

講演番号

19

体積位相型ホログラフィックグレーティングの高性能化と近赤外用広帯域分光フィルタへの応用

High Performance Volume Phase Holographic Grating and its Application to Broad Spectrum Filter for Near-Infrared

°中嶋薫 小館香椎子  
°Kaoru Nakajima and Kashiko Kodate

日本女子大学 理学研究科  
Faculty of Science, Japan Women's University

The Volume Phase Holographic (VPH) grating is attracting interests as a very efficient, dispersion device. We will talk about the challenges to the broad spectrum of VPH grating for near-infrared filters. We have successfully developed high performance VPH gratings by calculating RCWA, using optimized exposing condition, and introducing an active phase control technique.

1. はじめに

体積位相型ホログラフィック(VPH)グレーティングは、高効率・高分散な素子として様々な応用が応用展開がなされている。近年、近赤外分光への期待が高まる中、近赤外用分光フィルタにおいて、広帯域化が期待される。このような分光素子として、Volume Phase Holographic (VPH)グレーティングは、ブラッグ入射条件により、100%近い高効率を得られ、2 光束干渉露光法により微細周期の作製、及び大面積化も可能である。我々はこれまでに、乾式処理が可能なフォトポリマーを用い、厳密結合波解析 (RCWA: Rigorous Coupled wave Analysis)<sup>1)</sup>を用いた数値計算により最適化し、VPH グレーティングの開発を進めてきている。また、VPH グレーティングの両側に2つのプリズムを挟んで構成した直視型分光素子 VPH グリズムを提案している。可視域に対して高性能化を実現し、すばる望遠鏡 FOCAS に搭載し、高精度観測データの取得に貢献している<sup>2)</sup>。一方、近赤外域においては、高効率でスペクトル幅の広い VPH グレーティングは、設計波長の長波長化に伴う膜厚の影響で屈折率変調量が低下し、実現が困難とされていた。この問題を克服するため、屈折率変調量に着目し、露光条件の最適化と 2 光束露光に位相制御技術を導入した。これまで光通信用の高性能な近赤外デバイスとして格子周期 700nm の VPH グリズムを開発した<sup>3)</sup>。今回、近赤外用広帯域分光フィルタとして VPH グレーティングの適用を考え、広帯域化の検討を行った。RCWA による最適設計、作製およびその評価を行った。格子周期、膜厚、屈折率変調量の関係は重要である。今回、露光条件の最適化と 2 光束の位相制御により、屈折率変調量を制御し、広帯域化を実現した。

2. VPH グレーティングの最適化検討

近赤外域における高性能な分光素子として、広帯域かつ高効率を目指し、設計波長を 2200nm、格子周期を 2.4 $\mu$ m とし最適化の検討を行った。VPH グリズムでは VPH グレーティングのブラッグ条件を満たすブレイズ波長が固定されるため、それにより回折効率やスペクトル幅が制限される。VPH グレーティングの最適作製条件を決定するために、

1 次光の回折効率、膜厚  $t$ 、屈折率変調量  $\Delta n$  に関して厳密結合波解析 RCWA を用いて計算を行った。高効率を得るために  $t$  と  $\Delta n$  の組合せが最も重要である。設計波長が近赤外域と可視域より長波長するに伴い、高効率を得るために2つの積の値( $t\Delta n$ )を大きくする必要がある<sup>4)</sup>。屈折率変調量が通常得られる 0.02 の場合、格子周期 2.4 $\mu$ m で高効率を得るには厚い膜厚 60 $\mu$ m が必要となり、そのときのスペクトル幅 ( $\lambda_{FWHM}$ : 半値幅) は理論上 200nm と狭くなる (Fig.1)。高効率と  $\lambda_{FWHM}$  の広さはトレードオフの関係があり、実現が難しい。RCWA による計算の結果、Fig.2 より  $\lambda_{FWHM} \propto 1/t$ ,  $t \propto 1/(\Delta n)$  と、薄い膜厚、高い  $\Delta n$  が非常に重要であることが分かった。ブレイズ波長 2.2 $\mu$ m に対する回折効率の関係から膜厚を 60 から 20 $\mu$ m まで 10 $\mu$ m 毎に薄くし、そのときのスペクトル幅として 200, 240, 310, 410, 610 nm、 $\Delta n$  として 0.019, 0.023, 0.029, 0.038, 0.057 を得た。

