

回折光学素子による光制御

塩 野 照 弘

回折光学素子とは、光の回折現象を効果的に利用して機能する光学素子のことである。これまで、光学素子としては、通常の（バルク）レンズやプリズム等の光の屈折現象を利用した屈折光学素子が主流であったが、多くの研究者の努力と、微細加工技術の進展、さらには、光学素子の集積化・簡素化・小型軽量化・薄型化のニーズの近年の高まりなどが相まって、回折光学技術は急速に発展し、光デバイスの重要技術と見なされるようになってきた。

回折光学素子には種々のタイプが存在するが、回折効率を高くできるという点で、振幅変調型よりも位相変調型の素子が優れ、なかでも角度許容性（受容角）が広く使いやすいという点で、屈折率変調型よりも表面レリーフ型（凹凸型、膜厚変調型）の素子が注目される。

レリーフ型回折光学素子は、深さが波長オーダーの微小な凹凸が、周期的あるいは準周期的に表面に形成されているという構造的特徴を有する。入射光の波長に比べて素子の周期が十分大きいとき、レリーフ形状を鋸歯形状化（ブレード化）することにより、1次回折効率の値が100%となることはよく知られている。

高効率化のためのブレード化技術として、1980年代前半に大阪大学の西原らにより電子ビーム描画法が提案された^{1,2)}。この方法によれば、サブミクロンの微細加工ができることに加え、電子ビームの照射量を微妙にコントロール（中間露光）して、露光・現像処理を行うことにより、1度のプロセスで斜面が滑らかな鋸歯形状の素子を作製することができ、さらには、コンピューター制御のため、プログラムの変更だけで仕様の異なる素子を迅速に作ることも可能である。また、レーザービームを用いてブレード化が可能

であることも示されている³⁾。

1980年代後半に、アメリカのMIT Lincoln LaboratoriesのVeldkampらにより、断面が階段形状の回折光学素子を作製するバイナリーオプティクス作製技術が開発された^{4,5)}。この技術は、フォトリソグラフィーとエッチング/薄膜堆積という通常の半導体プロセスを繰り返し用いることにより、作製が難しい鋸歯形状を、デジタル的な階段形状で近似して作製するものである。

このバイナリーオプティクス作製技術の開発により、汎用性・量産性に優れた電子集積回路（IC）と同じ手法で高い回折効率を有する表面レリーフ型の光学素子が一括作製できるようになった。

多くの回折光学素子はパッシブ（光学特性の動的制御不可能）なものであるが、アクティブ（光学特性の動的制御可能）な回折光学素子も開発されている⁶⁻⁸⁾。

本稿では、このような回折光学素子に注目して、1次回折光が生じる領域での回折効率と作製技術を中心に述べる。

1. 回折光学素子による光制御の原理

回折光学素子では、多くの場合、屈折角の制御のみで光学素子を設計するのに対し、回折光学素子では、回折角だけでなく、回折効率や回折次数をパラメーターにした幅広い設計が可能であり、新規光学素子がいろいろ考案できるものと期待される。

1.1 パッシブ光学素子

レリーフ型の回折光学素子では、入射光の波長に対する周期の大きさで、回折次数をパラメーターにした回折角が決まり、また断面形状、溝の深さで回折効率が決められる。例えば、垂直入射の場合、入射光の波長 λ 、周期 Λ 、 m 次の回折角 θ_m との関係は

