

高分解能KTN光ビームスキャナの実現

$\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN) を用いて、新しい原理に基づく小型・高速の光ビームスキャナを構成できます。こうしたスキャナ素子の応用範囲の拡大には、スキャン分解能の改善が必要ですが、本稿では、分解能の決定要因を明らかにし、結晶品質の制限の下で分解能を向上するために有効なマルチパス構成を紹介します。

ながぬま かずのり みやづ じゅん
 長沼 和則 / 宮津 純
 やぎ しょうご
 八木 生剛

NTTフォトニクス研究所

KTN光ビームスキャナの特長

タンタル酸ニオブ酸カリウム ($\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$: KTN) 結晶を一对の電極で挟み、電極面に並行に結晶中に光を通した状態で、電極に電圧を印加します。すると、結晶からの光線の射出方向が電圧に依存して変化することが、2006年にNTTフォトニクス研究所で見いだされました⁽¹⁾。電界により電子の進む方向を変える偏向器はよく知られていますが、KTN結晶によって、図1のように、電子の代わりに光を曲げる偏向素子、すなわち光ビームスキャ

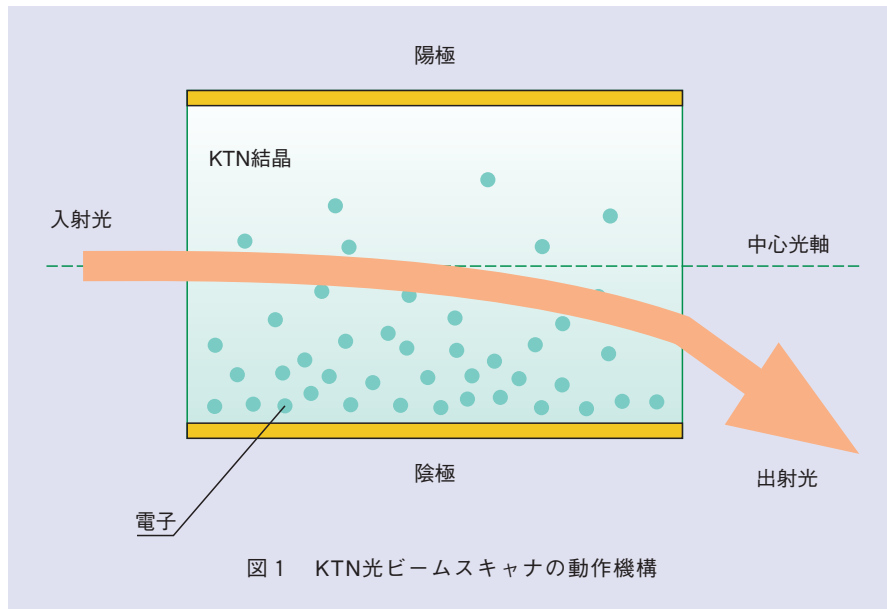
ナが実現された訳です。この現象は、電極から結晶内に電荷が注入され、生じた空間電荷によって極板間の電界が非一様となったところに、KTN結晶の持つ2次の電気光学 (EO) 効果が結びついて起きている⁽²⁾ ということが現在までに解明されています。前段の空間電荷の形成が現実的な電圧下で生じるためには、非常に大きな誘電率が必要となり、さらに、電界の分布が一樣な屈折率の傾斜に転化され、光線を曲げるためには、EO効果の次数が2次に限られるため、この空間電荷制御モードEO効果による光偏向現象は、

他の結晶では発現しがたいKTN独特のものです。

このKTN光スキャナは、EO効果に起因するため、KTN変調器⁽³⁾ において観測されているようなGHzに至る高速性が期待されます。また、光線を曲げる原因である屈折率の傾斜は、KTN結晶内の全所で発生していて、結晶内の光の伝搬経路にわたってそれが蓄積される結果、大きな偏向角が得られます。KTNスキャナは、この点で、効果が例えばプリズムの界面だけに局在した従来のEO光ビームスキャナ⁽⁴⁾ とは大きく異なるのです。

