

電気パルスで駆動できる可搬型 X 線発生装置の基礎開発

西田 和樹 (東京理科大学大学院 理学研究科)

概要

我々は、針葉樹型カーボンナノ構造体 (CCNS) とガス電子増幅フォイル (GEM) を用いた新しい X 線発生装置を考案し、実際に製作して動作確認をしたので、実証結果について報告する。この X 線発生装置は、アイソトープや、熱電子を利用した X 線発生装置とは異なり、100 V 程度の電気パルスによる駆動で X 線強度をナノ秒オーダーで変調できる。75 μm 厚の GEM に 80 V 以上を印加すると、GEM の穴に 10 kV/cm 以上の強電場が発生し、CCNS が電界放出をおこして電子が飛び出す。それを 10 kV で加速させて Ti ターゲット金属に当てることで、4.5 keV の特性 X 線が放射されたことを確認した。GEM に 140 V を印加した時の X 線フラックスは 1.31×10^6 counts/sr/s であった。

1 研究の背景

X 線を用いて天体観測をするには、X 線が地球の大気で吸収されてしまうために、検出器とその較正装置を最適化・軽量化して人工衛星に搭載する必要がある。検出器のエネルギー較正を行うには、特性 X 線などの既知のエネルギーをもつ X 線を検出器に入射させる。一般的には ^{55}Fe などの放射性同位体や、フィラメントによる熱電子を利用した X 線発生装置が利用される。しかし、これらの X 線発生過程はランダムなので、X 線発生のタイミングを知ることが重要となる検出器の較正、例えばガス中での電子ドリフト速度の較正が重要となる Time Projection Chamber 技術を用いた X 線偏光計 (J. K. Black, et al. 2007) には、従来の X 線発生装置は較正用 X 線源として適していない。そこで我々が開発している、電気パルスで変調駆動できる小型の X 線発生装置 (Modulated X-ray Source ; MXS) を使うと、外部の電気信号によりナノ秒単位で X 線の発生を制御できるので、X 線・ガンマ線天文衛星の分野で、にわかに注目を集めている。

一般的な X 線発生装置では、フィラメントを加熱して熱電子を発生させ、その熱電子を電圧により加速してターゲット金属に衝突させることで、特性 X 線や制動放射線を得る。この構造で X 線を ON/OFF するには熱電子か、電子を加速する電圧 (加速電圧) を制御する必要があるが、熱電子は放熱しないとそ

の発生がとまらず、加速電圧は X 線を発生させるのに 10 kV 以上の高電圧を用いるため、どちらも高速で行うことが難しく、数秒単位での制御になってしまう。一方、MXS では外部からの定電圧電気パルスで駆動する冷陰極電子源を利用するため、任意のタイミングでの X 線制御ができる (K. Gendreau, et al. 2012)。現在、様々なタイプの MXS が開発されているが、我々は将来の衛星計画での搭載に向けて、針葉樹型カーボンナノ構造体 (CCNS) とガス電子増幅フォイル (GEM) を組み合わせたものを電子源とした MXS (CCNS-MXS) を製作した。CCNS の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を図 1 に示す。CCNS は炭素原子で構成され、ナノメートルオーダーの構造をもち、10 kV/cm 程度の電場をかけると電界放出により電子を放出する (H. Wo, et al. 2008)。GEM は厚さ 100 μm 以下の絶縁体 (液晶ポリマー) の片面に 5 μm 厚の銅極板が付いており、 $\phi 300 \mu\text{m}$ の穴が規則正しく並んだ構造をしている (T. Tamagawa, et al. 2009)。GEM は 100 μm 以下と薄いため、GEM に 100 V の電圧を印加すると、GEM の穴の中では 10 kV/cm 以上の電場が生成される。そのため、図 2 のように、CCNS に GEM を押し付け、GEM に 100 V 程度の電圧を加えるだけで、電界放出に必要な 10 kV/cm 以上の電場が GEM の穴の中に入った CCNS に加えられ、電子が放出される。この電子をターゲット金属に衝突させることで X 線が発生する。GEM に印加する 100 V 程度の電圧であれば、トラン