$$\sin\theta_m = m\lambda/\Lambda \quad (1)$$

松下電器産業(株)光ディスク開発センター（〒570 守口市八雲中町3-1-1）
E-mail: shiono@drl.mei.co.jp

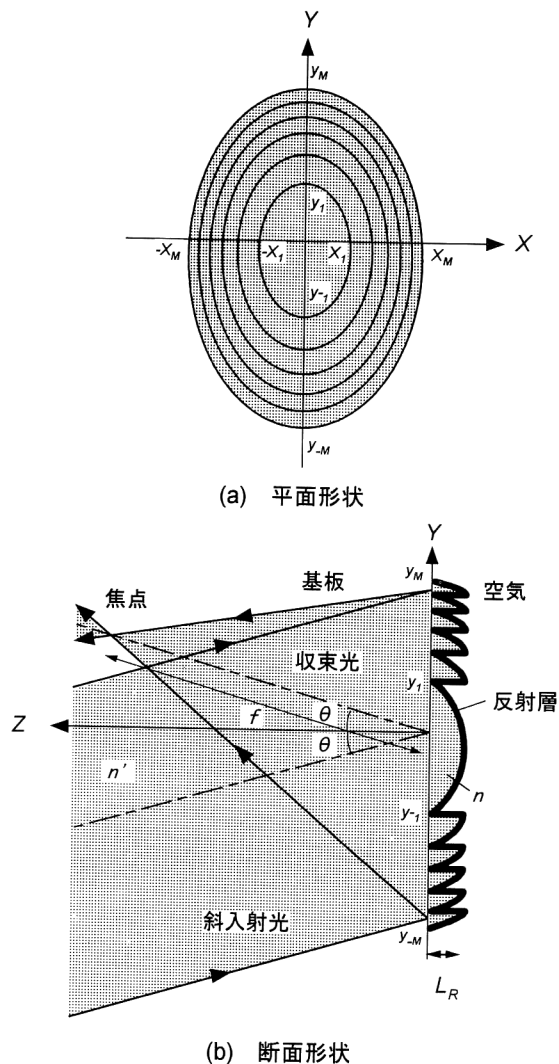


図1 斜め入射用反射型回折光学レンズの構造。

となり、 Λ/λ が小さくなるほど回折角が大きくなることがわかる。なお、多くの場合、 $m=1$ (1次回折) を用いる。

新しい回折型マイクロレンズとして、斜め入射光を良好に集光し、プレーナーオプティクス^{9,10)} (平板型光集積回路)に適した反射型レンズ¹¹⁾を図1に示す。このレンズは、斜め入射光に対して発生するコマ収差・非点収差を補正する特殊な形状をしており、回折型レンズならではの設計のフレキシビリティを生かした例である。

1.2 アクティブ光学素子

回折効率、回折角、回折次数等をアクティブに制御することができれば、新しい機能素子が実現できるものと考えられる。

筆者らは、焦電型赤外線センサーの光チョッパー用に、反射型の可動グレーティング構造を有する回折型マイクロ(マシン)チョッパーを開発した⁸⁾。図2に構造と動作を示す。この素子は、静電力を用いて反射型グレーティングの

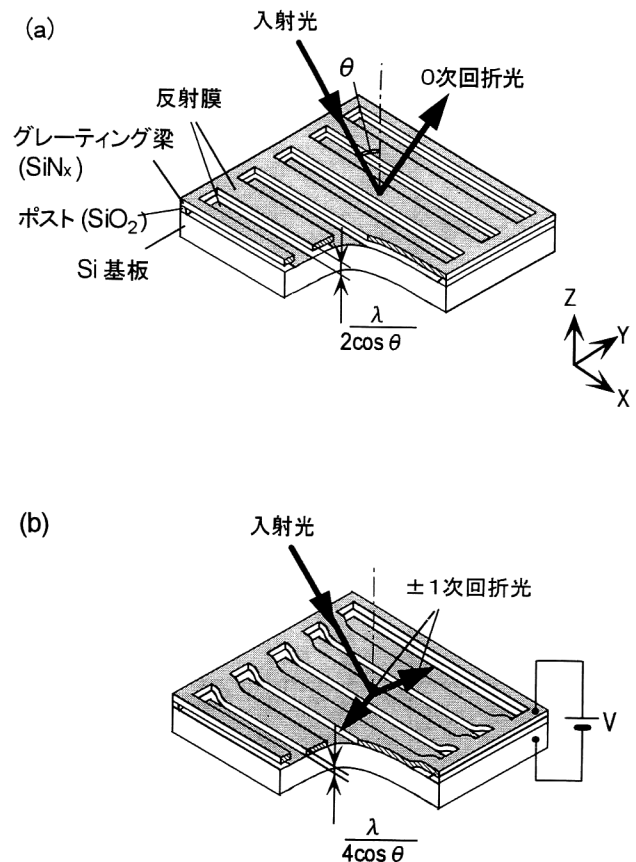


図2 回折型マイクロ(マシン)チョッパーの構造と動作。

梁の変位を変える(実効的な溝深さを変化させる)ことにより、梁と基板からの反射光の位相差を制御(電圧なし:位相差 2π , 電圧印加:位相差 π)し、反射光量を変調する。電圧印加なしのとき(図2(a))は、ほとんど通常の反射光(0次回折光)が生じるが、電圧印加時(図2(b))では、主に ± 1 次回折光に変化するものである。

