

高速空間光変調素子用電気光学ファブリ・ペロー共振器の解析

滝沢 國治*

Analysis of electrooptic-crystal-based Fabry-Perot resonators for high-speed spatial light modulators

Kuniharu TAKIZAWA*

ABSTRACT : An electrooptic (EO) -crystal-based Fabry-Perot (FP) resonator, which is suitable for a high-speed spatial light modulator, is proposed. The FP resonator serves as a light modulator with an extremely low drive voltage and a high extinction ratio. It is revealed, by analyzing both the linear EO effect and the inverse piezoelectric effect of various EO crystals, that three kinds of EO crystal configurations are suitable for the FP resonator. One of these is applicable to the isotropic crystals, point group 23 and $\bar{4}3m$, another well fits for the uniaxial EO crystals, point group $\bar{4}2m$, 3m and 4mm, and the other fits for the biaxial crystal, point group mm2, and for the point group 3m. The EO crystals suitable for the FP resonator are as follows; ferroelectric crystals, such as LiNbO₃, LiIO₃, BaTiO₃, and sillenite compounds, such as Bi₁₂SiO₂₀ and Bi₁₂TiO₂₀, and compound semiconductors, such as GaAs and GaP.

KEYWORDS : Electrooptic effect, Piezoelectric effect, Electrooptic crystals, Fabry-Perot resonator

(Received May 31, 2003)

1. まえがき

空間光変調素子 (SLM) は、インコヒーレント光/コヒーレント光変換、波長変換、光増幅などを並列に行えるため、画像抽出^{1,2}、論理演算³⁻⁵、相関演算^{6,7}、光ニューラルネットワーク^{8,9}などの光画像処理や高輝度の投射型ディスプレイ¹⁰⁻¹⁵への応用が図られている。これまでにネマチック液晶あるいは高分子分散液晶とアモルファスシリコン膜からなる液晶ライトバルブやBi₁₂Si₂₀ (BSO) 結晶やLiNbO₃結晶などの電気光学結晶を用いたSLMなどが開発されている。

電気光学 (EO) 結晶を用いた代表的な空間光変調素子として、PROM (Pockels Readout Optical Modulator)^{3,16,17}、MSLM (Micro-channel Spatial Light Modulator)⁸⁻²⁴およびPhoto-Titus²⁵などがある。PROMは、電気光学効果と光導電効果を併せ持つBSO結晶やGaAs結晶に絶縁層と透明電極を積層した非常に単純な構造をもつ。MSLMは真空管であり、その中にフォトカソード、MPC (Micro-channel plate) およびEO結晶を含む。構造は非

常に複雑であるが、他のSLMにくらべて高感度である。Photo-Titusは、アモルファスセレン膜を蒸着したDKDP結晶を真空管の中に閉じ込めた構造をもつ。DKDP結晶をキュリー温度付近まで冷却して用いなければならないため、現在は使用されていない。これらのデバイスは高いコントラスト比と多彩な機能を持つが、数kVから10数kVの駆動電圧を必要とするため、EO結晶のもつ高速応答特性を十分に生かすことができない。そのため、液晶を用いたSLMに比べてその開発は大きく遅れている。

この論文では、平行に研磨されたEO結晶の入出力端面に誘電体多層膜ミラーを蒸着したファブリ・ペロー (FP) 干渉型SLMを提案する。EO結晶の1つの端面には光吸収層とホットコンダクターが積層されており、ホットコンダクターに入射する書込み光の強度に応じて、結晶に加わる交流電圧が変化する。この交流電圧の変化は結晶の屈折率の変化に置き換わり、結晶内を多重反射する読み出し光の位相を変える。このようにFP-SLMの主な機能は、従来のSLMと同様に、書込み光の情報を読み出し光に移すことである。従来のEO結晶を用いたSLMとの明瞭な違いは、FP共振器の大

* 物理情報工学科教授 (takizawa@apm.seikei.ac.jp)
Professor, Department of Applied Physics)

きな非線形特性を利用するために、従来のSLMよりも動作電圧を大幅に軽減でき、EO結晶のもつ高速応答特性を活かせる可能性を持つことである。

2章ではFP-SLMの基本構造を示し、その動作原理を等価回路を用いて明らかにする。

3章では、FP-SLMの光変調動作を解析するため、SLMを簡略化したモデルとしてEO結晶の誘電体多層膜ミラーと透明電極を蒸着したFP共振型光変調器(FPM)を選び、多重反射光の位相差、ミラーの反射率、EO結晶の光損失などの光変調器の様々なパラメータと出力光強度との関係を明らかにする。4章では、FPMに適した等軸性EO結晶と、それらを用いたFPMの構成を示す。また、変調光強度とFPMのパラメータの関係を解析するとともに、効率よく変調するのに欠かせない位相整合条件やこの条件から外れた場合のFPMの光変調特性などの計算結果を示す。5章では、FPMに適した1軸性結晶と、それを用いた3種類の素子構成を明らかにする。これらの素子構成の位相整合条件を示すとともに、条件を満たさない場合の各素子の光変調特性を解析する。6章では、2軸性結晶のFPMへの応用の可能性について検討する。7章では4章から6章で検討したFPMの構成に適したEO結晶の半波長電圧を計算し、FP-SLMに最適な結晶構成を選び出す。8章では、1軸性および2軸性EO結晶の位相変化に関わりのあるEO係数と圧電定数の相対的な符号関係について考察する。9章は結論である。

2. 反射型FP-SLMの構造と動作原理

FP-SLMは、図1に示すようにEO結晶の両端

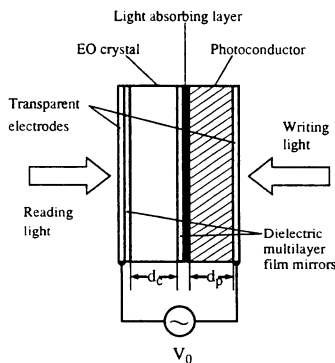


Fig. 1. Schematic diagram of a FP-SLM. d_c is the thickness of the EO crystal, and d_p is the thickness of the photoconductor. V_0 is the drive voltage.

面に誘電体多層膜ミラーを蒸着したFP共振器とホットコンダクターで構成される。FP共振器の読

み出し光側とホットコンダクターの書き込み光側にはそれぞれ透明電極が蒸着されている。FP共振器とホットコンダクターの間には、読み出し光と書き込み光をアイソレートする光吸収層が挿入されている。

図2の等価回路を用いて交流電圧 V_0 を印加し

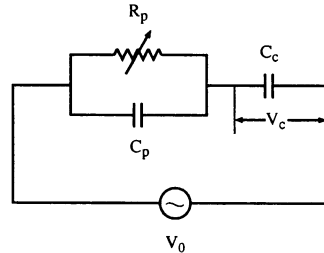


Fig. 2. Equivalent circuit of the FP-SLM. R_p and C_p are the resistance and the capacitance, respectively, of the photoconductor and C_c is the capacitance of the EO crystal. V_0 is the voltage applied to the EO crystal.

たときのFP-SLMの動作を説明しよう。図2の C_c はEO結晶の静電容量、 C_p , R_p はホットコンダクターの静電容量と抵抗である。EO結晶およびホットコンダクターの比誘電率を ϵ_c , ϵ_p とし、EO結晶およびホットコンダクターの厚さを d_c , d_p とすると、図2を構成する各層の単位面積あたりの誘電率および抵抗は、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} C_c &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_c}{d_c}, \\ C_p &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_p}{d_p}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$R_p = \rho d_p$$

ただし、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ρ はホットコンダクターの単位面積当りの暗抵抗である。書き込み光がない場合 $R_p \gg 1/\omega C_p$ であるから、EO結晶に印加される電圧 $V_c(\text{dark})$ は、式(2)で与えられる。ここでは、誘電体多層膜ミラーと光吸収層は、その両側のEO結晶とホットコンダクターよりもはるかに薄いので、無視した。

$$V_c(\text{dark}) = \frac{V_0}{1 + \frac{C_c}{C_p}} = \frac{V_0}{1 + \frac{\epsilon_c d_p}{\epsilon_p d_c}}. \quad (2)$$

つぎに、ホットコンダクターに書き込み光が入り、その比抵抗 ρ が大幅に低下すると、式(3)で表される電圧 $V_c(\text{photo})$ がEO結晶に印加される。

$$V_c(\text{photo}) = \frac{V_o}{\sqrt{1 + (\omega C_c R_p)^2}} = \frac{V_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_c \rho_p d_p}{d_c} \right)^2}}, \quad (3)$$

ここで、 ω は交流電圧の角周波数、 ρ_p は明状態のホットコンダクターの比抵抗である。ここで、

$$V_c(\text{photo}) \gg V_c(\text{dark}), \quad (4)$$

となるようにEO結晶とホットコンダクターの厚さおよび書込み光強度を定めれば、EO結晶に式(5)の信号電圧

$$V_s = V_c(\text{photo}) - V_c(\text{dark}), \quad (5)$$

が加わり、印加電圧によってFP共振器内を伝播する読み出し光の位相が変化して、読み出し光強度が変調される。読み出し光は、EO結晶の中で反射を繰り返しながら、入射光側に出力する。

3. FP型光変調器の動作解析

ホットコンダクターはEO結晶に印加される交流電圧 V_c の大きさを変える可変抵抗器の役目をしている。そこで、解像度などSLMの2次元的な性能を考えずに光変調機能だけに注目して、FP-SLMを図3に示すようにEO結晶の両端面に同じ反射率をもつ誘電体多層膜ミラーと透明電極を蒸着したFP型光変調器(FPM)に置き換えてその光変調動作を解析する。

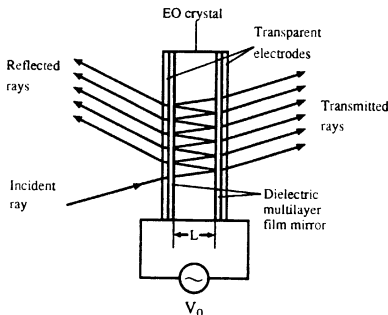


Fig. 3. Multiple reflection of light in the FPM consisting of an EO crystal and dielectric multilayer film mirrors at normal incidence. The figure was drawn schematically to show each optical ray. L is the thickness of the EO crystal.