光ビームスキャナの分解能

KTNスキャナでは、光ビームが電極に挟まれた薄い結晶を通過するために、結晶厚未満にビーム直径を絞らねばなりません。このようなビームは、図2のように、回折によって、必然的に大きな拡がり角を伴います。電圧印加による偏向角の変化が、仮にこの拡がり角 $\Delta\theta$ よりも小さかったならば、元々の拡がり角に埋もれてしまって、変化は検知できないでしょう。こう考えると、全拡がり角 $2\Delta\theta$ は、光スキャナの角度刻みを与え、さらにそれで偏向角の全可変範囲 $2\theta_{\max}$ を規格化した数



N は、光スキャナで角度を区別できる点数、つまり解像点数ということになります。

偏向角範囲、あるいは拡がり角は、付加する光学系の角倍率を通じて、それぞれ増減できますが、それらの比の解像点数は不変です。したがってこの解像点数が、光スキャナの基本的な性能指標となります。KTNスキャナの解像点数として、従来20程度⁽⁵⁾を報告しました。これに対して、例えばプリンタに用いられているポリゴンミラーなどでは、ビームを絞る必要がなく、解像点数が1000を超えます。KTNスキャナは桁違いに高速という特性を持つので、必ずしも同等の解像点数を持つ必要はありませんが、より広く適用されるために、解像点数の改善が望まれることに変わりありません。

解像点数の決定要因

空間電荷制御モードEO効果による偏向現象を解析すると、最大偏向角 θ_{\max} を表す式として下記が得られます。

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} n^3 g_{11} E_{\max}^2 \epsilon^2 \frac{L}{d} \quad (1)$$

ここで、 d は電極の間隔、すなわち

結晶厚、 L は結晶長、 n 、 ϵ 、 g_{11} は、それぞれKTN結晶の屈折率、誘電率、2次電気光学係数を表します。また、 E_{\max} は結晶に掛け得る最大の電界です。空間電荷の形成下では、電界は陽極直前で平均電界 V/d の1.5倍の最大値に達するので、結晶に印加できる電圧 V は、最大 $V_{\max} = (2/3) E_{\max} d$ に制限されることとなります。

一方、波長 λ の光線において、ビームウエスト半径 w に伴われる拡がり角は、 $\Delta\theta = \lambda / (\pi w)$ で表されます。これと式(1)から、解像点数 N の具体的な表式が次のように求まります。

$$N = \frac{\pi}{2\lambda} n^3 g_{11} E_{\max}^2 \frac{w}{d} \epsilon^2 L \quad (2)$$

KTNの材料定数は、波長 $\lambda = 633$ nmにおいて屈折率 n は2.29⁽⁶⁾、2次電気光学係数は $g_{11} = 0.136 \text{ m}^4 \text{ C}^{-2}$ と報告⁽⁷⁾されています。また、印加電界の上限 E_{\max} は、経験的に600 V/mm程度です。これらを式(2)に用いると、比誘電率 ϵ_r が15000のとき、 $N = 25.7(w/d)L$ と算出されます。ここで、寸法要素 w 、 d 、および L は、単位mmで表すものとします。

さて、そもそもビームが結晶を通過

するために、ビーム直径 $2w$ が結晶厚 d を越えられないのはもちろんですが、さらに光スキャナの場合、そのビームが偏向される余地が残っていることが必要です。簡単な幾何学的考察から、解像点数 N を最大にするビーム直径は結晶厚の半分、すなわち $w/d = 1/4$ であることが分かります。結果、 $N = 6.4L$ となり、例えば、 $L = 5$ mmの結晶チップに期待できる解像点数は高々32、さらに、電極近傍でのビームの歪を避けるために、ビーム径は最適値よりも小さめに設定することを考慮すると、従来値の20という解像点数は、以上の理論的考察とよく合致するといえます。

