

# 新たな可能性を拓く KTN結晶とその応用技術

KTN結晶が持つ巨大な電気光学効果を利用し、高速広角光スキャナや高速可変焦点レンズの開発を行いました。これらのデバイスは、光通信のみならず光を用いるさまざまな分野に適用可能なため、事業化に向けた取り組みを行っています。

## KTNで光を操る

光には、波長、強度、偏光、位相、進行方向という基本的性質があります。光を用いるすべての機器は、上記性質の何かを操っています。例えば、レンズ、プリズムやミラーは光の進行方向を、ディスプレイは光の強度を、ホログラフィは光の位相を操っています。

タンタル酸ニオブ酸カリウム (KTN) 結晶は、上記光の性質をすべて操る機能を持っていますが、特に、進行方向を変える応答が速くて大きい点に特長があります。

すなわち、KTN結晶を用いれば、レンズ、プリズム、ミラーといった、ごく一般的な部品を、それらが高速で動く必要がある用途に対しては、KTN結晶に置き換わる可能性があります (図1)。

## KTNとは

KTNとは、カリウム (K)、タンタル (Ta)、ニオブ (Nb) からできた酸化物で、化学式は $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ で表されます。電圧をかけると屈折率が変化する現象を「電気光学 (EO) 効果」と呼びますが、KTNは電気光学効果が大きい、すなわち、低い電圧で屈折率が大きく変わる材料として、古

く1950年代から知られていました。光学部品として使用するためには、光を散乱することがない単結晶にする必要がありますが、KTNは、単結晶にすることが非常に難しく、それが実用化を遅らせた原因です。

NTTフォトニクス研究所では、まずKTN結晶育成技術開発に努め、2003年には、光を散乱させることがない高品質のKTN結晶 (図2) を安定的に得られるようになりました。

## KTNの電気光学効果

KTNは、温度を変えると次々と結晶構造を変え、低温側から菱面体晶、斜方晶、正方晶、もっとも高温で立方晶となります (図3)。KTNは正方晶と立方晶の相転移温度より数度高い

やぎ しょうご

八木 生剛

NTTフォトニクス研究所

温度、すなわち、立方晶の状態で用います。

KTNの化学式は $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ において、Nbのモル比 (x) を変えると、相転移温度が変えられることが分かります。x=0.35付近のKTNを用いれば、室温で正方晶→立方晶の相転移

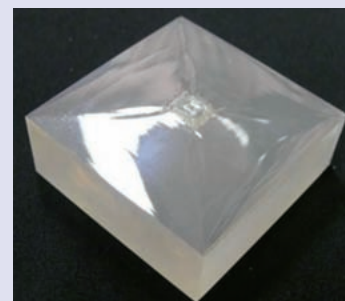


図2 NTTで作製した高品質KTN結晶 (53×53×20 mm)

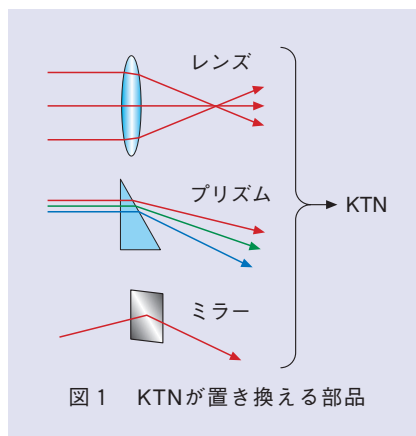


図1 KTNが置き換える部品

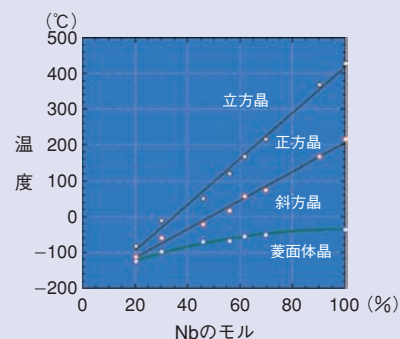


図3 KTNの相転移

温度より数度上の状態が実現されず、NTTで作製したKTNの比誘電率の温度依存性を図4に示します。このKTNの相転移温度は47℃で、その温度において比誘電率はピーク値の50 000となります。