素子構造が単純な2レベルでありながら、わずか $1/4$ 波長程度の梁の変位で、理論的には入射光をほぼ100%変調(0次回折光検知)することができる。

また、式(1)により、梁の周期で回折光の反射角が決まるため、小さくすれば大きな偏向角が実現可能である。

2. 回折光学素子の回折効率

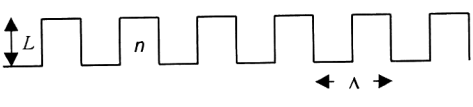
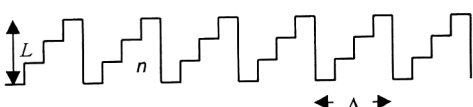
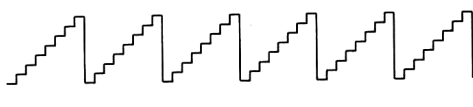
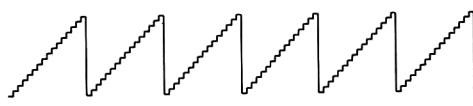
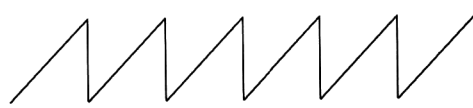
回折光学素子の周期が波長に比べて十分大きく、薄いグレーティング¹²⁾と見なせる場合、回折効率は、スカラー回折理論^{4,5)}を用いて比較的容易に計算することができる。

周期が波長程度に小さくなってきた場合は、電磁界解析であるベクトル回折理論^{13,14)}を適用する必要がある。

2.1 スカラー回折理論による薄い回折光学素子の回折効率

表1に、スカラー理論により計算した、薄い透過型回折

表1 薄いレリーフ型回折光学素子の最大1次回折効率と最適溝の深さ（スカラー理論値）。

	回折光学素子の断面形状	最大1次回折効率と最適溝深さ ($\Lambda \gg \lambda$)
2 レベル		40.5% $L = \frac{\lambda}{2(n-1)}$
4 レベル		81.1% $L = \frac{3\lambda}{4(n-1)}$
8 レベル		95.0% $L = \frac{7\lambda}{8(n-1)}$
16 レベル		98.7% $L = \frac{15\lambda}{16(n-1)}$
ブレース		100 % $L = \frac{\lambda}{(n-1)}$

光学素子の最大1次回折効率と最適溝の深さを示す。

断面が鋸歯形状であるブレース化素子が、表面での反射を無視して100%という最も高い回折効率を示す。

理想的な鋸歯形状は作製が難しいが、階段形状で近似するバイナリーオプティクスと称される回折光学素子がこの間を補完する。レベル数 p の薄い透過型バイナリー/マルチレベル素子は

$$L = (p-1)/p \cdot \lambda / (n-1) \quad (2)$$

の溝の深さで、1次回折率は最大値

$$\eta_{1\max} = \text{sinc}^2(\pi/p) \quad (3)$$

になることを導くことができる。ただし、 $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ である。

したがって、表1に示したように、段数を増やすと効率が向上することがわかる。特に、4レベルでも80%以上の回折効率を得られることは注目に値する。

2.2 ベクトル回折理論によるマルチレベル素子の回折効率

ベクトル回折理論には種々の方法が提案されているが、ここでは、よく用いられている differential method¹³⁾ を適用した計算結果の一例を示す。計算手法は、入射光が TE

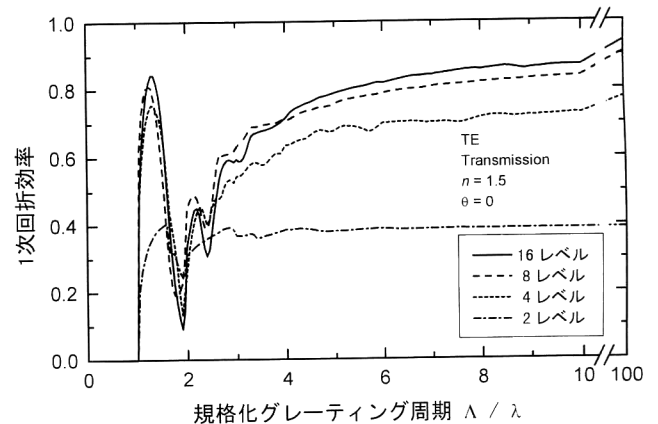


図3 透過型バイナリー/マルチレベルグレーティングの1次回折効率と規格化周期との関係（ベクトル理論値）。

偏光（電界方向が素子の溝方向に平行）、TM 偏光（磁界方向が素子の溝方向に平行）に分けて、それぞれ、それに対応するマクスウェルの波動方程式を境界条件を満足するように数値的に解くという方法である。

