

LiNbO₃と鉛ガラスを用いた電流、電圧、電力同時測定Simultaneous Measurement of Current, Voltage, and Power by LiNbO₃ and Flint Glass

斎藤 成文*・藤井 陽一*・横山 幸嗣*

Shigebumi SAITO, Yoichi FUJII and Koji YOKOYAMA

レーザー光の偏波は2つの自由度を有している。従来のレーザーCT, PTはそのうち1つだけを用いていたが、これに対しその両方を使用することにより、電流(CT)、電圧(PT)を同時に測定できるのみでなく、ある特別な結晶、検光子、波長板の配置のときに、電力も測定できる。これをポアンカレ球を用いて解析し、実験例を付した。

1. はじめに

われわれはすでに、偏波面の2つの自由度を使用する電流、電圧および電力の同時測定について報告したが¹⁾、これは、KDPを用いたもので、感度があまりよくなく原理をたしかめるに止まった。また、報告文中に多少不完全な点があり爾後かなり誤解を招いていること、また、誤差・感度についての記述がないので、この際、現在広く電圧測定用として用いられているz-カットのLiNbO₃結晶を用い²⁾、かつその原理を再確認し、かつ誤差の検討を行ったので、報告する。

2. 理 論

周知のとおり、ファラデー効果により、電流 I に比例して、光路中の偏波面が θ だけ回転する。すなわち、

$$\theta = VNI \quad (1)$$

ここで V は材料によって定まるヴェルデ定数であって、もっともよく使用される鉛ガラスでは大体 $3.2 \times 10^{-6} \text{rad/AT}$ であり、 N は、光路と電流路との鎖交数である。

一方、電気光学効果結晶によると、結晶の固有方向にと垂直の方向に対しての位相差 ϕ が印加した電圧によって、生ずる。

すなわち、

$$\phi = r \frac{l}{d} V \quad (2)$$

ここで、 r は、電気光学効果定数、屈折率、光の伝達方向によって定まるものであるが、z-カットのLiNbO₃のばあい結晶のz軸方向に光を通し、x方向に電圧を印加するとき、

$$r = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{22} \quad (3)$$

となっている。 $n_0 = 2.29$ 、 $r_{22} = 3.4 \times 10^{-12} \text{m/V}$ である。

このように電流、電圧によって、偏光角、位相差が異なるときは、一般的にポアンカレ球の理論³⁾によって、

図1のように、地球の経緯度線のように表すことができる。これは、結晶の0°方向から光を入射したばあいであり、結晶と光の入射方向により、このパターンは、変わるが、いずれも、経緯度線状をなしている。

ここで、図2のような測定装置を考えよう。すなわち、結晶の軸方向を0°としてすべての横方向角の基準とする。また、仮定として、 I 、 V ともに小信号、すなわち、 θ 、 ϕ 、ともに少ない角度を考えよう。

- i) まず、光を45°に入射したとき、その等電流線は45°の付近に図3の細線のようにできる。
- ii) ここで、結晶の軸を $\lambda/4$ 板により等価の90°北極の方へ回転³⁾してやった(別のことばでいうと、光学的位相差を90°与えた)とすると、等電圧線は、図3の45°付近の太線のようになる。
- iii) つぎには、光を0°の方向から入れ、結晶は0°のままとしたときを、 θ 、 ϕ の小さい範囲では、図4のようになる。

