

## 解説

## 超微細回折格子を用いた複屈折素子とその応用

青山 茂・山下 牧

オムロン(株)中央研究所 〒617 長岡京市下海印寺伊賀寺 20

(1992年1月6日受理)

## Form Birefringence Using Ultra-High Spatial Frequency Gratings

Shigeru AOYAMA and Tsukasa YAMASHITA

Omron Central R&amp;D Laboratory, Shimokaiinji, Nagaokakyo 617

## 1. はじめに

近年の光情報処理, 光通信を始めとする光エレクトロニクス分野の発達は目覚ましいものがあり, その生産額は既に2兆円を越えている<sup>1)</sup>. これらの機器, 装置に対して高性能化, 高機能化への要求はさらに高まり, それに伴い光コンポを構成する光デバイスの数量は増加の一途をたどると思われる. また, 一方では使いやすさ, また信頼性の面から小型化, 軽量化への要求は非常に高いものがあり, 光デバイスはこれらトレードオフの要素を含む要求に対して応えていかなければならない状況にある. 特に, 次世代大容量メモリシステムとして脚光を浴びている光磁気システムにおいては, まさしくこれらの要求を抱え, 高精度の検出特性を維持したまま, いかにか光ヘッドを小型軽量化して高速アクセスを実現していくかが, システム普及へのキーファクタとされている. これらの要求に応える素子として光電子集積回路(OEIC)や光集積回路(OIC)などが提案され<sup>2-6)</sup>, 大きな期待が持たれているものの, その実用化には今少し時間がかかるように思える. 当面はハイブリッド集積光デバイスに期待されるところが大きい. こうした状況の中でレンズ, プリズム, などを代表する微小光学素子<sup>7-13)</sup>にとっては新たな市場を創出する可能性を秘めた状況にあるといえる. このハイブリッド集積光デバイスに応用される微小光学素子の形態は屈折型と回折型とに大きく分類される. 屈折型の基本構造は従来素子構造の原形をとどめたまま形状を小さくすることにあり, これにより集積性を高め, 光学系の小型軽量化を図っている. これに対

し, 回折型には従来屈折型と比較して, 以下の特長を有することから, よりハイブリッド集積化に適していると考えられる.

- 複数の光学機能を1枚の素子に複合できる
- レプリカ作製が容易で量産性に優れている
- 薄型プレーナ構造であるため集積性に富む

さらに, 最近では偏光機能を回折型素子で実現させた報告がいくつかなされている. これにより波長板, 偏光ビームスプリッタ, ARコートといった新たな機能を回折型素子に付与でき, これまで以上に高機能な光学系にも応用できる可能性を持っている<sup>14-17)</sup>.

以上述べたことから回折型微小光学素子をこれからのハイブリッド集積デバイスを担う光学素子と考え, 電子線描画法によるマイクロフレネルレンズを始めとする回折型微小光学素子の研究を行ってきた. 回折格子の作製法としてはほかにホログラフィ法, 光露光法等が考えられるが, 電子線描画法が以下の特長を持つことによりこれまで本作製法を用いて回折型微小光学素子を作製してきた.

- パターン断面形状を制御できる
- サブミクロンオーダーのパターン精度を持つ微細加工が比較的容易に実現できる
- コンピュータ制御により設計のフレキシビリティが高い

特に, 本稿で述べる構造複屈折を用いて偏光機能を持たせた超微細回折格子は使用波長の1/2以下の周期を持ち, 高い微細加工性を要求されることから, 電子線描画法が構造複屈折を用いた回折型微小光学素子の作製法と

しても適していると思われる。

以下、本稿では超微細回折格子を用いた複屈折素子の原理、偏光ビームスプリッタとシリンドリカルレンズの機能を複合した素子の光ヘッドへの応用、さらに電子線描画法を用いて作製した本素子の基本特性に焦点を当て、筆者らの研究に基づいて解説を試みる。