ジスタを用いた回路により容易にナノ秒オーダーでの ON/OFF ができるので、X 線を任意のタイミングで発生させることができる。従来の MXS では、冷陰極電子源からの得られる電子量が少なく、高圧電源を用いる増幅機構が必要であった。一方、CCNS-MXS は、CCNS から十分に多くの電子が得られるので増幅機構と高圧電源を要さず、衛星計画に重要な軽量化・縮小化が期待できる。我々は原理実証をするために、CCNS-MXS を製作して X 線エネルギースペクトルやカウントレートの測定を行った。

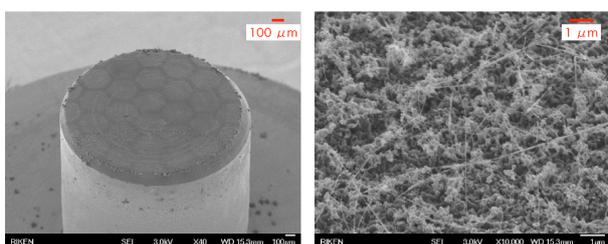


図 1: CCNS の SEM 写真。左：倍率 40 倍。φ2 mm の基板に CCNS が成膜されている。六角形の模様は GEM を押し付けた跡。右：倍率 1 万倍。

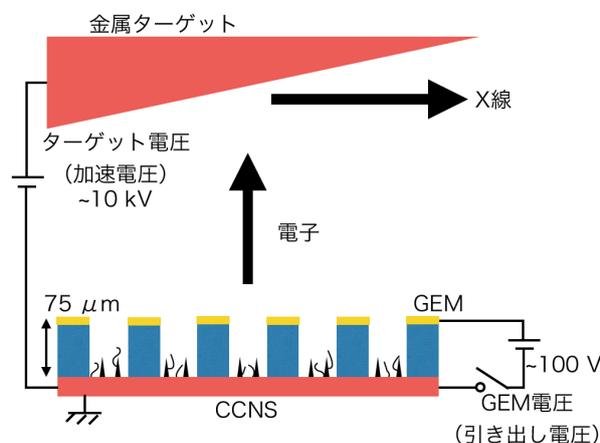


図 2: CCNS-MXS 内部の概略図。CCNS-MXS 内部は電子と X 線が気体と衝突することを防ぐため、 10^{-7} Torr の真空中に保たれている。

2 製作

図 3 に制作した CCNS ホルダの写真を示す。CCNS ホルダは 40 mm × 40 mm で、中心に CCNS、そこにかぶさるように 75 μm 厚の GEM が設置されている。CCNS は産業技術総合研究所に製作・提供してもらった。図 3 の下にみえる耳に取り付ける導線から電圧を印加し、GEM の上側を高電圧にする。このとき、GEM の上下は絶縁されているため、GEM の穴の中に高電場が形成され、CCNS から電子が発生する。この CCNS ホルダを ICF114Cube のチャンバ内に設置し、チャンバ内を 10^{-7} Torr の真空中に真空引きした。ターゲット金属には純度 99.9 % の Ti (特性 X 線のエネルギーは $K_{\alpha}4.5$ keV、 $K_{\beta}4.9$ keV) を用いた。

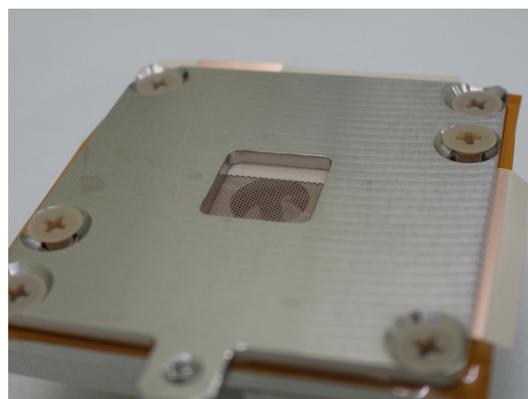


図 3: 制作した CCNS ホルダ。中心に見える黒い部分が CCNS の成膜部で、その上のメッシュが GEM。

3 実験セットアップ

実験セットアップを図 4 に示す。CCNS 表面と Ti ターゲット中心の距離は 10 mm、Be 窓から得られる X 線を増やすために 45° をなすように設置した。電子と X 線が気体粒子と衝突することをふせぐため、チャンバ内は真空引きをして 10^{-7} Torr 台の真空中に保った。また、Ti ターゲットの温度が上昇するとアウトガスにより真空度が変化するので、温度の急上昇を真空度でモニタしていた。GEM の厚さは 75 μm 、加速電圧を 10 kV に固定して、引き出し電圧を増加させて X 線の発生を確認した。X 線は、Si-PIN X 線