解像点数を改善するマルチパス構成

解像点数の改善には、結晶長 L 、より正確には電界の作用する領域の長さ、を増す必要があることが分かりました。そこで今回、実際に結晶長を増すことなく、図3に示すように、結晶チップ内に複数回光を通すマルチパス構成を採用することで、解像点数の改善を試みました。

KTN結晶としては、厚さ d が1 mm、

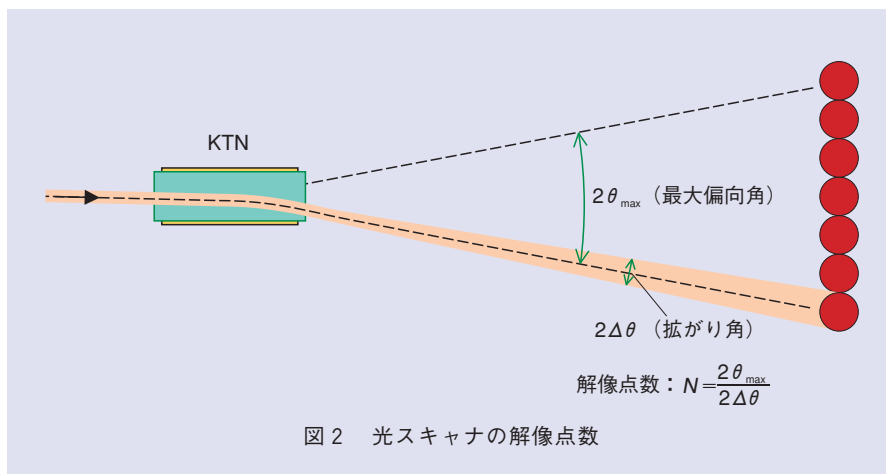


図2 光スキャナの解像点数

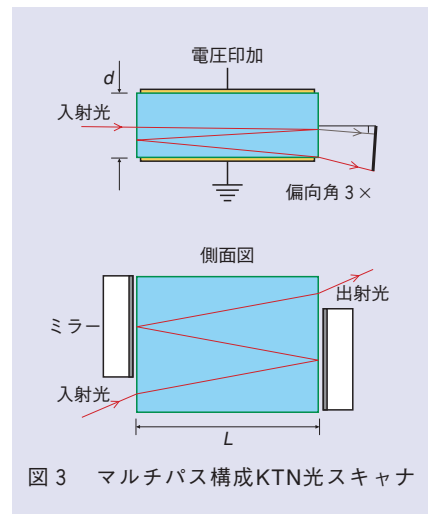


図3 マルチパス構成KTN光スキャナ

長さ L が6 mm (うち電界が掛かるのは5 mm) のチップを用いました。入射端面にはそれぞれARコートをし、端面直近に置いた外部ミラーによってチップに光を戻して、都合3パス、光を通してあります。ここで側面図から見てとれるように、入射光ビームは少し斜めにチップに入射し、チップ内を3回行き来すると初めて、出射端面でミラーのない個所に達して、出射光としてチップを離脱するのです。

このKTN チップに、波長633 nmのレーザー光をスポット直径300 μm に絞り込んだときに、出射側に置かれたスクリーン上で、印加電圧 ± 350 Vに対して得られたスキャン軌跡を図4に示します。期待したとおり、偏向角は単一パスの場合の3倍となり、軌跡の縦横比から評価される解像点数も61に改善されました。

結晶長を増さずにマルチパス構成を採った理由は、結晶の長尺化を阻む事情が2つあるからです。1つには、電極で挟まれたKTN結晶は、平行平板キャパシターを形成し、これの静電容量は結晶長に比例して増します。これは電圧を印加する駆動電源の負担を増すので、避けたいところです。もう1つの、KTN結晶に特有の事情については、さらに次項で述べます。

