



## BSO 単結晶のもつ偏光変換特性の解析と その空間光変調素子への応用

中川 清・梶田 信之・登田 健・陳 靖\*・峯本 工

神戸大学工学部計測工学科 〒657 神戸市灘区六甲台町

(1991年1月9日受付, 1991年2月25日受理)

### The Transformation of Polarization in a Thick BSO Crystal Plate and Its Application to Spatial Light Modulator

Kiyoshi NAKAGAWA, Nobuyuki KAJITA, Tsuyoshi TODA,  
Jing CHEN\* and Takumi MINEMOTO

Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University,  
Rokkodai, Nada-ku, Kobe 657

(Received January 9, 1991; Accepted February 25, 1991)

The transformation properties of light polarization in a thick photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) crystal plate, which possesses both the electrooptic effect and the optical activity, have been investigated as functions of the magnitude of the electric field, the thickness of the crystal plate and the azimuth of the polarization of an incident light. The condition, under which the incident linear polarized light is most effectively transformed to circular polarized one in the BSO crystal, has been found. The recording mechanics of the spatial light modulator using the thick BSO crystal plate under the condition has been discussed. An application of the BSO crystal plate to the spatial light modulator has been shown by using a spatial coding method that makes use of the characteristics of the transformation properties and the recording mechanics.

#### 1. 序 論

光誘起複屈折効果をもつ  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  (BSO) 単結晶は、1) 感度の波長依存性が大きい、2) 応答時間が短い、3) 電気光学定数が比較的大きい、4) 環境依存性が小さい等のため光強度分布の記録材料<sup>1,2)</sup>として広く利用されており、光コンピュータの実現のための画像記録・変換素子としての利用も期待されている。

光誘起複屈折性結晶に強度分布をもつ光が照射されると光の強い部分の電子はドナーレベルから伝導帯に励起される。励起された電子は空のトラップに再結合されるまで拡散やドリフトによって光の弱い部分に移動する。

照射した光の強度分布は移動した電子により生じる結晶板内の空間電界分布として記録される。空間電界分布は結晶のもつ電気光学効果により読み出し光の偏光状態の空間的な分布に変換される。この機構を用いた強度分布記録素子に BSO 結晶を利用することは F. Höller ら<sup>3)</sup>により提案された。提案された画像記録素子は横型電気光学効果を用いた素子であり、応用例としてインコヒーレント・コヒーレント光変換を行った。また素子の感度や空間分解能についての考察を行い、BSO が優れた空間光変調素子材料であることを示した。しかし BSO の偏光変換特性の解析はまったく行っていない。

一方、BSO 単結晶は電気光学効果と同時に旋光性をもっている。横型電気光学効果を用いた記録素子として BSO 結晶を利用する場合、電気光学効果の大きさは結晶板の厚さに依存する。大きい電気光学効果を得るため

\* Present address: Centre d'optique, Photonique et Laser, Université Laval, Québec, P. Q., Canada G1K 7P4.

には厚い結晶板を用いる必要がある。このため、読出し光として結晶に入射する光の偏光状態は電気光学効果と旋光性の両方の効果を受け変化する。しかしこれらの影響による合成の効果を考慮した偏光変換特性の解析はほとんど行われていない。そのため空間光変調素子として BSO を利用する場合の最適な使用条件は明確になっていない。

本研究では外部より一定電界を印加した BSO 単結晶にある方向の偏光面をもつ直線偏光を入射し、その透過光の偏光状態を観測することにより、BSO のもつ偏光変換特性の入射偏光方向・結晶板の厚さ・電界強度等への依存性について解析する。そして空間光変調素子として BSO を利用する場合の最適使用条件を求め、応用例を示す。さらに広い空間周波数範囲に対応できる素子として利用するために、ある空間コーディング法による書き込み、読出しを行いその結果を示す。

## 2. BSO 単結晶の偏光変換特性

BSO 単結晶では光の強度分布を電界強度の空間分布として記録しているので、ここでは電界強度と偏光変換特性の関係について考察する。まず、一定電界を外部より印加した BSO 結晶板に直線偏光を入射し、その透過光の偏光状態を観測した。光学系の配置図を Fig. 1 に示す。縦軸、横軸および光軸をそれぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸とする。結晶は  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$  軸がそれぞれ  $x$ ,  $y$  軸と一致するように配置する。 $y$  軸と任意の角度  $\phi$  をなす方向を偏光面にもつ直線偏光の He-Ne レーザ光 (波長 633 nm) を  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$  軸に沿って BSO に入射する。BSO には  $\langle 110 \rangle$  軸に沿って電界を印加する。この配置は BSO を体積型 hologram 記録媒体<sup>4)</sup> として用いるときと同じである。この配置では  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 110 \rangle$  軸の二等分線の方向とその垂線方向が結晶板の屈折率の主軸方向でありそれぞれ slow 軸と fast 軸になる。結晶を透過

