

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13470

研究課題名(和文)究極的な高次高分散回折格子の開発

研究課題名(英文) Development of ultimate diffraction grating of high diffraction order with high dispersion

研究代表者

海老塚 昇 (Ebizuka, Noboru)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・研究員

研究者番号：80333300

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：Quasi-Bragg (QB) 回折格子として機能する高アスペクト比のVolume binary (VB) 回折格子を、シリコンのサイクルエッチング、酸化膜の形成・除去によって試作した。このシリコンのVB回折格子は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持つ。プロトタイプのリフレクタ面透過型(RFT)回折格子を鋭角な頂角の回折格子の金型からレプリカ加工した。試作品の回折効率は45~50%程度であった。30度傾けて切断したQB回折格子をプリズムおよび表面反射ミラーと貼り合わせてQB immersion 回折格子を試作して機能を検証した。

研究成果の概要(英文)：A volume binary (VB) grating of silicon with a high aspect ratio which functions as a QB grating was prototyped by cycle etching of silicon, formation and removal of oxide layer. This silicon VB grating has an extremely smooth optical surface with little scattering even in visible light. The prototype for the reflector facet transmission (RFT) grating was fabricated by the replication from the mold of the grating with an acute vertex angle. The diffraction efficiency of the grating was about 45 to 50%. The Quasi-Bragg (QB) immersion grating was prototyped by bonding a QB grating cut at 30 degrees with a prism and a surface reflection mirror, and its function was verified.

研究分野：光工学

キーワード：Volume grating Echelle spectroscopy 厳密結合波解析(RCWA)

1. 研究開始当初の背景

望遠鏡の大型化に伴って分光観測装置も巨大化するために、光学系を小型化することが可能な高次回折光を利用した高分散の透過型回折格子や光路中を高屈折率媒質で満たされた反射型の Immersion 回折格子の開発が求められている。

2. 研究の目的

8.2m すばる望遠鏡や TMT (Thirty Meter Telescope) などの新しい天文学観測装置に搭載する分散光学素子として、Quasi-Bragg (QB) 回折格子や Volume Binary (VB) 回折格子、Reflector facet transmission (RFT) 回折格子、QB immersion 回折格子の機能を実証し、実用化することを目的とする。

3. 研究の方法

1) Quasi-Bragg 回折格子の開発

Quasi-Bragg (QB) 回折格子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(図1左)。QB 回折格子は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。さらに、QB グリズム(直視回折格子)は、2 個のプリズムで回折格子を挟む構造であり、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、高次回折光の高分散分光用として最適である(図1右)。

東北大学 学際科学フロンティア研究所において、両面に厚さが均等な金の膜を堆積させた厚さ 0.5mm の石英ミラー基板 20 枚を常温接合法により積層して、切断・研磨により QB 回折格子を試作した。また、豊田工業大学ナノテクノロジープラットフォームにおいてクロムがスパッタリングされたミラー面の裏面をエッチングによりエンボス(スパーサ)を形成した 100×100×0.5 [mm]の石英ミラー基板(図2)を切断した短冊状のミラー基板 47 枚を紫外線硬化型接着剤により積層して、切断・研磨により QB 回折格子を試作した。

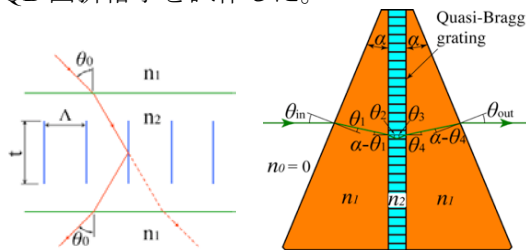


図1 Quasi-Bragg 回折格子(左)と Quasi-Bragg グリズム(右)の概念図。

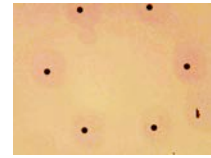


図2 石英ミラー基板のエンボスの顕微鏡写真。

2) Volume Binary 回折格子の開発。

RCWA 法を用いた数値計算(理研の岡本専任研究員)の結果から、QB 回折格子のミラー面として低屈折率の媒質による全反射を利用する、すなわち高アスペクト比の Volume binary (VB) 回折格子によって、高い回折効率を達成できることを見出した。そこで、豊田工業大学において MEMS 技術を応用して高アスペクト比のシリコンの VB 回折格子を試作した。

