

微小真空冷陰極アレイを用いた高い放射線耐性をもつ 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

(研究期間) 平成 25 年度～27 年度

1. 研究の背景とねらい

福島第一原子力発電所の廃炉を進めるにあたっては、圧力容器内の観察が必要であり、このためには高い耐放射線性を持つカメラが必要とされている。半導体を利用した CMOS や CCD といったカメラでは高い線量に耐えることができず、このような場では真空管式の撮像管に頼らざるを得ない。しかしながら、撮像管は電子ビーム走査の空間として長い距離を必要とするため大型で、かつ熱フィラメントやコイルを持つため消費電力も大きい。事故の起きた炉内の観察などでは、ロボットに搭載するごく小さなカメラが望まれており、CMOS や CCD のような形態の耐放射線カメラが必要である。本研究課題では、従来の撮像管の熱電子銃を電界放出電子源アレイ (以下 FEA) に置き換えた新しい耐放射線カメラを実現するための基本技術を確立するとともに、構成要素の耐放射線性能を確認することを目的としている。基本技術としては、FEA の一画素の小型化とそこから放出される電子ビームの集束と電流量の確保、光電変換膜による光電変換の確認とその電子ビーム読み出しである。平成 26 年度は、一画素 $100\ \mu\text{m}$ の FEA の試作を目指した。またその際、良好な集束特性を得るための電極構造を計算機シミュレーションにより調べた。光信号検出のために二次電子放出比制御膜である硫化アンチモン Sb_2S_3 薄膜の形成条件を明らかにするとともに、FEA からの放出電子と組み合わせて光信号を読み出すことを試みた。また、FEA および光電変換膜の CdTe/CdS ダイオードの耐放射線特性を、ガンマ線照射により確認した。

2. これまでの研究成果

2.1 一画素 $100\ \mu\text{m}$ の FEA の試作とその特性評価

一画素の大きさが $100\ \mu\text{m}$ であるフォーカス電極 (以下フォーカス) 付きスピント型 FEA を試作した。これまでの研究により、フォーカスがゲートより低い位置にあるとフォーカス電位印加時でもエミッタ先端の電界強度をあまり低下させないことが明らかとなっている。このような構造を形成するために、フォトリソをコーン形成の犠牲層とする新しいスピントプロセスを開発した⁽¹⁾。エミッタコーン形成後は、従来のエッチバック手法を用いてゲートおよびフォーカスを形成した。作製した二重ゲート付きの Ni-FEA の走査電子顕微鏡写真を図 1 に示す。

