

# 解説

## 超高速光制御技術

小林 哲郎

大阪大学基礎工学部電気工学科 〒560 豊中市待兼山町 1-3

(1995年4月19日受理)

### Ultrafast Light Control Technology

Tetsuro KOBAYASHI

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University,  
1-3, Machikaneyama-cho, Toyonaka 560

#### 1. はじめに

光波は非常に周波数の高い電磁波であり、これを搬送波とすれば電波に比べ、より広帯域、高速の信号を伝送したり、超短パルスを形成する可能性をもっている。制御性のよいコヒーレントな光源“レーザー”の出現とその進歩がこの超高速性の具体化を現実のものとしつつある。

レーザー光は定常発振状態では非常に単色性に優れたものであるが、レーザー媒質の增幅周波数帯域は広いものが多く、モード同期などの技術によりレーザー発振出力自体をピコ秒域の超短光パルスとするのに大して年月を要しなかった<sup>1)</sup>。

レーザー発振自体の高速性はレーザー媒質の利得帯域に依存するところが大きいため、チタン：サファイアレーザーや色素レーザーではフェムト秒パルスも可能になっている一方で、サブナノ秒パルス発生も難しいレーザーもある。フェムト秒パルス生成から光波の超高速性の一端を窺い知ることができるが、現実には限られたレーザーからのパルス生成を除けば超高速性はまだ十分には活用されていない。超高速光制御技術などの周辺技術の開発が必要とされるゆえんはここにある。

超短光パルスがゆっくりした周期で得られれば、それを低速制御したのち、時間多重(multiplex)すれば等価的には高速化が可能で、この方法は技術的に容易である。一方、この逆の時間分割、分離(demultiplex)は多重化後のビットレートに対応するだけの高速性が(周期的ではあるが)必要とされ、容易ではない。また、

cw光をもとに高速のパルス列を生成したり、高速の信号列を乗せたりする場合も当然、高速の光制御が欠かせない。

本稿ではピコ秒からフェムト秒という超高速域での光の制御について筆者らが専門とする電気・光制御を中心に、全光学的な光・光制御も併せて述べる。

#### 2. 電気光学制御

ここでは、電気信号で駆動し、電気光学効果などを介して、ピコ秒からフェムト秒の超短光パルスを生成したり、スイッチしたりすることを考える<sup>2)</sup>。

光の包絡線波形(位相波形も含む)に駆動電気信号波形を対応させる電気と光が1対1の光制御器、変調器の場合は多くの問題点がある。たとえばサブピコ秒域の制御にはサブピコ秒の電気信号が必要である(図1(a))。この電気信号はdcからサブミリ波、赤外の光成分まで含む非常に広帯域なものとなり、その生成自体が困難である。さらに電気光学結晶の誘電率分散、電極金属の表皮効果と分散、電気と光の速度非整合などからデバイスは短寸法にならざるを得ない。EOサンプリングで電気信号検出ができていることからサブピコ秒の高速域(帯域でいうと1 THz)で電気・光信号変換が可能であることは実証されているものの、変換成分は微小で、光をオン、オフするレベルにはない。一方、ピコ秒域(100 GHz以上THzまで)ではもっと現実的であり、実際に電界印加で吸収端を移動(広義のシャトルク効果)させ、吸収率や屈折率を効率よく変化できる量子井戸構造を用いた変調器が有望視されている<sup>3)</sup>。

さて、電気信号と光波形に1対1の対応が必ずしも要求されない場合はもう少し容易にサブピコ秒からフェムト秒域で光を電気的に制御することが可能である。つまり、図1(b)に示すように電気的に狭帯域ながらも、広帯域な光波を生成、制御する方法が実現すればよい。サブピコ秒パルスはTHzの周波数帯域をもつので、単一周波数に近いcw光をサブピコ秒光信号に変換する電気光学変換デバイスは少なくともTHzの帯域をもつ光周