検出器 Amptek XR-100CR(有感領域 13 mm²、厚さ 500 μm) と デジタル信号処理、MCA、電源が一体化した Amptek PX5 を用いて検出した。

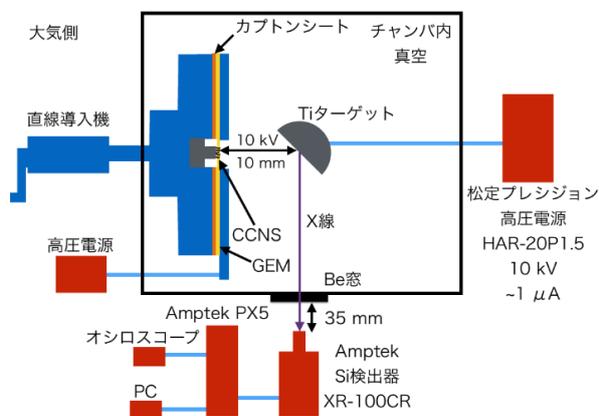


図 4: 実験セットアップ。チャンバ内は真空になっている。チャンバ本体は一辺 114 mm の立方体。

4 実験と結果

加速電圧を 10 kV に保ったまま、GEM に印加する引き出し電圧を徐々に大きくしていくと、80 V (10.7 kV/cm) から X 線の発生が確認できた。引き出し電圧を上げていくと X 線のカウントレートが指数関数的に増加した。引き出し電圧を 80 V よりも低くすると X 線が発生しなくなった。このことから、100 V 程度の電圧であれば、トランジスタを用いればマイクロ秒オーダーで容易に ON/OFF 制御が可能であるので、MXS として利用できることが実証できた。図 5 に引き出し電圧 140 V での 5 秒間積分のスペクトルを示す。一番大きなピークは Ti の K_α 特性 X 線 (4.5 keV)、二番目のピークは Ti の K_β 特性 X 線 (4.9 keV)、連続成分は制動放射線である。このときの X 線のフラックスは 1.31 × 10⁶ counts/sr/s で、Ti ターゲットに流れていた電流は高圧電源の電流計での読み取り最小値 1 μA 未満であった。また、圧力の大きな上昇がみられなかったので、加速電子の衝突による Ti ターゲットの急激な温度上昇はなかったと判断した。

図 6 にカウントレートの時間変化を示す。数十秒間に桁での大きな変動を示して、カウントレートは安定しなかった。この原因について以下のように推察する。CCNS に加える電場が小さいと、CCNS 全体からは電子が放出されず、特に細くて電場が集中しやすい一部分のみが電界放出をおこす。すると、その部分的な CCNS がカウントレートを支配することになる。発生した電子がアウトガスなどを電離してイオンを生成し、そのイオンが CCNS の構造を損壊することがある。このときカウントレートを支配していた部分が破損すると、CCNS の部分的な破損であってもカウントレートが大きく変化してしまう。一方で、電場を大きくすると CCNS 全体から電子が放出されるようになり、CCNS の部分的な損壊だけでは、カウントレートが大きく変化しなくなり、安定度が増加すると思われる。この推察を検証するために、CCNS 単体で図 6 の実験の 5 倍 (50 kV/cm) の電場を加えて、数 μA の電流を引き出す実験を行った。このとき、加速電圧は 2 kV に固定して X 線が発生しないようにしていた。その結果を図 7 に示す。引き出される電流の変化は、1 万秒程度の時間では、最大でも倍程度に抑えられていた。電流と、発生する X 線のカウントレートは比例すると思われるので、この実験結果から、引き出し電場を大きくして X 線のカウントレートを上昇させると、カウントレートの安定度が増すと推測できる。

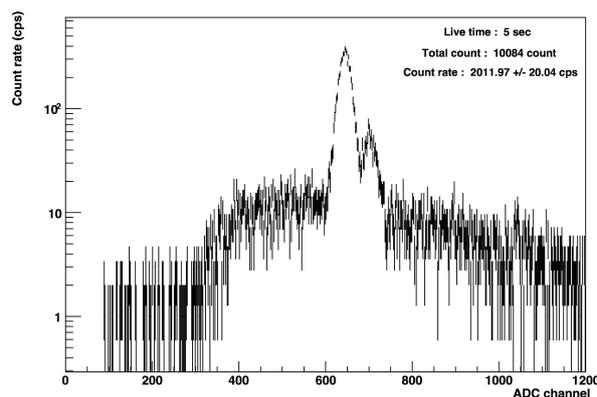


図 5: 引き出し電圧 140 V (18.7 kV/cm)、加速電場 10 kV での 5 秒間積分のスペクトル。第一、第二ピークはそれぞれ、Ti の K_α 4.5 keV、K_β 4.9 keV であり、連続成分は制動放射線。

