

すばる望遠鏡天体分光観測用 VPH グリズムの開発

岡 恵子, 山田亜希子, 石川 麻美, 柏木 正子, 小舘香椎子
日本女子大学理学部理学研究科 数理・物性構造科学専攻

(2003年10月20日受理)

要 旨 本研究で作製した Volume Phase Holographic (VPH) グレーティングは、レーザを光源とする 2 光束干渉露光により、干渉縞の光強度分布を記録材料の屈折率変調として 3 次元的に記録された、ホログラフィック格子である。また、記録材料が干渉縞の間隔より十分大きな厚さを持つため、厚いホログラフィック格子に分類される。厚いホログラフィック格子の再生は、一層の格子による通常の回折とは異なり、結晶を用いた X 線回折と同様に、多層格子によるブラッグ回折が生じ、ブラッグ条件を満たす入射により、100% に達する高い回折効率を得ることが出来る。2 光束干渉露光法は光源のレーザの波長以下の微細周期格子や曲面状格子の作製も可能であり、ルーリングエンジンなどの機械的格子の作製に比べ高性能な回折格子の作製に適している。しかし、これまでは高解像力と露光量に応じた幅広いダイナミックレンジの屈折率変調量を持ち、さらに処理や取り扱いが容易な優れた記録材料の開発があまり進んでいなかったため、特に大面積を持つ高性能な素子へ適用されていなかった。今回の VPH グレーティングの作製には、日本ペイント (株) により新たに開発された光重合性の高解像・高屈折率変調量を持つ液状の高分子フォトリソレジストを記録材料として使用した。その結果、0.03 の屈折率変調量により 80% の高い回折効率を持つ VPH グレーティングを、大面積 ($110 \times 106 \text{ mm}^2$) に渡り、わずか $\pm 2\%$ の変動率で作製でき、また高い面精度 ($\text{rms} = 0.494 \lambda$) を持つことも Zygo 干渉計測計により確認した。

一方、我々は 2000 年度より国立天文台すばる望遠鏡の観測装置の一つである、微光天体分光撮像装置 (FOCAS) 搭載用の分光素子 Volume Phase Holographic (VPH) グリズムの開発を行ってきた。そこで今回試作した直進波長 435nm、波長分解能 2300 の VPH グレーティングを 2 つのプリズムと合わせ VPH グリズムを完成し、2003 年 6 月にハワイ島に出かけ、すばる望遠鏡 FOCAS に搭載し、性能評価を目的とした測光標準星の分光観測を行った。性能評価実験により、試作 VPH グリズム 435 は設計波長 435nm 付近で既存のレプリカタイプのグリズム (分解能 1000) より高分解能 (2300) で、約 2 倍の回折効率が得られたことを確認した。

本論文では、高効率回折格子として、屈折率変調型の VPH グレーティングの設計・作製プロセスについて述べる。また応用として、天体観測用 VPH グリズムの開発を行い、すばる望遠鏡 FOCAS に搭載し性能評価観測により、優れた性能を持つことが確認された結果について報告する。

キーワード: Volume Phase Holographic (VPH) グレーティング, 屈折率変調格子, フォトリソレジスト, 厳密結合波解析 (RCWA), VPH グリズム, すばる望遠鏡 FOCAS, 天体分光観測

1. はじめに

気温の変化、気流の乱れが小さく、空の透明度が高いハワイ島マウナケア山頂 4200m に世界最大級の 1 枚鏡である口径 8.2m のすばる望遠鏡が建設されている。数百億光年の宇宙の果てを観測し、宇宙初期の原始銀河、銀河の形成過程の解明、及び太陽系外の恒星をまわる惑星

系の探索を行い、これらの形成過程を研究することにより太陽系・地球・生命の起源の解明を行うことが目的である。遠い宇宙の天体を観測し、宇宙の構造や進化を調べるためには、かすかな暗い天体のスペクトル観測を効率良く行える分光素子が必要である¹⁻³⁾。

分光素子は 19 世紀初頭に提案されたプリズムをはじめ、20 世紀初頭には高い回折効率をもつ表面形状型のブレイズ格子やエシュレット格子、厚さが等しい水晶を階段状に並べることで高い分解能を与えるエシュロン、エシェ

