

論 文

Bi₁₂SiO₂₀ 結晶を用いた光電圧測定でのλ/4板の影響

檜垣 勝*, 山口 静夫*

藤井 邦夫*, 曽根 勇**

(2001年3月21日受付; 2001年8月31日受理)

Influence of a Quarter Wave Plate on the Modulation Depth Caused by Pockels Effect in Bi₁₂SiO₂₀ Crystal for Optical Voltage Measurement

Masaru HIGAKI*, Shizuo YAMAGUCHI*,

Kunio FUJII* and Isamu SONE**

(Received March 21, 2001; Accepted August 31, 2001)

This paper deals with the theoretical analysis and experimental investigation of the modulation depth caused by Pockels effect in Bi₁₂SiO₂₀ (BSO) crystal with optical activity, when linearly polarized light passed through the BSO crystal is converted to circular polarization using a quarter wave plate. Supposing that the elliptical polarization caused by the Pockels effect occurred while passing through the BSO crystal together with the rotation of the polarization plane caused by optical activity, theoretical equations of the modulation depth caused by the Pockels effect were deduced. Experiments were carried out using a single or double BSO crystals placed serially, and compared with the calculated results. The BSO was 5mm in thickness and modulated with a longitudinally applied voltage. The calculated results agreed well with the measured modulation depth. The dependence of the modulation depth upon the magnitude of the rotation angle of the polarization plane and applied voltage was clarified. It was also clarified that the modulation depth of the BSO crystal with linearly polarized light showed a slight difference between positive and negative voltage application.

1. まえがき

光学現象を利用した電圧・電流変成器は絶縁が容易、小型で広帯域、電磁誘導障害を受けにくいなど多くの利点を有しており、それらの開発と実用化が各所で進められている¹⁻⁴⁾。ポッケルス効果を利用した電圧計測で、2個のBi₁₂SiO₂₀（以下 BSO と略記する）結晶を組み合わせ、それらに加える直流電圧の極性を変えるとポッケルス効果

による変調率も変化すること、特に二つの BSO 結晶に逆極性での電圧を加えると変調率が大きくなることなどを明らかにした⁵⁾。ポッケルス効果を利用した電圧・電界計測では、前に調べたポッケルス素子に円偏光を直接入射する方法のほかに、素子に直線偏光を入射し、素子を通過した後に円偏光とする方法がある⁶⁾。後者の方法についてはこれまでほとんど解析と実験がなされていないので、今回円偏光入射と同じような効果が現われるかについて実験と解析を行い、円偏光入射の場合との違いを明らかにし、それぞれの場合での変調率の計算式を提案することを試みた。さらに、ポッケルス効果による変調率に及ぼす旋光角や印加電圧の大きさの影響などについて解析した。なお、ポッケルス効果による変調率とは、電圧印加時と無課電時の出力光量の差を無課電時の出力光量で除算した値で定義したものである。

2. 実験の方法

二つの BSO 結晶を組み合わせ、ポッケルス効果による直流電圧の変調率を測定する実験回路を図1に示す。今回

キーワード：光電圧測定、BSO 結晶、ポッケルス効果、1/4 波長板、自然旋光性

* 九州共立大学工学部電気電子情報工学科 (807-8585
北九州市八幡西区自由ヶ丘 1-8)

Department of Electrical, Electronic, and Information Engineering, Kyushu Kyoritsu University, 1-8 Jiyugaoka, Yahatanishi, Kitakyushu, Fukuoka 807-8585, Japan

**株式会社日立製作所電力・電機開発研究所 (316-8501
日立市国分町 1-1-1)

Electrical Power Delivery System Department, Power & Industrial Systems R & D Laboratory, Hitachi Ltd., 1-1-1 Kokubu-cho, Hitachi, Ibaraki 316-8501, Japan

は、図1(a)のようにポッケルス素子に直線偏光を入射し、ポッケルス素子を通過した後に円偏光とする場合について調べた。図1(b)は円偏光を直接入射する場合である。素子には自然旋光性を持つBSO結晶を使い、光源には波長860nmの発光ダイオードを使った。検光子から出た光はフォトダイオードにより電気信号に変換され、デジタルマルチメータでその大きさを測定した。検光子では、偏光子の偏光軸に対し0°～360°に変えて測定した。

図2に直線偏光入射でのBSO結晶、λ/4板、検光子の構成と、使用したBSO結晶の方位、電圧印加方向、光透過方向を示す。BSO結晶は電圧印加と光透過が同じ方向の縦型電圧変調で、厚さは5mmである。

