

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 野口卓 殿

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 光量子工学研究領域 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：H 30 年 4 月 1 日～H 31 年 3 月 31 日	
利用者リスト 海老塚 昇	

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。）

1. TMT/WFOS 用 Reflector facet transmission grating および MOIRCS 用 Hybrid grism の開発

我々は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裏面の平面から回折光が出射する RFT (Reflector facet transmission) grating を考案した。RFT grating は格子において反射を利用して回折光を強める方向に光束を導くために格子の屈折率が小さくても大きな回折角を達成できる。現在、我々チームの超精密加工装置を用いて TMT の可視光観測装置 WFOS に搭載する RFT grating を開発中である。RFT grating の製作方法として、刃先を格子形状と同じ角度の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、金型に離型材を塗布して紫外線硬化型等の樹脂を滴下した後に平行平面基板を置き、基板側から紫外線露光を行ない、金型を剥離することによって完成する。今年度に 2 回の金型の試作を行った。1 回目の金型を用いてレプリカ加工を行ったが、金型の格子頂点のカエシ（バリ）のために樹脂が型から剥離しなくなってしまった。回折光の波面計測に Zygo GPI 干渉計、格子の観察に日立 S-3000N 走査型顕微鏡およびニコン MM-40 測定顕微鏡を利用した。

すばる望遠鏡の MOIRCS 用の中分散グリズムは図 1 のような ZnSe プリズム ($n=2.45@1.65\mu\text{m}$ 、頂角： $\alpha=23.8^\circ$) にレプリカ ($n=1.52@1.65\mu\text{m}$) の SR grating を組合せたハイブリッド・グリズムである。このハイブリッド・グリズムは格子間隔が $10.8\mu\text{m}$ 、格子の頂角が $\gamma=61.8^\circ$ の鋭角になる。

現在、理研において RFT grating と同様にシェーパー加工によって 50×50 のレプリカ実験用の金型を試作して、メーカーに依頼してレプリカの加工実験を行った。図 2 は試作したハイブリッド・グリズムのレプリカ実験用金型（左）とレプリカ（右）の電子顕微鏡写真である。また、金型とレプリカの回折光の波面を測定した結果、金型の回折光波面（反射）は $\text{RMS: } \lambda/8@633\text{nm}$ 程度であり、可視光用の反射型回折格子用としても実用的な値であり、レプリカの回折光波面（透過）は $\text{RMS: } \lambda/14$ であった。MOIRCS 用のグリズムは使用波長が $0.8\mu\text{m}$ 以上であり、仕様を充分満足する。回折効率の測定に島津製作所 UV-3100PC 分光光度計、回折光の波面計測に Zygo GPI 干渉計、格子の観察に日立 S-3000N 走査型顕微鏡およびニコン MM-40 測定顕微鏡を利用した。

2. nuMOIRCS 用エッセル・グリズム (Volume Binary grating) の開発。

ULTIMATE Subaru は、すばる望遠鏡に新しい Ground layer adaptive optics (GLAO) を取り付けることにより、広い視野におい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。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。nuMOIRCS に搭載されるエッセル・グリズムは 3~6 次回折光のスペクトルを、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、検出器上に折り込むことによって、 $0.8\sim 1.8\mu\text{m}$ 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、その性能向上の鍵となる。

