

解説

半導体レーザーからの超短パルス発生

神谷 武志

東京大学工学部電子工学科 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1993年10月26日受理)

Ultrashort Pulse Generation from Semiconductor Lasers

Takeshi KAMIYA

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. はじめに

光の持つ本質的な特徴のひとつはそれが極めて高い周波数の電磁波であることに基づく超高速性であり、その電子工学分野への応用のポテンシャルはつとに注目されていた。1980年代の量子エレクトロニクスを特徴づける活動にフェムト秒パルスを発生するレーザーの開発、パルス圧縮技法の考案、超高速検出技術の高度化、などが挙げられる。その主役はモードロック YAG レーザー、色素レーザーなどであり、各種科学計測には威力を発揮したものの、産業応用への道は遠く、より安定でコンパクトかつ安価な超短パルス発生源の実現を求める声は強かった。

■半導体レーザーはそのような要求を満たし得るもっとも有力なレーザーであり、MIT ハウス教授らの能動モードロック実験をかわきりに¹⁾、半導体レーザーからのピコ秒またはサブピコ秒パルス発生の試みは1990年前後以来の大きな流れとなり、今日に至っている^{2,3)}。現在の半導体レーザーの超短パルスを分類すると利得スイッチ法、モードロック法およびパルス圧縮法に分かれる。これに半導体レーザー光をポンプ源とする光ポンプレーザーを加えると、コンパクトなフェムト秒レーザーとしてはファイバーレーザーや LD 励起固体レーザーがあり、それらの将来性について検討することも重要である。本論文はこれらのアプローチの特色および問題点を要約し、今後の課題と思われる諸点を抽出することを目的とする。

2. 利得スイッチング

レーザー作用の本質である誘導放出過程の非線形性のために、反転分布の大きさと光子密度の間には複雑な関係が生じ、特に急激な共振器損失の抑制によって発生した過剰利得をもたらす巨大光パルスの発生は Qスイッチング特性と呼ばれ、回転ミラーや可飽和吸収帯を用いたものがレーザー開発の初期から詳しく調べられてきた。半導体レーザーでは電流注入によって急速な反転分布の変化を引き起こすことが可能なため、単に大きな電流パルスを印加するだけで過渡的な過剰利得を産み出すことができるので、これによる光パルス発生法を利得スイッチングと呼んでいる。

レーザーにステップ状の利得変化を与えたときに生じる緩和振動と密接な関係があり、利得スイッチパルスは緩和振動の第一のピークを切り取ったもの、という解釈を与えることも可能である。よって利得スイッチングによるパルスの幅は微分利得の大きさによって支配されることが容易に理解できる⁴⁾。

近年の半導体レーザーの解析によって瞬時利得の大きさは注入された過剰キャリア密度によって一義的に定まるのではなく、バンド内の非定常な分布の影響で部分的な抑圧を被る場合のあることが明らかになっている。その主要なものは強い誘導放出過程によって特定の運動エネルギーのバンド状態の占有率の低下するスペクトルホールバーニング効果と電子の平均運動エネルギーが大きくなって利得に直接寄与しない高エネルギー電子密度が増大するホットエレクトロン効果であるとされる。両

者とも光子密度の高いときに瞬時利得の低下をもたらすので現象論的なパラメータとして利得圧縮因子 (gain compression factor) ϵ が導入された⁹⁾。

われわれはこの効果を取り入れたレート方程式近似でパルス幅が約 100 ピコ秒の電流パルスで駆動した場合のパルス発生過程のシミュレーションを行い、波長 1.5 μm の DFB レーザーについての実験結果と比較し (図 1), 定性的な一致をみた⁶⁾。典型的な光通信用の半導体レーザーに対してはこの方法でパルス幅 20 ピコ秒程度までの短縮が可能である。電流パルスの振幅をさらに大きくしても利得圧縮効果のために微分利得は増大せず、したがってパルス幅の短縮には限界があり、むしろ蓄えられたキャリアによるダブルパルス生成などの不都合な動作が開始する。

利得スイッチング法のわく内でさらにパルス幅を短く

するにはモード間の競合を用いる方法がある。ナガラジヤンらは量子井戸レーザーの高次量子サブバンドによる短波長発振と基底サブバンドによる長波長発振の競合を用いてパルス幅 4 ピコ秒を発生させたが⁷⁾、同様の動作の再現性は最近笠原らによって確認されている⁸⁾。可飽和吸収領域をもつ半導体レーザーにおける偏波モード間の競合は河口らによって詳しく調べられ、短パルス発生、双安定性実現に有効であることが確認されている^{9,10)}。

