

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17773

研究課題名(和文)次期惑星探査に向けた新型極端紫外線検出器の開発研究

研究課題名(英文)Newly developed ultraviolet detector for future space missions

研究代表者

村上 豪 (Murakami, Go)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50734026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：惑星観測に有用な極端紫外線(EUV)検出器の性能向上を目指し、新型EUV検出器の開発を行った。本研究では可視光用のCMOSセンサを従来の検出器に応用することを目指した。鍵となる技術が光伝送用ファイバオプティクスプレート(FOP)とCMOSセンサの結合である。複数の試作により探査機搭載性を確認するとともに、最適なFOP設計および接着工程を見出し、FOPとCMOSセンサの結合技術を確立させた。この成果を用い、検出器全系を試作し正常に動作することを確認した。本成果によりCMOSセンサを用いた新型検出器の開発技術を確立させることができたといえる。

研究成果の概要(英文)：The extreme ultraviolet (EUV) telescopes and spectrometers have been used as powerful tools in a variety of space applications, especially in planetary science. However, the conventional detection systems has limitations of resolution and incident count rate. One of the solutions of this issue is using a CMOS imaging sensor. We developed a new CMOS-coupled microchannel plate (MCP) detector for future UV space and planetary missions. It consists of MCPs followed by a phosphor screen, fiber optic plate, and a windowless CMOS. We manufactured a test model of this detector and performed vibration, thermal cycle, and performance tests. Our results indicate that this new type of UV detector can be widely used for future space applications.

研究分野：惑星科学

キーワード：検出器 CMOS 紫外線 マイクロチャンネルプレート 惑星探査 リモートセンシング ファイバオプティクス

1. 研究開始当初の背景

地球を始めとする惑星の大気や周辺プラズマはそのほとんどが極端紫外線 (EUV) と呼ばれる波長域で発光している。EUV は地球大気に吸収されてしまうため、宇宙空間からの観測が必須となる。研究代表者はこれまで自身の開発した EUV カメラを月周回衛星「かぐや」および国際宇宙ステーションに搭載し、地球周辺プラズマの撮像において EUV 観測技術を確認してきた。そしてその技術は世界初の EUV による惑星専用の宇宙望遠鏡である惑星分光観測衛星「ひさき」に用いられ、EUV 観測技術の惑星観測における有用性を示してきた。

EUV による惑星観測の必要性が高まる一方で、重大な開発課題にも直面しつつある。一般的に EUV 分光装置は検出効率を高めるため反射面の数を最小限にし、主鏡と回折格子、検出器で構成される。中でも空間・波長分解能やダイナミックレンジなど装置の性能を左右する最も重要な要素の一つが検出器である。通常、EUV 検出器は図 2 に示すように受光面、電子増倍部、2 次元位置検出部から構成される。受光面に入射した光子は電子に変換され、増幅されて電気信号として入射位置が演算される。研究代表者はこれまでの研究において、従来の検出器の原理を維持したまま電子増倍部への電圧の印加方法に独自の工夫を施すことにより分解能を従来の 4 倍の 512×512 ピクセルにまで高めることに成功した [Murakami et al., 2008; 2010]。この検出器は上述の国際宇宙ステーションや惑星分光観測衛星「ひさき」、日欧共同の水星探査機 BepiColombo/MPO 搭載の EUV 観測器に採用されている。しかしこの方式ではアナログ信号処理により位置を演算しており、その精度は必ず電気ノイズに左右されてしまうためこれ以上の高分解能化は不可能である。また入射光子ごとに位置を演算し計数する方式 (フォトンカウンティング) のため、演算時間が確保できなくなる 10kHz 以上の大光量の測定はできないという欠点をもつ。木星探査機では木星周辺の強大な放射線にさらされ 10kHz 以上のノイズカウントがのってしまうため、従来の検出器のままでは観測を実施することができない。これらの問題を克服するには 100 krad 以上の放射線耐性を持ち、分解能を従来の 2 倍以上、ダイナミックレンジを 10 倍以上に向上させた検出器が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では検出器の原理を見直し、可視光用の撮像素子として用いられる CMOS イメージセンサを取り入れた新型 EUV 検出器を開発することで、今後の惑星探査に向けた技術革新を目指す。人工衛星や惑星探査機などの飛翔体への搭載を目指し、過去に宇宙空間での使用実績がある素子を用いて新型検出

