CLEO/QELS 2000報告

伊藤 弘昌^{*,**}, 小林 洋平^{***}, 小関 俊政^{****}, 猿倉 信彦^{****}, 小山 二三夫^{*****},
和田 智之[†], 平等 拓範^{****}, 今井 一宏^{**}, 南出 泰重^{**}, 松本 正行^{††}, 佐藤 尚^{*},
熊谷 寛^{†††}, 向井 剛輝^{††††}, 吉田 正裕^{†††††}

^{*}東北大学 電気通信研究所 (〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平2-1-1)

^{**}理化学研究所 フォトダイナミクス研究センター (〒980-0868 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399)

^{***}電子技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園1-1-4)

^{****}岡崎国立共同研究機構 分子科学研究所 (〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中38番地)

^{*****}東京工業大学 精密工学研究所 マイクロシステム研究センター (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田4259)

[†]理化学研究所 工学基盤研究部 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1)

^{††}大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

^{†††}理化学研究所 レーザー物理工学研究室 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1);

(〒980-0868 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉519-1399)

^{††††}(株)富士通研究所 基盤技術研究所 (〒243-0197 神奈川県厚木市森の里若宮10-1)

^{†††††}東京大学 物性研究所 (〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

Report on CLEO/QELS 2000

Hiromasa ITO,^{***} Yohei KOBAYASHI,^{***} Toshimasa KOZEKI,^{****} Nobuhiko SARUKURA,^{****}
Fumio KOYAMA,^{*****} Satoshi WADA,[†] Takunori TAIRA,^{****} Kazuhiro IMAI,^{**} Hiroaki MINAMIDE,^{**}
Masayuki MATSUMOTO,^{††} Takashi SATO,^{*} Hiroshi KUMAGAI,^{†††}
Kohki MUKAI,^{††††} and Masahiro YOSHITA^{†††††}

^{*}RIEC (Research Institute of Electrical Communication), Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577

^{**}Photodynamics Research Center, RIKEN, 519-1399 Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0868

^{***}Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

^{****}Institute for Molecular Science, Laser Research Center for Molecular Science, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585

^{*****}Microsystem Research Center, Precision & Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8503

[†]Advanced Engineering Center, The Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

^{††}Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

^{†††}Laser Technology Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198;

519-1399 Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-0868

^{††††}Fujitsu Laboratories Ltd., 10-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0197

^{†††††}Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

(Received July 12, 2000)

1. はじめに

2000年5月8日～12日、サンフランシスコのモスコセンタで開催されたCLEO/QELS 2000は、よく知られているように毎年米国の東部と西部の都市、といっても近年はボルチモアとサンフランシスコで交互に毎年開催される、レーザーおよび量子エレクトロニクス分野の最大の国際会議の一環である。今回の参加登録者は6500人を超え、前年度から斬増で内約4千人がテクニカルセッションの登録者とのことであった。従来レーザー関連の会議でこの

CLEO/QELSは最大規模を誇っていたが、本年3月に開かれたOFC (Optical Fiber Communication) の参加者は、テクニカルセッション登録が5千人(昨年のなんと2倍)、展示入場者を含めると1万8千人を超え、いかに光network関連の研究開発やビジネスが過熱しているかを示していた。展示会の規模や、会議スポンサーのサポートにも、大きな差が出ているとは双方に参加した米国の友人の言であった。いずれにしても米国のITやnetworkに対する企業マインドは異常とも言えるほどで、その傾向が世界に波及していくと共に、余りに急な成長の反動が数年後に必ず来ると思われ、ふ

り廻され易い我国の動向が気にかかる。

本年は2000年というミレニアムの会議であったが、日本からの参加者や動きがあまり大きくなかったように思えた。これは、これまでこの会議には必ず出席して、本会議運営にも直接貢献していた人々の顔がかなり見当たらなかったためかも知れない。逆に若い人の参加が多くこれも世代の交代期なのかも知れない。10の平行セッションが5日間にわたってあり、プレナリー3、チュートリアル13、招待講演CLEO43/QELS59、オーラル573/259、ポスター215/92と39のショートコースという構成で約1250の発表があった。現在一番hotな光通信やネットの話題はOFCに中心が移ったこともあり、この会議はより基礎的なトピックスや新しい技術動向が多くなると共に、ショートコースやチュートリアルを充実させて参加者を得ていることがみられる。

