成　果　報　告　書

研究題目：高分散・高効率・広波長帯域 Trapezoid grating 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
格子形状の設計					◆							
Si鋳型の試作								←→	←→	←→	◆	
レプリカ加工											←→	
インプリント加工											◆	◆
測定											◆	◆

(2)研究の成果の説明

すばる望遠鏡の MOIRCS や FOCAS 用および TMT の WFOS 用の高効率かつ広帯域の透過型回折格子として、Trapezoid grating（図 1）を開発している。図 2 のようなシリコン基板にサイクルエッチングおよびシリコンの酸化・酸化膜除去により製作された高アスペクト比のシリコン格子を鋳型にして、レプリカ加工あるいはインプリント加工によって樹脂の Trapezoid grating を製作する。図 3 左の MOIRCS, K バンド用の Volume binary (VB) grating（深い溝の矩形回折格子）と図 3 右の Trapezoid grating の回折効率を比べると Trapezoid grating の方が *s* と *p* 偏光の分光特性を近づけられるために回折効率の平均値が高いことがわかる。

従来の波長 365nm のマスク露光では 2μm 以下の線幅のパターンニングが困難である。豊田工大の佐々木教授が考案した超密着露光法により、線幅約 1.2μm のパターンニングを実施した。側面のテーパー角はサイクルエッチングのガス量の調節および酸化の工程で酸素ガスと水素ガスの量（水蒸気量）を調節することにより制御できる。図 4 は試作したシリコンの Trapezoid grating の鋳型である。この Trapezoid grating の鋳型の L&S と溝の深さは、ほぼ設計通りであるが、テーパー角は設計値より小さい。

（株）島津製作所においてレプリカ加工の実験を行った。レプリカ加工はシリコン鋳型に離型剤を塗布した上にアルミ蒸着し、紫外線硬化型樹脂を滴下してガラス基板を乗せた後に樹脂を硬化させ、離型剤の部分を剥離する工程である。シリコン鋳型の裏面とガラス基板の接着面で剥離した。このことから深い溝の VB grating や Trapezoid grating のレプリカ加工が困難であることが分かった。

