分極反転を用いた電気光学デバイスによるレーザー光制御

森本 朗裕, 和田 泰輔

立命館大学 理工学部電子光情報工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Laser Beam Control by Electro-Optic Devices Using Polarization Reversal

Akihiro MORIMOTO and Taisuke WADA

Department of Photonics, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University,
1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577

(Received December 11, 2003)

Polarization reversal of an electro-optic crystal makes spatial control of the modulation polarity in the crystal. Electro-optic modulators using polarization reversal have remarkable features of spatial modulation suitable especially for microwave modulation. This paper reviews electro-optic devices with polarization reversal. An electro-optic modulator with periodic polarization reversal is an efficient phase modulator in microwave frequency regions with quasi-velocity-matching, which is useful not only in modulators but also spectral comb generators and coherence controllers. An electro-optic deflector with slant polarization reversal in a beam diameter is a typical application. Novel electro-optic devices are possible with this technique.

Key Words: Polarization reversal, Domain inversion, Electro-optic devices, Laser beam control, Ultrafast

1. はじめに

光の周波数は数百THzからPHzの領域にあり、きわめて広帯域である。また、それと同時に、光波の波長はサブマイクロメートルからナノメートルの領域にあり、短波長性に起因する空間並列性がある。このような光波の持つ広帯域性、高速性と空間並列性を相互に有効に利用することが、光制御において重要な課題である¹⁾。

強誘電結晶の分極反転は、非線形光学素子としての応用だけでなく、こうした光制御用電気光学デバイス分野での利用も期待できる。多くの電気光学結晶は強誘電結晶であり、分極反転によれば電気光学係数の符号を一つの素子内で自在に制御することができ、結晶を通過する光波に対してさまざまな光制御が実現できるのである。特に、空間的に変調の符号が制御できることから、空間光制御素子の新しい作成法として注目されている²⁾。電気光学素子は動作波長領域が半導体素子と比べてきわめて広く、また超高速動作が可能であるため、広帯域な光周波数分離・制御素子や、さまざまな極限光制御デバイスへの利用が期待されている。

以上のような観点から、分極反転を用いた超高速光制御のための光変調器、光空間変調器の開発が近年精力的に進められているが、ここではその概要について報告する。

2. 分極反転光空間変調器

よく知られているように、強誘電結晶は強い電界を印加するなどによってその結晶軸の向きが反転する。これが分極反転である。LiNbO₃やLiTaO₃などの電気光学結晶も強誘電結晶であり、強い電界印加によって結晶軸の向きが反転する。ただし、この電界は通常のLiTaO₃では22 kV/mmにもおよび、結晶の放電破壊電界に近い。

電気光学結晶の+z面にパターン電極を形成し、-z面を一樣な接地電極として電界を印加すると、+z面から分極反転が進行してパターン電極形状の分極反転が結晶内に形成される。これによって電気光学効果の符号が場所的に異なる結晶を作成することができる。分極反転後に結晶両面に一樣な変調電極を形成して一樣電界を印加したとき、結晶を通過する光波の波面は、光波が通過する方向に反転電極形状のレプリカとなる。このため、分極反転を利用することによって、任意の空間光変調器が作成できるようになった。

なお分極反転後の結晶中には、5 kV/mm程度の電界が分極反転壁周辺を中心に残留する³⁾。これが結晶の電気光学効果を介して複屈折効果をもたらすため、透過波面が歪んでしまい、そのままでは光空間変調素子として使うことはできない。熱アニール等によって、この残留電界による波面歪みを解消することが必要である。

2.1 電気光学偏向器

最も簡単な光空間変調器は電気光学偏向器である。電気光学偏向器は通常の光エレクトロニクスの教科書にも記載されるなど、古くから知られていた⁴⁾。しかし従来、それを作成するには高度な結晶研磨技術が必要であり、実用化は困難であった。しかし、分極反転技術によって作成が可能となり、いくつかの報告と商品化がされるようになった^{3,5)}。