## 2. 超微細回折格子を用いた複屈折素子

### 2.1 構造複屈折の原理

使用波長の1/2以下の周期を持つ超微細回折格子は回折光を生じず、複屈折特性を示すことが知られている。回折格子の周期構造が空間変調素子としての機能よりもはや複屈折結晶としての機能を持つことから、このような成因の複屈折は構造複屈折とよばれている。この超微細回折格子の周期を  $A$ 、格子厚を  $d$ 、デューティ比を  $t$  とし、周期  $A$  の2倍以上の波長を持つレーザー光が複屈折素子に垂直入射したと仮定する。このとき入射光の偏光方向が格子の溝に平行であるか垂直であるかによって複屈折素子の周期構造部分での屈折率はおのおの次式で与えられる<sup>19)</sup>。

$$n_{\parallel} = \sqrt{tn_1^2 + (1-t)n_2^2} \quad (1)$$

$$n_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{\frac{t}{n_1^2} + \frac{1-t}{n_2^2}}} \quad (2)$$

ここで  $n_1, n_2$  はそれぞれ周期構造の山と谷の部分の屈折率である。図1にデューティ比に対するそれぞれの屈折率の計算結果の例を示す。破線が  $n_{\parallel}$ 、実線が  $n_{\perp}$  を表している。また計算には  $n_1=1.6, n_2=1.0$  をそれぞれ用いた。またこのとき位相差は、

$$\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \left( \sqrt{tn_1^2 + (1-t)n_2^2} - \frac{1}{\sqrt{\frac{t}{n_1^2} + \frac{1-t}{n_2^2}}} \right) \quad (3)$$

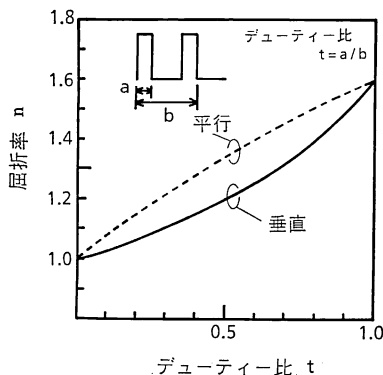


図1 超微細回折格子の複屈折

となる。 $\lambda$  は使用波長である。これから、デューティ比および格子厚を適当に選択することで位相差を  $\pi$  あるいは  $\pi/2$  に設定することができるため構造複屈折を用いて各種波長板を実現できることがわかる。

### 2.2 偏光ビームスプリッタとシリンドリカルレンズの複合機能素子

本素子の構造を図2に示す。本素子の基本構造はそれぞれ異なった2種類のデューティ比を持つ超微細回折格子からなる。これらの超微細回折格子の溝の方向をそれぞれ直交させて交互に配列させてある。このデューティ比の異なる超微細回折格子の周期的配列にシリンドリカルレンズの機能を持たせてある。以下本素子の基本原理を順に述べる。

断面形状が矩形構造をなす薄い位相回折格子の回折効率は

$$\eta_1 = \frac{4}{\pi^2} \sin^2 \left( \frac{\Delta n d}{\lambda} \pi \right) \quad (4)$$

で表される。 $\Delta n$  は超微細回折格子によって生じる複屈折である。またこのときの0次回折光、すなわち透過光は、

$$\eta_0 = \cos^2 \left( \frac{\Delta n d}{\lambda} \pi \right) \quad (5)$$

となる。この回折効果を利用して偏光ビームスプリッタとして機能させるためには、ある偏光方向を持つ入射光に対しては位相差をゼロ、それと直交した偏光方向を持つ入射光に対しては  $\pi$  となるようにすればよい。図3に本素子のデューティ比に対する屈折率の計算結果を示す。 $n_1, n_2$  の屈折率は同様にそれぞれ1.6, 1.0と仮定した。また超微細回折格子のデューティ比をそれぞれ  $t_a, t_b$  とし、ある偏光方向の入射光に対して等しい屈折率  $n_0$  となるように設定してある。このように設定された素子に、デューティ比  $t_b$  を持つ超微細回折格子の溝の方向に対して垂直な偏光方向を持つレーザー光を入射