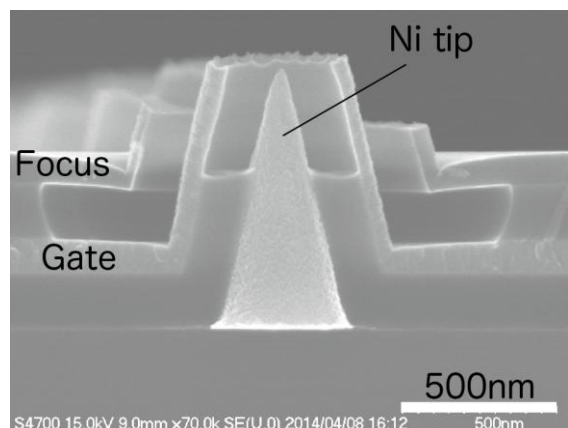


図 1. 作製した FEA のエミッタティップ一つの断面を走査電子顕微鏡で観察したもの。

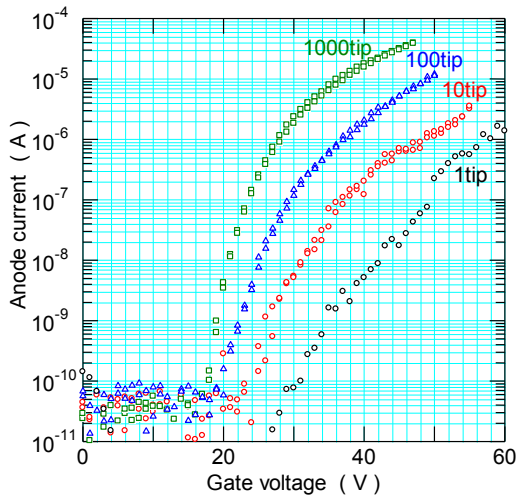


図 2. 作製した FEA を 3 極管構造としたときの電流電圧特性の例。

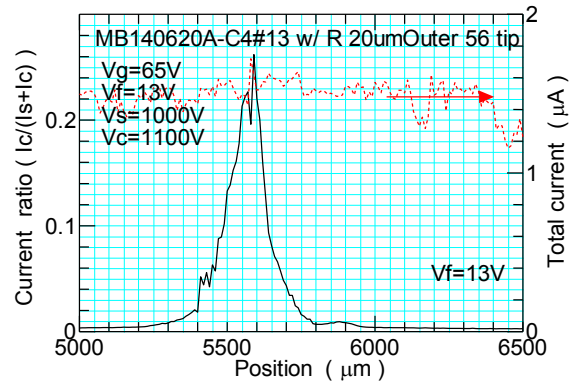


図 3. 作製した FEA から放出された電子ビームのビームプロファイルの例。

作製した FEA にアノードを設置して、3 極管構造としたものを用いて電流電圧特性を測定した結果を図 2 示す。エミッタチップ数の異なるものを作製したところ、いずれも最大電流は $1\mu\text{A}$ を超え、撮像素子に必要な電流量は確保できることが明らかとなった。図 3 には 56 tip の FEA から放出された電子ビームのビームプロファイル(電流密度分布)を示す。この状態では、ビーム径が依然として画素の大きさよりやや広い状態である。

このため、計算機シミュレーションを行って、ゲート、フォーカスの電極構造がビーム軌道に与える影響を検討した。電位分布は差分法で求めた。差分法で電極構造を再現しにくいエミッタ先端付近を双曲面近似する座標系の解析解と合わせて解析することでエミッタ表面上の電界分布を再現することができた⁽²⁾。これにより、FEA からわずかに離れた仮想アノード位置におけるビーム径の評価を行った。図 4 に軌道計算で得られた電流密度とビーム径を示す。複数あるプロットはフォーカス電位の違いである。ゲート長さ、フォーカス径に関わらず、プロットは右下がりフォーカス電位印加時のエミッタ先端の電界低下が少なく、電流量を維持して電子ビームが集束

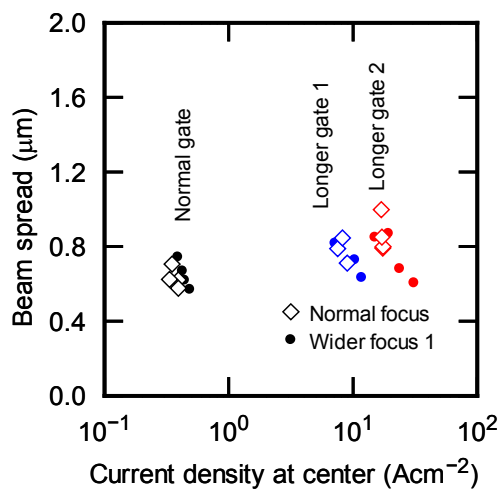


図 4. 計算機シミュレーションにより求めたビーム径と中心での電流密度。

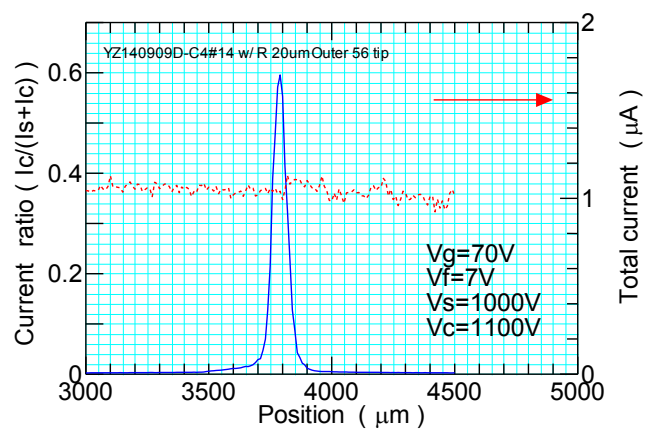


図 5. 改良したプロセスにより作製した FEA のビームプロファイル。

できることが明らかとなった。

これらの結果をもとに FEA の二次試作を行った。エミッタ材料を Mo とし、ゲートの開口径の均一性確保、フォーカス開口径の独立制御などを行った。その結果得られたビームプロファイルの例を図 5 に示す。ビーム径として $70\ \mu\text{m}$ の値が得られた。

