電界放出陰極アレイを用いた超高感度平面撮像管の開発*

難 波 正 和^{*1}

Ultra-high Sensitivity Flat Image Pick-up Tube with Field Emitter Array

Masakazu NANBA^{*1}^{*1}Advanced Functional Devices Research Division, NHK Science & Technology Research Laboratories,
1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157-8510, Japan

(Received May 31, 2016, Accepted September 19, 2016)

A 640×480 pixel field emitter array (FEA) image sensor with a high-gain avalanche rushing amorphous photoconductor (HARP) target was fabricated and tested as a step toward the development of ultrahigh-sensitivity compact image sensors for high-definition TV cameras. Experiments showed that the prototype sensor could obtain clear images with little noise under illumination on a level equivalent to moonlight, with sufficient resolution while consuming far less power than current ultrahigh-sensitivity pickup tubes. Furthermore, various technologies which were suitable for practical image sensor have been developed.

1. はじめに

アモルファスセレン内でのアバランシェ増倍現象を利用した HARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 光電変換膜 (以下, HARP 膜と呼ぶ) を用いた超高感度撮像管¹⁻³⁾は, 既に実用化され超高感度ハイビジョンカメラに用いられている³⁾. 本カメラは, 現在の主流である CCD や CMOS などの固体撮像素子を用いたカメラの感度をはるかに凌駕し, 照明が制約される夜間緊急報道や, 科学番組制作における放送用途にとどまらず, 学術や医療・バイオなど様々な分野で利用されてきている^{4,5)}. しかしながら, HARP 撮像管は, 熱陰極を用いた電子銃からの一本の電子ビームを偏向し HARP 膜上を走査することで, 膜内に生成・増倍し蓄積された電荷 (正孔) を外部へ信号として出力しているため, カメラのサイズ, 消費電力が大きいという点で固体撮像素子を用いたカメラと比べて劣っていた. 一方で, 1970年前半に C. A. Spindt らによって考案された半導体加工技術を用いて作られるマイクロメートルサイズの電界放出陰極⁶⁾ (スピント型と呼ばれる) は, 平面上に多数並べたアレイとすることでマルチ電子ビーム源として利用できることから, 1990年代はじめから主に従来の陰極線管 (CRT) に代わる平面ディスプレイ用として多くの研究がなされてきた^{7,8)}.

筆者らは, このスピント型電界放出陰極を並べたアレイ (以下, 電界放出陰極アレイと呼ぶ) を HARP 撮像管の電子銃部に適用することで, 固体撮像素子並みに小型でかつ低消費電力化を図った超高感度平面撮像管の研究に着手した. 冷陰極 HARP 撮像板と名付けられた本素子は, 撮像管用に開発された超高感度な HARP 膜をそのまま適用できることから, 超高感度と高画質を両立できる小型撮像素子として, その開発に大きな期待が寄せられ, 実現に向けて様々な要素技術を開発してきた. ここでは, その研究の一部について紹介する.

2. 冷陰極 HARP 撮像板の動作原理

Fig. 1 に基本的な冷陰極 HARP 撮像板の構成を示す. 本素子は, 電界放出陰極アレイ, メッシュ電極, ならびに, 超高感度光電変換膜である HARP 膜をそれぞれ近接させて配置した平面真空管構造となっている. 通常, 電界放出陰極アレイの画素には, 十分な放射電流を得るため, 複数の電界放出陰極が形成されている. 電界放出陰極は, 様々な構造のものが提案^{9,10)}されているが, 筆者らは, 先鋭な円錐状の陰極 (エミッタチップとも呼ばれる) と $1\mu\text{m}$ 以下の開口を持つ引き出し電極で構成されるスピント型電界放出陰極⁶⁾を用いてきた. 本陰極は, 陰極に対して引き出し電極に正の電圧を印加することで, 尖った陰極先端に電界集中を起こさせ, 比較的低い電圧 (40~60 V) で電子を真空中に放出できる. 本撮像板の動作原理を **Fig. 2** に示す. HARP 膜に光が入射すると透明電極近傍の膜内部に入射光量に応じた電子・正孔対が生成される. この内, 正孔は透明電極を介して HARP 膜に印加された強電界 (電界強度 10^8 V/m 以上) によって加速され, 膜を構成する原子とつぎつぎに衝突を繰り返し, 新たな電子・正孔対を生み出し (アバランシェ増倍) つつ, 電子ビーム走査側に蓄積される. 一方で, 電界放出陰極アレ

Fig. 1 Configuration of field emitter image sensor with HARP target.

