

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2022
課題番号：20K14506
研究課題名（和文）次世代CMB偏光観測衛星の観測感度向上を目的とした広帯域シリコン光学素子の開発

研究課題名（英文）Development of silicon optical device for sensitivity improvement of the next generation CMB space mission

研究代表者
長谷部 孝（Hasebe, Takashi）
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員

研究者番号：30794169
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：次世代CMB偏光観測衛星の高感度化を目的とし、望遠鏡に用いるシリコン光学素子の広帯域化・高周波化に必要な反射防止加工技術の開発を行った。異方性ドライエッチングを用いて35 mm角のシリコンチップ表面に3段の微細周期構造を加工した。2枚のチップの片面にそれぞれ加工を行い、未加工面同士をイオンビーム照射による表面活性化によって接合した。低温透過率測定の結果、200 - 450 GHzにおいて平均透過率98%を達成した。透過率実測値は電磁界シミュレーション結果ともよく一致した。本技術はCMBをはじめとしたサブミリ波観測用光学素子の広帯域化・高周波化のためのブレイクスルーになると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本成果によって、CMB偏光観測に用いる光学素子の光学性能は格段に向上する。その結果、インフレーションモデルのより詳細な検証が可能となる。

また、本成果によって実証された反射防止加工技術はCMB観測だけでなくあらゆるサブミリ波用光学デバイスに応用可能である。平面への加工だけでなく曲面への加工が可能であることも部分的に実証済みであるため、多様な分野への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to increase the sensitivity of the next-generation CMB polarization observation satellite, we developed an antireflection fabrication technique that is necessary for broadband and high-frequency silicon optical devices used in the telescope. Anisotropic dry etching was used to fabricate a three-step micro-periodic structure on the surface of a 35 mm square silicon chip; each side of two chips was processed, and the unprocessed surfaces were bonded by surface activation using ion beam irradiation. Low-temperature transmittance measurements showed that an average transmittance of 98% was achieved from 200 to 450 GHz. The measured transmittance agreed well with the results of electromagnetic field simulation.

This technology is expected to be a breakthrough for broadening the bandwidth and increasing the frequency of submillimeter-wave observation optical devices.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙物理学 宇宙マイクロ波背景放射 フォトリソグラフィ ドライエッチング 反射防止

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光観測によって、インフレーション仮説の検証が可能である。大角度スケールでの CMB 偏光観測のためには衛星を用いた全天観測が必要となる。衛星による CMB 偏光観測では望遠鏡の広帯域化が感度向上のための重要な要素であるが、光学素子の周波数帯域の制約により望遠鏡の観測帯域が制限されてしまう。それは主に、集光レンズやローパスフィルターといった透過型の光学素子の表面反射による観測効率の低減によって生じる。

そのため、これら透過型光学素子の表面には反射防止加工を施す必要がある。すなわち、透過型光学素子の表面反射防止加工の光学性能が CMB 偏光観測の感度に直結する。

2. 研究の目的

本研究の目的は次世代の CMB 偏光観測衛星の高感度化を目指し、そのために必須となる透過型光学素子の広帯域化・高周波化技術の開発を行う。ドライエッチング加工を用いてシリコン表面に広帯域・高周波の反射防止構造を形成し、望遠鏡の比帯域を拡張することで次世代 CMB 偏光観測衛星によるインフレーションモデルの詳細な検証を可能にする。

3. 研究の方法

光学素子部材はシリコンを選択する。反射防止加工には、入射波長よりも十分に小さいスケールの周期構造を配置するサブ波長構造を用いる。ドライエッチング加工を採用することによって、従来の機械加工やレーザー加工では実現不可能であった高アスペクト比かつ微細な多段構造を形成することで、これまでにない広帯域・高周波の反射防止構造を持った光学素子の開発が可能となる。

本研究ではシリコンチップ平面への多段ドライエッチング加工の技術立証に焦点を置く。反射防止構造として構造周期 $180\mu\text{m}$ の 3 段構造の加工を行う (図 1)。期待される光学性能は $200 - 450\text{GHz}$ において平均透過率 98% となる。

プロセスフローを図 2 に示す。異なる 3 種のパターンをチップに転写するため、フォトリソ、アルミ、熱酸化膜の 3 層の異なるマスクパターンを用い、各層のエッチング、マスク層除去を繰り返すことで 3 段構造の加工を行う。チップ両面への加工が必要となるため、2 枚のチップの片面に加工を行い未加工面同士を接合する。チップ接合にはイオンビーム照射による表面活性化を用いた接着剤を使用しないボンディングを採用する。