ル格子などが次々に提案され、分光器に使用されている。特に、1954年に G. H. Herbig により多数の天体を同時に分光するために透過型回折格子とプリズムを組み合わせたグリズムが提案されている⁴⁾。しかし、広い波長域にわたる高分散天体観測用分光素子としては、従来の階段状溝形状の高次回折格子（エシェル型）と高屈折率のプリズムを組み合わせた表面刻線型グリズムではプリズムと回折格子の部分との屈折率差により、プリズム頂角が制限され、現状以上の高性能化は難しい^{5, 6)}。例えば、プリズムとエシェル格子の屈折率がそれぞれ、2.3と1.5の場合、プリズム頂角が約40°で臨界角となり、約2500以上の高分散能が得られない。一方、我々が国立天文台、理化学研究所と共同で提案し開発を進めている VPH グリズムは Volume Phase Holographic (VPH) グレーティングを2つのプリズムで挟んだ構造となっているため、例えばプリズムとグレーティングの屈折率が同じ値の2.3と1.5とすると、臨界角が63.6°となり、表面刻線型グリズムより4.7倍の分解能を得ることが可能である⁷⁻¹²⁾。この VPH グリズムで使用している VPH グレーティングは、レーザを光源とする2光束干渉露光により、干渉縞の光強度分布を記録材料の屈折率変調として3次元的に記録したホログラフィック格子である。記録材料が干渉縞の間隔より十分大きな厚さを持つため、厚いホログラフィック格子に分類される。厚いホログラフィック格子の再生では、結晶のX線回折と同様に多層格子によるブラッグ回折が生じ、ブラッグ条件を満たす入射により、100%に達する高い回折効率を得ることが出来る。また、作製法の2光束干渉露光法は光源のレーザ波長以下の微細周期格子や曲面状格子の作製も可能であり、ルーリングエンジンなどの機械的格子の作製に比べ高性能な回折格子の作製に適している。しかし、これまでは高解像力と露光量に比例した幅広いダイナミックレンジの屈折率変調量を持ち、処理や取り扱いが容易な優れた記録材料の開発があまり進んでいなかったため、大面積を持つ高性能な素子へ適用が進んでいなかった。今回、この VPH グレーティングの作製に、新たに開発された光重合性の高解像・高屈折率変調量を持つ液状の高分子フォトリソ（日本ペイント製）を記録材料として使用した。

2003年6月には、Fig. 1に示す大面積(106×110mm²)の VPH グリズム(直進波長 $\lambda=435\text{nm}$)を試作し、すばる望遠鏡の微光天体分光撮像装置(FOCAS)¹³⁾に搭載し、性能評価のための観測を行った(Fig. 2)。その結果、天体分光観測用の分光素子に要求される条件である高効率(80%以上)と面精度($\text{rms}<\lambda/2$)を満たし、従来のグリズムに比べ、1.5～2倍の高効率と分解能 $R=2300$ が得られることを性能評価観測により確かめている¹⁴⁾。これにより開発した厳密結合波解析(RCWA)プログ

ラム^{15, 16)}を用いたグリズム設計と膜厚、屈折率変調量などの作製条件の算出¹⁷⁾、および高屈折率変調量を持つ感光性樹脂フォトリソ¹⁸⁾を用いた VPH グレーティングの作製法が FOCAS の可視光領域(350～1000nm)と分解能領域(3～10000程度)を満たす高性能な VPH グリズムの作製にとって有効であることを立証した。

本論文では、第2章で高分散能、高効率をもつ高性能な天体分光観測用 VPH グリズムの原理を述べる。第3章では VPH グリズムの性能を決めている VPH グレーティングの設計、作製、評価に関して記述し、第4章でまとめとする。

2. 天体分光観測用グリズムの原理

天体観測用の VPH グリズム分光素子として、機械切りの表面形状型回折格子が用いられていた。しかし、格子周期の周期を入射波長の5倍以下に微細化していくと、精度の良い作製が困難になり、高分散能をえることは難しい。また、入射波長の10倍以下の周期になると、偏光モードによる効率の差が生じてくる。

これに対し我々が提案する VPH グリズムは VPH グレーティングと2つのプリズムを組み合わせた構造を持っている。主要な役割を担う VPH グレーティングは2光束干渉光学系による作製が可能であり、格子周期が波長に近づき、膜厚、屈折率変調量などの最適条件が満たされたとき、ブラッグ条件入射により100%に近い1次回折効率が得られる。従って、高分散能、高効率といった分光素子の性能は、VPH グレーティングの性能に依存している。また、2光束干渉による書き込み角度を変えるだけで、格子周期を比較的容易に変えることができる利点も含んでいる。

