



BSO 空間光変調素子 (PROM) への書込み光入射方向による素子特性の非対称性

峯本 工・陳 靖

神戸大学工学部計測工学教室 〒657 神戸市灘区六甲台町

(1986年2月3日受理)

Investigation of Asymmetric Writing Characteristics of PROM Device

Takumi MINEMOTO and Jing CHEN

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

Asymmetric characteristics arising from the fact that a Pockels Readout Optical Modulator (PROM device) has a thick active electrooptic layer are investigated. It is shown by computer simulations that, when an image is read into the negative electrode side of PROM device, (1) in PROM devices with asymmetric structure the greater sensitivity and resolution are obtained, and (2) in PROM devices of symmetric structure the greater sensitivity is obtained but the resolution is independent of the negative and the positive electrode sides. The characteristics are experimentally verified in the device of symmetric structure.

1. はじめに

光伝導性電気光学結晶 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (以下, BSO と略す) の単結晶板を用いて構成した空間光変調器の一種である PROM 素子は, コヒーレント光による画像処理系における入力画像変換素子, 空間周波数フィルタおよび画像記憶素子などに応用されたり¹⁻⁷⁾, 光並列演算における論理ゲードに応用されている^{8,9)}. この素子は Itek の研究者たちによって開発され¹⁰⁻¹²⁾, その特性も一部の問題を除いてはほぼ解明されている¹³⁻¹⁵⁾. 素子の最も重要な特性は, 素子への画像書込み露光量 E に対する読出し光の素子透過率 T の変化を表わす T - E 特性と, 空間周波数に対する読出し像のコントラストの変化を表わす MTF 特性である.

素子の T - E 特性, 書込み光の波長による素子感度の変化および BSO 結晶板の厚さに対する素子感度の変化は Sprague¹³⁾ と Minemoto ら¹⁴⁾ の解析法によってほぼ説明できる. 書込み露光量の少ない領域では Sprague の解析¹³⁾ で十分説明され, 露光量が比較的多い領域では Minemoto らの解析法¹⁴⁾ を使用する必要がある. しかし, 露光量が非常に多い領域, たとえば書き込んだ画像

の陰画像が読出し像として得られる素子動作モードにおいて素子透過率 T が何も書き込まれていないときの値の約 1/5 以下に減少するような領域における T - E 特性を説明できる解析はまだない.

素子の MTF 特性は, 空間周波数の低い領域では, Owechko ら¹⁵⁾ の解析によって比較的よく説明できる. しかし, 空間周波数の高い領域において MTF 特性曲線が周波数の 2 乗に反比例して変化するという測定結果^{5,16)} を T - E 特性と関連させて説明できる解析はまだなく, 今後の課題として残っている.

本研究では, 書込み光の入射方向と書込みのために素子に外部から印加する電界の方向との相互の関係が T - E 特性および MTF 特性にいかに関与するかを調べた. 素子感度に関しては, Nisenson³⁾ が簡単に “BSO 単結晶ではキャリアが電子であり, 書込み光が BSO 結晶板内で強く吸収されるから, 陰極側書込み (書込み光の入射方向と外部印加電界の方向とが互いに逆向き) の場合が高感度である” と書いている. 彼は素子の解像力については何も述べていない. また, 高感度になっていることを実証していない. 本論文では, 上記の影響を対称形 PROM 素子と非対称形 PROM 素子について解析を行

ない, さらに対称形 PROM 素子を用いて, その検証を試みた. 解析によって, 対称形素子では T - E 特性が書き込み光の入射方向と外部印加電界の方向との相互の関係によって異なる非対称な振舞いをし, 非対称形素子では T - E 特性および MTF 特性ともに非対称な振舞いをすることがわかった. 対称形素子におけるこのような性質は実験によって実証された.

以下, 2節では解析法を簡単に説明し, 3節に解析結果を示す. そして, 4節では対称形 PROM 素子を用いて測定した結果を示す.

