

レーザーによる電力用電流電圧測定

The Current and Voltage Measurements for Power Transmission Lines by Using Laser Light.

斎藤 成文・藤井 陽一・横山 幸嗣

Sigebumi SAITO・Yoichi FUJII and Koji YOKOYAMA

レーザー応用計測技術の一環として、レーザー、あるいは、発光素子を利用した無接触電流、電圧計測器の研究開発を行い、かなりの精度で測定されることが実証されている。^{1)~9)}ここでは、このようなレーザーを利用した電流、電圧測定方式について概説し、研究の現状、ならびに、将来の実用化の動向についてのべる。

1. はじめに

レーザーを電流、電圧の計測に使用することの需要は、つぎのようなところにある。すなわち、1) 電力系統の超高圧化に伴い、電流、電圧の測定が加速度的に困難になる。とくに、大形の絶縁碍子の製作に巨大な費用を要する。2) また、電力系統の制御、事故時の対策を立てるために、送電系統における電流、電圧の情報を従来より多く必要としている。3) 電流、電圧等を、回路に手を加えることなく“非破壊測定”を行いたい、そのためには、簡易に測定装置の取付が可能な無接触方式がのぞましい。4) 直流大電流のように、従来から変流器等の適用不可能であったような量の測定が簡単に行える。5) インパルス電流、電圧のように、従来の測定方式では、測定が困難であるか、または、不可能である場合、6) 超高圧部位、放射線、化学薬品、遠隔地等の人間が接近困難であるような電気量の測定。

上記のような用途は、未だその需要は、必ずしも普遍的なものではなく、ある程度は、他の測定手段を以ってしても十分使用可能なものもあるが、レーザーを用いた無接触方式によれば、より簡易に測定することができるという特徴がある。しかし、レーザーを用いた方式では、従来の測定方式におけるように、測定装置が十分堅牢でなく、レーザー自体、および、附属する電子回路の部品も、従来の鉄心形の測定変換器に比し、寿命は短いので、このような点に十分考慮する必要があり、実用化への大きな問題とされていた。^{9) 10)}

近年、オプトエレクトロニクスの進歩はめざましく、これらの問題は次第に解決されつつある。レーザー自体、信頼性および寿命の点では年々向上し、さらに、半導体の室温連続発振レーザーにみられるように、小形化しつつあり、また、取り扱いが容易で長寿命、安価な発光ダイオードの有用性も考えられる。一方、光の伝送路自体も光ファイバ^{10) 11)}や光集積回路のように、導波路化しており、これにより、機械的な振動、気象の影響

も容易に克服されつつある。さらに、誘導障害がないところから、将来、電力通信へ広く利用されようとしている光ファイバ通信系への直接結合も可能になる利点がある。

我々は、多年に渉り、レーザーやマイクロ波を用いた電流、電圧計測について、開発研究を行ってきたが、最近、計測用光変流器(レーザーCT)について、より安定した測定を行うため、光伝送路への光ファイバの導入、また、可撓性光路(セルフォック[®])を電流路に鎖交させ、光ファイバ内でのレーザー偏光波のファラデー効果を直接用いる方式等により、さらに、実用化へと一歩を進めた。また、計測用光変圧器(レーザーPT)については、He-Neレーザー、半導体レーザー、発光ダイオード等のスペクトル巾の異なる発光デバイスによる変成器の検討を試みた。^{2) 20)}

特に、発光ダイオードは、 $\pm 500 \text{ \AA}$ 程度のスペクトル巾を持つインコヒーレント光であるため、LiNbO₃結晶の結晶軸と印加電界方向に対するスペクトル巾による影響を検討し、安価な発光ダイオードによる光変圧器の見通しを得ている。

2. レーザによる電流、電圧測定の原理

電流の測定は、電流を媒介する物理量は磁界、磁束密度であるから、電流を無接触で測定するためには、磁界を測定することになる。磁界を光学的に測定するには、一般的には、偏光面回転角が磁界に比例する磁気光学効果(ファラデー効果)²⁰⁾が考えられる。材料としては、その効果はあまり大きくないが、安定性のよい重鉛ガラスの使用が実際的である。また、可撓性の集束性ファイバ(セルフォック[®])を電流路に鎖交させ、等価的にその効果を高める方式も考えられる。その他、Ce, Tb, Ybガラスなどファラデー効果の大きい材料の使用も考えられるが、これらの常磁性体や強磁性体では温度特性を有し、問題がある。表1は、いくつかの磁気光学材料と、その特性を示してある。⁹⁾

