

バイナリオプティクス

日本女子大学 理学部 数物科学科

小館 香椎子・駒井 友紀

Binary Optics

Kashiko Kodate, Yuki Komai

Faculty of Science, Japan Women's University

1. はじめに

21世紀の情報通信技術の発展と普及に伴い、電子的な情報処理に光技術を用いたテクノロジーの融合が必要となり、光と電子情報間のインターフェイスや光波制御用の素子およびそれらを一体化したコンポーネントの開発が活発になっている。これらの要求を満たし、光の持つ強度・波面・波長・偏光の4つの機能を複合して発現できる素子として回折光学素子への期待が高まっている^{1),2)}。回折光学素子は、波長オーダーの微小な凹凸、屈折率分布が周期・非周期に形成された構造を持ち、球面収差が小さく、小型・軽量・薄型で設計の自由度が高く、他素子との一体化、集積化が可能などの優れた特徴を持っている。そのため回折格子やフレネルゾーンプレートなどの研究および作製が古くから続けられてきている。近年は、特に小型な半導体レーザを光源とする光通信や光エレクトロニクス用の主要なデバイスとして、高効率のフレネルレンズを中心とする開発が進められてきた³⁾。また、1998年になって、MITのG. J. SwansonとW. B. Veldkampにより、作製が難

しいブレード形状を階段形状で近似（量子化）して設計し、微細加工技術を用いて容易に作製することが可能な「バイナリオプティクス」という新技術が提案されている⁴⁾。この「バイナリオプティクス」により、高い回折効率を持つ微小な回折光学素子が、適度なコストで実用化されるようになり、応用分野も、カメラレンズ、光スイッチング、赤外センサ、アレイイルミネータなど多岐の分野に渡っている^{5)~7)}。

本稿では著者らが、これまでに研究を進めてきた、バイナリオプティクスとして、単体で分岐・結像機能を持つマルチレベルゾーンプレート (Multi-level Zone Plate: MLZP) の原理・設計・作製について記述する。さらに作製時の誤差が素子性能に与える影響について述べ、高NA、高効率化に向けて提案した異種レベルを組み合わせたハイブリッド素子およびマルチレベルゾーンプレートの応用例について紹介する。

2. マルチレベルゾーンプレート (Multi-level Zone Plate: MLZP) の設計と作製

2.1 MLZPの原理

マルチレベルゾーンプレートは、円形開口による光の回折によってできるフレネル輪帯を1

〒112-8681 東京都文京区目白台2-8-10
TEL 03-5981-3614
FAX 03-5981-3615
E-mail: kodate@fourier.jwu.ac.jp

つおきに不透明にしたもので、中心から m 番目の半径を r_m 、焦点距離を f とすると、波長 λ の平面波が垂直入射した場合、 r_m は次式で与えられる⁸⁾。

$$r_m^2 = 2mf\lambda + (m\lambda)^2 \quad (1)$$

また、このフレネルレンズの位相シフト関数 $\phi(r, f)$ は次式で与えられる。

$$\phi(r, f) = k_0(f - (f^2 + r^2)^{1/2}) \quad (2)$$

ここで、 $k_0 = 2\pi/\lambda$ である。 f がレンズ開口より十分に大きい時は次式になる。

$$\phi(r, f) = -(\pi r^2/\lambda f) \quad (3)$$

ただし、作製可能な位相シフト量は $0 \sim 2\pi$ の範囲なので、位相シフト関数 $\phi_F(r, f)$ は

$$\phi_F(r, f) = \phi(r) \bmod 2\pi$$

となり、最大のレリーフの深さ D は 2π なので次式となる。

$$\Delta\phi = \phi_F(r, f) \times \{\lambda / (2\pi(n-1))\} \quad (4)$$

このフレネルレンズの断面形状は従来の半円形の屈折型レンズから均一な位相変化に相当する部分を取り除き、ブレース化した図 2(b) のような形状となる。すなわち、このレンズは位相成分を光学的な長さに変換したキノフォーム

