

電気光学効果と逆圧電効果を利用した縦型光変調素子

滝沢國治^{*1}, 小林慎治^{*2}, 菊池 宏^{*3}

Longitudinal light modulators based on the electrooptic and inverse-piezoelectric effects

Kuniharu TAKIZAWA^{*1}, Shinji KOBAYASHI^{*2}, Hiroshi KIKUCHI^{*3}

ABSTRACT : This paper describes novel longitudinal light modulators using LiNbO₃ single-crystal. The operation principle of the device is based on the electrooptic (EO) and inverse-piezoelectric (IP) effects. LiNbO₃ crystal is optically uniaxial and belongs to point group 3m of trigonal crystal. It has large EO coefficients r_{33} , r_{51} and a large piezoelectric constant d_{15} . It was found from the analysis of the optical phase change caused by the EO and IP effects in the LN crystal that -60.15° Z-cut structure is the most suitable for the longitudinal light modulator because three optical coefficients mentioned above are efficiently contributed to the modulation. Experimental results using several Z-cut LiNbO₃ crystals with different cut-angle supported the analytical results.

KEYWORDS : Electrooptic effect, Piezoelectric effect, LiNbO₃, Longitudinal light modulator

(Received March 22, 2004)

1. まえがき

電気光学 (EO) 効果は印加電界で物質の屈折率が変化する現象であり、直流からマイクロ波領域まで及んでいるため、光変調器や光スイッチなど様々なデバイスに活用されている。これらの素子は印加電界による光の位相変化を干渉で光の強度変化に変える、あるいはこの位相変化により光の伝播方向を変化させるなどの原理に基づいている。

EO効果を利用した多くのデバイスでは、屈折率のみならず光路長変化が位相変化に影響を与える。¹⁻⁵ すなわち、EO結晶は圧電性を有するため結晶に電界を加えると、電界の大きさに比例して結晶長が変化する。これは圧電効果 (固体を押すと電荷が生じる現象) の逆の現象であり、逆圧電 (IP) 効果と呼ばれる。IP効果と類似の現象に電歪 (固体の形状変化が印加電界の2乗に比例する現象) があるが、その大きさはIP効果に比べて一般に非常

に小さいので、ここでは省略する。EO効果にも屈折率変化が印加電界の大きさに比例する1次のEO効果 (別称: ポッケルス効果) と印加電界の2乗に比例する2次のEO効果 (別称: カー効果) がある。ここでも2次のEO効果は1次のEO効果に比べて格段に小さいため、本論文では、2次のEO効果を省略して、1次のEO効果 (以後は単にEO効果と呼ぶ) のみを取り扱うことにする。

本論に戻ろう。IP効果により生じた歪は光路長変化のほか、光弾性効果により屈折率にも影響を与える。この屈折率変化は歪一定状態 (constant strain) のEO効果による屈折率変化と合わせて、応力一定状態 (constant stress) のEO効果に含まれる。2つの屈折率変化に関係する光学定数は、応力一定状態のEO係数 r_{ij}^T (r_{ij} はEO係数。上付き文字のTは応力一定状態を示す。本論文ではこれ以降添え字Tを省略する) としてよく知られている。^{6, 7}

このようにIP効果によって生じた光弾性効果はよく理解され、EO係数 r_{ij} に組み込まれてきたが、不思議なことにIP効果に基づく光路長変化の効果には殆ど注意が払われなかった。この問題はこれまで報告されてきた種々のEO係数測定法を調べるとよく理解できる。

EO係数 r_{ij} を精密に測定する方法として、Michelson干渉法、⁸ Mach-Zehnder干渉法、⁹ Senarmont法、^{7, 10} 反射光干

^{*1} 物理情報工専攻教授 (takizawa@apm.seikei.ac.jp)
Professor, Department of Applied Physics)

^{*2} 物理情報工学専攻大学院生 [現: 富士写真フイルム(株)]

