

研究代表者：

氏 名 海老塚 昇

所属・職 理化学研究所 光量子工学研究領域・研究員

研究題目：高効率高分散回折格子の開発

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
Quasi-Bragg gratingの試作	エンボス付ミラー基板の積層 常温接合によるミラー基板の積層											
Birefringence VPH gratingの試作	↔											
フォトレジスト回折格子の試作	←											
RFT gratingの開発	設計 ← 試作 ↔											
Si, Ge切削加工実験	↔											
回折格子測定装置の改造	←											

(2) 研究の成果の説明

1. はじめに

TMT の第一期観測装置である可視光広視野分光撮像装置 WFOS は反射型エシエル回折格子を採用する計画であったが、光学系の仕様変更によって、コーリメータやカメラレンズの口径が当初設計の $\phi 440\text{mm}$ より大きくなることが分った。口径が $\phi 440\text{mm}$ より大きいレンズ用の硝材の入手が極めて困難であり、装置全体も大型化するためにコストの大幅な上昇が懸念されている。そのため、エシエルタイプの透過型高分散回折格子の開発が求められている。透過型回折格子はコーリメータやカメラレンズの近傍に置くことができるためにコーリメータやカメラレンズの口径を小さくすることが可能である。また、TMT の可視光用補償光学は開発に今後 10 年以上要すると見込まれており、透過型エシエルタイプ回折格子を使用したいいくつかの可視光-中間赤外線観測装置計画が提案されている。

Fig. 1のような従来のノコギリ歯形状の表面刻線型回折格子は、回折角が大きくなるのに従い、屈折率を大きくしなければならぬ。例えば、入射角および回折角が 45° の場合に格子の屈折率が 2.3 以上必要であるため、光学ガラスや樹脂等を利用できない。高エネルギーレーザーのパルス圧縮光学系等に使用される Fig. 2のような Volume binary grating (厚い矩形回折格子) は 2 種類の材質の幅 (L&S: Line and space) を調整することによって S と P 偏光の分光回折効率特性をほぼ一致させることが可能で、高次光に対して

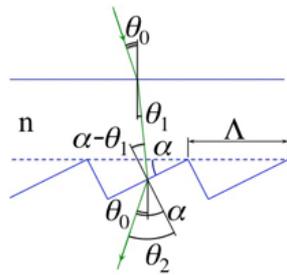


Fig. 1 Propagation of incident beam in SR grating with sawtooth grooves.

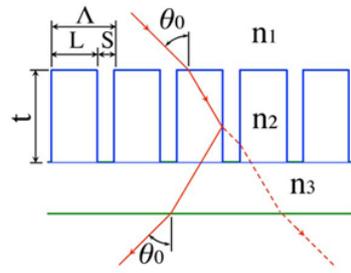


Fig.2 Schematic representation of volume binary grating.

も高い回折効率を達成できる。しかし、このようなVolume binary (VB) gratingは一方の材質の幅: S と厚さ: t の比 (アスペクト比) が1 : 数10になってしまうために最新の異方性エッチング加工等を用いても製作が困難である。一方、屈折率が正弦波状に変調されたVolume phase holographic (VPH) gratingは1次回折光のSあるいはP偏光に対して最大効率100%を達成可能であり、同一口径の表面刻線型回折格子に対して極めて大きな角度分散を達成できるために、すばる望遠鏡をはじめ多くの天文学観測装置に搭載されている。しかし、VPH gratingはFig. 3のようにSとP偏光の分光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くなってしまう上、高次回折光の効率が低いためにエシェルタイプの回折格子として利用できない。

2. Birefringence VPH grating

透過型の VPH grating において、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生媒質、あるいは2種類の光学異方性媒質を組み合わせた場合に、任意のブラッグ角において光学異方性媒質と等方生媒質の屈折率を調整して、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。研究チームの岡本氏が独自に作成

