



高効率電気光学結晶KTNを用いた光デバイスの開発

NTTフォトニクス研究所

あひうら かずお とよだ せいじ ささうら まさひろ いまい ただゆき
藤浦 和夫 / 豊田 誠治 / 笹浦 正弘 / 今井 欽之

電気光学効果を用いた光デバイスは、光通信システムにおいて、電気信号を光信号に変換する光変調器などに使用されています。NTTフォトニクス研究所で開発を進めている世界最大の電気光学効果を持つ結晶材料と、その材料を用いた光デバイスの最近の進展や今後の展開について解説します。

電気光学効果と光デバイス

電気光学効果とは、材料に電界を加えることにより屈折率が変化する現象であり、これまで数多くの電気光学効果を持つ材料が研究されてきました。主に強誘電体と呼ばれる酸化水素結晶がその中心であり、中でもLiNbO₃は携帯電話に用いられる表面弾性波フィルタや、長距離伝送用の光変調器に幅広く用いられています。そのほかにも研究された材料はありますが、作製可能な結晶の大きさや電気光学効果の大きさが不十分であり、LiNbO₃以外に実用になっていくものは多くありません。

特に光通信分野では、近年、基幹ネットワークの大容量化は一段落し、メトロやアクセス系ネットワークの大容量化・高機能化を目的とした開発が進展しています。このために必要となる光変調器や光スイッチについてもLiNbO₃光デバイスが候補となりますが、小型化と動作電圧の低減が課題となっています。このデバイスのサイズや駆動電圧は材料の電気光学効果の大きさによって決まっています。したがって、この課題を解決するためには、従来の電気光学結晶LiNbO₃の効率を上回る新たな材料の開発が必須です。

KTN結晶

KTN (KTa_{1-x}Nb_xO₃) 結晶とは、カリウム、タンタル、ニオブと酸素からなる透明な光学結晶であり、1950年代に初めて合成されました⁽¹⁾。この結晶は、立方晶という結晶構造を持ち、光学的異方性^{*}がないこと、熱や水に対して安定であるという特徴を持っています。材料の電気光学効果には、加えた電界に屈折率変化が比例する1次の電気光学効果（Pockels effect：ポッケルス効果）と、加えた電界の二乗に屈折率変化が比例する2次の電気光学効果（Kerr effect：カー効果）があります。KTN結晶は2次の電気光学効果が極めて大きい材料であることが知られて

いました。しかし、結晶成長が難しく、十分な性能評価ができず、実用的な光デバイス材料とは考えられていませんでした。

NTTフォトニクス研究所では、「KTNの大型結晶作製には温度の精密制御が重要である」ことを見出したことにより、光デバイスが作製可能な40 mm角という実用的な大きさを持つ結晶の作製に成功しました。

KTN結晶の構造を図1に、作製したKTN結晶の写真を図2に示します。

今回作製したKTN結晶の電気光学効果の評価のために、電圧を加え結晶の屈折率変化を測定しました。その結

* 光学的異方性：結晶軸の方向によって屈折率が異なる性質。

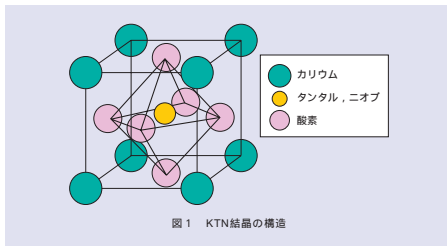


図1 KTN結晶の構造

果を従来材料であるLiNbO₃と比較したものを図3に示します。図のように、KTN結晶はLiNbO₃に比べて大きい屈折率変化を示しており、電界の二乗に屈折率変化が比例する傾向を示しています。一方、LiNbO₃は電界に屈折率変化が比例しています。このため、加える電界が大きくなるにつれKTN結晶の屈折率変化はLiNbO₃に比べて大きくなり、このグラフの傾きで表される電気光学係数は、60 V/mm以上の電界で、LiNbO₃の持つ電気光学係数の20倍となる600 pm/Vを示し、100 V/mmでは1000 pm/Vに達しています。