結局、図2の実験装置における、偏光子、 $\lambda/4$ 板、検光子等を、表1のような角度に配置することになる。

このとき、この系のジョーンズ行列を計算すると、表2のようになる。

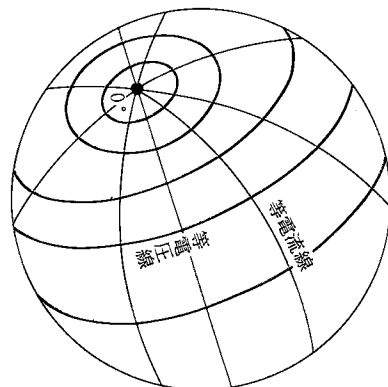


図1 0°を北極としたポアンカレ球上の等電流・等電圧線

* 東京大学生産技術研究所第3部

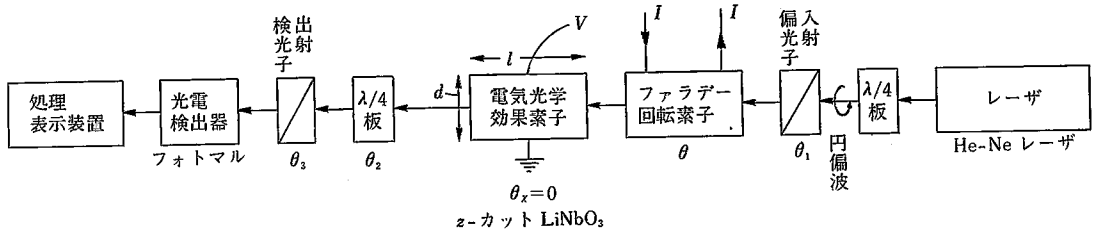


図2 実験装置図

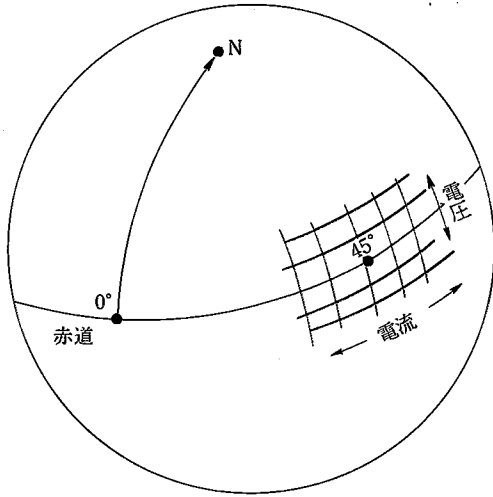


図3 電流あるいは電圧を測定する場合のポアンカレ球

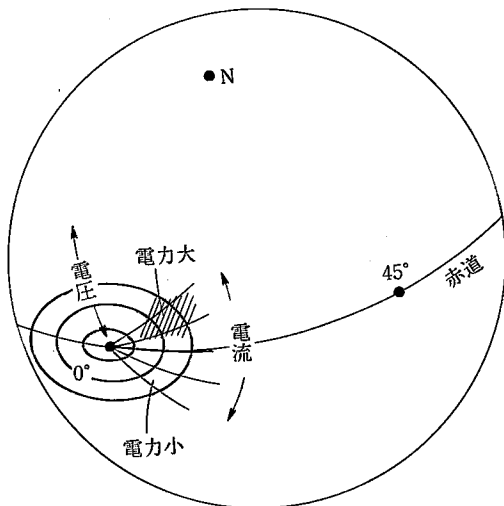


図4 電力を測定する場合のポアンカレ球

i) 電流測定

0°検光子(0°の直線偏波を100%通し,ポアンカレ球上で,これより遠い光ほど出力が弱くなり,真裏の

表1 光学素子と設定角度

	検光子角度	λ/4板軸方向	電気光学効果結晶軸方向	ファラデー効果素子	入射偏光子角度	設定角度
	θ ₃	θ ₂	θ _x	θ	θ ₁	
i)	0°	なし	0°	-	45°	電流測定時
ii)	45°	0°	0°	-	45°	電圧測定時
iii)	0°	45°	0°	-	0°	電力測定時

90°の光の出力は0となる。通常の検光子)からみると,等電流線は,(等電圧線と直交しており),電流の大小に応じ遠近があるので,電圧によらずに,電流だけによって,出力がえられるはずである。θ, φは小として,

$$\sin x \approx x \tag{4}$$

という近似を用い,受光電力 P_r,光検出器の変換効率 K_Dを用いると,受光器からの出力電流 I は表2の出力強度の項から,

$$I(I) = \frac{1}{2} P_r K_D (1 - 2\theta) \tag{5}$$

交流分のみ \tilde{I} をとると,

$$\tilde{I}(I) = P_r K_D \theta = P_r K_D V N I \tag{6}$$

となって,電圧に無関係に電流 I に比例する出力が基本周波数(50/60Hz)でえられる。

ii) 電圧測定

N(北極)検光子(左回り偏波 $\begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$ が最大になる検光子)からみると,図3のように電流に対して出力がなく電圧にのみ感ずる。表2のジョーンズ行列からは,同様に,

$$2(\sin\theta)^2 \ll 1 \tag{7}$$

として

$$I(V) \approx \frac{1}{2} P_r K_D (1 + \phi) \tag{8}$$

表2 各測定時のジョーンズ行列表示

	出力光強度	出力振幅	検光子 (0度または北極)	電気光学効果素子 (0°) $\phi = r \frac{l}{d} V$	ファラデー回転素子 $\theta = VNI$	入射偏波	測定項目
i)	$\frac{1}{2} (1 - \sin 2\theta)$	$\frac{1}{\sqrt{2}} (\cos \theta - \sin \theta) e^{+j\frac{\phi}{2}}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} e^{+j\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\phi}{2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	電流
ii)	$\frac{1}{2} [1 + \{1 - 2(\sin \theta)^2\} \sin \phi]$	$\frac{1}{2} [(\cos \theta - \sin \theta) e^{+j\frac{\phi}{2}} - j(\sin \theta + \cos \theta) e^{-j\frac{\phi}{2}}]$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1+j \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} e^{+j\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\phi}{2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	電圧
iii)	$\frac{1}{2} [1 + \sin 2\theta \sin \phi]$	$\frac{1}{\sqrt{2}} [\cos \theta e^{+j\frac{\phi}{2}} - j \sin \theta e^{-j\frac{\phi}{2}}]$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1-j \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} e^{+j\frac{\phi}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\phi}{2}} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	電力