* 平成27年12月3日 第56回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} NHK 放送技術研究所 新機能デバイス研究部 (〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11)

Fig. 2 Operating principle of field emitter image sensor with HARP target.

イ側では、テレビジョンの規格に準じて、各画素の引き出し電極と陰極との間に電子放出に必要な電圧を順番に印加し、各画素から電子を順次放出させる。この電子は電界放出陰極の引き出し電極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¹¹⁾によって引き出され、HARP 膜に到達する。最終的に陰極から放出された電子と HARP 膜に蓄積された正孔とが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時系列の映像信号が得られる。

このように本撮像板では、撮像管のように電子放出のための加熱や電子ビームの偏向に要する電力が不要であり、HARP 撮像管と同等の超高感度が得られるだけでなく、飛躍的な小型化と消費電力低減を図ることができる。

3. 磁界集束型640×480画素冷陰極 HARP 撮像板

ここでは、小型・超高感度撮像素子としての可能性を実証するために試作した磁界集束型640×480画素冷陰極 HARP 撮像板について紹介する。

3.1 640×480画素電界放出陰極アレイと撮像板の試作

電界放出陰極アレイの各画素からの電子放出を制御するための方法として、引き出し電極と陰極の配線とを互いに交差するように分割し、外部から直接駆動電圧を印加するパッシブマトリクス構造 (Fig. 1 参照) がある。比較的簡便な構造であり、筆者らも当初はこの構造のアレイを用いて基礎実験を行ってきた^{12,13)}。しかし、解像度の向上を目指し多画素化を図るためには、「水平画素数+垂直画素数」に相当する膨大な数の配線を素子内部から外部へ取り出すことが必要となり、小型な撮像素子を目指す上での大きな障壁となっていた。

この問題を解決するため、集積回路作製技術により駆動回路を形成したシリコン基板上に電界放出陰極アレイを作製したアクティブ駆動回路内蔵スピント型電界放出陰極アレイを開発した。模式図を Fig. 3 に示す。電界放出陰極アレイの陰極は、画素ごとに電氣的に分離する画素電極上に形成され、その直下にそれぞれ形成した高耐圧トランジスタ (画素トランジスタ) のドレイン電極が接続される。画素トランジスタのソースおよびゲートは、画素配置領域外に形成した水平および垂直走査回路に接続される。アレイの引き出し電極

Fig. 3 Schematic diagram of active-matrix Spindt type field emitter array.

Fig. 4 Fabricated active-matrix Spindt-type FEA with 640×480 pixels: (a) overview of FEA chip and (b) scanning electron microscope (SEM) image of one pixel.

(各画素共通) に電子放射に必要な DC 電圧を印加し、水平および垂直走査回路により各画素の画素トランジスタのドレイン電位、すなわち、陰極の電位を制御することで、各画素からの電子放出ならびに走査が可能である。この構成により、外部からは走査回路への制御信号 (同期信号・走査速度制御信号) と DC 電圧の供給のみで電界放出陰極アレイの駆動を可能とし、外部接続配線数を大幅に削減した¹⁴⁾。

Fig. 4 には、実際に試作したアクティブ駆動回路内蔵スピント型電界放出陰極アレイの写真を示す。全体のチップサイズは 15 mm×12 mm、画素配置領域 12.8 mm×9.6 mm の中にサイズ 20 μm×20 μm の画素を 640×480 個並べた。また、撮像動作に必要な放射電流を確保するため、各画素内には引き出し電極の開口径約 0.8 μm のスピント型電界放出陰極を 121 個配置した。

上述した電界放出陰極アレイに、開口率約 45% のメッシュ電極と厚さ 15 μm の HARP 膜とを対向配置した 640×480 画素冷陰極 HARP 撮像板を試作した。その外観を Fig. 5 に示す。試作撮像板の厚さは約 10 mm と、HARP 撮像管 (長さ約 100 mm) に比べて、格段に小型である。

スピント型陰極から放出された電子ビームの空間広がり大きく⁷⁾、解像度の劣化要因となる。HARP 膜上での電子ビームの広がり径を画素サイズ程度に抑え、解像度劣化の防止を図るため、形状の異なる 2 種類のネオジム系永久磁石

Fig. 5 External view of prototype field emitter image sensor with HARP target.

