

# 電気光学外部変調による超短パルス光源

小林 哲郎

## Ultrashort Optical Pulses by External Electro-Optic Modulation

Tetsuro KOBAYASHI

In this paper, we describe the newly designed quasi-velocity-matched electro-optic modulators using domain inversion of the electro-optic crystal and their application to ultrashort optical pulse generation. These modulators can be operated with extremely large modulation indices and become a powerful means to generate wideband ( $> \text{THz}$ ) optical signals with the lower frequency electrical signal of about 10 GHz. They are possible to have other functions such as lens modulation, deflection and traveling grating in addition to phase modulation. Finally we show the examples of their applications of ultrashort optical pulse generation.

**Key words:** electro-optic modulator, ultrashort optical pulses, periodic domain inversion, electro-optic lens, electro-optic deflector

電気信号による変調で超短光パルスが生成できると、電気回路との同期が容易であり、その応用が一段と広がる。レーザーの非線形性などによりパルス位置が左右されるような内部変調によるモード同期ではなく、外部変調だけで超短光パルスが生成できれば特に有用である。

しかしながら、電気信号の帯域、速度は数十 GHz、数十 ps が精一杯であり、テラヘルツを超える帯域を必要とするピコ秒、サブピコ秒光パルスを得るには工夫が必要である。ここでは、電気光学結晶のドメイン反転を利用して 10 GHz 程度の電気信号でテラヘルツの広帯域光信号の生成を可能にした、疑似速度整合型の種々の変調器およびそれらによる超短光パルス発生についての筆者らの研究成果について、その概要を述べる。

### 1. 変調器と光周波数スペクトル

電気駆動の光変調器で直接光パルスを得るとすると、光パルスに匹敵する短い電気パルスとそれで動作する超広帯域の変調器が必要になるが、現在のところいずれもまだ開発されていない。一方、広帯域の光周波数スペクトルがあ

れば、これらの各成分がある瞬間に同位相（同時に山となる）となるように同期をとりさえすれば超短光パルスが生成できる<sup>1-3)</sup>。したがって、超高速の電気信号がなくても、超広帯域な光周波数スペクトルを生成できる電気光学素子があれば、超短光パルスを電気光学的に生成することは可能となる。

電気光学変調器の多くは、印加電界により媒質の光学的屈折率が変調される電気光学効果を利用しており、位相変調が基本となっている。さて、正弦波位相変調された光波（搬送光波周波数： $\nu_0$ ）は

$$E(t) = a_0 e^{j2\pi\nu_0 t} e^{-j\Delta\theta_m \sin(2\pi f_m t)} \\ = a_0 \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} J_{-n}(\Delta\theta_m) e^{+j2\pi(\nu_0 + n f_m)t} \quad (1)$$

で表され、ベッセル関数状の周期的な線スペクトルからなるサイドバンドが生成される。一方、瞬時周波数は

$$\nu(t) = \nu_0 - \Delta\theta_m f_m \cos(2\pi f_m t) \quad (2)$$

式(1)からあるいはこの周波数掃引幅からわかるように、サイドバンドの周波数広がり、

$$\Delta\nu \sim 2 \cdot \Delta\theta_m (\text{変調指数}) \times f_m (\text{変調周波数}) \quad (3)$$

