

KTN結晶を用いた電気光学プローブに関する研究

高野, 佳大 / TAKANO, Keita

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025380>

KTN 結晶を用いた電気光学プローブに関する研究

RESEARCH ON ELECTRO-OPTICAL PROBES USING KTN CRYSTALS

高野佳大

Keita TAKANO

指導教員 品川満

法政大学大学院理工学研究科応用情報工学専攻修士課程

This paper describes the feasibility of an electro-optic (EO) probe system using $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN) crystals. The application of EO probe system can be expanded by using KTN crystal that responds to low frequency signals including direct current. We investigated the time stability of the measured values required for the sensor. We found that the tendency for time stability depends on the presence or absence of external light to the KTN. In addition, we raised the issue of drift, where the measurements of the two photodiodes change in the same direction.

Key Words: KTN crystals, EO probe system, Kerr effect, EO crystals

1. 序論

電気光学(EO)プローブシステム[1]は EO 結晶とレーザー光を用いた電界計測システムである。被測定物(DUT)に対して非接触かつ電氣的に絶縁されているため、DUT を傷つけることなく低擾乱な測定を行える。従来では、集積回路や有機薄膜太陽電池等の電子機器の測定に適用されている[2][3]。図1にEOプローブシステムの概要図を示す。

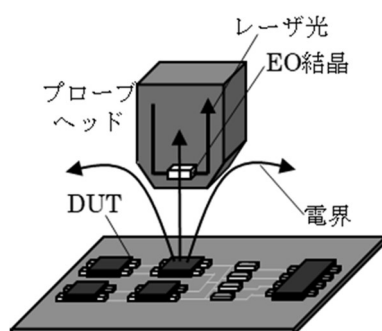


図1. EOプローブシステム

EO 結晶の EO 効果を用いて DUT からの電界を測定する。EO 結晶として半導体結晶である ZnTe を用いた従来の EO プローブシステムでは、1kHz 以下の低周波信号を測定することが困難であり、 $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN)結晶[4]を用いることで DC を含む低周波信号の測定が可能になることが従来研究において示されている。KTN を用いた EO プローブシステムを実現することができれば、静電気の帯電評価など、EO プローブシステムの応用先を拡大することができる。本論文では、EO 結晶に KTN を用いた

EO プローブシステムの長時間の連続測定における測定値の安定性について明らかにする。

2. EO プローブシステム

図2にEOプローブシステムの構成を示す。

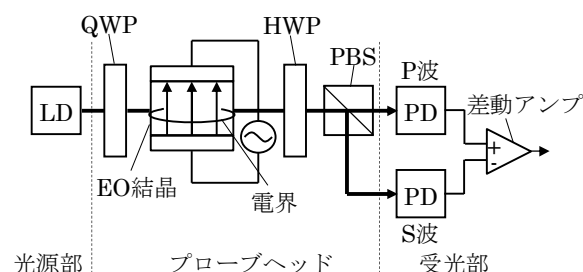


図2. EOプローブシステムの構成

図2のように、EOプローブシステムはレーザー光源(LD)、1/4波長版(QWP)、EO結晶、1/2波長版(HWP)、偏光ビームスプリッター(PBS)、受光素子(PD)、差動アンプから構成されている。LDから出射されたレーザー光は直線偏光であり、QWPを透過することによって円偏光になる。次に電界が結合されたEO結晶を透過するとEO効果によって偏光変化が生じ楕円偏光になる。HWPによって光軸が整えられ、PBSでP波とS波に分離される。PDでそれぞれ光電気変換され差動アンプに入力される。差動アンプにおいて逆相である信号成分は増幅され、同相の雑音は除去される。EO結晶透過後の偏光状態の時間変化を調べることで電界の計測を行っている。

図3にEO変調信号の概要図を示す。

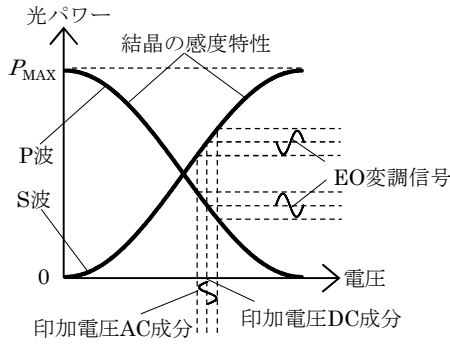


図3. EO変調信号

EO結晶にDC電圧を印加することでEO効果が発生し、図のP波、S波で表される受光量の変化が発生する。この受光量の変化を記録していったものを結晶の感度特性と呼ぶ。EO変調信号の大きさは、結晶の感度特性に大きく影響を受ける。感度特性の傾きが大きい箇所では、印加電圧が微小な場合でも、EO変調信号の振幅は大きくなる。感度特性は結晶によって異なり、位相差が電界強度の1乗に比例して変化するポッケルス効果と2乗に比例して変化するカー効果に分けられる。よってEOプローブシステムの性能はEO結晶によって大きく変わる。

