

LiTaO₃ 結晶を用いた光変調器の考察 (その2)

波々伯部 圭佑*・小 川 健一朗**
末 吉 智 博**・牧 原 竜 也**

A study on the light modulator employed LiTaO₃ crystals (Part II)

Keisuke Hohkabe, Kenichiro Ogawa, Tomohiro Sueyoshi and Tatsuya Makihara

The refractive index of the electrooptic crystal vary with the electric field to applied its crystal. The transverse light modulator employed LiTaO₃ crystal ($L/d = 25$) achieves a modulation depth of 100% at modulating voltage of about 96V. This paper describes on the experimental results of the relations between modulation depth and modulating voltage of 10V at frequency range from 0.1 to 50MHz in two type of transverse light modulators employed two LiTaO₃ crystals and a reflective light modulator employed one LiTaO₃ crystal.

1. まえがき

電気光学結晶は外部電界によって結晶内を伝搬する光に対する屈折率が変化する。

LiTaO₃ 結晶 ($L/d = 25$) を用いた横形光変調器において、100 % の変調の深さを得るには結晶への印加電圧が約 96 V である。

本論文では、2 個の LiTaO₃ 結晶を用いた 2 種類の横形光変調器と 1 個の LiTaO₃ 結晶を用いた反射形光変調器について、周波数範囲 0.1 ~ 50 MHz における振幅 10 V の変調電圧に対する変調の深さの周波数特性の実測結果を示している。

2. 横形光変調器の光強度変調の計算

図 1 において、LiTaO₃ 結晶の y 、 z 軸に 45 度方向の偏光面をもつ直線偏光のレーザ光が結晶に入射すると、結晶内では y 、 z 軸方向の偏光に分離して結晶内を伝搬し、両偏光の間には位相差を生じる。変調電界 $E_z (=V_z/d)$ が与えられる LiTaO₃ 結晶では、 y 、 z 軸方向の偏光に対する屈折率 n_y 、 n_z は

$$n_y \doteq n_o - \frac{1}{2} \gamma_{23} n_o^3 E_z, \quad n_z \doteq n_e - \frac{1}{2} \gamma_{33} n_e^3 E_z \quad (1)$$

である^{(1),(2)}。ここで、 n_o 、 n_e は y 軸方向の偏光、 z 軸方向の偏光に対する屈折率、 γ_{23} 、 γ_{33} は電気光学係数である。

結晶を通過した後の両偏光間の位相差を $\Delta\phi$ とすると、次式で与えられる⁽³⁾。

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_y L - n_z L) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) L - \frac{\pi}{\lambda} (\gamma_{23} n_o^3 - \gamma_{33} n_e^3) \frac{L}{d} V_z \quad (2)$$