レンズの一種で、屈折型レンズと同等の機能を持ち、厚みが薄くなるぶんだけ軽量化され、回折現象を用いているので球面収差も小さい。しかし、フレネルレンズのフレイズ形状を精度良く作製するのはゾーンのライン幅の微小化と共に難しくなり、コストも高くなる。そこで図 2(c) に示すように 2^N level の階段状 (マルチレベル) に近似 (量子化) したバイナリオプティクスが開発された。

2^N level の MLZP のレリーフの深さは

$$D_N = (1/2^N) \{ \phi_F(r, f) \cdot \lambda / (2\pi(n-1)) \} \quad (5)$$

となり、この時のゾーンのライン数 M 、および中心から m 番目のライン幅は

$$M = \{ 2^N \cdot (r_m^2 + f^2 - f) \} / \lambda, \quad W_m = r_m - r_{m-1} \quad (6)$$

で表される。

溝の深さは

$$\phi = 2\pi\lambda / (n-1) M \cdot (n \bmod M) \quad (7)$$

となる。ただし、 n は媒質の屈折率である。

2.2 MLZP の設計と数値解析

MLZP の設計パラメータとして、波長・焦

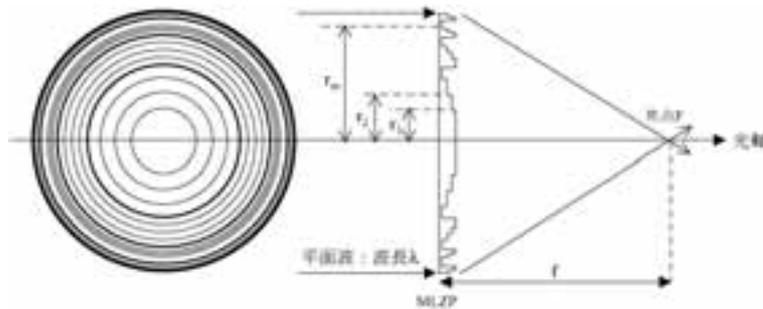


図1 MLZP の結像機能



図2 マルチレベルゾーンプレート

点距離・開口形状・レベル数・最小ライン幅・結像スポット径が挙げられる。入射光源は単色光と白色光，コヒーレントとインコヒーレント，球面波・平面波・ガウシアンビーム，また開口形状は円形・矩形・楕円等の任意開口が考えられる。最初に，設計波長を決定し，作製する光リソグラフィ装置の性能から最小ライン幅が決定される。それに基づき，作製可能なパラメータ（レベル数・NA・スポット径）の範囲が決まる。さらにNA・スポット径・回折効率・レベル数やレベル組み合わせの有無などの設計条件・優先項目を決め，最終的に設計値を決定する。

(1), (7)式を用いて素子形状を設計し，目的に応じて光線追跡法，スカラー解析法，電磁波解析法などの数値計算手法を使い分けて結像特性を求める。最も重要な性能である回折効率を算出するには波動論を適用しなければならない。スカラー回折理論は Scalar-Helmholtz 方程式をもとに，等方的空間中での回折を扱うのが基本である。著者らの研究室では，Fraunhofer の回折近似により導かれる Fresnel-Kirchhoff 回折積分を用いた数値計算プログラムを作成し，適用している⁹⁾。

さらに MLZP のライン幅が波長領域になる

と，電磁波理論を用いた厳密な解析が必要となり，これに対しては RCWA 法によるプログラムを開発し，検討を加えている（図3）¹⁰⁾。

図4にマルチレベル周期格子における回折効率の規格化周期（ A/λ ）依存性の数値計算結果を示す。

$$NA = r/f \tag{8}$$

により定義され，この値が大きいほど明るい。

さらに結像スポット径（ $2\omega_{1/e}$ ）はレーザーのガウシアンビームを求める基本式から次式となる。

$$2\omega_{1/e} = 2\lambda/\pi NA \tag{9}$$

結像機能を持つ MLZP の性能としては高効率，高 NA，高分解能が求められており，式(8), (9)からレベル数 L，および半径 r を大きくする必要がある。しかし，それに伴い



