

LiTaO₃ 結晶を用いた光変調器の考察

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 with LiTaO₃ crystals

Keisuke Hohkabe, Kenichiro Ogawa, Tomohiro Sueyoshi and Tatsuya Makihara

Since the laser is invented, the light modulator with an electrooptic crystal has been studied by several workers. We have proposed the reduction of modulating voltage for light modulator with KDP-type crystals employed the crystal cut of $45^\circ z - 45^\circ y'$ cut⁽¹⁾.

The refractive index of the electrooptic crystal is varied by applied electric field to its crystal. In the case of transverse light modulator with LiTaO₃ crystal, modulation depth of 100% is accomplished by applied voltage of about 90V to its crystal.

In this paper, it is shown that modulation depth of 12% was accomplished by voltage of 10V at frequency rang from 0.1 to 10MHz for light modulator with LiTaO₃ crystal.

1. まえがき

電気光学結晶を用いた光変調器の研究は、レーザの発明以来、数多く行われてきた。筆者らは、以前、 $45^\circ z - 45^\circ y'$ カットの結晶カットの KDP タイプ結晶を用いた変調器について、変調電圧を低減できることを提案した⁽¹⁾。

電気光学結晶に外部から電界を印加すると、屈折率が変化する。LiTaO₃ 結晶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 96V 必要である。

本研究では、LiTaO₃ 結晶を用いて、周波数 0.1-10MHz にわたり 10V の変調電圧で約 12%の変調の深さを得た。

2. 電気光学効果と光変調器の構成

2.1 異方性結晶と光の電磁界

異方性結晶の誘電率テンソルは対称テンソルであり、電界 \mathbf{E} と電束密度 \mathbf{D} の関係を主軸座標系を用いて表すと、

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

と書ける。なお、磁界 \mathbf{H} と磁束密度 \mathbf{B} の関係は、比誘電率 $\mu_r = 1$ であるから、 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} =$

* 宇宙通信工学科 ** 電気工学専攻大学院生

$\mu_0 \mathbf{H}$ である。ここで、ポインティングベクトル $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ 及び \mathbf{D} に垂直な方向の波数ベクトル \mathbf{k} を導入して異方性結晶内の電磁界の関係を示すと、図 1 のようになる。

図 1 は、光の波面 (\mathbf{D} 、 \mathbf{H} を含む平面) は波数ベクトル \mathbf{k} の方向に進み、光のエネルギーは、 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} を含む平面と垂直なベクトル \mathbf{S} の方向 (ベクトル \mathbf{k} と角度 α をなす方向) に進むことを示している。異方性結晶内では、光の波面の進行方向とエネルギーの伝搬方向とは一致しない場合も生じる。

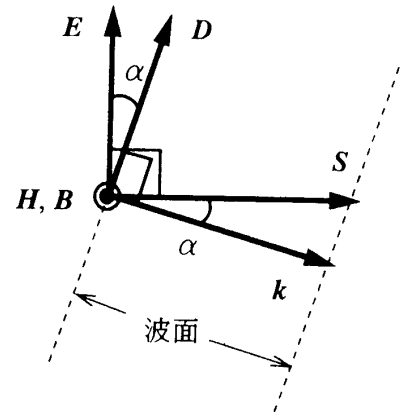


図 1 結晶内の電磁界

2.2 屈折率楕円体と異方性結晶内の光の伝搬

異方性結晶について、電気的エネルギー密度 u_e は、

$$u_e = \frac{1}{2} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}) = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j E_i \epsilon_{ij} E_j \quad i, j = x, y, z \quad (2)$$

と表され、電気的エネルギー密度 u_e が一定となる曲面を考えると、次式の屈折率楕円体を導出できる。

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (3)$$

ここで、 x, y, z は主軸座標系であり、 n_x, n_y, n_z は x, y, z 軸方向の偏光に対する屈折率を示す。この屈折率楕円体は、結晶内における光の波面の伝搬に関する情報を与える。

