

# アクティブマトリクス駆動型 HEED の開発と撮像デバイスへの応用

Fabrication of active-matrix HEED (high-efficiency electron emission device) and its application to high-sensitivity image sensing

中田 智成, 佐藤 貴伸, 松葉 陽平, 田中 亮太  
Tomonari Nakada, Takanobu Sato, Yohei Matsuba, Ryota Tanaka

酒村 一到, 根岸 伸安, 奥田 義行  
Kazuto Sakemura, Nobuyasu Negishi, Yoshiyuki Okuda

渡辺 温, 吉川 高正, 小笠原 清秀  
Atsushi Watanabe, Takamasa Yoshikawa, Kiyohide Ogasawara

**要旨** HEED (High-efficiency Electron Emission Device) はさまざまな可能性を持っており、その中でも超高感度撮像デバイスへの応用が期待されている。超高感度撮像デバイスである HARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 撮像板を実現させるため、アクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイを開発し、これと HARP 膜とを組み合わせた HEED 冷陰極 HARP 撮像板を試作した。本撮像板を NTSC 規格に合わせて駆動し、良好な撮像特性を確認することができた。

**Abstract** HEED (High-efficiency Electron Emission Device) has various applications, among which one is application to ultrahigh-sensitivity image sensing. We developed and prototyped an active-matrix HEED for a HARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) target. This prototyped image sensor (HARP with HEED) has excellent imaging properties.

キーワード: 電子放出, 冷陰極, HEED, HARP, アクティブ駆動, 超高感度, 撮像デバイス

## 1. まえがき

我々はパイオニア独自の冷陰極電子源である HEED (high-efficiency electron emission device) を開発し、フラットパネルディスプレイへの応用について検討してきた<sup>(1)(2)(3)</sup>。HEED には低電圧駆動、シンプルな構造という特長があり、近年ではそれをさらに活かすため、撮像デバイスへの応用を検討している。

この撮像デバイスは、NHK 放送技術研究所が中心となって開発した HARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 光電変換膜<sup>(4)(5)</sup>を用いたデバイスであり、実用化されている HARP 撮像管を発展させたものである。この HARP 撮像管は、超高感度かつダイナミックレンジが広いという特長を持っており、夜間の緊急報道や科学技術番組などで活躍してい

る。しかし、信号読み出し用の電子ビームに従来の真空管やブラウン管と同じタイプの熱電子源を用いているため、CCD などの固体撮像素子と比較すると大きく、カメラの小型化を妨げている。そこで、熱電子源を平面構造である冷陰極電子源アレイに置き換えた冷陰極 HARP 撮像板が、次世代の小型超高感度撮像デバイスとして期待され、開発が進められてきた<sup>(6)(7)(8)</sup>。この冷陰極 HARP 撮像板を実用化させるには、高精細かつ高放出電流、加えて高速スイッチング動作が可能である高性能な冷陰極電子源が求められる。これらの要求を満たすために我々はアクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイを提案した。今回は、開発したアクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイと、これと HARP 膜とを組み合わせた HEED 冷陰極 HARP 撮像板について報告する。

## 2. アクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイ

### 2.1 仕様

我々が提案したアクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイの概念図を図 1 に示す。図 1 に示すように、Si ウェハに作り込んだ駆動回路 LSI 上に HEED 冷陰極アレイを直接積層させて一体化した。撮像応用では画素を点順次スキャンで駆動するため、1 画素の駆動パルス幅は標準テレビ画像の場合 80ns と非常に高速になる。LSI と一体化させた HEED 冷陰極アレイはこの高速駆動に対応させることができる。また、画素の駆動を制御する水平および垂直走査回路も同じチップの中に搭載されているため、膨大な数の画素を実用的な配線数

