コンファレンスレポート

I Q E C ' 8 8 報 告 Ⅱ

—凝縮系との光相互作用, 超高速現象, 半導体レーザー素子と物理・
 オプトエレクトロニクス, 光通信・情報処理・その他の応用—

光 永 正 治*・廣 嶋 透 也**・張 吉 夫***・中 川 清 司****

Report on IQEC' 88

—Optical Interaction with Condensed Matter and Ultrafast phenomena,
 Physics and Device aspect of Semiconductor Laser and Optoelectronics,
 Optical Communications, Information Processing and Other Novel
 Applications—

Masaharu MITSUNAGA*, Tohya HIROSHIMA**;
 Yoshio CHO*** and Kiyoshi NAKAGAWA****

1. 凝縮系との光相互作用・超高速現象

1.1 超高速現象

1.1.1 概要

超高速現象の分野に関して言えば, IQEC の発表だけで世界の動向を把握しようとするのは甚だ危険である。というのは, IQEC の一週間前に京都の比叡山で超高速現象の国際会議(International Conference on Ultrafast Phenomena: ICUP) が開催され, 多数の発表はそちらでなされている。実際, 規模を比較してみ

ると, ICUPにおいては, 口頭発表77件, ポスター81件, postdeadline 21件, 計179件であるのに対し, IQECにおける超高速現象に関する発表は, (勿論境界の定め方によって数字はかなり違ってくるものの) 口頭発表44件, ポスター16件, postdeadline 7件, 計67件となる。という訳で, 両国際会議を鳥瞰する形で, ここでは話を進めるのが望ましいであろう。

さて前述の全発表を対象にもう少し数字を並べてみよう。まず取り扱っている光パルスの時間領域であるが,

* NTT基礎研究所 (〒180 東京都武蔵野市緑町3-9-11)

** 日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 (〒213 神奈川県川崎市宮前区宮崎4-1-1)

*** 大阪大学産業科学研究所 (〒567 茨木市美穂ヶ丘8-1)

**** NTT伝送システム研究所光通信研究部 (〒238-03 横須賀市武1-2356)

* NTT Basic Research Laboratories (3-9-11, Midoricho, Musashino, Tokyo, 180)

** Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation (4-1-1, Miyazaki, Miyamae, Kawasaki, 213)

*** The Institute of Scientific Industrial Research, Osaka University (8-1, Mihogaoka, Ibaraki, 567)

**** Lightwave Communication Laboratory, NTT Transmission Systems Laboratories (1-2356, Take, Yokosuka 238-03)

ピコ秒以上 119件

サブピコ秒 100件

と、まったく相拮抗している事が解る。更に言えば、フェムト秒レーザーもようやく一般化し始め、今回は丁度ピコ秒からフェムト秒への過渡期であるとも取れようか。次に発表の内容であるが、

物性解明	161件
内訳	
色素・高分子	32
量子井戸半導体	29
バルク半導体	25
分子	24
生物	14
半導体ドーピングガラス	7
その他	30

パルス発生 49件

テクノロジー 26件

と、物性解明、特に短パルスを用いた緩和過程の研究が多数を占め、その中でも分子と半導体が2大主流となっている。さて次に、国別の発表件数であるが、

日本	78件
米国	69件
西独	33件
フランス	17件
その他	49件

となる。日本が一位を占めているのは、今回ホスト国であるという事で充分納得できるが、話をフェムト秒に限ればどうなるか。例えばフェムト秒パルスを用いた物性解明の発表件数を比較すると、

米国	22件
西独	7件
フランス	5件
日本	5件
その他	9件

となり、日本の割合は極端に低くなる。実際に会場で受ける印象では殆んど皆無と言っても良い程である。これは、欧米においてCPMレーザーが当然の如く道具として使用され始めている事実と比し、日本ではピコ秒は確立したもの

の、フェムト秒領域の技術はまだ根付いていない事を物語っている。これは第5回ICUPの感想¹⁾でも指摘された所であるが、日本のこの分野における異常なまでの低迷は2年後の今も依然として続いている。

1.1.2 短パルス発生

パルス幅を短くする試みに関しては、前回CLEOの6 fs発生²⁾の報告である程度極限に達した感がある。今回は、フェムト秒パルスの波長域の拡大や性能の向上(波長可変性、高出力)に視点が移ってきている。まず青色光領域は紫外光で青色色素を励起する事により、CPM(U-FG4)*あるいは同期励起(U-FG5)でのサブピコ秒発生の報告がある。紫外領域へは充分増幅された可視サブピコ秒パルスを2次高調波発生で紫外に変換する(MM1, U-FG1, U-FG2),あるいは和周波発生を用いる(U-WD3)。またCPMレーザー共振器内にBBO結晶を挿入して、50 fsの紫外光パルス発生の報告もなされた³⁾(U-FA1)。

赤外域に関しては、可視のフェムト秒パルスより生成した白色光を分光し、その一部を取り出す事により、近赤外で波長可変な9 fsパルス発生の報告があり(U-PD9, PD15)、注目される。また色素に代わる新しい赤外波長可変光源としてのチタンサファイヤレーザーによる短パルス発生(U-PD3)も目を引いた。