すなわち、伝搬する光の波面法線方向に垂直であり、かつ、屈折率楕円体の原点を含む平面によって屈折率楕円体を切断すると、この平面上における楕円体の切り口は楕円として描ける。この楕円の長軸と短軸の方向が伝搬する光の偏光方向 (光の電界の方向) を示し、長軸、短軸の長さがそれぞれの偏光に対する屈折率を与える。

異方性結晶は、光学的には 3 種類に分類され、それぞれの結晶の主軸座標方向の偏光に対する屈折率は次のようになる。

等方性結晶 : $n_x = n_y = n_z = n_o$

単軸結晶 : $n_x = n_y = n_o \quad n_z = n_c \quad (n_o \neq n_c)$

二軸結晶 : $n_x \neq n_y \neq n_z$

ここで、 n_o, n_c はそれぞれ常光線、異常光線に対する屈折率を表す。

2.3 電気光学効果と屈折率楕円体

異方性結晶の中には外部から印加される電界によって屈折率が変化する電気光学効果を示すものがある。外部電界に比例する形の屈折率の変化を示す 1 次電気光学効果 (ポッケル効果) を有する異方性結晶の屈折率楕円体は次の 2 つの式から導かれる。

$$a x^2 + b y^2 + c z^2 + 2 f y z + 2 g z x + 2 h x y = 1 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} a - a_0 \\ b - b_0 \\ c - c_0 \\ f \\ g \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \\ \gamma_{41} & \gamma_{42} & \gamma_{43} \\ \gamma_{51} & \gamma_{52} & \gamma_{53} \\ \gamma_{61} & \gamma_{62} & \gamma_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $a_0 = 1/n_x^2$ 、 $b_0 = 1/n_y^2$ 、 $c_0 = 1/n_z^2$ であり、 γ_{ij} は電気光学係数、 E_x 、 E_y 、 E_z は外部電界である。

本研究で用いている LiTaO₃ 結晶は単軸結晶であり、電気光学係数は、 $\gamma_{12} = -\gamma_{22} = \gamma_{61}$ 、 $\gamma_{13} = \gamma_{23}$ 、 γ_{33} 、 $\gamma_{42} = \gamma_{51}$ が存在するので^{(2),(3)}、(4)、(5)式から LiTaO₃ 結晶についての屈折率楕円体は次のように書ける。

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{12}E_y + \gamma_{13}E_z \right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22}E_y + \gamma_{23}E_z \right) y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33}E_z \right) z^2 \\ & + 2\gamma_{42}E_y yz + 2\gamma_{51}E_x zx + 2\gamma_{61}E_x xy = 1 \end{aligned} \quad (6)$$

LiTaO₃ 結晶の電気光学係数は、 γ_{33} の値が大きいので、これを有効に利用する光変調器の構成としては次のようなものが望ましい。すなわち、光の伝搬方向は x 軸（または y 軸）方向とし、外部電界は z 軸方向の E_z を加える。そして、入射光の偏光方向は y 軸（または x 軸）方向及び z 軸方向に偏光成分をもつような直線偏光とする。

いま、 x 軸方向の光の伝搬を考えると、上述の屈折率楕円体の性質をから(6)式の屈折率楕円体において、 $x = 0$ とし、外部電界が E_z のみであるから、 $E_x = E_y = 0$ とおけるので、次の楕円を表す式が得られる。

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{23}E_z \right) y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33}E_z \right) z^2 = 1 \quad (7)$$

ここで、 γ_{ij} 、 E_j の値は非常に小さいことを考慮すると、(7)式は次のように変形できる。

$$\frac{1}{n_y^2} y^2 + \frac{1}{n_z^2} z^2 = 1 \quad (8)$$

ここで、 n_y 、 n_z は次のように与えられる。

$$n_y \doteq n_o - \frac{1}{2} \gamma_{23} n_o^3 E_z, \quad n_z \doteq n_e - \frac{1}{2} \gamma_{33} n_e^3 E_z \quad (9)$$