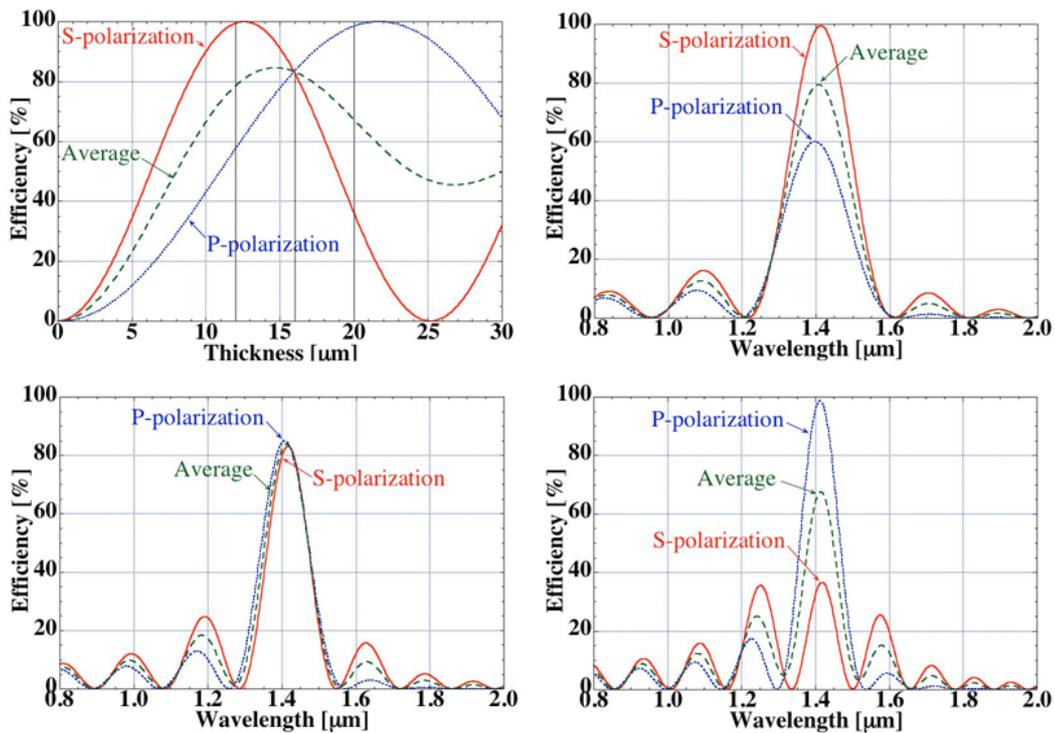


Fig. 3 Calculated polarized diffraction efficiencies versus thickness t of a VPH grating at $\lambda = 1.41 \mu\text{m}$ (upper left panel), and polarized spectral diffraction efficiencies on $t=12 \mu\text{m}$ (upper right panel), $16 \mu\text{m}$ (lower left panel) and $20 \mu\text{m}$ (lower right panel) calculated by RCWA method. $n_{\text{max}} = 1.60$, $n_{\text{min}} = 1.50$, $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$ and $\theta_B = \theta_0 = 45^\circ$.

