

# 解 説

## 超高速光の物理

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

(1995年4月20日受理)

### Some Physical Problems of Ultrafast Optics

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—超高速光制御の必要性

レーザー光の特質の一つは超高速性である。すでに1966年にはモードロック法による固体レーザーからの超短パルス列の発生が確認されている<sup>1)</sup>。その後色素レーザーや、最近のチタンサファイアレーザー等を用いたモードロック動作で幅10 fs前後のパルスが再現性よく作られるようになってきた。これらは物質の時間分解分析に威力を発揮した。1980年代は物理学、化学、の基礎的研究の有力手段として超短パルスレーザーが広く導入された時期である。またそれらを用いて情報の伝送や処理、あるいは工業計測に用いようとする考えも現れ、ピコ秒光エレクトロニクスと称せられた<sup>2)</sup>。さらに強い光パルスが誘起する非線形効果も魅力的な現象であり、非線形光学の基礎および応用の展開が加速された。その一つの例が光ファイバー中におけるソリトンパルスの励振と伝搬である。1973年に理論的に提案されたソリトン光伝送の構想は実験技術の成熟を待って1980年代後半になりようやく実験的な確認が行われ、その後の現実的なソリトン方式超長距離光伝送システム研究の端緒となった<sup>3)</sup>。ソリトン効果を含む種々の非線形光学効果が詳しく調べられ、その後の各種光制御の準備となつた<sup>4)</sup>。

これらの準備のもとで1990年代になると光の超高速性を生かした応用を積極的に開拓しようとする考えはさらに加速され、その研究動向は要素技術からシステム技術におよぶ広がりをもつようになってきた<sup>5)</sup>。これらの中で電子回路技術の速度限界を越える超高速の光制御が

求められるようになり、従来の電子システムの設計・制御技法とは異なる方策が模索されるようになった。光による光制御を始めとする新しい物理的原理の研究が活発化するようになってきた<sup>6)</sup>。

超高速光技術の最近の動向の手掛かりとして、通商産業省の産業科学技術研究制度のもとに平成7年度よりプロジェクト研究が発足することになった「フェムト秒テクノロジー」の基礎調査報告書<sup>7)</sup>、および最近の当該分野の専門家会議予稿集<sup>8)</sup>、を挙げておく。

本稿では光制御を目的意識にもちつつ、超高速光現象に現れる興味深い物理的な問題のいくつかに関し筆者のグループで検討した結果を解説する。

#### 2. 超高速光に対する物質の応答

光を制御するにはほとんど必ず光と物質の相互作用が利用される。そこで物質の応答特性を知ることが重要である。

超短光パルスの一つの特徴はたとえコヒーレントなレーザー光であっても、スペクトルが拡がり、単色光とはみなせなくなる、という事実である。波長が1μmでパルス幅が100 fsの光インパルスを考えると約5 nmのスペクトル拡がりが生じている。複素誘電応答の実部および虚部を周波数の関数として取り扱うことが必要になってくる。吸収性的媒質にはクラマースクロニッヒの関係によって屈折率の周波数依存性すなわち分散特性が付随する。それぞれの周波数成分によって伝搬遅延が異なるから入射光と出射光の時間波形は異なる。このことを積極的に利用すればパルス圧縮を行うことができる。

さらに超短パルスへの物質応答の興味深い現象は物質が熱平衡状態からはずれた分布をもつ状況でしばしば見出される。もっともポピュラーな実験方法はいわゆるポンプアンドプローブ法であって時間間隔  $t$  の二つの超短パルスを用意し、第1のパルスで物質をポンプして非平衡状態を生ぜしめ、第2のパルスで光学応答の変化を探る。変化を遅延時間  $t$  の関数としてプロットすれば物質の緩和過程が直接的な形で捕捉可能となる。

パルス光の強度が強くなると多光子過程が重要になる。非線形光学効果は単純な波長変換に限らず多様な効果をもたらす。先に触れたソリトン効果や誘導ラマン増幅、4光波混合効果などは応用上も重要である。

