

小 論 文

電界センサの電界感度に及ぼす $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶

ポッケルス素子の厚さの効果

金子正光*, 福山茂男*, 大坪昌久**, 贅田 寛**
江連 孝***, 西村英一***

(1990年6月30日受理)

Effects of Thickness of a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ Single Crystal Pockels
Device on the Sensitivity of Electric Field Sensor

T. KANEKO,* S. FUKUYAMA,* M. OTSUBO,** H. NIEDA,**
T. EZURE*** and E. NISHIMURA***

(Received June 30, 1990)

In this work, the method of improving the sensitivity of an optical electric field sensor with the longitudinal mode was proposed by the increase of an optical path of crystal along the light beam, that is, a thickness of Pockels device. Experiments were carried out with a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ single crystal. As a result, it was found that adjusting an azimuth angle of an analyser to obtain the maximal sensitivity, the sensitivity of a $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ Pockels device having an optical activity roughly rose with increasing the thickness of Pockels device.

1. ま え が き

ポッケルス効果を利用した光電界計測法は、従来の電界計測法による場合ほどに電界を乱さないなどの利点を有するので、放電空間の電界を測定する新しい電界計測法として利用されつつある¹⁾。

この新しい光電界計測法で、ポッケルス効果を示す素子、すなわちポッケルス素子としては、現在、温度特性の優れた $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (以下 BGO と略す) 単結晶、 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 単結晶などの立方晶系酸化物や電気光学係数の大きな LiNbO_3 単結晶、 LiTaO_3 単結晶などの三方晶系酸化物が開発・利用されている²⁾。

しかし、実際の計測では、温度特性の優れた立方晶系

酸化物のポッケルス素子が主に用いられている。この場合、素子の電気光学係数が小さく測定感度を十分に上げることができないので、測定感度の向上法が検討されている。この測定感度の向上法としては、ポッケルス素子に入射されるレーザー光の強度を変調する方法³⁾などがある。このほかに、原理的に入射レーザー光がポッケルス素子を通過する際の光路長、すなわちポッケルス素子の厚さを大きくする方法が考えられる⁴⁾。しかし、この場合、ポッケルス素子の厚さと測定感度についての基礎的な実験研究例は見あたらない。

そこで、著者らは、ポッケルス素子として BGO 単結晶を用い、入射レーザー光の進行方向を印加電界に対して平行にした縦型変調方式によって、電界センサの電界感度に及ぼす BGO ポッケルス素子の厚さの効果を実験的に調べた。以下、このことについて報告する。

2. 実験の装置と方法

本研究に用いた実験装置は、He-Ne レーザ、偏光子、1/4 波長板、ポッケルス素子、平行平板電極、検光子と受光部からなる。平行平板電極としては、中央に直径 (ϕ) 2.0 mm の穴のある 2 枚の平板電極を用いた。2 枚の平板電極の広さは等しく $300 \times 310 \text{ mm}^2$ である。平行平板電極のギャップ長 (d) は 40 mm または 60 mm とした。ポッケルス素子としては、厚さ (L) のみが異なる

キーワード：電界センサの電界感度、素子の厚さ、変調度、旋光性、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶

* 運輸省航空大学校 (880 宮崎市大字赤江字飛江田)
Civil Aviation College, Ministry of Transport,
Hieda, Akaeji, Owaza, Miyazaki, 880 Japan

** 宮崎大学工学部電気工学科 (889-21 宮崎市学園木花台西 1-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty
of Engineering, Miyazaki University, 1-1, Gaku-
en kibanadai-Nishi, Miyazaki, 889-21 Japan

*** 古河電気工業(株)平塚事業所 (254 平塚市東八幡5-1-9)
The Furukawa Electric Co., Ltd., Hiratsuka
Works, 5-1-9, Higashi-Yawata, Hiratsuka, 254
Japan

る, $L=4.7$ mm, 8.7 mm の 2 種類の BGO 単結晶を用い, 入射 He-Ne レーザ光に対するそれぞれの有効断面積は等しく, 4.7×4.7 mm² とした.

この BGO ポッケルス素子を穴開き平行平板電極のギャップの中央に置いた. この素子を用い, 縦型変調方式でギャップの電界を調べるために, He-Ne レーザ光が素子の面方位 (100) 軸に対して垂直に入射するように精密 XYZ ステージコンポを用いて各光学系の配置を調整した. この調整の後, He-Ne レーザ光を入射させた状態で 60 Hz の交流電圧を平行平板電極に印加して, 検光子の光出力強度を受光器で測定した. この実験を $L=4.7$ mm, 8.7 mm の 2 種類の BGO ポッケルス素子について行い, 電界感度に対する BGO ポッケルス素子の厚さの効果を調べた.