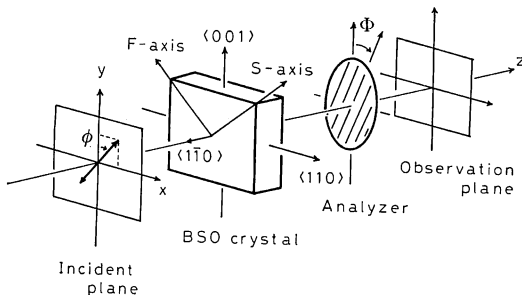


Fig. 1 Optical configuration for analyzing polarization state of transmission light.

した光は  $y$  軸に対して角度  $\phi$  の方位角をとる検光子を透過した後観測面に達する。

観測面における透過光電場の規格化された振幅  $T$  は複屈折性と旋光性を同時にもつ電気光学結晶の偏光変換行列<sup>5)</sup> により求めることができる。系全体を透過した光の電場は入射偏光状態を示す行列に、座標軸変換のための回転行列、電気光学結晶による偏光変換行列、座標変換の回転行列、検光子の方位角を示す行列を、光の進行順に左側から次々と掛け合わせることににより表わせる<sup>6)</sup>。つまり、

$$T = (\sin \phi \cos \phi) \begin{pmatrix} \cos(\pi/4) & -\sin(\pi/4) \\ \sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\Delta D) + i \sin(\Delta D) \sin \theta & -\sin(\Delta D) \cos \theta \\ \sin(\Delta D) \cos \theta & \cos(\Delta D) - i \sin(\Delta D) \sin \theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\pi/4) & \sin(\pi/4) \\ -\sin(\pi/4) & \cos(\pi/4) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin \phi \\ \cos \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\Delta^2 = \delta^2 + \rho^2, \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1}(\delta/\rho), \quad (3)$$

$$2\delta = (2\pi/\lambda)n^3r_{41}E, \quad (4)$$

となる。ここで (2) は単位長さ当りの合成位相変化量、 $D$  は結晶板厚さ、 $\delta$  は電気光学効果のみによる位相変化量、 $\rho$  は旋光性のみによる位相変化量、 $\lambda$  は入射光の波長、 $n$  は結晶の自然屈折率、 $r_{41}$  は電気光学定数、 $E$  は結晶内での電界強度である。本研究で用いる電界方向では電気旋回効果は無視できるので自然旋光性のみを考慮し<sup>7)</sup>、 $\rho = 22$  (deg/mm)、 $\lambda = 633$  (nm)、 $n = 2.5$ 、 $r_{41} = 5 \times 10^{-12}$  (m/V) の値を用いて以下の解析を行った<sup>5)</sup>。

結晶表面や内部での多重反射を無視すると、検光子を透過した光の強度は検光子方位角  $\phi$  の関数として

$$I(\phi) = |T|^2 = 1 + A(\phi) \cos(2\phi - 2\phi) + B(\phi) \sin(2\phi - 2\phi) \quad (5)$$

$$A(\phi) = \cos(2\Delta D) + \sin^2(\Delta D) \sin^2 \theta (1 - \cos 4\phi) \quad (6)$$

$$B(\phi) = -\sin(2\Delta D) \cos \theta + \sin^2(\Delta D) \sin^2 \theta \sin 4\phi \quad (7)$$