3. ポッケルス効果による変調率の解析

BSO結晶などの自然旋光性を有するポッケルス素子に円偏光を入射したときのポッケルス効果による変調率については前に解析した⁵⁾。今回は、このような素子に直線偏光を入射し、素子を通過した後に円偏光に直す場合について解析し、両者の場合での変調率の計算式を明らかにする。その際、素子1個の旋光能はθ_a[rad/mm]、半波長電圧はV_π[V]であるとする。

3.1 素子単体での変調率

図2のように、結晶軸(x軸)方向に偏光軸を持つ偏光子により直線偏光を作り、それを電圧Vが加わっている旋光性を有するポッケルス素子であるBSO結晶に入射させる。厚さlの素子を通過した後のポッケルス素子の主軸x'、y'軸の光の電界強度E_{x0'}、E_{y0'}は次式で与えられる^{7,8)}。

$$\begin{vmatrix} E_{x0}' \\ E_{y0}' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} E_{xi}' \\ E_{yi}' \end{vmatrix} \quad (1)$$

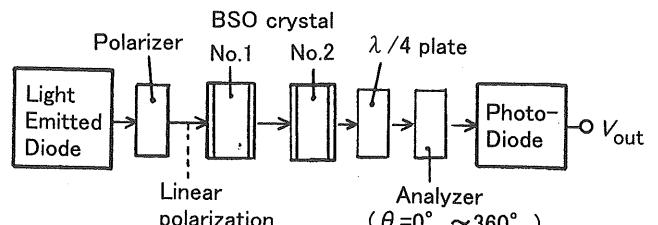
ここで、E_{xi'}、E_{yi'}は入射光側の主軸x'、y'軸の電界強度で、直線偏光を入射したときはE_{xi'}=1/√2、E_{yi'}=-1/√2である。また、

$$\left. \begin{array}{l} a_{11} = \cos(\phi/2) - i\{(\pi V/V_\pi)/\phi\}\sin(\phi/2) \\ a_{12} = -(2\theta_a l/\phi)\sin(\phi/2) \\ a_{21} = (2\theta_a l/\phi)\sin(\phi/2) \\ a_{22} = \cos(\phi/2) + i\{(\pi V/V_\pi)/\phi\}\sin(\phi/2) \end{array} \right\} \quad (2)$$

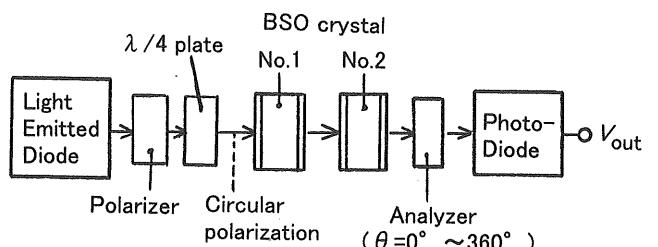
であり、φは次式で与えられる。

$$\phi = \sqrt{(\pi V/V_\pi)^2 + (2\theta_a l)^2} \quad (3)$$

この素子から出射する電界強度E_{x0'}、E_{y0'}は偏光子の偏光軸に対して角度(θ_a×l)だけ旋光するので、1/4波長板によりこの角度(θ_a×l)にさらに45°を加えて円偏光に直す。すなわち、図2に示した1/4波長板からの出射光の電界強度E_{x''}、E_{y''}は次式で与えられる。



(a) Incidence of linearly polarized light



(b) Incidence of circular polarization

図1 実験回路

Fig.1. Experimental circuit.

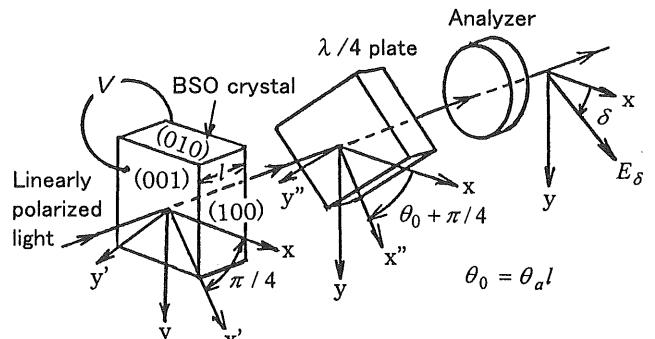


図2 BSO結晶、λ/4板と検光子の構成

Fig.2 Arrangement of BSO crystal, quarter wave plate, and analyzer.

$$\left. \begin{array}{l} E_x'' = E_{x0}' \cdot \cos \theta_0 + E_{y0}' \cdot \sin \theta_0 \\ E_y'' = -i(-E_{x0}' \cdot \sin \theta_0 + E_{y0}' \cdot \cos \theta_0) \end{array} \right\} \quad (4)$$

