

研究

2値位相格子を用いた光学的ローパスフィルタリング

尼子 淳・曾根原富雄

セイコーエプソン(株)研究開発本部 〒392 諏訪市大和 3-3-5

(1994年6月7日受付, 1994年8月11日受理)

Optical Low-Pass Filtering with Binary Phase Grating

Jun AMAKO and Tomio SONEHARA

Research and Development Division, Seiko Epson Corp.,
3-3-5, Owa, Suwa, 392

(Received June 7, 1994; Accepted August 11, 1994)

As an optical low-pass filter for a matrix liquid crystal panel, a binary phase grating was investigated. Considering the pixel arrangement, the point spread functions (PSFs), which the gratings should have, were determined. Using simulated-annealing algorithm, the phase distributions of the gratings were designed with those PSFs as constraints. For the gratings fabricated by photo-lithography, the light throughput efficiency and the error between the theoretical and measured PSFs were evaluated. The optimized phase distribution can use more than 70% of incident light and reconstruct the diffracted images of a pixel aperture that are needed for low-pass filtering. By positioning the grating in front of the panel, the improvement of image quality was confirmed.

1. はじめに

CRT, 液晶パネルをはじめ,多くの表示体には周期的な画素構造があり, 開口と開口の間には, 発光しない部分あるいは光を遮る暗い部分が周期的に散在する。このような表示体が提供する映像は, 縦横にサンプリングされた映像である。表示体の解像度が十分に高くない場合には, 前記の周期性すなわちサンプリングノイズが視認者に不快感を与えることがある。

サンプリングノイズを低減する手法のひとつに, 光学的ローパスフィルタ¹⁾がある。同フィルタを表示体と視認者の間に配置することにより, 高域のMTFを低下させ, 映像に重なるサンプリングノイズを減らすことができる。言い方を換えれば, フィルタが有する光拡散または光分岐作用により, 開口の像にぼけを加え, 周期的なサンプリング構造を目立たなくするということである。人工拡散板¹⁾, レンズアレイ²⁾, 位相格子^{3,4)}などが, 光学的ローパスフィルタへ応用してきた。とくに位相格子には, 位相分布の設計を工夫することにより, さまざまな光分岐作用を実現できる可能性がある。

位相格子の形状には, 大きく分けて, 連続型, 多値型, 2値型の3種類がある。連続型の好例が位相分布が正弦波形状の位相格子であり, (0, 0) 次および周辺の回折次数へ多くの光を集めること, すなわち, 低域のMTFを高めることができる⁴⁾。光学的ローパスフィルタとしての理想に近いMTF特性を得るために, もっと複雑な形状を設計することは可能であるが³⁾, そういう格子形状を設計に忠実に作製することは難しい。他方, 2値型の例が位相分布が矩形状の位相格子であり, 凹凸の単純な並び(例えば, 四辺形や円形)では, 点像の広がりと光量の配分が表示体の開口の並びに適合しないので, 十分なフィルタリング効果が得られない。形状が量子化された多値型の格子は, 連続型と2値型の中間の性格を備えている。

われわれは, 特定の回折次数へ光を集めることができ 2値位相格子を設計, 作製し, その格子を光学的ローパスフィルタとして用いることを検討した。液晶パネルの画素配列からサンプリングノイズ除去に適した点像強度分布を決めて, この点像強度分布を目標にして格子の位相分布を計算した。フォトリソグラフィで作製した格

子を液晶パネルへ装着し、映像の見え方がどう変化するかを調べた。格子の光利用効率および点像強度分布を測定し、回折特性とフィルタリング性能との関係を考察した。

2. 位相格子の設計

カラー液晶パネルを例にあげて、フィルタ用格子の位相分布の計算について述べる。実験に使った液晶パネルの画素配列の概略を Fig. 1 に示す。開口（図中の□）が1行ごとに半画素ピッチだけずれて並んでいる点に特徴がある。開口幅は画素ピッチのほぼ半分であり、開口と開口の間に遮光部がある。RGB のうちの任意の色に注目すると、その色に関するサンプリング点すなわち開口は、菱形の頂点に周期的に並ぶ。