となる。偏光方向  $\phi$  の直線偏光が結晶に入射したとき、透過した後の偏光状態を偏光度  $P(\phi)$  および方位角  $R_0(\phi)$  で表すとすると、 $P(\phi)$  および  $R_0(\phi)$  は (5) 式から与えられる。つまり式 (5) で表す偏光板方位角  $\phi$  の変化ともなう光強度変動の振幅と位相のずれ角が明確になるように

$$I(\phi) = 1 + P(\phi) \cos(2\phi - 2(\phi + R_0(\phi))) \quad (8)$$

と書き換えると、

$$P(\phi)^2 = A(\phi)^2 + B(\phi)^2 \quad (9)$$

$$R_0(\phi) = \arctan(B(\phi)/A(\phi))/2, \quad (10)$$

$$R(\phi) = R_0(\phi) - \rho D, \quad (11)$$

を得る. 式(11)の中の  $\rho D$  は自然旋光による方位角の変化量を示すので,  $R(\phi)$  は電界によって発生した複屈折性と自然旋光性との合成で生じた旋光角を表していることになる. 偏光度  $P(\phi)$ , 旋光角  $R(\phi)$  とも合成の位相変化  $\Delta$  を含んでおり複屈折性と旋光性の両方の影響を受けることがわかる.

結晶板厚さ  $D=3$  (mm) で一定電界を印加した BSO 単結晶に任意の方向に偏光面をもつ直線偏光を入射したときの結晶からの透過光の偏光度  $P(\phi)$  および旋光角  $R(\phi)$  が測定した. そして,  $P(\phi)$  と  $R(\phi)$  の入射光偏光方向による変化を3種類の電界強度についてまとめた結果を Fig. 2 (a), (b) に示す. 実線と破線は理論値, 黒丸印は測定値を示す. 電気光学結晶における複屈折の主軸方向は, 電界が存在しても偏光度  $P(\phi)$  が1になる方向, つまり直線偏光のまま透過する方向である. 計算上の主軸方向は  $\phi = \pm 45$  (deg) であるが結晶の旋光性のため実質的な主軸方向は電圧によりそれぞれ変化する.  $E=6.4$  (kV/cm) における実質的な主軸の方向は  $\phi = 10, -80$  (deg) の方向であり最大の電気光学効果は  $\phi = -40, 50$  (deg) の方向の直線偏光で得られる. 一方,

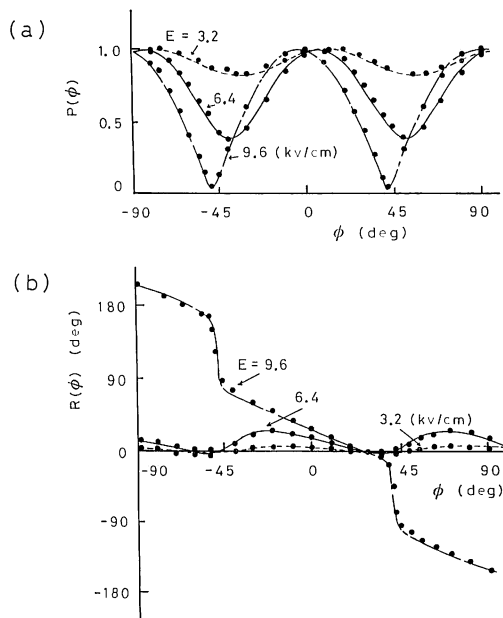


Fig. 2 Experimental results and theoretical curves for (a) degree of polarization  $P(\phi)$  and (b) optical rotation angle  $R(\phi)$  versus the polarization azimuth  $\phi$  of incident light.

旋光角  $R(\phi)$  と偏光度  $P(\phi)$  の変化は一応の対応はしているが電界存在下でも旋光角  $R(\phi)$  が変化しない方位と  $P(\phi)$  が変化しない方位とは異なっている. つまり  $E=6.4$  (kV/cm) の場合, 実質的な主軸方向  $\phi = 10, -80$  (deg) の方位は電界の存在により偏光度は変化しない方位であるから, 旋光角  $R(\phi)$  は変化している. また  $\phi = -50, 40$  (deg) 付近では  $R(\phi) = 0$  (deg) であるが, 偏光度は変化している. また最大の旋光角が得られるのは  $\phi = -25, 75$  (deg) 付近である. 以上より結晶板内での電界は偏光度と旋光角のいずれによってでも認識可能であることがわかる. また偏光度と旋光角の両方を用いれば任意の偏光方向をもつ直線偏光で電界強度を知ることができるかと結論できる.

