

感光性ガラス基板を用いた気体放射線イメージング検出器



三津谷 有貴

Mitsuya Yuki

(東京大学大学院工学系研究科)

1 はじめに

放射線イメージングの検出器としては、現在は半導体やシンチレータ等固体型検出器によって作られるものが多く、実用化され商業的にも成功を収めている。一方で、気体型の放射線検出器は物理実験の粒子線検出器としての色合いが強く、1960年代の比例計数管に始まり、1992年にノーベル物理学賞を受賞した Charpak による多線型比例計数管の開発、その後現在まで続いている微細電極構造を有するマイクロパターンガス検出器 (Micro-Pattern Gaseous Detector, 以下 MPGD) によって、歴史的にその発展を支え続けてきた。そして現在では、MPGD のイメージングデバイスとしての応用が目を集め始めている。

MPGD を含む気体検出器は、チェンバーに充填された希ガス主成分の検出ガスが放射線によって電離されて生じる一次電子を、高電界中で加速し、希ガス分子と衝突 (クーロン相互作用) させ次々と電離させていくことによって雪崩的に電子数を増幅し、信号を形成するメカニズムとなっている。気体であるために物質密度が小さく、固体検出器に比べると高エネルギーの X 線に対しての検出効率は低い。しかしながら、低 γ 線バックグラウンド型の中性子検出器や、高線量率下でも放射線損傷の無い粒子線検出器、コンバーターを用いた高エネルギー X 線の検出の実現等、様々な放射線の検出ができるという魅力がある。また、低いマテリアルコストに

も関わらず、大面積のイメージングを両立することが可能である。

現在最も広く使われている MPGD の 1 つとして、ガス電子増幅器 (Gas Electron Multiplier, 以下 GEM) が挙げられる¹⁾。GEM は厚さ数十 μm の絶縁体のホイルを両面から銅電極で挟み込み、そこに数十 μm のピッチで多孔を形成した構造となっている。この多孔内に形成される高電界中で電子増幅が生じる。

筆者らのグループでは、この GEM を、ガラス基板を用いて形成した検出器 Glass GEM (以下 G-GEM) の開発を行っており、また種々の放射線イメージング応用の研究を行っている²⁾。ガラスはアウトガスの発生が非常に少ないため、ガラス基板から作成することで検出ガスの純度低下による検出器性能の劣化を回避することができる。また、ガラス基板から作ることで大面積性と機械的安定性を両立することができ、更に放電時の耐性が極めて高くなるという利点がある。図 1 に実際に作成した G-GEM、及び図 2 に三次元モデルを示す。

2 感光性ガラス基板を用いた製作

G-GEM の基板には感光性エッチングガラスを用いている。このガラスでは、孔を形成したい部分に対してのみ紫外線を照射し、照射された部分が結晶化されてエッチングによって取り除くことができる。これによって 10 : 1 程度までの高いアスペクト

