

フェムト秒光エレクトロニクスデバイスの展開

和田 修

半導体レーザーや石英ガラスファイバーの開発によって可能となった光通信技術は、1980年代前半から実用化が開始されて以来、社会インフラ技術としてすっかり根づいた。その間通信容量は指数関数的に増大してきたが、この増大は時間多重 (TDM) 方式におけるビットレートの上昇によって達成され、現在 10 Gb/s が実用化されている。その一方で近年波長多重 (WDM) 方式の実用化が急速に進み、ネットワークの大容量化に貢献している。すでに 3 Tb/s 以上の大容量化の可能性を示す研究結果もいくつか発表されるようになってきた^{1,2)}。一方、近年のインターネットや携帯電話の爆発的な普及に現れているとおり、情報通信ネットワークにはますますの大容量化が望まれており、たとえば 2010 年には 5 Tb/s、2015 年には 10 Tb/s の国際統合ネットワークの実用化が予測されている³⁾。このような大幅な大容量化を達成するには、単に WDM の波長チャンネル数を増大するだけで解決できるものではなく、超高速化技術のさらなる推進が不可欠になるものと考えられる。そのためには、TDM 方式の高速化において数十 Gb/s 以上で早晚壁となると考えられる電子デバイスや配線の速度限界を克服するため、全光デバイスをベースとした光時間多重 (OTDM) 方式によるネットワーク技術の実現が切望される。OTDM の研究はこれまでも 100 Gb/s 以上⁴⁾、最近では 640 Gb/s⁵⁾ までの超高速化が報告されているが、光デバイスとしては光ファイバーを基本としたものに限られており、小型、安定で実用的な固体デバイスはまだ開発されていない。

このような背景から、大容量 OTDM を可能とするフェムト秒領域の超高速光デバイスの開発が、1995 年から開

始された「フェムト秒テクノロジー」プロジェクト⁶⁻⁸⁾の一環として進められており、また世界的にみても、欧米のプロジェクトや国際学会での論文数などに超高速化技術の研究が活発化していることがうかがえる。本稿では、これら超高速光デバイスの研究動向を展望することを目的として、上記プロジェクト研究における FESTA の研究を中心とした最近のトピックスを紹介する。フェムト秒レーザー、計測、応用などの技術全般について、およびファイバーベースの光通信デバイスなどについては最近出版された成書⁹⁾や他の文献¹⁰⁾に譲り、以下では半導体を中心とした新原理に基づく光源デバイス、光スイッチングデバイス、および将来に向けた新材料・新現象などについて概要を述べる。

1. フェムト秒光デバイスの研究アプローチ

従来の半導体光デバイスの動作速度は、ほとんどの場合キャリアの再結合速度で制限されており、ピコ秒さらにはフェムト秒領域の速度を実現するためにはこれを打破する新しいデバイス原理が必要である。図 1 に、超高速光通信に必要なキーデバイス、各種デバイスを実現するための基本的手法、この手法を半導体などの固体材料で実現するための物理現象および材料構造、などの相互の関係を示す⁸⁾。

最も基本的なキーデバイスは、超短パルス光源と光スイッチとによってよかろう。超高速動作を実現するためには、モードロックなど既存の手法を集積化デバイス構造の中で活用することによるアプローチに加え、図 1 の下段に例示したような、既存のデバイスには用いられてこなかった新しい物理現象やナノ量子構造など新材料構造をうまくデバイス構造の中に取り込むことによって、光および電子状態を制御し、デバイス機能を実現していく挑戦的なアプロー

技術研究組合フェムト秒テクノロジー研究機構 (〒300-2635 つくば市東光台 5-5)
E-mail: owada@festa.or.jp

Function	Generation	Transmission	Control	Distribution
Key devices	Femtosecond laser Optical regenerator Ultra-low dispersion waveguides		All-optical switch (space, time and wavelength)	
Basic technique	Mode-locking		Ultrafast relaxation	
	Dispersion control		Optical nonlinearity enhancement	
Physics	Control of optical field and electron states			
	Microcavity	Quantum wires and dots	Intersubband transition	
	Photonic band	Exciton-polariton	Spin relaxation	

図1 超高速デバイス技術におけるキーデバイス、基本的手法および物理現象、材料構造の相関図。

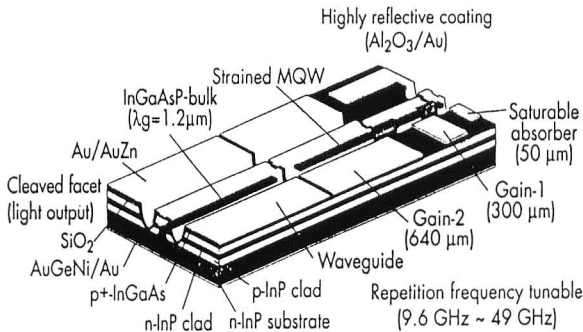


図2 InGaAs/InP モノリシックモードロックレーザーの構造。(S. Arahira, *et al.*¹²⁾による)

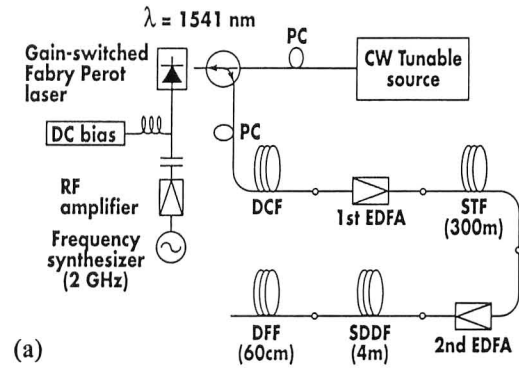
チが是非必要と考えられる。以下では、このような新デバイス原理の確立に向けて具体的に進められている研究をいくつか紹介する。

2. フェムト秒光源デバイス

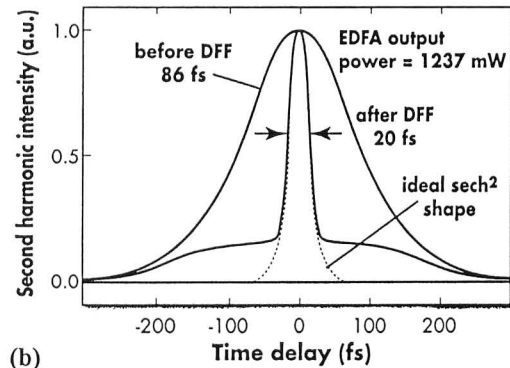
フェムト秒領域の極短パルス発生のための代表的な方法として、モードロックレーザーによる直接発生、および利得スイッチレーザーで発生するピコ秒パルスを圧縮する方法などがある。半導体基板上に集積されたモノリシックモードロックレーザーでは、短共振器長と広帯域性という半導体の特徴によって高繰り返しでフーリエ変換限界の良好な光パルスが得られる利点がある。一方、利得スイッチレーザーによれば任意の繰り返し特性が得られ、外部圧縮デバイスの最適化によって極短パルス発生も可能となる。