分極反転を用いた電気光学偏向器の例をFig. 1に示す。電気光学結晶の $+z$ 面に光通過面に対して傾いた、三角形の電極を形成して分極反転を行う。変調時にはこの結晶全体に一樣な電界を印加するが、このとき反転部の屈折率が増加したとすると非反転部の屈折率は減少する。そのため反転部と非反転部との界面で光ビームの屈折が起こり、光ビームが偏向される。印加電圧に対する偏向特性の一例をFig. 2に示すが、偏向角は印加電圧に比例しており、理論とよい一致を示している。

電気光学偏向器の能率は、遠視野でビームを1スポット分だけ移動させるのに必要な電圧で記述される。光偏向器の出射面では光波面が印加電界に比例して傾くが、光波の進行方向(偏向方向)はこの波面に垂直であり、素子を通過する光ビームの大きさにはよらない。しかし光ビームの広がり角はビーム径に比例するため、最大光偏向角とこのビーム広がり角の比が分解可能スポット数となる。効率よく光偏向器を動作させるには素子幅全体に光ビームを通過させる必要がある。このとき1スポット分だけ光ビームが偏向するのは、素子断面内での最大光路差が半波長となるときのである。これは通常電気光学変調

Fig. 1 Electro-optic deflector with polarization reversal.

Fig. 2 Deflection characteristics of the electro-optic deflector.

器における半波長電圧と同じであり、バルク素子では一般に数十ボルトから数百ボルトになる。これらの電気光学偏向器で分解可能なスポット数は数十から百程度となる。

動作周波数は電極の静電容量によって制限されるが、数十MHz程度以上まで可能であり、光ビームの分配やスイッチとしての応用が期待される⁶⁾。

2.2 電気光学波面制御器

電気光学偏向器は光波面の一次空間制御であったが、これは分極反転形状に依存することから、任意の光波面制御も可能である。Fig. 3は直線、放物線、および3次曲線の波面制御部を一つの電気光学素子に形成したものである⁷⁾。分極反転部ごとに、電気光学偏向器、電気光学レンズ、3次歪補正器であり、波面の級数展開による一次元任意波面制御器となっている。各々の素子の動作も理論通りであることが確認されている。電気光学レンズでは、口径数ミリメートルの場合、キロボルトあたり数ジオプターのシリンドリカルレンズとなっている。

分極反転が結晶中で一様に進行することからこうした素子の動作は基本的に一次元であり、真の任意波面制御である二次元動作には二素子を組み合わせるなどの工夫が必要である。

2.3 電気光学位相格子

周期的な分極反転を用いると位相格子形光変調器が実現できる⁸⁾。Fig. 4に示す素子は電気光学結晶に周期的な分極反転を施したものであるが、電圧印加によって透過ビームに対して回折格子(位相格子)となる。先の電気光学偏向器とは異なって電圧印加によって偏向角を制御することはできないが、比較的大きな角度に光ビームのスイッチングを行うことができる。スイッチに必要な電圧

Fig. 3 Electro-optic wave front controller. Three electrodes correspond to a deflector, a lens, and an aberration corrector.

Fig. 4 Electro-optic phase grating with periodic polarization reversal.

は通常の光変調器における半波長電圧と同じである。

電気光学位相格子ではブラッグ回折によって光ビームの切り替え機能を実現することができるが、そのためには分極反転を数十マイクロメートルと短い周期のものにしなければならない。分極反転周期がそれよりも長い場合にはラマン・ナス回折状態になり、一つの回折ビームに対して100%の回折効率を得ることはできない。ラマン・ナス回折の場合には、0次回折光を用いた強度変調器としての利用が考えられる。

3. 擬似速度整合形電気光学変調器

ギガヘルツ領域の高速電気光学変調器を作成する場合、その帯域を制限する最も大きな要素は、光波とマイクロ波の速度非整合である。通常の電気光学結晶中では、光波はマイクロ波よりも数倍速く進むため、変調電気信号であるマイクロ波を光波が追い越してしまい、同じ位相のマイクロ波と光波が相互作用を続けることができなくなってしまう。これが速度非整合であり、進行波光変調器構成において相互作用長を制限し、変調能率が限られたものとなる原因になっている。これは非線形光学結晶による波長変換において問題となる位相不整合と同様である。