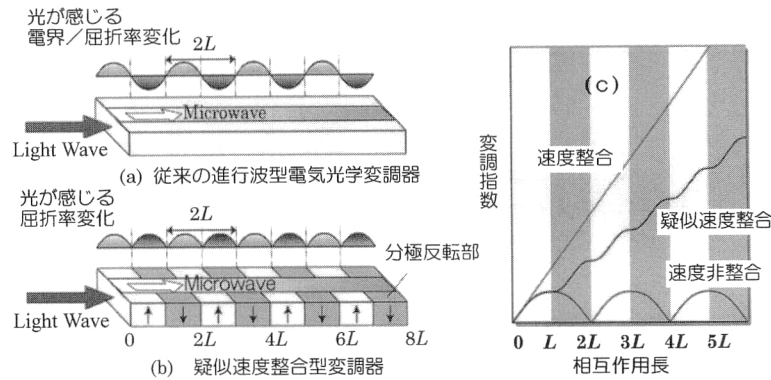


図1 電気光学結晶の分極反転と疑似速度整合光変調器。

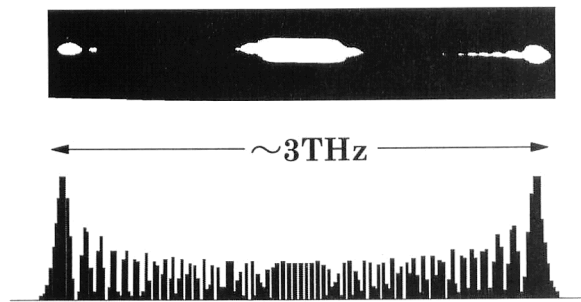


図2 QVM 電気光学位相変調器による広帯域サイドバンド生成の例。

となり、変調振幅（指数）と周波数の積の2倍となっている。数値例をあげると、 $f_m = 20$  GHz,  $\Delta\theta_m = 200$  ラジアンとして、 $\Delta\nu = 8$  THz となる。変調指数が大きければ、20 GHz 程度の低（？）周波数でも色が変化する 10 THz ほどのサイドバンド生成が可能なることは驚きでもある。

## 2. 分極反転と光変調器の疑似速度整合

大きい変調指数つまり大振幅の位相変調を得るには、印加電界を強くし、変調器長を長くすればよい。しかし、印加電界には電気光学結晶の耐破壊電界で決まる上限があるので、最終的には変調器の長さが重要になる。高周波での電気光学変調器では、RC 定数などの電氣的時定数による変調帯域の制限を避けるため、進行波型構造（光波、変調マイクロ波を同一方向に進行させて相互作用させる構造）をとる。しかし、それでも光波とマイクロ波の進行速度が異なるため、相互作用長が長くなると変調効果が累算されなくなり、さらにはキャンセルするようになり変調帯域を制限する(図1(a), (c) の下の曲線)。そこで、光波がマイクロ波の半周期分を追い越すごとに、つまり長さでいうと

$$L = [(1/v_{pmod} - 1/v_{gopt})2f_m]^{-1} \quad (4)$$

$v_{pmod}$ : 高周波の位相速度,  $v_{gopt}$ : 光波の群速度  
ごとに、電気光学効果が逆符合に働くように電気光学結晶

の結晶軸を反転すればよい(図1(b))。この結果、キャンセル分が増加分に置き換わり、相互作用長に比例して変調指数をいくらかでも大きくできるようになる(図1(c)の中の内線)。これは、光波の群速度と変調電気信号の速度の非整合を周期的ドメイン反転という手法で補償しているとみることができ、疑似速度整合(quasi-velocity-matching; QVM)と筆者らは名づけている<sup>4,5)</sup>。反転のピッチ(半周期  $L$ )は結晶中での高周波の波長程度で、cm~mm の範囲にあり、第二高調波発生(SHG)などの疑似位相整合(quasi-phase-matching; QPM)の場合の  $\mu\text{m}$ ~数十  $\mu\text{m}$  に比べ非常に長く、それだけ技術的に容易である(QVM も実は QPM からくるものである)。図2に、このような QVM を用いた電気光学変調器で得た変調サイドバンドの例を示す<sup>6)</sup>。

## 3. 光空間変調器への応用

### 3.1 反転形状と変調特性

変調器としては反転部と非反転部が1対1のものが最適であるが、それでは、反転部の幅や位置を変えてみると変調特性がどのように変わるだろうか。

進行電界で生じる最大屈折率変化を  $n_m$  とすると、反転位置  $y_{rc}$ 、反転部の幅  $W$  の場合の誘導位相変化は

$$\phi_{2L}(y_{rc}, W, t_0) = (2\pi/\lambda)(2\Delta n_m L) [(2/\pi)\sin(\pi W/2L)] \cos(\pi y_{rc}/L + 2\pi f_m t_0) \quad (5)$$

となる(長さ  $2L$  あたり)。これから、電気信号の位相や強さを変えなくても、反転部の(中心)位置  $y_{rc}$  によって位相変調の高周波の位相が、また反転部の幅  $W$  により位相振幅が変えられることがわかる。

### 3.2 周期分極反転を用いた光空間変調器<sup>7)</sup>

以上から、反転位置や反転部の幅を横方向に分布させ、変調振幅や位相を横方向に分布させれば、さまざまな光空間変調器が構成できることがわかる。ここでは、それらの中でシンプルな3つの例、位相変調の振幅が断面方向に線

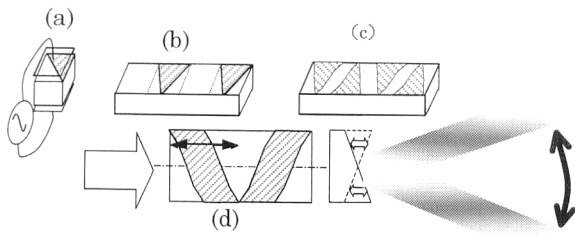


図3 QVMを利用した偏向器.