Fig. 6 Reproduce image taken by prototype image sensor (Illumination of about 0.3 lx, lens iris of F1.2).

からなる磁界集束系を開発し、撮像板内部に磁束密度約 0.125 T のほぼ一様な磁界を形成させた¹⁴⁾。

3.2 試作した冷陰極 HARP 撮像板の諸特性

試作撮像板の特性評価にあたっては、電界放出陰極アレイを NTSC 方式（走査線 525 本、フレーム周波数 30 Hz、インターレース比 2:1）に準じた規格で駆動し、メッシュ電極には 700 V、HARP 膜には最大で 1550 V を印加した。撮像板の駆動に要する電力は、HARP 撮像管の 1/10 であった。本撮像板による撮像例を **Fig. 6** に示す。月明かり程度の明るさ（被写体照度 0.3 lx）で、ノイズの少ない鮮明な映像が得られた。

3.2.1 主要撮像特性

撮像板に青色光を照射したときの出力信号電流と HARP 膜印加電圧との関係を **Fig. 7** に示す。HARP 膜の印加電圧を高くするに従い、出力信号電流はいったん飽和するが、印加電圧が 1200 V を超えるあたりからアバランシェ増倍により急激に上昇し、1550 V で約 200 倍の電荷増倍率が得られている。これは、同じ厚さ（15 μm ）の HARP 膜を適用した撮像管の特性³⁾とほぼ一致しており、撮像板においても HARP 膜に由来する高い感度が安定して得られることを示している。

撮像板のダイナミックレンジの上限（入射光が増した時どこまで階調が表現できるか）は、電界放出陰極アレイの各画素から放射された電子ビームのうちメッシュ電極を通過して HARP 膜側へ届く電子量（通常、電流値で表わし、以降実

Fig. 7 Sensitivity characteristics.

Fig. 8 Effective emission current characteristics.

Fig. 9 Resolution characteristics.

効放射電流量と呼ぶ）で決まる。**Fig. 8** は、開口率が 45% のメッシュ電極を用いた時の電界放出陰極アレイの引き出し電極電圧と実効放射電流の関係を示す。一般的な撮影では 1 ~ 2 μA 必要といわれているが、試作撮像板では引き出し電極電圧 60 V のときに 7 μA 以上得られ、十分な実効放射電流量が得られていることが分かった。

Fig. 9 には、試作撮像板の解像度を表す振幅変調度の測定結果を示す。振幅変調度は、線密度の異なる白と黒の縦縞パターンを HARP 膜上に投影したときの白および黒の信号の差を、線密度が低いとき（約 4.2 lp/mm）の信号の差で割った値で定義した。線密度が 25 lp/mm（HARP 膜面で幅 20 μm の縦縞となる）のときの振幅変調度は約 56% であり、良好な解像度が得られていることで磁界集束により HARP 膜

Fig. 10 Reproduce image with (a) anti-blooming operation and (b) conventional operation.

面上での電子ビームが画素サイズ相当に小さくできていることが分かった。さらに画面の全体にわたり同程度の振幅変調を確認しており、撮像管で生じる電子ビームの偏向に伴う周辺解像度の劣化もないことも、本撮像板の特長である。

3.2.2 高輝度光入射時の画質改善

HARP 撮像管では、車のヘッドライトや街路灯などの高輝度な被写体を撮影すると、ブルーミングと呼ばれる偽信号（高輝度な被写体を実際より膨らんで見える現象）が発生し、画質が著しく劣化するという問題があった。ブルーミングは、HARP 膜の高輝度光入射部近傍を走査する電子が、電位が高くなった同部に引き寄せられ、そこに蓄積された電荷を読み出すことで発生する。そこで、各画素に電子放出源を配置した撮像板の特徴を生かし、水平帰線消去期間にこれから走査を行うアレイの水平走査方向上に位置するすべての画素から電子を放射させて、HARP 膜に蓄積された過剰な電荷のみを事前に取り除くという新たな駆動法（アンチブルーミング駆動法）を考案した¹⁵⁾。Fig. 10に示すように、アンチブルーミング駆動法の導入により、映像信号の白レベルの数百倍に相当する光量が入射した場合でも、高輝度光入射部以外の画質には影響を及ぼさずにブルーミングの発生を抑制できることを確認した。

