フィールドエミッションアレイを用いた X線イメージング技術

青木 徹¹・中川雅史¹・武田匡史¹・恒川裕輝¹・長尾昌善²金丸正剛²・森井久史¹・根尾陽一郎¹・三村秀典¹¹静岡大学電子工学研究所 ☎ 432-8011 静岡県浜松市中区城北 3-5-1²産業技術総合研究所 ☎ 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1

(2008年9月3日受理)

X-ray Imaging Technology using Field Emission Array

Toru AOKI¹, Masashi NAKAGAWA¹, Masafumi TAKEDA¹, Yuki TSUNEKAWA¹, Masayoshi NAGAO²Seigo KANEMURA², Hisashi MORII¹, Yoichiro NEO¹ and Hidenori MIMURA¹¹Research Institute of Electronics, Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8011²Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

(Received September 3, 2008)

We proposed a novel CdTe X-ray image sensor, which was driven by the FEA, to obtain high spatial resolution X-ray images and have demonstrated the principle operation by using the CdTe image sensor with one pixel. We have also fabricated a FEA matrix with 12×12 pixels to obtain X-ray images. For the further improvement of spatial resolution in the CdTe image sensor, we have proposed a novel double-gated FEA with a focusing lens, which was fabricated by using the etch-back method. The double-gated FEA showed a good focusing characteristic without significant decrease of the emission current, when the height of the focus electrode was optimized. The CdTe image sensor driven by the double-gated FEA is promising for an ultra-high-resolution X-ray image sensor.

KEYWORDS : CdTe, X-ray image sensor, M- π -n structured CdTe diode, Matrix FEA, double-gated FEA

1. はじめに

X線画像はレントゲン写真やX線CTなどの医療分野、非破壊検査などの工業分野、手荷物検査などのセキュリティ関連など様々な分野で利用されている。本研究室ではCdTe素子を用いたエネルギー弁別型フォトンカウンティングX線イメージセンサ¹⁾の開発を行っており、被写体の形状を得るための透過像撮像だけでなく、厚さも認識できるX線CT画像の取得に加え、エネルギー弁別を利用した材質識別型のX線CTの研究を行っている。

一方で、X線のイメージセンサとしてはいろいろな種類があるものの、まだ、X線の持つ能力を全て利用できるまでには至っていない。X線は現在主に利用されている高い物質透過能力の他に、その非常に短い波長を生かした超高解像度イメージングの可能性、エネルギー（波長）情報を利用した透過材質識別、通常は正確な測定の障害となる散乱線を逆に活用した高精度測定、これから現実のものとなるX線自由電子レーザーによる超強力かつコヒーレントな光源を利用したX線領域での干渉を用いた新しいイメージングなど、現在使われていない様々な能力を持っている。これらをうまく利用するためにはイメージセンサが要であると言っても過言でない。

このような状況の中、現在、X線イメージセンサの高

解像度化が求められている。これは、単に微細構造を直視したいだけでなく、動物実験用の小型高解像度 X 線 CT など、これまでの高解像度の範疇を超えた超高解像度が求められている。従来の構造で高解像度化を考えた場合、これまでの 1 mm ピッチを 100 μm にする程度までであればその延長線上での開発が考えられる。この場合でもシリコンのようなプロセスが確立していない CdTe 素子の微細化や全線結線を用いている処理回路の増加と回路面積が検出素子面積を超えてしまう問題、微小容量検出器であるため浮遊容量に非常にシビアであるため ASIC までの結線方法など様々な問題点がある。さらに画素数の増加に伴い、電気特性や放射線検出特性が均一な CdTe 素子が数多く必要となる。一方で、この延長線上では例えば 1 μm ピッチといった超高解像度への対応は不可能であるが、現在のユーザーからの要求はこの範囲へ達している。これらの問題を解決するために、CdTe 素子に X 線を照射したときに発生した信号をフィールドエミッタアレイ (FEA) からの電子ビームで読み出す方法を提案した。この方法では電子ビームの照射領域が画素サイズを決め、FEA の数が画素数を決める。このため、CdTe 素子の微細化や画素毎の分離が必要なくなる。したがって、超高解像度の X 線イメージセンサが実現できると考えられる。高性能電子源の出現が新しい X 線イメージング計測の分野を切り開く可能性を秘めている。