2.1 モノリシックモードロックレーザー

図2に沖電気グループで製作されているInP基板上にモノリシック集積したモードロックレーザーの構造の例を示す¹¹⁾。利得セクション、受動導波路セクションおよび可飽和吸収体から成り、可飽和吸収体側の端面が高反射膜となっているため、等価的に衝突パルスモードロック構造を形成している。共振器長によって繰り返し周波数は10~50 GHzで変化する。



(a)



(b)

図3 (a) 多段ファイバー圧縮器によるフェムト秒パルス光源のブロック図、(b) 圧縮パルス出力の自己相関波形。(Y. Matsui, *et al.*¹⁹⁾による)

すでに外部ファイバーの圧縮および遜倍により500 fsパルス発生¹²⁾や、196 GHz 繰り返し¹³⁾が実現されている。最近では、短共振器を用いた高繰り返し化など性能向上が進んでいるが、詳細は別の報告を参照されたい¹⁴⁾。

極短パルス光源の実用化に向けて低ジッター化がきわめて重要になってくる。EDFAリングレーザーをマスターレーザーとした高調波光注入同期法により、160 GHzで繰り返し動作時のジッターとして260 fs (フリーランニング時は2.2 ps)までの低減が達成されており(注入光パワー57 μW)¹⁵⁾、有力な動作安定化の方法として注目される。また、このような高効率な同期特性と、利得状態における高速応答特性とを活用して、モードロックレーザーを光ゲートやクロック回復などに応用する試みがある^{16,17)}。すでに40 Gb/s → 10 Gb/s DEMUX (demultiplexing)動作¹⁶⁾が報告されており、モードロックレーザーの幅広い応用を示すものとして今後の進展が期待される。

2.2 ファイバーパルス圧縮光源

半導体レーザーとファイバー圧縮器を用いるフェムト秒領域の極短パルス光源は小型・安定な可搬光源として重要である。これまでに3 ps入射パルスを65 fsに圧縮した例¹⁸⁾があるが、最近ソリトン圧縮を含めた多段ファイバー圧縮器の最適化によって著しい進展があった。図3(a)

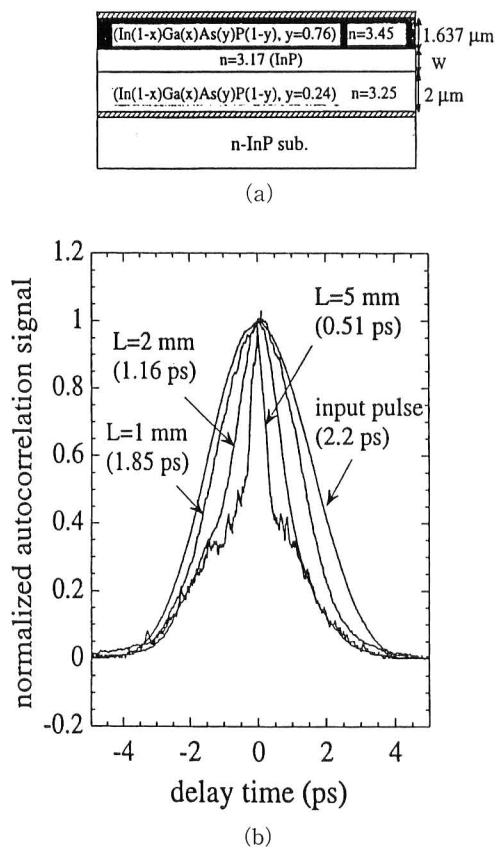


図4 (a) 結合導波路構造による群速度分散補償デバイスの断面構造図, (b) 入力パルスおよび長さの異なるスラブ導波路伝搬後の出力パルスの自己相関波形. (Y. Lee²²⁾による)

はFESTAで構成された光源システムのブロック図を示す。システムは、標準的な単一モード伝送ファイバー(STF)による3次ソリトン圧縮, EDFAによるソリトンの狭帯化, 階段状分散減少ファイバー(SDDF)による断熱圧縮, および分散平坦化ファイバー(DFF)による高次ソリトン圧縮が, 連続的に行われる構成となっている¹⁹⁾。図3(b)は, 1.55 μm波長で7.5 psのレーザーパルスから圧縮を行って得られた出力の自己相関波形を示しており, パルス幅として20 fs(圧縮比: 375, 4光周期に対応)の半導体レーザー光源として最短パルス幅が実現されている。さらに, パルス波形にみられるペDESTAL成分を除くための最適設計²⁰⁾や, 構成の簡略化²¹⁾などが進んでおり, 簡便なフェムト秒光源の出現が待たれる。

2.3 半導体導波路分散補償デバイス

前節で述べたファイバー圧縮器は極限的性能が実現できる反面, デバイス構成が複雑で半導体レーザーとの集積化には適さない。この観点から, 半導体導波路構造に基づく分散補償, パルス圧縮, 波形制御などの機能をもつデバイスが望まれる。図4(a)は, 日立グループで検討されてい

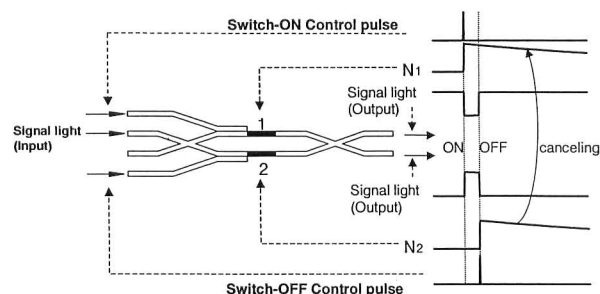


図5 対称マッハ・ツェンダー導波路光スイッチの構成と動作原理を示す図. (K. Tajima²⁵⁾による)