2. 特性解析法

この論文では Fig. 1 に示すように, PROM 素子への書き込み光の入射方向 (+ z 方向) と外部印加電界の向きが反平行の場合 (case (a): 陰極側書き込み) と, 両者が平行の場合 (case (b): 陽極側書き込み) について, 素子の BSO 単結晶板内における電荷の分布および結晶板の表面間の電位差を Minemoto ら¹⁴⁾の方法によって求め, 素子の T - E 特性を計算する. また, 上で得た結晶板内の電荷分布を用いて, Owechko ら¹⁵⁾の方法によって, 素子の MTF 特性を計算する. この節では, 両特性の計算法を簡単に説明する.

2.1 T - E 特性の計算法

素子の T - E 特性は, 強度が一様な光を素子に照射して書き込みを行なったときの読出し光の強度変化を求めることによって得られる. 理論的取扱いは, BSO 単結晶は電子のみをキャリアとする光伝導物質であり, キャリヤは z 方向にのみ動くとして仮定する. そして, BSO 単結晶板内での書き込み光の吸収による減衰, キャリヤのトラップによる捕獲およびキャリヤとホールとの再結合を考慮に入れて, 結晶板内の電荷分布を計算する. この電荷分

布を求めるに際し, ある一定量の露光は微小な露光の多数回の積重ねによって達成されると考える.

まず, 素子に印加する外部電界の方向が書き込み光の入射方向と反平行になっている陰極側書き込みの場合 (case (a)) の BSO 結晶板内の各位置 z におけるホールの数やトラップされている電子の数の変化について考える. 微小な露光量 ΔE の書き込みを行なった場合, 結晶板内の z における単位体積当りのホールの数 $N^+(z)$ の増加数は

$$\begin{aligned} \Delta N^+(z) = & \alpha \beta \frac{\Delta E}{h\nu} \exp(-\alpha z) - \alpha \beta \frac{\Delta E}{h\nu} S N^+(z) \\ & \times \int_0^z \exp(-\alpha z') \exp\left(-\int_{z'}^z \frac{1}{\tau \mu \epsilon(z'')} \right. \\ & \left. + S N^+(z'') \right) dz' \end{aligned} \quad (1a)$$

トラップされている電子の数 $N^-(z)$ の増加数は

$$\begin{aligned} \Delta N^-(z) = & \alpha \beta \frac{\Delta E}{h\nu \tau \mu \epsilon(z)} \\ & \times \int_0^z \exp(-\alpha z') \exp\left(-\int_{z'}^z \frac{1}{\tau \mu \epsilon(z'')} \right. \\ & \left. + S N^-(z'') \right) dz' \end{aligned} \quad (1b)$$

で与えられる*1. ここに, $\alpha, \beta, \tau, \mu, S$ は BSO 単結晶の性質を表わす定数であり, α は書き込み光 (周波数: ν , 波長: λ) の吸収係数, β は量子効率, τ はキャリヤの平均寿命, μ はキャリヤの移動度, S はキャリヤとホールとの再結合衝突断面積である. また, h は Plank の定数, $\epsilon(z)$ は z の位置での電界の大きさである. 式中の指数関数 $\exp(-\alpha z)$ が結晶板内での書き込み光の減衰を表わしている. もう一つの指数関数はキャリヤが移動中にトラップに捕獲されたり, ホールと再結合することによる効

*1 解析式を簡単にするために, 素子の絶縁層中での光の減衰は無視する.

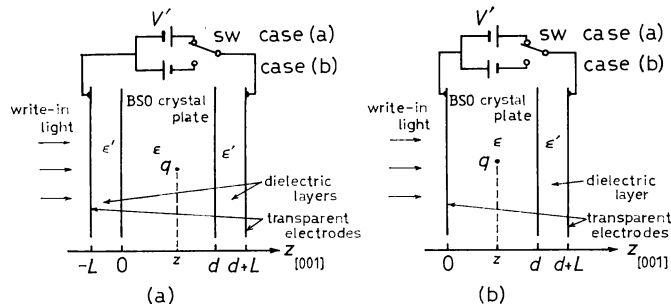


Fig. 1 PROM device models of (a) symmetric structure and (b) asymmetric structure; d , thickness of BSO crystal plate; L , thickness of dielectric layer; ϵ and ϵ' , dielectric constants; q , point charge; V' , applied voltage.