ここで、

$$\theta_0 = \theta_a \times l \quad (5)$$

と置いている。

ゆえに、図2で検光子の偏光軸が偏光子の偏光軸(x軸)に対してなす角度をδ[°]とすると、検光子からの出射光の電界強度E_δは、

$$E_\delta = E_x'' \cdot \cos(\pi/4 + \theta_0 - \delta) - E_y'' \cdot \cos(\pi/4 + \theta_0 - \delta) \quad (6)$$

で与えられる。ここで、δ'=δ×π/180と置いている。

この検光子からの出射光をフォトダイオードで電気信

号に直す。電界強度 E_s の絶対値を求め、それを自乗すると出力電圧 V_{out} が求められる。すなわち、

$$V_{out} = \frac{k}{\sqrt{2}} \left\{ \begin{aligned} & 1 + \sin 2\theta_0 \cos \phi \sin 2(\theta_0 - \delta') \\ & - \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2\theta_0 \sin 2(\theta_0 - \delta') \\ & + \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2(\theta_0 - \delta') \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 k は光電変換器で光量を電気信号に変換するときの変換係数である。

ゆえに、直線偏光を入射した場合のポックルス効果による変調率 m_c は、電圧 0V での出力電圧 $V_{out} = k/\sqrt{2}$ であるから、

$$\begin{aligned} m_c = & \sin 2\theta_0 \cos \phi \sin 2(\theta_0 - \delta') \\ & - \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2\theta_0 \sin 2(\theta_0 - \delta') \\ & + \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2(\theta_0 - \delta') \end{aligned} \quad (8)$$

で与えられることになる。 m_c は前記で定義した変調率の計算値を意味する。

円偏光を入射した場合の変調率 m_c' は前に報告しており⁵⁾、次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} m_c' = & \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2\delta' \\ & + 2 \left(\frac{(2\theta_a l)(\pi V / V_\pi)}{\phi^2} \right) \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \sin 2\delta' \end{aligned} \quad (9)$$

3.2 素子2個直列での変調率

図1(a)のように旋光性を持つポックルス素子を2個直列に配置し、それらへの電圧 V の加え方を変えた場合の変調率の検光子角度依存性についても、上記の素子単体の場合と同じようにして解析できる。以下にその結果をまとめ。直線偏光を入射した場合の変調率を m_c で与え、円偏光を入射した場合の変調率を m_c' で与える。

3.2.1 素子2個に同じ電圧を同じ電界方向に印加

$$\begin{aligned} m_c = & \sin 4\theta_0 \cos 2\phi \sin 2(2\theta_0 - \delta') \\ & - \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right) \sin 2\phi \cos 4\theta_0 \sin 2(2\theta_0 - \delta') \\ & + \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \sin 2\phi \cos 2(2\theta_0 - \delta') \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} m_c' = & \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \sin 2\phi \cos 2\delta' \\ & + 2 \left(\frac{(2\theta_a l)(\pi V / V_\pi)}{\phi^2} \right) \sin^2 \phi \sin 2\delta' \end{aligned} \quad (11)$$

3.2.2 素子2個に同じ電圧を逆の電界方向に印加

$$\begin{aligned} m_c = & \sin 2\alpha \sin 4\theta_0 - 2 \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right) \sin \phi \sin 2\alpha \cos 4\theta_0 \\ & + \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right)^2 \left[4(1 + \sin 2\alpha \sin 4\theta_0) \left\{ \sin^4 \left(\frac{\phi}{2} \right) - \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \right\} \right. \\ & \quad \left. + (1 - \sin 2\alpha \sin 4\theta_0) \sin^2 \phi \right] \\ & + 4 \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right)^2 \left\{ \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right) \sin 2\alpha \cos 4\theta_0 \right. \\ & \quad \left. + \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \cos 2\alpha \right\} \sin \phi \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $\alpha = 2\theta_0 - \delta'$ と置いている。

$$\begin{aligned} m_c' = & -4 \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \sin \phi \cos 2\delta' \\ & + 4 \left(\frac{(2\theta_a l)(\pi V / V_\pi)}{\phi^2} \right) \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \cos \phi \sin 2\delta' \\ & + 8 \frac{(\pi V / V_\pi)^3 (2\theta_a l)}{\phi^4} \sin^4 \left(\frac{\phi}{2} \right) \sin 2\delta' \end{aligned} \quad (13)$$

3.2.3 偏光子側素子 (No. 1) にのみ電圧印加

$$\begin{aligned} m_c = & \sin 2\theta_0 \cos \phi \sin 2(2\theta_0 - \delta') \\ & - \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2\theta_0 \sin 2(2\theta_0 - \delta') \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} m_c' = & \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2(\delta' - \theta_0) \\ & + 2 \left(\frac{(2\theta_a l)(\pi V / V_\pi)}{\phi^2} \right) \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \sin 2(\delta' - \theta_0) \end{aligned} \quad (15)$$