る結合導波路型分散補償デバイスの構造を示す²¹⁾。この構造では, 屈折率が大きく異なる2つの導波路が結合しており, 各導波路モードの混合比が波長によって変化するため, きわめて大きな群速度の波長依存性すなわち群速度分散が実現できる²³⁾。群速度分散の大きさとスペクトル幅にはトレードオフの関係があるが, 導波路間隔 W の選択によって最適化することにより, チャープパルスの圧縮が可能となる。

図4(b)は, $W=800$ nmのスラブ導波路デバイスに線形アップチャープの2.2 ps幅のパルスを入射した場合の, 異なる素子長 (L) に対する出力パルスの自己相関波形を示し, $L=5$ mmで約500 fsのパルス幅が得られることを示している²²⁾。このようにきわめてコンパクトなデバイスによって大きな圧縮比が得られた点は注目し, 今後デバイス設計の精密化による分散補償デバイスとしての確立および集積化への展開が期待される。さらに進めば, 現状ではファイバグレーティングなどを用いて検討されているパルス波形制御, パルスコーディング (FESTA 松下グループ²⁴⁾) などの高い機能への貢献も期待される。

3. フェムト秒全光スイッチングデバイス

全光スイッチは, 光アドドロップマルチプレクサー (光ADM), 光クロスコネクタ (光XC), 光MUX/DEMUXなど超高速光ノードにおける基本機能を実現するためのキーデバイスであり, 超高速応答, 高繰り返し, 低スイッチングエネルギーなどの特性が求められる。また, ネットワークの中の各所で用途によって使い分けられるよう, 空間, 時間, 波長の次元で動作する各種スイッチの開発が望まれる。以下では, 新しいデバイス構造および半導体の超高速緩和現象を用いる開発例について紹介する。

3.1 対称マッハ・ツェンダー導波路光スイッチ

図5に, NECグループによって提案されている対称マッハ・ツェンダー (SMZ) 導波路干渉計型光スイッチの構造と動作原理を示す^{25,26)}。干渉計の両腕には半導体非線形

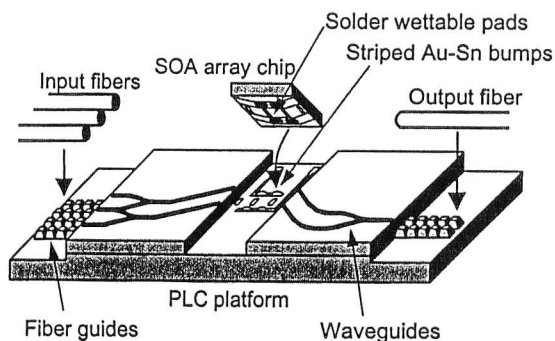


図6 半導体光アンプ (SOA) を用いたハイブリッド集積対称マッハ・ツェンダー光スイッチの構造図. (S. Nakamura, *et al.*²⁷⁾ による)

導波路が配置されており、制御パルス光は時間差をつけて各腕に導入される。非線形導波路で生ずる光位相のシフトは、制御パルスがOFFとなった後もキャリア寿命の間は持続するが、両腕に対して位相シフトは等しいから干渉計出力としては残らず、結局時間差に相当する時間幅の矩形パルス出力が得られる。

図6は、上述のデバイス構造を、半導体光アンプ (SOA) と石英導波路の平面光回路 (PLC) 技術を用いて製作したハイブリッド集積 SMZ 光スイッチモジュールの構造を示す²⁷⁾。集積化によってコンパクトなモジュールが実現されたのみならず、きわめて安定な動作が実現された。図7は、波長 1560 nm の 168 Gb/s 擬似ランダムパターン信号 (a)、および波長 1545 nm の 10.5 Gb/s の制御パルスによって DEMUX 動作させた場合の出力の相互相関波形 (b) を示す。制御光パルスエネルギー 0.05 pJ 程度で安定した 168 Gb/s → 10.5 Gb/s DEMUX 動作が実現され、かつビットエラーレート (BER) < 10⁻¹¹ も確認されており、この集積化光スイッチのフェムト秒動作における有効性が示されている。

同様のデバイス原理によってさらなる高速化が可能であり、実際同じグループによって、複屈折結晶によって2つの直交する偏光方向に対して時間差を与える手法を用いた偏光識別マッハ・ツェンダー光スイッチで、200 fs スイッチング、および 1.5 Tb/s 相当の 3 連パルスの DEMUX 動作など世界最高速のスイッチング動作が報告されている²⁸⁾。今後、後述する超高速緩和現象を活用した高繰り返し化などの高性能化と、実用的な光スイッチモジュールとしての開発との両面から、さらなる進展が期待される。

3.2 スピン緩和光スイッチ

半導体中の電子のスピンは通常上向き、下向きが 50% ずつで平衡しているが、何らかの方法でスピンの向きが揃った電子を励起することができれば、それらが平衡状態に

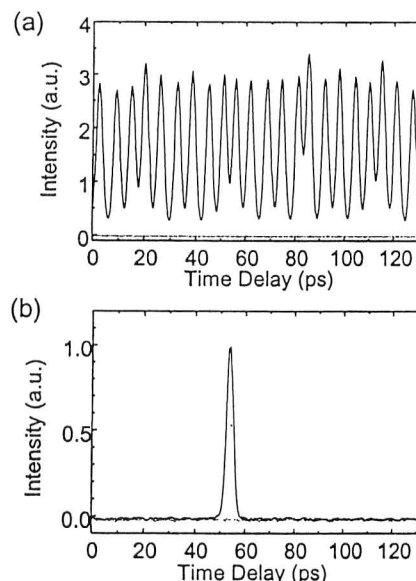


図7 ハイブリッド集積マッハ・ツェンダー光スイッチによる 168 Gb/s → 10.5 Gb/s DEMUX 動作を示す相互相関波形. (a) 168 Gb/s 擬似ランダム信号入力, (b) 10.5 Gb/s DEMUX 信号出力. (S. Nakamura, *et al.*²⁷⁾ による)

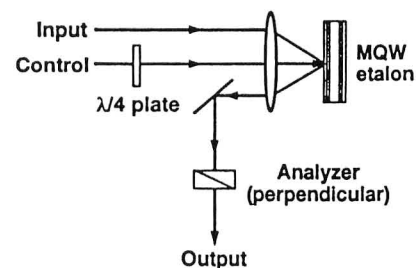


図8 量子井戸エタロン構造を用いたスピン緩和光スイッチの構成. (Y. Nishikawa, *et al.*²⁹⁾ による)