^{*3} 日本放送協会放送技術研究所

渉法^{1, 2, 11}などが知られている。これらの計測法では試料であるEO結晶に電界を加えることによって生じる1つの位相変化を測定してEO係数を求めてきた。しかし、前にも述べたように電界によって生じる位相変化には、EO効果による屈折率変化とIP効果による結晶長変化が含まれているため、1つの測定値から求めたEO係数 r_{ij} には、光弾性効果による圧電定数のほかに、IP効果による圧電定数も含まれてしまう。言い換えると、これまでのEO係数測定法では、IP効果による結晶サイズ変化をEO効果や光弾性効果による屈折率変化に取り込んでしまっていたことになる。

EO効果の物理を考える場合、あるいはEOデバイスを実際に設計する場合においてもこれは見逃せない問題である。特に、 LiNbO_3 (LN)、 LiTaO_3 、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 、 BaTiO_3 、 GaAs 、 InP など大きな圧電定数を有する結晶あるいは圧電定数がEO係数と同程度の大きさを持つ結晶では、利用する結晶方位によってはデバイス設計を大幅に見直さなければならない。

この問題が最も顕著に現れるのは、LN結晶を用いた縦型光変調素子である。この素子を用いた代表的なデバイスとしてMSLM (Micro-channel spatial light modulator) と呼ばれる空間光変調素子がある。¹²MSLMには55°ZカットLN結晶が用いられているが、実用化されている素子の動作が設計と大きく異なることが問題になっている。¹³そこで本論文では、IP効果にも十分考慮しながら画像処理に独特の地位を築いてきた縦型LN光変調素子の動作解析を見直す。第2章および第3章では、縦型LN光変調素子のEO効果とIP効果に基づく位相変化を解析し、縦型変調素子として最適な結晶方位が従来と大きく異なることを明らかにする。第4章および第5章では、解析結果に基づいて試作した縦型変調素子の変調特性を測定し、解析結果が正しいことを示す。第6章は結論である。

2. LN結晶を用いた縦型光変調素子の位相変化

2.1 LN縦型光変調素子の構造

LN結晶を用いた縦型光変調素子は、図1に示すように、 x_1 軸を中心にして、 (x_2, x_3) 面を角度 q だけ反時計回りに回転させた新座標軸の x_3 軸に光と電界を伝搬させる構成が一般的である。この縦型光変調素子において、 i 軸方向に振動しながら x_3 軸方向に進む直線偏光の位相変化 f_i は、EO効果とIP効果を考慮すれば次式で表される。

$$f_i = \frac{2p}{l}(n_i + \Delta n_i)(l + \Delta l) \quad (1)$$

$$\approx \frac{2p}{l}n_i l + \frac{2p}{l}\Delta n_i l + \frac{2p}{l}n_i \Delta l$$

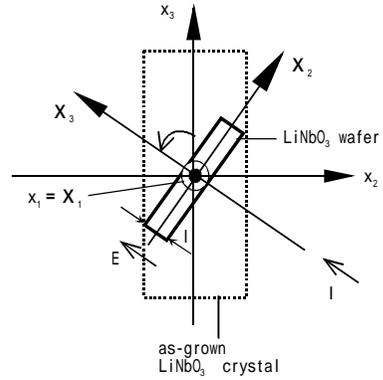


図1 LN結晶の方位

ただし、 i は1あるいは2であり、 n_i と Δn_i は i 軸方向に振動する直線偏光が感じる屈折率およびEO効果による屈折率変化である。 l と Δl_3 は x_3 軸方向の結晶長およびIP効果による結晶長変化である。EO効果による屈折率変化 Δn_i およびIP効果による結晶長変化 Δl は次の手順で求められる。

2.2 Δn_i の導出

図1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、 $-E \sin q$ 、 $E \cos q$ 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。

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22}E \sin q + r_{13}E \cos q\right)x_1^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} - r_{22}E \sin q + r_{13}E \cos q\right)x_2^2 \quad (2)$$

$$+ \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33}E \cos q\right)x_3^2 - 2r_{51}E \sin q x_2 x_3 = 1.$$