この場合, 各測定は同一条件で 5 回行い, 実験結果を示すグラフには, 5 回の測定値の平均を各種記号で, 変動幅を縦棒で示す. また, 交流電圧と交流電界は, 特に言及しない限りその波高値で示す. なお, 実験装置と実験方法についての詳細な説明は別報⁵⁾ で述べている.

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果

検光子の方位角と光出力強度との関係を明らかにするために, まず, 偏光子を通過した直線偏光の He-Ne レーザ光の偏光方向と平行に検光子を置き, このときの検光子の方位を検光子の回転角 (θ_A) の基準, すなわち, $\theta_A=0^\circ$ とした. 次に, 平行平板電極に交流電圧を印加し, θ_A を $0^\circ \sim 200^\circ$ の範囲で 5° 刻みに回転させ, 各回転位置で検光子を通過した BGO ポッケルス素子の光出力強度の交流分 (V_{AC}) を測定した.

さらに, $L=4.7$ mm, 8.7 mm の各 BGO ポッケルス素子の θ_A に対する V_{AC} の変化を, 偏光子の回転角 (θ_P) を 0° とし, $d=40$ mm, 印加電圧 (V_a) 14.8 kV で求めた. 図 1 に, $L=8.7$ mm の BGO ポッケルス素子について求めた θ_A に対する V_{AC} の変化 ($V_{AC}-\theta_A$ 曲線) を示す. 同図で, V_{AC} の変化は V_{AC} の最大値で規格化して示した. この図から, V_{AC} は θ_A に対してほぼ $\cos^2 2\theta_A$ の関数で変化し, 最大の V_{AC} を示す θ_A は 3° , 93° , 183° であることがわかった. $L=4.7$ mm の BGO ポッケルス素子の $V_{AC}-\theta_A$ 曲線も同様な特性を示し, 最大の V_{AC} を示す θ_A は 9° , 99° , 189° であった.

ここで, 直線偏光の入射レーザ光の BGO ポッケルス素子による偏向角は, 素子の旋光能 ($\theta: 21.0^\circ/\text{mm}$) と厚さの積であるから, $L=4.7$ mm の素子による偏向角は 99° , $L=8.7$ mm の素子による偏向角は 183° となる. したがって, $L=4.7$ mm の素子で $\theta_A=99^\circ$ に現

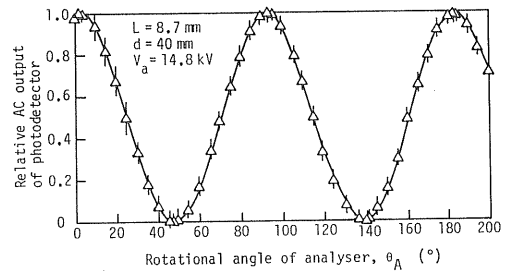


図 1 相対交流分光出力強度対検光子の回転角度特性

Fig. 1 Characteristics of relative AC output of photodetector versus rotational angle of analyser.

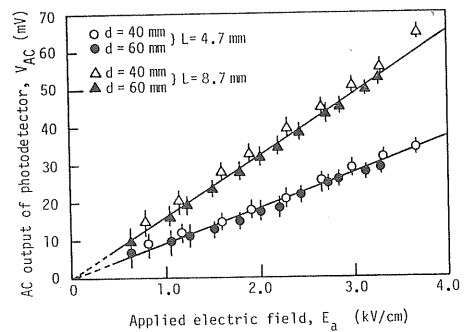


図 2 交流分光出力強度対印加電界特性

Fig. 2 Characteristics of AC output of photodetector versus applied electric field.

れる最大の V_{AC} は, $L=8.7$ mm の素子では, $\theta_A=183^\circ$ に現れることになる. 一方, θ_A に対する V_{AC} の変化についての実験からも, 上記のように, 最大の V_{AC} を示す θ_A の一つとして, $L=4.7$ mm の素子で $\theta_A=99^\circ$ が得られ, $L=8.7$ mm の素子で $\theta_A=183^\circ$ が得られた. これらのことから, 実験に用いた素子は, $21.0^\circ/\text{mm}$ の旋光能とそれぞれの厚さ 4.7 mm または 8.7 mm との積で定まる偏向角を直線偏光の入射レーザ光に与えることを, 実験的に確認することができた.

以下に述べる実験では, 各厚さに対して検光子からの光出力強度が最大になるように θ_A を調整して, その位置で検光子の光出力強度を測定しその特性を調べた.

