

電界集束スピント型電界放射陰極アレイを用いた平面撮像管に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2017-06-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 本田, 悠葵 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00010192

静岡大学 博士論文

**電界集束スピント型電界放射陰極アレイ
を用いた平面撮像管に関する研究**

2016 年 12 月

大学院 自然科学系教育部
ナノビジョン工学専攻

本田 悠葵

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	スピント型電界放射陰極アレイを用いた平面撮像管	6
1.2.1	HARP 撮像管の課題	6
1.2.2	これまでの研究成果	6
1.3	本研究の目的	12
1.4	本論文の構成	12
第 2 章	平面撮像管の電子ビーム集束系と課題	16
2.1	はじめに	16
2.2	電子ビーム磁界集束系を適用した平面撮像管	16
2.2.1	感度	21
2.2.2	解像度	22
2.2.3	出力映像の輝度ムラ	22
2.2.4	磁界集束系の課題	28
2.3	電子ビーム電界集束系を適用した平面撮像管	28
2.3.1	電界集束スピント型 FEA の電極構造の基礎検討	29
2.3.2	基礎実験用電界集束スピント型 FEA	34
2.3.3	電界集束系の課題と対策方針	39
第 3 章	電子軌道解析の高精度化と電界集束スピント型 FE の電極構造検討	47
3.1	はじめに	47
3.2	集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA	47
3.2.1	放射電子特性	47
3.2.2	平面撮像管を用いた撮像実験	51
3.3	電子初速にマクスウェル分布を用いた電子軌道解析モデルの課題	54
3.4	アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子初速を用いた 電子軌道解析モデルの提案	57
3.5	ゲート電極凸構造の電界集束スピント型 FE	60
3.6	ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE	64
3.7	まとめ	69

第 4 章	ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の設計と試作	71
4.1	はじめに	71
4.2	ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA および 同 FEA を適用した平面撮像管の設計	71
4.3	ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA および 同 FEA を適用した平面撮像管の試作	78
4.4	まとめ	81
第 5 章	アクティブマトリクス駆動回路の応答特性の改善	83
5.1	はじめに	83
5.2	NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路と ハイビジョン駆動に向けた課題	83
5.3	ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス 駆動回路の設計	91
5.4	ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス 駆動回路の評価用素子の試作	97
5.5	まとめ	100
第 6 章	結論	102
6.1	結論	102
	6.1.1 電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管	102
	6.1.2 平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路	104
6.2	電界集束型平面撮像管のハイビジョン化への展望	105
	謝辞	108
	研究業績	109

第 1 章

序論

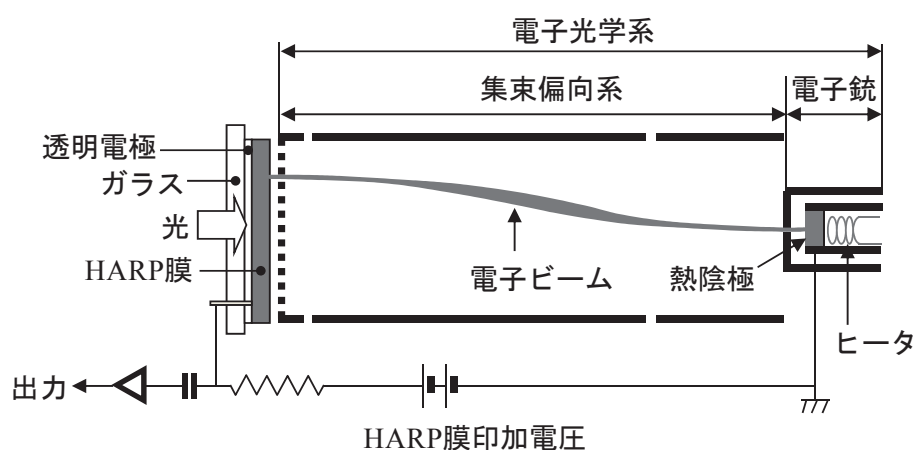
1.1 本研究の背景

現在，放送用ハイビジョンカメラや民生用ビデオカメラ，スマートフォンのカメラ部等に用いられる CCD (Charge Coupled Device) および CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) イメージセンサ¹⁻⁶⁾は，それらが普及する以前に放送用カメラに用いられてきた光導電型撮像管⁷⁻¹¹⁾と比較して，小型軽量で信頼性が高いこと，レジストレーションなどの複雑なカメラ調整が不要なことなどから広く普及しており，撮像デバイスの主流となっている．これらの固体撮像デバイスは，マイクロレンズアレイ¹²⁾による光開口率の改善や埋め込みフォトダイオード¹³⁾等のプロセス開発，相関二重サンプリング処理による雑音低減等の回路技術¹⁴⁾により，現在では，通常の照明条件下での撮影に対して十分な感度を有している．しかし，照明条件が制限された状況下では必ずしも感度が十分とはいえないケースがあり，NHK では HARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 撮像管を適用した超高感度な放送用ハイビジョンカメラ¹⁵⁾を，夜間の緊急報道やオーロラ撮影等の自然科学番組に利用してきた¹⁶⁾．

HARP 撮像管の構成を図 1.1 に示す．HARP 撮像管はアモルファスセレン (a-Se) を主体とした光導電膜^{15, 17-18)}を適用した光導電型撮像管である．HARP 膜に光が入射すると，透明電極近傍の膜内に電子・正孔対が生成される．この内，正孔は膜に印加された強い電界によって電子ビーム走査側に加速され，膜を構成する原子と次々に衝突する事で新たな電子・正孔対を生み出す．このようにアバランシェ増倍¹⁹⁾された正孔が蓄積されることで，HARP 膜内の電子ビーム走査側には入射光像に対応した電荷パターンが形成される．出力映像信号は，蓄積された正孔と走査電子とが再結合する際に信号電極から取り出される．HARP 撮像管で高い感度が得られるのは，高電界を印加した a-Se 内部で電荷のアバランシェ増倍現象が生じ，かつ，その増倍過程において付加雑音（アバランシェ増倍ノイズ）がほとんど付加されないことによるものである．また，HARP 膜を厚くし，高電界を印加することで，その電荷増倍率をさらに大きくできるという特徴を有する．図 1.2 に一定光量の青色光を厚さ 25 μm の HARP 膜に照射したときの出力信号電流と HARP 膜に印加する電界強度との関係（感度特性）を厚さ 4 μm の HARP 膜の感度特性と比較して示す．厚さ 25 μm



(a) HARP 撮像管の外観



(b) HARP 撮像管の構成（断面図）

図 1.1 HARP 撮像管の外観と構成

の HARP 膜に印加する電界強度を高めていくと出力信号電流はいったん飽和した後、 0.8×10^8 V/m 以上で急激に上昇し、約 1.0×10^8 V/m で約 600 倍の電荷増倍率が得られる。一方、厚さ $4\mu\text{m}$ の HARP 膜における電荷増倍率は約 10 倍となっている。加えて、HARP 膜を厚くするほど、走査電子ビーム量と HARP 膜の光電変換特性 (γ 特性) とで決まるダイナミックレンジが拡大するという特徴を有する。図 1.3 に、厚さ $25\mu\text{m}$ の HARP 膜のアバランシェ動作時における光電変換特性を、厚さ $4\mu\text{m}$ の HARP 膜と対比して示す。両者とも、入射光量が増すほど出力信号電流の増加が抑えられて γ 値が小さくなるが、厚さ $4\mu\text{m}$ の HARP 膜に比べて、厚さ $25\mu\text{m}$ の HARP 膜ではこの γ 値の減少が著しく、走査電子ビーム量が同じでも、より広いダイナミックレンジを得ることができる。これは、アバランシェ増倍動作時の HARP 膜では、入射光量が増すと電子ビーム走査側に蓄積される電荷量が増加することから、膜内の実効的な電界強度の減少に伴い増倍率が低下して γ 値が小さくなるが、一方で図 1.2 に示すように、HARP 膜が厚くなるほど、アバランシェ増倍領域での膜内電界強度に対する出力信号電流の上昇はより急峻になるため、蓄積電荷の増加に伴う実効的な

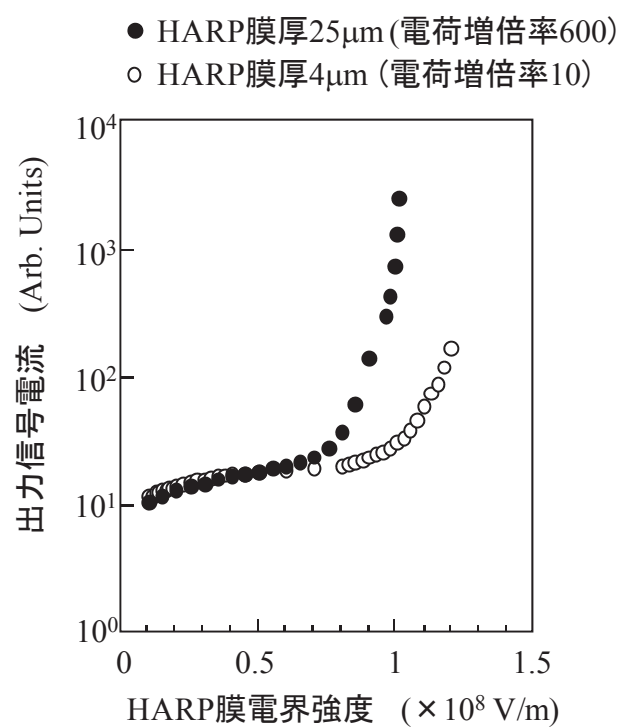


図 1.2 出力信号電流と HARP 膜に印加する電界強度との関係

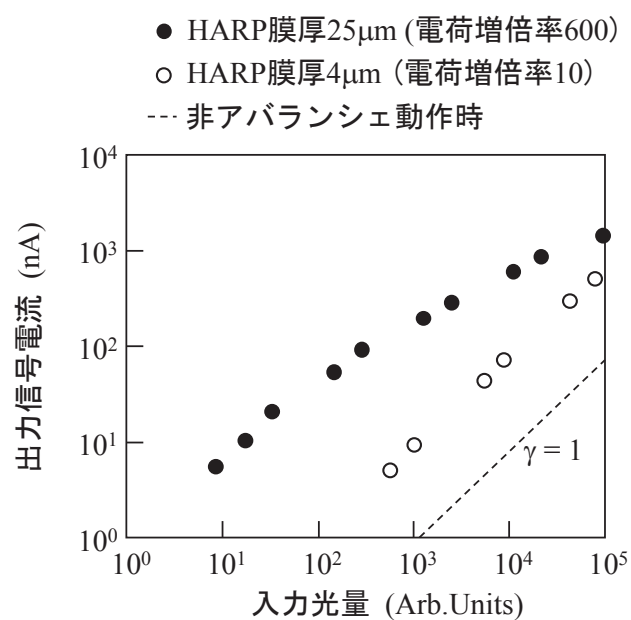


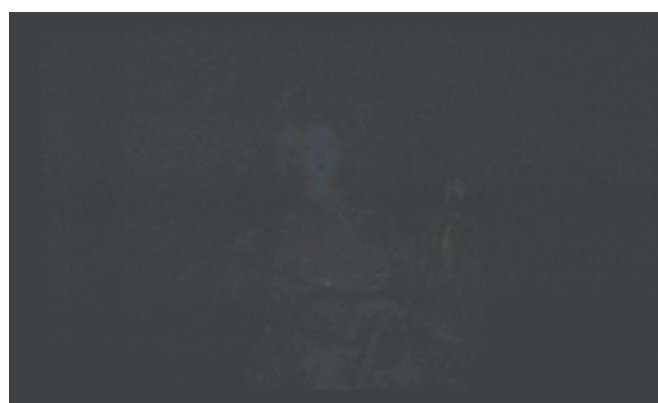
図 1.3 光電変換特性

電界強度の減少が同じでも，膜が厚くなるほど，増倍率の低下がより顕著になるためと考えられる．

現在，実用化されている放送用超高感度ハイビジョンカメラ（日立国際電気 SK-H5000）では，膜厚 $15\mu\text{m}$ の HARP 膜（電荷増倍率 200 倍）を適用した 2/3 インチサイズ（有効撮像領域の対角長 11mm）の HARP 撮像管が使用されている．このカメラの最大感度は 62.5 lux, F10 であり，2/3 インチサイズの CCD を適用したハイビジョン CCD カメラの感度 2000 lux, F10 に対して 30 倍を超える高い感度を得ることができる¹⁸⁾．さらに HARP 膜厚を $35\mu\text{m}$ に増した撮像管を試作し，電荷増倍率約 1000



(a) HARP撮像管カメラ
(アンプゲイン 0dB)



(b) 通常のCCDカメラ
(アンプゲイン +18dB)

被写体照度，光学レンズの絞り値: 0.3 lux, F1.7

図 1.4 HARP 撮像管カメラと CCD カメラの撮像例の比較

倍（対 CCD 感度 200 倍）を達成している²⁰⁾。図 1.4 に HARP 撮像管カメラの撮像例を CCD カメラと比較して示す。被写体照度は 0.3 lux，光学レンズの絞り値は F1.7 としている。

一方，HARP 撮像管以外の超高感度撮像デバイスも開発された。図 1.5 に代表的な増倍型超高感度撮像デバイスを示す。デバイスは外部光電効果を利用したものと内部光電効果を利用したものとに分類した。外部光電効果を利用したデバイスには，イメージンテンシファイア CCD (IICCD: Image Intensifier CCD)²¹⁾や電子打ち込み式 CCD (EBCCD: Electron Bombardment CCD)²²⁾がある。IICCD では，入射光は光電面で電子に変換され，真空中に放出される。放出された電子は，マイクロチャンネルプレート (MCP: Micro-Channel Plate) において 2 次電子増倍により最大 10000 倍に増倍された後に蛍光面へと加速され，衝突する。電子の衝突により発光した蛍光面を CCD で再撮することで超高感度を実現している。EBCCD では，光電面で変換された電子を真空中に放出し，数 kV の電圧で加速して裏面照射型 CCD に衝突させることで 1000 倍以上に増倍する。これらのデバイスは非常に高い電荷増倍率が得られる反面，光電面の変換効率は 50%程度のため光の利用効率が十分ではない，焼きつきが生じるなどの問題がある。一方，内部光電効果を利用したデバイスには，電子増倍型 CCD (EM-CCD: Electron Multiplying CCD)²³⁾ や HARP 撮像管がある。EM-CCD は電子の増倍機能をもつ転送部 (増倍用 CCD) を電荷転送路 (水平 CCD) の最終段に付加した構造をもつ。増倍用 CCD では，通常より高い電圧で電子は転送され，加速された電子によるインパクトイオン化により新たな電子・正孔対を発生させる。発生確率は非常に低く，1～2%程度であるが，400 段以上からなる増倍用 CCD において増倍を繰り返すことで 1000 倍以上の電子増倍率を実現している。EM-CCD は，小型軽量で信頼性に優れ，通常の CCD の感度をはるかに超える超高感度を得ることができるが，電子の増倍率にばらつきがある，暗電流によるノイズを低減するために CCD を冷却する必要がある，暗部の階調再現性が不十分である，高輝度な光が入射すると白詰まりが生じるなどの問題がある。

外部光電効果	内部光電効果
・ イメージンテンシファイア CCD ・ 電子打ち込み式 CCD	・ 電子増倍型 CCD ・ HARP 撮像管

図 1.5 代表的な増倍型超高感度撮像デバイス

電子増倍型 CCD では超高感度撮影時の画質改善が課題であるのに対し、HARP 撮像管では、光開口率が 100%である、暗電流が非常に少ない、アバランシェ増倍ノイズがほとんど付加されない、高輝度な入射光に対しては膜内の実効的な電界強度の減少に伴い増倍率が低下して γ 値が小さくなるため白詰まりの発生を抑制するなどの特徴があり、超高感度と高画質とを両立できる撮像デバイスとして高い評価を得ている。このため放送用途のみならず、X 線医療診断やバイオ研究、深海探査や夜間の港湾監視など、さまざまな分野での応用が期待されている¹⁶⁾。

1.2 スピント型電界放射陰極アレイを用いた平面撮像管

1.2.1 HARP 撮像管の課題

HARP 撮像管では、図 1.1 に示したように熱陰極を用いて単一の電子ビームを放射し、その電子ビームを偏向させて HARP 膜に蓄積された電荷を走査する。この電子光学系には以下に示す諸課題があり、抜本的な改善が強く望まれていた。

- ・電子ビームを偏向させるための距離が必要なため、撮像管の管長が約 100mm (2/3 インチサイズ HARP 撮像管) と長く、カメラの小型化が難しい。
- ・電子ビームを偏向する際の収差の影響で、電子ビームの空間広がり画面周辺部の HARP 膜上で大きくなり、画面周辺部での解像度が劣化する。
- ・CCD の消費電力が約 0.5W であるのに対し、HARP 撮像管の消費電力は熱陰極を加熱するヒーターや偏向コイルの消費電力も加わり約 9W (磁界集束・磁界偏向型) と非常に大きい。

これら HARP 撮像管の課題解決に向けて、微細な電子源である電界放射陰極アレイを画素毎に設け、HARP 膜と対向配置させた構造をもつ平面撮像管の研究に着手した²⁴⁻²⁵⁾。

1.2.2 これまでの研究成果

ここからは、スピント型電界放射陰極アレイ (FEA: Field Emitter Array)²⁶⁻²⁸⁾を用いた平面撮像管のこれまでの研究成果を述べる。瀧口らは、電圧を印加するだけで真空中に電子を放射する微細な電子源であるスピント型電界放射陰極 (FE: Field Emitter) を画素毎に多数並べたアレイと HARP 膜とを対向配置させた構造の平面撮像管を試作し、撮像実験を行った²⁹⁾。電子ビームの空間広がりを抑制するため、

スピント型 FEA と HARP 膜との間にはメッシュ状の電極を配置し、500V の電圧を印加して電子ビームを加速させる構造とした。図 1.6 に基礎実験用平面撮像管の構成、図 1.7 に平面撮像管の外観写真、図 1.8 に基礎実験用平面撮像管の撮像例を示す。試作した基礎実験用平面撮像管は画素数 128×96 、画素サイズ $180 \times 180 \mu\text{m}^2$ であり、画素サイズは大きいものの、以下に示す結果が得られ、HARP 撮像管での課題を抜本的に解決する見通しが得られた。

- ・ HARP 膜のアバランシェ増倍に由来する高感度を得られる。
- ・ 平面撮像管の厚さは約 10mm であり、撮像管の 1/10 に薄型化できる。
- ・ 解像度の画面内依存性がない。
- ・ CCD の消費電力 0.5W よりも低消費電力にできる。

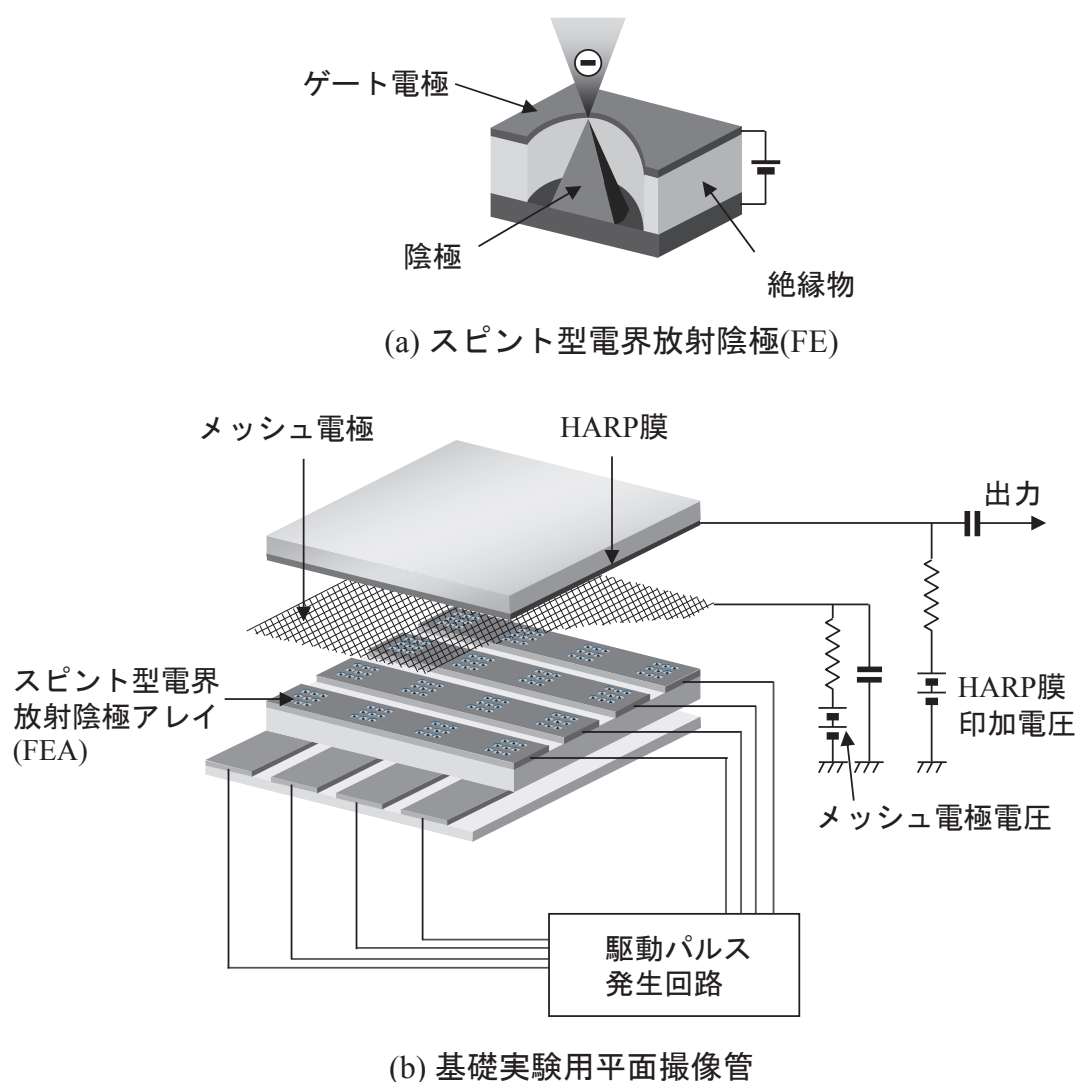
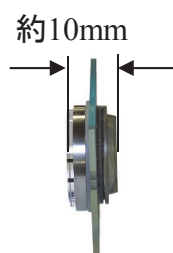
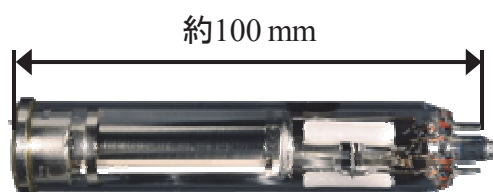


図 1.6 スピント型電界放射陰極(FE), およびスピント型電界放射陰極アレイ(FEA)を適用した基礎実験用平面撮像管の構成



(a) 平面撮像管



(b) HARP撮像管

図 1.7 平面撮像管および HARP 撮像管の比較



画素数: 128×96

画素サイズ: $180 \times 180 \mu\text{m}^2$

図 1.8 基礎実験用平面撮像管の撮像例

一方、試作した基礎実験用平面撮像管には、多画素化・高集積化に向けて以下の課題が残された。

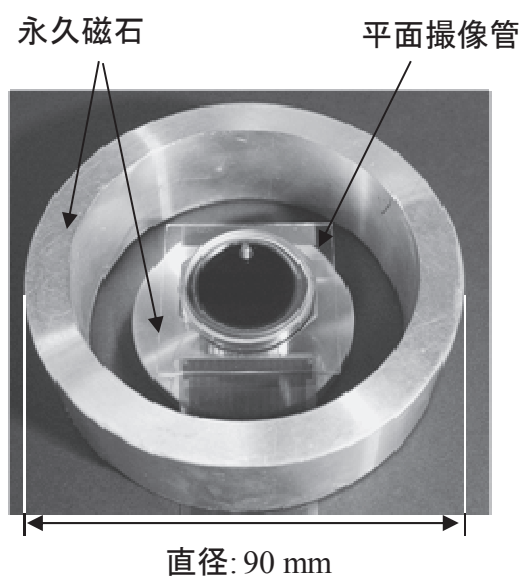
- ・メッシュ電極による加速電界では電子ビームの集束が不十分。
- ・スピント型 FEA の駆動回路が平面撮像管の外部にあり、平面撮像管-駆動回路間の配線数が多く、配線長が長い。

次に、難波らは、アクティブマトリクス駆動回路を形成したシリコン基板上にスピント型 FEA を形成するとともに、平面撮像管の周囲に2つの永久磁石を配置し、画素エリアで均一な磁界 (垂直方向の磁束密度 約0.125 T) を与えることでHARP膜上での電子ビームの空間広がり抑制する磁界集束型平面撮像管を試作した³⁰⁾。図 1.9 に磁界集束型平面撮像管と永久磁石の構成および外観、図 1.10 にアクティブマトリクス駆動回路の上に形成したスピント型 FEA の構成および断面の走査型電子顕微鏡観察像、図 1.11 に磁界集束型平面撮像管の撮像例を示す。試作した磁界集束型平面撮像管は画素数 640×480、画素サイズ 20×20 μm^2 であり、以下の結果が得られた。

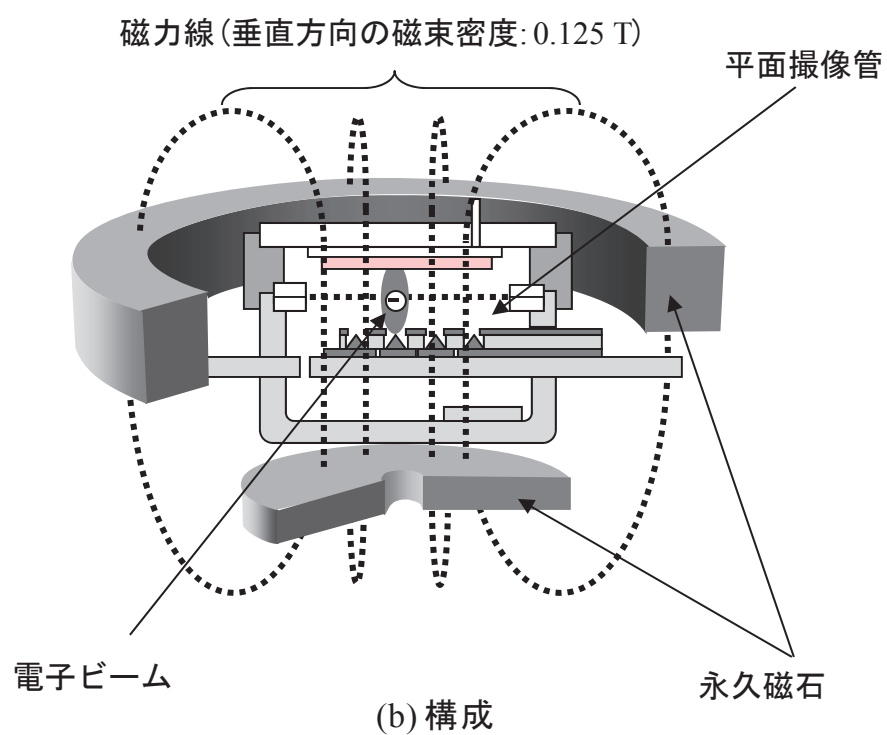
- ・円筒型と円盤型の2つの永久磁石を組み合わせて平面撮像管の周囲に配置し、垂直方向の磁束密度の面内分布を均一にすることにより、画面全体で良好な解像度が得られる。
- ・アクティブマトリクス駆動回路を形成したシリコン基板上にスピント型 FEA を形成することで、画素数 640×480 のスピント型 FEA を駆動するのに十分な応答速度が得られるとともに、外部へと接続する配線数を10本程度に抑えることができる。

一方、試作した磁界集束型平面撮像管には、以下の課題が残された。

- ・磁束密度の面内分布を均一にするため、平面撮像管の周囲に配置する永久磁石が大きくなり (円筒型永久磁石の直径: 90mm, 円筒型と円盤型の2つの永久磁石を合わせた総重量: 600g), 平面撮像管の特徴の一つである小型化を阻む要因になる。
- ・平面撮像管の更なる多画素化の際に、アクティブマトリクス駆動回路によるスピント型 FEA の応答速度が不十分。



(a) 外観



(b) 構成

図 1.9 磁界集束型平面撮像管および永久磁石

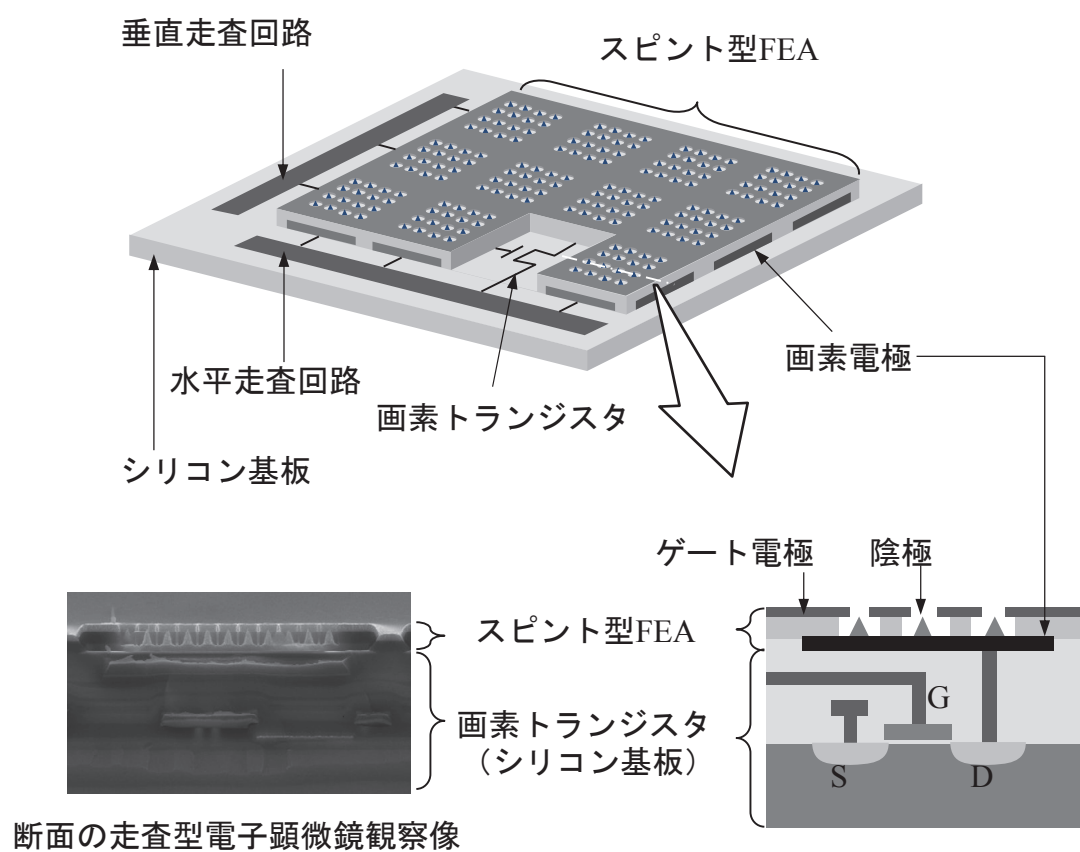


図 1.10 アクティブマトリクス駆動回路の上に形成したスピント型 FEA



画素数: 640×480

画素サイズ: $20 \times 20 \mu\text{m}^2$

図 1.11 磁界集束型平面撮像管の撮像例

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、磁界集束型平面撮像管の電子ビーム集束系と比べて格段に小さな集束系をもつ電界集束型平面撮像管の実現可能性を、集束電極を一体化した電界集束スピント型FEAの電極構造やアレイピッチおよび同FEAから取り出せる電子ビーム量と出力映像の輝度ムラとの関係から検討することと、FEAのハイビジョン駆動(1画素当たりの駆動時間: 約 13.5ns)が可能なアクティブマトリクス駆動回路を検討すること、そしてこれらの検討により、平面撮像管を適用した小型で高画質な超高感度ハイビジョンカメラの早期実現に資することである。具体的には、

- ・ゲート電極開口部の高さに対して低い位置に集束電極を配置した電極構造の電界集束スピント型FEAを適用した平面撮像管で、撮像動作が実現できること、出力映像の輝度ムラが抑制されることを確認する
- ・アクティブマトリクス駆動回路の駆動パルスを低電圧化し、画素部にてスピント型FEAの駆動に必要な高電圧パルスに変換する回路構成で、スピント型FEAのハイビジョン駆動が実現できることを確認する

ことを目指す。

1.4 本論文の構成

以下に、本論文を構成する各章の内容を概説する。

1章では、本研究の背景と目的を述べる。

2章では、平面型撮像管に適用する2種の電子ビーム集束系として、磁界集束系と電界集束系を示し、撮像特性をはじめとする諸特性およびそれぞれの課題について述べる。

3章では、電界集束系を適用した平面撮像管の設計に用いる電子軌道解析の高精度な解析モデルを提案するとともに、電界集束スピント型FEAから取り出せる電子ビーム量を向上させるための電極構造について述べる。

4章では、ボルケーノ構造電界集束スピント型FEAの最適なFEAピッチおよび同FEAを適用した平面撮像管の試作結果について述べる。

5章では、アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型FEAのハイビジョン駆動に向けて、アクティブマトリクス駆動回路の駆動パルスを低電圧化し、画素部にてスピント型FEAの駆動に必要な高電圧パルスに変換する回路構成を提案する。

6章では、結論および平面撮像管のハイビジョン化に向けた展望について述べる。

参考文献

- 1) G. Weckler, "Operation of p-n Junction Photodetectors in a Photon Flux Integrating Mode," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-2, no. 3, pp. 65-73, 1967.
- 2) W. S. Boyle, and G. E. Smith, "Charge Coupled Semiconductor Devices," Bell Syst. Tech. J. (Briefs), pp. 587-593, 1970.
- 3) M. F. Tompsett, G. F. Amelio, W. J. Bertram, Jr., R. R. Buckley, W. J. McNamara, J. C. Mikkelsen, Jr., and D. A. Sealer, "Charge-Coupled Imaging Devices: Experimental Results," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-18, no. 11, pp. 992-996, 1971.
- 4) P. J. W. Noble, "Self-Scanned Silicon Image Detector Arrays," IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-15, no. 4, pp. 202-209, 1968.
- 5) F. Andoh, K. Taketoshi, J. Yamazaki, M. Sugawara, Y. Fujita, K. Mitani, Y. Matuzawa, K. Miyata, and S. Araki, "A 250,000-Pixel Image Sensor with FET Amplification at Each Pixel for High-Speed Television Cameras," IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. vol. 33, pp.212-213, 1990.
- 6) E. R. Fossum, "Active Pixel Sensors: Are CCDs Dinosaurs?," Proc. SPIE. vol. 1900, pp.2-14, 1993
- 7) F. F. De Hann, A. Van der Drift, P. P. M. Schampers, "The Plumbicon; a New Television Camera Tubes," Philips Tech. Rev., vol. 25, pp. 133-151, 1963/1964.
- 8) P. W. Weimer, S. V. Forgue, R. R. Goodrich, "The Vidicon Photoconductive Camera Tube," Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 71-73, 1950.
- 9) 清水和夫, 吉田興夫, 相原敏, 木内雄二, "CdSe 複合ターゲットビジコンの動作機構と緒特性," テレビジョン, vol. 26, no. 9, pp. 755-761, 1972.
- 10) 後藤, 磯崎, 設楽, 小泉, 丸山, 平井, 藤田, "新光導電形撮像管サチコンの特性," テレビ全大, 3-23, 1973.
- 11) 藤原, 長谷川, 山本, "ニュービコン," テレビ誌, vol. 28, no. 11, pp. 884-888, 1974.
- 12) Y. Ishihara, and K. Tanigaki, "A High Photosensitive IL-CCD Image Sensor with Monolithic Resin Lens Array," Int. Device Meeting Tech. Dig., pp.497-500, 1983.
- 13) N. Teranishi, A. Kohno, Y. Ishihara, E. Oda, and K. Arai, "No Image Lag Photodiode Structure in the Interline CCD Image Sensor," IEDM Tech. Dig., pp.113-116, 1982.
- 14) M. H. White, D. R. Lampe, I. A. Mack, and F. C. Blaha, "Characterization of Charge-Coupled Device Line and Area-Array Imaging at Low Light Levels," IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. XVI, pp.134-135, 1973.

- 15) K. Tanioka, T. Matsubara, Y. Ohkawa, K. Miyakawa, S. Suzuki, T. Takahata, N. Egami, K. Ogusu, A. Kobarashi, T. Hirai, M. Hombo, and T. Yoshida, "Ultra-High-Sensitivity New Super-HARP Pickup Tube and Its Camera," IEICE Trans. Electronics, vol. E86-C, no. 9, pp. 1790-1795, 2003.
- 16) 谷岡健吉, "超高感度 HARP 撮像管の研究開発とその応用," JAXA 第2回学際領域における分子イメージングフォーラム, pp. 2-13, 2016.
- 17) K. Tanioka, J. Yamzaki, K. Shidara, K. Taketoshi, T. Kawamura, S. Ishioka, and Y. Takasaki, "An Avalanche-Mode Amorphous Selenium Photoconductive Layer for Use as a Camera Tube Target," IEEE Electron devices Lett. vol. 8, no. 9, pp. 392-394, 1987
- 18) K. Miyakawa, Y. Ohkawa, T. Matsubara, T. Takahata, S. Suzuki, M. Kubota, N. Egami, K. Tanioka, K. Ogusu, A. Kobayashi, T. Hirai, T. Kawai, M. Hombo, and T. Yoshida, "Ultrahigh-Sensitivity HDTV New Super-HARP Camera," Proc. SPIE, vol. 5677, pp. 26-34, 2005.
- 19) K. Tanioka, K. Shidara, and T. Hirai, "A Highly Sensitive Camera Tube Using Avalanche Multiplication in an Amorphous Selenium Photoconductive Target," Proc. SPIE, vol. 1656, pp. 2-12, 1992.
- 20) 松原智樹, 大川裕司, 宮川和典, 鈴木四郎, 高島保, 江上典文, 谷岡健吉, 小林昭, 小楠功一, 平井忠明, "極超高感度新 Super-HARP 膜の試作," 映像情報メディア学会年次大会, 12-3, 2003.
- 21) 三橋政次, 宮崎正之, 山崎順一, 水野到, 渭原常夫, 吉川和雄, 斉田有宏, 蛭間位吉, 鈴木拓弥, "ノイズ軽減機能付き内蔵 IR 対応 HDTV 超高感度カメラ," 映像情報メディア学会誌, vol. 60, no. 3, pp. 378-383, 2006.
- 22) T. Maruno, M. Shirai, F. Iwase, N. Hakamada, "Electron Bombardment CCD Camera," Proceedings of SPIE, vol. 3302, pp. 2-8
- 23) J. Hynecek, "Impactron - A New Solid State Image Intensifier," IEEE Trans. Electron. Devices, vol. 48, no. 10, pp. 2238-2241, 2001.
- 24) 難波正和, 山岸敏郎, 岡崎三郎, 谷岡健吉, 江上典文, 佐藤史郎, "冷陰極撮像板の基礎実験," 電子情報通信学会技術報告, EID, 電子ディスプレイ, 96(340), pp. 13-18, 1996.
- 25) 難波正和, 山岸敏郎, 岡崎三郎, 江上典文, 谷岡健吉, 阿部正英, 高山勝己, 田中満, 伊藤 茂生, "冷陰極 HARP 撮像板," 映像情報メディア学会誌, vol. 54, no. 2, pp. 242-247, 2000.
- 26) C.A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey, E. R. Westerberg, "Physical Properties of Thin-Film Field Emission Cathodes with Molybdenum Cones," J. Appl. Phys., vol. 47, no. 12, pp. 5248-5263, 1976.

- 27) S. Itoh, T. Watanabe, T. Yamamura, K. Yano, “A Challenge to Field Emission Displays,” Proc. Asia Display '95, no. S25-1, pp. 617-620, 1995.
- 28) S. Itoh, T. Watanabe, K. Ohtsu, M. Taniguchi, S. Uzawa, N. Nishimura, “Experimental Study of Field Emission Properties of the Spindt-Type Field Emitter,” J. Vac. Sci. Technol., B13(2), pp. 487-490, 1995.
- 29) Y. Takiguchi, K. Osada, M. Nanba, K. Miyakawa, S. Okazaki, T. Yamagishi, K. Tanioka, M. Abe, N. Egami, M. Tanaka, S. Itoh, “128×96 Pixel Image Sensor with HARP Target,” IEICE Trans. Electron., E85-C, 11, 2002.
- 30) M. Nanba, Y. Takiguchi, Y. Honda, Y. Hirano, T. Watabe, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh, and A. Kobayashi, “640 × 480 Pixel Active-Matrix Spindt-Type Field Emitter Array Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target,” J. Vac. Sci. Technol., B28(1), pp. 96-103, 2010.