サンプリングノイズを除くということは、開口と遮光部の間の輝度差を小さくし、周期構造を目立たなくすることに他ならない。そして、輝度差を小さくするには、開口の虚像を所要の数だけつくり、それらの虚像をすきまなくかつ無駄なく遮光部に重ねればよいことは容易に理解できる。このように考えて、Fig. 1 の画素配列に対しては、図中に○で示した点像強度分布を与える3種類の位相格子を設計することにした。図の右隅に、回折光の相対強度（理想値）を示した。

格子の位相分布の計算には、シミュレーテッドアニーリング法（以後、SA 法と称する）を用いた⁵⁻⁷⁾。この方法では、計算を反復する際に用いる拘束条件が、良い解が求まるかどうかを左右する。以下に、設計の進め方を説明する。

- (1) 計算の進め方：格子の1周期を複数のセルに分割し、個々のセルにゼロまたは ϕ の位相値を与える。ランダム位相分布から出発して、無作為にセル

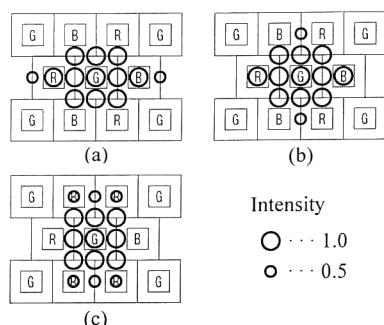


Fig. 1 Pixel arrangement of the liquid crystal panel and the point spread function needed for sampling noise reduction.

を選び、そのセルの位相値をゼロから ϕ へ（あるいは、 ϕ からゼロへ）変える。このたびにコスト関数を計算し、SA 法の規則にしたがい、その変化を受け付けるかどうかを決める。セル数の多少に配慮して、すべてのセルにアクセスする過程を何度も繰り返す。こうしないと、系が平衡状態に到達しないことがある。以上の過程を、目標に近い点像強度分布を与える位相分布が得られるまで繰り返す。

- (2) コスト関数：計算の収束状況を監視するために用いるコスト関数 F を次式で定義する。

$$F = \sum_{m, n} (\eta_{mn} - \bar{\eta}_{mn})^2 \quad (1)$$

ただし、 m, n はフィルタリングに用いる回折次数、 η_{mn} は計算途上の解が与える回折光強度、 $\bar{\eta}_{mn}$ は目標とする回折光強度である。目標値 $\bar{\eta}_{mn}$ は、何度も計算を試行した後に達成された値を考慮して定めた。

回折光強度 η_{mn} は次式から求まる。 N は分割したセル数、 k, l はセルの番号、 ϕ_{kl} はセルの位相値である。

$$\begin{aligned} \eta_{mn} &= |A_{mn}(1/N^2) \\ &\times \sum_{k, l} \exp(j\phi_{kl}) \exp\{j[2\pi(mk+nl)/N]\}|^2; \\ A_{mn} &= (jN/2\pi m)(jN/2\pi n) \\ &\times \{\exp(j2\pi m/N)-1\} \{\exp(j2\pi n/N)-1\} \end{aligned} \quad (2)$$

なお、セル数が多い場合には、係数 A_{mn} を 1 とおいて計算しても問題はない（付録 1）。

2 値位相格子の点像強度分布の対称性を考慮すると、設計上注目すべき回折次数の数は高々 8 であり、計算量を減らすことができる。

- (3) 平衡状態の判定：所定の回数だけ計算を反復したら、系が平衡状態にあるかどうかを判定する⁷⁾。この時に、次式を用いた。

$$|N_a - N_r|/(N_a + N_r) \leq \Delta N \quad (3)$$

N_a は位相値の変化を無条件で受け付けた回数、 N_r は確率分布にしたがい条件付で受け付けた回数である。本研究では、 ΔN を ~ 0.05 に定めた。そして、(3)式の条件を 1 ~ 3 回続けて満足したら、系が平衡状態にあると判断し、系の温度を下げるにした。2 回以上続ける理由は、1 回だけでは良い解が得られない場合があるためである。