昨年までは会議初日の午後に行われていたプレナリーセッションが、今年は2日目の朝一番に移された。プレナリーではIEEE, OSA, APSの主催者側からのキーノート講演が、各一件ずつあった。中でも、Agilent TechnologyのS. JoinerはVCSELの通信への展開を熱く語っていた。彼も冒頭で述べていたが、東工大の伊賀教授のグループによる研究によってVCSELの今日があるのだが、これまでの多くのわが国の先駆的な研究がそうであったように、国内で花開かず海外であつという間に現実レベルまで事が進んでいることを知って、何とも複雑な気持ちを抱かずにはいられなかった。5年以内に90%以上の通信用LDがVCSELに置きかわると述べ、現在でもすでに16%程度はVCSELとのことで、この数字の信憑性は疑わしいがその鼻息は荒く、聞いていて何か我国の動きをもどかしく感じた。今年度のIEEEのQuantum Electronics Award 2000はStanford大の山本喜久教授に授与された。これまでの独創的で卓越した研究成果が世界に認められたことは大変喜ばしく、この紙面でもお祝い申し上げる。主催3学会のFellowの授与も例年のように行われた。本年日本からはOSAのFellowを電通大植田 憲一教授と私が受けた。我国の研究内容やレベルから、もっと多くの数のプログラム委員会への参加や、invited talkなどに貢献すべきであり、依頼された人は積極的に動くことが必要である。プレナリー終了後そのままエキジビションのオープニングにつながるという今年からのプログラム構成は、エキジビタに好評であり、今後このスタイルが定着するかもしれない。

会議の具体的なトピックスは、それぞれの専門家が執筆をされるので譲るが、気がついた動向としては、光通信関連の報告がわずか2スロットあるだけで、殆どがOFCに移っていることは前述のとおりである。フォトリソグラフィは本年度のQELSの中心トピックスとして取り上げられており、新しい実験結果が多数報告された。また最近の動向がめざましいQuantum Cascade Laserは、発振を実現した機関数がヨーロッパを中心に増え、底辺の広がりを見せているとともに、先進のグループからは埋め込みやDFB構造などによるモード制御した連続動作(ただし77K付近での動作)の報告が多く、出力の品質が問題になっている。我国からの参入が未だなのはさびしい。これらの例は、前述

のようにCLEO/QELSがより物理的で基礎的な側面の研究が戻ってきているものである。

最近のこの会議では、就職情報の提示やインタビューをやるための部屋が用意されていたが、今年は展示会場の一隅に所狭しと貼られたあらゆる転職の具体的な求人案内と共に、インタビューの予約申し込みが貼られていて、空いている所に自分でサインアップして説明を直接会社担当から聞くようになっていた。その机の数だけでも20近くあったように覚えており、米国の空前の好景気で、光技術者が大幅に不足していることが良くわかる。シリコンバレーでは、給料は既に十分高いレベルにあるので、現在ではストックオプションがもらえる会社かどうか、良い技術者を引き抜けるかどうかにかかっているとのこと。日本の大手の現地法人でも、発展が早く良い技術者を必要とする採算性の良い部門が親会社の意志で独立して別会社を作る動きも多く、その目的がストックオプションによる人材確保であるという。ストックオプションによって億円以上の株をもつ人が随分多いようで、桁違いのお金の話が飛び交うのが何かむなしく思えるのは持たない者の僻みからだろうか。

会議を通じてヨーロッパの大学からのレベルの高い発表が目立った。特に英語のレベルが近年格段に進歩したように感じる。これは全ヨーロッパで学生の交流が極めて活発になってきたことが理由の一つだと著者は思っている。CLEO/QELSのように基礎に目を向けた会議からまた新しい目が多く出て、その中に我国の貢献が数多く含まれることを期待したい。

