

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月17日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740125

研究課題名（和文） 次世代大型望遠鏡搭載の可視・赤外線 ZnS 製イマージョングレーティングの実現

研究課題名（英文） Realization of optical/near IR ZnS immersion grating for next generation large telescopes

研究代表者

池田 優二（IKEDA YUJI）

京都産業大学・理学部・准教授

研究者番号：40550611

研究成果の概要（和文）：

次世代大望遠鏡用可視～近赤外線高分散分光器の主分散素子となる ZnS 製小型イマージョングレーティングの開発を行った。超精密加工機を用いたフライカット法による加工検討を進めた結果、溝加工においては相対回折格子で 72.8%@1 $\mu$ m を達成することができた。また、反射コーティングにおいても、Cu コーティングを用いた新しいアイデアの膜の試作を行い、目的の波長域（0.8-1.5 $\mu$ m）において目標値である 90%以上の反射率が達成できる反射コートを実現できた。以上により、ZnS イマージョングレーティングの実現に向けての道筋を立てることができた。

研究成果の概要（英文）：

We developed ZnS immersion grating which is a main disperser for the next generation optical/NIR high resolution spectrograph attached to the ground-based 30m telescopes and/or large space telescopes. Using a fly-cutting technique with the nano precision machining equipment in LLNL, we obtained the grooves on the CVD-ZnS prism with the relative diffraction efficiency of 72.8% at 1  $\mu$ m. And, we succeeded to fabricate the new reflective Cu coating with a SiO<sub>2</sub> protection and anti-reflection thin-layer between the ZnS bulk and Cu, which achieved the high reflectivity over 90% from 0.8 to 1.5 $\mu$ m. Therefore, we have a prospect of realizing the ZnS immersion grating for optical and NIR astronomical application.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：赤外線、可視光、高分散分光、イマージョングレーティング、ナノテクノロジー

## 1. 研究開始当初の背景

現代の赤外線天文学において、高分散分光（波長分解能： $\lambda/\lambda > 70,000$ ）の要求はますます

高まりをみせている。今や主流となっているドップラー法による系外惑星探査に加え、クエーサーやγ線バーストをもしひた銀

河間物質の宇宙年齢スケールでの化学進化の研究、原始惑星系円盤の分光観測による宇宙生命学、惑星および彗星の分子分光による太陽系の起源の研究などテーマを挙げれば枚挙にいとまがない。これからの天文学の10年間を俯瞰すると、アメリカが中心となって進めている30m地上望遠鏡計画(TMT計画)や日本が主導する3m赤外線望遠鏡計画(SPICA計画)など多くの超大型望遠鏡計画が進みつつあり、単位波長幅( $\Delta\lambda$ )あたりの光子数の向上が研究の進歩に本質的に重要な高分散分光の需要は、こうした大望遠鏡の実現とともにますます加速されていくと考えられる。

ところが、大型望遠鏡に搭載する高分散分光器を実現する上で一つの技術的な壁があることが知られている。それは装置のサイズに関するもので、例えば望遠鏡の口径が30mにもなると、非現実的に大きな高分散分光器が必要になるのである。例えば、すばる望遠鏡(D=8m)に搭載されている高分散分光器「HDS」は5m x 5m x 5m近くのサイズであるが、もし同等の機能の分光器を30m望遠鏡搭載用に設計すると、 $\sim 20\text{m} \times 20\text{m} \times 20\text{m}$ ものサイズになることが、回折格子の理論から導くことができる。さらに、赤外線分光器においては、装置内部を極低温に冷却する必要があるため、同程度かそれ以上のサイズの真空冷却容器を準備しなければならない、莫大な開発時間とコストを要するということから実現性に乏しいと言わざるを得ない。

## 2. 研究の目的

背景で述べたような困難を解決するための手段として「イマージョングレーティング」という技術がある。イマージョングレーティングとは回折面媒質を屈折率 $n$ の媒質で満たしたグレーティングで、古典的な反射グレーティングの $n$ 倍にすることができる。逆に、もし波長分解能を維持すれば、ビーム径を $1/n$ にできる。つまり、観測装置をコンパクトサイズに保ったままで高波長分散分光が実現できるため、次世代大型望遠鏡用の光学素子として高い期待が寄せられている。しかしながら、光学ガラスを始めとする脆性材料への超精密な周期溝加工技術の困難さから、これまでに実用化されたものはほとんどない。唯一の例として単結晶シリコンをリソグラフィの技術を用いて、テキサス大のグループが実現させた(Marsh et al. 2007, Applied Optics, 46, 3700)が、シリコンは、波長1.4 $\mu\text{m}$ –6 $\mu\text{m}$ までしか光を透過しないため、観測天文学用途としては制限が多い。