- (4) 温度降下：以下の式にしたがい、系の温度を降下させる。

$$T^{(n)} = T^{(0)} \beta^n \quad (4)$$

ただし、 $T^{(n)}$ は n 番目の平衡状態における系の温度、 $T^{(0)}$ は初期状態での系の温度である。本研究では、 $T^{(0)}$ を 1 とした。この値は、初期状態におけるコスト関数値のおよそ 10 倍である。 β は降下係数であり、0.90～0.95 に定めた、計算に要した反復数は 150～300 である。

計算で得たコスト関数値と温度の関係の典型的な例を Fig. 2 に示した。この例にもはっきりと認められるように、位相分布に秩序が現れ始めると、コスト関数値は急速に小さくなる。この時に降下係数の値を大きくして、慎重に解を探すように努めた。

フィルタの性能を左右するものは格子の点像強度分布の再現性であり、フィルタの配置に制約を加えるものは格子の周期の長さである：分布の再現性と周期の長さを支配するものは、格子の 1 周期当たりのセル数である。そこで、フィルタ用格子の設計に用いるセル数を決めてがかりを得るために、(0, 0) 次を含む 3×3 個の回折光を与える格子 (3×3 格子) について、回折特性とセル数の関係を調べることにした。この理由は、Fig. 1 に示した点像強度分布からわかるように、 3×3 個の回折次数へ多くの光を集めることと、それらの強度の均一性を高めることができが、サンプリングノイズの除去に必須だからである。

3×3 格子における、光利用効率とセル数の関係ならびに均一性とセル数の関係を Fig. 3 に示す。●、○が理論値、■、□が実測値である。光利用効率 (●, ■) は 3×3 個の回折次数へ供給されるエネルギーの割合であり、均一性 (○, □) は、 3×3 個の回折次数における強度の最小値と最大値の比である。測定には、He-Ne レーザー (波長 633 nm) を使用した。Fig. 3 に示されるように、セル数の多少は、光利用効率よりも、点像強度分布に大きく影響する。点像強度分布における理論値と実

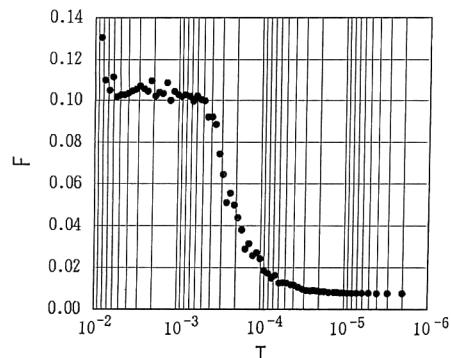


Fig. 2 Cost function F versus temperature T .

測定の差は、主に (0, 0) 次の回折光強度の誤差に起因する。(0, 0) 次を除く 8 個の回折次数についての均一性は 0.90 をこえた。 30×30 のセル数で計算した時の位相分布を Fig. 4 (a) に、点像強度分布を Fig. 4 (b) に示した。Fig. 4 (a) における位相値は 2.56 rad であり、分布には 90° の回転対称性が認められる。

格子の回折特性を高めるには、セル数をできるだけ多くとりたい。格子周期を固定して考えると、周期当たりのセル数が少ないほど、セル寸法を大きくとることができる。こうすると、格子の作製が容易になり、格子形状の転写忠実性を高めることができる。また、格子作製に用いるプロセスの転写能力からセル寸法は制約を受けるので、この点でも、周期当たりのセル数が少ない方が有利である。これらの点に配慮して、フィルタの設計には 30×30 前後のセル数を当てるにした。そして、先に述べた設計の進め方にしたがい、フィルタ用格子の位相分布を計算した。

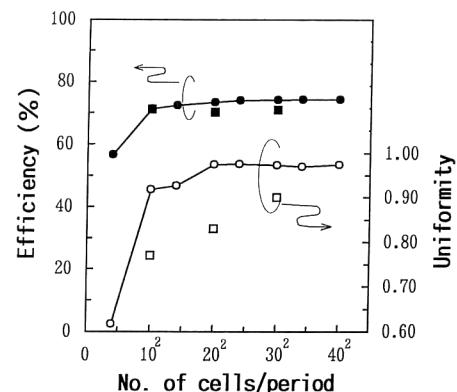


Fig. 3 Diffraction properties for the number of cells in a period of the 3×3 beam fanout grating. ●, ○ are for computed results and ■, □ are for experimental results.