電圧の測定には、媒介量としては電界を測定するこ

となる。原理としては、通常は電気光学効果(ポッケルス効果)が考えられる。これは、その結果が十分強くなく、また、温度特性も良好でないで、材料の選択を十分検討しなければならない。一般には、KDP, ADP, LiNbO₃, LiTaO₃などが多く使用されている。中でもLiNbO₃系結晶はポッケルス定数が大きく、横型電界で使用することができるため、高感度の電圧検出の計測に適している。その他、最近開発がすすめられている液晶には、電圧に感ずるものがあり、このようなものも十分に検討に値するものと思われる。表2は、いくつかの結晶における電気光学係数の値を示している¹⁵⁾

表1 代表的な物質のVerdets定数⁹⁾(λ=5893Å)

物質	温度(°C)	Verdets定数 単位×10 ⁻¹ min/oe·cm	屈折率
ガラス(エナリン酸クラウン)	18	+1.61	1.51
ガラス(エナ最重フリント)	18	+8.88	1.91
水晶	20	+1.664	1.54
二硫化炭素	18	+4.2	
水	20	+1.302	1.33
Ce(PO ₃) ₃ ガラス	20	-21.7(λ=5780)	Pale yellow to colorless
Tb(PO ₃) ₃ "	20	-22.6(")	Colorless.
Pr(PO ₃) ₃ "	20	-18.2(")	Green.

表2 いくつかの電気光学材料とその特性¹⁵⁾

材料	室温での電気光学係数 単位10 ⁻¹¹ m/V	屈折率*	n _o ² γ 単位10 ⁻¹¹ m/V	ε/ε _o 室温での値	点群
KDP (KH ₂ PO ₄)	r ₁₁ =8.6	n _o =1.54	29	ε // c=20	42m
	γ ₁₃ =10.6	n _e =1.47	34	ε ⊥ c=45	
KD ₂ PO ₄	r ₁₃ =23.6	-1.50	80	ε // c~50 (24°C)	42m
ADP (NH ₄ H ₂ PO ₄)	r ₁₁ =28	n _o =1.52	95	ε // c=12	42m
	r ₁₃ =8.5	n _e =1.48	27		
水晶	r ₁₁ =0.2	n _o =1.54	0.7	ε // c~4.3	32
	r ₁₃ =0.93	n _e =1.55	3.4	ε ⊥ c~4.3	
ZnS	r ₁₁ =2.0	n _o =2.37	27	~10	43m
LiNbO ₃	r ₁₃ =30.8	n _o =2.29	n _e ² γ ₁₃ =328	ε ⊥ c=98	3m
	r ₁₂ =8.6	n _e =2.20	n _o ² r ₁₂ =37	ε // c=50	
	r ₂₂ =3.4		1/2(n _e ² r ₁₃ -n _o ² r ₁₂)=112		
	r ₄₂ =28				
LiTaO ₃ (30°C)	r ₁₃ =30.3	n _o =2.175	n _e ² r ₁₃ =314	ε // c=43	3m
	r ₁₂ =5.7	n _e =2.180			

* 波長5500Å付近での代表的な値

3. レーザによる電流、電圧の測定

3-1) レーザ変流器の原理^{11,12)}

レーザ変流器は、光学領域の電磁波に対して、その偏波面が磁界により回転する光ファラデー効果を使用

したものである。図1は原理を示す。この方式では、磁界による偏光面の回転角Δθは

$$\Delta\theta = \nu NI \quad \dots\dots\dots(1)$$

で与えられ、ファラデー素子の材料で決まるν(Verdet's定数)のほかに、光路と電流路との相互鎖交数Nと電流Iに関係する。

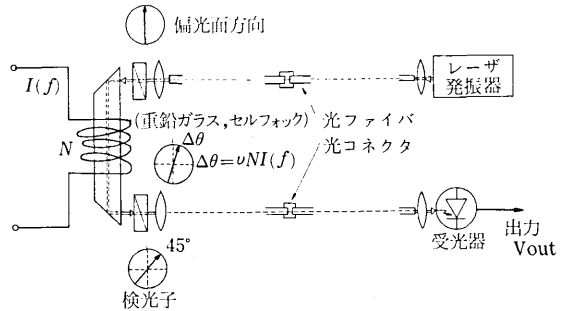


図1 レーザ変流器(CT)の原理図

図1において、検光子の方位角をもとの偏光方向に対してθ₀とすると、受光器の出力V_{out}は、

$$V_{out} = P_{\gamma} \cdot K_D \cdot \cos^2(\theta_0 + \Delta\theta) \\ = \frac{1}{2} P_{\gamma} \cdot K_D \{1 + \cos 2(\theta_0 + \Delta\theta)\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、P_γ: 受光器における光の強度(W)

K_D: 受光器の検波定数(V/W)

である。従って、検光子を原偏光に対し、θ₀=π/4としたとき、光のファラデー効果による検波出力は、

$$V_{out} = \frac{1}{2} P_{\gamma} \cdot K_D \sin^2 \Delta\theta \\ \approx P_{\gamma} \cdot K_D \cdot \nu NI \quad (V/AT) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、Δθ≪1