(伊藤 弘昌)

2. 超短パルスレーザー

ここでは超短パルスレーザーの開発及び応用分野について報告する。超短パルスレーザーに関するセッションは非常に多岐にわたっており、パラレルセッションとなっている部分もあるため、本稿では筆者が聞いたものの中から紹介する。

まずはレーザー発振器について報告する。全体的に見ると最短パルス幅競争は一息ついて、次の段階としてパルスの包絡線に対する電場の位相をどのように決めてコントロールできるかという方向性が出てきたように感じられる。CPD1ではWien工科大学のKrauszらとMax-PlanckのHänschらによって、シングルモードファイバを用いた1オクターブ以上の広帯域にわたる白色光発生、及びそれを用いたキャリアフェーズの測定の講演があった(Fig.1)。シングルモードファイバでスペクトルを十分広げるために、発振器の工夫をして9fs, 20nJのパルスを発生させ、これをファイバに入力している。白色光の帯域がこれほど広範囲にわたると長波長側のSHGが自分自身のスペクトルと重なってくる。この重なった部分でのビートを観測することにより、キャリアの位相がパルスの包絡線に対してどのようになっているかの情報が得られるのである。彼らは10kHzのビート信号を綺麗に示していた。これに関連してQWF1では同じくHänschがフェムト秒レーザーと超精密測定分野との融合について講演した。フェムト秒レー

Fig.1 (CPD1-1, Fig.1, A. Poppe, *et al.*)

ザーはパルスの繰り返し周波数ごとの縦モードをもつ。そしてその帯域は上記のファイバ等を用いると1オクターブ以上の広範囲に及ぶ。従って、フェムト秒を用いて周波数チェーンを構築することや、自分自身と第2高調波が干渉することを用いて絶対周波数を決定することができるようになる。今まで周波数安定化cwレーザーと超短パルスレーザーは、いわば対極の存在であったが、融合領域があり新しいフェムト秒レーザーの応用分野として期待される。さらに、CThK4ではNISTのグループはレーザー発振器の出力をMicrostructure fiberに入力することにより超広帯域の白色光を発生させ(Fig.2), やはりSHGと自分自身の干渉を観測し、制御することによりキャリア位相の制御を行っていた。このMicrostructure fiberは多数の中空穴を持つ特殊な構造のファイバで既存のファイバでは得られない分散特性を実現できる。彼らのグループではパルス間のキャリアフェーズシフトを $\sim 10^{-5}$ radに制御することに成功していた。CPD30ではBath大学のBirksらがファイバを引き延ばしてテーパ状にしたものを用いて超広帯域の光を発生させた。これらのファイバの工夫により超広帯域光発生が可能となってきた。キャリアフェーズがらみではCFE5で電総研の小林らが分数周波数比を持つ光パルスをフェムト秒OPOにより発生させ、ポンパルスに対するシグナル、アイドラーパルスのキャリア位相の流れる様子を観測した。この技術は今後光シンセサイザやサブフェムト秒パルス列発生の実現への重要なステップとなる。これらのように、光パルス内の電場の位相までを観測制御できるようになった。

超短パルス光発生ではCThE6で北大の山下らは再生増幅器の出力を中空ファイバ中の希ガスに集光しスペクトルを広げ、空間位相変調器でパルス圧縮することによりサブ5fsパルスを発生させた(Fig.3)。空間位相変調器を用いることにより、高次の分散も補償することが可能となりこのような短パルスを発生することができたわけである。こ

Fig.2 Generated continuum from microstructure fiber. (CThK4, Fig.3 (a), M. Boucher, *et al.*)

Fig.3 Measured interferometric autocorrelation of the shortest pulse. The solid curve is a fit of a sech^2 with a FWHM of 4.7 fs, and the open circles are calculation from IFFT of the pulse spectrum with FWHM of 4.9 fs. (CThE6 Fig.2, L. Xu, *et al.*)