KTN結晶の不均一の克服

育成されたKTN結晶には、成長方向に若干の組成の勾配があります。組成の違いは相転移温度 T_c の違いをもたらすし、さらに誘電率 ϵ 、ひいては ϵ^2 に比例するKerr定数の大きな違いとなって現れ、KTN光スキャナの動作に大きな影響を与えます。ここで、チップを切り出す方位についてみると、図5に示

したように、光ビームが成長面を貫いて伝播するAカットのチップでは、偏向時にもビームパターンが良好に保たれます。これに対しBカットでは、入射端面内の組成変動によって、偏向時にビームパターンが崩れてしまいます。そのためAカットのチップが望ましいのですが、Aカットのチップでも、長手方向の組成変動により、相転移温度 T_c がずれていて誘電率 ϵ が小さく、EO効果にあまり寄与しない部分が含まれる可

能性は残ります。

これをモデル計算した例を図6に示します。Aカットのチップにおいて、長手方向の相転移温度 T_c の一様な勾配の3つのレベルに対してそれぞれ、長さ L に依存して、 $E_{\text{max}}=600$ V/mmで得られる最大偏向角を計算したものです。初期の比誘電率 ϵ_r は30 000を仮定しました。組成変動がなければ、原点での接線方向に、長さとともに直線的に増加するべきところですが、組成