KTNに電界 ( $E$ ) を加えたときの屈折率変化 ( $\delta n$ ) は、屈折率を  $n_0$ 、真空の誘電率を  $\epsilon_0$ 、比誘電率を  $\epsilon_r$  として

$$\delta n = -\frac{0.136}{2} n_0^3 \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 E^2 \quad (1)$$

で表され、比誘電率の2乗に比例することが分かります。つまり、図4に示される比誘電率の温度依存性から、KTNの電気光学効果を使う場合、それは、相転移温度の直上で温度制御を行うことが許される用途に限られることを意味します。

温度制御をすることが前提ならば、温度制御にコストをかけない努力が必要となります。そのため、相転移温度が室温より若干高い温度になるようニオブの比率を設定し、ヒーターによる温度制御を行います。

図2のKTN結晶写真では、白濁して光学部品としては使えないように見えますが、これは室温で撮影を行ったために正方晶になっており、強誘電

体のドメインによる散乱が見えているためです。温度を上げて、立方晶になれば透明になります。

表1では、KTNの電気光学効果の大きさを他の材料と比較しています。光通信にもすでに用いられているニオブ酸リチウム (LN) や、光学の実験室で用いられているチタン酸バリウム (BT) は、屈折率変化が電界に比例して変化するポッケルス効果を、チタン酸ジルコン酸ランタン鉛 (PLZT) やKTNは電界の2乗に比例して変化するKerr効果を用いていますので、低電界ではポッケルス効果、高電界ではKerr効果が有利となりますが、実用的な電界である500 V/mmで比較しますと、表1のようにまとめられます。なお、KTNの比誘電率は30 000で計算しています。

KTNの電気光学効果が既存の材料

に比べて圧倒的に大きいことが分かります。すなわち、電気光学効果を用いて何かをしたいとき、KTNを用いれば、電圧が低くて済む、あるいは、小さな結晶で動作する、ということの意味しています。

### 高速ビームスキャナ

さらにNTTでは、KTNにおいて特殊な電気光学効果、空間電荷制御電気光学効果が発現することを見いだししています。

電極材料としてチタン (Ti) を用いると、図5に示されるように、陰極から電子がKTN内に注入され、電極間で陰極からの距離 ( $x$ ) の平方根に比例した電界勾配

$$E(x) = \frac{3V}{2d} \sqrt{x} \quad (2)$$

表1 電気光学材料の比較

材 料	和 名	電気光学定数	屈折率変化	効 果
LN	ニオブ酸リチウム	30 pm/V	0.00009	ポッケルス
BT	チタン酸バリウム	1 640 pm/V	0.005	ポッケルス
PLZT	チタン酸ジルコン酸ランタン鉛	0.36 fm <sup>2</sup> /V <sup>2</sup>	0.00054	Kerr
KTN	タンタル酸ニオブ酸カリウム	10 fm <sup>2</sup> /V <sup>2</sup>	0.0152	Kerr