4. 実用化に向けた取り組み

4.1 静電集束構造を持つスピント型電界放出陰極の開発

前章で紹介した撮像板のように、永久磁石からの磁界で電子ビームを集束する方法では、磁石のサイズが大きく、3板化によるカラー化や、カメラの小型・軽量化が難しい。そこで電界放出陰極アレイ上に追加した電極により形成される静電レンズにより電子ビームを集束する静電集束スピント型電界放出陰極の適用検討を進めた。

静電集束構造を持つ電界放出陰極については様々な構造が提案されているが、引き出し電極上に集束電極を追加した基本的な構造を Fig. 11に示す。本構造では、集束電極に引き出し電極より低い電位を与えることで、電子ビームの集束効果が得られる一方で、集束電極電位が陰極先端の電界集中を弱めてしまい放出電子量が減少する問題があった。筆者らも、電子ビームの集束と十分な放出電子量の両立を目指して、数値解析を用いた電子軌道計算を基に、集束電極の電位の影響を遮蔽するため引き出し電極を厚くした構造や、集束電極と引き出し電極の間に高い電圧を印加する中間電極を挿

Fig. 11 Schematic configuration of Spindt-type field emitter with electrostatic focusing electrode.

入した構造を試作した^{16,17)}が、遮蔽効果は得られたものの、集束電極開口付近で多くの電子が引き出し電極方向へ戻され捕獲されてしまうため、根本的な放出電子量の改善には至らなかった。また、これらの試作の過程において、数値解析結果と実測値との間にかい離が大きいことも分かった。これに関して、解析では陰極から放出する電子群の初速度分布を理想的な形状のもとで計算し与えていることが主な要因であることを見出し、より精密な軌道計算ができるよう、放出電子群の初速度分布を実測で求め、数値解析での電子群にそれぞれ反映し軌道を計算する手法を構築した¹⁸⁾。この計算手法を用いて検討した結果、従来のゲート電極上方に集束電極を形成する構成よりも、ゲート電極開口位置より下方に集束電極を形成する構成が電子ビームの改善には有効であることが分かった¹⁹⁾。

そこで注目したのが、(国研)産業総合技術研究所と静岡大学のグループが研究を進めていたボルケーノ構造スピント型電界放出陰極である²⁰⁾。Fig. 12に電子顕微鏡写真を示す。従来構造のスピント型陰極とは異なり、引き出し電極の開口より集束電極が低い位置に配置された構造であることが特徴である。これによりボルケーノ構造では、集束電極に引き出し電極よりも低い電圧を印加し静電レンズを形成しても、引き出し電極に戻される電子が少なく、効率よく集束された電子を HARP 膜方向へ取り出すことができる。ボルケーノ型で測定した集束電極電圧と1陰極あたりの放出電子量（電流量で換算）の関係を、従来構造¹⁸⁾との比較で Fig. 13に示す。1陰極あたりの放出電子量は、集束効果が期待できる15 V 近辺では、約2倍近く改善できることが分かった。このボルケーノ構造スピント型陰極の撮像板用アレイへ適用を目的に、20 μm $\times$ 20 μm の画素に39個形成したボルケーノ構造陰極のアレイ（100 $\times$ 50画素）とそれを適用した撮像板の試作と評価を進めている。

4.2 多画素化に適したアクティブ駆動回路の開発

本撮像板では、画素ごとに順次電子放射し HARP 膜に蓄積された電荷を読み出している。実用化に向け、画素数を増加させていくに従って、1画素の駆動時間（電子放射させる時間）が短くなる。ハイビジョンの画素数（1920 $\times$ 1080画素）では、1画素の駆動時間は約13.5 ns と3章で紹介した640 $\times$ 480画素撮像板の約1/6に短くなる。3章で紹介したアクティブ駆動回路では、1画素のエリア内に形成された1個の画素トランジスタで画素を駆動できる利点を持つが、画素駆動用の高いパルス電圧を MOS (Metal Oxide Semiconductor) トランジスタに印加するため、トランジスタのドレ