いま結晶中の光波の速度(群速度)を v_g 、マイクロ波の速度(位相速度)を v_m 、変調周波数を f_m とすると、

$$L = \frac{1}{2f_m(1/v_m - 1/v_g)} \quad (1)$$

なる距離 L だけ光波が進行すると、マイクロ波を半周期分だけ追い越すため、これ以上相互作用を続けても逆に変調は打ち消されて小さくなる。 LiNbO_3 や LiTaO_3 といった電気光学結晶では、10 GHz以上のマイクロ波周波数になるとこの距離は数ミリメートルになり、効率の高いマイクロ波光変調器を設計することを困難にしている。

そこでこの L ごとに結晶軸を反転させておけば、Fig. 5に示すように変調はいつまでも打ち消されことなく伝搬にともなって増大することになる。これが擬似速度整合であり、非線形波長変換素子における擬似位相整合と同じ原理である。擬似速度整合では、Fig. 5からもわかるように、速度整合が完全である場合に対して変調指数は $2/\pi$ に低下するものの、ほぼ相互作用長に比例している。これを用いると、特定のマイクロ波周波数で極めて大きな変調能率を有する電気光学変調器を設計することが可能となる。

Fig. 6は擬似速度整合形マイクロ波光学変調器の外形を示している。 LiTaO_3 結晶に周期分極反転を施し、17 GHzで動作する共振電極をマイクロストリップ線路によって形成している。この変調器は極めて大きなマイクロ波位相変調を光波に印加することができるが、それによる光サイドバンド広がりには3 THzにおよぶものが報告されている⁹⁾。

このような大振幅位相変調はフェムト秒光パルス生成やフェムト秒光波形整形に応用できる他、超高速光パル

Fig. 5 Microwave modulation indices as a function of interaction length.

Fig. 6 Quasi-velocity-matched electro-optic phase modulator with periodic polarization reversal.

スのコヒーレンス制御にも有効であり、核融合用レーザーのビーム形状改善にも利用されている¹⁰⁾。

周期分極反転では特定の一つの周波数でのみ変調効率が高かった。しかし、非周期の分極反転を用いればマイクロ波変調帯域の制御も可能であり、広帯域化等が可能である。これはRadio-on-fiber用の高効率光変調器等として期待される。

4. 進行波位相格子形光変調器

周期分極反転による擬似速度整合形光位相変調器の変調特性においては、Fig. 5に示すように光波の進行にともなって特定の周波数でのみ変調が積算されるが、周期分極反転の空間位相も最終的な位相変調に影響する。このときマイクロ波光変調の位相は、周期分極反転の空間位相に比例して変化するという特徴がある。これはマイクロ波変調の位相を分極反転によって空間的に制御できるということを表している。例えば同じマイクロ波変調信号と同じ電極を用いても、周期分極反転の空間位相を1/4波長ずらすことによって、 $\sin$ の変調と $\cos$ のマイクロ波変調を行う変調素子を作り分けることができるのである。

この特性を用いた素子にFig. 7に示す進行波位相格子形光変調器がある¹¹⁾。斜めの周期分極反転を用いて進行波形のマイクロ波変調を行うが、光およびマイクロ波の相互作用方向には先の擬似速度整合形電気光学変調器と

Fig. 7 Travelling phase grating with slant periodic polarization reversal.

なっている。ただし光ビーム断面内で擬似速度整合の空間位相が直線的に変化していることから、マイクロ波変調の位相も電極の断面内で直線状に変化したものとなる。このため、素子出力断面での波面は正弦波状となり、時間とともに進行する。つまり進行波位相格子になる¹²⁾。これは音響光学変調器によるものと同様の動作であるが、音響光学変調器では動作周波数は数百MHzであるのに対し、この電気光学素子ではマイクロ波領域で動作が実現できる。

Fig. 8はこの素子による回折スポットの実験結果を示している。これは分極反転周期が比較的大きい場合の結果であり、マイクロ波変調によってラマン・ナス回折が起こり、複数の回折スポットが現れている。隣接スポット間では、光周波数の差はそれぞれ変調周波数である17 GHzだけ離れている。この素子は光周波数生成と空間分散の双方を兼ね備えており、空間内に分散された光周波数コム生成器となっている。