図3 バイナリオプティクスの数値解析法

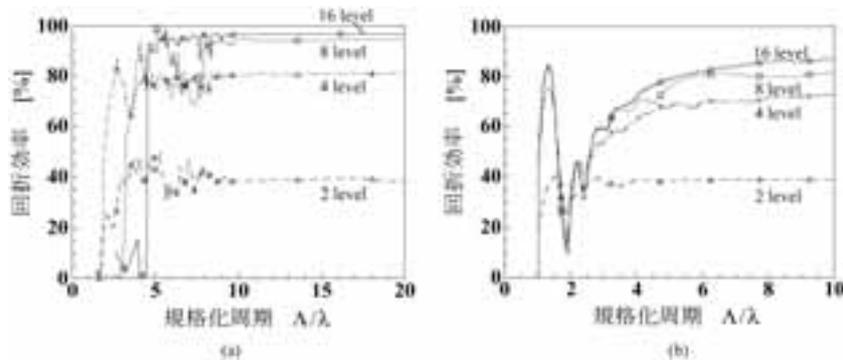


図4 マルチレベル周期格子における回折効率の規格化周期依存性
 数値計算の条件： $\lambda = 635 \text{ nm}$ ， $n = 1.5$ （石英）， A ：格子周期
 (a) Fresnel-Kirchhoff の回折理論を適用した場合
 (b) 電磁波解析 (RCWA) を適用した場合 (TE モード)

$$W_{\min} = \lambda / (L \cdot NA) \quad (10)$$

で表わされるように MLZP の最外側のライン幅を小さくしていくことになり、このライン幅の限界は作製装置の分解能により決まる。

規格化周期が 10 以上の素子では図 4(a) からわかるように level 数が 2, 4, …16 と向上するにつれて回折効率も高くなる。しかし規格化周期 $10 \lambda / \lambda$ 以下ではスカラー回折理論の数値計算結果には振動が生じており、厳密な回折の波の振る舞いを考慮した電磁波解析の適用 (図 4 (b)) が必要である¹¹⁾。

2.3 マルチレベルゾーンプレート (MLZP) の作製と評価

図 5 に石英基板を使用した MLZP の光リソグラフィとリアクティブエッチングによる作製プロセスを示す。現在、主に使用されている微小光学素子の大きさは直径約 $10 \mu\text{m}$ から数 mm なので、光リソグラフィとドライエッチングの組み合わせが主流となっている¹²⁾。この方法では(1)マスクパターンへの設計、(2)マスクパターンの電子線描画、(3)光リソグラフィによるレジストへのパターンニング、(4)ドライエッチングの 4 つの工程が必要である。

第 2 のマスクは、第 1 のマスクの半分のライン幅のマスクパターンで、アライメントマークと合わせて基板にのせ、同様なプロセスを繰り返す。このようにして 2^N level の素子の作製には同一プロセスを $(N - 1)$ 回繰り返す、MLZP を作製する。

このように 2^N level の溝の深さ D は

$$D = (2^N - 1) \lambda / 2^N (n - 1) \quad (11)$$

で表される。

エッチングにはガスイオンを基板に衝突させて彫るドライエッチングを使用しており、表 1 に示すように、この手法で作製した素子の回折効率 ($\eta = (I_1 / I_{\text{in}}) \times 100 [\%]$; I_{in} : 入射光強度, I_1 : 1 次回折光強度) は 4 level で 68.0%, 8 level で 88%, 16 level で 93% であり、スカラー回折理論を適用した数値計算結果とはほぼ、近い値を得ている。値の差は作製誤差に基づくものと考えている。