向けて緩和する過程で、スピン緩和時間に対応した高速応答が得られる。一方向スピンの励起は量子井戸の選択則に基づいて、エネルギーと偏光方向を制御することで可能である。効率を増大するためのエタロン構造を導入した光スイッチの構成を図8に示す^{29,30)}。円偏光の制御光の照射によってスピン方向が揃い、次第に緩和していく。信号光として直線偏光 (右および左円偏光の重ね合わせ) を用いると、スピン方向が揃っている間だけ制御光偏光と同じ偏光方向成分が増強されて楕円偏光となるため、検光子を用いればこの変化分だけが検出される。GaAs 系量子井戸を用いた FESTA グループの研究ですでに 4 ps ゲート動作が制御光パワー 50 fJ/μm² 程度の効率で実現されている。さらに、1.55 μm 帯動作に向けて InGaAs/InP 量子井戸におけるスピン緩和が評価され、図9に示すように、半値幅 880 fs のスイッチングが行えることがわかっている³¹⁾。

このようなスピン緩和光スイッチにおける課題として、繰り返し速度と偏光依存性の問題があげられる。この光ス

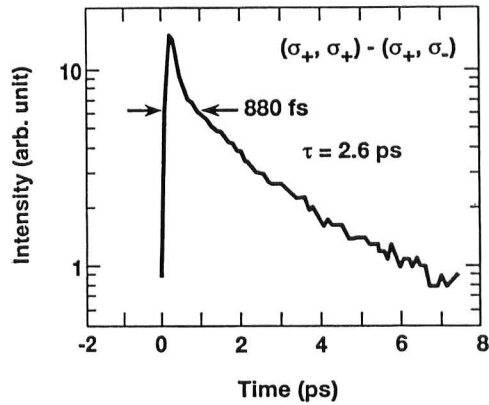


図9 InGaAs/InP量子井戸のスピンの緩和時間の測定結果。(A. Tackeuchi, *et al.*³¹⁾による)

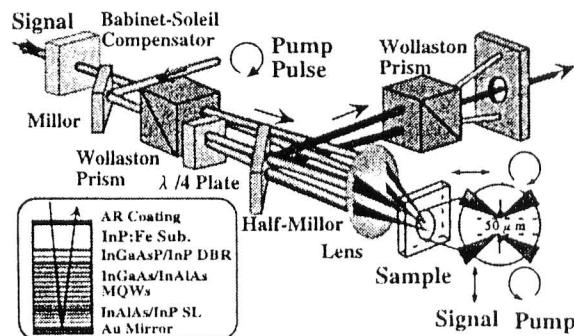


図10 偏波ダイバーシティ構成を採用した偏光無依存型スピンの緩和光スイッチの構造。(H. Kobayashi, *et al.*³³⁾による)

スイッチの非線形性は励起子吸収飽和に基づいているため、室温動作ではキャリア寿命の制限を受ける。しかし、プロトン照射³²⁾や低温成長³³⁾などの手法によれば、DEMUX 応用などには十分な高速化が可能と考えられる。一方、最近 NTT の高橋らは、図 10 に示すように入射ビームを直交する 2 つの偏光方向に分けてスイッチ動作させる偏波ダイバーシティ構成の偏光無依存光スイッチを提案している³⁴⁾。低温成長 Be ドープの InGaAs/InAlAs 量子井戸を用いたデバイスで 300 fs の超高速で高消光比 (>30 dB) のスイッチング動作が実現されている。

3.3 サブバンド間遷移光スイッチ

図 11 は、量子井戸のバンド図と、帯間および帯内遷移を模式的に示す。このうち、伝導帯内のサブバンド間遷移は、帯間再結合速度に比較してきわめて速い緩和速度が得られ、さらに量子井戸パラメーターによって動作波長が可変できるなどの特徴があるため、近赤外領域でのカスケードレーザーや受光素子への応用に加え、超高速光変調素子や光スイッチへの応用が期待される。これまでの光スイッチ応用の研究は GaAs 系材料によって行われ、浅野らに

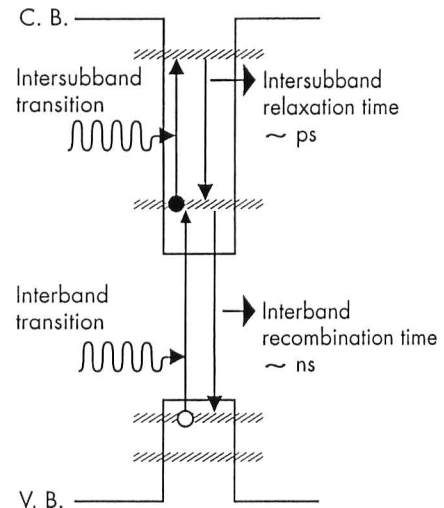


図11 半導体量子井戸のバンド間およびバンド内遷移を示す。

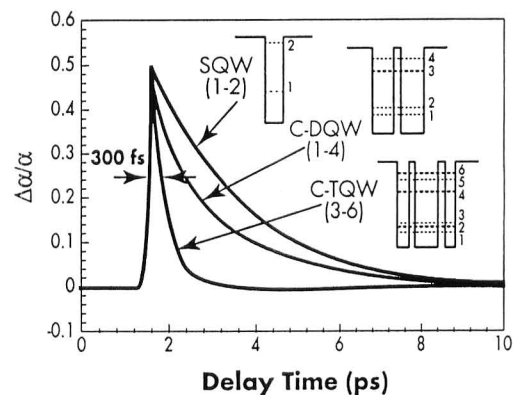


図12 InGaAs/AlAsSbの各種量子井戸構造に対して計算されたサブバンド間吸収回復波形。(H. Yoshida, *et al.*³⁹⁾による)

よって波長 2.5 μm のピコ秒光変調特性が報告されている^{35,36)}。以下では、新しい材料系によるアプローチを紹介する。

光通信応用のための最大の課題は 1.55 μm 波長に向けた短波長化である。FESTA ではこれを実現するための方法として、伝導帯不連続 (ΔE_c) が大きく InP 基板と格子整合するヘテロ接合として InGaAs/AlAsSb 系を採用して検討を行っている^{37,38)}。また、結合量子井戸構造を導入することにより、フォノン放出によるエネルギー緩和過程を制御することによって、スイッチングの超高速化を試みている。図 12 は、Sb 系材料による単一量子井戸 (SQW)、結合 2 重 (C-DQW) および結合 3 重量子井戸 (C-TQW) 構造における光スイッチング応答特性の計算結果を示す^{37,39)}。SQW の 1-2 準位間遷移では半値幅 1.8 ps のスイッチング応答が得られるのに対し、C-DQW の 1-4 間遷移、さらには C-TQW の 3-6 間遷移を用いること