今回作製する FOCAS 用の高分散グリズムは可視波長領域の350～1000nmにおいて分解能($R=\lambda/\Delta\lambda$)2500程度で、高効率であることが要求されている。FOCAS用の分光器の設計条件として、スリット幅(s)(0.2mm)とコリメータレンズの焦点距離(f_{cal})(1097.7mm)および分光素子のホルダーのサイズ(大きさ:106×110×90mm³, 頂角:20°)が固定されている。従って、組み合わせて使用するプリズムの頂角(α)は20°と決められる。Fig. 1を用いて以下の式(1)～(5)を導き、これらの式に直進波長(λ)、プリズム(PBM3)、乾板用ガラス基板(BK7)、感光材料(フォトリソ感光性樹脂)の屈折率の値(1.63:1.52:1.54)を入力し、格子周期(Λ)の値を算出する。

$$n_0 \sin \theta_{in} = n_1 \sin \theta_1 \quad (1)$$

$$\Lambda = \frac{m \lambda f_{cal} (1 + \tan \alpha \tan (\alpha - \theta_1))}{sR} \quad (2)$$

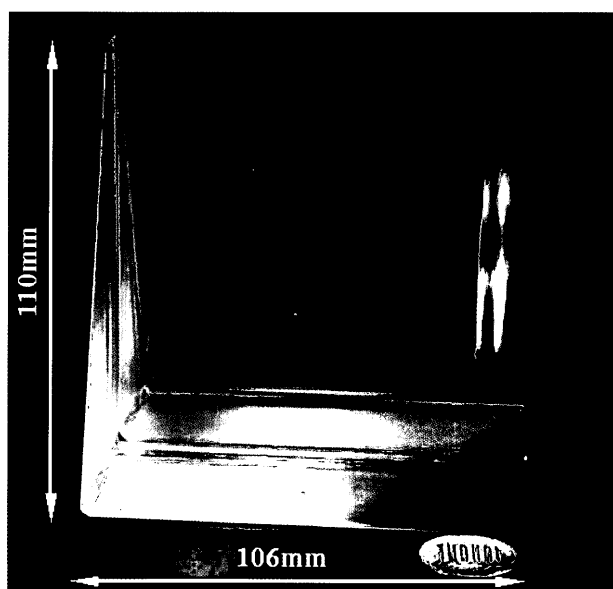


Fig. 1 $110 \times 106 \text{ mm}^2$ VPH grism designed and fabricated specially for the Subaru-telescope