で与えられる。このように、電流量に比例する光の偏光面の回転Δθを得、これを偏光板を用いて光の強度に変換し、さらに、光電変換器により電気量に変換することによって、電流に比例した出力を得る方法である。しかし、(2)式に示すように、Δθの余弦関係であるから、線形に比例する範囲は限られており、飽和したり、逆に減少したりする。この限界点は、材料のVerdet's定数と鎖交数Nのみで定まる。

3-2) レーザ変圧器の原理^{10,11)}

電気光学効果による結晶の屈折率の変化は、通過する光の速度を変化させ、通過することによって光の位相が変わる。この印加電界による光の位相差を検出して測定する方式である。

図2は原理を示す。この方式では、電界による偏光波の光学的位相差Δφは

$$\Delta\phi = \gamma \frac{l}{d} V \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、γは結晶のポッケルス定数と光線方向と結

晶のカットによって等価的に決まる電気光学効果の大きさを示す係数。 l , d は結晶の長さ, 厚さ, V は印加電圧。 で与えられ, 結晶の性質で決まる γ のほかに, 素子形状に依存する l/d と電圧 V の関係である。

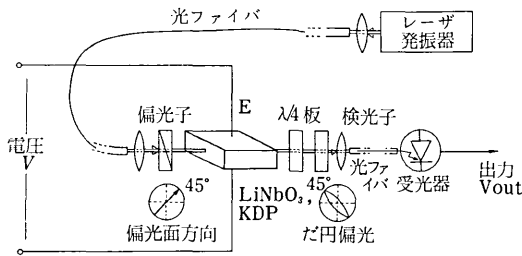


図2 レーザ変圧器 (PT) の原理

図2において, 検光子の方位角を入射光の偏光方向と直交させ, 光学的バイアス板の位相を ϕ_0 とすると, 受光器の出力は(2)式を求めた時と同様に取扱い,

$$V_{out} = P_r K_D \sin^2(\phi_0 + \Delta\phi) \quad \dots(5)$$

で表わされる。したがって, 波長板による光学バイアスの位相を $2\phi_0 = \pi/2$ とおけば, 光のポッケルス効果による検波出力は

$$V_{out} = \frac{1}{2} P_r \cdot K_D \cdot \sin 2\Delta\phi \approx P_r \cdot K_D \cdot \gamma \frac{l}{d} V \quad \dots(6)$$

ただし, $\Delta\phi \ll 1$

で与えられる。すなわち, 電氣的に誘起された複屈折によって, 入射偏光波は楕円偏光波となる。これを偏光板を用いて光の強度に変換し, 電圧に比例した屈折率変化による楕円偏光率から求める方式である。

3-3) レーザによる電力測定¹¹⁾

前述の電流, 電圧の原理にもとづき, 図3に示すように, 同一レーザービーム内に, 電流, 電圧トランスデューサを配置すると, 電力の測定もできる。

構成は, 電流トランスデューサで $\Delta\theta$ の偏光面の回

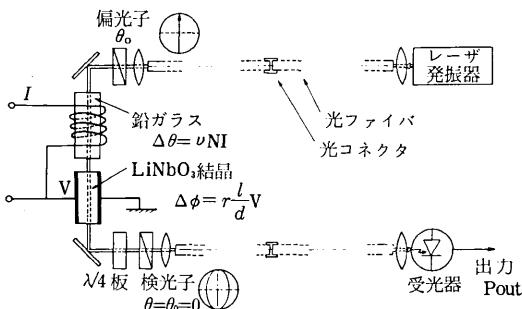


図3 レーザによる電力測定の原理図

転を受けたレーザービームを, さらに, 電圧トランスデューサにおいて, $\Delta\phi$ の位相差を生じ, 楕円偏光波となる。すなわち, 偏光面の回転角と楕円率によって生じた偏光の変化率を, 検光子で同時に光の強度として検出する。

検光子の方位角を原偏光に対し θ_0 , 波長板のバイアス点の位相を ϕ_0 と置くと, 受光器の出力はジョーンズ行列を用いて求めると, 一般的に, 次式で表わされる。

$$V_{out} = \frac{1}{2} P_r \cdot K_D \{1 - \sin 2(\theta_0 + \Delta\theta) \cdot \cos 2(\phi_0 + \Delta\phi)\} \quad \dots(7)$$

ここで, $2\phi_0 = \pi/2$, $\theta_0 = 0$ とおき, その出力を P_{out} とすると,

$$P_{out} = \frac{1}{2} P_r \cdot K_D (1 + \sin 2\Delta\theta \cdot \sin 2\Delta\phi) \quad \dots(8)$$

