## ポラリメータ用 Yカット Z軸伝搬 LiNbO3 光変調器の温度特性

滝沢 國治\*1, 金 蓮花\*2, 米倉 和也\*3

Temperature Characteristics of a Y-cut Z-propagation LiNbO<sub>3</sub> Light Modulator for Application to Polarimeters

Kuniharu TAKIZAWA<sup>\*1</sup>, Lianhua JIN<sup>\*2</sup>, and Kazuya YONEKURA<sup>\*3</sup>

**ABSTRACT** : Temperature characteristics of a *Y*-cut *Z*-propagation LiNbO<sub>3</sub> crystal light modulator, with manufacturing errors, in absence and presence of electric field have been investigated by the analyses and experiments. According to our analyses, when the *Z*-axis of LiNbO<sub>3</sub> crystal is at the angle of 0.22° with respect to the normal of input surface of the crystal, we found the theoretical fluctuation of the normalized output-light intensity with temperature is less than  $7.75 \times 10^{-6}$ /°C. This magnitude is less than 1% of the theoretical intensity fluctuation of a conventional temperature-compensation LiNbO<sub>3</sub> light modulator. The measured temperature characteristics of a prototype of this modulator was  $2 \times 10^{-4}$ /°C in absence of the electric field (OFF state), and  $2.8 \times 10^{-4}$ /°C in presence of the external field (ON state), respectively. During running test longer than 8 hours at room temperature, the intensity fluctuation of this prototype was 0.2% at OFF state, and 0.5% at ON state.

Keywords : LiNbO<sub>3</sub> crystal, light modulator, electro-optic effect, birefringence, manufacturing error

(Received March 25, 2010)

### 1. まえがき

薄膜の屈折率や吸収率,厚さなどを計測するエリプソ メトリおよびサンプルのリタデイションや方位角を計測 する偏光計測を高性能化するには,光の位相差を高速か つ正確に制御する光変調器が必要である。これらの分野 では,これまでに,石英の圧電効果を利用した光弾性変 調器(PEM)<sup>1),2)</sup>,ネマティック液晶の複屈折を低電圧で制 御する液晶変調器<sup>3)</sup>および2個のZカット P軸伝搬 LiNbO<sub>3</sub>(LN)結晶の間に半波長板を挿入するデュアルタ イプ光変調器<sup>4)</sup>などが用いられている。

PEM は大きな開口を有するが、①SiO<sub>2</sub> の複屈折性に 基づく温度依存性を有する、②決められた共振周波数で しか動作できない、③大型で重量も大きいなどの課題を もつ。液晶素子は小型・安価で駆動電圧も非常に小さい が、温度依存性が極めて大きい、動作速度が遅いなどの 課題を持つ。デュアルタイプ光変調器は小型で応答速度 が優れているが,結晶長や結晶方位などを2つの結晶で 完全にそろえることができないため,自然複屈折による 温度依存特性が残る。

これらのデバイスの共通の課題である温度依存性を低 減するため,我々は,YカットZ軸伝搬LN光変調器(こ こでは Y-Z 光変調器と呼ぶ)を用いた複屈折計測システ ムを提案した 5)。Y-Z 光変調器をポラリメータに用いる 理由は次の通りである。結晶の Y 軸方向に電界を加え, Z軸方向に光を伝搬させると、X軸方向および Y軸方向 にそれぞれ振動する直線偏光は、同じ大きさの EO 効果 を受ける。どちらの光も常光線屈折率を感じるため、静 的リタデイションは原理的にはゼロとなり,変調器の温 度依存性はきわめて小さい。Y-Z 変調器のこの性質は既 によく知られており、多くの報告がある<sup>6-10)</sup>。Takizawa らは、上記の特性を利用して、偏光無依存の導波路形光 変調器やX分岐形光スイッチを作製した<sup>9,10)</sup>。このよう に Y-Z 光変調器の開発は進んでいるが、変調動作時の温 度特性や加工誤差をもつ Y-Z 変調器の温度特性はまだ知 られていない。

本論文では、結晶軸方向が理想的な状態から逸脱した

<sup>\*1:</sup>物質生命理工学科教授 (takizawa@st.seikei.ac.jp)

<sup>\*2:</sup>山梨大学医工准教授

<sup>\*3:</sup>物理情報工学専攻卒業生(現;防衛省)

状態の F-Z 変調器の変調状態の温度特性を詳しく解析す るとともに, F-Z 変調器の変調特性と温度との関係を実 験により求めた。また,従来のデュアルタイプ光変調器 の変調特性と温度との関係も解析し, F-Z 光変調器と比 較した。

## 2. Y-Z光変調器の加工誤差

前節に述べたように, *F-Z* 光変調器は,光の伝搬方向 が結晶の異方性軸 (*Z*=*X*<sub>3</sub>軸)と一致するため,静的位相 差を0にすることができる。図1(a)に示すように,LN結 晶の *X*(=*X*<sub>1</sub>)軸と *Y*(=*X*<sub>2</sub>)軸に 45 度の角度で振動する直線 偏光がLN結晶に入射すると,X軸あるいはY軸方向に 振動する2つの直線偏光はどちらも常光屈折率を感じる ため,両光線の間の静的位相差は0である。しかし,実 際に結晶を加工する場合,LN 結晶のそれぞれの面の法 線と結晶の主軸を完全に一致させることは不可能である。 通常の加工では,1~10 分程度の角度誤差が含まれる。 ここでは,この加工誤差が位相差にどれほどの影響を与 えるのかを解析する。