利得スイッチング法の特徴は繰り返し周波数を駆動電流パルス源によって自由に選択できることであり、外部クロックによって制御できることが後述のモードロック法との基本的な違いである。

一方タイミングジッター特性はモードロックレーザーより劣るとする報告が多かったが、最近ジッター特性を厳密に抑えた測定システムを用いて利得スイッチ動作の

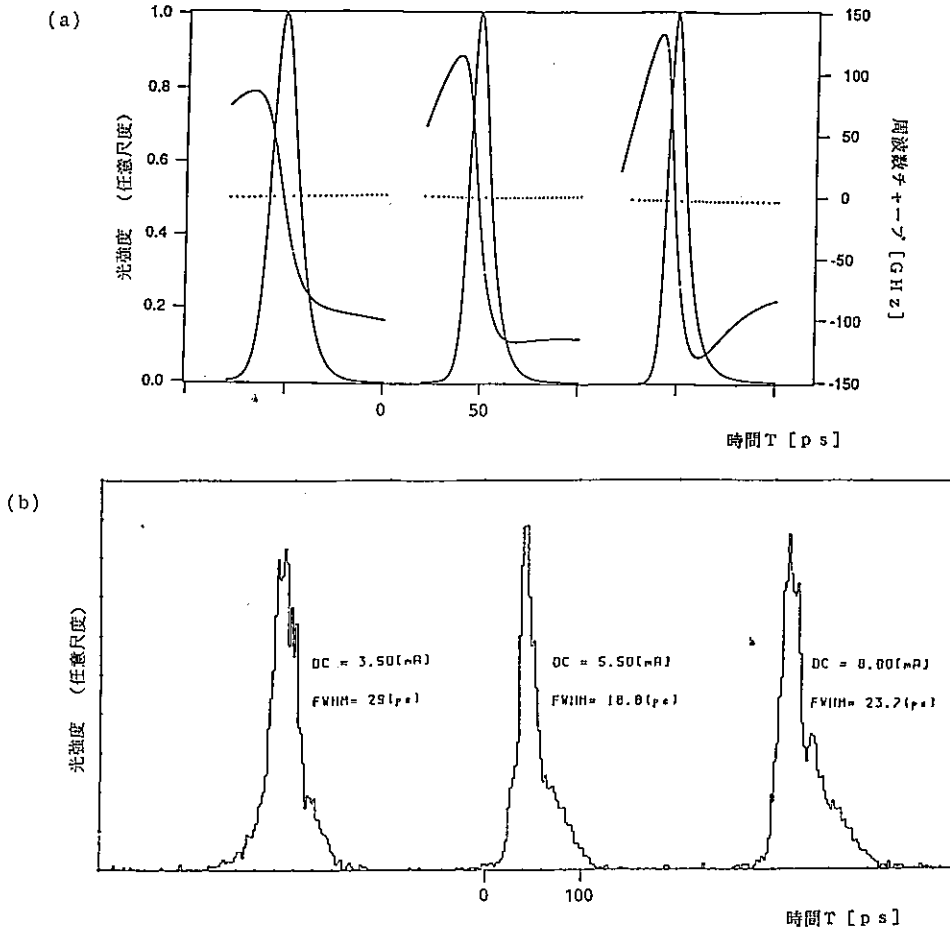


図 1 半導体レーザーの利得スイッチングによる短パルス発生
(a)シミュレーション, (b)実験結果。駆動パルス一定 (幅 100 ps) で直流バイアス電流を変化させた。(a)中の右下がり曲線はチャープ特性。