### 3. 光ファイバー中パルス伝搬と偏光フィルタリング

超高速光技術の応用において安定な超短パルス光源を得ることが重要である。筆者らは半導体レーザーを利得スイッチング動作させて得られるパルスの波形整形によって任意繰返し周波数で安定なパルス列発生を試みた。利得スイッチ動作によって駆動電気パルスよりも短いパルス幅が得られることが知られているが、パルス波形には裾引きが残り、応用上不十分である。またパルス発生時にキャリア密度が減少するために発振の瞬時周波数が低い方へ変化する（レッドシフトチャーブ）ことが知られている。この事実を利用して適切にスペクトルフィルタリングを行えばきれいな波形の得られる可能性がある。筆者らは図1に示すような偏光フィルタリングの実験配置によってチューナブルなフィルタリングを行った<sup>9)</sup>。波長  $1.55\mu\text{m}$  のDFBレーザーからの光パルスをエルビウムファイバー増幅器で増幅する。ここで伝送路に複屈折性があるために直線偏光入射に対して出射光は

さまざまな偏光状態をとる。複屈折性は直交成分の遅延時間差で表されるが、遅延時間が波長によって異なるため出射側にアナライザーを置くと波長成分によって透過率が変わる。 $1/2$  および  $1/4$  波長板を挿入し、角度を調節することによってフィルターの中心波長を合わせることが可能である。図2(a)の破線が元のスペクトルで実線がフィルタリング後であり、対応して(b)に示すようなほとんどフーリエ変換極限に近い波形（時間帯域積0.38）が得られた。