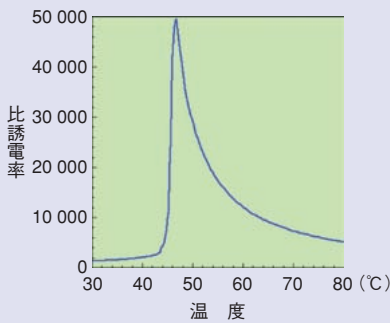


図4 比誘電率の温度依存性

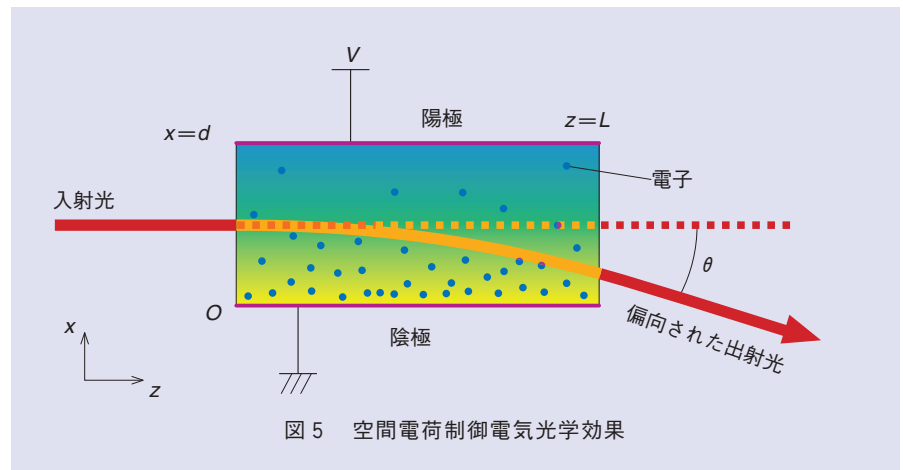


図5 空間電荷制御電気光学効果

が形成されます。(1)式から、屈折率変化は

$$\delta n(x) = -0.153 n_0^3 \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 \frac{V^2}{d^3} x \quad (3)$$

と求められ、 $x$ に比例することが分かります。すなわち、電圧を印加することによって、KTNはプリズムのように光の形状を変えず、方向のみ変化させることが分かります。

この現象は、電子移動に由来するものですから、光の方向を機械的に変えるガルバノミラー、ポリゴンミラー、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ミラーに比べて高速に動作します。

一方で、光の偏向角度 ( $\theta$ ) は、光がKTN結晶内を透過する間に蓄積され

$$\theta = L \frac{\partial n}{\partial x} = -0.153 n_0^3 \epsilon_0^2 \epsilon_r^2 \frac{V^2}{d^3} L \quad (4)$$

となり、例えば、結晶厚1 mm、長さ6 mm、誘電率30 000の平均的なKTNチップにて、 $\pm 400$  Vを印加すると、 $\pm 128$  mrad ( $=\pm 7.3^\circ$ )の範囲で光ビームを偏向させることが可能となります。この偏向角度は、電気光学プリズムだと $1^\circ$ 偏向させるのに1万ボルト近い電圧が必要な状況に比べて、非常に高効率であるといえます。

応答速度については、単パルスで1  $\mu$  秒、連続動作で100 kHzまでの動作は確認済みです。しかし、図4や(1)式で示されるように、高い電気光学効果は、高い誘電率に由来しますので、高速動作させる場合は、KTNはコンデンサとして働くことを考慮しなければなりません。例えば、通常用いている厚さ $5 \times 6 \times 1$  mm<sup>3</sup>のKTNチップの場合、コンデンサとしての容

量は比誘電率が30 000の場合、8 nFにも達します。400 Vで100 kHz動作では、2 Aの変位電流が流れることになります。共振回路が使える一定周期での動作、あるいは、頻度の低いトリガに高速に応答させる動作の場合には問題ありませんが、高速での高頻度のランダム動作を必要とするアプリケーションの場合は、電源についても考慮する必要があります。

また、ビームスキャナとして重要なパラメータである、解像点数についても考慮する必要があります。KTNでは、(4)式に示されるように、偏向角は $V^2/d^3$ に比例しますから、同じ偏向角を保つためには、結晶厚 ( $d$ ) の1.5乗に比例した電圧が必要になります。つまり、結晶厚が薄いほど印加電圧がより小さくできます。しかし、図6に示すように、解像点数は、結晶厚が薄いと不利になります。ビーム直径を $B$ 、最大偏向角を $\theta$ とし、焦点距離 $f$ のレンズをKTNから $f$ の位置に置いたとします。KTNから $2f$ の位置で、光は集光されますが、そのスポットサイズは、波長を $\lambda$ として、 $2.4 \lambda f/B$ となります。レンズの焦点位置で、KTNスキャナによって、 $2f \tan \theta$ の長さの範囲内で焦点を結ぶことができるため、その長さをスポットサイズで割った値