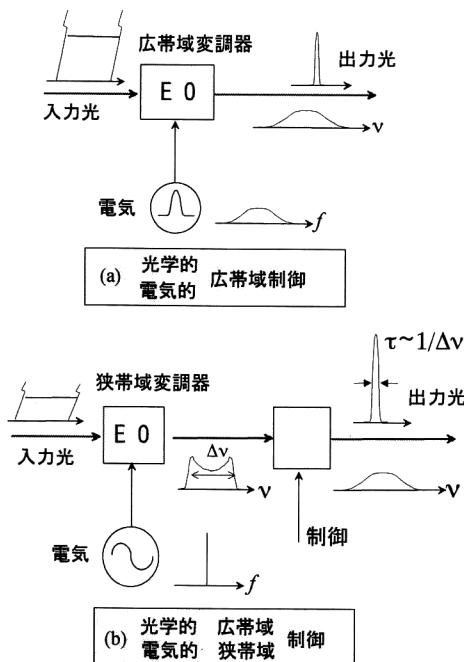


図1 超高速電気光制御

(a)では超高速の電気信号で広帯域の電気光学変調器を介して超高速光信号を生成制御する。このような変調器はもちろん電気信号の実現も技術的に非常に困難である。一方、(b)では実現が容易な狭帯域の駆動電気信号と変調器を用い、変調指数、振幅を大きくすることで広帯域の光サイドバンドを生成し、そのサイドバンドの振幅位相を制御して高速の光信号生成や制御を行うもので、使い方に制約はあるものの現在の技術でサブピコ秒域電気光制御も十分に可能である。

波数スペクトルを生成する能力をもたねばならない。電気的に狭帯域な光変調器で広帯域な光波を生成する最もシンプルな方法は比較的高い変調周波数で深い変調、大振幅な変調を利用することである<sup>4)</sup>。たとえば、正弦波位相変調では、生成される変調サイドバンドの周波数幅は

$$\Delta\nu \sim 2\Delta\theta f_m \quad (1)$$

となって、変調周波数 $f_m$ と変調深さ（変調指数） $\Delta\theta$ の積に比例して広がる。したがって、たとえば変調周波数：20 GHz、変調指数：100 radとすればサイドバンド幅は4 THzと非常に広くなる。吸収率の変調の場合も同様である。電気光学効果などの電気光相互作用は弱いので深い変調を得るには、長い相互作用長が必要である。このためには変調電気信号の伝搬速度と光の群速度の間に速度整合をとることが必要となる。電気信号が正弦波のように狭帯域なら電気信号の位相速度を整合すればよいので容易である。たとえば、電気伝送線路の高次モードを用いれば、線路幅で位相速度が自由に制御でき<sup>5)</sup>、また、電気光学結晶の分極反転を利用すれば疑似速度整合（図2）<sup>6)</sup>が可能である。図2は著者らの分極反転を利用した疑似速度整合位相変調器の一例である。図3はこれを用いて生成した2.85 THz(FWHM) サイド

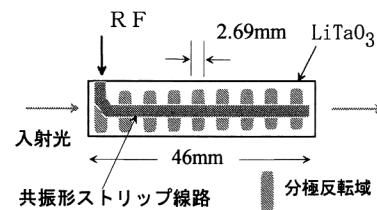


図2 分極反転を利用した疑似速度整合形電気光学変調器

光の伝送速度が電気信号の伝送速度に比べ速いため、変調器が長くなると光は電気信号をどんどん追い越し、印加電界の正相逆相部を交互にみてゆくことになり変調効果は相殺される。そこで、ここでは変調効果が相殺ではなく累積されるように、光が電気信号の半周期分を追い越すごとに電気光学結晶の軸を反転させている。