上述の考察をもとに、LiTaO₃ 結晶を用いて構成した横形光変調器（光の伝搬方向と外部電界の方向が直交している方式）の基本形を図2に示す。

2.4 横形光変調器による光強度変調の計算

図2について、結晶への入射光は偏光子を通して y 、 z 軸に 45 度方向の直線偏光にする。ただし、直線偏光のレーザ光を使用するときは偏光子は不要である。

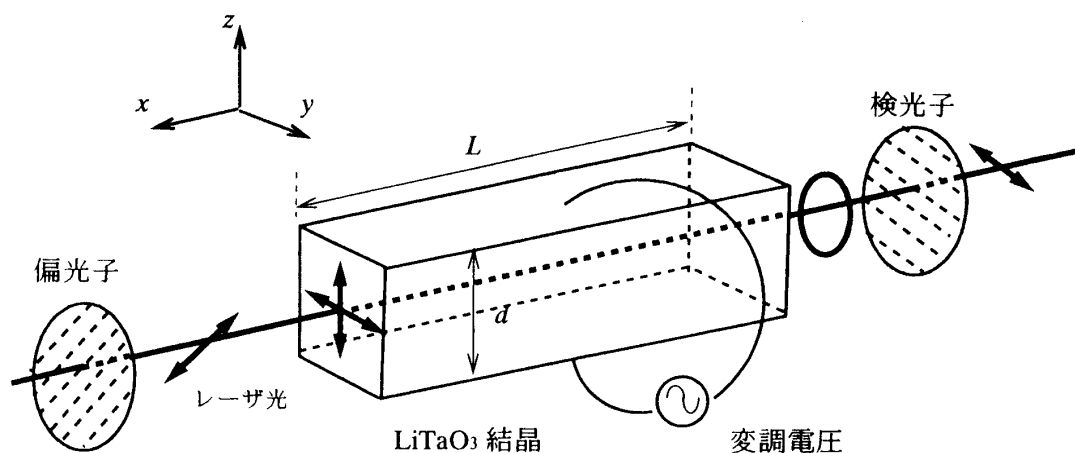


図2 横形光変調器の基本的構成

結晶に入射した直線偏光は y 、 z 軸方向の偏光として結晶内を伝搬し、それぞれ位相変化 ϕ_y 、 ϕ_z を生じ、結晶を通過した後、一般に楕円偏光となる。この楕円偏光が検光子を通過することにより強度変調された光を得る。入射光（偏光子を通過した後の光）の電界を E_i 、検光子を通過した後の光の電界を E_o とすると、次のようになる（図3参照）。

$$E_o = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} E_i (e^{j\phi_y} - e^{j\phi_z}) = \frac{1}{2} E_i e^{j\phi_y} (1 - e^{j\Delta\phi}) \quad (10)$$

ここで、 $\Delta\phi = \phi_y - \phi_z$ である。

(10)式を用いて、入射光強度 P_i と出射光強度 P_o の関係 P_o/P_i を求めると、

$$\frac{P_o}{P_i} = \sin^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (11)$$

となり、 $\Delta\phi/2$ に対する P_o/P_i の関係は図4のようになる。

次に、 $\Delta\phi$ については、以下のように求められる。

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_y L - n_z L) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) L - \frac{\pi}{\lambda} (\gamma_{23} n_o^3 - \gamma_{33} n_e^3) \frac{L}{d} V_m \quad (12)$$