果を表わしている。

素子へ印加する外部電界の方向が書込み光の入射方向と平行になっている陽極側書込みの場合 (case (b)) には, キャリヤの移動する方向が上の場合とは反対になるから, $\Delta N^+(z)$ と $\Delta N^-(z)$ は

$$\begin{aligned} \Delta N^+(z) = & \alpha\beta \frac{\Delta E}{h\nu} \exp(-\alpha z) - \alpha\beta \frac{\Delta E}{h\nu} S N^+(z) \\ & \times \int_z^d \exp(-\alpha z') \exp\left(-\int_z^{z'} \left\{ \frac{1}{\tau\mu\epsilon(z'')} \right. \right. \\ & \left. \left. + S N^+(z'') \right\} dz''\right) dz' \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \Delta N^-(z) = & \alpha\beta \frac{\Delta E}{h\nu\tau\mu\epsilon(z)} \\ & \times \int_z^d \exp(-\alpha z') \exp\left(-\int_z^{z'} \left\{ \frac{1}{\tau\mu\epsilon(z'')} \right. \right. \\ & \left. \left. + S N^+(z'') \right\} dz''\right) dz' \end{aligned} \quad (2b)$$

で表わされる。

露光量が E のときの BSO 結晶板内の正味の電荷密度分布 $\rho(z)$ は $N^+(z)$ と $N^-(z)$ を用いて

$$\rho(z) = e(N^+(z) - N^-(z)) \quad (3)$$

で与えられる。ここに, e は素電荷である。ホールは発生した位置に留まり, 電子のみ移動するから結晶板表面の電荷密度 σ は,

$$\text{case (a)} : \begin{cases} \sigma = 0 & (z=0) \\ \sigma = -\int_0^d \rho(z) dz & (z=d) \end{cases} \quad (4a)$$

または

$$\text{case (b)} : \begin{cases} \sigma = -\int_0^d \rho(z) dz & (z=0) \\ \sigma = 0 & (z=d) \end{cases} \quad (4b)$$

となる。

電荷分布 $\rho(z)$ と σ を用いて, 結晶板表面間の電位差 V と結晶板内部の電界の大きさ $\epsilon(z)$ は

$$\begin{aligned} V = & \frac{mLd}{m\epsilon L + \epsilon' d} \sigma + \frac{mL}{m\epsilon L + \epsilon' d} \int_0^d z \rho(z) dz \\ & + \frac{\epsilon' d V'}{m\epsilon L + \epsilon' d} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\epsilon(z) = \frac{\epsilon'(V' - V)}{m\epsilon L} - \frac{1}{\epsilon} \int_0^z \rho(z') dz' \quad (6)$$

で与えられる。ただし, V' は素子外部から印加されている電圧の大きさであり, 係数 m は対称素子では 2 に等しく, 非対称素子では 1 に等しい。露光量 E に対する V の変化は式 (1), (2) と (5), (6) から成る連立方程式を逐次近似法によって解いて求める^{13,14)}。

素子が結晶軸 $[0\ 0\ 1]$ に垂直な面で切り出された BSO

結晶板で構成され, 読出し光が結晶軸 $[1\ 0\ 0]$ または $[0\ 1\ 0]$ に平行な偏光面をもち, 直交検光子を通して素子からの出力光を観測する場合, 読出し光に対する素子の透過率 T は

$$T = T_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{V}{V_h}\right) \quad (7)$$

で与えられる。ただし, T_0 は T の最大値であり, V_h は BSO 単結晶の半波長電圧である。

2.2 MTF 特性の計算法

素子の MTF 特性は理想的な書込み光学系で書き込まれた点像によって BSO 結晶板内に z 軸に沿ってできる線状電荷分布を想定し, この電荷分布による結晶板表面間の電位差 V の空間周波数成分を計算することによって求める。線状電荷分布は, キャリヤが z 軸の方向にのみ動くことと仮定するならば, 上で求めた $\rho(z)$ と σ で表わされる。線状電荷分布を点電荷の集合と考え, BSO 結晶板内部に 1 個の点電荷が存在するときの電位差とその空間周波数成分を求め, 点電荷による空間周波数成分の重量として線電荷分布による V の空間周波数成分を計算する。

