

PRIZ 型空間光変調素子における偏光変調効率の解析

中川 清・峯本 工

神戸大学工学部情報知能工学科 〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1

Modulation Efficiency of Polarization in PRIZ Spatial Light Modulator

Kiyoshi NAKAGAWA and Takumi MINEMOTO

Department of Computer and Systems Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University, 1-1, Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657

Recording and readout properties of a PRIZ spatial light modulator based on a photo-refractive $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal have been investigated. In order to estimate the ability of the modulator, we proposed modulation efficiency of the polarization of the beam from the modulator, which was calculated by the effective scalar electro-optic coefficient. By using the dependence of the modulation efficiency on the polarization direction of the readout beam, the spatial differential of the input patterns with respect to a selected direction can be carried out in real time.

1. はじめに

フォトリフラクティブ結晶を用いた空間光変調素子は、光情報処理システムのなかで、画像信号の入出力素子、画像変換素子等として広く利用されている¹⁾。特に、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) 単結晶を用いた空間光変調素子は、ホログラム記録型²⁾、PROM型³⁾、PRIZ型素子⁴⁾など多くの素子構成方法が報告され、画像計測における画像信号の実時間処理に利用されている^{5,6)}。これは、BSO単結晶が比較的大きな電気光学定数を示し、入射光線に対して早い応答性が期待できる優れたフォトリフラクティブ結晶であるためである。

BSO単結晶を利用した空間光変調素子のなかでもPRIZ型素子は、素子中に記録した入力画像の空間微分演算結果を出力するという特徴をもった素子である。これは、PRIZ素子の動作原理が他の構成法とは異なり、バイアス電界と、電気光学効果に寄与する電界の方向が同一でないため得られる特性である。

PRIZ型素子の画像処理特性は、蓄積画像中の高空間周波数成分をもつ部分を選択的に読み出せることに相当しており、光学系を用いたフーリエ変換処理システムにおいては、零空間周波数およびその周辺の低い周波数成分の影響をキャンセルしてフーリエスペクトルを観測できる点で実用上有効である。このためBSO-PRIZ素子

の構成において、最も有効に電気光学効果を利用できる結晶方位に関する解析や、良好な微分結果が得られる素子動作条件に関する解析が、いくつか報告されている^{7,8)}。また、素子構成法や結晶の寸法と空間分解能の関係についての考察もいくつか報告されている^{9,10)}。しかし、BSO単結晶の示す電気光学効果が入射光の偏光方向に大きく依存するにもかかわらず、読出し光の偏光方向と空間微分特性の関係についての考察は行われていない。そこで、本論文では、BSO単結晶を用いて構成したPRIZ型空間光変調素子における空間微分特性と読出し光偏光方向の関係について考察する。空間微分特性は、結晶中に記録された空間電界分布による電気光学効果を介した読出し光位相の変調の効率に大きく依存している。そこで、読出し光の入射偏光方向と結晶中に分布する空間電界の方向の関数として偏光変調効率を評価し、数値計算によりその特性を明らかにする。その後、偏光変調効率の入射偏光方向依存性を利用した空間微分特性を実験的に検証する。

2. PRIZ素子の構成と偏光変調効率

PRIZ素子は、Fig. 1に示すように、表面に透明電極を蒸着した(110)面カットのBSO単結晶を用いて構成される。(111)面カットのBSO単結晶板を用いた

構成⁹⁾も報告されているが、ここでは解析を理解しやすいものとするために ($\bar{1}10$) 面カット BSO 単結晶板を用いた PRIZ 素子について考える。ここでの考察の手法は、(111) 面カットの場合にも同様に適応できる。

PRIZ 素子への書込み過程では、まず結晶面の ($\bar{1}10$) 面に入力画像を照射する。PRIZ 素子には、あらかじめ空間的に一様な数 kVmm^{-1} の電界を、バイアス電界として $\langle \bar{1}10 \rangle$ 軸に沿って印加しておく。BSO 単結晶中の明るい領域にある電子は、光学的に励起され、ドリフトによりあらかじめ印加されていた電界に沿って陽極の方へ移動する。移動した電子と残されたホールは、BSO 単結晶に照射されている光強度パターンに対応して分布する。照射の結果として生じた空間的な電荷分布は書込み照射前は空間的に一様であったバイアス電界の空間分布に変調を与える。素子に画像を記録した後の結晶中における電荷分布および電界分布の概略を Fig. 1 中に示している。

