

# ATC 施設利用・共同開発研究 成果報告書

国立天文台先端技術センター センター長 殿

平成 31 年 2 月 28 日

下記のとおり施設利用の成果を報告します。

ふりがな： エビヅカ ノボル 代表者氏名： 海老塚 昇	③所属機関， 部局： 理化学研究所 光量子工学研究センター 先端光学素子開発チーム
研究課題名：すばる望遠鏡、TMT 用の新しい回折格子の開発	
利用期間：H30 年 14 月 1 日 ～ H31 年 3 月 31 日	
利用者リスト 海老塚 昇	
<p>研究開発の成果（ATC 施設利用との関連を具体的に記述してください。）</p> <p>天体望遠鏡の大型化に伴って分光観測装置も巨大になってしまう。透過型回折格子はコリメータや結像光学素子の近傍に置くことができるために、光学系および装置全体の小型化が可能であり、高分散の透過型回折格子の実用化が望まれている。TMT (Thirty Meter Telescope)や 8.2m すばる望遠鏡用として開発を行っている、新しい RFT (reflector facet transmission) grating (特許出願) や VB (volume binary) grating (厚い矩形回折格子) は、いずれも透過型の高次回折格子であり、大きな角度分散と高い回折効率を実現できる。そのためにこれらの回折格子によって、観測装置の感度の向上や小型軽量化が実現できる。我々は厳密結合波解析 (RCWA) を用いた計算によって、これらの回折格子の回折効率や波長帯域幅が最適になるような形状を求め、製作方法の開発を行っている。</p> <p>シリコンやゲルマニウムの Immersion grating は、分光観測装置の体積を従来の反射型回折格子に対して、媒質の屈折率の 3 乗分の 1 程度に小型化することが可能であり、特に近赤外線から中間赤外線において重要な分散工学素子である。我々は超精密ダイヤモンド切削や MEMS 等の最新技術を採用して、これらの回折格子の製作方法の開発を推進している。</p> <h3>1. RFT grating</h3> <p>RFT grating は図 1 のようにノコギリ歯形状の格子の一方の面から入射した光束が、もう一方の面で反射して格子の裏面の平面から回折光が射出する新しい透過型回折格子である。従来の屈折を利用する格子が階段形状の表面刻線型回折格子と比べて、RFT grating は格子の内部反射を利用するために、格子の屈折率が小さくても大きな回折角にも対応できる。</p> <p>RFT grating の製作方法として単結晶ダイヤモンドバイトを超精密加工装置に取り付けて無電解メッキのニッケル・リン合金のワークピースをシェーパー切削加工によって金型を製作し、金型から透過型回折格子をレプリカ加工する。昨年度に理研の超精密加工装置にダイヤモンド工具を取り付けて、シェーパー加工（カンナで削るような加工、図 2 左）によって RFT grating の金型の試作を 2 回行った。1 回目の試作品は格子の頂点付近にカエシ（バリ）が生じてしまった（図 2 中央と右）。レプリカ加工を行った結果、樹脂が金型から離型できなくなってしまう。2 回目の試験加工において、ほぼ理想的な格子形状を形成できる切削加工工程を見出した。近日中にレプリカ加工実験用の金型の試作を行う予定である。</p> <h3>2. VB grating</h3> <p>ULTIMATE Subaru の第一期観測装置として、既存の MOIRCS を改造して分光性能を向上させる nuMOIRCS が予定されている。ULTIMATE Subaru は、すばる望遠鏡に新しい地表層補償光学 (GLAO: Ground layer adaptive optics) を搭載することにより、広い視野にわたって大気揺らぎによる波面誤差を補正して星像のサイズを小さくし、限界等級と空間分解能を向上させる計画である。</p> <div data-bbox="212 1803 528 2011"></div> <div data-bbox="568 1796 1498 2011"></div> <p>図 1 RFT grating の概念図。 図 2 シェーパー切削法による RFT grating の鋳型の加工（左）鋳型の SEM 写真（中央）鋳型断面の概念図。</p>	