ここで、 n_o はLN結晶の常光線屈折率、 n_e は異常光線屈折率、 r_{22} 、 r_{13} 、 r_{33} 、 r_{51} はEO係数である。図1の回転前の座標 x_1, x_2, x_3 と回転後の座標 X_1, X_2, X_3 の間には次の関係が成立する。

$$x_1 = X_1 \quad (3)$$

$$x_2 = X_2 \cos q - X_3 \sin q$$

$$x_3 = X_2 \sin q + X_3 \cos q.$$

式(3)を式(2)に代入すると、

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22}E \sin q + r_{13}E \cos q\right)X_1^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} \cos^2 q + \frac{1}{n_e^2} \sin^2 q \right. \quad (4)$$

$$\left. - r_{22}E \sin q \cdot \cos^2 q + r_{13}E \cos^3 q + r_{33}E \sin^2 q \cdot \cos q \right. \\ \left. - 2r_{51}E \sin^2 q \cdot \cos q\right)X_2^2 + X_3^2 = 1$$

となる。式(4)は交差項のない屈折率楕円体の形式で表されているから、これから簡単に以下の式が導かれる。

$$\Delta n_1 = -\frac{n_o^3}{2}(r_{22}\sin\mathbf{q} + r_{13}\cos\mathbf{q}) \quad (5)$$

$$\Delta n_2 = -\frac{n_{x_3}^3 E}{2} \left(\begin{array}{l} -r_{22}\sin\mathbf{q}\cos^2\mathbf{q} + r_{13}\cos^3\mathbf{q} \\ +r_{33}\sin^2\mathbf{q}\cos\mathbf{q} - 2r_{31}\sin^2\mathbf{q}\cos\mathbf{q} \end{array} \right) \quad (6)$$

$$n_{oe} = \frac{n_o}{\sqrt{\cos^2\mathbf{q} + \left(\frac{n_o}{n_e}\right)^2 \sin^2\mathbf{q}}} \quad (7)$$

2.3 Δl の導出

LN 結晶のピエゾ係数を d_{mi} , 結晶に印加する電界を E_m とすると, LN 結晶に誘起される歪 S_i は次式で与えられる。

$$S_i = d_{mi}E_m \quad (m = 1 \sim 3, i = 1 \sim 6). \quad (8)$$

式(8)に $E_2 = -E\sin\mathbf{q}$, $E_3 = E\cos\mathbf{q}$ を代入すると, 歪は次式で与えられる。

$$S_1 = E(d_{22}\sin\mathbf{q} + d_{31}\cos\mathbf{q}), \quad (9)$$

$$S_2 = E(-d_{22}\sin\mathbf{q} + d_{31}\cos\mathbf{q}), \quad (10)$$

$$S_3 = Ed_{33}\cos\mathbf{q}, \quad (11)$$

$$S_4 = -Ed_{15}\sin\mathbf{q}, \quad (12)$$

$$S_5 = Ed_{33}\cos\mathbf{q}, \quad (13)$$

$$S_6 = 0. \quad (14)$$

式(9)～(14)は旧座標 x_1, x_2, x_3 における歪であるから, 図1の回転後の新座標 X_1, X_2, X_3 での歪 S'_j は以下の行列の各成分で与えられる。

$$\begin{pmatrix} S'_1 \\ \frac{S'_6}{2} \\ \frac{S'_5}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{S'_6}{2} \\ S'_2 \\ \frac{S'_4}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{S'_5}{2} \\ \frac{S'_4}{2} \\ S'_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\mathbf{q} & -\sin\mathbf{q} \\ 0 & \sin\mathbf{q} & \cos\mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} S'_1 \\ \frac{S'_6}{2} \\ \frac{S'_5}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{S'_6}{2} \\ S'_2 \\ \frac{S'_4}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{S'_5}{2} \\ \frac{S'_4}{2} \\ S'_3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\mathbf{q} & \sin\mathbf{q} \\ 0 & -\sin\mathbf{q} & \cos\mathbf{q} \end{bmatrix}.$$

