

共同研究契約報告書

平成 31年 4月19日

平成30年5月17日付「高効率高分散回折格子の開発」
研究代表者：(光量子工学研究センター・研究員・海老塚 昇)

上記共同研究契約について、下記のとおり報告いたします。

所在地： 埼玉県和光市広沢2番1号
名 称： 国立研究開発法人理化学研究所
代表者： 外部資金室長 高山 宏 印

記

1. 成果報告書 (別紙のとおり)
2. 使用実績報告書 (別紙のとおり)

以上

成果報告書

1. 研究の実績

(1) 研究の実施日程

研究項目	実施日程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
RFT grating	金型試作・測定、レプリカ加工実験						試験加工・測定					
Hybrid grism	レプリカ加工実験						試験加工・測定					
VB grating	Si 鋳型試作 (レプリカ実験用)						Si VB grating 試作・酸化実験					
	レプリカ加工実験						SOQ 基板の製作			SOQ 基板の製作		
	低融点ガラス基板加工						陽極接合実験					
Ge grism (Immersion grating)	試験加工・加工1・測定						加工2・測定					

(2) 研究の成果の説明

はじめに

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。なお、VB grating は単体でも使用されるが、プリズムと接着してグリズム (直視回折格子) を構成することができる。我々は厳密結合波解析 (RCWA) 法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、超精密ダイヤモンド切削や MEMS 等の最新技術を駆使して、これらの回折格子の製作方法の開発を行っている。

一方、シリコンやゲルマニウム等の 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、TMT や 6.5m TAO 望遠鏡等の近赤外線から中間赤外線の観測装置において重要な分散光学素子である。また、切削加工による脆性材料の回折格子の製作は難題であり、シリコンやゲルマニウム等の Immersion grating やグリズムの開発は、精密工学分野の研究者や技術者にとっても研究課題として意義がある。

1. RFT grating およびハイブリッド・グリズム

RFT grating は図 1 のようにノ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出射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

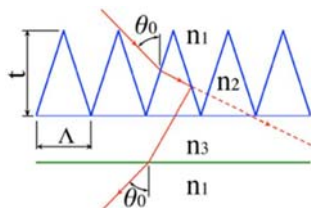


図 1 RFT grating の概念図。

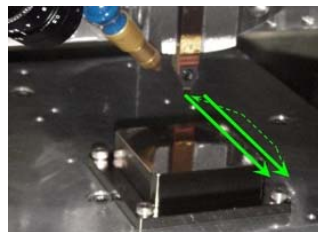


図 2 シェーパー切削法による RFT grating の鋳型の加工。

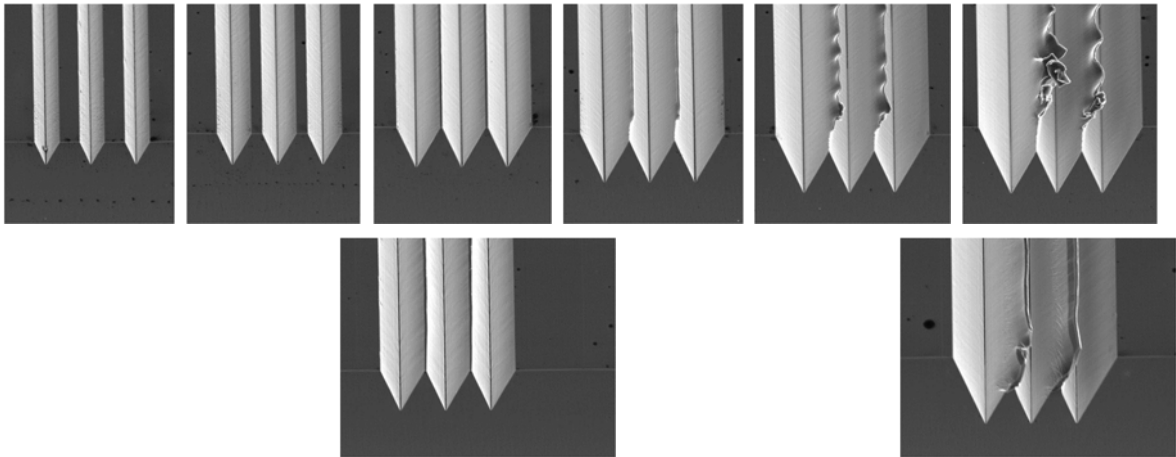


図3 MOIRCS ハイブリッド・グリズム用金型（格子間隔: 10.0 μm）の試験加工。上段：切込み深さ 2 μm×6 回加工、下段：切込み深さ 6 μm×2 回加工、ともに切削速度 1000mm/min。