ここで、 λ は入射光の波長、 V_m は変調電圧の振幅、 L は結晶の長さ、 d は結晶の厚みである。

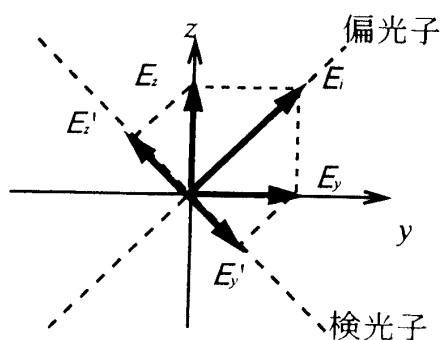


図3 光の電界の関係

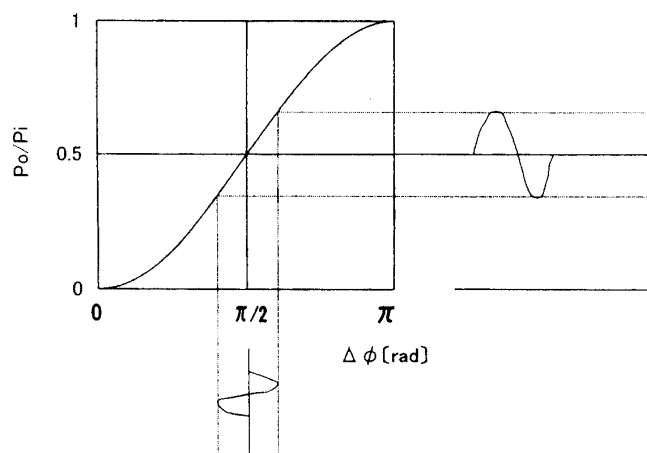


図4 光強度変調特性

(12)式の第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。そこで、2個の結晶を用いて（後述）、自然複屈折による位相差をキャンセルし、 $\lambda/4$ 板を使用すると、動作点を $\Delta\phi = \pi/2$ の点に定めることができる（図4）。

このとき、 $\Delta\phi$ が $\pi/6$ だけ振れるに必要な変調電圧を加えれば 50% の光強度変調が得られる。LiTaO₃ 結晶では、この電圧は約 32 V である。

3. 試作した光変調器の特性

3.1 実験方法

2 個の LiTaO₃ 結晶を光の伝搬方向に対して縦続配置になるようにした変調器構成により変調深さの周波数特性を測定した。(12)式で示される自然複屈折による位相差をキャンセルする目的で、2 個の結晶を縦続配置にしたが、実験の都合上、1 個の結晶のみに変調電圧を印加した。1 個の結晶の寸法は、 $2 \times 2 \times 25$ mm である。また、変調器の両端には 50Ω の終端抵抗を接続した。結晶へ印加する変調電圧は発振器出力を増幅し、振幅 10 V 一定になるようにした。周波数は 100 kHz ~ 50 MHz にわたって可変した。実験系統図を図5に示す。なお、変調器と変調電源を含む等価回路は図6のように考えられる。