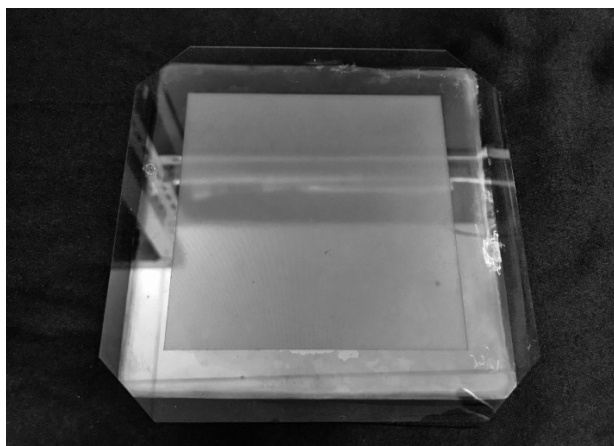


図1 作成した G-GEM
有感領域は 100mm × 100mm

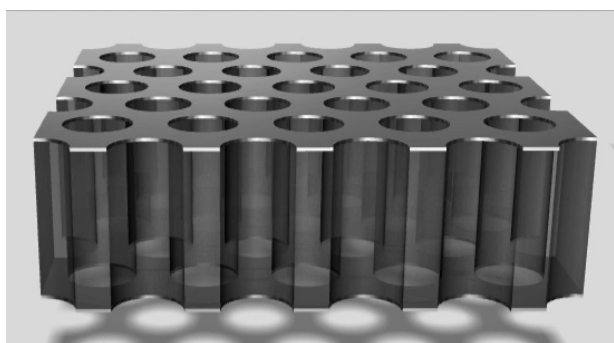


図2 G-GEM の三次元モデル
孔径 170 μm 、基板厚さ 680 μm 、孔ピッチ 280 μm のジオメトリ
で作成

比で細孔を作成することができる。

電子増幅に基づく検出器では、電子雪崩の発生する過程で、電子が検出器の絶縁材部分に付着(チャージアップ)することで内部電場を変形させ、増幅率特性を変化させる現象がしばしば見られる。GEM のような細孔型の検出器では、増幅率を高くする目的で増幅領域を長くするために基板を厚くするほど、電子に対して剥き出しとなる絶縁材の面積が大きくなり、チャージアップの影響が深刻になるというジレンマがある。また、入射放射線の強度が高いほどチャージアップは顕著になり、高計数率特性を劣化させる要因となっている。筆者らのグループではこれに対する解として、抵抗率の比較的低いイオン伝導性の感光性ガラスを用いている。G-GEM では剥き出しとなったガラス部分の抵抗値は、チャージアップ抑制に十分な程度に低く保たれており、高計数下でも高い増幅率での安定動作が可能である。

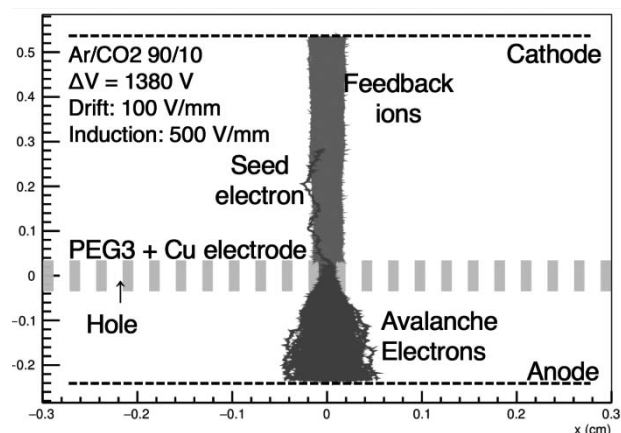


図3 電子雪崩の計算機シミュレーション

3 実証実験

計算機シミュレーションを行い、G-GEM による電子増幅の発生を検証した。ガラス基板の厚さを 680 μm 、孔の大きさを 170 μm 、孔のピッチを 280 μm としたモデルを作成し、両面に電極を付与した。電極には固定電位を与え、有限要素法によって孔内に生じる電界強度の計算を行った。約 1,300 V 程度の電圧印加によって、電界強度はアルゴンガス中での増幅閾値である 106 V/m に達していることが確認できた。この電界を用いてモンテカルロシミュレーションによってガス中の電子輸送計算を行い、上記パラメータによる G-GEM での電子雪崩発生を確認することができた(図3)。

実際に感光性ガラス基板から上記パラメータで G-GEM を作成し、動作実証及びガス中での電子増幅率を測定した。その結果、G-GEM を 1 枚のみ設置した体系でも 10^4 倍を超える電子増幅率が得られることが確認でき、ホイル状の GEM を複数段重ねた構造に匹敵する増幅率が得られることが分かった(図4)。イメージング用途では、分解能の向上のために検出過程での電子拡散を抑制することが重要であるため、1 段で高い増幅率が得られるメリットは大きい。また、デバイス全体としての構造を単純化できるメリットもある。