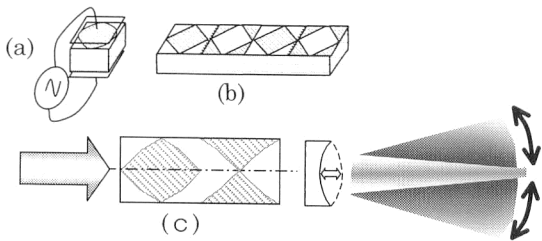


図4 レンズ変調器.

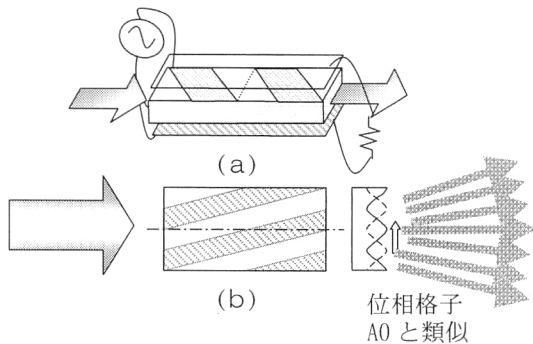


図5 進行正弦波位相格子.

形に変化したプリズム型偏向器, 二次関数的に変化した電気光学レンズ, 位相変調の位相が線形に変化した進行波位相格子について述べることにする.

### 3.2.1 プリズム型電気光学偏向器

速度非整合が問題とならない低周波領域では, 図3 (a) に示すように三角形の反転形状をとればプリズムが形成でき, 光路長がビーム断面内で線形に変化するため出口では波面が傾き, 光の進行方向が変わる偏向器の動作をする. 高周波域では一見, これに疑似速度整合を組み合わせ (b) のようにすればよいように思える. しかし, 式(5)からもわかるように, 疑似速度整合時には位相変調の振幅は反転幅  $W$  には比例せずその正弦関数に比例するので, 線形な偏向を得るには (c) や (d) のように  $\sin^{-1}$  関数的な分布の反転形状が必要である.

### 3.2.2 電気光学レンズ<sup>8)</sup>

3.2.1 で述べたと同じ理由で, ドメイン反転の形状をレンズ状にとるのではなく, むしろ  $W$  を線形に分布させた

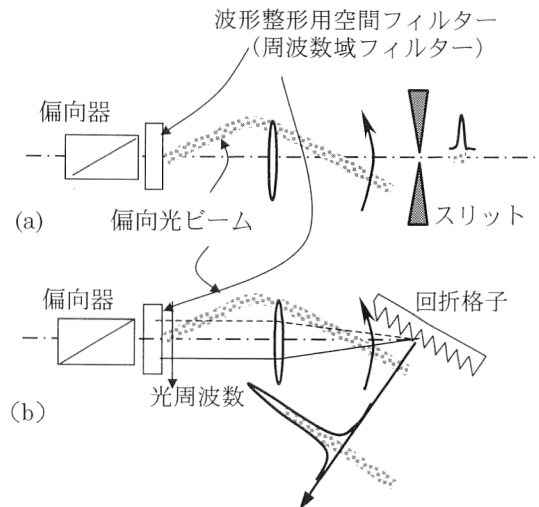


図6 電気光学偏向器による超短光パルス生成. (b) はシンセサイザーにもなる.

ほうが位相変化が二次関数的に近くなる. 図4 (b), (c) ではより厳密な形状のものを用いている.