加工を行ったチップの光学性能を低温環境下で評価し、期待性能を達成できた場合は研究目標達成とする。

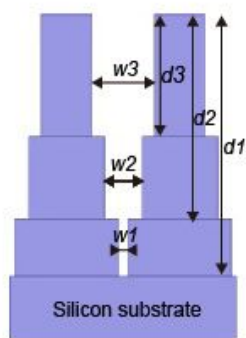


図 1. 3 段反射防止構造

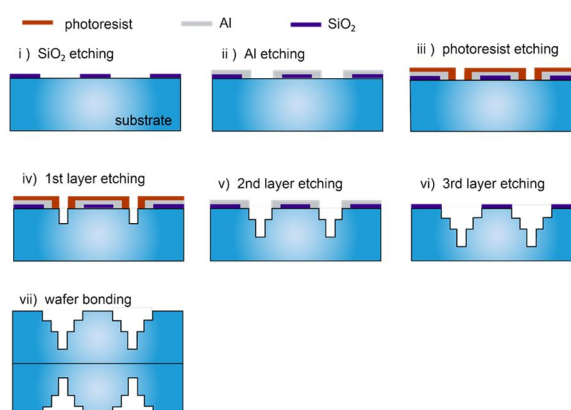


図 2. 3 段構造作成プロセス

4. 研究成果

チップの作成は JAXA 宇宙科学研究所内クリーンルームで行った。チップサイズは 35 mm 角である。作成した 3 段構造を電子顕微鏡で撮影した画像を図 3 に示す。レーザー顕微鏡でチップ表面の 9 点をサンプリングし形状測定の評価を行った。溝幅、深さともに概ね設計値に対して誤差 1 % 以内に抑えることに成功した。

チップ 2 枚の加工を行った後、ウェーハー接合を外注した。接合後のチップの低温透過率測定を国立天文台先端技術センターにて実施した (図 4)。チップを液体ヘリウムデューワー内で冷却した。



図 3. 作成した 3 段構造の写真

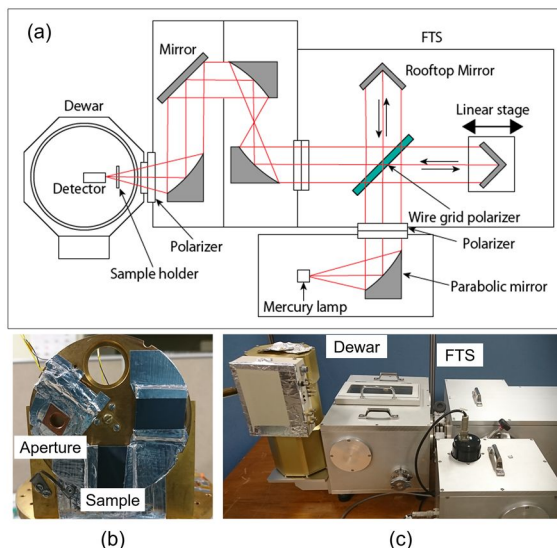


図 4. 低温透過率測定試験セットアップ。(a) 測定系の概略図。(b) チップをデューワーに設置した様子。(c) 測定系の写真。

透過率測定の結果を図 5 に示す。黒点が実測値である。実線は反射防止構造の形状を用いて電磁界シミュレーションを行った結果である。実測値はシミュレーションの値とよく一致していることがわかる。実測値で 200 - 450 GHz において平均透過率 98 % が得られ、目標光学性能を達成した。

本研究の成果によって、多段ドライエッチングによる反射防止加工の実証に成功した。本技術は CMB をはじめとしたサブミリ波観測用光学素子の広帯域化・高周波化のためのブレイクスルーになると考えられる。

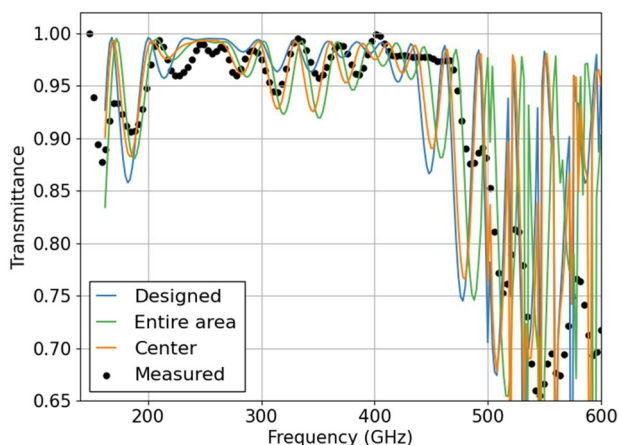


図 5. 低温透過率測定試験の結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hasebe Takashi, Hayashi Tasuku, Shohmitsu Yoshinori, Nitta Tom, Matsuo Hiroshi, Sekimoto Yutato	4. 巻 60
2. 論文標題 Fabrication of three-layer silicon antireflection structures in 200-450 GHz using deep reactive ion etching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 10462 ~ 10462
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.441969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 長谷部孝, 林佑, 正光義則, 新田冬夢, 松尾宏, 関本裕太郎
2. 発表標題 多段ドライエッチングを用いたミリ波観測用シリコン素子の反射防止加工の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷部孝, 林佑, 正光義則, 新田冬夢, 松尾宏, 関本裕太郎
2. 発表標題 多段ドライエッチングを用いたサブミリ波 観測用広帯域シリコン光学素子の開発
3. 学会等名 第22回ミリ波・サブミリ波受信機ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長谷部孝, 林佑, 正光義則, 新田冬夢, 松尾宏, 関本裕太郎
2. 発表標題 深掘りドライエッチング加工を用いたミリ波観測用広帯域シリコンフィルターの開発
3. 学会等名 第21回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷部孝, 林佑, 正光義則, 新田冬夢, 松尾宏, 関本裕太郎
2. 発表標題 異方性ドライエッチングによる多段サブ波長構造を用いたCMB観測用広帯域シリコンフィルターの開発
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷部孝, 佐々木実
2. 発表標題 曲面エッチング加工を用いたサブミリ波観測用広帯域シリコンレンズの開発
3. 学会等名 日本天文学会年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------