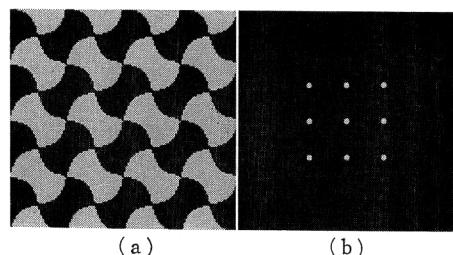


Fig. 4 (a) Phase distribution of the 3×3 beam fanout grating and (b) its point spread function.

3. 位相格子の作製

以下の工程にしたがい、位相格子を作製した。各工程の概要を説明する。

- (1) CAD データ作成：SA 法で求めた位相分布から CAD データを作成し、さらに、CAD データをマスク描画データに変換する。今回は、マスク作製時の描画精度を考慮して、位相格子のセル寸法を $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ にした。
- (2) マスク作製：レーザー描画により Cr マスクを作製する。実験に使用した装置が描画できる最小線幅は $2 \mu\text{m}$ である。マスク基板には合成石英を用いた。
- (3) 露光および現像：作製した Cr マスクを使い、コンタクト法により、厚さ $1.0 \mu\text{m}$ のポジ型レジスト膜 OFPR 8600（東京応化）を露光した。レジスト基板は合成石英 ($n=1.46$) である。露光後のレジスト膜を NMD-3（東京応化）で 60 秒間現像した。パターン転写性を高めるために、ディップ現像を採用了。
- (4) エッチングおよびレジスト除去：反応性イオンエッチングにより、石英基板へパターンを転写する。CHF₃ ガスを使用し、RF パワー 70 W, 26 mTorr の条件でエッチングした。この時のエッチングレートは毎分 400 \AA である。エッチング終了後、O₂ ガスに交換し、不要なレジスト膜を灰化して除いた。

評価用の位相格子については、He-Ne レーザーの波長 633 nm に合わせてエッティング深さを決めた。フィルタとして液晶パネルへ装着する位相格子については、パネルを照明するランプ光源のスペクトルから主波長を定め、その波長に合わせてエッティング深さを決めた。

作製した位相格子の評価から、作製誤差と格子の回折特性の間には以下の関係があることがわかった。

(1) エッティング深さの誤差は $(0,0)$ 次回折光の強度に影響し、全体の光利用効率にはあまり影響しない。

(2) 主に、 $(0,0)$ 次回折光と高次回折光の間でエネルギーのやりとりが行われるので、 $(0,0)$ 次回折光の強度の変化が均一性に与える影響が大きい。

(3) 形状、線幅の誤差は、点像強度分布の再現性に影響する。

参考までに、Fig. 4 の 3×3 格子を測定して得た光利用効率と位相差の関係を Fig. 8 に示した（付録 2）。

4. 実験

前章で説明した工程にしたがい、Fig. 1 の (a)～(c) に示した点像強度分布を与える、3 種類のフィルタ用格子 A, B, C を作製した。セル数は 32×32 、格子周期は $320 \mu\text{m}$ である。格子の点像強度分布を He-Ne レーザーで測定し、測定値から、光利用効率 E と、点像強度分布の誤差 R を次式を使って計算した。その結果を設計値とともに Table 1 にまとめた。

$$E = \sum_{m,n} \eta_{mn} \quad (5)$$

$$R = \sqrt{\sum_{m,n} (\eta_{mn} - \tilde{\eta}_{mn})^2} \quad (6)$$

ただし、 η_{mn} は回折光強度の設計値または実測値であり、 $\tilde{\eta}_{mn}$ は Fig. 1 の点像強度分布が与える理想値である。（6）式の計算には、相対強度を用いた。

格子 A, B, C の光利用効率の実測値は、どれも 70% 以上である。点像強度分布の誤差は、A と C の格子では設計値と実測値の差は小さく、B の格子ではやや大きい。B の格子の点像強度分布の誤差が大きい理由は、格子の深さが設計値に足りないせいで、 $(0,0)$ 次の光が強く現れたからである。格子 A, B, C の点像強度分布を Fig. 5 (a)～(c) に示した。