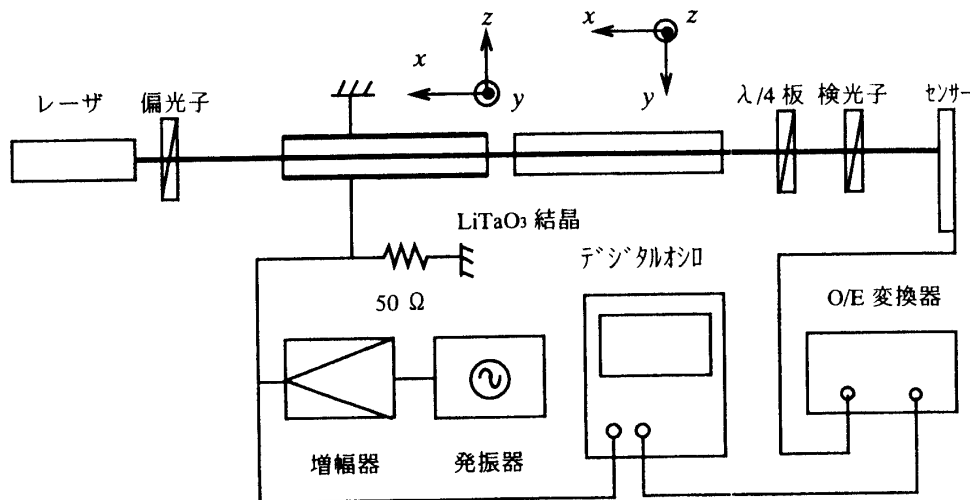


図5 実験系統図

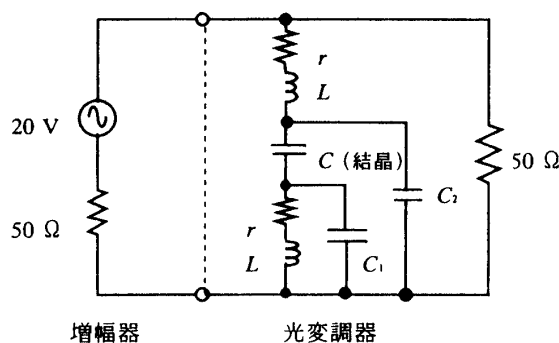


図6 等価回路

3.2 実験結果と考察

本実験で得られた結果の一例を図7に示す。変調の深さは平均的に予測値(0.164)より約20%小さい値が得られた。この他にもいくつかの問題点が見られた。

- (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ように、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考えられる。計算結果の一例を図8に示す。これ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にする必要があると思われる。