図 1 시軸が固定された Y-Z光変調器

加工誤差は3次元的に発生するため、そのままでは計 算が複雑になる。そこでここでは、X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>軸の中の 1つの軸を固定して、他の2つの軸が固定された軸の周 りを微小回転する単純なケースについて、自然複屈折に よる静的リタデイションおよび印加電界による動的リタ デイションを解析する。

#### 2. 1 X<sub>1</sub>軸が固定された Y-Z光変調器

まず,図1(b)に示すように,LN結晶の $X_1$ 軸を中心 に $X_2$ 軸および $X_3$ 軸が微小角度 $\xi$ rad だけ回転するケース を例に取り、回転角度  $\xi$ と温度特性の関係を計算する。  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ は結晶の本来の光学軸であり、ここでは旧 座標軸と呼ぶ。加工結晶の辺に沿った軸  $X_1$ '(= $X_1$ ),  $X_2$ ',  $X_3$ 'は、加工誤差によって生じた新座標軸である。図1 (b)の構成から、式(1)に示される E0 効果による屈折 率変化および式(2)の屈折率楕円体の式を得る。

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E\cos\xi \\ E\sin\xi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_{22}E\cos\xi + r_{13}E\sin\xi \\ r_{22}E\cos\xi + r_{13}E\sin\xi \\ r_{33}E\sin\xi \\ r_{51}E\cos\xi \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
(1)  
$$\begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{n_o^2} - r_{22}E\cos\xi + r_{13}E\sin\xi \\ n_o \end{pmatrix} x_1^2$$
$$+ \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{22}E\cos\xi + r_{13}E\sin\xi \\ n_o \end{pmatrix} x_2^2$$
(2)  
$$+ \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{33}E\sin\xi \\ n_o \end{pmatrix} x_3^2 + 2r_{51}E\cos\xi x_2 x_3 = 1$$

ここで, r<sub>ij</sub> は電気光学係数, n<sub>o</sub> は常光線屈折率, n<sub>e</sub> は異 常光線屈折率, E は印加電界である。図1(b)より, 旧座 標系と新座標系の間には, 次の関係が成立する。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & -\sin \xi \\ 0 & \sin \xi & \cos \xi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{pmatrix}$$
(3)

式(3)を式(2)に代入し,屈折率楕円体の主軸を求めると, *X*<sub>1</sub>'あるいは *X*<sub>2</sub>'軸方向に振動する直線偏光は,それぞれ つぎの屈折率 *n*<sub>1</sub>', *n*<sub>2</sub>'を感じる。

$$n_1' = n_o + \frac{1}{2} n_o^3 (r_{22} \cos \xi - r_{13} \sin \xi) E$$
<sup>(4)</sup>

$$n'_{2} = n_{oe} - \frac{n_{oe}^{3}}{2} \left( r_{22} \cos^{3} \xi + r_{13} \sin \xi \cos^{2} \xi + r_{33} \sin^{3} \xi + 2r_{51} \sin \xi \cos^{2} \xi \right) E$$
(5)

ただし

$$\frac{1}{n_{oe}^2} = \frac{1}{n_o^2} \cos^2 \xi + \frac{1}{n_e^2} \sin^2 \xi$$
(6)

である。

つぎに, 逆圧電効果を解析する。旧座標系の Xj 軸に対 する新座標系の Xi 軸の方向余弦を a<sub>ij</sub> とすると, 2つの 座標系の間にはつぎの関係が成立する。

$$x'_{i} = a_{ij}x_{j}$$
 (*i*, *j*=1,2,3,...) (7)

式(7)の方向余弦を用いると、旧座標系の歪 *S*<sub>ki</sub> と新座標 系の歪 *S*<sub>hi</sub>の間には以下の関係が成立する。

$$S'_{hi} = a_{hk} a_{ji} S_{ki} \tag{8}$$

ところで,点群 3m の LN 結晶は圧電定数 *d*<sub>15</sub>, *d*<sub>22</sub>, *d*<sub>31</sub> および *d*<sub>33</sub>をもつから,旧座標軸 *X*<sub>2</sub>方向に電界を印加すると,逆圧電効果により下記の歪が生じる。

$$\begin{pmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 \end{pmatrix}$$
(9)  
=  $\begin{pmatrix} 0 & E \cos \xi & E \sin \xi \end{pmatrix}$   
 $\cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{15} & -2d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ 