そこで我々は、可視域から中間赤外線域まで広い波長範囲を透過可能なCVD-ZnSに注目し、その材料を用いての実用的な可視・赤外線イマージョングレーティングを実現化を

目指した。

## 3. 研究の方法

ZnS製イマージョングレーティングを実用化するためには、大きく二つの技術的課題をクリアする必要がある。一つは、「精密溝加工技術の確立」で、もう一つは「回折面への反射コーティング技術の確立」である。

前者については、加工試験をアメリカのローレンスリバモア国立研究所(LLNL)のPaul Kuzmenko博士の協力を得ながら、LLNLが誇る超精密ダイヤモンド旋盤加工機「PERL II」(図3)を用いて行った。PERL IIは、100mm以上のサンプル加工域を有しながらも、 $\pm 0.01\text{K}$ 以下での温度安定機構とレーザ干渉計によるclosed-loop制御によって、数nm以下の加工位置精度を実現できる世界屈指の精密加工装置である。加工方法については、本研究事業前にすでにZnSe基板に対して良好な結果を得ていた「フライカット切削法」によって行った(Kuzmenko, Little, Ikeda et al. 2008, SPIE prop. 7018 151)。加工溝ピッチは30 $\mu\text{m}$ 、ブレード角は70度で、これらは後に搭載予定の京都産業大学神山天文台に設置されている赤外線分光器WINEREDにおいて最適な分光スペクトルが得られる条件に合わせてある。探索加工条件としては、「刃物の回転速度」、「ステージ送り速度」、「刃物のすくい角」等がある。加工現場における加工条件の良否判定は、顕微鏡によるチップングの有無の確認と原子間力顕微鏡(AFM)による表面粗さの測定によって行った。さらに、サンプルの加工条件を適切に判断するために、グレーティングサンプルを光学性能評価できるシステムを独自に開発した。本システムは、大学研究室内の光学実験室定盤上に、可視光レーザ(He-Neレーザ)を光源とした光学系を組み上げ、サンプルグレーティングの回折光を冷却CCDカメラにて取得する構成となっている。グレーティングは赤外線波長域においても使用するが、評価は可視光線のみで充分である。むしろ、(i)可視光線は赤外線よりも回折現象に対して敏感なので、より精密な評価が可能、(ii)可視光線の検出器(いわゆるCCD)は感度が高く、より高いS/N比での測定が可能、(iii)回折光の様子を目視によっても確認できるため実験が容易、といったメリットさえある。本システムからは、グレーティングの光学理論を駆使することで「グレーティングの回折効率」、「波長分解能」、「バックグラウンド光」、「ゴースト光」などの情報を得ることができる。例えば、回折回数間に広がる淡いバックグラウンド光は溝のランダム周期誤差に起因することが理論的に知られており、その測定値から直接ランダム周期誤差を推測できる(Ikeda et al. 2008, SPIE prop. 7018, 152; Ikeda et al.

2008, SPIE prop. 7014, 102)。このように評価によってフィードバックをかけながら得られた条件を用いて、最終的に ZnS 製の小型イメージングレーティング（最終品の 1/3 サイズ）の完成までを行った。

後者の回折面への反射コーティングの開発においては、まずコーティングの厚さ公差が緩くかつ波長方向に対して反射率が平坦な金属コートを用いることにした。ただし、溝加工面の反射膜はブレイズ角分だけ傾いた面へのコーティングが必要な上、膜材の最有力候補である金 (Au) は、ZnS などの誘電体材料への密着力が弱いことが知られている。そこで、金以外にも銅 (Cu)、アルミニウム (Al)、銀 (Ag) も候補に入れ、かつ密着を向上させるための密着層の検討も併せて行った。具体的には、RCWA 法を用いたコーティングを施した状態での回折効率の計算から目標の反射率である 90%以上を達成する膜の組み合わせ候補を幾つか選び、実際にそれを膜密度の高いスパッタリング法によって試作を行って分光光度計を用いて特性を確認する、というのが一連の流れである。性能を満たす膜サンプルについては、望遠鏡のドーム内に放置しての対湿度/耐温度変化に対する環境試験も実施した。

