

## 周波数変調によるレーザーパルス制御

森本 朗 裕

### Laser Pulse Control by Frequency Modulation

Akihiro MORIMOTO

Laser pulse control by electrooptic modulation is described. Domain inversion of an electrooptic crystal makes quasi-velocity-matching in microwave frequency modulation and spatial phase modulation possible. Spatial control of sideband frequency components provides ultrashort light pulses of arbitrary shapes from any laser.

**Key words:** electrooptic modulation, ultrashort pulses, domain inversion, quasi-velocity-matching, spatial modulation, picosecond, femtosecond, terahertz

光の周波数は数百 THz から数 PHz の領域にあり、時間領域にしてピコ秒からフェムト秒領域の信号生成が可能であるが、電気信号は数十 GHz の領域にあるため、電気的光制御においてはなんらかの多重化を行う必要がある。ここでは分極反転を利用した電気光学素子と、それによる光周波数生成/光周波数の空間制御による光パルス制御について述べる。

電気光学変調による周波数生成とそれを用いた光パルス波形制御の概念を図 1 に示す<sup>1)</sup>。マイクロ波領域で大きな変調を加えると、変調によるサイドバンドが拡大し、テラヘルツにおよぶ広いスペクトル広がりを生み出すことができる。そのサイドバンド成分を分離し、独立に位相と振幅を制御すれば、任意の光源から任意の光パルス波形を生成することができる。これを実現するためには (1) 広いスペクトル広がりを生成できる光変調器、(2) 周波数成分の分波/合波器、(3) 空間的波面/振幅制御器、が必要となる。

電気光学結晶の分極反転を利用すると、電気光学係数の符号を結晶内の任意の部分について反転させることができるため、さまざまな光制御素子が可能となる。LiNbO<sub>3</sub>、LiTaO<sub>3</sub> といった電気光学結晶は強誘電結晶であり、外部から大きな電界を印加すると結晶軸の向きが反転し、それにもなって非線形光学係数や電気光学係数の符号が反転する<sup>2)</sup>。これが分極反転であり、非線形光学結晶で基本波と第二高調波等との疑似位相整合に利用されてきた。このた

めマイクロメートルオーダーの微細な分極反転まで可能になっている<sup>3)</sup>。

マイクロ波信号によって光変調を行う場合にも光波とマイクロ波の速度整合が問題となるが、周期分極反転を利用した疑似速度整合を行えば、高い周波数で大きな変調を実現することができる。このような変調器の構成例を図 2(a) に示す<sup>4)</sup>。進行波光変調器において光が変調マイクロ波を半波長だけ追い越す距離ごとに結晶の分極を反転させ、変調が加算されるようになっている。

この変調器によりテラヘルツにおよぶ FM 変調サイドバンド広がり観測されており、その出力光はサイドバンドごとの振幅と位相を調整することによってフェムト秒光波形に整形可能である。2 次の分散回路である光ファイバーを用いてこの周波数変調光を圧縮した光パルスの例を図 2(b) に示す。また、回折格子を用いた分波/調整/合波によ

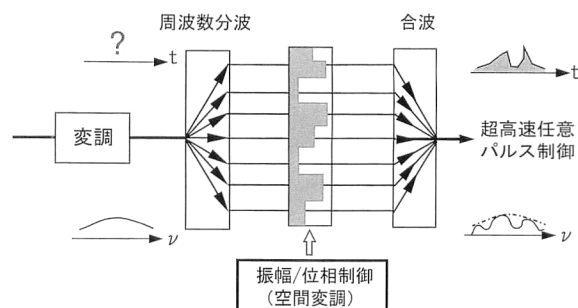
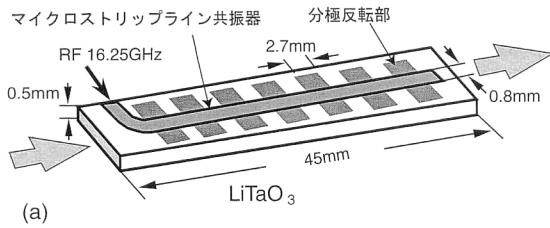
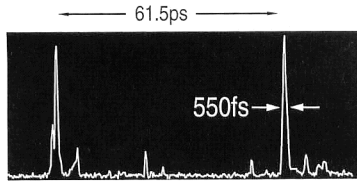


図 1 光周波数の空間制御による超短光パルス制御の概念図。

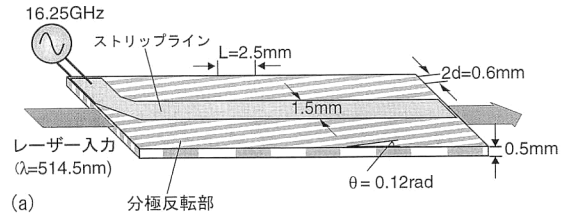


(a)