の方式はチャープミラーを用いなくて良い点に特徴がある。CPD4ではMITのChudobaらがCr:forsteriteレーザーで14fsのパルス幅を達成した(Fig.4)。これはTi:sapphire laserで非常にうまくいっているダブルチャープミラーのCr:forsterite laserバージョンを利用して、さらに、プリズムも併用してGDDを打ち消して得られている。やはり連名者であるKarlsruhe大学のKartnerらとTH DarmstadtのTschudiらが制作しているダブルチャープミラーの一人勝ちの感がある。発振器での短パルスをいかに出すかは、優れたチャープミラーをいかに作るかということになっているのが現状であろう。その作成グループの一人、Morgnerらによって、CThE5では1オクターブの帯域にわたるチャープミラーのデザインと制作についての発表があった。さらには東大の小林らと同様のOPAによる5fsパルス発生をCThE4でミラノ工科大のCerulloらが発表していたが、これもまた、上記のグループによるチャープミラーを用いている。

フェムト秒レーザーの応用についてまずはCMK1 (Tutorial)で行われたLucent TechnologiesのKnoxによる講演を紹介する。彼が挙げたフェムト秒レーザーの応用を羅列すると、レーザー加工、外科手術、THz光発生、2光子顕微鏡、コヒーレントフォノン (pulse sound generation)、光通信、電子加速、レーザーMBE、同位体分離、レーザー誘雷である。講演の内容で印象的なのは\$10のフェムト秒レーザーができれば、フェムト秒レーザーで焼くオーブントースターができ、これを用いると、表面の50nmがクリスピーで中は柔らかいパ

Fig.4 Interferometric autocorrelation measurement (triangles). The solid line represents a sech-fit and for a pulse duration of 14 fs. (CPD4 Fig.3, C. Chudoba, *et al.*)

ンが焼けると言っていた。勿論テラビット通信に必要であることにも触れていた。それぞれの応用にそれぞれ適した超短パルスレーザーがあるわけであり、特に超高強度レーザーシステムの応用を多く取り上げていた。超高強度レーザーとその応用の発表について触れることにする。

10Hz Ti:sapphireレーザーシステムや単発動作のガラスレーザーシステムでのピーク出力の増大の報告は見受けられなかったが、100TWクラスのレーザーの計画はポスターセッションで幾つかの発表があった。高繰り返し回のレーザーシステムではCThU6で東大物性研の鍋川らによる5kHz全固体Ti:sapphireレーザーシステムの報告があった。LD励起YAGレーザーを励起源としてパルス圧縮前37.7W、圧縮後22.2W、パルス幅22fs、繰り返し5kHzを得ている。高強度レーザーは高ピーク化と高繰り返し化の両方向に進んでいるようである。高ピーク化を目指すもう一つの方法として、OPCPAという方法がある。これは、シードとなる超短パルス光源をパルス伸長器でパルス幅をのばし、OPAで増幅するやり方である。この方法を用いると、励起光として巨大ガラスレーザーを用いることができ、ガラスレーザーよりも短パルスを生成することができる。さらに、波長は任意に選ぶことができる。CWC1でRutherfordのRossらはガラスレーザー励起のOPCPAにより10PWのピーク強度を生成する可能性を示し、集光強度は 10^{23} W/cm²となると主張していた。

超短パルス高強度レーザーを用いた応用としては、CWG1 (invited)でLawrence Livermore Natl. LabのZweibackらは4TW Ti:sapphireレーザー(パルス幅35fs、パルスエネルギー120mJ)を重水素クラスターに集光することによりクーロン爆発による核融合で放出される中性子の観測について講演した。これはスイッチオンによって中性子が得られる点で着目されている。また、CWG3でミシガン大学のVanRompayらは超短パルス高強度レーザーによって同位体分離が可能であることを示し、同じくミシガン大学のMaksimchukらはCWG4にて高強度レーザーにより10MeVの陽子を発生させ、これをBoronやCarbonに照射することにより放射化させていた。これらは10分程度の寿命を持ち、医療用として使えると主張していた。高強度レーザーを用いて電子加速をする応用があるが、これには高強度レーザーを長い距離にわたって集光する必要がある。高強度レーザーの開発の需要を生み出している。原理的には円形加速器で到達できない領域にまで加速する可能性があり様々な研究がなされている。短パルスレーザーがプラズマを生成する際、電子密度の粗密波を生み出し、電子がこれに波乗りをして加速されるというものである。これについてはCWG5では筑波大学の近藤らが高強度レーザーをガス中に集光することによって生成されるレーザー航跡場の振動する様子を2次元画像として観測することに成功していた。また、集光強度が 10^{18} W/cm²程度以上になるとレーザー電場で振られる電子の速度が相対論的な領域にまで到達するが、ミシガン大学のNeesらはCPD5にて再生増幅器からの出力を中空ファイバ中を伝搬させることでスペクトルを広げパルス幅8fs、パルスエネルギー0.2mJ、繰り

