

微小真空冷陰極アレイを用いた高い放射線耐性を持つ小型軽量撮像素子の開発

受託者 国立大学法人京都大学
研究代表者 後藤 康仁 大学院工学研究科
再委託先 独立行政法人産業技術総合研究所、国立大学法人静岡大学、
独立行政法人国立高等専門学校機構木更津工業高等専門学校
研究開発期間 平成25年度～27年度

1. 研究開発の背景とねらい

東日本大震災における福島第一発電所の事故以来、高い放射線耐性を持つ撮像素子開発の要求は従来以上に高まった。通常の監視以外に、事故時の高い線量率の下で機能する撮像素子や、ロボットの目となる小型、軽量の撮像素子が必要とされている。現在主流のMOS型撮像素子の耐放射線性も向上してきているが、本質的に異なる動作原理の撮像素子の開発が必要と考えられる。

本事業では、原子力発電所や宇宙空間などで利用できる高い放射線耐性を持つ小型で軽量の新しい撮像素子の基本的な原理検証を行うことを目的としている。放射線耐性の高い従来の撮像素子の利点を生かしつつ、熱陰極の代わりに微小真空冷陰極アレイを用いることで、高い放射線耐性を維持した上で、省電力、小型、軽量の撮像素子を実現しようとするものである。図1に素子の構造の基本的な概略図を示す。撮像素子は、光信号を電気信号に変換する光電変換膜と、光電変換膜に蓄積された電荷を読み出すための電子ビームを供給する微小真空冷陰極アレイ(FEA)、および電子線の加速を行うためのグリッドからなる。FEAは、小さな領域ごとに区切られており(画素)、各画素の中には電子放出する複数のエミッタと電子放出に必要な電界を与えるゲートが形成されている。各画素に相当する電子源を順に駆動すること(マトリクス駆動)により、電子線を偏向することなく光電変換膜上の電荷分布を読み出すことができる。単一電子ビームを偏向した従来の撮像素子では、偏向のために距離が必要であったため、素子自身が大型になるとともに、熱陰極の加熱電流、偏向コイルの電流など消費電力も大きかった。今回の撮像素子は、陰極表面に強電界を印加してトンネル効果による電子放出を生じさせるもので、小型にできる上に電力効率も良いことが期待される。したがって、ロボット搭載カメラとしても期待できる。

この撮像素子の基本的な構造は高感度撮像素子としてすでに検討がなされてきたもの⁽¹⁾であるが、各画素に配置した電子線の発散などによる像の分解能確保の難しさなどの問題が残されている。本事業では、これらの問題に対応するとともに、耐放射線という観点で材料を含めて検討し、新しい撮像素子の開発を試みるものである。したがって、本事業で実施する研究開発業務は、FEAおよび耐放射線特性のよい光電変換材料を用いた撮像素子を構成して撮像素子としての基本的な動作を確認すること、また実際にその撮像素子の放射線耐性を確認することの2点である。