2.4 マルチレベルゾーンプレート (MLZP) の作製誤差と異種レベル組み合わせハイブリッド MLZP (Hybrid MLZP) による高性能化

MLZP 作製時には深さ方向のエッチング誤

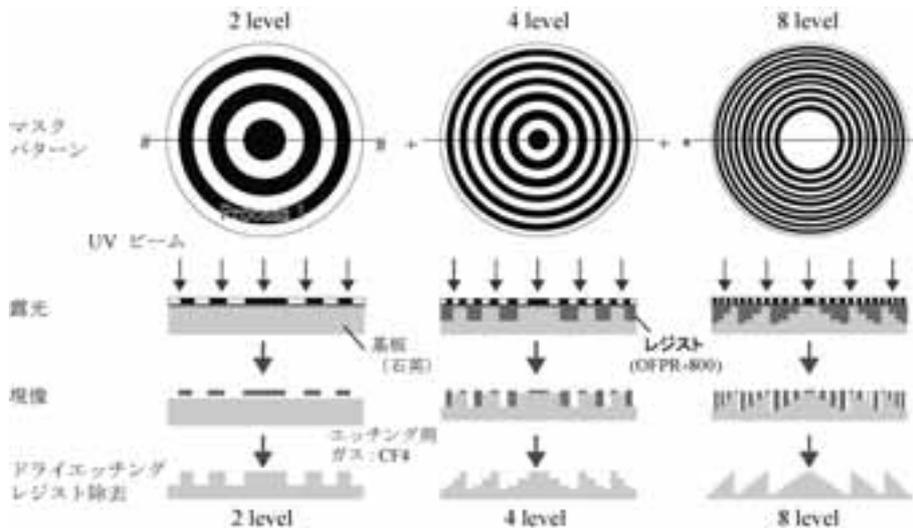


図 5 MLZP の作製プロセス

表1 試作した MLZP の結像特性の実験と数値解析

f=200mm, NA=0.0125

レベル数	4 level	8 level	16 level	
断面形状 (AFM)				
理論値				
	回折効率 [%]	91.1	95.5	98.7
実験値	回折効率 [%]	68.0	88.0	93.0

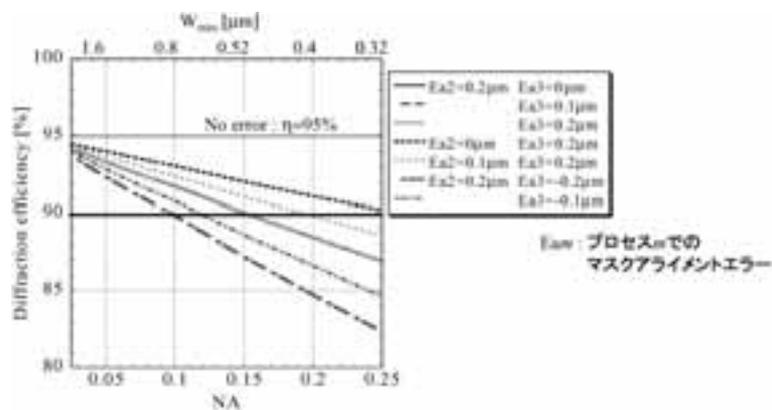


図6 マスクアライメント誤差 ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $f = 10 \text{ mm}$, 8 level)

差とマスクの位置合わせ精度のずれによるアライメント誤差が生じるが、特にマスクアライメント誤差は効率の低下につながる。エッチング誤差は最適な溝の深さに対し $\pm 10\%$ のエラーで回折効率は2.4%ほど減少するが、結像スポット径にはほとんど影響を与えない結果が数値解析から得られている。市販されている高性能ドライエッチング装置ではエッチングエラーが $\pm 5\%$ 以内におさえられているので、回折効率や結像スポット径への影響は小さいと考えられる。一方、アライメント誤差については図6に示すように高NAの素子ほどエラーの影響が大きく、初期プロセスほど精度良く作製する必要があったことがわかった。

高性能 MLZP として、高効率・高 NA の要求を満たすためには、(1)レベル数を増加させること、(2)開口径を大きくすることが挙げられる。開口径が大きくなると共に、MLZP の外側のライン幅は小さくなるので、作製装置の限界を超えると共に、作製エラーの影響が大きくなる。著者らは、作製可能なライン幅に相当する NA まで高レベルで、その外側は低レベルにして、異なるレベルを組み合わせたハイブリッド MLZP (Hybrid Multi-level Zone Plate: HMLZP) による高性能化を提案してきている¹³⁾。一方、このような異なるレベルの組み合わせにより、レベル間の位相の不整合が生じる。この補正については文献 13) に詳しい記