式(9)の歪は簡略化された表現であり、式(8)の厳密な表現 との間には、 $S_1=S_{11}$ 、 $S_2=S_{22}$ 、 $S_3=S_{33}$ 、 $S_4=S_{23}+S_{32}$ 、 $S_5=S_{31}+S_{13}$ 、  $S_6=S_{21}+S_{12}$ の関係がある。式(3)、(8)、(9)より、

$$S'_{3} = \begin{pmatrix} d_{22}\sin^{2}\xi\cos\xi + d_{31}\sin^{3}\xi + \\ d_{33}\sin\xi\cos^{2}\xi - d_{15}\sin\xi\cos^{2}\xi \end{pmatrix} E$$
(10)

を得る。結晶長をLとすると,X3'軸方向の結晶長変化/L は、次式で与えられる。

$$\Delta L = S_3 L, \tag{11}$$

Y-Z変調器のリタデイションθは、次の式で表される。

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \left( n_2' - n_1' \right) \left( L + \Delta L \right) \tag{12}$$

これを自然複屈折に基づく静的位相差 $\theta_s$ と印加電界に依存する動的位相差 $\theta_d$ を用いて $\theta=\theta_s+\theta_d$ と表す。式(4),(5)および(11)を用いると, $\theta_s$ と $\theta_d$ は,次の式で与えられる。

$$\theta_s = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_{oe}) L \tag{13}$$

$$\theta_{d} = \frac{\pi}{\lambda} n_{o}^{3} EL \begin{bmatrix} r_{22} \cos \xi - r_{13} \sin \xi \\ + \left(\frac{n_{oe}}{n_{o}}\right)^{3} \cdot A + \frac{2(n_{o} - n_{oe})}{n_{o}^{3}}B \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} r_{22} \cos^{3} \xi + r_{13} \sin \xi \cos^{2} \xi \\ + r_{33} \sin^{3} \xi + 2r_{51} \sin \xi \cos^{2} \xi \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} d_{22} \sin^{2} \xi \cos \xi + d_{31} \sin^{3} \xi \\ + d_{33} \sin \xi \cos^{2} \xi - d_{15} \sin \xi \cos^{2} \xi \end{pmatrix}$$
(14)

#### 2. 2 X<sub>2</sub>軸が固定された Y-Z光変調器

図 1(c)のように X<sub>2</sub>軸を中心に X<sub>1</sub>, X<sub>3</sub>軸が微小角度 *č*だ け回転するときの屈折率楕円体の式は次の通りである。

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -r_{22}E \\ r_{22}E \\ 0 \\ r_{51}E \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{n_0^2} - r_{22}E \\ n_e^2 + 2r_{51}Ex_1x_3 = 1 \end{pmatrix}$$
(15)
$$(15)$$

図1(c)より、新旧座標軸の間には、次の関係がある。

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \xi & 0 & \sin \xi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \xi & 0 & \cos \xi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \\ x_3' \end{pmatrix}$$
(17)

式(17)を(16)に代入し, X<sub>3</sub>'軸を除いた固有値方程式を解 くことにより, X<sub>1</sub>', X<sub>2</sub>'軸方向に振動する直線偏光が感じ る屈折率 n<sub>1</sub>', n<sub>2</sub>'を得る。

$$n_1' = n_{oe} + \frac{1}{2} n_{oe}^3 \left( r_{22} \cos^2 \xi + r_{51} \sin 2\xi \right)$$
(18)

$$n_2' = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{22} E \tag{19}$$

図 1(c)より旧座標系の歪は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & S_4 & S_5 & S_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & E & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & -2d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -d_{22}E & d_{22}E & 0 & d_{15}E & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$(20)$$

式(20)と式(8)より、X3'軸方向の歪S3'は次の式となる。

$$S_3' = -d_{22}E\sin^2\xi$$
 (21)

この歪が X3'軸方向の結晶長を

$$\Delta L = S_3' L = -d_{22} EL \sin^2 \xi \tag{22}$$

だけ変化させる。

式(18), (19)および式(22)を式(12)に代入すると,静的 リタデイション $\theta_s$ および動的リタデイション $\theta_d$ はそれぞ れ次式で与えられる。

$$\theta_s = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_{oe}) L \tag{23}$$

$$\theta_{d} = -\frac{\pi}{\lambda} n_{o}^{3} EL \begin{cases} r_{22} \left[ 1 + \left( \frac{n_{oe}}{n_{0}} \right)^{3} \cos^{2} \xi \right] \\ + \left( \frac{n_{oe}}{n_{o}} \right)^{3} r_{51} \sin 2\xi \\ - \frac{2(n_{o} - n_{oe})}{n_{o}^{3}} d_{22} \sin^{2} \xi \end{cases}$$
(24)

#### 2. 3 Xa軸が固定された Y-Z光変調器

図 1(d)に示すように X<sub>3</sub>軸が固定されると, X<sub>3</sub>軸方向に 進む光は複屈折を感じないため,他の2軸を回転しても 主軸変換は起こらない。したがって, X<sub>1</sub> あるいは X<sub>2</sub>軸方 向に振動する直線偏光が感じる屈折率 n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub> は

$$n_{1} = n_{o} + \frac{n_{o}^{3}}{2} r_{22}E$$

$$n_{2} = n_{o} - \frac{n_{o}^{3}}{2} r_{22}E$$
(25)