$$\frac{0.83B}{\lambda} \tan \theta \quad (5)$$

が解像点数となります。解像点数計算のために挿入したレンズの焦点距離とは無関係な値となります。例えば、波長532 nm、ビーム径0.25 mmにて $\pm 5^\circ$ をスキャンした場合、解像点数の理論上限は41点です(物性値を考慮した詳しい解析は本特集記事『高分解能KTN光ビームスキャナの実現』に譲ります)。

しかし、結晶の相転移温度がチップ内でも一様でない、チップ厚が薄いと変更時にビームが電極にあたってしまう、逆にチップ厚が厚いと高電圧が必要となり、分極の飽和によってビームが歪んでしまう等々の問題があり、図6で示した単純な構成では、解像点数の増大には限界があります。そこで、解像点数を増大する手段を講じていますが、本稿において、手法の1つを紹介いたします。

## 高速可変焦点レンズ

電極材料として、金 (Au) や白金 (Pt) を用いると電荷注入が抑えられ、通常の電気光学効果が発現します。電極構造の工夫によって、電圧に応じて焦点距離が変化する可変焦点レンズが

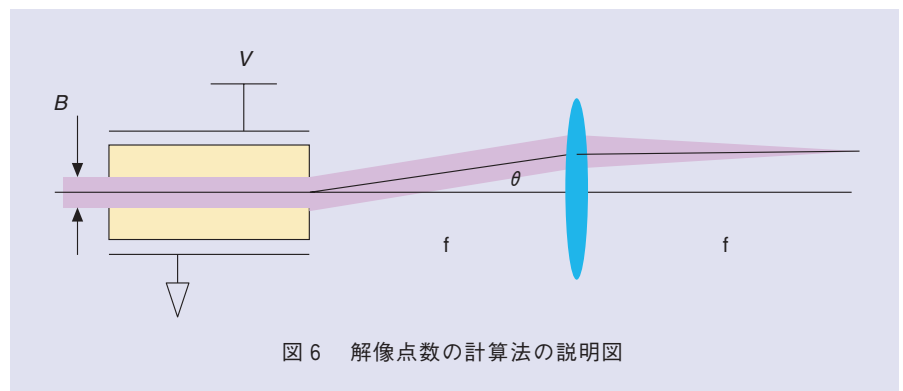


図6 解像点数の計算法の説明図

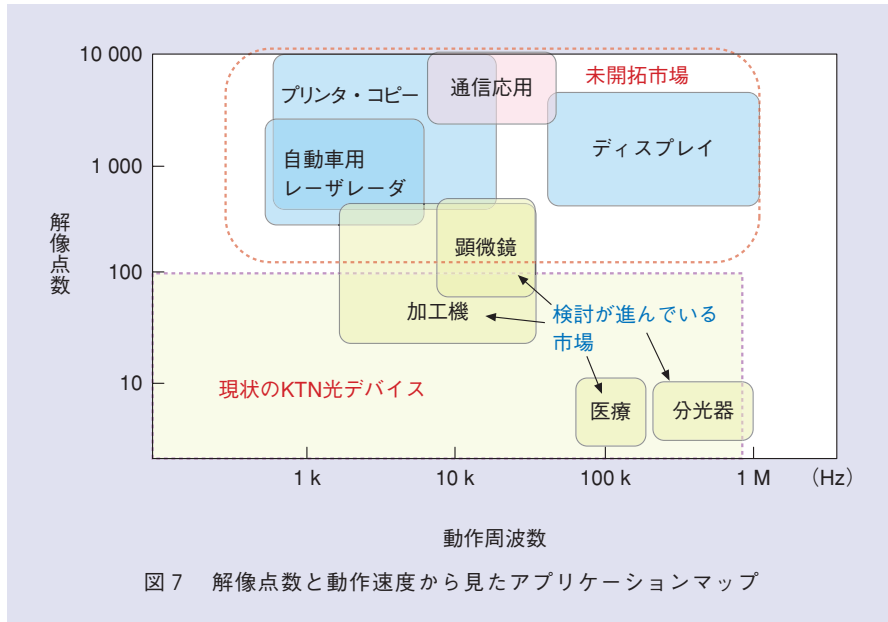


図7 解像点数と動作速度から見たアプリケーションマップ

実現可能です。市販されている可変焦点レンズの応答速度は1 m秒より遅いものですが、KTN可変焦点レンズでは、その1 000倍高速である1 μ秒の応答を確認しています。詳細は、本特集記事『KTN単結晶を用いた高速可変焦点レンズ』に譲りますが、KTNは、この可変焦点レンズの実現によって、先のビームスキャナと組み合わせると、3次元空間内で光スポットを高速に移動させられる機能を得たこととなります。

### KTNのアプリケーション

光の方向を変えるという基本的なデバイスであるため、KTNは光通信に限らず、光を扱うさまざまな分野への応用が期待できます。

解像点数と動作周波数から見たアプリケーションマップを図7に、それぞれのアプリケーションでKTNデバイスの持つ強みについては表2に示します。現在のKTNデバイスの解像点数では、市場の大きなプリンタ・コピーやディスプレイには性能的に届かず、