素子内に分布している電界強度の空間分布は、線形電気光学効果を介して結晶中に屈折率の変化 Δn を誘起する。この結晶に一様な波面をもつ読出し光を入射したとき、結晶中に誘起されている屈折率変化 Δn により生じる読出し光の位相変化 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda_R)\Delta n \quad (1)$$

$$\Delta n = (1/2)n_0^3 r^{\text{eff}} E_{\text{sc}} \quad (2)$$

で表される。ここで、 λ_R は読出し光の波長、 n_0 は波長 λ_R での BSO の自然の屈折率である。屈折率変化 Δn は、有効スカラ電気光学定数 r^{eff} および空間電界電界強度 E_{sc} で与えられる。 E_{sc} は、バイアス電界が書込み画像の照射により変調を受け、結果的に結晶中に存在している空間電界強度である。 r^{eff} は電気光学テンソル $r^{\text{eff}}_{ij}(\mathbf{k}_g)$ および入射光と変調光の偏光状態ベクトル d^{inc}_i 、 d^{mod}_j を用いて、

$$r^{\text{eff}} = d^{\text{inc}}_i r^{\text{eff}}_{ij}(\mathbf{k}_g) d^{\text{mod}}_j \quad (3)$$

と表すことができる¹¹⁾。 $r^{\text{eff}}_{ij}(\mathbf{k}_g)$ は、空間電界ベクトル

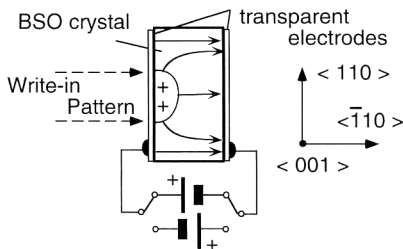


Fig. 1. Structure of PRIZ spatial light modulator.

の方向 \mathbf{k}_g と結晶の対称性により決定されるテンソル量である¹²⁾。 $r^{\text{eff}}_{ij}(\mathbf{k}_g)$ は、電気光学テンソルと電界方向単位ベクトルの積をならび変えることにより 3×3 のテンソルとして表記される¹³⁾。BSO 単結晶は点群 23 に属する結晶である。したがって有効な電気光学定数は、 r_{41} 、 r_{52} 、 r_{63} であり、これらの係数はすべて等しい ($r_{41} = r_{52} = r_{63}$)。ここで、 E_{sc} の空間的な分布は蓄積画像に対応し、読出し光偏光方向には依存しない。したがって、PRIZ 素子もつ読出し偏光方向依存性はすべて r^{eff} の偏光方向依存性に起因していると考えられる。そこで以下では r^{eff} の読出し光偏光方向依存性について検討する。

BSO 単結晶を用いた PRIZ 素子における読出し偏光方向依存性を解析するための光学系を Fig. 2 に示す。読出し光は結晶の ($\bar{1}10$) 面から入射する。このときも BSO 結晶には、($\bar{1}10$) 面に垂直な方向にバイアス電界が与えられており、画像の書込みは完了し、結晶中には書込み画像に対応した E_{sc} の分布が記録されていると考える。また本論文では、BSO 単結晶の旋光性についてはこれを無視して以下の解析を行う。