BSO 結晶板内部の 1 点 z に存在する点電荷 q による電位差 V の空間周波数 ω の成分 $V(\omega, z)$ は, 対称素子では

$$V(\omega, z) = -\frac{q}{\omega \sinh(\omega d / \epsilon) \epsilon' \coth(\omega L) + \epsilon \coth(\omega d / 2)} \sinh(\omega z - \omega d / 2) \quad (8a)$$

非対称素子では

$$V(\omega, z) = -\frac{q}{\omega \sinh(\omega d) \epsilon' \coth(\omega L) + \epsilon \coth(\omega d)} \sinh(\omega z) \quad (8b)$$

で与えられる。したがって, (3) 式の $\rho(z)$ と (4) 式の σ で与えられる線状電荷分布による電位差 V の空間周波数 ω の成分 $V(\omega)$ は, 対称素子では

$$\begin{aligned} V(\omega) = & -\frac{1}{\omega \epsilon' \coth(\omega L) + \epsilon \coth(\omega d / 2)} \\ & \times \left\{ \int_0^d \frac{\rho(z) \sinh\left(\omega z - \frac{\omega d}{2}\right) dz}{\sinh(\omega d / 2)} + v \right\} \end{aligned} \quad (9a)$$

$$v = \begin{cases} \sigma & \text{case (a)} \\ -\sigma & \text{case (b)} \end{cases} \quad (9b)$$

で与えられ, 非対称素子では

$$\begin{aligned} V(\omega) = & -\frac{1}{\omega \epsilon' \coth(\omega L) + \epsilon \coth(\omega d)} \\ & \times \left\{ \int_0^d \rho(z) \sinh(\omega z) dz + v \right\} \end{aligned} \quad (10a)$$

$$v = \begin{cases} \sigma & \text{case (a)} \\ 0 & \text{case (b)} \end{cases} \quad (10b)$$

で与えられる。電位差 V の $\omega=0$ に対する値は外部印加電圧 V' による成分と $\lim_{\omega \rightarrow 0} V(\omega)$ とから成り

$$V(\omega=0) = \frac{\varepsilon' d V'}{m \varepsilon L + \varepsilon' d} - \lim_{\omega \rightarrow 0} V(\omega) \quad (11)$$

となる。以上の式を利用して、素子の MTF 特性は

$$\text{MTF}(\omega) = \frac{\sin^2\{(\pi/2)(V_{\max}/V_h)\} - \sin^2\{(\pi/2)(V_{\min}/V_h)\}}{\sin^2\{(\pi/2)(V_{\max}/V_h)\} + \sin^2\{(\pi/2)(V_{\min}/V_h)\}} \quad (12)$$

と計算される。ただし、ここに

$$V_{\max} = V(\omega=0) + |V(\omega)| \quad (13)$$

$$V_{\min} = V(\omega=0) - |V(\omega)| \quad (14)$$

である。

3. 計算結果

厚さ $300 \mu\text{m}$ の BSO 単結晶板と厚さ $5 \mu\text{m}$ のパリレン膜絶縁層で構成されている対称形素子と非対称形素子について、 T - E 特性と MTF 特性を前節で説明した方法によって計算した。計算に際して、書き込み光の波長は $\lambda=435 \text{ nm}$ とし、読出し光の波長は 633 nm (この波長に対する $V_h=3.9 \text{ kV}$) とした。BSO 単結晶とパリレン膜の定数には次の値を用いた¹⁴⁾。

$$d=300 \mu\text{m}, L=5 \mu\text{m}, \varepsilon=56 \varepsilon_0, \varepsilon'=3 \varepsilon_0, \tau=29.3$$

$$\mu\text{s}, \mu=0.029 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}, \alpha=2.88 \text{ cm}^{-1}, \beta=0.995$$

(ε_0 は真空の誘電率)

そして、素子に書き込みを行なう前には、BSO 単結晶板の内部および表面上に電荷が分布していない ($\rho=0, \sigma=0$) という初期条件の下で計算を行なった。