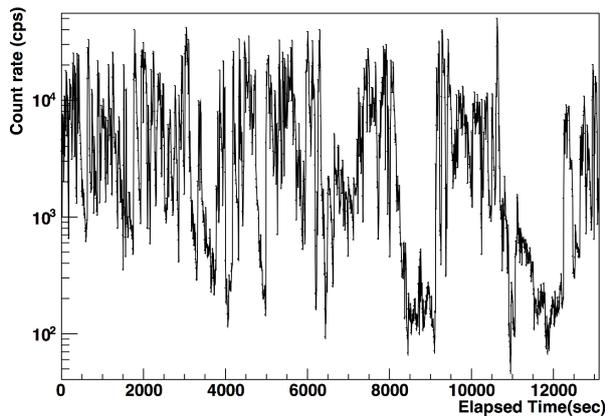


図 6: 引き出し電圧 140 V (18.7 kV/cm)、加速電場 10 kV でのカウントレートの時間変化。1 点は 5 秒間ごとの平均カウントレート。

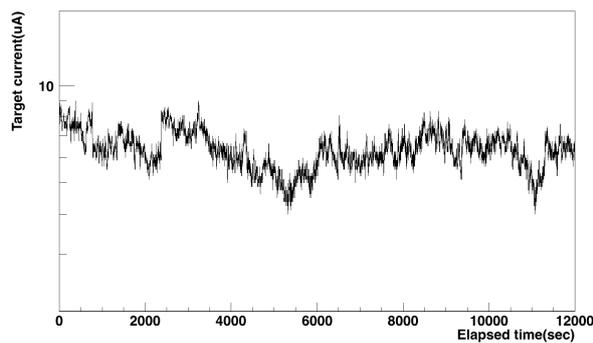


図 7: CCNS 単体、引き出し電場 50 kV/cm でのターゲットに流れた電流の時間変化。1 点は 60 秒間ごとの平均電流値。

5 まとめと今後

CCNS と GEM を組み合わせて電子源とした MXS を製作し、実証実験を行った。80 V 以上の引き出し電圧で X 線を発生させることに成功し、引き出し電圧を高速で ON/OFF すれば X 線をナノ秒オーダーで制御できることが実証できた。引き出し電圧 140 V で 1.31×10^6 counts/sr/s のフラックスの X 線が得られた。しかし、20 kV/cm 程度の電場ではカウントレートが桁で変動して安定しなかった。電場を 50 kV/cm と 5 倍程度まで大きくした CCNS 単体での実験では、

CCNS から引き出される電流の時間変化が 1 万秒間で倍程度にまで抑えられることが確認された。このことから、X 線のカウントレートは、引き出し電場を大きくすれば安定させられることが推察できた。現在、100 V 程度程度の電圧でも 60 kV/cm の電場が生成できる 15 μ m の薄い GEM を製作中である。この GEM を用いれば、十分に安定したカウントレートの X 線を得ることができると思われる。今後は、GEM の穴径、厚さ、ピッチによって電場を最適化したのち、高速で電圧を ON/OFF する回路によって X 線の高速制御を行う。また、将来の衛星搭載に向け、環境試験等を行う予定である。

謝辞

本研究に当たって、玉川先生、岩切さんをはじめ、玉川高エネルギー宇宙物理研究室のみなさまには、広範に渡りご協力を頂きました。この場を借りてお礼を申し上げます。産業技術総合研究所の鈴木さん、加藤さん、志岐さんには CCNS とその取り扱いに関するノウハウを教えて頂きました。ここに感謝の意を表します。また、京都大学基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

参考文献

- K. Gendreau, et al. 2012, SPIE
- H. Wo, et al. 2008, 特開 2008-150253 炭素膜および炭素膜構造
- T. Tamagawa, et al. 2009, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A
- J. K. Black, et al. 2007, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A