解析に先立ち、非対称な構造をもつFP-SLMを図3の対称な構造のFPMに置き換えることの妥当性を検討しておく。誘電体多層膜ミラーは、小

さな屈折率 n_b をもつ薄膜と大きな屈折率 n_c をもつ薄膜を図4のように交互に積層したものである。

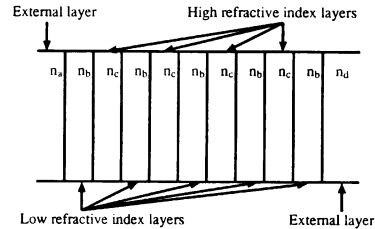


Fig. 4. Cross-section view of the dielectric multilayer film mirror. High and low refractive-index layers are stacked alternately. n_b and n_c are the refractive indices of the high and low refractive-index layers. n_a and n_d are the refractive indices of the external layers.

n_a, n_d はミラーに接する媒質の屈折率である。SLMの読み出し光側のミラーでは、 n_a は透明電極の屈折率になり、書込み光側のミラーでは、 n_a は光吸収層の屈折率である。2N+1層の多層膜ミラーのパワー反射率を R とすると、 R は次の式で与えられる。²⁷

$$R = \left[\frac{1 - \left(\frac{n_b}{n_a} \right) \left(\frac{n_b}{n_d} \right) \left(\frac{n_b}{n_c} \right)^{2N}}{1 + \left(\frac{n_b}{n_a} \right) \left(\frac{n_b}{n_d} \right) \left(\frac{n_b}{n_c} \right)^{2N}} \right]^2. \quad (6)$$

低屈折率層に SiO_2 ($n_b=1.542$)、高屈折率層に TiO_2 ($n_c=2.533$)、EO結晶を LiNbO_3 (異常光屈折率; $n_e=2.2030$)を用い、透明電極と光吸収層の屈折率 n_a をそれぞれ1.9, 3.0として反射率 R を計算すると、両者の差は $N=5$ で0.5%程度になる。SLMの多層膜ミラーは一般に $N>5$ であり、その場合 n_a 層の R に及ぼす影響は一層小さくなる。従って、FP-SLMを図3のFPMで近似して解析することは妥当である。これ以後はこのFPMの反射光について詳細に検討する。

図3に示すように、FPMに入射した光ビームは、2つの薄膜ミラーの間で多重反射し、FPMの両端面から無数のビームを出力する。この図では、入射ビームおよび無数の出射ビームは、FPMの端面とある角度をなすように模式的に描かれているが、実際のデバイスでは、全てのビームの進行方向は端面に垂直である。FPMのフィネスを F 、EO結晶内を1往復するときの位相変化を θ とすると、FPMの規格化された反射光強度 I_R は次の式で与えられる。

$$I_R = \frac{\alpha + \left(\frac{2}{\pi} F \sin \frac{\theta}{2}\right)^2}{1 + \left(\frac{2}{\pi} F \sin \frac{\theta}{2}\right)^2}, \quad (7)$$

ここで、 α は規格化された出力光強度の最小値であり、 θ および F とともに以下の式で与えられる。

$$\theta = \frac{4\pi nL}{\lambda}. \quad (8)$$

$$F = \frac{\pi\sqrt{R\beta}}{1-R\beta}, \quad (9)$$

$$\alpha = R \frac{(1-\beta)^2}{(1-R\beta)^2}, \quad (10)$$

$$\beta = \exp(-\gamma L) \quad (11)$$

ただし、 n および L はEO結晶の屈折率と厚さ、 λ は光の波長、 R はミラーのパワー反射率、 β はFPMの光損失、 γ はEO結晶の光吸収率である。

反射率 R をパラメータとしたときのFPMの I_R と位相 θ との関係を図5に示す。この図は I_R が

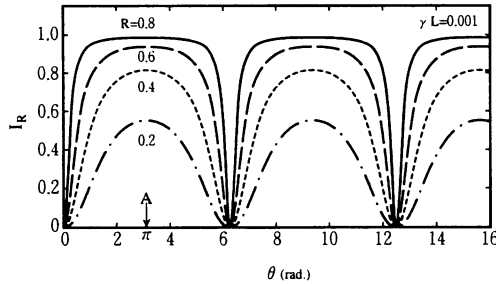


Fig. 5. Dependence of the intensity of the output light I_R of the FPM on phase difference θ between two successively reflected rays for various values of reflectance R . A is the point at which $\theta = \pi$ rad and I_R is maximum. γL is the optical loss of the FPM.

θ と R に大きく依存することを示している。 I_R の最大値と最小値の比を消光比 E_R とすると、 E_R は次の式で表される。

$$E_R = \frac{1}{\alpha} \frac{\alpha + \left(\frac{2F}{\pi}\right)^2}{1 + \left(\frac{2F}{\pi}\right)^2}. \quad (12)$$

FPMの消光比 E_R と R との関係を図6に示す。この図から E_R が γL に大きく依存することや、 R が0.9を越すと E_R に大きな影響を与えることがわかる。

式(8)より θ は屈折率に依存するから、EO

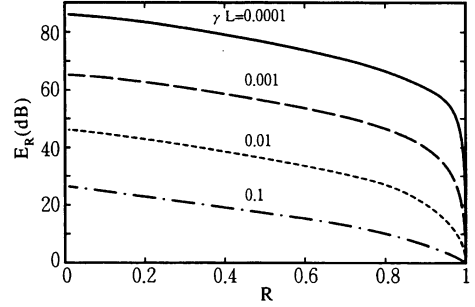


Fig. 6. Relationship between extinction ratio E_R and the reflectance R for various values of γL .

効果を利用して屈折率を電界で制御すれば、 I_R を変調することができる。例えば、外部電界で図5の原点から、A点(I_R が最大になる位相)まで、 θ を変えれば、ノーマリブラックモード(印加電界がゼロのとき出力光強度が最小になる)動作となる。ノーマリホワイトモード動作の場合には、位相はA点から原点まで変化する。ノーマリブラックモードは、僅かな位相の変化で反射光強度が大きく変化するため、光変調器にとって好都合である。

反射光を利用するためには、入射光と反射光の光路を分離しなければならない。分離する2つの方法がある。1つは、図7(a)のようにハーフミラーを用いる方法である。この方法は簡単であるが75%の光が失われてしまうため、得策ではない。もう1つは、図7(b)のように偏光ビームスプリッター(PBS)と $\lambda/4$ 板を用いる方法である。この方

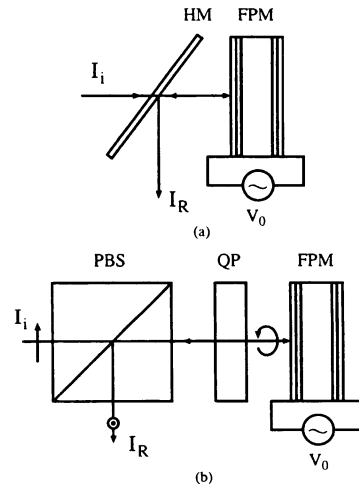


Fig. 7. Schematic diagram of the optical system that separates incident beam I_i and output beam I_R . (a) Simple structure with half-mirror HM but a large optical loss. (b) Requires a PBS and a quarter-wave plate QP but has a small optical loss, provided that linearly polarized light is employed for the input.

Table 1. Isotropic EO Material Parameters

Material	Point Group	EO Coefficient r_{41} (pm/V)	$n_o^3 r_{41}$ (pm/V)	Refractive Index	Wavelength (nm)	Piezoelectric Strain Coefficient d_{14} (pC/N)	Relative Dielectric Constant
$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	23	5.0	81.98	2.5504	633	40	56
$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$	23	3.40	52.8	2.5405	633	31	40
$\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$	23	5.17	85.77	2.5504	633		47
GaAs	$\bar{4}3m$	-1.44	53.63	3.455	1150	-2.7	12.5
GaP	$\bar{4}3m$	-0.97	35.17	3.3098	633		11.1

法では、入力光として直線偏光を用いる。直線偏光はPBSを直進して $\lambda/4$ 板で円偏光になり、FPMの中で90度の位相差（リターデーション）をもつ2つの直線偏光として反射を繰り返す。多重反射した反射光は $\lambda/4$ 板で入射光と直交する直線偏光となり、PBSで直角に曲がって出射する。この場合には光損失はない。しかし、高い消光比を達成するためには、FPM内の2つの直線偏光の位相変化が等しいか、あるいは少なくともその絶対値が同一でなければならない。4章～7章では、7(b)の構成に様々なEO結晶を当てはめ、高消光比を得られる結晶構成と、その光変調特性について詳しく解析する。

4. 等方性結晶を用いたFPM

等方性結晶で顕著なEO効果を示す点群は2つある。1つは点群23であり、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ および $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ などのシレンナイト(sillenite)系化合物が所属する。これらの結晶は表1に示すようなEO係数と屈折率をもつ。²⁸⁾もう1つは点群 $\bar{4}3m$ であり、GaAs、GaPなどの化合物半導体がこれに含まれる。これらの結晶の(001)面に誘電体多層膜ミラーと透明電極を積層して図8に示すようなFPMを構