1.1.3 半導体の高速現象

高速緩和現象の研究対象として最も多いのは半導体、それもバルク又は量子井戸構造のGaAsである。得られる情報は、励起波長(可視、近赤外、赤外)、実験手法(pump-probe法, transient grating法, photon echo法, 蛍光観測)、励起パルス幅(6 fs~数ps)により多様である。例えば、可視フェムト秒パルスによるpump-probe法(U-FA1)やphoton echo法(TuA1)により、ホットキャリアーのsatellite valleyへの散乱, carrier-carrier散乱の様子

* 本稿においてU-で始まる参照はICUPにおける講演番号を示し、それ以外はIQECの講演番号を示すものとする。

がわかる。また、近赤外のフェムト秒白色光を用いた励起子共鳴付近の時間分解透過分光光 (TuA2, U-ThB3, U-WF3) も一般化しつつあり、励起子線の飽和の機構説明等に有力である。近赤外の短パルスで直接励起子線に共鳴させて、transient grating法 (WL4) やphoton echo法 (ThB6) を行ない。量子井戸励起子の性質を調べる方法もある。また赤外 (5~12 μ m) の波長可変ピコ秒パルスを用いて量子井戸のサブバンド間遷移を直接励起し、サブバンド間の緩和時間を測定する報告もなされた (ThB8, U-TuD6)。

手法として目新しいのは、Honold らが報告したbackward 4 光波混合⁴⁾ (ThB6) がある。これは量子井戸等2次元の試料に適用できるものであるが、複数の光パルスを試料の前方より照射し信号もまた試料の前方から観測する手法である。つまり光がまったく透過しない試料に対しても非線形分光が適用できるもので、注目に値する。

1.1.4 半導体ドーパガラスの高速現象

半導体ドーパガラスは、バルクや量子井戸半導体に比べても、まだ実験的にも理論的にも確立されていない。ただ、材料そのものへの理解を深めようとする動きは共通のようで、これまでの市販の試料から、自分達で試料を作成あるいは加工する (MD2, MD5) あるいはファイバーやポリマーフィルムにドーパする (WG3, WH1) 機運が窺える。高速緩和現象も少しずつ明確になりつつあり、バンド端より2~300 meV 下に位置するトラップ準位の存在が重要な鍵を握っている事で見解は一致している (U-WF6, TuP37, WH1, ⁵⁾)。

手法としては、Cotter らによる n_2 (非線形屈折率) の過渡応答の観測 (WG3, U-FD4) が新しい。従来の $\chi^{(3)}$ の虚数部の観測 (pump-probe法)、 $|\chi^{(3)}|^2$ の観測 (transient grating法) と併わせて、非線形過渡応答の総合的理解が得られる事になる。

1.1.5 その他

日本を中心に発達して来たインコヒーレント

過渡分光はますます盛んになる傾向があり、今回も不純物固体 (PD26, TuP39), 半導体ドーパガラス (U-PD15), カー媒質 (U-FD2), 色素 (WJ3, U-WA2) 等、多くの材料で高速緩和が観測された。またコヒーレント信号を観測するのみならず、高速の蛍光寿命をインコヒーレント光で測定する試みもなされている (U-FD1, U-PD15)。

有機色素あるいは分子の高速緩和では、一昨年あたりから注目され始めた量子ビートの観測 (U-WA2, U-TuF2, U-FA1, U-FA5) がある。また気体のリドベルク状態においても量子ビート同様の振る舞いの観測がなされた (U-ThB2)。

以上、簡単に今回の内容を振り返ってみたが、今後これらの分野が材料の準備と相まってどのような展開を見せてくれるか、非常に興味深い。

(光永正治)

1.2 半導体超格子・量子井戸・微結晶

半導体超格子・量子井戸・微結晶の関係では、口頭発表に限ると“Physics of Quantum Wells”と“Symposium on Confinement Effects in Quantum Wells and Microcrystallites I・II”のセッションが設けられた。このうち対象となる半導体の構造から分類して超格子・量子井戸関係が8件 (その内Ⅱ-V族化合物半導体に関するものが1件、他はすべてⅢ-V族化合物半導体に関する発表)、微結晶・量子球に関するものが3件、この両方に係わるものが2件であり、依然として超格子や量子井戸といった系に関する研究のアクティビティが高い。一方、内容から見るとエキシトンの電子的構造やダイナミクス・非線形光学応答に関する発表が10件近くを占めた。

以下、初めに招待講演 (4件) の概要から報告する。まず花村 (東大) は、半導体量子井戸や量子球におけるエキシトンの巨大双極子効果とそれによる光非線形性の増強について講演した (Th-B1)。一般にエキシトンは結晶全体にわたるコヒーレントな集団励起であるので、本