BSO 単結晶の主軸 (X, Y, Z) と実験上の座標系 (x_1, x_2, x_3) の関係を Fig. 3 に示している。 x_3 軸は Z 軸と平行である。 x_1, x_2 軸は、 $X-Y$ 面にあり X, Y 軸に対して Z 軸を回転軸としてそれぞれ 45° 回転移動している。結晶中に記録された光強度分布に対応した空間電界ベクトル \mathbf{E}_{sc} を、Fig. 3 に示す BSO 単結晶の主軸 (X, Y, Z) を基準にとった極座標系を用いて、

$$\mathbf{E}_{\text{sc}} = E_{\text{sc}} \mathbf{k}_g = E_{\text{sc}} \begin{pmatrix} \sin \theta_g \cos \phi_g \\ \sin \theta_g \sin \phi_g \\ \cos \theta_g \end{pmatrix} \quad (4)$$

と表す。ここで、空間電界の方向を表す方向角 ϕ_g, θ_g は、Fig. 3 にその定義を示した。式(4)で表される空間電界が、電気光学効果によって読出し光の偏光状態を変調することになる。ここで簡単のために、入射偏光状態および変調後に取り出す光の偏光状態を、Fig. 2 に示すように、それぞれが x_1-x_3 面上で、 x_3 軸からそれぞれ方位 θ, θ_1 だけ傾いた面上で振動する直線偏光と考える。偏光方向を示す方位も Fig. 3 の定義に従って表記すると、 $\phi_1 = \phi_t = 45^\circ$ である。このとき r^{eff} は、

$$r^{\text{eff}} = r_{41} (\sin \theta / \sqrt{2}, \sin \theta / \sqrt{2}, \cos \theta) \cdot \begin{pmatrix} 0 & \cos \theta_g & \sin \theta_g \sin \phi_g \\ \cos \theta_g & 0 & \sin \theta_g \cos \phi_g \\ \sin \theta_g \sin \phi_g & \sin \theta_g \cos \phi_g & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sin \theta_i / \sqrt{2} \\ \sin \theta_i / \sqrt{2} \\ \cos \theta_i \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \theta_t / \sqrt{2} \\ \sin \theta_t / \sqrt{2} \\ \cos \theta_t \end{pmatrix} = r_{41} [\cos \theta_g \sin \theta_i \sin \theta_t + \sin \theta_g \sin(\phi_g + 45) \sin(\theta_t + \theta)] \quad (5)$$

と求められる。ここでさらに簡単のために $\theta_t = \theta_i + 90^\circ$ 、つまり、透過光のうち、入射偏光成分に対して直交方向の偏光成分のみを出力光と考える。通常フォトリフラクティブ結晶を用いた空間光変調素子ではノイズ光を低減するために、結晶を直交する偏光板の間に置いて使用し、入射光に対して直交する偏光成分をもつ変調光を読出し光として観測するので、この単純化は実用上妥当なものであると考えられる。この条件下で式(5)は、

$$\eta = r^{\text{eff}} / r_{41} = A \sin(2\theta + \delta) \quad (6-1)$$

$$A^2 = (1/4) \cos^2 \theta_g + \sin^2 \theta_g \sin^2(\phi_g + 45) \quad (6-2)$$

$$\delta = \arctan(\tan \theta_g \sin(\phi_g + 45)) \quad (6-3)$$

と変形できる。本論文では式(6-1)における比 r^{eff} / r_{41} を偏光変換効率 η と定義して以下の考察を進める。まず、式(6-1)中の A の値を、 (ϕ_g, θ_g) の関数として計算した結果を Fig. 4 に示す。 $\phi_g = 135^\circ$ 、 $\theta_g = 90^\circ$ 以外

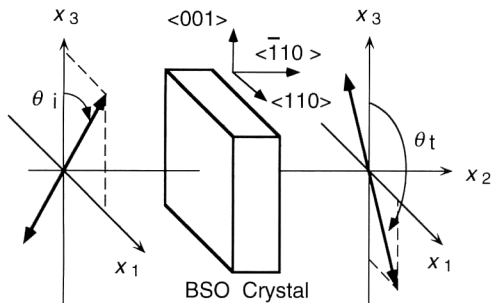


Fig. 2. Experimental coordinates for analysis.