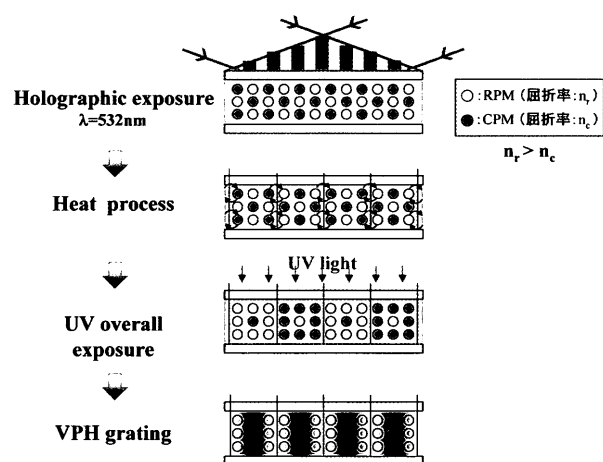


Fig. 3 Concept of a photopolymer system

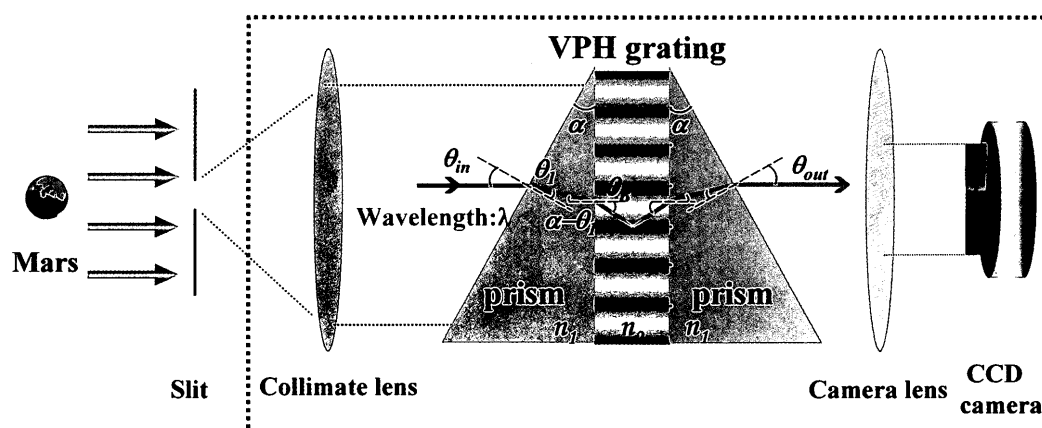


Fig. 2 System for FOCAS of the Subaru-telescope

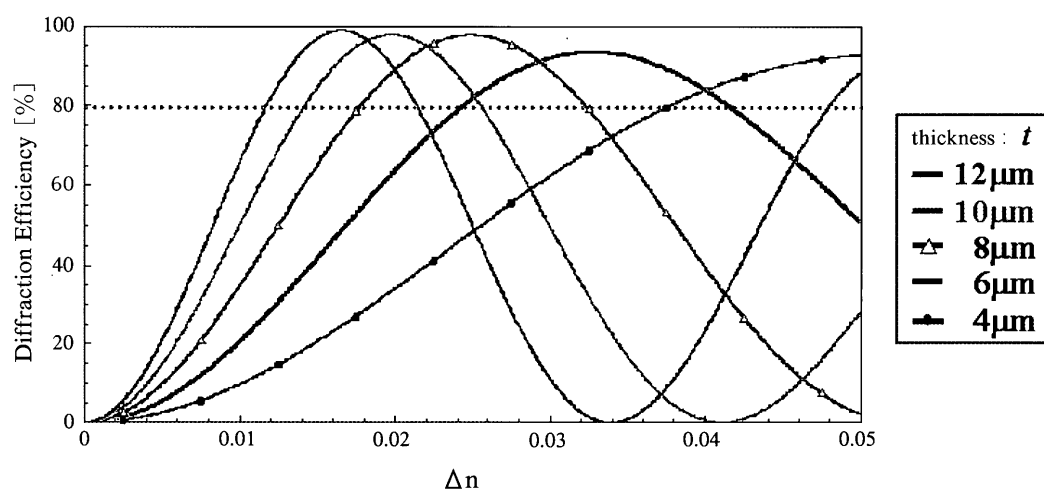


Fig. 4 Dependence of diffraction efficiency on refractive index modulation for each thickness

$$n_1 \sin(\alpha - \theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (3)$$

$$2n_2 \Lambda \sin(\theta_B) = m\lambda \quad (4)$$

$$\theta_w = \sin^{-1}\left(\frac{m\lambda}{2\Lambda}\right) \quad (0^\circ < \theta_w < 90^\circ) \quad (5)$$

ここで、 m : 回折次数、 θ_1 : プリズムの屈折角、 θ_B : ブラッグ角、 λ_1 : 露光用レーザ波長を示す。プリズム屈折率 n_1 を決定し、直進波長 435nm、分解能 R が 2300 の場合、式 (1) (2) より格子周期 Λ は $1\mu\text{m}$ と算出できる。そして、今回は感光材料に高分子フォトリソマー $n_2=1.54$ を用いた VPH グレーティング作製の際、式 (2)、(5) より Nd:YVO_4 レーザ ($\lambda_1=532\text{nm}$) の 2 光束書き込み角度 θ_w が決まる。また、ブラッグ角 (θ_B) と VPH グレーティングに入射する角度 (θ_2) が等しくなるように設計する。

Fig. 2 には FOCAS 内の光学系を示す。ここに VPH グリズムを搭載し、天体の微少光を取り込むことで要求される波長を直進させ、スペクトルを効果的に取得することが可能となり、スペクトル解析により天体に含まれる物質や成分を同定することができる。

3. Volume Phase Holographic (VPH) グレーティングの作製

作製する分光素子の仕様として、サイズ $110 \times 106\text{mm}^2$ 、直進波長 435nm、回折効率 80% 以上、面精度 $\lambda/2$ 以下が求められ、この時の分解能はスリット幅 0.2mm の時 2300 になる。この要求項目を満たすための作製検討条件として、高効率を得るための膜厚、屈折率変調量の算出や露光条件、大面積で均一な波面精度があげられる。手順として最初に、開発した RCWA のプログラムを用い、高効率を得るために感光材料であるフォトリソマーの膜厚を算出する。得られた最適な膜厚で乾板の作製を行い、次に 2 光束干渉露光で基板に干渉縞を記録し、加熱処理、UV 露光を経て材料を硬化させる。最後に評価として回折効率測定と透過波面の測定を行い、高効率・高分解能な VPH グレーティングの作製を行う。さらにこの VPH グレーティングに対してキセノンランプを用いた回折効率における波長依存性や Zygo 干渉計による透過波面測定の評価実験を行っている。

3.1 VPH グレーティングの記録材料

体積ホログラフィック格子の記録材料として、従来から銀塩や重クロム酸ゼラチン系などが用いられてきている¹⁹⁾。銀塩は、ホログラム記録材料として高感度、高解像力のものが開発され、入手や取り扱いが簡単であるため広く使用されている。しかし、一般には振幅型で、高