交流分 $\tilde{J}(V)$ は,

$$\tilde{J}(V) = \frac{1}{2} P_r K_D \cdot r \frac{l}{d} V \quad (9)$$

となり、電流には影響なく、電圧のみが基本周波数で測れる。

iii) 電力測定

図4のポアンカレ球で、0°付近を、N検光子からみる。そうすると、表2のジョーンズ行列の結果から、

$$I(P) = \frac{1}{2} P_r K_D (1 + 2\theta\phi) \quad (10)$$

変化分 \tilde{J} のみをとると、

$$\tilde{J}(P) = P_r K_D V N \cdot r \frac{l}{d} V I \quad (11)$$

と、電力に比例する成分が、倍周波(100/120 Hz)でえられ、適当な校正により、正負の電力が測定できる。

3. 検 討

3.1 非線形歪

電流、電圧を表す θ, ϕ 等は、交流信号であるから、 $a \sin \omega t$ と表すと、Bessel 関数の公式⁴⁾

$$\sin(a \sin \omega t) = 2 \sum_n J_{2n+1}(a) \sin(2n+1)\omega t \quad (12)$$

を用いると、大体の非線形歪を計算できる。

i) 電流のときは、通常のレーザCTと同じ⁵⁾ 3、5次の歪がつよく、3次に対する歪率 W_3 は、 θ を振幅として

$$W_3 = J_3(2\theta) / J_1(2\theta) \quad (13)$$

ii) 電圧については、表2の結果から、 ϕ を振幅として

$$W_3 = \left| \frac{J_3(\phi)}{J_1(\phi)} \right| + \left| \frac{2\theta^2}{J_1(\phi)} \right| \quad (14)$$

iii) 電力のときは、2次の信号に対し、4、6、8…次の歪があり4次については、

$$W_4 = \left| \frac{J_3(\phi)}{J_1(2\theta)} \right| + \left| \frac{J_1(2\theta)}{J_1(\phi)} \right| \quad (15)$$

3.2 雑 音

図2に示すような測定系では、ショット雑音(量子の雑音)を含む多くの雑音源があるが、実用的に重要なものは、光出力変調雑音である⁶⁾⁷⁾。その変調率を m とすると、 S/N 比は、 θ, ϕ, m をそれぞれ変調率に換算して

$$S/N(I) = (\theta/m)^2 \quad (16)$$

$$S/N(V) = (\phi/m)^2 \quad (17)$$

$$S/N(P) = (\theta\phi/m)^2 \quad (18)$$

となって、 $\theta, \phi \ll 1$ であるため、電力測定源の S/N 比 $S/N(P)$ はあまりよくない。

3.3 そ の 他

さらに結晶の軸のわずかのずれ⁸⁾、 $\lambda/4$ の軸のずれと $\lambda/4$ 板の位相が正しく $\pi/2$ でないことなどの理由で、実際、電力を測定するため結晶の軸を正しく 0° にすることは、かなりむずかしい。補償板の使用も有効であろう。

温度係数については、測定されてはいないが、鉛ガラスのファラデー効果のそれはほとんど無視でき、 α -カットの LiNbO_3 のそれは、少ない方なので、良い結果が期待できる。

4. 実 験

上記の原理にもとづき、簡単な実験を行った。レーザは He-Ne 633nm 約 10mW、ファラデー効果素子は、約 20cm の鉛ガラス棒(ヴェルデ定数 3.2×10^{-5} rad/A-T)にコイルを 2000 T まき AC/DC 電流を流す。 LiNbO_3