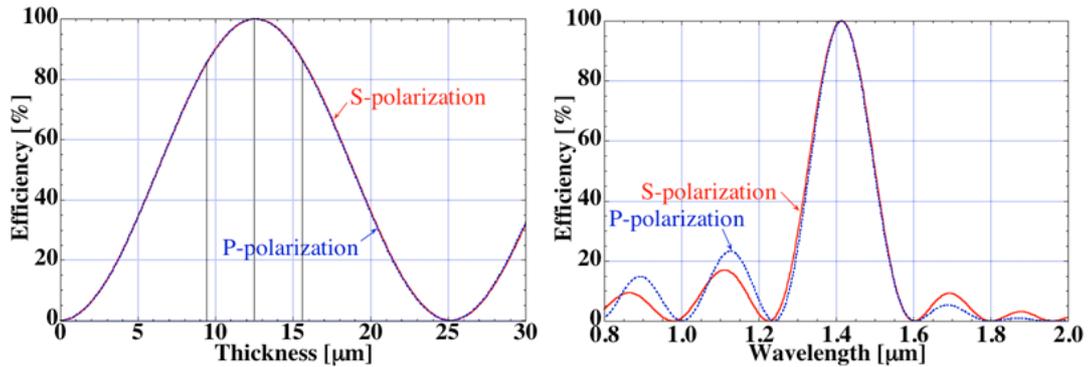


Fig. 4 Calculated polarized diffraction efficiencies versus grating thickness t of birefringence VPH grating at $\lambda = 1.41 \mu\text{m}$ (upper panel), and polarized spectral diffraction efficiencies on $t = 9.4 \mu\text{m}$ (upper middle panel), $12.5 \mu\text{m}$ (lower middle panel) and $15.6 \mu\text{m}$ (lower panel) calculated by RCWA method. $n_{S\text{max}} = 1.60$, $n_{S\text{min}} = 1.50$, $n_{P\text{max}} = 1.653$, $n_{P\text{min}} = 1.50$, $\Lambda = 1.0 \text{ mm}$, $\theta_0 = 45^\circ$.

した厳密結合波解 (RCWA) のソフトウェアを光学異方性媒質にも対応できるように改良して、Birefringence VPH grating が自然偏光や円偏光に対して最大 100%の回折効率を達成できることを確認した (Fig. 4)。

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 Birefringence 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 (Fig. 5)。ただし、紫外線硬化型と通常の液晶が同一メーカーの組合せ (1 種類) は他の 2 種類より回折効率が極端に低かった。

3. Volume binary grating

VB grating は屈折率が異なる 2 種類の材質の幅 (L&S: Line and space) を調整して、高次回折光に対して比較的高い回折効率を達成できることが RCWA によって確認されている。Fig. 6 は WFOS 用を想定した VB grating (L&S=4.75:0.25 [μm]、深さ $9\mu\text{m}$ 、7~11 次を使用) の回折効率である。この VB grating は S 偏光より P 偏光の効率がよく、6 次以上において 70%程度 of 回折効率を達成できることがわかった。

回折格子は回折次数が高くなると光波と格子との電磁気的なカップリングが弱くなり、光波の挙動が波動光学で取り扱えるようになる。VB grating は低屈折率の媒質と高屈折率の媒質との界面において入射光が臨界角を超えている場合に、高次回折光においては低屈折率の層を全反射面として扱うことができるようになり、低屈折率媒質の幅を狭くするほど効率が高くなる。(ただし、間隔が波長の数分の一以下ではエバネッセント結合により 0 次光に強度が分配されて効率が低下する。) すなわち、全反射ミラー

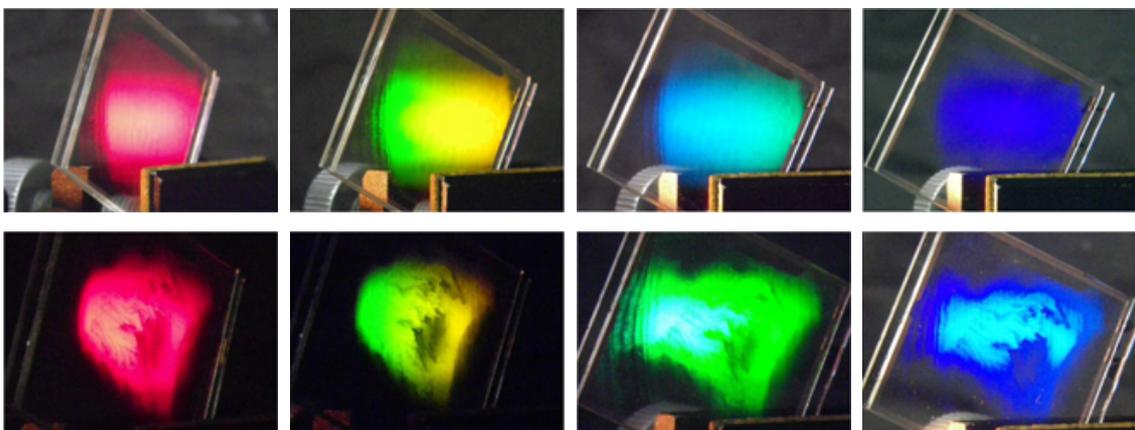


Fig. 5 Diffraction image of liquid crystal gratings with the 1st order. Rows are the same gratings, columns are different observation (Bragg) angles.