2.2 FEA を用いた撮像素子の動作原理検証

光電変換膜上に形成された光信号を電子ビームで読みだすためには、光電変換膜に電子ビームが入射したときの二次電子放出比を 1 以下に抑える必要がある。このためには、表面に複雑な構造を形成することが必要となる。 Sb_2S_3 を $80\ \text{Pa}$ の Ar 雰囲気中で蒸着することで、複雑な表面構造を有する二次電子放出比制御薄膜を形成することができた。図 6 にこの膜の SEM 像を示す。この膜にエネルギーの異なる電子ビームを入射すると、電子ビームのエネルギーの増加に伴い徐々に電流が増加しその後一定の値となった。このことは、二次電子放出を抑制していることを示している。この Sb_2S_3 膜を光電変換膜として実際に FEA から放出される電子ビームを用いて光信号検出の実験を行った。FEA と光電変換膜の間にグリッドを設けて撮像素子を構成し、光電変換膜に光を入射したとき、入射しないときの信号を比較した。図 7 に結果を示す。光信号のオン・オフに対応してアノード電流が変化している。

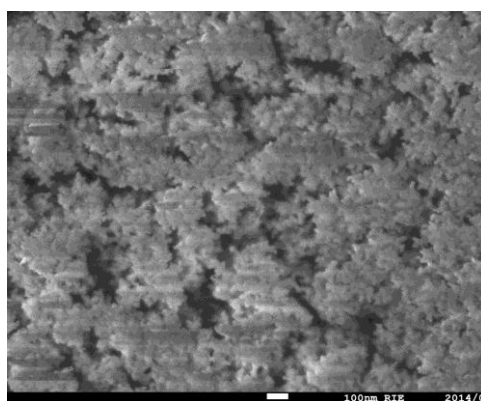


図 6. $80\ \text{Pa}$ の Ar ガス中で蒸着した Sb_2S_3 薄膜表面の SEM 像。

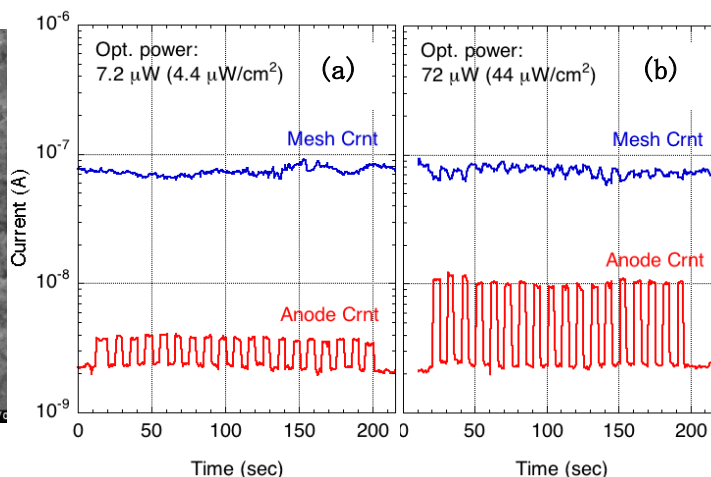


図 7. 光照射に伴うアノード電流の変化。(a) $7.2\ \mu\text{W}$ 、(b) $72\ \mu\text{W}$

2.3 FEA および光電変換膜の耐放射線性評価

以上のように作製した FEA および光電変換膜のガンマ線照射による性能変化を評価した。ガンマ線照射は、京都大学原子炉実験所のコバルト 60 ガンマ線照射装置を用いて行った。予備的な照射を行った結果、FEA 表面に、大気中におけるガンマ線励起化学反応の結果生成したと考えられる付着物があつたので、FEA についてはガラス管状の真空容器内に FEA を設置して照射を行った。図 8 に $125\ \text{kGy}$ ガンマ線照射した FEA とガンマ照射していない FEA の電流電圧特性の差を示す。いずれも 3 極管構成で測定を行った。特性はガンマ線照射の有無で大きく変化しておらず、この吸収線量の範囲では劣化は見られない。また図 9 に光電変換膜であるサブストレート型 CdTe/CdS ダイオードの電流電圧特性を示す。サブストレート型はガラス面を設けず、ダイオードに直接光