子の屈折率が小さくても大きな回折角を達成できる。

WFOS は 5~8 次あるいは 8~13 次の高次の高分散回折格子とプリズムまたは低分散回折格子を組み合わせ 2 次元検出器上にスペクトルを折り込むエシエル分光観測を行う。WFOS 用の透過型回折格子は入射角と回折角が 36~53°であり、WFOS 用の RTF 回折格子は、格子の屈折率が 1.54 の場合に、格子の頂角が 35~44°である。そこで、格子の屈折率が 1.54 の RFT grating について入射角および回折角が 45°の場合に RCWA を用いた数値計算（理研の岡本 隆之 専任研究員）によって回折効率を求めた結果、4 次以上の高次回折光において 80%程度の回折効率を達成できることがわかった。この場合の格子の頂角は 38.3°である。WFOS の RTF grating は格子の頂角が 35~44°と小さく、図 2 のような超精密加工機とダイヤモンド工具による金型加工やレプリカ加工の工程において困難が予想された。そこで、MOIRCS の中分散グリズム用としての、格子の頂角が 60°程度のハイブリッド・グリズム用に表面刻線型（SR）回折格子を試作して、WFOS の RTF grating を製作する場合の問題点を明らかにすることになった（理研の細島 拓也 研究員と竹田 真宏 氏）。

MOIRCS 用の中分散グリズムは ZnSe プリズム ($n=2.45@1.65\mu\text{m}$) 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。当初の設計（幾何光学）では、ハイブリッド・グリズムは格子間隔が 10.8 μm、光束が射出する斜面の角度が $\beta=64.8^\circ$ 、格子の頂角が $\gamma=61.8^\circ$ であった。しかし、昨年度に試作したレプリカ格子の回折効率は、ピークの実測値が 50%程度であった。RCWA を用いた数値計算によって効率の分光特性を調べたところ、格子形状 ($\beta=65.5^\circ, \gamma=56.0^\circ$) の場合に波長帯域と回折効率が最適であり、ピークの計算値が約 60%（実測値が 55%程度の見込み）であることがわかった。そのレプリカ用の金型の試験加工として、図 3 のように切込み深さや切削速度を変えて溝形状を調べた。その結果、切込み深さが溝の深さと等しい場合に理想的な格子形状を得られることがわかった（図 3 上段、左から 3 番目と下段の左）。なお、この実験では刃物を切削方向と垂直に取り付けたが、先立つ RFT grating の試験加工により切削方向に対して刃物を 3° 程度傾けること（スキュー角）により、バリが効率よく除去されることが分かっている。

今年度に MOIRCS ハイブリッド・グリズムの実機用（口径 70×70）および RFT grating のレプリカ加工実験用の透過型回折格子の製作を行う計画であったが、超精密加工機のマシンタイムを確保することができなかった。2019 年度には、これらの回折格子の金型を製作する予定である。

2. VB grating

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

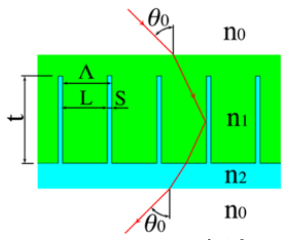


図4 VB grating の概念図。

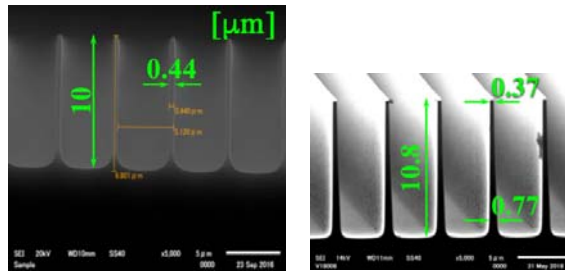


図5 シリコンの高アスペクト回折格子のSEM写真(格子周期: $\Lambda=5.1\mu\text{m}$)。

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。nuMOIRCS に搭載されるエシェル・グリズム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、 $0.9\sim 1.8\mu\text{m}$ 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、ULTIMATE Subaruの波長分解能(\propto 天体の視線速度)や観測効率の向上の鍵となる。そこで、図4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、3次以上の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。