### 3.2.3 進行波位相格子 (traveling grating)<sup>9)</sup>

反転部の幅は一定で位置を図5 (a) のように線形にずらすと, 位相変調の深さは一様であるが, その時間位相が断面方向に線形にずれることになる. この結果, 変調の同位相の部分は時間的に断面方向に一定速度で移動する. つまり, ビーム断面横方向に進行する正弦波の位相格子を生むことになり, 進行音響波によるものと同様の光波回折が生じる. 図からわかるようにこれは斜周期ドメイン反転であり, 縦方向の周期は疑似速度整合のために利用され, また横方向周期は進行波位相格子の周期となって光波を回折するのに使われる. 横方向周期は進行する変調マイクロ波の波長とは無関係に選択でき, 例えば波長 30 cm (結晶中でも数 cm 程度) の 1 GHz 波に対しても, 位相格子の周期はサブミリ以下にできる. もちろん, 音響波による回折が利用できない数 GHz~数十 GHz でも, この位相格子は利用可能である. この位相格子は, 幅が広いときはラマン・ナス回折素子として動作し, 空間分光周波数コム, シンセサイザー, 片方向偏向器, 超高速シリアル-パラレル変換器など多くの用途がある<sup>10-12)</sup>. 他方, 幅を狭くするとブラッグ回折素子として働き, 周波数シフターとして, 音響光学 (AO) デバイスでは不可能な高周波域で動作できる.

## 4. パルス発生への応用

### 4.1 偏向器とスリット, 回折格子<sup>13,14)</sup>

図6 (a) のように, 偏向器とスリットを組み合わせると, 超短光パルスが得られる. パルス幅は周波数広がり逆数程度になるほか, 偏向ビームのビーム形状を偏向器出口で

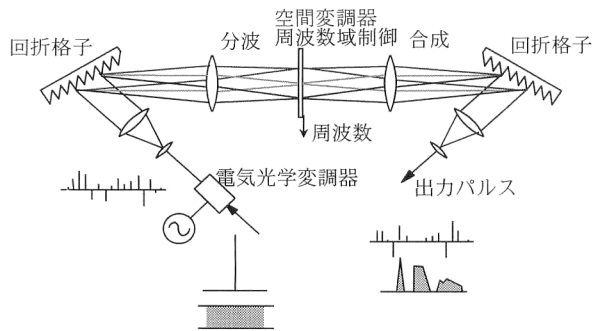


図7 光パルスシンセサイザ。

空間フィルターなどを用いて制御すると、スリット部での遠視野像（出口のフーリエ変換像）も変化し、時間波形もこれに対応するためパルスの時間波形制御も可能になる。この方式は、周波数広がりを利用からいえば理想的なものであるが、光パワーの利用率からいうとよくない。ほとんどの入射光ビームのパワーがスリットでカットされるからである。この点を改良したのがスリットを回折格子に置き換えた図6(b)のものである。回折格子にあたる光束全体が出力として利用できる。この場合も、出力の時間波形は偏向器出口の空間変調器で制御できる。回折格子の設置角はパルス圧縮条件で決定されるが、これは、異なる位置から異なる角度で回折格子に入射する異なる周波数成分が、ちょうどまい具合に同一方向に重畳、回折される条件と等価である。つまり、回折格子は周波数成分の合成（フーリエ合成）の役割をもち、偏向器出口に配した空間フィルター、空間変調器は周波数フィルターとして動作する。したがって、全体として、周波数成分の合成（フーリエ合成）方式のパルスシンセサイザに対応する。

#### 4.2 シンセサイザ

前述のように、互いに位相関係のある周波数成分を個々に制御しフーリエ合成すれば、任意波形の光パルス性が可能である。いわば、光のシンセサイザである。偏向器では周波数成分の生成と空間分離が自動的に行われるが、通常の位相変調器では、分波機能を別途用意する必要がある。そのように考えて、筆者らのグループが先駆けて開発したのが図7のシンセサイザである<sup>15,16</sup>。QVM位相変調器で実際、フェムト秒に迫る波形合成に成功している<sup>17</sup>。この構成は現在、フェムト秒パルス波形制御でも一般に使われている。

#### 4.3 周波数チャープ圧縮と複合機能空間変調器の利用

さて、式(2)からわかるように、大きな振幅の位相変調は同時に大きい振幅の周波数変調となっている。瞬時光周波数は正弦波関数で時間的に変動し、周波数が時間的にほぼ線形に掃引される部分（周波数チャープ部）と周波数が