第 2 章

平面撮像管の電子ビーム集束系と課題

2.1 はじめに

平面撮像管において高精細かつ良好な解像度を得るためには、HARP 膜に到達する電子ビームの空間広がりを抑制する必要がある。これは、スピント型 FEA の陰極から放射される電子が 20° から 30° の発散角を持つことや¹⁾、スピント型 FEA と HARP 膜との間に配置し高電圧を印加するメッシュ電極と HARP 膜との間の電界は、HARP 膜へと向かう電子を減速させる減速電界であり、発散角を持つ電子ビームは HARP 膜に到達するまでの間に空間的に広がりやすい傾向があるためである。特に後者については、電界放射陰極アレイから放射する電子を蛍光体に向けて加速し、蛍光体に衝突させることで発光させる電界放出ディスプレイ (FED: Field Emission Display)²⁾に対して、平面撮像管の電子ビームが空間的に広がりやすい要因であるといえる。

電子ビームの集束方式には、磁界を用いる磁界集束型と静電界を用いる電界 (静電) 集束型の 2 つの方式がある。磁界集束型では、磁界の働きによって、HARP 膜へと向かう電子の運動に円運動を加え、電子ビームを HARP 膜上に集束させる。一方、電界集束型では、複数の電極に異なる電圧を印加し、空間に形成された静電界の働きによって電子の軌道を曲げ、電子ビームを集束させる。本章では電子ビーム磁界集束系および電界集束系をそれぞれ適用した平面撮像管とその課題について述べる。

2.2 電子ビーム磁界集束系を適用した平面撮像管

電子ビーム磁界集束系を適用した平面撮像管³⁻⁷⁾は、HARP 膜、メッシュ電極およびスピント型 FEA を近接させて対向配置したものである。図 2.1 に磁界集束型平面撮像管の構成を示す。また、図 1.9 に示したように、平面撮像管の外部には永久磁石からなる電子ビーム磁界集束系を備えている。

平面撮像管の動作原理を図 2.2 に示す。HARP 膜に光が入射すると、透明電極近傍の HARP 膜内に電子・正孔対が生成される。この内、正孔は HARP 膜に印加された強い電界によって電子ビーム走査側に加速され、HARP 膜を構成する原子と次々に衝突することで新たな電子・正孔対を生み出す。このようにアバランシェ増倍された正孔が蓄積されることで、HARP 膜内の電子ビーム走査側には入射光像に

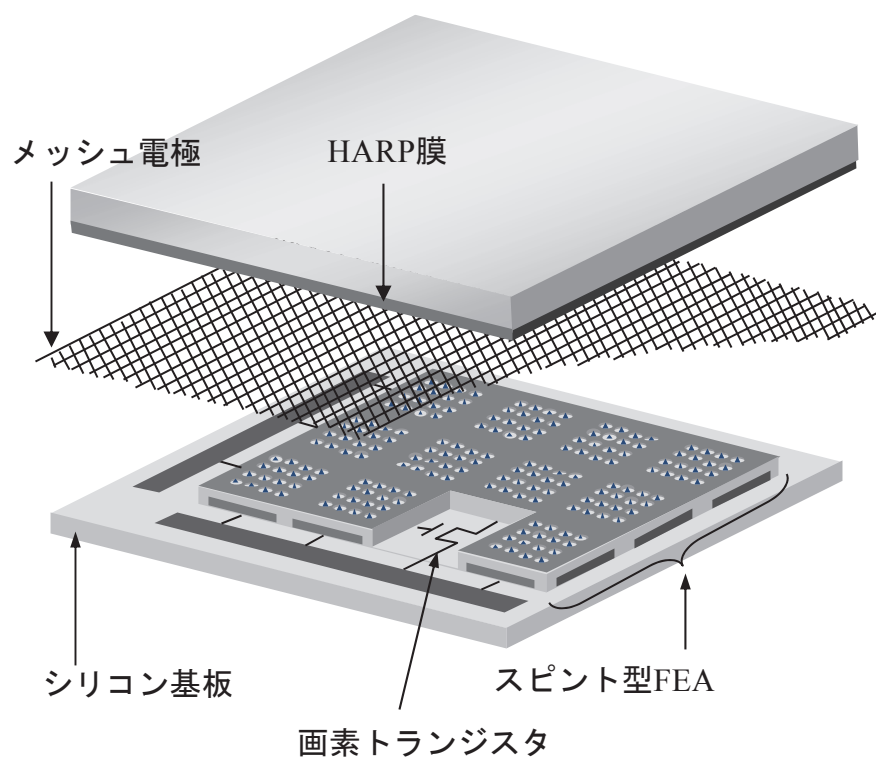


図 2.1 磁界集束型平面撮像管の構成

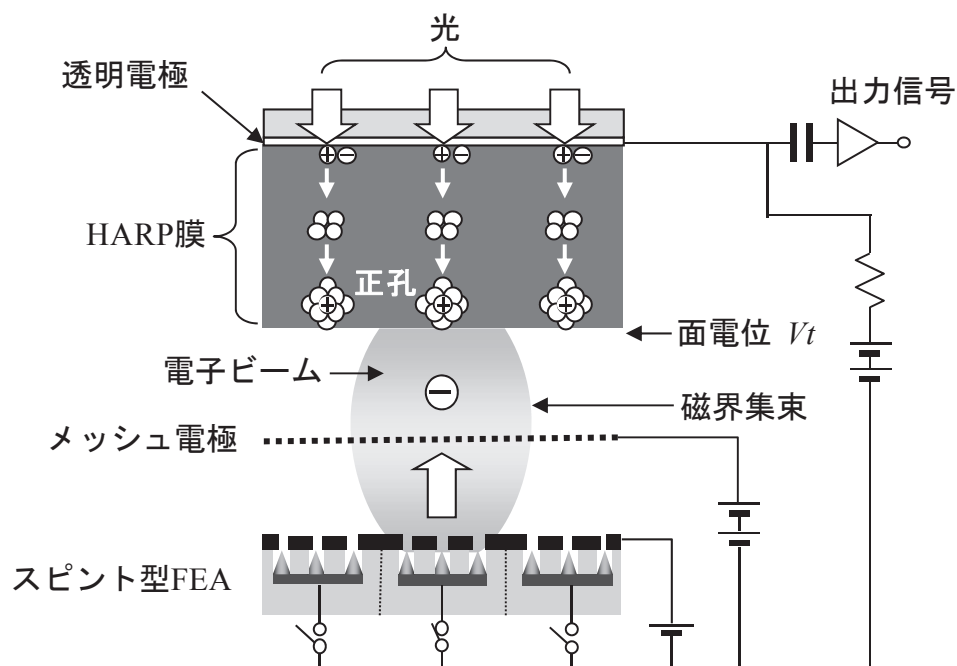


図 2.2 磁界集束型平面撮像管の動作原理

対応した電荷パターンが形成される。

一方、図 1.10 に示したようにアクティブマトリクス駆動回路を形成したシリコン基板上に形成されたスピント型 FEA には、TV 規格に準じた駆動パルスが同回路から印加され、各画素から順次、電子ビームが放射される。この電子ビームは、スピント型 FEA の駆動電圧に比べて格段に高い電圧が印加されたメッシュ電極によって HARP 膜側に引き出されるとともに、電子ビーム磁界集束系を適用した平面撮像管の場合はスピント型 FEA と HARP 膜との間に形成された磁界によって HARP 膜上に集束される。最終的にスピント型 FEA から放射された電子と HARP 膜に蓄積された正孔とが再結合した際に、外部回路に流れる電流を出力として取り出すことで、入射光像に対応した映像信号が得られる。HARP 膜に蓄積された正孔との再結合に寄与しなかった余剰電子は、メッシュ電極やスピント型 FEA のゲート電極に回収される。従って、平面撮像管では、動作原理上、HARP 膜に蓄積された正孔数 (電荷量) 以上の放射電子が HARP 膜へと到達する必要がある。

HARP 膜に蓄積された電荷による電子ビーム走査側の膜電位(本論文では面電位 V_t と呼ぶ)は、膜に蓄積された電荷が電子ビーム走査によってその都度全て読み出されると仮定したときには、次式(2.1 式)で表すことができる⁸⁾。

$$V_t \cong \frac{Q}{C_t} + V_k = \frac{1}{C_t} \int_0^{t_s} I_{sj}(t) dt + V_k \quad (2.1)$$

ここで、 Q は電子ビーム走査側の HARP 膜に読み出し直前まで蓄積された 1 画素あたりの電荷量、 C_t は 1 画素あたりの HARP 膜の蓄積容量、 V_k は電子ビーム放射時のスピント型 FEA の陰極電位、 t_s は 1 画素の電子ビーム照射時間、 I_{sj} は出力信号電流である。通常、平面撮像管では、入射光量や HARP 膜の蓄積容量にもよるが、電子ビームによる走査直前の HARP 膜の面電位は最大でも数 V から数十 V で、スピント型 FEA に要求される放射電子量などによってはスピント型 FEA の駆動電圧が HARP 膜の面電位よりも高くなる。

試作した磁界集束型平面撮像管および磁界集束系の仕様を表 2.1 に示す。図 2.3 には試作したスピント型 FEA の外観を示す。画素数は水平 640×垂直 480、画素サイズは $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ で、各画素に 121 個のスピント型 FE を配置した。磁界集束系は図 1.9 に示したように円筒型と円盤型の 2 つのネオジウム系永久磁石 (円筒型永久磁石の直径: 90mm、円筒型と円盤型の 2 つの永久磁石を合わせた総重量: 600g) を組み合わせて平面撮像管の周囲に配置し、平面撮像管の内部に磁束密度約 0.125T のほぼ一様な磁界を与えた。スピント型 FEA と HARP 膜との間隔は約 2.6mm とし、HARP 膜厚は $15 \mu\text{m}$ とした。試作した磁界集束型平面撮像管の特性評価にあたっては、

表 2.1 磁界集束型平面撮像管および磁界集束系の仕様

画素数	640 × 480
画素サイズ	20 × 20 μm^2
スピント型FE数/画素	121
メッシュ電極電圧	700 V
HARP膜-スピント型FEA間距離	2.6 mm
HARP膜厚	15 μm
磁界集束系	
磁束密度(垂直方向)	0.125 T
磁束密度(垂直方向)の面内分布	$\leq 1 \%$
磁束密度(水平方向)成分	$\leq 0.3 \%$

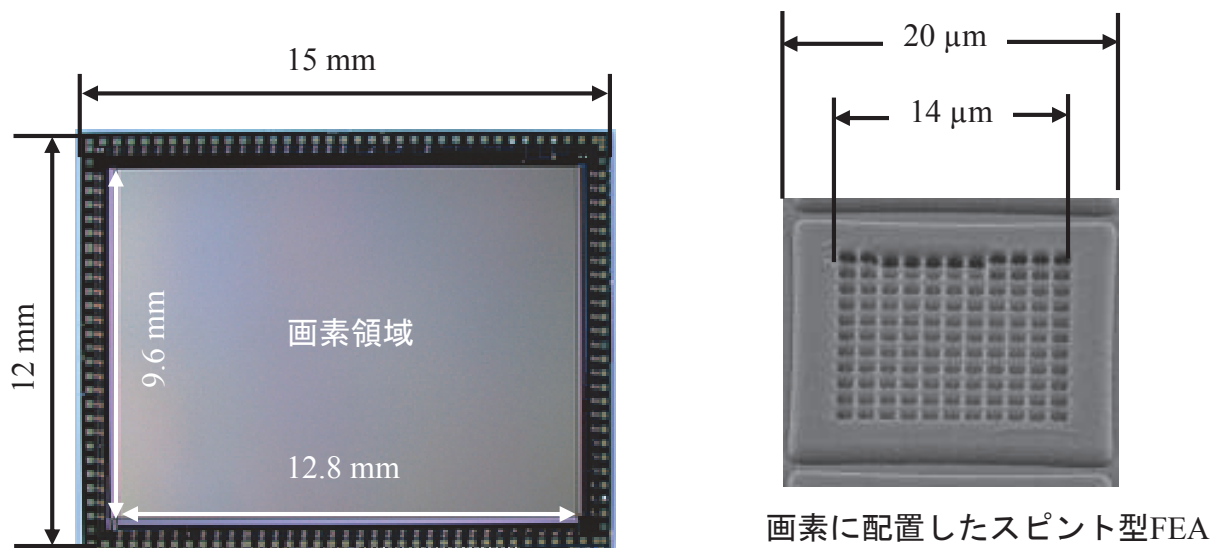
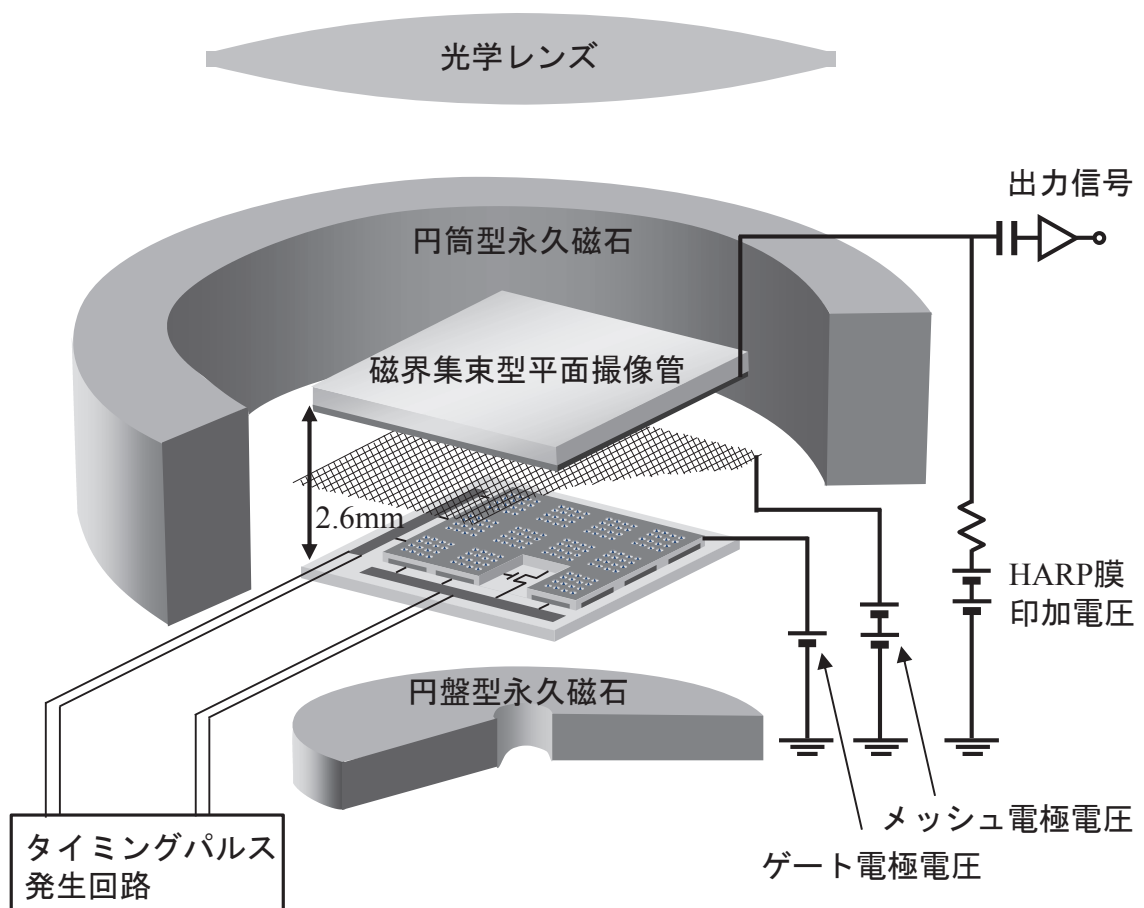


図 2.3 試作したスピント型 FEA の外観



(a) 評価用モノクロカメラ外観



(b) モノクロカメラ構成

図 2.4 評価用モノクロカメラと構成

図 2.4 に示す評価用モノクロカメラを用いた。スピント型 FEA は NTSC(National Television System Committee)規格で駆動し(1 画素当たりの駆動時間約 80ns), メッシュ電極には 700V, スピント型 FEA のゲート電極には 60V, HARP 膜には最大で 1550V を印加した。試作した磁界集束型平面撮像管では, 月明かり程度の明るさで (被写体照度約 0.3 lux, 光学レンズの絞り値 F1.2), 図 1.11 に示すようにノイズの少ない鮮明な映像を得ることができた。以下に試作した磁界集束型平面撮像管で得られた主要な撮像特性について述べる。

2.2.1 感度

一定光量の青色光を HARP 膜に照射したときの, 出力信号電流と HARP 膜印加電圧との関係⁷⁾(感度特性)を図 2.5 に示す。HARP 膜の印加電圧を高めていくと, 出力信号電流はいったん飽和した後, 約 1200V 以上で急激に増加し, 約 1550V で 200 倍の電荷増倍率 (通常の CCD の 30 倍以上の感度に相当) が得られた。これは, 同じ厚さの HARP 膜を適用した撮像管での特性とほぼ一致しており, 平面撮像管でも HARP 膜に由来する超高感度が安定に得られることが確認できた。

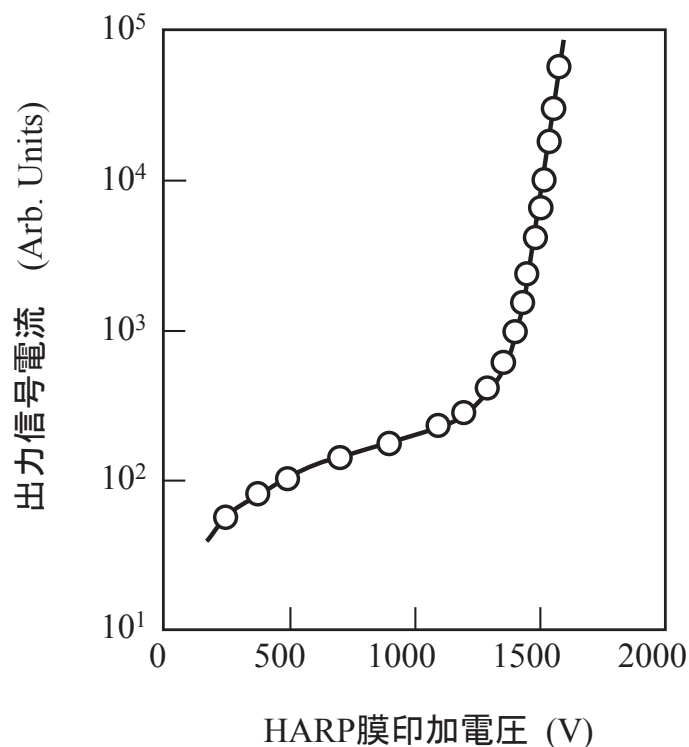


図 2.5 出力信号電流と HARP 膜印加電圧との関係

2.2.2 解像度

試作した磁界集束型平面撮像管の振幅変調度⁷⁾を図 2.6 に示す。振幅変調度は、線密度の異なる白と黒の縦縞からなるパターンを HARP 膜上に投影したときの白および黒からの出力信号の差を、線密度が小さいとき (約 4.2 lp/mm) の出力の差分で割った値で定義した。画素サイズに相当する線幅 20 μ m (線密度 25 lp/mm) のパターンを投影した時の振幅変調度は約 56%で、画素数に相当する良好な解像度を得ることができた。また、画面内での解像度の一様性も良好であった。

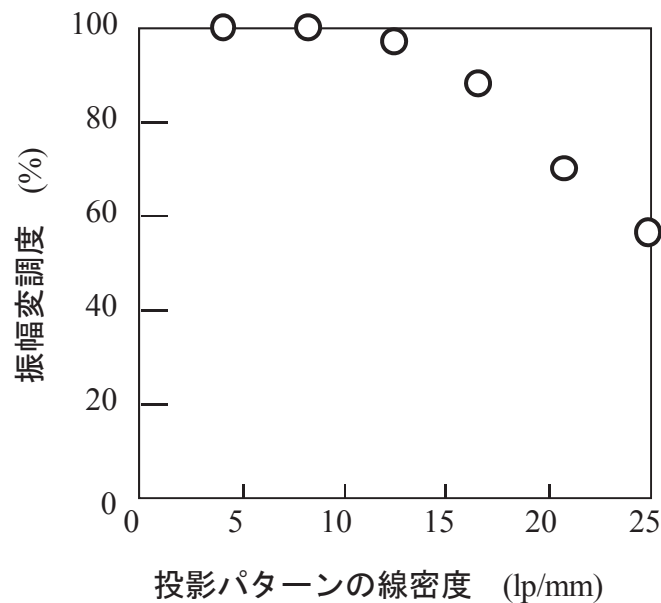


図 2.6 解像度特性

2.2.3 出力映像の輝度ムラ

前述したように平面撮像管においては、HARP 膜の蓄積電荷量以上の放射電子が HARP 膜へと到達する必要がある。ある画素において HARP 膜へと到達する放射電子量が HARP 膜の蓄積電荷量を下回る場合、その画素では HARP 膜の蓄積電荷の一部を読み残してしまうため、出力映像信号が低下する。HARP 膜へと到達する放射電子量が HARP 膜の蓄積電荷を下回る画素の割合が増えるほど、出力映像に発生する輝度のバラつき (出力信号電流の画素間のバラつきのこと。本論文では輝度ムラと呼ぶ) は顕著となる。

試作した磁界集束型平面撮像管のスピント型 FEA からの平均放射電流と撮像例との関係を図 2.7 に示す。映像信号の白レベルを規定する基準信号電流は 0.2 μ A に



(a) 平均放射電流 $6.6\mu\text{A}$



(b) 平均放射電流 $4.6\mu\text{A}$



(c) 平均放射電流 $3.1\mu\text{A}$



(d) 平均放射電流 $2\mu\text{A}$



(e) 平均放射電流 $1.26\mu\text{A}$



(f) 平均放射電流 $0.73\mu\text{A}$

図 2.7 スピント型 FEA からの平均放射電流と撮像例

設定し、放射電流は計 1600 画素から同時に電子を放射した際の平均電流値を画素数 (1600 画素) で割って求めた。平均放射電流が $2\mu\text{A}$ を上回る場合、出力映像に輝度ムラはほとんど確認できなかった。また、放射電流の時間変動による出力映像への影響も認められなかった。これは HARP 膜に蓄積された正孔数 (電荷量) 以上の放射電子が HARP 膜へと到達し、出力映像信号は HARP 膜の蓄積電荷量によって決まることを示している。一方、画素あたりの平均放射電流が $2\mu\text{A}$ を下回ると出力映像に輝度ムラが顕著に発生した。磁界集束型平面撮像管のスピント型 FEA と HARP 膜との間に配置されたメッシュ電極は開口率が約 45% である。よってメッシュ電極の開口を通り HARP 膜へ向かう放射電流の平均値は $0.9\mu\text{A}$ (スピント型 FEA からの平均放射電流が $2\mu\text{A}$ の場合) と算出される。HARP 膜に蓄積される最大の電荷量は基準信号電流 $0.2\mu\text{A}$ に相当するため、HARP 膜へと向かう放射電子量は蓄積電荷量を上回っているが、放射電子量の低下とともに出力映像には輝度ムラが顕著に発生する。この理由の一つにはスピント型 FEA からの放射電流が画素ごとにバラついていることが挙げられる。

HARP 膜全域に一定光量の光を入射したときの出力信号電流の画素間のバラつきとスピント型 FEA のゲート電極電圧との関係を図 2.8 に示す。入射光量は、出力映像信号の白レベルの 50% (出力信号電流 $0.1\mu\text{A}$ に相当) とし、出力信号電流の画素間のバラつきは、出力信号電流の画素間の変位量 (振幅) の 2 乗平均平方根 (RMS) を出力信号電流 ($0.1\mu\text{A}$) で割った値と定義した。光入射時の出力信号電流の画素間の

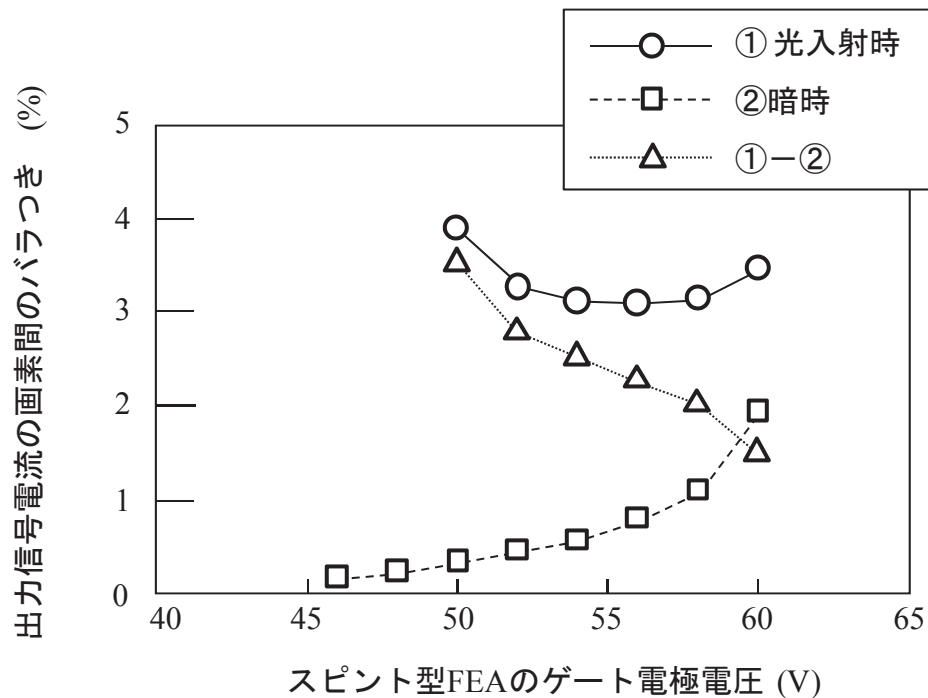


図 2.8 出力信号電流の画素間のバラつき

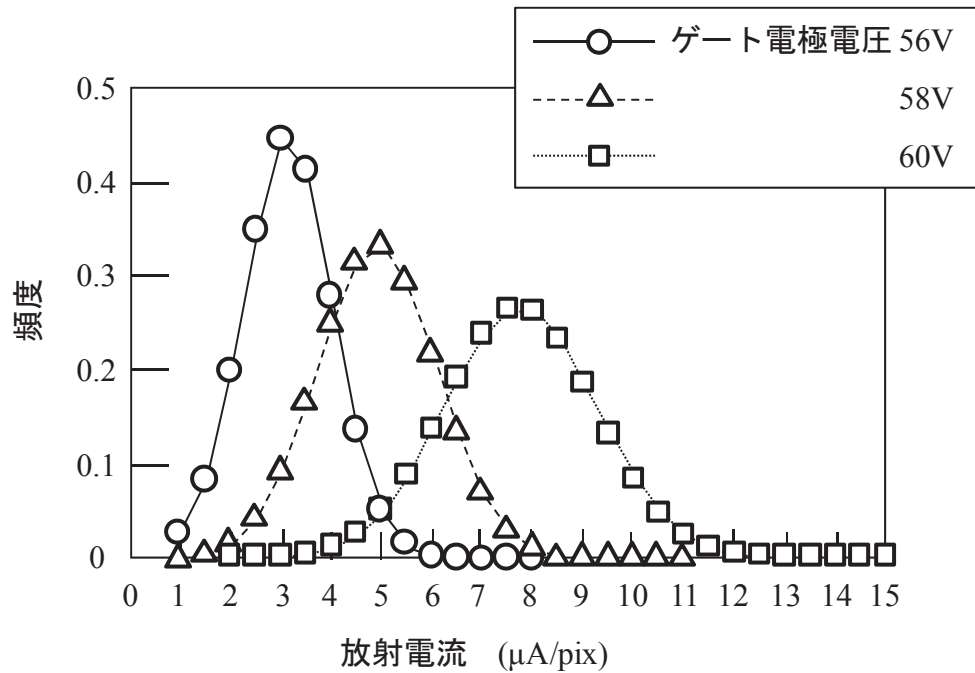


図 2.9 放射電流の画素間のバラつき

バラつきはゲート電極電圧が 56V のときに最小となった。ゲート電極電圧を 56V より下げたときの出力信号電流の画素間バラつきの増加は放射電流の減少によるもの、ゲート電極電圧を 56V よりも上げたときの出力信号電流の画素間バラつきの増加は、暗時（入射光無し）の出力信号電流の画素間バラつきの増加によるものであり、後者は、スピント型 FEA の駆動電圧の上昇に伴って増加したアクティブマトリクス駆動回路のスイッチングノイズが容量性結合によって出力信号に混入したためと考えられる。一方、図 2.9 には画素ごとの放射電流分布とゲート電極電圧との関係を示す。画素ごとの放射電流分布は、母数 441 画素の各放射電流を測定し、その平均値および標準偏差から求めた正規分布である。各放射電流は、単一画素から周期 1/60s, Duty 比 4.8% で電子を放射させた際の平均放射電流を測定し、ピーク値に換算して求めた。スピント型 FEA の放射電流分布はゲート電極電圧が低下するほど減少傾向にあり、ゲート電極電圧が 56V での放射電流の最小値は約 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ であった。前述したように、ゲート電極電圧を 56V より下げると出力信号電流の画素間バラつきが増加することから、スピント型 FEA からの放射電流の最小値が $1\mu\text{A}/\text{pix}$ を下回ると出力信号電流の画素間バラつきは増加する。スピント型 FEA からの放射電流の最小値が $1\mu\text{A}/\text{pix}$ のとき、HARP 膜へと向かう放射電流の最小値は $0.45\mu\text{A}/\text{pix}$ と算出される（メッシュ電極の開口率約 45%）。HARP 膜の蓄積電荷量は出力信号電流 $0.1\mu\text{A}$ に相当するため、HARP 膜へと向かう放射電子量の最小値は蓄積電荷量を上回っている。

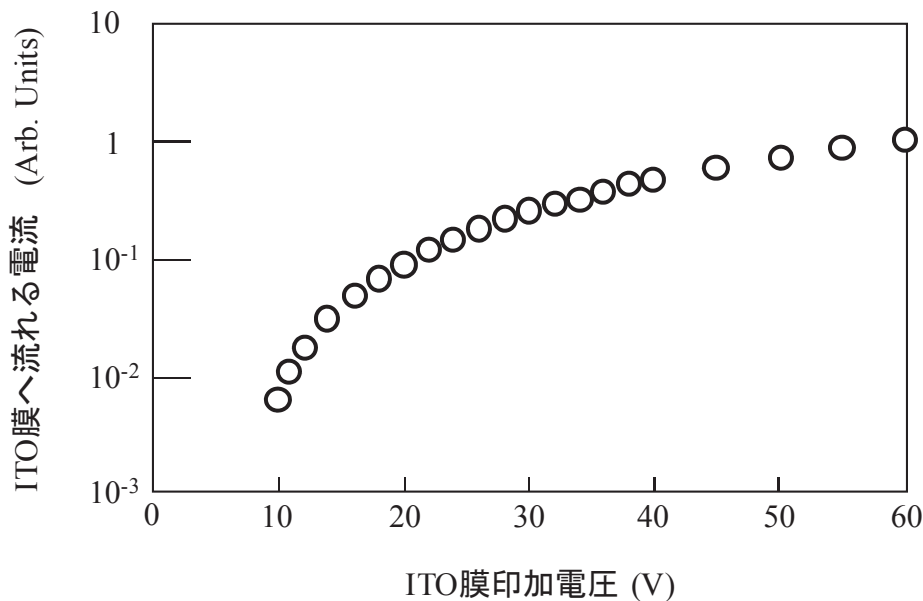


図 2.10 電子ビームアクセプタンスカーブ

しかし、ゲート電極電圧を 56V よりも下げると出力信号電流の画素間のバラつきは増加傾向にあった。この理由には、スピント型 FEA から放射される電子の、HARP 膜へと向かう方向（垂直方向とする）の速度分散が挙げられる。すなわち、メッシュ電極（700V）と HARP 膜（面電位 $V_t = 11.29V$: 2.1 式より求めた計算値）との間の減速電界において、速度分布を持つ電子ビームのうち比較的低速な電子は、HARP 膜へ到達する前に失速しメッシュ電極へと戻るため、HARP 膜の蓄積電荷の読み出しに寄与することができない。そのため、出力信号電流の画素間のバラつきが顕著となる放射電子量の最小値と HARP 膜の蓄積電荷量との間に差異が生じたと考えられる。図 2.10 には電子ビームアクセプタンスカーブ⁹⁻¹⁰⁾ (HARP 膜の面電位と出力信号電流との関係) を示す。これは、HARP 膜の面電位を直接測定することはできないため、HARP 膜の代わりに透明電極である ITO (Indium Tin Oxide) 膜を用いて、ITO に印加する電位を等価的に HARP 膜の面電位とし、ITO へ流れる電流 (ITO 電流) を出力信号電流として測定した結果である。ITO 電流は ITO 電圧が 60V における ITO 電流で正規化した。ITO 電圧の低下に伴い、ITO 電流は低下する。これは電子が発散角を持ってスピント型 FEA の陰極から放射されることに起因する放射電子の垂直方向の速度分散を裏付けていると考えられる。

以上の結果より、平面撮像管において、出力映像に輝度ムラがほぼ見られず、高品質な映像を取得するための指標として、スピント型 FEA からの放射電流の最小値が $1\mu A/pix$ 以上であることと設定した。

2.2.4 磁界集束系の課題

上述した磁界集束型平面撮像管の主要な撮像特性から、HARP 膜に由来する超高感度が安定に得られることや、面内分布が均一な磁界を平面撮像管に印加することにより、画面全体で良好な解像度が得られること、輝度ムラがほぼ見られず高品質な映像が得られることを確認した。また、スピント型 FEA からの放射電流の最小値が $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上であることを出力映像に輝度ムラがほぼ見られず、高品質な映像を取得するための指標と設定した。しかし、磁界集束系においては、磁束密度の面内分布を均一にするため、平面撮像管の周囲に配置する永久磁石は円筒型永久磁石の直径が 90mm と大きく、円筒型と円盤型の 2 つの永久磁石を合わせた総重量は 600g になる。したがって、永久磁石が平面撮像管の特徴の一つである小型化を阻む要因であり、面内均一性を保ちつつ、いかに永久磁石を小型化できるかが課題である。

2.3 電子ビーム電界集束系を適用した平面撮像管

磁界集束型平面撮像管では良好な解像度や輝度ムラの少ない高品質な映像が得られるが、その一方で、集束系に用いる永久磁石が大きく、カメラの小型・軽量化を阻む要因になっていることを前節で述べた。そこで、電子ビーム磁界集束系に比べて格段に小さな集束系をもつ電界集束型平面撮像管の実現を目指し、電子の軌道を電界の働きによって曲げることで空間広がりを抑制する集束電極をスピント型 FEA と一体化した電界集束スピント型 FEA および電界集束スピント型 FEA を用いた平面撮像管の開発に着手した。

これまでに、電界集束スピント型 FEA として、集束電極をスピント型 FEA の上に積層した構造(図 2.11)や集束電極をスピント型 FEA と同一面上に配置した平面構造(図 2.12)等が提案されている¹¹⁻¹³⁾。いずれの場合も集束電極には、電子を放射するためにゲート電極に印加する電圧よりも低い電圧を印加し、両電極の電位差によって集束電極の近傍に形成される空間電界の働きにより、発散角を持って放射される電子の軌道を曲げ、電子ビームの空間広がり抑制するものである。本論文では、電子ビームの空間広がり抑制する働きを持つ空間電界を静電レンズと呼称する。これまでに提案された電界集束スピント型 FEA では、静電レンズの働きによって電子ビームの空間広がり抑制することはできるが、ゲート電極電圧より低い電圧が印加された集束電極が周囲に形成する電界が、静電レンズを形成すると同時にスピント型 FEA の陰極先端の電界集中を弱め、放射される電子ビーム量が著しく減少するという問題があった。電子ビーム量の著しい減少により、その最小値が $1\mu\text{A}/\text{pix}$ を

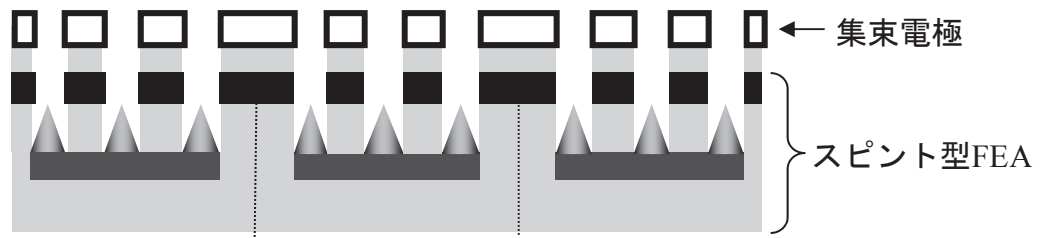


図 2.11 集束電極をスピント型 FEA の上に積層した構造の電界集束スピント型 FEA

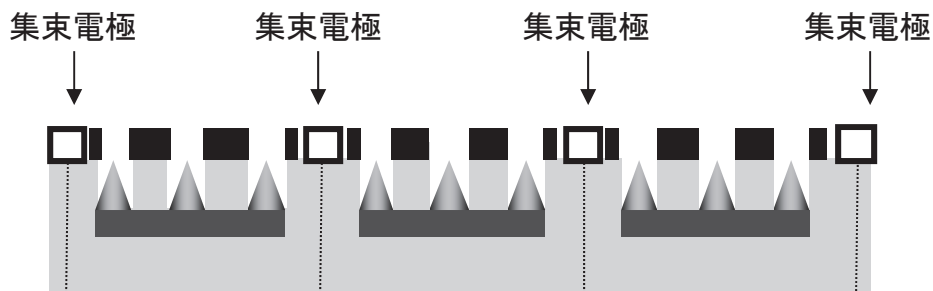


図 2.12 集束電極をスピント型 FEA と同一面上に配置した構造の電界集束スピント型 FEA

下回る画素の割合が増加すると出力映像に輝度ムラが顕著に発生する。そこで、静電レンズによる電子ビームの集束と陰極先端の電界集中減衰の抑制とを両立する電界集束スピント型 FEA の電極構造を検討し、ゲート電極を厚くして、陰極先端と集束電極との距離を離れた構造の電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した蛍光表示管と平面型撮像管を試作した¹⁴⁾。

2.3.1 電界集束スピント型 FEA の電極構造の基礎検討¹⁴⁾

静電レンズによる電子ビームの集束と陰極先端の電界集中減衰の抑制とを両立する電界集束スピント型 FEA の電極構造を検討した。陰極先端の電界集中減衰を抑制する手法としては次の 2 つの方法が考えられる。

- ・ゲート電極を厚くして、陰極先端と集束電極との距離を離す
- ・ゲート電極と集束電極との間の層間絶縁膜を厚くして、陰極先端と集束電極との距離を離す

但し、いずれの手法においても、陰極から放射される電子のうち発散角の大きな

電子は厚膜化するゲート電極または層間絶縁膜へと捕獲され、HARP 膜へと向かう電子ビーム量は陰極先端から放射される電子量と比べ減少することが予想される。また、ゲート電極や層間絶縁膜を厚くすることにより、電子ビームの集束性能へ影響を与える可能性も考慮する必要がある。そこで、ゲート電極の厚さ(L_g)、集束電極の厚さ(L_f)および層間絶縁膜の厚さ(L_i)と電子ビーム量および HARP 膜上での電子ビーム広がりとの関係を電子軌道解析により求めた。

電界集束型平面撮像管における放射電子特性および電子ビーム広がり解析には

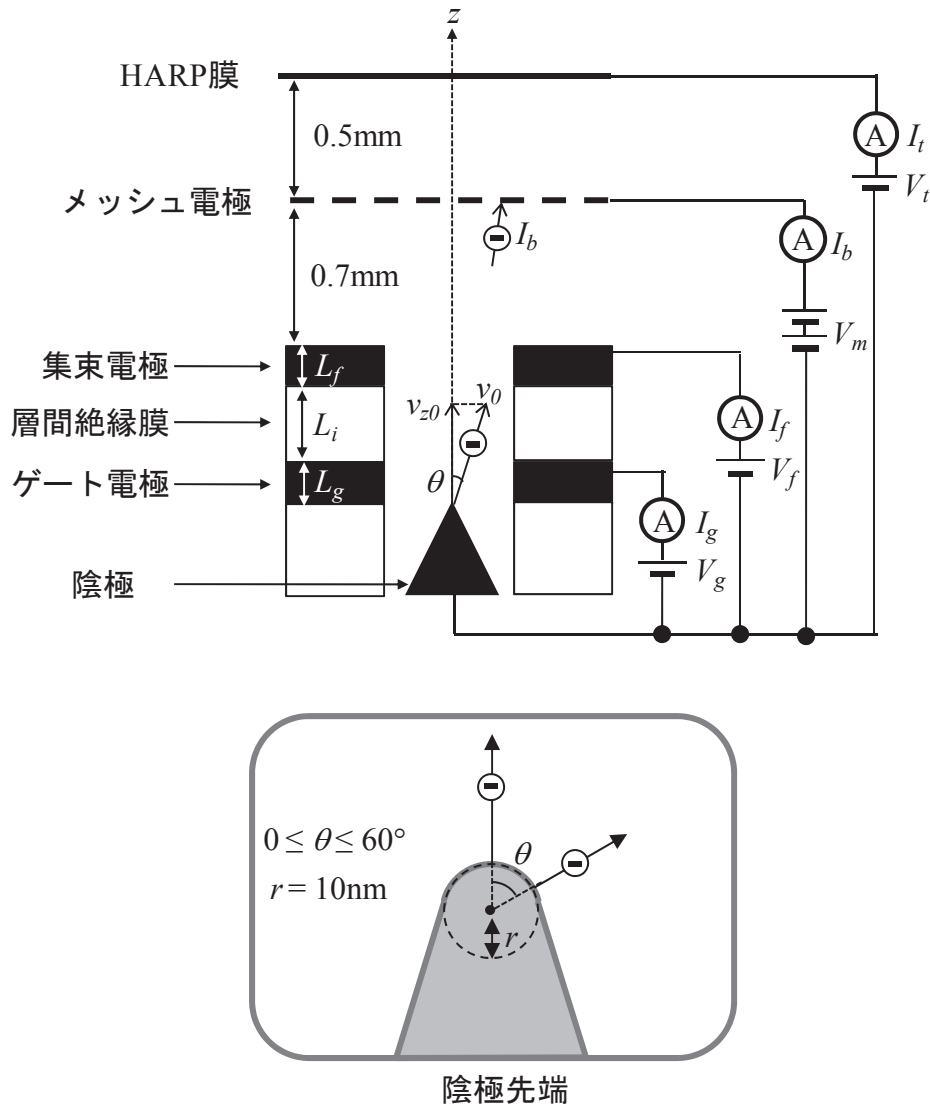


図 2.13 電界集束スピント型 FE を適用した平面撮像管の電子軌道解析モデル

電子軌道解析プログラム(COBHAM 社 OPERA3D)を用いた。本プログラムではポアソン方程式や運動方程式からなる支配方程式に 3 次元有限要素法¹⁵⁾を適用し 3 次元空間の静電場および電子軌道を算出する。図 2.13 に電界集束スピント型 FE を適用した平面撮像管の電子軌道解析モデルを示す。スピント型 FE とメッシュ電極との間隔およびメッシュ電極と HARP 膜との間隔はそれぞれ 0.7mm および 0.5mm と設定した。電界集束スピント型 FE のゲート電極、集束電極および層間絶縁膜の厚さは任意に設定することとし、開口直径は 1.0 μm とした。ゲート電極およびメッシュ電極の印加電圧はそれぞれ 60V および 500V とし、集束電極の印加電圧(V_f)は HARP 膜上での電子ビームの空間広がり最小となる電圧値に設定した。陰極先端の曲率半径は 10nm とし、電子は球状の陰極先端表面から垂直に出射する。出射時の電子の発散角の範囲は 0°から 60°までと仮定した。陰極先端表面における電子の初速度 v_0 は次式に示すマクスウェル分布の平均値と仮定した。

$$v_0 = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} \quad (2.2)$$

$$v_{z0} = v_0 \cos\theta \quad (0 \leq \theta \leq 60^\circ) \quad (2.3)$$

ここで k はボルツマン定数、 T は陰極温度[K]、 m_e は電子の質量[kg]、 v_{z0} は電子の初速度の z 成分、 θ は電子の発散角[°]をそれぞれ表す。電子軌道は 2.2 式および 2.3 式を基に、ポアソン方程式や運動方程式からなる支配方程式に 3 次元有限要素法を適用して算出する。また、放射される電子には、Fowler-Nordheim 式¹⁶⁾に基づき、スピント型 FE の陰極先端の電界強度に依存した電流密度の重みづけを行うものとする。電子ビーム量は、電子軌道がある平面と交わるときの、その平面における電流密度分布を積分することで求め、HARP 膜上での電子ビームの空間広がり、電流密度分布の半値幅として求めることとした。