3.2.4 検光子側素子 (No. 2) にのみ電圧印加

$$\begin{aligned} m_c = & \sin 2\theta_0 \sin 2\alpha \cos^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) - \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2\theta_0 \sin 2\alpha \\ & + \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2\theta_0 \cos 2\alpha \\ & - 2 \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right) \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \sin 2\theta_0 \cos 2\alpha \\ & - \left\{ \left(\frac{2\theta_a l}{\phi} \right)^2 \sin 2\theta_0 + \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right)^2 \sin 6\theta_0 \right\} \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \sin 2\alpha \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $\alpha = 2\theta_0 - \delta'$ と置いている。

$$\begin{aligned} m_c' = & \left(\frac{\pi V / V_\pi}{\phi} \right) \sin \phi \cos 2\delta' \\ & + 2 \left(\frac{(2\theta_a l)(\pi V / V_\pi)}{\phi^2} \right) \sin^2 \left(\frac{\phi}{2} \right) \sin 2\delta' \end{aligned} \quad (17)$$

4. 実験と解析結果の比較

実験に使用した BSO 結晶 1 個 (5mm 厚さ) の旋光角は 56° であった⁵⁾。ゆえに、以下の解析では旋光能 $\theta_a = 0.195 \text{ rad/mm}$ を使う。また、BSO 結晶の半波長電圧として、波長 860nm で $V_\pi = 6,700\text{V}$ を用いることとする。

4.1 BSO 結晶単体での変調率

図 1 (a) で BSO 結晶 1 個のみとして、BSO 単体での変調率の実測値 m_m の検光子角度依存性についての実測と計算結果を比較したのが図 3 である。変調率は次式で、% で与え、その求め方は以下同じである。

$$m_m = \frac{V_{out}(V) - V_{out}(0)}{V_{out}(0)} \times 100 \text{ (%)} \quad (18)$$

ここで、 $V_{out}(0)$ は印加電圧なしのとき、 $V_{out}(V)$ は印加電圧 V のときの検光子出力電圧である。図 3 中の変調率の計算値は(8)式により求め、% で表示した。○印が実測結果、実線と破線が計算結果である。BSO 結晶中でポッケルス効果を受けながら旋光するため、旋光角 56° 近くとそれに 90° づつずれた検光子角度で変調率は極大を示す。このことは、(8)式でほぼ $\delta' = \theta_0$ のときに変調率 m_c が極大値をとることに一致している。計算値は実測値と良く一致している。 $+500\text{V}$ と -500V とを比較して、計算でも実測でも完全に上下対称になっていない。これは、(8)式の第 1 項と第 2 項とが存在するためである。

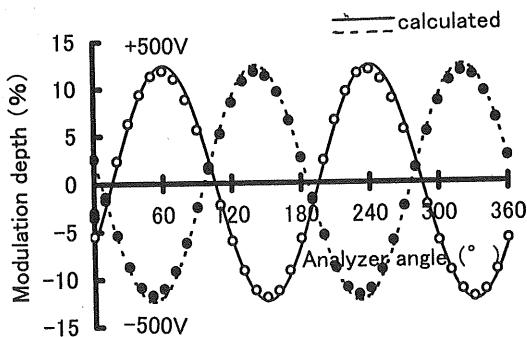


図 3 直線偏光入射時の変調率の検光子角度依存性

Fig.3 Analyzer angle dependence of the modulation depth with linearly polarized light.

4.2 BSO 結晶 2 個配置での変調率

図 4 は、図 1 (a) の BSO 結晶 2 個に同じ直流電圧を同じ電界方向に加えた場合での変調率の検光子角度依存性についての実測と計算結果を比較した例である。BSO 結晶 1 個に加える電圧を $+500\text{V}$ と -500V としている。○印が実測結果、実線と破線が計算結果である。計算値は実測値と良く一致している。BSO 結晶単体の場合と同じく、

計算でも実測でも、 $+500\text{V}$ と -500V とで上下対称にならない。これは、(10)式の第 1 項と第 2 項とが存在するためである。変調率が極大を示す検光子角度は、BSO 結晶 2 個分の旋光角より少し大きいところにあるが、極性は逆転している。変調率の検光子角特性に及ぼす旋光角の大きさの影響については後述する。

図 5 は、BSO 結晶 2 個に同じ直流電圧を、電界方向を逆にして加えた場合での変調率の検光子角度依存性についての実測と計算結果である。偏光子側素子(No.1)に加えた電圧を印加電圧として表示している。○印が実測結果、実線と破線が計算結果である。この場合は、図 4 に示した同じ電圧を、同じ電界方向に加えた場合の変調率の特性をほぼ逆転させたような特性になるが、変調率の極大値は 3 倍近く大きくなることがわかる。計算値と実測値とは良く一致している。 $+500\text{V}$ と -500V とでは完全な上下対称になっていないが、図 3, 4 ほどの大きな違いは見られない。