効率を得るには漂白処理により位相型として用いているが、得られる効率は最大 70% 程度であり、膜の厚みも $10\mu\text{m}$ 程度が最大であることが今回の目的には適さない。また、重クロム酸ゼラチンの場合には、利点として高屈折率変調量 ($\Delta n \leq 0.1$) が得られるため高効率が得られ、さらに高解像力であることが挙げられる。しかし、現像処理として水洗、脱水、乾燥の湿式処理が必要となり、作製条件の再現性が得にくく、また湿気に対しては弱いので耐久性が悪いという欠点がある。そのため、乾燥後に上からシールを貼るなどの処理が必要となってくる。

そこで我々は、光ラジカル重合におけるモノマーの拡散現象を利用することで乾式処理が可能であり、湿気に強く、高屈折率変調量が得られる液状フォトリソマー (日本ペイント (株)) を VPH グレーティングの記録材料として用いている。このフォトリソマーは新しく開発されたもので、屈折率の異なるラジカル重合性モノマー: RPM (高屈折率) とカチオン重合性モノマー: CPM (低屈折率) の屈折率分布をレーザの 2 光束干渉露光により形成するものである。2 種類のモノマーの他に、シアニン系色素とジフェニルヨードニウム塩からなる光開始剤で構成されている。RPM は UV と $470\text{nm} \sim 600\text{nm}$ で重合し、CPM は UV でのみ重合するように作製されている。記録プロセスを Fig. 3 に示す。レーザの 2 光束干渉露光を行うと波長 530nm 付近と UV 光に感度のある RPM が反応し、干渉縞の明部にあたる部分が重合する。それにより RPM の濃度差による拡散移動が生じ、干渉縞の明部に RPM が集まる。さらに、加熱処理を行うことにより、拡散移動が促進され高屈折率変調量 ($\Delta n \leq 0.04$) が得られる。最後に、2 つのモノマーに感光波長域である UV 光 ($200 \sim 320\text{nm}$) を一様照射すると、残留している RPM と未反応のままである CPM が同時に重合し、干渉縞が定着する。このような過程により完成した VPH グレーティングは正弦波形状の 3 次元屈折率分布をもち、膜の透明性に優れている。

3.2 VPH グレーティングの最適作製条件の算出

本研究室で作成した電磁波解析の一種である厳密結合波解析: Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA) の数値計算プログラムを用いて、80% 以上の高効率を得る最適な膜厚と屈折率変調量の関係を算出した。RCWA は、0 次から任意の高次回折光までの考慮が可能で、偏光特性やエバネッセント波の影響も考慮できる。特に、屈折率変調型の素子や階段状構造の素子に対して有効であり、今回作製する VPH グレーティングの回折効率算出など、光波の振る舞いにおける厳密な解析が可能な手法である。

Fig. 4 に格子周期を $1\mu\text{m}$ としたときの、各膜厚に対

する回折効率の屈折率変調量依存性を算出した結果を示す。図中の点線は、各膜厚における回折効率80%以上が得られる屈折率変調量の範囲を示している。さらに、予備実験により使用するフォトポリマーの屈折率変調量は0.03程度と算出されているのでこれらの数値を用いた数値計算に基づき、6 μm の膜厚で作製を行うことにした。この場合、Fig. 4 から屈折率変調量が0.025~0.039の間であれば80%以上の効率が得られることがわかる。

3.3 作製条件の最適化

RCWAにより算出した最適屈折率変調量と膜厚をもとに、実験において溶剤の揮発量や露光条件の検討を行い、高効率 VPH グレーティングの作製プロセスを検討した。作製プロセスとしては、VPH グレーティングの露光用乾板作製、2 光束干渉露光による干渉縞記録、屈折率変調量の増大を促す加熱処理、最後に均一な UV 光照射による干渉縞の定着処理を行い、VPH グレーティングが完成する。本研究では、記録材料の特性を考慮し光源を波長 $\lambda = 453\text{nm}$ の Nd:YVO₄ レーザとし、Fig. 5 に示す光学系を組み 110×106mm² の大面積 VPH グレーティングの作製を行った。均一な VPH グレーティングを作製するために、空間フィルターと凹面鏡を用い、ビーム系を 140mm に拡大し 2 光束で露光を行った。この光学系は Fig. 5 の黒丸 (●) の角度を等しくすることにより、2 つの凹面鏡のもつ収差を打ち消す配置を取っている。また、2 枚の $\lambda/2$ 板と偏光ビームスプリッター (PBS) を用い、2 光束の光強度の調整を行った。

次に、露光用乾板は大面積にわたり、均一な膜厚を得るために直径 6 μm のガラスビーズをあらかじめフォトポリマーに混入し塗布を行った。今回使用したフォトポリマーには、溶剤としてエタノールが33%含まれているので、高効率を得、一定の高屈折率変調量を得るために溶剤は出来るだけ揮発させることが望ましく、揮発温度を 70° とし、揮発時間を変化させ溶剤の揮発量を実験的に求めた。揮発温度の 70° は、このフォトポリマーは高温