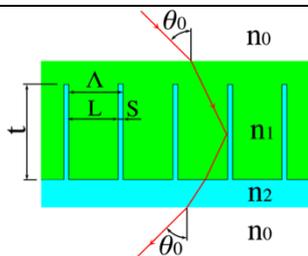


図3 VB grating の概念図。

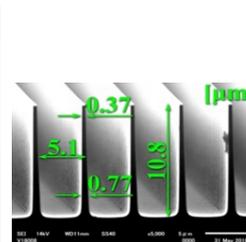
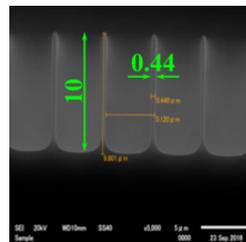
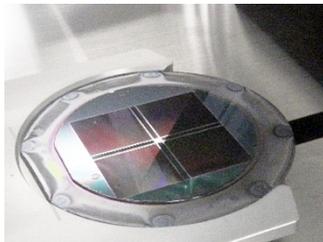


図4 シリコン基板の Deep etching (左) シリコンの高アスペクト回折格子の SEM 写真 (中央と右)。

nuMOIRCS に搭載されるエシェル・グリズム (直視回折格子) は垂直分散光学素子としての直視プリズムと組み合わせて、3~6 次回折光のスペクトルを撮像検出器上に折り込むことによって、0.9~1.8 $\mu\text{m}$  の広い波長範囲を同時に高分散分光観測ができるようになり、ULTIMATE Subaru の波長分解能 ( $\propto$ 速度) や観測効率の向上の鍵となる。そこで、図 3 のような高アスペクト比の VB grating について、RCWA 法を用いた回折効率の数値計算を行った結果、高次回折光において 70% 程度のピーク回折効率を達成できる格子形状を見出し、エシェル・グリズムを開発することになった。具体的には Line & Space が 2.0 $\mu\text{m}$ : 3.1 $\mu\text{m}$  のマスクを用いてシリコン基板上にレジストを形成し、サイクルエッチング (図 4 左) によって深い溝を形成して、酸化膜形成と除去を 2 回行い、図 4 中央のように 0.44 $\mu\text{m}$  の等幅で側面が極めて滑らかな格子や図 4 右のように多少テーパがある格子が得られている。これらのシリコンの矩形回折格子を型にしてレプリカ加工の実験を行っている。また、石英基板に薄いシリコンウエハを接合した SOQ (silicon on quartz) 基板を用いて、図 5 のような工程によってシリコンの矩形格子をさらに酸化させて、全体が石英の VB grating の製作方法を開発している (特許出願)。また、K バンドグリズム用の 1 次回折光の透過型回折格子についてもこの方法によって製作するために、現在はフォトリソを紫外線レーザーによる干渉露光によってパターンニングする方法について検討中である。

### 3. LightSmyth 社の新しい矩形回折格子

すばる望遠鏡の MOIRCS 用に開発した VPH グリズムの一部は波長帯域幅が狭く、視野の中心と端では、帯域の両端で回折効率が大きく変動するためにスペクトルの解析に労力を要する。最大回折効率 95% 以上を達成でき、帯域幅が広い新しい矩形回折格子 (LightSmyth 社製) と ZnSe プリズムを組合せた高分散グリズムを VPH グリズムの後継機として開発を行っている。現在、J バンド・グリズム用の透過型回折格子を入手して、評価を行なっている。また、H バンド・グリズム用の透過型回折格子は性能評価用サンプルの試作中である。

