

高分散分光用の回折格子

(名大院工^a, 名大院理^b, 日女大理^c, 東北大院理^d, 広島大院理^e, 理研^f, 国立天文台^g, INAF Astro. Obs. di Brera^h)

○海老塚 昇^a・堀 勝^a・平原 靖大^b・佐藤 修二^b・小舘 香椎子^c・市川 隆^d・川端 弘治^e・大森 整^f・青木 和光^g・家 正則^g・Andrea Bianco^h・Filippo Maria Zerbi^h

Gratings for High Dispersion Spectroscopy

(Faculty of Eng., Nagoya Univ.^a, Faculty of Sci., Nagoya Univ.^b, Japan Women's Univ.^c, Tohoku Univ.^d, Hiroshima Univ.^e, RIKEN^f, National Astronomical Obs., Japan^g, INAF Osservatorio Astronomico di Brera, Italy^h) Noboru Ebizuka^a, Masaru Hori^a, Yasuhiro Hirahara^b, Shuji Sato^b, Kashiko Kodate^c, Takashi Ichikawa^d, Koji S. Kawabata^e, Hitoshi Omori^f, Wako Aoki^g, Masanori Iye^g, Andrea Bianco^h, Filippo Maria Zerbi^h

Abstract

A VPH (volume phase holographic) grating is able to achieve very high diffraction efficiency up to 100% for S or P polarized light at the first diffraction order. However, the diffraction efficiency of the VPH grating decreases toward a higher order. We would introduce a thick transmission grating with rectangular grooves utilized for an echelle spectrograph. We also introduce a novel immersion grating.

1. はじめに

地上望遠鏡用の分光観測装置は、補償光学を使用しない場合に大気揺らぎによってスリットの最小幅が制限され、体積が分解能と望遠鏡の口径の 3 乗にほぼ比例するために望遠鏡が大口径になると分光観測装置も巨大化してしまう。一方、宇宙望遠鏡は回折限界を達成できるので、体積が分解能と観測波長の 3 乗にほぼ比例する。しかし、宇宙においては重量や体積に対する制限が厳しい。装置の小型・軽量化を実現するために次世代大型望遠鏡用の分散光学素子には大きな角分散と高い効率が求められる。我々は 8.2m すばる望遠鏡¹⁾や 8.1m×4 台 VLT (Very Large Telescope)²⁾、30m クラス次世代巨大地上望遠鏡^{3, 4)}および 3.5~10m クラスの次世代大型宇宙望遠鏡⁵⁾の観測装置用の分散光学素子として、新しい VPH grating (volume phase holographic) や厚い矩形回折格子、Immersion grating の実用化を目指している⁶⁻⁸⁾。

2. VPH grating の偏光回折効率特性

VPH grating のように屈折率が正弦波状に変化する厚い回折格子は、0 次と 1 次回折光のみの結合を扱う 2 波結合解析法により、0 次回折光と 1 次回折光の偏光回折効率特性の相対値 (S 偏光および P 偏光の極大値が常に 100%になる) を見積ることができる⁹⁾。透過型の VPH grating は、S 偏光と P 偏光の偏光回折効率特性が大きく異なってしまうために自然偏光に対する回折効率を高くすることができないという問題点がある。なお、透過型 VPH grating の内部におけるブラッグ角が 35.3° の場合には、S 偏光の回折効率の第二極大において P 偏光の回折効率の第一極大となるために、S 偏光と P 偏光いずれも最大 100% の高い回折効率を達成できる¹⁰⁾。ただし、S 偏光の第二極大における波長帯域幅は第一極大の波長帯域幅の 1/3 である。

3. 透過型の厚い矩形回折格子

透過型の厚い矩形回折格子の回折効率を求める場合に 2 波結合解析による数値計算では精度が不十分であり、正確な偏光回折効率を見積もるためには厳密結合波解析法 (Rigorous Coupled Wave Analysis : RCWA) 等を用いた数値計算が必要である¹¹⁾。ただし、屈折率が異なる 2 種類の材質の幅が等しい、すなわち格子周期 : Λ と一方の材質の幅との比 (デューティ比) が 2:1 の透過型の厚い矩形回折格子と透過型 VPH grating の偏光回折効率特性は類似しており、いずれの回折格子も Fig. 3 のように厚さに対して S 偏光と P 偏光の回折効率が極大と極小を周期的に繰り返す¹²⁾。ただし、 Λ や n_{\max} と n_{\min} が等しい透過型 VPH grating とデューティ比が 2:1 の透過型の厚い矩形回折格子について格子の厚さ : t に対する回折効率の周期を比較した場合にはブラッグ角 : θ が大きくなるほど差異も大きくなる。

Gerritsen と Jepsen は表面刻線型 (溝が真空あるいは空気) の厚い矩形回折格子についてデューティ比を調整することによって自然偏光や 45° 偏光、円偏光に対しても 90% 以上の回折効率を達成できることを数値計算によって示している¹³⁾。しかし、2 種類の光学等方性媒質の屈折率比が

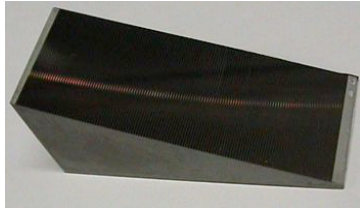


図1 ゲルマニウム Immersion grating.