になると硬化するため、ある時間揮発を行っても問題のない温度として経験的に求めた値である。15 分の揮発時間で溶剤の 90% が揮発し、それ以降は材料の硬化が見られるため、今回 90% まで溶剤を揮発させることに決定した。また高効率を得るために大きな屈折率変調量が必要であるが、屈折率変調量は露光エネルギーにも依存するため、最適な露光量の検討を行った。露光レーザーパワー 0.5mW における露光量依存性を調べた結果、20mJ/cm² で 80% 以上の効率が得られることを確かめ、これを作製条件とした。

3.4 評価

作製した VPH グレーティングの評価実験として、1 次光の透過波面精度とキセノンランプを光源とした回折効率測定を行った。Zygo 干渉計 GPI (光源: He-Ne レーザ (633nm)) を用いて、作製した VPH グレーティング (110×106mm²) の 1 次回折光における透過波面測定を行ったところ、rms=0.494 λ の均一な透過波面が得られた (Fig. 6)。また、キセノンランプに分光器 (SPG-120: 島津製作所) を組み合わせ、光源を波長可変した。キセノン光源から出た光はレンズを用いて分光器のスリットに集光させ、分光器の出射側スリットから出た光をレンズで平行光にし、回転ステージ上の VPH グレーティングに直進波長におけるブラッグ角 (7.48°) で入射をさせている。これにより、回折効率の波長依存性およびグレーティングの測定位置を水平・垂直方向に 10mm ずつ移動させ場所依存性の測定を行った結果を Fig. 7 に示す。図からわかるように、回折効率の波長依存性は RCWA を用いたシミュレーション結果とほぼ一致する良好な結果を得、作製した VPH グレーティングの屈折率変調量が 0.026 であることがわかった。また、得られた回折効率は水平・垂直方向の回折効率の測定により、ばらつきが $\pm 2\%$ 以内の変動量であり、広い面積にわたり高効率で均一性が高い VPH グレーティングであることを確かめた。以上の結果から、再現性の高い作製プロ

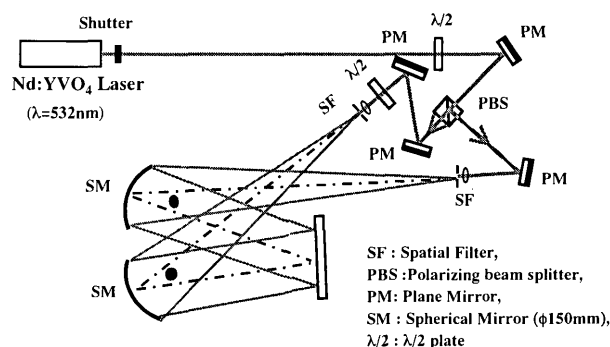


Fig. 5 Optical setup of recoding VPH grating

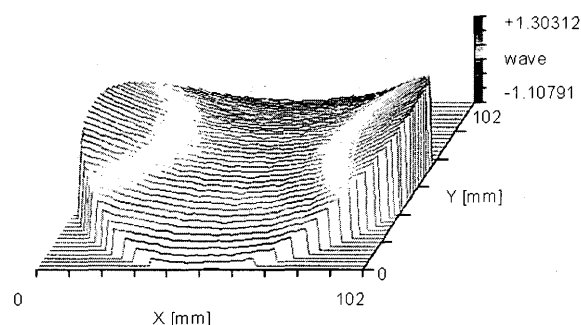


Fig. 6 Measurement of the 1st order diffraction wave front by Zygo Interferometer