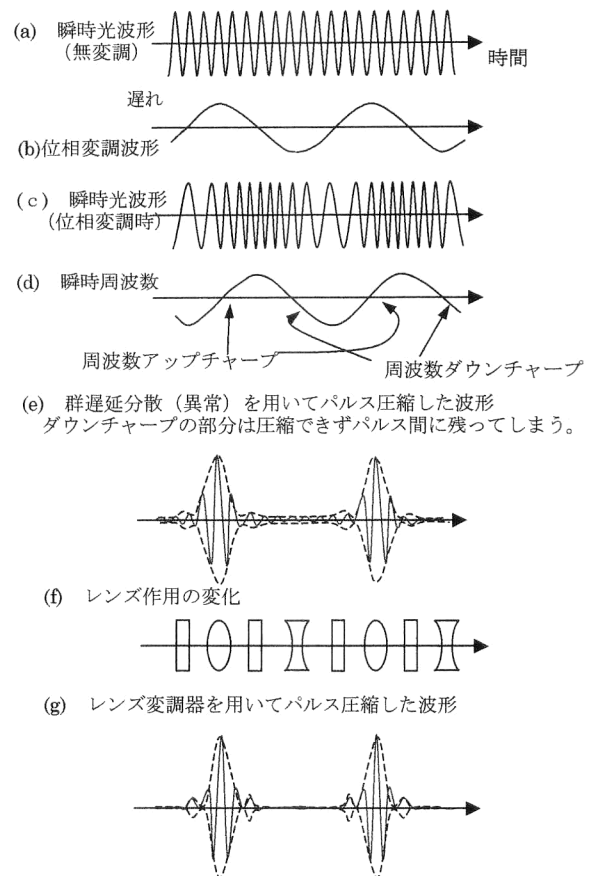


図8 位相変調と群遅延圧縮によるCW光からのパルス圧縮生成。レンズ変調器ではアップチャープ（ダウンチャープ）時に凸（凹）レンズになるので、アパーチャーなどで、この部分だけを選択的に抽出でき、消光比が改善。

大きくシフトする部分に分けられる（図8(b)～(d)）。周波数チャープしている光は群遅延分散回路を通すと、パルス圧縮されることがよく知られている<sup>18</sup>。屈折率が増加し最大になって減少を始める領域は周波数が低→高と変化する正の周波数チャープ領域となり、高周波のほうが遅延時間の少ない異常群遅延分散回路を通して超短光パルス列が得られる<sup>19</sup>。逆のチャープ部を圧縮するには、正常群遅延分散を用いればよい<sup>20</sup>。最適な圧縮で得られるパルスの幅はほぼ周波数広がり逆数の程度であり、すでにサブピコ秒も得られている。また、QVM変調部と群遅延分散部を導波路一体集積構造とし、小型化、高信頼化をはかる試みも行われている<sup>21</sup>。これらCWチャープ光を圧縮し、パルス生成を行う方式の問題点は、正の周波数チャープ部を圧縮した際は負の周波数チャープが逆に伸長され、パルス中に閉じ込められずにパルス間に背景光として残ってしまうことである（図8(e)）。そこで、この問題点を解決するものとして、複合機能をもつ光空間変調器が登場する。一例として、電気光学レンズ（図4）の利用を考える。これは、印

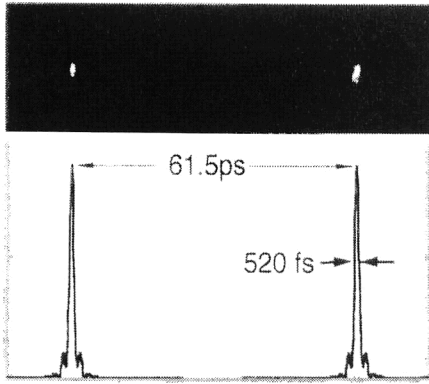


図9 レンズ位相変調器による無背景超短光パルス生成。

加電界による屈折率の増加，減少に伴い，位相変調のほか凸，凹とレンズ作用が生じ変調される効果も伴う（焦点距離が正負と大幅に変化する）。図8(f)にこの様子を示す。これを用いれば，ビーム集光位置の変調と光の周波数変調が同時進行することになり，この集光位置近傍にスリットなどを配すると周波数チャープや周波数シフトを選択できる。図9に，これを超短パルス生成に応用して得られたフェムト秒光パルスの例を示す<sup>22)</sup>。

このほか，反転位置の4分の1ずらしを用いた超高速SSB (single sideband) 変調器<sup>23)</sup>など，ドメイン反転を利用した多くの新機能変調器が提案されており，今後の発展も大いに期待できる。

