

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13495

研究課題名(和文) 針葉樹型カーボンナノ構造体を用いた超小型タイミングX線源による分光観測の革新

研究課題名(英文) A new modulated X-ray generator fabricated with coniferous carbon nano-structure for future X-ray spectrometers

研究代表者

玉川 徹 (Tamagawa, Toru)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・准主任研究員

研究者番号：20333312

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ガス電子増幅フォイル(GEM)と針葉樹型カーボンナノ構造体(CCNS)を組み合わせ、ナノ秒オーダーでON/OFFできる、小型X線発生装置を製作した。当初の想定通り、GEM電極に100V程度の電圧を印加することでCCNSから電子が引き出すことができ、同時に、X線を発生させることに世界で初めて成功した。また、500ナノ秒のゲートを入れて、電圧ONの期間だけX線が発生していることを確認し、タイミングX線源として動作していることを実証した。さらに、GEMとCCNSのデザインを最適化することで、長期に安定的にX線を発生させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We fabricated a modulated X-ray generator combining with Gas Electron Multiplier (GEM) and Coniferous Carbon Nano-Structure (CCNS). When the voltage (~100 V) was applied to the GEM electrode, electrons were successfully extracted from the CCNS substrate, and then X-ray was emitted by bombarding the electrons on a target metal. We also demonstrated that the generator was operated as a timing X-ray generator when the 500 ns-gated voltage was applied to the electrode. Finally we optimized the designs of GEM and CCNS for stable operation, and we successfully operated the generator for long term.

研究分野：宇宙物理

キーワード：宇宙物理 X線発生装置

1. 研究開始当初の背景

最新の天体分光観測装置であるX線マイクロカロリメーターは、極低温(約 50 mK) に冷やした吸収体と、その温度を精度良く計測する温度計からなる。X線入射による温度上昇を精密計測することにより、6 keV のX線に対して、その 1/1000 (6 eV) の究極のエネルギー分解能を得ることができる。しかし、50 mK の世界では、100 万分の 1 (1 μK) の温度変動でも分光性能が劇的に変化する。宇宙で常時 μK の精度で温度を制御することは難しく、決まった X 線エネルギーに対する検出器の応答がゆらぎ、それを時間積分することになるので、分光性能が悪化する。この温度ゆらぎを補正するには、「エネルギーが既知の X 線」を、タイミングを決めて照射し、その揺らぎを基準とすることで、常時補正をするのが唯一の策である。一般に宇宙実験では線源として ⁵⁵Fe などのアイソトープが用いられるが、放射性崩壊イベントは完全にポアソン統計に従いランダムなので、天体からの X 線とかぶり、我々の用途には不向きである。宇宙利用に適した、小型かつ、任意のタイミングで ON/OFF できる X 線発生装置が必要とされている。

2. 研究の目的

産業技術総合研究所の持つ針葉樹型カーボンナノ構造体 (CCNS; Coniferous Carbon Nano-Structure) と、理化学研究所の持つマイクロパターン電子増幅フォイル(GEM)の技術を組み合わせることで、高速で ON/OFF スイッチが可能な X 線発生装置が製作することに思い至った。本研究は、このアイデアに基づいた X 線発生装置を実現するとともに、その性能評価、ならびに、宇宙利用に向けた最適化を行うことを目的とする。

将来的には、放射線検出器を取り扱う研究室への放射線源としての普及、X線を用いた医療機器や非破壊検査などの産業への応用、宇宙空間における X 線通信などに応用が期待できる。

3. 研究の方法

本研究は、以下の 5 つの開発研究から構成される。

1) CCNS 電子源の成膜

CCNS の成膜は、基板の形状が異なると、マスクや成膜条件が変化する。X 線発生装置に最適なデザインの基板の上に、最適なスポットサイズで CCNS を成膜するために、ガス(水素、メタン)流量や投入電力、基板温度、成膜時間等のパラメーター調整をおこない、半年程度で製作を完了する。

2) GEM の製作

CCNS の成膜と平行して、理研で GEM を製作する。GEM の穴直径や開口面積などは、電子源としての性能を左右するので、事前に電場シ

ミュレーション等を実施し、CCNS も含めた最適な電場パラメーター出しをおこなう。

3) X 線発生装置の試作と性能評価試験

X 線発生装置のテスト用チェンバーを理研で製作し、上記で製作した CCNS と GEM を組み合わせることで、X 線発生装置を試作する。

4) デザインの最適化

評価試験を実施することにより、電子源となる CCNS の成膜形状や、電子の引き出し電極の形状等、最適なデザインが見えてくる。実機による試験で各種パラメーターを最適化することにより、問題点を改良した二機目の試作機を製作する。