成する。図8のE,Sは印加電界と光の伝播方向を示している。結晶の X_1 軸方向に振動する電気ベクトル $\mathbf{P}$ をもつ直線偏光が X_3 軸に沿って結晶内を1往復するとき、 X'_1 [110]方向および X'_2 [110]方向に振動する直線偏光の位相 θ_1 、 θ_2 は、式(8)および表1より、以下の式で与えられる。

$$\theta_1 = \frac{4\pi}{\lambda} n_o L + \delta\theta, \quad (13)$$

$$\theta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} n_o L - \delta\theta, \quad (14)$$

$$\delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{41} V, \quad (15)$$

ただし、 r_{41} は応力一定(constant stress)のEO係数、 n_o は屈折率、 V は印加電圧である。応力一定のEO係数とは、結晶に応力が掛からない状態(free crystal)で測定したEO係数のことである。本論文では特に断らない限り、EO係数は応力一定の下で求めた値を用いることとする。

光変調器の位相が $\lambda/2$ だけ変化するのに必要な電圧は半波長電圧と呼ばれる。FPMでは $\delta\theta = \pi$ となる電圧

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{41}}, \quad (16)$$

がそれに相当する。 V_π は従来の光変調器の半波長電圧の半分に過ぎないが、5章で詳しく述べるようにFPMの変調特性の非線形性は、従来素子のそれよりもはるかに大きいから、非常に効率のよい変調が可能である。

式(13)、(14)より、静的位相(static phase)が

$$(4\pi/\lambda)n_o L = 2m\pi \quad (m: \text{整数}) \quad (17)$$

となる位相整合条件を満足させることができれば、変調の動作点を図5の最小レベル点に定めることが可能となる。このとき、FPM内で繰り返し反

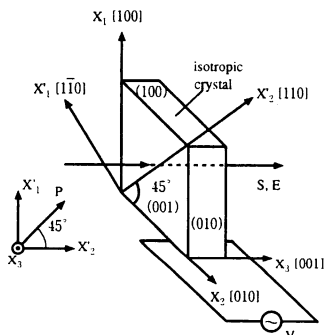


Fig. 8. Schematic diagram of the FPM consisting of an isotropic EO crystal. Both the circularly polarized light and the applied electric field propagate along axis X_3 . $\mathbf{P}$ is the electric vector of the linearly polarized light passing through the PBS shown in Fig. 7.

射する2つの直線偏光の規格化された振幅 AR_1 、 AR_2 は

$$AR_1 = \frac{\sqrt{R}[1 - \exp(-\gamma L + i\delta\theta)]}{2[1 - R \exp(-\gamma L + i\delta\theta)]}, \quad (18)$$

$$AR_2 = \frac{\sqrt{R}[1 - \exp(-\gamma L - i\delta\theta)]}{2[1 - R \exp(-\gamma L - i\delta\theta)]}. \quad (19)$$

である。互いに直交する2つの直線偏光は図7(b)の $\lambda/4$ 板とPBSを経て、入射光の光路から分離される。このときPBSから出力する光の強度 I_R は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{R}{4} \left| \frac{1 - \exp(-\gamma L + i\delta\theta)}{1 - R \exp(-\gamma L + i\delta\theta)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1 - \exp(-\gamma L - i\delta\theta)}{1 - R \exp(-\gamma L - i\delta\theta)} \right|^2 \\ &= \left\{ \frac{\sqrt{\alpha} + (1+R)[(2/\pi)F \sin(\delta\theta/2)]^2/2\sqrt{R}}{1 + [(2/\pi)F \sin(\delta\theta/2)]^2} \right\}^2. \end{aligned} \quad (20)$$

$\delta\theta$ と I_R との関係を図9に示す。パワー反射率 R が大きい場合には、図9と図5はよく似てい

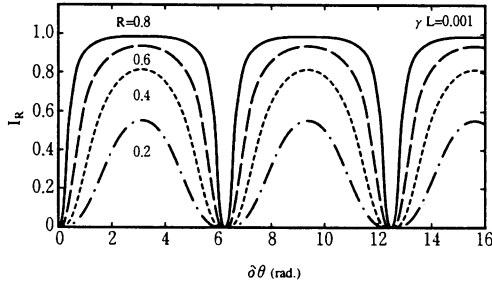


Fig. 9. Dependence of the intensity of the output light I_R of the FPM shown in Fig. 8 with optical loss $\gamma L = 0.001$ on the electro-optically induced phase difference $\delta\theta$ for several values of reflectance R .

るが、曲線の勾配 $I_R/\delta\theta$ は、図5のほうが図9よりも大きい。この勾配は、 R が大きいほど大きくなるため、変調電圧の低減には R を大きくしなければならない。しかし、 R を大きくし過ぎると消光比が劣化する。例えば図6の $\gamma L = 0.001$ の場合、 $R = 0.99$ では消光比は約100:1に低下するため、 R の値は光損失と用途（アナログ信号処理用あるいはデジタル信号処理用など）に応じて定められるべきである。

次に式(17)の位相整合条件が成立しない場合を検討する。このケースでは、式(20)は一般に以下の式で表される。

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{R}{4} \left| \frac{1 - \exp\{-\gamma L + i[(2m+p)\pi + \delta\theta]\}}{1 - R \exp\{-\gamma L + i[(2m+p)\pi + \delta\theta]\}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1 - \exp\{-\gamma L + i[(2m+p)\pi - \delta\theta]\}}{1 - R \exp\{-\gamma L + i[(2m+p)\pi - \delta\theta]\}} \right|^2, \end{aligned} \quad (21)$$

ただし、 m は整数、 p は位相整合条件からのずれの大きさを示し、 $-1 \leq p \leq 1$ の範囲にあるゼロを除く実数である。図10に p を0.01から0.08まで変化させたときの I_R と $\delta\theta$ の関係を示す。この図より、消光比を100:1以上にするには $p < 0.01$ 、すなわち、静的位相誤差を1%以下に抑えること

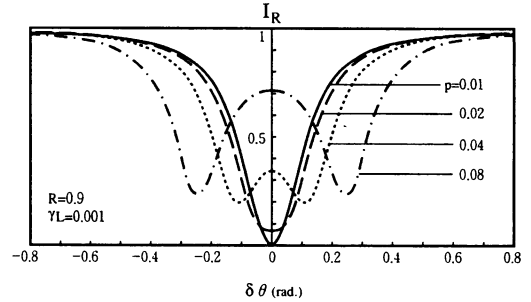


Fig. 10. Dependence of the intensity of the output light I_R of the FPM shown in Fig. 8 with a reflectance $R = 0.9$ and an optical loss $\gamma L = 0.001$ on electro-optically induced phase difference $\delta\theta$ for several values of p . p denotes the deviation from the phase-matching condition.

が要求される。

式(17)において制御できるパラメータはEO結晶の厚さ L 、波長 λ 、屈折率 n であるから、上記の条件を成立させる方法として、以下の3通りの方法が考えられる。

- (1) λ と n_0 を定数として与え、 $L = m\lambda/2n_0$ となるように、EO結晶を加工する。
- (2) L と n_0 を定数として与え、 $\lambda = 2n_0L/m$ となるように、入射光の波長を選択する。
- (3) L と λ を定数として与え、 $n_0 = m\lambda/2L$ となるように、EO結晶の屈折率を電界で制御する。

(1)の方法は最も望ましいが、高い加工精度が要求される。そこで、EO結晶をほんの僅か回転させて、光路長を変えることが考えられる。しかしこの場合、光ビームはEO結晶内で反射するたびに光の進行方向と直交する方向に少しずつ移動するため、SLMの解像度が低下する可能性がある。(2)の方法は波長可変レーザを用いれば可能であるが、使える波長範囲は限定されるという問題をもつ。(3)の方法は結晶加工プロセスや光学

Table 2. Uniaxial EO Material Parameters

Material	Point Group	EO Coefficient (pm/V)	Refractive Index	Wavelength (nm)	Piezoelectric Strain Coefficient (pC/N)	Relative Dielectric Constant
LiIO ₃	6	$r_{13} = +6.4$ $r_{33} = +4.2$ $r_{41} = +3.1$	$n_o = 1.8830$ $n_e = 1.7367$	633	$d_{14} = 7.3$ $d_{15} = 49.3$ $d_{31} = 7.3$	$k_1 = 7.9$ $k_3 = 6.4$
LiNbO ₃	3m	$r_{51} = +7.9$ $r_{13} = +9.6$ $r_{22} = +6.8$	$n_o = 2.2868$ $n_e = 2.2030$	633	$d_{33} = +92.7$ $d_{15} = +74.0$ $d_{22} = +20.7$	$k_1 = 84.6$ $k_3 = 28.6$
LiTaO ₃	3m	$r_{33} = +30.9$ $r_{51} = +32.6$ $r_{13} = +8.49$	$n_o = 2.1774$ $n_e = 2.1818$	633	$d_{31} = -0.86$ $d_{33} = +16.2$ $d_{15} = +26$	$k_1 = 53.6$ $k_3 = 43.4$
Pb ₅ Ge ₃ O ₁₁	3	$r_{22} = -0.2$ $r_{33} = +30.5$ $r_{51} = +20$	$n_o = 2.116$ $n_e = 2.151$	633	$d_{33} = +9.2$ $d_{11} = 0.1$ $d_{14} = 0.2$	$k_1 = 22$ $k_3 = 36$
KH ₂ PO ₄	42m	$r_{11} = 0.276$ $r_{13} = 10.9$ $r_{22} = 2.35$	$n_o = 1.5100$ $n_e = 1.4684$	556	$d_{15} = 3$ $d_{22} = 2$ $d_{31} = 5.2$	$k_1 = 43.2$ $k_3 = 20.8$
KD ₂ PO ₄	42m	$r_{33} = 15.2$ $r_{41} = 0.62$ $r_{51} = 6.1$	$n_o = 1.5079$ $n_e = 1.4683$	546	$d_{36} = -20.9$ $d_{14} = 1.28$ $d_{31} = -34.7$	$k_1 = 58$ $k_3 = 48$
(NH ₄)H ₂ PO ₄	42m	$r_{63} = -10.5$ $r_{41} = 8.8$ $r_{51} = -26.4$	$n_o = 1.52662$ $n_e = 1.48079$	546	$d_{36} = +58$ $d_{14} = 1.76$ $d_{15} = 587$	$k_1 = 55.8$ $k_3 = 15.3$
BaTiO ₃	4mm	$r_{41} = 23.76$ $r_{63} = -8.51$ $r_{13} = 24$	$n_o = 2.4037$ $n_e = 2.3607$	633	$d_{36} = -48.3$ $d_{31} = -34.7$ $d_{33} = 85.7$	$k_1 = 2920$ $k_3 = 168$

*Wavelength, 546 nm.