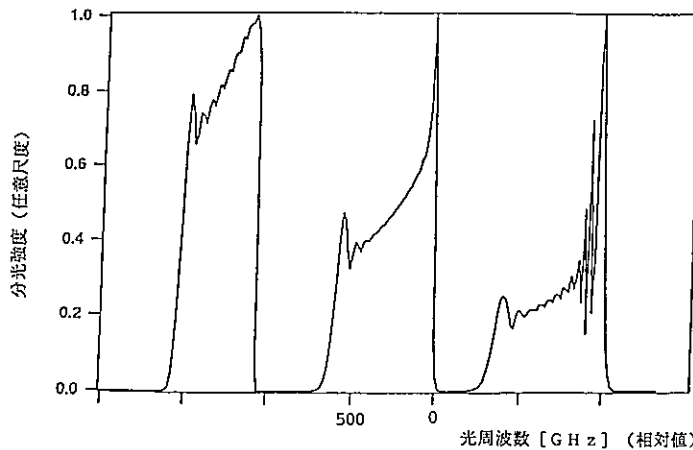


図2 利得スイッチ動作半導体レーザー出力の時間平均スペクトル(図1(a)と同一条件) 光周波数軸は相対値で左向きに増大。

タイミングジッターが1ピコ秒より大幅に下回ることを実証するデータがラウらによって報告され、おおきなジッターが自然放出の量子ゆらぎによる本質的なものであるとする解釈に疑問を投げかけることとなった¹¹⁾。今後の詳しい検討が待たれる。

利得スイッチングにおいては動作中にキャリア密度が急速に減少するために、プラズマ効果による屈折率の上昇がおこり、発振波長が長いほうへシフトするチャープ特性をもたらす(図2)。この特性はパルス圧縮のためには好適な現象であるが、そのためにはチャープ特性を精密に制御することが重要な課題となる。

3. モードロッキング

非線形結合部を有するレーザーにおいて共振器長で定まるモード間隔に相当する周波数の摂動を与えると周期変化の正帰還がおこり、共振器周回時間の繰返しをもつ超短パルス列を発生することが可能で、摂動の生じたことによって能動モードロック、および受動モードロックの区別がなされている。

通常の半導体レーザーにモード間隔に相当する周波数の高周波電流を加えたときに引き起こされる能動モードロック動作ではパルス幅に1ピコ秒以下とすることは困難であったが、可飽和吸収領域を付加して非線形結合を強めたものはサブピコ秒動作が可能となった。半導体レーザーは導波路型デバイスであり、入出力結合損失が大きく、外部鏡配置のモードロック系では共振器損失を低めることが困難であった。近年成功した単一基板結晶状に集積化されたモノリシックモードロック半導体レーザーは利得領域、可飽和吸収領域、共振器を一体化して

いるので動作が安定であり、特に両領域の間隔を1/4周期としてパルス可飽和吸収領域で衝突するように設計した衝突パルスモード同期レーザー(colliding pulse mode-lock laser; CPM laser)では0.6ピコ秒のパルス幅、繰返し周波数300GHzが得られている^{12,13)}。

モノリシックモード同期レーザーの問題点は、(1)短い共振器長では繰返し周波数が高くなりすぎて、通常のエレクトロニクスとの整合性に欠けること、(2)繰返し周波数が共振器長によって定められるので、外部制御の余地が少ないこと、また、(3)増幅領域の体積の限界からパルス当りの光エネルギーは典型的にはピコジュールに留まること、などである。ただしこれらについて(1)は長い共振器のCPMレーザーの試作が進められており(図3)¹⁴⁾、また(3)については外部にブースター増幅器を付加することで解決するか、半導体パワー増幅器と外部ミラーの組合せで増幅器体積を増す試みが進行している。

4. パルス圧縮

利得スイッチング動作半導体レーザーの問題点であるパルス幅について性能向上を図るためには外部にパルス圧縮装置を付加することが有効と考えられる。

第1の方法は分散ファイバーを用いて半導体レーザーからのチャープパルスを波形整形するもので、その動作原理は定性的には次のように理解される。パルスの立ち上がり部分の瞬時周波数が立ち下がり部分より高いいわゆるダウンチャープ特性の場合、もしファイバーの分散特性が正すなわち光速度が低周波成分ほど早くなるとパルス後縁部は前縁部に追いつく傾向を示す。適当な距離