3) Reflector facet transmission 回折格子およびハイブリッド・グリズムの開発

我々は図3のような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出射する Reflector facet transmission (RFT) 回折格子を考案した。RFT 回折格子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(角度分散)にも対応することができる。

RFT 回折格子の製作方法として、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する。この金型からレプリカ加工により透過型回折格子を製作する。しかし、TMT の第一期可視光観測装置である WFOS 用の RTF 回折格子は格子の頂角が 35~44°と小さいため、金型やレプリカ加工の工程において困難が予想される。そこで我々は、60°程度のすばる望遠鏡の赤外線観測装置 MOIRCS のハイブリッド・グリズム

(図4)用の透過型回折格子を試作して、WFOS の RTF 回折格子を製作する場合の問題点を明らかにすることになった。

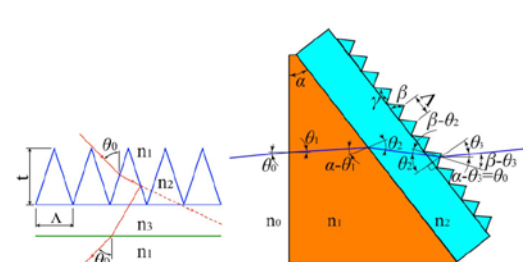


図3 RTF 回折格子の概念図。

図4 ハイブリッド・グリズムの概念図。

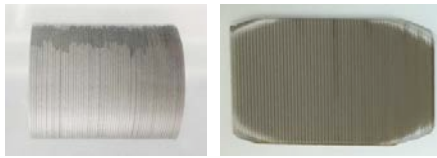


図5 金の常温接合によって60枚積層された石英基板のブロック（左）と30°傾けて切断されたQB回折格子（右）。

4) QB immersion 回折格子の開発

図5のように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°傾けて切断したQB回折格子をリトロープリズム（60°, 30°の直角三角形）および表面反射ミラーと貼り合わせてQB immersion 回折格子を試作した。

4. 研究成果

1) QB 回折格子の開発

今回試作した2種類のQB回折格子と以前に試作したクロムがスパッタリングされたミラー基板をガラスビーズが混入された接着剤で積層したQB回折格子の回折像を観察した。その結果、ガラスビーズが混入された接着剤で積層したQB回折格子は、ガラスビーズの直径のばらつきのために、可視光においては回折格子として機能しないことがわかった。一方、常温接合法により積層されたQB回折格子は可視光において極めて高い格子周期精度であることが分かった。また、エンボス付きミラー基板を積層したQB回折格子は接着の条件が最適ではなかったため、部分的に周期誤差があるものの、可視光においても実用的な精度の格子間隔を実現できることを確認した（図6左）。さらに、QB回折格子2枚を交差して組合せることにより、実像（中空像）を結像することを確認した（図6右）。

2) VB 回折格子の開発。

これまでの試作により、サイクルエッチングの工程（Bosch process）においてエッチングガスおよびPassivation（側壁保護）

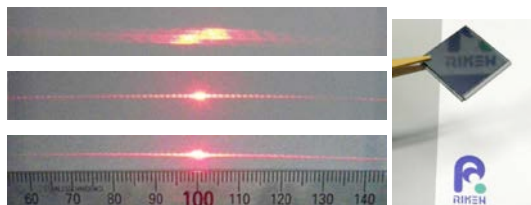


図6 ガラスビーズを混入した接着剤で接合したQB回折格子（左1段目）および、金の常温接合によって積層したQB回折格子（左2段目）、スペーサ付石英ミラー基板を積層したQB回折格子（左3段目）の回折像。直交した2枚のQB回折格子による実像の観察（右、物体より手前に結像しているために像が拡大されている）。