* 宇宙通信工学科 ** 電気工学専攻大学院生

ここで、(2)式右辺の第2式において、第1項は自然複屈折による位相差、第2項は変調電圧に依存する位相差を示している。

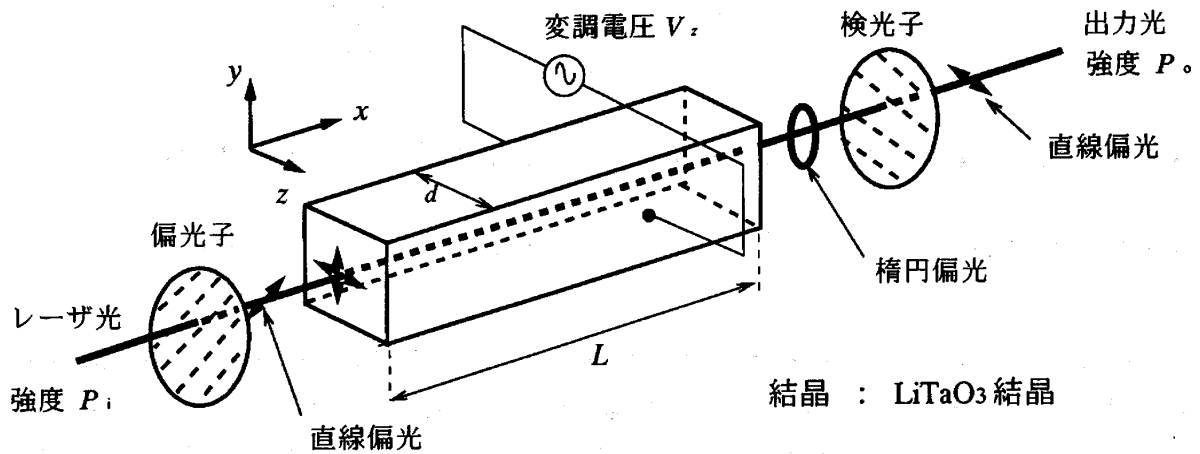


図1 横形光変調器の基本構成

図1においては、入射光の偏光方向と直角方向の偏光成分を通過させる検光子から出力光を取り出すが、入射光強度を P_i 、出力光強度を P_o とすると、

$$\frac{P_o}{P_i} = \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (3)$$

となる。

変調電圧の大きさにできるだけ比例する出力光強度を得るには、動作点を $\Delta\phi = \pi/2$ の点に定めることが望ましい。このため、 $\lambda/4$ 板を用いるが、このとき(2)式の自然複屈折による位相差はキャンセルする必要がある。

3. 試作した光変調器の構成と変調特性

3.1 光変調器の構成

(1) 縦続配置形光変調器

2個の LiTaO_3 結晶を光の伝搬方向に対して縦続配置し、2個の結晶の y 、 z 軸の関係が90度回転した関係になるようにして自然複屈折による位相差をキャンセルする。