つぎに、これらの位相格子を液晶パネルへ装着し、光学的ローパスフィルタとしての作用を調べた。ランプ光

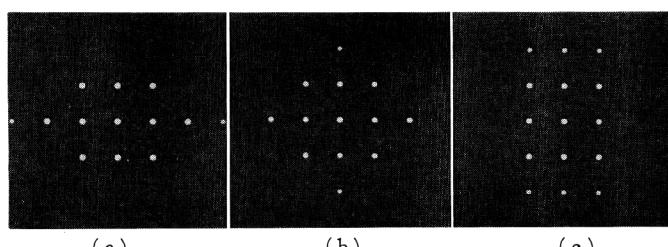


Fig. 5 Point spread functions experimentally obtained for the grating A (a), B (b), and C (c), respectively.

源のスペクトルと視感度に配慮して、色光G(波長550 nm)に合わせて格子の深さを決めた。また、周期320 μmおよび波長550 nmの条件と、開口の1次回折像の位置から、液晶パネルに対する格子の位置を決めた。ここでは、Fig. 1にも示したように、開口の中心から画素ピッチの半分だけ離れた位置に開口の1次回折像がくるように設計した。この時の格子の位置 z は次式から求まる。

$$z = pg/2\lambda \quad (7)$$

ただし、 z は画素配列面から格子までの光路差、 p は画素ピッチ、 g は格子周期、 λ は波長である。例えば、 $p=50 \mu\text{m}$ の時、 $z=14.5 \text{ mm}$ となる。一般に、画素配列面とパネル表面の間には、ガラス基板や偏光板などの素子がある。これら素子の厚さと屈折率を考慮すると、パネル表面から格子までの位置が求まる。

格子Aを用いた時の実験結果を示す。Fig. 6は格子Aの光学顕微鏡像である。この格子を付けない時と付けた時のカラー映像を、それぞれ、Fig. 7(a), (b)に示した。格子を付けない時は、開口間の遮光部が目立ち、映像の細かい構造が視認されにくい。他方、格子を

付けると、開口の回折像が所定の場所に重なり、遮光部が目立なくなる。この結果、映像がなめらかになる。この時に、格子と液晶パネルの距離を変えると、映像の見え方が微妙に変化する。ただし、格子を装着することにより、映像のコントラストは少し低下する。BとCの格子についても同様の実験を行い、フィルタリングの効果を確認した。映像の見え方には、格子A, B, Cの間に微妙な差が認められた。

比較のために、Fig. 4の格子を試してみた。3×3個の回折像では遮光部をすきまなく覆うことができないため、開口の並びに起因する周期的な輝度分布が認められた。

5. 考 察

3種類の格子の間にフィルタリング性能の差が認められた理由はふたつある。ひとつには、液晶パネルの開口形状が等方的でないことと開口幅が厳密には画素ピッチの半分に等しくないせいで、回折像を重ね合わせて得られる輝度分布が格子ごとに異なるからである。フィルタ

Table 1 Diffraction properties of the gratings, A, B, and C that provide the point spread functions shown in Fig. 1 (a), (b), and (c), respectively.

Grating	Phase (rad)	Efficiency		Error	
		E_{th}	E_{ex}	R_{th}	R_{ex}
A	2.63	76%	72%	0.26	0.34
B	2.69	77	71	0.20	0.63
C	2.61	79	74	0.25	0.14

Notes: The subscripts "th" and "ex" mean "theoretical" and "experimental," respectively. Phase values in Table 1 are the computed ones.

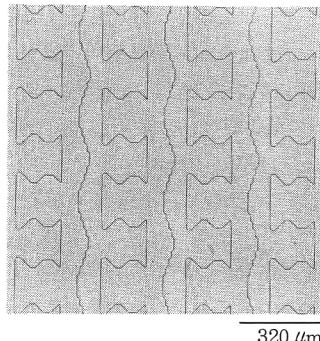


Fig. 6 Optical micrograph of the phase grating, A. Some 4×4 periods are shown.