図3は、透過型バイナリー/マルチレベルグレーティングの TE 偏光に対する1次回折効率の計算結果であり、基板側から垂直入射したときの規格化周期 Λ/λ との関係を示す。

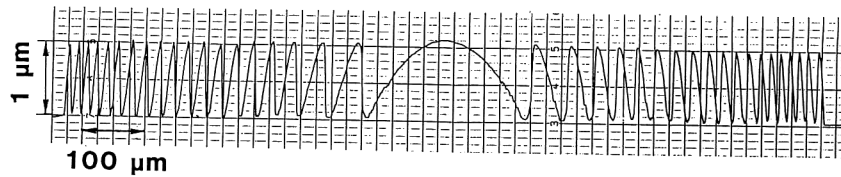


図4 電子ビーム描画法により作製したブレード化回折型マイクロレンズの断面形状の測定結果（焦点距離 10 mm, 波長 $0.6328 \mu\text{m}$, 開口サイズ 1 mm）.

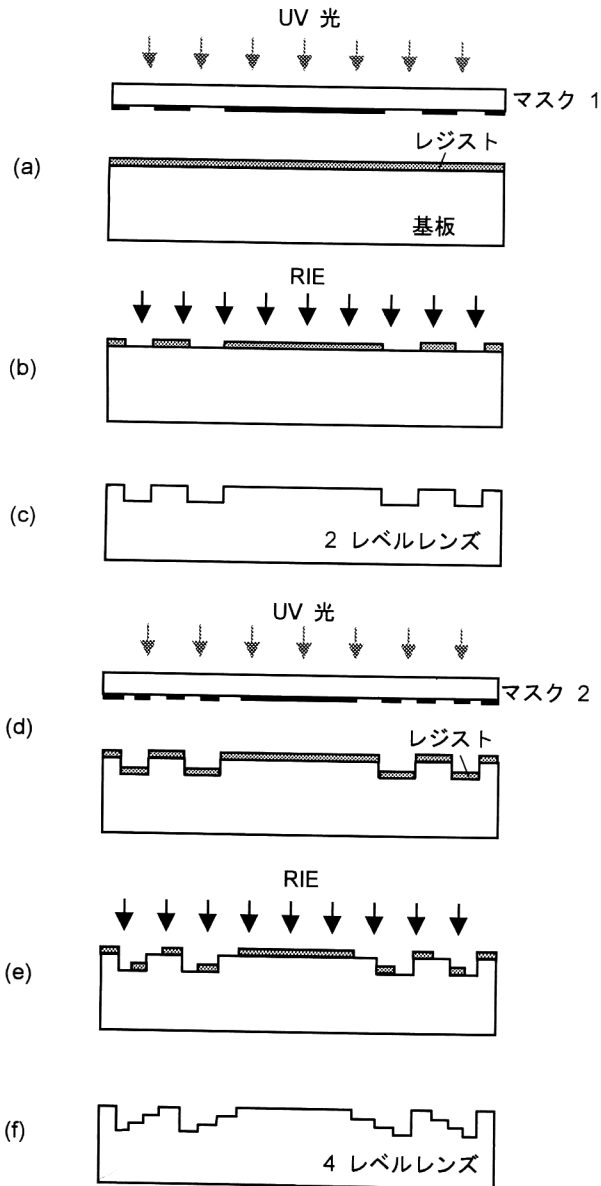


図5 エッチングプロセスを用いたマルチレベル回折型マイクロレンズの作製手順.

示したものである. なお, 計算結果には, 表面反射の値が含まれている.