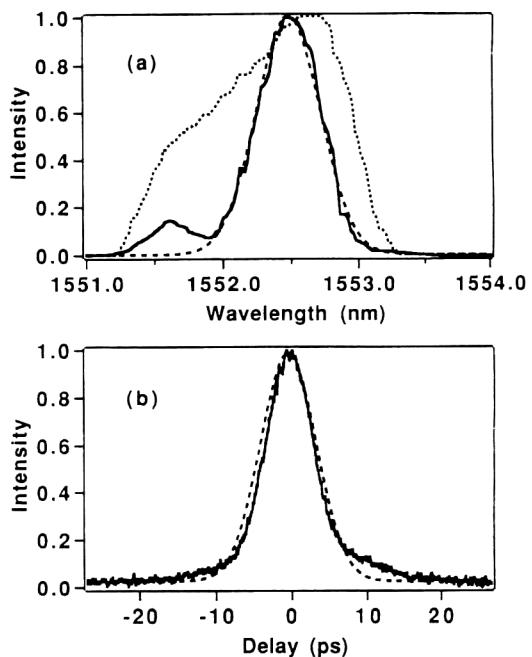


図2 偏光フィルタリング実施による利得スイッチパルスのスペクトル変化(a)とフーリエ変換極限に近い自己相関トレース(b)<sup>9)</sup>

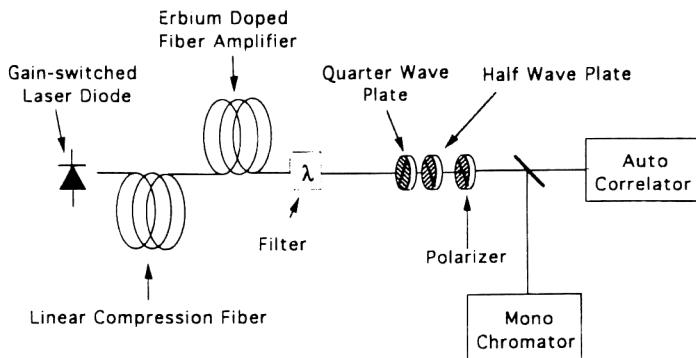


図1 ファイバーの複屈折分散を利用した波長フィルタリング実験系<sup>9)</sup>

#### 4. 微小共振器中の量子井戸可飽和吸収体

パルス光制御のためには制御光に対する感度が高いことが望ましいが、従来良く知られた非線形光学材料では大きなスイッチングエネルギーが必要とされる。近年注目されている物質として化合物半導体超格子構造がある。量子井戸に閉じ込められたエキシトンの共鳴吸収によってかなりの吸収変化が期待できる。ただし半導体レーザーをポンプ光源とすると感度は未だ不十分である。筆者らは図3に示すような微小共振器にMQW構造を作り付け、共鳴効果による感度向上があるか、を実験的に試してみた<sup>10)</sup>。ここでエキシトン吸収の中心波長、ブリッジ反射器の共鳴波長およびモードロックチタンサファイアレーザーの中心波長は概ね一致させている。中心波長および入射光強度を少しずつ変化させて測定した透過光強度を図4に示す。共振器のない構造の応答(黒)

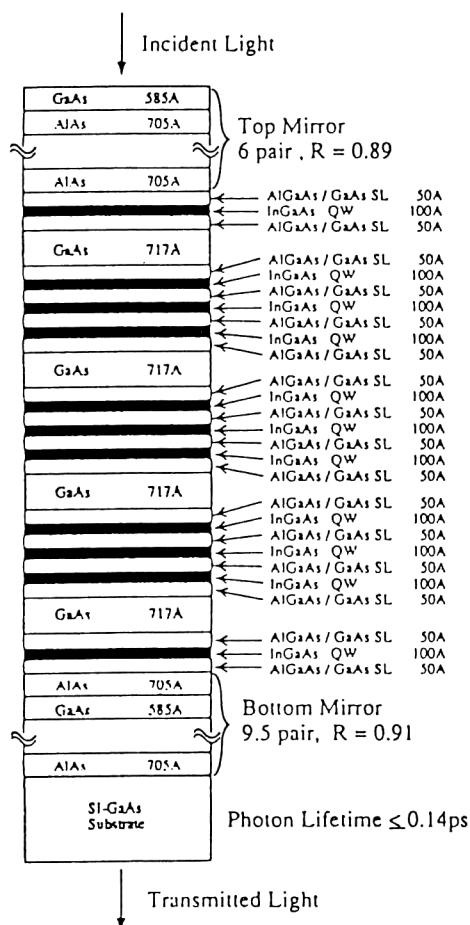


図3 InGaAs 歪超格子可飽和吸収体を含む微小共振器構造断面図<sup>10)</sup>

丸)と比較すると透明化のしきい値パワーが約2桁高感度化していることがわかる。図5は横軸にレーザーパルス中心波長をとり、共鳴吸収特性が入射光強度によってどのように変化するかを見やすくしたものである。入射光強度が増えるにつれ、共鳴ピークが連続的にシフトする傾向が明らかである。このように本構造のパルス応答は可飽和吸収と非線形エタロン効果の混合したものであることが明らかになった。定量的な理解については現在検討中である。