式(15)より, 回転後の歪の各成分は次式で与えられる。

$$S'_1 = S_1, \quad (16)$$

$$S'_2 = S_2 \cos^2\mathbf{q} + S_3 \sin^2\mathbf{q} - S_4 \sin\mathbf{q} \cdot \cos\mathbf{q}, \quad (17)$$

$$S'_3 = S_2 \sin^2\mathbf{q} + S_3 \cos^2\mathbf{q} + S_4 \sin\mathbf{q} \cdot \cos\mathbf{q}, \quad (18)$$

$$S'_4 = 2(S_2 - S_3) \sin\mathbf{q} \cdot \cos\mathbf{q} + S_4 (\cos^2\mathbf{q} - \sin^2\mathbf{q}), \quad (19)$$

$$S'_5 = S_5 \cos\mathbf{q} + S_6 \sin\mathbf{q}, \quad (20)$$

$$S'_6 = -S_5 \sin\mathbf{q} + S_6 \cos\mathbf{q}. \quad (21)$$

これらの歪成分の中で図1の構成で光の位相に影響を与えるのは, X_3 軸方向の歪 S'_3 である。 S'_3 は回転前の歪成分 S_2, S_3, S_4 から成るから, 式(10)～(12)を式(18)に代入して,

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

を得る。この歪成分 S'_3 は X_3 軸方向の結晶長 ℓ を下式のように変化させる。

$$\Delta\ell = S'_3 \ell \quad (23)$$

式(5)～(7)および式(22), (23)を式(2)に代入すると, X_1 軸および X_2 軸方向に振動する直線偏光の位相 f_1, f_2 は, 以下の式で与えられる。

$$f_1 = \frac{pV}{l} [-n_o^3 (r_{22} \sin\mathbf{q} + r_{13} \cos\mathbf{q}) + 2n_o \{-d_{22} \sin^3\mathbf{q} + (d_{31} + d_{15}) \sin^2\mathbf{q} \cos\mathbf{q} + d_{33} \cos^3\mathbf{q}\}] \quad (24)$$

$$f_2 = \frac{pV}{l} [-n_{oe}^3 (-r_{22} \sin\mathbf{q} \cos^2\mathbf{q} + r_{13} \cos^3\mathbf{q} + r_{33} \sin^2\mathbf{q} \cos\mathbf{q} - 2r_{31} \sin^2\mathbf{q} \cos\mathbf{q}) + 2n_{oe} \{-d_{22} \sin^3\mathbf{q} + (d_{31} + d_{15}) \sin^2\mathbf{q} \cos\mathbf{q} + d_{33} \cos^3\mathbf{q}\}] \quad (25)$$

ここで, V は LN 結晶に加える電圧 ($= E / l$) である。

式(24), (25)より, LN 結晶を通過する直線偏光の位相変化は, EO 効果と IP 効果に大きく依存することがわかる。ただし n_o と n_e は近い値を持つため, リタデーション

$f = f_2 - f_1$ では IP 効果の影響を無視しても実用上差し支えない。

3. 解析結果

LN 結晶の圧電定数および波長 $\lambda = 632.8$ nm で計測したときの EO 係数を表1に示す。⁶ EO 係数同士あるいは圧電定数同士の符号は表1に示されるように既に明らかであるが, EO 係数と圧電定数の相対的な符号は不明である。そこでここでは, EO 係数 (これ以降 r_{ij} を r と略す) と圧電定数 (これ以降 d_{ji} を d と略す) の符号が一致 ($rd > 0$ と表す), 不一致 ($rd < 0$), および逆圧電効果は無視する場合 ($d = 0$) の3つのケースについて, f_1, f_2, f と回転角度 \mathbf{q} との関係性を計算してみよう。