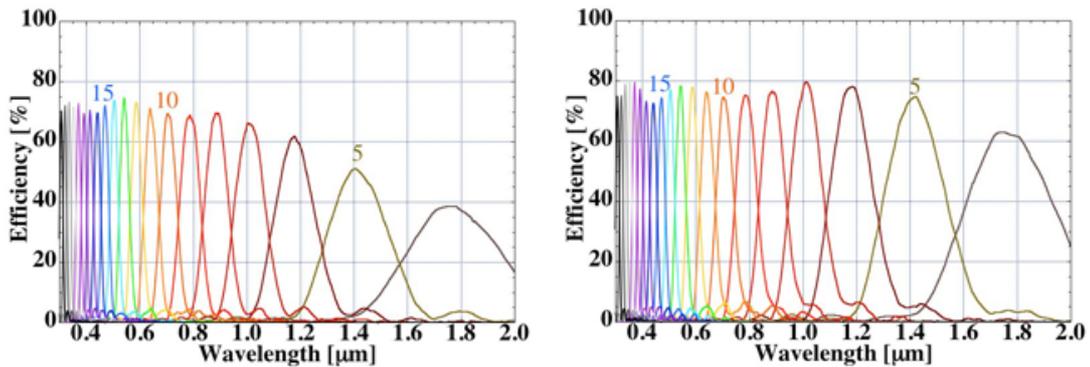


Fig. 6 Diffraction efficiencies of volume binary gratings for the 4th to 23th diffraction orders. $n_1=1.0$, $n_2=1.55$, $n_3=1.55$, $\Lambda=5 \mu\text{m}$, $L\&S=4.75:0.25 [\mu\text{m}]$, $t=9 \mu\text{m}$, $\theta_0=45^\circ$. Left panel: S polarization, right panel: P polarization.

面が整列した Quasi-Bragg grating (次節) と見なすこともできる。

高アスペクト比の矩形格子を実現するために、豊田工業大学のナノテクノロジープラットフォームとの共同研究により、MEMS 技術を応用してフォトレジスト等の矩形回折格子の製法を開発した結果、 $L\&S=4:1 [\mu\text{m}]$ 、深さ $10\mu\text{m}$ の VB grating の製作条件を見出すことができた。この VB grating は入射角と回折角が 17.3° の場合に $m\lambda=3\mu\text{m}$ (1次@ $3.0\mu\text{m}$, 2次@ $1.5\mu\text{m}$, 3次@ $1.0\mu\text{m}$...) の透過型回折格子として回折効率 $60\sim 70\%$ 程度であると見積もられている。しかし、上記のような WFOS 用の VB grating は製作が困難であることが分かった。

4. Quasi-Bragg grating

Quasi-Bragg (QB) grating は短冊状の金属膜あるいは低屈折率層が錠戸やブラインドのように精度よく平行に配列された高次回折光用の透過型回折格子である。前節と同じく WFOS 用を想定した QB grating について RCWA 法の数値解析を行った結果、Fig.7 のように P 偏光より S 偏光の効率が高く、8 と 9 次で 60% 程度、4~7 次と 10 次以上で 70% 程度を達成できることがわかった。

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²¹⁾により積層して QB grating を試作した。また、平行平面基板自体をエッチングして厚さを維持したスペーサを形成した基板を積層することによって、格子周期の精度が高い QB grating を実現する方法を考案した。クロムがスパッタリングされたミラー面の裏面にエッチングによりエンボス (スペーサ) を形成した 0.5mm の石英ミラー基板 47 枚を紫外線硬化型接着剤により積層して、QB grating を試作した。