#### 4. 研究成果

[精密溝加工技術の確立について]

初年度は、ZnSの加工特性を調べるために 1 インチサイズのCVD-ZnS基板および特性が近く比較対象として最適な材料であるZnSe基板への加工による試験を行った。加工は、共同研究者であるP. J. Kuzmenko博士が所属するアメリカのローレンスリバモア国立研究所 (=LLNL) のPERL-IIを用いたフライカット法によって行った。その結果、チップングの少ない良好な溝形状が得られ、独自開発した光学測定システムからは、回折格子において重要なパラメータである溝ピッチ誤差や面粗さともに10nm(rms)以下に抑えられていることが確認できた。二年目は、前年度に実施したZnSおよび同等材料であるZnSeの加工条件調査の結果を基にして、回折面サイズが50mmx80mmのプリズム上への精密溝加工を実施した。これによって小型ながらもほぼ完全な形でのイメージングレーティングを得ることができる。加工は昨年度までの同様、LLNLで実施した。その結果、加工試験時と同様の数nmのピッチ誤差を達成する良好な溝形状が得られていることが、明らかになった。しかしながら、試験加工に比較して、(1)チップングが多い、(2)回折面の面精度が悪い(スペック値 $\lambda/4$ に対して、 $\lambda$ 程度の面精度)、(3)ブレイズ角が狙い角から3度ほどずれている、(4)ゴーストが多い、といった新たな課題が認められた。これらの原因について詳細に調査した

ところ、(1)については高均質材を使えば問題ないこと、(2)については加工時の気圧変動が原因であること(温度については $\Delta T=0.01K$ でコントロールしている)、(3)についてはダイヤモンドバイトの角度にずれがあったこと、(4)については偶数列と奇数列の溝において、加工過程にシステマチックな違いがあることが分かった。そこで、最終年度には、二年目の小型イメージングレーティングの加工によって明らかになった問題点を一つずつ解消し、再度小型(1/3サイズ)イメージングレーティングを製作した(図1)。その結果、相対回折効率で72.8%@1 $\mu m$ 、溝ピッチエラー6.2nm(rms)のイメージングレーティングが達成できていることが分かった。

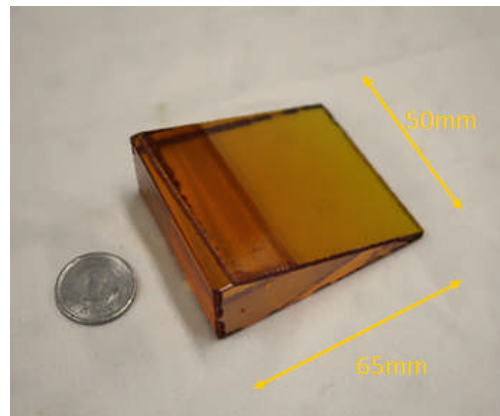


図1： 完成した小型イメージングレーティング

[回折面への反射コーティング技術の確立]  
反射面コーティングについては、まずは設計検討を行った。その結果、通常近赤外線域用いられる反射率の高いAuにCrの密着層を用いた方法よりも、SiO<sub>2</sub>を密着層としたCu膜の方が高い反射率が得られることが分かった。そこで、実際にマグネトロンスパッタリング法を用いて、ZnS基板へのコーティング試験を

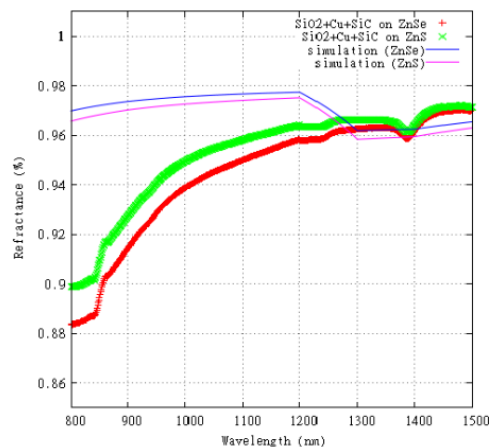


図2：Cu+SiO<sub>2</sub>膜の反射率測定結果  
実施した。製作したコーティングの反射特性を測定したところ、仕様全波長域反射率にし

てスペックを満たす90%以上の反射率を達成していることが分かった(図2)。さらに、半年間の高湿度環境下での耐性試験を実施したところ優位な性能劣化は認められないことが分かった。