ゲート電極厚(L_g)を 0.2 μm から 0.9 μm へと厚くしていった場合の電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)および電子ビーム広がり電子軌道解析結果を図 2.14 に示す。電界集束型 FE の集束電極厚(L_f)は 0.2 μm 、層間絶縁膜厚(L_i)は 0.3 μm とした。図 2.14 に示す電子ビーム量(I_b)および電子ビーム広がり、 $L_g = 0.2\mu\text{m}$ における電子ビーム量(I_b)および電流密度分布の半値幅を基準とした相対値で示した。電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)は、ゲート電極厚(L_g)を 0.2 μm から厚くすると増加し、 $0.5 \leq L_g \leq 0.7\mu\text{m}$ の範囲で最大となり、 $L_g = 0.2\mu\text{m}$ の場合と比較して約 8 倍となった。さらに L_g を厚くすると、陰極から放射される電子のうち

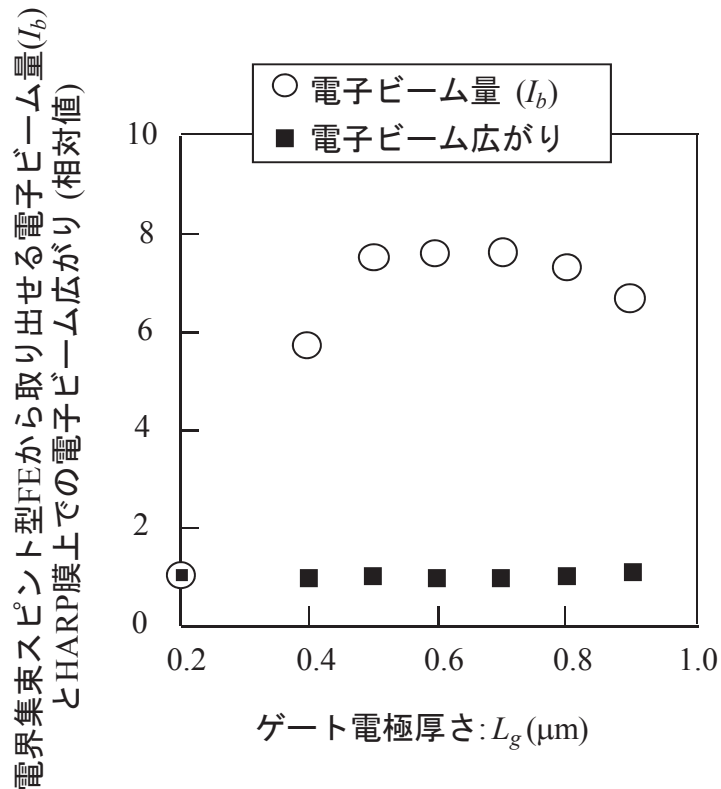


図 2.14 ゲート電極厚さと集束時の電子ビーム量および電子ビーム広がりとの関係

発散角の大きな電子がゲート電極等に遮られ、取り出せる電子ビーム量(I_b)は減少する事がわかった。放射電子の広がりとは $0.2 \leq L_g \leq 0.9 \mu\text{m}$ の範囲で同程度であり、ゲート電極の厚さを適切に設定する事で電界集束時の電子ビーム量の低下を抑制できることがわかった。

層間絶縁膜厚(L_i)を $0.3 \mu\text{m}$ から $1.0 \mu\text{m}$ へと厚くしていった場合の電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)および電子ビーム広がりとの電子軌道解析結果を図 2.15 に示す。電界集束型 FE のゲート電極厚(L_g)および集束電極厚(L_f)は $0.2 \mu\text{m}$ とした。図 2.15 に示す電子ビーム量(I_b)および電子ビーム広がりとは、 $L_i = 0.3 \mu\text{m}$ における電子ビーム量(I_b)および電流密度分布の半値幅を基準とした相対値で示した。電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)は、層間絶縁膜厚(L_i)を $0.3 \mu\text{m}$ から厚くすると増加し、 $0.7 \leq L_i \leq 0.9 \mu\text{m}$ の範囲で最大となり、 $L_i = 0.3 \mu\text{m}$ の場合と比較して約 2.5 倍となった。放射電子の広がりとは $0.3 \leq L_i \leq 1.0 \mu\text{m}$ の範囲で同程度であった。

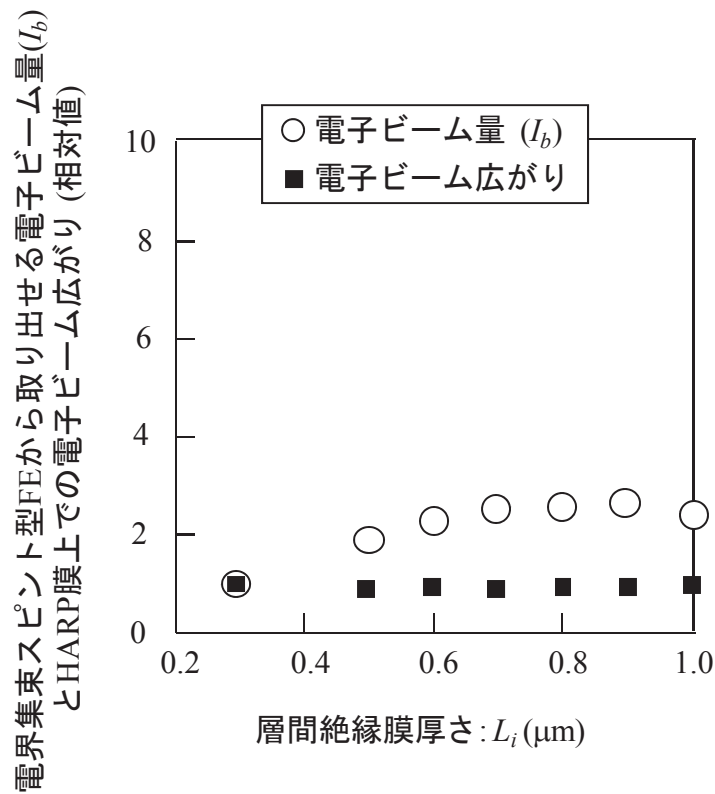


図 2.15 層間絶縁膜厚さと集束時の電子ビーム量および電子ビーム広がりとの関係

以上の電子軌道解析結果より、電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量を増加させる手段として、ゲート電極を厚くする方法がより効果的であることがわかった。これは層間絶縁膜を厚くする場合と比べて、ゲート電極を厚くした電界集束スピント型 FE は、陰極先端の電界集中減衰を抑制する効果がより強く得られたためと考えられる。

2.3.2 基礎実験用電界集束スピント型 FEA¹⁴⁾

電子軌道解析結果を基に、2種のゲート電極厚の電界集束スピント型 FEA を試作し、放射電子特性および電子ビーム広がり特性を評価した。2種のゲート電極の厚さ(L_g)はそれぞれ、磁界集束型平面撮像管に用いた FEA と同じ $0.2\mu\text{m}$ および約 3 倍に厚膜化した $0.5\mu\text{m}$ とした。2種の FEA のいずれも、集束電極の厚さ(L_f)は $0.2\mu\text{m}$ 、層間絶縁膜の厚さ(L_i)は $0.3\mu\text{m}$ とした。画素サイズは $20\times 20\mu\text{m}^2$ 、画素内の FEA 配置エリアは $15\times 15\mu\text{m}^2$ 、画素あたりの FE 数は 121 個とした。試作したゲート電極厚 $0.5\mu\text{m}$ の電界集束スピント型 FEA の走査型電子顕微鏡観察像を図 2.16 に示す。ゲート電極および集束電極の開口直径はともに約 $1\mu\text{m}$ である。試作した電界集束スピント型 FEA の評価には、電界集束スピント型 FEA を適用した平面型撮像管および電界集束スピント型 FEA と蛍光体を塗布したガラス基板とを対向配置させた評価系を用いた。図 2.17 に蛍光体を用いた電界集束スピント型 FEA の評価系を示す。ゲート電極および蛍光体に印加する電圧はそれぞれ 60V、2kV とした。電界集束スピント型 FEA-蛍光体間の距離は約 1.33mm とした。図 2.18 にアノード電流-集束電極電圧特性を示す。アノード電流は計 120 画素から同時に電子を放射した際の平均電流値を画素数(120 画素)で割って求めた。ゲート電極厚(L_g)が $0.2\mu\text{m}$ および $0.5\mu\text{m}$ のいずれの場合においても、アノード電流(I_a)は集束電極電圧(V_f)の減少とともに減少する傾向にあった。しかし、 $L_g = 0.5\mu\text{m}$ における I_a の減少は $L_g = 0.2\mu\text{m}$ に対して緩やかであり、例えば $V_f = 15\text{V}$ におけるアノード電流(I_a)を比較すると、 $0.18\mu\text{A}/\text{pix}$ ($L_g = 0.5\mu\text{m}$)、 $0.037\mu\text{A}/\text{pix}$ ($L_g = 0.2\mu\text{m}$)である。従って、ゲート電極厚(L_g)を $0.2\mu\text{m}$ から $0.5\mu\text{m}$ へと厚膜化することによりアノード電流(I_a)は約 4.8 倍向上する結果が得られた。図 2.19 に陰極電流-集束電極電圧特性を示す。ゲート電極厚 $0.5\mu\text{m}$ および $0.2\mu\text{m}$ の電界集束スピント型 FEA の陰極電流(I_c)は、両者ともに集束電極電圧の低下とともに減少するが、

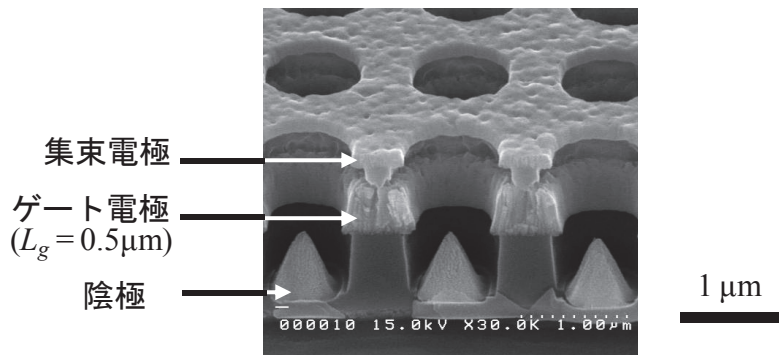


図 2.16 電界集束スピント型 FEA の走査型電子顕微鏡観察像

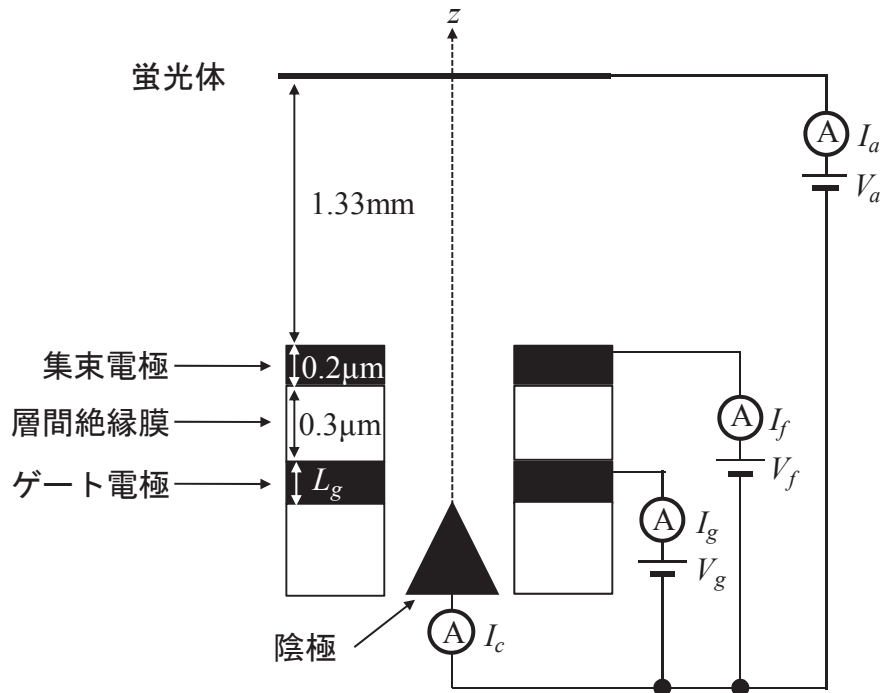


図 2.17 蛍光体を用いた電界集束スピント型 FEA の評価系

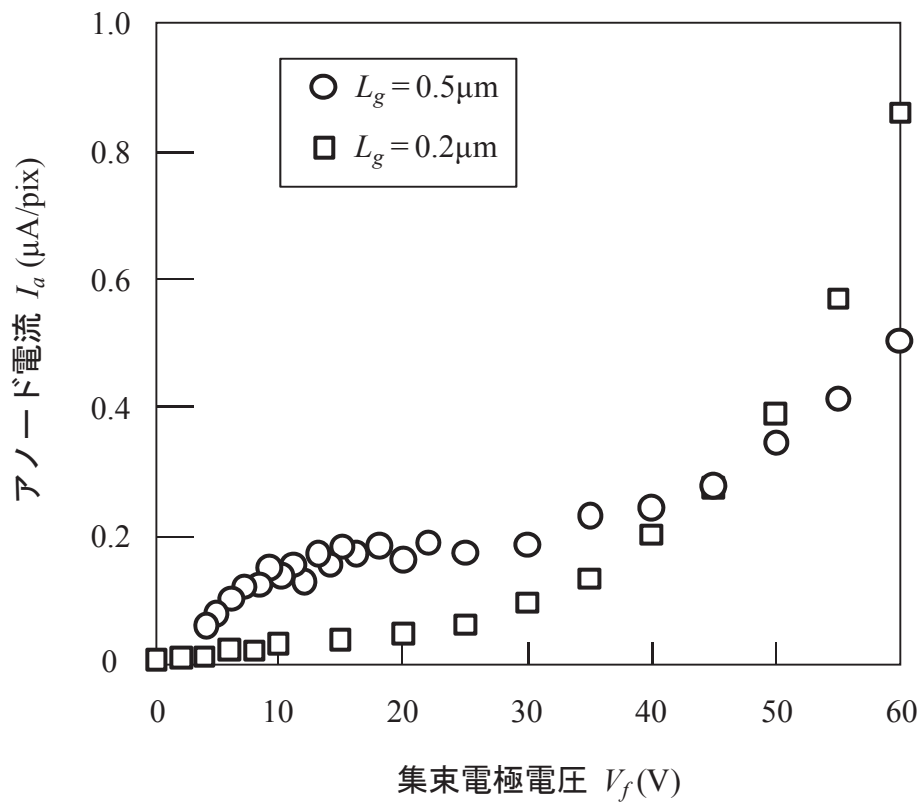


図 2.18 アノード電流–集束電極電圧特性

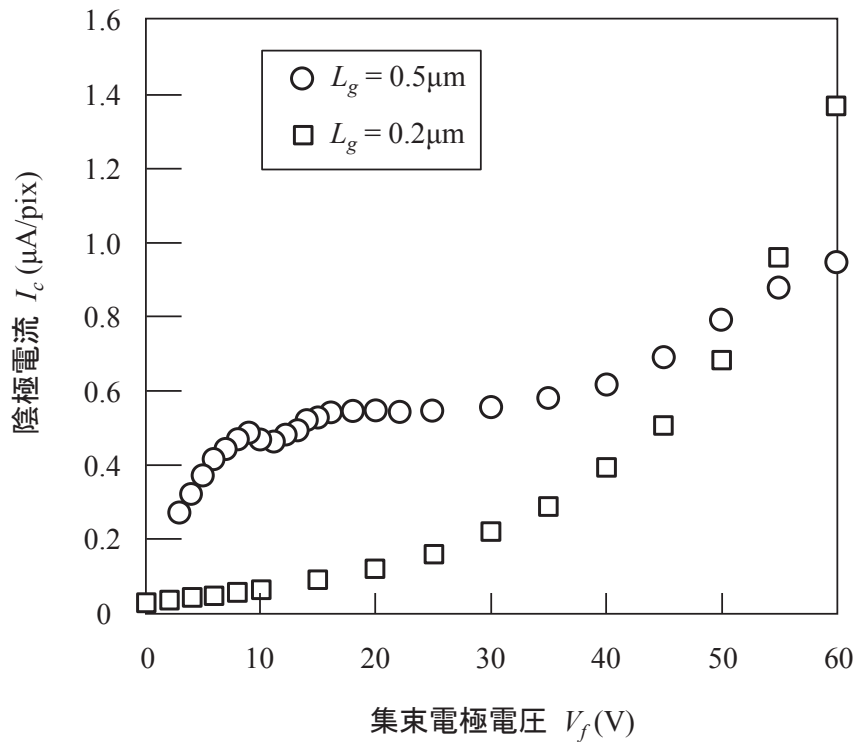


図 2.19 陰極電流-集束電極電圧特性

ゲート電極厚 $0.5\mu\text{m}$ における I_c の減少はゲート電極厚 $0.2\mu\text{m}$ に比べて緩やかである。以上の結果より、ゲート電極を厚くすることにより、電界集束時の陰極先端の電界集中減衰を抑制する効果が得られ、アノード電流が増加することを確認できた。しかし、アノード電流は、平面撮像管において出力映像に輝度ムラの影響がほぼ見られず、高品質な映像を取得するための目標値である最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上を満たすことはできなかった。

電子ビーム広がり特性は、電子放射により発光した蛍光体の輝度分布から発光幅を測定する事により求めた。蛍光体の発光幅と集束電極電圧との関係を図 2.20 および図 2.21 に示す。発光幅は、集束電極電圧をゲート電極電圧と同じ 60V から下げていくと縮小し、集束電極電圧が約 13V のときに最小値の約 $50\mu\text{m}$ となった。この時の電子ビーム広がり、集束電極とゲート電極とを同電位(60V)にした場合と比較して約 $1/6$ に広がり抑制することができたが、画素サイズ $20 \times 20\mu\text{m}^2$ よりも大きかった。

次に、ゲート電極厚 $0.5\mu\text{m}$ の電界集束スピント型 FEA を適用した平面型撮像管を試作した。画素数は 100×75 、画素サイズは $20 \times 20\mu\text{m}^2$ とした。HARP 膜-メッシュ電極間距離は 0.5mm 、メッシュ電極-電界集束スピント型 FEA 間距離は 0.7mm

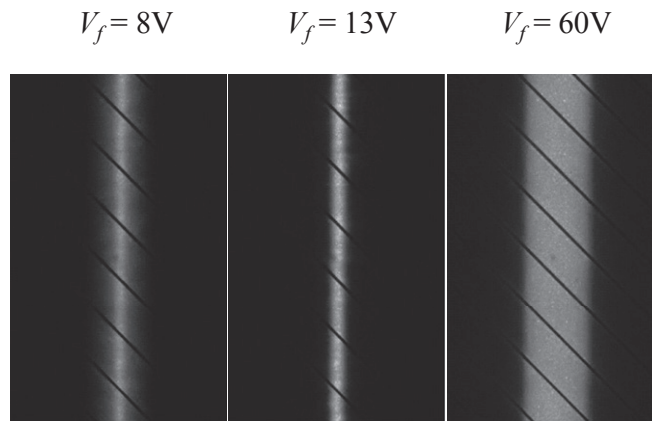


図 2.20 蛍光体の発光像と集束電極電圧

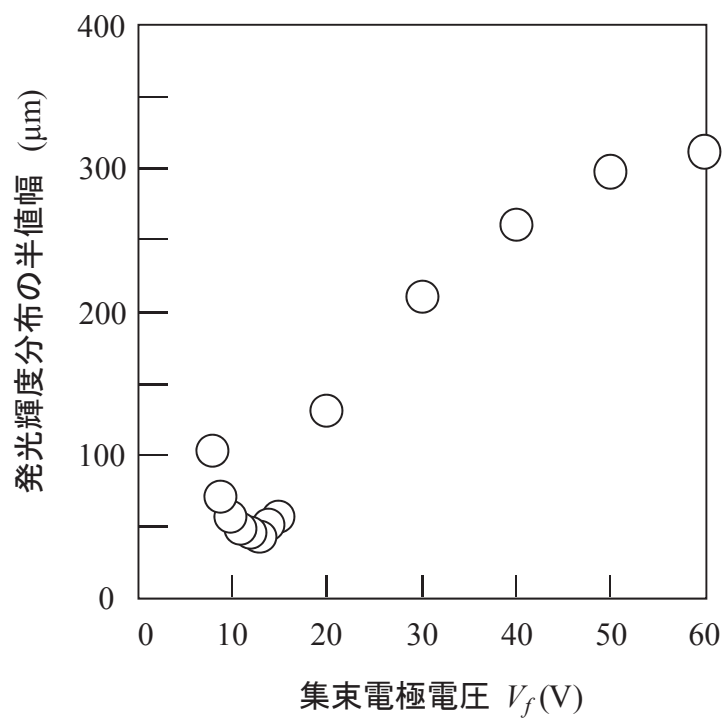


図 2.21 蛍光体の発光輝度分布の半値幅と集束電極電圧

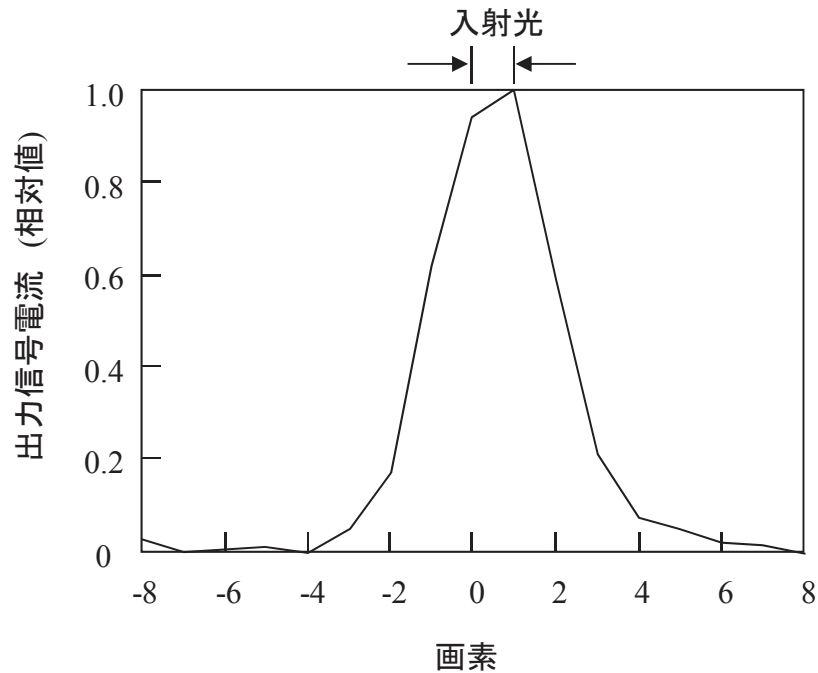
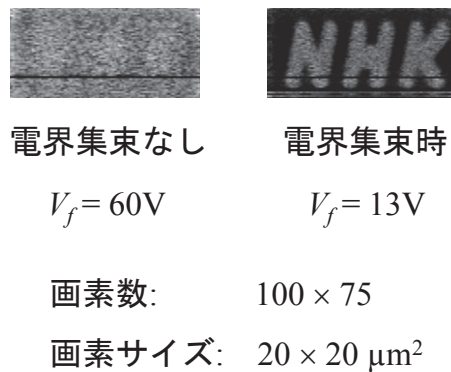
図 2.22 平面撮像管に $40\mu\text{m}$ 幅の光を入射させたときの出力信号電流

図 2.23 基礎実験用電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の撮像例

とした．電界集束スピント型 FEA は NTSC 規格(1 画素当たりの駆動時間約 80ns)で駆動した．平面型撮像管に $40\mu\text{m}$ 幅の光を入射させたときの出力信号を図 2.22 に示す．出力信号の幅は集束電極電圧が 13V の時に最小となった．この集束電極電圧は，蛍光体を用いた評価における電圧値と同じであった．入射光は図 2.22 における画素 0 と 1 に入射させた．出力信号は入射光(画素 0, 1)に対し約 3 画素広がっていることから，電子ビーム広がりとは約 $60\mu\text{m}$ であると見積もった．電子ビーム広がりとは蛍光体の発光幅の測定結果と同様，画素サイズを上回った．試作した平面撮像管の撮像例を図 2.23 に示す．被写体は文字“NHK”である．集束電極電圧が 60V の場合，文字を

確認する事ができないが、集束電極電圧が 13V の場合、文字”NHK”を確認する事が出来た。これにより、電界集束型平面撮像管において電子ビームの集束効果を確認する事が出来た。

2.3.3 電界集束系の課題と対策方針

試作した基礎実験用電界集束スピント型 FEA は、ゲート電極を厚くすることで、電界集束時の陰極先端の電界集中減衰を抑制し、電子ビーム量を向上させることができたが、その出力映像は磁界集束系を適用した平面撮像管と比べて画質が劣化していた。この理由としては以下が挙げられる。

- ・電界集束時の電子ビーム量の平均値は $0.18\mu\text{A/pix}$ であり、平面撮像管において出力映像に輝度ムラの影響がほぼ見られず、高品質な映像を取得するための目標値である最小値 $1\mu\text{A/pix}$ 以上を満たしていない。
- ・電子ビーム広がり(電流密度分布の半値幅)は約 $50\sim 60\mu\text{m}$ であり、画素サイズ ($20\times 20\mu\text{m}^2$) よりも大きい。

以下に電子ビーム量および電子ビーム広がり(電流密度分布の半値幅)の課題について対策方針を述べる。電子ビーム量については、ゲート電極を厚くすることによって電界集束時の減少を抑制する一定の効果が得られたものの、目標値を下回っていた。そこで、電界集束スピント型 FEA を微細化することで陰極先端の電界集中を高め、放射電子量を増やすこととした。ゲート電極の開口直径と陰極先端において同等の電界強度が得られるゲート電極電圧との関係を求めた計算モデルを図 2.24 に示す。電界強度の計算には以下に示す Becker の式¹⁷⁾を利用した。

$$E = \beta \cdot V_g \quad (2.4)$$

$$\beta = \frac{2}{r \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot d}{r}\right)} \quad (2.5)$$

2.4 式および 2.5 式において E は陰極先端の電界強度、 β は電界集中係数、 V_g はスピント型 FE のゲート電極電圧、 r は陰極先端の曲率半径、 d はゲート電極開口部の半径を表す。ゲート電極開口部の直径を $1.0\mu\text{m}$ から $0.1\mu\text{m}$ まで小さくしていった場合に、陰極先端において同一の電界強度が得られるゲート電極電圧の関係を求めた計算結果を図 2.25 に示す。但し、陰極先端の曲率半径は 10nm と仮定し、

ゲート電極開口部の直径が $1\mu\text{m}$ のときのゲート電極電圧を 60V と設定した．ゲート電極開口部の直径を小さくすると，陰極先端において同一の電界強度が得られるゲート電圧は減少し，開口部の直径を $0.5\mu\text{m}$ に微細化したゲート電極に約 51V 印加した場合の電界強度は，開口部直径 $1.0\mu\text{m}$ のゲート電極に 60V 印加した場合の電界強度とほぼ同じであった．

次に，計算結果を基に微細化したスピント型 FEA を試作した．ゲート電極の開口部直径は $1.0\mu\text{m}$, $0.8\mu\text{m}$, $0.6\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$ とした．図 2.26 に放射電流とゲート電極電圧

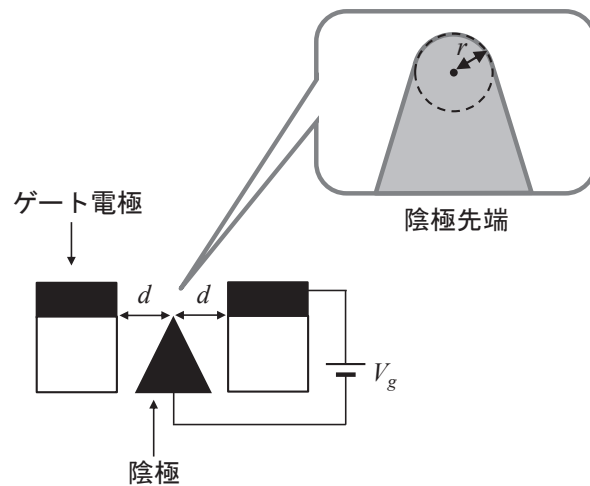


図 2.24 ゲート電極の開口径と陰極先端において同等の電界強度が得られるゲート電極電圧との関係を求める計算モデル

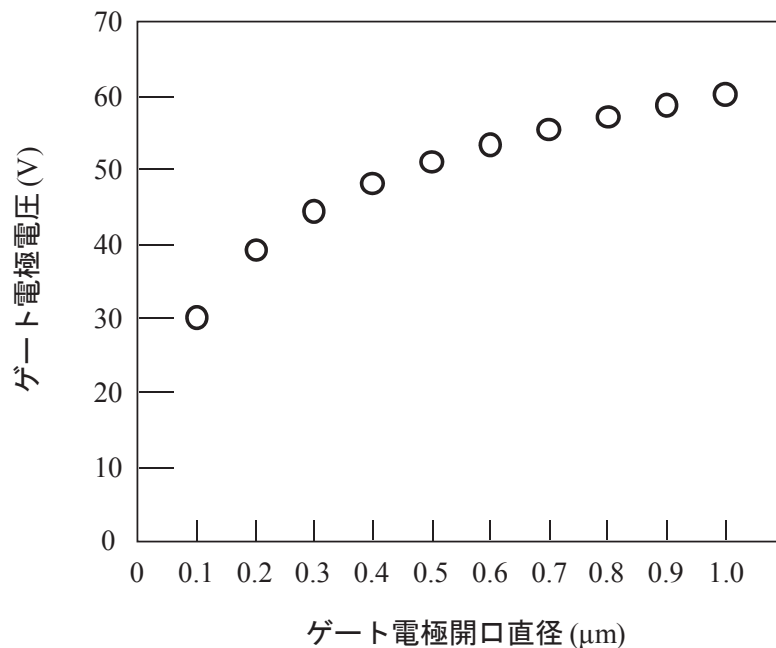


図 2.25 陰極先端において同一の電界強度が得られるゲート電極電圧とゲート電極開口直径との関係の計算値

との関係を表す。ゲート電極の開口直径を $1.0\mu\text{m}$ から小さくしていくと、同じ放射電流が得られるゲート電極電圧は減少していき、開口部直径が $0.5\mu\text{m}$ のゲート電極に 54V 印加した際の放射電流は、開口部直径が $1.0\mu\text{m}$ のゲート電極に 60V 印加した場合の放射電流とほぼ等しい結果が得られた。また、開口直径が $0.5\mu\text{m}$ の放射電子特性は、開口直径が $0.6\mu\text{m}$ の場合とほぼ同じであり、スピント型 FEA の微細化による放射電流の増加は飽和傾向にあることがわかった。以上より、電界集束スピント型 FEA の電子ビーム量を増加させるためには、FEA の微細化が有効である結果が得られた。但し、ゲート電極開口部の直径が $0.6\mu\text{m}$ を下回る微細化は、電子ビーム量の増加が飽和することが予想されるため、FEA の微細化はゲート電極開口直径 $0.6\mu\text{m}$ を限度とすることとした。

電子ビーム広がり(電流密度分布の半値幅)は約 $50\sim 60\mu\text{m}$ であり、画素サイズ($20\times 20\mu\text{m}^2$)よりも大きかった。電界集束系を用いて電子ビーム広がりをさらに抑制するためには、ゲート電極開口径と同一にしている集束電極開口を拡大することが有効であると考えられる。以下にその理由¹⁴⁾と集束電極開口部を拡大することによる効果を、電子軌道解析を用いて示す。電界集束スピント型 FEA は、その作製工程などに起因して形状がバラつくことが考えられる。FE 形状のバラつきによって、陰極先端を通り HARP 膜(または蛍光体)へと向かう垂直方向の軸上に静電レンズの中心が形成されない場合、電流密度分布の中で密度が最大となる電子群は、

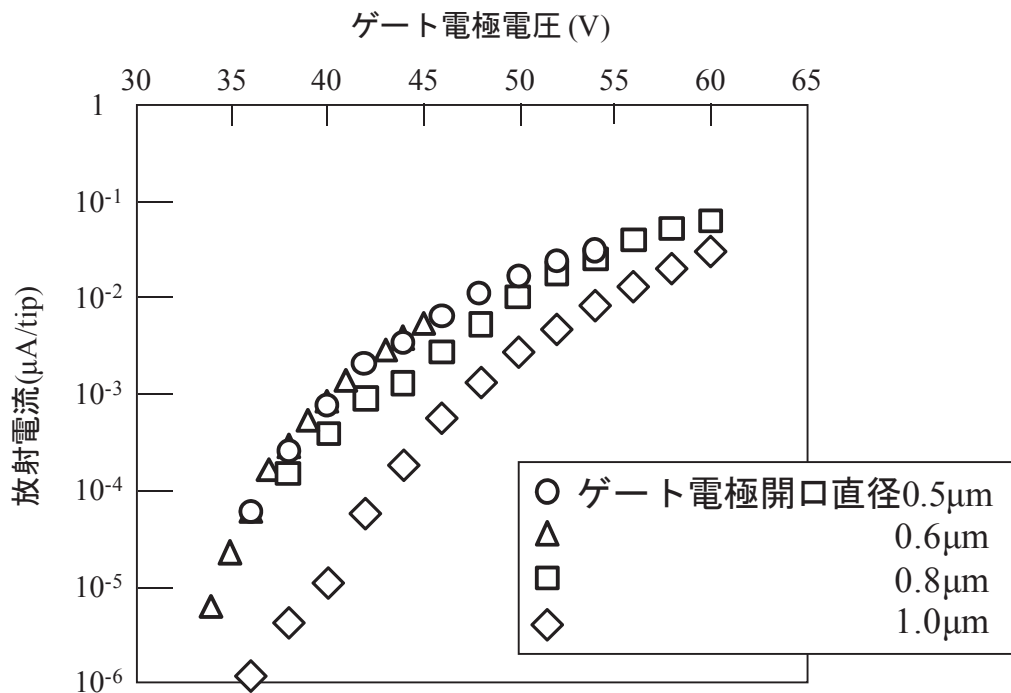


図 2.26 ゲート電極開口直径が $1.0\mu\text{m}$, $0.8\mu\text{m}$, $0.6\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$ のスピント型 FEA における放射電流とゲート電極電圧との関係の実測値

静電レンズの中心から離れた場所を通過する(放射電流密度分布は陰極先端において最大と仮定). その際, 密度が最大となる電子群は, 陰極先端を通る垂直方向の軸上から離れる方向に軌道が曲げられる. 画素内には多数の FE が配置され, 各 FE から放射される電子の足し合わせが画素から放射される電子ビームとなるため, FE 形状のバラつきによって, 電界集束時の電子ビームは広がることが予想される. 図 2.27 に陰極先端位置のずれと電流密度が最大となる電子群の位置との関係を求めるための解析モデルを示す. ゲート電極厚(L_g), 集束電極厚(L_f), および層間絶縁膜厚(L_i)はそれぞれ $0.5\mu\text{m}$, $0.2\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ とした. アノード電極-電界集束スピント型 FEA 間の距離は 1.33mm とし, アノード電極印加電圧は 2kV とした. ゲート電極および集束電極の開口部直径は $1.0\mu\text{m}$ とし, z 軸は開口部中心を通るものとした. ゲート電極電圧は 60V , 集束電極電圧は 18V , 13V , 8V の 3 通りとした. 図 2.28 に陰極先端位置のずれとアノード電極上での最大放射電流密度の到達位置との関係の解析結果を示す. 最大放射電流密度の到達位置は, 陰極先端の中心位置を x 軸(+)方向へずらしていくと, x 軸(-)方向へと移動すること, 集束電極電圧を下げるほど最大放射電流密度の到達位置の変移量が大きくなること, 陰極先端の中心位置のずれと最大放射電流密度の到達位置の変移量は比例の関係にあることがわかった. 陰極先端の中心位置のずれに対し最大放射電流密度の到達位置の変移量はおおよそ 100 倍前後大きいことから, 陰極先端の中心位置のずれは最大放射電流密度の到達位置の変移に大きく影響することがわかる.

陰極先端位置のずれに対する最大放射電流密度の到達位置の変移量を抑制するため, 集束電極の開口径をゲート電極開口径に対して拡大し, 静電レンズを大きくする手法の効果を電子軌道解析により調査した. 図 2.29 に解析モデルを示す. 集束電極の開口直径を $1.0\mu\text{m}$, $1.5\mu\text{m}$, $2.0\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$ と拡大していき, それぞれの最大放射電流密度の到達位置との関係を解析した結果を図 2.30 に示す. 但し, 陰極先端の中心位置からのずれは $0.1\mu\text{m}$, 集束電極電圧は 13V とし, その他の条件は図 2.27 と同じとした. 最大放射電流密度の到達位置の変移量は集束電極の開口直径を拡大していくと減少し, 集束電極開口の直径が $2.0\mu\text{m}$ のときに $0\mu\text{m}$, 同直径が $2.5\mu\text{m}$ のときに $2\mu\text{m}$ となった. 以上の結果から, 陰極先端位置のずれによる最大放射電流密度の到達位置の変移量を抑制するには集束電極の開口径をゲート電極の開口径に対し拡大する事が有効であることを電子軌道解析により確認できた. 解析結果より, 最大放射電流密度の到達位置の変移量は, 集束電極の開口直径をゲート電極と同じとした場合に比べて, 集束電極の開口直径を 1.5 倍から 2.5 倍まで拡大したいずれの場合においても電子群の到達位置の変移量は小さい. 以上の結果より, 電界集束時の集束効果を高めるため, 集束電極の開口直径は $2.0\mu\text{m}$ 以上(ゲート電極の開口直径の 2 倍以上)とすることとした.