我々はこれまでに 1 画素における試作・原理検証を行い、良好な結果を得た。さらに、12 $\times$ 12 画素における画像取得に向けて集束電極を有するマトリクス駆動 FEA の作製を行っている。

また、X 線画像の高解像度化のためには電子ビームの広がりを抑制する必要がある。そこで我々は、電子ビームの集束機能を FEA に搭載した新型のダブルゲート構造 FEA を試作した。この FEA で、従来のダブルゲート

構造 FEA で問題となっている放射電流の減少を抑制し、かつ電子ビームを集束可能であることを確認した。

本報告では 1 画素における原理検証と 12 $\times$ 12 画素の集束電極を有するマトリクス駆動 FEA の試作結果およびイメージング結果、そしてダブルゲート構造 FEA の作製と放射電流特性および集束動作特性について詳述する。

2. 動作原理

FEA 駆動 CdTe-X 線イメージセンサの動作原理を Fig. 1 に示す。CdTe 素子、メッシュ電極およびマトリクス駆動 FEA から構成される。CdTe 素子に X 線を照射すると、入射フォトンの数やエネルギーに比例した電子・正孔対が発生する。CdTe 素子の内部電界により、正孔は電子ビーム走査側へ蓄積され、正孔パターンが形成される。一方で、マトリクス駆動 FEA に走査信号を入力することで、それに対応する各画素から順次、電子ビームが放射される。この電子ビームは、高電圧を印加したメッシュ電極によって加速され、CdTe 素子の電子ビーム入射面に到達する。そして、FEA から放射された電子と CdTe 素子に蓄積された正孔が結合したとき、外部回路に流れる電流を出力信号として取り出すことで、入

Fig. 2. Emission properties of FEA.

Fig. 1. (color online). Principle of CdTe X-ray image sensor driven by FEA.

Fig. 3. (color online). Diode properties of CdTe detector.

射フォトン数やエネルギーに対応した画像信号が得られる。

2.1 画素における試作・原理検証

2.1.1 各素子の特性

第1段階として、FEAにはカーボン基板を H_2 ガス雰囲気中でスパッタリングすることで作製できるグラファイトナノニードルエミッタ²⁾を用いた。このFEAの放射電流特性をFig. 2に示す。電界放射により電界強度 $13\text{ V}/\mu\text{m}$ で約 $10\text{ }\mu\text{A}$ 程度の放射電流が得られた。

Fig. 4. (color online). Measurement system for one pixel detector.

Fig. 5. (color online). X-ray response properties of CdTe detector with gold electrode.

Fig. 6. (color online). X-ray response properties of CdTe detector with Sb_2S_3 film.

CdTe 素子には、エキシマレーザードーピング法³⁾を用いてサイズ $2\times 2\times 0.5\text{ mm}^3$ に作製したM- π -n型CdTeダイオードを用いた。そのダイオード特性をFig. 3に示す。逆バイアス 200 V を印加したとき、逆方向電流は 400 pA 程度であり、良好なダイオード特性が得られた。

2.2 原理検証

1画素における原理検証の測定系をFig. 4に示す。真空度 10^{-6} Pa 程度の真空チャンバー内にCdTe素子、メッシュ電極、FEAを設置した。ビューポートを透過したX線はCdTe素子に照射される。このときに発生した信号を電子ビームで読み出した。

1画素におけるX線応答特性をFig. 5に示す。アノード電圧 50 V 付近で信号電流 0.5 nA を得た。X線照射による電流増加を確認した。しかし、アノード電圧 50 V 付近で信号電流が正から負へ反転した。これは電子の入射エネルギーが 50 V 付近で、電子ビーム入射面に用いたAuの二次電子放出比が 1.0 以上になったことが原因であると考えられる。この問題を解決するために、二次電子放出比が小さい Sb_2S_3 を電子ビーム入射面に用いて測定を行った結果、アノード電圧 200 V で信号電流 2.2 nA を得た。そのときのX線応答特性をFig. 6に示す。この結果から電荷収集効率が向上し、信号電流の増加が見られた。以上の結果から、1画素における動作を確認できた。

