

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740131

研究課題名(和文) 中間赤外線用イマージョングレーティングの開発：回折面への金属成膜技術の確立

研究課題名(英文) Development of Immersion Grating for Mid-infrared High-resolution Spectroscopy: Technique to Coat Metal on Diffraction Surface

研究代表者

猿楽 祐樹 (Sarugaku, Yuki)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員

研究者番号：10512147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：コンパクト・軽量な中間赤外線高分散分光装置を実現するキーデバイスとなるイマージョングレーティングの開発を実用化目前の段階まで進めた。低キャリア(高抵抗)CdZnTeが、波長5-20 $\mu\text{m}$ において、高い透過性(吸収係数が0.01/cm以下)を持つことを明らかにした。また、Alが回折面の反射膜として反射率も十分に高く(波長10-20 $\mu\text{m}$ において界面での反射率が95%以上)、低温での使用も可能であることを確認した。さらに実用レベルのCdZnTe大型イマージョングレーティング(成膜なし)を世界で初めて実現した。

研究成果の概要(英文)：We have advanced the development of an immersion grating, which could be the key device to realize a compact lightweight high-resolution spectrograph in the mid-infrared wavelength region. From precise measurements of transmittances of some candidate materials, it was found that low-carrier (high-resistivity) CdZnTe has high transparency (internal attenuation is less than 0.01/cm) at the wavelength range from 5 to 20  $\mu\text{m}$ . From experiments to coat flat substrate of CdZnTe with metal, it was found that Al has sufficient reflectivity as reflective coating on the diffraction surface and that the coating is durable at low temperature. Also, a practical large CdZnTe immersion grating (without coating) was fabricated, which is the first case in the world.

研究分野：赤外線天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：イマージョングレーティング 高分散分光 赤外線 CdZnTe

1. 研究開始当初の背景

(1) 中間赤外線波長帯に豊富に存在する分子の輝線・吸収線を高い波長分解能(高分散)で分光観測することにより、多様な天体の物理・化学的状態の精密測定が可能となる。特にこれからの天文学で発展が期待される惑星系が誕生するごく初期の段階(原始惑星系円盤)の観測や、生命の起源に関連する有機物(バイオマーカー)の検出等の強力な手段となる。

(2) 中間赤外線は、地上からでは大気吸収などの影響のため、系統的な観測を行うのが難しく、宇宙から観測することが必要となる。しかし、一般に高分散分光器は大型になるため衛星への搭載が実現してこなかった。これまでで最も波長分解能が高いのは、赤外線宇宙天文台 ISO の波長分解能 /  $\sim 3,000$  である。

(3) 衛星にも搭載可能な小型で軽量な高分散分光器を実現するキーデバイスとして、イメージンググレーティングが注目されている。その実現の技術的難しさから、天文観測用として実用化レベルにあるのは、Si を材料とした近赤外線観測用の素子の 1 例のみである。

2. 研究の目的

(1) 我々は、中間赤外線用のイメージンググレーティングの開発を進めている。イメージンググレーティングの開発要素として、材料の選定、精密溝加工、回折面の反射膜、入射面の反射防止膜の開発項目がある。中間赤外線用イメージンググレーティングの候補材料は CdZnTe である。CdZnTe は赤外線をよく透過し、この材料に精密な溝形状を実現できる目処もたっている。本研究では、実用化に必要な回折面へ反射膜成膜方法を検討し、高効率のイメージンググレーティングの実現を目指す。

(2) 最終的には、実現した素子を用いた中間赤外線高分散分光装置を開発し、衛星への搭載を目指す。具体的には、次期赤外線天文衛星 SPICA(JAXA 宇宙科学研究所と欧州宇宙機構等との国際協力ミッションとして検討が進んでいる)へ搭載することを提案しており、実現すれば世界で唯一の宇宙中間赤外線高分散分光装置となる。