$\Delta\theta, \Delta\phi \ll \frac{\pi}{2}$ のとき, ファラデー, ポッケルス効果による受光器の検波出力は(1), (4), (8)式より

$$P_{out} \approx 2P_r K_D \Delta\theta \cdot \Delta\phi = 2P_r K_D \cdot \nu N \cdot \gamma \frac{l}{d} (IV) \quad \dots(9)$$

すなわち, 同一レーザービーム内に電流, 電圧トランスデューサを配置し, 検光子の方位角をもとの偏光面に対し, 平行 ($\theta_0 = 0^\circ$) に設定することにより, 直接電力の値を計測することができる。

4. 光源スペクトル特性を考慮した電圧トランスデューサの設計

4-1) 光源のスペクトル特性と複屈折の分散

LiNbO₃ 結晶を用いて, z軸方向に電界を印加した横方向電界形変調を行う場合, 常光線屈折率 n_o と異常光線屈折率 n_e は波長によって異なる分散特性をもつため, 光源のスペクトル巾の中で, 自然複屈折による光学的位相差が互いに打消しあう現象が生ずる。このため, He-Neレーザーのように発光スペクトルが極めて狭いコヒーレント光源の場合には, 問題を生じないが, 発光ダイオード, および, 多くの“縦モード”で発振している通常の半導体レーザーを光源とする場合, そのスペクトル巾は, 前者が約 $\pm 500 \text{ \AA}$, 後者が約 $\pm 5 \text{ \AA}$ とかなり広いため, ポッケルス効果が打消されて変調は不可能となる現象を生じる。そこで, 光源のスペクトル特性を考慮した電圧トランスデューサについて検討する。

4-2) 結晶主軸に対する印加電界と光線方向

電圧トランスデューサとして, LiNbO₃系結晶は, 点群 3m に属するので, 電界 $E (E_x, E_y, E_z)$ の存在する場合の屈折率楕円体の式は, 一般に次のように表わされる。⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22} E_y + \gamma_{13} E_z\right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22} E_y + \gamma_{13} E_z\right) y^2$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{1}{n_e^2} + \gamma_{33} E_z\right) z^2 - 2\gamma_{22} E_x x y + 2\gamma_{31} E_y y z \\
 & + 2\gamma_{31} E_z z x = 1 \dots\dots\dots(10)
 \end{aligned}$$

ここに、結晶は単軸結晶だから、 $n_x = n_y = n_o$, $n_z = n_e$ としてある。 n_o は常光線屈折率、 n_e は異常光線屈折率である。このように電界の印加により屈折率楕円体の式には非対角項が現われる。これは電界を加えると屈折率楕円体の主軸がもはや x , y , z 軸と平行ではないことを意味する。それゆえ、光伝搬への電界の影響は、 E の存在下での新しい主軸の方向と主屈折率の値を求めることが必要になる。そこで、結晶主軸に対する印加電界と光伝搬方向について、つぎの二つについて考える。

i) $E_x = E_y = 0$, $E_z \neq 0$ で x 軸入射の場合

屈折率楕円体の主軸は変わらないが、楕円体はつぎのように変形する。

$$\frac{x^2 + y^2}{n_o^2 \left(1 - \frac{1}{2} n_o^2 \gamma_{13} E_z\right)^2} + \frac{z^2}{n_e^2 \left(1 - \frac{1}{2} n_e^2 \gamma_{33} E_z\right)^2} = 1 \dots\dots\dots(11)$$

すなわち、主屈折率は

$$\begin{cases} n_x = n_y = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{13} E_z \\ n_z = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_z \end{cases} \dots\dots\dots(12)$$

x 軸に平行に光束を入れた場合の光学的位相差はつぎのようになる。

$$\begin{aligned}
 \Delta\phi_x &= \frac{2\pi}{\lambda} (n_y - n_z) \ell \\
 &= \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ (n_o - n_e) + \frac{1}{2} n_e^3 \left[\gamma_{33} - \left(\frac{n_o}{n_e}\right)^3 \gamma_{13} \right] \frac{V_z}{d} \right\} \ell \dots\dots\dots(13)
 \end{aligned}$$

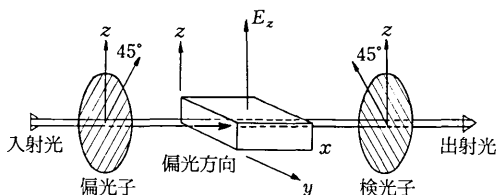
ここで、 ℓ : x 軸方向の長さ、 d は z 軸方向の結晶の厚さ、 $V_z = E_z d$ で印加電圧。