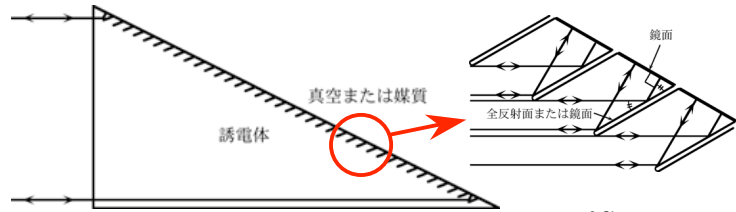


図2 新しい格子形状の Immersion 回折格子⁶⁻⁸⁾。

小さいほど t が厚くなり、またブラッグ角 θ が大きくなるほど w_2 が狭くなるので、 w_2 と t のアスペクト比が大きくなり、屈折率が低い媒質を注入する溝の加工が困難になってしまう。

共著者の一人の Bianco 等は格子の屈折率差やデューティ比を調整することによって自然偏光等に対して 9 次以上の高次回折光において 60% 以上の回折効率を達成できることを数値計算によって示している¹⁴⁾。

4. 新しい格子形状の Immersion grating

Immersion grating とは光路が媒質で満たされた反射型の回折格子のことであり、同一形状の反射型回折格子の角分散に媒質屈折率を乗じた角分散を得ることができる。例えば屈折率: $n=4.0$ のゲルマニウムを素材に使用することによって、同一形状の反射型回折格子の 4 倍の角分散が得られる。すなわち、口径と長さを 1/4 に縮小することができるために、分光器の体積を従来の 1/50 程度まで小型化することが可能になる。

すばる望遠鏡の次世代観測装置候補の IRHS (InfraRed High dispersion Spectrograph) のプロトタイプとして図 1 に示すサイズが $30 \times 30 \times 72$ [mm] のゲルマニウムの Immersion 回折格子^{6,8)} を使用して、波長 $10\mu\text{m}$ (430 次) において分解能: $R (= \lambda/\Delta\lambda) \sim 44,000$ を達成する中間赤外線高分散分光観測装置: GIGMICS (Germanium Immersion Grating Mid-Infrared Cryogenic Spectrograph) が開発されている¹⁵⁾。しかし、従来の階段形状の回折格子では理想形状と滑らかな表面粗さを得るためには膨大な加工時間と人手を要する。そこで図 2 のようなスリット状格子の Immersion grating が考案されている。この新しい Immersion grating は階段形状の回折格子と比べて散乱損失が少なく、理想形状の加工が容易であるために加工時間は従来の 1/10 程度であると見積もられている⁶⁻⁸⁾。

参考文献

- 1) N. Takato and T. Usuda: "Instrumentation at the Subaru Telescope," *Proc. SPIE* 7735 (2010) 773504.
- 2) M. M. Casali: "ESO instrumentation for the La Silla/Paranal Observatory," *Proc. SPIE* 7735 (2010) 773503.
- 3) L. Simard, D. Crampton, B. Ellerbroek and C. Boyer: "The TMT Instrumentation Program," *Proc. SPIE* 7735 (2010) 773523.
- 4) S. Ramsay, et al.: "An overview of the E-ELT instrumentation program," *Proc. SPIE* 7735 (2010) 773524.
- 5) T. Nakagawa and SPICA team: "The next-generation space infrared astronomy mission SPICA," *Proc. SPIE* 7731 (2010) 773100.
- 6) 海老塚 昇, 他: "すばる望遠鏡および次世代巨大望遠鏡用の新しい回折格子" 光学シンポジウム **36** (2011) 27.
- 7) 海老塚 昇: "グリズムを用いた天体観測," 光学 **39** (2010) 566.
- 8) N. Ebizuka, et al.: "Novel immersion grating, VPH grating, and quasi-Bragg grating," *Proc. SPIE* **6273** (2006) 62732G1.
- 9) I. K. Baldry, J. Bland-Hawthorn and J. G. Robertson: "Volume Phase Holographic Gratings: Polarization Properties and Diffraction Efficiency," *Publ. Astron. Soc. Pacific* **116** (2004) 403.
- 10) L. D. Dickson, R. D. Rallison and B. H. Yung: "Holographic polarization-separation elements," *Appl. Opt.* **33** (1994) 5378.
- 11) N. Chateau and J. Hugonin, "Algorithm for the rigorous coupled-wave analysis of grating diffraction", *J. Opt. Soc. Am. A*, **11**, 1321-1331, 1994.
- 12) M. C. Gupta and S. T. Peng: "Diffraction characteristics of surface-relief gratings," *Appl. Opt.* **32** (1993) 2911.
- 13) H. J. Gerritsen and M. L. Jepsen: "Rectangular Surface-Relief Transmission Gratings With a Very Large First-Order Diffraction Efficiency (95%) for Unpolarized Light," *Appl. Opt.* **37** (1998) 5823.
- 14) A. Bianco and G. Pariani: "Volume phase holographic echelle grating: a theoretical study," *Proc. SPIE* **7739** (2010) 77394O1.
- 15) Y. Hirahara et al.: "Development of the mid-IR echelle high-dispersion spectrograph employing the germanium immersion grating," *Proc. SPIE* **7735** (2010) 77351B.