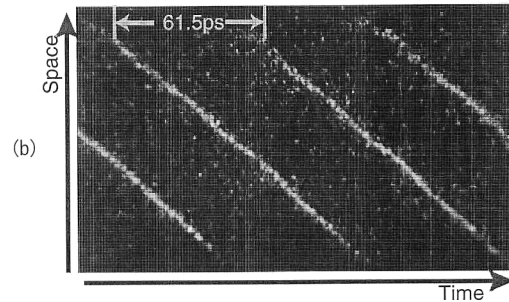


(b)

図2 (a) 大振幅周波数変調のための分極反転疑似速度整合型マイクロ波位相変調器と、(b) その周波数変調光を光ファイバーを用いて圧縮した光パルス。



(a)



(b)

図3 (a) 斜め分極反転を利用した進行波位相格子と、(b) 位相調整による超高速走査ビーム。

っていくつかの超短波形制御が報告されている<sup>5)</sup>。

分極反転を利用すれば空間光変調器の構成も可能である。空間光変調器としては光偏向器や焦点可変レンズが考えられるが、これらは三角形の分極反転や放物線形状の分極反転を行うことにより容易に構成できる。また空間変調効果を疑似速度整合型光変調器と組み合わせると、変調と同時に空間ビーム制御が可能となる。マイクロ波で動作する空間光変調器（任意波面制御器）が検討されている。

図3(a)は疑似速度整合型光変調器においてマイクロ波変調の位相が分極反転の空間位相に依存することを利用して、分極反転を斜めにして進行波位相格子型の変調を行えるようにしたものである<sup>6)</sup>。この進行波位相格子型変調器によれば、周波数変調とサイドバンド分離を同時に行うことができる。図の変調器構成によるラマン・ナス回折によって、数十本のサイドバンドの生成・分離が観測されたが、それらの振幅/位相調整によってフーリエ変換面上に合成された光ビームの例を図3(b)に示す<sup>7)</sup>。マイクロ波の周波数で一方向に走査される光ビームが観察されている。このような超高速光走査器は、超高速光分配器、シリアル・パラレル変換器、フェムト秒光波形整形器としての利用が期待される。

図3の素子は斜め周期分極反転の幅をさらに微細にすることにより、ブラッグ回折状態にすることもできるが、そのときはマイクロ波周波数シフターとして動作する。

分極反転を利用した光周波数生成と空間変調による制御を組み合わせた超高速光波形/周波数制御について述べた。超高速光信号の電氣的制御には光波の空間並列性を利用した、波長(周波数)領域での制御による多重化が重要である。電気光学素子は、液晶などと比べて動作電圧は高いものの、速度がきわめて速いという特徴がある。ここでは主にバル

ク型の素子応用について述べたが、分極反転は導波型素子においても有効に機能することが知られており、導波型光変調器への応用も報告されている<sup>8)</sup>。今後さらに新しい光制御素子が生み出されると期待される。

## 文 献

- 1) T. Yajima, H. Yajima, F. Saito and O. Wada, Eds.: *Femtosecond Technology* (Springer, Berlin, 1999).
- 2) 宮澤信太郎: 光学結晶 (培風館, 1995).
- 3) 藤村昌寿, 栖原敏明: “強誘電体擬位相整合非線形光学デバイスの新展開”, 応用物理, **69** (2000) 539-542.
- 4) D.-S. Kim, M. Arisawa, A. Morimoto and T. Kobayashi: “Electrooptic femtosecond pulse generation using quasi-velocity-matched electrooptic phase modulator,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **2** (1996) 5125-5129.
- 5) D.-S. Kim, T. Khayim, A. Morimoto and T. Kobayashi: “Ultrashort optical pulse shaping by electrooptic synthesizer,” IEICE Trans. Electron., **E81-C** (1998) 260-263.
- 6) A. Maruko, T. Khayim, T. Kobayashi and A. Morimoto: “Ultrafast electrooptic traveling phase grating with periodic domain inversion,” *CRL Int'l Symp. on Optical Commun. and Sensing toward the Next Century*, C-7, Tokyo (1999) pp. 211-212.
- 7) T. Khayim, A. Maruko, K. Shibuya, A. Morimoto and T. Kobayashi: “Ultrafast unidirectional beam deflection using an electrooptic traveling phase grating with periodic domain inversion,” IEEE J. Quantum Electron., **37** (2001) 964-969.
- 8) H. Murata, A. Morimoto, T. Kobayashi and S. Yamamoto: “Optical pulse generation by electrooptic-modulation method and its application to integrated ultrashort pulse generator,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **6** (2000) 1325-1331.

(2001年6月18日受理)