

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18790

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メタマテリアル方式半波長板の開発

研究課題名（英文）Development of a meta-material based half-wave plate for a measurement of the cosmic microwave background polarization.

研究代表者

松村 知岳（Matsumura, Tomotake）

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：70625003

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙マイクロ波背景放射に搭載することを目指し、微細加工メタマテリアル式大型半波長板の実現性について研究を行った。熱及び光物性よりミリ波光学材として適した部材の中で特に大型化が可能なアルミナに着目した。難加工材であるアルミナに対し、ダイシング微細溝加工により半波長板の実現性を示した。また、大型化に向け、特に3次元プリンターによるアルミナ造形、また長短波レーザーによるアルミナ微細加工の2つの加工方法に着目し試作を行った。ミリ波で求められる加工精度には十分であり、大型化に対して対応できる加工用ステージが準備できれば、それ以上の技術的な制約はないため、今後の発展性が期待できることが本研究にて示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙論における最大の謎の一つがインフレーション仮説の検証である。宇宙マイクロ波背景放射偏光観測は宇宙初期の事象を観測できる数少ない実験手法である。特にナノケルビンの輻射の変化を捉える観測装置は非常に高感度が要求されており、偏光変調器はその実現への鍵となる装置である。本研究は高感度に必須となる大型化に対して、微細溝加工にて実現するための検討であり、日本発の技術開発が将来のインフレーション仮説の検証に寄与する可能性があり意義深い。また、ミリ波の微細加工技術は高速通信技術（5G）の次の世代の技術（6G）として注目されている周波数に対応し、将来的にミリ波技術の社会的な波及性も期待できるため意義深い。

研究成果の概要（英文）：We studied the feasibility of using an alumina as a birefringent material by fabricating an array of grooves on its surface. Among a number of candidate materials for a millimeter wave telescope we particularly targeted alumina due to its availability in size together with the thermal and millimeter wave properties. First, we machined the square groove on an alumina disk by dicing saw. This is to show the concept demonstration of fabricating the birefringent material to hard material, like alumina. While a dicing is limited due to the wear and tear for a larger area machining, we further investigate the possibility of 3D printing and laser machining. In both cases, the machinability that is required for a millimeter wave telescope is feasible and the limitation to the large area machining, a diameter of ~0.5 m, is only limited by an available stage size. With this concept demonstration, we developed a path forward to fabricate the large diameter wave plate using a micro-machining.

研究分野：宇宙物理

キーワード：インフレーション ミリ波光学 微細加工 レーザー 3Dプリンター

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 (Cosmic Microwave Background = CMB) の偏光観測によりインフレーション仮説の検証が可能である。現在、世界中でその最初の発見に向けて高精度観測計画が進行中である。特に、米国を中心に大型地上望遠鏡群 (Simons Array, Simons Observatory, Stage-IV) などが観測中、また観測準備中である。また、日本を中心に衛星計画 LiteBIRD が計画されている。インフレーションによる CMB 偏光信号 (B モード) は、CMB の 3K の黒体複写の偏光成分の揺らぎとして観測される。その信号強度から求められる観測感度はナノケルビン程度であり、地上でも衛星でも、高い統計感度と系統誤差の低減が求められている。前者を克服するために、望遠鏡の口径は大型化し、それに伴い光学系や焦点面検出器も大型している。偏光観測において、系統誤差の低減に鍵となる半波長板偏光変調器も同じく大型化が求められている。半波長板偏光変調器は、光学系に複屈折材料である半波長板を搭載し、回転させることで、入射直線偏波を回転させることができる。これにより偏光信号を変調することができ、観測装置由来の揺らぎとの縮退を解くことができる。非常に優れた装置であるが、望遠鏡の大型化に伴い大型半波長板が求められている。現在、南極地上望遠鏡 BICEP などインフレーション由来の B モード偏光信号が現れると期待されている大角度相関を狙う望遠鏡は 30cm 程度の口径を持つ。複屈折材としての候補は CMB のミリ波帯域ではサファイアが光学物性を含むその特性により主に用いられている。しかし、人工的に作ることができるサファイアの直径は 30cm 程度であり、品質を問わなければ 50cm 程度まで手に入る可能性はあるが、安定的な供給源は担保されていない。

2. 研究の目的

高感度化を目指し大型化する宇宙マイクロ波背景放射偏光実験に対応すべく、人工的に光物性を設計、作成することができるメタマテリアル方式の偏光変調器のための光学素子、半波長板を開発する。波長よりも小さい構造を誘電体に作成した場合、その部分の屈折率は真空と誘電体の屈折率の間の値を持つことになる。真空と誘電体の占める割合を調整すると自由に屈折率を設定することができ、結果として人工的に光物性を設計し作成することができる。一様な誘電体材料を微細加工することにより、複屈折材料を作成する。これにより高感度インフレーション探索 CMB 望遠鏡の設計制約が半波長板の大きさにて制約されないための道を切り開く。

3. 研究の方法

ミリ波で透過性の高い材料でかつ大型材料 (~1m) 程度が実現可能な材料としてプラスチック材及びアルミナに注目した。前者は安価に入手できるため、また後者は光学材料としての高い誘電率、低い誘電損失、さらに低温環境での高い熱伝導に着目した。入手の容易性を加味し、これらの材料の加工性を 3次元プリンター、レーザー加工、ダイシング加工を持ちいて、その微細加工の成立性を評価項目とし試作・評価を行った。