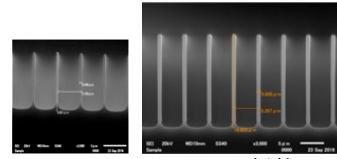
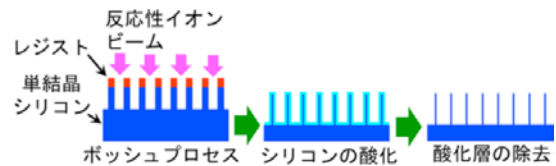


図7 高アスペクト比のVB回折格子の製作工程（上）およびサイクルエッチングにより加工された高アスペクト比のVB回折格子用のシリコンのVB回折格子（格子周期 $\Lambda = 5.1\mu\text{m}$ ）。左下：高さ $t = 10\mu\text{m}$ 、幅 $s = 0.44\mu\text{m}$ 。右下： $t = 20\mu\text{m}$ 、 $s = 0.80\mu\text{m}$ 。

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（図7上）。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、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（図7左下と右下）。

3) RFT 回折格子およびハイブリッド・グリズムの開発

理研の超精密加工装置に単結晶ダイヤモンドを取り付けて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た。図8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とその回折光の波面である。波面精度はRMS: $\lambda/8@633\text{nm}$ 程度であり、可視光用の反射型回折格子用

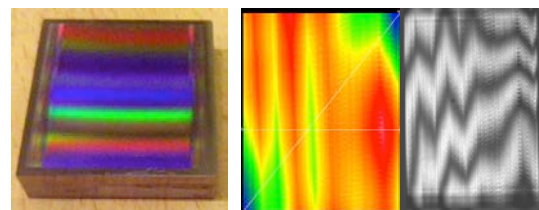


図8 ハイブリッド・グリズムのレプリカ実験用金型（サイズ：50×50、左）と金型の波面、PV: 0.89λ, RMS: 0.13λ（右）。

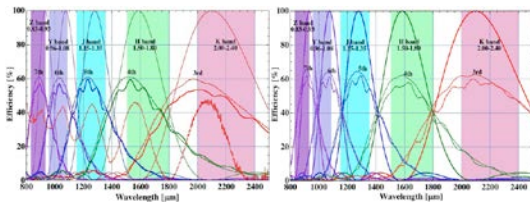


図9 MOIRCS用ハイブリッド・グリズムの回折効率の測定値(上: $\beta=64.8^\circ, \gamma=61.8^\circ$)および、厳密結合波解析によって求めた最適な格子形状の回折効率(右: $\beta=65.5^\circ, \gamma=55.0^\circ$)。

としても実用的な値である。ハイブリッド・グリズムは使用波長が $0.8\mu\text{m}$ 以上であり、透過型(反射型の1/4程度の精度)なのでこの金型は仕様を充分満足する。

次に外部に依頼して、試作した金型を使用し、レプリカの加工実験を5回行った。1~4回目まではUV硬化型樹脂を使用した。効果収縮のために剥離や透過波面の乱れが大きく実用的ではなかった。5回目は硬化収縮が小さいシリカを混入した2液性の樹脂を使用し、カップリング剤を使用したにもかかわらず、大部分がガラス基板から剥離してしまった。今後はレプリカ工程を改善する必要がある。

1回目のレプリカ試作品について、回折効率を測定した結果、ピークの効率が45~50%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波長帯域がシフトしているために回折効率が低下していることがわかった(図9左)。そこで光束が出射する斜面の角度(β)や格子の頂角(γ)を変化させて効率の分光特性を調べたところ、図9右のような格子形状($\beta=65.5^\circ, \gamma=55.0^\circ$)の場合に波長帯域と回折効率が最適であることがわかった。