システムへの負担はないが、E O 結晶の電気光学効果は小さいため、大きな直流電圧を必要とする。実際には (1) ~ (3) の方法を組み合わせて式 (21) で要請される条件の成立を図ることになるであろう。

5. 1 軸性EO結晶を用いたFPM

1 軸性結晶の中で顕著な E O 効果を示す点群は 3 つある。1 つは点群 3 m であり、最も代表的な E O 結晶である LiNbO₃ および LiTaO₃ などの強誘電性結晶がこれに所属する。もう 1 つは点群 42m であり、KH₂PO₄ (KDP), KD₂PO₄ (DKDP), (NH₄)H₂PO₄ (ADP) など光シャッターとしてよく用いられる結晶がこれに含まれる。最後の 1 つは点群 4 mm であり、BaTiO₃ などの極めて大きな E O 係数をもつ強誘電性結晶がこれに所属する。また、E O 効果はそれほど大きくないが、LiIO₃ のように大きな piezo 係数をもつ点群 6 も FPM に適用できる可能性がある。これら結晶の電気光学的特性を表 2 に示す。²⁸

結晶点群 42m は表 2 に示すように、点群 23 や $\bar{4}3m$ とよく似た E O 効果のテンソル成分 r_{41} と r_{63} を有するため、4 章の計算結果をそのまま利用できる。すなわち、42m でも図 8 の構成が FPM に適しており、同図の X_1 $[\bar{1}\bar{1}0]$ 方向および X_2 $[\bar{1}10]$ 方向に振動する直線偏光の位相 θ_1 , θ_2 は、式 (13) および式 (14) で与えられる。ただし、電界によ

る位相変化 $\delta \theta$ は、次式で与えられる。

$$\delta \theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{63} V, \quad (22)$$

ここで、 n_o は常光屈折率である。この結晶グループの半波長電圧 V_π は

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{63}}. \quad (23)$$

である。点群 42m の E O 結晶からなる FPM の出力光強度は、式 (17) が成立する場合には式 (20) で、また不成立の場合には式 (21) で与えられる。

点群 6、3 m および 4 mm の E O 結晶は符号と大きさが同じ E O 係数である $r_{13} = r_{23}$ を有するため、FPM に好適な図 11 の構成が可能である。同

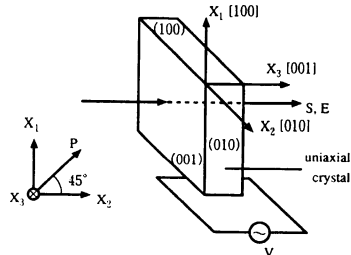


Fig. 11. Schematic diagram of the FPM consisting of a uniaxial EO crystal. Both the circularly polarized light and the applied electric field propagate along axis X_3 . P is the electric vector of the linearly polarized light passing through the PBS shown in Fig. 7.

図に示すように、結晶の[110]方向に振動する電気ベクトル $\mathbf{P}$ をもつ直線偏光が X_3 軸に沿って結晶内を1往復するとき、 X_1 軸および X_2 軸方向に振動する電気ベクトル成分の印加電界による位相変化 $\delta\theta_{X1}$ 、 $\delta\theta_{X2}$ は、符号も含めて同一になり、以下の式で与えられる。^{29,30}

$$\begin{aligned}\delta\theta_{X1} = \delta\theta_{X2} &= \frac{4\pi}{\lambda} [(n_{X1} + \Delta n_{X1})(L + \Delta L) - n_{X1}L] \\ &\equiv \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta n_{X1}L + n_{X1}\Delta L),\end{aligned}\quad (24)$$

ここで n_{X1} は X_1 あるいは X_2 軸方向の屈折率（常光屈折率 n_o ）、 Δn_{X1} は X_1 あるいは X_2 方向のEO効果による屈折率変化、 ΔL は逆圧電効果（Inverse piezoelectric effect 以後IP効果と略記する）による X_3 方向の結晶長変化であり、それぞれ次のように表される。

$$n_{X1} = n_o, \quad (25)$$

$$\Delta n_{X1} = -\frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E, \quad (26)$$

$$\Delta L = d_{33} L, \quad (27)$$

ただし、 d_{33} は圧電定数（Piezoelectric strain coefficient）である。式(25)～(27)を式(24)に代入すると、

$$\delta\theta_{X1} = -\frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 V \left(r_{13} - \frac{2}{n_o^2} d_{33} \right), \quad (28)$$

を得る。ここで、 V はEO結晶に加える交流電圧である。

図11のFPM、PBSおよび1/4波長板を用いて図7(b)の光学系を構成したときの、PBSの出力 I_R は、式(24)を式(7)に代入することにより、

$$I_R = \frac{\alpha + [(2/\pi)F \sin(\delta\theta_{X1}/2)]^2}{1 + [(2/\pi)F \sin(\delta\theta_{X1}/2)]^2}, \quad (29)$$

となる。ただし、前章の(1)～(3)などの方法により、予め式(17)の位相整合条件を成立させなければならない。式(29)の変調出力 I_R とEO効果による位相 $\delta\theta_{X1}$ の関係を知るには、図5の横軸座標を θ から $\delta\theta_{X1}$ に変更するだけでよい。

図11のFPMの半波長電圧 V_π は、 $\delta\theta_{X1} = \pi$ より、

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3 [r_{13} - (2/n_o^2)d_{33}]}. \quad (30)$$

となる。4章でも述べたようにFPMの変調曲線（光出力対印加電圧特性）の非線形性は、従来の素子のそれよりもはるかに大きいから、わずかな印加電圧で大きな光出力を得ることができる。図12はパワー反射率 $R = 0.9$ の場合の規格化された

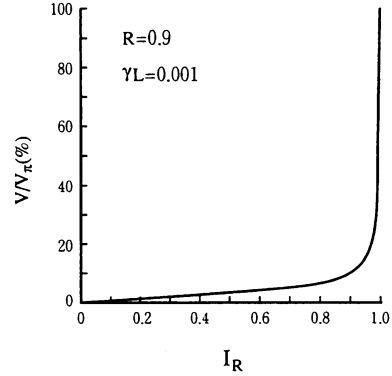


Fig. 12. Dependence of V/V_π of the FPM shown in Fig. 11 with $R = 0.9$ and $\gamma L = 0.001$ on intensity I_R of the output light.

最大透過率 $I_R(\max)$ とそれを得るのに必要な相対的印加電圧 V/V_π の関係を示している。この図より、 $I_R(\max) \leq 0.9$ の場合、従来の素子に比べ格段に小さい印加電圧でよいことが分かる。また、図13は V/V_π と R の関係を示している。 $R > 0.85$

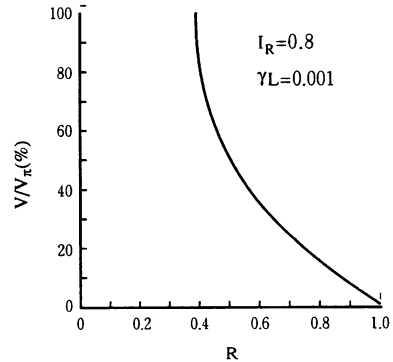


Fig. 13. Dependence of V/V_π of the FPM shown in Fig. 11 with $I_R = 0.8$ and $\gamma L = 0.001$ on reflectance R .

では、相対的印加電圧 V/V_π は従来の素子の半波長電圧の10%以下と非常に小さい。ただし図6に示したように R が増大すると、消光比が急激に劣化するため、これをむやみに大きくすることはできない。図12および図13では $\gamma L = 0.001$ とした。 γL を変えても図12の特性は殆ど変化せず、光損

失が印加電圧に及ぼす影響は軽微である。

次に、図11の構成で位相整合条件が不成立の場合について検討する。このときFPMの出力は以下の式で与えられる。

$$I_R = \frac{\alpha + \{(2/\pi)F \sin[(2m+p)\pi + \delta\theta_{X_1}]/2\}^2}{1 + \{(2/\pi)F \sin[(2m+p)\pi + \delta\theta_{X_1}]/2\}^2}, \quad (31)$$

ただし、 m は任意の整数、 p は $-1 \leq p \leq 1$ の範囲にあるゼロを除く実数である。図14に p を0から

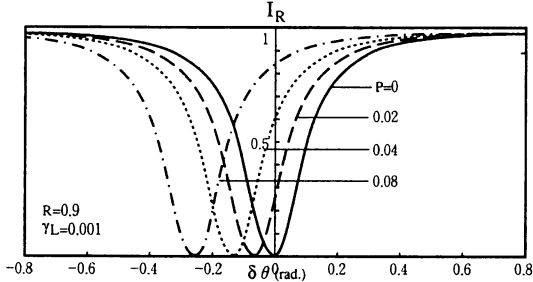


Fig. 14. Dependence of the intensity I_R of the output light of the FPM shown in Fig. 11 with $R = 0.9$ and $\gamma L = 0.001$ on electro-optically induced phase difference $\delta\theta$ for several values of p .