3. 12×12 画素における試作

試作した 12×12 画素の集束電極付マトリクス駆動FEAをFig. 7に示す。作製方法は反応性イオンエッチング(RIE)とエッチバック法⁴⁾を用いた。ガラス基板上にスパッタにより堆積したアモルファスシリコン(a-Si)をコーン形状のエミッタにRIEによりエッチングし、Arイオンエッチングと CHF_3 によるRIEを用いて室温でエミッタの先鋭化を行った⁵⁾。また、エミッタには低電圧駆動、長寿命を実現するために炭化ハフニウム(HfC)を被覆している⁶⁾。集束電極付マトリクス駆動FEAの主な仕様をTable 1に示す。

また、このエミッタからの電子放出特性の一例をFig. 8に示すが、良好な電子放出特性が観察された。しかし、現状では全ピクセルが十分に動作するには至っておらず、今回はそのうちの一部の動作点を用いたX線イメージングを試みた。Fig. 9にその測定系を示す。 $0.5\sim 1.5\text{ mm}$ まで厚みを変えた銅板を透過したX線像を撮像した。Fig. 10にX線管電圧を変化した場合の出力電流を示す。高压部分で飽和している傾向が見られるがここではエミッション電流がX線でCdTe内で発生する電荷に対して不足していると考えられる。また、今回は1次

Fig. 7. (color online). Pictures of matrix FEA with focus electrodes (a) Overall, (b) 1 pixel SEM image, and (c) 1 tip SEM image.

Table 1. Specification lists of matrix FEA with focus electrodes.

Number of pixels	12×12
Size	$13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$
Pixel pitch	0.9 mm
Area of FEA	$150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$
Number of emitter in a pixel	750 tips/pixel

Fig. 8. (color online). Typical electron emission properties of matrix FEA.

Fig. 9. (color online). Schematic diagram of measurement system for matrix FEA imager.

Fig. 10. (color online). Output current properties as a function of X-ray source tube voltage.

Fig. 11. (color online). Output current as a function of Cu plate thickness in X-ray penetration imaging.

元のイメージングとなったため画像は省略するが、銅板の厚みに対する出力電流を Fig. 11 に示す。点数が少ないため傾向を示すに過ぎないが銅板の厚みに逆比例した電流を観察することができた。

4. ダブルゲート構造 FEA について

X 線画像の高解像度化のためには電子ビームの広がり抑制する必要がある。その方法として、① FEA エリアの縮小、② CdTe 素子と FEA 間の距離を縮小すること、③ 永久磁石による磁界集束系を組み込むこと、④ 静電レンズによる電界集束系を組み込むこと等があげられる。①は FEA の放射電流量の低下を招き、②は発生したガスの拡散を妨げ、③はイメージセンサの拡大等の弊害を伴う。我々は FEA に静電レンズとなる集束電極を搭載し、電子ビーム集束機能を有するダブルゲート構造 FEA の研究を行っている。ダブルゲート構造 FEA を用いてビーム径の縮小化および高解像度化を図ることを提案する。

従来のリフトオフ法で作製されたダブルゲート構造 FEA は優れた集束動作特性を有しているが、集束動作に伴って放射電流量が減少する問題があった⁷⁾。そこでエッチバック法を用いることを提案した。これにより集束電極の高さを容易に制御できる構造とし、集束電極とゲート・ティップ間隔を変化させることで集束動作に伴う放射電流量減少の改善を試みた。この節ではエッチバック法によるダブルゲート構造 FEA の作製と放射電流特性および集束動作特性について詳述する。

4.1 ダブルゲート構造 FEA の作製

作製したダブルゲート構造 FEA を Fig. 12 に示す。エミッタに HfC を被覆し、エッチバック法を用いてそれぞれ異なった集束電極の高さを有する FEA を作製した。エッチバック法では、エッチバックの時間を変化させることで容易に集束電極の高さを制御することができる。エッチバック時間を 12 min, 21 min として集束電極の高さの異なる二種類のサンプルを作製した。集束電極が

Fig. 12. Cross sectional SEM images of double gates FEA (a) sample (A) : etch-back time 12 min, (b) sample (B) : etch back tie 21 min.