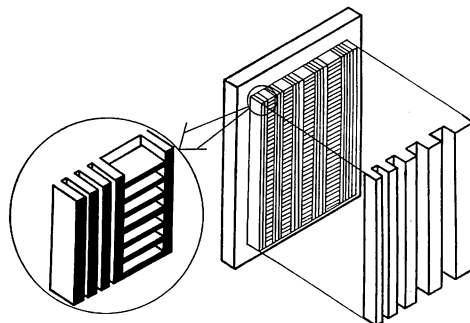


図2 超微細回折格子を用いた複屈折素子

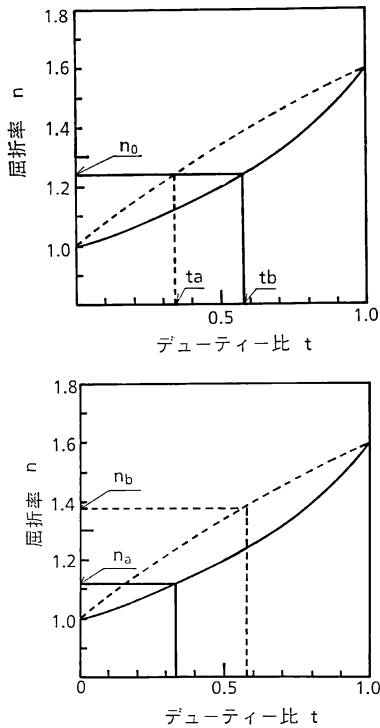


図 3 超微細回折格子のデューティ比に対する屈折率依存性

させたと仮定すると、デューティ比  $t_a$ 、デューティ比  $t_b$  の領域での位相差はゼロとなり入射光は完全に透過される。これに対して、平行な偏光方向を持つ入射光に対しては、屈折率差  $\Delta n = n_b - n_a$  を持つために回折されることになる。このとき、格子厚を  $d = \lambda / 2 \cdot \Delta n$  とすることですべての入射光を回折させることができる。±1 次回折光の最大回折効率 は (4) 式より  $4/\pi^2 = 0.41$  となる。

2.3 設計例

表 1 に本素子の仕様を示す。本素子の設計に際して、光源を発振波長 780 nm の半導体レーザーとし、そのときのレジストの屈折率を 1.6 として計算を行った。また超微細回折格子の周期を 0.3  $\mu\text{m}$  とした。図 4 に二つ

表 1 作製した素子の仕様

超微細回折格子	設計波長 (nm)	780
	周期 ( $\mu\text{m}$ )	0.3
	デューティ比	0.33
		0.58
	格子厚 ( $\mu\text{m}$ )	1.5
回折格子	焦点距離 (mm)	10.0
	最小周期 ( $\mu\text{m}$ )	6.3

のデューティ比  $t_a$ 、 $t_b$  の設計例を示す。二つの曲線に囲まれた領域が消光比 15dB を得られるデューティ比の範囲である。作製精度のマーヅンが大きくとれ、かつ電子線描画法による作製の容易さを考慮してデューティ比をそれぞれ、 $t_a = 0.33$ 、 $t_b = 0.58$  とした。このときの最大屈折率差 (デューティ比  $t_a$  を持つ超微細回折格子の溝の方向に対して平行であり、デューティ比  $t_b$  に対しては垂直である) は 0.26 となる。また 15 dB 以上の消光比を得るためのデューティ比の作製精度は ±2% となる。(4) 式より最大の回折効率を得るためには  $d = 1.5 \mu\text{m}$  とすればよいことがわかる。さて、本素子を半導体レーザーと組み合わせて用いる場合、発振波長のバラツキや変動に対する消光比の依存性を考慮しておく必要がある。図 5 に波長 780 nm で設計した素子に対する消光比の波長特性の計算結果を示す。波長 580 nm から 980 nm の範囲で消光比 20 dB 以上が得られ、本素子が波長変動に対して比較的安定に動作することがわかる。