結晶の寸法は、 $2 \times 2 \times 25 \text{ mm}$ で、1個の結晶のみに変調電圧を印加する。

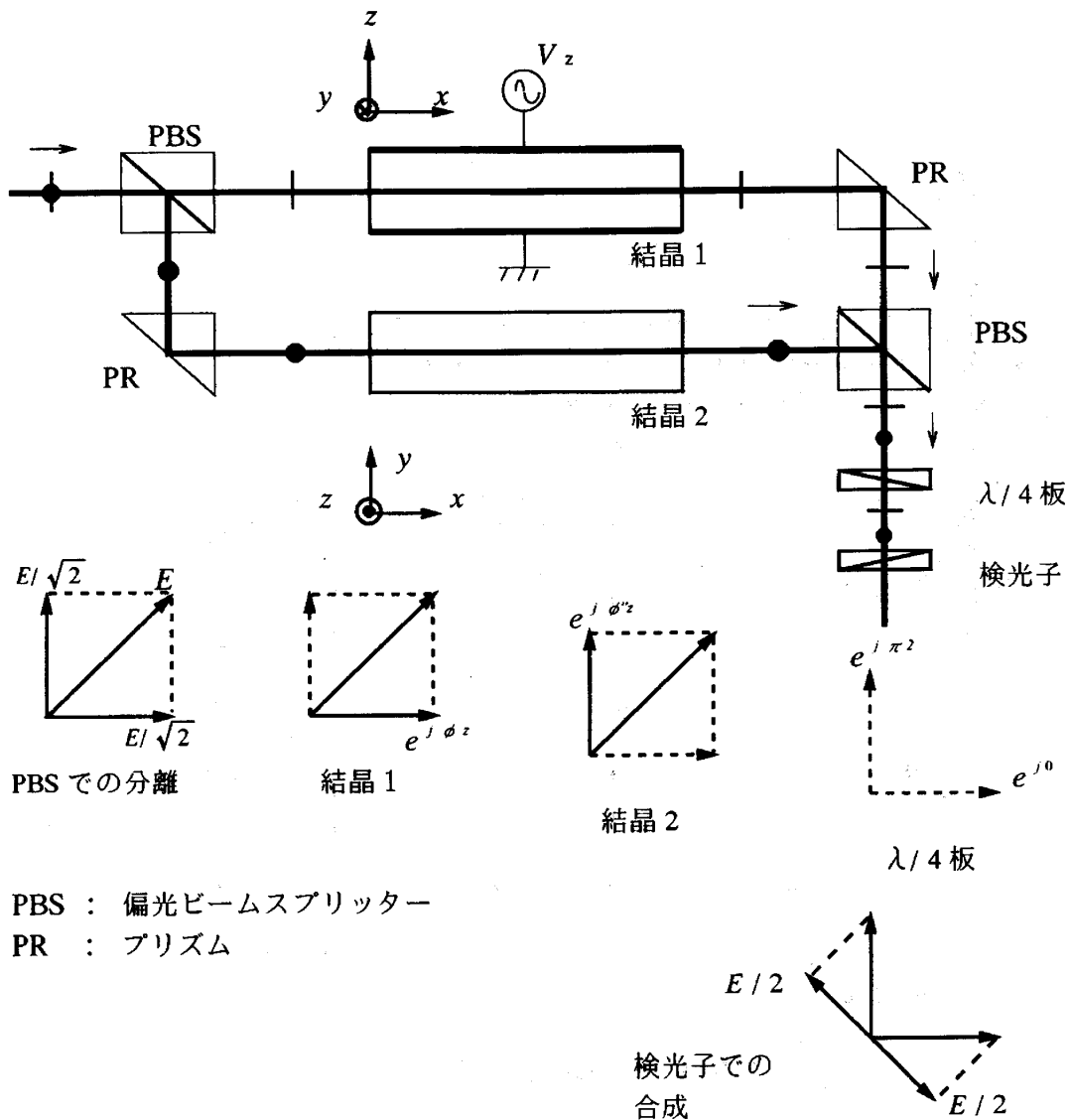
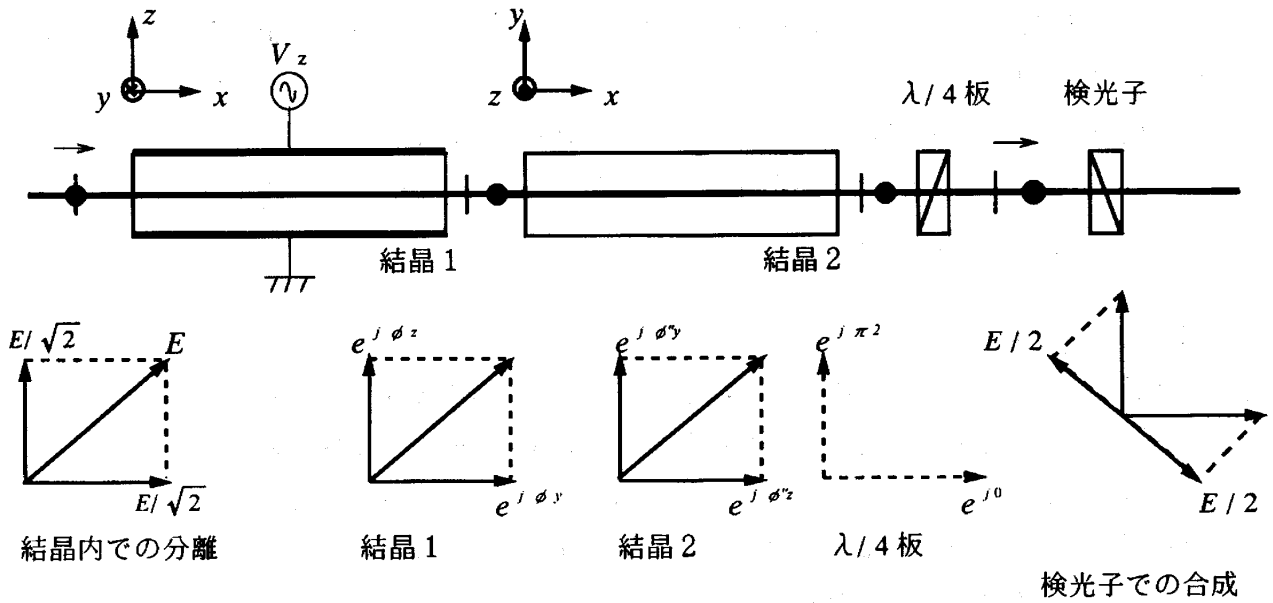
光変調器の構成と各部の偏光の大きさ、位相の関係を図2に示す。

2個の結晶を通過した後の両偏光間の位相差 $\Delta\phi$ は次式で与えられる。

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda} (\gamma_{33} n_e^3 - \gamma_{23} n_o^3) \frac{L}{d} V_z \quad (4)$$

(2) 並列配置形光変調器

2個の LiTaO_3 結晶を光の伝搬方向に対して並列配置し、2個の結晶の y 、 z 軸の関係が90度回転した関係になるようにして、各結晶で z 軸方向の偏光が通過できるようにする。