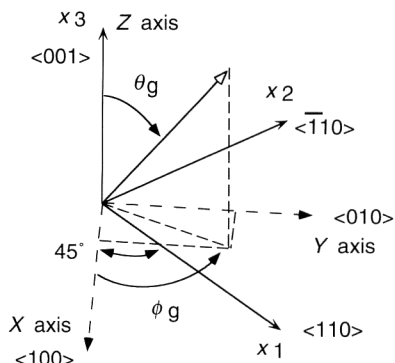


Fig. 3. Relation between experimental coordinates and crystal orientation.

の方向では、 A はゼロより大きな値をとっている。これは、 $\phi_g = 135^\circ$ 、 $\theta_g = 90^\circ$ 以外の方位で存在する空間電界は、読出し光に電気光学効果を介して変調を与える可能性があることを示している。 $\theta_g = 90^\circ$ 、 $\phi_g = 135^\circ$ の場合、つまり結晶中の電界が $\langle \bar{1}10 \rangle$ 軸に沿っている場合には、バイアス電界と平行な電界のみが存在する場合であり、バイアス電界と同方向の電界は、読出し偏光の変調に寄与しないことを示している。

光照射により発生した電界の乱れによって $\langle \bar{1}10 \rangle$ 軸方向成分以外の成分が発生すると、電気光学効果を介して読出し光に位相変調を与えることができる。 $\langle \bar{1}10 \rangle$ 軸と垂直な方向への成分をもつ電界は、照射した書込み画像中の強度が空間的に変化している部分に発生し、特にエッジの部分において強く発生する。したがって、書込み画像のエッジ部分に入射された読出し光が位相変調を強く受ける。書込み画像のエッジ以外の部分では、空間電界成分の大部分が $\langle \bar{1}10 \rangle$ 軸に沿ったものとなり、読出し光位相にほとんど変調を与えない。したがって、位相変調量の空間分布は照射した光画像の空間的な微分パターンと対応することになり、記録画像の空間微分画像が光強度の分布として読み出されることになる。

次に、 η の読出し光偏光方向依存性について考察する。まず、読出し偏光方向 $\theta = 0^\circ$ の場合における η の電界方向依存性を計算した。実際に観測できるのは光強度であり、 η^2 に関係している。そこで、 $\theta = 0^\circ$ の場合における (ϕ_g, θ_g) の関数として η^2 をプロットしたものが Fig. 5(a) である。図より、 $\phi_g = 45^\circ$ 、 $\theta_g = 90^\circ$ の方位の電界が読出し光に効率よく位相変調を与えることがわかる。 $\phi_g = 45^\circ$ 、 $\theta_g = 90^\circ$ は、 x_1 軸方向である。 $\theta_g = 0^\circ$ つまり $x_3(Z)$ 軸方向の電界は読出し光偏光に変調を与えない。同様に、 $\theta = 45^\circ$ の η^2 を、Fig. 5(b) に示している。この場合には、 $\theta_g = 0^\circ$ つまり $x_3(Z)$ 軸方向の電界に対して変調効率が高く、 $\theta_g = 90^\circ$ の方向の電界からの変調は小さい。これらより、 $\theta = 0^\circ$ の場合には、 $x_3(Z)$ 軸方向の電界を、 $\theta = 45^\circ$ の場合には、 x_1 軸方向の電界を、各々選択的に読み出せると考えられる。つぎに $\theta = 22.5^\circ$ 、つまり $\theta = 0^\circ$ と 45° の中間状態での η^2 の計算結果を、Fig. 5(c) に示している。この場合にも、空間電界の方向により変調効率に若干の変動があるものの、広い方位の電界ベクトルから位相変調を受けることが可能であることを計算結果は示している。

以上の解析より、 $(\bar{1}10)$ 面カットのBSO単結晶板を用いたPRIZ素子では、読出し偏光方向により特定方

向の空間電界を選択的に読み出せる可能性があることが明らかにできた。

3. PRIZ 素子からの読出し特性

以上で行った理論的解析を実験的に検討するために結晶板厚 1 mm, 有効画面 15×15 mm の BSO 単結晶を用いて PRIZ 素子を構成した。書込み過程では、写真フィルムに記録した画像に青色 CRT (波長約 500 nm) を光源とする青色光を照射し、その透過光を PRIZ 素子表面に結像して照明した。読出しは、波長 650 nm 付近で無偏光光を発生する LED を光源として用いた。LED からの光線をコリメイトし、空間的に一様波面をもつ平面