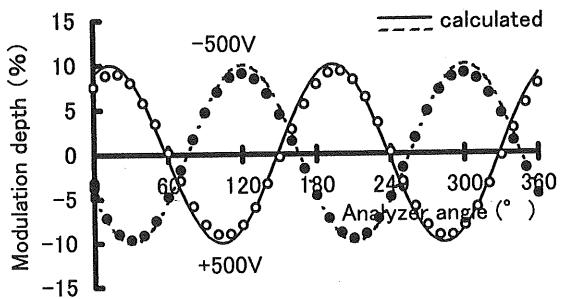


図 4 2 個直列で同じ電圧を同じ方向に加えたときの変調率の検光子角度依存性

Fig.4 Analyzer angle dependence of the modulation depth of double BSO crystals in the same polarity with the same magnitude of applied voltage.

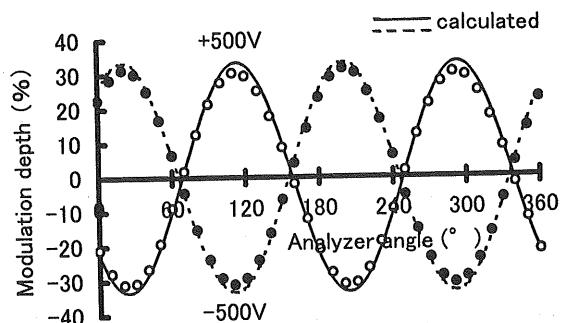


図 5 2 個直列で同じ電圧を逆方向に加えたときの変調率の検光子角度依存性

Fig.5 Analyzer angle dependence of the modulation depth of double BSO crystals in the opposite polarity with the same magnitude of applied voltage.

5. 考察

5.1 BSO結晶単体の場合

図6は、BSO結晶単体で、旋光角を $0^\circ \sim 100^\circ$ に変えたときの変調率の検光子角度依存性を計算により求めた結果であり、(a)が円偏光を入射させた場合、(b)が直線偏光を入射させた場合である。印加電圧は+500Vとした。旋光角 0° のときは両者の変調率の検光子角度依存性は一致するが、旋光角が大きくなるにつれて変調率の検光子角度依存性で、極大値が小さくなり、かつ極大値を示す検光子角度が大きくなることがわかる。円偏光を入射させた場合の変調率は旋光角の1/2に相当する検光子角度で極大を示すが⁵⁾、直線偏光を入射させた場合は旋光角にほぼ相当する検光子角度で極大を示すことがわかる。さらに旋光角が大きくなると、変調率の検光子角度依存性は正、負が逆転するようになる。図4はこの場合に相当する。

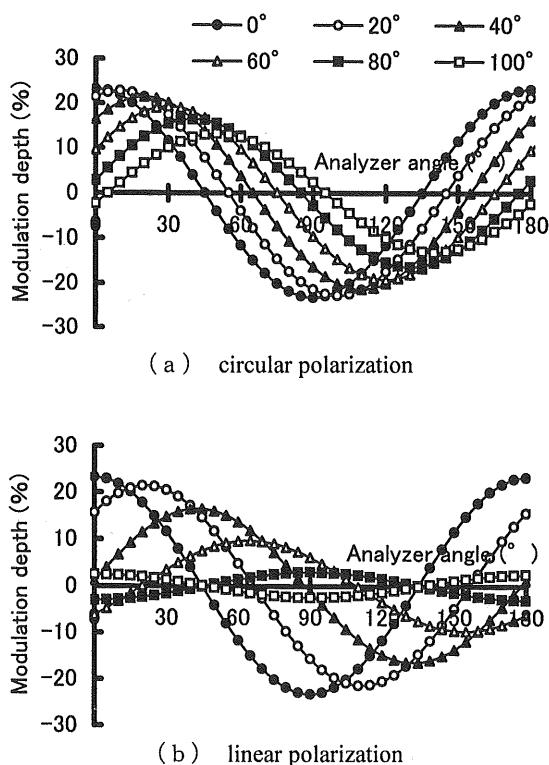


図6 旋光角を変えたときの変調率の検光子角度依存性
Fig.6 Analyzer angle dependence of the modulation depth at different rotation angle.