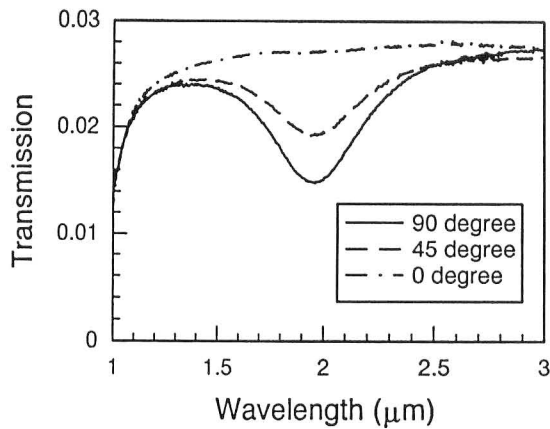


図13 InGaAs/AlAsSb 単一量子井戸のサブバンド間吸収スペクトルの測定結果 (偏光は 0 degree が p-偏光に対応)。(H. Yoshida, *et al.*⁴⁰⁾による)

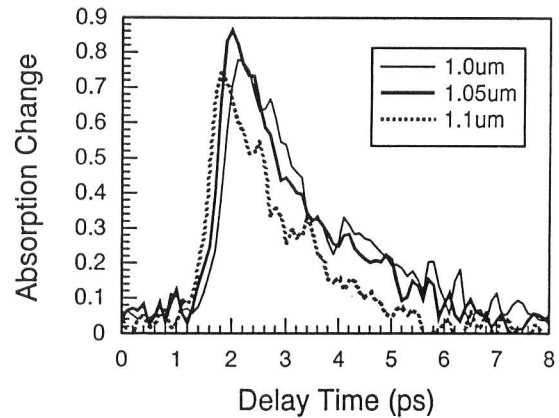


図14 サブバンド間励起波長 1.95 μm において異なるバンド間プローブ波長に対する吸収回復特性の測定結果。(H. Yoshida, *et al.*⁴⁰⁾による)

により 300 fs までの超高速化の可能性が示されている。このようにヘテロ材料と量子井戸構造の設計により、光通信波長帯でのフェムト秒光スイッチの実現が期待できる。

実験的評価は MBE 成長による SQW 構造を中心に行われ、最近近赤外領域での光応答特性が評価された。図 13 は、InGaAs(2.0 nm)/AlAsSb(10 nm) SQW(60 周期)の吸収スペクトルを示し、1.95 μm をピークとする強いサブバンド間吸収が得られている⁴⁰⁾。ポンププローブ測定による応答速度の測定結果を図 14 に示す。励起はサブバンド間遷移波長 (1.95 μm) の 150 fs パルス光を用い、白色化したプローブ光によりバンド間吸収の応答を測定した。図 14 に示すとおり、プローブ波長 1.1 μm で最も高速で 1.5 ps、1.0 μm で 2~2.5 ps となる波長依存性が現れており、サブバンド間およびサブバンド内でのエネルギー緩和による効果として説明されると考えられる。したがって、サブバンド間遷移の応答時間としては 2 ps 以下の超高速が得られることがわかる。さらに、同一試料で 1.55 μm 波長の励起による応答特性も評価され、半値幅 1.2 ps の超高速性が実証されており⁴¹⁾、光通信デバイスとしての可能性が示されつつある。

一方、ワイドギャップ半導体の AlGaIn/GaN 量子井戸では ΔE_c が大きく短波長化に有利であり、またイオン性が高いことに起因してフォノンを介したエネルギー損失レートがきわめて大きく、100 fs 以下の超高速性が期待できる⁴²⁾。東芝グループでは最近、MOCVD 成長により歪みを克服して量子井戸を多層化する構造を実現し、光応答特性の評価を可能にした。図 15 は、サブバンド間吸収波長 4.6 μm の試料に対するポンププローブ応答波形を示す⁴³⁾。高速緩和成分の時定数として 150 fs が得られており、励起パルス幅 130 fs を考慮すると、さらに高速の吸

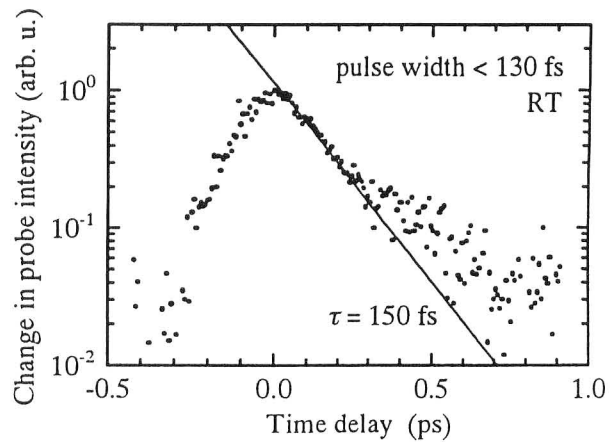


図15 AlGaIn/GaN 量子井戸のサブバンド間遷移吸収回復特性の測定結果。(N. Suzuki, *et al.*⁴²⁾による)

収回復特性が実現されているものと考えられる。

以上のように、サブバンド間遷移は超高速光スイッチの原理としての有効性が実験的にも示される段階となってきた。今後、高くり返し化、低エネルギー化などデバイス化に向けた研究開発の進展が望まれる。

3.4 波長変換光スイッチ

図 16 は、富士通グループの提案による半導体光アンプ中の非縮退四光波混合を利用した波長変換光スイッチの構造を示す⁴⁴⁾。この構造では DFB レーザーが基本構造となっており、レーザー発振光自身を四波混合の励起光として使うことができるため、信号光を入射するだけで波長変換された位相共役光出力が得られることが特徴である。これまでに InGaAs/InP 量子井戸構造を用いたデバイスで 1.55 μm 波長帯で 2 THz の波長変換帯域が得られている。また、歪み量子井戸の導入により出力を増大できることがわかった。図 17 は、0.8% 圧縮歪みと無歪みの量子井戸に対して 3 次非線形感受率 $\chi^{(3)}$ の信号光離調周波数依