具体的には豊田工業大学のナノテクノロジープラットフォーム(ナノテクPF)において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5左のように $0.44\mu\text{m}$ の等幅の格子や図5右のように多少テーパがある格子で側面が極めて滑らかなシリコンの矩形回折格子が得られている(佐々木実教授と梶原氏、梶浦氏)。

2.1 樹脂のVB grating (レプリカ)

上記のシリコンの矩形回折格子を鋳型にして島津製作所に依頼してレプリカ加工の実験を行った。様々な離型剤やプラズマ加工によって成膜したフッ化水素系の膜を試したが、現時点においてレプリカを離型することができない。現在は新たな離型法について調査中である。

2.2 ガラスのVB grating

一方で図6のようにシリコンの矩形回折格子を鋳型(犠牲層)にしてガラスのVB gratingを製作する方法を考案した(特許出願準備中)。そこで、テンパックス(TPX: ショット社のホウ珪酸系ガラス $n_d=1.47$)および2種類の高屈折率の低融点ガラス(オハラ製のL-TIM28: $n_d=1.69$ とL-LAH85V: $n_d=1.85$)とシリコン基板の陽極接合(加熱および加圧して電界をかけることによりシリコンとガラス等を接合する方法)実験を行った。その結果、TPXは 320°C において接合が確認された。L-TIM28は 300°C で接合されたが常温に戻す過程で剥離と破損が生じた。L-LAH85Vは 325°C まで加熱しても接合できなかった

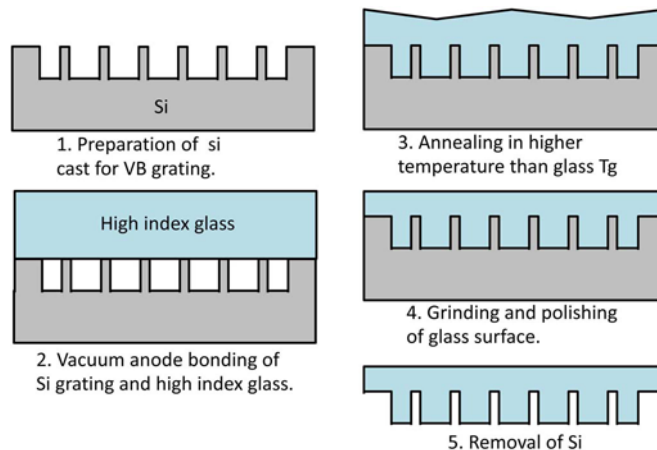


図6 シリコンのVB grating 鋳型を用いたガラスVB gratingの製作工程。

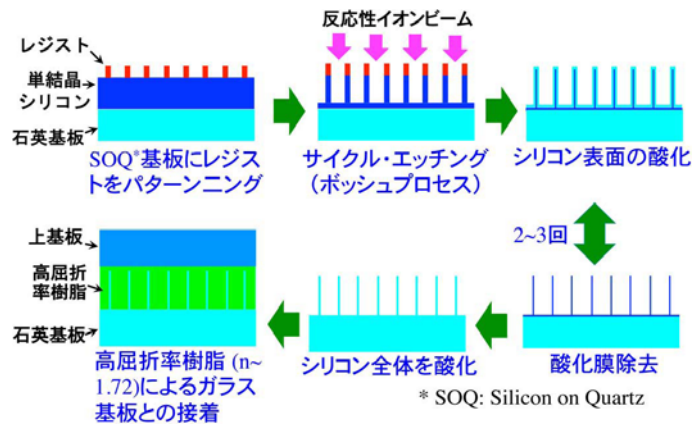


図7 シリコンのサイクルエッチングと酸化による VB grating の製作方法。

た。TPX や L-TIM28 が接合できたのは含有しているナトリウム等が電解によってシリコンとの界面まで移動して化学的に結合したためと考えられる。一方、L-LAH85V はナトリウムを含有しておらず 325°Cにおいてガラス中を移動できる物質（金属等）がないために接合できないと考えられる。なお、シリコンの線膨張係数は $26 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (20°C), $35 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (500°C)、TPX は $33 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (20-300°C)、L-TIM28 は $130 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (100-300°C)、L-LAH85V は $77 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (同) である。現在、図6の工程2のように TPX とシリコンの矩形回折格子を真空中で陽極接合して、工程3以降の加工実験を計画している。