図からわかるように, λ/λ が十分大きい領域では, 表面反射損を除いて, 前述したスカラー理論値とほぼ一致し, レベル数が大きいほど高い1次回折効率が得られる. 周期

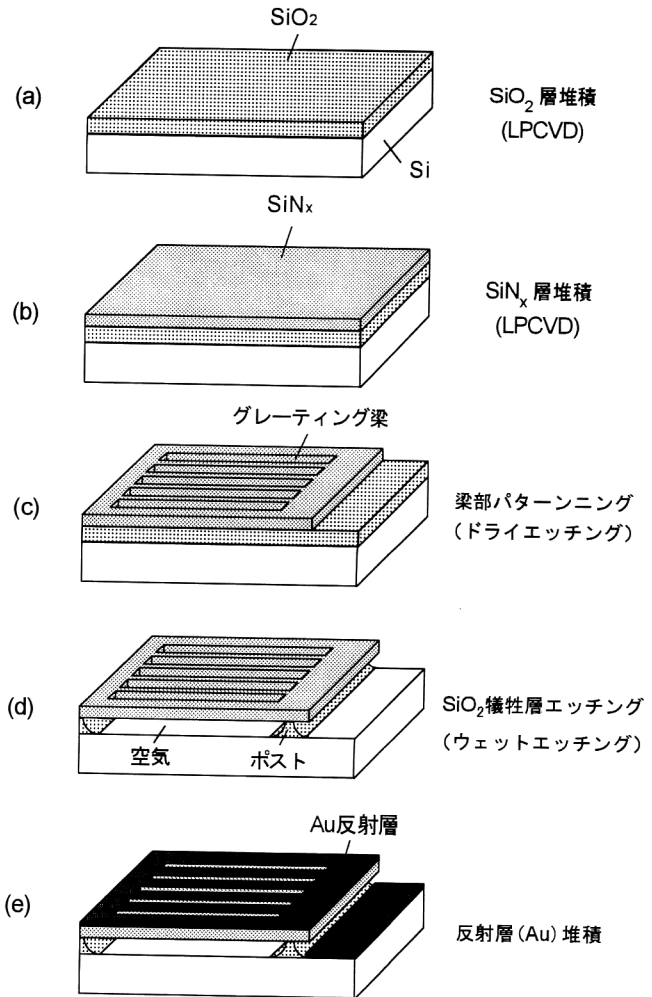


図6 回折型マイクロチョッパーの作製手順.

が小さくなってくると, レベル数の大きい素子ほど1次回折効率は急激に減少していく傾向がみられ, 必ずしも, レベル数が大きいほど1次回折効率が高くなるとはいえない領域 ($\lambda/\lambda = 1.6 \sim 4$) が存在することがわかる.

垂直入射において, 小さいレベル数のグレーティングにも優位性が表れることは興味深く, この領域の微細加工性を考えあわせると, 作りやすさと回折効率が両立できる場合があることは設計の上で興味深いところである.