インだけでなくソースとゲートも高耐圧構造としている¹⁴⁾。このためゲートとソースの寄生容量が大きくなり、13.5 ns の期間にドレイン（陰極）電圧を OFF 状態（電子放射のカットオフ電圧）から ON 状態（約 0 V）に切り替えることが困難である。そこで、多少回路構成が複雑になるものの駆動負荷を低減した新しい駆動回路を提案した。Fig. 14 に新駆動回路の模式図を従来回路と比較して示す。従来駆動回路では、陰極に接続される画素電極は、トランジスタのドレインのみに接続されていたが、新駆動回路では、加えて抵

Fig. 12 SEM image of the Volcano-structured, electrostatic focusing, Spindt-type field emitter.

Fig. 13 Measured dependencies of electron beam current extracted from volcano structured field emitter on focusing voltage.

抗を介して駆動電圧電源に接続できるようにした。これによりトランジスタの ON/OFF の切り替えにより、カットオフ電源から直接高いパルス電圧の印加ができるようになるため、トランジスタのソースとゲートは 5 V と 0 V からなる低いパルス電圧で制御でき、高耐圧構造が不要となり、寄生容量 (C_{source}) を低減できる。さらに、周波数の高い水平走査の切り替えを、より寄生容量 (C_{gate}) の小さいゲートで行わせることにし、駆動負荷を従来方式の約 1/6 に低減させた。これを基に動作検証用の評価素子（水平10×垂直1080画素の駆動回路、冷陰極に相当する疑似負荷を回路に接続）を試作し、画素電極（陰極）電位の応答特性の評価を行った。測定結果を Fig. 15 に示す。陰極電位は、ハイビジョンの1画素の駆動時間約13.5 ns 内に、40 V からほぼ 0 V へ変化しており、ハイビジョン駆動が可能であることを確認した²¹⁾。

5. む す び

夜間緊急報道等に不可欠な超高感度カメラの小型化に向けて取り組んでいる冷陰極 HARP 撮像板について640×480画素撮像板を中心に実用化に向けた要素技術開発の概要について紹介した。これらを基にして、小型・低消費電力で、超高感度と高画質とを両立することができる冷陰極 HARP 撮像

Fig. 15 Measured change in cathode (emitter tip) potential.

Fig. 14 Schematic diagram of field emitter arrays with (a) new drive circuit (b) conventional circuit.

板を実用化できた暁には、放送のみならずさまざまな分野での利用が期待できる。

また、京都大学後藤准教授をはじめとするグループは、前述のボルケーノ構造スピント型陰極と、カドミウム・テルル (CdTe) 膜とを組み合わせた耐放射線撮像素子の開発を進めており²²⁻²⁴⁾、真空ナノエレクトロニクスに基盤をおく撮像素子のさらなる活躍が待たれる。