これらの QB grating 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

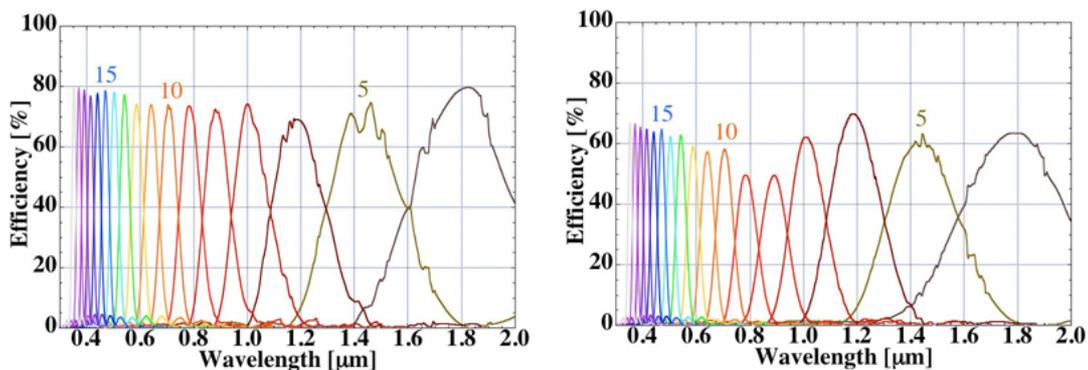


Fig. 7 Diffraction efficiencies of QB gratings for the 4th to 20th diffraction orders. $n_0=1.0$, $n_1=1.54$, $\Lambda=5 \mu\text{m}$, $t=9 \mu\text{m}$, $\theta_B=45^\circ$. Left panel: S polarization, right panel: P polarization.

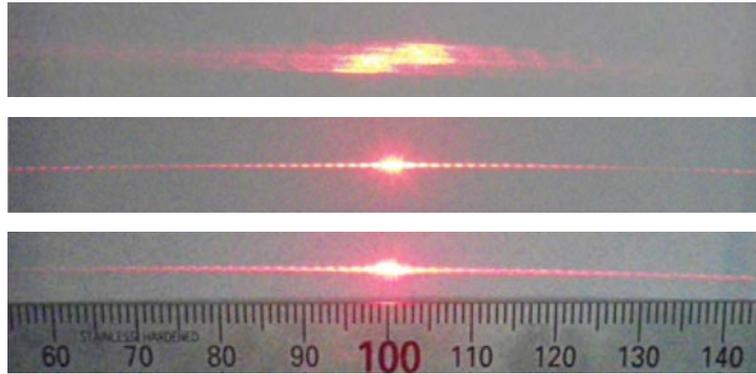


Fig. 8 Diffracted beam images of QB gratings, Quasi-Bragg angle: 45° . QB grating on the top panel is that silica glass substrates of 0.2mm in thickness deposit with chromium film on one side are laminated by adhesive mixed with glass beads of $10\ \mu\text{m}$ in diameter. QB grating on the middle panels is that silica glass substrates of 0.5 mm in thickness deposit with gold film on both sides are laminated by fusion of gold in room temperature. QB grating on the bottom panels is that silica glass substrates of 0.5 mm in thickness with emboss laminated by adhesive.

入された接着剤で積層したQB gratinの回折像を観察したところ、ガラスビーズが混入された接着剤で積層したQB gratinは、ガラスビーズの直径のばらつきのために、Fig. 8の上段のよう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 gratingは Fig. 7の中段のように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、エンボス基板を積層したQB gratingは接着の条件が最適ではなかったため、Fig. 8の下段のように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。

5. Immersion grating (近-中間赤外線・高分散分光観測装置用)

昨年度に開発した 60 枚刃の単結晶ダイヤモンド・エンドミルによってシリコン基板に V 溝加工を行った。その結果、エンドミルの側面と底面とのエッジ部分によって加工された面は比較的滑らかであるが、側面の歯の部分によって加工された面には脆性破壊が見られた。その原因として歯の稜部が曲面になっているために加工層を除去できず、押し潰しているためではないかと考えられる。改善策として、側面を研磨して歯の稜部に鈍角（負のすくい角）のエッジを設けることが考えられる。

6. Reflector facet transmission grating

前述の VB grating や QB grating は、格子間隔が $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 程度の WFOS 用の透過型回折格子の製作が困難である。Reflector facet transmission (RFT) grating は Fig.9 左のようにノコギリ歯形状の格子の一方の面