前述のとおり直交した異なるデューティ比を持つ超微細回折格子の周期構造が回折格子としての機能を有する。そこで本素子の超微細回折格子を持つ偏光ビームス

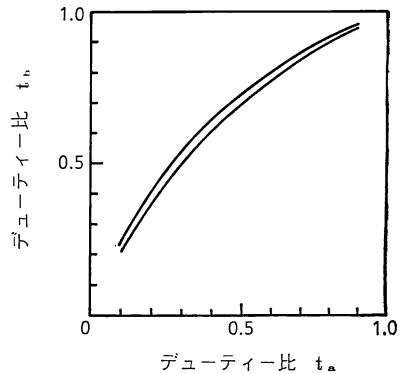


図 4 デューティ比の作製誤差に対する消光比の依存性

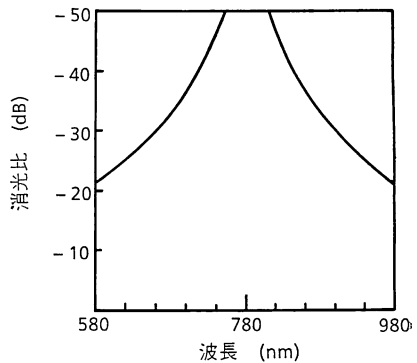


図 5 波長変動に対する消光比の依存性

プリッタの機能にオフアキسسシリンドリカルレンズの機能を持つ回折格子を複合させた。オフアキسسシリンドリカルレンズの焦点距離は 10 mm に設定した。このときの回折格子の最小周期は  $6.3 \mu\text{m}$  である。

### 3. 作製評価

作製プロセスを図 6 に示す。本素子はアスペクト比が 10 以上、またその周期が  $0.3 \mu\text{m}$  の微細構造が必要であるため電子線描画法のみでは作製が困難である。さらに所望とする位相差を実現するためにはサブミクロンオーダーのデューティ比制御、および格子厚制御が必要となる。そこでデューティ比制御が比較的容易に実現でき、しかも高アスペクト比を持つ超微細回折格子の作製が期待できる 2 層レジスト法を本素子の作製プロセスとして用いた。今回、2 層レジストの上層レジストである電子線レジストをマスクパターンとして使い、下層のフォトレジストに異方転写性に優れた RIE (reactive ion etch) を用いてパターンを転写した。作製プロセスは以下のとおりである。

- (1) フォトレジストを  $\text{SiO}_2$  基板上にスピコートし、 $150^\circ\text{C}$  でベークする。膜厚は  $1.3 \mu\text{m}$  である。
- (2) 電子線レジストをスピコートし、 $80^\circ\text{C}$  でベークする。膜厚は  $0.2 \mu\text{m}$  である。
- (3) 電子線描画法によりマスクパターンを作製する。このときデューティ比は電子線の走査回数と電

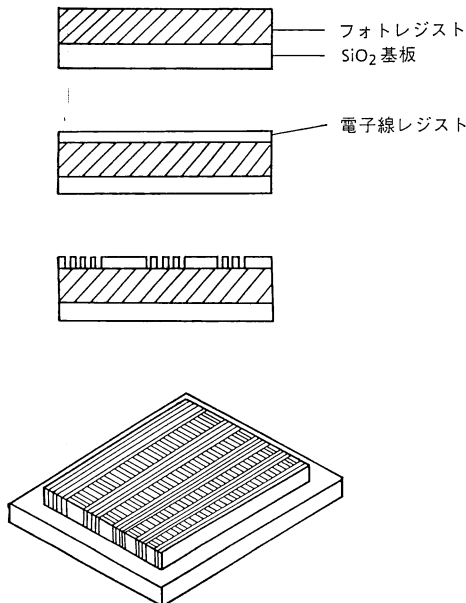


図 6 作製プロセス

子線照射量により制御する。電子線のプローブ径は  $0.025 \mu\text{m}$  と設定したので、走査回数はデューティ比 0.33 と 0.58 でそれぞれ 4 回と 7 回となる。

- (4) 電子線レジストを現像後、フォトレジストにパターンを転写する。エッチャントとして  $\text{O}_2$  ガスを用い、RF パワー 150 W、圧力 3 Pa でエッチングを行った。