返し0.5kHzのパルスを発生させたことを報告した。これをdeformableミラーで波面補正を施し、軸はずし放物面鏡で集光することにより集光径1 μ mを達成し、集光強度も 1.5×10^{18} W/cm²に達した。比較的エネルギーが低く、高繰り返しで超高強度物理を研究できる光源として魅力的である。

また、集光強度が 10^{14} W/cm²程度の物理現象として高次高調波発生があるが、これについても幾つかの講演が行われた。高次高調波は極端紫外領域から軟X線領域において時間空間コヒーレンスに優れ、アト秒パルスを発生させる可能性にも注目されている。高次高調波の発生メカニズムについてはおおそ分かってきており、最近はいかに変換効率を向上させるかなどに興味に移りつつある。理研の玉木らはこの観点からCThP5において高調波発生最適化についての講演を行った。また、CFL6においてVienna大学のGeisslerらは高次高調波にて発生するアト秒パルスのパルス幅測定の方法を提案した。これは高強度の基本波レーザーでヘリウムイオンのクーロンポテンシャルを歪ませておいて、そこに高調波パルスが入射すると1光子でイオン化することができるが、レーザー電場がちょうど0の時には高調波ではイオン化できないという仕組みを用いている。実験的にどのようにヘリウム1価イオンを高密度で供給できるかというような難点はあるが、興味深い講演であった。

(小林 洋平)

3. 固体レーザー

最近の固体レーザーの新展開は、より実用化を意識した光源開発にシフトしているように思われる。ファイバレーザーは、ここ2、3年、急速に発展しており、少なくとも低平均出力レーザーの応用分野では、固体レーザーからファイバレーザーにとって代わられると予想される。固体レーザーの発展は、いかに高出力化を実現するかという点に収斂してきているように思われる。ここでは、近年のファイバレーザーの発展や高出力化レーザーの開発主に焦点を当てて紹介する。

まず、Visible and UV Solid-State Sourceのセッションにおいては、High-pulse-energy ultraviolet Ce:LLF and Ce:LiCAF lasers using CZ-grown large-size crystals and new cavity configuration (CMD7)で、東北大LiuらがCz法でCe:LLFとCe:LiCAF結晶を大きく高品質に成長させ、それらを用いたレーザー発振を高効率、高出力で行った報告をした。また、非同軸ブリュスター角励起ディスク発振法の紹介もあり、紫外領域における固体レーザーの高出力への見通しをつけたことは意味深い。

Novel Architecturesのセッションでは、Lawrence Livermore Natl. Lab.のBibeauらは、The Mercury Laser: A diode-pumped, gas-cooled Yb:S-FAP solid-state laser (CMJ1)として、新しい高エネルギーゲインとして興味深いYb:S-FAPをレーザー媒質として用いた場合のガスジェットによる冷却方法を紹介した(Fig.5)。Yb:S-FAPは、Nd:ガラスよりもエネルギーの蓄積と熱伝導の点で優れており、このレーザーの最終目標は、波長1.05 μ mで繰り返し10Hzで100Jの出力である。ガスジェットによる冷却法とは、ヘリウムガスを高速

Fig.5 A schematic cross-section through amplifier head showing the cooling passage between vanes. (CMJ1 Fig.2, C. Bibeau, *et al.*)