謝辞

640×480画素スピント型電界放出陰極アレイの試作では双葉電子工業株式会社、ボルケーノ構造スピント型電界放出陰極アレイの試作では国立研究開発法人産業技術総合研究所、HARP 膜の試作では浜松ホトニクス株式会社のそれぞれの皆様にご協力頂きました。ここにあらためて感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) K. Tanioka, J. Yamazaki, K. Shidara, K. Taketoshi, T. Kawamura, S. Ishioka and Y. Takasaki: IEEE Electron Dev. Lett., **8** (1987) 392.
- 2) K. Tanioka, T. Matsubara, Y. Ohkawa, K. Miyakawa, S. Suzuki, T. Takahata, N. Egami, K. Ogusu, A. Kobayashi, T. Hirai, T. Kawai, M. Hombo and T. Yoshida: IEICE T. Electron., **E86C** (2003) 1790.
- 3) Y. Ohkawa, K. Miyakawa, T. Matsubara, K. Kikuchi, S. Suzuki, M. Kubota, N. Egami, K. Tanioka and A. Kobayashi: J. Inst. Image Inf. Telev. Eng., **62** (2008) 1641.
- 4) H. Mori, E. Tanaka, K. Hyodo, M. U. Mohammed, T. Sekka, K. Ito, Y. Shinozaki, A. Tanaka, H. Nakazawa, S. Abe, S. Handa, M. Kubota, K. Tanioka, K. Umetani and M. Ando: Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol., **276** (1999) H429.
- 5) K. Matsuura-Tokita, M. Takeuchi, A. Ichihara, K. Mikuriya and A. Nakano: Nature, **441** (2006) 1007.
- 6) C. A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey and E. R. Westerberg: J. Appl. Phys., **47** (1976) 5248.
- 7) S. Ito, T. Watanabe, K. Ohtsu, M. Taniguchi, S. Uzawa and N. Nishimura: J. Vac. Sci. Technol. B, **13** (1995) 487.
- 8) R. Meyer, A. Ghis, P. Rambaoud and F. Muller: *Tech. Digest of Japan Display*, Nagahama, Japan, 1986, p. 513.
- 9) S. Kanemaru, K. Ozawa, K. Ehara, T. Hirano, H. Tanoue and J. Itoh: Jpn. J. Appl. Phys., **69** (1996) 1557.
- 10) N. Negishi, T. Chuman, S. Iwasaki, T. Yoshikawa, H. Ito and K. Ogasawara: Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) L939.
- 11) M. Nanba, T. Yamagishi, S. Okazaki, K. Tanioka, K. Takayama, M. Tanaka and S. Itoh: Appl. Surf. Sci., **146** (1999) 251.
- 12) M. Nanba, T. Yamagishi, S. Okazaki, N. Egami, K. Tanioka, M. Abe, K. Takayama, M. Tanaka and S. Itoh: J. Inst. Image Inf. Telev. Eng., **54** (2000) 242.
- 13) Y. Takiguchi, M. Nanba, K. Osada, T. Watabe, S. Okazaki, T. Yamagishi, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka and S. Itoh: J. Vac. Sci. Technol. B, **22** (2004) 1390.
- 14) M. Nanba, Y. Takiguchi, Y. Honda, Y. Hirano, T. Watabe, N. Egami, K. Miya, K. Nakamura, M. Taniguchi, S. Itoh and A. Kobayashi: J. Vac. Sci. Technol. B, **28** (2010) 96.
- 15) Y. Takiguchi, M. Nanba, Y. Honda, M. Kubota, N. Egami, K. Nakamura and M. Taniguchi: J. Inst. Image Inf. Telev. Eng., **64** (2010) 399.
- 16) Y. Honda, Y. Takiguchi, N. Egami, M. Nanba, Y. Saishu, K. Nakamura and M. Taniguchi: J. Vac. Sci. Technol. B, **29** (2011) 04E104-1.
- 17) Y. Honda, Y. Takiguchi, N. Egami, M. Nanba, K. Nakamura and M. Taniguchi: *Technical Digest of 24th International Vacuum Nanoelectronics Conference*, Wuppertal, Germany, 2011 (2011) 14.
- 18) Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa, M. Kubota, Y. Nagao, Y. Neo, H. Mimura and N. Egami: IEEE Trans. Electron Devices, **63** (2016) 2182.
- 19) Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa, M. Kubota and N. Egami: *Technical Digest of 27th International Vacuum Nanoelectronics Conference*, Engelberg, Switzerland, 2014 (2014) 234.
- 20) M. Nagao and T. Yoshida: Microelec. Eng., **132** (2015) 14.
- 21) Y. Honda, M. Nanba, K. Miyakawa, M. Kubota and N. Egami: J. Vac. Sci. Technol. B, **33** (2015) 012205.
- 22) M. Nagao, Y. Gotoh, Y. Neo and H. Mimura: J. Vac. Sci. Technol. B, **34** (2016) 02G108.
- 23) T. Okamoto, T. Igari, Y. Gotoh, N. Sato, M. Akiyoshi and I. Takagi: Phys. Status Solidi C (in press).
- 24) H. Mimura: Oyo Butsuri, **85** (2016) 15.