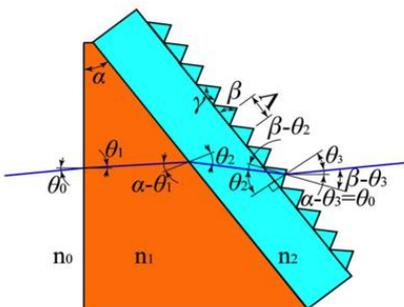


図 1 ハイブリッド・グリズムの概念図。

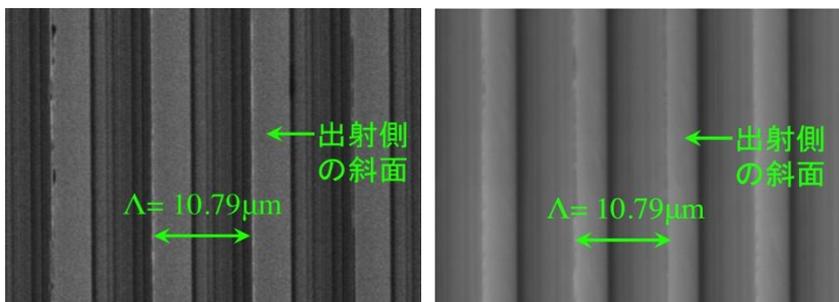


図 2 ハイブリッド・グリズムのレプリカ実験用金型（左）とレプリカ（右）の格子の透過型電子顕微鏡写真。

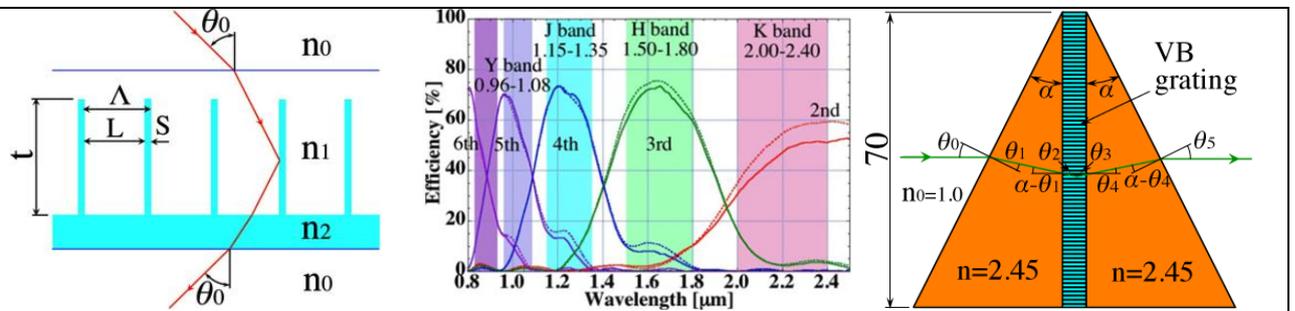


図3 VB grating の概念図 (左)。MOIRCS のエシエル・グリズム用の VB grating の回折効率 (中央), $n_1=1.33, n_2=1.6, n_3=1.6, \Lambda=5.1 \mu\text{m}, L\&S=4.6:0.5 [\mu\text{m}], t=16 \mu\text{m}, \theta_0=28.4^\circ$ と VB グリズムの概念図 (右)

我々は、図3左のような高アスペクト比の Volume binary (VB) grating によって、図3中央のように高い回折効率を達成できることを見出し、図3のような nuMOIRCS 用のエシエル・グリズム開発することになった。このエシエル・グリズムは VB grating を2枚の ZnSe ($n=2.453@1.65\mu\text{m}$) プリズムの間に挟む構造であり、高屈折率プリズムと回折格子の界面における臨界角の制限が緩やかであるために、高分散グリズム用として最適である。

Volume binary (VB) grating の開発は豊田工業大学・ナノテクノロジープラットフォームと共同研究を行っている。これまでにサイクルエッチング工程 (Bosch process) においてエッチングガスおよび Passivation (側壁保護) ガスに酸素を僅かに入れることで、クリーニングしながらエッチングと側壁保護を行い、かつエッチング量を少なくすることで、溝側面のスキヤロップ (エッチングサイクル毎に形成される凹凸) を 40nm 程度まで減らすことに成功した。さらに酸化処理によってシリコンの表面に厚さ約 1μm の酸化膜を形成させた後、酸化膜のエッチングを行うと、シリコンの表面から酸素が拡散して酸化されている部分の壁面の両側が約 400nm ずつ除去される。この工程を数回繰り返すことによって、可視光においても散乱が少ない極めて滑らかな光学面を得ることができた。具体的には Line & Space が 2.0μm : 3.1μm のマスクパターンでシリコン基板上にレジストを形成して、サイクルエッチングによって深さ 10μm と 20μm の溝を形成して、厚さ約 1μm の酸化膜形成と除去を2回行った結果、図4のように、それぞれ幅 0.44μm と 0.8μm の壁面が極めて滑らかな格子が得られている。回折光の観察は多目的実験室を利用した。

3. QB immersion grating の開発

QB (Quasi-Bragg) grating は短冊状の金属膜あるいは低屈折率層がミラー面としてブラインドや鍍窓のように等間隔に整列した、新しい構造の透過型回折格子である。QB grating は RFT grating と同様に高次回折光において高い回折効率を達成できることが RCWA 法を用いた数値計算によって確認されている。

金の常温接合により厚さ 0.5mm の石英基板 60 枚を積層したブロックを 30 度傾けて切断した QB grating をリトロー (60°, 30°の直角三角形) プリズムと表面反射ミラーの間に紫外線硬化型樹脂によって貼り合わせて、図5 (左) のように QB immersion grating を試作した。リトローマウントの光学系を組み、He-Ne レーザを光源として回折像を観察した。その結果、図5 (右) のように、ピンホールの点像が回折次数の間隔より大きく、次数間の分離ができなかったものの、回折高強度が集中 (ブレイズ) しており、Immersion grating として機能することが検証された。QB immersion grating の組立ておよび回折光の観察は多目的実験室を利用した。

4. 液晶の VPH grating の開発

従来の VPH (Volume Phase Holographic) grating は S と P 偏光の回折効率特性が異なるために、角度分散が大きくなると自然偏光等に対して高い効率を達成できない。Birefringence VPH (B-VPH) grating は、ホログラム記録材料として液晶等の光学異方性媒質と等方性媒質、あるいは2種類の光学異方性