この場合、印加電界による位相差のほか、自然複屈折による位相項が含まれる。図4(a)は構成を示す。

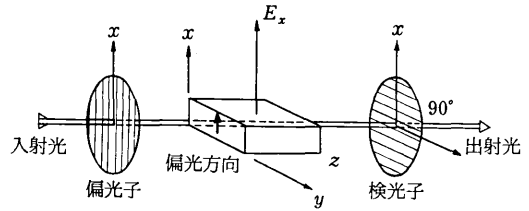
ii) $E_y = E_z = 0$, $E_x \neq 0$ で z 軸入射の場合

屈折率楕円体は

$$\frac{1}{n_o} (x^2 + y^2) - 2\gamma_{22} E_x x y + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \dots\dots\dots(14)$$



(a) 印加電界 z 軸、光入射 x 軸方向の場合



(b) 印加電界 x 軸、光入射 z 軸方向の場合

図4 LiNbO₃ 結晶主軸に対する印加電界と光の入射方向による構成

であるから、屈折率楕円体の主軸は、 z 軸を軸として、 45° 回転した方向となる。これを x' , y' , とすると

$$\frac{x'^2}{n_o^2 \left(1 + \frac{1}{2} n_o^2 \gamma_{22} E_x\right)^2} + \frac{y'^2}{n_o^2 \left(1 - \frac{1}{2} n_o^2 \gamma_{22} E_x\right)^2} + \frac{z^2}{n_e^2} = 1 \dots\dots\dots(15)$$

すなわち、主屈折率は

$$\begin{cases} n'_x = n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{22} E_x \\ n'_y = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{22} E_x \\ n'_z = n_z = n_e \end{cases} \dots\dots\dots(16)$$

x 軸方向に電界を印加し、 z 軸方向に通した光に生じる位相差はつぎのようになる。

$$\Delta\phi_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{22} \frac{\ell}{d} V \dots\dots\dots(17)$$

このように、結晶主軸に対する印加電界と光入射の方向を選ぶと、自然複屈折による光学的位相差を除去することが可能である。すなわち、光源のスペクトル特性に影響されないことになる。図4(b)は構成を示す。

例えば、波長 6600\AA 、結晶の光透過方向の長さを 15 mm とした場合、i) の電界印加を z 軸にとったとき、変調可能な光源の限界スペクトル巾 $\Delta\lambda$ はつぎのようになる。

$$\frac{2\pi\ell}{\lambda} (n_o - n_e) - \frac{2\pi\ell}{\lambda + \Delta\lambda} (n_o - n_e) \leq \pi \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 $\lambda = 6600\text{\AA}$, $n_o = 2.3075$, $n_e = 2.2100$, $\ell = 15\text{ mm}$ により、

$$\Delta\lambda = 1.8545\text{\AA}$$

極めて狭いコヒーレント光源を必要とする。

一方、ii) の x 軸方向に電界を印加して、 z 軸方向に光を通したとき、光学的位相差は(17)式で示されるように、自然複屈折による位相項は含まれず、光源のスペクトル特性による影響は生じない。この場合、光源に発光ダイオード、半導体レーザー等の使用が可能となる。

このほか、複屈折の効果は、屈折率の温度依存性が偏光成分により異なるので、温度とともに変動し、光

学的バイアスの制御に影響する。このため、i)の場合には、温度補償が必要である。

5. ファラデイ、ポッケルス効果による光変成器の入出力特性

5-1) レーザ変流器の入出力特性

図5(a), (b)は電流トランスデューサ部を変えたときのレーザー変流器の入出力特性を示す。図5(a)^{21,22)}は、トランスデューサに重鉛ガラス15×20mm角、長さ60mmを用いた高圧大電流用に試作したレーザー変流器の大電流特性を示す。実験的に入力電流実効値 I_{Ac} とレーザー変流器の出力電圧の $p-p$ 値 V_{pp} の関係式を求めると、

$$V_{pp}(\text{mV}) = 0.48 I_{rms}(\text{A})$$

となる。また、電流変化範囲における実測値の直線性も良好である。このレーザー変流器によって $I=20\text{KA}$ まで直線性からのずれが数パーセント以内で測定可能となる。