となる。 $X_3$ 軸方向の歪は  $S_3=0$  となるから、リタデイション $\theta$ は次の式で与えられる。

$$\theta = \theta_d = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{22} LE \qquad (26)$$

このケースのリタデイションは,加工誤差のない理想状 態のそれと同一である。

## 3. LiNb0<sub>3</sub>結晶の屈折率と電気光学係数の温度分散,波長 分散および熱膨張係数

2節の $\theta_s$ および $\theta_d$ を用いて *F-Z*光変調器の温度特性を 計算するには、LN 結晶の屈折率と電気光学係数の温度 依存性および結晶の熱膨張特性が必要である。LN 結晶 の屈折率の温度依存性は、D.F. Nelson と R. M. Mikulyak によって詳しく調べられている<sup>10)</sup>。LN 結晶の屈折率の 波長分散は24.5℃で404.63 nm から 3051.48 nm にわたっ て測定された。これらのデータは、Smith らによって確 認された。かれらは、さらに20-600℃の範囲で屈折率の 温度分散を測定し、つぎの回帰方程式を求めた<sup>11)</sup>。

$$n^{2}(\lambda,T) = a_{1} + \frac{a_{2} + b_{1}f(T)}{\lambda^{2} - (a_{3} + b_{2}f(T))^{2}} + b_{3}f(T) + a_{4}\lambda^{4}$$

表1 LN結晶の屈折率分散の係数

	n <sub>o</sub>	n <sub>e</sub>	
$a_1$	4.905E+00	4.582E+00	
a <sub>2</sub>	1.180E+05	9.920E+04	
a <sub>3</sub>	2.180E+02	2.110E+02	
$a_4$	-2.720E-08	-2.190E-08	
$b_1$	2.230E-02	5.270E-02	
<b>b</b> <sub>2</sub>	-2.970E-05	-4.910E-05	
<b>b</b> <sub>3</sub>	2.140E-08	2.300E-08	

f(T) = (T - 24.5)(T + 570.5) (T:°C) (28) ただし、Tは温度(°C)である。式(27)の係数を表 1 に示 す。

LN 結晶の電気光学係数  $r_{13}$ ,  $r_{33}$ ,  $r_{22}$ の温度依存性は Zook らによって 20°C から 200°C まで測定された<sup>8)</sup>。彼らは, 半波長電圧と温度の関係を測定し,  $(1r_{13} \ge r_{33})$ は温度が 増加すると EO 係数が直線的に減少する,  $(2r_{22})$ は 125°C まで温度に依存せず一定である, ことを明らかにした。 係数  $r_{13}$ ,  $r_{23}$   $r_{20}$ の温度勾配を以下に示す。

$$dr_{13}/dT = 0.016 \, pm/V^{\circ}C$$

$$dr_{33}/dT = 0.0046 \, pm/V^{\circ}C$$

$$dr_{22}/dT \approx 0 \, pm/V^{\circ}C$$
(29)

筆者らも *r*<sup>22</sup>の温度依存性を測定し、Zook らと同じ結果
 を得た(図 2)。 *F-Z*変調器の温度特性の実験結果については6節で詳しく述べる。

LN 結晶の熱膨張係数は Gallagher らによって測定された<sup>12)</sup>。彼らの論文によると、LN 結晶の格子間距離Dの温度依存性は次式で与えられる。



図2 LiNb0<sub>3</sub>結晶の電気光学係数 r<sub>22</sub>と温度との関係

-18-

表 2 LN結晶の格子間距離 Dの係数<sup>12)</sup>

a-axis						
Temperature range (K)	а	b (×10 <sup>-6</sup> )	c (×10 <sup>-6</sup> )	d ( ×10 <sup>-6</sup> )		
60-220	5.149	13	0	-98.1		
220-523	5.149	13.43	17.55	-16.3		
523-1373	5.1485	16.29	4.83	0		
c-axis						
Temperature range (K)	а	b (×10 <sup>-6</sup> )	c (×10 <sup>-6</sup> )	d ( ×10 <sup>-6</sup> )		
60-373	13.8673	4.09	4.4	-20.2		
373-1373	13.8633	4.4	0	-3.69		

$$D = a \left( 1 + bT + cT^2 + dT^3 \right) \quad (T: ^{\circ}\mathrm{C}) \tag{30}$$

上式の係数を,表2にまとめて示す。

#### 4. Y-Z光変調器の温度依存性

*Y-2* 光変調器の規格化された出力信号 *I* は,次の式で 表される。

$$I = \frac{1 - \cos(\theta_s + \theta_d)}{2} \tag{31}$$

数式(27)~(30)で表される LN 結晶の屈折率,熱膨張率お よび電気光学系の温度特性を式(13),(14),(23),(24),(26) に代入し,さらにそれらを式(31)に代入すれば, $X_1$ 軸,  $X_2$ 軸あるいは $X_3$ 軸をそれぞれ固定し,そのほかの軸を微 小角  $\xi$ だけ回転させた *F-Z* 光変調器の温度特性を得る。 L=20.6 mmの結晶長をもつ *F-Z* 光変調器の解析結果の一 例を図 3~図 5 に示す。ここで,解析条件は,波長  $\xi$ = 632.8 nm,印加電界 E=70 kV/m,加工誤差角度  $\xi$ =0,0.05,0.1, 0.15,0.2°である。 $\xi$ と温度勾配との関係を明瞭にするた め,図 3 では $\xi$ の小さなほうから順にバイアス位相差  $\theta$  $_{b}$ =0,0.0185,0.065,0.1385,0.24 rad.を加え、レベルを 揃えて表示した。また図 4 では,角度 $\xi$ に応じて, $\theta_{b}$ =0, 0.0088,0.045,0.109,0.2 rad.を加えた。