図7は、印加電圧を+500Vと-500Vとし、BSO結晶に円偏光を入射させた場合と直線偏光を入射させた場合とを計算比較したものである。旋光角を 56° とした。円偏光を入射させた場合は上下対称となり、正、負電圧の極性の違いがないが、直線偏光を入射させると正、負電圧の極性の違いが出てくる。また、直線偏光入射での変調率の極

大値が円偏光入射での検光子角度 $\delta'=0^\circ$ での変調率に一致する。このことは、(8)式での検光子角度 $\delta'=\theta_0$ での変調率 m_c が、(9)式での検光子角度 $\delta'=0^\circ$ での変調率 m_c' に一致することからも分かる

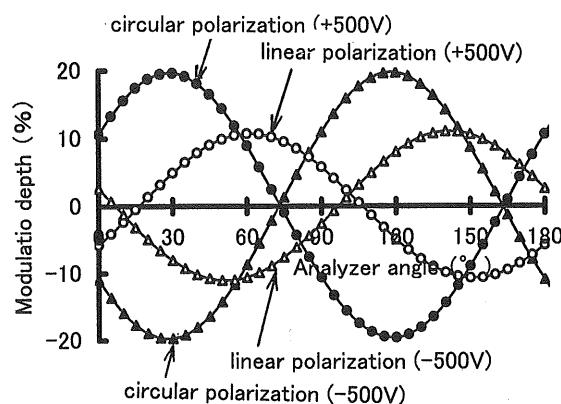
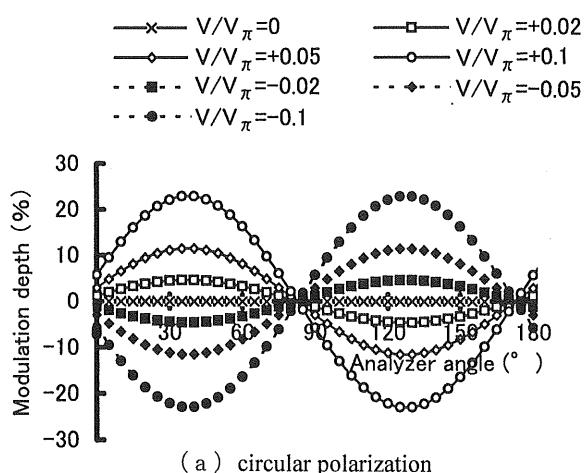


図7 直線偏光入射と円偏光入射での変調率の検光子角度依存性
Fig.7 Analyzer angle dependences of the modulation depth with incident linear or circular polarization.

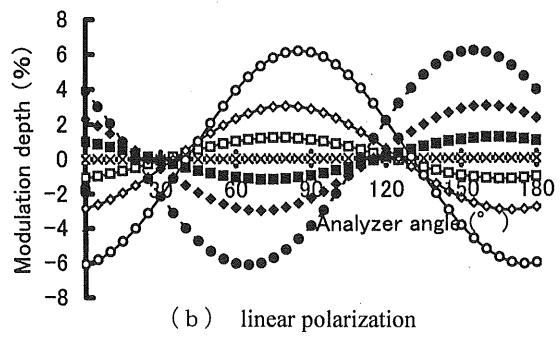
図8は、半波長電圧 V_π に対する印加電圧 V の比 V/V_π を $0 \sim +0.1$ 、および $-0.02 \sim -0.1$ に変えたときのBSO結晶単体の変調率の検光子角度依存性を計算により求めた結果であり、(a)が円偏光を入射させた場合、(b)が直線偏光を入射させた場合である。旋光角を 56° とした。円偏光を入射させた場合は、 V/V_π に直線的に比例して変調率が変化し、しかも正、負極性での違いがないことがわかる。一方、直線偏光を入射させた場合は、 V/V_π に比例して変調率が変化するが、前記したと同じく正、負極性で違いが見られる。

図9は、直線偏光を入射させた場合で、BSO結晶単体の厚さ l を1, 2, 3mmに変えて変調率の検光子角度依存性を計算により求めた結果である。BSO結晶への印加電界を 100V/mm 、旋光能 $\theta_a=0.195\text{ rad/mm}$ としている。結晶の厚さが薄いと、正、負極性電圧とで変調率はほぼ上下対称に近いが、厚くなると上下対称性が少しくずれてくることがわかる。

図10は、図9の検光子角度 $\delta=0^\circ$ での正極性および負極性電圧印加時の変調率をそれぞれ $m_c(+)$ 、 $m_c(-)$ とし、 $|m_c(-)/m_c(+)|-1$ とBSO結晶の厚さとの関係を計算により求めた結果である。図10より、結晶の厚さが厚くなるほど正、負極性電圧の $\delta=0^\circ$ での変調率の違いが大きくなること、その違いを $\pm 1\%$ 以内に収めるには、BSO結晶の厚さを1mm以下にする必要があることがわかる。



(a) circular polarization



(b) linear polarization

図 8 V/V_π をえたときの変調率の検光子角度依存性
Fig.8 Analyzer angle dependence of the modulation depth at different magnitude of V/V_π .