波として結晶に入射させた。ここでは、読出し画像の読出し光偏光方向依存性について検討するために、PRIZ 素子を 2 枚の偏光板間に配置した。読出し光偏光方向は、素子前方の偏光板で設定した。結晶中に記録されている空間電界分布に対応した位相変調の分布は、素子後方の偏光板を用いて強度の変調分布に変換し観測した。また素子後方の偏光板は、入射偏光方向の変化に対応して、入力画像照射前に、結晶中にバイアス電界のみがあるとき、常に消光状態となるように調整して読出しを行った。厚さ 1 mm の BSO 単結晶板は、約 15° の自然旋光性を示す。このため、PRIZ 前後に配置した偏光板は、直交状態から約 15° ずれて設定した。

PRIZ 素子の使用条件について考察するために、Fig. 1 に示すように、バイアス電界の方向を変化させ、読出し画像へのバイアス電界方向の影響について検討した。まず、光の照射側が陽極になるように設定し、書込み読出しを行った。このとき、得られた強度分布を、書込み光露光時間を変化させた場合について Fig. 6(b)~(d) に示す。Fig. 6(a) には書込み光照射時の PRIZ 素子表面光の強度分布を示している。このとき読出し偏光の方向は、67.5° である。書込み時間が長くなるに従って、シャープな微分処理が実行できている。30 秒以上の照射を行っても読出し像の変化はなく、ほぼ定常状態に達している。短い書込み時間では、光励起され移動する電子の分離が不十分なため、分解能の悪い微分画像しか得ら

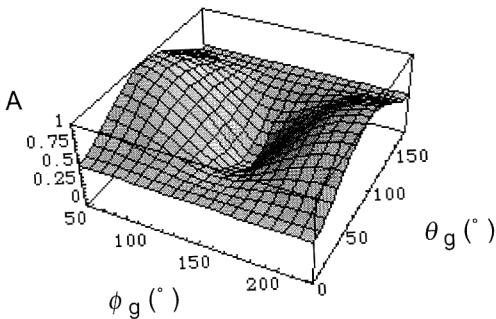


Fig. 4. Calculated results of the magnitude A of polarization modulation efficiency.

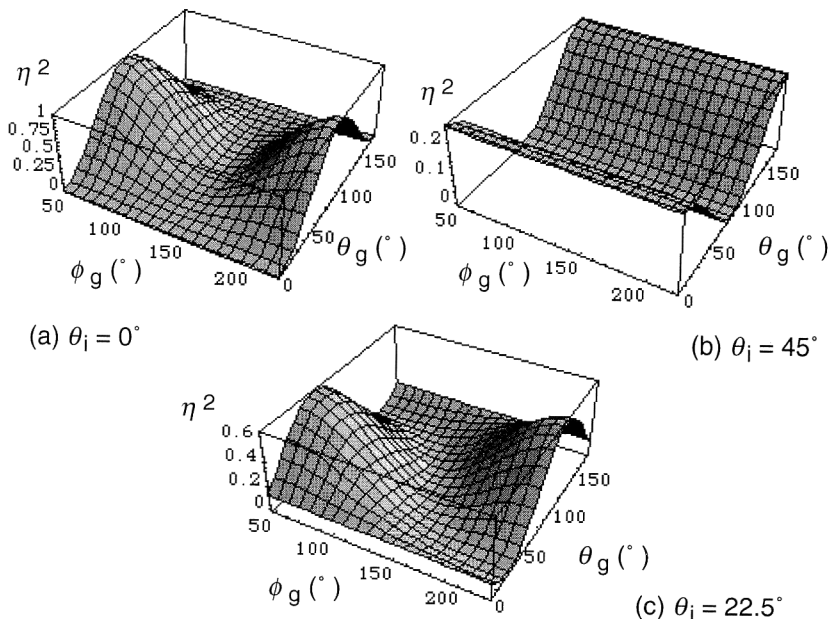


Fig. 5. Calculated η^2 as a function of (ϕ_g, θ_g) when (a) $\theta_i = 0^\circ$, (b) 45° , and (c) 22.5° .