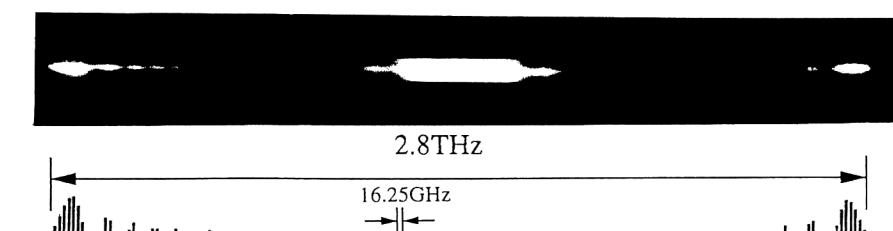


図3 位相変調で生成された広帯域光サイドバンド

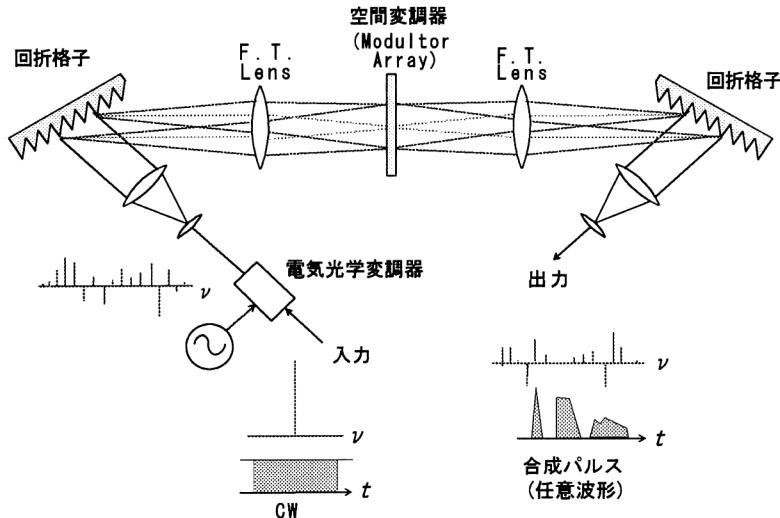


図4 電気光学変調を用いた光パルスシンセサイザー

回折格子で空間的に分波された変調サイドバンドの各成分は、空間変調器によりその位相、振幅が制御された後、回折格子によりフーリエ合成されて出力される。

バンドの例である<sup>7)</sup>。いったん、広いサイドバンドがでければ、短光パルス生成は容易である。たとえば、サイドバンド選択<sup>8)</sup>、チャープ圧縮<sup>9)</sup>、シンセサイザー<sup>10)</sup>等が利用できる。このうち代表的なシンセサイザ法の構成例を図4に示す。

同期多重路変調も一種の疑似速度整合を利用したものである。多重路を2枚の反射鏡間の同一光路とすればファブリ・ペロー型の多重干渉が生じ、多重干渉変調器(同期駆動掃引型干渉計、ファブリ・ペロー変調器<sup>11)</sup>)になる。この場合、小さい変調でも実効的に大きい変調が得られ、特に高フィネス共振器内に同期位相変調を用いると、超短光パルスが自動的に生成できる。図5(a), (b)はこのファブリ・ペロー変調器とその動作原理を示す。同図(c)はその改良型である<sup>12)</sup>。(c)の方式では入射光パワーの大部分が出力パルスに変換され、変調というよりはcw入力光を圧縮して光パルス列を形成させたという方が実体に近い。ここでは、利得媒質が存在しないにもかかわらず出力パルスのピークパワーは入射パワーに比べ非常に高くなっている。

一方、深い強度変調を利用して超短光パルスが生成できる。図6には電界吸収(EA)変調の大振幅動作でピコ秒パルスを生成する方法を示す<sup>13)</sup>。電界強度により吸収率が変化するので、透過度は印加電界に対し指數関数的に変化する。適当な直流バイアス電界のもとでの正弦波電界掃引では近似的に変調周期に比べ十分に短い  $\text{sech}^2$  パルスが得られソリトン通信に応用できる。

偏向も変調と同様に重要な光制御の一つであるが、高速偏向の研究は多くない。音響光学偏向ではGHz以上の高速動作は音響損失、および、回折波長などから困難である。他方、電気光学偏向は十分に可能で、筆者らは10 GHz以上の偏向周波数で1スポット偏向速度がピコ秒以下の高速偏向を達成している<sup>14)</sup>。偏向の場合も大振幅動作を行えば超高速性を得ることが可能で、例えば図7に示すようにピコ秒パルス生成にも利用できる。回折格子などを併用すれば、さらに、パルス圧縮やシンセサイザーにも利用できる<sup>14,15)</sup>。電気光学的に誘導した位相回折格子を用いると片方向偏向も可能で<sup>16)</sup>、時間域分離(time domain demultiplex)や超高速TVに利用できよう。

そのほか、マイクロキャビティ構造<sup>17)</sup>を用い、電界印加で準位間エネルギー、屈折率などを変化させれば自然放出や誘導放出、レーザー発振などの発光強度、波長、方向などが超高速に制御でき<sup>17,18)</sup>、2次元アレイ化を組み合わせて新しい光情報システムに応用できそうである。

### 3. 光・光制御

光照射により媒質の光学的性質(屈折率や吸収)を変化させる、いわゆる非線形光学効果(2次や3次)を利用すれば、光による光の制御が可能になる。RC時定数や表皮効果などの電気的速度制限要因がないので高速性が期待できる。一般に駆動光が媒質に対し非共鳴ではこ