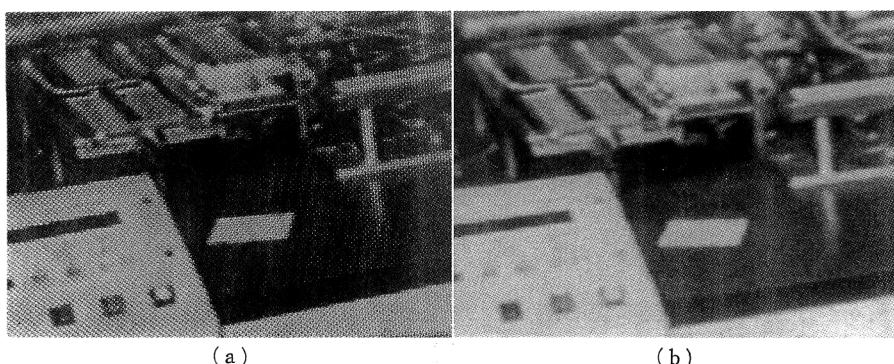


Fig. 7 Pictures of color images displayed on the liquid crystal panel, without grating (a) and with grating (b).

リング効果を高めるには、位相格子を用いることを前提に、液晶パネルの開口面積、形状を設計することが望ましい。

ふたつめの理由は、点像強度分布の再現性に差があるからである。どの位相格子が最も優れているか、格子の最適位置をどこに求めるかということは、最終的には、視認評価の結果をふまえたうえで決めなければならない。

つぎに、フィルタリング性能と格子の回折特性の関係について述べたい。映像に必要以上のボケを加えることなくサンプリングノイズを除くためには、サンプリング周波数以上での MTF をゼロに近づけると同時に、サンプリング周波数よりも低域での MTF を高めなければならない。この要求は、(0, 0) 次およびその周りの限られた回折次数へできるだけ多くの光を集め、かつ、周囲の高次の回折次数へ散逸する光量を抑えることに等しい。格子における MTF と点像強度分布の関係は、次式のように表せる。

$$MTF = |F\{\eta_{mn}\} + F\{\Delta\eta_{mn}\}| \quad (8)$$

$F\{\cdot\}$ はフーリエ変換を意味する。 η_{mn} はフィルタリングに貢献する低次の回折光の強度分布、 $\Delta\eta_{mn}$ はフィルタリングに貢献しない高次の回折光の強度分布である。(8)式から、 $\Delta\eta_{mn}$ に多くのエネルギーが回りかつその分布が遠くまで広がるほど、MTF における直流成分が高くなり、相対的に低域の MTF が低下することがわかる。

われわれが設計、作製した 2 値位相格子は、凹凸の並びが工夫されていて、フィルタリングに貢献する 12 ないし 15 個の回折次数へ 70% 以上の光 ((8)式の η_{mn}) を集めることができる。すなわち、MTF の 2 次元的な広がりを任意に設計できる点に特徴がある。ただし、残りの光 ((8)式の $\Delta\eta_{mn}$) は周囲へ散逸するので、その分、低域の MTF が低下することは避けられない。これは、2 値位相格子の断面が矩形であるためであり、作製が容易であるという長所とは競合する関係にある。多値位相格子⁸⁾や連続的な分布の位相格子⁹⁾は 80~90% 以上の光利用効率を与える可能性があるが、複雑な格子形状を高精度に作製することは容易ではない。

最後に、位相格子の色収差の処理について述べる。ここで言う色収差とは、格子の回折特性すなわちフィルタ特性が波長に依存する性質である。この色収差を回避するには、ふたつの方法がある。ひとつは、色光ごとに格子を設計する方法であり、RGB の色光ごとに液晶パネルを配置できる表示装置にふさわしい。ふたつめは、屈折型レンズの色収差を利用して、格子の色収差を相殺

する方法である。RGB の色光に対して共通の液晶パネルを使用する場合に有効であろう。とくに、後者では、RGB の各主波長の近くにエネルギーが集中する、いわゆる 3 波長タイプの光源¹⁰⁾を使用することが望ましい。

6. おわりに

2 値位相格子型の光学的ローパスフィルタをシミュレーテッドアニーリング法で設計し、ホトリソグラフィとイオンエッチングにより作製した。同フィルタを液晶パネルへ装着し、開口の並びに起因するサンプリングノイズを効果的に減らすことができた。また、格子の位相分布を工夫することにより、いろいろな形状の点像強度分布を実現できることもわかった。このことは、映像に対する任意の方位の視認性を制御できることを示唆している。作製が容易である点も大きな長所であり、2 値位相格子は、サンプリングノイズの除去にとどまらずに、各種の映像処理の手段として有用であろう。