器を試作する。具体的には、可視光検出器として汎用的な CMOS センサでは高分解能なものが既に多く実用化されているため、飛躍的に分解能を向上させることが可能となる。また CMOS イメージセンサは高速読み出しが可能となえ、電子増倍部での増倍率を調整すればフォトンカウンティングだけでなく連続的な測光もできるため、暗い観測対象には従来の性能を維持したまま、そして明るい対象の大光量の観測が可能となる。本研究の目的はその光学性能および飛翔体への搭載可能性を評価することである。

3. 研究の方法

衛星搭載実績のある CMOS イメージセンサを用い、新設計の EUV 検出器を開発する。まず光を伝送するためのファイバーオプティクスプレート (FOP) と CMOS イメージセンサを結合する技術を確認させる。過去の研究において材料の選定および要素試験は実施済みであり、機械強度および熱歪みに対する耐性の評価、また光学性能の測定が主な実施項目となる。次に光電面の劣化を防ぐための真空保管容器と FOP の結合技術を確認させ、EUV による光学性能の評価および飛翔体搭載性の実証試験を実施する。これらの試験により放射線耐性および分解能、ダイナミックレンジがそれぞれ前述の目標性能を達成しているか検証する。

研究代表者は受光面および電子増倍部は従来型を維持したまま、位置検出部の代わりに可視光用の CMOS イメージセンサを用いる方式を考案した。電子増倍部からの電子雲を蛍光剤に衝突させて可視光に変換し、ファイバーオプティクスプレート (FOP) を用いて CMOS センサに光を伝送する方式である。受光面上に電荷転送回路が配置された CMOS センサへの FOP の結合が本研究の大きな課題である。

EUV 検出器の受光面には大きく分けて 2 種類あり、図 1 のように窓材を用いた透過型と図 2 のように直接受光面に入射させる露出型に分けられる。波長 115 nm 以下の EUV 領域では透過材が存在しないため、受光面を露出させる必要がある。一方で、EUV 受光面として用いられる光電物質 (ヨウ化セシウム) は潮解性を持ち、大気中に保管すると感度が劣化してしまう。そのため地上では真空容器中に保管し、打ち上げ後に蓋をあけて受光面を露出させるような機構が必要となる。

そこで本研究では図 2 のように CMOS イメージセンサを用いた露出型の新型 EUV 検出器の開発を最終目標とする。受光面、電子増倍部、蛍光面、真空保管機構、CMOS センサ単体は申請者のこれまでの研究においてそれぞれ既に開発済みである。CMOS イメージセンサには衛星搭載実績および耐放射線性能を有する ON Semiconductor 社の STAR1000 を用いる。また最適な FOP 材質と接着剤の選定・調達、および CMOS センサとの結合に必要な基