来巨大な遷移の双極子モーメントを持っているのであるが、バルク結晶中ではほぼ理想ボゾンの振る舞いをするため、この本来の巨大な双極子モーメントは光非線形性に反映されない。またバルク結晶中ではエキシトンが電磁場と結合してポラリトンとなり、これが速い光学的応答を妨げている。これらの難点を克服する方法として、i) 半導体量子球においてエキシトン間の非調和的相互作用を強くし、エキシトンの理想ボゾンからのずれを呼び起こすこと、ii) 半導体量子井戸において超放射機構を誘起し、極めて速い縦緩和を起こさせること、が提案された。エキシトンが結晶全体にわたるコヒーレントな励起であるとは言っても、実際にはエキシトン同士や他の素励起との散乱等によりコヒーレントな領域は狭められる。このことは昨年Feldmanらによって考察され、理論的・実験的に準2次元エキシトンの再結合寿命(τ)と均一拡がり(Γ)の間に一定の関係があることが見い出されていた。Honold (マックス・プランク固体研) らは、時間分解縮退4光波混合を用い、位相緩和時間 T_2 と τ を直接測定することにより、この関係を確めた。(Th-B6)。彼らはGaAs単一量子井戸構造にCW光を照射し、その強度を変え、従ってエキシトン散乱に寄与するキャリアエキシトンの濃度を変化させながら T_2 と τ を測定した。直接的な方法でFeldmanらの指摘した関係を実験的に検証したのは、これが初めてである。エキシトンのダイナミクスの中でもコヒーレントな光学過程は、その超高速性のゆえに応用上も極めて重要であると思われる。特に最近、このコヒーレント光学過程の一つである光シュタルク効果が半導体量子井戸構造中のエキシトン系について見い出され注目されている。この光シュタルク効果に関し、最近興味深い実験事実が発見された。これは、半導体の非共鳴領域に強いポンプ光パルスを入射し、弱いプローブ光で透過係数を観測すると、ポンプ光のパルスがプローブ光に時間的に先行していても、観測されるスペクトルには振動成分が見られるというものである。これ

は測定における不確定性の現われであると考えられる。Koch (アリゾナ大) らは、この光シュタルク効果の過渡現象に関して理論・実験の報告を行った(Th-B2)。二準位原子系とほぼ等価なモデルでもかなり良く実験データと合うようである。Nurmikko (ブラウン大) らは、最近研究が活発化しつつあるII-VI族化合物半導体系の量子井戸構造(ZnSe/ZnTe)の中のエキシトンについて講演を行った(Th-B5)。ZnSe量子井戸の中にZnTeの超薄膜層を導入すると、格子緩和を伴ってホールかZnTeに束縛され、エキシトンは、束縛されたフレンケル型のホールとワニア型の電子からなるということである。このようなII-VI族化合物半導体系のヘテロ構造に関しては、未だに電子的構造がよく解明されておらず、今後の発展が期待される。

一般講演のうち、半導体量子箱・微結晶に関しては、山西(広島大)らや高河原(NTT基礎研)及び舂本(筑波大)らの講演があった。山西らは、半導体量子箱に一樣な静電場をかけた系における吸収・発光過程について議論した(WL-2)。このような系では、電子-正孔対生成(再結合)に伴って、静電場を与えている外部回路に電圧パルスが現われる可能性があるという。高河原は、半導体量子球におけるエキシトン状態の計算と、それに基づく3次の非線形感受率の計算を報告した(Th-B4)。さらにエキシトン分子状態の計算から、巨大振動子効果による光非線形性の増大を予測した。舂本らは、NaCl中に形成されたCuCl微結晶の系の非線形光吸収の実験から、花村の予想したエキシトンの巨大双極子効果を支持した(Th-B3)。彼らは、平均半径30Åから100Å以上のCuCl微結晶の試料を作成し、 R を平均の微結晶の半径として共鳴条件下では $\text{Im}\chi^{(3)} \propto R^3$ という関係を見い出した。半導体量子井戸の系におけるエキシトンに関しては、廣嶋(NEC光エレクトロニクス研)らが、一樣な静電場中の量子井戸における双極子-双極子相互作用を介した励起子光非線形性を議論した(WL-1)。またHegarty(トリニティ・カレッジ)らは、InGaAs/InP混晶量子井

戸構造におけるエキシトンの局在化に関して、時間分解吸収ホールバーニングの実験を行った結果を発表した(WL-3)。この結果は、以前に高河原が提唱した局在エキシトン状態間の音響フォノンを介したトンネル・モデルを支持するという。Oudar (CNET) らは、エキシトンの誘導再結合による再結合過程の高速化に関する実験を報告した(Th-B7)。特にこの誘導再結合は非常に強い温度依存性を持っていることを明らかにした。これらの他にも半導体量子井戸・超格子関係ではManning (Royal Signals and Radar Establishment) らによる多重量子井戸構造におけるトランジェント・グレーティング・スペクトロスコピーの報告(WL-4)。や、藤原(三菱中研)らによるGaAs/AlAs短周期超格子におけるホール・サブバンド混成に関するPLスペクトロスコピーの報告(WL-5)があった。この短周期超格子におけるホール・サブバンド混成は、量子井戸層の厚さのゆらぎによって重い正孔の状態と軽い正孔の状態が混じり合うためであると言う。また Seilmeier (ミュンヘン工科大) らは、GaAs量子井戸中のサブバンド間の緩和過程を、超高速赤外ブリュチングと呼ばれる方法で実験的に調べた結果を報告した(Th-B8)。室温ではLOフォノンがサブバンド間緩和を支配するようである。また量子井戸層の厚さを薄くしてゆくと、緩和時間が増大することが見い出されたが、これはサブバンド間の包絡関数の重なりから説明される。

以上で関係するセッションの発表について述べた。やはり半導体超格子・微結晶の光物性の中心はエキシトンのダイナミクスであろうと思われる。特に、現在急激な勢いで進展している超高速分光技術が、この分野の大きな牽引力となっている。

(廣嶋透也)