で動作させることができる。

HEED 冷陰極アレイの試作にあたってはサイズを光学 1 インチとし、まずは、アクティブ駆動回路と冷陰極アレイとの一体化を原理的に確認する試作として、256 × 192 画素の HEED 冷陰極アレイを試作した (試作 I)。次に、実用的な解像度である 640 × 480 画素 (VGA) まで高精細化させた HEED 冷陰極アレイの試作 (試作 II) を行った。

### 2.2 素子構造と動作原理

アクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイの模式的な構造を図 2 に示す。本冷陰極アレイは、HEED を駆動する MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) トランジスタ

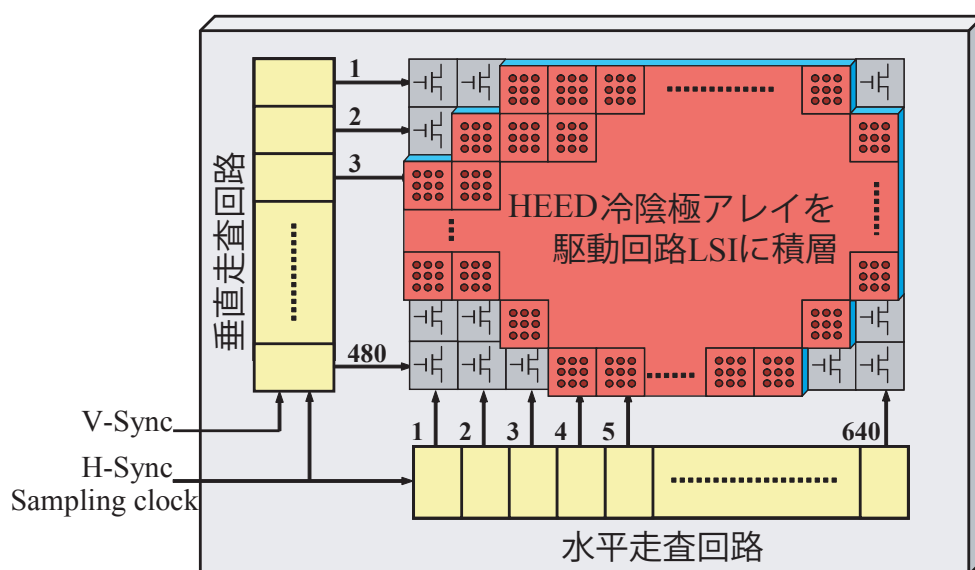


図 1 アクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイの概念図

Fig.1 Conception of the active-matrix HEED.

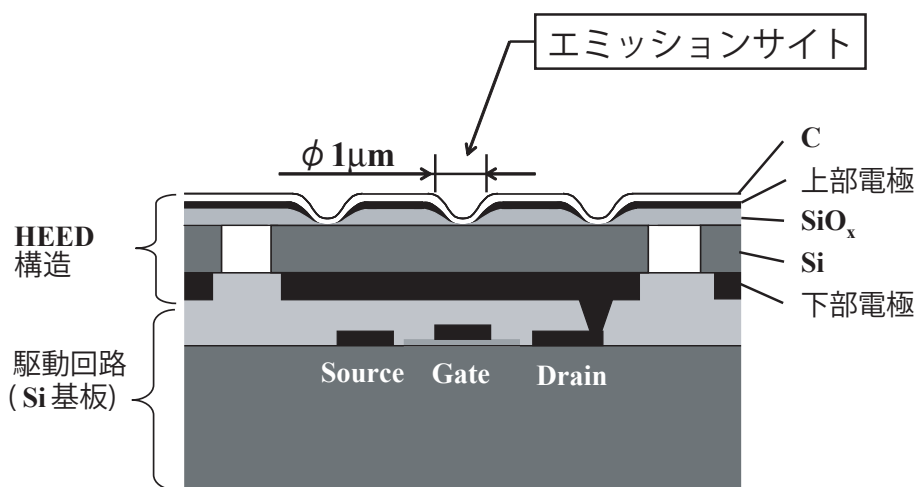


図 2 アクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイの模式的な構造

Fig.2 Schematic cross-sectional view of active-matrix HEED.

