

論文の内容の要旨

論文題目 Development of a novel two-dimensional position-sensitive gaseous radiation detector using a glass substrate

(ガラス基板を用いた新しい二次元位置敏感型気体放射線検出器の開発)

氏名 三津谷 有貴

1. 序論

1.1 研究の背景

放射線イメージングは様々な学術分野で必要であり、また医療分野では体内検査や、産業分野でも非破壊検査等で大きな役割を果たしている。そして近年ではより大面積・高精細な検出器が求められている。検出器としては従来からイメージングプレートが長く使われてきたが、現在はリアルタイム性を持つフラットパネル検出器の需要が高い。しかし固体検出器であるフラットパネルでは放射線損傷ゆえに重粒子に対応できず、また中性子を高い検出効率で捉えられない。加えて低い信号レベルである低エネルギーX線などでは精細な画像が得られないという問題がある。よって、これらの放射線に対しても高いイメージング性能を持つ検出器が求められているが、これは気体を検出媒体とするガス検出器によって実現可能である。

ガス検出器は、低コストに大きな有感領域で作製することが容易で、また高い信号増幅率によってエネルギー付与の小さな放射線にも高いSN比を得られる。近年では基板に微細な電極を形成するマイクロパターンガス検出器 (Micro Pattern Gas Detector, MPGD) の開発が盛んである。MPGDは微細構造ゆえに高い位置分解能を有し、また検出媒体の放射線損傷が無い。加えて、目的に合わせた気体やコンバーターを用いれば柔軟に様々な種類の放射線を捉えられる。

GEMは最も広く使用されているMPGDのひとつである (図1)¹⁾。GEMは50 μm の薄い絶縁体ホイルの両面に電極を形成したもので、直径70 μm ほどの無数の孔を持つ。電極間に電位差を与えると孔内に強電場が生じ、各孔が独立して電子雪崩を生じさせ信号を増幅する (図2)。また増幅機構のみを持つため、他のMPGDの前段増幅に使用することや、また任意の読み出しと組み合わせ等、検出器設計の自由度が高い。またGEMは大面積性と高い位置分解能を有する検出器として、高エネルギー物理学のみならず応用の幅が広い。

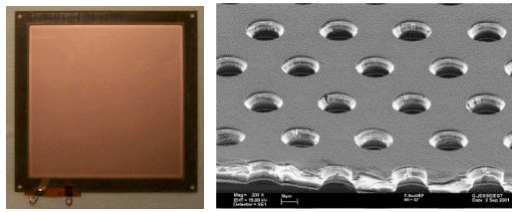


図1 GEM 外観, 拡大図の写真²⁾

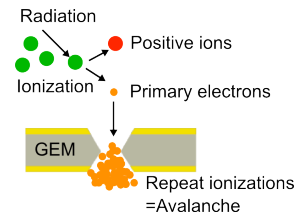


図2 GEM の動作原理

1.2 研究の目的

GEMのような多孔型のMPGDはその位置分解能の高さゆえにイメージング検出器として有望であると考えられる。しかしGEM自体は1枚では増幅率が低く、放電損傷を避けつつ高い増幅率を得るには複数段のカスケード構成とする必要があるが、その場合検出器の構成が複雑になってしまう。また薄いホイルであるために機械的に安定せず、特に大面積ではたわみの問題が顕著となる。加えて、絶縁部の有機物からアウトガスが発生し計数ガスが劣化するため、ガスを封じ切った場合に長期間の安定動作ができない。

これらのすべての問題は、今まで実現されなかったガラス基板をベースとしたGEMを開発することで根本的に解決できると考えられる。厚いガラス基板とすることで検出器1段でも高い増幅率を実現し、かつたわみ無く自重を支えるのに十分な機械強度が得られる。加えて、ガラスは原理的にアウトガスの発生がないため、将来的にガスフロー装置などを排除した封じ切り型の検出器とし可搬性の高いイメージングデバイスが実現できると考えられる。

以上より、本研究では、感光性エッチングガラスという技術を駆使して、今までにない全く新しいMPGDとして、ガラス基板を用いたGEM (Glass Gas Electron Multiplier, G-GEM) を提案・開発する。そしてその高い性能を実証することでMPGD開発の一角にそれを位置づけ、またイメージングデバイスとして有望であると実証することを目的とする。

2. ガラス基板を用いたGEMの開発

従来の技術では、大面積の厚いガラス基板に高アスペクト比の孔を多数形成してGEMを作ることは不可能であった。ガラスの薬品耐性により従来の化学エッチングでは速度が非常に遅く、また基板厚さ方向への異方性エッチングもできないため高アスペクト比にならない。