次に結晶板厚の影響を入射偏光方位角  $\phi = 0$  (deg) の場合について考察する. 電界強度変化により生じる偏光度および旋光角を結晶板の厚さ  $D$  をパラメータとして求め, その結果を Fig. 3 (a), (b) に示す. 図では理論値, 実験値をそれぞれ示している. 電界強度により偏光度および旋光角の両方がそれぞれ変化する. 電圧変化により生じる偏光度の変化の厚さ  $D$  が大きくなるにしたがって小さくなる, つまり小さな電界強度変化で偏光度が変化する. しかしその変化の振幅も変化しており, 結晶板が厚いほど偏光度の変化が電界強度変化に対して敏感ではない. 旋光角は結晶厚によりその傾きが変化し

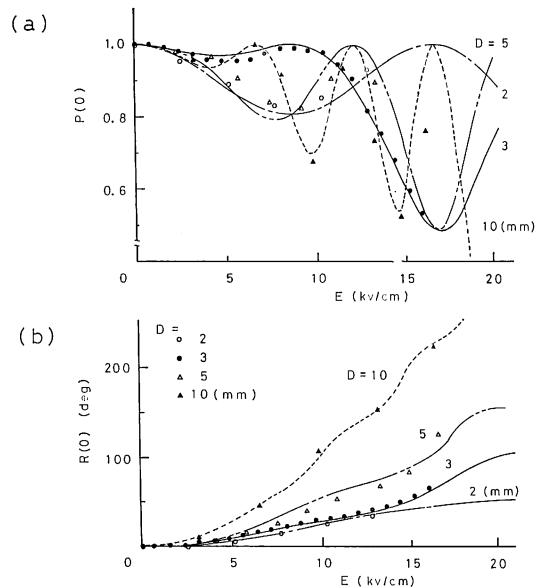


Fig. 3 The changes of (a) degree of polarization  $P(\phi)$  and (b) optical rotation angle  $R(\phi)$  versus the magnitude of electric field  $E$  at  $\phi = 0$  (deg).

ており、電界強度変化による旋光角の変化は結晶板の厚さが厚いほど大きい。この図からも偏光度と旋光角は独立に変化することがわかる。

以上 BSO 単結晶の偏光変換特性の結晶板の厚さ、電界強度、および入射偏光方向への依存性を明らかにした。旋光性をもつ BSO 結晶では偏光度と旋光角の両方を用いれば任意の方向の直線偏光で電界を認識でき、その偏光度、旋光角は結晶板の厚さにより特徴的に変化することを示した。また波長 633 (nm) の光に対しては、理論値と実験値はほぼ一致し、用いた偏光変換行列および偏光解析の方法は吸収の効果を無視しているにもかかわらず透過光の偏光状態をよく表していると結論できる。

### 3. BSO 単結晶の最適使用条件

BSO 単結晶のもつ偏光状態の変換特性が式(5)でよく表されることを示した。ここでは BSO 単結晶を空間光変調素子として用いる際の使用最適条件について理論的に考察する。一定電界を印加した BSO に直線偏光を入射したときに得られる透過光の偏光度について、入射偏光方向を変えてその電界強度で得られる偏光度の最小値を求め、図示したのが Fig. 4 である。図では結晶板の厚さ 1~5 (mm) についてそれぞれ求めた最小偏光度を示す。偏光度の最小値は円偏光を示す零であり、最大値は直線偏光の 1 である。結晶板が厚くなるにしたがって  $P(\phi)$  が最初に極小となる電界強度は小さくなる。しかし、 $P(\phi)$  の最初の極小値は大きくなる。BSO 単結晶を画像記録素子として実際に利用するときには印加電界はできる限り小さいほうが実用的である。また書き込み光強度の差は電界強度の差で読み出されるので、電界強度の変化により偏光状態が顕著に変化する状態を利用すると、高感度の素子になると考えられる。そこで最小電界強度  $E=9.3$  (kV/cm) で円偏光が得られる  $D=3$  (mm) を画像記録素子として BSO を用いる際の使用最適厚さとする。結晶板厚さ 3 (mm) で円偏光となる点 A は入射

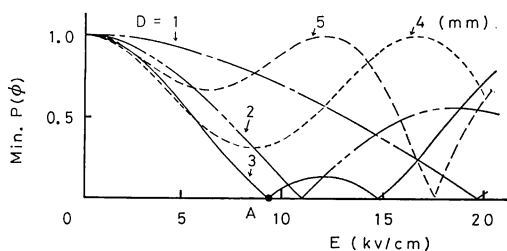


Fig. 4 Minimum degree of polarization versus the magnitude of electric field  $E$ .