アレイと、このトランジスタアレイを制御する水平および垂直走査回路とを作製した後、その上部に HEED を形成する。HEED は下部電極、Si 層、SiO<sub>x</sub> 層、上部電極層 (W)、炭素層の積層構造からなる MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) 型の冷陰極電子源である。そのため、予め作り込んであるトランジスタアレイと同様のプロセスで作製することができる。また、素子の表面には直径 1 $\mu$ m のエミッションサイトを形成している。

次に、本冷陰極アレイの動作原理を以下に示す。本冷陰極アレイの上部電極は全画素共通になっており、下部電極および Si 層を分割して各画素を分離している。下部電極は MOS トランジスタのドレイン電極にビアホールを介して接続されており、また、ゲート電極とソース電極は水平および垂直走査回路に接続されている。電子を放出させる画素のスイッチングはトランジスタのドレイン電位、すなわち HEED の下部電極の電位を制御することで行う。

### 2.3 外観

試作 I において作製した HEED 冷陰極アレイの外観を図 3(a) に、表面の SEM 像を図 3(b) に示す。画素数は 256  $\times$  192 であり、画素が配列されているエリアは、12.8  $\times$  9.6mm<sup>2</sup> である。この画素エリアのサイズは、光学 1 インチのレンズ系に対応するものである。画素エリアの周辺には水平および垂直走査回路を組み込んでいるため、高速動作を可能にするだけでなく、256  $\times$  192 画素の冷陰極アレイを 12 本という実用的な配線数で動作させることも可能にした。1 画素のサイズは 50  $\times$  50 $\mu$ m<sup>2</sup> であり、その中の 24  $\times$  24 $\mu$ m<sup>2</sup> の領域に 4  $\times$  4 個のエミッションサイトを配列している。このエミッションサイトの面密度はディスプレイ応用で用いたそれと比べて 28 倍であり、撮像用に求められる高放出電流密度を実現させるものである。

次に、試作 II において作製した HEED 冷陰極アレイの外観を図 4(a) に、表面の SEM 像を図 4(b) に示す。画

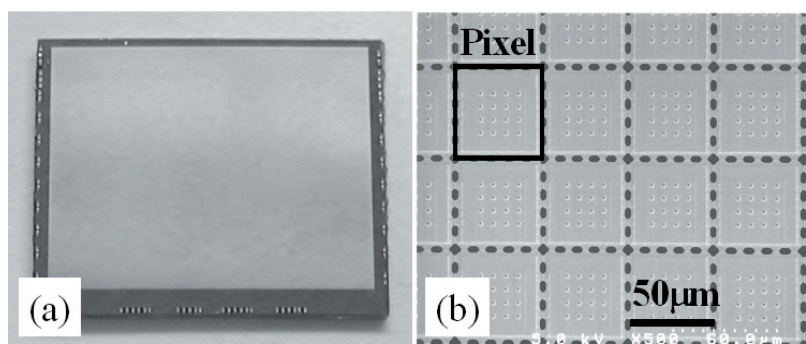


図 3 (a) 試作 I での HEED 冷陰極アレイの外観  
(b) 試作 I での HEED 冷陰極アレイの表面の SEM 像

Fig.3 (a) Cover shot of an active-matrix HEED in device I .  
(b) Top-view SEM image of the emitter arrays in device I .

