

高効率回折光学素子

塩野 照弘

High-Efficiency Diffractive Optical Elements

Teruhiro SHIONO

It is well known that diffractive optical element (DOE) with blazed structure exhibits high diffraction efficiency. Recent rigorous electro-magnetic theory has demonstrated that the efficiency of the blazed DOE decreases rapidly when the period becomes nearly comparable to the wavelength and a distinctive peak appears before the efficiency drops to zero. Our analysis concerning the peak characteristics with the grating vector diagram makes clear that the diffraction efficiency could be improved by Bragg diffraction at that period. Using electron-beam lithography, excellent blazed DOEs (period 10–0.54 μm) were fabricated for violet wavelength (0.407 μm) by optimizing electron-beam writing parameters. We demonstrated that the measured diffraction efficiency values agreed well with the rigorous theoretical ones, and the peak appearance was confirmed experimentally in fine period of 0.54 μm .

Key words: diffractive optical element, high diffraction efficiency, blazed DOE, Bragg diffraction electron-beam lithography

1. ブレーズ化回折光学素子の回折効率

回折光学素子は、光の回折現象を効果的に利用して機能する光学素子であり、種々の光応用システムのサイズ、重量、コストを低減するキーデバイスとして期待されている。そのような回折光学素子の中でも、断面が鋸歯形状であるブレーズ化回折光学素子は、ほぼ100%もの高効率が実現可能な素子として従来から注目されてきた。

しかしながら、電磁界解析であるベクトル回折理論^{1,2)}の進展により、ブレーズ化構造を理想的に形成できても、100%近い回折効率が実現できるのは素子の周期が波長よりも十分大きい場合のみであり、周期が小さくなるにつれて減少していくことが明らかになってきた^{3,4)}。上記理論のひとつである differential method¹⁾を用いて筆者らが計算した場合の均一周期ブレーズ化素子の一次回折効率を図1に示す。実線はTE偏光(入射光の電界方向が素子の溝方向に平行)で、破線はTM偏光(入射光の磁界方向が素子の溝方向に平行)に対する一次回折効率であり、基板側から垂直入射($\theta=0$)したときの規格化周期 A/λ (周期: A , 波長: λ) との関係を示したものである。なお、屈折率は

$n=1.5$ 、溝深さはスカラー回折理論⁵⁾の最適値 $L=\lambda/(n-1)$ とし、計算結果は表面での反射損を無視している。この結果から、ブレーズ化素子は周期が波長オーダーになってくると回折効率が急激に低下するが、回折効率が0となる直前 ($A/\lambda \sim 1.3$) に両偏光ともピーク特性を有することがわかる。このピークは、微細加工性が厳しいため実際に生じるかどうかはこれまで確認されていなかった。筆者らは、このピークが生じる原因を考察するとともに、ブレーズ化のための微細加工技術を向上させて、このピークが発生する微細周期の素子を含む種々のブレーズ化素子を作製し、その回折効率の測定値と理論効率との比較を行った。

2. ブレーズ化素子における一次回折のベクトルダイアグラム

まず、回折の物理的なイメージを探るためにグレーティングベクトル \mathbf{K} について考える。通常、 \mathbf{K} の方向はグレーティング面に平行にとる場合が多い。しかし、ブレーズ化素子では垂直面と斜面の2つの面を有するので、それぞれの面に垂直なグレーティングベクトルを \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 とした