図 11 は、何らかの原因で BSO 結晶の旋光角が少し変化する場合を考え、その際に変調率がどの程度変化するかを計算により調べた結果の例である。BSO 結晶単体で、円偏光入射と直線偏光入射で比較している。印加電圧を +500V とし、旋光角が 56° から $\pm 2^\circ$ 変化したときの変調率の検光子角度依存性を計算により求め、それより代表的に検光子角度 $\delta = 0^\circ$ での変調率の変化率(%)と旋光角との関係を求めた。旋光角 56° での変調率を基準としている。円偏光の場合の方が変調率の変化が少し小さいが、旋光角が少しでも変化すると変調率もかなり変化することから、旋光角が変化しないように配慮する必要がある。

5.2 BSO結晶2個配置の場合

図 12 は、BSO 結晶 2 個に同じ電圧を同じ電界方向に加えた場合での変調率の検光子角度依存性を、円偏光を入射させた場合と直線偏光を入射させた場合とで比較している。印加電圧は +500V と -500V である。直線偏光を入射させたときの変調率の極性は、円偏光を入射させた場合に対

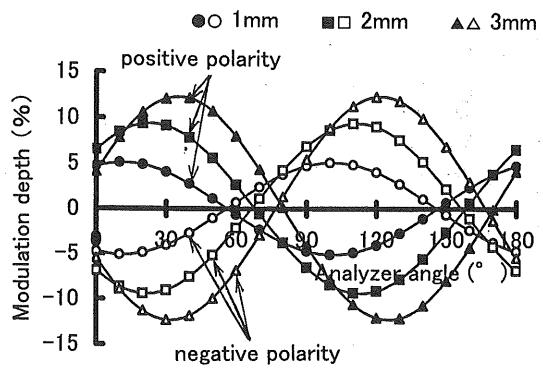


図 9 結晶厚さを変えたときの変調率の検光子角度依存性
Fig.9 Analyzer angle dependence of the modulation depth at different thickness of BSO crystal.

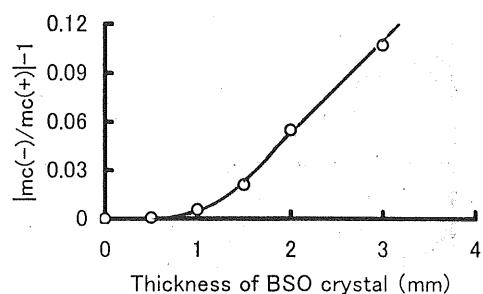


図 10 $|m_c(-)/m_c(+)| - 1$ と BSO 結晶の厚さとの関係
Fig.10 Relationship between thickness of BSO crystal and $|m_c(-)/m_c(+)| - 1$.

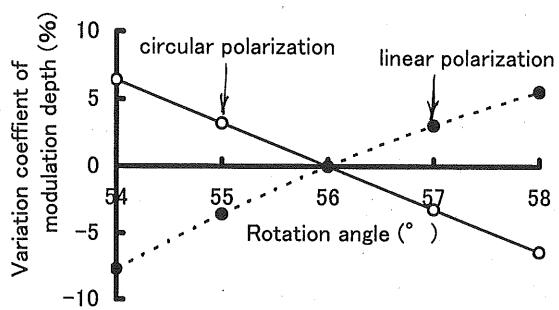


図 11 旋光角と変調率の変化率との関係
Fig.11 Relationship between rotation angle and variation coefficient of modulation depth.

して逆転している。これは旋光角が 112° と大きいからである。直線偏光入射での変調率の極大値は円偏光入射での検光子角度 $\delta = 0^\circ$ での変調率に一致し、円偏光入射に比べて変調率の極大値は約 1/3 以下と小さくなる。これも旋光角が大きいためである。

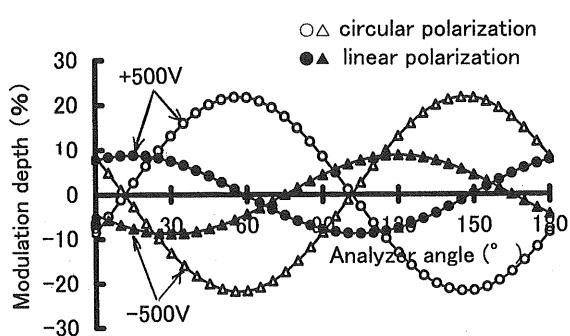


図 12 2 個直列で同じ電圧を同じ方向に加えたときの変調率の検光子角度依存性の比較

Fig.12 Analyzer angle dependence of the modulation depth of double BSO crystals in the same polarity with the same magnitude of applied voltage.