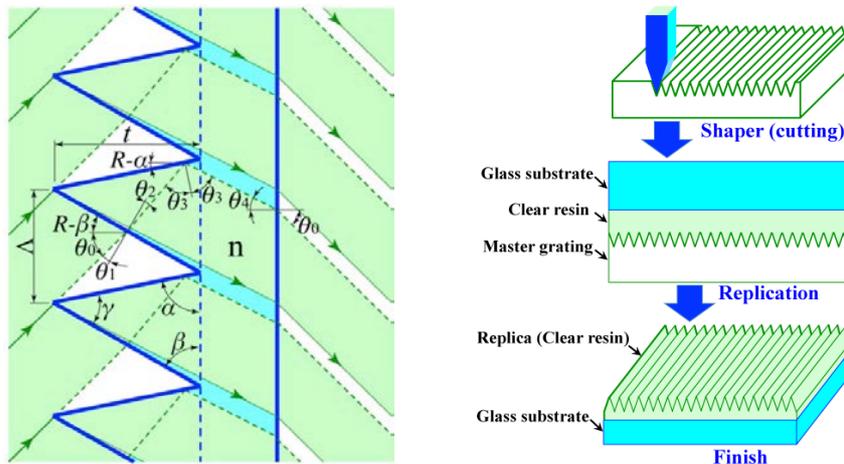


Fig. 9 Schematic representation of reflector facet transmission (RFT) grating (Left panel). Fabrication process of mirror substrate with emboss for RTF grating (Right panel).

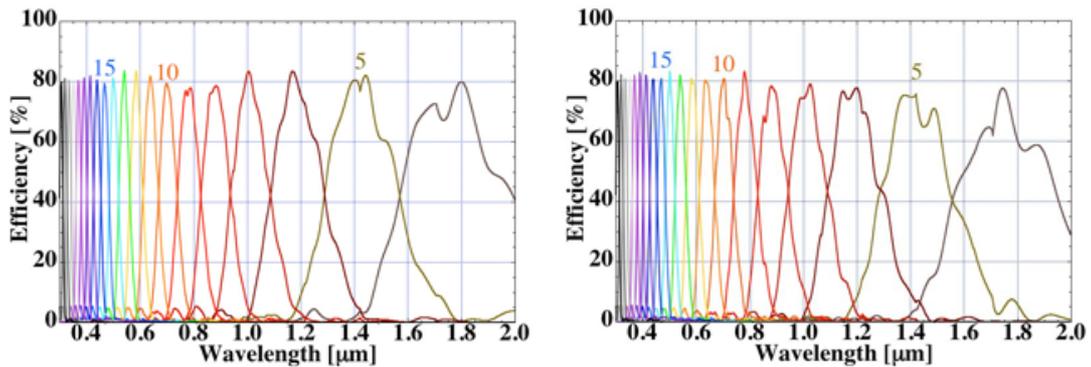


Fig. 10 Diffraction efficiencies of QB gratings for the 4th to 23th diffraction orders. $n_0=1.0$, $n_1=1.54$, $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, $t = 9 \mu\text{m}$, $\theta_B = 45^\circ$. Left panel: S polarization, right panel: P polarization.

から入射した光束が、格子のもう一方の面で反射して格子の裏面の平面から光束が出射する新しい格子構造の回折格子（特許出願）である。VB grating や QB grating と同様に WFOS 用を想定した RCWA 法の数値解析を行った結果、Fig.10 のように S と P 偏光の効率がほぼ等しく、4 次より高次において 80% 程度の回折効率を達成できることがわかった。さらに RFT 回折格子は QB 回折格子や VB 回折格子より製作が容易であると見込まれる。

7. 回折格子測定装置の改造

以前に開発した回折格子測定装置の改造を行なった。当初はパソコンと A/D コンバータの交換および制御ソフトの修正を行なう予定であったが、回転ステージのモータドライバが最新のパソコン OS に対応していないことが判明したため、回転ステージとモータドライバも交換することになり、制御ソフトは新たに作成することになった。さらにモノクロメータの波長走査も自動化した。

8. 成果報告・特許

1) 国内会議口頭発表

- ・海老塚 昇 他, "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, 2015 年 6 月 25, 26 日
- ・海老塚 昇 他, "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, 2015 年 9 月 4-6 日
- ・海老塚 昇 他, "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), 2015 年 11 月 24-26 日
- ・海老塚 昇 他, "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, 2015 年 12 月 7-9 日