対称形素子の T - E 特性を Fig. 2 に示す。この図には外部印加電圧 V' が素子の半波長電圧 V_h' の 0.22 倍と 0.5 倍に等しい場合の結果を示している。また、Fig. 3 には非対称形素子に $0.5V_h'$ に等しい外部電圧を印加した場合の T - E 特性を示す。対称形素子、非対称形素子のいずれにおいても、素子透過率がある一定の値に減少するのに要する書き込み露光量は陰極側書き込み (case (a)) の場合のほうが少なくなっている。素子透過率 T が露光量が零のときの値の $1/e$ になる露光量をもって素子の感度露光量と定義すると、陰極側書き込みの場合の感度露光量は陽極側書き込みの場合の $0.6 \sim 0.7$ 倍程度に小さくなっている。すなわち、陰極側書き込みのほうが感度が高い。

上の二つの図に示した場合において、素子透過率 T が露光量がゼロのときの値の 0.5 倍 (対称形素子) および

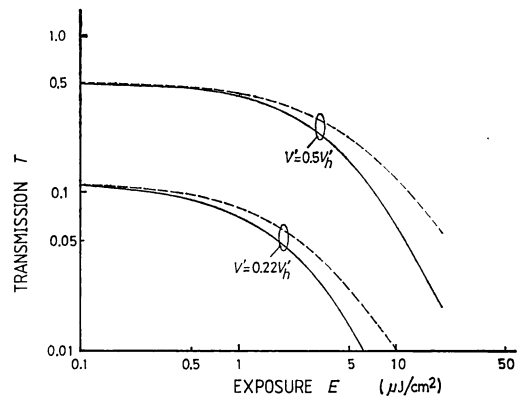


Fig. 2 T - E curves obtained by simulation for a device of symmetric structure. Solid curves show results in case (a), reading into the negative side, and broken curves show results in case (b), reading into the positive side.

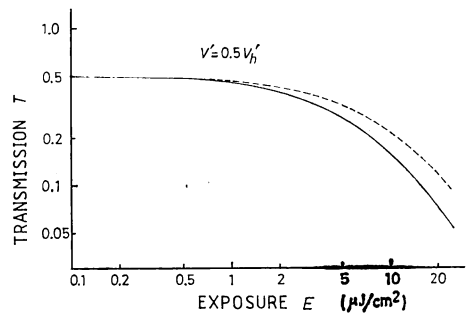


Fig. 3 T - E curves obtained by simulation for a device of asymmetric structure. Solid curve shows a result in case (a), and broken curve, in case (b).

0.6 倍 (非対称形素子) になったときの BSO 単結晶板内の電荷分布を示すと、Fig. 4 と Fig. 5 のようになる。これらの図から、陰極側書き込み (case (a)) のほうが陽極側書き込み (case (b)) にくらべて正電荷と負電荷の分離度が良いことがわかる。このことが陰極側書き込みが高感度になる理由である。

上で得た BSO 単結晶板内電荷分布および (9) 式~(13)式を用いて、素子の MTF 特性を計算した。その結果を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。対称形素子の MTF 特性では、陰極側書き込みと陽極側書き込みに大きな差はない。しかし、非対称形素子では、陽極側書き込みの特性が陰極側書き込みにくらべて大変悪くなっている。MTF 特性のこのような関係は露光量の多い少ないにはほとんど影響されない。素子の解像力を MTF が零空間周波数のときの $1/e$ になる空間周波数で定義すると、Fig. 6 に

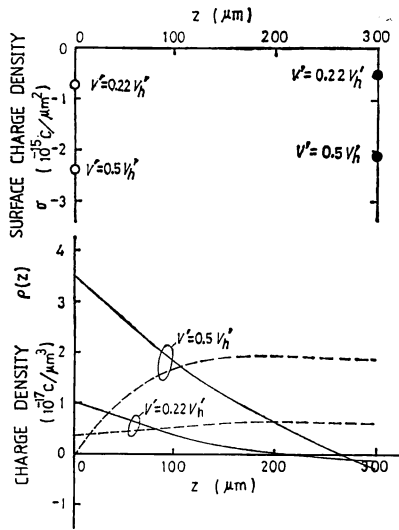


Fig. 4 Charge distributions in BSO crystal plate in a device of symmetric structure for two values of V' when transmission T becomes approximately at half of the value at zero exposure. Solid curves show results in case (a) and broken curves, in case (b). Solid and open circles in the top show surface charge densities in cases (a) and (b), respectively.