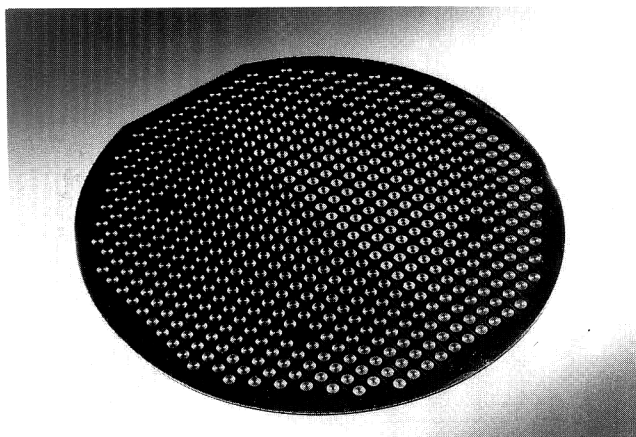


図7 Si ウエハー上に一括作製した、マルチレベル赤外用回折型 Si マイクロレンズ。

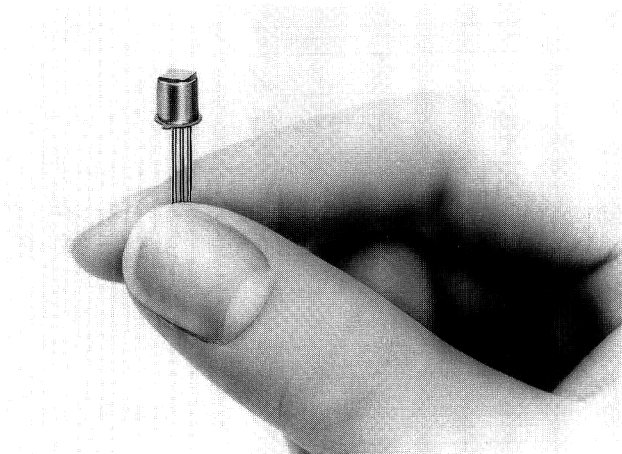


図8 回折型 Si マイクロレンズを用いたマイクロ焦電型赤外線センサー。

3. 高効率素子の作製技術

3.1 電子ビーム直接描画法によるブレース化技術

現像後の電子ビームレジストの残膜率が、電子ビームの照射量に依存するという現象を用いると、断面形状を3次的に制御可能である。

チャージアップ防止用の透明導電膜付きのガラス基板を用いて、電子ビームレジストを塗布し、電子ビーム描画装置にて、素子の形状（円、楕円等）に合わせて電子ビームを一定の時間（回数）走査する。このときの走査時間は、周期を考慮した実験的なレジストのガンマ特性に基づいて与える。

1つの曲線走査後、徐々に（ $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ）走査サイズを大きくしていき、素子の形状分布に対応する露光量分布を与える。その後、現像処理を行うことにより、レジストの膜厚を変化させ、ブレース化構造が形成できる。

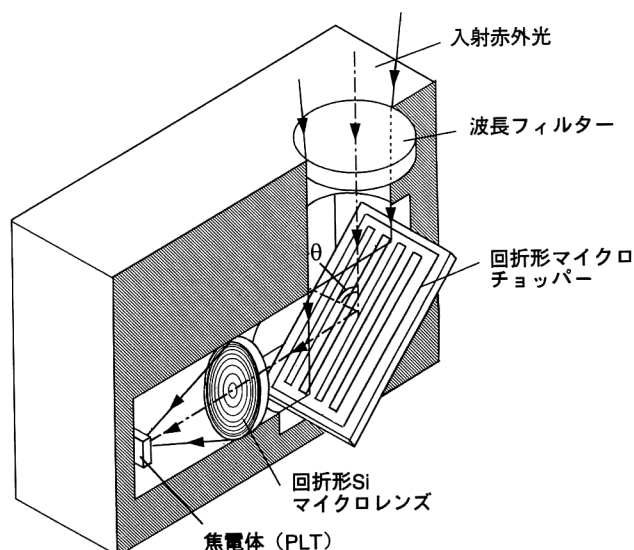


図9 回折型マイクロチョッパーと回折型レンズを用いた赤外線センサー構成図。

図4は、筆者らが専用開発した電子ビーム描画装置¹⁵⁾を用いて作製した回折型マイクロレンズの表面段差計による測定結果である。中央部の滑らかな曲線形状と外周部の鋸歯形状が設計通りに形成されていることがわかる。

本方法により、回折限界の集光特性と約80%の回折効率を有する透過型/反射型の回折型マイクロレンズが実証されている^{11,15)}。

3.2 バイナリーオプティクス作製技術

バイナリーオプティクス作製技術によれば、汎用性のある半導体プロセスを用いて高効率の回折光学素子を作製することができる。図5に回折型マイクロレンズの作製手順を示す。

まず、フォトマスク1を用いたフォトリソグラフィーと、RIE（リアクティブイオンエッチング）のプロセスにより、2レベルレンズを作製し、次に、フォトマスク2を用いて、その基板と位置合わせを行ってから、同じプロセスを繰り返して、4レベルレンズを作製する。このように、プロセスを N 回繰り返して、レベル数 2^N のレンズが作製可能⁴⁾である。ただし、マスク合わせ精度がポイントである。

図6は回折型マイクロチョッパーの作製プロセスである。この素子も半導体プロセスで一括作製可能である。特徴的なのはLPCVD法による薄膜堆積（ SiO_2 , SiN_x ）と、マイクロマシン作製の基本技術である犠牲層（ SiO_2 ）エッチングのプロセスである。なお、使用するフォトマスクは1枚のみである。

作製したチョッパーは、 CO_2 レーザー光（波長 $10.6 \mu\text{m}$ ）に対して84%もの変調効率（挿入損失 -0.81 dB ）が得られている⁸⁾。

4. 回折光学素子の応用例

4.1 赤外用回折型 Si マイクロレンズと焦電センサー

近年、家電・FA・セキュリティーシステム等の分野で、人体を検知したり、非接触で温度計測をする赤外線センサーのニーズが高まっている。

図7は、4インチ Si ウエハー上に800個一括作製したマルチレベル構造の回折型 Si マイクロレンズ¹⁶⁾の写真である。このレンズは、口径2.2mm、焦点距離3mm、中心波長は10 μ mである。屈折率が3.5と非常に高いため、溝深さが浅くでき、その結果、高NA化と広角化にも対応できることが明らかになっている¹⁷⁾。

