は，上述した通りアナログデータのメモリー機能を有しているので，選択行の画素に対し階調レベルに応じた電圧を印加して，電子の蓄積を行っていく．

次に，電子放出段階では電子放出プロセスの第2段階を行う．この段階で印加する電圧は，ただ一つの電圧レベルでよい．各電子放出素子は，階調レベルに応じて電子放出面に蓄積された電子を放出するので，各階調レベルに応じた輝度の発光が得られる．したがって，電子放出段階では，データ書き込み段階と比べ高電圧 (約200V) を印加するが，トランジスタ回路の1出力のみを利用して，すべての電子放出素子 (すなわちすべての画素) から同時に電子を放出することができるため，複数出力をもつ高電圧ドライバICは不要である．

もし電子放出素子にメモリー機能がないと仮定した場合，選択した行の各々においてデータ書き込み段階と電子放出段階を行う必要がある．解像度 (すなわち行走査数) が増すほど1行あたりの割当て時間が減少するので，特に電子

図3 パッシブマトリックスディスプレイパネルの駆動方法
The driving method of passive matrix display panel.

放出段階においては、高電圧を素子に印加するための時間が確保しにくくなる。しかし、メモリー機能という特徴によって、データ書き込み段階と電子放出段階を、1フレーム期間において独立に割当て、データ書き込み段階では行選択された時間内でデータ書き込みを行い、電子放出段階では全素子（全行）同時に高電圧を印加することにより、電子放出期間を行走査数（すなわち解像度）によらず確保することができる。

5. 電子放出素子の特性

5.1 電子放出特性

図4に、データ書き込み段階における印加電圧（上下電極間に印加する電圧）と電子放出段階の放出電子密度との関係を示す。電子放出段階の印加電圧はすべて一定（200V）である。電子放出段階の放出電子密度は、データ書き込み段階における印加電圧を大きくしていくと、ある電圧付近で急激に増加し、その後一定となる。図4では、この一定となったときの値で規格化した。この結果から、強誘電体層の厚さを小さくしていくと、放出電子密度の変化が急峻になっていくのがわかる。つまり、強誘電体層の厚さを小さくすれば、放出電子密度の制御をより小さな電圧変化で行うことが可能である。例えば、厚さを $10\mu\text{m}$ 以下にすると、制御に必要な電圧変化を10V以下にすることが可能である。これは、ディスプレイパネルの駆動において、10V以下のドライバICを利用できることを示すものである。放出電子密度は、例えば、厚さ $20\mu\text{m}$ の場合、1フレーム時間あたりで $0.6\mu\text{C}/\text{cm}^2$ であり、放出電子密度 $36\mu\text{A}/\text{cm}^2$ に相当する。また、真空度を 10^{-2}Pa ～ 10^{-6}Pa の範囲で変化させて測定したが、これら電子放出密度は変化しなかった。

5.2 寿命特性

図5は、FEEDの輝度－寿命特性を示したものである。FEED素子を、蛍光体とともに真空管球化した真空モジュ

図4 放出電子密度－印加電圧特性（データ書き込み段階）
（強誘電体膜厚を小さくすると、より小さな電圧変化で放出電子密度を制御可能である）
Electron emission density as a function of the applied voltage in Data-set stage.

図5 FEEDの輝度－寿命特性
（10,000時間後の輝度は、初期の80%を維持している）
Luminance as a function of the driving time.

ール（真空度は約 $1\times 10^{-3}\text{Pa}$ ）を用いて寿命試験を実施した。蛍光体はP-22（G）、加速電圧は500Vである。蛍光体保護のために、輝度測定時のみ加速電圧を3kVとして評価した。加速電圧3kVと加速電圧500Vの両方で放出電子量は同じであり、初期の放出電子量は $0.2\mu\text{C}/\text{cm}^2$ であった。また、加速電圧3kVにおける輝度の初期値は $100\text{cd}/\text{m}^2$ であった。60Hz駆動にて10,000時間経過後の輝度は初期値の80%であった。輝度の低下には、放出電子量の低下および蛍光体の発光効率低下が要因として考えられる。

5.3 電子ビーム直進性

図6は、FEEDの電子ビーム直進性を評価した実験結果である。0.2mmサブピクセルピッチを想定して、0.11mm幅の電子放出素子を作製した。具体的には、セラミック基板上に下部電極と強誘電体層を形成した後に、上部電極を0.2mmピッチでライン状に形成し、その上に誘電体でマスク層を形成する。マスク層には、 $0.11\text{mm}\times 0.35\text{mm}$ の窓が横0.2mmピッチ、縦0.6mmピッチでアレイ状に形成されている。この電子放出素子の上方に、2mmスペーサを介して、

図6 電子ビーム直進性の評価
(0.2mmピッチにてクロストークがないことを確認した)
Emission angle dispersion.