礎試験は過去の研究において実施済みである。よって本研究で課題となるのは蛍光面と CMOS センサ、真空容器の結合となる。

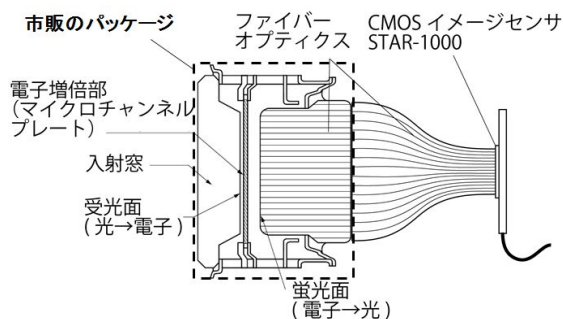


図 1. 透過型 EUV 検出器の模式図。

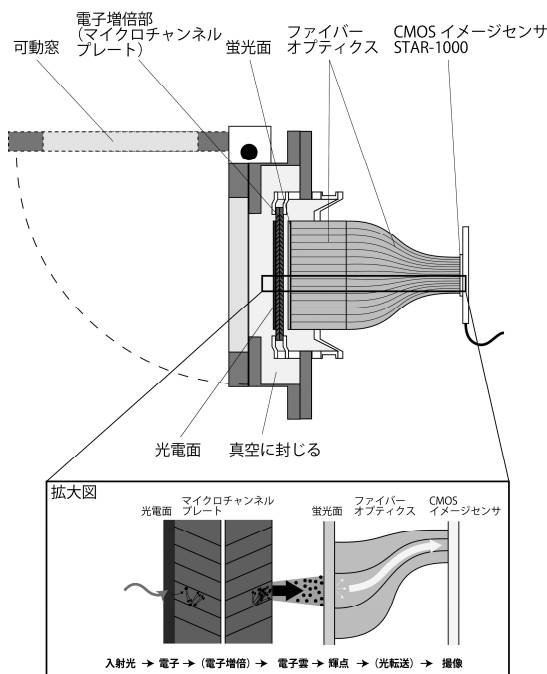


図 2. 露出型 EUV 検出器の模式図。

4. 研究成果

(1) CMOS センサと FOP の結合

過去の研究において選定済みであった接着剤および FOP を用いて、カバーガラス除去済みの CMOS センサと FOP の結合試験を実施した。図 3 に FOP 接着済み CMOS センサの試作機の写真を示す。その結果、結合後も健全に動作することを確認した。また、結合済みの試作機に対して機械環境試験および熱サイクル試験を実施し、探査機への搭載性にも問題がないことを確認した。

さらに、形状の異なる 2 種類の FOP を用いてそれぞれの試作機の性能評価試験を行い、分解能の向上に最適な FOP 計上を見出した。また結合時に FOP と CMOS 間に圧力を加えることで分解能を最大限に向上できることを確認した。試作機の分解能評価試験の結果、27 μm の分解能を達成できていることを確認した。これは今回用いた CMOS センサ単体の分解能と同程度であり、FOP 接着による分解能の低下がないことを示している。また FOP のファイバ径は 6 μm であることから、より高

分解能の CMOS センサを用いればさらなる分解能の向上も見込める。

これらの結果から、本研究の大きな技術課題であった CMOS センサと FOP の結合技術を確立できたといえる。

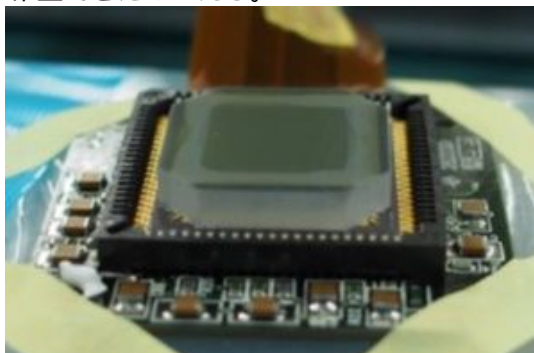


図 3. FOP 接着済み CMOS センサの写真。

(2) 透過型 EUV 検出器の開発

試作した FOP 接着済み CMOS センサを用いて、透過型 EUV 検出器の試作および動作試験、性能評価を実施した。試作機には市販のイメージインテンシファイアを用い、テーパ付 FOP を介して CMOS センサに光を伝送する。図 4 に透過型 EUV 検出器の試作機の写真を示す。試作機にテストターゲット像を入射し、CMOS センサにおいて正常に像が出力されることを確認した。これにより、イメージインテンシファイアを用いた透過型 EUV 検出器が実現可能であることが示された。

試作機の分解能も評価した。本試作機では (1) で試作した 2 種の FOP 接着済み CMOS センサのうち分解能が低い方を用いたため、透過型 EUV 検出器の構成により達成できる最高分解能を評価することはできなかった。しかしそれでも、少なくとも今回用いた FOP 接着済み CMOS センサ単体の分解能である空間周波数 4.5 lines/mm を透過型 EUV 検出器全系でも達成できることを確認した。