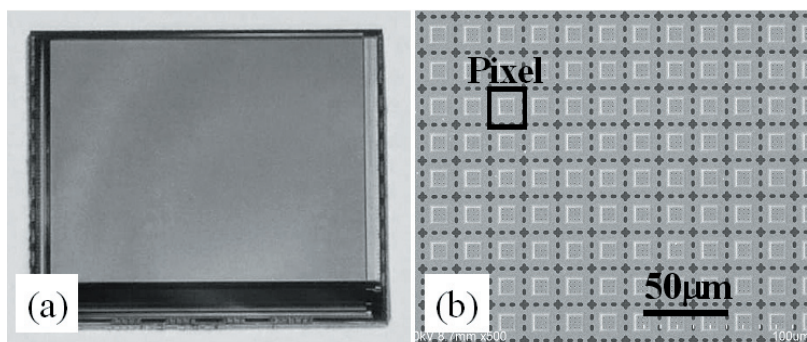


図 4 (a) 試作 II での HEED 冷陰極アレイの外観  
(b) 試作 II での HEED 冷陰極アレイの表面の SEM 像

Fig.4 (a) Cover shot of an active-matrix HEED in device II .  
(b) Top-view SEM image of the emitter arrays in device II .

素数は 640 × 480 画素 (VGA) であり、画素が配置されているエリアは試作 I と同様である。こちら画素エリアの周辺に走査回路を組み込んでいるため、画素数は大幅に増加しているが配線数は変わらない。1 画素のサイズは 20 × 20 μm<sup>2</sup> であり、その中の 8 × 8 μm<sup>2</sup> の領域に 3 × 3 個のエミッションサイトを配置している。

#### 2.4 電子放出特性

試作 I と試作 II で作製したそれぞれの HEED 冷陰極アレイの電圧 - 電流特性を図 5 に示す。試作 I の HEED 冷陰極アレイは、50 × 50 μm<sup>2</sup> の画素で 1 画素あたり 2.4 μA の放出電流が得られた。HARP 撮像板では 1 画素からの放出電流が 2 μA でハイライトにも対応する撮像をおこなうことができる<sup>(9)</sup> ので、この放出電流は十分な値である。また、これを放出電流密度に

換算すると、約 400 mA/cm<sup>2</sup> となり、従来のディスプレイ応用と比べて約 100 倍の放出電流密度となった。これは先に述べたエミッションサイト密度の向上に加えて、HEED を構成している各層の最適化を進めた結果である。ここで述べる放出電流密度は、エミッタエリアあたりの放出電流で定義した。さらに、試作 II で作製した HEED 冷陰極アレイは、20 × 20 μm<sup>2</sup> と画素の面積が約 1/6 になったにもかかわらず、1 画素あたり 2.8 μA と試作 I 以上の放出電流が得られ、試作 II においても目標の放出電流を達成することができた。この放出電流を放出電流密度に換算すると約 4 A/cm<sup>2</sup> であり、試作 I の約 10 倍であった。また、駆動電圧も 24 V から 22 V に低減した。以上の結果を表 1 にまとめる。

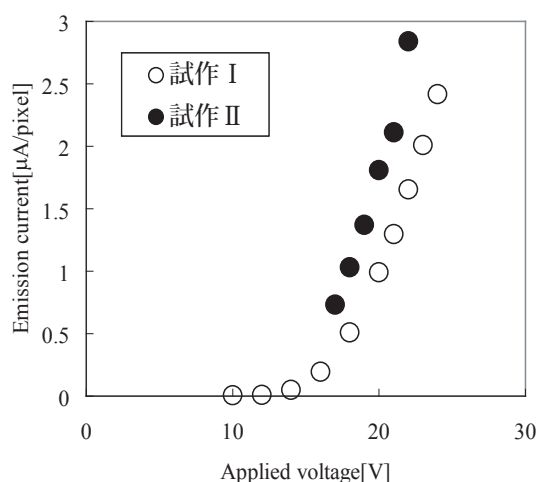


図 5 アクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイの電圧 - 電流特性

Fig.5 Applied voltage dependence of the emission current for device I (open plots) and device II (closed plots).

表 1 アクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイの仕様

Table1 Specifications of active-matrix HEEDs.