(マッハ0.1)で流すことで、スラブを冷却する手法である。このガス冷却器でYb:S-FAPを用いたレーザー発振はなされていないが、ガラススラブを用いた増幅器の実験で評価された。

Short-Pulse Solid-State Lasersのセッションでは、Femto-second microjoule pulses with 15.8W average power from a passively mode-locked diode-pumped Yb:YAG thin-disk laser (CMQ1)としてSwiss Federal Inst. of Tech.のKellerのグループによって、高平均出力のフェムト秒レーザーをYb:YAG thin-disk laserで過飽和半導体ミラーを用いて初めて、受動モードロックしたことにより、Yb系で初めて実現したことが報告された。サブピコレベル680fsでは、増幅器を用いずに平均出力15.8Wは世界最高値であり、さらにこのレーザーのコンセプトでは、さらに出力を増大させることも可能であると予想されている。そして、IMRA America Inc.のFermannらによるHighly efficient, low-noise Yb femtosecond fiber source (CMQ2)においては、従来、通信応用分野に限られたラマンシフトレーザーを初めて他の分野へ応用したことが発表された。これは、極めて低ノイズでフェムト秒Ybファイバレーザーを動作させた結果、出力に独立なErソリトンレーザーのラマンシフトを実現したものである。そして、分子科学研究所の猿倉のグループによりHigh-average-power femtosecond Ti:sapphire laser with an intracavity continuous wave amplifier (CMQ6)では、Ti:sapphireレーザーの高繰り返しフェムト秒パルス列の共振器内cw増幅器による増幅によって新しい高出力平均化の方向を提案したことが意味深い。ここでは、過飽和吸収体として色素ジェットを用いた場合は、23%の変換効率、繰り返し79MHz、パルス幅145fsで3.4Wの出力を得ており、また過飽和吸収体としてSSBRを用いた場合は、繰り返し68MHz、パルス幅145fsで1.62Wの出力を得たことが報告された。

High Power Solid-State Lasersのセッションで興味深い発表としては、Lawrence Livermore National Lab.のHoneaらによるHigh Power dual-rod Yb:YAG Laser (CTuE1)があった (Fig.6)。ディスクレーザーとは異なる従来からの手法によるアプローチで高出力化を実現したことは、将来どちらが主流になるか興味深い。最高出力は、LDの全出力3930Wのときに1080Wで、電気-光学効率は、12.3%となり、ビーム品質は、そのときに $M^2 = 13.5$ で、1000W以上の出力のときでも10未満と良い値を示した。また、高繰り返しのQ-SW実験も行われ、3114Wの励起光出力で10kHzの繰り返しの

Fig.6 Schematic of dual-rod Yb:YAG laser. (CTuE1 Fig.1, E. C. Honea, *et al.*)

ときに532Wの出力が $M^2 = 2.2$ で得られた (光-光効率は17%)。これらの結果より、cwと高繰り返しQ-SW動作に対して、同様な出力が実験的、理論的に見られたことが報告された。そして、Forschungsgesellschaft für StrahlwerkzeugeのContagらによるPower scalability and beam quality of the thin disk laser (CTuE3)においては、薄ディスクレーザーを用いた新しい方法で出力のスケールリングを示したことに意味がある。ここでは、薄ディスクレーザーを用いて、光学的効率の低下を小さく留めてマルチモードからシングルモードへのビーム品質の向上が示された。具体的には、1枚の薄ディスクの励起領域を拡大することにより、46%の光学的効率で590Wまで高出力化がなされ、さらに、4枚の薄ディスクを1つの共振器に用いることにより、48%の光学的効率で最大出力1070Wを得られたことが報告された。

Single-Frequency Solid-State Lasersのセッションにおいては、Q-peak Inc.のWelfordらは、Single-frequency operation of a Cr:YAG laser from 1332nm to 1554nm (CTuJ1)で、初めての実用的なCr:YAGレーザーで単一モード発振を実現したことが報告された。波長範囲は、1332nmから1554nmまでで、680mWの出力が得られた。このときのレーザー共振器の構造は、単一方向のリング共振器構造で、共振器内にはチューニングのための石英の複屈折フィルターと隣接した縦モードを抑圧して単一モードにするための9.5mmの厚さのCaF₂のエタロンが設けられた。