回折型 Si マイクロレンズを用いたマイクロ焦電型赤外線センサー（松下電子部品(株)開発）の外観写真を図8に示す。レンズは、カンパッケージ表面にレンズ面を裏側にして設置されている。従来センサーの約1/100（体積比）という超小型化を実現している。

4.2 全回折型赤外線センサー

焦電型赤外線センサーは、焦電効果を用いるため微分検知であり、静止人体検知や温度計測には、入射赤外光をオン・オフする光学チョッパーが一般に必要である。

図9に、前述の回折型チョッパーと回折型 Si マイクロレンズを組み合わせた、赤外線センサー⁸⁾の構成図を示す。

波長フィルターにより10 μ mを中心に波長選択された入射光は回折型チョッパーにより変調され、0次回折光はマイクロレンズにより焦電体上に集光される。0次以外の回折光については焦電体に入射しない配置となっている。

静止人体に対し、回折型チョッパーに印加する電圧のオン・オフに対応して、焦電体から信号が出力され、良好に動作することが確認されている。

以上、回折光学素子による光制御について述べた。

今後、設計面では、ベクトル回折理論を駆使した最適設計技術が進展し、また、バイナリーオプティクス作製技術は、実用化レベルの光技術として、赤外領域から可視光領域へ拡大発展していくものと期待される。デバイス面では、マイクロマシン（アクティブ光学素子）の回折光学への融合が今後の楽しみのひとつになるであろう。

文 献

- 1) T. Fujita, H. Nishihara and J. Koyama: "Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 578-580.
- 2) H. Nishihara and T. Suhara: "Micro Fresnel lenses," *Progress in Optics Vol. 24*, ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1987) pp. 1-37.
- 3) M. Haruna, M. Takahashi, K. Wakabayashi and H. Nishihara: "Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 5120-5126.
- 4) G. J. Swanson and W. B. Veldkamp: "Diffractive optical elements for use in infrared systems," *Opt. Eng.*, **28** (1989) 605-608.
- 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) O. Solgaard, F. S. A. Sandejas and D. M. Bloom: "Deformable grating optical modulator," *Opt. Lett.*, **17** (1992) 688-690.
- 7) E. Motamedi: "Micro-opto-mechanical systems," *Opt. Eng.*, **33** (1994) 3505-3517.
- 8) M. Ueda, T. Shiono, T. Ito and K. Yokoyama: "High efficiency diffractive micromachined chopper for infrared wavelength and its application to pyroelectric infrared sensor," *Appl. Opt.* (submitted).
- 9) J. Jahns and A. Huang: "Planar integration of free space optical components," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1602-1605.
- 10) T. Shiono and H. Ogawa: "Planar-optic-disk pickup with diffractive micro-optics," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 7350-7355.
- 11) T. Shiono and H. Ogawa: "Diffraction-limited blazed reflection diffractive microlenses for oblique incidence fabricated by electron-beam lithography," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 3643-3649.
- 12) R. Magnusson and T. K. Gaylord: "Diffraction efficiency of thin phase gratings with arbitrary grating shape," *J. Opt. Soc. Am.*, **68** (1978) 806-809.
- 13) R. Peit, ed.: *Electromagnetic Theory of Gratings* (Springer-Verlag, Berlin, 1980).
- 14) M.G. Moharam and T.K. Gaylord: "Diffraction analysis of dielectric surface-relief gratings," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 1385-1392.
- 15) T. Shiono: "Diffractive microlenses fabricated by electron-beam lithography," *Optical Computing Hardware*, eds. J. Lahns and S. Lee (Academic Press, Boston, 1993) pp. 169-192.
- 16) K. Fujikawa, G. Hirakawa, T. Shiono and K. Nomura: "Optical properties of a Si binary optic microlens for infrared ray," *Proceedings of the Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems* (Nagoya, 1997) pp. 360-365.
- 17) 塩野照弘: "高屈折率マルチレベルグレーティングの回折効率", 光学連合シンポジウム浜松 94 (1994) 23Ca09.

(1997年8月21日受理)