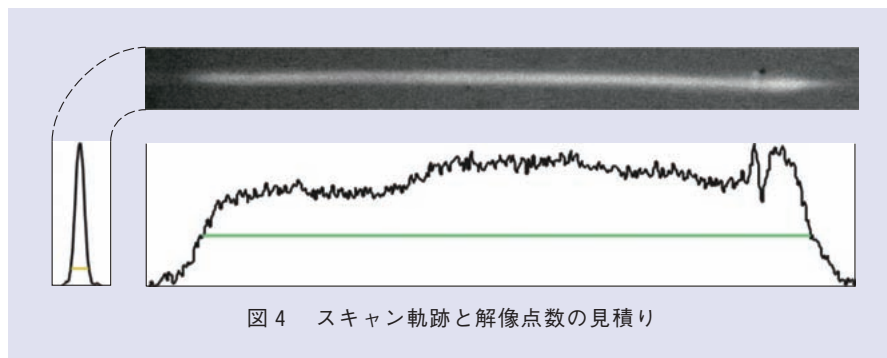


図4 スキャン軌跡と解像点数の見積り

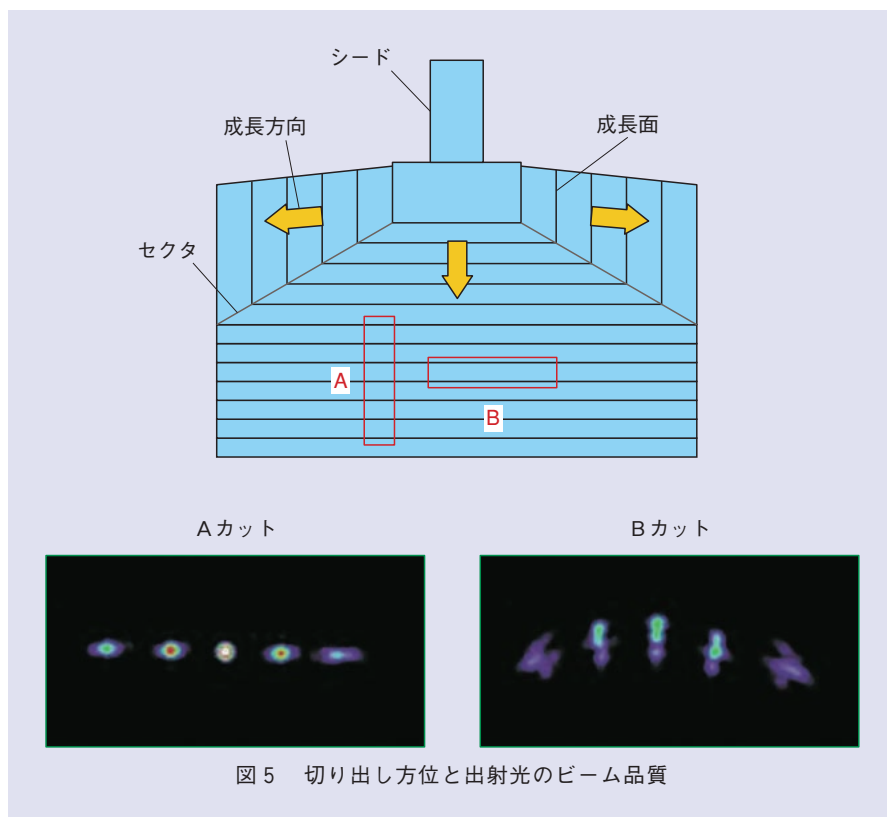


図5 切り出し方位と出射光のビーム品質

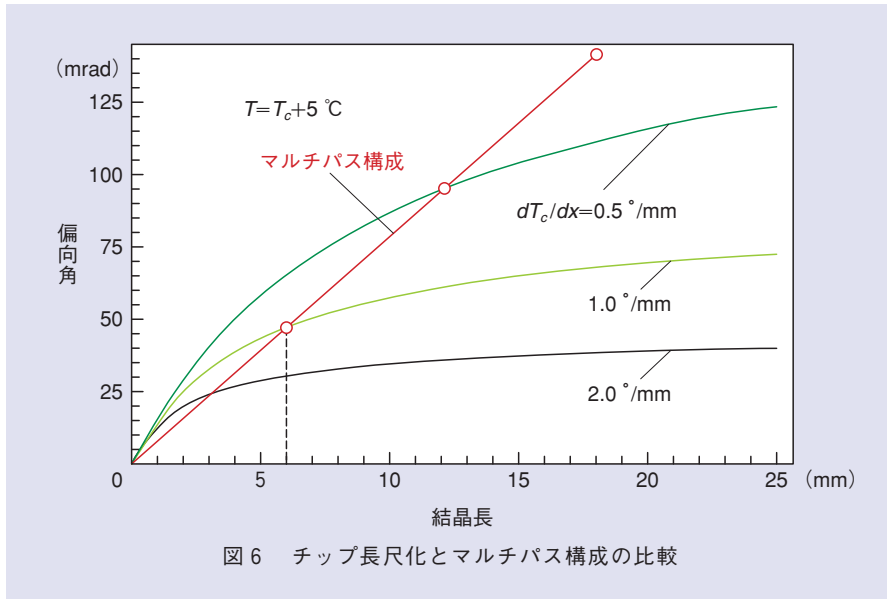


図6 チップ長尺化とマルチパス構成の比較

変動のために、長くしても効率の低い個所が増えていき、偏向角の増加は頭打ちになってしまいます。ここで例えば、 $1^\circ/\text{mm}$ の6mmのチップを用いて3パスのマルチパス構成を採れば、その6mmのチップで得られる偏向角が、直線的に3倍されます。これは、同じ品質の結晶から18mmのチップをつくるより、遥かに良い結果となっています。このように、長尺の結晶を現実用いることなくして、相互作用長を増すことができるマルチパス構成は、KTN結晶にとりわけ適した方法となっているのです。

解像点数の今後の展望

さて、マルチパス構成で結晶チップ内を行き来する回数を増せば、解像点数をいくらかでも大きくできるでしょうか？ 残念ながら、そうはなりません。なぜなら、最大偏向角には、式(1)とは別に、チップのアスペクト比による上限 $n(d-2w)/L$ があって、マルチパス構成で等価的に L を長くしていくと、かえって減ってくるこの幾何学的な上