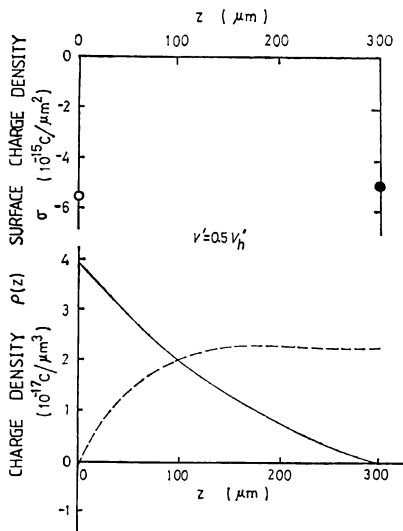


Fig. 5 Charge distributions in BSO crystal plate in a device of asymmetric structure when transmission T becomes approximately 0.6 times of the values at zero exposure. Solid curve shows a result in case (a) and broken curve, in case (b). Solid and open circles in the top show surface charge densities in cases (a) and (b), respectively.

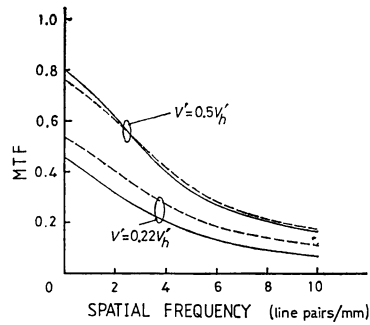


Fig. 6 MTF curves of a device of symmetric structure for two values of V' . These curves were calculated by the use of charge distributions $\rho(z)$ and σ shown in Fig. 4. Solid curves show results in case (a) and broken curves, in case (b).

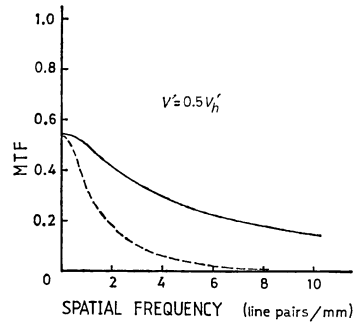


Fig. 7 MTF curves of a device of asymmetric structure. These curves are calculated by the use of charge distributions $\rho(z)$ and σ shown in Fig. 5. Solid curve shows the result in case (a) and broken curve, in case (b).

示した対称形素子の特性から陰極側書込みおよび陽極側書込みともに解像力は約 6 lp/mm である。また、Fig. 7 に示した非対称形素子の特性から、陰極側書込みの場合の解像力が約 7 lp/mm、陽極側書込みの場合が約 2 lp/mm である。

上記のように素子特性が書込み光の入射方向と外部印加電圧の方向の関係によって異なるという非対称な性質は次のように解釈できる。

- (i) PROM 素子が厚い感光層 (BSO 単結晶板) をもち、書込み光が感光層の内部を進むにしたがって著しく減衰する。
- (ii) 光伝導機構の主たるキャリアが電子のみであり、キャリアの平均自由行程が感光層の厚さと同程度またはそれ以下である。

などの理由によって、陰極側書込みの場合には、BSO 結

晶板内の陰極に近いところでホールと電子が多数発生し、電子は陽極側の表面に多くが移動する、そして、結晶板内における正電荷と負電荷は効率よく分離される。他方、陽極側書込みの場合には、BSO 結晶板内の陽極に近いところでホールと電子が多数発生し、電子は陽極側結晶板表面に多数が分布するようになり、正電荷と負電荷の分離効率が悪くなる。このような BSO 結晶板内の電荷分布の様子が陰極側書込みの場合と陽極側書込みの場合で異なり、非対称な性質が発生する原因となる。

4. 測定結果

前節の計算の場合と同じく、BSO 単結晶板の厚さ $300 \mu\text{m}$ 、ポリレン膜の厚さ $5 \mu\text{m}$ の対称形 PROM 素子を用いて、 T - E 特性と MTF 特性を陰極側書込みの場合と陽極側書込みの場合について測定した。測定光学系は通常のものと同様に構成し¹⁷⁾、書込み光の光源には超高圧水銀灯または青色の投写形 CRT 管 (中心波長: 450 nm) を使用し、読出し光の光源には He-Ne レーザー (発振波長: 630 nm) を使用した。特性を測定するときの素子の動作は次の順序で行なった。