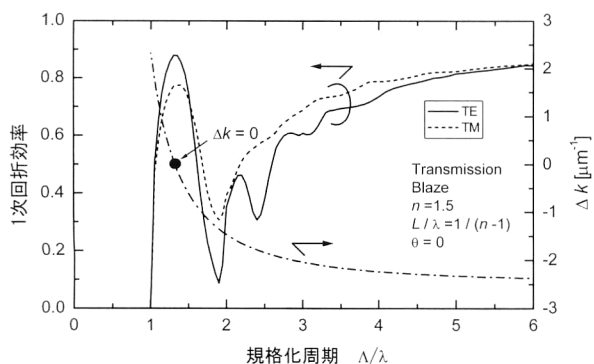


図1 ブレーズ化回折光学素子における一次回折効率およびブラッグ条件の不整合量 Δk の規格化周期依存性。

とき、トータルな \mathbf{K} ベクトルは、図2(a) に示すように、グレーティング面 (ZX 面) から傾く⁶⁾ と推測される。どれくらい傾けるべきかは \mathbf{K}_1 , \mathbf{K}_2 の寄与度をどれくらいにするかということになり、なかなか定量的には決めにくい(入射角によっても異なると考えられる)、ここでは直感的に、垂直入射であるので同図のように鋸歯形状(直角三角形)の頂点から底辺へ二等分線を引き、それに垂直な方向に \mathbf{K} ベクトルを仮定する。

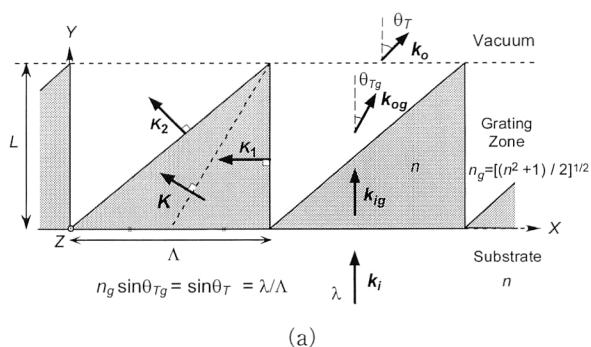
次に、この傾いた \mathbf{K} ベクトルを用いて、一次回折が生じるグレーティングゾーン(鋸歯形状領域)でのベクトルダイアグラムを考察する。この領域での等価的な屈折率は、真空部(屈折率1)とグレーティング部(屈折率 n) の誘電率の平均値から

$$n_g = [(n^2 + 1)/2]^{1/2} \quad (1)$$

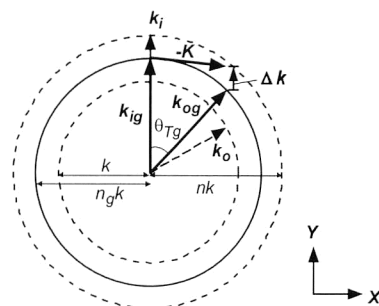
で与えられる⁷⁾。この領域での入射光(垂直入射)の波数ベクトル \mathbf{k}_{ig} 、一次回折光の波数ベクトル \mathbf{k}_{og} (回折角 θ_{Tg}) およびグレーティングベクトル \mathbf{K} に、一次回折条件($-\mathbf{K}$ と \mathbf{k}_{og} の X 方向成分が等しい)

$$n_g \sin \theta_{Tg} = \lambda / \Lambda \quad (2)$$

を適用すると、ベクトルダイアグラムは図2(b) に示すようになる。この図における Y 軸方向の Δk はブラッグ条件の不整合量を表しており(三角形が閉じた場合の $\Delta k = 0$ がブラッグ条件に相当)、この Δk と規格化周期との関係の計算結果が図1の一点鎖線で示す曲線である。 Δk は一次回折効率の大きさの傾向を表す指標となるが、周期が大きい場合“薄いグレーティング”とみなせてラマン・ナス回折の領域であるため、式(2)の X 軸方向の回折条件を満たしていれば $|\Delta k| = 2\pi/L$ でも高い回折効率を得られる⁸⁾。しかしながら、周期が小さくなるにつれて“厚いグレーティング”に近づきブラッグ回折の領域になるので、不整合量 Δk が値をもてばその分回折効率は低くなると推測される。計算結果からピークが生じる周期 ($\Lambda/\lambda \sim 1.3$)



(a)



(b)