超微細回折格子の作製に対して 2 層レジスト法は幾つかのメリットを持つ。まず、電子線レジストの膜厚を薄くでき、しかも下層のフォトレジストにより基板からの後方散乱の影響を低減できるためマスクパターンを高精度で作製できる。また  $\text{SiO}_2$  基板がエッチングストップとして機能するため所望とする格子厚を容易に得ることができる。

図 7 に作製した素子の断面 SEM 写真を示す。エッチング特性の違いにより電子線レジストとフォトレジストの境界でアンダーカットが見られ、また断面形状も台形となっている。断面形状を考慮してデューティ比を計算するとそれぞれ 0.31 と 0.51 となった。

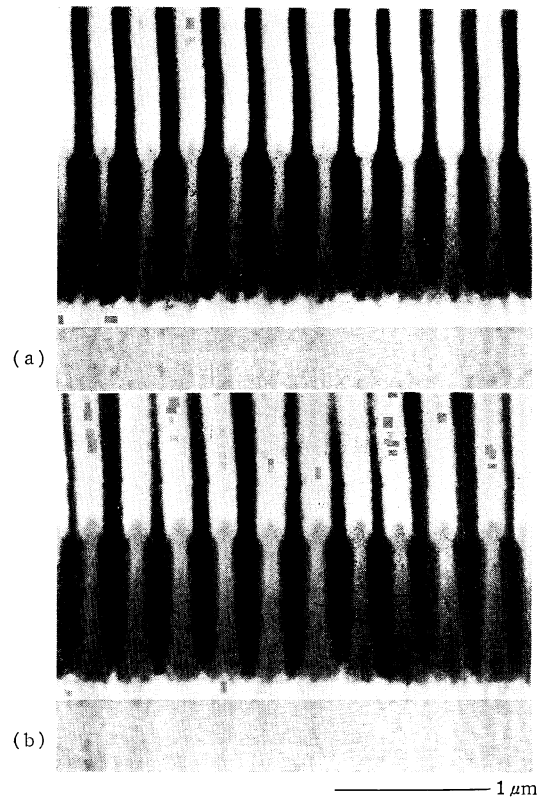


図 7 作製した素子の断面 SEM 写真  
(a) はデューティ比 0.31, (b) はデューティ比 0.51 である。

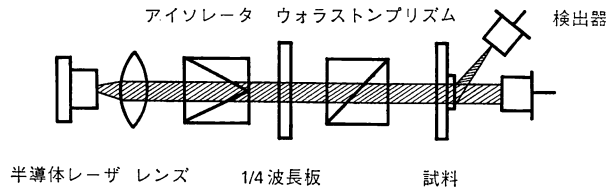


図 8 消光比測定実験光学系

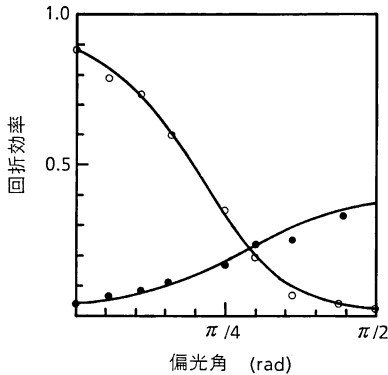


図 9 消光比の測定結果

本素子の偏光ビームスプリッタとしての機能を図 8 の実験光学系を用いて確認した。光源には  $0.78 \mu\text{m}$  の半導体レーザーを用い、開口数 0.1 のレンズによりコリメートして本素子に垂直入射させる。本素子への入射光の偏光方向を変化させるために、ウォラストンプリズムと  $1/4$  波長板を用いた。半導体レーザーからのコリメート光の偏光方向を  $1/4$  波長板の結晶軸方向に対して  $45^\circ$  の角度で入射させることで、直線偏光を円偏光に変換させ、さらにウォラストンプリズムを用いて所望とする偏光成分のみを本素子へ入射させた。