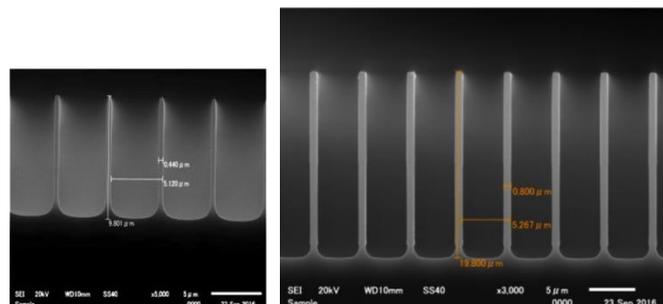


図4 サイクルエッチング (Bosch プロセス) →シリコン酸化←酸化膜除去により加工された高アスペクト比の VB 回折格子用のシリコン金型 (格子周期 $\Lambda=5.1\mu\text{m}$)。左: 高さ $t=10\mu\text{m}$ 、幅 $s=0.44\mu\text{m}$ 。右: $t=20\mu\text{m}$ 、 $s=0.80\mu\text{m}$ 。

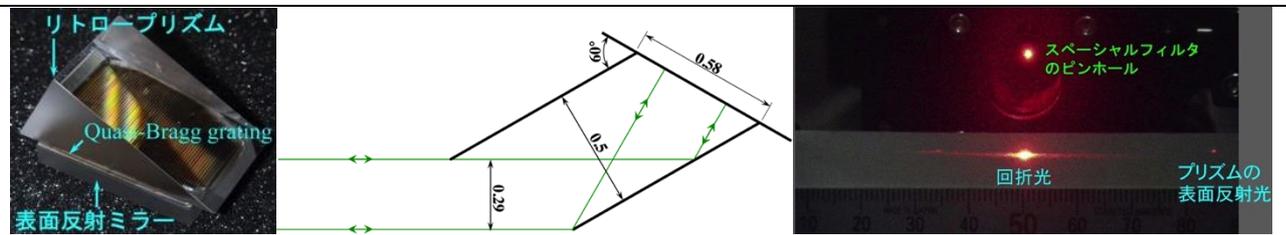


図 5 QB immersion grating の試作品（左）と格子における光束の伝搬（右） 試作品の回折像。

媒質を組み合わせ、任意のブラッグ角において光学異方性媒質と等方性媒質の屈折率を調整して S 偏光と P 偏光の 1 次回折光の回折効率特性を一致させることによって、自然偏光や円偏光に対しても高い回折効率を達成できるようになる。

多目的光学実験室において我々は 3 種類の紫外線硬化型の液晶をそれぞれ通常の液晶（1 種類）と混合して、紫外線レーザーの二光束干渉計を用いた干渉露光によって B-VPH grating の試作を行った。その結果、いずれの組み合わせでも回折光を観察することができた。3 種類のうち最も回折効率が高い紫外線硬化型の液晶について厚さ 10 と 20 μm の B-VPH grating の試作を行った結果、厚さ 10 μm の場合に波長 450nm において S 偏光の回折効率が最大 67%（P 偏光は最大 27%）を達成した。次に、可視光硬化型樹脂（ $n=1.51$ ）と UV 硬化型液晶（ $n_o=1.55$, $n_e=1.72$ ）を混合して、可視光レーザー（532nm）二光束干渉計を用いた干渉露光によって厚さ 10 と 20 μm の B-VPH grating（616 groove/mm）を試作した結果、厚さ 20 μm の場合に回折効率は 80%程度を達成した（図 12）。

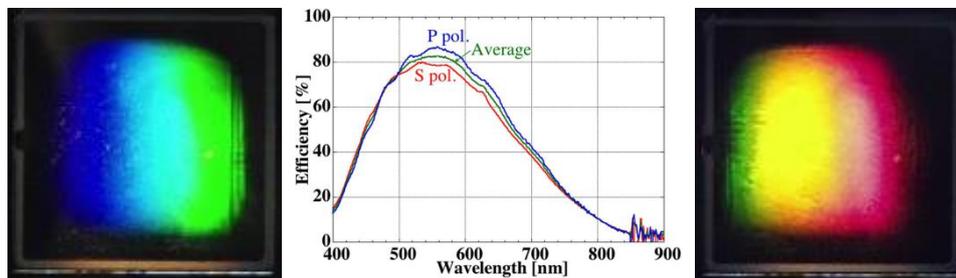


図 12 可視光硬化型樹脂と紫外線硬化型液晶の B-VPH grating の回折光（左と右）および回折効率（中央）。回折公は左から右に向かって Bragg 角が小さくなる。

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。）

- 1) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Novel gratings for next-generation instruments of astronomical observations," *Proc. SPIE* **10233**, 0M1-0M8, 2017.
- 2) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細畠 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 佐藤 慎也, 橋本 信幸, 田中 壱, 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 III", 第 42 回光学シンポジウム講演予稿集, 27-30, 2017.
- 3) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Uomoto, T. Shimatsu, M. Sasaki, A. Bianco, C. Packham, W. Aoki, "Diffraction Gratings for the Latest Visible and Infrared Astronomical Observations," 日本赤外線学会誌 **26** (2), 32-39, 2017.

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
- ・ Zygo GPI レーザ干渉計
- ・ 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

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。