れないが、書込み時間の増加に従って分離が十分となり、良好な画像が得られている。

これに対して書込み側を陰極として設定したときの読出し光強度分布を Fig. 7 に示している。この場合も、画像書込み時間を変化させた場合の読出し画像の変化を示しており、読出し偏光の方向は、 67.5° である。陽極側書込みに比べて空間微分画像のコントラストが低下している。また、短時間書込み時の画像の再生状態が、陽極側書込みの場合に比べて劣っている。これは、光励起によって移動する電子の移動距離の違いに起因していると考えられる。書込み画像を結晶に照射したとき、光照射側の結晶表面で最も多くの電子が励起され、ドリフトにより陽極側に移動する。陽極側書込みの場合は励起された電子はすぐに陽極に達する。しかし陰極側書込みの場合には、励起された電子は陽極まで結晶板の厚さ分だけ、バイアス電界に沿って移動することになる。この移動距離の相違が、短時間書込みの際の再生画像の差になっていると考えられる。また、陰極側書込みの場合には、陽極側への移動距離が長いので、熱拡散などの影響が発生する可能性がある。つまり、励起された電子は、バイアス電界に沿った移動だけでなくランダムな方位への拡散の影響での移動が加わる。この移動方向のばらつきによってもバイアス電界が変調され、書込み画像強度分布により生じた電界変調にノイズ成分として重ね合わされる。電子のランダムな移動は書込み時間が少ない場合には相対的に大きく、書込み時間の増加に従ってドリフトによる移動電荷の増加につれて、相対的に小さくなると考えられる。これらの原因により、陰極側書込みでは、空間微分特性が陽極側書込みに比べて低下していると考えられる。以上の実験結果および考察の結果から、良好な空間微分結果を得るためには、陽極側書込みのほうが良いことがわかる。また、ここで用いた青色 CRT を光源として実験を行う場合には、画像の書込み時間は、約 30 秒で十分であると考えられる。

次に読出し画像の入射偏光方向依存性について検討した。書き込んだ光強度分布を Fig. 8(a) に示している。一辺が約 1.4 mm の正方形群を結晶に陽極の側から約 30 秒間照射した後読出しを行った。各々の正方形強度分布では、各辺に垂直な方向に空間電界が発生すると考えられる。つまり、それぞれ x_1 , x_3 軸方向の空間電界で、 $\phi_0 = 45^\circ$, $\theta_0 = 90^\circ$ および $\theta_0 = 0^\circ$ の計算結果に対応した実験が行える。

読出し偏光方向を変えて得られた読出し画像を Fig. 8(b)~(d) に示す。Fig. 8(b) は、 $\theta = 15^\circ$ の場合に

おける読出し画像である。正方形の側面が明るく表示され、 x_1 軸方向に沿った空間電界による位相変調のみを選択的に読み出し、 x_3 軸方向の電界の影響は、無視されている。Fig. 8(c) は $\theta = 60^\circ$ で、 x_3 軸方向の電界の影響のみ読み出し、 x_1 軸方向に沿った電界の影響は無視されている。Fig. 8(d) では (b), (c) の中間状態で、 $\theta = 40^\circ$ の場合であり、 x_1 および x_3 両軸方向の電界成分を同時に読み出している。ここでは BSO 単結晶の示す自然旋光性を考慮していないため、理論的な偏光方向と実験的な方向が 15° 異なっている。しかし、結晶板厚 1 mm における自然旋光角は、入射光波長約 650 nm の光線について約 15° であり、その大きさだけ回転していると考えられ、妥当な結果であると考えられる。