これらの図は、20°C から 100°C まで温度上昇するとき、  $\xi < 0.2$ 度の素子の規格化出力変動は5 × 10<sup>-5</sup>~10<sup>4</sup>/°Cで あることを示している。図4は、加工誤差の無い素子( $\xi =$ 0°)よりも $\xi = 0.2°$ の加工誤差をもつ素子のほうが優れた 温度特性を有することを示している。しかし、印加電界 によって図3~図5の特性は変化するため、以下に示す 温度をパラメータとした光出力*I*と印加電界*E*の特性か ら判断すべきである。



図 3 X<sub>1</sub>軸を固定した Y-Z光変調器の出力と温度の関係



図4 시軸を固定した Y-Z光変調器の出力と温度の関係



図 5 人軸を固定した Y-Z光変調器の出力と温度の関係

*Y-2*光変調器の *I-E*特性を評価するために,結晶温度 が 20°C の出力信号 *I*(20)を基準としたときの *T*°C での 光出力信号 *I*(*T*)の出力変動・*I*(*T*)を下式のように定義 し,それと印加電界 *E*との関係を計算した。

$$\Delta I(T) = I(T) - I(20) \tag{32}$$



図 6 X<sub>1</sub>軸を固定した Y-Z光変調器の∠I(1)の電界 E 依 存性 ξ=0.1°



# 図 7 *X*<sub>2</sub>軸を固定した *Y−Z*光変調器の*∠I*(1)の電界 *E*依存性 *ξ*=0.1°

X1, X2, X3 のなかの1つの軸を固定し,他の2軸を ζ=0.1°だけ回転させた Y-Z 光変調器の △(T)-E 特性を図6 ~図 8 に示す。解析条件は,結晶長 L=20.6 mm,波長 ζ=632.8 nm,温度 T = 40, 60, 80, 100 ℃ である。これ らの図から,次のことを見出す。



図8 *X*<sub>3</sub>軸を固定した Y-Z光変調器の⊿I(1)の電界 E依 存性 *ξ*=0.1°

- (1) ∠1(T)は,温度 Tの増加とともに増大する。
- (2) (2) (1)は、印加電界 Eの増加とともに増大する。
- (3) この光変調器の半波長電界(194.5 kV/m)を E<sub>π</sub>で表 すと、 △(T)は、E=mE<sub>π</sub> (m=0,±1, ±2, ±3・・)の ときゼロになる。
- (4) 印加電界が|E<sub>x</sub>|以下で、デバイスの動作温度が 20℃から100℃まで変化するとき、規格化出力信号 の変化は、X<sub>3</sub>軸固定の素子で2.63×10<sup>-5</sup>/℃以下、 それ以外の素子で3.13×10<sup>-5</sup>/℃以下である。

(4)の結果は、*Y-Z* 光変調器の温度特性が極めて優れて いることを示している。また、 $X_3$ 軸が不動で、 $X_1,X_2$ 軸が 角度  $\xi$ だけ回転する素子は、 $\xi$ =0の理想的素子と同一で あり、駆動電界が  $mE_{\pi}$ のとき、出力信号は温度に依存し ない。この特性を利用すれば、光導波路からなる方向性 結合器<sup>13)</sup>、Y分岐型光スイッチ<sup>14)</sup>、全反射型光スイッチ<sup>15)</sup> およびY分岐型光スイッチ<sup>16)</sup> などデジタルデバイス の温度特性を改善できるであろう。

つぎに、 $\xi=0.22^{\circ}$ のときの $X_1$ 軸固定の F-Z 光変調器の  $\Delta I(T)$ と印加電界 E との関係を図9に示す。-30~190 kV/m を動作範囲とすると、この範囲の温度変動は 7.75×10<sup>-6</sup> / C以下となり、図8に示される  $X_3$ 軸固定 素子の温度変動の約 1/3 である。加工誤差の無い素子よ りも、適当な加工誤差をもつ素子のほうが温度変動が大 幅に減少するという興味深い結果が得られた。 $X_2$ 軸を固 定した素子でも同様な結果が得られた。 $\xi=0.2^{\circ}$ の加工は 容易であるから、図9の特性を実現することは、可能で ある。