当論文に関連する研究の多くは，立命館大学森本朗裕教授，当学村田博司，高原淳一両助教授はじめ多くの大学院生の協力のもとに行われたものである。ここに謝意を表す。

## 文 献

- 岡田 正，小林哲郎，伊藤 正：新しい光の科学（大阪大学出版会，2001）pp. 59-61.
- 小林哲郎：“超高速光制御技術”，光学，**24**（1995）384-390.
- K. Amano, T. Kobayashi, H. Yao, A. Morimoto and T. Sueta: “Generation of 0.64 THz-width optical sidebands by a novel electrooptic modulation for the purpose of forming ultrashort optical pulses,” *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1454-1458.
- A. Morimoto, E. Saruwatari and T. Kobayashi: “Quasi velocity matched electrooptic phase modulator with domain inversion for deep microwave modulation,” *CLEO '94*, CME5 (1994) p. 21.
- 小林哲郎：“ドメイン反転外部変調器を用いた超短光パルスの発生”，応用物理，**69**（1998）1056-1060.
- A. Morimoto, M. Tamaru, Y. Matsuda, M. Arisawa and T. Kobayashi: “3 THz sideband generation by electro-optic phase modulation and the application to ultrashort pulse generation,” *CLEO Pacific Rim* (1995) pp. 234-235.
- 小林哲郎：“分極反転構造を用いた光変調器の新展開”，第48回応用物理学関係連合講演会論文集，29p-ZV-2（2001）p. 83.
- T. Khayim, A. Maruko and T. Kobayashi: “A novel ultrahigh-speed electrooptic lens with periodic domain inversion,” *Opt. Rev.*, **7** (2000) 115-118.
- 小林哲郎，黄 偉竜，森本朗裕，高原淳一，北川勝浩：“分極反転を利用した新しい超高速電気光学偏向器”，第57回応用物理学会講演論文集，8p-KG-4（1996）p. 941.
- 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.
- T. Khayim, A. Maruko, A. Morimoto and T. Kobayashi: “Ultrafast unidirectional deflection by electrooptic traveling phase grating using periodic domain inversion,” *CLEO Pacific Rim '99*, ThO3 (1999) p. 726.
- D.-S. Kim, A. Maruko, T. Khayim, A. Morimoto and T. Kobayashi: “Optical pulse synthesis by ultrafast EO traveling phase grating,” *FST '99*, WB-12 (1999) p. 57.
- T. Kobayashi, H. Ideno and T. Sueta: “Generation of arbitrarily shaped optical pulses in the subnanosecond to picosecond region using a fast electrooptic deflector,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-16** (1980) 132-136.
- B. Y. Lee, T. Kobayashi, A. Morimoto and T. Sueta: “High-speed electrooptic deflector and its application to picosecond pulse generation,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-28** (1992) 1739-1744.
- T. Kobayashi, A. Morimoto, M. Doi, B. Y. Lee and T. Sueta: “Picosecond to femtosecond optical synthesizers,” *Ultrafast Phenomena VI*, eds. T. Yajima, *et al.* (Springer, Berlin, 1988) pp. 135-138.
- T. Kobayashi and A. Morimoto: “Picosecond optical synthesis of picosecond optical pulses,” *1989 OSA Proc. on Picosecond Electronics and Opto-Electronics* (1989) pp. 81-86.
- 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.
- T. Kobayashi, K. Amano, K. Yao, H. Fukushima, A. Morimoto and T. Sueta: “Optical pulse compression using high-frequency electro-optic phase modulation,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-24** (1988) 382-388.
- D.-S. Kim, M. Arisawa, A. Morimoto and T. Kobayashi: “Femtosecond optical pulse generation using quasi-velocity-matched electrooptic phase modulator,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2** (1996) 493-499.
- D.-S. Kim, Y. Matsuda, A. Morimoto and T. Kobayashi: “Electrooptic femtosecond pulse generation using a dispersive optical fiber,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 5125-5129.
- H. Murata, A. Morimoto, T. Kobayashi and S. Yamamoto: “Optical pulse generation by electrooptic modulation method and its application to integrated ultrashort pulse generators,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 1325-1331.
- T. Khayim, M. Yamauchi, D.-S. Kim and T. Kobayashi: “Femtosecond optical pulse generation from a CW laser using electrooptic phase modulator featuring lens modulation,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-35** (1999) 1412-1418.
- H. Murata, T. Doi, T. Kobayashi and S. Yamamoto: “Novel guided-wave single-sideband electrooptic modulators by using periodically domain-inverted structure,” *CLEO 2002*, CTuK14 (2002) pp. 204-205.

(2003年6月12日受理)