図2 ブレーズ化回折光学素子におけるグレーティングベクトル \mathbf{K} (a) と一次回折のベクトルダイアグラム (b)。

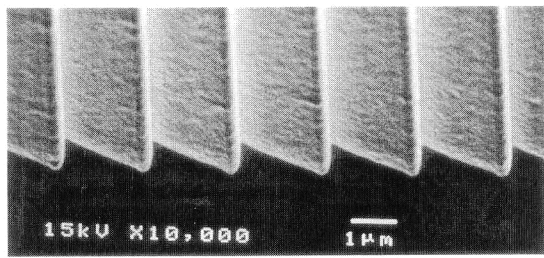
では $\Delta k = 0$ 、すなわちブラッグ条件が満たされていることが明らかになり、そのため回折効率が高くなったと考えられる。

ブラッグ回折で高効率にできる素子として、矩形断面等の対称形状深溝グレーティング⁹⁾がよく知られているが、光軸からブラッグ角だけ傾けて配置する必要がある。微細ブレーズ化グレーティングにおいて、垂直入射でブラッグ回折が生じることは大変興味深く、垂直入射で高効率が可能なたら体積ホログラム¹⁰⁾に比べてもブレーズ化素子のほうが受容角が広く使いやすいため、今後新しい用途が開けるものと期待される。

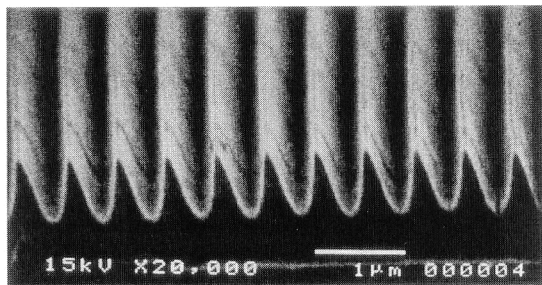
3. 電子ビーム描画法による素子の作製と光学特性

近年、筆者らは大阪府地域結集型共同研究事業(1997～2002年)に約5年間参画して、電子ビーム描画法による高性能(高効率、低波面収差)回折光学素子の研究開発に取り組んできた。電子ビーム描画法¹¹⁾によれば、サブミクロンの微細加工性や設計・作製におけるフレキシビリティが得られるのはもちろんのこと、電子ビームの照射量を精密に制御して(中間露光を行い現像後の残膜率の変化を利用する)段差のない連続階調ブレーズ化が1プロセスで可能であるため、今後の高精度微細光学素子作製の有望技術として注目されている。

従来の電子ビーム描画作製ブレーズ化グレーティングでは、実験的な一次回折効率はたかだか80%前半¹²⁾である



(a)



(b)

図3 作製した紫色波長（波長 $0.407\ \mu\text{m}$ ）用ブレース化素子の断面SEM写真。(a) 周期 $2\ \mu\text{m}$ 、(b) 周期 $0.54\ \mu\text{m}$ 。

と報告されており、周期がおよそ $3\ \mu\text{m}$ 以下では良好な鋸歯形状作製も困難であった。筆者らは、比較的ガンマ値の高い（ $\gamma=4$ ）PMMA（polymethylmethacrylate）電子ビームレジスト（ポジ型）を用いて種々の描画作製条件を最適化し（加速電圧 $50\ \text{kV}$ ）、赤色光源（波長 $\lambda=0.65\ \mu\text{m}$ ）、紫色光源（ $\lambda=0.407\ \mu\text{m}$ ）用のブレース化グレーティングの実現可能性を検討した。

周期が比較的大きい領域、例えば周期 $40\ \mu\text{m}$ では、一次回折効率が世界トップデータとなる 95.6% を実現できた。また、周期が波長オーダーとなる微細領域においては、厳密解析の結果、だれのないような垂直面を形成することが高効率実現のうえで重要であることが判明した。この解析結果に基づいて紫色光源用に描画条件の最適化を追求した結果、図3に示すように、周期 $2\ \mu\text{m}$ においてもほぼ直角の垂直面（溝深さ $L=0.8\ \mu\text{m}$ ）が形成でき、さらにピーク特性が期待できる $0.54\ \mu\text{m}$ というサブミクロン領域においても良好なブレース化形状を確認した。