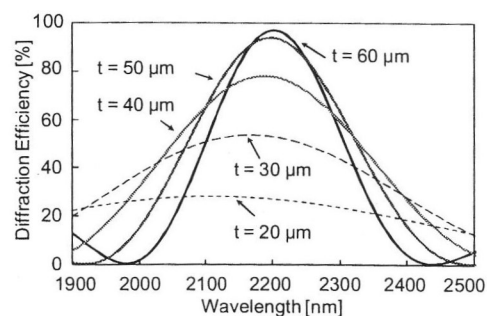


Fig.1 Dependence of diffraction efficiency on wavelength.

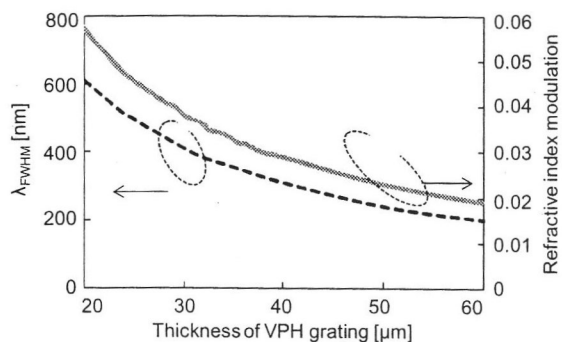


Fig.2 Dependence of spectral bandwidth and refractive index modulation.

### 3. 高屈折率変調量の検討

屈折率変調量  $\Delta n$  は VPH グレーティング内の記録材料の正弦波分布の最大値と最小値の屈折率差である。露光時間の積算であるため、 $\Delta n$  はパワー分布だけではなく、露光時の位相ゆらぎに依存する。光の分波後に微小な位相  $\Delta\phi$  が式(1)として時間的に生ずると仮定すると露光時間がこの揺らぎより長くなると光強度ピークは 0 次のベッセル関数に従い、コントラスト  $c$  は低下する。

$$\Delta\phi(t) = \phi_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$c = J_0(\phi_m) \cong 1 - \phi_m^2 / 2 \quad (\text{for } |\phi_m| \ll 1) \quad (2)$$

このように高い屈折率変調量を得るには位相ゆらぎを抑えてコントラストの向上を図ることが重要である(Fig.3)。

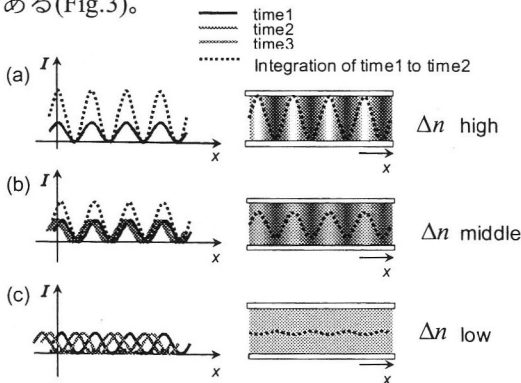


Fig.3 Phase fluctuation and refractive index modulation

### 4. VPH グレーティングの作製光学系

作製光学系を Fig.4 に示す。光源には、第 2 高調波の Nd:YVO<sub>4</sub> レーザ ( $\lambda$ :532nm, power:2W) を用いて 2 光束干渉露光により VPH グレーティングの作製を行った。安定かつ再現性の高い長波長用 VPH グレーティングを作製するために次の工夫を加えた。2 光束干渉露光のコントラスト向上による高屈折率変調量の実現を目的に、高出力の光源を用いた露光時間の短縮化を図り、更に露光中の位相変動を抑える位相制御技術を導入した。その補助干渉系を Fig.4 の点線部分に示す。グレーティングの背後に同軸型に干渉させ、フォトディテクタで 2 光束の位相差をモニターし、位相揺らぎに合わせて PZT 素子に印加する電圧を制御してフィードバックさせる。このように、能動的なフィードバック技術<sup>3)</sup>を用いることで位相揺らぎの影響を抑えることができる。