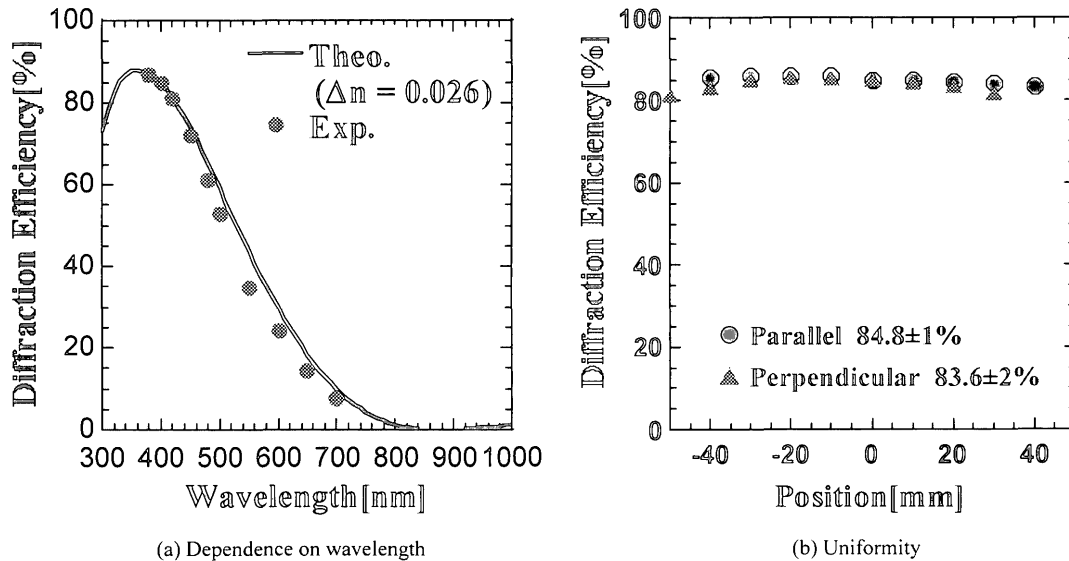


Fig. 7 Measurement of diffraction efficiencies of VPH grating

セスが確立できていることを実証した。

4. ま と め

VPH グレーティングの作製にあたり、電磁波解析である厳密結合波解析 (RCWA) を用いた設計により、80 % 以上の高効率を得るための最適な膜厚と屈折率変調量を検討し、膜厚 $6 \mu\text{m}$ 、格子周期 $1 \mu\text{m}$ 、屈折率変調量 0.026 を算出した。この数値計算により、必要とされる波長域のグリズムの設計・作製のパラメータを確定した。また、設計条件を踏まえた作製を行うために、感光材料の膜厚の制御、揮発時間の最適化、露光光学系および露光量などの実験条件の検討を行い、再現性の高い作製プロセスを確立した。さらにその評価実験により、回折効率の RCWA の数値計算結果と良い一致を得、大面積 $110 \times 106 \text{mm}^2$ サイズにおいて水平・垂直方向の各部分で $\pm 2 \%$ という高い均一性も得ている。また、すばる望遠鏡用 FOCAS に搭載可能な波面精度 ($\text{rms} = 0.494 \lambda$) を得た。この試作 VPH グリズムを、すばる望遠鏡 FOCAS に搭載し、測光標準星を用いた性能観測により直進波長 435nm で従来型に比べ約 2 倍の高効率、高分解能 2300 をもつ優れた分光素子であることを確かめた。

今後、直進波長 520nm をはじめ現在空白になっている未開発、あるいは、より高性能な分解能を満たす、VPH グリズムの最適設計と作製を検討していく予定である。これまでにない波長域における高効率・高分解能な VPH グリズムの開発により、高精度な天体分光観測データを取得し、新しい知への貢献が出来ると考えている。

謝 辞

本研究は国立天文台のプロジェクトとして家正則教授および理化学研究所の海老塚 昇氏との共同研究の一部である。本報告書にある VPH グリズムの設計・試作・評価は、日本女子大グリズム班の小館研究室が行っている研究である。感光材料を提供して頂いた日本ペイント (株) の川畑正巳氏、寺西 卓氏、すばる望遠鏡を用いた観測結果の解析に協力していただいた国立天文台の川端弘治氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Iye M, Ando H, Kashikawa N, Miyazawa S, Nishimura T, Noguchi K, Otsubo M, Sasaki T, Sekiguchi K, Sekiguchi M, Takami, Takano N and Tanaka W: Proceeding of SPIE 2871 1057 (1996).
- 2) 家 正則: 光技術コンタクト 36 5 (1998).
- 3) 安藤裕康: 世界最大の望遠鏡『すばる』平凡社 東京 (1998).
- 4) Herbig, GH: Astrophysical Journal 119 483 (1954).
- 5) 佐野一雄, 有留宏明, 難波 進, 西 恵三: 新領域への回折格子の適用とその基礎研究 102 (1988).
- 6) Ebizuka N, Iye M and Sasaki T: Appl. Opt. 37 1236 (1998).
- 7) 清水賀代, 後藤美紗樹, 海老塚 昇, 川畑政巳, 家 正則, 小館香椎子: 第26回光学シンポジウム 42 (2001).
- 8) 渡辺真美, 岡 恵子, 清水賀代, 小館香椎子, 海老塚 昇, 寺西 卓, 川畑政巳, 家 正則: 2002 年春季天文学会 61 (2002).
- 9) Ebizuka N, Oka K, Yamada A, Watanabe M, Shimizu K, Kodate K, Kawabata M, Teranishi T, Kawabata K, Iye M: Proceeding of SPIE 4842 319 (2003).
- 10) Oka K, Yamada A, Komai Y, Watanabe E, Ebizuka N,