結晶の寸法は、 $2 \times 2 \times 25 \text{ mm}$ で、1個の結晶のみに変調電圧を印加するため自然複屈折による位相差をキャンセルできる。

光変調器の構成と各部の偏光の大きさ、位相の関係を図3に示す。

それぞれの結晶を通過した後の両偏光間の位相差 $\Delta\phi$ は次式で与えられる。

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda} \gamma_{33} n_e^3 \frac{L}{d} V_z \quad (5)$$

(3) 反射形光変調器

反射ミラーを用い、1個の LiTaO_3 結晶を光が往復して伝搬できるようにする。

自然複屈折による位相差をキャンセルするには反射ミラーに工夫が必要になる。

結晶の寸法は、 $2 \times 2 \times 25 \text{ mm}$ で、この結晶に変調電圧を印加する。

光変調器の構成と各部の偏光の大きさ、位相の関係を図4に示す。

ただし、この場合は出力光強度が最大でも入射光強度の $1/4$ になる。

結晶を往復した後の両偏光間の位相差 $\Delta\phi$ は次式で与えられる。

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (n_o - n_e) L - \frac{2\pi}{\lambda} (\gamma_{33} n_e^3 - \gamma_{23} n_o^3) \frac{L}{d} V_z \quad (6)$$

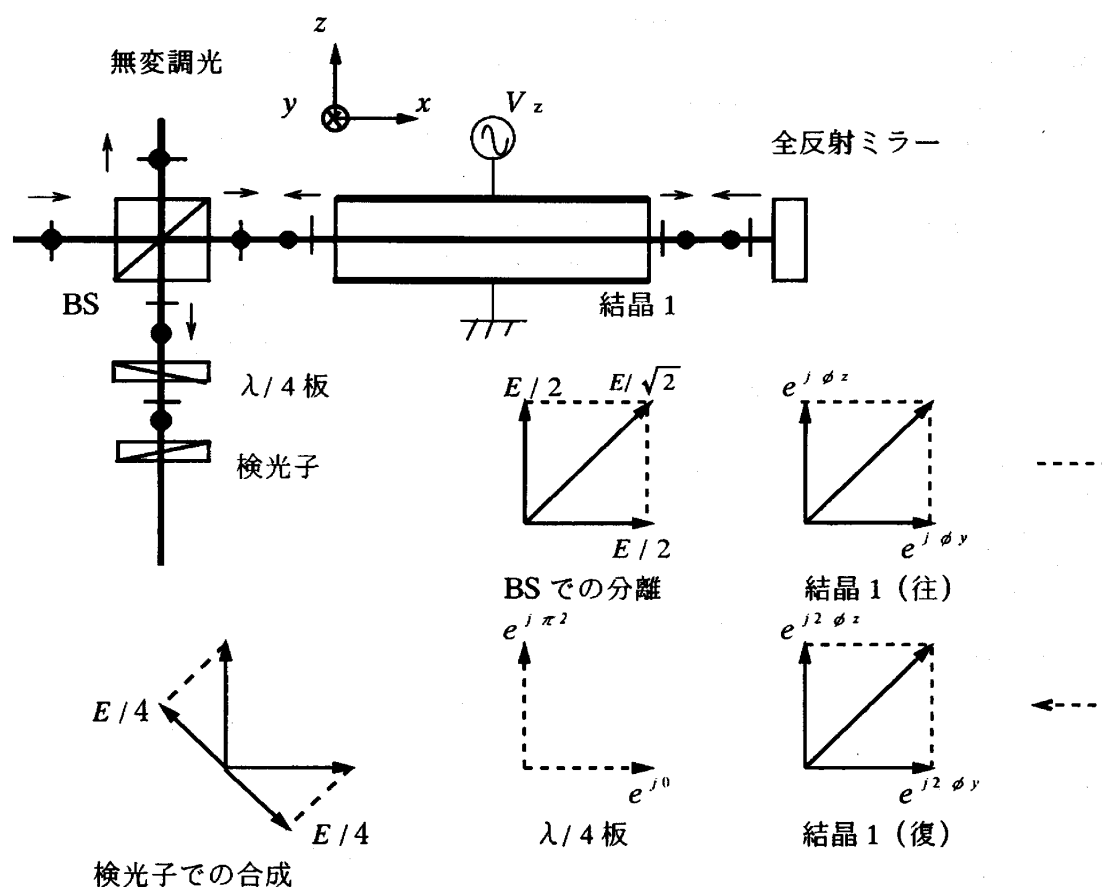


図4 反射形光変調器の構成

3.2 変調の深さの周波数特性

図2、図3、図4に示す各光変調器の構成について、変調の深さを実測した。それらの実測結果の一例を図5、図6、図7に示す。

なお、反射形光変調器については、入射光の分離に無偏光ビームスプリッターを使用した場合とハーフミラーを使用した場合の結果を示している。