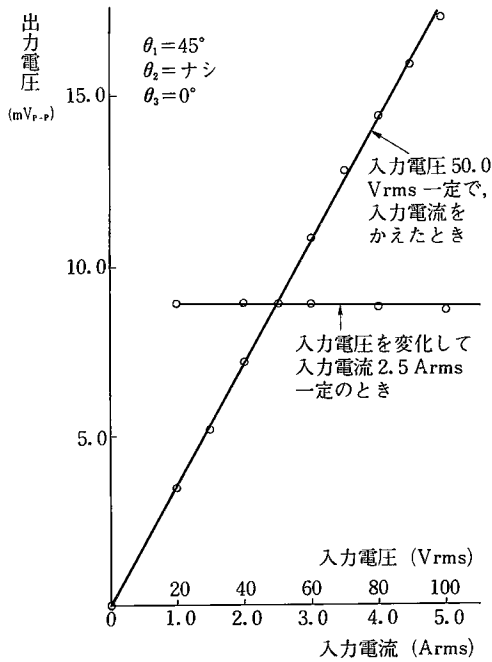


図5 電流の測定例

結晶は $4 \times 4 \times 15$ mm の z-カットで、 $rl/d = 1.38 \times 10^3$ rad/V である。光検出器は Sharp 製 PO-102 J 形ソーラセルで負荷抵抗は $1 \text{ k}\Omega$ で、出力をシンクロスコープで表示した。

以下は、図2と表1のセットによる実験結果である。

図5に、電流測定でそのときの直線性と、電圧に影響をうけないことを示したものである。電流、電圧は50Hzである。

図6も同様に、電圧測定源に電流が影響しないことを示したものである。

図7には、電力の測定例をしめし、出力がほぼ電流×電圧に比例していることをしめす。

5. 結 論

上述のように、偏波の2つの自由度を利用して独立な2つのパラメタ、あるいは、その積を送ることは、いくつかの困難を伴うけれども、将来各種の分野で利用されるものと思う。とくに最近では、コアが真円のファイバも開発されつつあり⁹⁾、光ファイバとの組み合わせで、利用範囲が拡大するであろう。

終わりに、御討論いただく東電学園 大野豊氏、本所 浜崎教授、榑助教授、大林、五十嵐枝官、並びに歴代の大学院実験諸氏に深謝致します。

(1979年12月12日受理)

参 考 文 献

1) 藤井, 滝本, 井上, 中川: "同一レーザービームによる電流電圧計測" 電気四学会連大, 1733, 1969

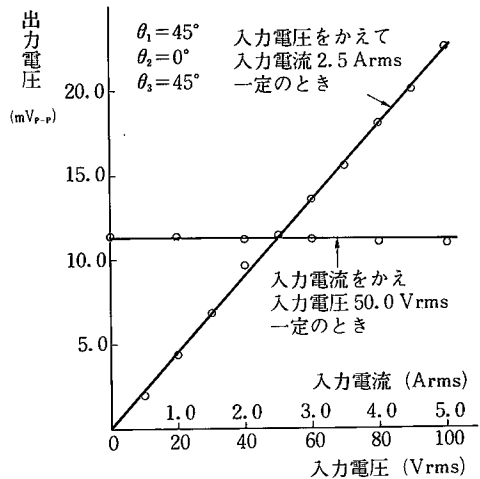


図6 電圧の測定例

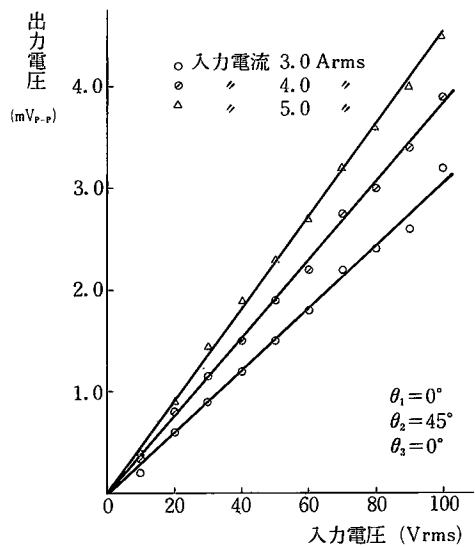


図7 電力の測定例

2) 斎藤, 藤井, 横山: "レーザーによる電力用電流電圧測定" 生産研究, vol. 28, No. 6, pp. 14-20; June 1976.
 3) 土居康弘: "偏光と結晶光学" 光学技術シリーズ4共立, 1975.
 4) 森口, 宇田川, 一松編: "数学公式III", 岩波 1959.
 5) 斎藤, 浜崎, 藤井, 横山, 大野, 志田: "レーザーを利用した無接触起高圧変流器(レーザーCT)", 電学誌, Vol 88, No. 8, pp 1541-1549, Aug. 1968.
 6) S. R. Norman, D. N. Payne and M. J. Adams; "Analysis, Fabrication and Properties of Single-Mode Fibers Exhibiting Extremely Low Polarization Birefringence", 1979 OCL, 10.1
 7) 斎藤, 藤井, 横山, 浜崎: "レーザーを用いた電流電圧測定に関する基礎的研究" 生研報告, Vol. 28, No. 6
 8) 藤井, 横山, 柴野: "光変調器の感度の光入射角依存性" 信全大 815, Mar. 1979.