本検出器は、最大で 300 mm 角の基板を用いた G-GEM を作成し動作試験に成功している(図5)³⁾。また、本検出器を用いたイメージングデバイスとしての実装・開発も進めている。イメージングにおいては、G-GEM の信号をいかに読み出すかが重要と

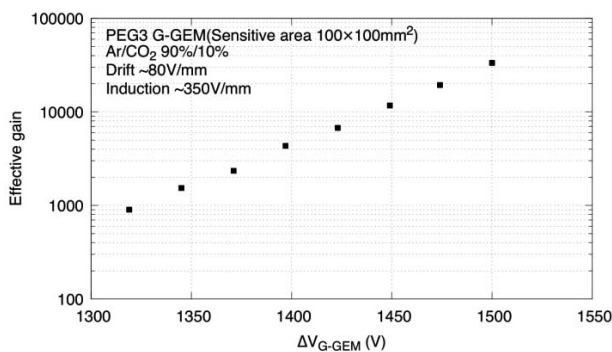


図4 印加電圧に対する電子増幅率の測定

なるが、その中で、現在、光読み出しが大きな注目を集めている。四フッ化炭素等の励起発光性を持つ気体を動作ガスに添加することによって、電子雪崩の発生と共に多数の光子を生成することができることが分かっている⁴⁾。四フッ化炭素を添加した場合に発生する光子の波長は可視光領域となり、商用の高感度冷却 CCD カメラ等の感度波長に合うため、これを高解像度の読み出しデバイスとして使うことができる。ガス中で発生する光子数は電子雪崩の大きさに比例するため、検出器の増幅率が高いほど多数の光子を一度に生成することができる。光子が多いほど高い SN 比で高速の撮像が可能となり、静止画だけでなく動画の取得もできるようになる。それゆえ、G-GEM の 1 段での高い増幅率は、このような光読み出しデバイスと極めて相性が良い。現在では X 線 / 中性子イメージング、治療用 X 線モニタリング、治療用粒子線の二次元線量分布測定等の様々なイメージング応用に関する研究を進めている。また、フラットパネル型のフォトダイオードパネルと組み合わせた、新しいガスフラットパネル検出器の開発も行っている。これらの研究結果に関しては、文献を参照されたい^{5,6,7,8)}。

4 まとめと今後の展望

感光性ガラス基板を用いて作成した G-GEM は、アウトガスフリー、高い機械的安定性、高い放電耐性等の特長を持つ。また、1 段で 10^4 を超える高い電子増幅率を有し、四フッ化炭素等の励起発光性ガスを添加して使うことで多量の励起発光光子生成に



図5 300 mm 角基板を用いた G-GEM の試作

より、光読み出しデバイスと組み合わせた高速の撮像が可能となっている。今後は中性子イメージング、治療用粒子線の二次元線量分布測定の実用化が期待される。

参考文献

- 1) F. Sauli, GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*, **386**, 531 (1997)
- 2) H. Takahashi, *et al.*, Development of a glass GEM, *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*, **724**, 1 (2013)
- 3) Y. Mitsuya, *et al.*, Development of large-area glass GEM *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*, **795**, 156 (2015)
- 4) M.M.F.R. Fraga, *et al.*, The GEM scintillation in He-CF₄, Ar-CF₄, Ar-TEA and Xe-TEA mixtures *Nucl. Instr. Meth A*, **504**, 88 (2003)
- 5) T. Fujiwara, *et al.*, Gas scintillation glass GEM detector for high-resolution X-ray imaging and CT *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*, **850**, 7 (2017)
- 6) T. Fujiwara, *et al.*, Development of a scintillating G-GEM detector for a 6-MeV X-band Linac for medical applications *Journal of Instrumentation*, **8**, C12020 (2013)
- 7) T. Fujiwara, *et al.*, Microstructured boron foil scintillating G-GEM detector for neutron imaging *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*, **838**, 124 (2016)
- 8) Y. Mitsuya, *et al.*, Gaseous flat-panel detector with glass gas electron multiplier coupled with micro-photodiode array *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*, (In Press), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.05.040>