

台内

平成27年度国立天文台共同開発研究報告書

平成28年 5月20日

国立天文台長 殿

研究代表者	氏名	(ふりがな) えびづか のぼる		
		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		
	電話	048-462-1111	E-mail	noboru.ebizuka@riken.jp
研究課題名	TMT 用高効率・高分散エシェルタイプ透過型回折格子の開発			
研究実績	詳細は別紙参照。 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の製作方法), 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			
研究の活用	Quasi-Bragg (QB) grating エンボスに加わる荷重によってミラー面が陥没して格子周期が乱れることがわかった。エンボスに加わる荷重を軽減するためにエンボスの密度を10倍程度増やしたミラー基板を積層してQB回折格子の試作を行う。また、格子が傾いたQB gratingと直角プリズムおよび表面ミラーと組み合わせてQuasi-Bragg immersion (QBI) gratingの試作を行う。 ミラー基板を積層する方法では格子周期が100μm以下のQB grating (次世代30m望遠鏡:TMTの観測装置WFOS用の回折格子は格子周期が2-5μm)を製作することが困難である。一方、紫外線露光によるフォトリソの高アスペクト比のVolume binary (VB) grating (厚い矩形回折格子)を製作す			

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ない。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エ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。

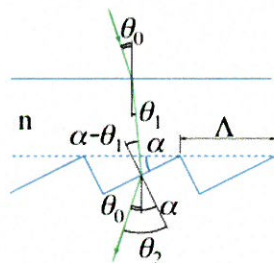


Fig. 1 Propagation of incident beam in SR grating with sawtooth grooves.

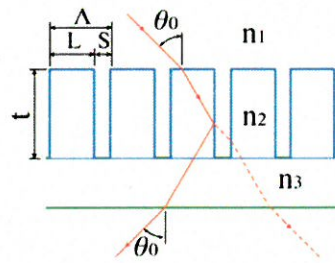


Fig. 2 Schematic representation of volume binary grating.

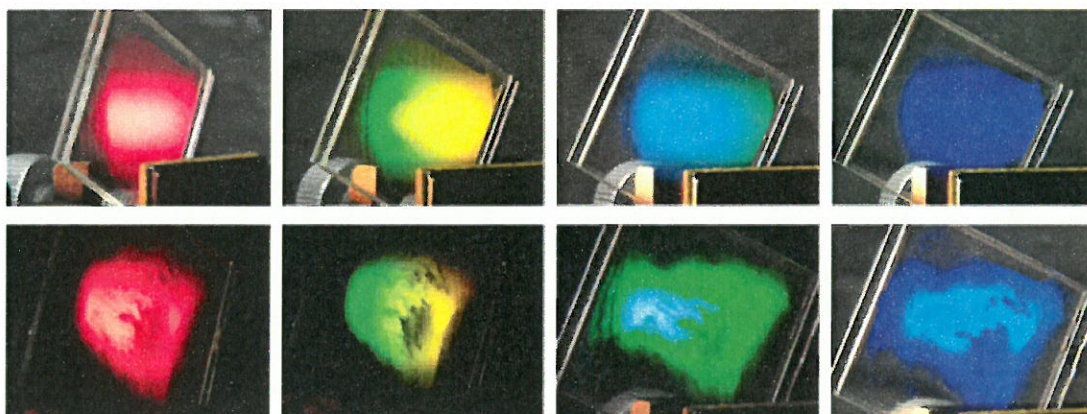


Fig. 5 Diffraction image of liquid crystal gratings with the 1st order. Rows are the same gratings, columns are different observation (Bragg) angles.

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作法を開発した結果、 $L\&S=4:1$ [μm]、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 60~70%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鏡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