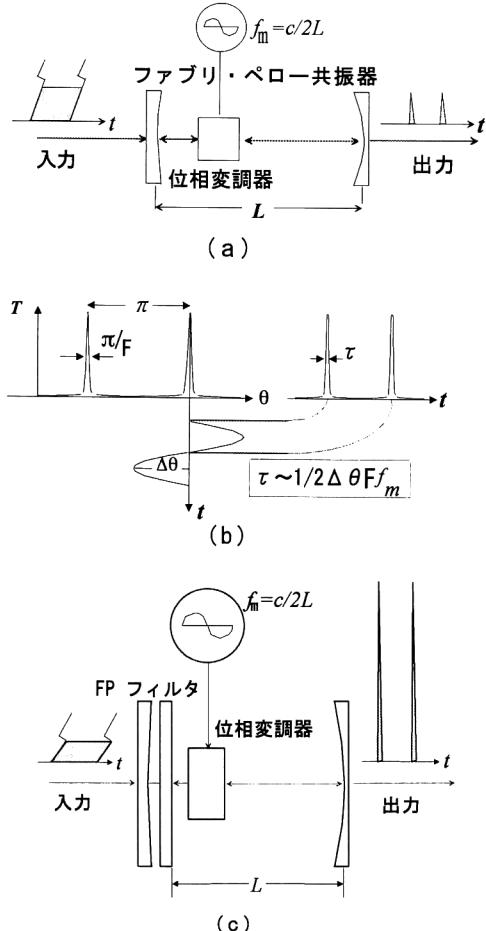


図5 ファブリ・ペロー電気光学変調器/変形ファブリ・ペロー電気光学変調器による超短光パルス生成

(a)のファブリ・ペロー電気光学変調器はファブリ・ペロー干渉計の光学長を位相変調器により同期掃引できるようにしたものである。(b)はその動作原理を示したもので、干渉計の鋭い透過特性と位相変化から透過波形が鋭いパルスとなることがわかる。(c)の変形ファブリ・ペロー電気光学変調器では、(a)の入力ミラーの代りに、入射光に透過ピークを合わせた高フィネスのファブリ・ペローフィルターを配している。なぜ高効率になるかは読者への宿題としたい<sup>12)</sup>。

の非線形光学効果は小さく、共鳴状態では大きい。しかし、共鳴励起駆動の場合は上位準位にキャリアが実励起されるため、これの下位への緩和時間（多くの場合ナノ秒程度で遅い）により、応答時間が制限される。このようなことより、制御感度と速度がトレードオフの関係にある<sup>19)</sup>。そこで、高感度かつ高速、あるいは、緩和時間に制限されないいくつかの光・光制御法が工夫、研究