0.08まで変化させたときの I_R と $\delta\theta_{X_1}$ の関係を示す。この図より静的位相の誤差は消光比に影響を与えないことがわかる。ただし、 $p \neq 0$ の場合には、バイアス電圧が必要になるため、 p をできるだけ小さくすることが望ましい。

点群3m、4mmおよび6mmでは、FPMとして図15の構成も可能である。この図では、 X_1 [100]軸を中心に X_2 軸および X_3 軸をそれぞれ角度

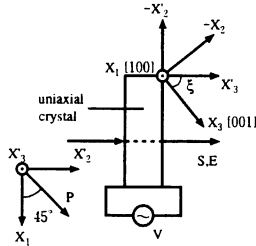


Fig. 15. Schematic diagram of the FPM consisting of a uniaxial EO crystal. Both the circularly polarized light and the applied electric field propagate along axis X_3' . P is the electric vector of the linearly polarized light passing through the PBS shown in Fig. 7. ξ だけ回転させた X_2' 軸および X_3' 軸を新たな主軸としている。印加電界 E とFPMに入射した直線偏光は X_3' 軸に沿って伝播する。このとき、 X_1 方向および X_2' 方向に振動する光の印加電界 E による位相変化 $\delta\theta_{X_1}$ 、 $\delta\theta_{X_2'}$ は、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \delta\theta_{X_1} &= \frac{4\pi}{\lambda} [(n_{X_1} + \Delta n_{X_1})(L + \Delta L) - n_{X_1}L] \\ &\equiv \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta n_{X_1}L + n_{X_1}\Delta L), \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \delta\theta_{X_2} &= \frac{4\pi}{\lambda} [(n_{X_2} + \Delta n_{X_2})(L + \Delta L) - n_{X_2}L] \\ &\equiv \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta n_{X_2}L + n_{X_2}\Delta L). \end{aligned} \quad (33)$$

ここで X_2' 方向の屈折率 $n_{X_2'}$ 、EO効果による X_1 および X_2' 方向の屈折率変化 Δn_{X_1} 、 $\Delta n_{X_2'}$ 、IP効果による X_3' 方向の結晶長変化 ΔL は、それぞれ次のように表される。(付録1, 2)

$$n_{X_2} = \frac{n_o}{[\cos^2 \xi + (n_o/n_e)^2 \sin^2 \xi]^{1/2}}, \quad (34)$$

$$\Delta n_{X_1} = -\frac{n_o^3 E}{2} (r_{22} \sin \xi + r_{13} \cos \xi), \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \Delta n_{X_2} &= -\frac{n_{X_2}^3 E}{2} (-r_{22} \sin \xi \cos^2 \xi + r_{13} \cos^3 \xi \\ &\quad + r_{33} \sin^2 \xi \cos \xi - 2r_{51} \sin^2 \xi \cos \xi), \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \Delta L &= LE(-d_{22} \sin^3 \xi + d_{31} \sin^2 \xi \cos \xi + d_{33} \cos^3 \xi \\ &\quad + d_{15} \sin^2 \xi \cos \xi), \end{aligned} \quad (37)$$

ここで r_{13} 、 r_{22} 、 r_{33} 、 r_{51} はEO係数、 d_{22} 、 d_{31} 、 d_{33} 、 d_{15} は圧電定数である。

式(34)～(37)を式(32)、(33)に代入すると、次の式を得る。

$$\begin{aligned} \delta\theta_{X_1} &= -\frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 V \left[r_{22} \sin \xi + r_{13} \cos \xi \right. \\ &\quad - \frac{2}{n_o^2} (-d_{22} \sin^3 \xi + d_{31} \sin^2 \xi \cos \xi \\ &\quad \left. + d_{33} \cos^3 \xi + d_{15} \sin^2 \xi \cos \xi) \right], \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \delta\theta_{X_2} &= -\frac{2\pi}{\lambda} n_{X_2}^3 V \left[-r_{22} \sin \xi \cos^2 \xi + r_{13} \cos^3 \xi \right. \\ &\quad + r_{33} \sin^2 \xi \cos \xi - 2r_{51} \sin^2 \xi \cos \xi \\ &\quad - \frac{2}{n_{X_2}^2} (-d_{22} \sin^3 \xi + d_{31} \sin^2 \xi \cos \xi \\ &\quad \left. + d_{33} \cos^3 \xi + d_{15} \sin^2 \xi \cos \xi) \right]. \end{aligned} \quad (39)$$

表2のLiNbO₃結晶を例に取り、 $\delta\theta_{X_1}$ 、 $\delta\theta_{X_2'}$ と ξ との関係を計算した。 $V=1000$ Vの場合を図16に示す。ここで、 V は $\delta\theta_{X_1}$ 、 $\delta\theta_{X_2'}$ の大きさ

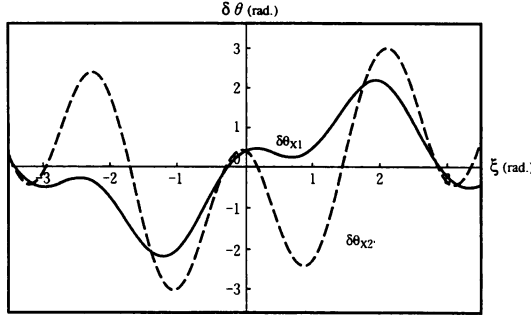


Fig. 16. Dependence of electro-optically induced phase differences $\delta\theta_{x1}$ and $\delta\theta_{x2}$ of the FPM shown in Fig. 15 consisting of a LiNbO_3 crystal on rotation angle ξ .

に関係するだけであり、 V が変わっても $\delta\theta_{x1} = \delta\theta_{x2}$ となる ξ の値は変わらないことに注意してほしい。同図の2つの曲線は周期特性を示すため、 ξ の変化範囲を $-\pi \leq \xi \leq \pi$ に限定して議論しても一般性を失わない。この範囲で $\delta\theta_{x1} = \delta\theta_{x2}$ となる角度 ξ_0 は $-1.381, -0.311, 0, 1.760, 2.830$ ラジアンである。この中で $\xi_0 = 0$ ラジアンの場合は、FPMの構成は図11に一致する。それ以外の場合にはFPMは図15の構成になり、電界に誘起される位相変化には多数のEO係数やピエゾ係数が含まれることになる。 $\xi_0 = -1.381$ あるいは $\xi_0 = 1.760$ の位相変化は $\xi_0 = 0$ のそれよりも約5倍大きいので、駆動電圧は大幅に低減される。図15の構成で高い消光比を得るためには、 X_1 軸方向および X_2 軸方向に振動する直線偏光のもつ静的位相 θ_1, θ_2 が以下の位相整合条件を満足しなければならない。

$$\theta_1 = \frac{4\pi}{\lambda} n_{x1} L = 2m\pi, \quad (40)$$

$$\theta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} n_{x2} L = 2m'\pi, \quad (41)$$

ただし、 m, m' は異なる整数である。式(40)および式(41)が成立するとき、FPMの出力 I_R は以下の式で与えられる。

$$I_R = \frac{R}{4} \left| \frac{1 - \exp[-\gamma L + i(2m\pi + \delta\theta)]}{1 - R \exp[-\gamma L + i(2m\pi + \delta\theta)]} + \frac{1 - \exp[-\gamma L + i(2m'\pi + \delta\theta)]}{1 - R \exp[-\gamma L + i(2m'\pi + \delta\theta)]} \right|^2, \quad (42)$$

ここで、 $\delta\theta$ は、式(38)の $\delta\theta_{x1}$ あるいは式(39)の $\delta\theta_{x2}$ である。式(42)の計算結果を、図17に

示す(実線)。

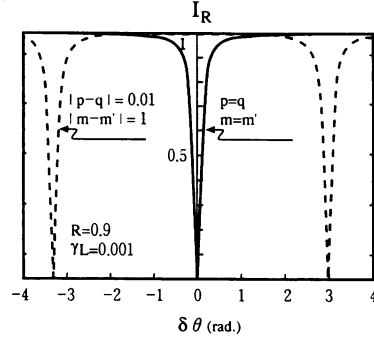


Fig. 17. Dependence of the intensity I_R of the output light of the FPM shown in Fig. 15 with $R = 0.9$ and $\gamma L = 0.001$ on the electro-optically induced phase difference $\delta\theta$ for several values of p .

図15の構成のFPMの半波長電圧 V_π は、以下の式で与えられる。

$$V_\pi = \lambda(2n_o^3)^{-1} \left[r_{22} \sin \xi_0 + r_{13} \cos \xi_0 - \frac{2}{n_o^2} (-d_{22} \sin^3 \xi_0 + d_{31} \sin^2 \xi_0 \cos \xi_0 + d_{33} \cos^3 \xi_0 + d_{15} \sin^2 \xi_0 \cos \xi_0) \right]^{-1}. \quad (43)$$

式(32)～式(34)から明らかなように、 X_1 軸方向および X_2 軸方向に振動する直線偏光は、それぞれ異なる屈折率 n_{x1} および n_{x2} を感じるから、式(40)および式(41)を同時に満足させるのは容易ではない。そこで、この位相整合条件を満たさない場合を考えよう。位相不整合のときのFPMの光出力 I_R は以下の式で与えられる。

$$I_R = \frac{R}{4} \left| \frac{1 - \exp\{-\gamma L + i[(2m+p)\pi + \delta\theta]\}}{1 - R \exp\{-\gamma L + i[(2m+p)\pi + \delta\theta]\}} + \frac{1 - \exp\{-\gamma L + i[(2m'+q)\pi + \delta\theta]\}}{1 - R \exp\{-\gamma L + i[(2m'+q)\pi + \delta\theta]\}} \right|^2, \quad (44)$$