以上より、読出し光偏光方向を変えることにより x_3 軸方向および x_1 軸方向そして両軸方向の空間微分を選択的に実行できることが実験的に確認された。Fig. 8(b), (c) を比べると、 $\theta = 15^\circ$ の場合のほうが明るい画像が得られている。これは、Fig. 5(a), (b) に示す計算結果の、偏光変調効率の絶対値の大小に対応している。 x_1 軸方向の電界は、 x_3 軸方向の電界よりも、高い効率で偏光を変調する。これらの結果より本論文で考察し

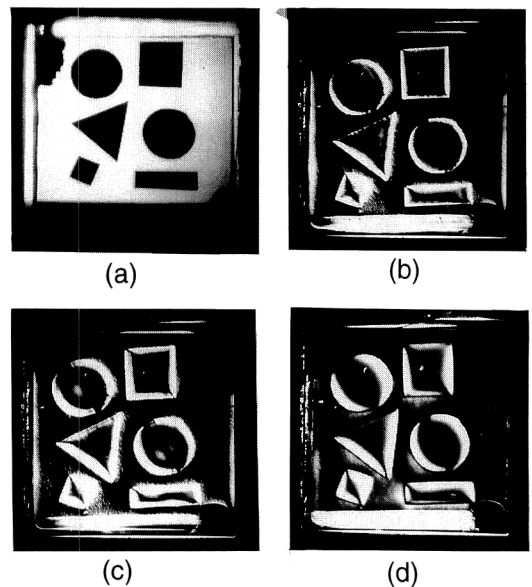


Fig. 6. (a) Intensity distribution on PRIZ illuminating with write-in image, readout images in writing time (b) $T = 30$ s, (c) $T = 15$ s, and (d) $T = 1/2$ s when write-in and read-out operation were carried out from plus terminal. Polarization direction of readout beam θ was 67.5° and bias electric field for the device was 4 kVcm^{-1} .

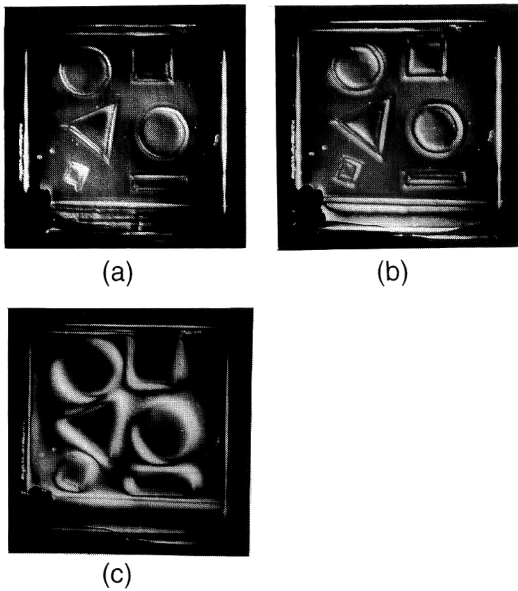


Fig. 7. Readout images in writing time (b) $T=30$ s, (c) $T=15$ s, and (d) $T=1/2$ s when write-in and readout operation were carried out from minus terminal. Polarization direction of readout beam θ_1 was 67.5° and bias electric field for the device was 4 kVcm^{-1} .

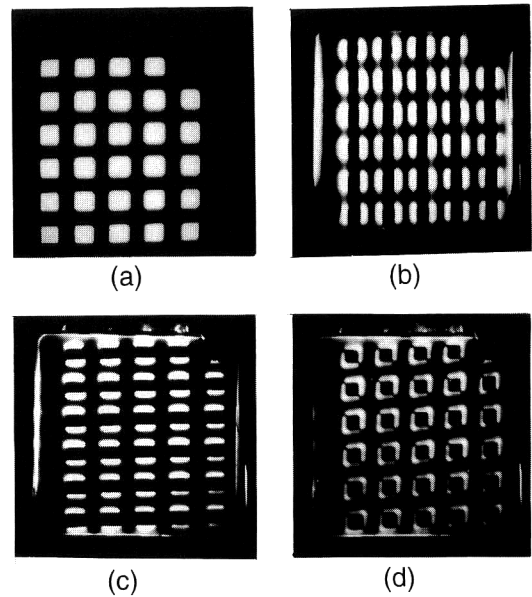


Fig. 8. (a) Write-in image and Readout images, when the direction of readout polarization is (b) $\theta_1=45^\circ$, (c) $\theta_1=45^\circ$, and (d) $\theta_1=45^\circ$. Write-in time is 30 s and bias electric field for the device was 4 kVcm^{-1} .