4. 研究成果

アイデアの実証として、複数のサンプルを設計及び作成した。例として、アルミナに対してダイシング加工にて溝を加工した(図1)。これにより複屈折材料を人工的に作成した。屈折率3.14のアルミナに対してピッチ0.35 μm 、幅0.18 μm 、深さ1.18mmの溝配列を加工した。対応する屈折率は溝に並行、そして直行方向それぞれ1.39と2.40になる。これにより126GHzを中心周波数とした半波長板とする。また、グレーティング効果による回折限界として使用可能な周波数領域の高周波側は200GHzとなる。この形状は、加工により最大の複屈折率の差が得られるように選択した。結果として、位相差 δ 、厚み d 、屈折率の差 Δn 、周波数 ν の関係 $\delta = 2\pi d\Delta n\nu/c$ より加工深さを最小化しアスペクト比を抑え加工性の容易性を優先した。また、この設計方針により、直径50mmのサファイアと加工したアルミナによる微細加工半波長板を同じ性能にて重量を比較するとサファイアが28gであることに対して、アルミナ微細加工半波長板は11gとなり2.5倍の軽量化となる。作成した試料に対し、直線偏波を垂直入射し試料を回転させることで、変調効率を測定することができる。透過率と波長板角度をプロットすると一回転で4回の振幅を得ることができ、確かに変調を実現していることが確認できる。(図2)。これにより、加工による難加工材誘電体でも複屈折材料が作れることを実証した。

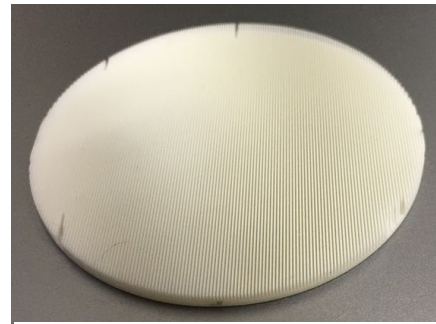


図1 アルミナに対するダイシングにより微細溝加工。

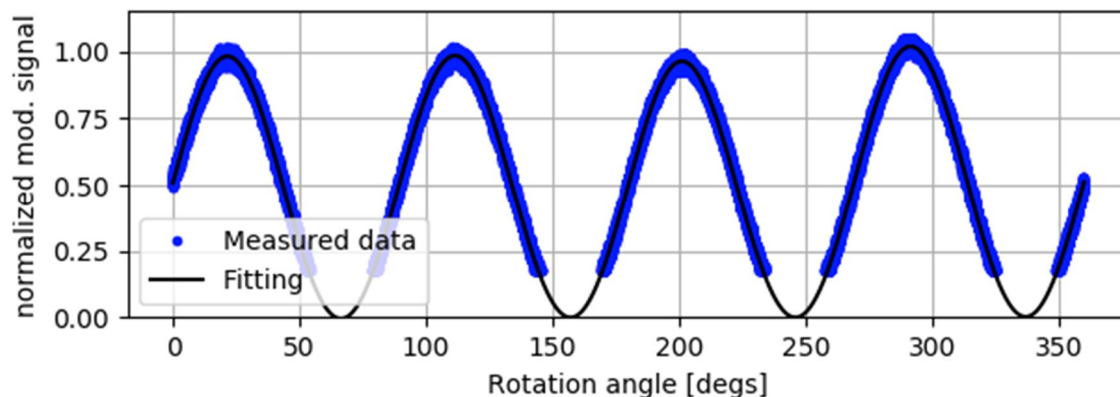


図2 入射直線偏波に対して溝加工波長板を回転させた場合の変調信号。周波数は112GHz。

また、さらなる広帯域性の可能性に向けて微細化構成を検討すべく複雑な加工形状を作成した。作成方法は実証目的として3次元プリンターを用いた。特に近年まだ技術革新がめざましいアルミナセラミックの3次元プリンターを用いた。図3に共焦点顕微鏡によるサンプルの構造を示す。また、長短パルスレーザー加工によるV溝加工も行い、それぞれアスペクト比4程度のV溝構造の作成は問題ないことを確認した。大型化に向けて、難加工材であっても3次元プリンター及びレーザー加工は共に現状では加工ステージによる制約はあるものの、加工ステージの大型化を行えば十分大型加工は可能であり今後の展開が期待できる。

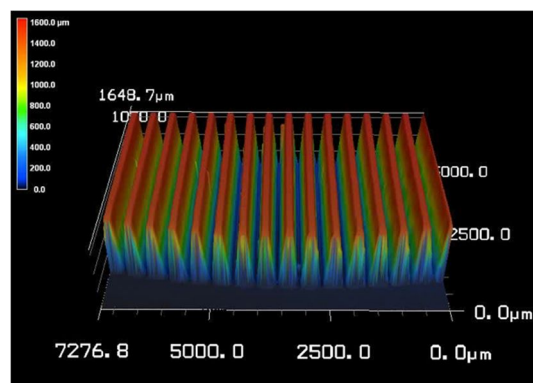


図3 3次元プリンターによるアルミナV溝加工例。

こうした微細加工による波長板の作成は、微細加工技術の発展により多様な可能性が広がり

つつある一方で、高透過率を実現するには溝加工による半波長板に反射防止機能を付け加える必要がある。設計は近年米国を中心にその設計については進展があったため、大型化への鍵として加工性の実証を優先して検討を行った。

本研究により、ミリ波光学材として適した特性を持つ一方で難加工材であるアルミナセラミック対し、微細加工により半波長板の実現性を示した。また、大型化に向け、特に3次元プリンターによるアルミナ造形、また長短波レーザによるアルミナ微細加工の2つの加工方法に着目した。共に、ミリ波で求められる加工精度には十分であり、大型化に対して対応できるステージが準備できれば、それ以上の技術的な制約はないため、今後の発展性が期待できることが本研究にて切り開くことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松村知岳
2. 発表標題 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測のためのサブ波長構造を用いた半波長板の開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----