5) マイクロカロリメーターを用いた評価・実証試験

首都大学東京で開発している、衛星搭載を目指す超伝導遷移端検出器(TES)と組み合わせることで、温度の時間変動を常時校正しつつ、究極の分光性能を出す評価試験を実施する。衛星計画への応用については、熱や構造など、別途考慮すべきことが多いので、本研究では実験室レベルでの試作と、原理実証を完了するところまでをスコープとする。

4. 研究成果

本研究により、以下の 4 つの成果を得た。

(1) X 線発生装置の製作と原理実証

当初の予定通り、初年度に理化学研究所において GEM のデザインを決定し、製作を行った。また、産業技術総合研究所において、CCNS の成膜を実施した。

図 1 に製作した X 線発生装置の概念図を示す。GEM に 100 V 程度の電圧を印加することにより、CCNS 表面から電界放出で電子が飛び出す。これを 10 kV のターゲット電場により加速し、金属ターゲットにぶつけることで X 線を発生させる。

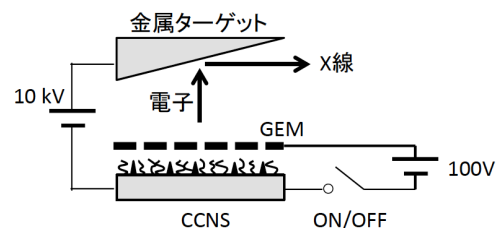


図 1: X 線発生装置の概念図

最初は GEM への電圧を ON/OFF せずに印加し、連続的に電子が放出されるモードで試験を行った。その際に得た X 線スペクトルを図 2 に示す。金属ターゲットであるチタンからの輝線と、制動放射による X 線が得られ、我々の X 線発生装置が当初の想定通り動作していることを確認した。

次に、GEM への印加電圧と、引き出された電流値の関係測定し、I-V 特性を調査した。

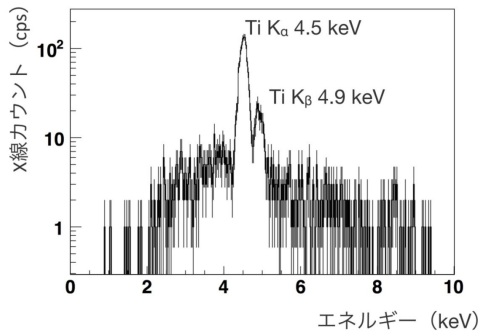


図 2：得られた X 線スペクトル。

図 3 に示す通り、電圧をあげると指数関数的に電流値が増加することがわかった。電界放出する素子は、Faular-Nordheim (FN) 則に従うことが知られている。図 3 の直線は FN 則によるフィット結果である。その結果より、CCNS 表面では、電界集中のおかげで印加電圧の約 1000 倍程度の電場が形成されていることがわかった。これは CCNS 単体で測定した値とほぼ同じであり、GEM と組み合わせても、想定通りに電子が引き出せていることが確認できた。

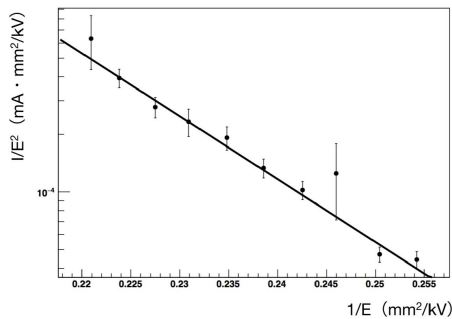


図 3：CCNS+GEM 電子源の I-V 特性曲線。

(2) ON/OFF 機能の実証

GEM への電圧印加装置に、ON/OFF できるスイッチ機能を付加し、X 線を任意のタイミングで ON/OFF できるかの実証試験を行った。500 ns のゲート期間のみ電圧を ON にする設定で、電圧印加 ON タイミングをスタート信号にして、X 線検出時刻をストップ信号にし、その間の時間差を求めたところ、500 ns の幅の分布が得られた。これにより、500 ns のゲートを開いた間のみ X 線が放射されていることが実証され、我々の製作した X 線発生装置が、変調動作できることを示した。