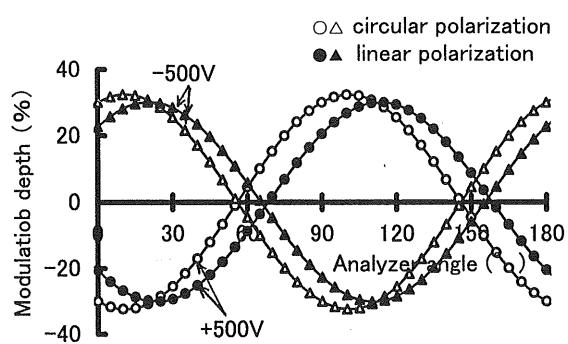


図 13 2 個直列で同じ電圧を逆方向に加えたときの変調率の検光子角度依存性の比較

Fig.13 Analyzer angle dependence of the modulation depth of double BSO crystals in the opposite polarity with the same magnitude of applied voltage.

図 13 は、BSO 結晶 2 個に同じ電圧を逆の電界方向にして加えた場合での変調率の検光子角度依存性を、円偏光を入射させた場合と直線偏光を入射させた場合とで比較している。印加電圧は+500V と-500V である。直線偏光入射と円偏光入射での特性はほぼ同じになり、検光子角度 $\delta = 0^\circ$ での変調率も BSO 結晶単体あるいは 2 個組み合わせて同じ電界方向に加えた場合に比べて最も大きくなる。しかし、円偏光入射に比べると約 2/3 と小さい。

今回は BSO 結晶を使ったが、BSO 結晶と同じように旋光性を持つポッケルス素子であれば、本報告で述べたと同様な効果が得られると考えられる。

6. むすび

旋光性を有する BSO 結晶に直線偏光を入射し、BSO 結

晶の後に 1/4 波長板を置いた場合について、BSO 結晶への電圧印加方法などを変えたときのポッケルス効果による変調率について調べ、次のような結果を得た。

(1) BSO 結晶単体、およびそれらを 2 個組み合わせたときの直線偏光入射でのポッケルス効果による変調率の検光子角度依存性を計算する手法を示し、また直線偏光入射と円偏光入射での変調率の検光子角度依存性の計算式を示した。計算結果は実測結果とよく一致した。

(2) 直線偏光を入射した場合、正、負極性電圧で変調率に違いが生ずることを計算と実験で明らかにした。その際、検光子角度 $\delta = 0^\circ$ での正、負極性電圧での変調率の違いを $\pm 1\%$ 以内に収めるには、BSO 結晶の厚さを 1mm 以下にする必要がある。

(3) 直線偏光を入射した場合の変調率に及ぼす旋光角および V/V_π の大きさの影響を計算解析により明らかにした。旋光角が大きくなるにつれて変調率の検光子角度依存性が変化し、その極大値が小さくなり、かつ極大値を示す検光子角度が大きくなること、 V/V_π に比例して変調率が変化するが、正、負極性で違いが見られることなどを明らかにした。

(4) BSO 結晶 2 個を組み合わせた場合、結晶への電圧印加方法の違いにより変調率の大きさが変わることを明らかにした。特に、2 個の BSO 結晶に同じ電圧を電界方向を逆にして加えた場合の変調率の検光子角度依存性は、円偏光入射の場合とほぼ同じような特性を示すこと、BSO 単体の場合や結晶 2 個を組み合わせて同じ電界方向に電圧を加えた場合に比べて、検光子角度 $\delta = 0^\circ$ での変調率が最も大きくなることなどを明らかにした。

参考文献

- 1) T. W. Cease and P. Johnston: IEEE Trans. Power Delivery, 5 (1990) 548
- 2) T. Sawa, K. Kurosawa, K. Kaminishi, and T. Yokota: IEEE Trans. Power Delivery, 5 (1990) 884
- 3) S. Kobayashi, A. Horide, I. Takagi, M. Higaki, G. Takahashi, E. Mori, and T. Yamagawa: IEEE Trans. Power Delivery, 7 (1992) 815
- 4) 中田安彦, 曽根勇, 白倉利治, 渡部一朗, 山極時生: 電気学会開閉保護研究会資料, SP-94-92 (1994)
- 5) 檜垣勝, 山口静夫, 藤井邦夫, 曽根勇: 電気学会論文誌 A, 119-A (1999) 1445
- 6) 久間和生, 布下正宏: 光ファイバセンサ, p.104, 技術調査会(1986)
- 7) W. J. Tabor and F. S. Chen: J. Appl. Phys., 40 (1969) 2760
- 8) 芳野俊彦: システムと制御, 28 (1984) 150