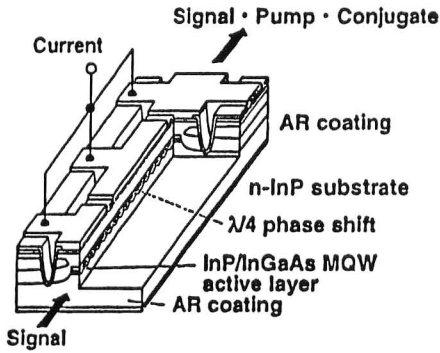


図16 量子井戸DFBレーザーを基本とした波長変換光スイッチの構造。(H. Kuwatsuka, *et al.*⁴⁴⁾による)

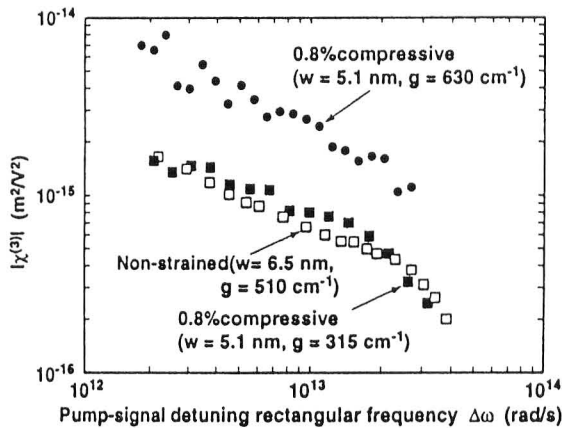


図17 無歪み量子井戸と圧縮歪み量子井戸に対する3次非線形感受率の離調周波数依存性。歪み量子井戸によって非線形性が向上される。(H. Kuwatsuka, *et al.*⁴⁵⁾による)

存性を比較した結果である⁴⁵⁾。歪み量子井戸では $\chi^{(3)}$ が約3倍増強できることがわかる。このような非線形性増大の機構は、圧縮歪み下の有効質量低減などを通じたキャリアダイナミクスの変化によって説明されている。波長変換スイッチに適用すれば1桁近い出力パワーの増大ができるため、特性向上に向けてひとつの有効な手法であると考えられる。

4. フェムト秒デバイスに向けた新材料の開発

ここでは将来のフェムト秒デバイス応用に向けた新しい材料として、半導体微細構造および有機薄膜材料の研究状況を述べる。

4.1 半導体微細構造材料

半導体微細構造の中でも、0次元量子閉じ込めを実現する量子ドットには、線形光利得や非線形感受率の増大によるデバイス特性の大幅な改善が期待されている^{46,47)}。すでにStranski-Krastanov (SK) モード成長を利用した形成法に基づいて研究が行われており、低閾値レーザーなどデ

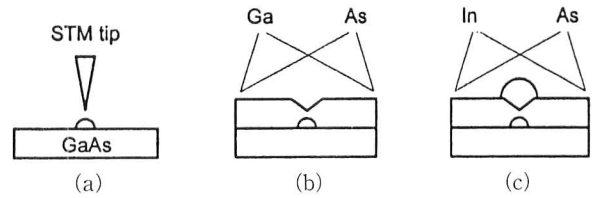


図18 STMを用いた位置制御量子ドットの形成プロセス。(a) STM-induced deposition, (b) GaAs nano-hole formation, (c) InAs QD self-organization. (S. Kohmoto, *et al.*⁴⁸⁾による)

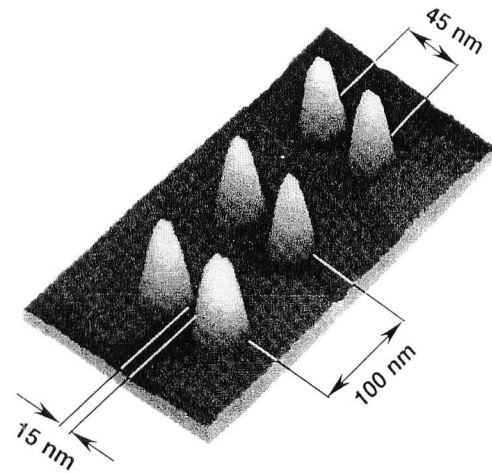


図19 STMを用いた位置制御ドットの構造を示すSTM走査像の一例。(S. Kohmoto, *et al.*⁴⁸⁾による)

バイス応用の研究も始められている。しかし、本来の低次元化の特徴を十分生かした応用を考えていく立場から、ドットのサイズの均一化およびサイトの制御が不可欠になるものと思われる。FESTAで開発している位置制御量子ドット製作プロセスを図18に示す⁴⁸⁾。成長基板上にSTM探針を近づけて電流パルスを流す方法により微小堆積物によるナノマスクを形成すると、続いて成長するGaAs膜にナノホールが形成される。このナノホール部にInAs量子ドットの自己組織化成長を行うことにより、任意の位置にドットを形成することができる。このSTMによる方法は、電子ビームによる位置制御法⁴⁹⁾に比較し大幅な位置精密化が達成される。図19はこの方法で形成した量子ドット列のSTM像の例を示し、量子ドットがナノメートル精度で位置制御されていることがわかっている⁴⁸⁾。また、これらの位置制御ドットのフォトルミネセンス発光から評価した光学的特性は、まだ不均一広がりが大きいことを除けば通常のSKドットと同等であり、位置制御プロセスによる劣化は特になんことが確かめられている⁵⁰⁾。この位置制御法はドット間結合の制御法としてのみならず、究極的なサイズ均一化の可能性もあることから、今後の発展が期待される。

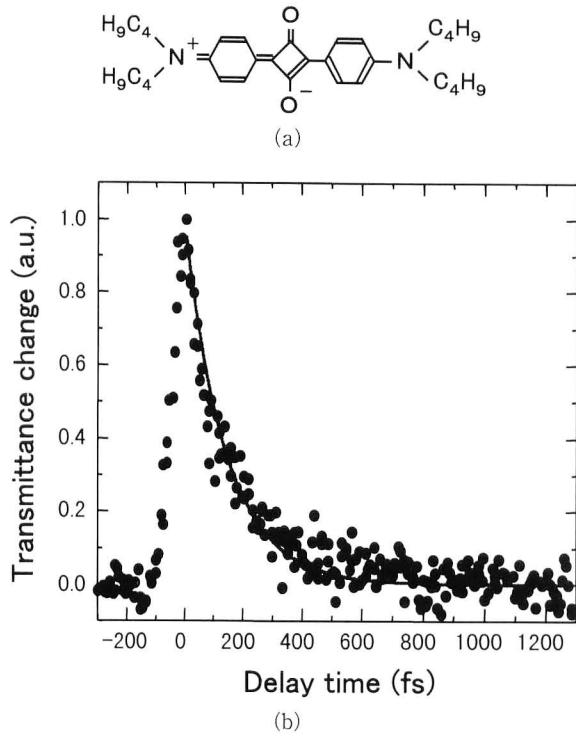


図20 (a) スクエアリリウム誘導体の化学構造の例, (b) スピンコートで形成したスクエアリリウム J 会合体薄膜の吸収回復特性を示すポンププローブ測定結果. (S. Tatsuura, *et al.*⁶¹⁾ による)