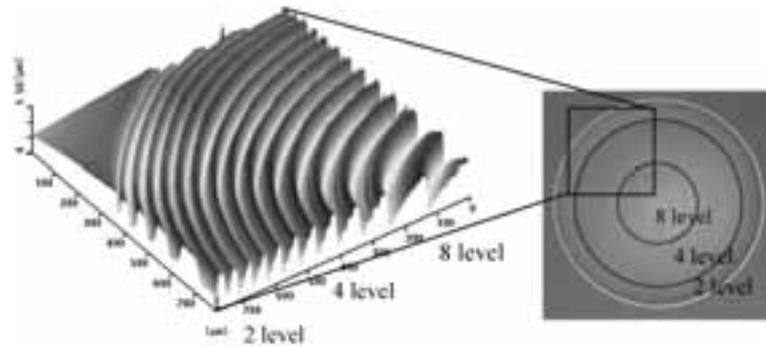


図7 試作ハイブリッド MLZP の断面写真 (2/4/8 level, $\lambda=633\text{ nm}$, $f=1.0\text{ mm}$, $W_{\text{lim}}=2\text{ }\mu\text{m}$)

述がある。図7に試作したハイブリッド MLZP の平面写真および AFM による断面写真を示す。

以上の検討をふまえた HMLZP の最適設計の流れを図8に示す¹³⁾。

2.5 素子材料の温度特性

バイナリ光学素子の優れた特徴については最初に記したが、これらの特徴により、広範囲にわたる応用分野の開拓と発展が期待されている。しかし、システムや装置の小型化に伴い、装置内の温度上昇がより顕著となることや、また光通信へ応用する場合は、大気温度変化による素子の形状変化が引き起こされ、光学素子の特性に影響を与える。MLZP に温度変化が生じた場合の形状変化としては、半径方向と深さ方向の膨張または収縮による変化が考えられ、その大きさ L は

$$L(T) = L(T_0) \cdot (\alpha T + 1) / (\alpha T_0 + 1) \quad (12)$$

で与えられる。ここで α は線膨張率、 T_0 は室温、 T は変化した温度を表す。

石英であれば $\alpha = 4.0 \times 10^{-7}$ なので 20°C から 50°C へ 30°C の温度変化が生じても石英素子のライン幅は $0.006 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$ しか変化せず、回折光強度プロファイルにはほとんど影響を与えない¹⁴⁾。

また、NA の大きい素子ほど温度変化に伴う、焦点上での回折効率低下が大きい。石英は線膨張率が小さく、回折光強度プロファイルの

崩れと回折効率の低下はあまり見られない。

一方、BK7 ($\alpha = 8.0 \times 10^{-6}$) で $\text{NA} = 0.5$ の素子の場合には、 60°C の温度変化に対して回折効率の減少は 10% 以下に抑えられる。また、焦点距離の位置が変化するので焦点上では 2% 程度の回折効率低下が見られるが、システムによっては受光する位置を変えることにより使用可能である。

レプリカを使用する場合には精度良く作製したマスクを使用し、線膨張率の小さいレプリカ用の材料の選定が必要である。従ってレプリカを作製する基板材料の線膨張率の値により、母型作製時のエラーに対する十分な考慮が必要である。

3. マルチレベルゾーンプレートの応用

MLZP はこれまでに述べてきたように優れた機能と特徴を持つため多くの応用が期待されている。提案されている素子とその応用分野および使われている機能は文献 15 に記述されている。ここでは、実用化へ向けた応用として、フォトニックネットワーク用光スイッチングモジュールと小型光並列顔認識システムについて紹介する。