4) QB immersion 回折格子の開発

リトロマウントの(入射光と回折光の角度が小さい)分光光学系を組み、He-Neレーザを光源として、試作したQB immersion 回折格子(図10左)の回折像を観察した。その結果、図10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、次数の分離ができなかったものの、回折光強度が集中(ブレイズ)しており、Immersion 回折格子としての機能を検証することができた。



図10 試作したQB immersion 回折格子(左)とQB immersion 回折格子の回折像(右)。

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 3 件)

- ① N. Ebizuka, T. Okamoto, T. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, “Novel diffraction gratings of astronomical observations”, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 10233, 2017, in press.
- ② 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, 査読有, Vol.26 No. 2, 2017, 32-39.
- ③ N. Ebizuka, T. Okamoto, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, “Novel diffraction gratings for next generation Spectrographs with high spectral dispersion”, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 9912, 2016, 2z1-2z10, DOI: 10.1117/12.2231949

[学会発表] (計 16 件)

- ① 海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 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 壺, 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の開発状況”, 木曾広視野サーベイと京都 3.8m 即時分光によるタイムドメイン天文学の推進, 京都大学(京都市左京区), 2017年2月20-22日
- ② N. Ebizuka, T. Okamoto, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, “Current Status of Novel Gratings for Next Generation Astronomical Instruments III”, Subaru Users' Meeting FY2015, 国立天文台(三鷹市), 2017年1月19-21日
- ③ 海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 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 壺, 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 IV”, 第6回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 国立天文台(三鷹市), 2016年11月24-25日

- ④ 海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 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 3”, 理研シンポジウム: 第4回「光量子工学研究-若手・中堅研究者から見た光量子工学の展開-」, 理研・鈴木梅太郎ホール(和光市), 2016年10月31日-11月1日
- ⑤ 海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 尾崎 忍, 青木 和光, “ファイバ分光器、平面導波路用の新しい回折格子”, コンテンポラリーオプティクス研究会, 電気通信大学(調布市), 2016年10月5日
- ⑥ 海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 尾崎 忍, 青木 和光, “次世代観測装置用の新しい回折格子 II”, 2016年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム「共同利用と大規模観測の調和」, 国立天文台(三鷹市), 2016年9月26-28日
- ⑦ N. Ebizuka, T. Okamoto, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, “Novel diffraction gratings for next generation Spectrographs with high spectral dispersion”, SPIE Astronomical Telescope + Instrumentation, Edinburgh, UK, 2016年6月26-7月1日
- ⑧ N. Ebizuka, T. Okamoto, T. Hosobata, Y. Yamagata, I. Tanaka, T. Hattori, “New Grisms for MOIRCS”, ULTIMATE Subaru Sci. WS, 国立天文台(三鷹市), 2016年6月16, 17日
- ⑨ 海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 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 II”, 第41回光学シンポジウム, 東京大学生産技術研究所(東京都目黒区), 2016年6月23, 24日
- ⑩ 海老塚 昇, 細島 拓也, 山形 豊, 岡本 隆之, 佐藤 慎也, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 桐野 宙治, 尾崎 忍, 青木 和光, 高見 英樹, “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 II”, 第21回天体スペクトル研究会, 甲南大学(神戸市東灘区), 2016年2月27, 28日
- ⑪ N. Ebizuka, T. Hosobata, Y. Yamagata, T. Okamoto, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, O. Kirino, S. Ozaki, W. Aoki, “Current Status of Novel Gratings for Next Generation Astronomical Instruments III”, Subaru Users' Meeting FY2015, 国立天文台(三鷹市), 2016年1月19-21日
- ⑫ 海老塚 昇, 細島 拓也, 山形 豊, 岡本 隆之, 佐藤 慎也, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 桐野 宙治, 尾崎 忍, 青木 和光, 高見 英樹, “次世代天文学観測装置用の新しい回折格子”, 第5回可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 東北大学(仙台市青葉区), 2015年12月7-9日
- ⑬ 海老塚 昇, 山形 豊, 岡本 隆之, 佐藤 慎也, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 桐野 宙治, 尾崎 忍, 青木 和光, 高見 英樹, “新しい高分散回折格子”, 近赤外高分散分光研究会: 地球型惑星探索と広がるサイエンス, 国立天文台(三鷹市), 2015年11月24-26日
- ⑭ 海老塚 昇, 岡本 隆之, 森田 晋也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 桐野 宙治, 尾崎 忍, 青木 和光, 高見 英樹, “次世代観測装置用の新しい回折格子”, 2015年度光学赤外線天文連絡会シンポジウム「光赤外将来計画: 報告書の最終取りまとめと長期戦略への布石」, 国立天文台(三鷹市), 2015年9月14-16日
- ⑮ 海老塚 昇, 岡本 隆之, 森田 晋也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 桐野 宙治, 尾崎 忍, 青木 和光, 高見 英樹, “次世代天文学観測装置用の新しい回折格子”, 2015年精密工学会秋季大会講演, 東北大学(仙台市青葉区), 2015年9月4-6日
- ⑯ 海老塚 昇, 岡本 隆之, 森田 晋也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 桐野 宙治, 尾崎 忍, 青木 和光, 高見 英樹, “次世代天文学観測装置用の新しい高分散回折格子”, 第40回光学シンポジウム, 東京大学生産技術研究所(東京都目黒区), 2015年6月25, 26日