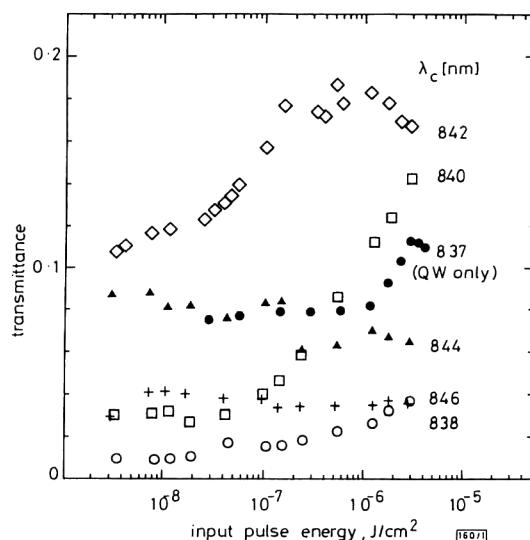


図4 3.8 psパルスの透過強度の入射光強度依存性<sup>10)</sup>

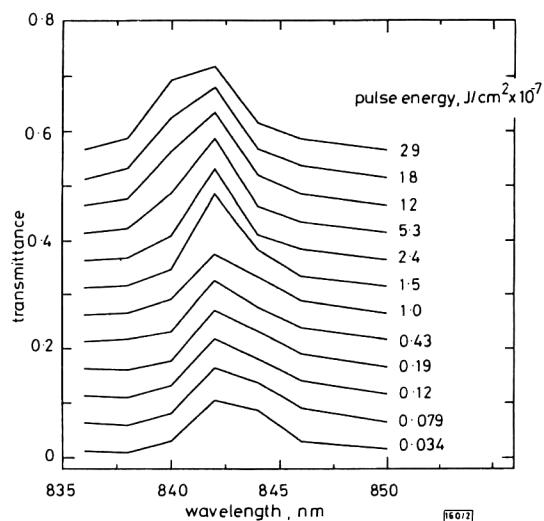


図5 透過光強度を入射光中心波長の関数としてプロット<sup>10)</sup>

## 5. 半導体レーザーの非線形チャープ

半導体レーザーのチャープ現象の利点の一つは適当な分散素子と組み合わせることによりパルス圧縮が行えることである。パルス前縁の周波数成分に対する光速は遅く、後縁の成分は早いような分散媒体を通過させることによっていっそう短いパルスを取り出すことが可能になる。ただしこのことが正確に実行できるためには瞬時周波数が時間と線形関係でシフトする必要があるが、現実の半導体レーザーでは駆動条件によってさまざまな程度の非線形チャープ特性を呈する。これらの事情を明らか

にする有力な実験手法に回折格子分光器とストリーカカメラを組み合わせた時間分解スペクトル直視法が知られている。

図6(a)に波長  $1.55\mu\text{m}$  のDFBレーザーを利用し、スイッチ動作させたときのチャープシフトパターンを示す<sup>11)</sup>。ただしデータの解釈にあたっては十分な注意が必要とされる。光周波数にプランクの定数を乗ずると光子エネルギーとなり、時間とエネルギーの不確定性関係によりこのチャートには分解能のぼやけが本質的に存在する。このことを考慮して線形および非線形チャープパラメータを推定するために筆者らは短時間フーリエ変換法