ただし、 m は任意の整数、 p, q は位相整合条件からのずれの大きさを示し、 $|p| \leq 1, |q| \leq 1$ の範囲にあるゼロを除く実数である。 $R = 0.9, \exp(-\gamma L) = 0.0001, |m-m'| = 1, p = 0.06, q = 0.05$ として式(44)を計算した結果を図17に示す。(破線)4章の(1)～(3)の手法を用いて $|p-q| < 0.01$ 以内に収めることは可能であるが、 $|m-m'| = 1$ および $|p-q| < 0.01$ を同時に満たす条件を探すには、波長可変

Table 3. Biaxial EO Material Parameters^a

Material	Point Group	EO Coefficient (pm/V)	Refractive Index	Piezoelectric Strain Coefficient (pC/N)	Relative Dielectric Constant
KNbO ₃	mm2	$r_{13} = +28$ $r_{23} = +1.3$ $r_{33} = +64$ $r_{42} = 380$ $r_{51} = 105$	$n_1 = 2.280$ $n_2 = 2.329$ $n_3 = 2.169$		$k_1 = 160$ $k_2 = 1000$ $k_3 = 55$
Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅	mm2	$r_{13} = 15$ $r_{23} = 13$ $r_{33} = 48$ $r_{42} = 92$ $r_{51} = 90$	$n_1 = 2.326$ $n_2 = 2.324$ $n_3 = 2.221$	$d_{15} = 32$ $d_{24} = 45$ $d_{31} = -6.8$ $d_{32} = -6.9$ $d_{33} = 34$	$k_1 = 238$ $k_2 = 228$ $k_3 = 43$
Li(COOH)H ₂ O	mm2	$r_{13} = -1.0$ $r_{23} = +3.2$ $r_{33} = -2.6$ $r_{42} = +1.0$ $r_{51} = +2.4$	$n_1 = 1.3645$ $n_2 = 1.4784$ $n_3 = 1.5163$	$d_{15} = -15.0$ $d_{24} = +1.2$ $d_{31} = -2.1$ $d_{32} = -6.7$ $d_{33} = +9.2$	$k_1 = 4.5$ $k_2 = 5.0$ $k_3 = 6.0$

^aThe wavelength in all cases is 633 nm and the point group is mm2.

レーザと精密な結晶回転機構が必要となるであろう。

6. 2軸性EO結晶のFPMへの可能性

顕著なEO効果を示す2軸性結晶は、斜方晶系結晶の点群mm2である。このグループの代表的なEO結晶は、表3のKNbO₃、Ba₂NaNb₅O₁₅である。²⁹ 点群mm2では、 $r_{13} \neq r_{23}$ であるから、図15がFPMとして唯一可能な構成である。図15のX₁方向およびX₂方向に振動する光の印加電界Eによる位相変化 $\delta\theta_{X1}$ 、 $\delta\theta_{X2}$ は、式(32)、(33)で与えられる。ただしX₁およびX₂方向の屈折率 n_{X1} 、 n_{X2} 、EO効果による屈折率変化 Δn_{X1} 、 Δn_{X2} およびIP効果による結晶長変化 ΔL は、それぞれ次のように表される。

$$n_{X1} = n_1, \quad (45)$$

$$n_{X2} = \frac{n_2}{[\cos^2 \xi + (n_2/n_3)^2 \sin^2 \xi]^{1/2}}, \quad (46)$$

$$\Delta n_{X1} = -\frac{1}{2} n_1^3 E r_{13} \cos \xi, \quad (47)$$

$$\Delta n_{X2} = -\frac{1}{2} n_{X2}^3 E \cos \xi [r_{23} \cos^2 \xi + (r_{33} - 2r_{42}) \sin^2 \xi], \quad (48)$$

$$\Delta L = LE[(d_{32} + d_{24}) \sin^2 \xi \cos \xi + d_{33} \cos^3 \xi], \quad (49)$$

ここで n_1 、 n_2 、 n_3 はX₁、X₂、X₃方向の屈折率、 r_{13} 、 r_{23} 、 r_{33} 、 r_{42} はEO係数、 d_{24} 、 d_{32} 、 d_{33} は圧電定数である。

式(45)～(48)を式(32)、(33)に代入すると、次の式を得る。

$$\delta\theta_{X1} = -\frac{2\pi}{\lambda} n_1^3 V \left\{ r_{13} \cos \xi - \frac{2}{n_1^2} [(d_{32} + d_{24}) \sin^2 \xi \cos \xi + d_{33} \cos^3 \xi] \right\}, \quad (50)$$

$$\delta\theta_{X2} = -\frac{2\pi}{\lambda} n_{X2}^3 V \left\{ \cos \xi [r_{23} \cos^2 \xi + (r_{33} - 2r_{42}) \sin^2 \xi] - \frac{2}{n_{X2}^2} [(d_{32} + d_{24}) \sin^2 \xi \cos \xi + d_{33} \cos^3 \xi] \right\}. \quad (51)$$

表3のBa₂NaNb₅O₁₅結晶を例に取り、 $\delta\theta_{X1}$ 、 $\delta\theta_{X2}$ と ξ との関係を計算した。V=1000Vの場合を図18に示す。この図より $\delta\theta_{X1} = \delta\theta_{X2} = 0$ 以外は、両者が一致する角度はなく、この結晶は

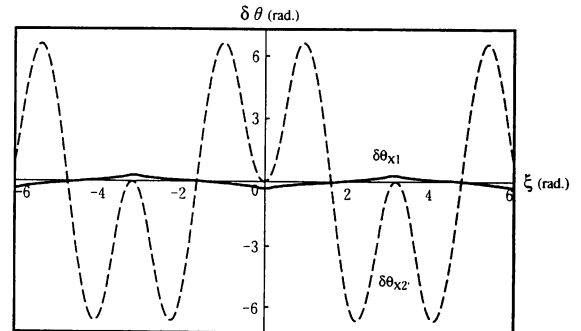


Fig. 18. Dependence of electro-optically induced phase differences $\delta\theta_{X1}$ and $\delta\theta_{X2}$ of the FPM consisting of Ba₂NaNb₅O₁₅ biaxial crystal on rotation angle ξ .

FPMには適さないことがわかる。その理由は、位相整合 ($\delta \theta_{x1} = \delta \theta_{x2'}$) が成立する条件を求めると理解できる。この条件から以下の式を得る。

$$\cos \xi = \pm \left[\frac{(n_1/n_{x2})^3 r_{13} - r_{33} + 2r_{42} + (d_{33} + d_{24})[(n_{x2} - n_1)/n_{x2}^3]}{r_{23} - r_{33} + 2r_{42} + (d_{32} + d_{24} - d_{33})[(n_{x2} - n_1)/n_{x2}^3]} \right]^{1/2}. \quad (52)$$

Ba₂NaNb₅O₁₅結晶のEO係数、圧電定数、屈折率などを式(52)に代入すると、以下の式を得る。

$$\cos \xi \approx \pm \left[\frac{(n_1/n_{x2})^3 r_{13} - r_{33} + 2r_{42}}{r_{23} - r_{33} + 2r_{42}} \right]^{1/2}. \quad (53)$$

上式が成立するためには、 $(n_1/n_{x2})^3 r_{13} \leq r_{23}$ が成立しなければならない。しかし表3が示すように、Ba₂NaNb₅O₁₅結晶ではこれは成立しない。したがって、 $\delta \theta_{x1} = \delta \theta_{x2'} = 0$ 以外は、位相整合することはなく、この結晶はFPMに不適である。

同じ理由で、KNbO₃結晶もFPMに適さない。位相整合条件を満たすのは、Li(COOH)H₂O (Lithium formate monohydrate)であるが、表3に示すようにそのEO係数は小さく応用面からは魅力に乏しい。

7. FPMに適したEO結晶の半波長電圧の比較

これまで述べた結晶点群に所属する代表的なEO結晶の半波長電圧を計算した。結果を表4に示す。ここで、 $\delta_n(\lambda/V_\pi)$ は、以下の式で与えられる。

$$\delta n = 2n_o^3 \left[r_{22} \sin \xi_0 + r_{13} \cos \xi_0 - \frac{2}{n_o^2} (-d_{22} \sin^3 \xi_0 + d_{31} \sin^2 \xi_0 \cos \xi_0 + d_{33} \cos^3 \xi_0 + d_{15} \sin^2 \xi_0 \cos \xi_0) \right]. \quad (54)$$

表4から、LiIO₃のV_πが最も小さいことが分かる。しかし、この結晶は潮解性を有するため、結晶が外気に触れないようにパッケージングに工夫が必要である。また、LiIO₃のピエゾ係数は0℃で測定された値であり、温度によってはこれが大きく変動する可能性もある。デバイス設計の前に室温でのピエゾ係数の測定が望まれる。

LiIO₃結晶に次いで小さなV_πを持つ結晶は、LiNbO₃結晶である。この結晶は電気光学特性が優れ、大型の単結晶が安価に手に入るため、最も実用的な材料である。図15の結晶構成では、FPMの入出力端面の法線と結晶のc軸とのなす角度が $\xi_0 = 101^\circ$ となるように結晶を加工しなければならないが、総合的に見てFPMに最適な材料であろう。

これらの結晶について有望な材料は、点群 $\bar{4}2m$ のKD₂PO₄である。KD₂PO₄は縦型光変調素子としては古典的な材料であり、大型結晶も育成できるが、潮解性があるため、LiIO₃結晶と同じ課題を抱えている。

点群23のシレナイト化合物系のBi₁₂SiO₂₀やBi₁₂GeO₂₀も有望な材料である。シレナイト系化合物は光導電性に基づく空間電荷効果(space-charge effect)や旋光性を有するため、これまで報