(3) 長期変動実験の実施

次に、20-100 μ A の電流を引き出しつつ、CCNS+GEM 電子源の性能がどのように変化していくのかを調査した。金属ターゲットで得られた電流値の時間変化を図 4 に示す。電流値は徐々に減少し、ある一定値に近づくことがわかった。この減少カーブは、CCNS で発生した電子が残留ガスをイオン化し、それが CCNS を破壊するというモデルでよく説明で

きることがわかった。また、この実験で得られた全電荷量は、我々が衛星プロジェクトで想定している総電荷量の 1.3 倍であり、将来への応用に十分な性能を持つことを実証することができた。

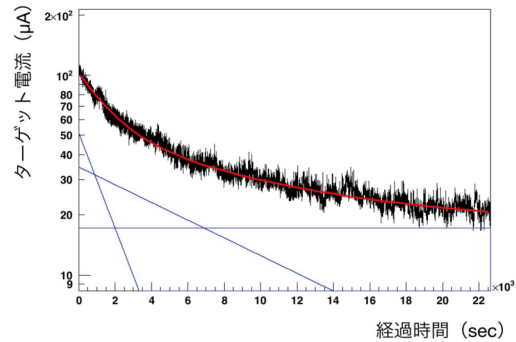


図 4：長期試験中の電流値変化。

(4) デザインの最適化

長期試験中に、電極のショートにより、GEM に電圧がかからなくなる事象が発生した。ショートした GEM 電極を電子顕微鏡で観察したところ、CCNS 基板の周辺部で形成される、比較的大きな炭素の塊が、強い電場により剥がれ、GEM の極板に接触したものであることがわかった。このようなショートを防ぐためには、CCNS 基板の周辺部を避けるように GEM の有感領域を形成すれば良いと考え、GEM ならびに CCNS 基板のデザインの改良を行った。

新しい X 線発生装置に対して、X 線を 500 ns で ON/OFF しながら長期試験を実施したが、電極ショートによる故障は一切起きなかった。この結果から、上記の改良がうまくいき、長期運用のリスクを大幅に削減することが可能になったと判断した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

(1) "Development of a compact X-ray source and detector system for high throughput, fully autonomous inspection", H. Kato, T. Fujiwara, B. E. O'Rourke, H. Toyokawa, A. Koike, T. Aoki and R. Suzuki, Sensors and Materials 28, No. 7, 763-768 (2016) [査読あり].

[学会発表](計 4 件)

(1) Toru Tamagawa, "A modulated X-ray generator for possible industrial applications", IEEE NSS/MIC conference, Strasbourg, France (Nov. 1, 2016).

(2) 西田和樹、玉川 徹、岩切涉、加藤英俊、鈴木良一、北口貴雄、志岐成友、早藤麻美、武内陽子、榎戸輝揚、窪田恵、「電気パルス

で変調駆動できる可搬型X線発生装置の開発
2: X線フラックスの安定度調査」日本物理
学会年次大会、東北学院大、仙台市 (2016年
3月21日)。

(3) Toru Tamagawa, "X-ray generator: an
application of micro pattern gas detector",
4th international micro pattern gas
detector conference, Trieste, Italy (Oct. 13,
2015).

(4) 西田和樹、玉川 徹、加藤英俊、鈴木良一、
北口貴雄、志岐成友、岩切涉、早藤麻美、武
内陽子、榎戸輝揚、窪田恵、「電気パルスで
変調駆動できる可搬型X線発生装置の開発」
日本物理学会秋季大会、大阪市立大、大阪市
(2015年9月25日)。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉川 徹 (TAMAGAWA, Toru)
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速
器研究センター・准主任研究員
研究者番号：20333312

(2) 研究分担者

加藤 英俊 (KATO, Hidetoshi)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・計
量標準総合センター・研究員
研究者番号：60583747

(3) 連携研究者

志岐 成友 (SHIKI, Shigetomo)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フ
ロントニア研究部門・主任研究員
研究者番号：50342796

北口 貴雄 (KITAGUCHI, Takao)
国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速
器研究センター・客員研究員
研究者番号：30620679

岩切 涉 (IWAKIRI, Wataru)
国立研究開発法人理化学研究所・MAXI チー
ム・基礎科学特別研究員
研究者番号：50749918

山田 真也 (YAMADA, Shin'ya)
首都大学東京・理工学研究科・助教
研究者番号：40612073

(4) 研究協力者

()