表 1 LN 結晶の光学定数⁷
($\lambda = 632.8\text{nm}$)

屈折率	EO 係数 (pm/V)	圧電定数 (pC/N)
$n_o = 2.2868$	$r_{13} = +9.6$	$d_{31} = -0.86$
	$r_{22} = +6.8$	$d_{22} = +20.7$
$n_c = 2.2030$	$r_{33} = +30.9$	$d_{33} = +16.2$
	$r_{51} = +32.6$	$d_{15} = +74.0$

図 2 は,EO 係数と圧電定数の符号が一致するケースである。図 3 は,EO 係数と圧電定数の符号が不一致のケースである。図 4 は全ての圧電定数をゼロと仮定した従来の縦型光変調素子の f_1 , f_2 , f と回転角度 q との関係である。図 2 ~ 図 4 の印加電圧 V は,いずれも 2 kV である。これらの図を比較すると,リタデーション f はどの図も殆ど一致するが,位相 f_1 , f_2 は逆圧電効果の有無およびEO 係数と圧電定数の相対的な符号関係に大きく依存することが分かる。

これらの結果から f_1 , f_2 , f の半波長電圧を求める。半波長電圧はこれらの位相あるいは位相差を 0 から π ラジアンまで変化させるのに必要な最小電圧であり,縦型光変調素子では,この値が小さいことが特に望まれている。図 2 ~ 図 4 より得られる最小半波長電圧とその回転角度 q を表 2 にまとめて示す。

従来の EO 効果のみを考慮した場合の f_1 の最小半波長電圧は, 4.50 kV ($q = -144.7^\circ$) であるのに対し, EO 効果と IP 効果を考慮した場合の f_1 の最小半波長電圧は, 2 種類の定数の符号が一致する場合および不一致の場合で,それぞれ 2.88 kV ($q = -69.5^\circ$) および 2.49 kV ($q = -141.9^\circ$) である。同様に, f_2 の半波長電圧は, EO 効果のみを考慮した場合は, 4.31 kV ($q = -123.85^\circ$) であるのに対し, EO 効果と IP 効果を考慮した場合の最小半波長電圧は, 2 種類の定数の符号が一致する場合および不一致の場合で,それぞれ 2.09 kV ($q = -60.15^\circ$) および 3.27 kV ($q = -6.3^\circ$) である。 f_1 , f_2 とともに半波長電圧が大幅に減少していることがわかる。以上の結果より, 駆動電圧が最小になるのは, EO 係数と圧電定数の符号が一致し,かつ, $q = -60.15^\circ$ のときであり,その条件下での半波長電圧は,従来の縦型光変調素子に比べ 50% 以下に低減することが示された。

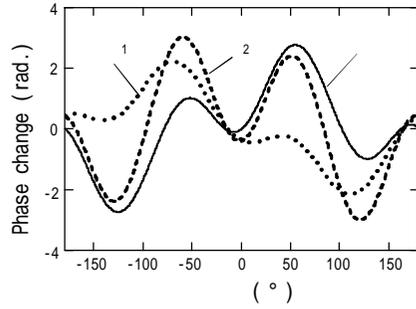


図 2 位相変化と回転角度の関係
(2 kV 印加時, $rd > 0$ と仮定)

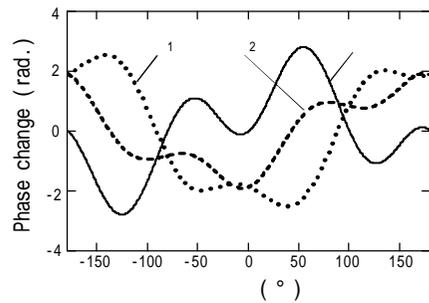


図 3 位相変化と回転角度の関係
(2 kV 印加時, $rd < 0$ と仮定)