Postdeadline Papersにおける固体レーザーに関する興味深い発表としては、IMRA America Inc.のGalvanauskasらによる13-W average power ultrafast fiber laser (CPD3)であった (Fig.7)。これは、従来フェムト秒レーザーとして不可能だと思われていた高出力化を実現した紹介で、正分散のファイバ増幅器で、シングルモードを出力を10Wを超えるまでに増幅させることに成功したものである。パルス圧縮には、コンパクトなCPPLNを用いて、527nmにおけるSHG平均出力250mWが得られた。もうひとつの興味深い発表としては、NikonのOhtsukiらによるEfficient 193nm generation by eighth harmonics of Er³⁺-doped fiber amplifier (CPD9)があった (Fig.8)。これは、リソグラフィ光源として全く新しい方法で実現したところに意義があるものである。具体的には、初めて波長1547nmのErがドープされたファイバ増幅器の出力から8倍高調波193nmを発生させたものであり、1547nmから193nmへの変換効率は7.0%で、今までで最も高い値であったことが報告された。ファイバ増幅器の出力パルスは、ビーム品質 $M^2 < 1.1$ 、平均出力40mW、パルスエネルギー40μJで、繰り返し1kHzの時のパルス幅は1.7nsで、このとき8倍高調波は平均出力2.8mWであった。

Fig.7 Experimental set-up. Dotted line shows an alternative optical path for a CPPLN compressor. (CPD3 Fig.1, A. Galvanauskas, *et al.*)

Fig.8 The frequency conversion setup for 193 nm generation. (CPD9 Fig.1, T. Ohtsuki, *et al.*)

2倍と3倍高調波は、LBO結晶を用いてノンクリティカル位相整合で、そして倍次と7倍高調波は、BBO結晶を用いて和周波によって、最後に8倍高調波は7倍波と基本波の和周波をCLBO結晶を用いて発生された。

(小関 俊政, 猿倉 信彦)

4. 半導体レーザー

半導体レーザー関連では、CLEOにおいて12のセッションがあり、トピックスとしては、面発光レーザー関連(3セッション)、量子ドットレーザー(2セッション)、量子カスケードレーザー関連(2セッション)、青色半導体レーザーなどが目についた。

面発光レーザーは、現在、北米を中心に高速の光データリンク用に実用化が急速に進められているが、CLEOだけでも20件を超える発表があり、半導体レーザー分野でかなりの割合を占めており、米国での研究開発が依然、たいへん盛んであることを示している。面発光レーザーについては、今回の会議では、GaN系青色面発光レーザーや1.3~1.55μm帯の長波長帯素子などの波長域拡大、単一横モード素子による10Gb/s帯高速変調と多モード光ファイバデータリンクへの応用、などに関して大きな進展が見られた。ブラウン大学のY. K. Songらは、レーザーブレイションを用いてサファイア基板を剥離する手法により短共振器面発光レーザー構造を形成して、紫外域(波長400nm)での疑似

CW動作での光励起レーザー発振を報告している(CMG7)。同研究グループは、電流注入での共振型LEDの報告も行っており(CMG6)、まだ解決すべき課題は多いものの、この構造は高反射率の誘電体反射鏡を両側に用いることができるため、電流注入型の青色・紫外面発光レーザーのレーザー発振を実現する上で最も効果的かもしれない。