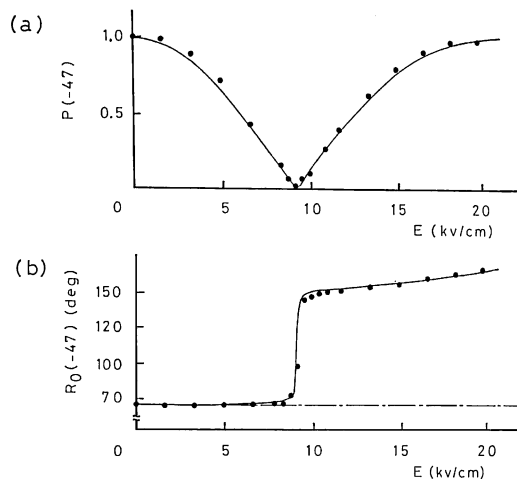


Fig. 5 The changes of (a) degree of polarization  $P(\phi)$  and (b) optical rotation angle  $R(\phi)$  versus the magnitude of electric field  $E$  at  $\phi = -47$  (deg).

偏光の方向  $\phi = -47$  (deg) で実現される。これらの条件 ( $D=3$  (mm),  $\phi = -47$  (deg)) で BSO を利用したときの偏光度  $P(-47)$  および方位角  $R_0(-47)$  の電界強度による変化を Fig. 5 (a), (b) に示す。電界強度  $E=9.3$  (kV/cm) で確かに円偏光となる。そして、 $E=9.3$  (kV/cm) を境にして偏光度、旋光角ともに急激に変化する。最適結晶板厚さ  $D=3$  (mm) は、吸収と結像の関係から F. Höller らが求めた結果 2.7 (mm) とほぼ一致している<sup>3)</sup>。

上で得た使用最適条件下で画像記録素子として BSO 単結晶板を利用する場合について考える。まず BSO 単結晶板に外部より初期印加電界  $E=9.3$  (kV/cm) を与えたとき、画像を記録前には  $\phi = -47$  (deg) の直線偏光は結晶板を透過すると結晶板全面で一様な円偏光となる。次に初期印加電界  $E=9.3$  (kV/cm) を与えた状態の結晶板に強度分布をもつ書き込み光を照射した場合を考える。書き込み光が照射された BSO 結晶中では光励起とキャリアの拡散・ドリフトにより書き込み光が明るい部分の電界は低くなり、暗い部分の電界は高くなる。つまり光が照射された部分では光励起により電子とホール対が発生し印加電界のために電子が移動して印加電界を減少させるように電子ホールが分離して分布する。光が照射されなかった部分では、照射部で生じた電荷の移動によって電界が高くなる。この強度分布を書き込んだ結晶に  $\phi = -47$  (deg) をもつ直線偏光の読出し光を照射すると高電界部を透過した読出し光の偏光状態は Fig. 5 に示すように偏光度  $P(-47)=1$  方位角  $R_0(-47)=156$  (deg)

の状態に近づく。逆に、低電界部を透過した光は偏光度  $P(-47)=1$  方位角  $R_0(-47)=66$  (deg) の状態に近づく。照射部の電界強度がほとんど零になるまで書き込みを十分に行うとすると、高電界部と低電界部を透過した光はお互い直行した直線偏光となる。このような場合には、書き込み光強度の低い部分に相当する高電界部からの透過光と書き込み光強度の高い部分に相当する低電界部からの透過光をそれぞれ別々に検光子を通して観測することができる。検光子の方位角を変えることにより陰画像、陽画像の選択ができ、高いコントラストで書き込み画像を読み出せると考えられる。

4. 空間光変調素子への応用

実際に厚さ  $D=3$  (mm) の BSO 結晶板を用い  $\langle 110 \rangle$  軸方向に  $9.3$  (kV/cm) の電界を印加した状態で、解像力チャートを記録・読出した結果の画像を Fig. 6(a), (b) に示す。書き込みには  $Ar^+$  レーザ光 (波長  $488$  nm) を、読出しには赤色 LED (中心波長  $650$  (nm)) を用いた。これは BSO 素子が青色の光には感度が高く、赤色の光には感度が低いためである。検光子の方位を変えることにより陰画像と陽画像を読み出している。これは、検光子により高電界側か低電界側かのどちらを明とするかを選択したことに対応する。高電界部よりの透過光のみを明として示したのが (a) 図であり、(b) 図は低電界部のみを透過した光を明としている。書き込み露光量が不足していたため空間電界強度差が余り発生せず、 $\phi = 130$  (deg) と  $\phi = 100$  (deg) で鮮明な画像が得られた。書き込みにより生じる空間電界の強度は書き込み露光量や書き込み画像の空間周波数と関係があり、実際に書き込みを行った際の読出し偏光方位角については今後解析が必要である。読出し結果より、電界方向の空間周波数成分についてはかなり高い周波数まで変調されて読み出されていることがわかる。結晶板の有効画面の大きさが  $10 \times 10$  (mm) であったので図より電界の方向には約  $10$  (lp/mm)