た、偏光変調効率の入射偏光方向依存性は、PRIZ 素子における空間微分特性の読出し光入射偏光方向依存性を記述できると結論できる。

4. む す び

($\bar{1}10$) 面カットの BSO 単結晶を用いて PRIZ 型空間光変調素子を構成した。構成した PRIZ 素子において、読出し光偏光方向を変えることにより、特定方向成分をもつ空間電界を選択的に読み出せることを、変調効率を導入して理論的に示し、実験的に確かめることができた。画像書き込み光源の光量を増すことで、書き込み時間は短縮することができる。したがって、BSO 単結晶板の厚さを最適化することで空間分解能を改善すれば、特定方向に限定した微分処理がほぼ実時間で実行可能で、実用的な光情報処理システム中での利用が大いに期待できる。

本研究の一部は、科学技術振興調整費による「ナノスペースラボによる新材料創製に関する研究」の一環として行われたものである。この研究を遂行するにあたり、BSO 単結晶を提供していただいた日本ガイシ(株)の関係者各位に感謝する。

文 献

- 1) U. Efron: "Spatial light modulators and applications for optical information processing," Proc. SPIE, **960** (1988) 180-191.
- 2) F. Holler and H. J. Tiziani: "A spatial light modulator using BSO crystal," Opt. Commun., **56** (1986) 20-24.
- 3) S. L. Hou and D. S. Oliver: "Pockels readout optical memory using $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$," Appl. Phys. Lett., **18** (1971) 325-328.
- 4) M. P. Petrov, V. I. Marakhonov, M. G. Shlyagin, A. V. Khomeko and M. V. Krasin'kova: "Use of PRIZ spatial modulator for information processing," Sov. Phys. Tech. Phys. (Engl. Transl.), **25** (1980) 752-753.
- 5) K. Nakagawa and T. Minemoto: "Improvement of Young's fringes visibility in speckle photography by use of BSO-PROM device," Opt. Commun., **70** (1989) 288-292.
- 6) K. Nakagawa, T. Yoshimura and T. Minemoto: "Surface-roughness measurement using Fourier transformation of doubly scattered speckle pattern," Appl. Opt., **32** (1993) 4898-4903.
- 7) M. G. Shlyagin, A. V. Khomeko, V. V. Bryksin, L. I. Korovin and M. Petrov: "Mechanisms of nonlinearity in a PRIZ space-time light modulator," Sov. Phys. Tech. Phys. (Engl. Transl.), **30** (1985) 68-72.
- 8) M. P. Petrov and A. V. Khomeko: "Physical basis of operation of the PRIZ spatial light modulator," Optik, **67** (1984) 247-256.
- 9) Y. Owechko and A. R. Tanguay, Jr.: "Theoretical resolution limitations of electrooptic spatial light modulators.

- I. Fundamental considerations," J. Opt. Soc. Am. A, **6** (1984) 635-643.
- 10) Y. Owechko and A. R. Tanguay, Jr.: "Theoretical resolution limitations of electrooptic spatial light modulators. I. Effects of crystallographic orientation," J. Opt. Soc. Am. A, **6** (1984) 644-652.
- 11) M. Zgonik, K. Nakagawa and P. Günter: "Electro-optic and dielectric properties of photorefractive BaTiO₃ and KNbO₃," J. Opt. Soc. Am. B, **12** (1995) 1416-1421.
- 12) 富田康生: "Photorefractive 効果とその非線形光学への応用", 応用物理, **59** (1990) 1154-1174.
- 13) 左貝潤一: 位相共役光学 (朝倉書店, 東京, 1990) pp. 176-178.