	試作 I	試作 II
画素数	256 × 192	640 × 480
画素エリア (mm <sup>2</sup> )	12.8 × 9.6	
画素サイズ (μm <sup>2</sup> )	50 × 50	20 × 20
エミッタエリア (μm <sup>2</sup> )	24 × 24	8 × 8
1 画素あたりのエミッションサイト数	16	9
駆動方式	アクティブマトリクス点順次駆動	
パルス幅 (ns)	160	80
1 画素あたりの放出電流 (μA)	2.4	2.8
放出電流密度 (mA/cm <sup>2</sup> )	400	4000

### 3. HEED 冷陰極 HARP 撮像板

#### 3.1 動作原理

HEED 冷陰極 HARP 撮像板の動作原理を図6に示す。アモルファスセレンを主成分とする 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。このうち正孔は透明電極を介して HARP 膜に印加された強い電界によって加速され、膜を構成する原子と次々衝突して、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 HARP 膜の冷陰極アレイ側に蓄積されて、入射光像に対応した正孔パターンが形成される。その正孔パターンと HEED 冷陰極アレイから放出された電子とが結合する際の電流が、入射光像に応じた映像信号として検出される。

#### 3.2 構造と仕様

試作 II で作製した HEED 冷陰極 HARP 撮像板の外観を図7に示す。試作した本撮像板の厚さは約 10mm であり、実用化されている 1 インチ HARP 撮像管の

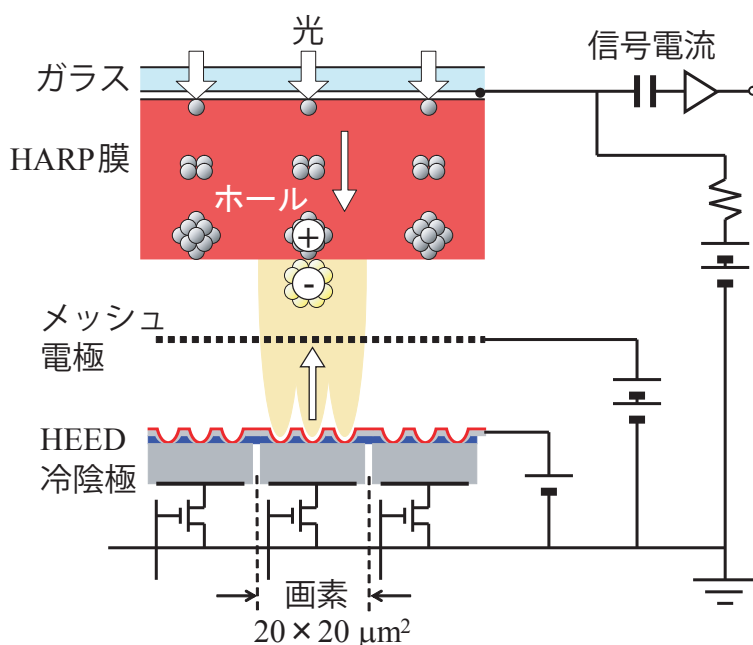


図6 HEED 冷陰極 HARP 撮像板の動作原理

Fig.6 Experimental configuration of the active-matrix HEED for image sensing with a HARP target and an operational scheme.

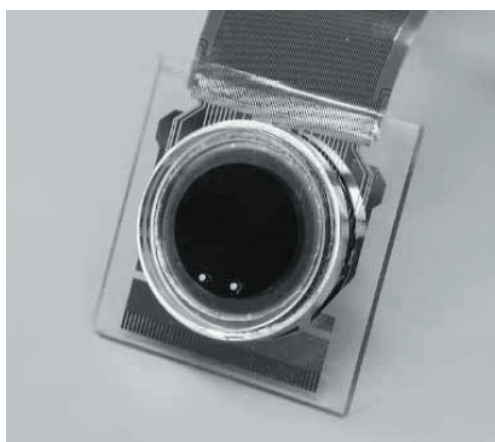


図7 HEED 冷陰極 HARP 撮像板の外観

Fig.7 Photograph of the prototyped image sensor.