今回作製したKTN結晶を従来の電気光学結晶と比較したものを図4に示します。この図で明らかのように、電気光学効果が十分に大きく、実用的な結晶サイズが実現できていることが分かります。

光導波路の作製

作製した結晶を基板に用い、その上にKTN結晶膜をLPE法（Liquid Phase Epitaxy：液相エピタキシー）により成長する技術を確立しました。

今回光導波路の作製に用いたプロセスを図5に示します。

LPE法とは溶液に基板を浸し、基板の上に所望の結晶膜を成長させる方法です。欠陥の少ない高品質な結晶膜を、高い成長速度で作製できることが特徴です。今回基板表面の温度変動を抑制し、結晶膜の成長速度を精密に制御することが可能になりました。その結果、光導波路に必要な5～10 μm厚の高品質な結晶膜を精度良く作製することができました。さらにドライエッチング技術との組み合わせにより、コアとなる結晶膜をリッジ形状に加工し、再度、LPE法で上部のクラッド層を形成することにより、埋め込み型の光導波路を作製しました。

作製した光導波路断面の顕微鏡写真を図6に示します。

写真の中央部に明るく見えているのは、光が伝搬するコアになります。この導波路は、基板に対する光の2つの偏

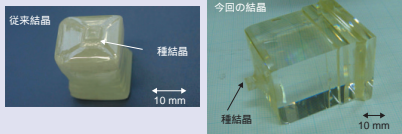


図2 作製したKTN結晶

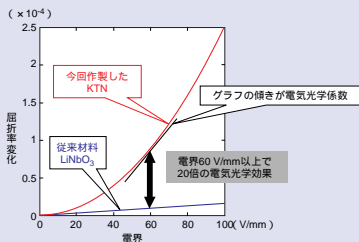
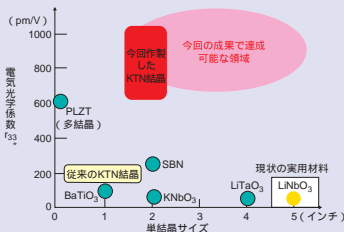


図3 KTN結晶の電気光学効果



* KTN結晶は、電界100 V/mmを印加した際の電気光学係数として換算

図4 KTN結晶と他の電気光学結晶の比較

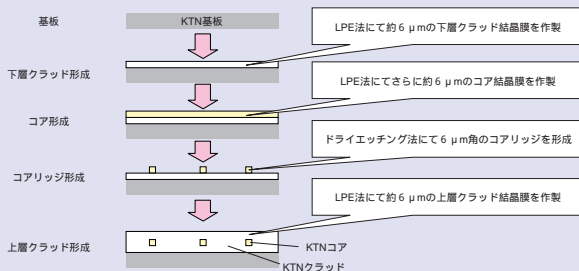


図5 KTN光導波路の作製プロセス

光，TEおよびTMモードに対して単一モード導波路として機能することを確認しました。

また光の透過損失が0.5 dB/cm以下という低損失な光導波路を実現しました。この技術により、所望の光回路を構成することが可能になりました。

光スイッチへの応用

KTN結晶の高い性能指数を光デバイスで実証することを目的とし、マッハツェンダ干渉計型光スイッチを作製しました。

作製した光スイッチの構成を図7に示します。

マッハツェンダ干渉計はKTN結晶導波路と石英ガラス導波路の方向性結合器で構成しています。干渉とは、2つの光の波が同一点で重なり合って互いに強め合う、あるいは弱め合う現象です。マッハツェンダ干渉計は、1つの光を分岐し、分岐した2つの光を再合成することで、光の干渉を起こす装置です。分岐した2つの光の光路差を変化させることにより、再合成した光の強度を変化させることができます。今回の光スイッチでは、分岐した光が2本のKTN結晶導波路を伝搬し、再度、石英ガラス導波路の方向性結合器で合成されます。