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称：光導波路、ならびに透過型回折格子
の使用法および設計方法

発明者：海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 拓也,
山形 豊, 尾崎 忍

権利者：理科学研究所

種類：特許

番号：PTC/JP2017/13798

出願年月日：2017年3月31日

国内外の別：国外(米国)

名称：光導波路、ならびに透過型回折格子
の使用法および設計方法

発明者：海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 拓也,
山形 豊, 尾崎 忍

権利者：理科学研究所

種類：特許

番号：特願 2016-072715

出願年月日：2016年3月31日

国内外の別：国内

名称：光学素子およびその製造法

発明者：海老塚 昇, 山形 豊

権利者：理科学研究所

種類：特許

番号：特願 2015-174187

出願年月日：2015年9月3日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海老塚 昇 (EBIZUKA, Noboru)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工
学研究領域・研究員

研究者番号：80333300

(2) 研究分担者

山形 豊 (YAMAGATA, Yutaka)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工
学研究領域・チームリーダー

研究者番号：70261203

佐々木 実 (SASAKI, Minoru)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：70282100

青木 和光 (AOKI, Wako)

国立天文台・TMT 推進室・准教授

研究者番号：20321581

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

島津 武仁 (SHIMATSU, Takehito)

東北大学・学際科学フロンティア研究
所・教授

魚本 幸 (UOMOTO, Miyuki)

東北大学・学際科学フロンティア研究
所・研究員

梶原 健 (KAJIWARA, Ken)

豊田工業大学・ナノテクノロジープラッ
トフォーム・支援員

奥村 俊雄 (OKUMURA, Toshio)

豊田工業大学・ナノテクノロジープラッ
トフォーム・支援員

田中 壱 (TANAKA, Ichi)

国立天文台・ハワイ観測所・Sr. Resident
Astronomer

服部 堯 (HATTORI, Takashi)

国立天文台・ハワイ観測所・Sr. Instru-
mentation Research Specialist

尾崎 忍 (OZAKI, Shinobu)

国立天文台・TMT 推進室・特任研究員

桐野 宙治 (KIRINO, Okiharu)

クリスタル光学・技術開発部長/取締役

岡本 隆之 (OKAMOTO, Takayuki)

国立研究開発法人理化学研究所・石橋極微
デバイス工学研究室・専任研究員

細島 拓也 (HOSOBATA, Takuya)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工
学研究領域・研究員

竹田 真宏 (TAKEDA, Masahiro)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工
学研究領域・テクニカルスタッフ I