$L=4.7$ mm と $L=8.7$ mm のそれぞれの素子について, $d=40$ mm または 60 mm としたときの, 平行平板ギャップの印加電界 (E_a) と V_{AC} の関係を図 2 に示す. 本実験では, 穴開き平行平板電極を用いているので, ギャップの電界分布を検討する必要がある. しかし, ギャップ長や平板電極の表面の広さに比べ穴の大きさが小さいので, ギャップの印加電界は, 一様であるとし, 簡単に $E_a=V_a/d$ で求めた. この図からわかるように, E_a が $0.45 \sim 4.0$ kV/cm の範囲では, E_a と V_{AC} の間には

線形の関係が成立している。

また、同図からは、電界感度を E_a に対する V_{AC} の大きさで表せば、 $L=8.7\text{ mm}$ の BGO ポッケルス素子を用いた場合の電界感度は、 $L=4.7\text{ mm}$ の BGO ポッケルス素子を用いた場合に比べ、厚さの比 $8.7/4.7$ にほぼ比例して約 1.8 倍になることがわかる。ただし、 V_{AC} は被測定電界 (E : BGO ポッケルス素子の電界) と L の積に比例する。そこで、BGO ポッケルス素子を含む平行平板ギャップを第 3.2 節で述べる二層直列型誘電体モデルで近似し、(3)式から E を求めて、 E と L の関係を概略調べた。その結果、 $d=60\text{ mm}$ で、 $V_a=15\text{ kV}$ による E は、 $L=4.7\text{ mm}$ で $E=7.0 \times 10^3\text{ V/m}$ 、 $L=8.7\text{ mm}$ で $E=7.5 \times 10^3\text{ V/m}$ となり、本実験条件では、 E は L の影響をあまり受けないことを確かめることができた。

このように、 V_{AC} は、 V_a したがって E_a の増加とともに直線的に増加し得、 L を大きくすれば、厚さの比にほぼ比例して増加する。さらに、 L を大きくすることによる E への効果は小さい。したがって、BGO ポッケルス素子を用いる場合、BGO ポッケルス素子の厚さを増せば厚さにほぼ比例した感度で電界を測定し得る。本研究では、このことを、実験的に明らかにすることができた。この場合、BGO ポッケルス素子の旋光性による直線偏光の入射レーザー光の偏向角を求め、検光子の方位角をそれに合わせて、光出力強度を測定しなければならない。なお、測定空間の電界を求めるには、 V_a したがって E_a と E の関係も明らかにしなければならない。そこで、 V_a と E の関係を第 3.2 節で述べる。

3.2 考 察

BGO ポッケルス素子に電界 E が加わると、ポッケルス効果により素子の屈折率が変化して旋光性が生じる。その結果、素子中を伝搬する He-Ne レーザ光の偏向角が回転する。このように、直線偏光が結晶を通過する際にその偏向面が回転する現象を結晶の旋光性という⁶⁾。このとき、検光子の回転角を $\theta_A=0^\circ$ に固定して置くと、旋光性によって V_{AC} が低下する。この低下特性は、次に示す、検光子の光出力強度の変調度 (m) から知ることができる⁷⁾。

$$m = \pi V / V\pi \left[\sin \sqrt{(\pi V / V\pi)^2 + (2\theta L)^2} / \sqrt{(\pi V / V\pi)^2 + (2\theta L)^2} \right] \quad (1)$$

ここで、 V は素子に加わる電圧 ($=EL$)、 $V\pi$ は用いた素子と入射レーザー光の波長で決まる半波長電圧 (5600 V)、 L は素子の厚さ、 θ は素子の旋光能で、 θL は入射レーザー光の偏向角である。

BGO ポッケルス素子は、旋光性により強度変調に非直線性をもたらすダイナミックレンジを制限するので、現在、旋光能を考慮し 1 mm 以下の厚さで使用されてい

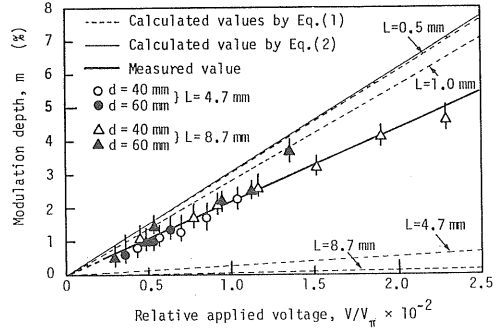


図3 変調度対相対印加電圧特性
Fig. 3 Characteristics of modulation depth versus relative applied voltage.