Table 4. Half-Wave Voltage of EO Materials^a

Material	Point Group	Half-Wave Voltage (V)	$ 2n^3 r_{ij} $ (pm/V)	$ 2n_o^3 r_{13} - 4n_o d_{33} $ (pm/V)	$ \delta n $	ξ_0 (deg)	Wavelength (nm)	Configuration
Bi ₁₂ SiO ₂₀	23	3820	166	—	—	—	633	Fig. 8
Bi ₁₂ GeO ₂₀	23	5860	111	—	—	—	633	Fig. 8
Bi ₁₂ TiO ₂₀	23	3690	172	—	—	—	633	Fig. 8
GaAs	$\bar{4}3m$	9680	119	—	—	—	1150	Fig. 8
GaP	$\bar{4}3m$	9000	70.3	—	—	—	633	Fig. 8
KH ₂ PO ₄	$\bar{4}2m$	7670	72	—	—	—	556	Fig. 8
KD ₂ PO ₄	$\bar{4}2m$	3020	181	—	—	—	546	Fig. 8
(NH ₄)H ₂ PO ₄	$\bar{4}2m$	9020	60.6	—	—	—	586	Fig. 8
Pb ₅ Ge ₃ O ₁₁	3	4160	152	—	—	—	633	Fig. 8
LiIO ₃	6	1040 (810)	—	610 (780)	—	—	633	Fig. 11
LiTaO ₃	3m	6650 (2480)	—	95.2 (255)	—	—	633	Fig. 11
		7780 (1670)	—	81.4 (378)	—	—	633	Fig. 11
LiNbO ₃	3m	1510 (1670)	—	—	418 (378)	101 (0)	633	Fig. 15
BaTiO ₃	4mm	4020 (425)	—	160 (1490)	—	—	633	Fig. 11
Li(COOH)H ₂ O	mm2	54,600 (145,000)	—	—	11.6 (4.36)	44.2 (46.3)	633	Fig. 15

^a δ_n is given by Eq. (54). The values in parentheses are the results calculated with the hypothesis in Section 8.

告されているEO係数の値に60%~100%のばらつきがある。²⁸ FPMを試作するためには、まずEO効果の正確な評価が必要であろう。 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ や $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 結晶は大型で高品質の単結晶が比較的容易に入手できるため、FPMの有望な材料であることは間違いない。

これらの結晶に次ぐ材料としては、点群4mmの BaTiO_3 結晶や点群3の $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ 結晶などがあるが、いずれも大型単結晶を育成することが困難であり、実用的でない。

点群43mのGaAs結晶はEO係数は小さいが、大きな屈折率を有しているため、赤外線領域での応用には有望である。ただし、FP-SLMとしては、GaAsやGaPなどの化合物半導体は酸化物結晶に比べて比抵抗が格段に小さいため、高解像度は望めないであろう。

8. EO係数 r_{ij} と圧電定数 d_{jk} の相対的符号

5-7章で得られた結果は、表2、表3に掲載したEO係数および圧電定数を用いて求められた。これらの数値は、この分野のバイブルともいえるべき文献[28]から引用されており、もっとも信頼性の高いデータである。しかしながら、EO係数と圧電定数の間の相対的な符号関係は、筆者が測定した KH_2PO_4 と $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ 結晶以外は、まったく知られていない。³⁰ EO効果やIP効果は古くからよく知られた物理現象であり、2つの物理定数の相対的な符号が不明なことは奇妙なことであるが、事実である。式(24)で明らかのように、光の位相変化には2つの物理現象が独立に現れるのだが、通常の結晶方位ではEO効果のほうがIP効果よりも格段に大きいため、IP効果が見落とされてしまったのだろうか。これまでの光変調素子に利用されている結晶方位では確かにIP効果は小さい。しかし、表4の解析結果が示すように、 LiIO_3 や LiNbO_3 結晶などの1軸性EO結晶を縦型光変調素子として用いる場合、IP効果は印加電圧の低減にきわめて有効であり、これを無視することはできない。

2種の光学定数の相対的符号が不明なもう一つの理由として、両定数がまったく異なる方法で測定されてきた事実が挙げられる。EO係数はMach-Zehnder干渉計やMichelson干渉計など光学的手法を用いて測定されてきた。一方、圧電定数は応力や歪によって発生する電荷の測定や、結晶に交流電圧を印加したときの共振周波数測定などエレクトロニクスの手法を駆使して求められてきた。このように2つの物理現象の測定方法は大きく異

なっている。

さらに、結晶を引き伸ばす力(張力)を正とする文献と、結晶を縮める力(圧縮力)を正とする文献が混在しており、圧電定数の符号自体が混乱気味であり、原著論文に遡って符号を引用する慎重さが要求される。³¹ そこで、本章では5-7章の解析で用いたEO係数と圧電定数の相対的符号関係と異なる符号を用いて半波長電圧の導出を試みた。その結果が表4の括弧内の数値である。表4の2つの結果を比較すると、 LiTaO_3 や BaTiO_3 結晶などでは、結果が相対的符号に大きく左右されることがわかる。FPMを試作するまえに、有望なEO結晶の2つの光学定数の相対的符号関係を明らかにすることが望ましい。筆者は、 LiNbO_3 および LiTaO_3 結晶の相対的符号測定の準備を進めている。

9. まとめ

この論文では、はじめに、EO結晶を用いたFP共振型空間光変調素子(FP-SLM)を提案した。FP-SLMの性能を左右するファブリ・ペロー型光変調器(FPM)の光出力と位相の関係を詳しく解析した。その結果、FPMを伝播する光の位相をEO結晶の電気光学効果で制御すれば、従来の光変調器に要する駆動電圧の数%から10%程度の小さな電圧で大きな光出力と高い消光比を同時に達成できることが分かった。

次に、様々なEO結晶の電気光学効果と逆圧電効果を詳細に検討し、光と印加電界の伝播方向がEO結晶の X_3 軸(c軸)と平行な2種類の結晶構成と、1軸性結晶の X_1 軸を中心に X_2 軸と X_3 軸を回転させる構成がFPMに適していることを明らかにした。また、これらの結晶構成に適した等軸性結晶、1軸性結晶および2軸性結晶の結晶点群を示した。このほか点群6mmと4もFPMに適したEO係数をもつが、これらは有望なEO結晶が見当たらないため、詳細な検討は行わなかった。

最後に、種類のEO結晶の半波長電圧を計算し、入出力端面の法線がc軸と101°の角度をなすように加工された LiNbO_3 結晶、 $\text{Bi}_{12}\text{SO}_{20}$ 結晶およびGaAs結晶などがFPMに適していることを明らかにした。また、 LiIO_3 結晶が表1から表3に掲げた結晶の中で最も小さな半波長電圧を有することを明らかにした。室温でもこの値が維持されれば、FP-SLMとして極めて有望な材料である。

FP-SLMは液晶を用いたSLMにない高速応答特性を有しているため、実時間画像処理、光コンピューティング、光ニューラルネットワークなど

多彩な分野での応用が期待される。

これらの分野に適用できるFP-SLMを実現するためには、次の研究が必要である。

- ① 有望なEO結晶について室温でのEO係数および圧電定数の符号を含めた精密な測定
- ② FPMの試作と光変調特性の評価（高消光比を達成するための静的位相の制御）
- ③ EO結晶、誘電体多層膜ミラー、光吸収膜および光導電材料を積層したFP-SLMの解像度の解析
- ④ FP-SLMの試作と空間光変調特性の評価
- ⑤ 実時間画像処理への応用

現在、①の準備に取り掛かっている。

【付録1】式(34)～(36)の導出

図15では X_3 軸に沿って印加された電界 E は X_2 軸および X_3 軸方向にそれぞれ、 $-E \sin \xi$, $E \cos \xi$ の電界成分をもつから、屈折率楕円体は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22}E \sin \xi + r_{13}E \cos \xi \right) X_1^2 \\ & + \left(\frac{1}{n_o^2} - r_{22}E \sin \xi + r_{13}E \cos \xi \right) X_2^2 \\ & + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E \cos \xi \right) X_3^2 - 2r_{51}E \\ & \times \sin \xi X_2 X_3 = 1. \quad (A1) \end{aligned}$$

回転前の座標 X_2, X_3 と回転後の座標 X_2', X_3' の間には次の関係が成立する。

$$X_2 = X_2' \cos \xi - X_3' \sin \xi, \quad (A2)$$

$$X_3 = X_2' \sin \xi + X_3' \cos \xi. \quad (A3)$$

式(A2), (A3)を式(A1)に代入すると、

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22}E \sin \xi + r_{13}E \cos \xi \right) X_1^2 \\ & + \left(\frac{1}{n_o^2} \cos^2 \xi + \frac{1}{n_e^2} \sin^2 \xi - r_{22}E \sin \xi \cos^2 \xi \right. \\ & + r_{13}E \cos^3 \xi + r_{33}E \sin^2 \xi \cos \xi \\ & \left. - 2r_{51}E \sin^2 \xi \cos \xi \right) X_2'^2 = 1. \quad (A4) \end{aligned}$$

となる。式(A4)より、式(34)～(36)が得られる。

【付録2】式(37)の導出

EO結晶に電界を印加すると、EO効果とともにIP効果による歪も発生する。EO結晶の圧電定数を d_{mi} 、結晶に印加する電界を E_m とすると、結晶に誘起される歪は、次式で与えられる。

$$S_i = d_{mi} E_m \quad (m=1 \sim 3, i=1 \sim 6). \quad (A5)$$

点群3mに属するLiNbO₃結晶は、次に示す圧電定数をもつ。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & -2d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (A6)$$