## 図 9 X<sub>1</sub>軸を固定した Y-Z光変調器の∠I(1)の電界 E依 存性。 *ξ*=0.22°

図 10 は $X_1$ 軸固定の *Y-Z* 光変調器の $\angle 1$ (100)と $\xi$ の関係 である。この図は、 $\xi$ <0.38° および *E*=200 kV/m の条件の とき、20~100°C の範囲の温度変動は5 × 10<sup>-5</sup> /°C以下に 抑えられることを示している。



図 10 X<sub>1</sub>軸固定の Y-Z 光変調器の∠/(100)と誤差角度 *<i>< < < < と*の関係。 *E*=200 kV/m

#### 5. デュアルタイプ変調器の温度特性

デュアルタイプ変調器の構造を図 11 に示す<sup>4)</sup>。この素 子は、2 個の LN 結晶の間に半波長板が挿入された構造 を持つ。半波長板の光軸と LN 結晶の Z 軸との交差角度 が 45°のとき、第一結晶の常光線および異常光線は、第 二結晶ではそれぞれ異常光線および常光線となる。した がって、2 つの結晶が同じサイズで光軸のズレが無けれ ば、無変調時には自然複屈折による温度依存性は完全に 消滅する。しかし、結晶加工には必ず誤差が伴う。F-Z 光変調器と違ってデュアルタイプの構造は複雑であるた め、いくつかの加工誤差が同時に発生する可能性が高い。 複合的な加工誤差の解析は容易でないため、この節では、 2 つの LN 結晶の長さが異なるという最も単純なケース を解析する。



図11 デュアルタイプ変調器の構造

第一および第二結晶の結晶長をそれぞれ L, L +  $\Delta$ L と すると、自然複屈折による静的位相差  $\theta_s$ および EO 効果 による動的位相差  $\theta_d$ は、それぞれ次の式で与えられる。

$$\theta_{s} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{o} - n_{e}) \Delta L \qquad (33)$$

$$\theta_{d} = -\frac{\pi}{\lambda} E \left[ \left( n_{e}^{3} r_{33} - n_{o}^{3} r_{13} \right) + (n_{o} - n_{e}) d_{31} \right] \cdot (2L + \Delta L) \qquad (34)$$

式(33), (34)を式(31), (32)に代入して, デュアルタイプ の温度特性を解析する。解析条件が *ΔL* =0, *L* =10.3 mm, *λ*=632.8 nm であるときの, *ΔI*(*T*)と印加電界 *E* との関係を 図 12 に示す。



図 12 デュアルタイプ変調器の⊿/(*1*)と印加電界 *E*の 関係 ⊿*L*=0

図 12 は理想的なデュアルタイプの温度特性である。  $\angle L = 0$  であるから, E = 0 ならば温度が変化しても光出力 は一定である。しかし,  $\theta_d$  は屈折率, EO 係数, 結晶長 など温度依存性をもつパラメータを含んでいるため, 変 調をかけると温度依存性が現れる。L = 10 mmのデュアル タイプの半波長電界  $E_{\pi}$ は約 94 kV/m である。 $\pm E_{\pi}$ をデバ イスの動作範囲とすると, 図 12 より, 20~100° C の変化 でデバイスの出力は 5.13×10<sup>5</sup>/C ほど変動することが分 かる。この値は,加工誤差の無い Y-Z 光変調器の約 2 倍 である。

つぎに 0.1%の加工誤差 ( $\Delta L=10\mu m$ に相当)をもつデ ュアルタイプを解析しよう。 $\Delta L$ 以外の条件は前と同じ とすると、デバイスの温度特性は図 13 で与えられる。 E=0を動作点として $\pm E_{\pi}$ だけ変調する場合、20~100°C の範囲のパワー変動は $1.25 \times 10^{-4}$ /°C以上になる。動作 点をE=1 kV/m に移動すれば、パワー変動を 5.63 ×  $10^{-5}$ /°Cに抑えることができるが、 $\Delta L$ の大きさをコント ロールすることは困難である。



## 図 13 デュアルタイプ変調器の∠/(*1*)と電界 Eの の関係 ∠*L*=10 μm

この節のまとめとして P-Z光変調器とデュアルタイプ 変調器の特性を比較する。前節と本節で解析された2つ の変調器には同一材料が用いられ、デバイス長も同じで ある。デュアルタイプ変調器は、大きな電気光学係数 $r_{33}$ と $r_{13}$ を用いるため、 $E_{\pi}$ は電気光学係数 $r_{22}$ を用いる P-Z型のおよそ半分であり、低電界で駆動できるという利点 を有する。しかし、自然複屈折を打ち消すために、2つ の全く同じ特性をもつLN 結晶と半波長板を組み合わせ、 アライメントを完璧にしなければならないという大きな ハンディを抱えている。

一方, X<sub>3</sub>軸の回転角度が ξ=0°の Y-Z 光変調器における

温度変動による出力変化はデュアルタイプの50%であり, 安定動作に優れている。ζ=0.22°の微小回転素子では,出 力変動をさらに半減させることが可能である。また,シ ンプルな構造をもつ F-Z 光変調器の作製は容易であると いうメリットも有している。