2. 半導体レーザー素子と物理・オプトエレクトロニクス

今回のIQECでは、日本開催ということから、

量子エレクトロニクスのなかでも、とくに、日本が得意とする半導体レーザーに関連して、このセッションが設けられたものであろう。ポスターも含めて、35件のうち、日本からのものが16件であったから、やはり、平均よりは、この分野での日本の寄与が高いと云える。以下に紹介する論文は、かなりランダムな選択になってしまっていることをおことわりしておく。

2.1 半導体レーザーの最近の進歩

半導体レーザーの最近の進歩は、(1)コヒーレント化、(2)短波長化、(3)高出力化、(4)低しきい値化、の4つの方向において、著しいものがある。これら、4つの方向の発展について、それぞれ、招待講演で、現状がレビューされ、また、研究成果が発表された。

まず、半導体レーザーのコヒーレント化は、日本がリードしている分野であり、そのコヒーレント通信への応用を中心にした現状紹介が、池上(NTT)によってなされた(MB-1)。

短波長化については、鈴木ら(東芝)が、可視光半導体レーザーの現状をレビューした(MB-2)。780nm以上では、AlGaAsが、また、700nm以上では、AlGaInPを格子整合の取れているGaAs基板上にMOVPEで成長したものが用いられている。667nmで、31mW cwが得られている。波長を短縮するには、Alの混晶比を上げなければならないが、そうすると、結晶性が悪くなり、発振しなくなる。記録的には、77Kではあるが、583.6nmという黄色の光がcwで得られている。一方、Ga_{0.5}In_{0.5}Pでも、GaとInが自発的な超格子構造をとるため、バンドギャップが変化して波長が短縮し、660nmまで得られている。

高出力化を実現するためには、活性層断面の面積拡大が必要となるが、これをフェーズドアレイで実現する方法と、単一ストライプで実現しようとする、いわゆる、ブロードエリア型がある。Hadleyら(Sandia National Lab.)は、活性層幅を60μm程度まで広げても、注入電流分布による屈折率変化をあらかじめ考慮して、

活性層の屈折率配分を設計すれば、大電流注入時にも、単一モードが保持できることを、シミュレーションと実験の両方で示した (MB-3)。一方、Begleyら (Ball Aerospace System) も、広面積化には、広い活性層にわたる均一な熱消散が重要であることを指摘した (MB-4)。これまでの報告では、パルス動作のピークではあるが、センチメートル当たり、80から150ワットの1次元アレイが実現できたとのことであり、さらに、これをスタッキングして、9000個以上の2次元アレイとしたとき、平方センチ当たり、3500ワットのピークパワーを40%以上の効率で発生できたとのことである。また、 10^9 パルス動作後にも、その出力に低下が見られないことから、信頼性にも自信を持っているようである。Sandia研にしる、Ball Aerospaceにしる、ハイパワーレーザーに関連する研究機関が、半導体レーザーの高出力化に取り組みはじめたのが注目される。

低しきい値化に関して、Kaponら (Bell Com) は、パターン化量子井戸 (PQW) 半導体レーザーについての、最近の成果を紹介した (MB-5)。PQWはパターンニングとエッチングで作ったミクロンオーダーの幅を持つV溝などの非平面構造上に、MBEなどにより量子井戸を成長させたもので、こうすると、斜面に成長する量子井戸の層厚は、V溝の中心から両端にかけて減少する。したがって、V溝の周辺部ほど、ギャップエネルギーは大きくなるので、キャリアの横方向閉じ込めが有効に起こる。数ミクロンの範囲にキャリアを閉じ込めたとき、端面コーティングなしで、しきい電流1.8mA、微量量子効率63%を得ている。つまり、プロセスとしては、平面的な通常の方法を用いながら、準2次元的なキャリアの閉じ込めが実現できているわけで、この方法を更に発展させれば、量子細線や、3次元的閉じ込め、すなわち、量子ドットの作製に有用であると思われる。

Yarivら (Cal. Tech) は、2次元、1次元、0次元の量子井戸レーザーについてのしきい電流の理論式を示して、それぞれのしきい電流の

実的な予測値を、2次元で、0.1mA、1次元で、 $10\mu\text{A}$ 、もちろん、0次元では、更に低しきい値となるとした (TuB-1)。しかし、 $1\mu\text{A}$ につき、 $1\mu\text{W}$ 程度の出力が期待できる通常の半導体レーザーにおいて、0次元量子井戸レーザーのごとき、低しきい値のレーザーが、意味があるのか、といったことについては、議論の別れるところである。同様の議論は、より詳細に、荒川ら (東大) によってなされており (TuP-45)、0次元化によって、しきい値以外に、変調バンド幅の増大、発振スペクトルの純化などが期待できることが示された。

古谷ら (富士通) は、以前からAlGaAs-GaAs MQW レーザーを井戸方向に沿って電流注入する構造を提案していたが、今回そのcw発振にはじめて成功している (TuJ-1)。これはプレーナ構造となるから、OEICの光源として用いるときに、整合性がいいことや、MQWに対する注入効率の改善、ならびに浮遊容量の減らせる構造であることなどから、高速変調に対する適合性など、多くの利点を持つと考えられる。現状では、まだ、しきい電流も高く、出力も低い、緩和振動の周波数は通常の注入法によるそれよりも高くなっており、今後の発展が期待される。横方向注入に関しては、Wangら (Lockheed) が、面発光レーザーに対して適用しており、2mAのしきい電流を得ている (TuP-43)。