3. 研究の方法

(1) CdZnTe 平面基盤に金属膜を成膜し、以下の評価項目を満たす膜材とその成膜条件を選定する。

基盤と膜の界面での反射率が波長 10-20 $\mu$ m において 95%以上。

熱サイクルによって剥離しないこと。

(2) 高効率のイメージンググレーティングの実現に要求される高い透過性(吸収係数

$<0.01\text{cm}^{-1}$ )を持つ材料を選定する。

(3) (1)で選定した膜材、成膜方法を用いて、CdZnTe グレーティングの回折面に成膜を施し、成膜前後の光学性能を評価する。

4. 研究成果

(1) CdZnTe 平面基盤に表 1 にある 6 つの条件で成膜を行い(ただし、Au は付着性向上のため、Cr をアンダーコートしている)、常温で基盤側から光を入射した際の赤外線反射率(空気-基盤面での反射と基盤-金属膜面での反射の両方を含む)を測定した。その値から基盤と反射膜界面での反射率を求め、番号 2、3、4、5 が我々の要求(波長 10-20 $\mu$ m において界面での反射率 95%以上)を満たすことが分かった(図 1、図 2)。

表 1. CdZnTe 製膜サンプル

No.	材質	厚さ (nm)	方法	基盤温度
1	Al	300	スパッタ	常温
2	Al	300	蒸着	常温
3	Al	300	蒸着	200
4	Cr/Au	2/300	スパッタ	常温
5	Cr/Au	2/300	蒸着	常温
6	Cr/Au	2/300	蒸着	200

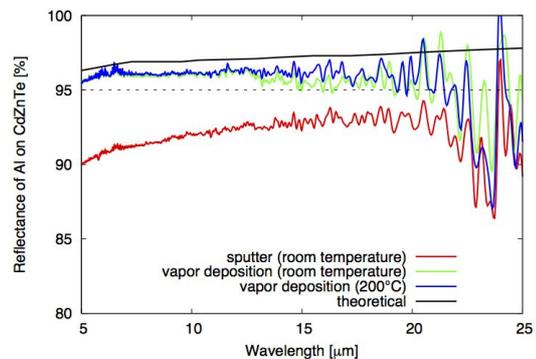


図 1. CdZnTe 平面基盤に Al を成膜した界面での反射率

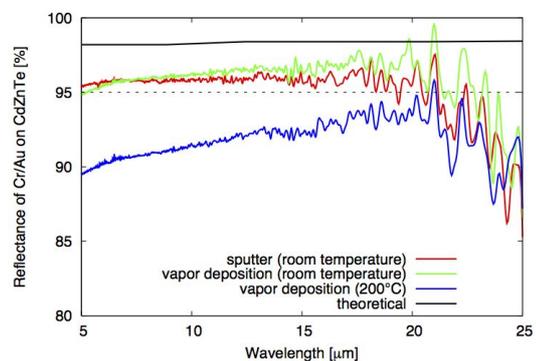


図 2. CdZnTe 平面基盤に Au(Cr をアンダーコート)した界面での反射率

また、すべてのサンプルを液体窒素に浸して 77K まで冷却し、その前後で剥離や反射特性に変化がないことを確認した。この実験から CdZnTe イマージョングレーティング反射膜の候補として複数の成膜条件が得られた。Al、Au とともに要求を満たす成膜条件が得られ、反射性能に大きな差はなかったが、理論値により近く、構造、工程がシンプルな Al 膜を反射膜の第一候補に選定した。

(2) 大型のブロックが民生品として入手可能な複数のサンプル(低キャリア CdZnTe、高キャリア CdZnTe、CdTe)の赤外線透過率を測定し、材料内部での吸収、散乱による減光の波長特性を非常にわずかなレベル(吸収係数  $\sim 0.001\text{cm}^{-1}$ )まで決定した。透過率を正確に測定するため、FTIR の光学系に独自の改良を加えて測定を行った。測定の結果、低キャリア CdZnTe のみが、波長 5-20  $\mu\text{m}$  において吸収係数  $< 0.01\text{cm}^{-1}$  を満たすことが分かった(図 3)。高キャリア CdZnTe の減光はフリーキャリア吸収が主な要因と考えられ、低温環境では低キャリア CdZnTe と同等の透過性が期待できる。一方、CdTe の減光は凝結体による散乱が主な要因と考えられ、低温でも我々の要求を満たさない。この測定から、低キャリア CdZnTe が、イマージョングレーティングに最適な材料として選定された。

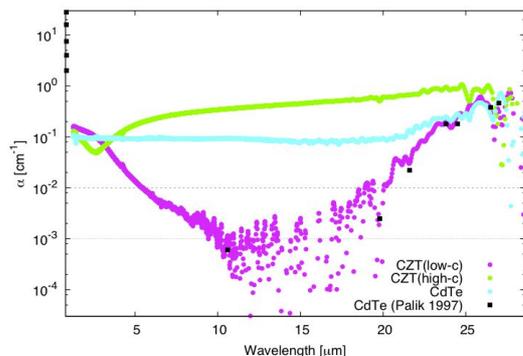


図 3. CdZnTe(低キャリア、高キャリア)、CdTe の吸収係数。

(3) CdZnTe 製グレーティングを試作し(図 4)、その光学性能を評価した(表 2)。これにより、実用的な CdZnTe 大型イマージョングレーティング(成膜なし)が世界で初めて実現された。