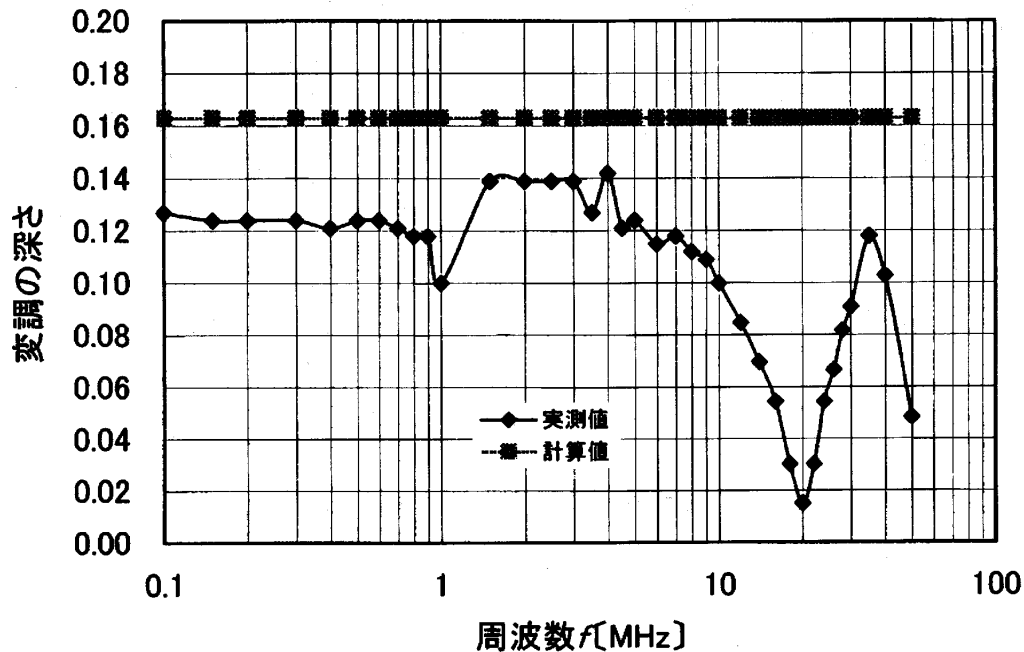


図5 縦続配置形光変調器の変調の深さの周波数特性

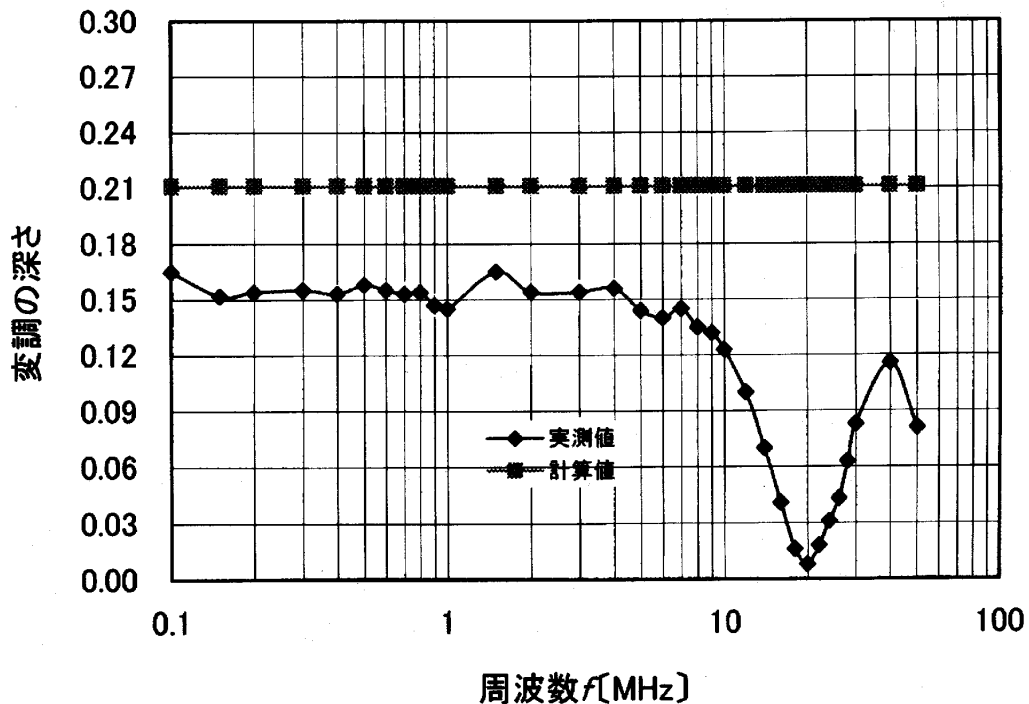


図6 並列配置形光変調器の変調の深さの周波数特性

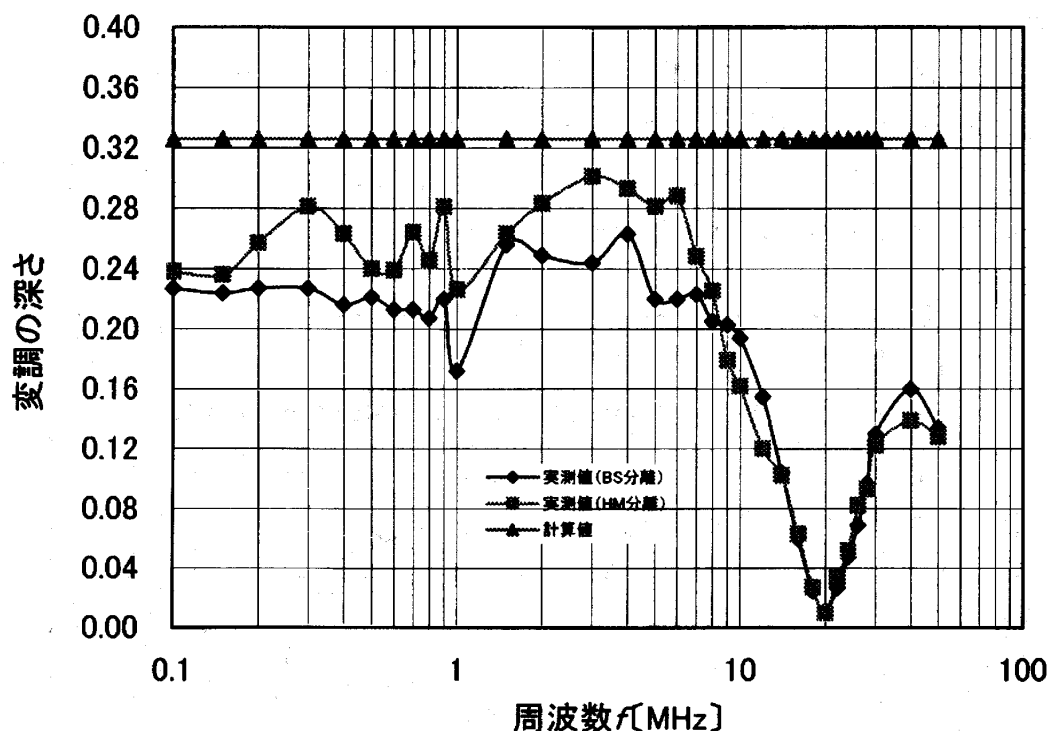


図7 反射形光変調器の変調の深さの周波数特性

3.3 考察

3種類の光変調器の構成に関して、変調の深さの実測値や計算値、自然複屈折による位相差などについての比較を表1に示す。

縦続配置形光変調器と並列配置形光変調器では2個の結晶を使用することによって自然複屈折による位相差がキャンセルできると考えられたが、実測時には光路長の温度特性により動作点がシフトすることが見られた。反射形光変調器では、反射ミラーに全反射ミラーを使用しているため自然複屈折による位相差はキャンセルできないが、動作点のシフトがあるため $\Delta\phi = \pi/2$ の点で変調の深さの実測ができた。