- Teranishi T, Kawabata M and Kodate K: Proceeding of SPIE 5005 8 (2003).
- 11) 岡 恵子, 山田亜希子, 海老塚 昇, 寺西 卓, 川畑政巳, 小館香椎子: 第28回光学シンポジウム 63 (2003).
- 12) 小館香椎子, 岡 恵子, 海老塚 昇: 光学 32 483 (2003).
- 13) Kawabata SK, Ebizuka N, Sasaki T: Proceeding of SPIE 4841 1219 (2003).
- 14) Yamada A, Oka K, Ishikawa M, Kashiwagi M and Kodate K: Diffractive Optics 2003 (2003).
- 15) Moharam GM, Grann BE and Pommet AD: J. Opt. Soc. Am, A 12 1068 (1995).
- 16) Moharam GM, Pommet AD, Grann BE and Gaylord KT: J. Opt. Soc. Am, A 12 1077 (1995).
- 17) Klaus W, Oka K, Fujino M and Kodate K: Optical Review 8 271 (2001).
- 18) Kawabata M, Sato A, Sumiyoshi I and Kubota T: Appl. Opt. 33 2152 (1994).
- 19) 辻内順平: ホログラフィー 裳華房 東京 (1997).

Development of VPH Grism for Astronomical Spectrum Observation of Subaru Telescope

Keiko Oka, Akiko Yamada, Mami Ishikawa, Masako Kashiwagi and Kashiko Kodate
The Graduate School of Science, Division of Mathematical and Material Structure Science,
Japan Women's University

(Received October 20, 2003)

Abstract: We introduce a Volume Phase Holographic (VPH) grating, of which holographic grating is recorded in three dimensions. We fabricated this as a refractive index modulation of record material in the intensity distribution of interference fringes by two beams interference exposure using laser as a light source. Since the record material has sufficient thickness vis-à-vis the interval of interference fringes, it is normally classified as a thick holographic grating. For a thick holographic grating, reproduction process differs from the one by usual one-layer grating diffraction. The Bragg diffraction in a multilayer grating arises as in X-ray diffraction using crystal. Therefore, by the incidence fulfilling the Bragg conditions, nearly perfect diffraction efficiency rate of 100% can be acquired. The two beams interference exposing method is also possible to fabricate the fine periodic grating below the wavelength of the laser of a light source or a curved surface grating. This method is more suitable for fabricating a highly efficient diffractive grating, compared to the fabrication of mechanical gratings such as a ruling engine.

However, conventionally there have been several obstacles to its applications. The refractive index modulation has a broad dynamic range, which depends on high resolution power and the exposure volume, and also there is only a slow progress of development of a record material with easier access and use. These factors have hindered its employment to a highly efficient element with a large area, in particular.

In this research, we used liquefied high photopolymer with high resolving power and high refractive index modulation of the optical polymerization which was newly developed by Nippon Paint Co., Ltd., for the purpose of fabricating VPH grating as a record material. Consequently, VPH grating was successfully constructed with diffraction efficiency of 80% and refractive-index modulation of 0.026 in the sheer rate of $\pm 2\%$ change over large area ($110 \times 106 \text{ mm}^2$). High wavefront accuracy ($\text{rms} = 0.494 \lambda$) was confirmed by using the Zygo interferometer.

While undertaking this above-mentioned fabrication and examination project, we have developed the Volume Phase Holographic (VPH) grism for the instrument of the Subaru Telescope of National Astronomical Observatory of Japan, which is named the Faint Object Camera and Spectrograph (FOCAS) in 2000. We fabricated the VPH grating sandwiched between two prisms and completed the VPH grism with a going-straight wavelength of 435nm

and resolving power R ($\Delta\lambda/\lambda$) of 2300 (0.4" slit).

Furthermore, all the authors except one were actually involved in the test experiments, having gone to Hawaii in June 2003, and loaded it onto the FOCAS to observe the photometric standard star (on June 21, 22, 2003). We noted that the VPH grism counted 1.5 to 2 times more photons than the conventional grism ($R=1000$) at wavelengths ranging from 380 to 430nm. The spectral data of an artificial light source confirmed that the fabricated VPH grism had a resolving power of 2300.

In this paper, we report the designing and fabricating process of the VPH grating as refractive index modulation-type grating with high efficiency. For application, as we developed VPH grism for astronomical observation, and equipped one on FOCAS in Subaru Telescope, its remarkable performance was confirmed through the test observation held in Hawaii.

Key words: Volume Phase Holographic (VPH) grating, Refractive index modulation grating, Photopolymer, Rigorous Coupled Wave Analysis (RCWA), VPH grism, FOCAS of Subaru Telescope, Astronomical spectrum observation