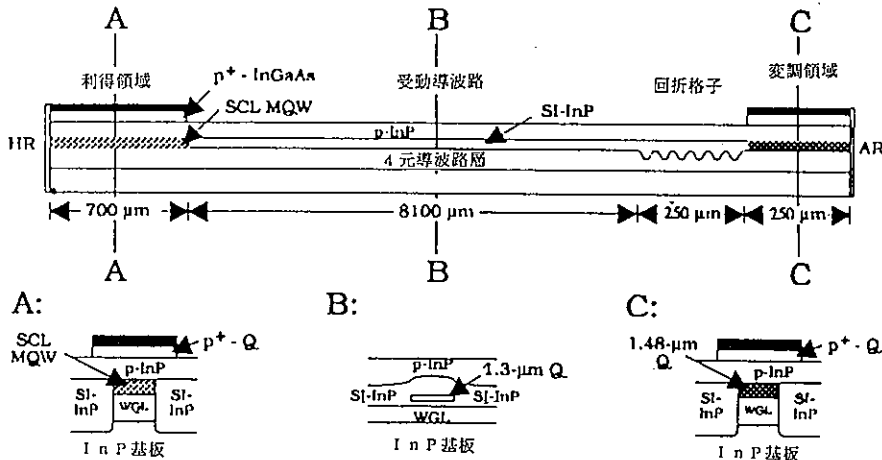


図 3 電界吸収型変調領域と一体集積化された長共振器ブラッグ反射型半導体レーザー
 MQW: 多重量子井戸, SCL: 歪補償層, Q: 4元混晶, WGL: 導波路層,
 AR: 無反射コーティング, HR: 高反射コーティング.

伝搬したときパルス幅は最小となることが期待される。実際にはファイバーの伝搬特性の有限帯域性のためにパルス幅がゼロになることは有り得ず、正しくは入射パルスの光電磁界をフーリエ変換し、ファイバーの伝達関数を掛けたのちフーリエ変換することによって出射パルスの波形が見積もられる¹⁵⁾。図4に利得スイッチ半導体レーザーからのパルスのファイバー分散効果を用いた圧縮実験結果の典型例を示す。再現性よくパルス幅約5ピコ秒を得ることが可能であった(図1と同一条件の実験結果)。

第2の方法はファイバーの3次非線形応答である自己位相変調効果にもとづくソリトンパルス伝搬特性を利用したパルス圧縮であって、非線形性をつよめるために光ファイバー増幅器を組み合わせて用いる¹⁶⁾。図5は著者

らを用いた利得スイッチ動作DFBレーザー、線形圧縮用ファイバー、エルビウムドープファイバー増幅器(EDFA)、およびソリトン圧縮用光ファイバーの組合せによるパルス圧縮系のブロックダイアグラムである⁶⁾。その動作原理はつぎのように考えられる。光ファイバー中の基底次数ソリトンとはファイバー中に光パルスを入射させたときに生ずる自己位相変調による圧縮性の傾向とファイバーの分散特性による拡大傾向とのバランスで定常状態が形成されるのであるが、もしファイバーの持つ分散の拡大傾向を上回る強いパルスが飛来した場合にはパルス幅は一定ではなく、伝搬方向に脈動することになる¹⁷⁾。このような振舞いをするパルスは高次ソリトンと呼ばれ、ソリトン周期をソリトン次数で除した長さの付近でパルス幅が最小に圧縮される。実際には概略の計