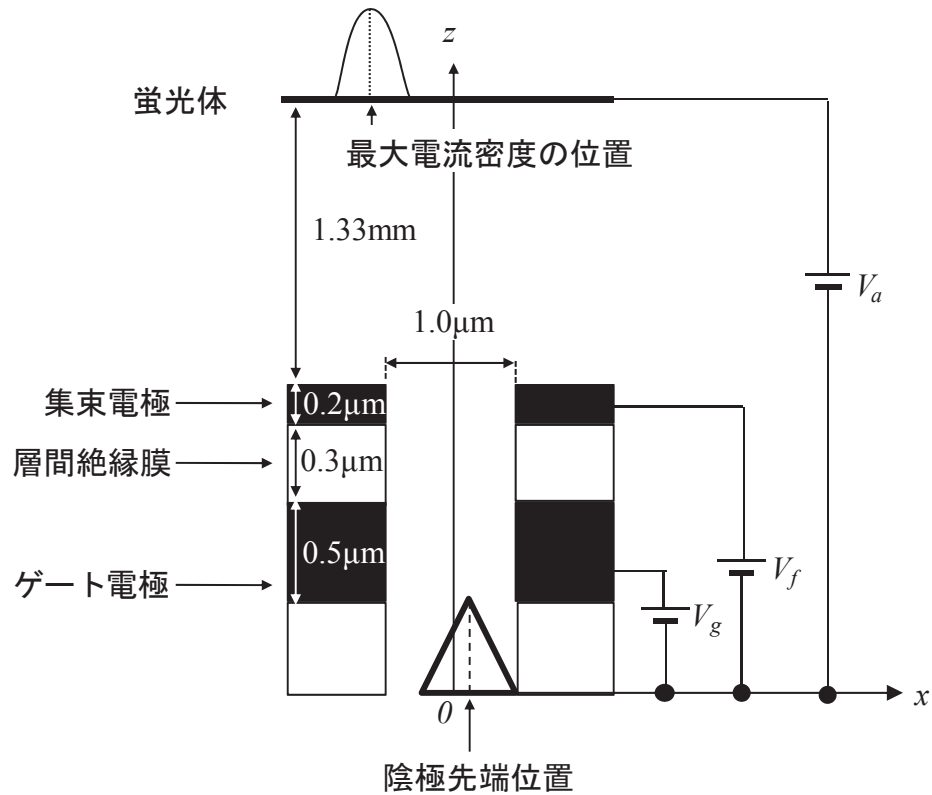


図 2.27 陰極先端位置のずれと電流密度が最大となる電子群の位置との関係を求める解析モデル

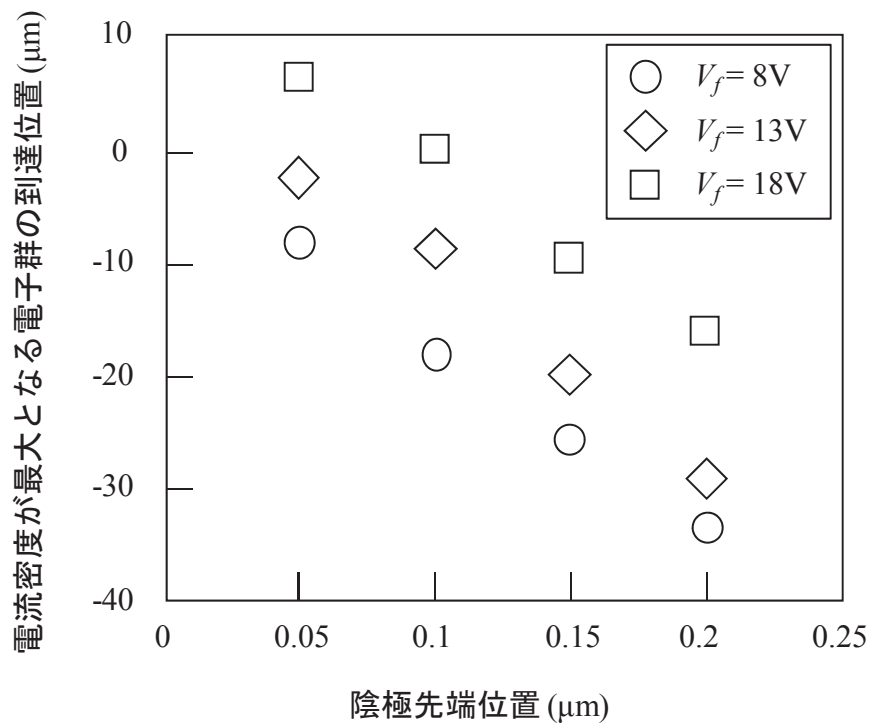


図 2.28 陰極先端位置のずれとアノード電極上での放射電流密度が最大となる電子群の到達位置との関係の解析結果

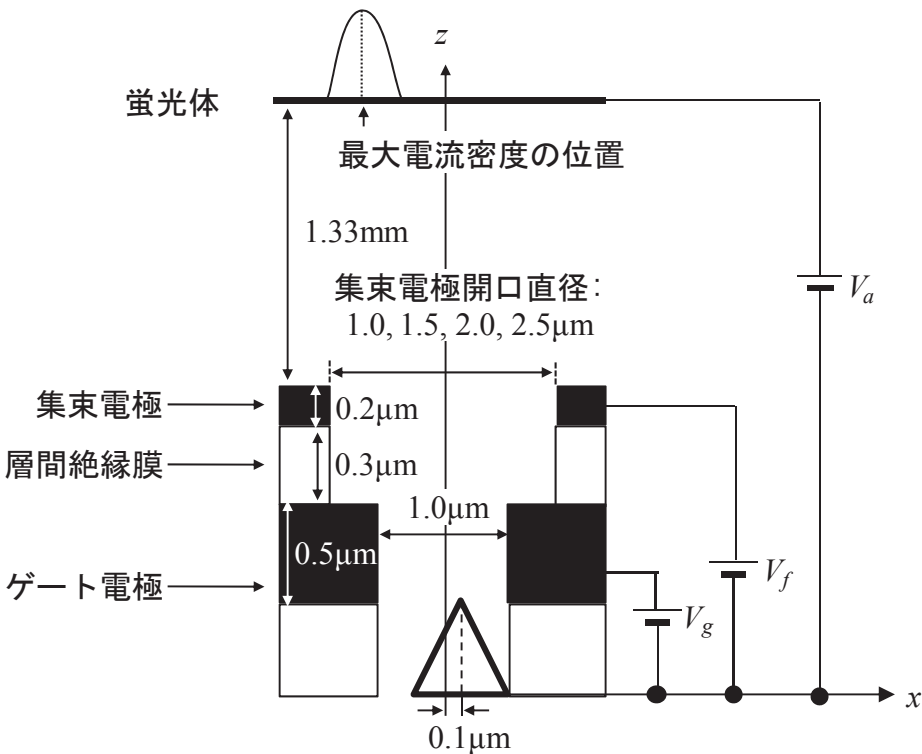


図 2.29 陰極先端位置のずれと電流密度が最大となる電子群の位置との関係を求める解析モデル

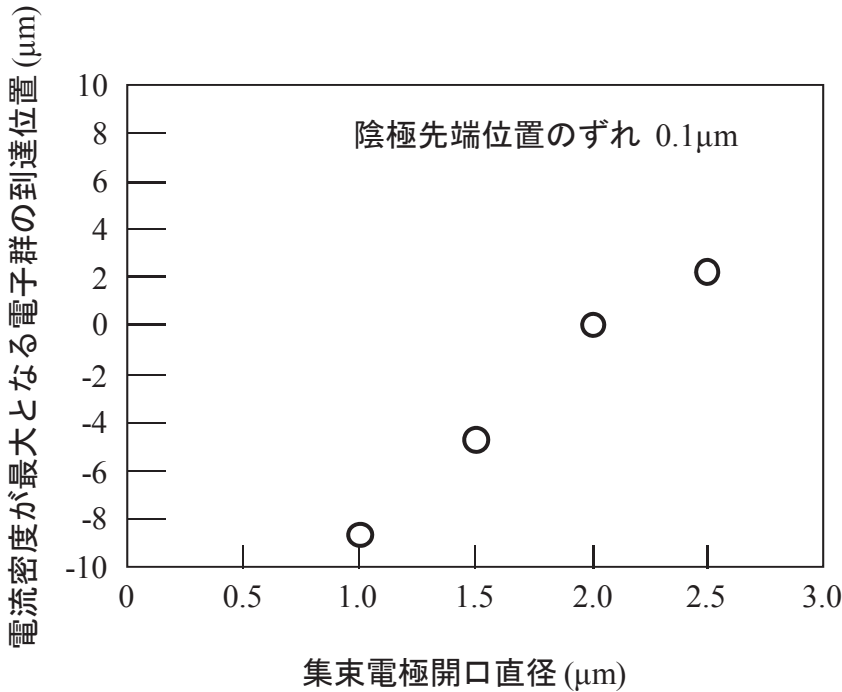


図 2.30 集束電極開口直径とアノード電極上での放射電流密度が最大となる電子群の到達位置との関係の解析結果

参考文献

- 1) S. Itoh, T. Watanabe, K. Ohtsu, M. Taniguchi, S. Uzawa, N. Nishimura, "Experimental Study of Field Emission Properties of the Spindt-type Field Emitter," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 13, no. 2, pp. 487-490, 1995.
- 2) S. Itoh, T. Watanabe, T. Yamamura, K. Yano, "A Challenge to Field Emission Displays," Proc. Asia Display '95, no. S25-1, pp. 617-620, 1995.
- 3) 難波正和, 本田悠葵, 平野善之, 宮川和典, 渡部俊久, 岡崎三郎, 江上典文, 小原有司, 田中満, 伊藤茂生, "1 インチ 256×192 画素磁界集束型冷陰極 HARP 撮像板の緒特性," 電子情報通信学会技術報告, ED, 電子デバイス, vol. 104, no. 520, ED2004-12, pp. 13-18, 2004.
- 4) Yoshiro Takiguchi, M. Nanba, K. Osada, T. Watabe, S. Okazaki, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka, and S. Itoh, "256×192 Pixel Field Emitter Array Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 22, no. 3, pp. 1390-1395, 2004.
- 5) 難波正和, 瀧口吉郎, 長田勝玄, 宮川和典, 渡部俊久, 岡崎三郎, 江上典文, 小原有司, 田中満, 伊藤茂生, "磁界集束系を備えた 1 インチ 256×192 画素冷陰極 HARP 撮像板," 映像情報メディア学会誌, vol. 59, no. 3, pp. 396-402, 2005.
- 6) N. Egami, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Miyakawa, T. Watabe, S. Okazaki, K. Osada, Y. Obara, M. Tanaka, and S. Itoh, "50×50μm Pixel Magnetic Focus Field Emitter Array Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 23, no. 5, pp. 2056-2061, 2005.
- 7) M. Nanba, Y. Takiguchi, Y. Honda, Y. Hirano, T. Watabe, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh, and A. Kobayashi, "640 × 480 Pixel Active-Matrix Spindt-Type Field Emitter Array Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 28, no. 1, pp. 96-103, 2010.
- 8) 本田悠葵, 平野善之, 宮川和典, 難波正和, 渡部俊久, 岡崎三郎, 江上典文, 小原有司, 田中満, 伊藤茂生, 小林昭, "超高感度スピント型冷陰極 HARP 撮像板の緒特性," 電子情報通信学会技術報告, ED, 電子デバイス, vol. 105, no. 257, ED2005-113, pp. 27-32, 2005.
- 9) 倉重光宏, 小楠千早, "撮像管電子ビームのアクセプタンスの広がりについて," 電子情報通信学会技術報告, ED75-12, 1975.
- 10) 倉重光宏, "撮像管電子ビーム系と容量性残像との因果関係の数値解析," テレビジョン学会誌, vol. 32, no. 3, pp. 217-223, 1978.

- 11) J. Itoh, Y. Tohma, K. Morikawa, S. Kanemaru, and K. Shimizu, "Fabrication of Double-Gated Si Field Emitter Arrays for Focused Electron Beam Generation," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 13, no. 5, pp.1968-1972, 1995.
- 12) L. Dvorson and A. I. Akinwande, "Double-Gated Spindt Emitters with Stacked Focusing Electrode," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 20, no. 53, 2002.
- 13) Y. C. Lan, J. T. Lai, S. H. Chen, W. C. Wang, C.H. Tsai, Y. Sheu, "Simulation of Focusing Field Emission Devices," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 18, no. 2, pp. 911-913, 2000.
- 14) Y. Honda, Y. Takiguchi, N. Egami, M. Nanba, Y. Saishu, K. Nakamura, and M. Taniguchi, "Electrostatic Focusing Spindt-Type Field Emitter Array for an Image Sensor with a High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 29, no. 4, pp.04E104.1-04E104.5, 2011.
- 15) P. Girdinio, M. Repetto, and J. Simkin, "Finite Element Modelling of Charged Beams," IEEE Trans. Magn., vol. 30, no. 5, 1994.
- 16) R. H. Fowler, L. Nordheim, "Electron Emission in Intense Electric Fields," Proc. Royal Society A, vol. 119, no. 781, pp. 173-181, 1928.
- 17) J. A. Becker, "The Use of the Field Emission Electron Microscope in Adsorption Studies of W on W and Ba on W," The bell system technical journal, pp. 907-932, 1951

第 3 章

電子軌道解析の高精度化と電界集束スピント型 FE の電極構造検討

3.1 はじめに

基礎実験用電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の出力映像は、磁界集束系を適用した平面撮像管と比べて画質が大きく劣化しており、その主な原因は、電界集束時の電子ビーム量が輝度ムラの影響がほぼなく高品質な映像を取得するための目標値を満たしていない事、FEA の形状バラつきにより陰極先端位置と静電レンズ中心とが同一軸上に無いことなどにより電子ビームの電界集束効果が満足に得られないことを示した。また、その対策として、FEA の微細化および集束電極開口径の拡大が有効と考えられることを示した。

本章ではまず、開口直径を $0.6\mu\text{m}$ に微細化したゲート電極上に、開口直径を $2.4\mu\text{m}$ に拡大した集束電極を積層した構造の電界集束スピント型 FEA の試作結果を電子軌道解析結果と比較して示す。次に、電界集束スピント型 FE の放射電子特性を高精度に解析する新たな電子軌道解析モデルを提案する。最後に、新たな電子軌道解析モデルを用いて、電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量をさらに向上させるために検討した電界集束スピント型 FE の電極構造について述べる。

3.2 集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA¹⁻²⁾

3.2.1 放射電子特性

基礎実験用電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管における画質劣化を抑制するには、電界集束型 FEA の微細化および集束電極開口径の拡大が有効と考えられる。2.3.3 節では、集束電極の開口径はゲート電極の開口径に対して 2 倍以上とすることや、ゲート電極開口直径の微細化は $0.6\mu\text{m}$ 程度を限度とすることを述べた。この方針を基に、開口直径を $0.6\mu\text{m}$ に微細化したゲート電極上に、開口直径を $2.4\mu\text{m}$ に拡大した集束電極を積層した構造の電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した平面撮像管を試作し、放射電子特性を評価した。集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE 断面の走査型電子顕微鏡像を図 3.1 に示す。ゲート電極厚は $0.6\mu\text{m}$,

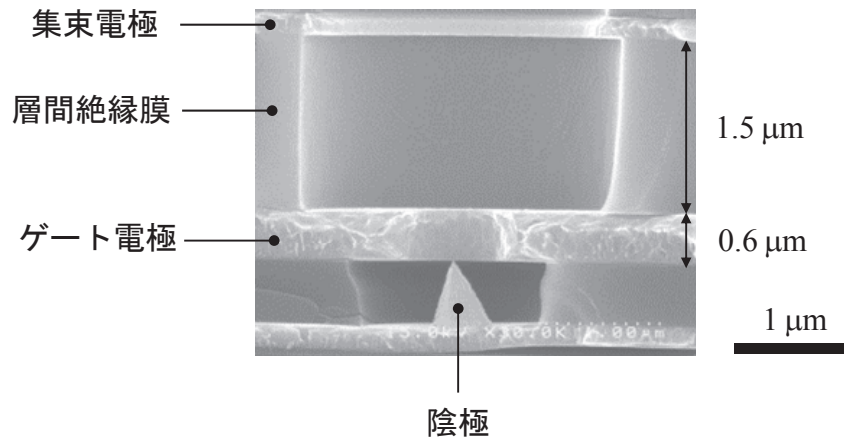


図 3.1 集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE 断面の走査型電子顕微鏡観察像

層間絶縁膜厚は $1.5\mu\text{m}$ 、集束電極厚は $0.2\mu\text{m}$ とし、ゲート電極開口部は直径 $0.6\mu\text{m}$ 、層間絶縁膜および集束電極開口部は直径 $2.4\mu\text{m}$ とした。画素数は 100×75 、画素サイズは $20\times 20\mu\text{m}^2$ 、画素あたりの FE 数は 39 個とした。図 3.2 に放射電子特性の測定系を示す。集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA とメッシュ電極との間隔およびメッシュ電極と HARP 膜との間隔はそれぞれ 0.7mm および 0.5mm と設定した。ゲート電極電圧(V_g)およびメッシュ電極電圧(V_m)は 60V および 500V に設定した。集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA は NTSC 規格(1 画素当たりの駆動時間約 80ns)で駆動した。図 3.2 において、 V_t は HARP 膜の電子ビーム走査側の電位(面電位)であり、HARP 膜に蓄積される電荷量および HARP 膜の容量に依存する。放射電子特性の測定系において、平面撮像管に入射する光は遮断することとした。すなわち、HARP 膜の電流(I_t)は 0A とした。図 3.3 に放射電子特性の実測値を示す。各電流値は 100×75 画素から順次電子を放射した際の平均電流値とした。集束電極積層構造電界集束スピント型 FEA の陰極からの放射電流(I_c)は、同 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)、ゲート電極電流(I_g)、HARP 膜電流(I_t)、および集束電極電流(I_f)の総和として求めた。集束電極電流(I_f)の実測値はほぼ 0A であった。陰極からの放射電流(I_c)は集束電極電圧(V_f)によらずほぼ一定であり、 $V_f = 60\text{V}$ における I_c の平均値は約 $4.3\mu\text{A/pix}$ である。図 2.19 に示した基礎実験用電界集束スピント型 FEA の陰極電流(I_c)の平均値は $V_f = 60\text{V}$ のときに約 $0.9\mu\text{A/pix}$ (ゲート電極厚 $0.5\mu\text{m}$ の場合)であり、FEA の微細化によって画素当たりの放射電流(I_c)は約 4.7 倍向上した。一方、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)は集束電極電圧(V_f)の低下とともに減少し、例えば $V_f = 15\text{V}$ における I_b の平均値は約 $0.9\mu\text{A/pix}$ であった。このときのゲート電極電流(I_g)に着目すると、 I_g は集束電極電圧(V_f)の低下と

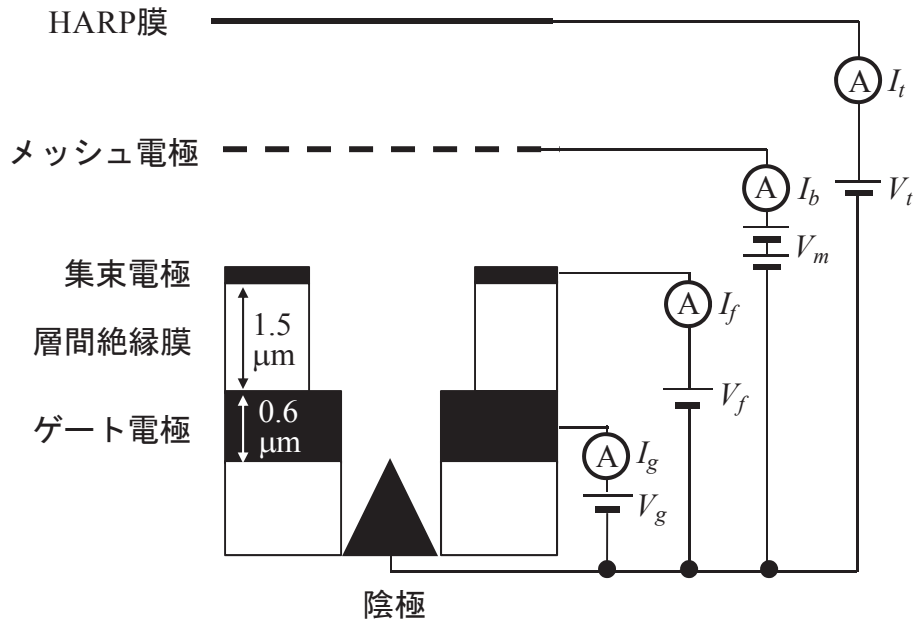


図 3.2 放射電子特性の測定系

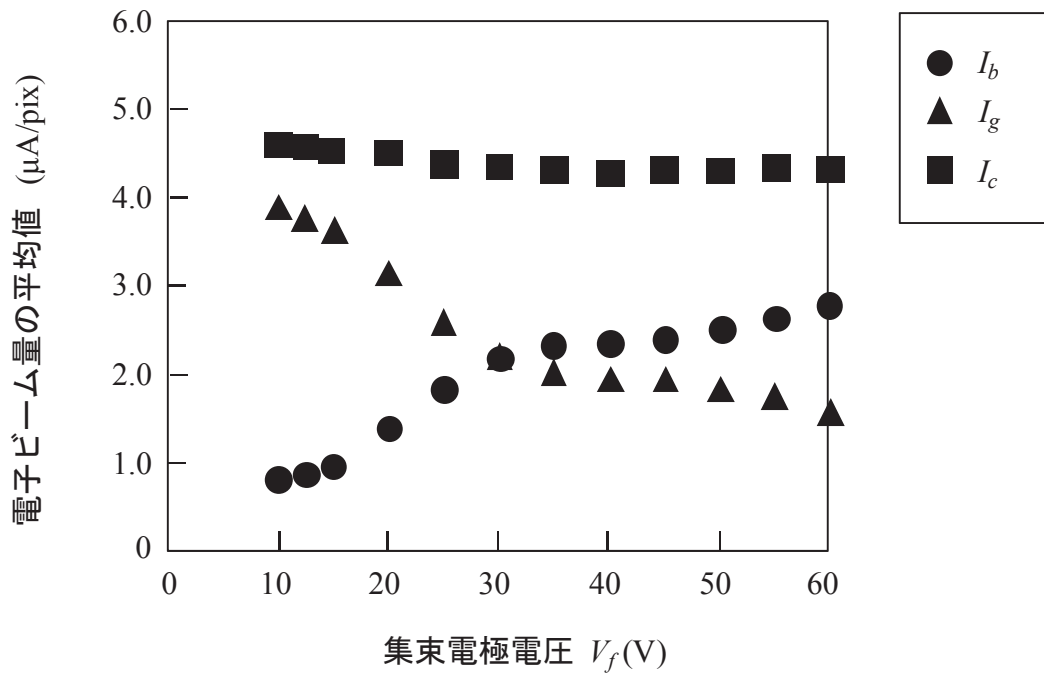


図 3.3 集束電極積層構造電界集束スピント型 FEA の放射電子特性の実測値

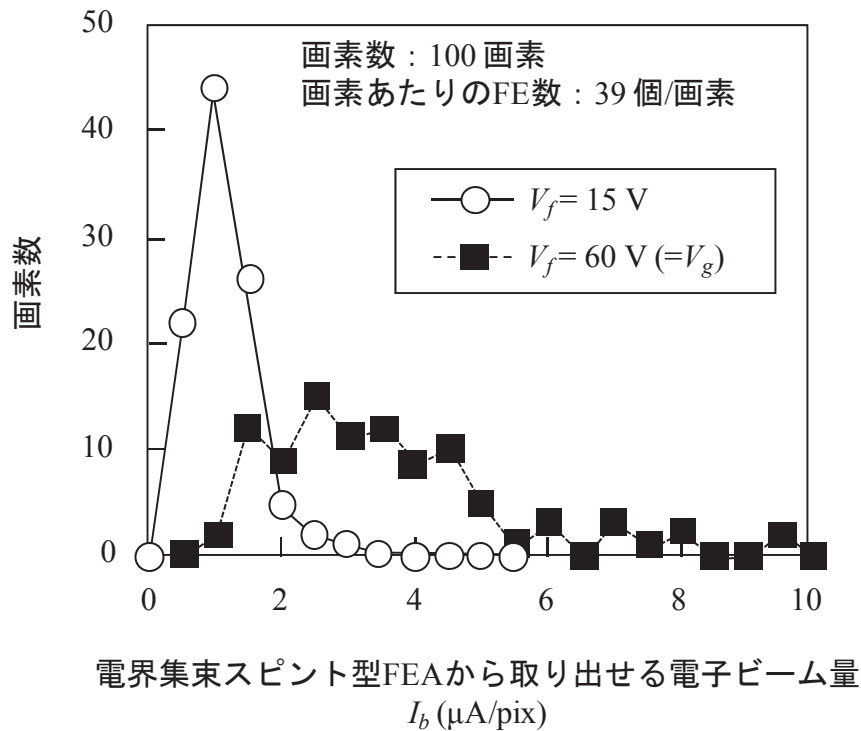


図 3.4 集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)のヒストグラム

ともに上昇する。従って、集束電極近傍の減速電界により電子ビームは減速し、失速してゲート電極へと戻る電子ビーム量が集束電極電圧(V_f)の低下とともに大幅に増加するため、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)は大きく減少したと考えられる(例えば $V_f = 15\text{V}$ の場合、半数以上の電子が失速してゲート電極へ戻る)。図 3.4 に集束電極積層構造電界集束スピント型 FEA から画素あたりに取り出せる電子ビーム量(I_b)とその電子ビーム量(I_b)が得られる画素数との関係を表したヒストグラムを示す。母数は 100 画素とし、各電子ビーム量は、単一画素から周期 1/60s, Duty 比 4.8%で電子を放射させた際に集束電極積層構造電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量の平均値を測定し、ピーク値に換算して求めた。集束電極電圧(V_f)がゲート電極電圧(V_g)と同じ 60V での I_b の最小値は $1\mu\text{A/pix}$ 以上であり、輝度ムラの影響がほぼなく高品質な映像を取得するための目標値である最小値 $1\mu\text{A/pix}$ を満たしているのに対し、集束電極電圧(V_f)が 15V における I_b の最小値は $0.5\mu\text{A/pix}$ に低下しており、100 画素のうち 2 割を超える画素で目標値である最小値 $1\mu\text{A/pix}$ を下回った。

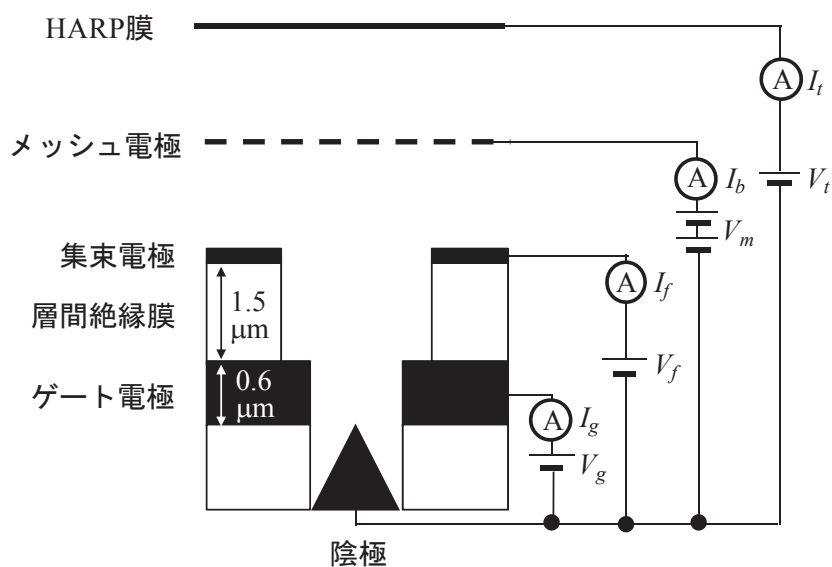
3.2.2 平面撮像管を用いた撮像実験

電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量と出力映像の輝度ムラの関係および解像度を評価するため、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管を用いて、2 種類の条件で撮像実験を行った。

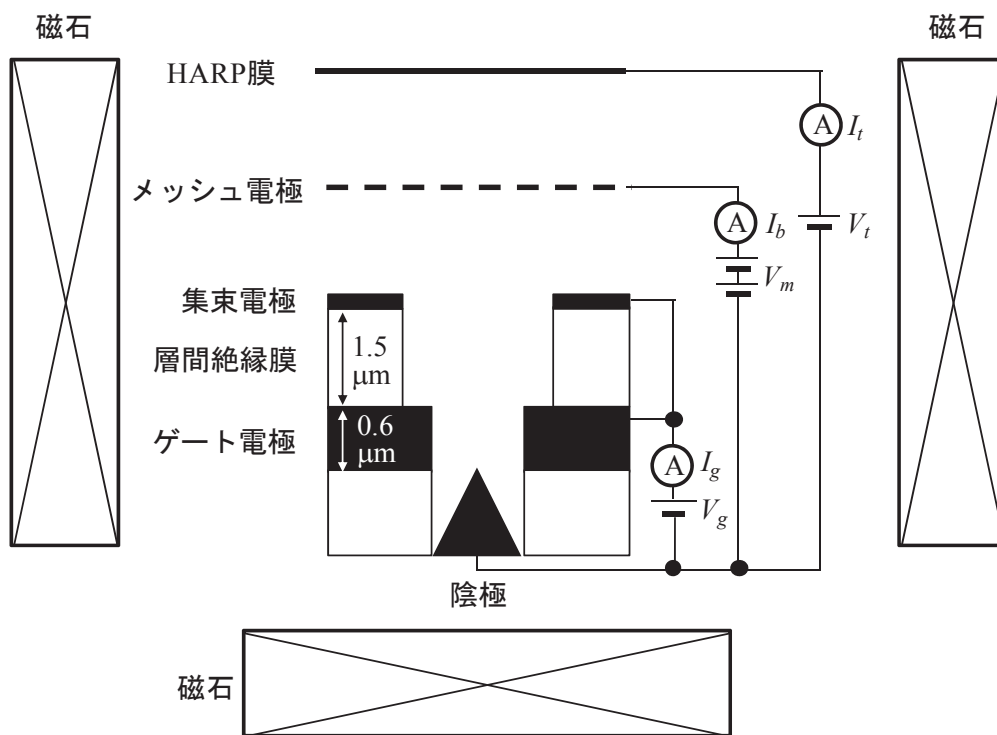
条件 1：ゲート電極電圧(V_g)を 60V、集束電極電圧(V_f)を 15V とし、電子ビームを静電レンズで集束させる。

条件 2：集束電極電圧(V_f)をゲート電極電圧(V_g)と同じ 60V に設定するとともに、磁界集束系に用いる永久磁石を平面撮像管の周囲に配置する。電子ビームに静電集束効果は働かず、磁界の働きによって集束させる。

図 3.5 に平面撮像管の構成および電子ビーム集束系を示す。両条件ともに、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA におけるゲート電極厚は $0.6\mu\text{m}$ 、層間絶縁膜厚は $1.5\mu\text{m}$ 、集束電極厚は $0.2\mu\text{m}$ とし、ゲート電極開口部は直径 $0.6\mu\text{m}$ 、層間絶縁膜および集束電極開口部は直径 $2.4\mu\text{m}$ とした。画素数は 100×75 、画素サイズは $20 \times 20\mu\text{m}^2$ 、画素あたりの FE 数は 39 個とした。電界集束スピント型 FEA は NTSC 規格 (1 画素当たりの駆動時間約 80ns) で駆動した。図 3.6 に撮像例を比較して示す。電子ビームを静電レンズの働きによって集束させた場合(条件 1)、出力映像には輝度ムラが発生した。これは図 3.4 に示したように、100 画素中 20 画素以上という多くの画素において集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量が輝度ムラの影響がほぼなく高品質な映像を取得するための目標値である最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ を下回っているためである。一方、集束電極積層構造電界集束スピント型 FEA から放射された電子を磁界の働きによって集束させた場合(条件 2)、出力映像に輝度ムラは発生しなかった。条件 2 の場合、集束電極電圧をゲート電極と同じ電圧に設定するため、集束電極近傍に減速電界は形成されない。そのため、陰極から放射される電子が集束電極近傍で失速しゲート電極へと戻ることはなく、電子ビーム量(I_b)は最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上を電界集束スピント型 FEA から取り出すことができる(図 3.4, $V_f = 60\text{V}$ の電子ビーム量(I_b)を参照)。従って電子ビーム量は、輝度ムラの影響がほぼなく高品質な映像を取得するための目標値を満たし、出力映像に輝度ムラは発生しなかったと考えられる。一方で、電子ビームを静電レンズの働きで集束させた場合(条件 1)の出力映像の解像度は、電子ビームを磁界の働きで集束させた場合(条件 2)とほぼ同等であった。従って、静電レンズの働きによる電子ビームの集束効果は、磁界集束の場合とほぼ同等であることが確認できた。基礎実験用電界集束

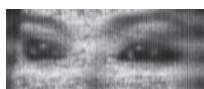


(条件1) 静電レンズの働きで電子ビームを集束



(条件2) 磁界の働きで電子ビームを集束

図 3.5 撮像実験における平面撮像管の構成および電子ビーム集束系



(条件1) 静電レンズの働きで電子ビームを集束: $V_f = 15V$



(条件2) 磁界の働きで電子ビームを集束: $V_f = V_g = 60V$

(共通条件) FEA: 集束電極積層構造電界集束スピント型

画素あたりのFE数: 39 個/画素

画素数: 100×75

画素サイズ: $20 \times 20 \mu m^2$

図 3.6 集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の撮像例

スピント型 FEA を適用した平面撮像管の場合と比べて解像度が向上し、磁界集束の場合とほぼ同等の解像度が得られたのは、集束電極開口径をゲート電極開口径に対して拡大したことによる効果と考えられる。

集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の評価結果を以下にまとめる。

- ・ FEA の微細化(ゲート電極開口直径を $0.9\mu m$ から $0.6\mu m$ に微細化)により陰極からの放射電流の平均値は約 $4.3\mu A/pix$ (画素当たり約 4.7 倍, $V_f = 60V$)に向上
- ・ FEA から取り出せる電子ビーム量の最小値は $0.5\mu A/pix$ ($V_f = 15V$)で高品質な映像を得るための目標値である最小値 $1\mu A/pix$ 以上を満たさない
- ・ 集束電極近傍に形成される減速電界により電子ビームは減速し、失速してゲート電極へと戻る電子ビーム量が集束電極電圧(V_f)の低下とともに大幅に増加する($V_f = 15V$ の場合、半数以上の電子が失速してゲート電極へと戻る)
- ・ 撮像実験により、電界集束時の減速電界による電子ビームの失速を抑制することが輝度ムラ発生の抑制に有効と考えられることを確認
- ・ 電界集束時の出力映像の解像度は、磁界集束系を適用した場合の解像度とほぼ同等

以上の結果から、電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管における課題は、出力映像に発生する輝度ムラであり、同 FEA から取り出せる電子ビーム量を増やす

こと、すなわち、減速電界により失速しゲート電極へと戻る電子ビーム量を抑制する事が、輝度ムラ発生の抑制に有効と考えられることがわかった。そこで、電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造の検討に着手した。

3.3 電子初速にマクスウェル分布を用いた電子軌道解析モデルの課題^{1, 2, 4)}

電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造の検討には電子軌道解析を用いることとした。まず初めに電子軌道解析による放射電子特性の解析精度を検証するため、図 3.1 に示した集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE における放射電子特性の解析値を実測値と比較した。図 3.7 に集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE を適用した平面撮像管の電子軌道解析モデルを示す。放射電子特性の解析には電子軌道解析プログラム(COBHAM 社 OPERA3D)を利用した。陰極先端から放射される電子の初速度(v_0)および電子の初速度の垂直成分(v_{z0})は次式に示すマクスウェル分布の平均値と仮定した。

$$v_0 = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} \quad (3.1)$$

$$v_{z0} = v_0 \cos\theta \quad (0 \leq \theta \leq 60^\circ) \quad (3.2)$$

ここで k はボルツマン定数、 T は陰極温度[K]、 m_e は電子の質量[kg]、 v_{z0} は電子の初速度の z 成分、 θ は電子の発散角[°]をそれぞれ表す。集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)、陰極からの放射電流(I_c)、およびゲート電極電流(I_g)と集束電極電圧(V_f)との関係の解析値を実測値と比較して図 3.8 に示す。ゲート電極電圧(V_g)およびメッシュ電極電圧(V_m)は 60V および 500V に設定した。集束電極電流(I_f)の解析値は 0A であった。集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE における各電子ビーム量(I_b , I_c , I_g)の実測値は、集束電極積層構造電界集束スピント型 FEA の画素あたりの各電子ビーム量の実測値(図 3.3)から画素あたりの FE 数(39 個)を割って求めた。解析値を実測値と比較すると、陰極からの放射電流(I_c)の解析値は実測値とほぼ一致した。しかし、集束電極積層構造 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)の、集束電極電圧(V_f)の低下に伴う減少は、実測値よりも解析値が緩やかであり、ゲート電極電流(I_g)の、集束電極電圧(V_f)の低下に伴う増加についても、実測値より

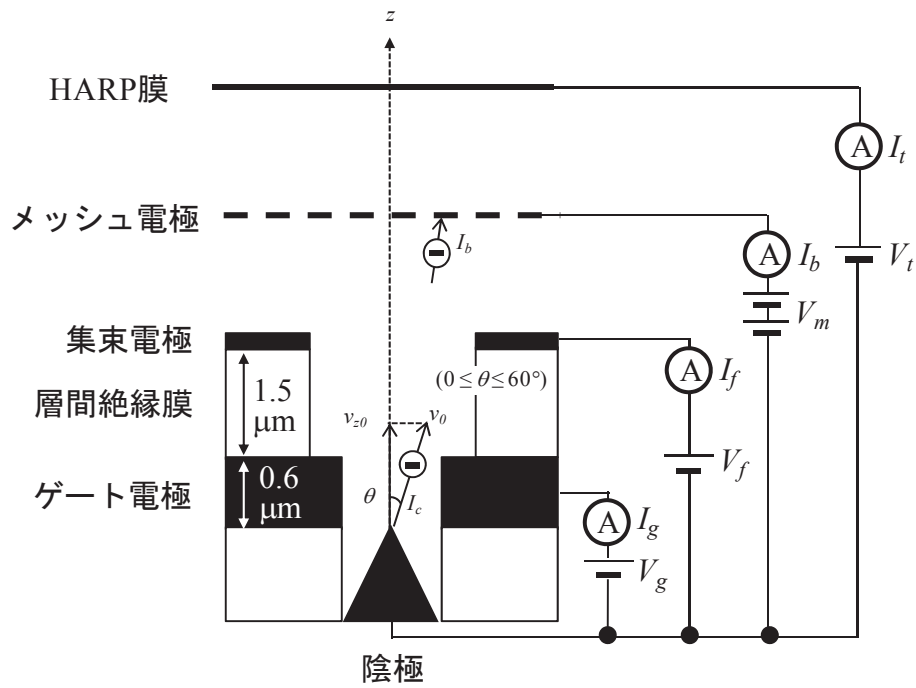


図 3.7 集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE を適用した平面撮像管の電子軌道解析モデル

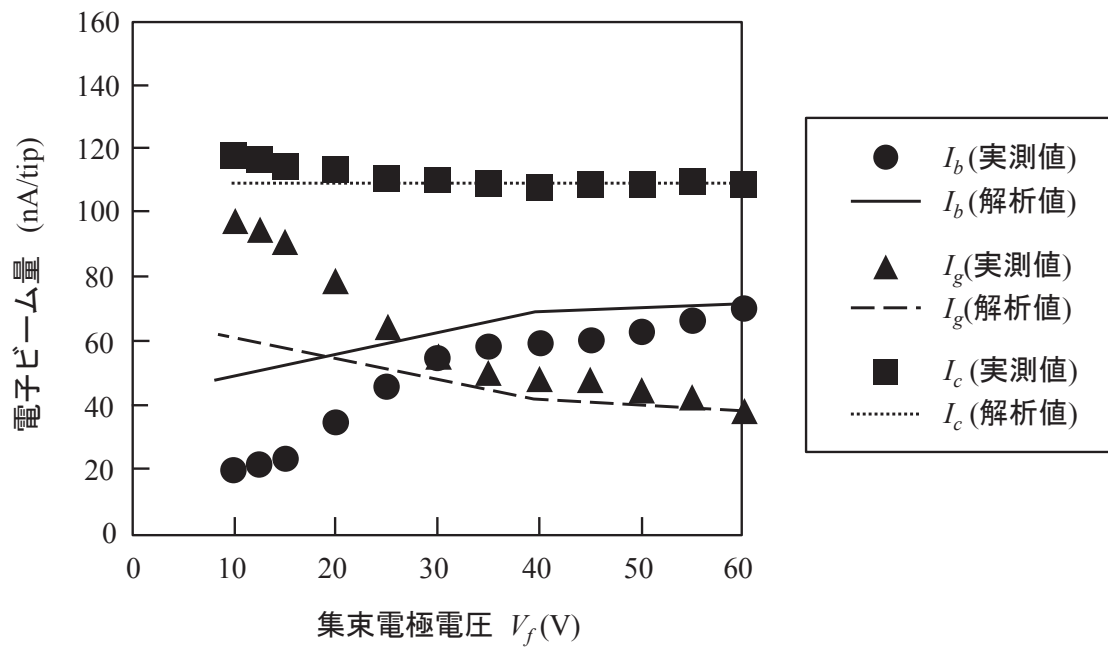


図 3.8 放射電子特性の実測値と解析値

解析値が緩やかである．従って、 I_b と I_g の解析値は実測値と一致しなかった．この違いは、実デバイスでは多くの電子が集束電極近傍を通過する際に減速電界によって失速し、ゲート電極へと戻るのに対し、解析モデルでは電子の速度分布が実デバイスと比べて高速域に分布しており、電子は減速電界で失速せずゲート電極へ戻らなかったためと考えられる．

次に、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE から放射される電子の速度分布を実デバイスおよび解析モデルとで比較するため、アクセプタンスカーブ(アノード電流とアノード電圧との関係、但し ITO 電流をアノード電流、ITO 電圧をアノード電圧と呼称する)の実測値と解析値を比較した．図 3.9 にアクセプタンスカーブの測定系、図 3.10 に測定結果を解析結果と比較して示す．測定系において、メッシュ電極電圧(V_m)は 500V、ゲート電極電圧(V_g)および集束電極電圧(V_f)は 60V に設定した．アノード電流はアノード電圧(V_a)における電流値で正規化した．アノード電流の実測値はアノード電圧を下げていくと $V_a < 60$ V の範囲で減少するが、解析値では $V_a < 15$ V の範囲のみで減少しており、解析値は実測値に比べてアノード電流が減少するアノード電圧範囲が狭い．また、アノード電流がほぼ 0 になるアノード電圧の解析値は実測値より低い．これらは実デバイスの電子速度分布が解析に比べて低速域に広範囲に分布していることに起因していると推察される．

以上の結果より、電子初速度をマクスウェル分布の平均値と仮定した場合、実デバイスと解析モデルにおける電子の速度分布が異なるため、実デバイスにおいて電子がゲート電極へと戻る軌道が解析モデルでは再現されず、集束電極積層構造の

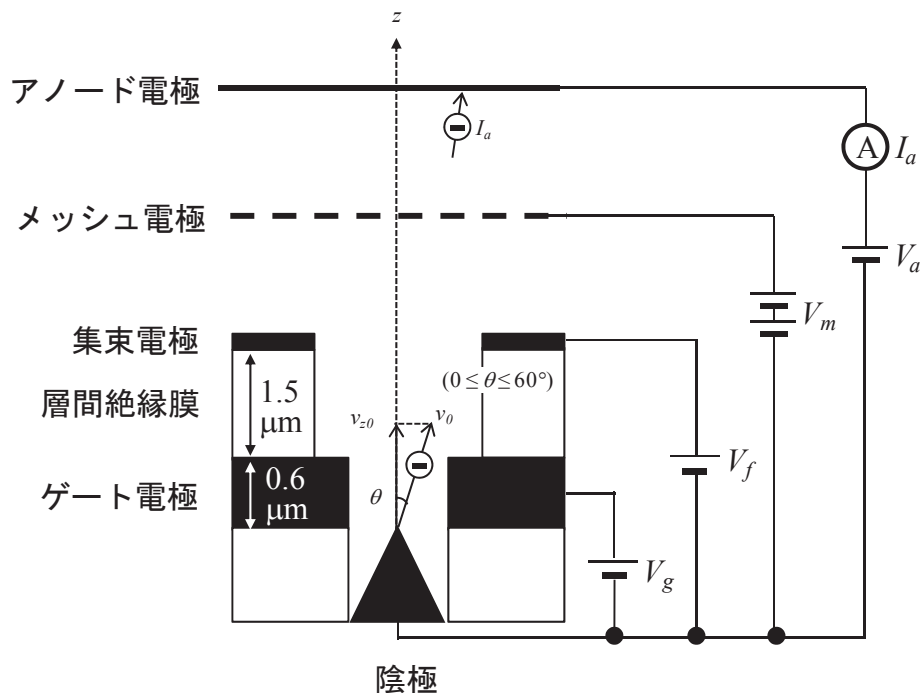


図 3.9 アクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の測定系

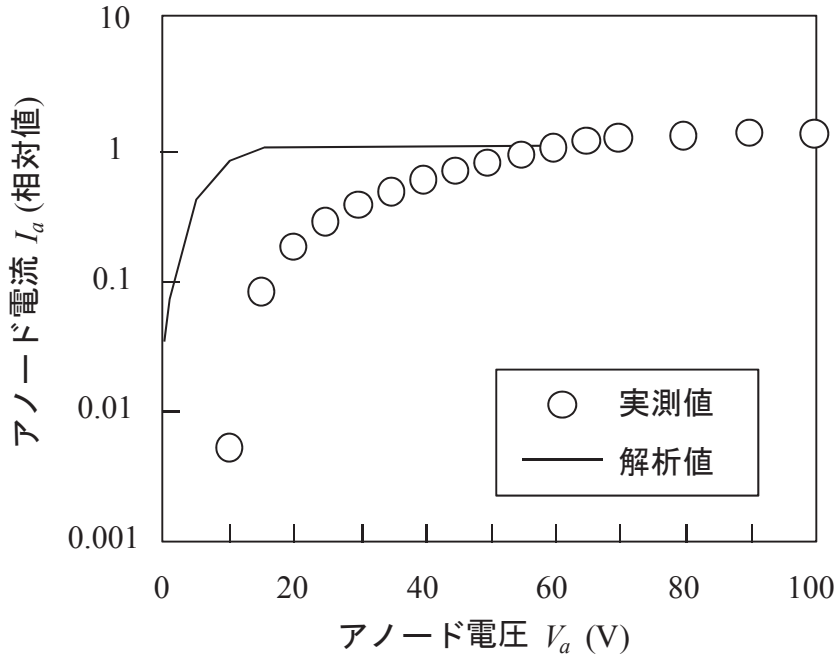


図 3.10 アクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の実測値と解析値

電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)の解析精度が劣化することがわかった. 同 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)の解析精度向上には, アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子速度分布の設定が有効であると考えられる.