## 6. Y-Z光変調器の作製とその温度特性の測定

これまで *Y-Z* 光変調器の温度特性を解析した。本節で はポラリメータ用 *Y-Z* 光変調器の作製とその温度特性実 験を述べる。

#### 6. 1 Y-Z光変調器と恒温槽の作製

ポラリメータ用 *P-Z*変調器として,コングルエント組成 *Y*カット *Z*軸

伝搬 LN 結晶を用いて,印加電界がゼロのとき温度無依存となる *ξ*=0のデバイスを作製した。

結晶の(001)面を光学研磨し, (010)面に Au 電極(厚さ



図 14 試作した Y-Z光変調器

表3 LN結晶のサイズと加工精度

サイズ (mm)	<i>X</i> <sub>1</sub> 軸方向	2.00±0.01
	X₂軸方向	9.93±0.02
	X₃軸方向	$20.01 \pm 0.01$
軸精度(°)	X <sub>1</sub> 軸	<±0.1
	<i>X</i> ₂軸	<±0.01
	X₃軸	<±0.1
(010)面のウエッジ角度(゜)		0.01

: 200 nm)を蒸着した。試作した *Y-Z* 光変調器の外観とその詳細を図 14 および表 3 に示す。

このデバイスの温度特性を測定するため,図15および 図16の開放型の小型恒温装置を作製した。恒温装置は開 放型恒温ユニット,ペルチェ駆動部,温度測定部および 制御部から構成される。光入出力用に恒温ユニットの2 面が開放されているため,ユニット全体が均一な温度分 布になるわけではない。しかし,ユニット(断面積:120 mm × 120 mm)の中央に表3のサイズをもつ小さな変 調器を設置すれば,デバイスの温度分布をほぼ均一に保 つことができる。恒温ユニット内の電極にはK型熱電対 を埋め込んだ。電極は絶縁膜を介してペルチェ素子と接 着された。温度制御部の設定温度と熱電対で得られる電 極温度からの差分を補完するようにペルチェ素子の駆動 電流を制御し,電極部温度を設定値に保った。温度制御 範囲は室温から100°C,温度精度は±0.1°C である。

## 2 実験・結果(結晶温度を変化させたときの位相差 変化量)

*Y-Z* 変調器の温度の変化と出力信号との関係を測定するため,図17の実験系を構成した。



図15 温度調整機構付き電極ステージ

Temperaturemonitorcontrolled unitビード・レードビード・レードレード・レードレード・レードPeltieTemperature<br/>controlled unitPeltieTemperature<br/>control board図 16恒温ユニットと温度制御部



図17 実験系統図(位相差変化量の測定)

結晶内の多重反射干渉の影響を除くため、光源には中 心波長 632.8 nm, 半値全幅 10 nm の LED を用いた。LED 光の一部と光検出器の出力信号をデータロガーに記録し、 LED の出力ゆらぎを補正した。 結晶温度を 25-50 ℃ ま で変化させたときの出力信号の変化 *δI(T)*を図 18 および 図 19 に示す。







と温度「の関係



図 20 無印加時の Y-Z 光変調器の出力信号 S /(t)の時 間変化



図 21 Y-Z 光変調器に 404 V の交流電圧を加えたときの 出力信号の時間変化 *δ* /(*t*)

図 18 は,結晶に電圧を加えないときの測定結果である。 図 19 は,結晶に正弦波電圧(振幅:170.8 V,周波数 1 kHz) を加えたときの測定結果である。*δI(T)*は結晶の温度が *P*Cのときの出力信号の変化であり,次の式で与えられ る。

$$\delta I(T) = \frac{I(T) - I(50)}{I(50)}$$
(35)

結晶温度が 25 度から 50℃へ変化するときの無印加時 の規格化出力信号変化は約2.8 ×  $10^{-4}$  / ℃であった。一 方,交流電圧印加時の出力信号の変化は2 ×  $10^{-4}$  / ℃であ った。いずれも理論値よりもやや大きいが,優れた安定 性を示した。

次に図 17 の実験系から恒温ユニットを除いた光学シ ステムを用いて、デバイスの出力信号の経時変化  $\delta I(t)$ を 観測した。観測開始から t 秒後の出力信号の変動を I(t)、 測定された出力信号の平均値を  $\overline{I}$  とすると、 $\delta I(t)$ は次の 式で表される。

$$\delta I(t) = \frac{I(t) - \bar{I}}{\bar{I}}$$
(36)

送風口の温度を 25℃に設定した空調機だけで室内温 度を制御した状態で、デバイスに0Vおよび404VのDC および AC 電圧を加えたときの出力信号の経時変化を求 めた。結果を図 20, 図 21 に示す。どちらも5時間にわ たりきわめて安定しており, *Y-Z* 光変調器の優れた安定 性が確認された。