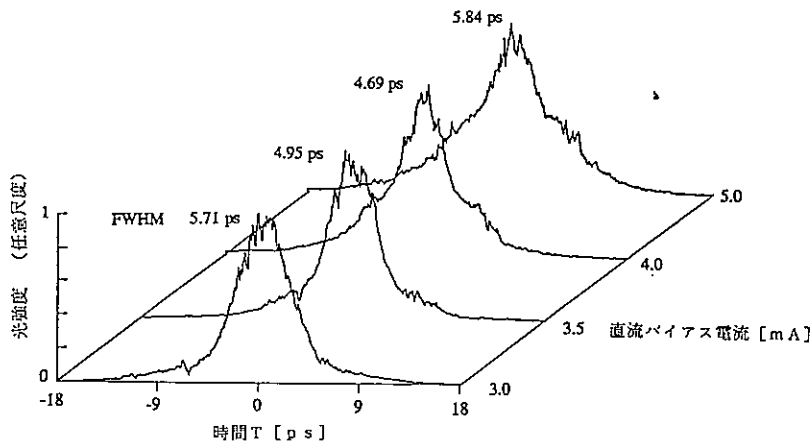


図 4 ファイバー分散特性を用いたチャープパルスの線形圧縮

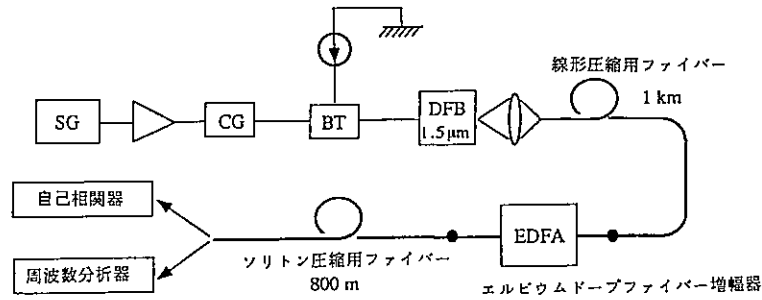


図5 半導体レーザー、ファイバー増幅器、分散ファイバーを用いたソリトン圧縮実験系のブロック図

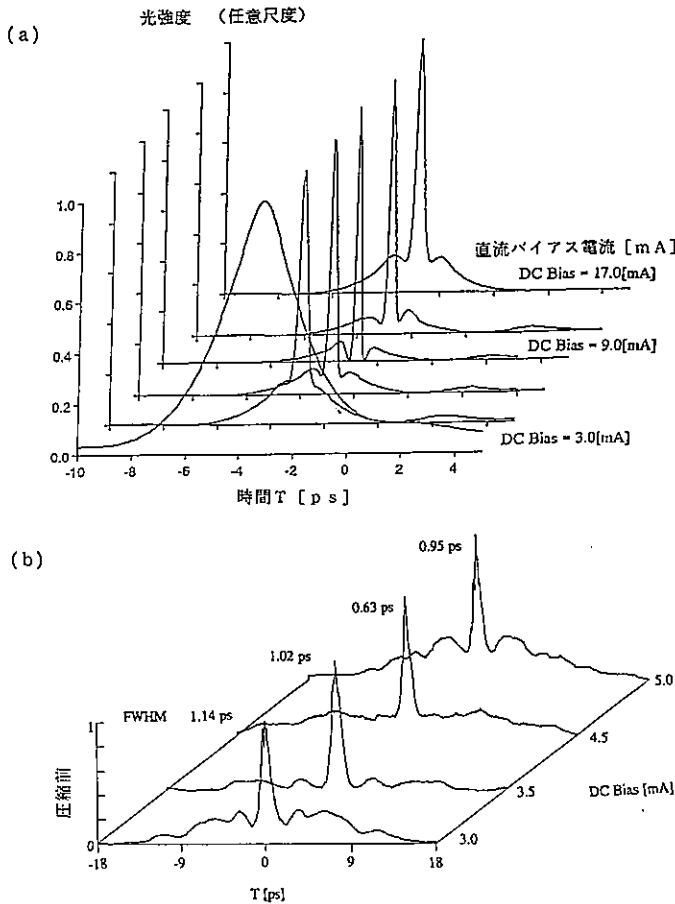


図6 高次ソリトン効果を利用した圧縮の(a)解析結果、(b)実験結果
半導体レーザーのバイアス電流を変化させるだけでソリトンの励振条件が変わりソリトン圧縮の最適条件が制御できる。

算によってファイバーの分散特性と半導体レーザーのチャープ特性を知って、ソリトン圧縮に適する最適なファイバー長を定めてセットを組み、そののちパルス幅をSHG 自己相関計によってモニターしながら利得スイッチ半導体レーザーの駆動条件を調節して最短パルス幅の条件を見いだすような作業を行った。図6は利得スイッチ半導体レーザーに与えるバイアス条件を変化させたときのソリトン圧縮パルスの自己相関特性の実験結果であ

り、非線形シュレーディンガー方程式を解析して得られるシミュレーション結果と定性的な一致が見られている。現在その再現性の向上および最適化の検討をさらに進めている。

5. 信号伝送および計測への応用

半導体レーザーからの超短光パルスの産業応用として注目される第1は情報伝送への応用であり、すでにソリ

トンパルスを用いた超長距離高速光通信システム研究が極めて活発化している¹⁸⁾。注目すべき成果は自然放出光の統計性に基づくジッターの蓄積現象を抑制する方法が二つ提案されたことであり、これによって原理的には伝送距離の限界は存在しなくなったと言える^{19,20)}。光通信システムは極めて高度の信頼性を要求する巨大システムであり、従来実績のある半導体レーザーを光源とするのが最も現実性があるように思われるが、半導体レーザーをポンプ源とするファイバーレーザーや固体レーザーはコヒーレンス特性が優れ、またファイバーとの接続損失が少ない、などの利点を持つため、将来的には総合的な比較が必要であろう²¹⁾。

実用化の近い他の研究対象に光プローブによる電子デバイス・集積回路の非接触・超高速サンプリング計測法が挙げられる。1981年ムールーらによって提案された電気光学サンプリング計測法は²²⁾いまやマイクロ波デバイス、回路の評価には不可欠な手法になったが、大型のモードロックレーザーを用いているために装置の安定性が十分でなく、また高価なことも欠点である。近年筆者のグループを含め半導体レーザーを光源とする電気光学サンプリングの計測システムの研究開発が進められ^{23,24)}、時間分解能 10 ピコ秒以下が実用レベルで達成されるようになってきた。超高速光エレクトロニクス工学から産業への展開のひとつのパスとして注目すべきものと考えられる²⁵⁾。