2.3 石英の VB grating

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7のような工程によって製作された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 の製作方法を考案した（特許出願）。SOQ 基板を業者から購入すると 5 枚で 100 万円以上かかるため、ナノテク PF の梶浦氏が石英基板とシリコンウエハの接合を行い、業者にシリコン側の研磨を依頼した。SOQ 基板とシリコンウエハでは、プラズマによるエッチングの条件が大きく異なるために、試行錯誤の結果、図8左のように SOQ 基板上にシリコンの矩形回折格子を製作する条件を見出した。このシリコンの矩形回折格子を酸化させ図8中央のように部分的に透明な石英の VB grating を得た。なお、図8中央の茶色の領域は格子底面のシリコンが厚く、酸化されずに残った部分である。透明な部分にレーザを照射して入射角 45° 、回折角 45° 近傍を観察した結果、ゴースト（水平方向）やフレア（垂直方向）が見られるものの、回折次数の位置に光強度が集中し、VB grating として機能することが分かった（図8右）。

3. 近-中間赤外線グリズム (Immersion grating のプロトタイプ)

TAO 望遠鏡の MIMIZUKU は近-中間赤外線 (2~5.3 μm)、中間赤外線 (6.8~26 μm) と中間-遠赤外線 (24~38 μm) の 3 バンドの観測チャンネルを有する。我々はシリコンやゲルマニウムのグリズムを Immersion grating のプロトタイプと位置付けて、2015 年度より MIMIZUKU の近-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、昨年度には超精密加工装

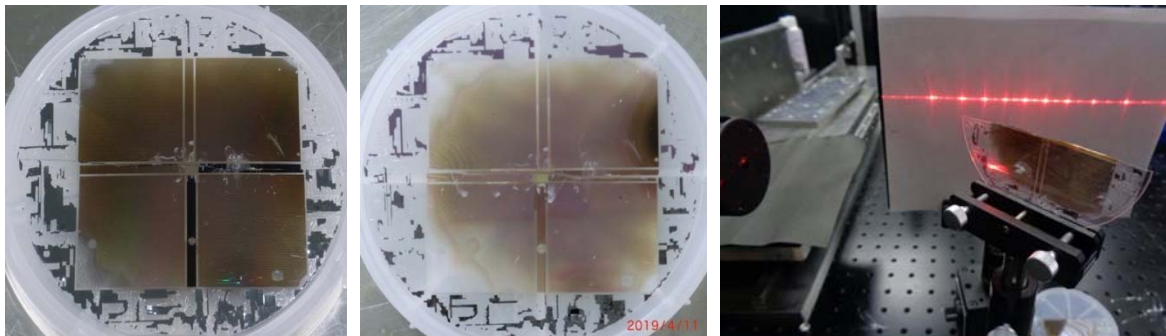


図8 SOQ 基板に加工した Si VB grating の酸化による石英 VB grating の試作。酸化前（左）、酸化後（中央）、石英 VB grating の回折光（右）。

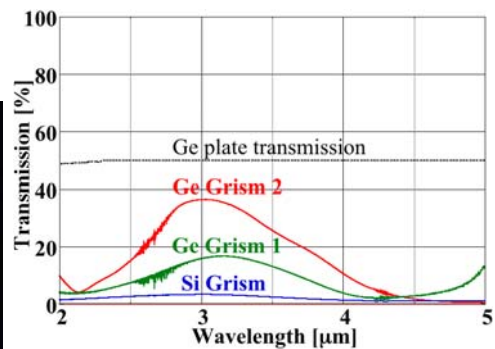
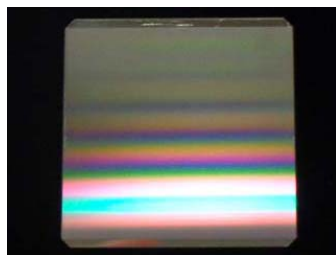


図9 フライカットによるゲルマニウム・グリズムの加工 (左)、MIMIZUKU 用グリズムの外観 (中央)、シリコンおよびゲルマニウムグリズムの回折効率 (右)。

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° , 格子周期: $\Lambda=17.09\mu\text{m}$) 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 (図9右)。