量子ドットの超高速デバイス応用に向けた研究はまだ多くないが, 最近SKモード成長による量子ドットを組み込んだ導波路光アンプによって実験的検討が始められるようになった⁵¹⁻⁵³. これまでに, 自己組織化ドットの多層化されたコラムナドット (富士通グループ⁴⁶⁾) を有する導波路光アンプを用いて利得回復応答特性がポンププローブ測定から評価され (FESTA), 1.8 ps の超高速回復が可能であることがわかっている⁵². さらに最近では, 非縮退四光波混合による波長変換特性が評価され, 量子井戸とほぼ同様の波長変換帯域が実現されている一方, ドットのキャリアエネルギー緩和が1 ps 以下の超高速性をもつ可能性も示されている⁵³. 今後さらに理解が深まるに伴い, 超高速デバイスへの適合性が明確になっていくものと思われる.

半導体のサブミクロンサイズの微小構造系において生ずる特有な光学的効果として, 非局所応答⁵⁴⁾に基づくエネルギーサイズ二重共鳴⁵⁵⁾によって巨大非線形性が発現されることが, 三菱電機グループの最近の研究によって明らかにされつつある^{56,57)}. すでにGaAsの薄膜 (110 nm厚) 構造において3次非線形応答信号がバルク材料に比較して25倍に増強され, 応答もピコ秒領域の超高速性を示すことが確かめられつつある^{56,57)}. 今後の研究により, このような新しい非線形応答が室温で発現できるようになれば新

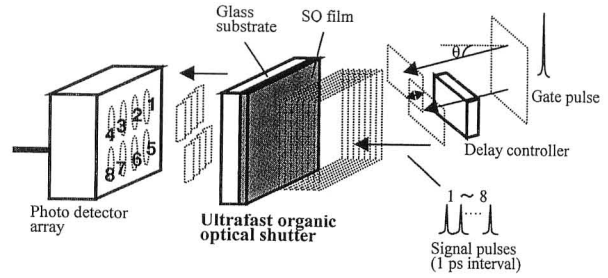


図21 スクエアリリウム J 会合体薄膜光スイッチをベースにした新しい光 DEMUX の構成. 時間・空間変換によって一括型光 DEMUX が可能となる. (S. Tatsuura, *et al.*⁶²⁾ による)

しいデバイスの出現に大きく寄与するものと期待される.

4.2 有機薄膜材料

有機分子薄膜で超高速応答と大きな非線形性が実現できれば, 大面積かつ低コストで, 半導体材料とは異なる特徴あるデバイスが可能となると考えられる. 富士ゼロックスグループではスクエアリリウム (SQ) 色素分子の J 会合体の単分子膜でフェムト秒オーダーの超高速応答を示すことを見だし, 光スイッチへの応用を検討してきた⁵⁸⁾. 最近, 特定のアルキル鎖を側鎖にもつ SQ 誘導体を用いることで, スピンコート法による J 会合体薄膜の形成に成功した⁵⁹⁾. この薄膜では, 一定の分子配向方向を示すミクロンオーダーのドメインが密に形成されていることが NSOM 測定から明らかになっており⁶⁰⁾, この均質性に対応して鋭い吸収スペクトル (ピーク波長 ~ 760 nm に対し半値幅 ~ 20 nm) が確かめられている. 図20(a)にSQ44分子の構造, (b)にスピンコート膜に対してポンププローブ計測を行って評価した吸収回復特性を示す⁶¹⁾. 共鳴波長の励起で200~300 fsの応答が得られ, 非共鳴励起では100 fs級の超高速応答が観測されている.

図21は, このような有機分子薄膜を光スイッチアレイとして用いた時間・空間変換による新しい DEMUX の構成を示す^{62,63)}. 信号光パルス列は光スイッチに垂直入射するが, 制御 (読み出し) 光の単発パルスは斜めに入射するため, 信号光パルスがおのおの別の位置で光スイッチを通過する. 上述のようなSQ膜のフェムト秒回復特性を活用すれば, きわめて高い繰り返しパルス信号に対する動作が可能になると考えられる. ごく最近, 1 Tb/s 相当の基本 DEMUX 動作が示されており⁶¹⁾, 今後の進展が期待される.

1 Tb/s 級の超高速 OTDM システムの構築に不可欠となるフェムト秒光デバイスの研究状況を述べた. 半導体レーザーに基づく光源およびパルス圧縮技術, 半導体の超高速

速現象を活用した各種全光スイッチデバイス技術, さらに量子ドットなど, 量子ナノ構造や有機分子薄膜などの新しい材料技術において, 著しい発展がみられていることが理解されたものと思う。フェムト秒領域の光技術がかつてはもっぱら学術的研究として取り上げられたのに対し, いまやここで述べた光通信応用を筆頭として産業応用上の重要性が著しく増大してきた。超高速物理現象から光通信システム応用までを視野に入れた研究がさらに進展し, 実用性の高い新光デバイスとして実を結ぶ日が待たれる。