長さが100mmであるのと比べると格段に小型になっている。本撮像板の模式的な構造を図8に示す。本撮像板は、HARP膜、メッシュ電極、およびHEED冷陰極アレイにより構成されている。HARP膜は透明電極付のガラス基板上に成膜されている。一方、本冷陰極アレイはガラス背面板に接着されており、その間にメッシュ電極が配置されている。全ての部材はフリットガラスまたはインジウムによってシールされている。駆動に必要な信号や電圧などはガラス背面板

上に形成した金属薄膜配線を介して外部から供給している。また、冷陰極の電子ビームをHARP膜表面に集束させる方法として、現状では2種類の永久磁石による磁界集束を用いている<sup>9)</sup>。磁界集束の模式的な構造を図9に示す。この磁界集束用の永久磁石は小型化の妨げとなっており、実用化に向けて電界集束についても検討している。

### 3.3 撮像特性

一定光量の光をHARP膜に照射したときの出力信

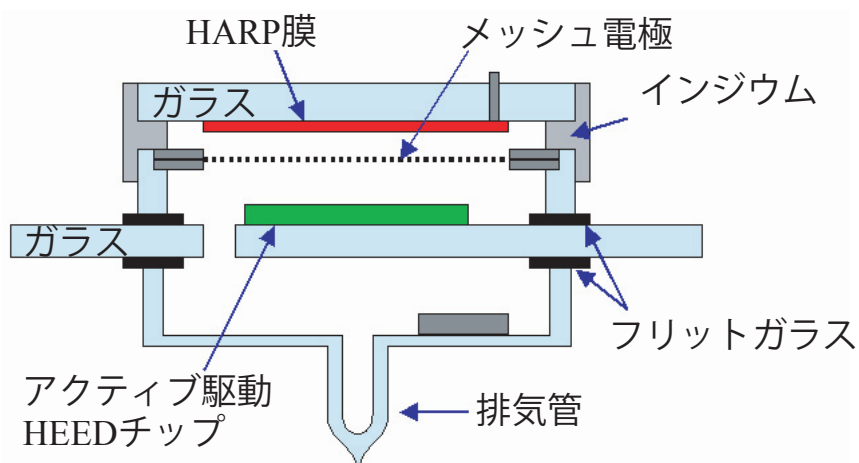


図8 HEED冷陰極HARP撮像板の模式的な構造

Fig.8 Schematic cross-sectional view of the prototyped sensor.

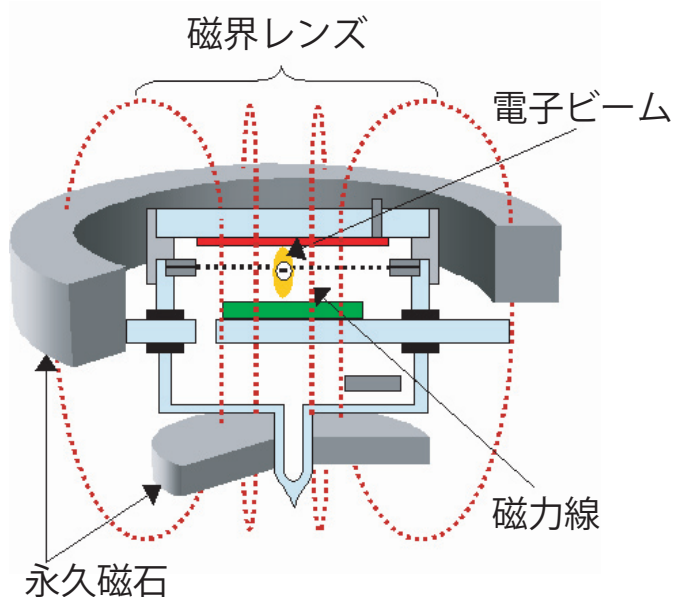


図9 磁界集束構造の模式的な構造

Fig.9 Configuration of the magnetic focusing system.