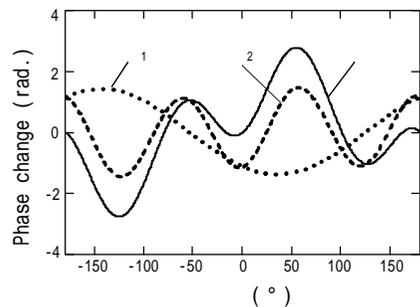


図 4 位相変化と回転角度の関係
(2 kV 印加時, $d = 0$ と仮定)

表2 半波長電圧 V と回転角度 q の関係 (計算結果)

対的符号	位相変化, 位相差	回転角度 q (°)	半波長電圧(kV)
rd>0	f_1	-69.5	2.88
	f_2	-60.15	2.09
	f	-126.1	2.29
rd<0	f_1	-141.9	2.49
	f_2	-6.3	3.27
	f	-126.2	2.25
d=0	f_1	-144.7	4.5
	f_2	-123.9	4.31
	f	-126.1	2.27

4. 動作原理と測定系

前章の解析を検証するため、 $q = 0^\circ, -60.6^\circ, -82.05^\circ, -103^\circ, -125^\circ, -127.2^\circ$ の Z カット LN 結晶 (結晶厚 $\ell = 2$ mm) の両研磨面に透明電極 (膜厚 55nm) を蒸着して、6 種類の縦型光変調素子を試作した。一例を図 5 に示す。これらの光変調素子を図 6 のマイケルソン干渉計内部の 1 つの光路に設置し、それらの変調特性を測定した。位相変調特性の測定では、 X_1 軸または X_2 軸方向に振動する直線偏光を光変調素子に入力し、2 光路を伝播するレーザー光の干渉光強度を光検出器で測定した。ここで、位相変化の相対的な符号関係は印加電圧の増減に対する干渉縞の移動方向から判断した。LN 変調素子に三角波電圧 (周波数 800Hz) を加え、光検出器の出力をオシロスコープおよび FFT アナライザに入力して、半端長電圧 V_p を測定した。一方、強度変調特性の測定では、光路を 1 つにするため図 6 のミラー 1 を除くとともに、光検出器前段に検光子を置いて直交ニコル反射型光学系を構成した。この光学系では、偏光子と検光子の光透過軸の交差角度は 90 度、偏光子の光透過軸と LN 結晶の X_1 軸は 45 度の関係にある。ここで注意すべきことは、図 6 の縦型光変調素子はレーザー光が素子内部を往復する反射型であり、その位相変化の大きさは透過型素子 (レーザー光が素子内部を 1 度通過するタイプ) のその 2 倍となることである。