3. KTN結晶

KTNはカリウム(K)、タンタル(Ta)、ニオブ(Nb)からなる酸化物結晶であり、非常に大きなEO効果を有することが知られている。図4にKTNの結晶構造を示す。

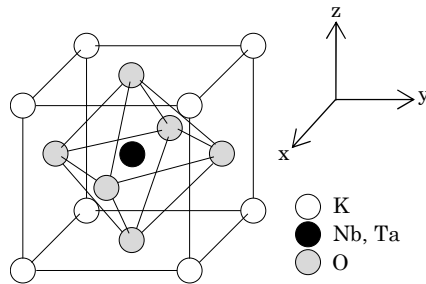


図4. KTNの結晶構造

KTNの結晶構造は温度によって変化し、それに伴い比誘電率も変化する。タンタルとニオブの比率によって結晶構造が変化する温度が変わり、本研究で用いたKTNでは約27°Cで正方晶から立方晶に変化する。よってKTNを温調し立方晶として扱った。

KTNのカー効果を式(1)に、ZnTeのポッケルス効果を式(2)に、ニオブ酸リチウム(LN)のポッケルス効果を式(3)に示す。

$$\Gamma_K = \frac{\pi n_{0K}^3 (g_{11} - g_{12}) \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 L V^2}{\lambda d^2} \quad (1)$$

$$\Gamma_Z = \frac{2\pi n_{0Z}^3 r_{41} L V}{\lambda d} \quad (2)$$

$$\Gamma_L = \frac{2\pi n_{0L}^3 r_{51} L V}{\lambda d} \quad (3)$$

ここで Γ_K 、 Γ_Z 、 Γ_L はそれぞれKTN、ZnTe、LNで発生するリタデーション、 n_{0K} 、 n_{0Z} 、 n_{0L} はそれぞれKTN、ZnTe、LNの屈折率、 g_{11} 、 g_{12} はKTNのカー係数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_r はKTNの比誘電率、 L は光路長、 V は結晶への印加電圧、 λ は光の波長、 d は結晶の厚さ、 r_{41} 、 r_{51} はそれぞれZnTeとLNのポッケルス係数を示す。表1に、本研究で用いるKTN、従来研究で用いたZnTe、EO結晶として広く知られているLNの比較を示す。

表1. 結晶比較

結晶	KTN	ZnTe	LN
物質	誘電体	半導体	誘電体
比誘電率	20000 (温度変化)	10	32
屈折率 n_0	2.1887	2.7483	2.2200
EO効果	カー	ポッケルス	ポッケルス
EO係数	$g_{11} - g_{12} = 0.14$	$r_{41} = 4.55$	$r_{51} = 28$

KTNは比誘電率が大きく、EO効果としてカー効果を有しているため、弱い電界でも高い感度が得られる。よってKTNを使用して評価を行う。

4. 実験結果

本研究ではKTNの基本特性を評価するため、実際のEOプローブシステムのような非接触型ではなく、結晶を電極で挟んだ構造で実験を行った。図5に本研究で用いた実験系のブロック図を示す。

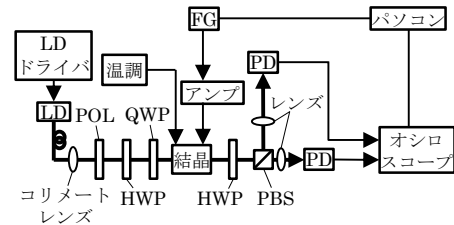


図5. 実験系

図6にKTNにDC電圧175V、AC電圧1V_{p-p}を印加し、周波数を変化させたときの結果を示す。

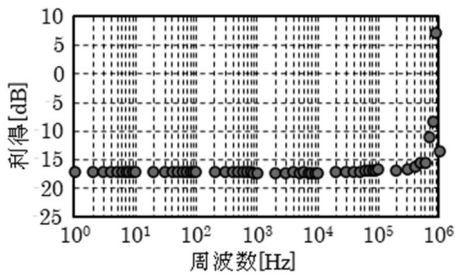


図 6. KTN の周波数特性

KTN の周波数特性は 1 Hz ~ 300 kHz で 1 dB 以内でフラットであり、900 kHz で共振が発生した。

アンプから DC 電圧 200 V を出力し続け、10 分間の測定電圧の時間変化を測定した。また、その後電圧をオフにした状態の測定電圧の時間変化も測定した。図 7 に電圧印加時の測定電圧の時間安定性の結果を、図 8 に電圧オフでの測定電圧の時間変化を示す。