そこで本研究では新しく感光性エッチングガラスに着目した。このガラスはフォトリソグラフィにより露光部分のみエッチングできるため、厚い基板にも高アスペクト比の孔を大面積に多数形成できる。本研究ではHOYA株式会社の感光性エッチングガラスPEG3を用いた。厚い基板は孔表面への電荷蓄積により動作が不安定化しやすいが、PEG3は低い体積抵抗率 ($8.5 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$) のため電荷が溜まりにくい。またPEG3を高温焼結した結晶化ガラスPEG3Cも、機械強度が上昇し薄型化や曲げ構造などの任意形状が可能となり素材として有望である。

シミュレーション結果を参考に、 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の有感面積、厚さ $680 \mu\text{m}$ 、孔径 $170 \mu\text{m}$ 、孔ピッチ $280 \mu\text{m}$ のG-GEMをPEG3、PEG3Cそれぞれを用いて作成した。(図3)³⁾。

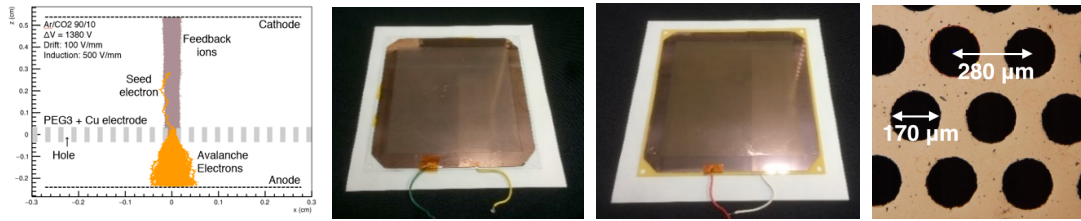


図3. 左から増幅計算の結果. 中央2つはPEG3およびPEG3CによるG-GEMの写真, 右端はPEG3 G-GEMの孔の拡大図.

3. PEG3 および PEG3C G-GEM の動作実証実験

まず PEG3 G-GEM を容器内に配置し, Ar/CO₂ 90/10 を 1 気圧のガスフローで流し試験を行った. 放射線源は ⁵⁵Fe (5.9 keV X 線) を用いた. 電子増幅率は最大 33000 に達し, 従来の GEM1 段より一桁高く, GEM 複数段に匹敵する値となった (図 4). また 5.9 keV に対して 22.2 % (FWHM) のエネルギー分解能が得られた. 有感面積全体に渡る増幅率の一様性は, エッジ部分を除けば相対値にして最大 1.06, 最小 0.90 となった. 増幅率のばらつきは小さく, 全体に渡って画像が得られると考えられ, イメージング検出器に適している. 最後に, 高レート照射での特性を確認した. 空間電荷によるゲインの低下が見られたものの最大で 3.7×10^5 Hz/mm² の照射に耐え, 高強度ビーム施設等においても安定して使用され得ることを示した.

PEG3C G-GEM についても Ar/CO₂ 90/10 中での増幅率の測定を行ったところ, PEG3 同様に高く最大で 25000 の増幅率を得た. 増幅率の一様性は, エッジ部分と異常チャネルの影響を除けば相対増幅率が最大で 1.09, 最小で 0.87 となり, PEG3 同様の一様性を得た.