- (1) 素子の両電極間を短絡して、強い光で素子を照射し、書き込まれている像を消去する、
- (2) 素子の両電極間に $0.22 V_h'$ に等しい高電圧を印加し、書込みの準備をする。
- (3) 素子に書込み光を照射し、書込みを行なう。
- (4) 素子に読出し光を照射し、書き込まれた像を読み出す。

T - E 特性を測定するときには、一様な強度分布の光で素子を直接に照射して書込みを行なった。MTF 特性を測定するときには一定の空間周波数をもつターゲットの像を素子に書き込んだ。

超高圧水銀灯の光で書込みを行ない、 T - E 特性を測定した結果を Fig. 8 に示す。前節の計算結果と同じように陰極側書込みの場合の感度露光量は陽極側書込みの場合の 0.65 倍程度になった。この傾向は青色の投写形 CRT の光で書込みを行なった場合も同じになり、感度露光量の比も上とほぼ同じになった。すなわち、計算結果と一致して、陰極側書込みのほうが高感度になった。測定結果 (Fig. 8) から求めた感度露光量は前節の計算結果よりも大きくなった。この原因はおもに実験に用いた書込み光が多色光であったこと、素子電極や絶縁膜による書込み光の減衰が存在したのに計算ではこの効果を無視したことなどにあると考える。

次に、書込み光の露光量レベルを2通りに変えて、素

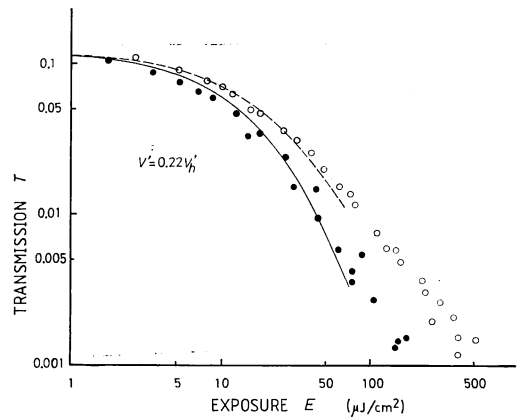


Fig. 8 Experimental T - E curves for $V' = 0.22 \times V_h'$. Solid and open circles show measured values in cases (a) and (b), respectively. Solid and broken curves show calculated curves in cases (a) and (b) (shown in Fig. 2), respectively where values of E for calculated curves are multiplied by a factor of 7.5.

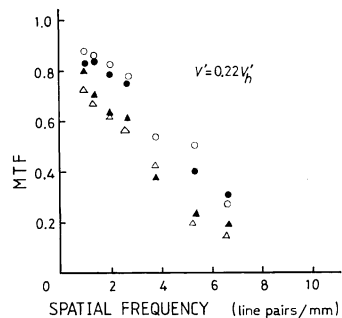


Fig. 9 Experimental MTF curves for $V' = 0.22 \times V_h'$. Solid and open marks show measured values in cases (a) and (b), respectively. Triangles and circles show values when average exposures were approximately $75 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ and $150 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, respectively.

子の MTF 特性を測定した。その結果を Fig. 9 に示す。測定の信頼性を高くするために、実験では出力像の信号対雑音比が高くなるように露光量レベルを選んだので、そのレベルが値の大きなところになり、シミュレーションによって BSO 結晶板内の電荷分布を計算できず^{*2}、Fig. 9 に計算による MTF 曲線を描くことができなかった。しかし、Fig. 9 の測定結果では、陰極側書込みの場合と陽極側書込みの場合の MTF 特性にほとんど差がない。このことは前節の計算による結果の傾向

*2 Fig. 8 の中に描かれている T - E 曲線 (計算による結果) は露光量が $75 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ のところまで到達していない。