図 9 に入射光の偏光方向に対する 1 次光、透過光の回折効率の測定結果を示す。回折効率の測定は以下の手順で行った。まず、 $\text{SiO}_2$  基板上に作製した本素子の開口サイズと等しい開口を持つマスクを測定光学系にセッティングし、開口を透過するパワー  $P_0$  を測定する。次に、本素子をセッティングしてウォラストンプリズムを回転させてそれぞれの回折光のパワー  $P$  を測定した。このとき回折効率は  $\eta = P/P_0$  で表される。1 次光と透過光の回折効率はある偏光方向を持つ入射光に対して 88%、4% であり、また直交した偏光方向に対しては 3%、36% であった。消光比は 1 次光は  $-13 \text{ dB}$ 、透過光は  $-11 \text{ dB}$  が得られた。

#### 4. 光ヘッドへの応用

図 10 に本素子を用いた光磁気ディスク用光ヘッドの

構成を示す。本素子は記録信号検出、フォーカス誤差信号検出、トラック誤差信号検出の機能を複合させることで、光ヘッドの小型軽量化を図れるところに特長がある。記録信号は差動検出法によって検出され、また焦点誤差信号、およびトラック誤差信号はそれぞれ非点収差法と、プッシュプル法によって検出される。偏光ビームスプリッタで反射された光ディスクからの戻り光は、 $1/2$  波長板によって偏光面を回転させられ、さらにレンズで集光されて本素子に入射する。このとき、ある偏光方向を持つ入射光は回折格子の影響を受け、非点収差特性を持つのに対し、直交した偏光方向をもつ入射光はそのまま集光される。

図 11 に非点収差特性の測定結果を示す。集光スポットは対物レンズでカメラ上に拡大投影して観測した。非点収差特性として対象性のある集光スポットが得られているのがわかる。

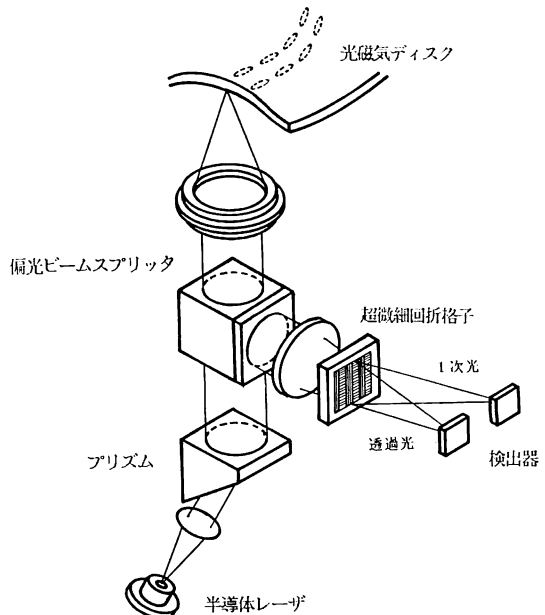


図 10 本素子を用いた光磁気ディスク用光ヘッドの応用例

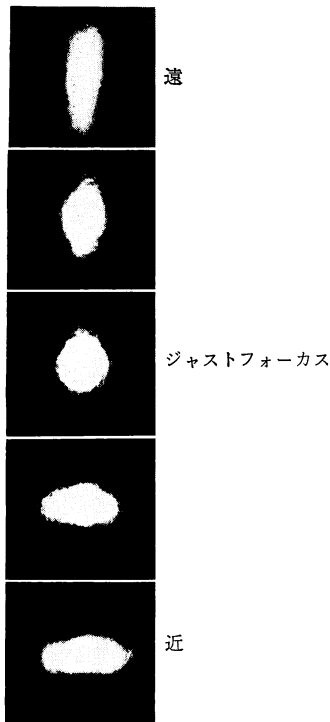


図 11 非点収差特性の測定結果

## 5. おわりに

光学系の小型軽量化を目的とするハイブリッド集積化の一つの方向性として要素機能の複合化に着目し、偏光ビームスプリッタの機能とオフアキシスシリンドリカルレンズの機能を複合した複屈折素子の動作原理、光ヘッドへの応用、試作結果について述べた。本素子の作製法として電子線描画法を用いた2層レジスト法を提案し、周期  $0.3 \mu\text{m}$ 、デューティ比  $0.31$ 、 $0.51$  の超微細回折格子を試作した。消光比は1次光、透過光に対してそれぞれ  $-13 \text{ dB}$  と  $-11 \text{ dB}$  が得られた。本素子のような超微細回折格子の作製法は、これからの研究によるところが大きく有効な作製プロセスの提案が待たれるところである。