### 4. 近-中間赤外線グリズム

TAO 望遠鏡の MIMIZUKU は近-中間赤外線 (2~5.3 $\mu\text{m}$ )、中間赤外線 (6.3~26 $\mu\text{m}$ ) と中間-遠赤外線 (24~38 $\mu\text{m}$ ) の 3 バンドの観測チャンネルを有する。我々は 2015 年度より、近-中間赤外線チャンネル用のグリズムの開発に取り組んでいる。数回の試行錯誤や試験加工を経て、昨年度に超精密加工装置にダイヤモンド工具を取り付けて、シリコンのグリズム (24 $\times$ 24 $\times$ t2.8, 頂角 4.2 $^\circ$ ,) をフライカット加工 (回転工具による加工) によって試作を行った。しかし、格子面が粗面になってしまい、ピークの効率が 5% 程度であった。そのために、材料をゲルマニウムに変更してフライカット加工によってグリズムを試作した。数回の試行錯誤の結果、反射損失を除いて 75% 程度の効率を達成するゲルマニウム・グリズムの製作に成功した (図 6)。

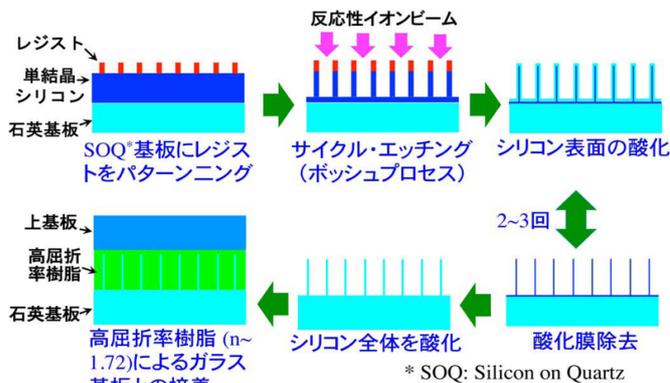


図5 シリコンのサイクルエッチングと酸化による VB grating の製作方法。

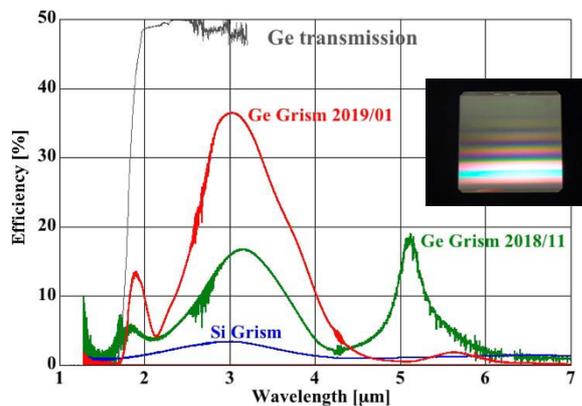


図6 ゲルマニウム回折格子の回折効率。

施設利用が謝辞等に記された学術論文など（資料を添付してください。）

#### 審査付原著論文

- ・ N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, T. Kamizuka, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, “Novel gratings for astronomical observations,” *Proc. ICSO 2018 (International Conf. on Space Optics)*, in press, 2019.

#### 総 説

- ・ 海老塚 昇 “天文学分光観測装置および分散光学素子”, 天文月報 **111**, pp.297-307, 2018.

#### 集録論文

- 1) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, I. Tanaka, T. Hattori, T. Kamizuka, S. Ozaki, W. Aoki, “Novel gratings for astronomical observations,” *Proc. ODF'18 (The 11th International Conf. on Optics-photonics & Fabrication)*, 84-85 (USB: 28PSa-22), 2018.
- 2) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細島 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 田中 尅, 服部 堯, 尾崎 忍, 青木 和光, “次世代天文学観測装置用の新しい高分散回折格子 IV”, 第 43 回光学シンポジウム講演予稿集, 41-44, 2018.

先端技術センターの利用設備・実験室等の利用した物品を具体的に記入してください。マシンショップへ依頼したリスト・利用した測定器・CAD 等について記入してください。)

#### オプトショップ

- ・ UV3100PC 分光光度計
- ・ Zygo GPI レーザ干渉計
- ・ MM40 精密作業顕微鏡
- ・ FTIR410 フーリエ変換赤外線分光光度計

#### 多目的光学実験室

- ・ 大型除振台（一部）

#### クリーンルーム

- ・ 電子顕微鏡

先端技術センターの施設への要望等ありましたら、記入してください。