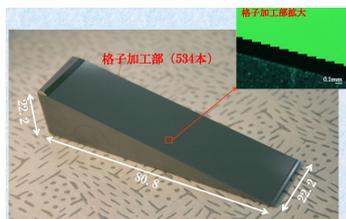


図 4. 大型 CdZnTe 製イマージョングレーティング(成膜なし)

表 2. 大型 CdZnTe 製イマージョングレーティング(成膜なし)の光学性能評価

項目	仕様値	評価結果	判定
面精度	< 126 nm (PV)	40 nm (PV)	
面粗度	< 8.8 nm (rms)	1.8 nm (rms)	
ランダム溝ピッチ誤差	< 9.1 nm (rms)	3.5 nm (rms)	
周期溝ピッチ誤差 (ゴースト強度)	< 1.8 nm (< 0.01%)	< 2.9 nm (0.026%)	or
波長分解能	R > 42,000	R > 50,000	or
相対回折効率	> 80%	> 81.6%	

## 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)

Yuki Sarugaku, Yuji Ikeda, Naoto Kobayashi, Takashi Sukegawa, Shigeru Sugiyama, Keigo Enya, Hirokazu Kataza, Hideo Matsuhara, Takao Nakagawa, Hideyo Kawakita, Sohei Kondo, Yasuhiro Hirahara, Chikako Yasui, Development of CdZnTe immersion grating for spaceborne application, Proc. SPIE 8442, 844257 (2012), DOI:10.1117/12.926742, 査読無

〔学会発表〕(計 5 件)

Sayumi Kaji, Yuki Sarugaku, Yuji Ikeda, Kenshi Nakanishi, Naoto Kobayashi, Sohei Kondo, Chikako Yasui, The precise measurement of the attenuation coefficients of various IR optical materials applicable to immersion grating, SPIE 2014 Astronomical Telescopes + Instrumentation, 2014/6/22~27, Canada

池田優二、猿楽祐樹、加地紗由美、小林尚人、助川隆、杉山成、近藤荘平、河北秀世、安井千香子、近中間赤外線用大型 CdZnTe 製イマージョングレーティングの光学評価、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013/9/10~12、宮城

加地紗由美、猿楽祐樹、池田優二、中西賢之、近藤荘平、河北秀世、安井千香子、小林尚人、近中間赤外線イマージョングレーティング用光学材料の吸収係数精密測定、日本天文学会 2013 年秋季年会、2013/9/10~12、宮城

猿楽祐樹、池田優二、小林尚人、助川隆、杉山成、P.J. Kuzumenko、塩谷圭吾、片ざ宏一、松原英雄、中川貴雄、河北秀世、近藤荘平、平原靖大、安井千香子、近中間赤外線用

イマージョン回折格子の開発 VII - CdZnTe  
グレーティングの製作と金属反射膜、日本天  
文学会 2012 年秋季年会、2012/9/19~21、  
大分

Yuki Sarugaku, Yuji Ikeda, Naoto  
Kobayashi, Takashi Sukegawa, Shigeru  
Sugiyama, Keigo Enya, Hirokazu Kataza,  
Hideo Matsuhara, Takao Nakagawa, Hideyo  
Kawakita, Sohei Kondo, Yasuhiro Hirahara,  
Chikako Yasui, Development of CdZnTe  
immersion grating for spaceborne  
application, SPIE 2012 Astronomical  
Telescopes + Instrumentation, 2012/7/1~  
6, The Netherlands

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

猿楽 祐樹 (SARUGAKU, Yuki)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
研究員  
研究者番号：1 0 5 1 2 1 4 7

### (2) 主要な研究協力者

池田 優二 (IKEDA, Yuji)  
京都産業大学・理学部・特任研究員  
研究者番号：4 0 5 5 0 6 1 1

小林 尚人 (KOBAYASHI, Naoto)  
東京大学・理学系研究科・准教授  
研究者番号：5 0 2 8 0 5 6 6