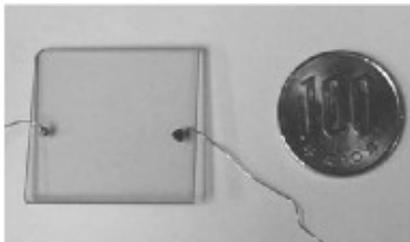


図 5 LN 縦型光変調素子

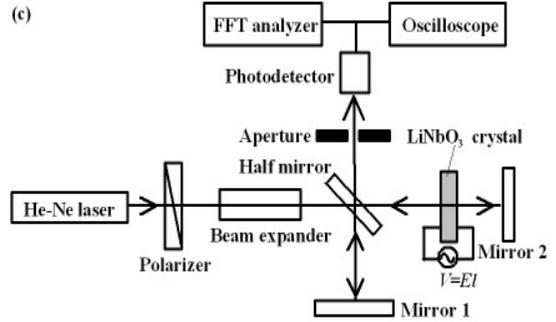


図 6 Michelson 干渉計を利用した EO 係数測定システム

5. 光変調特性

図 7 は、 $V = 2$ kV, $\lambda = 632.8$ nm の条件で得られた位相変化 f_1, f_2 および位相差 $Df (= f_2 - f_1)$ の回転角度 q 依存性の計算結果および実験結果である。実線、点線および破線は f_1, f_2, f の計算結果、 \times, \circ, \square は、それぞれ f_1, f_2, f の実験結果である。EO 係数 (r) と圧電定数 (d) の相対的な符号が不明であることから、符号が一致 ($rd > 0$)、不一致 ($rd < 0$)、および IP 効果を無視 ($d = 0$) すると仮定したときの計算結果と実験結果を、図 7(a) から (c) に示す。なお、同図の実験結果は、図 6 の反射型変調素子で得られた半波長電圧 $V_p (= V_p / 2)$ より算出された透過型光変調素子の位相変化 ($f = pV / 2 V_p$) である。

図 7 の強度変調特性は、計算結果 (実線) と実験値 () がすべての仮定でよく一致している。これより強度変調では、IP 効果を無視しても差し支えないことがわかる。強度変調に必要な最小の V_p は、 $q = -125^\circ (= 55^\circ)$ で 2.0 kV であり、これは従来報告されている値¹³ に非常に近い。

一方、位相変調特性における f_1 と f_2 の相対的な符号関係は、図 7(a), (b), (c) に示されるように $q = 0^\circ, -60.6^\circ, -82.05^\circ$ の素子で同符号、他の素子では異符号となる実験結果が得られた。

これらのなかで $rd > 0$ の場合 (図 7(a)) が計算結果とよく一致した。また、図 7(a), (b), (c) の $q = 55^\circ$ における f_1, f_2 の実験値をこれまで報告されている実験値 (f_1 では $V_p = 5.6$ kV, f_2 では $V_p = 2.6$ kV¹⁴) と比べると、図 7(a) がよく一致した。これらの事実を総合すると、図 7(a), (b), (c) では (a) が正しいと推論される。すなわち、LN 結晶においては、EO 係数と圧電定数の相対的な符号は同一であると思われる。ただし、これは LN 結晶を用いた縦型光変調素子の変調特性から得られた間接的な結果であり、両定数の相対的な符号関係を直接測定することが望ましい。これは今後の課題である。

縦型 LN 光変調素子の最小 V_p は両定数が同符号のときの位相変化 θ_2 で生じ、その値は $q = -60.6^\circ$ で 1.92 kV であった。この値は、これまで最も効率的な変調ができると考えられてきた $d = 0$ の場合 (図 7(c)) における $q = 55^\circ$ の計算値 4.32 kV に比べて 1/2 以下であった。

これらの結果は、式 (23) および式 (24) において、LN 結晶のもつ大きな圧電定数 d_{15} が EO 係数に対して対等あるいはそれ以上の大きさを有するためと考察される。本章の実験結果は、本論文で提案する動作解析モデルが正しいこと、および IP 効果を利用すれば従来 EO 効果のみで設計された光変調素子の駆動電圧を大幅に低減できることを示している。