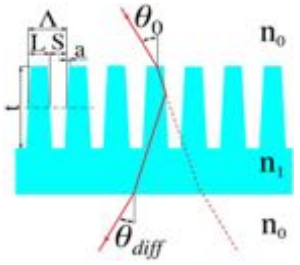

図1 Trapezoid gratingの概念図。

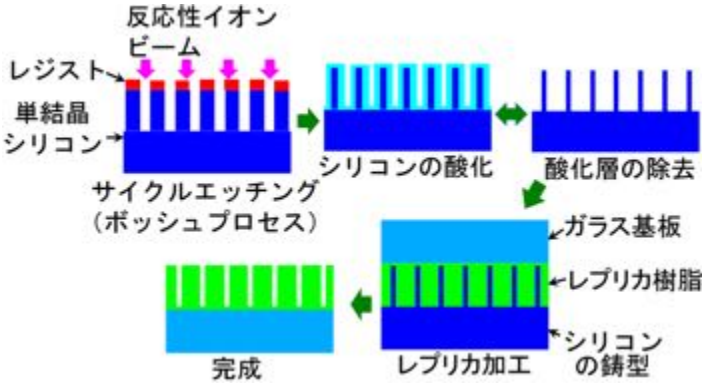

図2 高アスペクト比のTrapezoid grating/VB gratingの製作方法。

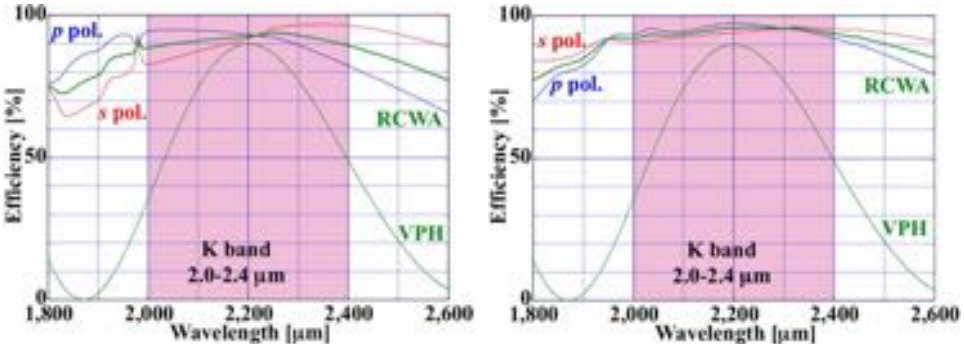

図 3 MOIRCS, K バンド用 VB grating（左）および Trapezoid grating（右）の回折効率。VB grating: L&S=1.18:1.18, 溝のアスペクト比 1:3.6、Trapezoid grating: L&S=1.39:0.97, 溝のアスペクト比 1:4.64, 溝の傾斜角: 7.1°。

日本特殊樹脂光学（株）においてインプリント加工の実験を行った。インプリント加工はシリコン鋳型に離型剤を塗布し、紫外線硬化型樹脂を滴下して硬質樹脂の基板を乗せた後に剥離する工程であるが、レプリカとの違いは硬質樹脂基板の端から剥離し、樹脂が変形するために力が剥離部分に集中する点である。その結果、インプリント加工により Trapezoid grating を試作することができた。

図 5 はインプリント加工により試作した Trapezoid grating の回折効率である。今回のシリコン鋳型はテーパー角が設計値より小さいが、ピークの効率が 85%程度、計算値と同じく広い帯域幅を達成した。なお、2200~2500nm の吸収は紫外線硬化型樹脂の吸収である。

(3) 今後の課題

・今回の鋳型に使用したシリコンウエハの厚さが 300μm であったため、ガラス基板に接着したことにより、回折光の波面が干渉計で測定不能となるほど大きく乱れてしまった。曲げ強度は厚さの 3 乗に比例するが、ウエハを厚くするとドライエッチング時の電界が変化するために電圧の調整が必要である。今後、シリコンウエハの厚さの検討とともに、薄いウエハを厚いウエハの接合も検討する。

・すばる望遠鏡や TMT の観測装置用の回折格子はサイズが 4 インチ以上であるが、超密着露光の場合に露光面積は 2 インチ程度が限界である。現在、405nm のレーザ干渉露光によるパターンニングを開発中である。

・MOIRCS の K バンド用の場合に今回使用した紫外線硬化型樹脂は使用できない。また、TMT の可視光観測装置 WFOS の場合、310nm まで透過する必要がある。今後、310~2400nm にて吸収がないフッ素系樹脂（旭硝子製サイトップ等）やシリコン樹脂によるインプリント加工技術を開発する。

