

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740182

研究課題名(和文)宇宙マイクロ波背景放射偏光観測のための広帯域反射防止膜の開発

研究課題名(英文)Development of a broadband anti-reflection coating for use in a cosmic microwave background polarization experiment

研究代表者

松村 知岳 (Matsumura, Tomotake)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・特任助教

研究者番号：70625003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：インフレーション仮説を検証する宇宙マイクロ波背景放射の偏光測定では広帯域観測が必須となる。望遠鏡に用いる光学素子は、表面反射を抑えるために反射防止膜を施す必要があるが、従来のコーティングによる極低温で広帯域を実現するのは難しい。本研究ではモスアイ加工を光学素子表面に施すことで広帯域反射防止膜を作成した。光学素子材料としてRexolite、アルミナに対して、ダイシングソーやレーザーを用いた加工にてプロトタイプを作成、またその評価測定システムの構築を行い、プロトタイプ素子の評価を行った。加工方法やレーザーの選定など今後、大型光学素子への広帯域反射防止膜を実現するための基礎検討としての成果を上げた。

研究成果の概要(英文)：The measurements of the cosmic microwave background polarization can provide the tool to probe the inflationary paradigm. One of the key features in the measurements is to cover the broad bandwidth and the corresponding optical system. Traditionally the broadband anti-reflection coating is done by applying the multi-layer on an optical components. At the cryogenic temperature the multi-layer coating tends to peel off and this has never been established as a robust technology. We propose to fabricate a moth-eye structure on an optical element. We investigate the machinability on a material such as rexolite and alumina by using the dicing saw and laser machining. We also constructed the measurement setup to evaluate the transmission and polarization properties of a prototype sample. The moth-eye structures on a rexolite show the agreement between the predicted performance and the measurements. We also evaluate the prospect of a moth-eye machining for a larger sample, a diameter of 300-mm.

研究分野：数物系 科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ミリ波 宇宙マイクロ波背景放射 インフレーション 広帯域反射防止膜 偏光 誘電体 微細加工  
極低温

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)が発見されて以降、WMAP衛星をはじめとするCMB温度揺らぎの精密測定により $\Lambda$ CDMビッグバン宇宙論が確立された。しかし、ビッグバン宇宙論では説明のつかない、宇宙の平坦問題や地平線問題、また物質の揺らぎの起源などを一挙に説明できる仮説として宇宙開闢直後に指数関数的宇宙膨張(インフレーション)が提唱されている。もしインフレーションが存在すると、急激な膨張により初期宇宙の原始重力波が引き延ばされ、最終散乱面にてCMB偏光に原始重力波による偏光パターン(B-mode)が刻印される。このB-modeシグナルの強度をパラメータ化した値、 $r$ (テンソル・スカラー比)、を定義する。WMAPやCMB地上実験から現在のインフレーションのエネルギースケールは $r < 0.21$ という上限値がついている。研究当初、世界的に $r \sim 0.01$ の発見を目指す地上、気球、そして $r \sim 0.001$ を目指す衛星実験計画が推進されていた。こうした次世代CMB偏光実験はインフレーションへの感度だけでなく、ダークエネルギーを含む標準宇宙論パラメータ、またニュートリノの質量和の制限への感度もあり素粒子物理からもその成果が期待されている。CMB観測では高統計を実現するために光子や望遠鏡を用いる必要がある。そのため、広視野を実現するために反射鏡だけでなくレンズの使用が必須となる。一方で、CMB偏光シグナルと我々の住む銀河系内からの放射(シンクロトロンやダスト放射など)を区別するために、スペクトル形状の違いを用いてCMBを推定する。故に、望遠鏡は広帯域にて観測する事が必要となる。これらの実験の成功の鍵となるのが、広帯域の反射防止膜の実現であり本研究成果は学術的に大きな重要性を持つ。

### 2. 研究の目的

レンズ系を用いた広帯域観測は、広帯域反射防止膜が必要となり技術的にチャレンジとなり、その技術が確立していない。故に、本研究では極低温で広帯域反射防止膜の開発を目的とする。