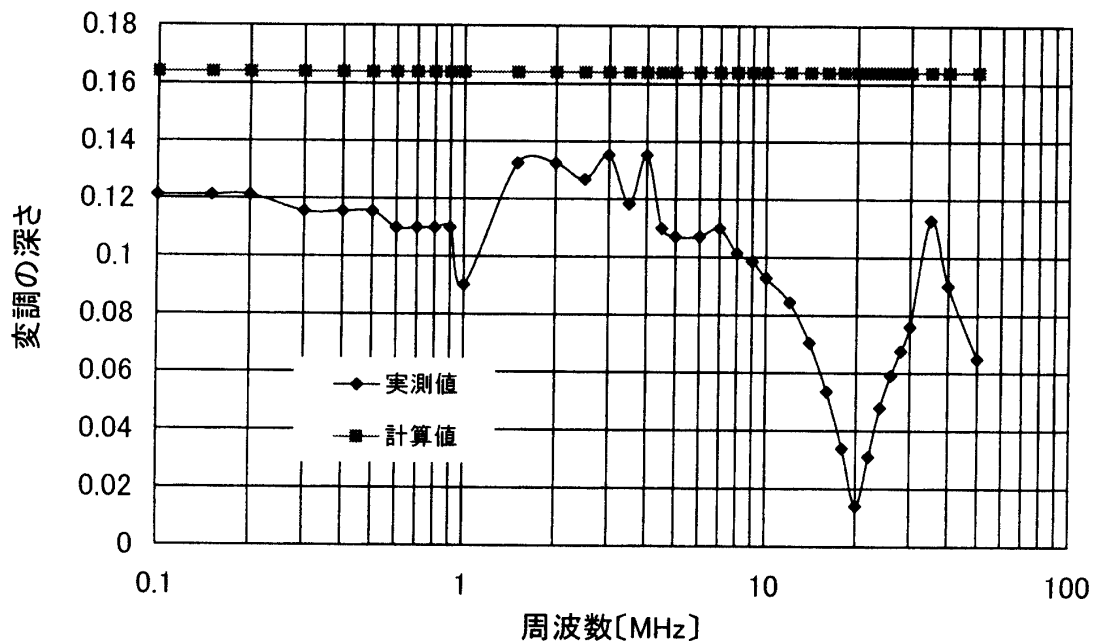


図7 変調の深さの周波数特性

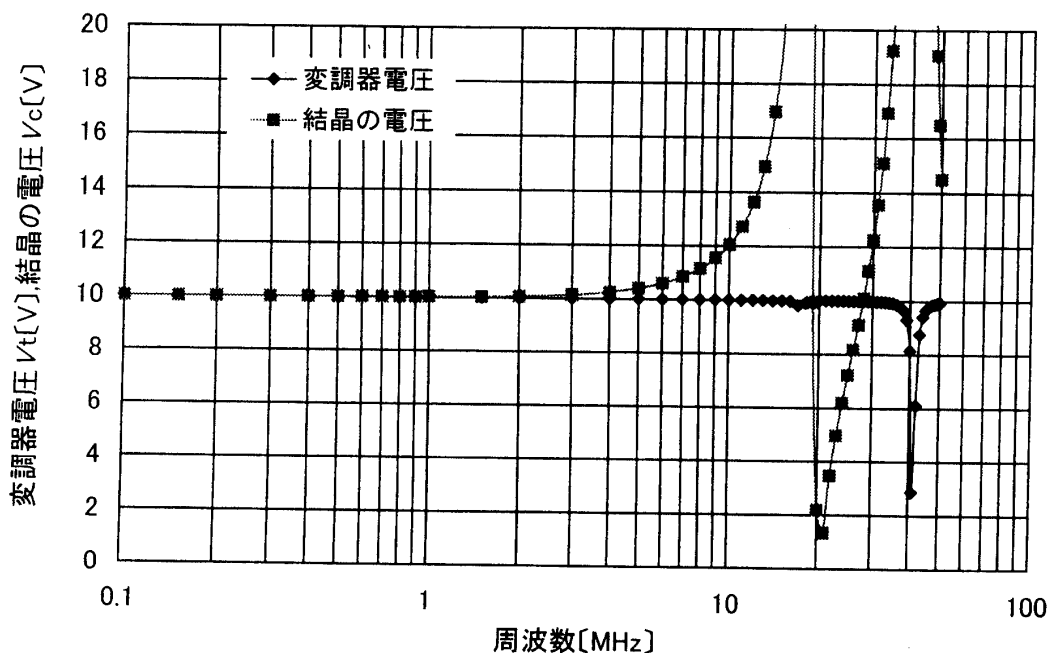


図8 変調器電圧及び結晶の電圧の周波数特性

図6の等価回路において、計算に用いた回路定数は次の通りである。

$C = 9 \text{ pF}$ (結晶の寸法から求めた静電容量)、

$r = 0.2 \text{ } \Omega$ 、 $L = 2 \text{ } \mu\text{H}$ 、 $C_1 = 30 \text{ pF}$ 、 $C_2 = 10 \text{ pF}$ (実測から予想した値)

(2) 自然複屈折による位相差をキャンセルするように2個の結晶を用いたが、波長オーダーの結晶寸法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。

図7の結果は動作点が $\Delta\phi = \pi/2$ の点になったときに測定した結果である。

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して、長さを L_1 、 L_2 とすると、自然複屈折による位相差は、

$$\frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)(L_1 - L_2) = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) \Delta L \quad (13)$$

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。

また、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。

(13)式の検討に使用した数値例を以下に示す。

$$n_e = 2.180, n_o = 2.176, n_e - n_o = 0.004 \quad (2)$$

$$\lambda = 632.8 \times 10^{-9} \text{ m}, \Delta L = 10^{-4} \text{ m}, \Delta L/\lambda = 1.58 \times 10^3$$

$$2\pi(n_e - n_o)(\Delta L/\lambda) = 2\pi \times 6.32$$

4. むすび

今回の報告は電気光学結晶を用いた高周波領域での光変調の基礎特性を得ることを目的にした実験結果と考察であるが、LiTaO₃結晶によって、かなりの変調の深さを得ることが分かる。

安定な変調を行うには変調器の構成、構造を十分考慮して改善する必要がある。

現在、並列配置形の変調器や反射形の変調器についても実験的検討を行っており、今後それぞれの特性の把握と比較検討を行っていく予定である。

参考文献

- (1) 波々伯部圭佑, 松尾幸人, “光変調に対するKDPタイプ結晶の最適カット”, 信学論, 54-B, pp.237-244.
- (2) 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.
- (3) 中澤勲一郎, 鎌田憲彦, “光物性・デバイス工学の基礎”, 第7章, 培風館, 1999年.

(平成13年12月6日受理)