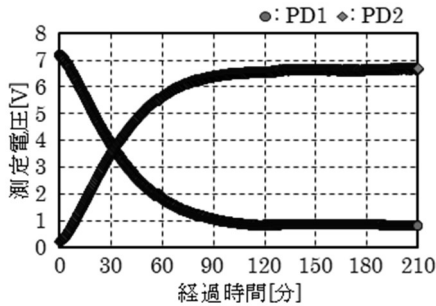


図 7. 電圧印加時の測定電圧の時間安定性

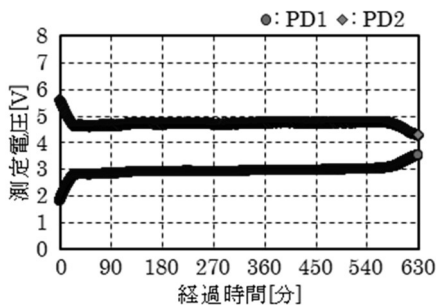


図 8. 電圧オフでの測定電圧の時間変化

電圧印加時においては、約 120 分の間、測定電圧の変化が発生し、その後は一定の値を取っているような結果が得られた。変化量は先行研究における感度特性の約 45 V 分である。電圧をオフにした後には、30 分ほど測定電圧の変化が発生しその後一定、570 分ほど経過した後から再度変化が発生することが確認された。この変化の原因として外部光の影響ではないかと考えた。本測定では 570 分あたりで日の出の時刻となり、太陽光が測定系に何らかの影響を与えたと考えられる。

外部光の影響を調べるため、遮光状態と外部光が有る状態で実験を行った。遮光用の箱を作成し、コリメートレンズから PD 前のレンズまでの空間光の光学系全体を遮光した。外部光として蛍光灯がある状態と、箱で覆った遮光状態についてそれぞれ、アンプから DC 電圧 200 V を 120 分間出力したときと、その後電圧をオフにして 120 分間の測定電圧の時間変化を測定した。図 9 に蛍光灯がある状態での結果を、図 10 に遮光状態での結果を示す。

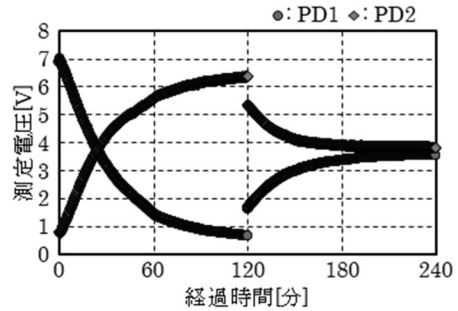


図 9. 蛍光灯がある状態での時間安定性

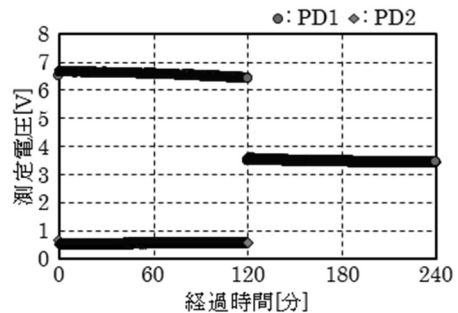


図 10. 遮光状態での時間安定性

蛍光灯がある状態での結果では、図 7 と同様の変化が起きた。遮光状態の結果では、電圧印加による測定電圧の時間変化はほぼ発生しなかった。また、電圧をオフにしたとき、蛍光灯がある状態での結果ではすぐに元の状態にもどらずに、時間経過によって変化が発生していることが確認できた。これらは外部光がある状態で電圧を印加することによって結晶内部で電子の偏りが生じ、その偏りによって外部電界がない状態でも、結晶内部で電界が発生しているのではないかと考えられる[5]。よって、外部光は KTN で発生する偏光変化に対して大きな影響を与えることが分かった。

図 10 の結果において、120 分までで PD1 のみの測定値の減少および 120 分以降で PD1, PD2 両方とも測定値の減少が確認された。PBS を用いた EO プローブシステムにおいては、感度特性は片方が上がれば片方が下がるという性質を持つため、測定値の片方の変化または両方とも同方向への変化は起こりにくい。図 11 に同方向への変化が発生する場合の感度特性を示す。