6. 結 び

半導体からの超短パルス発生法の原理の比較と著者らによるパルス圧縮実験の概要を述べ、異なるアプローチによるパルス発生の特徴と問題点を指摘した。

半導体レーザーはサブピコ秒の発生、100 GHz 以上のパルス繰返し周波数、小型、安定、などの特質を持つため、情報通信応用をめざした超高速光エレクトロニクスの基本デバイスとして今後も発展を続けると予想される。

文 献

1) P. T. Ho, L. A. Glasser, E. P. Ippen and H. A. Haus:

- Appl. Phys. Lett., 33 (1978) 241.
- 2) 伊藤弘昌: “超高速半導体レーザー”, 超高速光技術, 矢島達夫編 (丸善, 1990) 第6章.
- 3) 魚見和久: “超高速半導体レーザー技術”, 超高速光スイッチング, 荒川泰彦, 神谷武志編 (培風館, 1993) 第5章.
- 4) 今井 元: “半導体レーザーの高速化”, 超高速光スイッチング, 末田 正, 神谷武志編 (培風館, 1991) 第7章.
- 5) R. Olshansky, et al.: IEEE J. Quantum Electron., 23 (1987) 1410.
- 6) J. T. Ong, R. Takahashi, M. Tsuchiya, S. H. Wong, R. Sahara, Y. Ogawa and T. Kamiya: J. Quantum Electron., 29 (1993) 1701.
- 7) R. Nagarajan, T. Kamiya, A. Kasukawa and H. Okamoto: Appl. Phys. Lett., 55 (1989) 1273.
- 8) 笠原征夫: 私信.
- 9) H. Kawaguchi, H. Iwata and N. Tan-no: Jpn. J. Appl. Phys., 30 (1991) L1402.
- 10) H. Kawaguchi and T. Irie: Electron. Lett., 28 (1992) 1645.
- 11) P. Pepeljugoski, J. Lin, J. Gamelin and K. Y. Lau: OFC/IOOC '93 (San Jose, Feb. 1993) TuM6, 64.
- 12) Y. K. Chen and M. C. Wu: J. Quantum Electron., 28 (1992) 2176.
- 13) D. J. Derickson, R. J. Helkey, A. Mar, J. R. Karin, J. G. Wasserlauer and J. E. Bowers: J. Quantum Electron., 28 (1992) 2186.
- 14) P. B. Hansen, G. Raybon, U. Koren, B. I. Miller, M. G. Young, M. A. Newkirk, M. D. Chien, B. Tell and C. A. Burrus: Int. IEEE Semiconductor Laser Conf. (Takamatsu, Sept. 1992) PD-6.
- 15) Y. T. Lee, R. Takahashi and T. Kamiya: Jpn. J. Appl. Phys., 29 (1990) L 89.
- 16) M. Nakazawa, K. Suzuki and E. Yamada: Electron. Lett., 26 (1991) 2038.
- 17) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, New York, 1989).
- 18) 岩月勝美: “光通信・光交換への応用”, 超高速光スイッチング, 荒川泰彦, 神谷武志編 (培風館, 1993) 第10章.
- 19) M. Nakazawa, K. Suzuki, E. Yamada, H. Kubota, Y. Kimura and M. Takaya: OFC/IOOC '93 (San Jose, Feb. 1993) PD-7.
- 20) L. F. Mollenauer, J. P. Gordon and S. G. Evangelides: Opt. Lett., 17 (1992) 1575.
- 21) 張 吉夫: “超短光パルス”, 極限光技術, 森村正直監修 (オプトロニクス社, 1993) 2. 1章.
- 22) J. A. Valdmanis, G. Mourou and C. W. Gable: Appl. Phys. Lett., 41 (1982) 211.
- 23) 神谷武志, 高橋 亮: 応用物理, 61 (1992) 30.
- 24) R. Sahara, R. Takahashi, J. T. Ong, M. Tsuchiya, Y. Ogawa and T. Kamiya: CLEO '93 (Baltimore, May 1993) CThS87.
- 25) 青島紳一郎, 高橋宏典, 土屋 裕: 電気学会論文誌 C, 111-C (1991) 145; 高橋宏典, 青島紳一郎, 平野伊助, 土屋 裕: オプトロニクス, 6月号 (1993) 85.