今後さらに発展していく光エレクトロニクス分野の中で、微小光学素子を通じて光学系のさらなる小型軽量化、高機能化、ローコスト化に対して少しでも貢献していきたいと考えている。

## 文 献

- 1) OITDA: OITDA ACTIVE REPORT, **3** (1991).
- 2) S. Ura, M. Morisawa, T. Suhara and H. Nishihara: "Integrated optic wavelength demultiplexer using coplanar grating lens," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 1369-

- 1373.
- 3) S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: "Linearly focusing grating coupler for integrated-optic parallel data pickup," *International Symposium on Optical Memory '89* (1989) pp. 93-94.
- 4) 横森 清, 藤田俊介, 中山義宣, 木原 民, 三澤成嘉, 青木真金, 高浦 淳, 廣江昭彦, 船戸広義: "光集積ピックアップ—検出系の導波路集積化—", 第52回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, 10 p-ZN-6 (1991) p. 1008.
- 5) H. Toda, K. Kasazumi, M. Haruna and H. Nishihara: "An optical integrated circuit for time-division 2-D velocity measurement," *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 364-367.
- 6) S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: "Integrated-optical interferometer position sensor," *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 270-273.
- 7) T. Yamashita and S. Aoyama: "Micro grating device using electron-beam lithography," *Proceedings of SPIE Conference on Holographic Optics III: Principles and Applications* (Netherlands, 1991).
- 8) S. Ogata, H. Sekii, T. Maeda, H. Goto, T. Yamashita and K. Imanaka: "Microcollimated laser diode with low wavefront," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11** (1989) 354-355.
- 9) 緒方司郎, 山下 牧, 今仲伸一: "微小光学素子を集積化した光デバイス", 電子情報通信学会誌論文誌, **EMC 89-22** (1989) 35-40.
- 10) 青山 茂, 緒方司郎, 山下 牧: "電子線描画法を用いた平板マイクロレンズ", 電子情報通信学会誌論文誌, **OQE 88-118** (1989) 49-55.
- 11) M. Tanigami, S. Ogata, S. Aoyama, T. Yamashita and K. Imanaka: "Low-wavefront aberration and high-temperature stability molded micro Fresnel lens," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11** (1989) 384-385.
- 12) N.F. Borrelli and D.L. Morse: "Microlens array produced by a photolytic technique," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 476-479.
- 13) N.F. Borrelli, D.L. Morse, R.H. Bellman and W.L. Morgen: "Photolytic technique for producing microlensarray in photosensitive glass," *Appl. Opt.*, **16** (1985) 2520-2525.
- 14) R.C. Enger and S.K. Case: "Optical elements with ultrahigh spatial frequency surface corrugations," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3220-3228.
- 15) R.C. Enger and S.K. Case: "High-frequency holographic transmission gratings in photoresist," *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 1113.
- 16) Y. Ono, Y. Kimura and N. Nishida: "Antireflection effect in ultra spatial-frequency holographic relief gratings," *Appl. Opt.*, **6** (1987) 1442-1446.
- 17) H. Maeda, Y. Sumi, S. Ohuchida, J. Kitabayashi and T. Inokuchi: "A high density dual type grating for magnet-optical disc head," *Technical Digest of the International Symposium on Optical Memory 1989*, Kobe (1989) pp. 95-96.
- 18) S. Aoyama and T. Yamashita: "Grating beam splitting polarizer using multi-layer resist method," *Proceedings of SPIE International Conference on the Application and Theory of Periodic Structures*, San Diego (1991) pp. 241-250.
- 19) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 1st ed. (Pergamon Press, New York, 1959) pp. 705-708.