3.1 フォトニックネットワーク用光スイッチングモジュール

衛星間などの全光ネットワークシステムにお

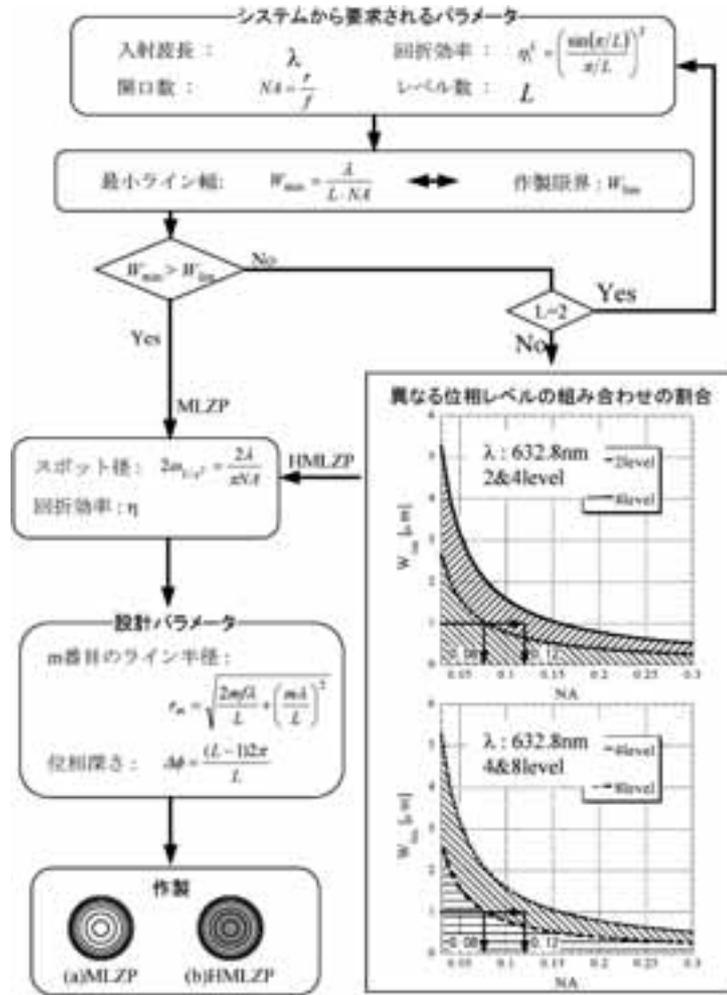


図8 MLZP および HMLZP の最適設計

ける高速光信号処理を行うために、試作した自由空間型微小光学モジュールを提案、試作した¹⁶⁾。このモジュールは高効率化をはかるために、位相補正を行った8, 4, 2 levelの斜入射・斜出射設計のHMLZPとミラーを、長さ14 mm、幅9 mm、厚さ5 mmの石英プレートの両面に配置し、量子井戸(Multi Quantum Well: MQW)可飽和吸収スイッチにファイバからの信号光を出力ポートへ伝える機能を持たせている。試作した光スイッチングモジュールの写真を図9に示す。

信号パルスと励起パルスの組み合わせで4ポートの試作モジュールに波長1.55 μm 、パルス幅30 ps、繰り返し周波数100 MHzのパルス光を入力した光スイッチング実験を行った。図10に示すように信号光パルスと参照光パルスが重なったときに出力信号が高くなり、このモジュールは時間多重信号を用いたフォトネットワークのノード処理に適用できる可能性を得た。onからoffへの切り替え時間は200 psであったが、今後MQWを最適化することにより高速化がはかれると考えている。

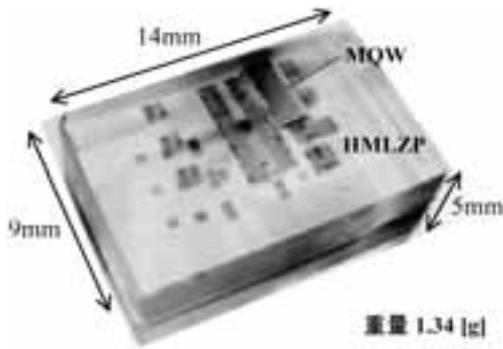


図9 試作全光スイッチングモジュール

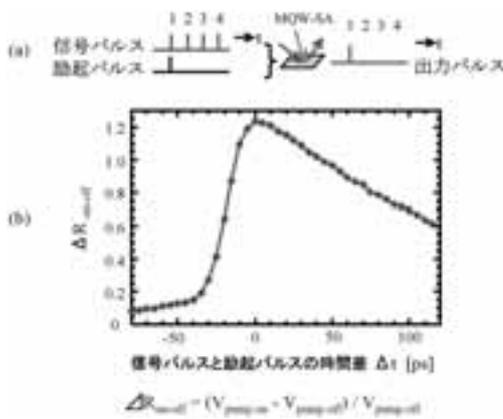


図10 光パルスを用いたスイッチング原理実験
 (a) スwitchingの原理
 (b) 出力パルス強度の入力パルスの時間差依存性

3.2 小型光並列顔認識システム

MLZP は結像機能を有すると同時に、レンズと同様にフーリエ変換機能を持つ。著者等は MLZP アレイの空間並列性を活かした光並列相関演算を提案し、これにデジタルコンピュータによる前後処理を加え、光並列顔画像認識システムを構築してきている¹⁷⁾。このシステムの光源モジュールとして VCSEL アレイを用い、8, 4, 2 level の HMLZP アレイと組み合わせた VCSEL アレイモジュールを提案・試作し、従来の LD 光源モジュールの 1/10 の大きさである 20 × 44 × 55 mm³ を実現した。試作したモ