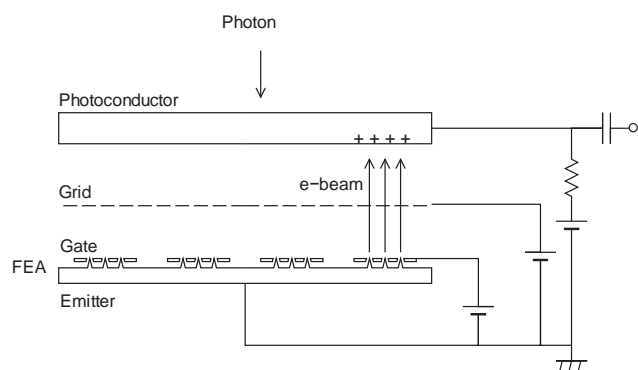


図1. FEAを用いた小型軽量撮像素子の構成例

2. 研究開発成果

2. 1. 集束電極一体型マトリックス駆動 FEA 開発と撮像素子構成

本課題で作製する FEA の最終的な画素のサイズは $50\ \mu\text{m}$ である。平成 26 年度までに $100\ \mu\text{m}$ サイズの画素を持つものを作製し、作製上の問題点の抽出や電子ビームの基本的な特性（電流量やビーム広がり）の評価などを行っている。電界放射型の電子源を利用すると、電子ビームが発散性を有することから取得画像の分解能が低下する恐れがある。一般に FEA から放出された電子ビームの集束には減速型の静電レンズを利用することが多いが、この場合、エミッタ先端の電界強度が低下するという問題があった⁽¹⁾。このため、エミッタ先端の電界強度を低下させない静電レンズの設計が必要となる。また、画素あたりの電子電流量を確保するためには、画素にエミッタをできるだけ多く配置する必要がある、このため鋭い頂角のエミッタが必要となる。エミッタ形状は現状の作製プロセスでは金属材料に依存するため、6 種類の金属材料を検討し、ニッケル (Ni) が最も高いアスペクト比を示すことを明らかにした。また、エミッタ先端電界強度を低下させにくい構造⁽²⁾の FEA として図 2 に示すような構造の FEA を作製した。十分小さな先端曲率を持つエミッタが形成できている。集束電極がゲートよりも低い位置にあるため、エミッタ付近の電界への影響を抑えることができ、かつ引き出された電子ビームを集束させることができる。図 3 に、作製した FEA の電流電圧特性の例を示す。100 ティップの FEA で最大 $10\ \mu\text{A}$ のアノード電流が得られている。100 ティップ FEA はおよそ $30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$ の領域に形成されていることから $50\ \mu\text{m}$ 画素の FEA においても $1\ \mu\text{A}$ 以上の電流が得られるものと期待される。

上記のように、電子ビーム集束によるエミッタ先端の電界低減を抑えるためには、集束電極、ゲートとエミッタの構造の最適化が必要である。このための計算機シミュレーションも実施している。エミッタ先端付近の電界強度の算定は一般に難しいが、本事業では数値計算と解析解を組み合わせた手法を用いてエミッタ付近の電界強度分布を精度良く計算することができた。図 4 に、計算機シミュレーションにより得られた等電位線、電子の軌道を示す。

光電変換膜としては $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{CdTe}/\text{CdS}$ 構造を検討している。 CdTe は太陽電池やエックス線検出器など、光電変換材料として知られている⁽³⁾。可視光検出のために必要な CdTe/CdS の膜厚についてはすでに検討を完了しており、現在、 CdTe/CdS 二層膜の作製条件の最適化、成膜分布の均一性確保を行っている。また、電子ビーム入射面の Sb_2S_3 薄膜では、膜表面を粗くして二次電子放出比