2) 国内会議ポスター発表

- ・ N. Ebizuka et al., "Current Status of Novel Gratings for Next Generation Astronomical Instruments II", Subaru Users' Meeting FY2014, 国立天文台 (三鷹), 2015 年 1 月 13-15 日
- ・海老塚 昇 他, "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」, 国立天文台 (三鷹), 2015 年 9 月 14-16 日

3) 特 許

- ・海老塚 昇, 岡本 隆之, 山形 豊, "光学素子およびその製造方法" (Quasi-Bragg grating の製造方法), 2015 年 9 月 3 日出願
- ・海老塚 昇, 岡本 隆之, 細島 拓也, 山形 豊, "透過型回折格子、光導波路、ならびに透過型回折格子の使用方法および設計方法" (Reflector facet transmission grating), 2016 年 3 月 31 日特許出願

使用実績報告書

1. 総括表

区分	費目	予算額 (円)	決算額 (円)	研究費の 充当額 (円)	備考
支出	設備備品費	600,000	648,000	648,000	
	消耗品費	1,160,000	1,128,060	1,126,100	
	その他の経費	400,000	385,900	383,900	
	合計	2,160,000	2,161,960	2,160,000	
収入	研究費の額	2,160,000	2,160,000		
	自己調達額	0	1,960		
	その他				
	合計	2,160,000	2,161,960		

2. 決算費目別内訳

(A) 支出

a 設備備品費

種別	仕様	数量	単価 (円)	金額 (円)	発注年 月日	引取年 月日	支払年 月日	備考
モノクロ メータ	DU-25型波長 駆動装置	1	648,000	648,000	2015年 12月24日	2016年 3月2日	2016年 3月29日	MC-10N分光器用
計				648,000				

b 消耗品費

種別	仕様	数量	単価 (円)	金額 (円)	支払年月日	備考
石英基板	100×100×t0.5	10	10,584	105,840	2016年1月 7日	
クロム+レジスト基板	両面クロム+レジスト塗布	10	21,168	211,680	2016年1月27日	
マスクケース	100×100基板10枚用	1	2,700	2,700	2016年1月27日	
Quasi-Bragg grating	23.5×4×t0.5, 46枚積層	1	518,400	518,400	2016年3月29日	試作品
石英ウエハ	φ50×t0.52	100	2,894.4	289,440	2016年3月29日	
計				1,128,060		

c その他の経費

種 別	摘 要	数 量	単 価 (円)	金 額 (円)	発注年月 日	引取年月 日	支払年月 日	備 考
国内旅費（光学シンポジウム）	武蔵境-駒場東大前	2	1,500	3,000			2015年 7月17日	東大生産研、6月25~26日
光学シンポジウム参加費		1	6,000	6,000	2015年 6月30日	2015年 6月30日	2015年 7月17日	東大生産研、6月25~26日
国内旅費（精密工学会）	武蔵境-仙台	1	36,420	36,420			2015年 10月16日	東北大学（川内）、9月3~4日
国内旅費（研究打合せ）	武蔵境-名古屋大学-相生山	1	37,260	37,260			2015年 12月18日	名古屋大学、11月9日、豊田工大、11月10日
国内旅費（観測装置WS）	武蔵境-青葉山	1	46,820	46,820			2016年 1月15日	東北大学（青葉山）、12月7~9日
国内旅費（すばるUM）	武蔵境-熱海	1	34,840	34,840			2016年 2月19日	KKRホテル熱海、1月19~21日
国内旅費（研究打合せ、天文スペクトル研究会）	武蔵境-神領-摂津本山	1	61,560	61,560			2016年 3月18日	中部大学、2月26日、甲南大学、2月27~28日
ナノテクプラットフォーム利用料		1	160,000	160,000	2015年 4月1日	2016年 4 月6日	2016年 2月24日	豊田工大
計				385,900				

(B)収入

種 別	摘 要	金 額 (円)	備 考
研究費の額	TMT戦略基礎開発経費	2,160,000	
自己調達額		1,960	
その他			
計		2,161,960	

(注) 共同研究の実施に際し、収入を得た場合や取引相手先からの納入遅延金が発生した場合には、収入の欄におけるその他に計上すること。