文 献

- 1) 佐柳和男：“Optical noise filter,” 応用物理, **27** (1958) 623~632.
- 2) E. Dolgoff: “Optical depixelization for electronic image projection,” *High-Resolution Displays and Projection Systems*, SPIE Proc., **1664** (1992) pp. 160~171.
- 3) K. Knop and M. T. Gale: “Diffractive diffusers for display applications,” *SID 86 Digest* (Palisades Institute for Research Services, INC. New York, 1986) pp. 354~356.
- 4) 藤沢克也、中務茂樹、渡辺陸司、市村英治郎：“有機光学材料を用いた光学的ローパスフィルタ”，テレビジョン学会技術報告, **14** (1990) 7~12.
- 5) S. Kirpatrick, C. D. Gelatt, Jr. and M. P. Vecchi: “Optimization by simulated annealing,” *Science*, **220** (1983) 671~679.
- 6) M. R. Feldman and C. C. Guest: “Iterative encoding of high-efficiency holograms for generation of spot arrays,” *Opt. Lett.*, **14** (1989) 479~481.
- 7) M. N. Vesperinas and R. Navarro: “Performance of a simulated-annealing algorithm for phase retrieval,” *J. Opt. Soc. Am.*, **5** (1988) 30~38.
- 8) J. M. Miller, M. R. Taghizadeh, J. Turunen and N. Ross: “Multilevel-grating array generators: fabrication error analysis and experiments,” *Appl. Opt.*, **32** (1993) 2519~2525.
- 9) M. T. Gale, M. Rossi, H. Schutz, H. P. Herzig and D. Prongue: “Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation,” *Appl. Opt.*, **32** (1993) 2526~2533.
- 10) 東 忠利：“最近の光源”，テレビジョン学会誌, **34** (1980) 719~725.

付 錄 1

セル数 N が多い時は、(2)式において、 $\exp(j2\pi m/$

$N)-1$ を $j2\pi m/N$ で、 $\exp(j2\pi n/N)-1$ を $j2\pi n/N$ で近似できる。よって、 $A_{mn}=1$ となり、次式で回折光強度を計算できる。

$$\eta_{mn} = \left| \left(1/N^2 \right) \sum_{k,l} \exp(j\phi_{kl}) \exp \{ j2\pi(mk+nl)/N \} \right|^2 \quad (\text{A1})$$

(2)式で求めた回折光強度と(A1)式で求めた回折強度を比べると、セル数が 30×30 よりも多い時には、有意差はほとんど認められなかった。セル数が 20×20 よりも少ない時には、係数 A_{mn} の効果が現れ、(A1)式で求めた回折光強度の方が数～10%くらい高くなる。

付 錄 2

Fig. 8 には、(2)式から求めた計算結果を曲線で、実測値をプロットで示した。これらの結果からわかるように、位相値 ϕ が 2.56 rad の近傍では、位相誤差が光利用効率に与える影響は小さい。なお、Fig. 4 の位相格子のように、位相値 $\phi \text{ rad}$ のセル数と位相値 0 rad のセル数が等しい時には、 $(0,0)$ 次回折効率は、

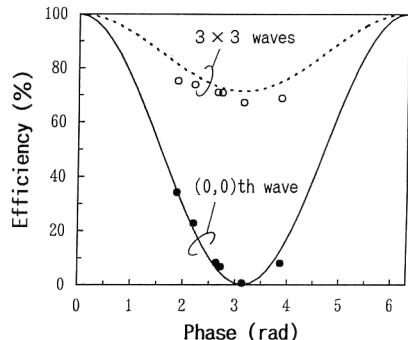


Fig. 8 Diffraction properties of the 3×3 fanout grating as a function of the phase depth ϕ . Lines are for computed results and plots for experimental results. Efficiency for 3×3 waves is computed as the same in Fig. 3 and efficiency for $(0,0)$ th wave is computed with Eq. (2).

$$\eta_{00} = \left| \left(1/N^2 \right) \sum_{k,l} \exp(j\phi_{kl}) \right|^2 = \cos^2(\phi/2) \quad (\text{A2})$$

と書ける。