ジュールを光並列顔認識装置へ組み込み、多光源光並列相関器を構築した (図 11)。この装置は、バイオメトリクス認証評価ガイドラインに沿った 300 人データベースでの精度評価において本人拒否率、他人受け入れ率共に 1%未満の結果を得ている。これらの結果は、試作した顔認識装置はコンピュータログインや住宅エントランスへのセキュリティ応用が可能であることを示している。実証実験の一つとして日本女子大と早稲田大学間の e-ラーニング用のセキュリティシステムとして、携帯電話を端末とした顔認証出席管理を始めている¹⁸⁾。更に大規模なデータベースを対象とした認証や検索、絞込みに有用な顔認識システムとして、1000 faces/s 以上の速度をもつ Fast Facial Recognition Correlator (FARCO) の開発に成功し、実用化に向けた検討を進めている¹⁹⁾。

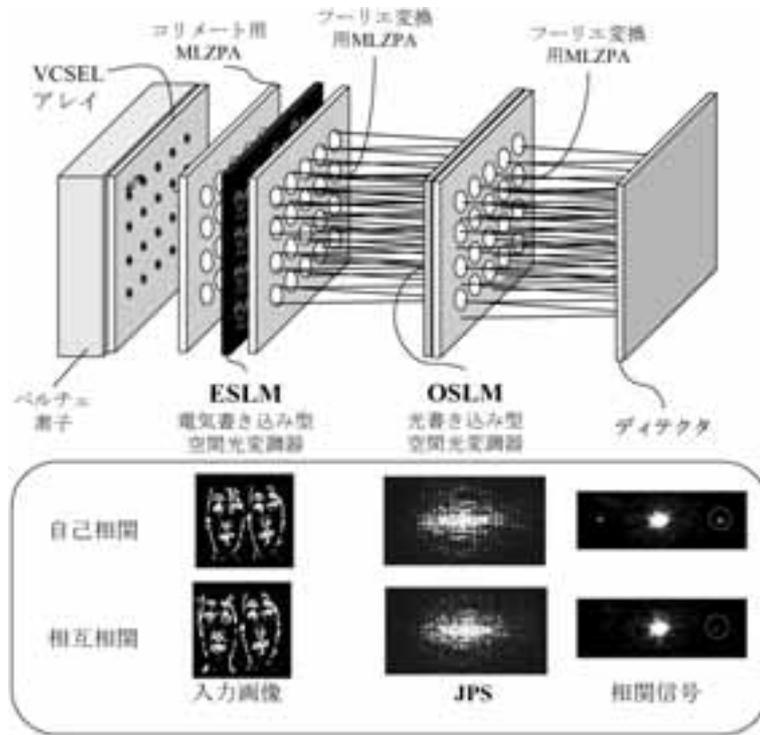
4. おわりに

開発に大きな期待がかかるバイナリオプティクスをとりあげ、位相変調部分をブレード形状からデジタル近似したマルチレベルゾーンプレートに関する設計、結像特性の数値解析、作製プロセスおよび評価結果について述べた。さらに作製誤差を考慮し、高性能化に向けたハイブリッドマルチレベルゾーンプレートの提案について述べ、さらにこれらを組み込んだ応用システムの例について紹介した。