#### 7. まとめ

コングルエント LN 結晶からなるポラリメータ用 F-Z 光変調器の出力光強度の温度依存性を詳細に解析し,そ の優れた安定性を実験により明らかにした。解析では, 1つの結晶軸を固定し,他の2つの結晶軸を微小角度 だけ回転させたモデルを用いて,回転角度 、印加電界 Eおよびデバイス温度Tの関係を求めた。座標変換で求 めたリタデイションに,既に明らかになっている LN 結 晶の屈折率対温度特性,格子定数対温度特性,電気光学 係数対温度特性を適用し,光変調信号対温度および光変 調信号対回転角度の関係を求めた。この研究で明らかに された F-Z 変調器(結晶長:20.6 mm)の性質は,4節の(1) ~(4)に述べられている。これらの特性は,従来の温度補 償型 LN 変調器に比べて各段に勝っている。

以上の結果を踏まえて、コングルエント LN 結晶から なる Y-Z 光変調器(結晶長: 20.6 mm)を作製し、開放型の 恒温ユニットにデバイスを設置して、出力信号と温度変 化の関係を測定した。試作デバイスの出力信号の変動は、  $2 \times 10^4 \sim 2.8 \times 10^{-4}$  / Cであった。また、室温におけ る Y-Z 変調器のランニングテストでは、出力信号の変動 は、印加電界がオン状態のとき 0.5%、およびオフ状態 のとき、0.2%であった。

Y-Z 光変調器のこれらの優れた特性をポラリメータや エリプソメータに応用すると、高速性と安定性を兼ね備 えた光計測システムを構築できる。特にこの変調器の駆 動電界が半波長電界の整数倍となるとき、デバイスは温 度無依存で動作するため、きわめて安定な光計測システ ムとなる。

*Y*-カット Z 軸伝播 L N 結晶と同様に,自然複屈折をもたない電気光学結晶として,点群 43 m の GaAs, InP 結晶,点群 23 の Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>, Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub> 結晶,点群 42 m の KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, KD<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> などが挙げられる。これらの結晶を用いた光変調器の温度特性を解析および実験

の両面から検討することが次のテーマである。

#### 謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)の 支援を受けて行われた。

## 参考文献

- T. C. Oakberg : "Modulated interference effects: use of photoelastic modulators with lasers," Opt. Eng., 34, 1545-1550 (1995).
- J. C. Kemp, G. D. Henson, C. T. Steiner and E. R. Powell, "The optical polarization of the Sun measured at a sensitivity of parts in ten million," Nature, **326**, 270-273 (1987).
- M. Shribak and R. Oldenburg: "Techniques for fast and sensitive measurements of two-dimensional birefringence distributions," Appl. Opt., 42, 3009-3017 (2003).
- J. R. Mackey, K. K. Das, S. L. Anna, and G. H. McKinley: "A compact dual-crystal modulated birefringencemeasurement system for microgravity applications," Meas. Sci. Technol., 10, 946-955 (1999).
- L. Jin, K. Yonekura, and K. Takizawa, "Fast and simultaneous measurement of both birefringence and azimuth angle using a y-cut LiNbO<sub>3</sub> phase modulator," Jpn. J. Appl. Phys., 45, 5244-5247 (2006).
- J. D. Zook, D. Chen, and G. N. Otto, "Temperature dependence and model of the electro-optic effect in LiNbO<sub>3</sub>," Appl. Phys. Lett. 11, 159-161 (1967).
- 7. J. L. Nightingale, R. A. Becker, P. C. Willis, and J. S. Vrhel, "Characterization of frequency dispersion in Ti-indiffused lithium niobate optical devices," Appl. Phys. Lett., 51, 716-718, (1987).
- K. Takizawa, M. Okada, and T. Aida, "Polarization -independent and optical-damage-insensitive LiNbO<sub>3</sub> interferometric waveguide modulator," Jpn. J. Appl. Phys. 27, L696-L698 (1988).
- T. Sunada and K. Takizawa, "Polarization-independent optical switch and TE/TM mode splitter using LiNbO<sub>3</sub> asymmetric x branch waveguides", IEICE C-I, J 73-C-1, 559-566 (1990).
- D. F. Nelson and R. M. Mikulyak, "Refractive indices of congruently melting lithium Niobate", J. Appl. Phys., 45, 3688 -3689 (1974).

- D. S. Smith, H. D. Riccius, and R. P. Edwin, "Refractive indices of lithium niobate", Opt. Commun. 17, 332-335 (1976).
- P. K. Gallagher, H. M. O'Bryan, E. M. Gyorgy, and J. T. Krause, "Thermal expansion and transitions of single crystal lithium niobates from -60 to 250 °C," Ferroelectronics, **75**, 71-77 (1987).
- 13. H. Kogelnik and R. V. Schmidt, "Switched directional couplers with alternating  $\Delta\beta$ ", IEEE J. Quantum Electron., QE-12, 396-401 (1976).
- M. Haruna and J, Koyama, "Electrooptic branching waveguide switches and the application to 1 x 4 optical switching network", IEEE J. Lightwave Technol., LT-1, 223-227 (1983).
- C. S. Tsai, B. Kim, and F. R. El-Akkari, "Optical channel waveguide switch and coupler using total internal reflection", IEEE. J. Quantum Electron., QE-14, 513-517 (1978).
- H. Sasaki and I. Anderson, "Theoretical and experimental studies on active Y-junction in optical waveguides", IEEE J. Quantum Electron., QE-14, 883-892 (1978).