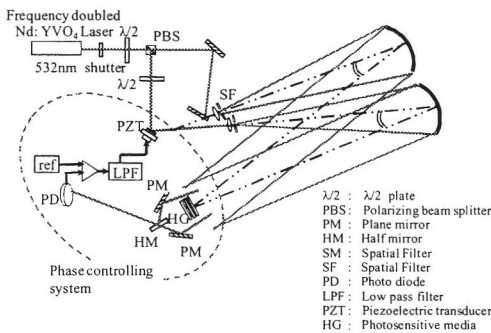


Fig.4 Optical setup for fabrication of VPH gratings with active phase control.

### 5. VPH グリズムの評価

各膜厚に対して露光条件の最適化を行い、露光時のレーザの光強度を変化させ、VPH グレーティングを作製した。グリズムの構成で回折効率を測定した。露光時のレーザパワーと位相を制御し、適した膜厚に薄くすることで、高効率を維持しながら広帯域化を図ることに成功した。Fig.5 に示すように、格子周期 2.36 $\mu$ m、膜厚 24 $\mu$ m において、露光エネルギー 30mJ/cm<sup>2</sup> (出力パワー 3.4mW/cm<sup>2</sup>) に対して、 $\Delta n=0.045$  を得た。回折効率として波長 2.2 $\mu$ m において 96.9% (位相制御なしで 89.4%)、半値幅として 502nm と非常に広い値を得た。作製した VPH グレーティングの 1 次回折光の透過波面を Zygo 干渉計により観察し、70mm 径に対する rms (root mean square) は 0.013 $\lambda$  (@2200nm)、0.046 $\lambda$  (@633nm) と非常に優れた透過波面精度を実現した。

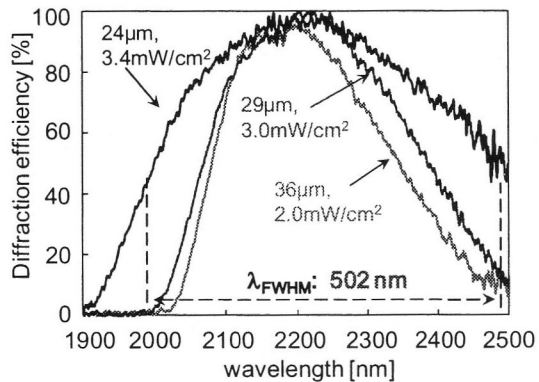


Fig.5 Dependence of diffraction efficiency on wavelength.

### 6. まとめ

近年、VPH グリズムは高分解能な分光素子として可視域で使われ始めている。しかし近赤外域においてはその膜厚の厚さにより作製が難しいとされていた。この課題に挑戦し、近赤外域の VPH グレーティングの設計・作製を行った。長波長化に伴い、値( $t\Delta n$ )を大きくする必要がある。一方、広いスペクトル幅を得るには薄い膜厚が必要である。大面積の VPH グレーティングは空気や振動による位相揺らぎの影響を受けやすい。そこで高出力露光と屈折率変調量  $\Delta n$  の向上を相関付け、さらに位相制御を導入することで、近赤外域における高性能化を図った。その結果、波長 2.2 $\mu$ m で回折効率 96.9%、スペクトル半値幅 502nm、透過波面精度誤差 0.013 $\lambda$  を実現した。近赤外用分光フィルタの第一段階として試作した分散素子は、近赤外用の分光フィルタとして幅広い応用が期待される。今後、格子周期を変化させ、広帯域化の限界を探る。

### 参考文献

- [1] K. Oka, et.al., Proc. of SPIE, 5005, 8-19 (2003).
- [2] M. Kashiwagi, et.al., Proc. of SPIE, 5494, 217-227(2004).
- [3] K. Nakajima, et.al., Opt. Rev, 14, No.4, 201-207(2007).
- [4] H. Kogelnik, The Bell Tech. Journal, 48, 9, 2909-2947 (1969).