この方式では自然複屈折による位相差をキャンセルするには反射ミラーを直角プリズムなどの使用について検討することが必要である。

本研究の実測結果から次のような問題点と改善が必要になる。

- (1) 20 MHz 付近でほとんど変調がかからない点が見られた。これは等価回路から計算される共振現象により結晶に印加される電圧が小さくなったためと思われる⁽³⁾。

このことを改善するには、変調器の構造をより単純な集中定数回路形の光変調器を構成することも一つの方策である。

- (2) 自然複屈折による位相差をキャンセルできることを期待して2個の結晶を用いたが、結晶寸法の波長オーダーの違いにより動作点が $\Delta\phi = \pi/2$ の点にならなかった。

その上、屈折率が温度特性をもつため実験中に動作点が動いていた⁽³⁾。

これらのことについては、次のように考えられる。結晶の長さに極僅かの違いがあると、結晶の長さを L_1 、 L_2 とすると、自然複屈折による位相差は、

$$\frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) (L_1 - L_2) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) \Delta L \quad (7)$$

となり、数 π ラジアン位の位相差が生じることが考えられる。

さらに、結晶の温度変化によって屈折率の差が 1/100 程度変化しても動作点が π ラジアン程度動くことが予想される。

表1 本研究における電気光学結晶(LiTaO₃結晶)を用いた光変調方式の比較

比較項目	変調形式	縦横配置形変調器	並列配置形変調器	反射形変調器(HM分離)
結 晶 の 数	寸法 $2 \times 2 \times 25\text{mm}$	2	2	1
半波長電圧(計算値)	$L/d = 25$	95.6 V	74.4 V	47.8 V
	$L/d = 12.5$	192 V	148 V	95.6 V
透 過 率	偏光子 \perp 検光子	1	1	0.25
変調の深さ(100%)の電圧(振幅)	本研究の計算値	95.6 V	74.4 V	47.8 V
電圧(振幅)10Vに対する変調の深さ	計算値	0.163	0.211	0.326
電圧(振幅)10Vに対する変調の深さ	実測値(最大)	0.139	0.165	0.301
	実測値(最小)	0.015(20MHz)	0.008(20MHz)	0.010(20MHz)
	実測値(平均)	0.12(0.1~10MHz)	0.15(0.1~8MHz)	0.25(0.1~10MHz)
自然複屈折による位相差		0	0	$(4\pi/\lambda)(n_o - n_e)L$
光路長の温度特性	~推定値、=文献*	$(1/L)\partial(\Delta n\Delta L)/\partial T \sim 4.7 \times 10^{-5}/250/^\circ\text{C}$	$(1/L)\partial(n\Delta L)/\partial T \sim 4.7 \times 10^{-5}/250/^\circ\text{C}$	$(1/L)\partial(\Delta n L)/\partial T = 4.7 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
動作点の動き(シフト)	実験時	速い	速い	速い
電圧印加方法の改善、 自然複屈折の消去		結晶間に旋光子を置き電圧印加方向を揃える	各光軸に旋光子を置き電圧印加方向を揃える	結晶と反射器間に旋光子を置く、または反射器にプリズムを使用して自然複屈折を消去する

文献*：青木昌治編著，“オプトエレクトロニックデバイス”，p.142，昭晃堂，昭和61年。

4. むすび

本研究は電気光学結晶を用いた光変調の基礎特性を調べる教材を製作することに着目して行われた。LiTaO₃結晶を用いると、かなりの変調の深さを得ることが実測できた。

今後、教材としてまとめていくには光変調器の構造をより単純な集中定数回路形にし、自然複屈折による位相差をキャンセルする上から結晶の温度制御が重要になると思われる。

参考文献

- (1) 多田邦雄，神谷武志，“光エレクトロニクスの基礎”，第9章，丸善，昭和63年。
- (2) 中澤勲一，鎌田憲彦，“光物性・デバイス工学の基礎”，第7章，培風館，1999年。
- (3) 波々伯部圭佑，小川健一朗，末吉智博，牧原竜也，“LiTaO₃結晶を用いた光変調器の考察”，
福井工業大学研究紀要，第32号（第一部），pp.365-371，2002年。

(平成14年12月6日受理)