図5(b)¹⁸⁾は、ファラデイ回転角が光路と電流路の鎖交数 N に比例することから、電流路の変わりに、光

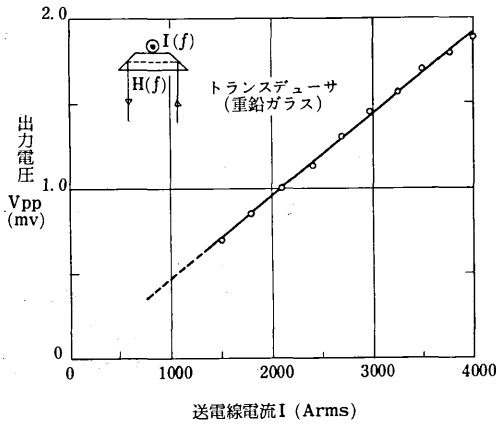


図5(a). レーザ変流器の大電流特性

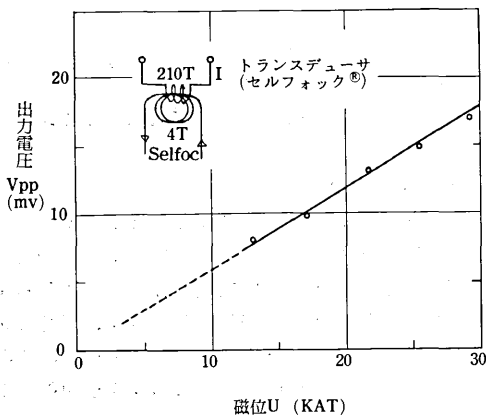


図5(b). セルフォックを用いたレーザー変流器の入出力特性

路のセルフォックを送電線に鎖交させ、従来の鉄心型変流器と同様の効果をもたせたものである。電流路210巻コイルに、巻回数4、巻半径11cmのセルフォックを鎖交させた実験装置における商用周波電流に対する測定値を示す。

入力磁位値 NI に対する出力電圧の関係は

$$V_{pp}(\text{mV}) = 6.15 \times 10^{-4} NI_{rms}(\text{A})$$

となり、 $10^4 AT$ あたり約6mVの検出感度を有する。

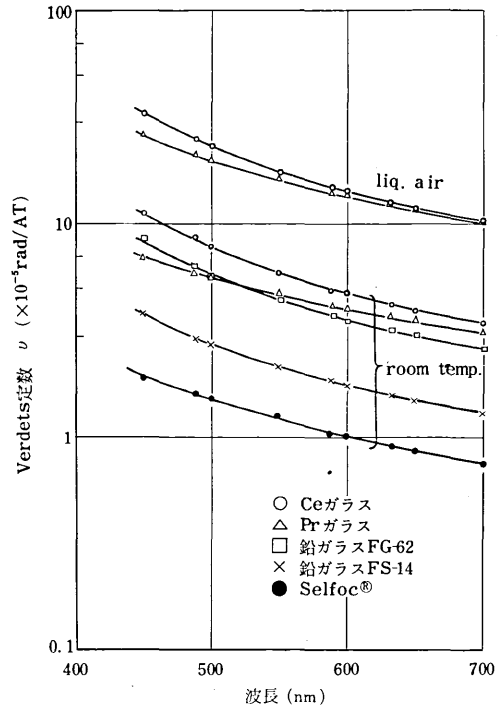


図6 磁気旋光物質のVerdet's定数の波長特性

Ceガラス (Ce_2O_3 : 35wt%) (P_2O_5 : 61 Na_2O : 4 Si : 1.2)	Prガラス (Pr_2O_3 : 29.08wt%) (P_2O_5 : 70.92)
鉛ガラス (FG-62, $n=1.9$ FS-14, $n=1.76$)	Selfoc® ($n_o=1.6$ ($n=n_o(1-\frac{1}{2}ar^2)$))

図6は、電流トランスデューサの材料として、光の波長に対するVerdet's定数の実測値を示す。

5-2) ポッケルス型光変成器の入出力特性

図7は、電圧トランスデューサとして、Z-cut LiNbO_3 結晶を用いたポッケルス型電圧変成器で、発光デバイス、および、結晶軸に対して印加電界方向を変えた場合の入出力特性である。

LiNbO_3 結晶は、電界印加方向の厚さ4mm、結晶内の光路長15mmを使用している。

図7(a)¹⁹⁾は、z軸方向に電界を印加し、x軸方向

にHe-Neレーザを通した場合で、半波長電圧の低い高感度検出方式である。スペクトル巾の狭いHe-Neレーザのため、自然複屈折による光学的位相差が互いに打消す現象はなく、直線性で高出力の特性を有する。

実験的に入力電圧 V_{Ac} と光変圧器の出力電圧 V_{Dp} の関係は式(6), (13)から

$$V_{Dp}(\text{mV}) = 0.457 V_{Ac}(\text{V})$$

となり、低電圧検出ができる。

図7(b)^{21), 22), 23)}は、 x 軸方向に電界を印加し、 z 軸方向に光を通した場合で、発光デバイスとして、発光ダイオード、半導体レーザによる比較を示す。