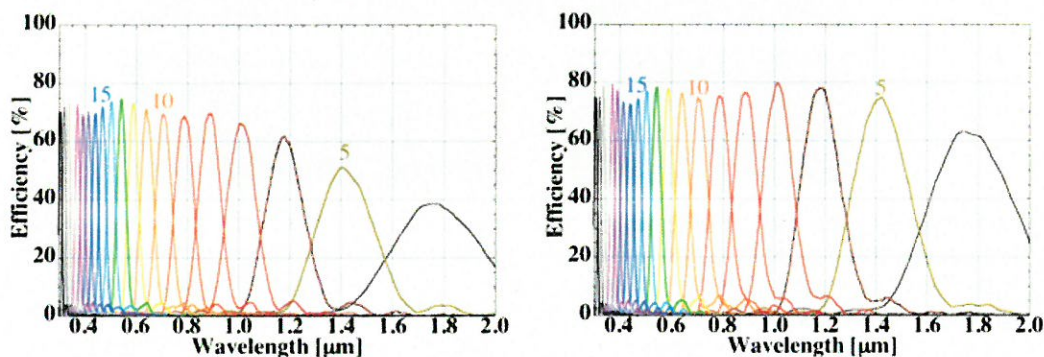


Fig. 6 Diffraction efficiencies of volume binary gratings for the 4th to 23th diffraction orders. $n_1=1.0$, $n_2=1.55$, $n_3=1.55$, $\Lambda=5\mu\text{m}$, $L\&S=4.75:0.25$ [μm], $t=9\mu\text{m}$, $\theta_0=45^\circ$. Left panel: S polarization, right panel: P polarization.

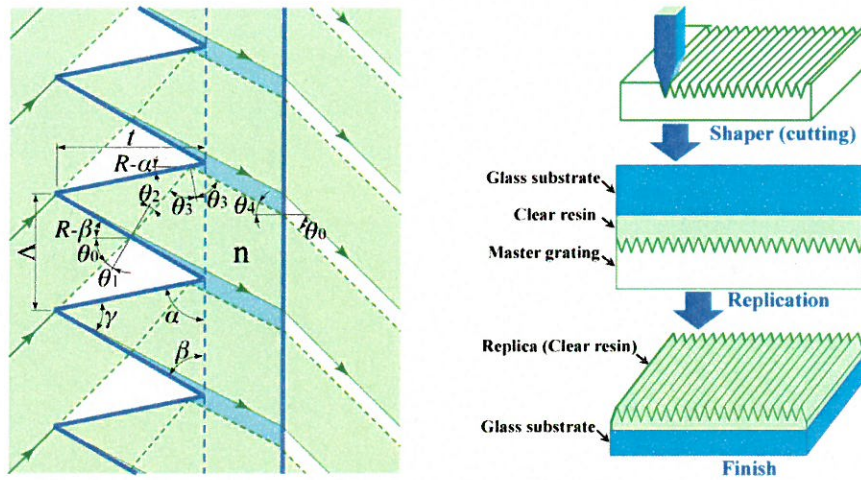


Fig. 9 Schematic representation of reflector facet transmission (RFT) grating (Left panel). Fabrication process of mirror substrate with emboss for RTF grating (Right panel).

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。

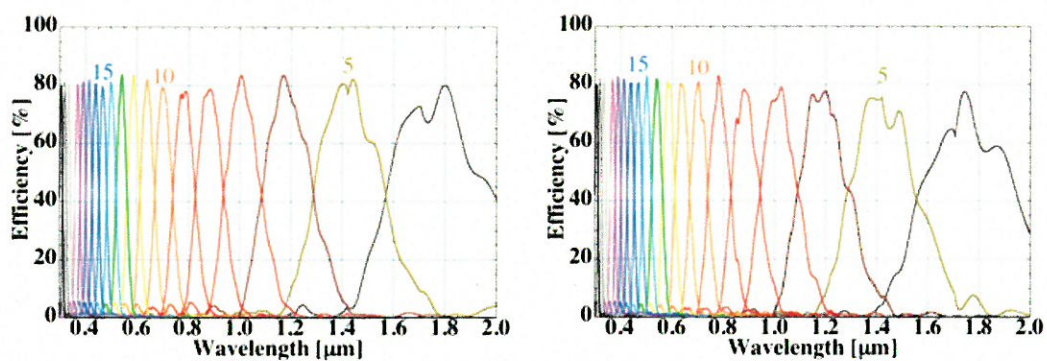


Fig. 10 Diffraction efficiencies of QB gratings for the 4th to 23th diffraction orders. $n_0=1.0$, $n_1=1.54$, $\Lambda=5\mu\text{m}$, $t=9\mu\text{m}$, $\theta_B=45^\circ$. Left panel: S polarization, right panel: P polarization.