ゲート電極より 220 nm 高いサンプルをサンプル (A)、集束電極とゲート電極が同じ高さのサンプルをサンプル (B) とする。作製プロセスの関係上、FEA として同時に動作させるエミッタチップ数がことなり、サンプル (A) で 37 チップ、サンプル (B) で 21 チップである。必要に応じて図中に明示した。

4.2 放射電流特性および集束動作時の放射特性

Fig. 13 にサンプル (A) とサンプル (B) の放射電流特性を示す。ゲート電圧とフォーカス電圧を同電位とし、アノード電圧を 1 kV に設定して測定した。サンプル (A)、サンプル (B) 共に 20 V 付近から電界放射が始まり、60 V 付近では数 μA の放射電流が得られた。この結果より、二つのサンプルは優れた電界放射特性を有していることが確認できた。同時動作チップ数は前述の通りでサンプル (A) で 37 チップ、サンプル (B) で 21 チップであるが、図中に示した。

Fig. 14 にサンプル (A) とサンプル (B) の集束動作

Fig. 13. Emission current properties of double gates FEA.

Fig. 14. Emission-current properties of double gates FEA in focus operation.

時の放射特性を示す。ゲート電圧を 60 V に固定し、フォーカス電圧を 60 V から 0 V まで変化させてアノード電流を測定したところ、フォーカス電圧の低下に伴い、アノード電流は減少した。しかし、サンプル (B) はサンプル (A) よりも電流量の減少が緩やかであることが確認できた。これは、集束電極の高さを低くすることで、集束動作に伴って起こるエミッタ先端に印加される電界強度の減少が抑制されたと考えられる。この結果より、集束電極の高さを低くすることで、放射電流量減少を改善できる傾向が見られた。

5. ま と め

FEA 駆動 CdTe-X 線イメージセンサの実現に向けて、1 画素における原理検証で良好な結果を得た。そして、 12×12 画素の画像取得を行うために集束電極付マトリクス駆動 FEA の試作を行い一次元イメージングを試みた。また、さらなる高解像度化を図るために、ダブルゲート構造 FEA を用いることを提案した。エッチバック法で集束電極の高さが異なるダブルゲート構造 FEA を作製し、それらの集束動作特性から集束電極の高さを低くすることで集束動作に伴う放射電流量減少を改善できる傾向が見られた。これらの結果から、ダブルゲート構造 FEA を用いた FEA 駆動 CdTe-X 線イメージセンサが

実現できると考えられる。

今後は、試作した集束電極付マトリクス駆動 FEA を用いて 12×12 画素の二次元イメージングを行うとともに、集束電極がゲート電極より低いダブルゲート構造 FEA を作製し、集束動作に伴う放射電流量のさらなる改善を試みたいと考えている。

文 献

- 1) T. Aoki, Y. Ishida, Y. Makino, G. Ohashi, Y. Tomita, H. Morii, J. Temmyo and Y. Hatanaka : Proc. IDW/AD'05, 2061-2064 (2005).
- 2) Y. Neo, H. Mimura and T. Matsumoto : Appl. Phys. Lett. **88**, 073511 (2006).
- 3) Y. Hatanaka, M. Niraula and T. Aoki : Appl. Surf. Sci. **175/176**, 462 (2001).
- 4) G. Hashiguchi, H. Mimura and H. Fujita : Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L883 (1995).
- 5) M. Nagao, Y. Sacho, T. Sato, T. Matsukawa, S. Kanemaru and J. Itoh : Jpn. J. Appl. Phys. Part 1 **43**, 3919 (2004).
- 6) T. Sato, S. Yamamoto, M. Nagao, T. Matsukawa, S. Kanamaru and J. Itoh : J. Vac. Sci. Technol. **B24** 1589 (2002).
- 7) J. Itoh, Y. Tohma, K. Morikawa, S. Kanemaru and K. Shimizu : J. Vac. Sci. Technol. **B13**, 1963 (1995).