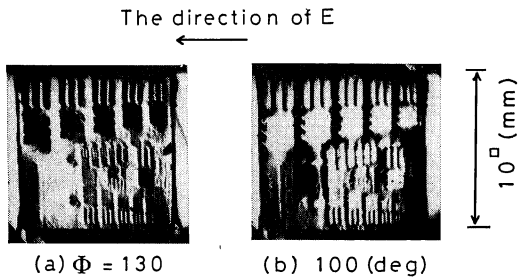


Fig. 6 Readout results from SLM of thick BSO plate at (a) azimuth of analyzer  $\phi = 130$  and (b)  $\phi = 100$  (deg).

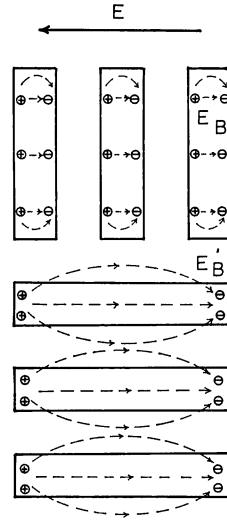


Fig. 7 Illustrative figure of electric field  $E_B$ ,  $E_{B'}$  generated by photoinduced charges.

までは十分に記録再生が行われていることがわかる。しかし印加電界の方向と垂直な方向の空間周波数成分に関する変調はあまり正確に読み出せていない。これは横型電気光学効果を用いた画像記録では避けることのできない性質と考えられる。つまり Fig. 7 に示すように光が照射された部分では光励起により電子とホール対が発生する。印加電界のために生じた電子が移動し書き込まれた画像に従って電子が空間的に固定される。空間的に分布している電子とホールにより印加電界を減少させる方向に電界  $E_B, E_{B'}$  が生じる、強度の変動が電界に沿った方向に関して高い空間周波数か低い空間周波数かによって、生じる電界強度や電界分布は異なる。強度変動が高い空間周波数となる部分で発生する電界  $E_B$  は一様になるが低い空間周波数部分で発生する電界  $E_{B'}$  は図に例示するように一様とはならず不均一な電界分布となる。このことにより、低い空間周波数領域では、印加電界と平行な方向の強度差の読出し空間分解能がとくに低下すると考えられる。

低い空間周波数の分解能を改善するために、Fig. 8 (a) に示す空間コーディング法により BSO に画像を書き込み、特性の改善を試みた。横型電気光学効果を用いた素子では電界と垂直な方向の変動は高い空間周波数まで記録再生できるので、この方法のコーディングによれば空間周波数を高く設定できる。実際に記録再生を行った結果を Fig. 8 (b), (c) に示す。円形、三角形、四角形、八角形を提案したコーディング法により書き込み、読出しを行った結果である。書き込みは青色光を発する CRT (画面大きさ  $32 \times 25$  (mm), 発光中心波長  $450$  (nm))

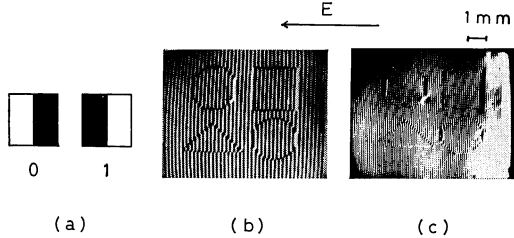


Fig. 8 Coding formula and readout results of spatially coded images. (a) coding formula of binary image, readout images by use of coding carriers with frequency (b) 5 (lp/mm) and (c) 9 (lp/mm). Arrow shows direction of applied electric field  $E$ .