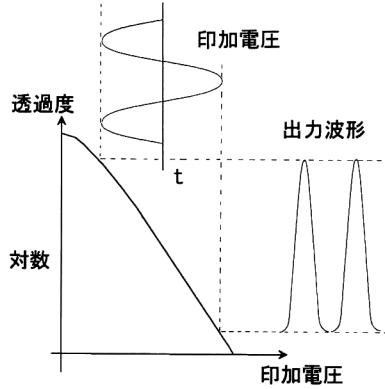


図6 電界吸収形変調器の大振幅動作による短光パルス生成

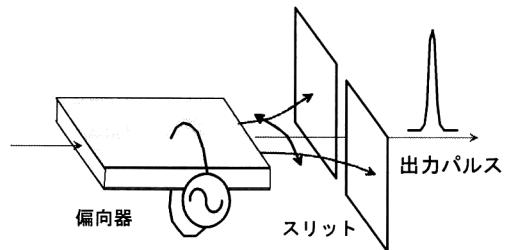


図7 大振幅偏向によるパルス生成

されている。その一つが図8に示した非線形ファイバーループミラー(NOLM)形の光スイッチである<sup>20)</sup>。高速の非線形効果である光ファイバー中の光カーエフェクトを用い、相互作用の弱さを長い相互作用長でカバーしており、超短光パルスのdemultiplexや抽出サンプリングに利用されている。図9はNECの田島氏らの考案による実吸収を用いた高効率、高速のマッハ・ツェンダー型光・光スイッチである<sup>21)</sup>。両分岐の位相差で出力が制御されるので、一方の分岐に十分に短い光パルスを入力し、屈折率変化を通して、位相にπだけステップ状に変化させ信号光をオンしている。少し遅れてもう一方の分岐にも同じように光パルスを入力してπだけ位相変化を与えるれば位相差がなくなり、オフできる。オン、オフのスイッチ時間は駆動光パルス幅と遅延時間で決定され、非線形媒質の緩和時間には無関係である。ただ、実励起であるため、高速に何度も動作を繰り返せば励起状態が満タンになるので、媒質に十分大きい非線形変化のダイナミックレンジが要求される。

図10は1対の連続した逆位相共鳴光パルスを位相緩和時間内に照射して、分極を効率よく励振し、強制的に止めるというコヒーレント・プッシュプル型光スイッチ

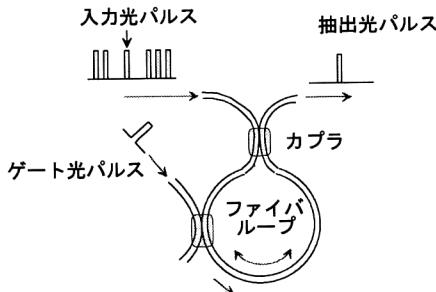


図8 非線形ファイバーループスイッチ  
光ファイバーのもつ光カーブ効果（光強度が強いと屈折率が大きくなる）のため、信号パルスのうちゲートパルスと同行してファイバー中を進む部分のみ位相シフトを大きく受け、逆行してきたパルスとの間に位相差が生じ抽出される。

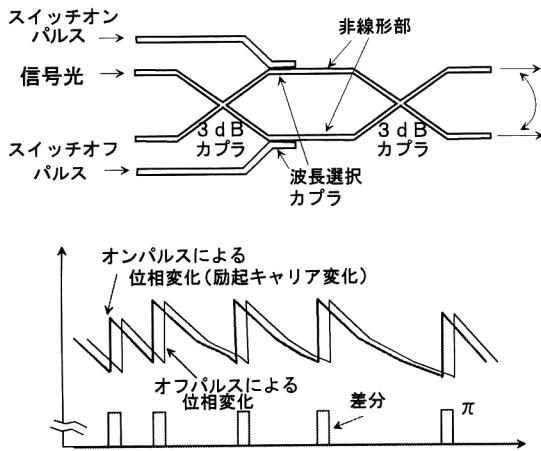


図9 マッハ・ツエンダー干渉型光・光スイッチ

である<sup>22)</sup>。これはコヒーレント相互作用を利用したもので非共鳴励起と同様、実励起を伴わず、緩和時定数フリーになるが、感度は共鳴励起みなに高い。 $2\pi$ パルス励起やAC シュタルク効果（光照射により共鳴線をシフトさせる）も高速性があるが、必要な駆動光電力は大きい。この他、ラマン的非共鳴法（図11）、横に別の緩和バイパスを設ける方法<sup>23)</sup>、位相緩和を用いる方法など多くの方法が試みられている。

媒質が1以上の屈折率をもつ限り、共鳴、非共鳴を問わず、光が照射されれば、媒質の分極が励振される。この場合、当然、上位準位に分布が生じているのであるが、実励起とはいわない。非共鳴、あるいは大きい離調状態では媒質の分極の位相とこれを揺する光の位相の間にずれがはやく生じ始めるので分極の振幅は大きくならず、そのうちに（離調周波数の逆数の半分程度たてば）逆位相になって光の方へエネルギーを返却してしまう。

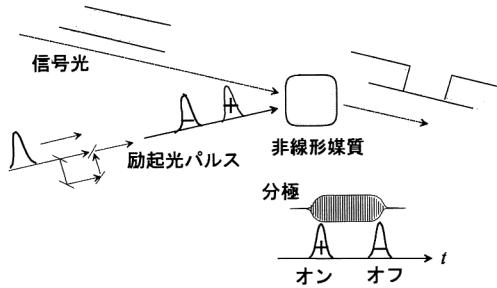


図10 コヒーレント・プッシュブル光スイッチ  
この原理は以下の例えで理解できよう。ブランコをタイミングをとって押すとよく振れる。このブランコを止まつたり、風で揺れるタイミングが変わったりしないうちに（位相緩和時間内に）、前とは逆側で押す（来るとときに押す）とすぐに止められる。