これらの空間分散された光はラマン・ナス回折の原理に基づいているため、それぞれの振幅は n 次のベッセル関数 $J_n(\Delta\theta)$ で与えられ、互いにコヒーレントである¹³⁾。これらの位相は互いに0か π かであるので、空間内に二値の位相マスクを配置することによって、全てを同位相に調整することができる。これは周波数合成による超短光パルス発生を空間的に行ったものと考えることができ、このとき遠視野での光ビームは一方向に超高速で走査される²⁾。そのような超高速光走査実験結果および計算例をFig. 9に示す¹⁴⁾。このような光ビームは超高速光制御に有用であり、超高速光分配やシリアル・パラレル変換に有用と考えられている。

分極反転周期をさらに微細にすれば、ブラッグ領域にすることもできるが、このときは回折スポットは一つだけとなり、光周波数シフタとして機能する。このとき、変調に必要な電圧は通常の光変調器の半波長電圧と同じになる。この原理による10 GHz領域のマイクロ波光周波

Fig. 8 Diffraction pattern of the travelling phase grating.

Fig. 9 Ultrafast laser beam scanner with the phase grating and spatial phase control.

数シフタが報告されている¹⁵⁾。

5. その他の空間変調素子

周期分極反転を用いた擬似速度整合形電気光学変調器では、マイクロ波変調の位相を反転の空間位相で制御できたが、変調振幅を空間的に制御することもできる。Fig. 5に示したように擬似速度整合形電気光学変調器の変調能率は増大するのであるから、反転周期内で L ごとに反転部と非反転部のデューティー比を制御すればマイクロ波変調を空間的に制御することができる¹⁶⁾。これによって定在波位相格子形マイクロ波変調器が報告されているが、マイクロ波領域の超高速光ゲートとして動作する。レーザーのモード同期には定在波形の音響光学変調器を用いることが多いが、そうした変調器のマイクロ波版として動作する。

擬似速度整合により変調振幅および変調位相が自在に制御できることは、マイクロ波領域でも任意波面生成器が実現できるということを表している。マイクロ波変調によって、ある波面からもう一つの波面へと周期的に変化させることができ、この波面形状を分極反転で任意に設計できる。

6. 分極反転を利用した導波形素子

分極反転の利用は導波形光変調器においても有用である。導波形にすることによって変調電圧の低減を図ることができ、光通信分野において有用な素子となるからである。周期分極反転による擬似速度整合は導波形光変調器でも有効であり、チャネル導波路を用いたものも実現されている¹⁷⁾。導波形では空間光変調器としての利用は困難であるが、複数の光導波路に異なる変調特性を与えることにより類似の機能を実現できる。例えば擬似速度整合の空間位相を利用して、二つの導波路にsin変調とcos

変調を行い、SSB変調が実現できることも最近報告されている¹⁸⁾。

以前よりバルク形電気光学変調では、結晶の方向を反転させて温度その他の特性安定化を図ることが行われてきた。分極反転によって導波形光変調器においてもこれらの手法が使えるようになり、温度安定化やチャープ補償などが報告されている¹⁹⁾。今後様々な応用が期待される。

7. むすび

分極反転を用いた電気光学デバイスについて報告した。分極反転により電気光学結晶の一部分だけの変調符号を反転させることができるようになり、従来は複数の結晶を組み合わせて実現していた光変調器の機能が一つの結晶だけを用いて容易に実現できるようになった。また理論的にはわかっているが、研磨技術のために実現できなかった空間変調器としての機能も現実のものとなった。これらはバルク形光変調器だけでなく、導波形光変調器にとってもきわめて有用であると考えられる。

周期分極反転を利用したマイクロ波光変調素子では、その変調度および変調の位相を自在に制御することができるため、様々な機能を実現できることを示した。空間変調器および集積化導波形光変調器として、新しい機能が期待できる。

分極反転を実現するには放電破壊電圧に近い比較的大きな電界が必要であった。定比組成結晶ではこの分極反転電界が一致溶融組成の場合の10分の1以下であり、素子の作成が容易となることが知られている。しかしながら、電気光学素子では変調に比較的大きな電界を必要とするため、分極反転電界が印加可能最大電界となると機能が限られたものとなる恐れがある。定比組成結晶のマイクロ波変調器への応用や、定比組成と一致溶融組成の中間状態にある結晶の利用が今後の課題である。