透明電極と蛍光体膜を形成したガラスプレートを設置する．透明電極と上部電極間には，電子加速電圧7kVを印加した．集束電極などは設けていない．

この実験条件で，我々はブラックマトリックスのない緑色ベタ蛍光体面上に，マスク層の窓に対応したドットパターンの発光を確認した．図を見てわかるように，各々のドットパターンの間に非発光の境界部が存在する．よって，0.2mmピッチのサブピクセル間でクロストークのないことがわかる．このときの輝度は， $1,200\text{cd}/\text{m}^2$ (60Hz駆動)であった．この実験によって，0.2mmサブピクセルピッチのディスプレイを作製するために，集束電極を用いない簡素な構造が適用できることを確認した．

また，この実験でドットパターンの発光にちらつきがないことが確認された．

6. 4.3インチプロトタイプディスプレイ

画素ピッチ0.6mm，128画素×128画素のディスプレイパネルを試作した．図7に，電子放出素子基板，電子放出素子アレイの詳細，および電子放出部の構造を示す．

電子放出素子基板は，酸化ジルコニウムを主成分としたセラミック基板上に電子放出素子を縦128素子×横384素子形成したものである．詳細は明らかにできないが，すべて厚膜プロセスによって作製している．

この電子放出素子基板を用いて，メモリー駆動方式(図3)を適用し，フレーム周波数60Hzにて各色128階調カラー動画表示を行った(図8)．このディスプレイの色度は，CRTとほぼ同等の特性が得られた(図9)．ピーク輝度は， $440\text{cd}/\text{m}^2$ である．良好な電子ビーム直進性と，メモリー機能を有する電子放出素子というFEEDの特長を生かし，集

図7 4.3インチプロトタイプディスプレイパネルと電子放出素子
(画素ピッチ0.6mm．1枚の電子放出素子基板は128×128画素)
4.3 inch prototype display panel and electron emitters.

画素ピッチ	: 0.6mm
画素数	: 128 × 128 画素
RGB 蛍光体	: P-22
電子加速電圧	: 7kV
階調数	: 各色 7ビット
フレーム周波数	: 60Hz
ピーク輝度	: $440\text{cd}/\text{m}^2$

図8 4.3インチプロトタイプディスプレイでのカラー動画表示例
The color moving image in 4.3 inch prototype display panel.

図9 4.3インチプロトタイプディスプレイにおけるFEEDの色再現性
(CRTと同等の色再現性が得られた)

Chromaticity of FEED in 4.3 inch prototype display panel.

束電極等を設けることなく、シンプルな構造でカラー動画表示を行うことができた。我々は、FEEDを利用したディスプレイの可能性を示すことができたと考えている。

7. む す び

FEEDは、電子放出プロセスにフィールドエミッションと強誘電体特性を組合せることによって、アナログデータのメモリー機能を有する電子放出素子である。FEEDは、①厚膜形成プロセスで作製できるシンプルな構造、②電子ビーム直進性が良好、③電子放出素子自体にメモリー機

能を有する、という特徴をもっている。

現在は、ガラス基板上にFEEDを形成するための低温プロセスを開発中である。

〔文 献〕

- 1) G. Rosenman et al.: "Electron Emission from Ferroelectrics", J. Appl. Phys., 88, pp.6109-6161 (2000)
- 2) Y. Takeuchi, T. Nanataki, I. Ohwada: "Novel Display Panel Utilizing Field Effect-Ferroelectric Electron Emitters", IDW'04, pp.1193-1196 (2004)

武内 幸久 1978年、京都大学理学部卒業。同年、日本ガイシ（株）入社。同社マイクロセラムックス研究所長を経て、現在、同社電子部品事業部長、執行役員。

七瀨 努 1986年、静岡大学大学院修士課程修了。同年、日本ガイシ（株）入社。現在、同社基盤材料研究所グループマネージャー。

大和田 巖 1990年、名古屋大学大学院修士課程修了。同年、日本ガイシ（株）入社。現在、同社基盤材料研究所マネージャー。

赤尾 隆嘉 1995年、東京大学大学院修士課程修了。同年、日本ガイシ（株）入社。現在、同社製造技術部主任。