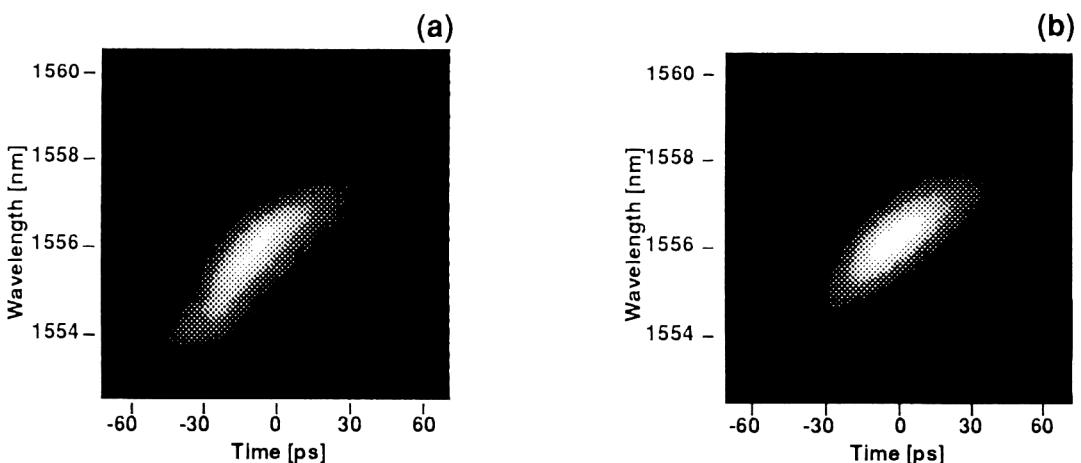


図6 回折格子分光器とストリーカカメラの組合せによる時間分解スペクトルの2Dトレース(a)とシミュレーション(b)<sup>11)</sup>

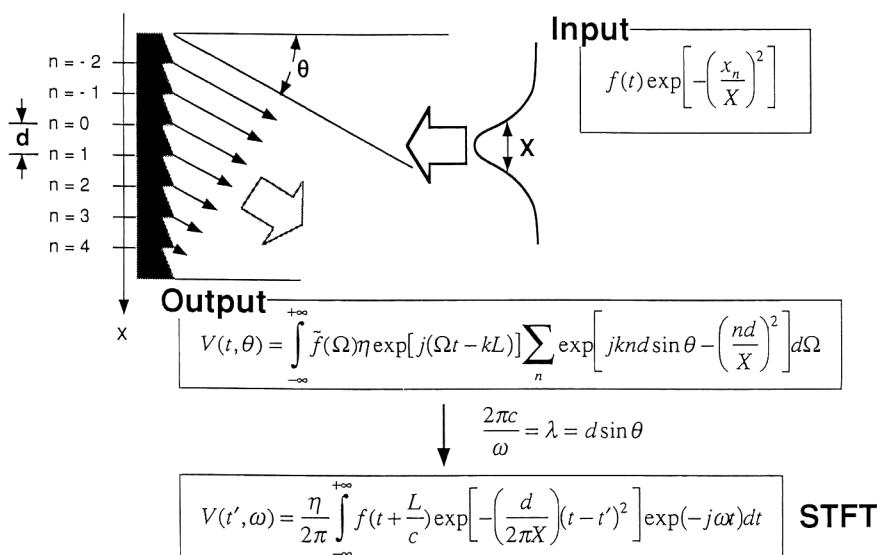


図7 有限ビーム幅( $X$ )で照射された回折格子による時間遅延を考慮した出力の理論表式(STFT)

(STFT) を適用したシミュレーションプログラムを開発した。図7に示すように波長(すなわち光周波数)の分解能を支配するのは回折格子を照射する光ビーム幅  $X$  であるが、これにともなってビーム内の位置に依存した位相遅延が生ずる。これらを加え合わせることによってガウス関数を積分核とする STFT 積分変換表式が得られる。線形および2次のチャーブパラメータ  $C_1$ ,  $C_2$  を含む入射波形を仮定してチャーブ特性マップを求

め、実験結果との最小自乗和条件からパラメータを推定する手続きをとった。シミュレーション結果を図6(b)に示す。同様の作業を種々の駆動条件で発生した光パルスについて実行し、チャーブパラメータの駆動条件依存性を追跡した。駆動パラメータとしてRFパワー、DCバイアス電流、およびヒートシンク温度をとった。推定結果を図8に示す。これからわかるることは、非線形チャーブを小さくするには出力パワーを大きくすることを避