図15では X_3 軸に沿って印加された電界 E は X_2 軸および X_3 軸方向にそれぞれ、 $E_2 = -E \sin \xi$, $E_3 = E \cos \xi$ の電界成分をもつから、式(A5)の圧電定数は次式で与えられる。

$$S_1 = E(d_{22} \sin \xi + d_{31} \cos \xi), \quad (A7)$$

$$S_2 = E(-d_{22} \sin \xi + d_{31} \cos \xi), \quad (A8)$$

$$S_3 = E d_{33} \cos \xi, \quad (A9)$$

$$S_4 = -E d_{15} \sin \xi, \quad (A10)$$

$$S_5 = 0, \quad (A11)$$

$$S_6 = 0. \quad (A12)$$

歪は2階テンソルであるから、EO結晶を図15に示すように、 X_1 軸を中心に X_2 軸および X_3 軸を角度 ξ だけ回転させると、回転後の歪は以下の行列の各成分で与えられる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} S'_1 & \frac{S'_6}{2} & \frac{S'_5}{2} \\ \frac{S'_6}{2} & S'_2 & \frac{S'_4}{2} \\ \frac{S'_5}{2} & \frac{S'_4}{2} & S'_3 \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & -\sin \xi \\ 0 & \sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 & \frac{S_6}{2} & \frac{S_5}{2} \\ \frac{S_6}{2} & S_2 & \frac{S_4}{2} \\ \frac{S_5}{2} & \frac{S_4}{2} & S_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & \sin \xi \\ 0 & -\sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix}. \quad (A13) \end{aligned}$$

式 (A13) より、回転後の歪の各成分は次式で与えられる。

$$S'_1 = S_1, \quad (\text{A14})$$

$$S'_2 = S_2 \cos^2 \xi + S_3 \sin^2 \xi + S_4 \sin \xi \cos \xi, \quad (\text{A15})$$

$$S'_3 = S_2 \sin^2 \xi + S_3 \cos^2 \xi - S_4 \sin \xi \cos \xi, \quad (\text{A16})$$

$$S'_4 = 2(S_2 - S_3) \sin \xi \cos \xi + S_4 (\cos^2 \xi - \sin^2 \xi), \quad (\text{A17})$$

$$S'_5 = S_5 \cos \xi - S_6 \sin \xi, \quad (\text{A18})$$

$$S'_6 = S_5 \sin \xi + S_6 \cos \xi. \quad (\text{A19})$$

これらの歪成分の中で図15の構成で位相に影響を与えるのは、 X_3 軸方向の歪である。 S_3 は回転前の歪成分から成るから、式 (A15) ~ (A17) を式 (A9) に代入して、

$$S'_3 = E(-d_{22} \sin^3 \xi + d_{31} \sin^2 \xi \cos \xi + d_{33} \cos^3 \xi + d_{15} \sin^2 \xi \cos \xi). \quad (\text{A20})$$

を得る。この歪成分が X_3 軸方向の結晶長を

$$\Delta L = S'_3 L. \quad (\text{A21})$$

だけ変化させる。式 (A20) と (A21) より、式 (37) が導かれる。

参考文献

- 1 K.Takizawa, M.Okada, H.Kikuchi, and T. Aida, "Bistable spatial light modulator using liquid crystal and $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ crystal layers," *Appl. Phys. Lett.* **53**, 2359-2361 (1988).
- 2 D. Armitage, J. I. Thackara, and W. D. Eades, "Photo-addressed liquid crystal spatial light modulators," *Appl. Opt.* **28**, 4763-4771 (1989).
- 3 K.Takizawa, H. Kikuchi, T. Aida, and M. Okada, "Optical parallel logic gate using a Pockels readout optical modulator and twisted nematic liquid-crystal cells," *Opt. Lett.* **14**, 208-210 (1989).
- 4 H. Fujikake, K.Takizawa, and H. Kikuchi, "Bistable spatial light modulator using guest-host liquid crystal and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ photoconductive crystal," *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 842-848 (1993).
- 5 T. Aida, K.Takizawa, H. Kikuchi, and M. Okada, "Optical parallel logic processor using a liquid crystal light valve and twisted nematic liquid crystal cells," *Japanese Journal of Optics* **21**, 724-729 (1992).
- 6 Y. Kobayashi, T. Takemori, N. Mukohzaka, N. Yoshida, and S. Fukushima, "Real-time velocity measurement by the use of a speckle-pattern correlation system that incorporates a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator," *Appl. Opt.* **33**, 2785-2794 (1994).
- 7 B. Javidi, G. Zhang, A. H. Fazlollahi, and U. Efron, "Application of a wire-grid-mirror liquid-crystal light valve in a nonlinear joint transform correlator," *Appl. Opt.* **33**, 2834-2841 (1994).
- 8 M.Ishikawa, N. Mukohzaka, H.Toyoda, and Y. Suzuki, "Optical associatron: a simple model for optical associative memory," *Appl. Opt.* **28**, 291-301 (1989).
- 9 D. R. Collins, J. B. Sampsel, L. J. Hornbeck, J. M. Florence, P. A. Penz, and M. T. Gately, "Deformable mirror device spatial light modulators and their applicability to optical neural network," *Appl. Opt.* **28**, 4900-4907 (1989).
- 10 T. T. True, "High-performance video projector using two oil-film light valves," in *Technical Digest of the Society for Information Display international Symposium 18(Society for Information Display, Santa Ana, Calif. 1987)*, pp.68-71.
- 11 V. J. Fritz, "Full-color, liquid crystal light valve projector for shipboard use," in *Large Screen and Projection Displays II*, W.P.Bleha, ed., *Proc.SPIE* **1225**, 59-68 (1990).
- 12 R. A. Forber, A. Au. Efron, K. Sayyah, and S. T. Wu, "Dynamic IR scene projection using the Hughes liquid crystal light valve," in *Liquid Crystal Materials, devices, and Application*, P. S. Drzaic and U. Efron, eds., *proc. SPIE* **1665**, 259-273 (1992).
- 13 K.Takizawa, H. Kikuchi, H. Fujikake, Y. Namikawa, and K. Tada, "Reflection mode polymer-dispersed liquid crystal light valve," *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 1346-1351 (1994).
- 14 K.Takizawa, T. Fujii, M. Kawakita, H. Kikuchi, H. Fujikake, M. Yokozaawa, A. Murata, and K. Kishi, "Spatial light modulators for projection displays," *Appl. Opt.* **36**, 5732-5747 (1997).
- 15 K.Takizawa, T. Fujii, H. Kikuchi, H. Fujikake, M. Kawakita, Y. Hirano, and F. Sato, "Spatial

- light modulators for high-brightness projection displays," *Appl. Opt.* **38**, 5646-5655 (1999).
- 16 B. A. Horwitz and F. J. Corbett, "The PROM-theory and applications for Pockels readout optical modulator," *Opt. Eng.* **17**, 353-364 (1978).
 - 17 T. Minemoto, K. Okamoto, and K. Miyamoto, "Optical parallel logic gate using spatial light modulators with the Pockels effect," *Appl. Opt.* **24**, 2055-2062 (1985).
 - 18 C. Warde, A. D. Fisher, D. M. Cocco, and M. Y. Burmawi, "Microchannel spatial light modulator," *Opt. Lett.* **3**, 196-198 (1978).
 - 19 C. Warde and J. I. Thackara, "Oblique-cut LiNbO₃ microchannel spatial light modulator," *Opt. Lett.* **7**, 344-346 (1982).
 - 20 C. Warde and J. Thackra, "Operating modes of the microchannel spatial light modulator," *Opt. Eng.* **22**, 695-703 (1983).
 - 21 A. Schwartz, X-Y. Wang, and C. Warde, "Electron-beam-addressed Microchannel spatial light modulator," *Opt. Eng.* **24**, 119-123 (1985).
 - 22 T. Hara, K. Shinoda, T. Kato, M. Sugiyama, and Y. Suzuki, "Microchannel spatial light modulator having the functions of image zooming, shifting, and rotating," *Appl. Opt.* **25**, 2306-2310 (1986).
 - 22 T. Hara, K. Shinoda, T. Kato, M. Sugiyama, and Y. Suzuki, "Microchannel spatial light modulator having the functions of image zooming, shifting, and rotating," *Appl. Opt.* **25**, 2306-2310 (1986).
 - 23 T. Hara, Y. Ooi, Y. Suzuki, and M. H. Wu, "Transfer characteristics of the Microchannel spatial light modulator," *Appl. Opt.* **28**, 4781-4786 (1989).
 - 24 T. Hara and Y. Suzuki, "Microchannel spatial light modulator," *Optoelectronics-Devices and Technologies* **10**, 393-420 (1995).
 - 25 Y. Kocher, G. Lebreton, and B. Moreau, "The TITUS light modulator in optical processing," in *Optical Computing '88*, P. H. Charel, J. W. Goodman, and G. Roblin eds., *Proc. SPIE* **963**, 66-77 (1988).
 - 26 Y. Bitou and T. Minemoto, "High-contrast spatial light modulator by use of the electroabsorption and the electro-optic effects in a GaAs single crystal," *Appl. Opt.* **37**, 4347-4356 (1998).
 - 27 M. Born and E. Wolf, *Principle of Optics, sixth edition*, (Pergamon Press, Tokyo 1980) pp. 66-70.
 - 28 K. -H. Hellwege, Editor in chief, *LANDOLT B_RNSTEIN, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series, Group III: Crystal and Solid State Physics, Vol. 11, Elastic, Piezoelectric, Pyroelectric, Piezooptic, Electrooptic Constants, and Nonlinear Dielectric Susceptibilities of Crystals* (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1979) pp. 287-670.
 - 29 K. Takizawa and M. Okada, "Simple method for measuring electro-optic coefficients by detecting the interference signal between transmitted and reflected beams," *J. Opt. Soc. Am.* **72**, 809-811 (1982).
 - 30 K. Takizawa and M. Okada, "Determination of relative signs of electro-optic and piezoelectric coefficients by measuring optical phase shifts caused by an applied electric field," *J. Opt. Soc. Am. B* **2**, 289-293 (1985).
 - 31 小川智哉:"結晶物理工学", 裳華房, p.95 (1976).