引き続き解像点数を増やす研究開発が必要であることが分かります。

一方、分光器や医療では、おおむね現在のKTNデバイスの性能で到達可能なレベルにあり、加工機や顕微鏡では、一部参入可能なレベルにあります。これら、参入可能な分野に関しては、引き続き速度や解像点数以外の性能、例えば、長期信頼性、ビーム品質、使用波長、入射強度耐性など、さまざまな項目について吟味を行っています。

特に、長期信頼性については、データの蓄積が少なく、劣化モードの解析は緒についたばかりです。故障時の交換・修理が簡単な用途なら問題ありませんが、厳格な長期信頼性を求められる光通信や、人命にかかわるレーザーレーダなどに向けて、早めの劣化メカニズム解析が大事です。

### 今後の展開

KTNデバイスの解像点数を増すとともに、速度や解像点数以外の、個々の製品セグメントへの適用可否判断基準となる性能について検討を進めます。

表2 各製品セグメントにおける市場性とKTNデバイスの強み

製品セグメント	市場性	KTNの強み
医療	100億円	小型
加工	20億円	高速性
分光器	20億円	低価格
顕微鏡	10億円	高速性 ランダムアクセス
レーザーレーダ	100億円	小型 静粛 ランダムアクセス
プリンタ・コピー	500億円	高速性
ディスプレイ	200億円	高速性 小型

### 参考文献

- (1) 藤浦・豊田・笹浦・今井：“高効率電気光学結晶KTNを用いた光デバイスの開発,” NTT技術ジャーナル, Vol.16, No.1, pp.56-59, 2004.
- (2) 特集：“電気光学結晶KTa<sub>1-x</sub>Nb<sub>x</sub>O<sub>3</sub>の結晶育成技術とデバイス応用,” NTT技術ジャーナル, Vol.19, No.12, pp.50-68, 2007.



八木 生剛

今からもう20年も前のことになりましたが、KTNの存在を知ったとき、その基本性能の高さに、強く惹きつけられました。そのKTNが、多くの困難を乗り越え、ようやく我々の手によって実用化されようとしている現状に興奮を覚えています。

### ◆問い合わせ先

NTTフォトニクス研究所  
 先端光デバイス研究部  
 光波制御デバイス研究G  
 TEL 046-240-2235  
 FAX 046-240-4300  
 E-mail shogo@aecl.ntt.co.jp