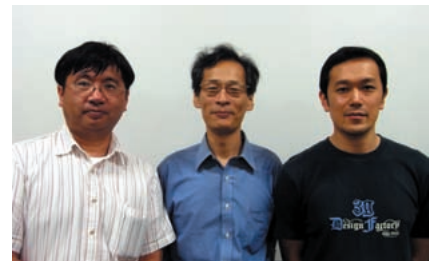
限に到達してしまうからです。実際、前述の実験で3パスを5パスに増しても、解像点数の改善はみられませんでした。

さらなる解像点数の改善には、結晶厚 d を増してこの幾何学的上限を緩くするか、または、誘電率 ϵ を高めることで長さ L 当りに得られる解像点数を増すことが必要です。特に後者は、 ϵ^2 に従う急速な改善が見込めるため、大変効果的です。例えば、比誘電率 ϵ_r が3000と倍増すれば、350以上とPOSスキャナ並みの解像点数に達するでしょう。すなわち、今後、KTN結晶の育成において、より高い組成均一性が達成されれば、解像点数の大幅な改善も可能となるのです。

参考文献

- (1) K.Nakamura, J.Miyazu, M.Sasaura, and K.Fujiura: "Wide-angle, low-voltage electro-optic beam deflection based on space-charge-controlled mode of electrical conduction in $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$," Appl. Phys. Lett., Vol.89, No.13, 131115-1-131115-3, 2006.
- (2) 中村・佐々木: "KTa_{1-x}Nb_xO₃結晶におけるKerr効果と空間電荷制御電気伝導による光ビームスキャナ," NTT技術ジャーナル, Vol.19, No.12, pp.56-59, 2007.
- (3) S. Toyoda, K. Fujiura, M. Sasaura, K. Enbutsu,

- A. Tate, M. Shimokozono, H. Fushimi, T. Imai, K. Manabe, T. Matsuura, and T. Kurihara: "Low-Driving-Voltage Electro-Optic Modulator with Novel $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ Crystal Waveguides," Jpn. J. Appl. Phys., Part 1, Vol.43, No.8B, pp.5862-5866, August 2004.
- (4) D. A. Scrymgeour, Y. Barad, V. Gopalan, K. T. Gahagan, Q. Jia, T. E. Mitchell, and J. M. Robinson: "Large-angle electro-optic laser scanner on LiTaO_3 fabricated by in situ monitoring of ferroelectric-domain micropatterning," Appl. Opt., Vol.40, No.34, pp.6236-6241, Dec. 2001.
- (5) K. Nakamura, J. Miyazu, Y. Sasaura, T. Imai, M. Sasaura, and K. Fujiura: "Space-charge-controlled electro-optic effect: Optical beam deflection by electro-optic effect and space-charge-controlled electrical conduction," J. Appl. Phys., Vol.104, No. 1, 013105-1-013105-10, 2008.
- (6) F. S. Chen, J. E. Geusic, S. K. Kurtz, J. G. Skinner, and S. H. Wemple: "Light Modulation and Beam Deflection with Potassium Tantalate-Niobate Crystals," J. Appl. Phys., Vol.37, No.1, pp.388-398, Jan. 1966.
- (7) J. E. Geusic, S. K. Kurtz, L. G. Van Uitert, and S. H. Wemple: "Electro-optic properties of some ABO_3 perovskites in the paraelectric phase," Appl. Phys. Lett., Vol.4, No.8, pp.141-143, April 1964.



(左から) 八木 生剛/ 長沼 和則/
宮津 純

今回は、狭い空間を通そうとすると広がって出てくる光の性質とどのようにして折合うかを紹介しました。他方、光が短い時間に閉じ込められると、スペクトルが広がってしまう現象もあり、このように似た性質が所を変えて幾度も現れるところに、光の面白みを感じています。

◆問い合わせ先

NTTフォトニクス研究所
先端光エレクトロニクス研究部
TEL 046-240-3239
FAX 046-240-4300
E-mail ngnm@aecl.ntt.co.jp