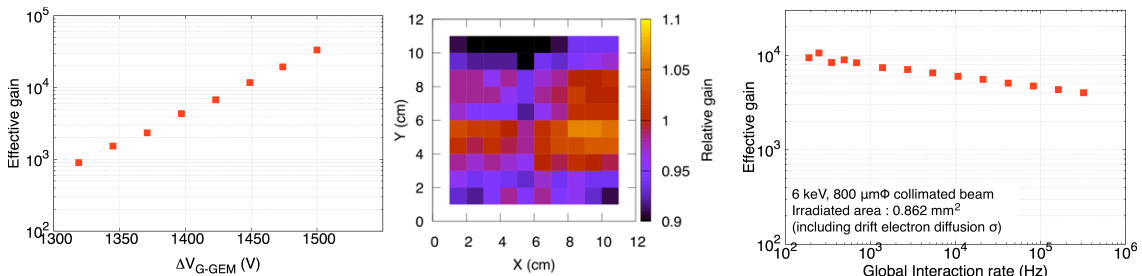


図 4 左から PEG3 G-GEM のガス増幅率, 増幅率一様性のマップ, 高レート耐性試験の結果

4. X線イメージング

次に, X線イメージングの実証を行った. まず PEG3C G-GEM と電荷読み出しの回路を用いて, 小動物 (コウモリ) の透過画像を取得した. 線源には ⁵⁵Fe を用いた. また, 読み出した信号波高値の重心演算によって位置計算を行った. その結果, 小動物の構造を明瞭に観察でき, エッジを誤差関数でフィットさせたところ X 方向に $\sigma=137 \mu\text{m}$, Y 方向に $\sigma=114 \mu\text{m}$ という高い空間分解能が得られた (図 5). また, PEG3 G-GEM を用いて, 電子雪崩中のガスの励起発光を冷却 CMOS カメラで捉える光読み出し方式のイメージングも行った. この方法は放電による回路損傷がなく, また高い増幅率により大発光量が取れ, 高速なイメージングが可能である. マイクロフォーカス X 線源を用いて, 対象物 (昆虫) の構造を明確に観察することに成功した (図 5).

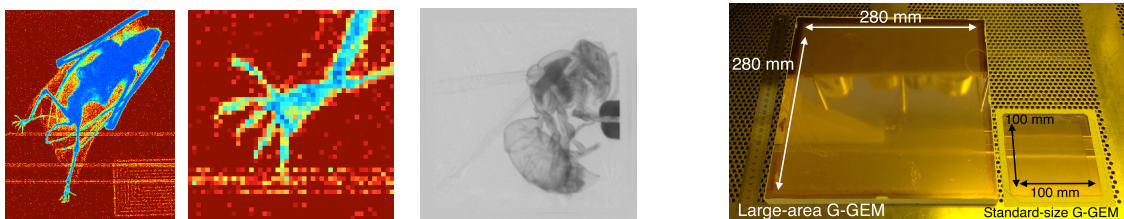


図5 小動物のX線画像（左・中央）、昆虫のX線画像（右） 図6 280mm角の大面積G-GEM

5. 実用性を追求した大面積化，および放電耐性構造の検討

実際のイメージング検出器を想定し，フラットパネルと同等サイズの大面積 G-GEM(有感領域 $280 \times 280 \text{ mm}^2$)を作成し評価を行った(図6)．Ar/CH₄ 90/10 混合ガス中で増幅率は最大 7700 が得られた．5.9 keV に対して分解能は 26.2 %であった．有感領域の増幅率ばらつきは，相対値で最大 1.094，最小 0.880 とイメージングに適する一様性であることが確認できた⁴⁾．

また放電損傷の対策として G-GEM の孔周辺の電極をリング状に高電圧源から独立させ，ガラス表面抵抗を用いて放電時の大電流から検出器を保護する試みも行った⁵⁾．

6. 結論

本研究では，従来のGEMの問題点を解決する全く新しいMPGDとしてG-GEMを開発した．基板に感光性エッチングガラスを用いることで，従来は不可能であった大面積の厚いガラス基板への微細孔の様な形成が可能となった．

PEG3 G-GEMでは増幅率は最大33000に達し，従来GEM複数段に匹敵する値となった．また5.9 keV X線に対し22.2 %(FWHM) のエネルギー分解能を得た．増幅率のばらつきは相対値で最大1.06，最小0.90と高い一様性を示した．高レート照射では最大で $3.7 \times 10^5 \text{ Hz/mm}^2$ に対しても安定に動作した．PEG3Cでも増幅率は25000に達し，また一様性は最大1.09，最小0.87と同様に高かった．また，PEG3, PEG3Cともに，電荷・光読み出しにより高精細X線イメージングに成功した．電荷読み出しの場合，X方向に $\sigma=137 \mu\text{m}$ ，Y方向に $\sigma=114 \mu\text{m}$ の空間分解能を得た．

以上より，G-GEMがMPGDとして高い性能を持ち，また優れたイメージングデバイスであることが分かった．現在では治療用炭素線の2次元線量分布測定や，中性子イメージングなどの応用が進んでいる．今後は完全な封じ切りによって長期間の安定動作可能な可搬型デバイスの実現が望まれている．

参考文献

- 1) F. Sauli, Nucl. Instr. and Meth. A 386 (1997) 531.
- 2) <http://gdd.web.cern.ch/GDD/>
- 3) H.Takahashi, Y.Mitsuya, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 724 (2013)1.
- 4) Y.Mitsuya, H.Takahashi, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 795 (2015) 156.
- 5) Y.Mitsuya, H.Takahashi, et al., J. Nucl. Sci. Technol., Vol.51 (2014), No.5, 639.