図4は、波長 $0.407\ \mu\text{m}$ 用に作製したブレース化素子の一次回折効率の実測値と理論値の比較である。同図からわかるように、測定値として周期 $10\ \mu\text{m}$ では 95.0% （TE 1次）のほか、ほとんど理論値通りの高い回折効率を実現し、特に周期 $0.54\ \mu\text{m}$ においては理論解析通り、回折効率がピーク特性（TE 1次測定値： 75.6% ）を有することを実験的にはじめて確認した¹³⁾。

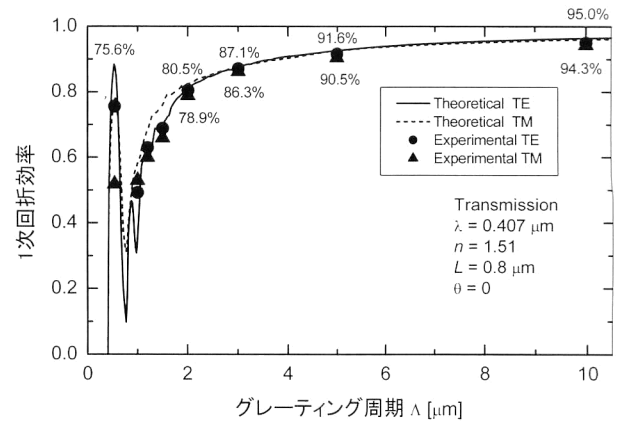


図4 作製した紫色波長（波長 $0.407\ \mu\text{m}$ ）用ブレース化素子の一次回折効率の実測値と理論値。

文 献

- 1) R. Peit, ed.: *Electromagnetic Theory of Gratings* (Springer-Verlag, Berlin, 1980).
- 2) M. G. Moharam and T. K. Gaylord: "Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 1385-1392.
- 3) T. Shiono, M. Kitagawa, K. Setsune and T. Mitsuyu: "Reflection micro-Fresnel lenses and their use in an integrated focus sensor," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 3434-3442.
- 4) E. Noponen, J. Turunen and A. Vasara: "Electromagnetic theory and design of diffractive-lens arrays," *J. Opt. Soc. Am. A*, **10** (1993) 434-443.
- 5) G. J. Swanson: "Binary optics technology: Theoretical limits on the diffraction efficiency of multilevel diffractive optical elements," *MIT Tech. Rep.*, **914** (1991) 1-27.
- 6) 塩野照弘, 西原 浩: "透過型ブレース化グレーティングの回折効率の垂直入射正/負方向依存性に関する解析", 平成12年春季応用物理学関係連合講演会講演予稿集, III (2000) 31a-W-6.
- 7) K. C. Change and T. Tamir: "Simplified approach to surface-wave scattering by blazed dielectric gratings," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 282-288.
- 8) 小山次郎, 西原 浩: 光波電子工学 (コロナ社, 1978) pp. 87-134.
- 9) K. Yokomori: "Dielectric surface-relief gratings with high diffraction efficiency," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2303-2310.
- 10) K. Matsuzaki, T. Shiono and T. Saimi: "Dual-layer volume holographic optical elements for three-wavelength optical pickup," *Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 1*, **39** (2000) 1546-1548.
- 11) H. Nishihara and T. Suhara: "Micro Fresnel lenses," *Progress in Optics*, Vol. 24, ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1987) pp. 1-37.
- 12) M. Ekberg, F. Nikolajeff, M. Larsson and S. Hard: "Proximity-compensated blazed transmission grating manufacture with direct-writing electron-beam lithography," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 103-107.
- 13) T. Shiono, T. Hamamoto and K. Takahara: "High-efficiency blazed diffractive optical elements for violet wavelength fabricated by electron-beam lithography," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 2390-2393.

(2003年3月3日受理)