3.4 アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子初速を用いた電子軌道解析モデルの提案¹⁻²⁾

アクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の実測値を基に電子軌道解析の電子初速度分布を設定する解析モデルを図 3.11 に示す. 本解析モデルでは, FE のゲート電極開口部において次式の電子初速度を与える.

$$v_0 = \{v_n\} \quad (3.3)$$

$$v_{z0} = v_0 \cos\theta \quad (\theta_n \leq \theta \leq \theta_{n+1}) \quad (3.4)$$

ここで, v_n は 1 つ以上の電子初速度群であり, その値はゲート電極開口部における発散角($\theta_n \leq \theta \leq \theta_{n+1}$)の範囲内において一定とする. また, アクセプタンスカーブの解析値が実測値と一致するように電子速度(v_n)および発散角(θ_n)は任意に設定するものとする. 電子初速度の仮定方法には他にも電子初速度(v_0)を発散角(θ)の関数と仮定

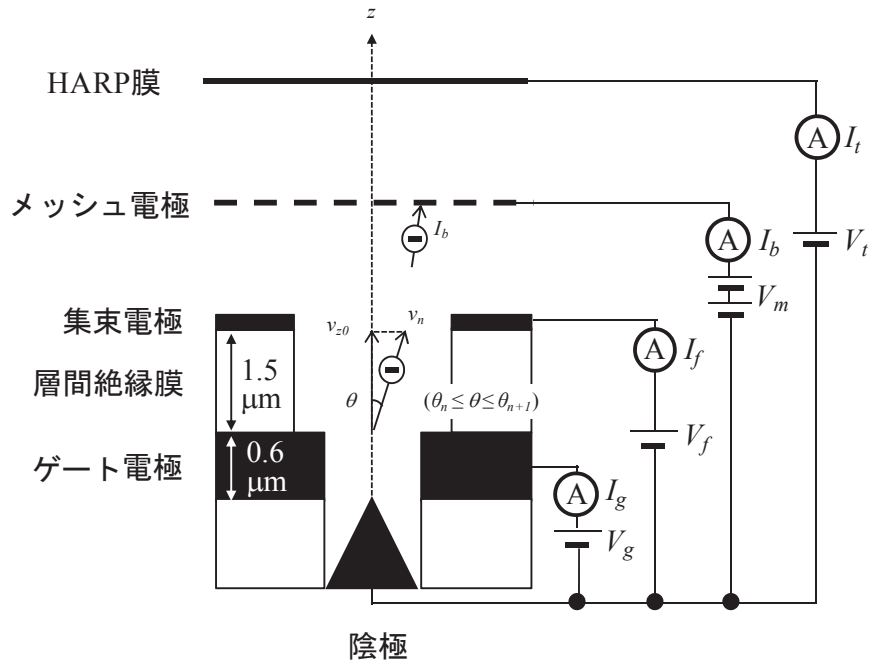


図 3.11 アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子初速を用いた電子軌道解析モデル

し、 θ に対して連続的に v_0 を変化させる方法も挙げられる。しかし、電子軌道解析プログラムの制約により、電子初速度は発散角に対して不連続に変化する仮定を行った。但し、どちらの場合においても電子初速度は発散角に対して複数の値または発散角の関数と仮定する。この理由は陰極から放射される電子のうち発散角の大きい電子がゲート電極開口部の壁面に衝突し、2次電子放出を起こすことによるものと考えられる。これらの事由により、電子初速度は3.3式および3.4式のように仮定した。図3.12にゲート電極開口部における電子速度の垂直成分を、マクスウェル分布を用いた従来解析モデルと比較して示す。また、図3.13にはアクセプタンスカーブ（アノード電流-アノード電圧特性）の実測値を解析値と比較して示す。図3.12の従来解析モデルにおける実線で示した電子速度は、ゲート電極開口の壁面に衝突せずに通過する電子ビームの速度を表しており、ゲート電極開口を通過する電子ビームはゲート電極の開口角約 26° に律束される。一方、新規解析における電子ビームの最大発散角は集束電極および層間絶縁膜の開口角である約 35° とした。アクセプタンスカーブの解析値が実測値と一致するように設定した新規モデルの電子速度群は、従来モデルの電子速度分布と比較して低速域に広範囲に分布している。図3.14には電界集束スピント型FEから取り出せる電子ビーム量(I_b)、陰極からの放射電流(I_c)およびゲート電極電流(I_g)と集束電極電圧(V_f)との関係を示す。 I_b および I_g の解析値は実測値とほぼ一致した。以上の結果から、アクセプタンスカーブの実測値を電子軌道解析の電子初速度に反映させる手法を用いることで、放射電子特性の解析精度を向上できることを確認した。

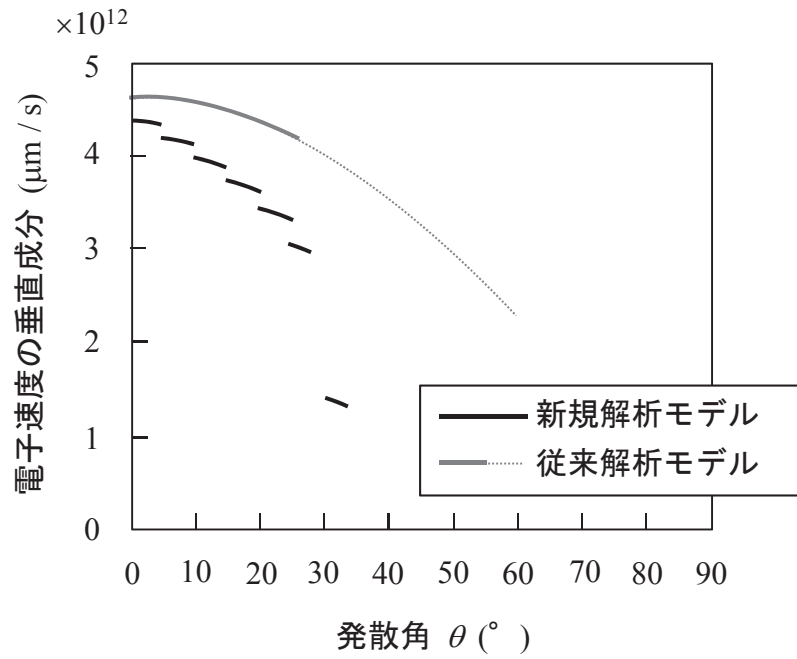


図 3.12 ゲート電極開口部における電子速度の垂直成分

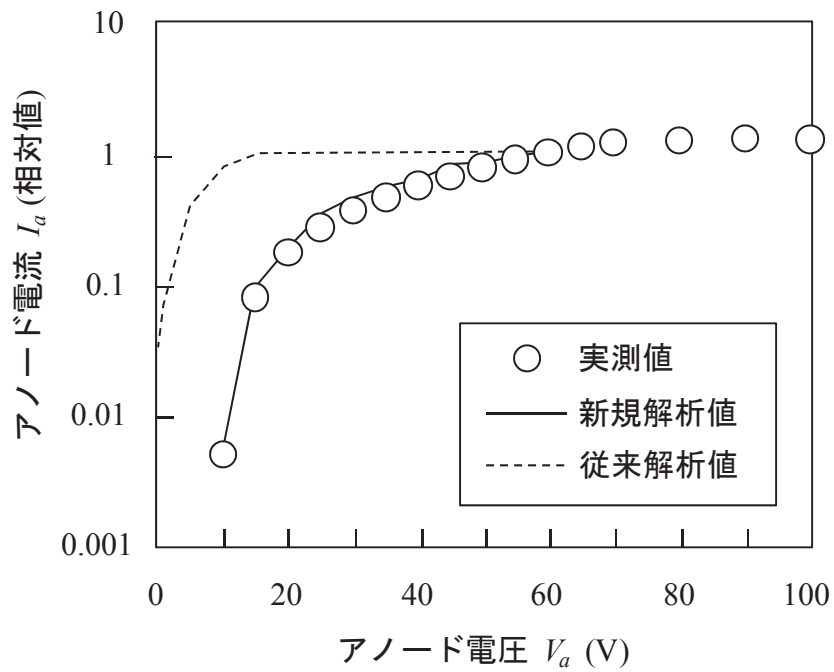


図 3.13 アクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の実測値と解析値

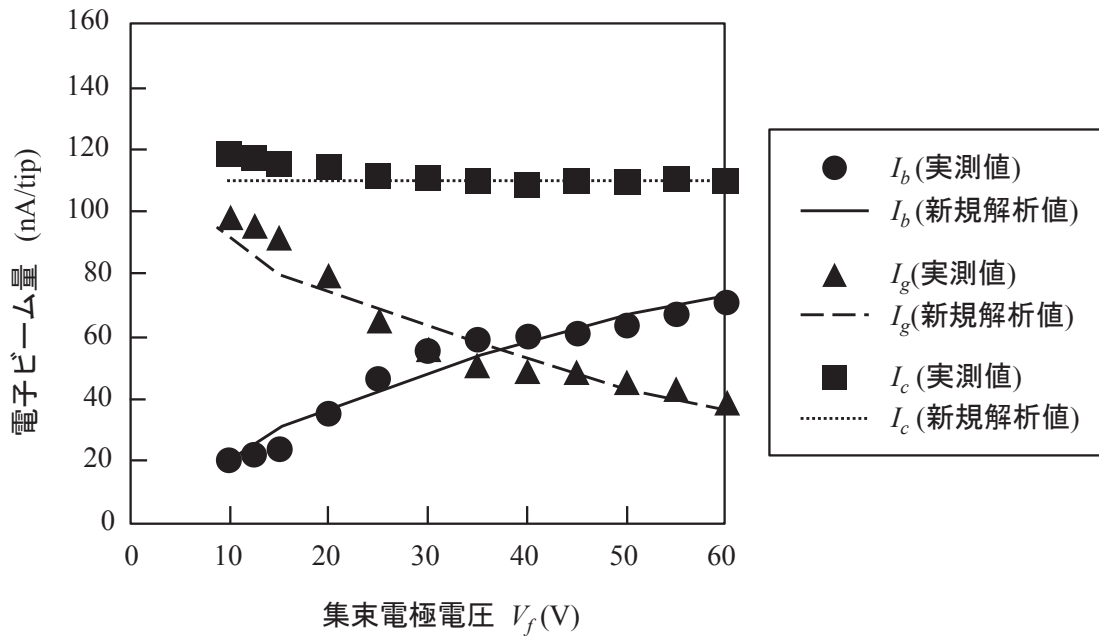


図 3.14 放射電子特性の実測値と解析値

3.5 ゲート電極凸構造の電界集束スピント型 FE^{1, 3-6)}

集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA においては、陰極からの放射電流(I_c)は集束電極電圧(V_f)によらず一定であり、集束電極電圧をゲート電極電圧(V_g)と同じ 60V としたときの I_c は約 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ (最小値)、約 $4.3\mu\text{A}/\text{pix}$ (平均値)であった。一方、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)は V_f を下げるほど減少し、例えば $V_f=15\text{V}$ における I_b は約 $0.5\mu\text{A}/\text{pix}$ (最小値)、約 $0.9\mu\text{A}/\text{pix}$ (平均値)であることを図 3.3 および図 3.4 に示した。これは、陰極先端近傍の電界集中が維持されるため陰極からの放射電流は一定であるが、ゲート電極に比べて電位の低い集束電極近傍を電子が通過する際に失速して FEA 内部(ゲート電極)へ戻る電子が増加したためである。出力映像に輝度ムラの影響がほぼ見られず、高品質な映像を取得するための目標値である最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上の電子ビーム量を得るためには、電子ビーム集束時に FEA から取り出せる電子ビーム量を向上させることが不可欠である。そこで 3.4 節で示した解析手法を用いて、電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量を向上させるための電極構造を検討した。ゲート電極凸構造の電界集束スピント型 FE の電極構造を図 3.15 に示す。本 FE は、ゲート電極断面が上に凸となる形状を持つ。また、集束電極をゲート電極開口部より下方に

配置することで、集束電極近傍での電子の失速を抑制し、FE から取り出せる電子ビーム量の向上を図っている。陰極先端の電界集中減衰を抑制するため、ゲート電極開口部の垂直方向の高さは、図 3.1 に示す集束電極積層構造の電界集束スピント型 FE と同じとした。

ゲート電極凸構造電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量を電子軌道解析により評価した。解析には 3.4 節に示した手法を用い、ゲート電極開口部における電子の初速度も同じとした。ゲート電極開口部に対する集束電極の位置(h_f)は、ゲート電極開口上端より $0.2\mu\text{m}$ 下($h_f = -0.2\mu\text{m}$)またはゲート電極開口上端と同じ高さ($h_f = 0\mu\text{m}$)とした。ゲート電極電圧(V_g)およびメッシュ電極電圧(V_m)は 60V および 500V に設定した。図 3.16 にゲート電極凸構造の電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)と集束電極電圧(V_f)との関係および陰極からの放射電流(I_c)と集束電極電圧(V_f)との関係の解析結果を従来の集束電極積層構造と対比して示す。両構造の電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)および陰極からの放射電流(I_c)は、集束電極電圧(V_f)がゲート電極電圧(V_g)と同じ 60V としたときの値を基準とした相対値である。ゲート電極凸構造($h_f = -0.2\mu\text{m}, 0\mu\text{m}$)および従来の集束電極積層構造ともに、集束電極電圧(V_f)をゲート電極電圧(V_g)より下げるほど電界集束

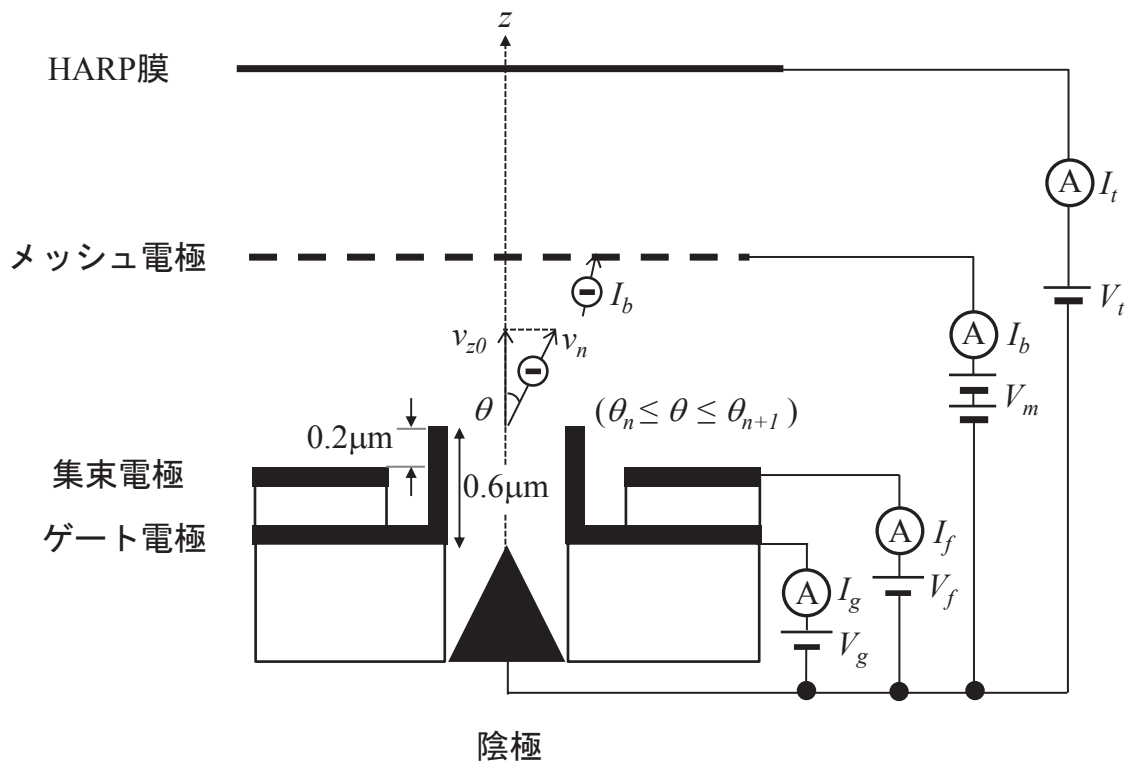
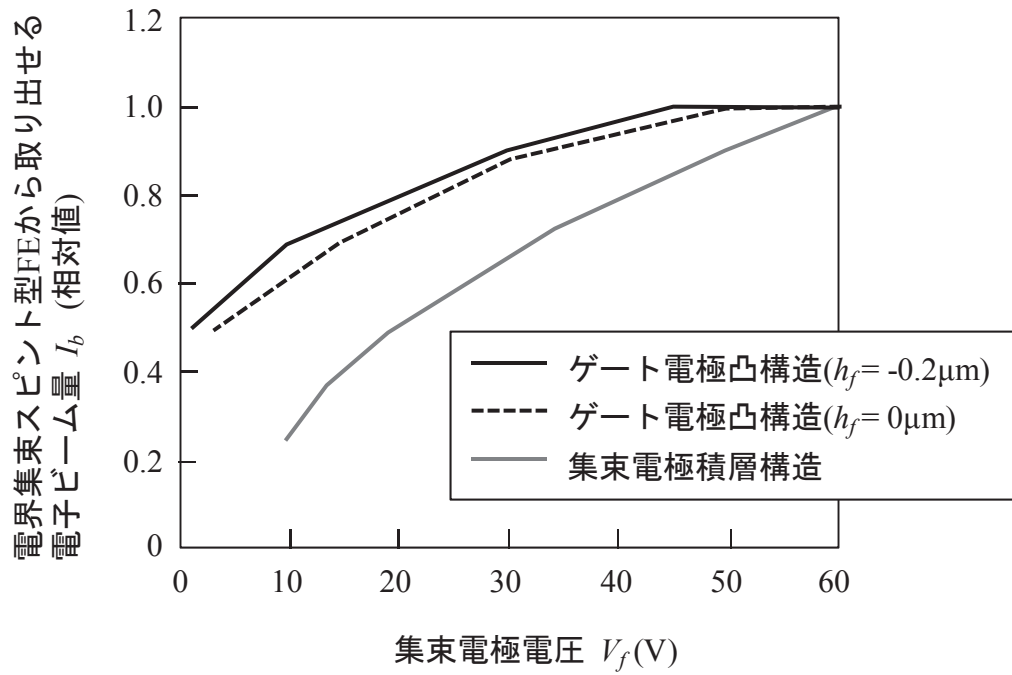
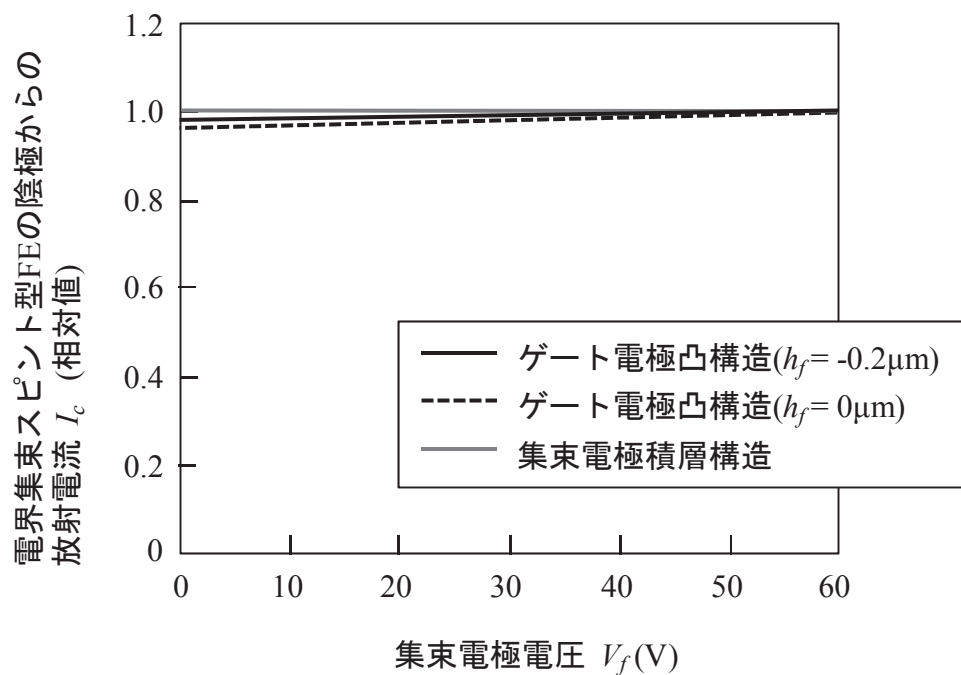


図 3.15 ゲート電極凸構造の電界集束スピント型 FE を適用した平面撮像管の電子軌道解析モデル



(a) 電界集束スピント型FEから取り出せる電子ビーム量(I_b)と集束電極電圧(V_f)との関係



(b) 電界集束スピント型FEの陰極からの放射電流(I_c)と集束電極電圧(V_f)との関係

図 3.16 放射電子特性の解析値

スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)は減少するが、ゲート電極凸構造では従来の集束電極積層構造に比べて取り出せる電子ビーム量(I_b)の減少が抑制されていること、さらに、集束電極の位置をゲート電極開口上端より $0.2\mu\text{m}$ 下に配置した場合($h_f = -0.2\mu\text{m}$)の I_b の減少は、ゲート電極開口上端と同じ高さに配置した場合($h_f = 0\mu\text{m}$)と比べて減少が抑制されることがわかった。集束電極電圧(V_f)が 15V の場合を一例に挙げると、 I_b はそれぞれ 0.73 (ゲート電極凸構造 : $h_f = -0.2\mu\text{m}$)、 0.68 (ゲート電極凸構造 : $h_f = 0\mu\text{m}$)、および 0.4 (従来の集束電極積層構造)である。従って、集束電極をゲート電極開口上端よりも $0.2\mu\text{m}$ 下に配置した場合($h_f = -0.2\mu\text{m}$)、約 73% の電子はゲート電極へと戻らず、ゲート電極凸構造から取り出せる電子ビーム量(I_b)は従来の集束電極積層構造と比較して約 1.8 倍向上した。一方、陰極からの放射電流(I_c)はゲート電極凸構造($h_f = -0.2\mu\text{m}$, $0\mu\text{m}$)および従来の集束電極積層構造のいずれもほぼ同じであり、集束電極電圧によらずほぼ一定であった。これは、陰極先端の電界集中減衰を抑制する効果がいずれの構造においても得られることを示している。

以上の結果から、ゲート電極凸構造においては、集束電極をゲート電極開口上端と同じ高さに配置する場合($h_f = 0\mu\text{m}$)と比較して、ゲート電極開口上端より $0.2\mu\text{m}$ 下に配置した場合($h_f = -0.2\mu\text{m}$)の方が取り出せる電子ビーム量が多く、ゲート電極凸構造($h_f = -0.2\mu\text{m}$)から取り出せる電子ビーム量(I_b)は従来の集束電極積層構造と比較して約 1.8 倍向上することが電子軌道解析によって示された。

3.6 ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE^{1, 3, 7-8)}

ゲート電極凸構造の電界集束スピント型 FE と同様に集束電極をゲート電極開口部より下方に配置した電極構造を有する FE にボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE⁷⁻⁸⁾がある．アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子初速度を用いた新規解析手法の解析精度を検証するため、ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE における放射電子特性の実測値を解析値と比較した．図 3.17 および 3.18 にボルケーノ構造電界集束スピント型 FE 断面の走査型電子顕微鏡像とボルケーノ構造電界集束スピント型 FE を適用した平面撮像管の解析モデルをそれぞれ示す．ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)の解析には 3.4 節に示した手法を適用した．すなわち、図 3.19 に示すアクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の解析値が実測と一致するようにゲート電極開口部における電子初速度を次式で与えた．

$$v_0 = 2.9 \times 10^{12} \quad [\mu\text{m} / \text{s}] \quad (3.5)$$

$$v_{z0} = v_0 \cos\theta \quad (0 \leq \theta \leq 90^\circ) \quad (3.6)$$

ここで、 θ はゲート電極開口部における電子の発散角であり 0° から 90° と設定した．これは、集束電極はゲート電極開口上端より $0.2\mu\text{m}$ 下に位置し、陰極先端はゲート電極開口部上端の近くまで突出しているため、HARP 膜へと向かう電子ビームはその途中でゲート電極や層間絶縁膜および集束電極に遮られることがほとんどないと想定したためである．ゲート電極電圧(V_g)およびメッシュ電極電圧(V_m)はそれぞれ 50V および 500V と設定した．

ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE の放射電子特性の実測値は、計 10 個のボルケーノ構造電界集束スピント型 FE から同時に放射された電子の放射特性を測定し、FE 数(10 個)で割って求めた．ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)と集束電極電圧(V_f)との関係の実測値および解析値を従来の集束電極積層構造と比較して図 3.20 に示す．FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)は集束電極電圧(V_f)を下げると $15 \leq V_f \leq 50\text{V}$ の範囲では緩やかに減少し、さらに V_f を下げると急激に減少した． I_b の解析値は実測値とほぼ一致した． $V_f = 15\text{V}$ においてボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)を一例として挙げると、 I_b は約 $45.3 \text{ nA}/\text{tip}$ であり、従来の集束電極積層構造電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量($I_b = 23.6 \text{ nA}/\text{tip}$)と比べて約 1.9 倍に向上した．図 3.21 にはボルケーノ構造電界集束スピント型 FE のゲート電極電流(I_g)と

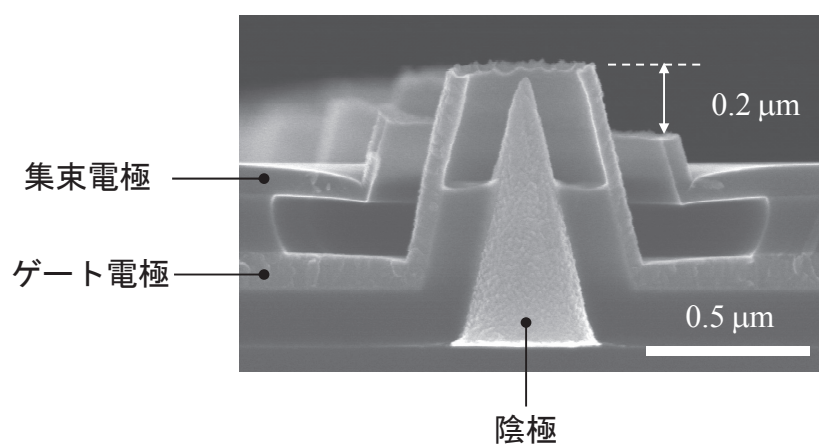


図 3.17 ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE 断面の走査型電子顕微鏡観察像

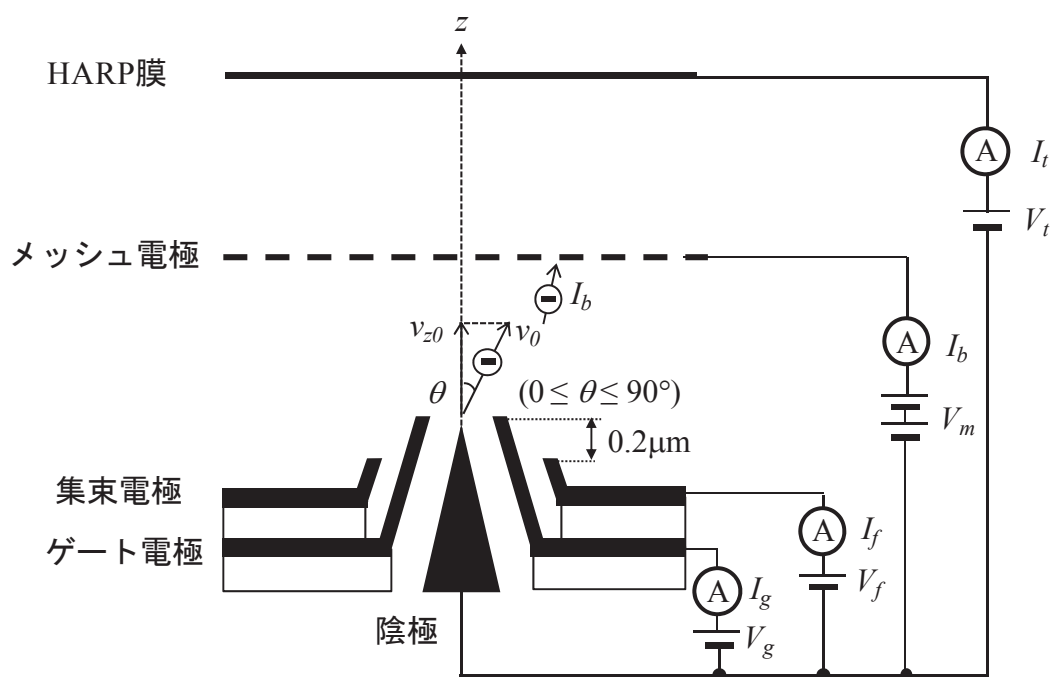


図 3.18 ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE を適用した平面撮像管の電子軌道解析モデル

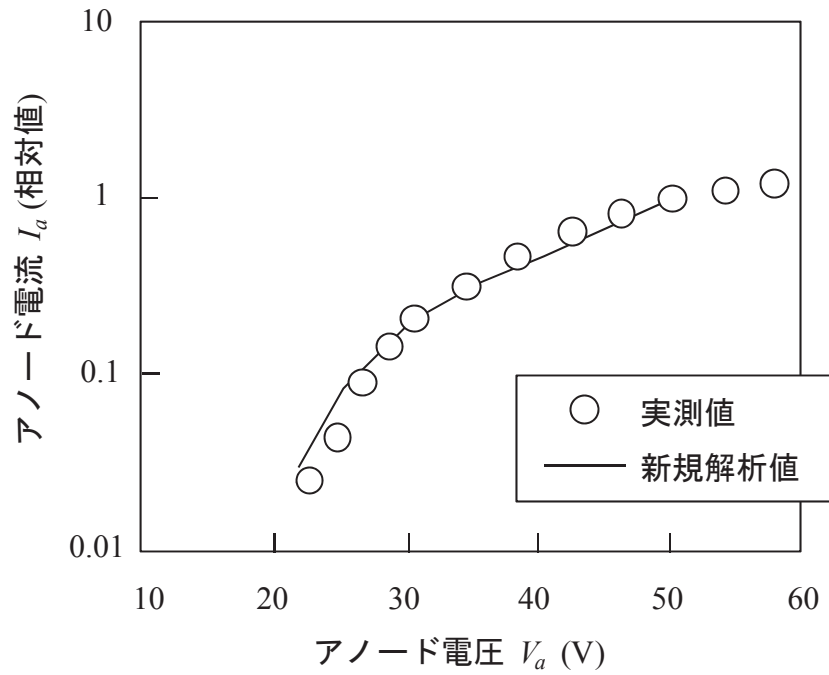


図 3.19 アクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の実測値と解析値

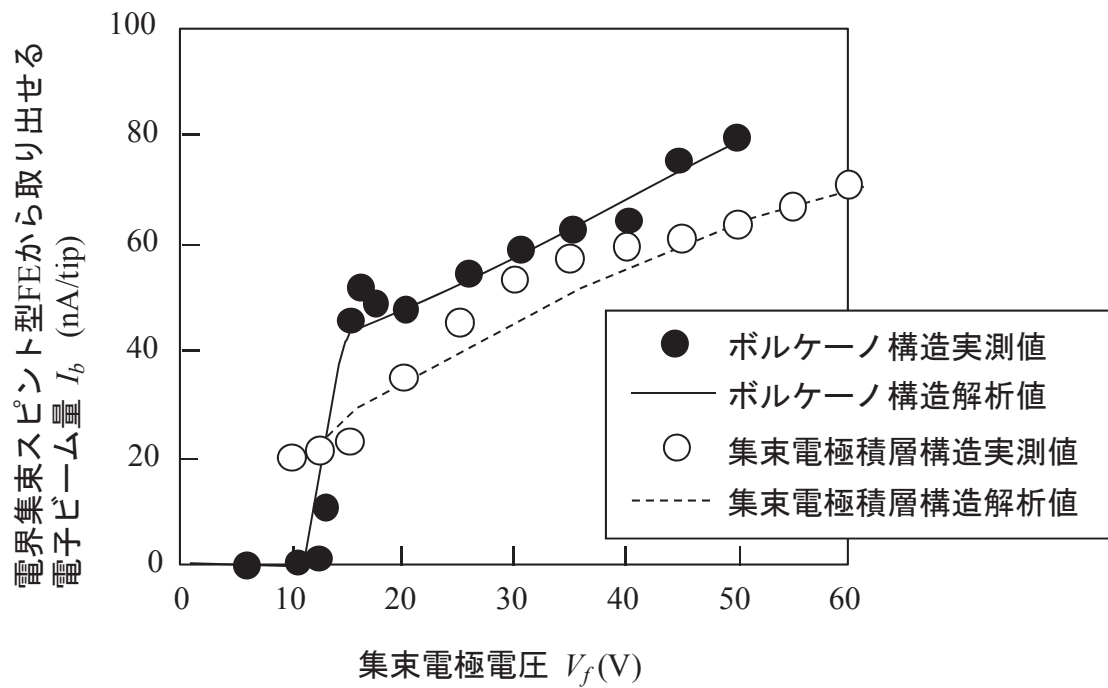


図 3.20 電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)と集束電極電圧(V_f)との関係

集束電極電圧(V_f)との関係の実測値および解析値を従来の集束電極積層構造と比較して示す. ボルケーノ構造のゲート電極電流(I_g)は $15 \leq V_f \leq 50\text{V}$ の範囲で約 $2\text{nA}/\text{tip}$ であり, 集束電極電圧(V_f)を 15V より下げると $40\text{nA}/\text{tip}$ 前後に増加した. この結果は, 集束電極電圧(V_f)が 15V 以上の場合, ほぼ全ての電子はゲート電極に戻らない事を示している. また, ゲート電極電流(I_g)の解析値は実測値とほぼ一致した. 図 3.22 にはボルケーノ構造電界集束スピント型 FE の陰極からの放射電流(I_c)と集束電極電圧(V_f)との関係の実測値および解析値を従来の集束電極積層構造と比較して示す. 集束電極電圧(V_f)がゲート電極電圧(V_g)と同じ 50V のとき, ボルケーノ構造の陰極からの放射電流(I_c)は約 $82.4\text{nA}/\text{tip}$ であり, V_f を下げると I_c は減少した. これは, 陰極先端の電界集中が減衰したためと考えられる. これらの結果から, 集束電極電圧(V_f)を下げたときのボルケーノ構造電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量(I_b)の減少は, ゲート電極より低い電圧を印加した集束電極が形成する電界により陰極先端近傍の電界集中が弱められることによる陰極からの放射電流(I_c)の減少が主な原因であることがわかった. ここで, 電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)と無集束時($V_f = V_g$)の陰極からの放射電流(I_c)の比を電子ビーム取り出し効率 (I_b/I_c)と定義すると, ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE の電子ビーム取り出し効率(I_b/I_c)は集束電極電圧(V_f)をゲート電極電圧(V_g)より下げていくと低下し, 例えば集束電極電圧(V_f)が 15V における電子ビーム取り出し効率(I_b/I_c)を一例に挙げ

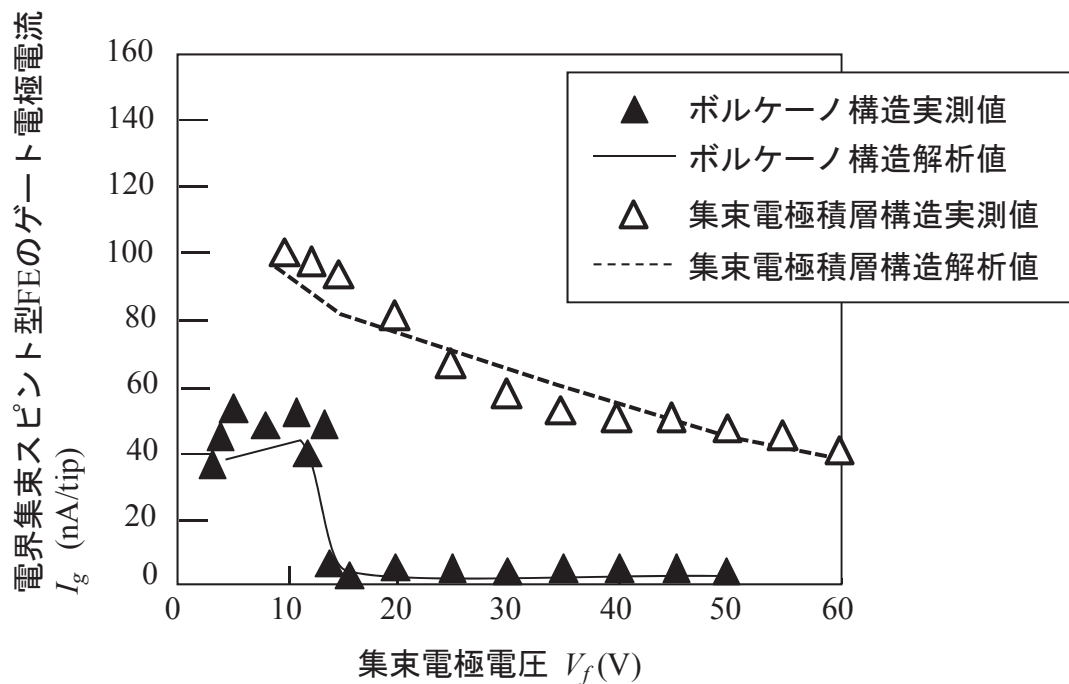


図 3.21 電界集束スピント型 FE のゲート電極電流(I_g)と集束電極電圧(V_f)との関係

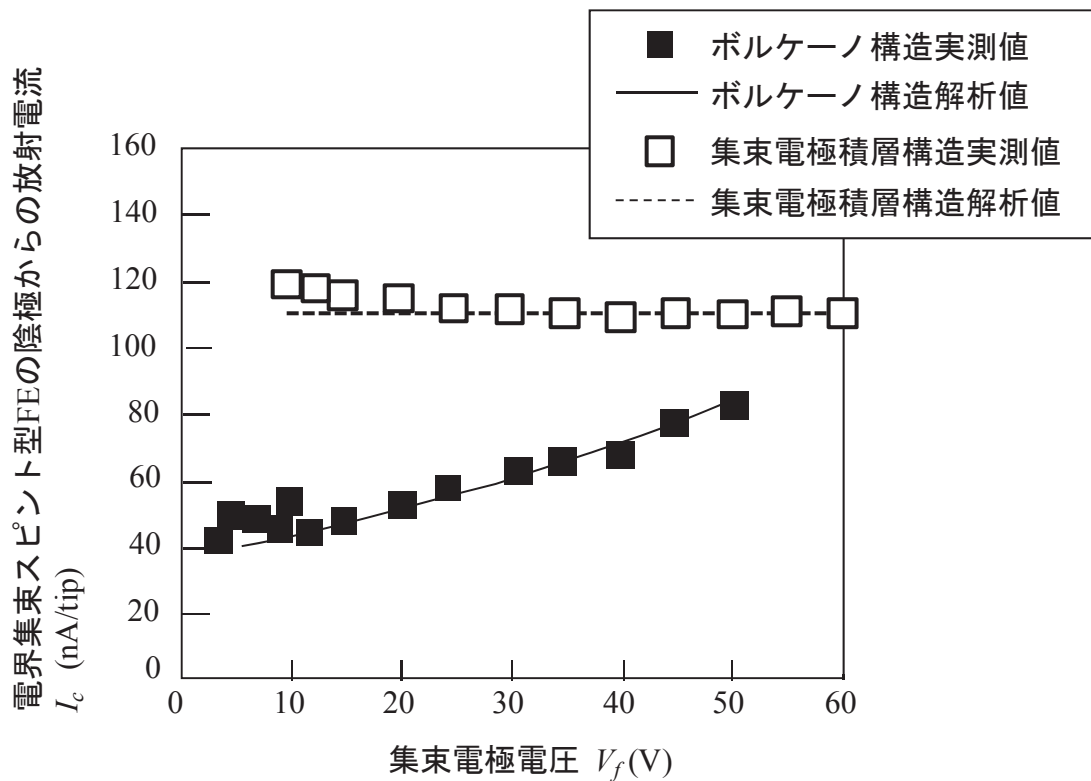


図 3.22 電界集束スピント型 FE の陰極からの放射電流(I_c)と集束電極電圧(V_f)との関係

ると、(I_b/I_c)は約 0.55 である．集束電極積層構造電界集束スピント型 FEA の $V_f=15\text{V}$ における (I_b/I_c)は約 0.21 であることから、集束電極積層構造と比較して電子ビーム取り出し効率は約 2.6 倍に向上することがわかった．

ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE の放射電子特性を実測および解析により求め、両者はほぼ一致する事を確認した．これにより、アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子初速度を用いた電子軌道解析モデルの妥当性を確認するとともに、ゲート電極凸構造およびボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE では、従来の集束電極積層構造と比較して FE から取り出せる電子ビーム量を 1.8 倍～1.9 倍に向上できることを確認した．

ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE および集束電極積層構造スピント型 FE の電子軌道解析モデルにおいてアクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の解析値が実測値と一致するように電子初速度を設定した．このとき、ボルケーノ構造 FE の電子初速度は 3.5 式および 3.6 式で示すように 1 種の電子初速度で表しているのに対し、集束電極積層構造 FE の電子初速度は図 3.12 で示すように複数の電子初速度群で構成される．これは集束電極積層構造 FE において電子がゲート電極開口の壁面に衝突し 2 次電子放出が起きることにより、1 種の電子初速度と電極構造の開口角で律束される電子ビーム発散角の範囲内では表現できないほど、実際の

電子速度が広範囲に分布したためと考えられる。一方、ボルケーノ構造 FE では陰極先端がゲート電極開口部上端の近くまで突出しており、集束電極はゲート電極開口部より下に配置するため、電極構造により発散角はほとんど律束されない。よって 2 次電子放出の影響は少なく、1 種の電子初速度で実際の電子速度分布が表現できたものと考えられる。

3.7 まとめ

集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管を試作し、出力映像に発生する輝度ムラが課題であることを示した。また、輝度ムラ発生の抑制には、同 FEA から取り出せる電子ビーム量を増やすこと、すなわち、減速電界により失速しゲート電極へと戻る電子ビーム量を抑制する事が有効であることを同平面撮像管に磁界集束系を適用した撮像実験により示した。

電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造の検討には電子軌道解析を用いるが、マクスウェル分布を用いて電子初速度を仮定する従来の解析モデルでは、放射電子特性の解析精度が不十分であることがわかった。そこで、電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造の検討に先立ち、放射電子特性を高精度に解析する新たな解析モデルを提案した。新たな解析モデルでは、アクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の解析値が実測値と一致するように電子初速度を設定する。提案手法により、集束電極積層構造電界集束スピント型 FE の放射電子特性は、解析値と実測値がほぼ一致する事を確認した。次に、提案する解析モデルを用いて電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造を検討した。その結果、ゲート電極凸構造およびボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE では、従来の集束電極積層構造と比較して FE から取り出せる電子ビーム量を 1.8 倍～1.9 倍に向上できる事を確認した。併せて、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE の放射電子特性は実測値と解析値がほぼ一致する事を確認し、アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子初速度を用いた電子軌道解析モデルの妥当性を確認した。

参考文献

- 1) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, "Double-Gated, Spindt-Type Field Emitter With Improved Electron Beam Extraction," IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 63, no. 5, pp. 2182-2189, 2016.
- 2) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 長尾昌善, 根尾陽一郎, 三村秀典, 江上典文, "電界集束型 FEA-HARP 撮像素子の放射電子特性," 電子情報通信学会技術研究報告 電子デバイス, vol.115, no.264, ED2015-56, pp.11-14, 2015.
- 3) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, and Norifumi Egami, "Electrostatic-Focusing Spindt-Type FEA with Improved Electron-Beam Extraction Efficiency for FEA-HARP Image Sensor," The 21st International Display Workshops (IDW '14), FED1-2, pp. 579-582, 2014.
- 4) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 根尾陽一郎, 三村秀典, 江上典文, "電界集束スピント型冷陰極の電子ビーム取り出し効率の改善," 電子情報通信学会技術研究報告, ED 電子デバイス, vol.114, no.262, ED2014-63, pp. 7-10, 2014.
- 5) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 江上典文, "電界集束型 FEA-HARP の電子ビーム取り出し効率の改善," 映像情報メディア学会年次大会, 9-2, 2014.
- 6) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, and Norifumi Egami, "Electrostatic-Focusing Spindt-Type FEA with Improved Electron-Beam Extraction Efficiency for Image Sensor with HARP Target," 27th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2014), S3 C-1, pp.19-20, 2014.
- 7) M. Nagao, T. Yoshida, T. Nishi, and N. Koda, "A Novel Fabrication of Spindt-Type Field Emitters with Focusing Electrodes," Tech. Dig. IVNC, I26, pp. 110-111, 2012.
- 8) M. Nagao, and T. Yoshida, "Fabrication of Gated Nano Electron Source for Vacuum Nanoelectronics", Microelectron. Eng., vol. 132, pp. 14-20, 2015.