以上により、可視・赤外線用イマージョングレーティング実現のめどが得られたと言える。

## 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] P. J. Kuzmenko, Y. Ikeda, N. Kobayashi et al. (2012), "Reflective coating for near infrared immersion gratings", SPIE proc. 8450, 845030, DOI: 10.1117/12.926668

[2] Y. Sarugaku, Y. Ikeda, N. Kobayashi et al. (2012), "Development of CdZnTe immersion grating for spaceborne application", SPIE proc. 8442, 844257, DOI: 10.1117/12.926742

[3] Y. Ikeda, et al. (2010), "Fabrication and current optical performance of a large diamond-machined ZnSe immersion grating", SPIE proc. 7739, 77394G, DOI: 10.1117/12.856631

[4] P. J. Kuzmenko, S. L. Little, Y. Ikeda, et al. (2010), "Progress in the fabrication of a prototype ZnSe immersion grating for the WINERED spectrograph", SPIE proc. 7739, 77393U, DOI: 10.1117/12.857804

[学会発表] (計9件)

[1] 福江慧、近藤莊平、中西賢之、川西崇史、中岡哲弥、新崎貴之、池田優二、河北秀世、藤代尚文、新井彰、三戸洋之、濱野哲史、安井千香子、小林尚人「近赤外高分散分光器「WINERED」:京産大 1.3m 望遠鏡におけるエンジニアリング・ファーストライトと光学性能評価」日本天文学会秋季年会 2012年9月19日 大分大学

[2] 川西崇史、池田優二、近藤莊平、福江慧、中西賢之、中岡哲弥、新崎貴之、河北秀世、藤代尚文、三戸洋之、濱野哲史、安井千香子、小林尚人、新井彰「近赤外線高分散分光器「WINERED」:1.7um cutoff HAWAII2-RG 検出器の評価」日本天文学会秋季年会 2012年9月19日 大分大学

[3] 中西賢之、池田優二、近藤莊平、福江慧、川西崇史、小林尚人、三戸洋之、安井千香子「近赤外高分散分光器「WINERED」:クライオスタット及び機械系の開発」日本天文学会春季年会 2012年3月21日 龍谷大学

[4] 福江慧、池田優二、近藤莊平、中西賢之、川西崇史、新崎貴之、小林尚人、三戸洋之、安井千香子「近赤外高分散分光器「WINERED」:京都産業大学荒木望遠鏡での光学系の調整」日本天文学会春季年会 2012年3月21日 龍谷大学

[5] 近藤莊平、池田優二、福江慧、中西賢之、川西崇史、三戸洋之、安井千香子、河北秀世、三好審、原哲也、米原厚憲、中道晶香、吉川智裕、藤代尚文、磯貝瑞樹、新井彰、小林尚人、「近赤外高分散分光器「WINERED」:京都産業大学 1.3m 荒木望遠鏡でのファーストライトに向けた開発状況」日本天文学会春季年会 2012年3月21日 龍谷大学

[6] 猿楽祐樹、池田優二、小林尚人、助川隆、杉山成、P. J. Kuzmenko、塩谷圭吾、片ざ宏一、松原英雄、中川貴雄、河北秀世、近藤莊平、平原靖大、安井千香子「SPICA 搭載用中間赤外線イマージョン回折格子の開発:溝形状の実現から実用性向上の成膜へ」日本天文学会秋季年会 2012年3月21日 龍谷大学

[7] 猿楽祐樹、池田優二、小林尚人、助川隆、杉山成、P. J. Kuzmenko、中川貴雄、河北秀世、近藤莊平、平原靖大、安井千香子「中間赤外線イマージョン回折格子の開発 VI- 中間赤外線用材料の適正評価」日本天文学会秋季年会 2011年9月20日 鹿児島大学

[8] 猿楽祐樹、小林尚人、池田優二、河北秀世、塩谷圭吾、片ざ宏一、松原英雄、中川貴雄、平原靖大、所仁志「SPICA 搭載中間赤外線分光撮像装置・高分散分光モードの開発」日本天文学会秋季年会 2011年9月20日 鹿児島大学

[9] 猿楽祐樹、小林尚人、池田優二「次世代赤外線天文衛星 SPICA 搭載用中間赤外高分散 Echelle 分光器の開発」日本天文学会秋季年会 2010年9月24日 金沢大学

[その他]

ホームページ等

<http://www.immersion-grating.com>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 優二 (IKEDA YUJI)

京都産業大学・理学部・准教授  
研究者番号：40550611