2.2 量子井戸 (QW) の物理とデバイス

QW構造の利用が量子エレクトロニクスにおいて一般化するにつれて、そのデバイスへの応用に関連したフィジックスの理解が進んできた。

Deveaudら (Bell Lab) は、多重量子井戸 (MQW) 中に注入されたキャリアが井戸中に捕捉される時間の測定を、400fsのパルスを用いて、InGaAs (井戸)/InP (バリアー) の系について、各々の部分からのフォトルミ (PL) の立ち上がりと減衰を観測することにより行った (TuG-1)。バリアー厚が500Å程度では、バリアー部からのPLの減衰から、捕捉時間は数

psと観測される。これは、このとき、キャリア注入プロセスが通常の拡散で決まることを示している。バリアーが200Å以下になってくると、キャリアの平均自由行程がバリアー幅を上回ることであり、捕捉時間は量子的なプロセスで決まると考えられる。これは、バリアー部からのPLの減衰と井戸部からのPLの立ち上がりとして観測され、測定的时间分解能400 fs以下であった。この捕捉時間はQWデバイスのキャリア注入に伴うレスポンス時間を決定するもので、QWのデバイス応用上重要なファクターである。

GaAs/AlGaAs 単一量子井戸 (SQW) レーザーのしきい電流が、QW部と基板との間にGaAs/AlAsの短ピッチ超格子を挿入することにより、大幅に低減できることは、従来から知られている。横山ら (NEC) は、SQWからのPLの減衰時間が、GaAs/AlAs超格子の挿入により、大幅に増大することを見いだした (TuG-2)。さらに、GaAs/AlGaAsのダブルヘテロ構造のGaAs部の厚みを変えて、PLの減衰時間の変化を観測した。減衰の支配的要素が非発光再結合であるとして、PLの減衰時間で非発光再結合寿命を決定し、その減衰時間が厚みにはほぼ逆比例することを見いだした。このことから、この非発光再結合の主要な部分がヘテロ界面に存在すると云える。そこで、彼等はSQWレーザーにおけるGaAs/AlAs超格子の存在が結晶成長時のバッファ層として働き、SQWヘテロ界面の欠陥の大幅な減少に役立ったと結論している。

QW半導体レーザーの利得スイッチングにより、ピコ秒台のパルスが得られたことが寒川ら (東大) により報告された (TuG-3)。理論的予測では、QWレーザーでは、微分利得が通常のDHレーザーに比べて4倍ほど大きく、このことがパルス幅の短縮に役立つとしている。色素レーザーからの30psの光パルス利得スイッチングにより、1.3psパルスを800 kHzの繰り返しで得ており、外部キャビティーを用いない半導体レーザーからのパルスでは、これまでの最短

記録と云える。ただし、自然放出の影響のため、パルス毎の変動が大きく、パルス波形が一定しないということをストリークカメラで観察している。

2.3 半導体レーザー中の非線形性とその応用

半導体レーザー利得媒質中の非線形性による縮退4波混合 (DFWM) は、デバイスへの応用と同時に、最近、その非線形性の観測手段として、あるいは、古くからの2準位系における共鳴蛍光の一具体例として、関心の持たれる問題である。準縮退4波混合 (NDFWM) の場合について、向井ら (NTT) は、InGaAsP 半導体レーザーを用いて、1.5μm帯での実験を行っている (WD-1)。ポンプ光による信号光の変換効率 (通常の増幅器の場合の増幅率に相当) として、最大14dBが観測された。NDFWMは、増幅器以外にも、可同調フィルターや、4波パラメトリック発振器など、応用範囲が広く、今後の発展が期待される。

半導体レーザーの電極を分割して、注入量に差をつけると、一部を非線形吸収体に使えるので、非線形な増幅特性や、双安定性の発現が期待できる。Marshallら (British Telecom) はInGaAsP半導体レーザーの電極を分割し、増幅特性の非線形部分を用いて、増幅特性を調べた (WD-4)。最低繰り返し時間、700psで、-51dBmの入力で、26dBのゲインと、立ち上がり時間200ps (検出器限界)を得ている。低入力と立ち上がりの速さで、注目される結果である。

半導体レーザー利得媒質中のパルス通過時のキャリアのダイナミクスについて、Ippenら (MIT) から、サブピコ領域における実験結果の報告があった (WD-3)。増幅状態に保たれたGaAlAs半導体レーザーのガイド層中を350 fsの光パルスを通過させ、これによるキャリアの変動を、利得の変動で捉えるもので、時間分解は、CWプローブ光をLiIO₃を用いた和周波サンプリングで行っている。パルス通過による利得の低下は2 ps以内にも回復するが、完

全に回復するには、ナノ秒台の時間を要する。しかも、この状況は、プローブCW光の波長を利得帯域内で変えても、変わらなかった。このことは、この程度の時間スケールでは、すでにバンド内緩和が完了しており、キャリア全体がヒートアップしていることを示している。従来、GaAs系レーザーについて一般に云われている緩和の機構と時間スケールに一致する結果であるが、実際に測定したということで意味がある。

2.3 量子井戸ならびに超格子関連オプトエレクトロニクスデバイス

量子井戸(QW)や超格子を利用したオプトエレクトロニクスデバイスとしては、量子準位間の共鳴トンネリングによる赤外検出器と、量子閉じ込めシュタルク効果(QCSE—Quantum Confined Stark Effect)関連のものが招待講演で注目された。

