

KTN 高速光スキャナの光路長制御による偏向角増大

Increase in scanning angle by controlling optical length of KTN-based scanner

○豊田誠治¹ 饗場悠太² 上野雅浩¹ 佐々木雄三¹ 坂本尊¹ 小林潤也¹ 阪本匡¹
○Seiji Toyoda Yuta Aiba Masahiro Ueno Yuzo Sasaki Takashi Sakamoto Junya Kobayashi Tadashi Sakamoto

1 日本電信電話株式会社 NTT デバイスイノベーションセンタ

NTT Device Innovation Center, NTT Corporation

2 東京工業大学院 理工学研究科

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology

E-mail:toyoda.seiji@lab.ntt.co.jp

1. 緒言

優れた電気光学効果を有する $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ (KTN)結晶を用いた光スキャナは、ガルバノミラーなどの機械駆動型光スキャナより高速な光スキャナとして注目されている。我々はこれまで KTN 光スキャナの特性向上を行い、チップ小型化による高速化、タンデム接合による偏波無依存化、光路折り返し構成による偏向角広角化を実現し、応用領域を拡大してきた。応用例の一つとして、200 kHz の掃引速度を有する広帯域波長掃引光源を実現し、3 次元生体イメージング用光源(OCT 光源)として実用化された[1]。OCT システムにおいては、測定深達度と空間分解能を同時に満足する必要があり、広角な偏向角を有する KTN 光スキャナの実現が要求される。最初 DC を印加し注入された電荷に起因した電界形成する残留屈折率分布に対し AC を印加し偏向動作が実現され、偏向角は下式で近似できる[2]。

$$\theta = -n_0^3 g_{11} \rho L \varepsilon \frac{V}{d} \quad (1)$$

(n_0 :電圧印加前屈折率、 L :光路長、 g_{11} :電気光学定数、 ε :誘電率、 ρ :残留電荷、 V :印加電圧、 d :結晶厚)

式1は近軸近似が成り立つ前提で導出したものであるが、今回、より詳細な光学モデルに基き、光路長を制御した KTN 光スキャナの偏向角を評価したので報告する。

2. 偏向モデル

図1(a)に KTN 光スキャナの構造を示す。結晶厚方向(以後x軸)にDC電圧を印加した後の残留電荷はxに比例する電界(E)を与えるため、立方晶KTNにおいては図1(b)に示すように電界の2乗(xの2乗)に比例した屈折率分布が生じる。特に入力偏波が電界に平行な場合大きな屈折率分布が生じる。

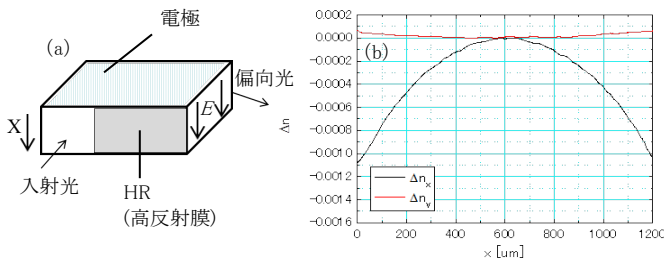


図1 (a) KTN 光スキャナの構造 (b) 残留電荷による結晶厚方向の屈折率変化(Δn_x は電界//偏波、 Δn_y は電界⊥偏波)

従って、電圧印加後の KTN 結晶の屈折率分布は GRIN レンズと同等で、屈折率分布および光線行列は結晶中心を原点とした時下式で与えられる。ただし、 $A_0 = n_0^2 g_{11} \rho^2$ である。

$$n(x) = n_0 \{1 - (1/2) n_0^2 g_{11}^2 \rho^2 [x + (\varepsilon/\rho) \cdot (V/d)]^2\} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\sqrt{A_0}L) & (1/n_0\sqrt{A_0})\sin(\sqrt{A_0}L) \\ -n_0\sqrt{A_0}\sin(\sqrt{A_0}L) & \cos(\sqrt{A_0}L) \end{bmatrix} \quad (3)$$

KTN 結晶にVの電圧を印加した場合、式2によれば、レンズの中心が $(\varepsilon/\rho) \cdot (V/d)$ だけずれることに相当し、 $x=0$ となる位置に光を垂直入射し、電圧Vを印加した時の入射光の状態を表すベクトルは下式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} (\varepsilon/\rho) \cdot (V/d) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

従って、交流電界を印加した場合、peak to peak の電圧差を ΔV とすれば偏向角 θ は下式で与えられる。

$$\theta = -n_0^2 \sqrt{g_{11} \varepsilon} (\Delta V/d) \sin(n_0 \sqrt{g_{11} \rho} L) \quad (5)$$

3. 実験および結果

同一の KTN スキャナに対し入射角度を変え内部反射型の3パス、5パス、7パスの光路を構成し、印加電圧 $\Delta V=400V$ 、入射波長 $1.3 \mu\text{m}$ 、印加電圧周波数が 200 kHz にて偏向角を測定した。図2に図1(a)を電極方向から見た時の各光路の様子を示す。チップ面積は、 $3.2 \times 4 \text{ mm}^2$ で、光路長は3パスが 12.2 mm、5パスが 20.1 mm、7パスが 28.0 mm となった。

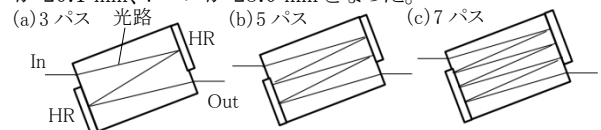


図2 KTN光スキャナの折り返し構成(偏向方向は紙面垂直)

なお、実験に用いた KTN 結晶では、 $n_0=2.18$ 、 $g_{11}=0.11 \text{ m}^4/\text{C}^2$ 、 $\rho=75 \text{ C/m}^3$ であった。図3に測定結果および式1、式5に基づく偏向角の様子を示す。測定値はレンズ効果を考慮した式5で説明でき、光路長を伸長しても偏向角増大には限界があることが確認できた。

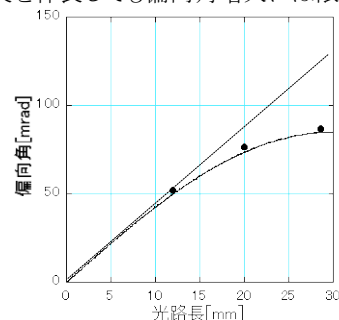


図3 偏向角の光路長依存性

(黒丸は実測値、実線は式5、点線は式1に基づく偏向角)

4. まとめ

今回我々は折り返し数を増やし光路長を制御した KTN 光スキャナの偏向角特性を調べた。実験で得られた偏向角は GRIN レンズ効果を考慮したモデルで解釈でき、偏向角は光路長に対して飽和することが分かった。

参考文献

- [1] Y. Okabe et al, '200 kHz swept light source equipped with KTN deflector for optical coherence tomography', Electron. Lett., 2012, 48, pp. 201-202.
- [2] J. Miyazu et al, 'New beam scanning model for high-speed operation using $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$ crystals', Appl. Phys. Exp. 2011, 4, pp.111501-1-3.