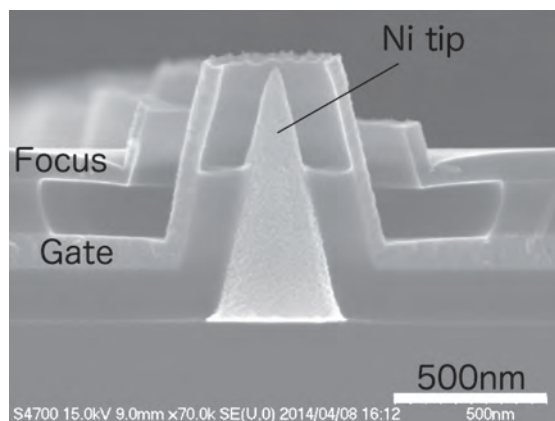


図 2. ゲート電極一体型 FEA の SEM 像

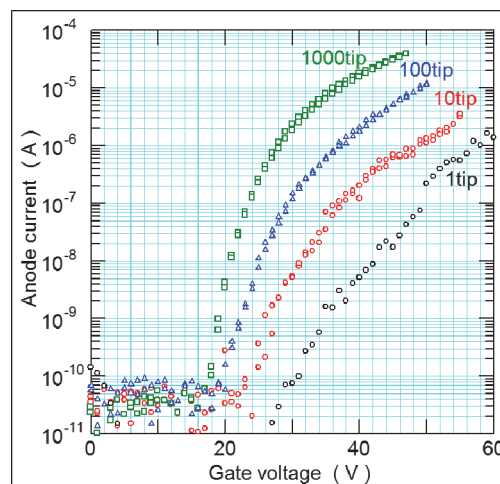


図 3. 作製した FEA の電流電圧特性

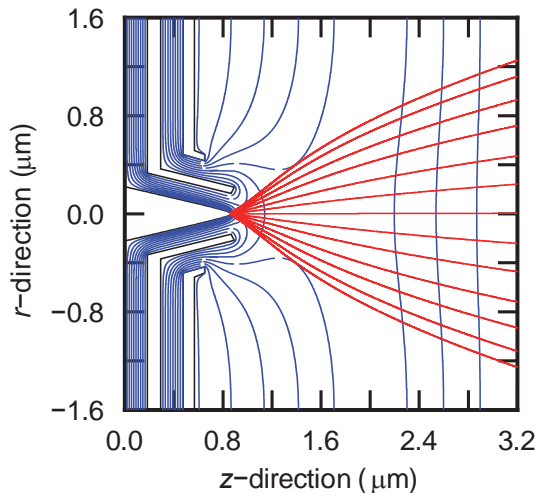


図 4. FEA から放出される電子の軌道

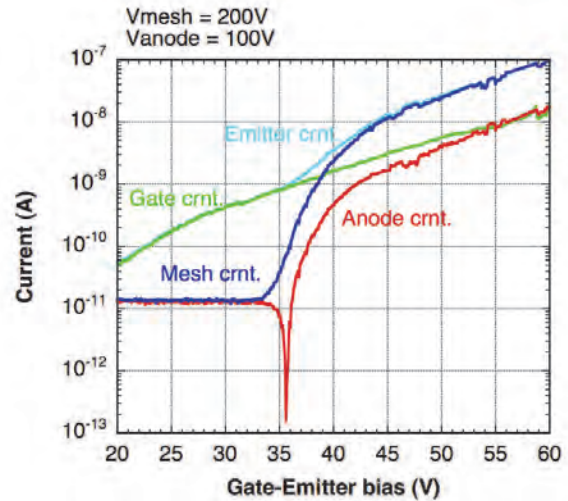


図 5. 撮像素子構成における各電極の電流

が 1 未満になるようにしなくてはならない。40 Pa のアルゴンガス中蒸着法を用いることで、空隙率の高い薄膜を形成することができた。

FEA を用いた撮像素子の原理検証のため、FEA と光電変換膜を組み合わせて光電面に蓄積された電荷分布を電子ビームで読み出すための装置を作製した。実際に FEA から電子ビームを放出させ、光電面に到達する電流を評価するなど、撮像素子としての基本的な特性の評価が可能かどうかを検証している。図 5 に、撮像素子の構成でメッシュに 200 V、アノードに 100 V を印加したときの動作特性を示す。アノードは高真空中で成膜した滑らかな表面を持つ Sb_2S_3 膜である。35 V 弱程度から電子放出し、メッシュとアノードに電流が流れている。ただし、アノード電流は電子放出後すぐに極性が反転している（図は対数目盛なので、電流の絶対値）。これは、アノード電圧が高く、二次電子放出比が 1 を超えたためと考えられる。アノード電圧を低くしたときにはこのような極性の反転は見られなかった。このような現象が見られることは、構成した素子が撮像素子としての動作を行っていることを示すものである。

2. 2. 構成要素の放射線耐性

FEA や光電変換膜の放射線耐性については、ヘリウムや水素などのイオン照射による特性の変化やガンマ線照射に伴う特性の変化などを調べている。FEA の放射線耐性の良し悪しは、エミッタ・ゲート間の絶縁体の放射線耐性で決まると考えられるため、FEA を模擬した試料や FEA を作製し、イオンビームやガンマ線照射前後の絶縁特性の変化を評価した。図 6 に Mo FEA のガンマ線照射前後のアノード電流およびゲート電流測定結果を示す。コバルト 60 ガンマ線照射装置により 80 kGy 程度のガンマ線を照射した。本来真空中に設置する FEA を大気中において照射したため FEA 表面にガンマ線