GaAsP発光ダイオード ($\lambda = 6600 \text{ \AA}$, 発光出力0.05 mW)を用いたインコヒーレント光による光変調は、光のビームの収束性が悪いため、出力光の消光比が劣化することから、出力電圧は

$$V_{Dp}(\mu\text{V}) = 0.88 V_{Ac}(\text{V})$$

と極めて小さく、外部電界による誘導、および、雑音

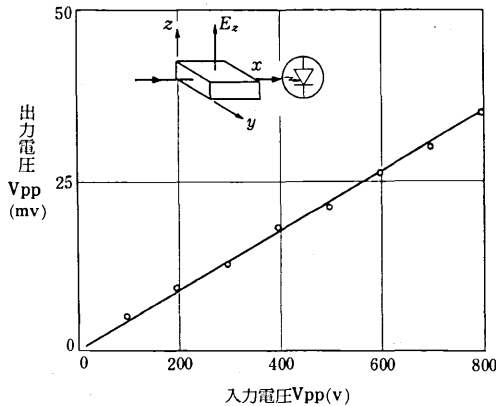


図7(a) He-Neレーザを用いた光変圧器の入出力特性(光束 $\perp z$ 軸, $E \parallel z$ 軸)

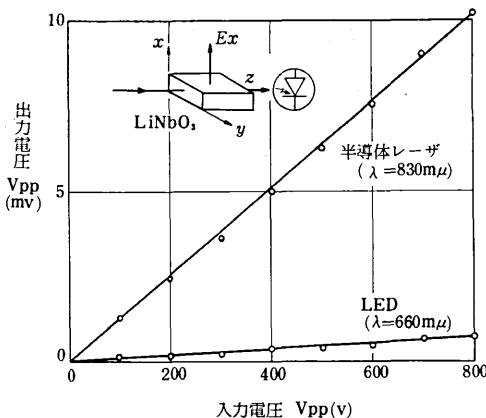


図7(b) 半導体レーザおよびLEDによる光変圧器の入出力特性(光束 $\parallel z$ 軸, $E \perp z$ 軸)

による誤差を生じやすい。

一方、半導体レーザ ($\lambda = 8300 \text{ \AA}$, 発光出力3 mW) (NEC-M108-KS28)を用いた場合、入力電圧 V_{Ac} と出力電圧 V_{Dp} の関係は

$$V_{Dp}(\text{mV}) = 0.0132 V_{Ac}(\text{V})$$

と高出力が得られ、直線性もよく、高精度の特性を有する。

以上のように、レーザによる電力用電流、電圧測定値の一例を示したが、これら電流、電圧光変成器の特性を決める要素として、精度は、光源の強度、導波系の損失、および、受光器の量子効率などによるショット雑音等で決まる。また、測定範囲は、(2), (5)式に示すように、その出力が余弦関数であるから、飽和したり、逆に減少したりする。したがって、その限界点は、トランスデューサの特性、および形状等で定まることになる。

一方、限界点を越える測定においては、基本波の一周期内における波頭の数 n と、最大振幅に達しない波頭の大きさを合成するようにして求める方式(デジタル変換型レーザ変成器²⁴⁾)が可能であることから、実質的には、この測定方式においては、測定限界は生じない。

このように、レーザによる電力用の電流、電圧を測定するためには、測定電流、電圧の範囲により、光源、トランスデューサ、受光器等の各デバイスを決めればよいことになる。しかし、一般的には、その特性、価格などの面から、大電流、大電圧の測定に適すと考えられる。

6. 光変成器の応用

光変成器は、構成上から入出力間は光によって光学的に結合され、絶縁度が高く、高帯域であることなど、すぐれた特性を有している。

その具体的な応用の可能性を掲げる。

- 1) 超高压送電線の保護システムの入力光ファイバ伝送を用いて現実的。
- 2) 計測用トランスデューサ。

電圧、電流量(低電圧)を光ファイバを介して伝送し、総合的な計測データ処理システムに入力する。

- 3) アイソレーション・トランス

内外サージ侵入の恐れのある高压系の変圧器、変流器などの電力回路と電子回路(コンピュータ、トランジスタ、リレー)間のインターフェイス。

- 4) 光検電器

光源に半導体レーザを用い、細い絶縁中空パイプの中の分圧器、変調素子を組込むことによって、ロッド状で軽量、かつ、操作が簡単な現場保守員の点検用検電器。

7. む す び

電力分野へのオプトエレクトロニクス応用の可能性として、電力計測用光変成器の各種構成法と実験データを概述した。

本研究において、レーザ変流器については、トランスデューサに光ファイバのセルフオックを用いることにより、機械的、および気象変化の影響を受けにくい、より安定した測定を行えること。

一方、光変圧器においては、電圧トランスデューサの LiNbO_3 変調素子で、印加電圧を x 軸、光ビームを z 軸方向にとることにより、発光ダイオードのインコヒーレント光による光変調が可能であること。さらに、室温連続発振の半導体レーザを用いると十分な出力を得ることができ、精度の向上がはかれることを実証し、光変成器として超小形システムが設計できる見通しを得た。