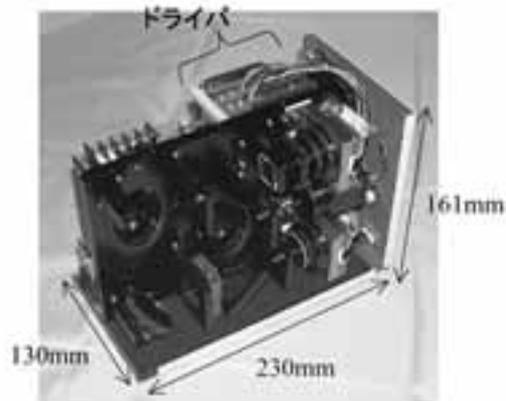
今後の情報化社会において、光技術が果たす役割は大きく、特に光デバイスには高機能・多機能が求められている。現状では、光の波面、振幅、波長、偏光の限られたものしか制御出来ないが、今後はこれらを時間的、空間的にも制御できる技術の研究・開発が望まれている。

参考文献

- 1) H. P. Herzig, *Micro-optics*, Taylor & Francis, London, 1997, pp. (1-52).
- 2) J. Turnen and F. Wyrowski ed.: "*Diffraction*



(a)



(b)

図 11 2枚のMLZPAを用いた試作した小型光並列相関器
(a) 光並列相関演算の原理
(b) 試作器の写真

optics for Industrial and commercial applications,
Akademie verlag, Berlin, 1997, pp. (303-324).

3) J. R. Legar, M. Holz, G. J. Swanson and W. B.

Veldkamp, "Coherent laser beam addition: An application binary optics technology," *Lincoln Lab. J.*, 1, 255 (1988).

- 4) G. J. Swanson, "Binary optics technology: Theoretical limits on the diffraction efficiency of multilevel diffractive optical elements," MIT Tech. Rep., 914, 1 (1991).
- 5) J. Trunen and F. Wyrowski, "*Diffractive optics for Industrial and commercial applications*," Akademie verlag, Berlin, 1997, pp. (1-80).
- 6) J. Turunen, *Micro-Optics*, Taylor and Francis, London, 1997, pp. (31-52).
- 7) H. Kikuta and K. Iwata, "Current Topics in Diffractive Optics," The IEICE Trans. Electron. (Jap. Edition), C 83, 173 (2000).
- 8) H. Nishihara and T. Suhara, *Progress in Optics XXIV*, North-Holland, Amsterdam 1987, pp. (1-38).
- 9) A. Okazaki, W. Klaus and K. Kodate, "Design of optimized Binary Optical Element by combining various phase levels," *Opto-electronics Laser*, 9 (Suppl.), 356 (1998).
- 10) W. Klaus, K. Oka, M. Fujino and K. Kodate, "Analysis of Near-Field Intensity Distributions of High-Compression Talbot Array Illuminators Using Rigorous Diffraction Theory," *Opt. Rev.*, 8, 271 (2001).
- 11) K. Oka, W. Klaus and K. Kodate, "Analysis of Diffractive Optical Element with Wavelength Region Using Rigorous Coupled-Wave Theory," *Journal of Japan Women's University, Faculty of Science*, 10, 99 (2002).
- 12) M. Kufner and S. Kufner, *Micro-optics and Lithography*, VUB Press, Brussels, 1997, pp. (23-80).
- 13) Y. Orihara, W. Klaus, M. Fujino and K. Kodate, "Optimization and Application of Hybrid-level Binary Zone Plates," *Appl. Opt.*, 40, 5877 (2001).
- 14) Y. Orihara, Y. Komai and K. Kodate, "Thermal effects on binary optical element performance," *Tech. Digest Optics Japan 1999*, 29 (1999).
- 15) B. Kress, P. Meyrueis, "*Digital Diffractive Optics*", John Wiley & Sons. Inc., New York, 2000, pp. (307-366).
- 16) Y. Komai, K. Kodate and T. Kamiya, "Improved Usage of Binary Diffractive Optical Elements in Ultrafast All-Optical Switching Modules," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41, 4831 (2002).
- 17) K. Kodate, A. Hashimoto and R. Thapliya, "Binary zone-plate array for a parallel joint transform correlator applied to face recognition," *Appl. Opt.*, 38, 3060 (1999).
- 18) K. Kodate, R. Inaba, E. Watanabe and T. Kamiya, "Facial recognition by a compact parallel optical correlator": *Meas. Sci. Technol.* 13, 1756 (2002).
- 19) E. Watanabe and K. Kodate: *Ext. Abstr. (9th Microoptics Conf. 2003)*; Group of Microoptics of Optical Society of Japan (Japan Society of Applied Physics) L3.