第 4 章

ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の設計と試作

4.1 はじめに

集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA は、基礎実験用電界集束スピント型 FEA と比べて画素当たりの放射電流を約 4.7 倍に向上できるものの、電界集束時に FEA から取り出せる電子ビーム量の最小値は約 $0.5\mu\text{A}/\text{pix}$ まで減少し、高品質な映像を得るための目標値である最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上を満たすことはできなかった。これは電界集束時に集束電極近傍に形成される減速電界により電子は減速し、半数以上の電子が失速してゲート電極へと戻ることが主な要因である。磁界集束系を用いた撮像実験により、失速による電子のゲート電極への戻りを抑制する事が出力映像に発生する輝度ムラの抑制に有効であることを確認した。また、アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子初速度を用いた電子軌道解析モデルを提案し、従来解析手法と比べ解析精度が向上する事を確認するとともに、提案した解析モデルを用いて電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造を検討した。その結果、集束電極をゲート電極開口部より $0.2\mu\text{m}$ 下に配置したゲート電極凸構造およびボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE では、従来の集束電極積層構造(集束電極はゲート電極より $1.5\mu\text{m}$ 上に配置)と比較して FE から取り出せる電子ビーム量を 1.8 倍～1.9 倍に向上できることを確認した。

本章では、集束電極をゲート電極開口部より $0.2\mu\text{m}$ 下に配置したボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の設計と試作結果について述べる。初めに、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を画素内に配置する際の最適な FEA ピッチについて述べる。次に、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した平面撮像管の試作結果について述べる。

4.2 ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した平面撮像管の設計¹⁾

電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管における課題は、電界集束時に

電子ビーム量が減少する事によって出力映像に発生する輝度ムラであること、集束電極をゲート電極開口部より $0.2\mu\text{m}$ 下に配置したゲート電極凸構造およびボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE では、従来の集束電極積層構造(集束電極はゲート電極より $1.5\mu\text{m}$ 上に配置)と比較して FE から取り出せる電子ビーム量を 1.8 倍～1.9 倍に向上できることを 3 章で述べた。この結果を基に、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を平面撮像管に適用することとし、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した平面撮像管を設計した。

画素内に配置するボルケーノ構造 FEA²⁻³⁾は、密度が高いほど、すなわち画素あたりの FE 数が多いほど画素から得られる電子ビーム量は増加するが、その一方で、電界集束時に集束電極周囲の空間に形成される電界すなわち静電レンズは図 4.1(a)に示すように集束電極開口部よりも大きな領域にわたり形成されるため、ボルケーノ構造 FEA を狭ピッチ化していくと、隣接する静電レンズ同士が干渉し、電界集束効果が十分に得られなくなることが予想される。従って、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を平面撮像管に適用するためには、画素内に配置するボルケーノ構造 FEA の FE 数すなわち FEA ピッチを最適化する必要がある。そこで、図 4.2 に示す解析モデルを用いて、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA のピッチと HARP 膜上での電子ビーム広がりとの関係および画素内に配置する FE 数と取り出せる電子ビーム量との関係を求めた。ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA のピッチは $1.7\mu\text{m}$ から $10.2\mu\text{m}$ まで変化させた。集束電極はゲート電極開口部よりも $0.2\mu\text{m}$ 下に配置した。ゲート電極とメッシュ電極に印加する電圧はそれぞれ 60V , 500V とした。ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA とメッシュ電極との間隔、およびメッシュ電極と HARP 膜との間隔はいずれも 0.25mm とした。

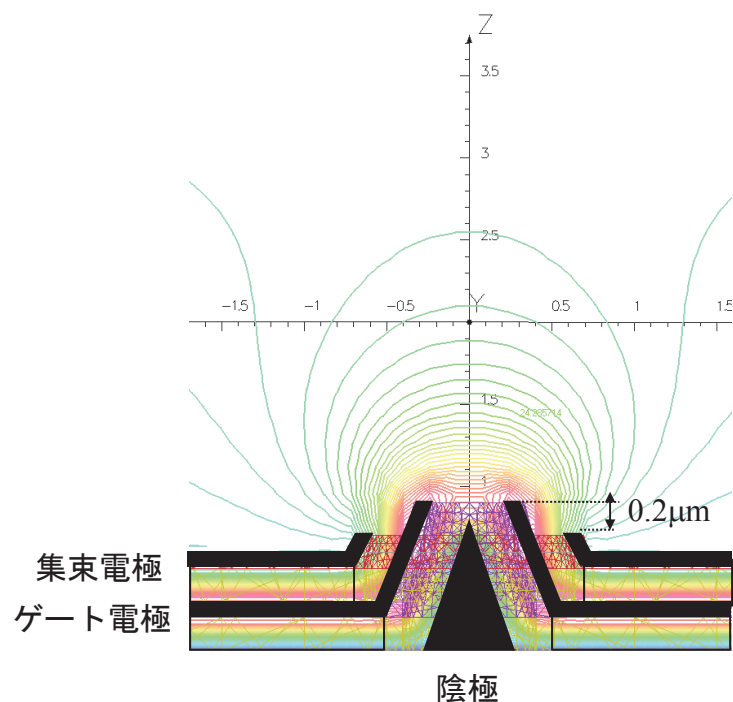
HARP 膜の電子ビーム走査側の電位(面電位 V_t)は HARP 膜に蓄積される電荷量(Q_t), HARP 膜の容量(C_t)および陰極電位(V_k)に依存し (2.1 式), $V_k = 0\text{V}$ とした場合以下の式で表すことができる。

$$Q_t = C_t V_t \quad (4.1)$$

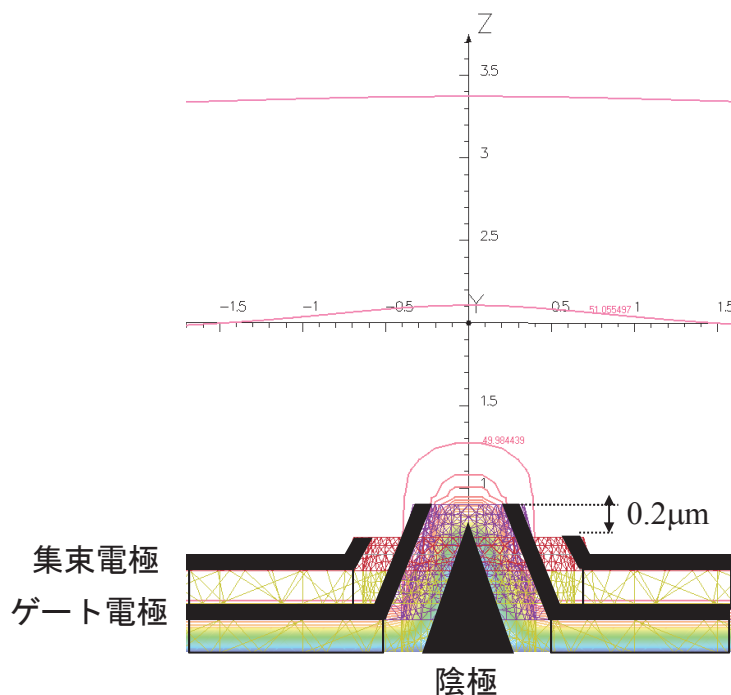
4.1 式を時間で微分すると以下の式が得られる。

$$\frac{dQ_t}{dt} = I_t(t) = C_t \frac{dV_t}{dt} \quad (4.2)$$

ここで、 $I_t(t)$ は HARP 膜に蓄積される電荷を電子ビームで読み出した際の出力信号電流を表す。FEA から放射される電子ビームの垂直方向の速度には例えば



(a) 集束電極電圧(V_f): 15V
ゲート電極電圧(V_g): 50V



(b) 集束電極電圧(V_f): 50V
ゲート電極電圧(V_g): 50V

図 4.1 ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE における等電位線の解析結果

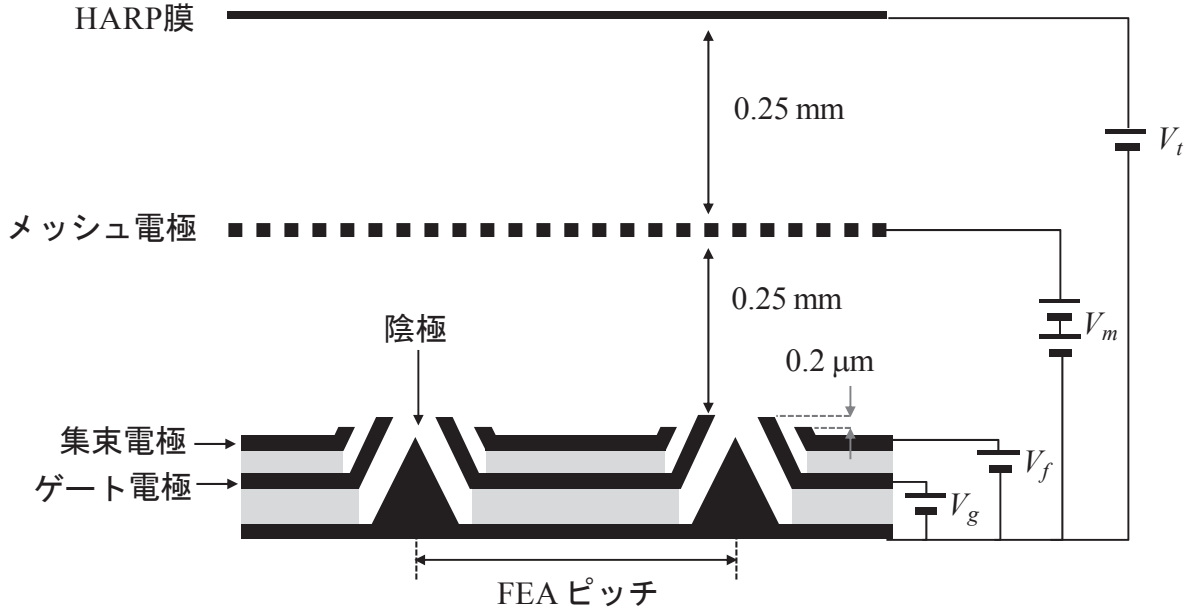


図 4.2 ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の最適 FEA ピッチを求めるための電子軌道解析モデル

3 章の 3.5 式および 3.6 式で仮定したように速度分布があり、図 3.19 で示したアクセプタンスカーブのアノード電極を HARP 膜に置き換えた場合、HARP 膜の蓄積電荷を電子ビームで読み出す過程において HARP 膜の面電位(V_t)が下がるほど、蓄積電荷の読み出しに寄与できる電子ビーム量は減少する。図 4.2 に示す解析モデルでは、蓄積電荷の読み出しに寄与できる電子ビーム量、すなわちアクセプタンスカーブを考慮して HARP 膜の面電位(V_t)を設定した。アクセプタンスカーブを考慮した場合、4.2 式は以下の式となる。

$$\frac{dQ_t}{dt} = I_t(V_t(t)) = C_t \frac{dV_t(t)}{dt} \quad (4.3)$$

4.3 式に示す微分方程式を有限差分近似すると以下の式が得られる。

$$I_t(V_t(t)) = C_t \frac{dV_t}{dt} \cong C_t \frac{\Delta V_t(t + \Delta t) - \Delta V_t(t)}{\Delta t} \quad (4.4)$$

4.4 式より HARP 膜の面電位(V_t)の時間進展は以下の式により算出する事が出来る。

$$\Delta V_t(t + \Delta t) \cong \frac{\Delta t}{C_t} I_t(V_t(t)) + \Delta V_t(t) \quad (4.5)$$

$$V_t(t = 0) = \frac{Q_t}{C_t} = \frac{1}{C_t} \int I_t(t = 0) dt \quad (4.6)$$

但し、4.6 式に示した初期条件において、出力信号電流($I_t(t=0)$)は映像信号の白レベルを規定する基準信号電流 $0.2\mu\text{A}$ とし、各画素の蓄積電荷読み出し期間は 80ns (NTSC 規格)、画素サイズは $20 \times 20\mu\text{m}^2$ 、HARP 膜の厚さは $15\mu\text{m}$ 、比誘電率は 6、画素当たりの HARP 膜容量(C_t)は $1.42 \times 10^{-15} \text{ F}$ とした。図 4.3 に HARP 膜の蓄積電荷を電子ビームで読み出す際の面電位(V_t)の時間推移を示す。読み出し期間と次の読み出し期間との間に HARP 膜に入射する光によって追加される蓄積電荷を考慮し、2 回目以降の蓄積電荷読み出しを行う直前の HARP 膜の面電位(V_t)には、4.6 式に示す面電位($V_t(t=0)$)を加算した。面電位 V_t と出力信号電流 I_t との関係は、図 4.4 に示すボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA のアクセプタンスカーブ実測値を基に以下の式で近似した。

$$\begin{aligned} I_t(V_t) \cong & -2 \times 10^{-16} V_t^6 + 6 \times 10^{-14} V_t^5 - 8 \times 10^{-12} V_t^4 + 5 \times 10^{-10} V_t^3 \\ & + 1 \times 10^{-8} V_t^2 + 1 \times 10^{-7} V_t - 6 \times 10^{-7} \end{aligned} \quad (4.7)$$

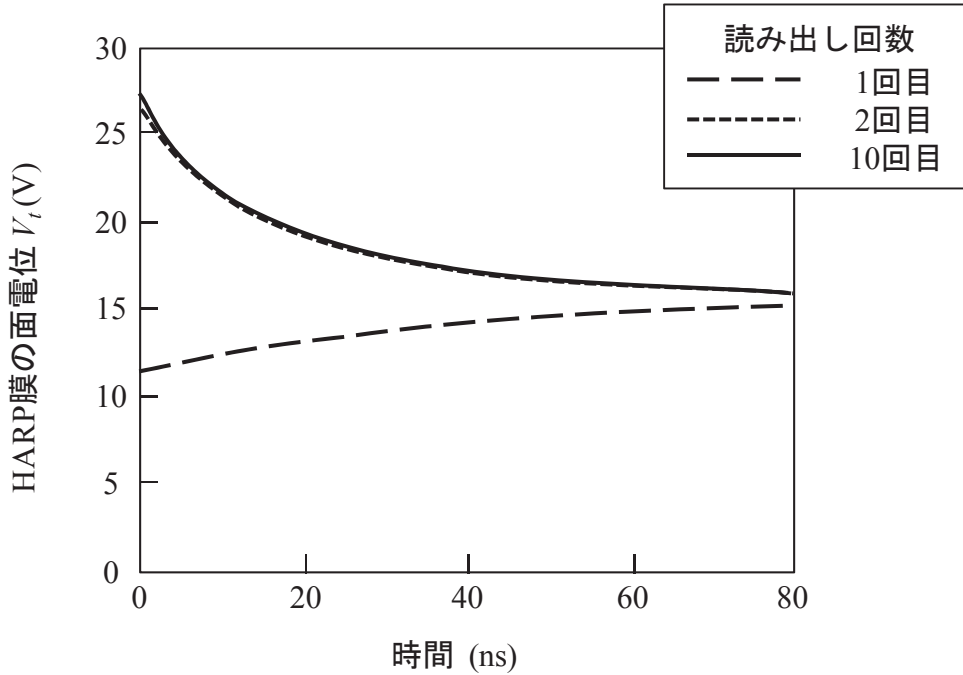


図 4.3 電子ビーム読み出し時の HARP 膜の電子ビーム走査側の電位(面電位)の時間推移

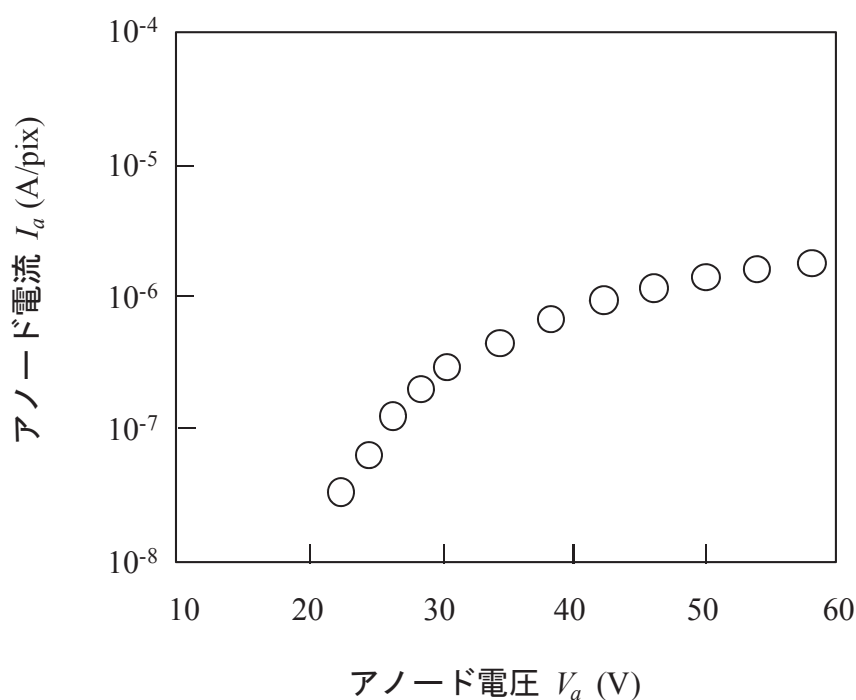


図 4.4 アクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の実測値

読み出し動作を 10 回繰り返したところ、電子ビームによる蓄積電荷の読み出し完了時の HARP 膜の面電位(V_t)は約 15.9V で平衡状態となった。この平衡電位は、電子ビームの速度分布によって HARP 膜の面電位が低くなるほど蓄積電荷の読み出しに寄与できる電子ビーム量が減少し、定常的に読み残してしまう蓄積電荷(残留電荷)が存在することに起因している。この残留電荷は出力信号に寄与しないため、撮像動作において電子ビームにより蓄積電荷を全て読み出すことは、残留電荷以外の蓄積電荷を全て読み出すことを意味する。以上の結果より、図 4.2 に示す解析モデルにおける HARP 膜の面電位(V_t)は、基準信号電流 0.2 μ A に相当する面電位(11.29V)に残留電荷による面電位(15.9V)を加算した 27.19V に設定した。

ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA のピッチと HARP 膜上での電子ビーム広がりとの関係の解析結果を図 4.5 に示す。但し、電子ビームの広がりとは HARP 膜上での電流密度分布の半値幅と定義した。HARP 膜上での電子ビームの広がりとは FEA ピッチが 3.2 μ m 以上の場合はほぼ同じ値であり、電子ビーム広がりとは 20 μ m 以下であった。集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の画素サイズは 20 $\times$ 20 μ m² であることから、図 3.6 で示した撮像例と同程度の解像度がボルケーノ構造 FEA を適用した電界集束型平面撮像管においても期待できる。一方、FEA ピッチが 2.2 μ m 以下の場合、狭ピッチ化するほど HARP 膜上での電子ビーム広がりとは大きくなり、電子ビーム広がりとは 160 μ m 以上に広がった。この電子ビーム広がり

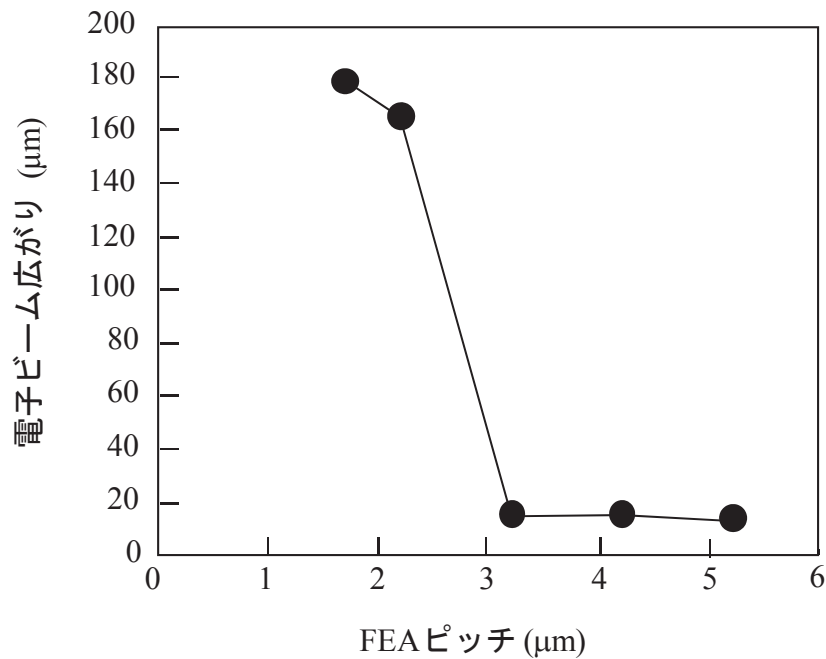


図 4.5 HARP 膜上での電子ビーム広がり半値幅とボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の FEA ピッチとの関係の解析値

は、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の画素サイズ $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ の 8 倍以上であり、解像度の劣化が予想される。これらの結果は、ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA を $2.2 \mu\text{m}$ 以下に狭ピッチ化すると、隣接する静電レンズ同士の干渉により電子ビームの集束効果が弱まり、電子ビームは画素サイズ $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ より大きく広がってしまうことを示している。

図 4.6 にはボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA が配置された画素から取り出せる電子ビーム量と同 FEA ピッチとの関係を表す計算結果を示す。画素から取り出せる電子ビーム量は、ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE において集束電極電圧(V_f)を 15V とした場合に取り出せる電子ビーム量(I_b) 45.3 nA/tip に画素あたりの FE 数を掛けて求めた。画素サイズは $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ とした。ボルケーノ構造 FEA のピッチを広くするほど、画素あたりの FE 数は減少し、画素から取り出せる電子ビーム量も減少する。ボルケーノ構造 FEA ピッチを $5.2 \mu\text{m}$ 以上に広げると、画素から取り出せる電子ビーム量の平均値は $1 \mu\text{A}/\text{pix}$ を下回り、高品質な映像を得るための目標値を満たすことはできなくなる。以上の結果より、電子ビームの電界集束効果と目標値を満たす電子ビーム量との両立を図るためには、ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA のピッチは $3 \mu\text{m}$ 程度が妥当であると判断した。

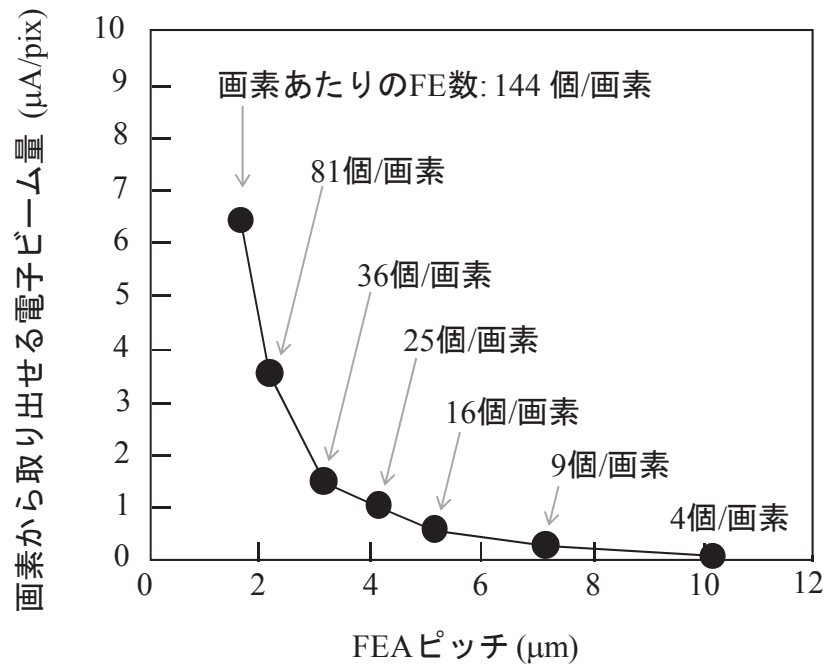


図 4.6 画素から取り出せる電子ビーム量(平均値)とボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の FEA ピッチとの関係の計算値

4.3 ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した平面撮像管の試作^{1, 4)}

電子軌道解析による最適なボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA のピッチの検討結果を基に、FEA ピッチを $3.1\mu\text{m}$ としたボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した平面撮像管を試作した。画素数は 100×50 、画素サイズは $20 \times 20\mu\text{m}^2$ 、画素あたりの FE 数は 39 個とした。集束電極はゲート電極開口部より $0.2\mu\text{m}$ 下に配置した。図 4.7 に試作したボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の走査型電子顕微鏡観察像を示す。同 FEA はアクティブマトリクス駆動回路の上に形成した。ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)とその電子ビーム量(I_b)が得られる画素数との関係を表したヒストグラムを集束電極積層構造の場合と比較して図 4.8 に示す。測定条件は集束電極積層構造の場合(図 3.4)と同じとした。すなわち、母数は 100 画素とし、各電子ビーム量は、単一画素から周期 1/60s, Duty 比 4.8%で電子を放射させた際にボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量の平均値を測定して、ピーク値に換算することで求めた。ボルケーノ構造 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)は集束電極積層構造

FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)よりも多く, ボルケーノ構造 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)の最小値は約 $2\mu\text{A}/\text{pix}$ であった. 従って, ボルケーノ構造 FEA から取り出せる電子ビーム量は, 高品質な映像を得るための目標値である最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上を満たすことができた.

ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の撮像例を図 4.9 に示す. 電子ビームの集束効果により, 被写体である女性の顔の一部を確認する事が出来た. また, 集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の撮像例と比較して, 出力映像の輝度ムラが抑制され, 画質が向上したことを確認できた. 試作した平面撮像管の画素サイズ $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ は NTSC 方式準拠のテレビ用 1 インチ撮像素子における画素サイズに相当する. また, ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA は NTSC 規格(1 画素当たりの駆動時間約 80ns)で駆動した. 従って, ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管は, 磁界集束系を適用した平面撮像管⁵⁻⁹⁾と比較して格段に小型な電子ビーム集束系を備えた NTSC 方式テレビ用撮像素子の実現可能性を示すことができた.

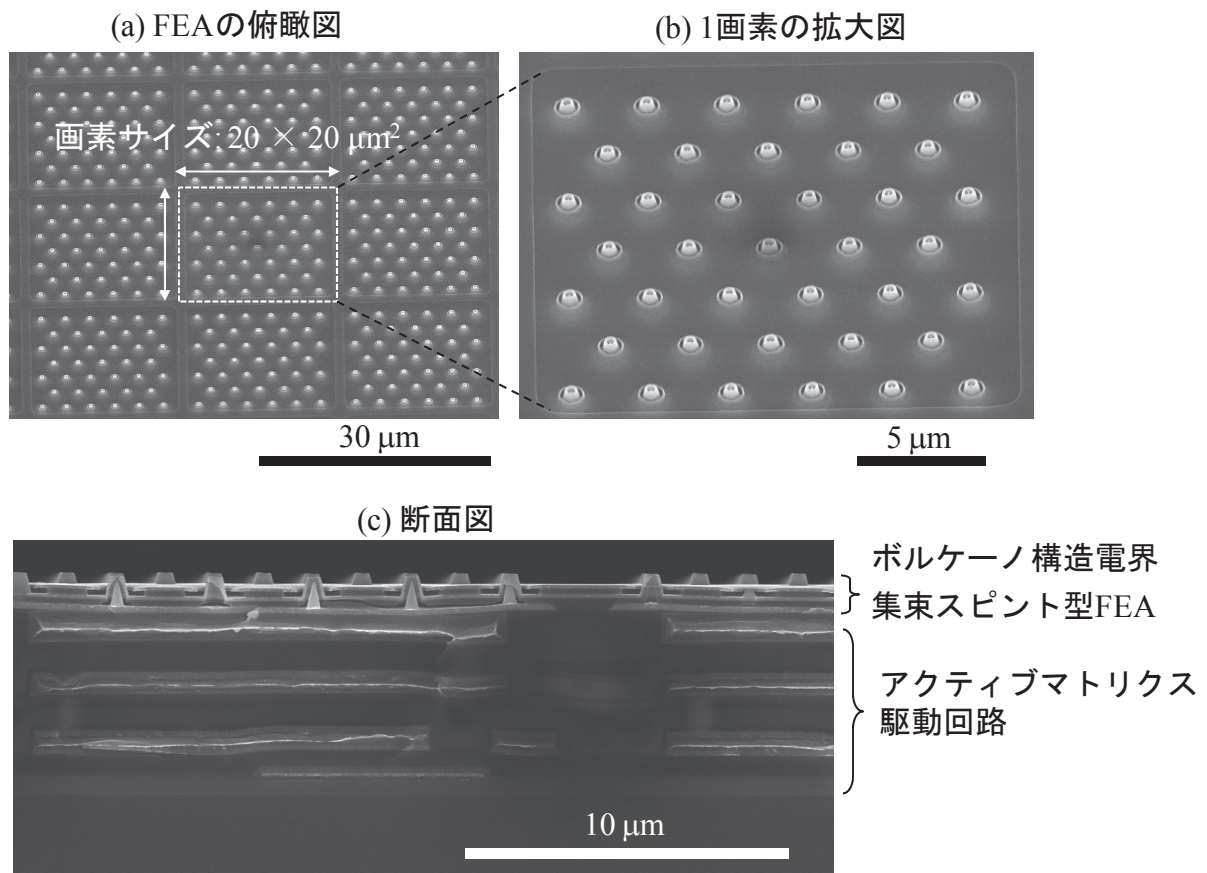


図 4.7 アクティブマトリクス駆動回路上に形成したボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の走査型電子顕微鏡像

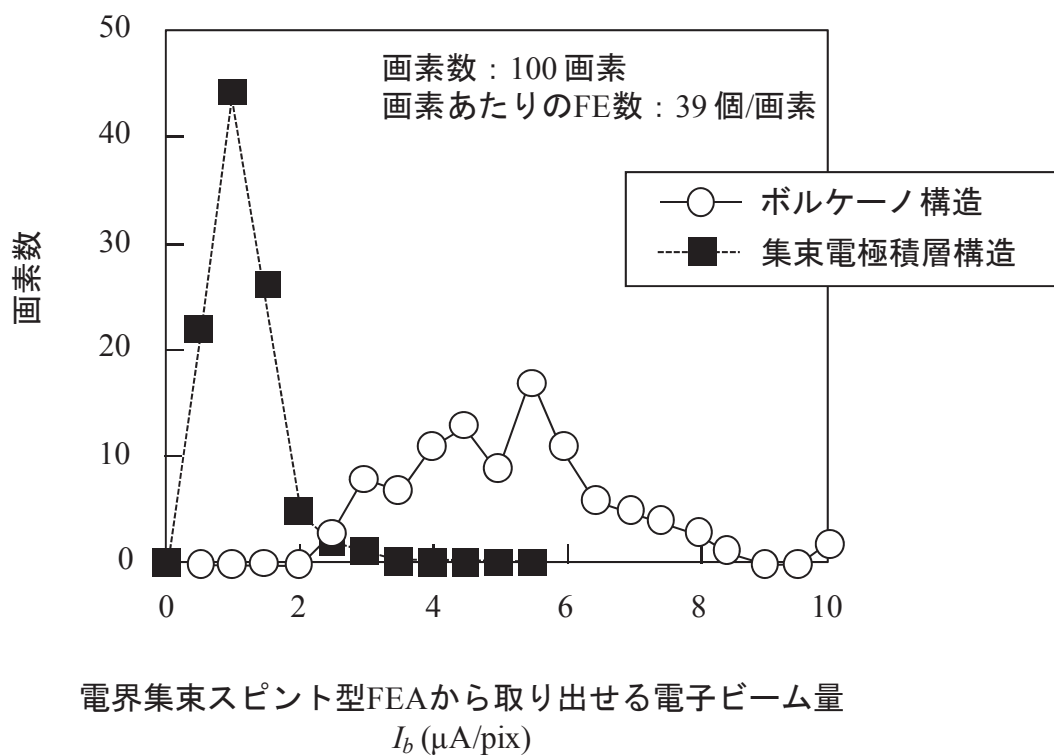


図 4.8 電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)のヒストグラム



画素数: 100×50

画素サイズ: $20 \times 20 \mu\text{m}^2$

FEA: ボルケーノ構造電界集束スピント型

集束電極位置: ゲート電極開口部より $0.2 \mu\text{m}$ 下

画素あたりのFE数: 39 個

電子ビーム集束系: 電界集束

図 4.9 ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管の撮像例

4.4 まとめ

ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を画素内に配置する際の最適な FEA ピッチを電子軌道解析により求めた。同 FEA はピッチを $2.2\mu\text{m}$ 以下に狭ピッチ化すると、隣接する静電レンズ同士の干渉により電子ビームの集束効果が弱まり、電子ビームは画素サイズ $20\times 20\mu\text{m}^2$ より大きく広がってしまうこと、FEA ピッチが $3.2\mu\text{m}$ 以上の場合には、電子ビーム広がりには $20\mu\text{m}$ 以下であり、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管に電界集束系および磁界集束系をそれぞれ適用した場合と同程度の解像度が期待できることを確認した。一方、ボルケーノ構造 FEA のピッチを広くするほど、画素あたりの FE 数は減少し、画素から取り出せる電子ビーム量も減少する。ボルケーノ構造 FEA ピッチを $5.2\mu\text{m}$ 以上に広げると、画素から取り出せる電子ビーム量の平均値が $1\mu\text{A}/\text{pix}$ を下回るため、高品質な映像を得るための目標値を満たすことはできなくなる。以上の結果より、電子ビームの電界集束効果と高品質な映像を得るための目標値を満たす電子ビーム量との両立を図るためには、ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA のピッチは $3\mu\text{m}$ 程度が妥当であると判断した。この結果を基に、FEA ピッチを $3.1\mu\text{m}$ としたボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した平面撮像管を試作した。ボルケーノ構造 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)の最小値は約 $2\mu\text{A}/\text{pix}$ であり、高品質な映像を得るための目標値である最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上を満たすことを確認した。また、撮像実験により、ボルケーノ構造 FEA を適用した平面撮像管において電子ビームの電界集束効果を確認するとともに、出力映像の輝度ムラが抑制されていることを確認した。試作した平面撮像管の画素サイズ $20\times 20\mu\text{m}^2$ は NTSC 方式テレビ用 1 インチ撮像素子における画素サイズに相当すること、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA は NTSC 規格(1 画素あたりの駆動時間約 80ns)で駆動していることから、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管は、磁界集束系を適用した平面撮像管と比較して格段に小さな電子ビーム集束系を備えた NTSC 方式テレビ用撮像素子の実現可能性を示すことができた。

参考文献

- 1) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, “Electrostatic-Focusing Image Sensor with Volcano-Structured Spindt-Type Field Emitter Array,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 34, no. 5, pp. 052201.1-052201.6, 2016.
- 2) M. Nagao, T. Yoshida, T. Nishi, and N. Koda, “A Novel Fabrication of Spindt-Type Field Emitters with Focusing Electrodes,” Tech. Dig. IVNC, I26, pp. 110-111, 2012.
- 3) M. Nagao, and T. Yoshida, “Fabrication of Gated Nano Electron Source for Vacuum Nanoelectronics”, Microelectron. Eng., vol. 132, pp. 14-20, 2015.
- 4) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, “Electrostatic-Focusing FEA-HARP Image Sensor with Volcano-Structured Spindt-Type FEA,” The 22nd International Display Workshops (IDW '15), FED2-3, pp. 601-604, 2015.
- 5) 難波正和, 本田悠葵, 平野善之, 宮川和典, 渡部俊久, 岡崎三郎, 江上典文, 小原有司, 田中満, 伊藤茂生, “1 インチ 256×192 画素磁界集束型冷陰極 HARP 撮像板の緒特性,” 電子情報通信学会技術報告, ED, 電子デバイス, vol. 104, no. 520, ED2004-12, pp. 13-18, 2004.
- 6) Yoshiro Takiguchi, M. Nanba, K. Osada, T. Watabe, S. Okazaki, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka, and S. Itoh, “256×192 Pixel Field Emitter Array Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 22, no. 3, pp. 1390-1395, 2004.
- 7) 難波正和, 瀧口吉郎, 長田勝玄, 宮川和典, 渡部俊久, 岡崎三郎, 江上典文, 小原有司, 田中満, 伊藤茂生, “磁界集束系を備えた 1 インチ 256×192 画素冷陰極 HARP 撮像板,” 映像情報メディア学会誌, vol. 59, no. 3, pp. 396-402, 2005.
- 8) N. Egami, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Miyakawa, T. Watabe, S. Okazaki, K. Osada, Y. Obara, M. Tanaka, and S. Itoh, “50×50μm Pixel Magnetic Focus Field Emitter Array Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 23, no. 5, pp. 2056-2061, 2005.
- 9) M. Nanba, Y. Takiguchi, Y. Honda, Y. Hirano, T. Watabe, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh, and A. Kobayashi, “640 × 480 Pixel Active-Matrix Spindt-Type Field Emitter Array Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 28, no. 1, pp. 96-103, 2010.