多重量子井戸の量子サブバンド準位間の遷移は赤外域の波長に対応する。GaAs/AlGaAsのMQWを変調ドープした構造中での共鳴トンネル伝導を利用した波長 $10\mu\text{m}$ の光検出器について、Levine (Bell Lab.) は、通常この波長で使われるHgCdTeなどに比して、これが、高速、高検出効率、GaAs-FETなどとの集積可能性など、多くの利点を持つことを説明した(TuB-3)。量子準位をただ1個となるように井戸幅をとれば、連続準位との遷移と伝導帯伝導を利用した検出器ができ、広帯域性を得ることもできる。また、MQWをInGaAs/InAlAsに変えれば、波長 $4.4\mu\text{m}$ の光検出器もできる。

GeSiひずみ超格子が新しいオプトエレクトロニクス材料として、種々の新しい可能性を与えることをPearsall (Bell Lab.) が、その招待講演で指摘した(TuB-4)。SiとGeは、それらの層厚が $10\text{\AA}$ 以下であれば、ひずみ超格子としてエピ成長可能で、Ge-Si単原子層、2原子層、4原子層超格子が調べられた。その結果、含まれるひずみ量に応じて、バンドギャップ、バンドオフセットが変化することや、なかば直接遷移的な特性が現れること、などがわかった。光

検出器用は材料として注目される。

QCSE利用した典型的なデバイス、SEED (Self Electro-optic Effect Device) であるが、SEEDの最近の発展についてのレビューを、その開発者の一人である Miller (Bell Lab.) がおこなった(TuB-6)。SEEDはGaAs-AlGaAsなどのMQWを変調ドープしてダイオードを作り、これを光検出器として用いて、負荷抵抗に発生する検出電圧をMQW室温エキシトンによるQCSEを介して、MQWの光透過率にフィードバックするもので、一部に電気回路(負荷抵抗)を介しているという意味で、純粋に、オールオプティカルデバイスとは云いきれないが、光入出力に関する限り、そうと云える。この点から、そのレスポンスに関しては、あまり多くを期待できないが、SEED以外のオールオプティカルデバイスの現状では、光プロセッシングへの応用に対して、SEEDが最短距離にあるデバイスと云えるかも知れない。最近では、ダイオードを負荷としたD-SEED、2個の特性の揃ったSEEDをシリーズに接続して、互いに相手を負荷と見るS-SEED、また、MQWのQCSEを用いた光変調器をFETおよび光検出器と集積化したF-SEEDなど、変種がたくさん出てきているようだが、いずれにしても、含まれる電気回路要素の比重が大きくなればなるほど、限りなく電気デバイスに近付いてゆくことになる。その意味で、レスポンスは電気回路で律速されることになってしまう。したがって、SEEDの最近の発展方向は、レスポンスの追求よりも、その2次元アレイ化による光並列処理の利点の活用へと移っていつているように見える。

Chemlaら(Bell Lab.) は、SEEDをInGaAs/InP MQWで作成し、はじめて $1.6\mu\text{m}$ 帯で実験している(TuG-5)。SEEDの光通信への応用を考えると、この結果は重要である。また、先にも出てきたS-SEEDをInGaAs/InPのMQWでできた $1.6\mu\text{m}$ 用のダイオードとGaAs/AlGaAsのMQWでできた $0.85\mu\text{m}$ 用のダイオードの直列接続で構成し、 $1.6\mu\text{m}$ の光による 0.85

μm の光の変調実験を行って、これを modulation converterと呼んでいる。その構成から考えて、逆方向の変調変換も当然可能である。ここで、注目すべきは、InGaAs/InPのMQWは、InPの基板上に成長させるが、InPが $1\mu\text{m}$ 以上の波長において透明であるため、GaAs/AlGaAsのSEEDで必要であったGaAs基板の除去といったプロセスが、 $1.6\mu\text{m}$ SEEDのプロセスでは不用になることである。基板除去のプロセスがなければ、特性の良好なエタロンを均一に作ることができ、SEEDのアレイ化には都合がよい。SEEDのレスポンス・スピードについては、相変わらず、報告がなかった。

QCSEは、当然そのまま、光変調器に使える。問題は、QCSEによるオンオフのコントラスト比が低くて、そのままでは、十分な変調度が取れないことと、エキシトン吸収ピークの近くで使うので、損失が大きいことなどである。Leeら(Bell Lab.)は、エタロン構成とし、エキシトン吸収ピークからの十分の離調によって、吸収損を避けながら、QCSEの分散変調効果を利用することを試みている(TuB-6)。「同種のところみは、すでに国内で報告されているが。」一方、脇田ら(NTT)は、QCSEの吸収変調効果を利用するのだが、導波路構成とすることによりコントラスト比をかせいでいる(TuB-7)。この際、吸収損は、やはり、離調によって避けるが、そうすると当然、変調度は下がる。Leeらの結果(AlGaAs/GaAsのMQW、波長 $0.85\mu\text{m}$)が、5:1のオンオフ比、60%の透過率を得るのに、30V程度の変調電圧を要しているのに対して、脇田らの結果(InGaAs/InAlAs、波長 $1.5\mu\text{m}$)は、15dBのオンオフ比、挿入損失2dBを得るのに、2V程度の変調電圧ですんでいるので、軍配は、後者に上がりそうだが、QCSEの分散変調効果の方が、原理的には有利なはずで、今後は、その導波路型への適用が待たれる。