### 3. 研究の方法

反射防止膜の方法として二通りの方法を検討する。一つは従来型の方法として薄膜をレンズ材料の上に施す事で、反射防止膜とする。広帯域にするためには、多層膜が必要となり、極低温にした場合の熱膨張係数の違いによる剥離などを考慮し材料選定の最適化を行う。また、もう一つの方法として加工を用いた反射防止膜の作成を行う。観測波長よりも十分小さい波長にて微細加工をレンズ表面に施した場合、レンズ材と空気層の占有割合によってレンズ材と空気層の中間程度の実効的な屈折率を実現する事ができる。これにより、コーティングで問題なりうる剥離の問題も解決できるために、極低温反射防止膜と

して有用な可能性がある。広帯域にするには表面加工形状をピラミッド型にする必要があり、屈折率の変化をテーパーすることで実現する。本研究では、この二つの方法の広帯域反射防止膜の方法について技術を確立を目指す。また、同時に反射の影響として透過率を測定できる試験環境を構築する。

### 4. 研究成果

#### (1) 広帯域反射防止膜の設計検討

広帯域反射防止膜は真空の屈折率1とレンズ材の屈折率のインピーダンスマッチングを多層コーティング、また微細構造にて実現する。プロトタイプを作成するために、広帯域反射防止膜の設計を行った。多層コーティングでは、層数と各層の屈折率、また構造の場合はピラミッド形状を仮定して高さ、ピッチ、実効的層数等をパラメータとして開発した有効媒質理論を用いたモンテカルロシミュレーションにて最適化を行った。CMB地上実験POLARBEAR及び将来科学衛星計画LiteBIRD、またそれらのプロトタイプ試験を想定した設計を行った。

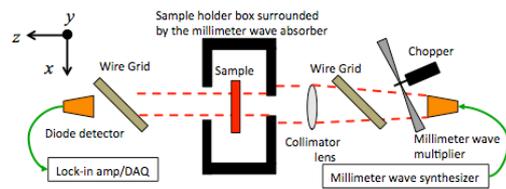


図2、ミリ波透過率及び偏光特性測定装置

#### (2) 試験環境構築

図1にあるミリ波透過率及び偏光特性測定装置を開発した。ミリ波信号源と通倍器を用いて72-162GHz帯域の透過特性及び偏光特性を測定できる。単一周波数にてチョッパーにて変調された信号をロックインにて復調し、透過強度を測定する。測定はLabviewによって自動制御で行えるようにした。

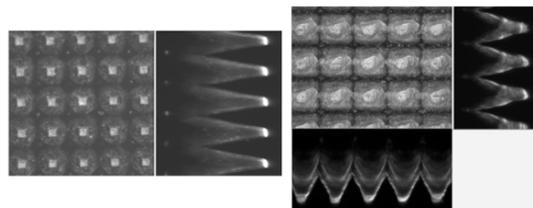


図1、紫外線レーザーによる加工(左)。赤外線レーザーによる加工(右)。

#### (3) 2層コーティングによる広帯域反射防止膜の開発

従来型の多層コーティングによる広帯域反射防止膜を、アルミナをレンズ材として極低温接着剤として用いられるStycastを利用し開発した。アルミナとStycastの熱収縮率は異なるが、熱収縮を緩和するために溝加工を

施す事によって100mm程度の表面サイズでも剥離がないことを示した。また、溝加工により懸念された偏光に対する影響もない事を確認した。本研究の成果により、アルミナを用いた赤外線カットフィルターの広帯域反射防止膜を実現する事が可能となった。