号電流と HARP 膜印加電圧との関係を図 10 に示す。これは HARP 膜の感度特性を表す。HARP 膜厚に印加する電圧を高めていくと、出力信号電流は一旦飽和した後、1.2kV 以上で急激に上昇する。これは、HARP 膜表面に発生した正孔が、HARP 膜中でアバランシェ増倍を起こしていることを示している。印加電圧が 1.5kV で増倍率は約 200 倍に達し、これにより月明りの夜のような暗がりでも鮮明な映像を撮影することが可能になる。

最後に、試作した HEED 冷陰極 HARP 撮像板の撮像例を図 11, 12 に示す。図 11 は試作 I において作製した撮像板で暗所を撮像した例である。試作 I では画素数が  $256 \times 192$  であるため解像度は不十分だが、月明かりの夜と同程度の照度である 0.3lx の暗がりでも鮮明な画像を得ることができた。これにより、アクティブ駆動回路を組み込んだ HEED 冷陰極アレイが良好に動作していることを視覚的にも確認でき、原理確認試作として満足の行く結果が得られた。図 12 は試作 II において作製した撮像板を、NTSC 規格に合わせて駆動した撮像例である。こちらは画素数が VGA であるので、十分な解像度を持った映像を標準テレビにフルサイズで映し出すことができた。これは、画素サイズ  $20 \times 20\mu\text{m}^2$ 、放出電流密度  $4\text{A}/\text{cm}^2$ 、応答速度 80ns といった高い目標を達成した結果であり、試作した

HEED 冷陰極 HARP 撮像板が実用的なレベルであることを示すものである。

#### 4. まとめ

実用的な冷陰極 HARP 撮像板の実現に向けて、アクティブ駆動型 HEED 冷陰極アレイを開発した。この HEED 冷陰極アレイと HARP 膜とを組み合わせることで HEED 冷陰極 HARP 撮像板の試作を行い、その電気特性と撮像特性を評価した。我々が開発した HEED 冷陰極 HARP 撮像板は、標準テレビ放送に用いられる NTSC 規格に合わせた駆動において、良好な撮像特性を示すことができた。今後は、撮像板のさらなる小型化を狙って、集束構造の改善と画素の一層の高精細化を行い、HEED 冷陰極 HARP 撮像板の早期実用化を目指す予定である。

#### 5. 謝辞

本研究を共同で行っている NHK 放送技術研究所の関係各位および HARP 膜を提供していただいた浜松ホトニクス株式会社の関係各位に深く感謝致します。また、本研究を行うにあたり多くの助言を頂きました東京農工大学の越田信義教授に深く感謝致します。

最後に、本研究の試作に協力いただいたパイオニアマイクロテクノロジー(株)の関係各位に感謝致します。

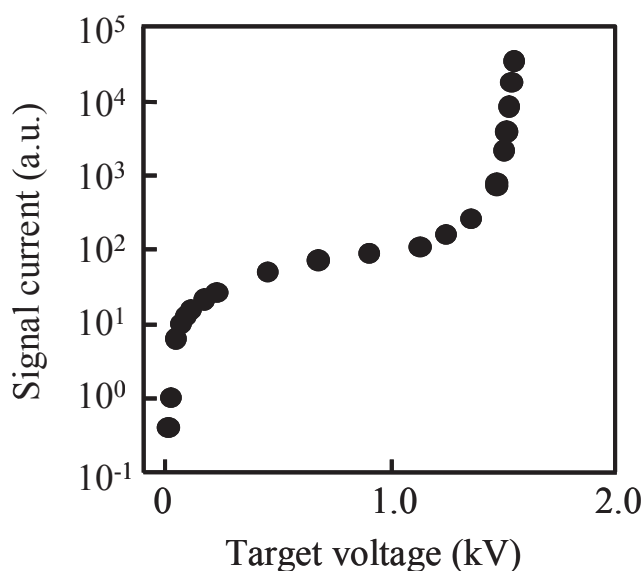


図 10 HARP 膜の感度特性

Fig.10 Target voltage dependence of output signal current.