以上、量子エレクトロニクスのこの分野の最近の発展を、IQECの発表に見てきたが、現在の半導体レーザーやオプトエレクトロニクスデ

バイスの発展から見ると、今後は、なお一層活発に、量子効果の利用と、その非線形性の活用が追求されてゆくだろう、というのがこの分野で筆者が受けた全体的な印象であった。

(張 吉夫)

3. 光通信・情報処理・その他の応用

3.1 まえがき

IQECは通常、応用分野を扱うCLEOと共催されているが、今回は、日本で独立して開催ということで、光通信、光情報処理その他の新しい応用分野もとりあげ、トピックスを中心にシンポジウムおよびセッションが構成された。

シンポジウムは、従来実用になって来ているシステムの構成原理とは異なった新しい現象や理論を必要とし、かつ最近の進歩が著しい分野を中心に構成された。シンポジウムで取り上げられたテーマは、「コヒーレントおよびソリトン光通信」、「非線形導波路デバイスと応用」、「光コンピューティングとニューラルネットワーク」である。また「フォトリック・スイッチング」、「生物医用応用」のセッション、「レーザー応用」、「レーザー計測」のポスターセッションが開かれた。

3.2 光通信

雑音状の光を強度変調し、直接検波する方式は、すでに実用になっているが、ギガビット/秒光通信の実現により、DFB・LDなどコヒーレンシのよいレーザーの開発が進められてきた。このような光源の進歩にともなって、光波の振幅・周波数・位相を変調し、受信側では、ヘテロダインやホモダイン検波を行なうコヒーレント光通信技術の研究が活発化している。また、光ファイバの非線形効果(カー効果)による自己位相変調による周波数チャープングと、光ファイバの分散によるパルス広がりやをバランスさせることにより、ソリトンを発生し伝搬させることが可能である。光源技術の進歩により、ソリトンの実証も行なわれるようになっていく。

コヒーレント光通信関係では、K.Nosu(NTT)

が、コヒーレント光通信の意義は、長スパン化と、光周波数多重 (FDM) による超大容量化にあり、光ファイバ当たり 1 Tb/s の潜在的通信能力があること、および 4 Gb/s/200km の実験成功とヘテロダイン検波における遅延等化の効果を示した。また、R. -P. Braun (HHI) 等は、コヒーレント・マルチチャネル・ネットワークの概念を提案し、分配網への適用と問題点を論じた。特に、光ファイバの非線形性の影響が無視できないこと、また逆に、非線形性を利用して、スイッチや、増幅、フィルタ等が期待されることを述べた。J. J. Bernard (CGE) 等は、1990年代始めの衛星間通信にコヒーレント光通信の適用を狙っていると述べFSK-ヘテロダイン検波による構成案を示した。

ソリトン光通信では、L. F. Mollenauer (AT&T) 等が、41.7kmの光ファイバと、モードロック・カラーセンタ・レーザー (パルス幅55 ps, 波長1600nm) 光源およびラマン増幅器 (1500nm CWカラーセンタ・レーザー) による光ファイバ損失補償等により周回実験を行い、6000 kmまでソリトン波形の伝搬が可能であることを示した。従来の報告では、4000kmであったが、ジッタを改善することにより、理論限界に近い距離まで、ソリトンが伝送できることを示した意義は大きい。N. J. Doran (BTRL) や S. Trillo (FUB) 等は、光ファイバ中や光カップラのソリトン波動伝搬やスイッチングについて、理論的な検討結果やシミュレーション結果を報告した。PD論文で、K. Iwatsuki (NTT) 等は、LD出力光源による、2.6GHz繰り返し光ソリトンの10km伝搬の観測結果を報告した。

また、G. H. Sigel (Rutgers大) は赤外光ファイバの現状は、0.7 dB/kmであり、製造法に一層の努力が必要なこと、および、通信以外の用途例えば、計測、エネルギー伝送などへの応用は可能になってきていると述べた。

3.3 光導波路デバイスと応用

光ファイバブリリアン散乱の増幅・波長選択復調への応用、LD光源による光ファイバ

ラマン増幅、半導体ドープ単一モード光ファイバの製作と非線形特性、非線形導波路デバイスの実験と理論検討などが興味を集めた。

R. W. Tkach (AT&T) 等が、光ファイバ中の誘導ブリリアン散乱を利用して、増幅、波長選択、FSK信号の復調を同時に行ない、128 × 128のスイッチの可能性と波長830 nmで250 Mb/sの伝送実験結果を示した。信号およびポンプ光源として、AlGaAs・LDを適用しており、実用に一步近づいてきた。

K. Mochizuki (KDD) はラマン増幅を光伝送系に適用する場合の雑音特性について論じ、半導体LDをラマン光源として用い565 Mb/s FSKで7.5 dB, IMで5.9 dBの利得を有することを示した。

D. Cotter (BTRL) 等は、約10 psの応答速度を有する半導体 (CdSSe) ドープ単一モード光ファイバの製造条件と非線形特性について論じた。M. J. LaGasse (MIT) 等は、光ファイバカー効果によるフェムト秒干渉計、Y. Silberberg (BCR) は全光スイッチの重要性は高まっているとし、光ファイバカー効果導波路デバイスとして、光ファイバ形スイッチや非線形方向性結合器などを紹介した。L. Thylen (Ericsson) はビーム伝搬法により、非線形導波路デバイスが、有効に設計できることを多くの実例で示した。