第 5 章

アクティブマトリクス駆動回路の応答特性の改善

5.1 はじめに

アクティブマトリクス駆動回路の上に、FEA ピッチを $3.1\mu\text{m}$ としたボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を形成し、HARP 膜と組み合わせた平面撮像管を試作した。試作した平面撮像管は、ボルケーノ構造 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)が高品質な映像を得るための目標値を満たすこと、出力映像の輝度ムラが抑制されており、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管と比べて画質が向上したことを確認した。試作した平面撮像管の画素サイズ $20 \times 20\mu\text{m}^2$ は NTSC 方式テレビ用 1 インチ撮像素子の画素サイズに相当すること、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA は NTSC 規格(1 画素当たりの駆動時間約 80ns)で駆動していることから、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管は、磁界集束系を適用した平面撮像管と比較して格段に小型な電子ビーム集束系を備えた NTSC 方式テレビ用平面撮像管の実現可能性を示すことができた。

本章では、平面撮像管のハイビジョン化に向けて、アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の応答速度を向上することができる新たなアクティブマトリクス駆動回路を提案し、評価用素子による応答特性の評価結果について述べる。

5.2 NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路とハイビジョン駆動に向けた課題¹⁻⁵⁾

これまでに、アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA と HARP 膜とを組み合わせるとともに磁界集束系を適用した画素数 640×480 の NTSC 方式テレビ用平面撮像管を試作し、FEA の応答速度は NTSC 規格での駆動条件(1 画素当たりの駆動時間約 80ns)を満たすことを確認している⁶⁾。本節では、NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路について述べるとともに、ハイビジョン規格(1 画素の駆動時間約 13.5ns)での駆動に向けた課題について述べる。

画素数 640×480 の NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路およびスピント型 FEA の基本構造を図 5.1 に示す。スピント型 FEA は MOS-LSI 技術を用いてシリコンウェハに作製した駆動回路上に形成される。NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路では、各画素に高耐圧 MOS トランジスタ(画素トランジスタ)を配置し、このトランジスタのドレイン(D)に接続する画素電極上に多数のスピント型 FE を形成する。画素トランジスタのゲート(G)とソース(S)にはそれぞれ垂直および水平走査回路を接続する。一方、スピント型 FEA のゲート電極は全画素共通で、このゲート電極に電子放射に必要な DC 電圧を印加するとともに、垂直および水平走査回路から高電圧パルス(例えば 25V)を印加して画素トランジスタを順次選択し、画素電極、すなわち、画素ごとに絶縁分離された陰極に高電圧パルスを印加する事で、各画素に配置した FEA からの電子放射ならびに走査を行う。

NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路の基本動作を以下に述べる。FEA からの電子ビームによる垂直方向の走査は、垂直走査回路から高電圧パルス(例えば 40V)を画素トランジスタのゲート(G)に順次印加する事で行う。水平方向の走査は、水平走査回路から高電圧パルス(例えば 25V)を画素トランジスタのソース(S)に順次印加する事で行う。垂直および水平走査回路からの高電圧パルスによって制御される画素トランジスタは画素ごとに順番に導通状態となり、水平走査回路からの高電圧パルスがスピント型 FEA の陰極へと印加される。その結果、各画素からは順次、電子が放射される。

アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の電子放射のターン・オフ特性は、平面撮像管の解像度に影響する重要な要素である。仮に、電子放射のオフ特性が不十分であり、ある画素の選択期間が終了した後も電子放射が続く場合、次に選択する画素からも電子放射が始まり、同時に 2 画素以上から電子が放射されるため、平面撮像管の解像度は劣化する。NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路では電子放射のオフ特性を向上させるために垂直および水平走査回路から高電圧パルスを印加する。図 5.2 に垂直および水平走査回路から高電圧パルスを印加した場合の電子ビームオフ特性の実測値を、低電圧パルスを印加した場合と比較して示す。垂直および水平走査回路から印加する高電圧パルスはそれぞれ 0-40V および 0-25V とし、低電圧パルスは垂直および水平ともに 0-5V とした。また、高電圧パルスおよび低電圧パルスを印加する場合ともにスピント型 FEA のゲート電極電圧は 60V とした。電子ビーム量はそれぞれの最大値を基準とした相対値で示した。測定結果より、低電圧パルスを印加した場合と比較して高電圧パルスを印加した場合の電子ビームは時間経過とともに早く減少し、高電圧パルスを印加した場合、約 50ns で電子ビーム量は 0 に到達することが確認できる。この結果は、アクティブ

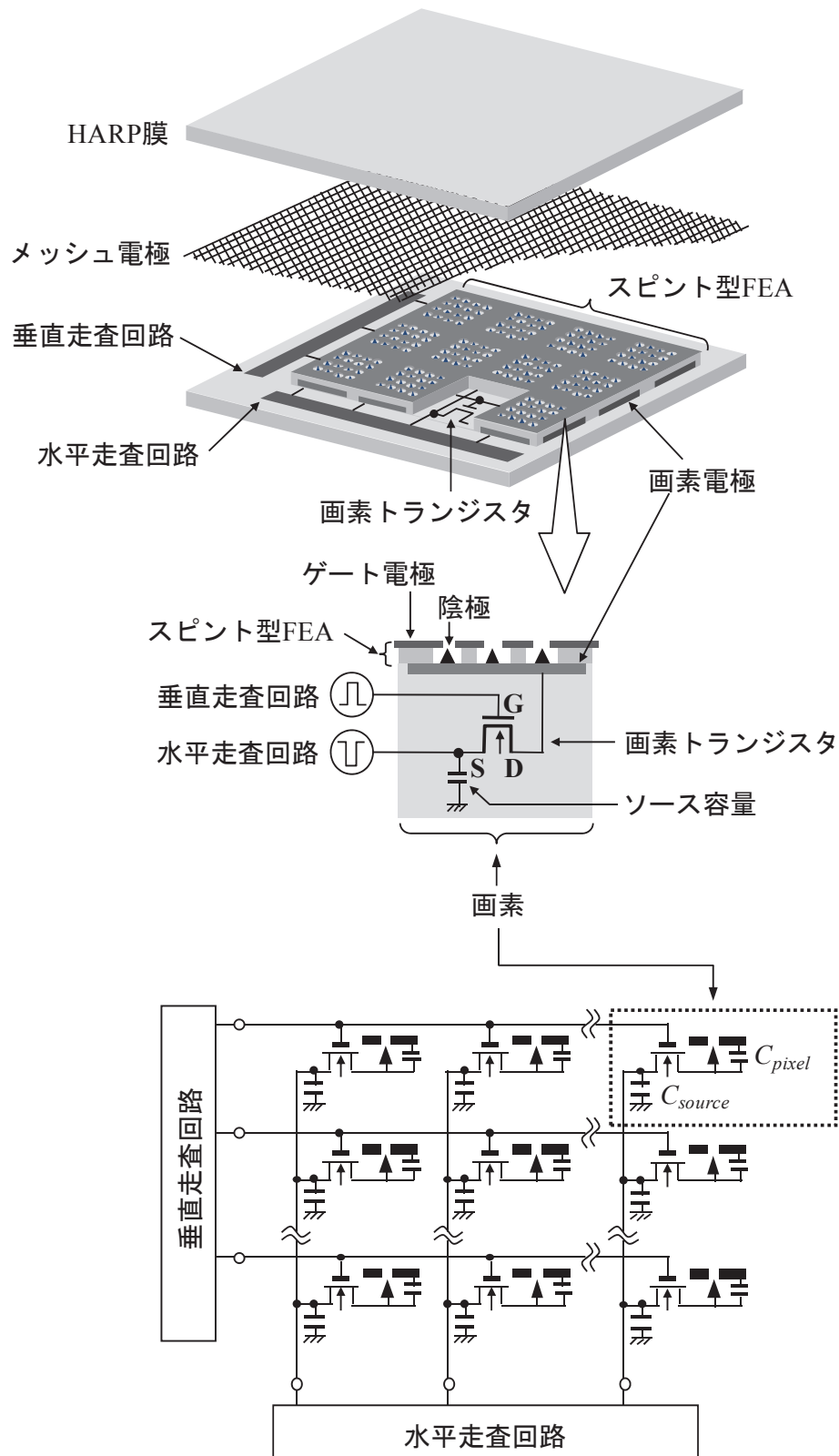


図 5.1 NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路および同回路を適用したスピント型 FEA の基本構造

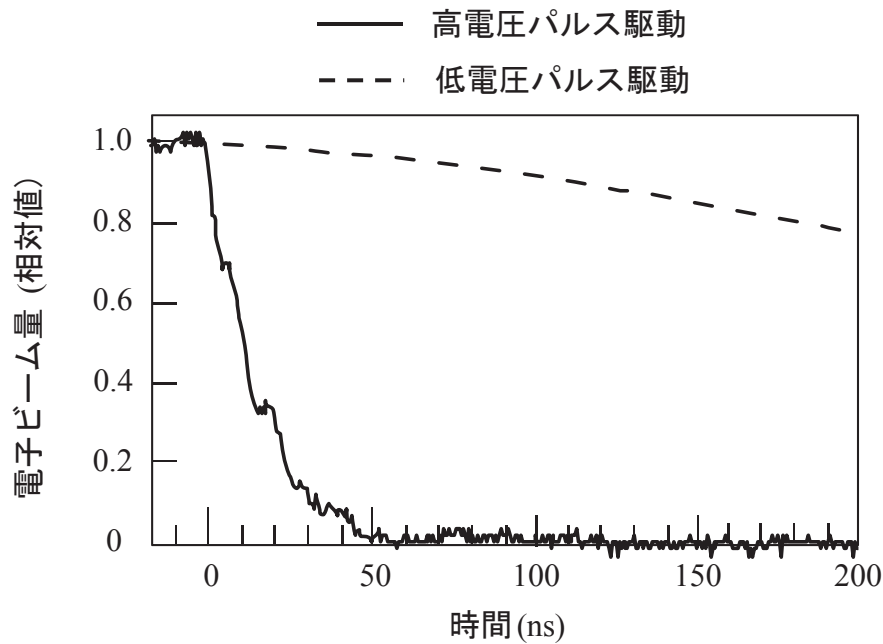
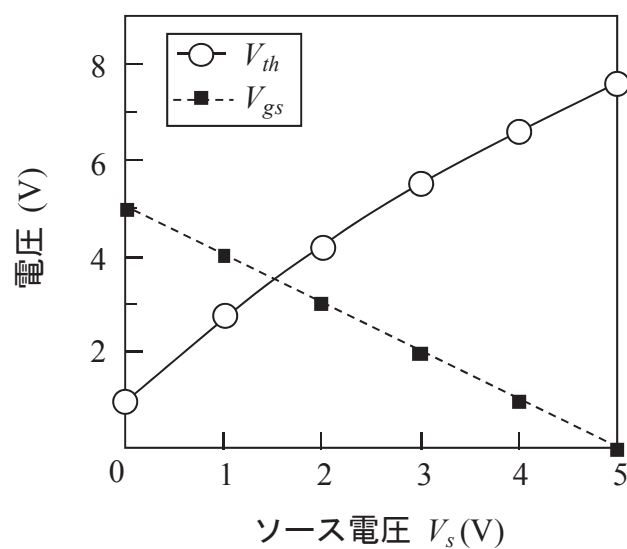


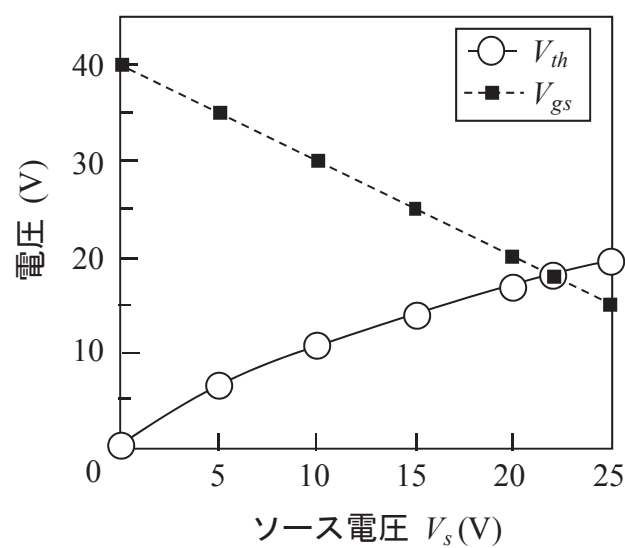
図 5.2 NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の電子ビームオフ特性の実測値

マトリクス駆動回路によってスピント型 FEA がオフ状態(電子ビームを放射しない状態)となった時の陰極電位は、低電圧パルスを押加した場合よりも高電圧パルスを押加した場合の方が高いことを示している。

画素トランジスタには nMOS(negative channel MOS)トランジスタを用いており、スピント型 FEA の陰極に印加できる最大電圧は画素トランジスタのゲート-ソース電圧(V_{gs})およびしきい値電圧(V_{th})に依存する。垂直および水平走査回路から低電圧パルスを押加する場合の画素トランジスタのゲート-ソース電圧(V_{gs})とソース電圧(V_s)との関係およびしきい値電圧(V_{th})とソース電圧(V_s)との関係を回路シミュレータ (SILVACO 社 SmartSpice)で求めた。図 5.3(a)に両者の関係を対比して示す。但し V_{th} は、画素トランジスタのドレイン-ソース電圧(V_{ds})および基板電圧(V_b)をそれぞれ 5V および 0V として求めた。 V_{gs} は画素トランジスタのゲート電圧(V_g)を 5V として求めた。画素トランジスタのゲート-ソース電圧(V_{gs})は、ソース電圧が $0 \leq V_s \leq 1.5V$ の範囲においてしきい値電圧(V_{th})を上回っている。従って画素トランジスタを、オン抵抗を無視した理想的なスイッチと仮定すると、 $V_s \leq 1.5V$ かつ $V_g = 5V$ のときスイッチはオン(短絡)状態となり、画素トランジスタのドレインおよびスピント型 FEA の陰極には画素トランジスタのソース電圧(V_s)が印加される。一方、 $V_s > 1.5V$ かつ $V_g = 5V$ または $V_g = 0V$ のときスイッチはオフ(開放)状態となる。これらの結果は、画素トランジスタのゲートに $5V(=V_g)$ を印加した状態でソース電圧(V_s)を 0V から 5V へと変化させ、スピント型 FEA をオン(電子ビームを放射する)状態からオフ(電子ビームを放射しない)状態へと遷移させるとき、スピント型 FEA の陰極に印加



(a) 垂直および水平走査回路から低電圧パルスを印加する場合



(b) 垂直および水平走査回路から高電圧パルスを印加する場合

 図 5.3 画素トランジスタのゲート-ソース電圧(V_{gs})とソース電圧(V_s)との関係
 およびしきい値電圧(V_{th})とソース電圧(V_s)との関係

される電圧が 0V から 1.5V まで上昇し、その後にスイッチ(画素トランジスタ)はオフとなることを示している。図 5.3(b)に垂直および水平走査回路から高電圧パルスを印加した場合の画素トランジスタのゲート-ソース電圧(V_{gs})とソース電圧(V_s)との関係およびしきい値電圧(V_{th})とソース電圧(V_s)との関係を示す。但し V_{th} は、画素トランジスタのドレイン-ソース電圧(V_{ds})および基板電圧(V_b)をそれぞれ 5V および 0V として求めた。 V_{gs} は画素トランジスタのゲート電圧(V_g)を 40V として求めた。画素トランジスタのゲート-ソース電圧(V_{gs})は、ソース電圧が $0 \leq V_s \leq 22$ V の範囲においてしきい値電圧(V_{th})を上回っている。この結果は、画素トランジスタのゲートに 40V($=V_g$)を印加した状態でソース電圧(V_s)を 0V から 25V へと変化させ、スピント型 FEA をオンからオフへと遷移させるとき、陰極に印加する電圧が 0V から 22V まで上昇し、その後にスイッチ(画素トランジスタ)はオフとなることを示している。従って、高電圧の垂直および水平走査パルスでは、アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA がオフ状態となるとときに陰極により高い電圧を印加できるため、電子ビームのオフ特性を改善する事が出来る。

高電圧の垂直および水平走査パルスを印加する NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路の画素トランジスタには、ゲート、ソースおよびドレイン耐圧を高めるために高耐圧 MOS トランジスタを採用している。高耐圧 MOS トランジスタでは、通常の MOS トランジスタと比べてソースやドレインの領域を拡大することで、ソースやドレインの電界集中を緩和させる⁷⁾。その結果、高耐圧 MOS トランジスタのソース寄生容量(C_{source})やドレイン寄生容量(C_{drain})は通常の MOS トランジスタと比較して大きくなり、スピント型 FEA の陰極電位の応答特性は、主に水平走査回路に並列に接続される画素トランジスタのソース寄生容量(C_{source})によって律速される。高電圧の垂直および水平走査パルスによって駆動する NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位および電子ビームのターン・オン特性を回路シミュレータ(SILVACO 社 SmartSpice)により求めた。画素数は 640×480、垂直および水平走査パルスはそれぞれ 0-40V および 0-25V とした。スピント型 FEA の陰極電位の初期値はスピント型 FEA のゲート電極電圧と同じ 60V とした。スピント型 FEA の画素あたりの容量(C_{pixel})は、画素サイズを $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 、スピント型 FEA のゲート電極および画素電極との間の層間絶縁膜(比誘電率 $\epsilon_r = 3.9$)の厚さを $0.9 \mu\text{m}$ として算出した。NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位のオン特性の解析結果を図 5.4 に示す。また図 5.5 には、NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA から放射される電子ビームのオン特性の実測値を解析値と比較して示す。スピント型 FEA の陰極電位は 30ns 以内にほぼ 0V へと下がり、電子ビームは実測値および解析値ともに 30ns 以内に最大値まで増加した。ここで、

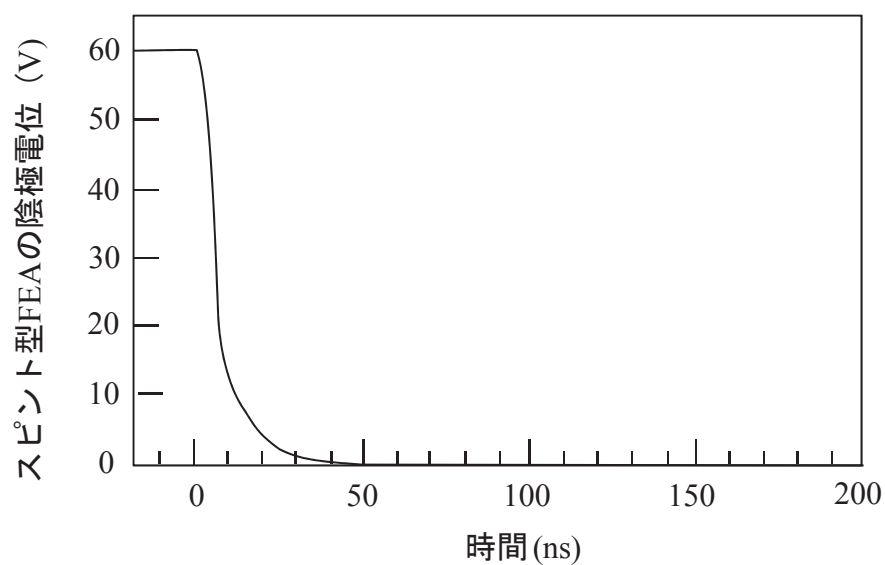


図 5.4 NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位オン特性の解析値

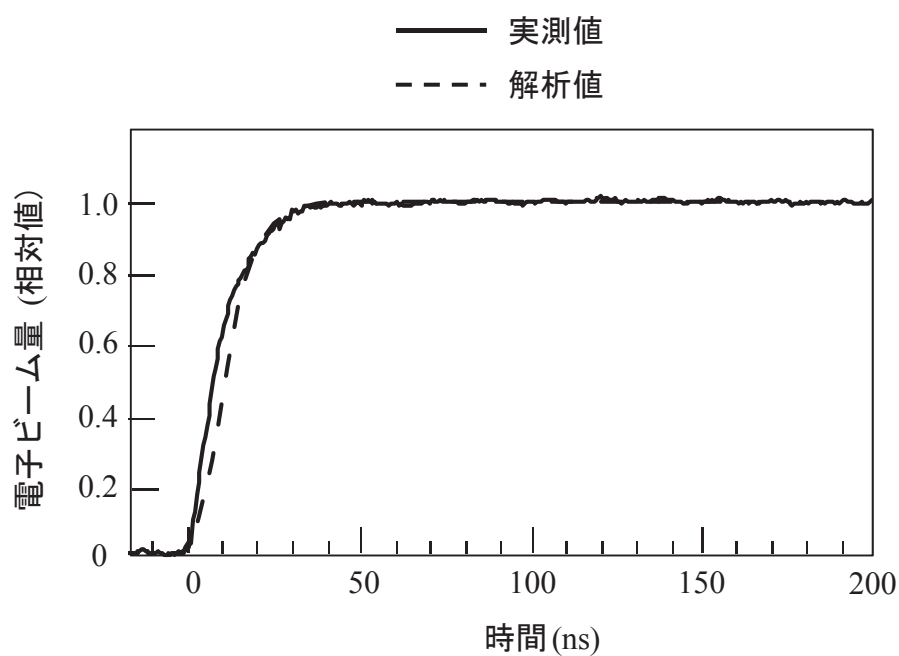


図 5.5 NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の電子ビームオン特性の実測値および解析値

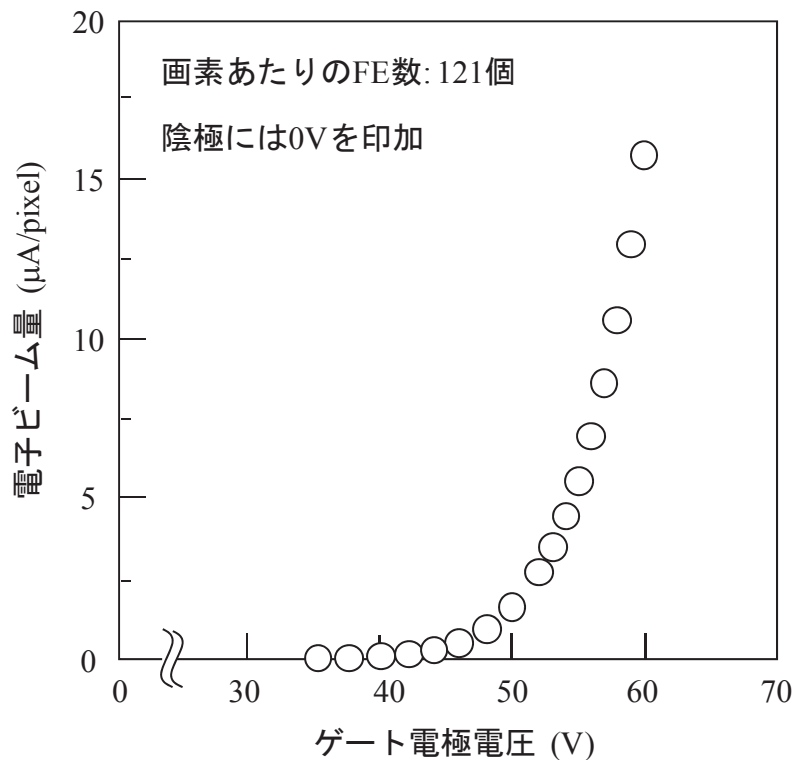


図 5.6 スピント型 FEA の放射電子特性の実測値

電子ビーム量の解析値はスピント型 FEA のゲート電極と画素トランジスタのドレインとの間の電位差から換算した。換算には、図 5.6 に示すスピント型 FEA の放射電子特性の実測値を参照した。電子ビームオン特性における電子ビーム量の実測値および解析値はそれぞれの最大値を基準とした相対値で示している。

上述した NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を高電圧の垂直および水平走査パルスで駆動した結果は、電子ビームが約 80ns 以内に放射しており、スピント型 FEA から放射される電子ビームの応答特性は NTSC 規格を満たすことを示している。しかし、スピント型 FEA の陰極電位のオン特性は、ハイビジョン規格の 1 画素の駆動時間である 13.5ns 以内に陰極電位を 0V まで推移することができない。従って、本アクティブマトリクス駆動回路をハイビジョン規格で駆動する場合、スピント型 FEA のゲート電極-陰極間の電位差は NTSC 規格で駆動する場合の電位差と比べて小さくなり、スピント型 FEA のゲート電極電圧が同じ場合にスピント型 FEA から放射される電子ビーム量の最大値は NTSC 規格での駆動と比べて減少することが予想される。更に、画素数を 1920×1080(ハイビジョン相当)に増やすことにより、水平走査回路に並列接続される画素トランジスタ数は増加するため、水平走査回路の負荷が増加して応答特性が劣化する可能性がある。従って、高電圧の垂直および水平走査パルスにて駆動するアクティブマトリクス駆動回路では、ハイビジョン規格(1 画素の駆動時間約 13.5ns)での駆動条件を満たすことは難しいと考えられる。

5.3 ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路の設計¹⁻⁵⁾

NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路は垂直および水平走査回路からスピント型 FEA の駆動に必要な高電圧パルスを印加する．この駆動回路の応答特性は主に高耐圧 MOS トランジスタのソース寄生容量(C_{source})によって律速され，NTSC 規格での駆動条件は満たすものの，ハイビジョン規格での駆動条件を満たすことは難しいことを 5.2 節で述べた．本節では，ハイビジョン規格でのスピント型 FEA の駆動に向けて，垂直および水平走査パルスを低電圧化することで応答特性を改善する新たなアクティブマトリクス駆動回路を提案する．提案するアクティブマトリクス駆動回路の画素部の構成を図 5.7 に示す．本回路は以下に示す 3 つの特徴を有する．

1. 各画素にスピント型 FEA と一体形成した抵抗を備える．画素密度に制約を与えることが無いように，抵抗をレイアウトする際の占有面積は画素サイズより小さくすることとする．
2. 垂直および水平走査パルスを低電圧化(5V)する．
3. 水平走査回路は画素トランジスタのゲートに接続し，垂直走査回路は画素トランジスタのソースに接続する．

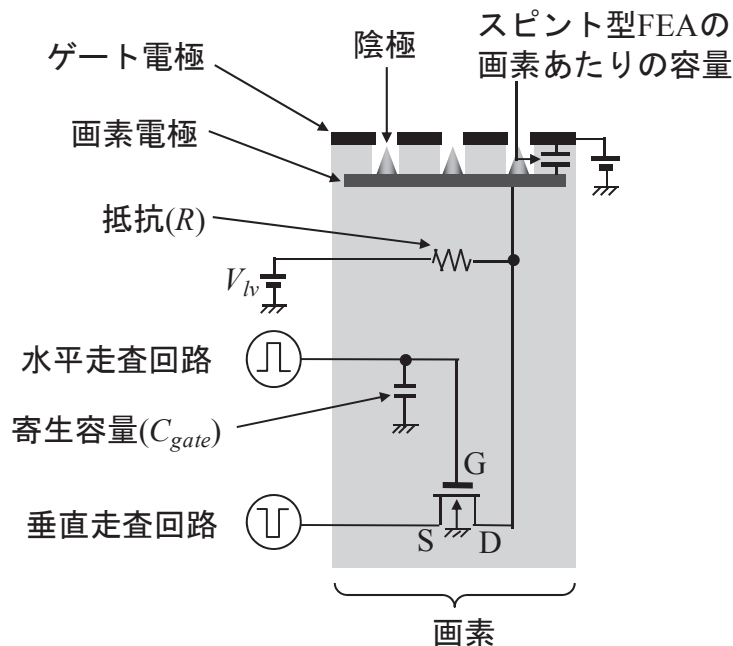


図 5.7 ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路の画素部

低電圧パルスは、画素部において画素トランジスタおよび抵抗で構成されるレベルシフタにより高電圧パルスに変換され、スピント型 FEA の陰極に印加される。提案する回路においてレベルシフタ構成を採用する理由は、電子ビームのターン・オフ特性を劣化させないように、スピント型 FEA をオフ(電子ビームを放射しない)状態に遷移するときに高い電圧を陰極に印加する必要があるという点が挙げられる。言い換えると、レベルシフタ構成を採用しない場合、スピント型 FEA をオフ(電子ビームを放射しない)状態に遷移するときに陰極に印加できる最大電圧は、低電圧パルスで NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を駆動する場合に陰極に印加できる電圧(5.2 節参照)と同様に低くなってしまう。従って、提案するアクティブマトリクス駆動回路においてはレベルシフタ構成が必要である。提案する駆動回路を適用したスピント型 FEA の応答特性は、主に水平走査回路に並列に接続される画素トランジスタのゲート寄生容量(C_{gate})によって律速される。低電圧化された垂直および水平走査回路に接続される画素トランジスタのソースおよびゲートは高耐圧化が不要となる。提案する駆動回路を適用したスピント型 FEA の応答特性の支配要因である画素トランジスタのゲート容量(C_{gate})と NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の応答特性の支配要因である画素トランジスタのソース容量(C_{source})とを回路シミュレータを用いて比較したところ、提案回路のゲート容量(C_{gate})は NTSC 用回路における画素トランジスタのソース容量(C_{source})の約 1/6 であった。従って、提案回路では応答速度の改善が期待できる。

ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位および放射される電子ビームの応答特性は図 5.8 に示す回路モデルを用いて解析した。画素数は 1920×1080 、レベルシフタに印加する電圧(V_h)は 40V とした。水平走査パルスの電圧は 0–5V、パルス幅は 13.5ns とし、垂直走査パルスの電圧は 0–5V、パルス幅は 29 μ s とした。スピント型 FEA の画素あたりの容量(C_{pixel})は、画素サイズを $11 \times 11 \mu\text{m}^2$ 、スピント型 FEA のゲート電極と画素電極との間の層間絶縁膜(比誘電率 $\epsilon_r = 3.9$)の厚さを 0.7 μm として算出した。スピント型 FEA のゲート電極電圧は 60V とした。画素サイズを $11 \times 11 \mu\text{m}^2$ とするハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA から放射される電子ビーム量の解析値は、スピント型 FEA のゲート電極電圧とレベルシフタ出力との電位差から換算した。換算には、図 5.6 に示すスピント型 FEA(画素サイズ $20 \times 20 \mu\text{m}^2$)の放射電子特性を基に、電子ビーム量は画素サイズの縮小に比例して減少するものと仮定して求めた。

ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位の応答速度は、レベルシフタの抵抗(R)に依存する。同 FEA の陰極電位の時間推移および同 FEA から放射される電子ビーム量の時間推移の解析

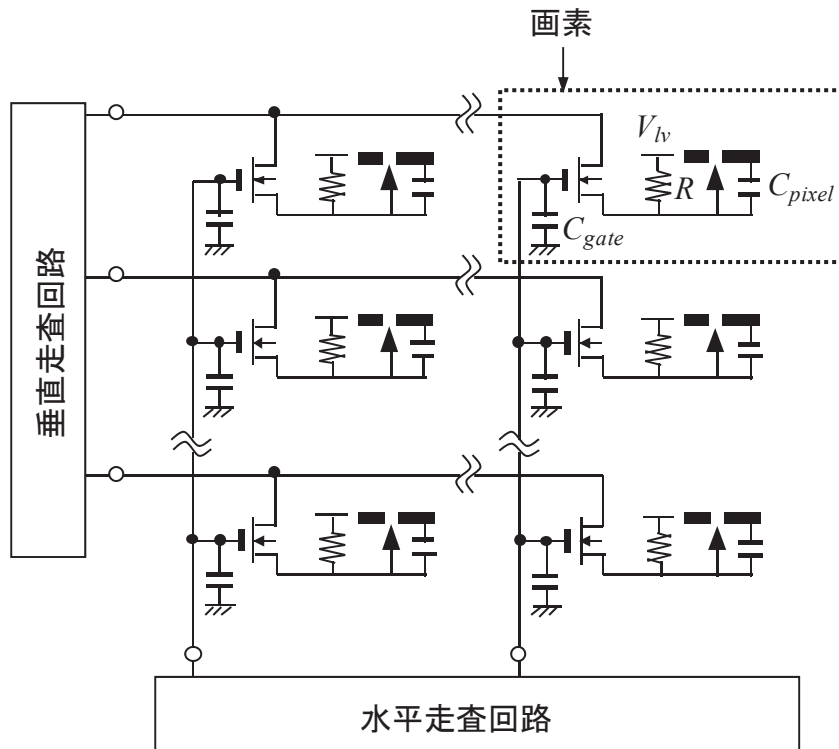
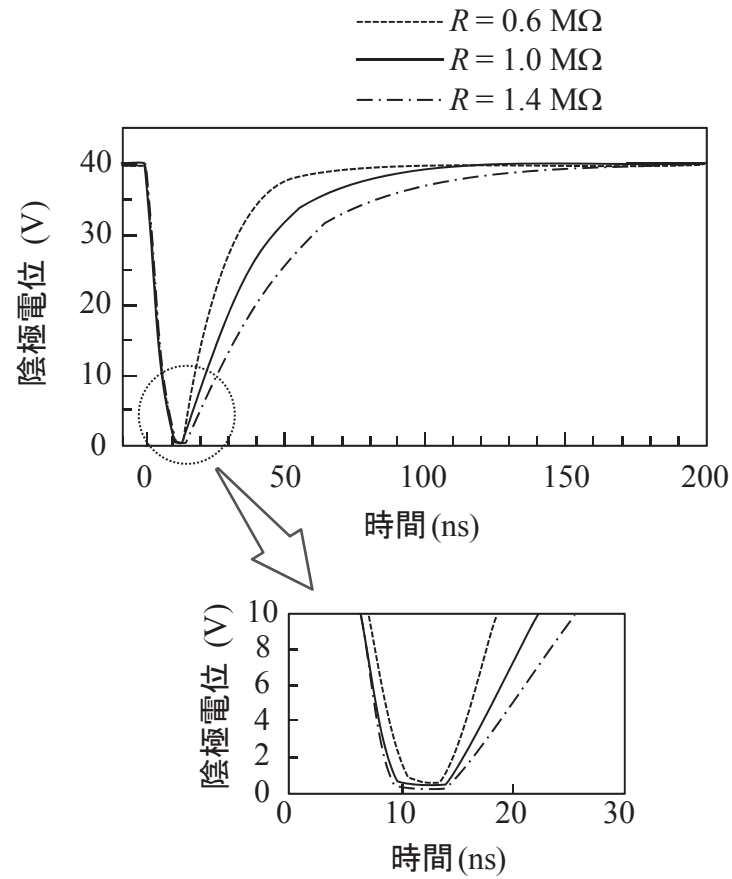
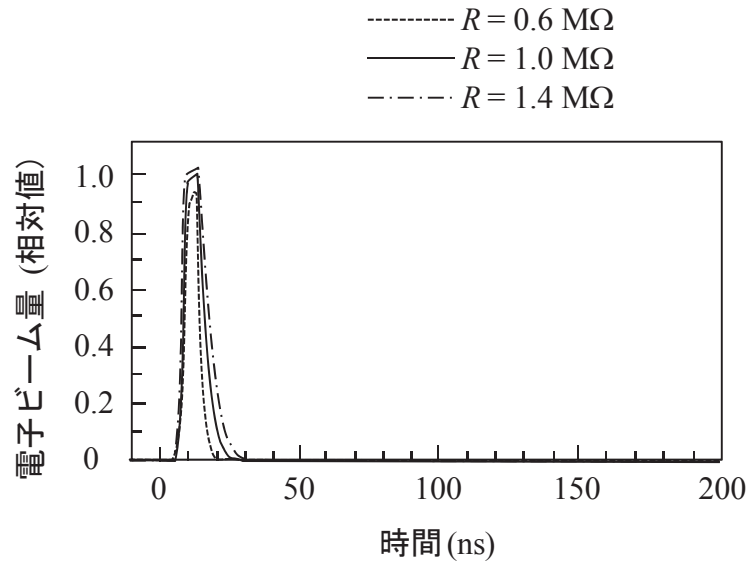


図 5.8 ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路の解析モデル

結果を図 5.9(a)および図 5.9(b)にそれぞれ示す。レベルシフタの抵抗(R)は $0.6\text{M}\Omega$ から $1.4\text{M}\Omega$ まで変化させた。電子ビーム量は、 $R = 1.0\text{M}\Omega$ における最大値を基準とした相対値で表した。陰極電位はレベルシフタの抵抗(R)が 0.6 , 1.0 , $1.4\text{M}\Omega$ のいずれの場合においても、ハイビジョン規格の 1 画素の駆動時間である 13.5ns の時間内に 40V からほぼ 0V へと推移し、その際の陰極電位の応答速度はレベルシフタの抵抗値によらずほぼ同じであった。その一方で、 0V から 40V へと戻る際の陰極電位は、レベルシフタの抵抗値が高いほど、緩やかに推移した。この結果は、陰極電位のターン・オフ特性はレベルシフタの抵抗(R)に依存し、抵抗値が大きいほどオフ特性は劣化する傾向にあることを示している。また、放射される電子ビーム量の時間推移は、陰極電位の時間推移と比較して速く変化している。これは電子ビームの放射特性は、スピント型 FEA のゲート電極-陰極間の電位差が大きくなるほど電子ビーム量の増加がより急峻になるため、ゲート電極電圧を 60V に固定する場合、陰極電位は 40V から 0V へと低下するほど電子ビーム量は急激に増加する。従って、電子ビーム量の応答特性は主に陰極電位が 0V から 10V までの間の時間推移に追従するために、電子ビーム量の時間推移は陰極電位の時間推移と比較して速く変化したと考えられる。また、電子ビーム量の最大値はレベルシフタの抵抗値(R)が減少するほど低下した。



(a) 陰極電位の時間推移



(b) 電子ビーム量の時間推移

図 5.9 ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路を適用した FEA の陰極電位の時間推移および同 FEA から放射される電子ビーム量の時間推移の解析結果

これはスピント型 FEA がオン (電子ビームを放射する)状態のとき, スピント型 FEA の陰極に印加できる電圧は, レベルシフタの抵抗と画素トランジスタのオン抵抗とで分圧された値となるためである. 図 5.10 に画素トランジスタのドレイン電流とドレイン電圧との関係およびレベルシフタの抵抗($R = 0.6, 1.0$, および $1.4\text{M}\Omega$)の負荷曲線を示す. 画素トランジスタのゲートに印加する電圧(V_g)およびレベルシフタに印加する電圧(V_{lv})はそれぞれ 5V および 40V とした. 画素トランジスタのドレイン電流とレベルシフタの抵抗(R)の負荷曲線が交差するドレイン電圧は, レベルシフタの抵抗(R)が小さくなるほど増加した. 従って, スピント型 FEA がオン(電子ビームを放射する)状態のとき, レベルシフタの抵抗が小さくなるほどスピント型 FEA の陰極に印加できる電圧の最小値は増加する. 図 5.11 にレベルシフタの抵抗値と放射される全ての電子ビーム量のうち 1 画素の駆動時間である 13.5ns の期間内に放射される電子ビーム量の割合との関係およびレベルシフタの抵抗値と 1 画素の駆動時間である 13.5ns の期間内に放射される電子ビーム量の積分値との関係をそれぞれ示す.