© NHK.Sobei Amano Sogovision

© PILOTINK

図 11 試作 I での HEED 冷陰極 HARP 撮像板の撮像例

Fig.11 Photograph of detected image with the prototyped sensing system under an illumination of 0.3 lx in device I .



図 12 試作 II での HEED 冷陰極 HARP 撮像板の撮像例

Fig.12 Photograph of detected image with the prototyped sensing system in device II .



## 参考文献

- (1)N. Negishi, T. Chuman, S. Iwasaki, T. Yoshikawa, H. Ito, and K. Ogasawara, Jpn. J. Appl. Phys., Part2 36, L939 (1997).
- (2)K. Sakemura, N. Negishi, T. Yamada, H. Satoh, A. Watanabe, T. Yoshikawa, K. Ogasawara, and N. Koshida, J. Vac. Sci. Technol. B 22, 1367 (2004).
- (3) 根岸伸安, 田中亮太, 中田智成, 酒村一到, 奥田義行, 佐藤英夫, 渡辺温, 吉川高正, 小笠原清秀, パイオニア R&D, Vol.15 No.2, 42 (2005)
- (4)K. Tanioka, J. Yamazaki, K. Shidara, K. Kawamura, S. Ishioka, and Y. Takasaki, IEEE Electron Device Lett. EDL-8-9, 392 (1987).
- (5)K. Tanioka, K. Shidara, and T. Hirai, Proc. SPIE 1656, 1 (1992).
- (6)T. Yamagishi, M. Nanba, K. Osada, Y. Takiguchi, S. Okazaki, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka, and S. Itoh, Proc. SPIE 4669, 29 (2002).
- (7)Y. Takiguchi, K. Osada, M. Nanba, K. Miyakawa, S. Okazaki, T. Yamagishi, N. Egami, T. Tanioka, M. Tanaka, and S. Itoh, IEICE Trans. Electron. E85C11, 1916 (2002).
- (8)Y. Takiguchi, M. Nanba, K. Osada, T. Watabe, S. Okazaki, N. Egami, K. Tanioka, M. Tanaka, and S. Itoh, J. Vac. Sci. Technol. B 22, 1390 (2004)
- (9)N. Egami, M. Nanba, Y. Takiguchi, K. Miyakawa, T. Watabe, S. Okazaki, K. Osada, Y. Obara, M. Tanaka, and S. Itoh, J. Vac. Sci. Technol. B 23, 2056 (2005)

## 筆者紹介

### 中田 智成 (なかだ ともなり)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。入社以来、電子放出素子の開発に従事。

### 佐藤 貴伸 (さとう たかのぶ)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。入社以来、電子放出素子の開発に従事。

### 松葉 陽平 (まつば ようへい)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。入社以来、電子放出素子の開発に従事。

### 田中 亮太 (たなか りょうた)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。入社以来、電子放出素子の開発に従事。

### 酒村 一到 (さけむら かずと)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。ポリマー二次電池の開発を経て、現在は電子放出素子の開発に従事。

### 根岸 伸安 (ねぎし のぶやす)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。光磁気ディスクの開発を経て、現在は電子放出素子の開発に従事。

### 奥田 義行 (おくだ よしゆき)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。レーザーディスクプレーヤー、有機 EL 駆動系の開発を経て、現在は電子放出素子の開発に従事。

### 渡辺 温 (わたなべ あつし)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。DAT 用磁気ヘッド、青色半導体レーザの開発を経て、現在は電子放出素子の開発に従事。

### 吉川 高正 (よしかわ たかまさ)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター 高機能デバイス研究部。光磁気ディスク、電子放出素子の開発を経て、現在は高機能デバイス研究部部長。

### 小笠原 清秀 (おがさわら きよひで)

技術開発本部 総合研究所 デバイス研究センター。ハイポリマー振動膜、リボンセンダストヘッド、光磁気ディスク、電子放出素子の開発を経て、現在は HEED 担当部長。