る⁸⁾。ただし、この使用状態では、検光子の方位角は旋光性に対して調整されていない。

一方、旋光性がない素子の変調度は、(1)式より、 $\theta = 0^\circ$ として、次式となる。

$$m = \sin \pi V / V\pi \quad (2)$$

本実験の場合、BGO ポッケルス素子は旋光性を有するが、旋光性を考慮して検光子の回転角を調整するので、用いた素子は等価的に旋光性を示さないものとして取扱うことができる。このときの変調度は、(2)式を用い、計算によって求めることができる。また、素子に旋光性があっても、素子の厚さが 1 mm 以下のような旋光性の影響が小さい場合の変調度は、検光子の回転角を調整することなく近似的に(2)式で求められる。

図3は、計算と実測で求めた、変調度と相対印加電圧 ($V/V\pi$) の関係を示す。同図中の点線による曲線は、検光子を固定した場合の、(1)式による計算結果であり、久間ら⁸⁾が述べているように、 m が素子の L の増加とともに低下することを示している。久間らは、ほかに、 $L = 1\text{ mm}$ 以下であれば、旋光性による m の低下はほぼ無視できると述べているが、このことは(1)式から説明できる。細実線による曲線は、(2)式による計算結果であり、検光子の回転角を旋光性に応じて変化した場合に適用できる。

図中には、さらに、本実験で光出力強度の観測から求めた m を太実線で示した。この場合、素子に加わる V と E は、素子を挿入した平行平板電極間を、単純に、空気と BGO 単結晶からなる二層の直列形誘電体と仮定して、次式によって求めた⁵⁾。

$$E = \epsilon_{ra} V_a / (\epsilon_{ra} L + \epsilon_{rp} d_a) \quad (3)$$

$$V = L \epsilon_{ra} V_a / (\epsilon_{ra} L + \epsilon_{rp} d_a) \quad (4)$$

ここで、 ϵ_{ra} は空気の比誘電率 (1.0)、 ϵ_{rp} は BGO ポッケルス素子の比誘電率 (38.6)、 d_a は空気層の厚さである。

この図で、 $V/V_{\pi}=0.0025\sim 0.025$ の範囲では、 m は L に無関係にほぼ V/V_{π} に比例して上昇しており、この傾向は(2)式による計算曲線の傾向と一致している。

このように、 L を大きくして θ_A を調整すれば、高い電界感度で電界を測定できることがわかった。しかし、ポッケルス素子を電界センサとして用いた場合の m の実測値は、同図からわかるように、計算値と十分には一致しなかった。これに対し、 $L=4.4\text{ mm}$ の BGO ポッケルス素子を電圧センサとして用いた場合の m の実測値と(2)式による計算値は、別報⁹⁾で述べているように、一致した。したがって、今回の m の実測値と(2)式による計算値との不一致は、素子を電界センサとして用いた場合の素子に加わる電圧 V の評価に主に問題があったように思われる。このことについては今後検討する予定である。

4. む す び

60 Hz の交流電界の場合に、電界センサとして、厚さ(光路長) 4.7 mm または 8.7 mm の BGO ポッケルス素子を置き、素子の旋光性に応じて、検光子からの光出力強度が最大になるように検光子の方位角を調整した。このときの素子の厚さと電界感度の関係を調べた。その結果、次のことがわかった。

(1) BGO ポッケルス素子の電界感度はほぼ厚さに比

例して上昇する。

(2) 変調度は、厚さに関係なく、印加電界に比例して直線的に上昇する。この特性は、理論的に、旋光性が無い場合の特性によって説明できる。

最後に、本研究を進めるに当り御鞭撻をいただいた九州大学工学部 原 雅則教授、BGO ポッケルス素子を提供していただいた古河電気工業(株)並びに同社の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、日高邦彦：レーザー研究, 16 (1988) 808
- 2) 桑原 宏, 吉永 淳：光ファイバ応用技術集成, 末松安晴(編), p. 410, 日経技術図書 (1986)
- 3) 中野俊樹, 太田 岳, 外屋寿郎, 室岡義広：電気学会全国大会, 2-28 (1990)
- 4) 工原美樹：電気計算, 50 (1982) 141
- 5) 金子正光, 福山茂男, 大坪昌久, 賛田 寛：航空大学校研究報告, R-43 (1990) 49
- 6) 応用物理学会光学懇話会編：結晶光学, p. 85, 森北出版 (1986)
- 7) Y. Hamasaki, H. Gotoh, M. Katoh and S. Takeuchi: Electron. Lett., 16 (1980) 406
- 8) K. Kyuma, S. Tai, M. Nunoshita, N. Mikami and Y. Ida: IEEE J. Lightwave Tech., LT-1 (1983) 93
- 9) 金子正光, 福山茂男, 大坪昌久, 賛田 寛, 西村英一, 江連 孝：航空大学校研究報告, R-44 (1991) 17