本稿で述べた成果の一部はNEDOの委託によりFESTAで行われたものである。また, 本稿に図面の引用をご承諾くださった方々に感謝申しあげる。

文 献

- 1) T. N. Nielsen, *et al.*: *Optical Fiber Commun. Conf. (OFC)*, postdeadline paper PD23, San Francisco (2000).
- 2) T. Ito, *et al.*: *Optical Fiber Commun. Conf. (OFC)*, postdeadline paper PD24, San Francisco (2000).
- 3) 光テクノロジーロードマップ策定専門委員会: “光テクノロジーロードマップ(情報通信分野)改訂版”, オプトニュース通巻116号(2000年 No. 2 (財)光産業技術振興協会) 7-10.
- 4) 猿渡正俊: 応用物理, **67** (1998) 44.
- 5) T. Yamamoto, *et al.*: *Proc. European Conf. Optical Commun. (ECOC)*, Nice (1999) vol. II, pp. 38-39.
- 6) F. Saito: *Abstracts of FST '96*, Tsukuba (1996) p. 7
- 7) H. Yajima and T. Kamiya: *IEICE Trans. Electron.*, **E-81** (1998) 95.
- 8) 和田 修: 応用物理, **67** (1998) 530.
- 9) T. Kamiya, F. Saito, O. Wada and H. Yajima eds.: *Femtosecond Technology—From Basic Research to Application Prospects—*(Springer-Verlag, Berlin, 1999).
- 10) *Abstracts of Intern. Workshop on Femtosecond Technology (FST)*, MakuHari (1999).
- 11) 荒平 慎: 応用物理, **9** (1998) 1013.
- 12) S. Arahira, *et al.*: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2** (1996) 480.
- 13) S. Arahira, *et al.*: *J. Lightwave Technol.*, **16** (1998) 405.
- 14) 小川 洋, 荒平 慎: 光学, **29** (2000) 494-495.
- 15) S. Arahira, *et al.*: *Abstracts of FST '99*, MakuHari (1999) p. 49.
- 16) H. Yokoyama, *et al.*: *Tech. Dig. of Optical Fiber Commun. Conf. (OFC)*, San Francisco (2000) ThP, p. 232.
- 17) C. Janz, *et al.*: *Tech. Dig. of Optical Fiber Commun. Conf. (OFC)*, San Francisco (2000) ThF6, p. 90.
- 18) R. Yatsu, *et al.*: *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1172.
- 19) Y. Matsui, *et al.*: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11** (1999) 1217.
- 20) 松井 康ほか: 第47回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 青山学院大学(2000) 29a-ZD-8, p. 1090.
- 21) 五十嵐浩司, 岸 真人, 土屋昌弘: 第47回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 青山学院大学(2000) 29a-ZD-9, p. 1089.
- 22) Y. Lee: *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 2715.
- 23) V. Paschel, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **67** (1995) 2111.
- 24) A. Baba, *et al.*: *Abstracts of FST '99*, MakuHari (1999) p. 103.
- 25) K. Tajima: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **32** (1993) L1746.
- 26) S. Nakamura, *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) L1426.
- 27) S. Nakamura, *et al.*: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **12** (2000) 425.
- 28) S. Nakamura, *et al.*: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (1998) 1575.
- 29) Y. Nishikawa, *et al.*: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2** (1996) 661.
- 30) 竹内 淳, 和田 修: 応用物理, **66** (1998) 960.
- 31) A. Tackeuchi, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **70** (1997) 1131.
- 32) O. Wada, *et al.*: *Proc. SPIE*, **3283** (1998) paper 3283-66, 602-613.
- 33) H. Kobayashi, *et al.*: *Electron. Lett.*, **34** (1998) 908.
- 34) R. Takahashi, *et al.*: *Tech. Dig. of Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO '99)* San Francisco (2000) CThF4, pp. 78-79.
- 35) T. Asano, S. Noda and K. Tomoda: *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 1418.
- 36) 野田 進, 浅野 卓: 光学, **29** (2000) 492-493.
- 37) H. Yoshida, *et al.*: *Electron Lett.*, **54** (1998) 913.
- 38) A. Neogi, *et al.*: *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11** (1999) 632.
- 39) H. Yoshida, *et al.*: *Proc. CLEO Pacific Rim '99*, Seoul (1999) vol. 3, p. 734.
- 40) H. Yoshida, *et al.*: *Tech. Dig. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Francisco (2000) CWPI, p. 357.
- 41) H. Yoshida, *et al.*: *Abstracts of FST '00*, Tsukuba (2000) TB-4, p. 39.
- 42) M. Suzuki and N. Iizuka: *Proc. SPIE*, **3283** Part 2 (1998) 614.
- 43) N. Suzuki, *et al.*: *Proc. SPIE*, **3940** (2000) 127.
- 44) H. Kuwatsuka, *et al.*: *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) 2002.
- 45) H. Kuwatsuka, *et al.*: *Abstracts of FST '99*, Tsukuba (1999) p. 208.
- 46) M. Sugahara, *et al.*: *Phys. Rev. B*, **61** (2000) 7595.
- 47) H. Ishikawa: Chap. 7 in ed. M. Sugahara, *Self-Assembled InGaAs/GaAs Quantum Dots*, Semiconductor and Semimetals, vol. 60 (Academic Press, San Diego, 1999) p. 287.
- 48) S. Kohmoto, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 3488.
- 49) T. Ishikawa, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 1712.
- 50) S. Nishikawa, *et al.*: *Abstracts of FST '00*, Tsukuba (2000) FC-44, p. 194.
- 51) P. Borri, *et al.*: *Proc. European Conf. Optical Commun. (ECOC)*, Nice (1999), vol. II, p. 74.
- 52) T. Akiyama, *et al.*: *Proc. European Conf. Optical Commun. (ECOC)*, Nice (1999), vol. II, p. 76.
- 53) T. Akiyama, *et al.*: *Tech. Dig. of Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Francisco (2000) CWU1, p. 378.
- 54) 張紀久夫, 石原 一, 大淵泰司: 物理学会誌, **5** (1997) 343.
- 55) H. Ishihara and K. Cho: *Phys. Rev. B*, **53** (1996) 15823.
- 56) K. Akiyama, *et al.*: *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 475.
- 57) K. Akiyama, *et al.*: *Abstracts of FST '00*, Tsukuba (2000).
- 58) T. Tani, *et al.*: *Femtosecond Technology*, Chap. VI-1, ed. T. Kamiya, *et al.* (Springer, 1999) pp. 328-349.
- 59) S. Tatsuura, *et al.*: *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **561** (1999)

105.

- 60) M. Furuki, *et al.*: Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **561** (1999) 9.
- 61) S. Tatsuura, *et al.*: *Abstracts of FST '99*, Makuhari (1999) p. 168.
- 62) S. Tatsuura, *et al.*: *Tech. Dig. of Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Francisco (2000) CTuA20, p.

151.

- 63) 古木 真ほか：第 47 回応用物理学関連連合講演会講演予稿集，青山学院大学（2000）30p-Y-2, p. 1263.

(2000 年 5 月 25 日受理)