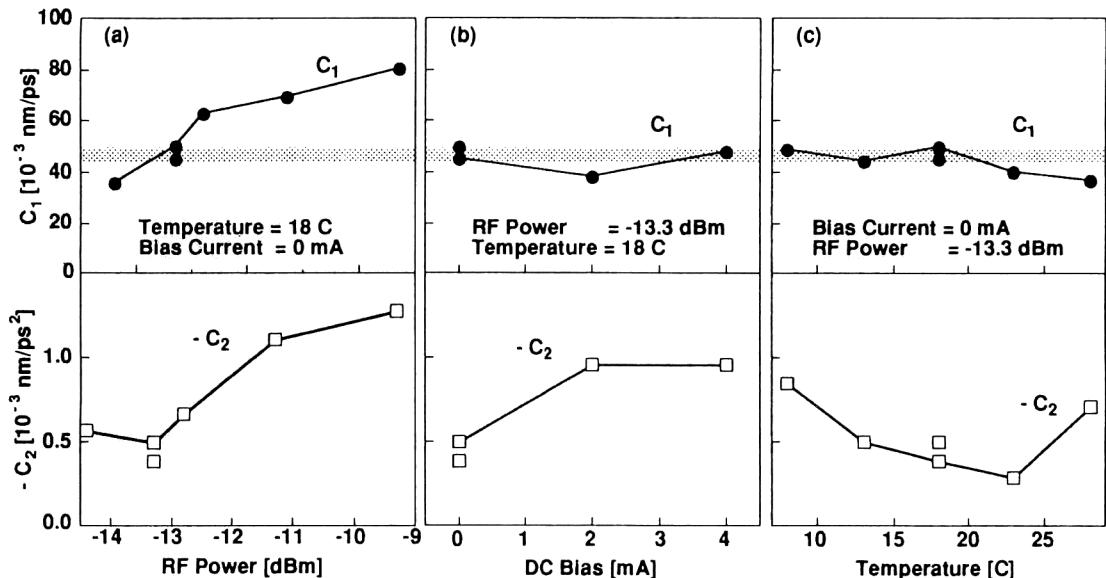


図8 線形( $C_1$ )および非線形( $C_2$ )チャーブパラメータの駆動条件依存性(RF電力、DC電流、動作温度)<sup>10)</sup>

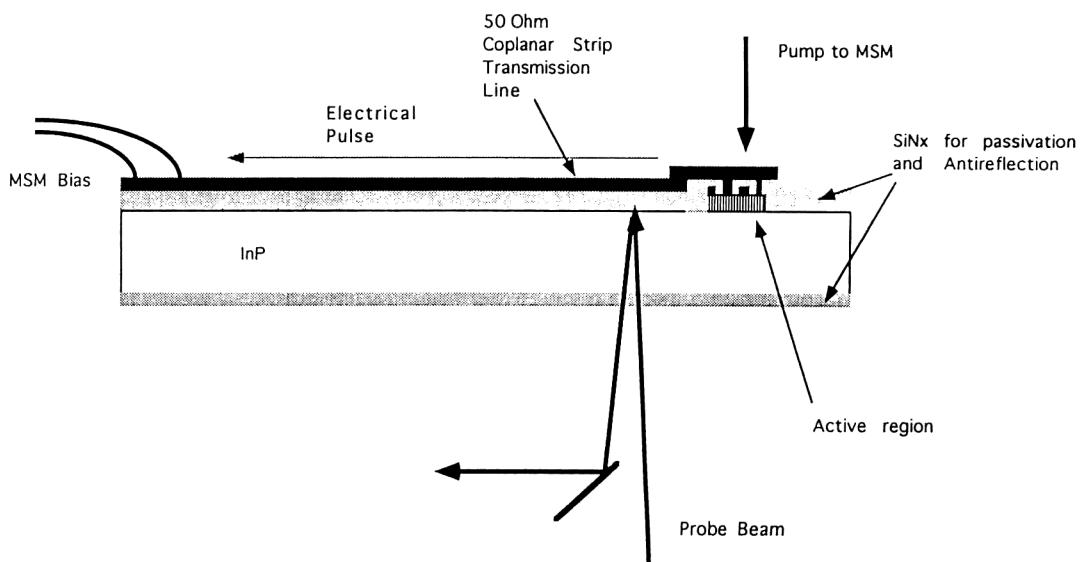
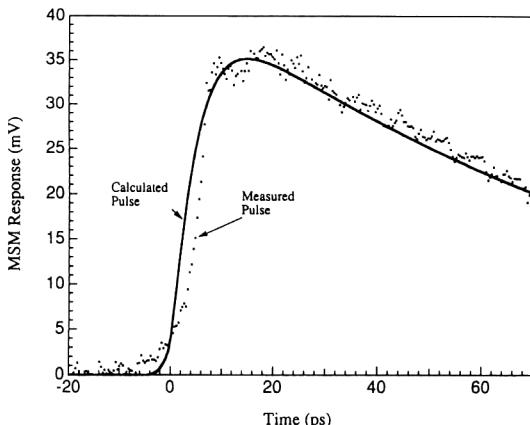