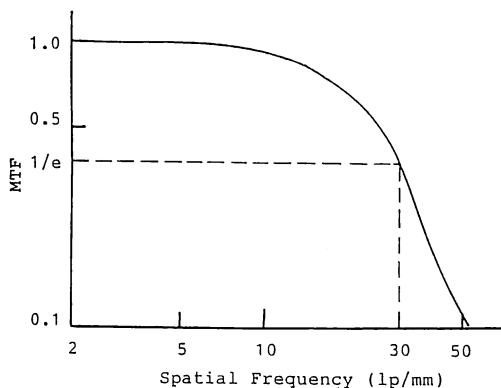


Fig. 9 The MTF curve of SLM with BSO plate of 3 (mm) thickness.

を用い、読み出し光は赤色 LED を用いた。空間周波数が (b)5, (c)9 (lp/mm) に相当するコーディングによる再生像を示した。この方法により形状を正確に記録再生している。画面強度むらは、読み出し光の強度むらと結晶板表面の傷によるものである。われわれが実際に用いた BSO 素子について空間周波数特性を求めた結果を Fig. 9 に示す。これは、BSO 素子に電界と垂直な方向の干渉縞を書き込み、読み出した像のコントラストを求めることにより得た MTF 特性である。特性の低下が最大値の  $1/e$  まで利用可能とすると空間周波数約 30 (lp/mm) までならば十分に空間光変調素子として利用することが可能であると結論できる。A. Marrakchi らが提案した、厚みのある素子における幾何光学的な考察に基づく使用限界<sup>9)</sup>は、結晶の厚さ 3 (mm) で、書き込み光学系の  $F$  値を 8 とした時 53.3 (lp/mm) となる。使用限界をレーリの解像限界<sup>9)</sup>として設定すると、MTF の値が約 0.1 まで使用可能と考えられ、Fig. 9 より空間周波数 50 (lp/mm) まで使用できることになる。これは A. Marrakchi らの提案とよく一致している。

この形式の素子は結晶板が厚いので機械的強度が強く、有効画面の大きな素子を容易に製作・使用できる。このため多方面への応用が期待できる。また、光コンピューティング等における画像の記録・変換・再生素子として BSO 単結晶を、提案したコーディング法により利用すれば広い空間周波数領域にわたって効率的な利用が期待できる。

## 5. 結 論

BSO 単結晶の偏光状態変換特性についての解析を行った。BSO 単結晶はその電気光学効果と旋光性により電界強度、結晶板厚さ、入射偏光方向変化に対して結晶からの透過光の偏光度と方位角を独立に制御できることを明らかにした。そしてこの性質を用いて空間光変調素子として BSO を用いる際の最適使用条件を求め、その条件下で応用例を示した。また空間周波数約 30 (lp/cm) までならば十分に空間光変調素子として利用することが可能であることが明らかとなった。

本論文では最適使用条件を偏光変換特性のみに基づいて議論した。しかし実際は結晶板厚さのために書き込み結像系における結像位置・焦点深度等の問題がある。これらの考察は BSO 素子自体の特性の解析同様重要な研究課題であり今後解析が必要である。

## 文 献

- 1) K. Nakagawa, T. Takatsuji and T. Minemoto: "Measurement of the displacement distribution by speckle photography using a BSO crystal," *Opt. Commun.*, **76** (1990) 206-212.
- 2) G. C. Valley and M. B. Klein: "Optimal properties of photorefractive materials for optical data processing," *Opt. Eng.*, **22** (1983) 704-711.
- 3) F. Höller and H. J. Tiziani: "A spatial light modulator using BSO crystals," *Opt. Commun.*, **58** (1986) 20-24.
- 4) M. Miteva and L. Nikolova: "Polarization characteristics of volume holograms in  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ," *Opt. Commun.*, **42** (1982) 307-309.
- 5) F. Vachss and L. Hesselink: "Measurement of the electrogyratory and electro-optic effects in BSO and BGO," *Opt. Commun.*, **62** (1987) 159-165.
- 6) A. Yariv and P. Yeh: *Optical Wave in Crystal* (Wiley, New York, 1984) Chap. 5, pp. 121-154.
- 7) K. Nakagawa, N. Kajita, J. Chen and T. Minemoto: "Measurement of the electrogyratory coefficient in photorefractive  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ," *J. Appl. Phys.*, **69** (1991) 954-958.
- 8) A. Marrakchi, A. R. Tanguay, Jr., J. Yu and D. Psaltis: "Physical characterization of the photorefractive incoherent-to-coherent optical converter," *Opt. Eng.*, **24** (1985) 124-131.
- 9) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 6th ed. (Pergamon Press, Oxford, 1980) p. 333.