今年度はゲルマニウムのウエハに切削加工の条件出しを行い、その中では最適な条件で1回目のゲルマニウムのグリズム ($24 \times 24 \times t2.4$, 頂角 3.3° , $\Lambda=17.04\mu\text{m}$) のフライカット加工を行った。しかし、格子が部分的に粗面になってしまい、回折効率は35%程度であった (図9右)。

シリコンやゲルマニウム等の脆性材料の切削加工には負のすくい角の刃物を用いられる。そのために昨年度のシリコンのおよび今年度1回目のゲルマニウムの切削加工では面取り付きのダイヤモンド工具を用いたのにも関わらず、いずれも格子面が粗面 (脆性面) になってしまう理由として、刃物の先端において、面取りが交差する稜部が正のすくい角になるために脆性材料の加工物を破碎してしまうのではないのかという推論に想到した。そこで、面取りが無いダイヤモンド工具を図9左のように工具の回転面の動径方向および回転半径の円筒面の円周接線から、それぞれ 45° 傾けて取り付けて、今年度2回目のゲルマニウム・グリズムの切削加工を行った。さらに今までは工具の軌跡が作る円筒の底面側が格子面に当たる方向で切削加工を行っていたのに対して、2回目のゲルマニウムの加工では円筒の側面が格子面に当たる方向で切削を行なった (図9左)。その結果、格子面が鏡面になり (図9中央)、約70%の回折効率を達成した (図9右)。現在、上記の2回目のゲルマニウム・グリズムの方法によるシリコンの切削加工および、シリコンとゲルマニウムについて同じ工具で円筒の底面側が格子面に当たる方向で切削加工を行う実験を計画している。

4. 成果報告・特許

4.1 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.

4.2 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) 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)*, (USB: P35), 2018.
- 3) 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 壱, 服部 堯, 上塚 貴史, 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.

4.3 国際会議発表

- 1) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, T. Kamizuka, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, “Current Status of Novel Gratings for Next Generation Astronomical Instruments VI,” *Subaru Telescope Users Meeting FY2018*, 2019 年 1 月 28-30 日, 国立天文台 (三鷹市), ポスター発表.
- 2) 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,” *ODF'18 (The 11th International Conf. on Optics-photonics & Fabrication)*, 2018 年 11 月 14-17 日, 広島国際会議場 (広島市), 口頭発表
- 3) 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,” *ICSO 2018 (International Conf. on Space Optics)*, Oct. 9-12, 2019, *Minoa Palace Resort & Spa (Chania, Greek)*, ポスター発表.

4.4 国内会議発表

- 1) 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 壱, 服部 堯, 上塚 貴史, 尾崎 忍, 青木 和光, “すばる望遠鏡および次世代大型望遠鏡用の新しい回折格子 III”, 第 24 回 天体スペクトル研究会, 2019 年 3 月 2, 3 日, 大阪教育大学 (大阪市天王寺区), 口頭およびポスター発表
- 2) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細島 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 上塚 貴史, 本原 顕太郎, 児玉 忠恭, 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回折格子 VI”, 第 7 回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 2019 年 2 月 25, 26 日, 国立天文台 (三鷹市), 口頭およびポスター発表
- 3) 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 壱, 服部 堯, 上塚 貴史, 尾崎 忍, 青木 和光, “8.2m すばる望遠鏡および次世代 30m 望遠鏡: TMT 用の新しい高分散回折格子 5,” 理研シンポジウム: 第 6 回 光量子工学研究, 2018 年 11 月 19, 20 日, 鈴木梅太郎記念ホール (和光市), ポスター発表
- 4) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細島 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 上塚 貴史, 本原 顕太郎, 児玉 忠恭, 田中 壱, 服部 堯, 尾崎 忍, 青木 和光, “次世代観測装置用の新しい回折格子 III”, 2017 年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム「2030 年代の光学赤外線天文学を考える ~2018 年秋~」, 2018 年 9 月 10-12 日, 国立天文台 (三鷹市), ポスター発表
- 5) 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 壱, 服部 堯, 上塚 貴史, 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, 2018 年 6 月 21, 22 日, 東大生産研 (東京都目黒区), 口頭発表.

4.5 特 許

- ・海老塚 昇, 岡本 隆之, 山形 豊, 田中 壱, 服部 堯, “石英製の格子構造体および回折格子ならびに製造方法,” 特願 2018-189248, 2018