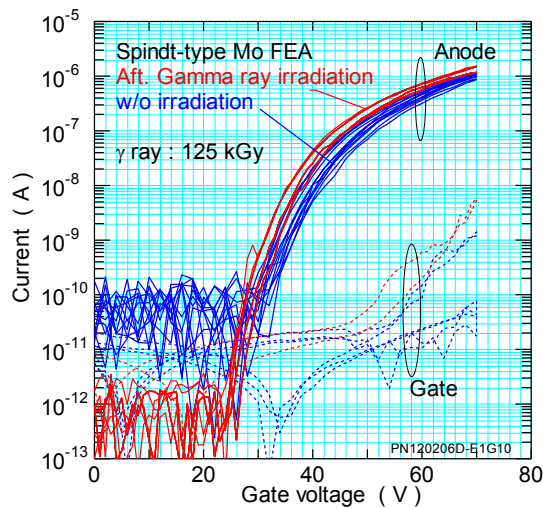


図 8. ガンマ線照射有無による FEA の電子放出特性の差異。

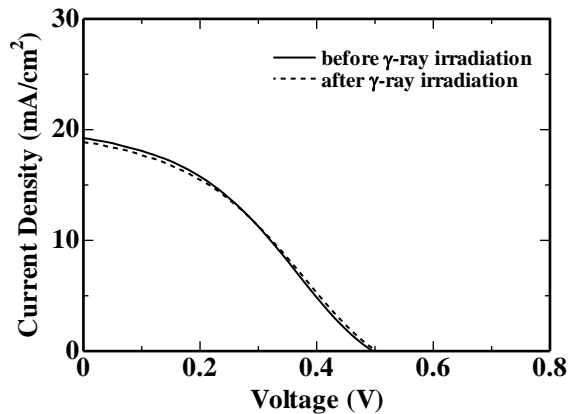


図 9. ガンマ線照射前後の CdTe/CdS ダイオードの電流電圧特性。

を入射させることのできる構造のもので、75 kGy のガンマ線照射に対して、解放電圧、短絡電流ともにほぼ変化がないことがわかる。

2.4 放射線照射下の素子特性評価装置

放射線照射場の中で機能するカメラとするためには、放射線照射下にあっても光信号を取得できることを検証しなくてはならない。京都大学放射実験室に設置されている電子線加速器に真空容器を接続し、電子線ないしは制動放射などで生成した高エネルギー엑스線を照射しながら FEA の動作特性を評価する装置を準備している。現在までに真空装置が FEA を動作させる圧力まで真空排気できること、実際に FEA からの電子放出が真空装置内で可能なこと、電子線加速器との接続も問題ないことなどを確認した。

3. 今後の展望

平成 26 年度までに得られた研究成果から、電界放出電子源アレイや光電変換膜のガンマ線に対する劣化はほとんど見られず、当初目標の吸収線量 1 MGy においても素子の性能を確保することは可能と見込まれる。今後は実際に 1 MGy の吸収線量までガンマ線照射を行い、これらの素子の性能の著しい劣化が見られないことを確認する。また、照射下における電流電圧特性の評価など、実際の放射線照射下における性能の確保に関する検討も行っていく予定である。

4. 参考文献

- (1) Nagao, M., “Fabrication and Emission Characteristics of Ni and Mo Spindt-type FEAs with Volcano-Structured Focusing Electrode”, Proc. 21st Int. Display Workshops (IDW’ 14), Niigata, Dec. 3-5, 2014, p.588
- (2) Gotoh, Y., Tsuji, H., Nagao, M., “Computer Simulation of Electron Beam Trajectories in Double-Gated Spindt-type FEAs”, Proc. 21st Int. Display Workshops (IDW’ 14), Niigata, Dec. 3-5, 2014, p.591