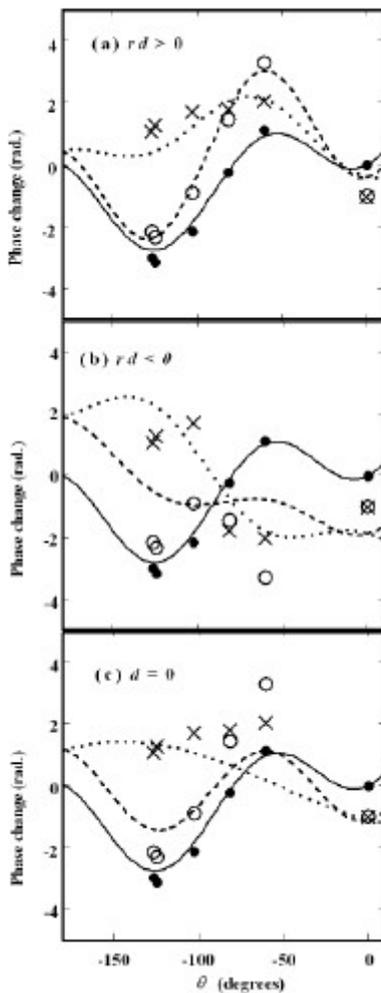


図 7 LN 縦型光変調素子の位相変化と回転角度の関係
計算結果 (実線、点線、破線) と実験結果 (×、
、) の比較

6. むすび

LN 結晶を用いた縦型光変調素子の EO 効果と IP 効果に基づく光変調特性を解析するとともに、結晶方位の異なるいくつかの縦型 LN 変調素子を試作し、それらの光変調特性を実験した。その結果、位相変調には IP 効果が大きく作用していることが判明した。また、LN 結晶の EO 係数と圧電定数の相対的な符号関係は一致しており、位相変調時の最小半波長電圧は、最適回転角度 $q = -60.6^\circ$ において 1.92 kV であった。この値は従来の位相変調時の半波長電圧の 50% 以下であり、IP 効果を考慮した素子設計を行えば印加電圧を大幅に軽減できることが明らかになった。

今回の結果は LN 結晶に留まらない。LN 結晶と同じ三方晶系の点群 3 m に所属する LiTaO_3 結晶、正方晶系の点群 4 mm の BaTiO_3 結晶、立方晶系の点群 23 の $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ や $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 結晶、立方晶系の点群 $\bar{4}3m$ の GaAs や InP 結晶など大きな圧電定数を有する結晶、あるいは圧電定数が EO 係数と同程度の大きさを持つ結晶を用いて位相変調素子を設計する場合には、IP 効果を十分考慮しなければならない。

参考文献

1. 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).
2. K. Takizawa and M. Okada, "Determination of relative signs of electro-optic and piezoelectric coefficients by measuring optical phase shifts by an applied electric field," J. Opt. Soc. Am. B **2**, 289-293 (1985).
3. K. Takizawa, "Analysis of electro-optic crystal-based Fabry-Perot etalons for high-speed spatial light modulators," Appl. Opt. **42**, 1052-1067 (2003).
4. 小林慎治, 菊池 宏, 滝沢國治, 「ポッケルス効果と逆圧電効果を利用した縦型光変調素子の設計」 信学論 C, J86-C, 83-85 (2003).
5. 菊池 宏, 小林慎治, 滝沢國治, 「ポッケルス効果と逆圧電効果に基づく縦型光変調素子の解析と実験的検証」 信学論 C, J87-C, 276-277 (2004).
6. K. -H. Hellwege, Editor in chief, *LANDOLT BÖRNSTEIN, 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.

- 7 . R. Carpenter, "The electro-optic effect in uniaxial crystals of the dihydrogen phosphate type. III. Measurement of coefficients," J. Opt. Soc. Am. **40**, 225-229 (1950).
- 8 . K. Onuki, N. Uchida and T. Saku, "Interferometric method for measuring electro-optic coefficients in crystals," J. Opt. Soc. Am., **62**, 1030 (1972).
- 9 . J. Zook, D. Chen and G. Otto, "Temperature dependence and model of the electro-optic effect on LiNbO₃," Appl. Phys. Lett., **11**, 159 (1967).
- 10 . S. Namba, "Electro-optic effect of zinblende," J. Opt. Soc. Am., **51**, 76-79 (1961).
- 11 . 滝沢國治, 横田雄二, 石山 遥, 花岡秀典, 「多重反射光干渉法による電気光学係数の高精度測定」第51回応用物理学関係連合講演会予稿集, 31pZV4 (2004).
- 12 . T. Hara, Y. Ooi, Y. Suzuki, and M. H. Wu, "Transfer characteristics of the microchannel spatial light modulator," Appl. Opt. **28**, 4781-4786 (1989).
- 13 . T. Hara and Y. Suzuki, "Microchannel spatial light modulator," Optoelectronics -Devices and Technologies **10**, 393-420 (1995).
- 14 . 原 勉, 信学論 (C-I), J.76-C-I, 41-45 (1991).