図9 ソリトン圧縮光パルスを用いたInGaAs高速受光デバイスの電気光学サンプリング測定<sup>12)</sup>

図 10 立ち上がり時間特性測定結果<sup>12)</sup>

け、小さくきれいなパルスを発振させ、その後ファイバー増幅器でパワー増幅するのが有効である。

実際に利得スイッチ条件を最適化し、線形チャーブを補償する正常分散ファイバーによって線形圧縮したのちエルビウムドープファイバー増幅器を通し、その後わずかに異常分散を示すファイバー中に高次ソリトンパルスを発生させ、ソリトン長に対して分数の距離で取り出すことによってソリトン圧縮を行い、裾引きの少ない半値全幅（自己相関波形）0.6 ps のパルス列を得ることができた。筆者らはさらにこのような超短光パルスの応用として電気光学サンプリングによる高速デバイスの評価を試みた。すなわちコプレーナー配置ストリップ線路上にモノリシック集積化されたInGaAs長波長MSM（metal-semiconductor-metal）フォトダイオードを作成し、その応答を測定した（図9）<sup>12)</sup>。代表的な測定結果を図10に示す。立ち上がり時間6 psには装置の時間分解能2 psが含まれていると推定された。

## 6. む す び

本報告では超高速光パルスを制御する際に現れる時間軸と周波数軸上の相関の問題を偏光フィルタリング、マイクロキャビティによる可飽和吸収体の共鳴増感、利得スイッチ動作半導体レーザーの非線形チャーブパラメー

タ推定法と最適パルスの電気光学サンプリングへの適用を例として略述した。

超高速光現象の制御に関する興味深い問題はこれらに止まらない。文部省科学研究費重点領域研究「超高速超並列光エレクトロニクス」が1994年に終了し、本年中に成果をまとめた英文図書が発刊されるが、多くの斬新な問題提起がなされている<sup>13)</sup>。その他の最新研究例として毎秒200 Gbit のデジタル信号を100 km 光ファイバ一伝送し、4光波混合効果を用いて信号分離を行った実験報告<sup>14)</sup>、および超短パルスレーザーをマスターレーザーとする遠赤外域超短パルス（テラヘルツ）による不透明物質のイメージング<sup>15)</sup>を挙げる。今後のいっそう豊かな展開が期待される。

## 文 献

- 1) A. Yariv : *Optical Electronics*, 4th ed. (Saunders, Fort Worth, 1991) Chapter 6.
- 2) C.H. Lee : *Picosecond Optoelectronic Devices* (Academic Press, New York, 1984).
- 3) 長谷川晃：物理学最前線 20 ファイバー中の光ソリトン、大槻義彦編（共立出版、東京、1988）。
- 4) G.P. Agrawal : *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, New York, 1989).
- 5) 末田 正、神谷武志編：超高速光エレクトロニクス（培風館、東京、1991）。
- 6) 神谷武志、荒川泰彦編：超高速光スイッチング（培風館、東京、1993）。
- 7) NEDO 平成5年度調査報告書 フェムト秒テクノロジー（産業創造研究所、東京、1994）。
- 8) OSA Technical Digest “Ultrafast Electronics and Optoelectronics” (March, 1995).
- 9) B. Thedrez, H. Takeshita and T. Kamiya : Appl. Phys. Lett., **65** (1994) 3057.
- 10) Y. Matsunaga, M. Tsuchiya and T. Kamiya : Electron. Lett., **30** (1994) 1780.
- 11) H. Takeshita, M. Tsuchiya and T. Kamiya : Tech. Digest, “Ultrafast Electronics and Optoelectronics” (1995) p. 77.
- 12) R. T. Sahara, H. Takeshita, K. Miwa, M. Tsuchiya and T. Kamiya : IEEE J. Quantum Electron., **31** (1995) 120.
- 13) T. Sueta and T. Okoshi eds. : *Ultrafast and Ultra Parallel Optoelectronics* (Ohm Publishing/John Wiley, Tokyo/London, 1995) to be published.
- 14) S. Kawanishi, H. Takara, T. Morioka, O. Kamatani and M. Saruwatari : OFC '95, San Diego (Feb., 1995) PD 28.
- 15) B.B. Hu and M.C. Nuss : UEO '95, Dana Point (March, 1995) PD 2.