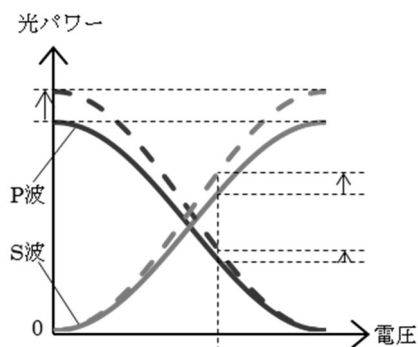


図 11. 同方向への変化の例

感度特性において、総光量が増える場合には、P波、S波ともに同方向への変化が発生する。図 11 は総光量が増えたことによって感度特性が実線から点線に移動し、ある一点では光パワーがどちらも上昇する例を示している。この上昇量は光パワーの大きさによって異なるため、P波とS波で異なる変化量となる。同方向の揺れは時間安定性の面において大きな問題であるため、以後、ドリフトと呼ぶこととして取り扱う。

ドリフトはLDから出射される総光量や、PDでの総受光量の変化による可能性が高いと考え、結晶を抜いた単純系から検証を行った。図 12 にドリフト検証用の実験系を示す。

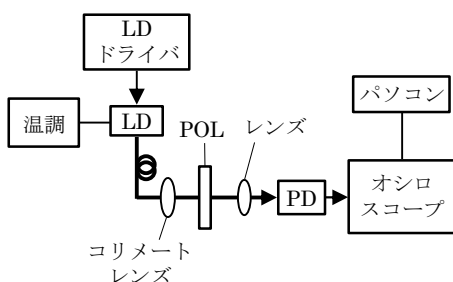


図 12. ドリフト検証用の実験系

POL 以外の光学素子、片方の PD を無くすことでパラメータを減らした。また LD の温度による影響を調べるために温度を導入した。図 13 に温度の設定温度を 0℃~50℃まで変化させたときのオシロスコープでの測定電圧を示す。

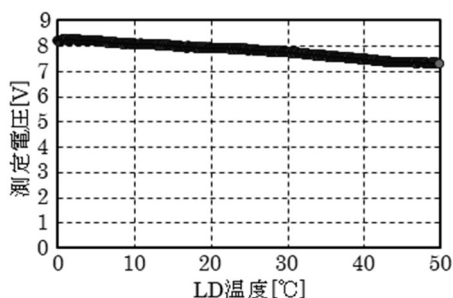


図 13. LD 温度と測定電圧の関係

LD の温度が上昇するにつれて測定電圧が減少していることがわかる。図 14 に温度の設定温度を 20℃で固定にしたときの時間経過によるオシロスコープでの測定電圧の変化を示す。

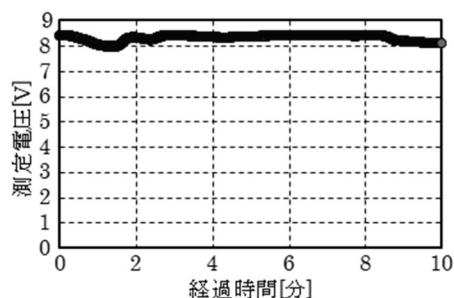


図 14. 温度 20℃で固定した時の測定電圧

温度の設定温度を固定しているのにも関わらず、測定電圧のドリフトが発生していることがわかる。これらの結果より、ドリフトの原因は結晶ではなく LD やその他の光学素子による可能性が高いことが分かった。

5. 結論

本論文では、KTN を用いた EO プロブシステムの長時間の連続測定における測定値の安定性について述べた。測定値の時間安定性は外部光がある状態と遮光状態と異なり、外部光がある状態では電圧を印加すると測定値が時間変化してしまい、遮光状態ではほとんど変化しないことが分かった。また遮光状態においても測定値の同方向への変化を確認し、これをドリフトと定義して検証を行い、結晶が原因ではない可能性が高いことが分かった。

参考文献

- 品川満, “フォトリック電界センサの応用技術に関する研究,” 博士論文, 2005.
- M. Yojima, H. Kuzumi, T. Nishiyama, “Non-contact LSI-package solder-joint inspection method using an Electro-Optic probe,” *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, vol. 66, Issue 10, pp. 1552-1557, 2000.
- J. Katsuyama, K. Matsumoto, R. Sugiyama, S. Hasegawa, M. Shinagawa, Y. Yanagisawa, “Failure diagnosis of organic photovoltaic using electro-optic probe,” *Opt. Rev.*, vol. 21, no. 5, pp. 621-627, 2014.
- 川村宗範, 今井欽之, 坂本匡, “KTN 単結晶を用いた光デバイスとその応用,” *日本結晶成長学会誌*, vol. 43, No. 3, pp. 155-160, 2016.
- T. Imai, S. Kawamura, S. Oka, “Space charge assisted evaluation method of the elasto-optic coefficients of electrooptic crystals,” *Optical Materials Express*, vol. 10, Issue 9, pp. 2181-2191, 2020.