とよく一致している。

以上、対称形素子を用いて測定した T - E 特性および MTF 特性における非対称な性質は前節の計算結果から導き出された結果とよく一致した。

5. 結 言

$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 単結晶を用いて構成した空間光変調器の一つである PROM 素子において、入力像を素子電極の陰極側から書き込む場合と陽極側から書き込む場合で素子の T - E 特性や MTF 特性が異なるかどうかを調べた。素子特性の理論的解析と実験による測定によって、両特性に像の書き込み方向による相違が存在することが明らかになった。また、この非対称な性質は素子の構造によって異なることも明らかになった。これらの性質を要約すると対称形 PROM 素子では

- (1) T - E 特性は入力像の書き込み方向によって異なり陰極側書き込みの場合のほうが素子の感度は高い。
- (2) MTF 特性は入力像の書き込み方向にほとんど依存せず、素子の解像力は陰極側書き込みの場合と陽極側書き込みの場合でほとんど差がない。

非対称形 PROM 素子では

- (1) T - E 特性は入力像の書き込み方向によって異なり陰極側書き込みのほうが素子の感度は高い。
- (2) MTF 特性も入力像の書き込み方向によって異なり陰極側書き込みのほうが素子の解像力は高くなる。

以上のことから、PROM 素子を使用するときには、入力像は素子電極の陰極側から書き込むように留意すべきである。

最後に、本研究を進めるにあたり、PROM 素子を提供していただいた住友電気工業株式会社研究開発本部、および青色投写形 CRT を提供していただいた松下電器産業株式会社無線研究所に深く感謝いたします。

文 献

- 1) P. Nisenson and S. Iwasa: "Real time optical processing with $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ PROM," Appl. Opt., **11** (1972) 2760-2767.
- 2) S. Iwasa and J. Feinleib: "The PROM device in optical processing systems," Opt. Eng., **13** (1974) 235-242.
- 3) P. Nisenson and R. A. Sprague: "Real-time optical correlation," Appl. Opt., **14** (1975) 2602-2606.
- 4) S. Iwasa: "Optical processing: a near real-time coherent system using two Itek PROM devices," Appl. Opt., **15** (1976) 1418-1424.
- 5) B. A. Horwitz and F. J. Corbet: "The PROM-theory and applications for the Pockels readout optical modulator," Opt. Eng., **17** (1978) 353-364.
- 6) T. Minemoto, I. Tsuchimoto and S. Imi: "Hybrid pattern recognition using the Fraunhofer diffraction pattern," Opt. Commun., **51** (1984) 221-226.
- 7) T. Minemoto and J. Narano: "Hybrid pattern recognition by features extracted from object patterns and Fraunhofer diffraction patterns," Appl. Opt., **24** (1985) 2914-2920.
- 8) T. Minemoto, K. Okamoto and K. Miyamoto: "Optical parallel logic gate using spatial light modulators with the Pockels effect," Appl. Opt., **24** (1985) 2055-2062.
- 9) T. Minemoto, S. Numata and K. Miyamoto: "Optical parallel logic gate using spatial light modulators with the Pockels effect: implementation using three PROM devices," Appl. Opt., **25** (1986) 948-955.
- 10) 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.
- 11) J. Feinleib and D. S. Oliver: "Reusable optical image storage and processing device," Appl. Opt., **11** (1972) 2752-2759.
- 12) P. Vohl, P. Nisenson and D. S. Oliver: "Real-time incoherent-to-coherent optical converter," IEEE Trans. Electron Devices, **ED-20** (1973) 1032-1037.
- 13) R. A. Sprague: "Effect of bulk carriers on PROM sensitivity," J. Appl. Phys., **46** (1975) 1673-1678.
- 14) T. Minemoto and T. Toda: "Effect of electron-hole recombination on the performance of $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ optical image converter," Jpn. J. Appl. Phys., **20** (1981) 2373-2381.
- 15) Y. Owechko and A. R. Tanguay, Jr.: "Theoretical resolution limitations of electrooptic spatial light modulators. I. Fundamental considerations," J. Opt. Soc. Am. A, **1** (1984) 635-643.
- 16) M. P. Petrov, A. V. Khomenko, V. I. Berezkin and M. V. Krasinkova: "Optical information recording in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$," Ferroelectrics **22** (1978) 651-652.
- 17) T. Minemoto, H. Yoshimura, Y. Suemoto and S. Fujita: "Incoherent-to-coherent optical image converter of transmission type using $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ single crystal," Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1979) 1727-1739.