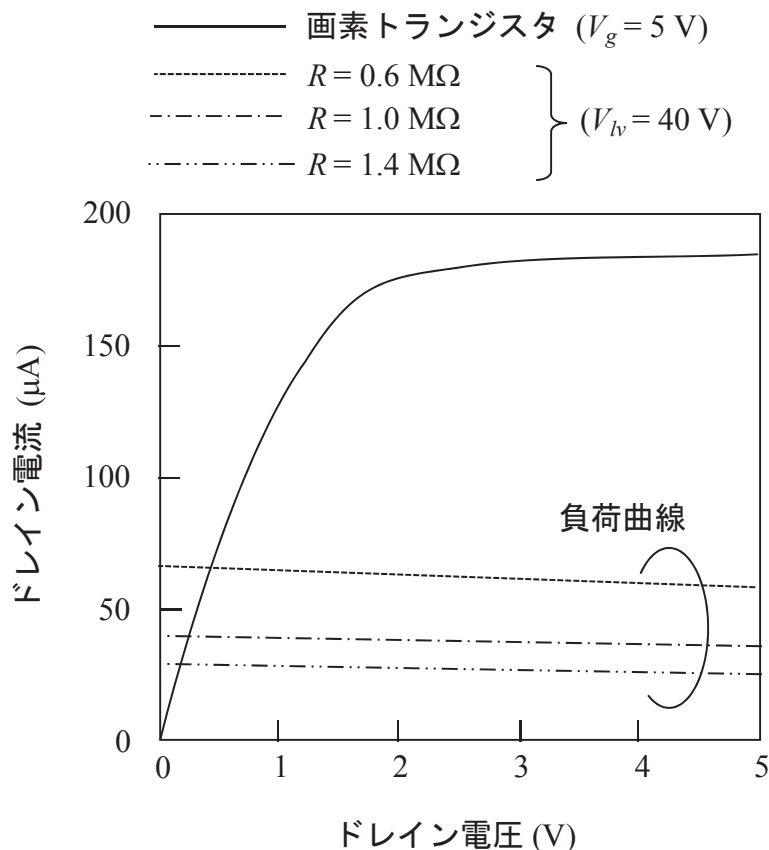


図 5.10 画素トランジスタのドレイン電流とドレイン電圧との関係およびレベルシフタの抵抗($R = 0.6, 1.0$, および $1.4\text{M}\Omega$)の負荷曲線

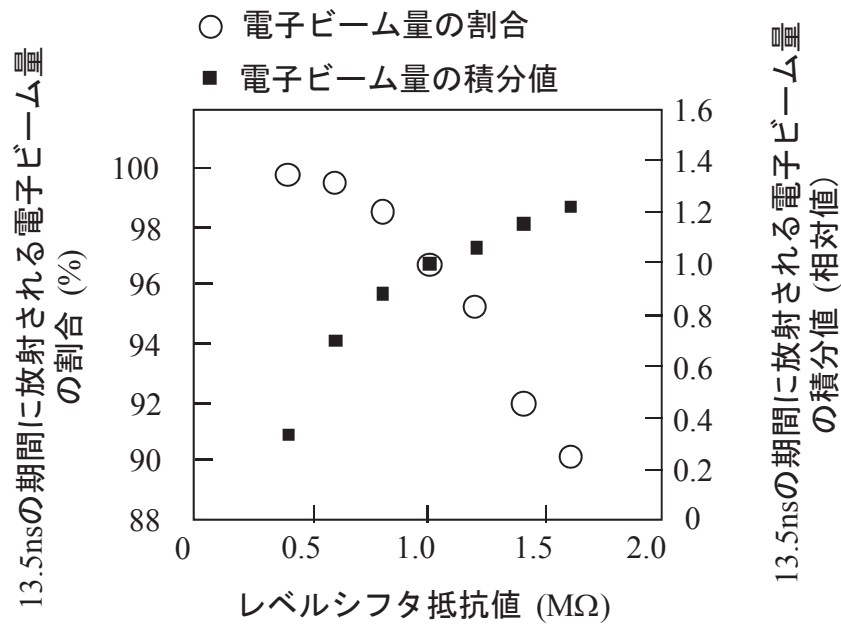


図 5.11 レベルシフタの抵抗値と放射される全ての電子ビーム量のうち 1 画素の駆動時間である 13.5ns の期間内に放射される電子ビーム量の割合との関係およびレベルシフタの抵抗値と 1 画素の駆動時間である 13.5ns の期間内に放射される電子ビーム量の積分値との関係

1 画素の駆動時間である 13.5ns の期間内に放射される電子ビーム量の積分値は、レベルシフタの抵抗(R)を $1.0M\Omega$ としたときの値を基準とした相対値で示した。13.5ns の期間内に放射される電子ビーム量の割合はレベルシフタの抵抗(R)が小さくなるほど増加する一方、13.5ns の期間内に放射される電子ビーム量の積分値はレベルシフタの抵抗(R)が小さくなるほど減少した。この結果を基に、ハイビジョン規格の 1 画素の駆動時間である 13.5ns の期間内に全電子ビーム量のうちの約 97%が放射される $R = 1.0M\Omega$ をハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路のレベルシフタ抵抗(R)に採用した。

5.4 ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路の評価用素子の試作¹⁻⁵⁾

ハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路の設計および解析結果を基に、低電圧化(5V)した垂直および水平走査回路および画素部に配置するレベルシフタとで構成される評価用素子を試作し、応答特性を評価した。ただし、評価用素子では、スピント型 FEA と一体形成する抵抗(R)を、MOS-LSI 技術で形成する抵抗で代用した。代用した抵抗は、占有面積は大きい、抵抗値は設計値と同じ $1\text{M}\Omega$ である。また、スピント型 FEA は疑似負荷で代用した。疑似負荷は容量値 0.1pF および抵抗値 $1\text{M}\Omega$ が並列接続される構成とした。図 5.12 に応答特性の測定系を示す。垂直および水平走査パルスはいずれも $0\text{--}5\text{V}$ とし、レベルシフタに印加する電圧(V_b)は 25V とした。レベルシフタに印加する電圧(V_b)が 5.3 節の解析モデルにおける設定値(40V)と異なるのは、疑似負荷の耐圧によるものであり、疑似負荷の動作が保障される最大電圧値に V_b を設定した。疑似負荷電圧のターン・オン特性およびターン・オフ特性の実測値および解析値を図 5.13(a)および図 5.13(b)にそれぞれ示す。オフ特性の解析値は実測値とほぼ一致するが、オン特性の解析値は実測値と一致せず、疑似負荷電圧の時間推移は解析値と比較して実測値が緩やかであった。これは、垂直走査パルスおよび水平走査パルスの電圧降下によるものと考えられる。疑似負荷電圧の応答特性はオン特性、オフ特性ともに 5.3 節で述べた FEA の陰極電位の応答

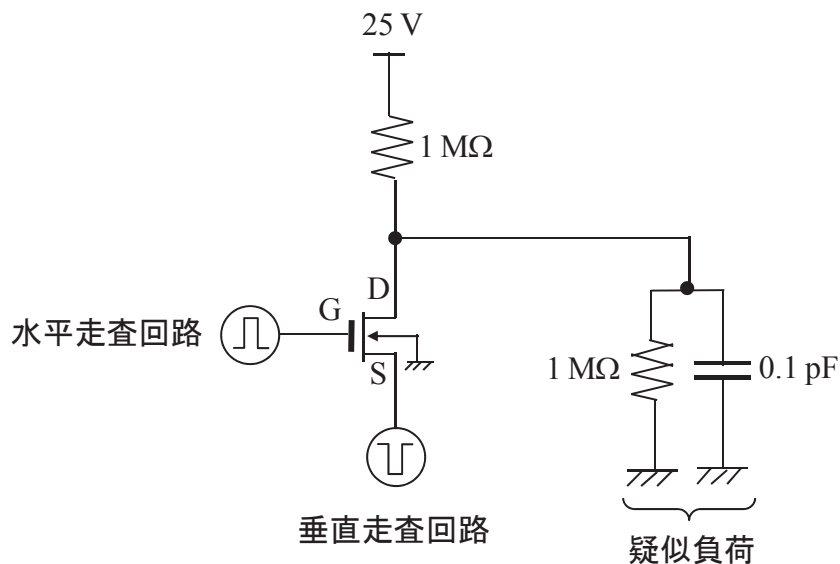
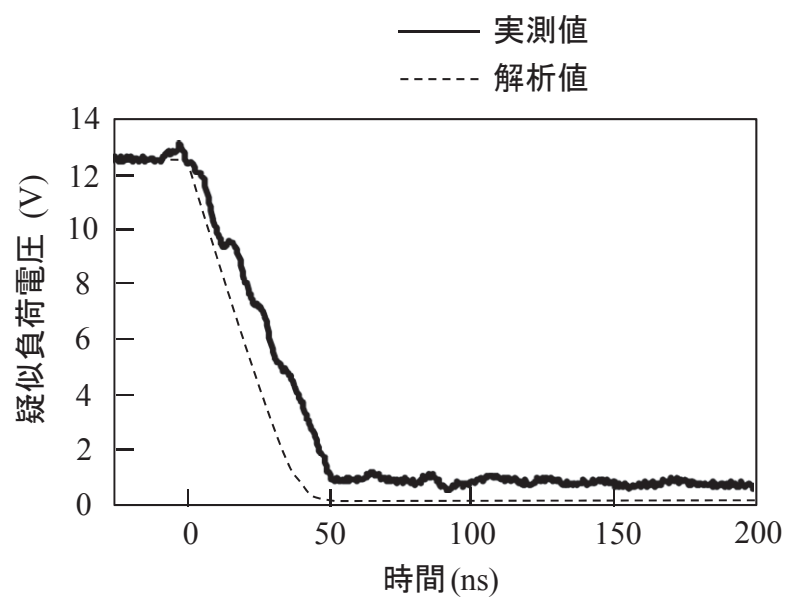
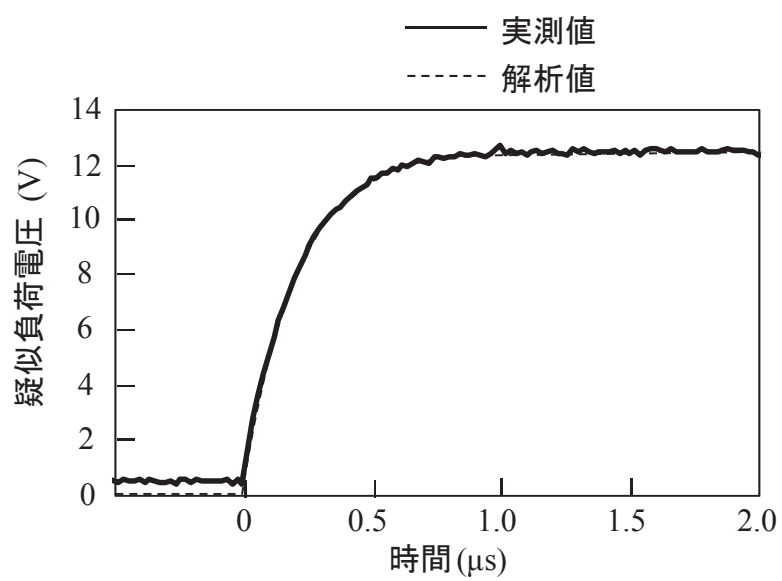


図 5.12 評価用素子の応答特性の測定系



(a) オン特性



(b) オフ特性

図 5.13 疑似負荷電圧のオン特性およびオフ特性の実測値および解析値

特性の解析結果と比べて応答速度が遅い。これはスピント型 FEA の画素あたりの容量(C_{pixel})に比べて疑似負荷が大きいこと、評価用素子におけるレベルシフタの抵抗を MOS-LSI 技術で形成する抵抗で代用したことが挙げられる。代用した抵抗は占有面積が画素サイズと比べて大きく、占有面積の増大により寄生容量が増加している。従って、レベルシフタの抵抗をスピント型 FEA と一体形成し、その占有面積を画素サイズ以下とすること、疑似負荷をスピント型 FEA へと置き換えることにより評価用素子の評価結果からスピント型 FEA の陰極電位の応答特性を見積もることとした。

評価用素子の評価結果を基に、スピント型 FEA の陰極電位の応答特性を見積もった解析結果を図 5.14 に示す。図に示すスピント型 FEA の陰極電位は、疑似負荷を画素サイズ $11 \times 11 \mu\text{m}^2$ におけるスピント型 FEA の画素あたりの容量(C_{pixel})に置き換えるとともに、MOS-LSI 技術で形成した評価用素子の抵抗は、スピント型 FEA と一体形成し、その占有面積は画素サイズ以下である抵抗に置き換えて回路シミュレータにより求めた。スピント型 FEA の陰極電位は 10V から 0V へ、そして再び 10V へと約 13.5ns 以内に推移した。以上の結果から、提案するアクティブマトリクス駆動回路では、ハイビジョン規格を満たす応答特性が得られる見通しを得ることができた。

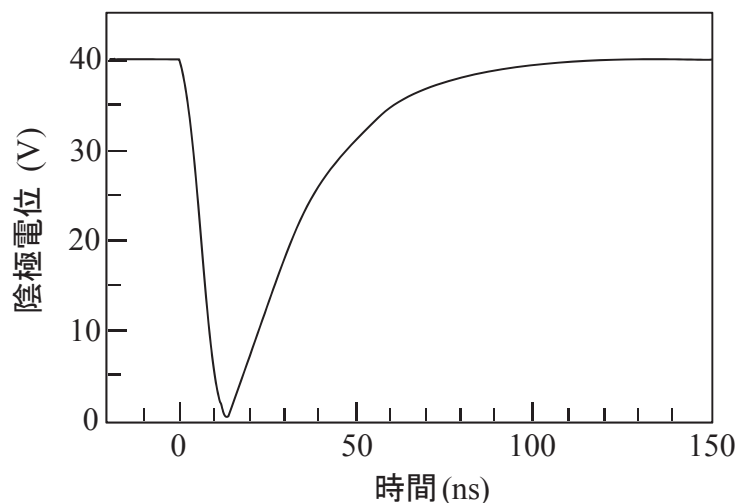


図 5.14 スピント型 FEA の陰極電位の応答特性を見積もった解析結果

5.5 まとめ

NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路では、画素部にトランジスタのみを配置する簡素な回路構成である一方で、同回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位の応答特性を改善するため、高電圧な垂直および水平走査パルス(例えば 40V および 25V)を要する事や水平走査回路に並列接続される高耐圧画素トランジスタの主にソース寄生容量が応答速度を律速しており、その応答特性は NTSC 規格(1 画素の駆動時間約 80ns)を満たすもののハイビジョン規格(1 画素の駆動時間約 13.5ns)を満たすことは難しいことを示した。次に平面撮像管のハイビジョン化に向けて、アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の応答速度を向上させる新たなアクティブマトリクス駆動回路を提案した。提案する回路は、スピント型 FEA と一体形成する抵抗を各画素に有し、画素トランジスタとともにレベルシフタを構成する。レベルシフタはスピント型 FEA の陰極に印加する電圧パルスを画素部で昇圧する機能を持ち、垂直および水平走査パルスは低電圧化(5V)することが可能である。水平走査回路は画素トランジスタのゲートに接続する回路構成とし、スピント型 FEA の陰極電位の応答特性は主に画素トランジスタのゲート寄生容量に律速されるが、ゲート寄生容量は高耐圧画素トランジスタのソース寄生容量(NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路における応答特性の支配要因)と比較して 1/6 程度のため、水平走査回路の負荷を軽減することができる。従って、提案回路ではスピント型 FEA の応答速度向上が可能である。提案するアクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位の応答特性を回路解析により評価し、ハイビジョン規格の 1 画素の駆動時間である 13.5ns の期間内に全電子ビーム量のうちの約 97%が放射される $R = 1.0\text{M}\Omega$ をハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路のレベルシフタ抵抗(R)に採用した。また、提案するアクティブマトリクス駆動回路の設計を検証するため、評価用素子を試作し、ハイビジョン規格での駆動に見通しを得ることができた。

参考文献

- 1) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, and Norifumi Egami, "Active-Matrix Spindt-Type Field Emitter Array with Faster Response Time for Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 33, no. 1, pp.012205.1-012205.7, 2015.
- 2) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 江上典文, "冷陰極 HARP 撮像板のハイビジョン化に向けたアクティブマトリクス駆動回路の基礎検討," 日本学術振興会第11回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, 5-4, pp. 35-43, 2014.
- 3) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, and Norifumi Egami, "Active-Matrix Drive Circuit for Image Sensor Consisting of Field Emitter Array and Avalanche Photoconductor," The 20th International Display Workshops (IDW '13), FED1-2, pp. 806-809, 2013.
- 4) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 江上典文, "ハイビジョン FEA-HARP 用アクティブマトリクス駆動回路の基礎検討," 映像情報メディア学会年次大会, 15-3, 2013.
- 5) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, and Norifumi Egami, "Faster Response Time of Active-Matrix Spindt-Type Field Emitter Array for Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target," 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2013), 2013.
- 6) M. Nanba, Y. Takiguchi, Y. Honda, Y. Hirano, T. Watabe, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh, and A. Kobayashi, "640 × 480 Pixel Active-Matrix Spindt-Type Field Emitter Array Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target," J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 28, no. 1, pp. 96-103, 2010.
- 7) E. Seebacher, K. Molnar, W. Posch, B. Senapati, A. Steinmair, and W. Pflanzl, "Compact Modeling: Principles, Techniques and Applications," Springer Press, ch. 4, pp. 105-136, 2010.

第 6 章

結論

6.1 結論

本論文は、磁界集束型平面撮像管の電子ビーム集束系と比較して格段に小型な集束系を備えた電界集束型平面撮像管を実現するために、集束電極を一体化した電界集束スピント型 FEA の電極構造検討やアレイピッチの最適化に関する研究およびアクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA のハイビジョン駆動を実現するために、画素部をレベルシフト構成とし、垂直および水平走査パルスを低電圧化(5V)する新たなアクティブマトリクス駆動回路に関する研究についてまとめたものである。

6.1.1 電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管

初めに、ゲート電極厚 $0.5\mu\text{m}$ 、集束電極およびゲート電極開口径が $1.0\mu\text{m}$ の基礎実験用電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管を試作した。試作した基礎実験用電界集束スピント型 FEA は、電界集束時の陰極先端の電界集中減衰を抑制し、電子ビーム量を向上させることができたが、その出力映像は磁界集束系を適用した平面撮像管と比べて画質が劣化していた。主な原因は次の 2 点が挙げられる。

- ・電界集束時の電子ビーム量の平均値は $0.18\mu\text{A}/\text{pix}$ であり、平面撮像管において出力映像に輝度ムラの影響がほぼ見られず、高品質な映像を取得するための目標値である最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上を満たしていない

- ・電子ビーム広がり(電流密度分布の半値幅)は約 $50\sim 60\mu\text{m}$ であり、画素サイズ($20\times 20\mu\text{m}^2$)よりも大きい。これは、FEA 形状のバラつきにより陰極先端位置と静電レンズ中心とが同一軸上に無いことによって電子ビームが広がったと考えられる。

また、上記課題の対策として、FEA の微細化および集束電極開口径の拡大が有効であることを示した。

つぎに、開口直径を $0.6\mu\text{m}$ に微細化したゲート電極上に、開口直径を $2.4\mu\text{m}$ に拡大した集束電極を積層した構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管を試作した。集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA は画素当たりの陰極からの

放射電流を基礎実験用電界集束スピント型 FEA と比べて約 4.7 倍に向上できるものの、電界集束時に FEA から取り出せる電子ビーム量の最小値は約 $0.5\mu\text{A}/\text{pix}$ まで減少し、高品質な映像を得るための目標値である最小値 $1\mu\text{A}/\text{pix}$ 以上を満たすことはできなかった。これは電界集束時に集束電極近傍に形成される減速電界により電子は減速し、半数以上の電子が失速してゲート電極へと戻ることが主な要因である。磁界集束系を用いた撮像実験により、失速による電子のゲート電極への戻りを抑制する事が出力映像に発生する輝度ムラの抑制に有効であることを確認した。

電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造の検討には電子軌道解析を用いるが、マクスウェル分布を用いて電子初速度を仮定する従来の解析モデルでは、放射電子特性の解析精度が不十分であった。そこで、電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造の検討に先立ち、放射電子特性を高精度に解析する新たな解析モデルを提案した。新たな解析モデルでは、アクセプタンスカーブ(アノード電流-アノード電圧特性)の解析値が実測値と一致するように電子初速度を設定する。提案手法により、集束電極積層構造電界集束スピント型 FE の放射電子特性の解析値は、実測値とほぼ一致する事を確認した。

次に、提案する解析モデルを用いて電界集束スピント型 FE から取り出せる電子ビーム量を向上させる電極構造を検討した。その結果、集束電極をゲート電極開口部より $0.2\mu\text{m}$ 下に配置するゲート電極凸構造およびボルケーノ構造の電界集束スピント型 FE では、集束電極をゲート電極より $1.5\mu\text{m}$ 上に配置する集束電極積層構造と比較して FE から取り出せる電子ビーム量を 1.8 倍～1.9 倍に向上できることを確認した。併せて、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FE の放射電子特性は、実測値と解析値がほぼ一致する事を確認し、アクセプタンスカーブの実測値に基づく電子初速度を用いた電子軌道解析モデルの妥当性を確認した。

電極構造の検討結果を基にボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を平面撮像管に適用するため、同 FEA を画素内に配置する際の最適な FEA ピッチを電子軌道解析により求めた。ボルケーノ構造 FEA はピッチを $2.2\mu\text{m}$ 以下に狭ピッチ化すると、隣接する静電レンズ同士の干渉により電子ビームの集束効果が弱まり、電子ビームは画素サイズ $20\times 20\mu\text{m}^2$ より大きく広がってしまうこと、FEA ピッチが $3.2\mu\text{m}$ 以上の場合には、電子ビーム広がり $20\mu\text{m}$ 以下であり、集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管に電界集束系および磁界集束系をそれぞれ適用した場合と同程度の解像度が期待できることを確認した。一方、ボルケーノ構造 FEA のピッチを広くするほど、画素あたりの FE 数は減少し、画素から取り出せる電子ビーム量も減少する。ボルケーノ構造 FEA ピッチを $5.2\mu\text{m}$ 以上に広げると、画素から取り出せる電子ビーム量の平均値が $1\mu\text{A}/\text{pix}$ を下回るため、高品質な映像を得るため

の目標値を満たせなくなることを確認した。以上の結果より、電子ビームの電界集束効果と高品質な映像を得るための目標値を満たす電子ビーム量との両立を図るためには、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA のピッチは $3\mu\text{m}$ 程度が妥当であると判断した。

ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の最適ピッチの検討結果を基に、FEA ピッチを $3.1\mu\text{m}$ としたボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA および同 FEA を適用した平面撮像管を試作した。ボルケーノ構造 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)の最小値は約 $2\mu\text{A/pix}$ であり、高品質な映像を得るための目標値である最小値 $1\mu\text{A/pix}$ 以上を満たすことを確認した。また、撮像実験により、ボルケーノ構造 FEA を適用した平面撮像管において電子ビームの電界集束効果を確認するとともに、出力映像の輝度ムラが抑制されていることを確認した。試作した平面撮像管の画素サイズ $20\times 20\mu\text{m}^2$ は NTSC 方式テレビ用 1 インチ撮像素子における画素サイズに相当すること、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA は NTSC 規格(1 画素の駆動時間約 80ns)で駆動していることから、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管は、磁界集束系を適用した平面撮像管と比較して格段に小型な電子ビーム集束系を備えた NTSC 方式テレビ用撮像素子の実現可能性を示すことができた。

6.1.2 平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路

初めに、NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路では、画素部にトランジスタのみを配置する簡素な回路構成である一方で、同回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位の応答特性を改善するため、高電圧な垂直および水平走査パルス(例えば 40V および 25V)を要する事や水平走査回路に並列接続される高耐圧画素トランジスタの主にソース寄生容量が応答速度を律速しており、その応答特性は NTSC 規格(1 画素の駆動時間約 80ns)を満たすもののハイビジョン規格(1 画素の駆動時間約 13.5ns)を満たすことは難しいことを示した。

次に、平面撮像管のハイビジョン化に向けて、アクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の応答速度を向上させる新たなアクティブマトリクス駆動回路を提案した。提案する回路は、スピント型 FEA と一体形成する抵抗を各画素に有し、画素トランジスタとともにレベルシフタを構成する。レベルシフタはスピント型 FEA の陰極に印加する電圧パルスを画素部で昇圧する機能を持ち、垂直および水平走査パルスは低電圧化(5V)することが可能である。水平走査回路は画素トランジスタのゲートに接続する回路構成とし、スピント型 FEA の陰極電位の応答特性は主に画素トランジスタのゲート寄生容量に律速されるが、ゲート寄生容量は高耐圧

画素トランジスタのソース寄生容量(NTSC 方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路における応答特性の支配要因)と比較して 1/6 程度のため, 水平走査回路の負荷を軽減することができる. 従って, 提案回路ではスピント型 FEA の応答速度向上が可能である. 提案するアクティブマトリクス駆動回路を適用したスピント型 FEA の陰極電位の応答特性を回路解析により評価し, ハイビジョン規格の 1 画素の駆動時間である 13.5ns の期間内に全電子ビーム量のうちの約 97%が放射される $R = 1.0\text{M}\Omega$ をハイビジョン方式平面撮像管用アクティブマトリクス駆動回路のレベルシフタ抵抗(R)に採用した. また, 提案するアクティブマトリクス駆動回路の設計を検証するため, 評価用素子を試作し, ハイビジョン規格での駆動に見通しを得ることができた.

6.2 電界集束型平面撮像管のハイビジョン化への展望¹⁾

スピント型 FEA を適用したアクティブマトリクス駆動回路についてはハイビジョン規格での駆動に見通しを得た. 最後に, ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を適用したハイビジョン方式平面撮像管の実現可能性を検討する. ハイビジョン方式平面撮像管の画素内に配置するボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の FE 数すなわち FEA ピッチを最適化するため, 図 6.1 に示す解析モデルを用いてボルケーノ構造 FEA ピッチと HARP 膜上での電子ビーム広がりとの関係を求めた.

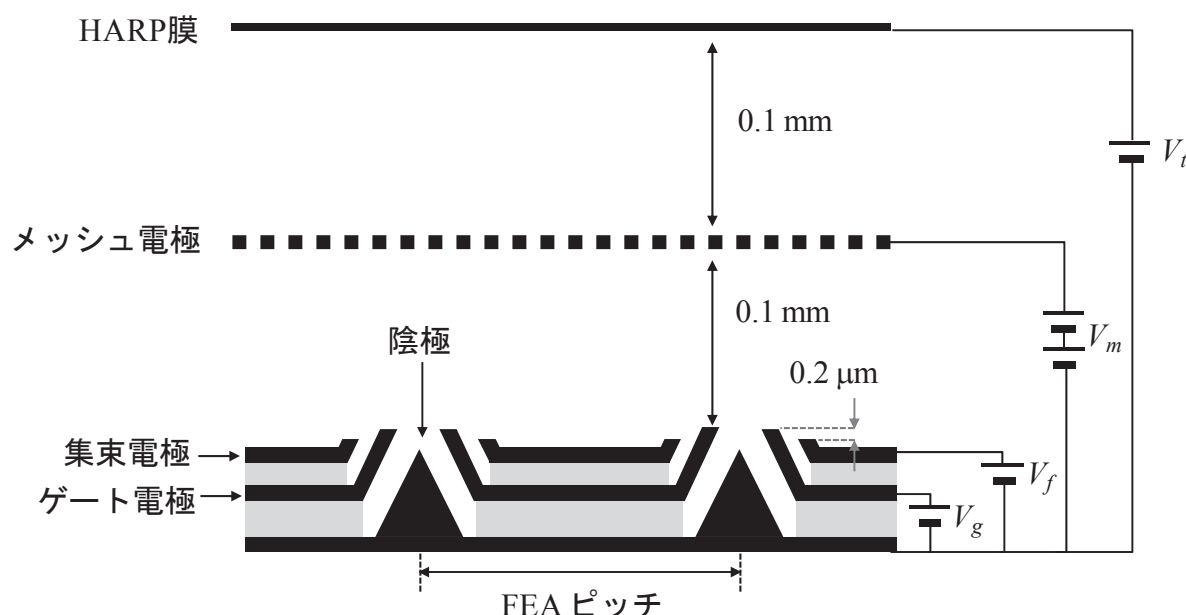


図 6.1 ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の最適 FEA ピッチを求めるための電子軌道解析モデル

画素サイズは $11 \times 11 \mu\text{m}^2$ とし、ボルケーノ構造 FEA ピッチは $1.7 \mu\text{m}$ から $5.2 \mu\text{m}$ まで変化させた。集束電極はゲート電極開口部よりも $0.2 \mu\text{m}$ 下に配置した。ゲート電極とメッシュ電極に印加する電圧はそれぞれ 60V 、 500V とした。ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA とメッシュ電極との間隔、およびメッシュ電極と HARP 膜との間隔はいずれも 0.1mm とした。ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA のピッチと HARP 膜上での電子ビーム広がりとの関係の解析結果を図 6.2 に示す。但し、電子ビームの広がりとは HARP 膜上での電流密度分布の半値幅と定義した。HARP 膜上での電子ビームの広がりとは FEA ピッチが $3.2 \mu\text{m}$ 以上の場合にはほぼ同じ値であり、電子ビーム広がりとは画素サイズ $11 \mu\text{m}$ 以下であった。一方、FEA ピッチが $2.2 \mu\text{m}$ 以下の場合、狭ピッチ化するほど HARP 膜上での電子ビーム広がりとは増大した。以上の結果より、ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA のピッチは $3 \mu\text{m}$ 程度が妥当であると判断した。

ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)とその電子ビーム量(I_b)が得られる画素数との関係を表したヒストグラムの見積もり結果を図 6.3 に示す。見積もりには、4.3 節の図 4.8 に示したボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)とその電子ビーム量(I_b)が得られる画素数との関係を表したヒストグラムを基に、画素内の FE 数と電子ビーム量は比例の関係にあるものとして換算した。なお、ボルケーノ構造 FEA ピッチは $3.1 \mu\text{m}$ とし、

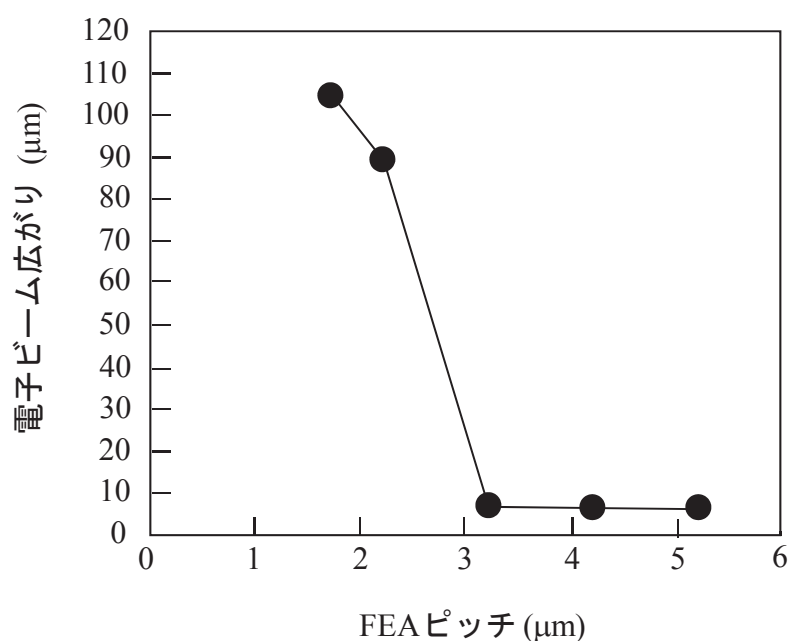


図 6.2 HARP 膜上での電子ビーム広がり半値幅とボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の FEA ピッチとの関係の解析値

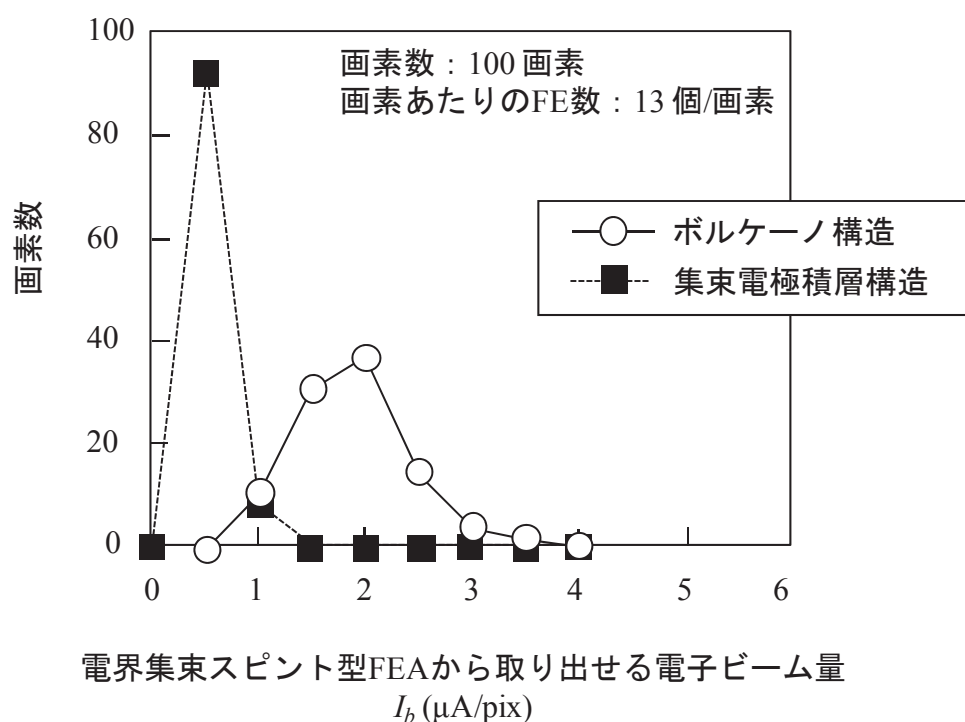


図 6.3 電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)の見積もり結果

ハイビジョン方式平面撮像管の画素内に配置する FE 数は 13 個とした。ボルケーノ構造の電界集束スピント型 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)の最小値は約 $1\mu\text{A/pix}$ である。従って、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を適用したハイビジョン方式平面撮像管においても、同 FEA から取り出せる電子ビーム量(I_b)の最小値は高品質な映像を得るための目標値である最小値 $1\mu\text{A/pix}$ 以上を満たす見積もり結果を得た。

5 章および本節で述べた結果より、ボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA を適用した平面撮像管は、磁界集束系を適用した平面撮像管と比較して格段に小型な電子ビーム集束系を備えたハイビジョン方式テレビ用撮像素子についても実現の見通しを得ることができた。

参考文献

1) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, “Electrostatic-Focusing Image Sensor with Volcano-Structured Spindt-Type Field Emitter Array,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 34, no. 5, pp. 052201.1-052201.6, 2016.

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の執筆にあたり，静岡大学 電子工学研究所所長の三村秀典 教授より多くのご支援とご指導を賜りました．心より厚く御礼申し上げます．また，本論文の審査過程において，ご助言とご指導を賜りました青木徹 教授，橋口原 教授，根尾陽一郎 准教授に深く感謝いたします．

本論文は NHK 放送技術研究所において行った「電界集束スピント型 FEA およびアクティブマトリクス駆動回路を適用した平面撮像管」の研究をまとめたものです．研究の機会および論文をまとめる機会を与えてくださり，多大なるご支援を賜りました放送技術研究所 黒田徹 所長，ならびに藤澤秀一 前 所長(現 一般財団法人 NHK エンジニアリングシステム 理事長)に深く感謝いたします．林直人 新機能デバイス研究部 部長，久保田節 上級研究員には多大なるご支援とご配慮をいただきました．深く感謝いたします．江上典文 元 研究主幹(現 近畿大学 産業理工学部教授)には，私の放送技術研究所への配属以来，直接の研究の指導者として細部にわたり貴重なご指導をいただき研究者としての姿勢を学ばせていただきました．心より感謝いたします．

研究メンバーの難波正和 上級研究員，瀧口吉郎 上級研究員，平野善之 特許部 副部長には本研究全般について，渡部俊久 主任研究員にはアクティブマトリクス駆動回路について，多大なるご助言とご協力をいただきました．また，HARP 膜の試作において，宮川和典 主任研究員にご協力をいただきました．ここに，これらの方々をはじめとする NHK 放送技術研究所 撮像デバイスグループの皆さまに厚く御礼申し上げます．

また，本研究で用いたボルケーノ構造電界集束スピント型 FEA の試作に関しては，国立研究開発法人 産業技術総合研究所の長尾昌善様をはじめとする多くの方々に全面的なご協力と有益なご助言をいただきました．心より御礼申し上げます．集束電極積層構造の電界集束スピント型 FEA や基礎実験用電界集束スピント型 FEA の試作に関しては双葉電子工業株式会社の伊藤茂生様，谷口昌照様，中村和仁様，宮健太様，西周慶久様をはじめとする多くの方々に全面的なご協力と有益なご助言をいただきました．深く感謝をいたします．HARP 膜の試作に関しては浜松 ホトニクス株式会社の小林昭様にご協力をいただきました．深く感謝をいたします．

最後に，私の社会人博士課程への入学を後押しし，常に支えてくれた家族と両親に感謝します．

2016 年 12 月

本田悠葵

研究業績

論文

- 1) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, “Double-Gated, Spindt-Type Field Emitter With Improved Electron Beam Extraction,” IEEE Trans. on Electron Devices, vol. 63, no. 5, pp. 2182-2189, 2016.
- 2) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, “Electrostatic-Focusing Image Sensor with Volcano-Structured Spindt-Type Field Emitter Array,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 34, no. 5, pp. 052201.1-052201.6, 2016.
- 3) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, and Norifumi Egami, “Active-Matrix Spindt-Type Field Emitter Array with Faster Response Time for Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 33, no. 1, pp. 012205.1-012205.7, 2015.
- 4) Y. Honda, Y. Takiguchi, N. Egami, M. Nanba, Y. Saishu, K. Nakamura, and M. Taniguchi, “Electrostatic Focusing Spindt-Type Field Emitter Array for an Image Sensor with a High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target,” J. Vac. Sci. Technol. B, vol. 29, no. 4, pp. 04E104.1-04E104.5, 2011.

口頭発表

- 1) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, “Electrostatic-Focusing FEA-HARP Image Sensor with Volcano-Structured Spindt-Type FEA,” The 22nd International Display Workshops (IDW '15), FED2-3, pp. 601-604, 2015.
- 2) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 長尾昌善, 根尾陽一郎, 三村秀典, 江上典文, “電界集束型FEA-HARP撮像素子の放射電子特性,” 電子情報通信学会技術研究報告 電子デバイス, vol.115, no.264, ED2015-56, pp. 11-14, 2015.
- 3) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 長尾昌善, 根尾陽一郎, 三村秀典, 江上典文, “ボルケーノ構造スピント型エミッタを適用した電界集束型FEA-HARP撮像素子,” 映像情報メディア学会年次大会, 13D-4, 2015.
- 4) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, “Design Optimization of a Spindt-Type Field Emitter Array for an Image Sensor with HARP Target,” 28th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2015), EO-01, pp. 234-235, 2015.
- 5) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 長尾昌善, 根尾陽一郎, 三村秀典, 江上典文, “電界集束スピント型冷陰極の電子ビーム取り出し効率の改善,” 日本学術振興会第12回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, pp. 25-33, 2015.
- 6) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, and Norifumi Egami, “Electrostatic-Focusing Spindt-Type FEA with Improved Electron-Beam Extraction Efficiency for FEA-HARP Image Sensor,” The 21st International Display Workshops (IDW '14), FED1-2, pp. 579-582, 2014.
- 7) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 根尾陽一郎, 三村秀典, 江上典文, “電界集束スピント型冷陰極の電子ビーム取り出し効率の改善,” 電子情報通信学会技術研究報告 電子デバイス, vol. 114, no. 262, ED2014-63, pp. 7-10, 2014.
- 8) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 江上典文, “電界集束型FEA-HARPの電子ビーム取り出し効率の改善,” 映像情報メディア学会年次大会, 9-2, 2014.
- 9) Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa, M. Kubota, and Norifumi Egami, “Highly Sensitive HARP Image Sensor with Spindt-Type Field Emitter Array,” The 6th IEEE International Nanoelectronics Conference 2014 (IEEE INEC 2014), emission 2, 2014.

- 10) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, and Norifumi Egami, “Electrostatic-Focusing Spindt-Type FEA with Improved Electron-Beam Extraction Efficiency for Image Sensor with HARP target,” 27th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2014), S3 C-1, pp. 19-20, 2014.
- 11) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 江上典文, “冷陰極HARP撮像板のハイビジョン化に向けたアクティブマトリクス駆動回路の基礎検討,” 日本学術振興会第11回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, 5-4, pp. 35-43, 2014.
- 12) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, and Norifumi Egami, “Active-Matrix Drive Circuit for Image Sensor Consisting of Field Emitter Array and Avalanche Photoconductor,” The 20th International Display Workshops (IDW '13), FED1-2, pp. 806-809, 2013.
- 13) 本田悠葵, 難波正和, 宮川和典, 久保田節, 江上典文, “ハイビジョンFEA-HARP用アクティブマトリクス駆動回路の基礎検討,” 映像情報メディア学会年次大会, 15-3, 2013.
- 14) Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, and Norifumi Egami, “Faster Response Time of Active-Matrix Spindt-Type Field Emitter Array for Image Sensor with High-Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target,” 26th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2013), 2013.
- 15) 本田悠葵, 江上典文, 瀧口吉郎, 難波正和, 中村和仁, 谷口昌照, “冷陰極HARP撮像板における電界集束系の開発,” 日本学術振興会第9回真空ナノエレクトロニクスシンポジウム, 5-1, pp. 83-90, 2012.
- 16) 本田悠葵, 瀧口吉郎, 江上典文, 難波正和, 中村和仁, 谷口昌照, “FEA-HARPの集束電極構造の改善検討,” 映像情報メディア学会年次大会, 14-2, 2011.
- 17) Y. Honda, Y. Takiguchi, N. Egami, M. Nanba, K. Nakamura, M. Taniguchi, “Triple-Gated Spindt-Type FEA for Image Sensor with HARP Target,” 24th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC 2011), O2-1, pp. 14-15, 2011.
- 18) Y. Honda, M. Nanba, Y. Takiguchi, N. Egami, Y. Saishu, K. Nakamura, M. Taniguchi, “Electrostatic Focusing Spindt-Type FEA for Image Sensor with HARP Target,” 8th International Vacuum Electron Sources Conference and NANO carbon (IVESC 2010 and NANO carbon 2010), O10-8, pp. 105-106, 2010.
- 19) Y. Honda, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Kikuchi, H. Seo, S. Aihara, T. Watabe, H. Ohtake, N. Egami, Y. Saishu, K. Nakamura, M. Taniguchi, “Electrostatic Focusing for FEA Image Sensor with HARP Target,” The 16th International Display Workshops (IDW '09), FED2/PH5-3L, pp. 1993-1994, 2009.

- 20) 本田悠葵, 難波正和, 菊地健司, 瀬尾北斗, 相原聡, 渡部俊久, 大竹浩, 瀧口吉郎, 江上典文, 西周慶久, 中村和仁, 谷口昌照, “電界集束型FEA-HARPの基礎検討,” 映像情報メディア学会年次大会, 12-8, 2009.
- 21) 本田悠葵, 瀧口吉郎, 難波正和, 渡部俊久, 江上典文, 宮健太, 中村和仁, 谷口昌照, “アンチラグFEA-HARP,” 映像情報メディア学会冬季大会, 1-5, 2008.
- 22) 本田悠葵, 瀧口吉郎, 難波正和, 渡部俊久, 江上典文, 宮健太, 中村和仁, 谷口昌照, “アンチブルーミングFEA-HARP,” 映像情報メディア学会技術報告, vol. 32, no. 50, ITS2008-72, pp.1-4, 2008.
- 23) 本田悠葵, 瀧口吉郎, 難波正和, 渡部俊久, 江上典文, 宮健太, 中村和仁, 谷口昌照, “アンチブルーミングFEA-HARP,” 映像情報メディア学会年次大会, 12-8, 2008.
- 24) 本田悠葵, 平野喜之, 宮川和典, 難波正和, 渡部俊久, 岡崎三郎, 江上典文, 小原有司, 田中満, 伊藤茂生, 小林昭, “超高感度スピント型冷陰極HARP撮像板の諸特性,” 電子情報通信学会技術研究報告 電子デバイス, vol. 105, no. 257, ED2005-113, OME2005-39, pp. 27-32, 2005.

表彰

International Display Workshops IDW '15 Best Paper Award

Yuki Honda, Masakazu Nanba, Kazunori Miyakawa, Misao Kubota, Masayoshi Nagao, Yoichiro Neo, Hidenori Mimura, and Norifumi Egami, “Electrostatic-Focusing FEA-HARP Image Sensor with Volcano-Structured Spindt-Type FEA,” The 22nd International Display Workshops (IDW '15), FED2-3, pp. 601-604, 2015.

第42回 平成20年度 映像情報メディア学会 鈴木記念奨励賞

本田悠葵, 瀧口吉郎, 難波正和, 渡部俊久, 江上典文, 宮健太, 中村和仁, 谷口昌照, “アンチブルーミング FEA-HARP,” 映像情報メディア学会年次大会, 12-8, 2008.

本田悠葵, 瀧口吉郎, 難波正和, 渡部俊久, 江上典文, 宮健太, 中村和仁, 谷口昌照, “アンチラグ FEA-HARP,” 映像情報メディア学会冬季大会, 1-5, 2008.