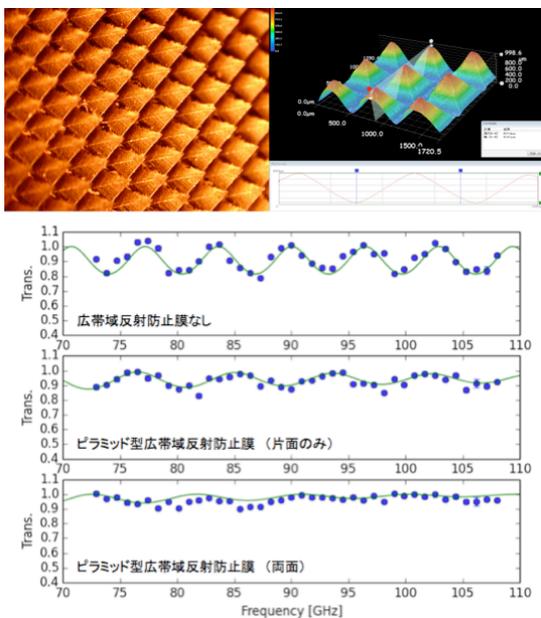


図 3、機械加工した Rexolite 表面の拡大図 (左上)。微細構造の形状測定 (右上)。透過率測定結果 (下)。

#### (4) Rexolite をレンズ材とした機械加工による広帯域反射防止膜の作成及び評価

架橋ポリスチレンを材料とした Rexolite はミリ波での透過性及び放射耐性、さらに加工性に優れている。この Rexolite の表面に微細ピラミッド構造 (高さ $\sim 1000\mu\text{m}$ 、ピッチ $\sim 600\mu\text{m}$ ) を機械加工した。50mm の直径のディスク型試作品の片面、両面、そして球面レンズの表面への加工を実現した (図 2 を参照)。図 2 に示すのは 72-162GHz 帯域にてミリ波透過率及び偏光特性測定を測定結果である。これにより、有効媒質理論の近似の範囲内で行った設計による透過率と測定結果の整合性が確認でき、大型化も含めた Rexolite を用いた機械加工による実現性を示した。

#### (5) アルミナをレンズ材とした機械加工による広帯域反射防止膜の作成

アルミナはミリ波帯域にて高い透過性を示し、また屈折率が $\sim 3$ 程度あることから、大型口径レンズ材として注目されている。アルミナは Rexolite と比べると加工性が悪いため、レーザーを用いた微細構造加工を検討した。紫外線 (248nm) 及び赤外線 (CO<sub>2</sub>, 10.6 $\mu\text{m}$ ) レーザーの 2 種類を候補として、ピラミッド加工 (高さ $\sim 600\mu\text{m}$ 、ピッチ $\sim 300\mu\text{m}$ ) を試みた。図 3 に示すのはそれぞれの方法で行った加工表面の形状測定結果である。紫外線レーザーは波長が短いために、加工精度が赤外

線レーザーと比べ高い。一方で、紫外線レーザーの加工速度は赤外線レーザーと比べると 2.5 倍程度遅く、また加工にかかる価格は 5 倍程度高価である。実用化に向けて広い面積に対して加工を行う場合は、加工精度と加工速度の最適化が必要な事がわかった。

#### 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 4 件)

① T. Matsumura, 他 5 5 人の著者。  
Cosmic Microwave Background polarization experiment, POLARBEAR-2.  
Proceedings of the 12<sup>th</sup> Asia Pacific Physics Conference.  
査読有、JPS Conf. Proc. 1 2014, 013108-1.  
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSCP1.013108>

② T. Matsumura, 他 6 8 人の著者。  
Mission design of LiteBIRD,  
Journal of Low Temperature Physics.  
査読有、175. 2014.  
[10.1007/s1090-013-0996-1](http://dx.doi.org/10.1007/s1090-013-0996-1)

③ Y. Inoue, T. Matsumura, M. Hazumi, A. T. Lee, T. Okamura, A. Suzuki, T. Tomaru, H. Yamaguchi.  
Cryogenic Infrared filter made of alumina for use at millimeter wavelength.  
Applied Optics.  
査読有、Vol. 53, No.9. 2014, 1727.  
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.53.001727>

④ T. Matsumura.  
Mitigation of the spectral dependent polarization angle response for achromatic half-wave plate.  
Submitted to Applied Optics. 査読有り。  
arXiv:1404.5795 (2014) .

[学会発表] (計 2 件)

① 松村知岳、LiteBIRD working group、  
LiteBIRD のための変調偏光器。日本物理学会 2014 年春季大会、東海大学。

② 松村知岳、LiteBIRD working group、  
LiteBIRD の HWP と焦点面設計。宇宙背景放射を含むミリ波サブミリ波観測のシステム (招待講演)。2013 年 11 月 岡山県倉敷。

[図書] (計 1 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 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 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

松村 知岳 (Tomotake Matsumura)  
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子  
核研究所 特任助教  
研究者番号：70625003

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：