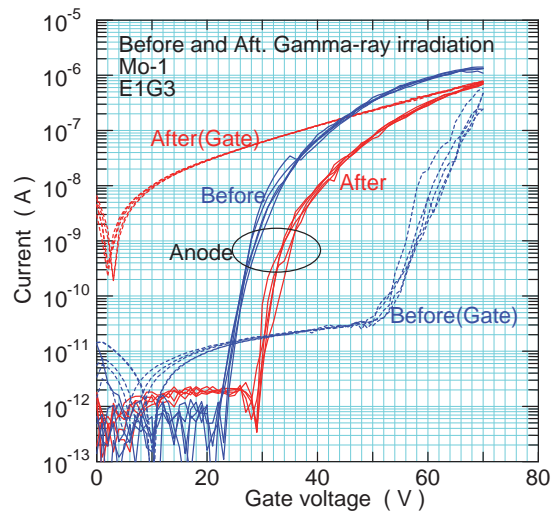


図 6. ガンマ線照射した Mo FEA の各電極の電流電圧特性

により活性化した気体分子などと FEA を保持して
た材料の反応などで生成したと考えられる付着物
があった。特性の劣化はこの付着物が原因と考え
ている。実際の撮像素子とした場合には、FEA は
真空内に置かれるため、このような現象は起きな
いと考えている。

光電変換材料である CdTe/CdS については、ガン
マ線照射前後における光起電力特性の比較を行っ
た。特性の変化を図 7 に示す。赤線が照射前、青
線がガンマ線 200 kGy 照射後の特性である。若干
の電流の低下が見られた。電流の低下の主な原因
は基板であるガラスの着色による、CdTe への入射
光量の低下と考えている。

撮像素子の放射線耐性は、放射線照射後に動作を確認するだけでなく、放射線照射の最中にもその動作が担保されなくてはならない。このため、MeV 領域の電子線・エックス線を照射しながらデバイス特性を評価することのできる真空装置を導入し、現在照射実験の準備を進めている。

3. 今後の展望

FEA の試作については順調に進んでおり、今後の計算機シミュレーション結果を考慮した電極構造設計をすることで、必要な電流量を確保した上で電子ビームの発散を抑制することができるものと考えている。今後、FEA から放出した電子ビームによる光電変換膜の光信号読み出しを試み、小型撮像素子の動作検証を行う。また、放射線耐性については、光電変換膜や電子源の主要な部分の放射線耐性は得られると考えており、素子全体としても高い放射線耐性を持つものと考えている。

最後に、本事業により、十分な放射線耐性を持つ小型撮像素子の動作検証が行われれば、福島第一原子力発電所の格納容器内へ導入する撮像素子開発の期待が高まる。具体的な撮像素子の実現には素子の真空封止や FEA の駆動回路などの開発が必要であるが、既存技術などを活用することによりこれらをクリアできるものと考えている。

4. 参考文献

- (1) Honda, Y., et al., “Electrostatic focusing Spindt-Type Field Emitter Array for Image Sensor with a High Gain Avalanche Rushing Amorphous Photoconductor Target”, J. Vac. Sci. Technol. B, 29, 04E104 (2011).
- (2) Nagao, M. et al., “Fabrication of a field emitter array with a built-in einzel lens”, Jpn. J. Appl. Phys. 48, 06FK02 (2009).
- (3) Okamoto, T., “Current status and future prospects of CdTe solar cells”, J. Jpn. Inst. Energy, 91, 356 (2012).

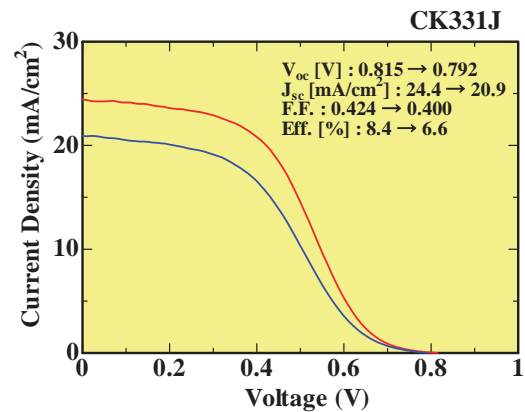


図 7. ガンマ線照射前後の CdTe/CdS
二層構造の光起電力特性