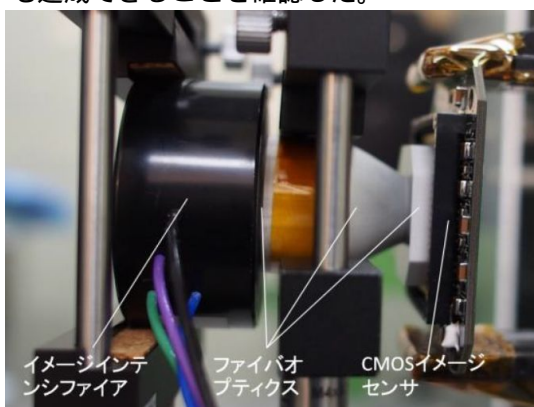


図 4. 透過型 EUV 検出器の試作機の写真。

(3) 露出型 EUV 検出器の開発

研究成果 (1)、(2) をもとに、露出型 EUV 検出器の試作および動作試験、性能評価を実施した。(2) で用いたイメージインテンシファイアの代わりとなる、MCP を内蔵した FOP 付真空容器の試作を行った。懸念事項であった真空シール性の評価試験も実施し、十分に真

空封じが可能であることを確認した。試作機にピンホール像を入射し、正常に像が出力されることを確認した。また出力されるピンホール像の拡がりから、本試作機が 100 μm 以上の分解能を達成できることを確認した。

本試作機にテーパ付 FOP、FOP 接着済み CMOS センサを結合して露出型 EUV 検出器を試作した。図 5 に本試作機の写真を示す。テーパ付 FOP および FOP 接着済み CMOS センサの動作は(2)においてすでに確認済みであり、本研究の最終目標であったこれにより露出型 EUV 検出器の開発も達成することができたといえる。

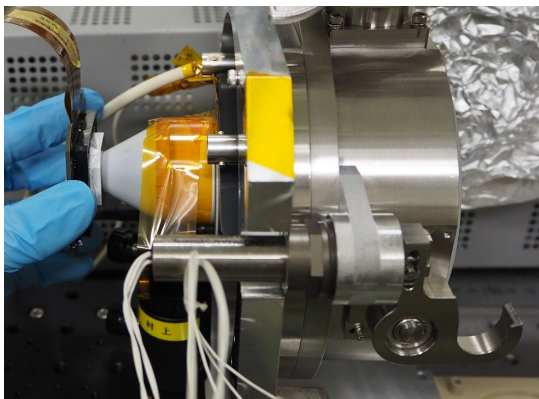


図 5. 露出型 EUV 検出器の試作機の写真。

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)

Murakami, G., M. Kuwabara, K. Yoshioka, R. Hikida, F. Suzuki, and I. Yoshikawa, Ultraviolet detector with CMOS-coupled microchannel plates for future space missions, Proceedings of SPIE, 査読無, vol. 9905, 99053G-1-6, doi:10.1117/12.2232183, 2016.

[学会発表](計 4 件)

村上豪, 堀越寛己, 亀田真吾, 生駒大洋, 成田憲保, 塩谷圭吾, 吉川一朗, 西川淳, 田村元秀, 杉田精司, UV 宇宙望遠鏡 (WSO-UV) 搭載トランジット分光装置による系外惑星酸素大気検出の検討, 研究集会「宇宙惑星結合系科学の実証的研究の創設に向けて」, 立教大学, 2016 年 12 月 27 日 (招待講演).

Murakami, G., M. Kuwabara, K. Yoshioka, R. Hikida, F. Suzuki, and I. Yoshikawa, Newly developed ultraviolet detector for future space missions, The AOGS 2016 13th Annual Meeting, ST38-PS17-A008, Beijing, China, 02 August 2016.

Murakami, G., M. Kuwabara, K. Yoshioka, R. Hikida, F. Suzuki, and I. Yoshikawa, Ultraviolet detector with

CMOS-coupled microchannel plates for future space missions, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2016, 9905-162, Edinburgh, United Kingdom, 26 June 2016.

村上豪, 桑原正輝, 吉岡和夫, 足田伶奈, 鈴木文晴, 吉川一朗, 次期惑星探査に向けた新型紫外線検出器の開発, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, PCG20-P08, 幕張メッセ, 2016 年 5 月 24 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 豪 (MURAKAMI, Go)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・
宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号: 50734026