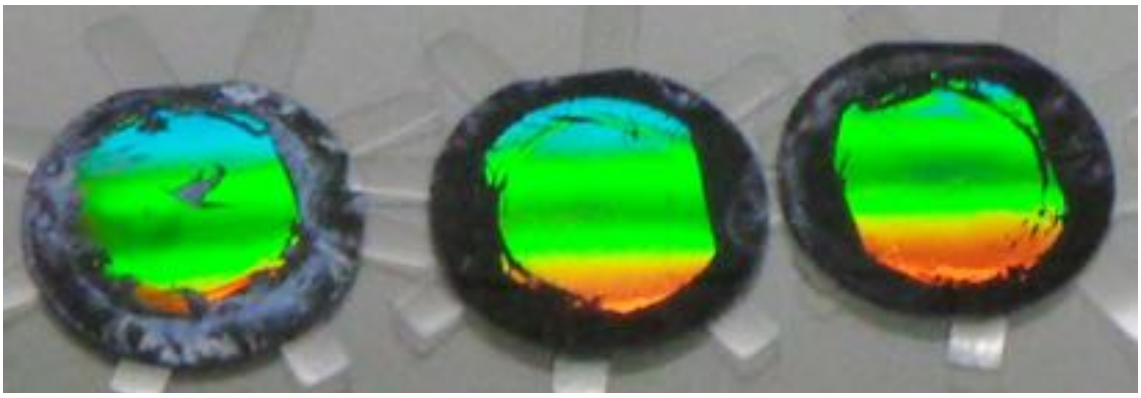

図 4 シリコンの Trapezoid grating 鋳型。

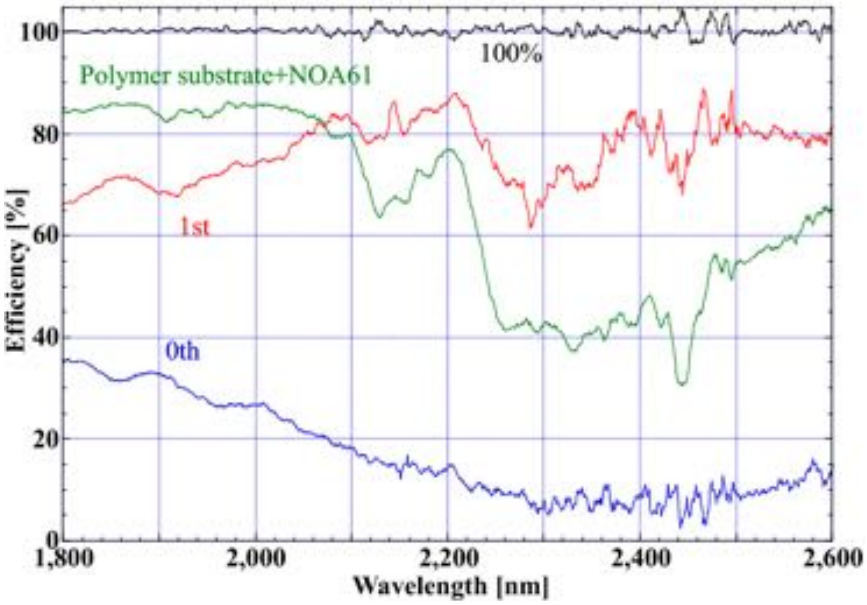

図5 インプリント加工により試作したTrapezoid gratingの回折効率（赤線）。

国際会議発表

1) N. Ebizuka, T. Okamoto, Y. Yamagata, M. Sasaki, I. Tanaka, T. Hattori, K. Motohara, T. Kodama, S. Ozaki, W. Aoki, Y. Nakauchi, M. Nishimaki, K. Yamamoto, K. Saiki, "Current Status of Novel Gratings for Next Generation Astronomical Instruments VII" Subaru Users meeting FY2021, 2022年1月11~13日, 国立天文台 (三鷹市, ハイブリッド開催), ポスター発表.

国内会議発表

1) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 山形 豊, 佐々木 実, 西牧 真木夫, 山本 和也, 岡田 真, 佐伯 和人, 仲内 悠祐, 田中 壱, 服部 堯, 本原 顕太郎, 児玉 忠恭, 尾崎 忍, 青木 和光, "天文学観測および宇宙探査用の新しい透過型回折格子," 第 27 回 天体スペクトル研究会, 2022 年 2 月 12, 13 日, Online 開催, 口頭発表。

2) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 山形 豊, 佐々木 実, 西牧 真木夫, 山本 和也, 岡田 真, 佐伯 和人, 仲内 悠祐, 田中 壱, 服部 堯, 本原 顕太郎, 児玉 忠恭, 尾崎 忍, 青木 和光, "次観測装置用の新しい回折格子の開発状況 VIII," 第 9 回可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 2021 年 12 月 1, 2 日, 国立天文台 (三鷹市、ハイブリッド開催), 口頭発表.

特　許

・佐々木 実、海老塚 昇、岡本 隆之、山形 豊、仲内 悠祐、西牧 真木夫、山本 和也、岡田 真、"ガラス回折格子及びその製造方法," 特願 2021-165361。