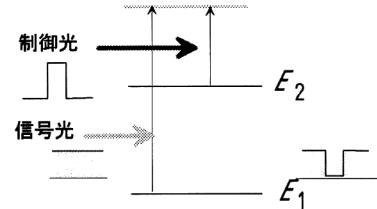


図11 ラマン非共鳴光スイッチ  
中間準位の位置にもよるが、パラメトリック的な差（和）周波成分の吸収を介した相互作用、あるいは非共鳴信号光に対する2準位系の分散、吸収の制御光による効率的な変化などの解釈が考えられる。

共鳴に近くなると位相ずれが現れるまでの長い時間に光から媒質へエネルギー移行が続き、分極の振動振幅が大きくなり、そのエネルギーの一部が他の系にも散逸してしまったり、あるいは弾性衝突などで個々の原子の分極の位相がばらばらになり、巨視的分極が小さくなってしまう（位相緩和）などして、光の場にエネルギーを戻せなくなってしまう。この状態が実励起と呼ばれるものである。つまり、励起の初期段階においては実（real）励起、バーチャル（virtual）励起の間に本質的な差はない。分極の位相緩和時間内なら、共鳴励起であっても、続く光パルスの位相いかんでは実励起をキャンセルし、緩和時間フリーの光・光相互作用が可能になる。

#### 4. その他の問題、今後の課題

##### 4.1 制御速度とエネルギー幅

$\tau$ という時間で光波の強度が大きく変化したり、あるいは、位相が $\pi$ 程度変化するときは光波には $1/\tau$ 程度の周波数広がりが生じる。これはエネルギー的には

$$\Delta E \sim h/\tau \quad (2)$$

程度広がることに対応する。これと類似して、帯域の狭

い吸収曲線（エネルギー幅を  $\Delta E_a$  とする），および，これと Kramers-Kronig 関係で関連づけられる分散曲線の掃引速度は  $h/\Delta E_a$  で制限される。離調励起では高速動作が可能であるが，それでも動作周波数は離調周波数より低くしないと，上述の光波スペクトル広がりにより実吸収成分が現れ，緩和時間による速度制限が生じる。このように周波数（エネルギー）と時間の不確定関係に起因する速度制限が高速光制御にはいつもついてまわることに注意が必要である。

#### 4.2 時間と空間

光は高速であるが 0.3 mm 進むのに真空中でも 1 ps もかかる。半導体やガラス中ではさらに遅い。したがって，超高速光デバイスではサブミリの長さのずれがきいてくる。現在の光制御素子の寸法は単体でも 1 mm から数 cm 程度のものが多く，光の走行時間は 10 ps 以上になり，半導体電子素子と比較してはもちろんのこと，超高速の観点からみても非常に大きい。光学媒質や電極材料の避けえない速度分散などを考えると光制御デバイスをもっと小さくする必要がある。

#### 4.3 今後の課題

上述のように光回路の小型化は重要課題である。システムの総合速度は含まれる素子数と素子の動作速度の積に関係し，やや低速とはいえ，超高密度集積が可能な半導体電子デバイスに光制御デバイスが対抗するにはもっともっと小さくならなくてはならない。小さくなると相互作用長の減少により素子駆動電力の増加を招く。このため高効率，高速応答の非線形光学媒質，構造の開発がキーとなる。とはいえ，消費電力など考えると集積度で電子デバイスと競争するのは得策とは思えない。光には高速，広帯域性の他に電子デバイスにはない超並列性と空間を自由に伝送できるという飛び道具的能力があり，これを活かさない手はない。光制御デバイス，電子デバイスとも媒質中の電子の振舞いを利用しているのは同じであり，両者をうまく共存させ，役割を分担させたハイブリッドな高速電子光制御システムの開発が望まれる。