こうした分野は最近研究が進められるようになったものであり、今後の発展が期待される。

謝 辞

日頃からご教示、ご指導をいただき、大阪大学大学院基礎工学研究科 小林 哲郎教授に感謝する。

参考文献

- 1) T. Yajima, H. Yajima, F. Saito, and O. Wada, Eds.: "Femtosecond Technology" (Springer-Verlag, 1999).
- 2) 森本 朗裕: 光学 **30** (2001) 510.
- 3) 森本 朗裕, 井邨 泰之, 小林 哲郎: 第40 回応用物理学関係連合講演会, 30a-SA-23 (1993).
- 4) A. Yariv: "光エレクトロニクス, 展開編" 多田, 神谷訳 (丸善, 2000).
- 5) D. A. Scrymgeour, Y. Barad, V. Gopalan, K. T. Gahagan, Q. Jia, T. E. Mitchell, and J. M. Robinson: Appl. Opt. **40** (2001) 6238.
- 6) 安達 雅浩, 黒川 悟, 蒲原 崇之, 和田 泰輔, 森本 朗裕: 第63回応用物理学学会講演会, 26p-B-12 (2002).
- 7) 和田 泰輔, 日比野 卓也, 國松 俊介, 森本 朗裕: 第60回応用物理学学会講演会, 4a-K-1 (1999).
- 8) H. Gnewuch, C. N. Pannell, G. W. Ross, P. G. R. Smith, and H. Geiger: IEEE Photonics Technol. Lett. **10** (1998) 1730.
- 9) D. -S. Kim, T. Khayim, A. Morimoto, and T. Kobayashi: IEICE Trans. Electron. **E81-C** (1998) 260.
- 10) G. Miyaji, N. Miyanaga, S. Urushihara, K. Suzuki, S. Matsuoka, M. Nakatsuka, A. Morimoto, and T. Kobayashi: Opt. Lett. **27** (2002) 725.
- 11) A. Maruko, T. Khayim, T. Kobayashi, and A. Morimoto: CRL Int'l Symp. on Optical Commun. and Sensing toward the Next Century, Tokyo, C-7 (1999) p.211.
- 12) A. Morimoto, T. Khayim, A. Maruko, and T. Kobayashi: CLEO/Pacific Rim '97, Makuhari (1997) p.38.
- 13) 小山 次郎, 西原 浩: "光波電子工学" (コロナ社, 1988).
- 14) T. Khayim, A. Maruko, K. Shibuya, A. Morimoto, and T. Kobayashi: IEEE J. Quantum Electron. **37** (2001) 964.
- 15) 渋谷 享司, 小林 哲郎: 第64回応用物理学学会学術連合講演会, 30p-YK-13 (2003).
- 16) 神谷 健太郎, 渋谷 享司, 小林 哲郎, 森本 朗裕: 第62回応用物理学学会講演会, 11p-Y-11 (2001).
- 17) H. Murata, K. Kinoshita, G. Miyaji, A. Morimoto, and T. Kobayashi: Electron. Lett. **36** (2000) 1459.
- 18) 村田 博司, 廣澤 慶二, 金田 一賢, 岡村 康行, 笹井 裕之, 榎原 晃: 第64回応用物理学学会学術連合講演会, 30p-YK-9 (2003).
- 19) 及川 哲, 山本 太, 本田 秀紀, 市川 潤一郎, 野村 善行, 栗村 直: 第64回応用物理学学会学術連合講演会, 30p-YK-6 (2003).

レーザーワード

分極反転 (polarization reversal)

強い外部電界等によって、強誘電結晶の自発分極の方向が反転すること。結晶中のイオンの位置が電気的に対称な位置から少しずれている場合に起こる。結晶軸の向き自体が反転するため、これにともなって非線形光学定数や電気光学定数の符号も反転する。強誘電材料ではよく知られている現象であり、メモリ等に应用されてい

る。非線形光学結晶や電気光学結晶も強誘電結晶であるが、分極反転に必要な電界は通常極めて大きい。結晶の破壊電界に近いために従来は反転不能と考えられていたが、近年作成が可能となって光学的な応用分野が広がっている。

(森本 朗裕)