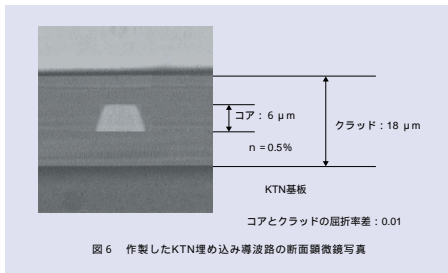


図6 作製したKTN埋め込み導波路の断面顕微鏡写真

2本あるKTN結晶導波路の片方だけに搭載した電極に電界が印加されると片方の導波路の屈折率が変化します。その結果、2つの導波路伝搬する光に位相差が生じ、再合成した際に出力ポートが切り替わり、光スイッチとして動作します。作製した光スイッチの特性を測定したところ、1.3 Vで光路が切り替わることを確認しました。従来の光スイッチは10～50 V^{(2),(3)}の電圧を必要とし、KTN光スイッチは、従来の約10分の1の電圧で動作することが確認できました。また光はその進行方向に垂直な面内で互いに直角の方向に振動する2つの

光の成分TEおよびTMモードに分けることができます。一般に光導波路では、基板の垂直方向と水平方向の光学的性質がわずかに異なるために、その性能が偏光によって異なる現象が起こります。特に電気光学結晶では、結晶の方位によって光学特性が大きく異なるため、電気光学結晶を用いた光デバイスでは2つの偏光で性能が大きく異なり、その克服が大きな課題でした。今回KTN結晶は光学的異方性がないという特徴を利用し、光スイッチにとって必須である偏光に依存しないスイッチ動作を実現し、偏光無依存の光スイッチとして最小の駆

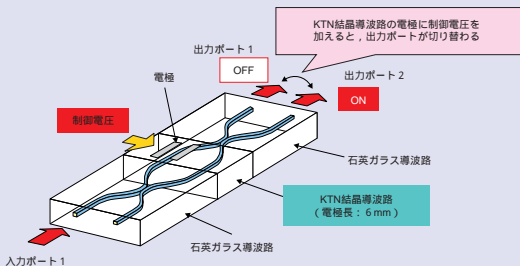


図7 KTN 光スイッチのイメージ図

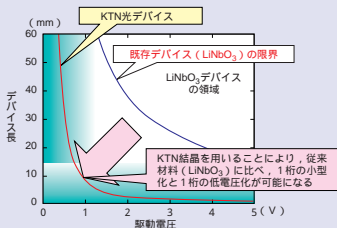


図8 既存光デバイスとKTN光デバイスの性能比較

動電圧を達成しました。

KTN結晶のポテンシャルと今後の展開

今回作製したKTN結晶の特性から予測される光デバイスの性能を従来の光デバイスと比較した結果を図8に示します。図のようにKTN結晶を用いることにより、従来の LiNbO_3 光デバイスの駆動電圧やサイズを1桁改善できることが分かります。またサイズや駆動電圧の改善は、KTN結晶が持つ多くの性能の一部を利用したに過ぎず、さらに多くの機

能を発現できると期待されます。今後は高機能光信号処理デバイスの実現に向け、大型結晶の育成や大規模な光回路作製を進め、KTN結晶が持つ極めて大きい電気光学効果の有効性を実証していきます。

参考文献

- (1) S. Triebwasser: "Study of ferroelectric transitions of solid-solution single crystals of $\text{KNbO}_3\text{-KTaO}_3$," Phys. Rev., Vol.114, No.1, pp.63-70, 1959.
- (2) A. Chen, R.W.Irvin, E. J. Murphy and R. Grecnvcich: "High performance LiNbO_3 switches for multiwavelength optical

networks," OSA TOPS Vol.32 Photonics in Switching, pp.163-167, 2000.

- (3) K. Nashimoto, H. Moriyama, S. Nakamura, E. Osakabe and K. Haga: "PLZT electro-optic waveguides and switches," Tech. Digest of OFC 2001, paper PD10, 2001.



(左から) 藤浦 和夫 / 豊田 誠治 / 笹浦 正弘 / 今井 欽之

技術の革新には新たな材料の開発が重要です。今後は、KTN結晶の可能性を追求するとともに、革新的な光デバイスの開発へ取り組みます。

問い合わせ先

NTTフォトニクス研究所
複合光デバイス研究部
TEL 046-240-4531
E-mail fujiura@aecl.ntt.co.jp