### 文 献

- 1) 小林哲郎：“超短光パルス技術”，電子情報通信学会誌，**72** (1989) 171-180.
- 2) 小林哲郎：“電気光学変調による超高速レーザパルス生成”，電子情報通信学会論文誌 C-I, **J74-C-I** (1991) 387-397.
- 3) K. Wakita, I. Kotaka, O. Mikami, H. Asai and Y. Kawamura : “Observation of low chirp modulation in InGaAs-InAlAs multiple-quantum-well optical modulator under 30 GHz,” Photon. Technol. Lett., **3** (1991) 138-140.
- 4) 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.
- 5) B. Y. Lee, T. Kobayashi, A. Morimoto and T. Sueta : “Velocity matched EO phase modulator for wide optical sideband generation,” Electron. Lett., **28** (1992) 330-332.
- 6) A. Morimoto, E. Saruwatari and T. Kobayashi : “Quasi velocity matched electrooptic phase modulator with domain inversion for deep microwave modulation,” CLEO '94, CME5 (1994) 21.
- 7) A. Morimoto and T. Kobayashi : “3 THz sideband generation by electrooptic modulation and an application to ultrashort pulse generation,” CLEO Pacific Rim '95 (1995).
- 8) 森本朗裕，小林哲郎，末田 正：“変調サイドバンドの選択制御による高繰返しビコ秒光パルス生成”，電子情報通信学会論文誌 C-I, **J73-C-I** (1990) 297-303.
- 9) 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.
- 10) T. Kobayashi, A. Morimoto, M. Doi, B. Y. Lee and T. Sueta : “Picosecond to femtosecond optical synthesizers,” *Ultrafast Phenomena VI*, ed. T. Yajima, et al. (Springer, Berlin, 1988) pp. 135-138; T. Kobayashi and A. Morimoto : “Electrooptical synthesis of ultra-short optical pulses,” 1989 OSA Proc. Topical Meeting on Picosecond Electronics and Opto-Electronics (1989) pp. 81-86.
- 11) T. Kobayashi, T. Sueta, Y. Cho and Y. Matsuo : “High-repetition-rate optical pulse generator using a Fabry-Perot electro-optic modulator,” Appl. Phys. Lett., **21** (1972) 341-343.
- 12) A. Morimoto, A. Shibagaki and T. Kobayashi : “Efficient ultrashort optical pulse generation using a modified Fabry-Perot modulator,” CLEO '93, 1993 OSA Tech. Digest, **11** (1993) 558-559.
- 13) M. Suzuki, H. Tanaka, N. Edagawa, K. Utaka and Y. Matsushima : “Transform-limited optical pulse generation up to 20-GHz repetition rate by a sinusoidally driven InGaAsP electroabsorption modulator,” J. Lightwave Technol., **LT-11** (1993) 468-473.
- 14) 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.
- 15) T. Kobayashi, H. Ideno and T. Sueta : “Generation of arbitrarily shaped optical pulses in the subnanosecond to picosecond region using fast electro-optic deflector,” IEEE J. Quantum Electron., **QE-16** (1980) 132-136.
- 16) T. Kobayashi, S. Hirasawa, A. Morimoto and T. Sueta : “Ultrafast optical signal processing using new type one-way optical beam scanner,” 1990 Int. Top. Meet. Optical Computing 12A2 (1990).
- 17) 小林哲郎：“自然放出を制御した機能発光素子”，特許第 1577615 号 (1990) (特願昭 57-160556 号)；小林哲郎，瀬川太郎，森本朗裕，末田 正：応用物理学会, 29 a-B-6 (1982).
- 18) 山西正道：“半導体中の輻射場の量子制御”，応用物理，**17** (1994) 885-897.
- 19) 山西正道：“量子井戸構造の仮想電荷分極による超高速光過程”，応用物理，**12** (1989) 1696-1707.

- 20) K. J. Blow, N. J. Doran and B. P. Nelson : "Demonstration of the nonlinear fiber loop mirror as an ultrafast all-optical demultiplexer," *Electron. Lett.*, **16** (1990) 962-964.
- 21) K. Tajima : "All-optical switch with switch-off time unrestricted by carrier lifetime," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) L1746-1749.
- 22) T. Kobayashi, A. Morimoto and T. Sueta : "Coherent push-pull transition for ultrafast optical switching," *1991 Quantum Electronics and Laser Science*, QWD21 (1991) pp. 144-145.
- 23) A. Takeuchi, T. Inata, Y. Nakata, S. Nakamura, Y. Sugiyama and S. Muto : "Picosecond signal recovery in type-II tunneling bi-quantum well etalon," *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 1892-1894.

全般的な参考文献として

- 24) 矢島達夫編:超高速光技術(丸善, 1989).
- 25) 末田 正, 神谷武志編:超高速光エレクトロニクス(培風館, 1991).