終りに、本研究に対しご援助を賜った本学浜崎教授、河村教授、および、東電学園大野教授、ならびに、電力中研、東京電力関係各位に厚く感謝する。

また、資料の提出、その他の御協力をいただいた、日本電気KK、日本板硝子KK、日本光学KK、小原光学KKに感謝する。
(1976年4月8日受理)

参 考 文 献

- 1) S. Saito, J. Hamasaki, Y. Fujii, K. Yokoyama and Y. Ohno "Development of the Laser Current Transformer for Extra-High-Voltage Power Transmission Lines" IEEE Journ. of Q. E ; vol. QE-3, No. 11 ; pp589~597 ; Nov. 1967.
- 2) 斎藤, 浜崎, 藤井, 横山, 大野, 志田 "レーザを利用した無接触超高压変流器(レーザCT)" 電気学会誌 vol. 88-8, No. 959, pp. 1541~1549. 1968年8月.
- 3) 斎藤, 浜崎, 藤井, 横山, 大野 "レーザを使用した超高压変流器" 生産研究, vol. 19, No. 8, 昭和42年8月.
- 4) 藤井, 白石, 浜口 "直流大電流用レーザCT/レーザセルシン" 電子通信学会; 量子エレクトロニクス研究会資料, QE68-19, 1968年7月.
- 5) 斎藤, 大野, 喜連川, 中原, 立川 "超高压用マイクロ波変流器(μ 波CT)" 三菱電機技報, vol. 42, No. 12, 1968年12月.
- 6) 藤井, 大野, 竹下 "レーザの電力技術への応用について" 電気評論, pp 550~562, 1968年4月.
- 7) 斎藤, 藤井 "量子エレクトロニクス技術の(電力技術への)導入" 電気学会誌, vol. 87, No. 945, p1055~1058, 1967年6月.
- 8) S. B. Berger, C. B. Rubinstein, C. R. Kurkjian, and A. W. Treptow, "Faraday Rotation of Rare-Earth (III) Phosphate Glasses" Physical Review, vol. 133, No. 3A, February, 1964.
- 9) 東京天文台編纂 "理科年表" 丸善,
- 10) 藤井, 鳴河, 浜口, 井上, 中川 "レーザによるPTの基礎実験" 電気四学会連合大会, 昭和44年, 1734.
- 11) 藤井, 滝本, 井上, 中川 "同一レーザビームによる電流電圧計測" 電気四学会連合大会, 昭和44年, 1733.
- 12) 斎藤, 藤井, 横山 "レーザによる電力用電流電圧計測器" 電気四学会連合大会, 昭和46年, 243.
- 13) 斎藤, 藤井, 横山 "オプトエレクトロニクスによる計器用変成器の実用性(レーザCT)" 電気四学会連合大会, 昭和47年シンポジウム, S-67.
- 14) 応用物理学会光学懇話会編 "結晶光学" 森北出版.
- 15) Amnon YARIV著, 多田, 神谷共訳 "光エレクトロニクスの基礎" 丸善.
- 16) T. Uchida, M. Furukawa, I. Kitano, K. Koizumi, H. Matsumura "Optical Characteristics of a Light-Focusing Fiber Guide and Its Applications", IEEE J. Quantum Electron. vol. QE-6, No. 10, pp606-612, Oct. 1970.
- 17) D. Gloge, "Bending Loss in Multimode Fibers with Graded and Ungraded Core Index" Applied Optics, vol. 11, No. 11, Nov. 1972.
- 18) 横山, 斎藤, 藤井 "セルフオックを用いたレーザ式電流計測器" 電気学会全国大会, 昭和48年, 1065.
- 19) 青柳, 北原, 大野, 横山, 藤井, 斎藤 "電力用光変成器" 電気学会全国大会, 昭和49年, 964.
- 20) 藤井, 横山, 大野 "光学的ファラデー効果とサーキュレータ" 電気四学会連合大会, 昭和41年, 1001.
- 21) 藤井, 横山, 斎藤, 三浦, 吉田, 大野 "発光ダイオードによる電力用光変成器の実験的研究" 電気学会全国大会, 昭和50年, 1300.
- 22) 大野, 藤井, 横山 "オプトエレクトロニクスを応用した電力計測用変換器" 電気四学会連用大会シンポジウム, 昭和50年, S-32.
- 23) 田所, 山本, 大野, 横山, 藤井, 斎藤 "発光ダイオードによる電力用光変成器の実験的研究その2" 電気学会全国大会, 昭和51年.
- 24) 横山, 藤井, 斎藤, 田所, 山本, 大野 "デジタル変換型レーザ電圧変成器の基礎的研究" 電気学会全国大会, 昭和51年.
- 25) 土井康弘著 "偏光と結晶光学" 共立出版.
- 26) F. T. Arecchi, E. O. Schulz-Dubois "Laser HandBook vol. 1, 2" American Elsevier Publishing Company.