非線形効果の大きな材料開発と回路設計の両面からの研究進歩が望まれる。

3.4 光コンピュータとニューラルネットワーク

並列光コンピュータ、量子光コンピュータ、ニューラルネットワーク、イメージ処理等の発表があり、着実な研究の進展を印象づけた。

D. Psaltis (Cal Tech) は空間の並列処理により、膨大なインターコネクションを有するシステムの実現性があることを述べ、ニューロン間のホログラム結線の要求条件を示した。

並列光コンピュータについて、M. A. A. Neil (Cambridge大) 等は、液晶空間変調器とオプ

トエレクトロニクスアレー素子を利用したニューラルネットワーク構成法, J. Tanida (阪大) 等は, 複屈折符号化投影相関光学系による並列光論理演算の実験, M. P. Prise (AT&T) 等は, SEEDデバイスを用いたデジタル光コンピュータについて報告した。

K. Igeta (NTT) 等は, 熱力学的限界の存在しない量子光コンピュータの可能性と, 損失をとみなさないスイッチングのモデルの提案, およびスクイズ状態の光源として, $\lambda/2$ の微小キャビティ半導体レーザーの提案と発表報告を行なった。

T. Sizer (AT&T) は, 光コンピュータのためのクロック光源として, モードロックレーザー出力のFPエタロンを用いたスペクトル処理による1GHz繰り返しパルスの発生法, T. Kurokawa (NTT) 等は, ZnS非線形エタロンによる光フリップフロップとゲート動作について報告した。動作速度は, $20\mu\text{s}$ で, 10mW程度のパワーが必要である。

イメージ処理関連では, T. Tschudi (IAP) 等が, 位相共役光帰還システム, M. K. Kim (SRI) 等が, フォトンエコーを用いたリアルタイム処理, Z. Zhiming (Dudan大) 等が正弦・余弦フーリエ変換によるパターン認識の報告を行なった。

3.5 フォトニックスイッチング

低速, 中速, 高速領域における光技術の適用, 全光カー効果デバイス, SEEDデバイスによる光交差網, 光注入型微小共振器GaAsデバイス, フェムト秒パルス波形整形技術などが注目され, 今後の発展が期待される。

P. W. Smith (BCR) が光とエレクトロニクスの適用領域について述べ, 光は, 低速・低消費電力の並列処理, 半導体エレクトロニクスと競合するがインターコネクション性に優れた中速領域, 少し電力は多いが超高速動作が可能なピコ秒以下の高速領域のそれぞれの領域で進歩の可能性があることを示した。J. Hahns (AT&T) は, SEEDデバイスを用いた光交差網の

構成と実験, J. L. Jewell (AT&T) 等は, 光注入微小共振器GaAs半導体デバイス, A. M. Weiner (BCR) 等は, フェムト秒光パルスの時間・周波数領域の操作により種々の光波形整形ができ, 符号分割多重アクセスへの適用やダークソリトンの発生など応用が広いことを示した。A. Morimoto (阪大) 等は, 位相変調器とFPフィルタにより繰り返し速度の速い光パルス列の発生の可能性, R. Jin (Arizona大) 等は, PD論文としてGaAs/AlGaAs非線形方向性結合器の試作例と光スイッチ特性を報告した。

3.6 生物医用応用および計測

T. Kasuya (RIKEN) 等が, 細胞内への異物挿入とレーザー顕微鏡について, S. Sato (東北大) 等が, レーザー励起高感度蛍光顕微鏡, T. Damm (Friedrich-Schiller大) 等が, モードロックレーザーによる超高速処理顕微鏡とプロセス, M. Yamashita (電総研) 等が, 悪性腫瘍細胞中のHpDのピコ秒分光, A. D. Twig (Berne大) 等が, レーザー手術の貫通深さの研究結果を報告した。またPD論文として, R. Q. Scott (JRDC) 等が, 2次元微弱光子計数画像による生体フォトン発光の観測について報告した。

ポスターセッションでは, レーザーアイソトープ分離, レーザーCVDによるSiON, SiNの作成, 兎などの眼球レンズの経年変化, 大気中のコヒーレントLidarなどのレーザー応用, レーザー増幅器のコヒーレント性への影響, 回折光子結合器, ヘテロダイン型半導体レーザーPLL, ヘテロダイン型高感度ラジオメータなどレーザー計測の発表があった。これらの分野における新しい応用と精度の向上への試みが興味深い。

3.7 むすび

第6分野のプログラムでは, レーザーの新しい応用に関して, 基礎的なしかも最新の研究成果が招待講演者を中心に紹介され, 会議参加者は最先端の研究の動向と応用分野の広がりをと

らえることが出来たのではないと思われる。
超高速，光出力化，コヒーレント性の向上，高
感度化の観点で，研究が活発化してきていると
感じた。現象の発見から，デバイス化，応用の
間の連携が一層重要になってきたと思われる。

(中川清司)

参考文献

- 1) 松岡正浩：日本物理学会誌 **41** (1986) 934.
- 2) R. L. Fork, et al.: Opt. Lett. **12** (1987) 483.
- 3) D. C. Edelstein, et al.: Appl. Phys. Lett. **52**
(1988) 2211.
- 4) A. Honold, et al.: Appl. Phys. Lett. **52**
(1988) 2105.
- 5) M. Mitsunaga, et al.: J. Opt. Soc. Am. **B5**
(1988) 1448.