一方、面発光レーザーのGb/sイーサネットへの応用が急速に進展しているが、10Gb/sイーサネットが次の展開である。ウルム大学のWebsterらは、850nm帯単一モード面発光レーザーを用いて、初めて高温85°Cでの10Gb/sの高速伝送を多モード光ファイバを用いて報告した(CTuF2)。また、ベル研究所のGiarettaらは、低モード分散の新しい多モード光ファイバと850nm帯面発光レーザーを用いて、Fig.9に示すように、10Gb/sで伝送距離を2.8kmまで拡大した(CPD13)。これは、従来の通常多モード光ファイバの帯域距離積の10倍以上の値である。10Gb/sイーサネットの標準化が今まさに進められようとしているが、面発光レーザーと低モード分散の多モード光ファイバの組み合わせも一つの有力な選択肢になろう。また、さらに大容量化を進める上では多波長アレーによる波長多重化が一つの方向であるが、ニューメキシコ大学のYangらは、Fig.10に示すように、スペクトル幅57nmの広い波長域で多波長面発光レーザーアレーを実現した(CTuL4)。

また、1.3~1.55μm帯の長波長帯面発光レーザーは、単一モード光ファイバでの伝送が可能になるため、伝送距離が数十kmまで拡大できる。都市内通信網にまで低価格のイーサネットを導入する動きがあるため、長波長帯面発光レーザーに大きな期待が寄せられている。今回、長波長帯

Fig.9 10 Gb/s data transmission experiment using a 850 nm VCSEL over new high bandwidth multimode fiber. (CPD 13 Fig.2, G. Giaretta, *et al.*)

Fig.10 Lasing spectra of monolithic wavelength graded VCSEL array. (CTuL4 Fig.3, K. Yang, *et al.*)

面発光レーザーで大きな進展が見られた。ドイツのWalter Schottky InstitutのOrtsieferらは、Fig.11に示すようなトンネル接合を用いて電流狭窄と光閉じ込めを同時に行う新しい構造を導入して、InP系面発光レーザーでは、世界最高レベルの特性を実現した(CPD11)。Fig.12に示すように、波長 $1.5\mu\text{m}$ でしきい値電流 0.85mA 、最大出力 1.6mW を得た。また、口頭で波長 $1.8\mu\text{m}$ での動作で、しきい値 0.2mA 、微分量子効率 35% という従来素子を大きく凌駕するデータを提示した。温度特性は、課題として残るものの、実用デバイスに一步近づいたと言えよう。昨今の光通信ネットワークの急拡大とともに、低コスト通信用光源として大きく展開するかもしれない。また、従来のGaAs基板上の面発光レーザーの技術が継承できるGaInNAs/GaAsの新材料も最近たいへん注目されている。スタンフォード大学のColdrenらは、 $1.2\mu\text{m}$ 帯GaInNAs面発光レーザーの高温動作を報告した(CTuL1)。

量子ドットレーザーに関する報告も多数目を引いた。GaAs基板上での波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯での動作や、極低しきい値動作などが注目される点である。GaInAs/GaAsの自己形成法を用いた量子ドットレーザーの性能が着実に進歩している。富士通研究所のMukaiらは、 $1.3\mu\text{m}$ 量子ドットレーザーの特性温度の向上について報告した(CWL1)。これまで、低しきい値動作は得られるものの、室温近傍での温度特性の劣化が課題であったが、3層でドットを覆って歪を緩和することにより、室温近傍で、特性温度 120K を達成していた。より高温域での改善が待たれる。また、テキサス大学

Fig.11 InP-based VCSEL with tunneling aperture. (CPD11 Fig.1, M. Ortsiefer, *et al.*)

Fig.12 Light-current (solid line) and current-voltage (dashed line) characteristics of tunnel junction VCSEL. (CPD11 Fig.2(a), M. Ortsiefer, *et al.*)

のParkらは、酸化狭窄閉じ込め構造を用いて、 $1.3\mu\text{m}$ 量子ドットレーザーでしきい電流 1.2mA の低しきい値動作を達成した(CWL6)。

その他、赤外波長域での量子カスケードレーザーの動作温度向上や高出力動作、固体レーザー励起用高出力半導体レーザーの進展、波長変換用の半導体光増幅器など、着実な進展が見られた。経済状況を反映してか、最近の我が国での国内学会と比べると、依然米国内での研究の活気が感じられた。(小山 二三夫)

5. 非線形波長変換技術

非線形波長変換に関するセッションは、固体レーザーに関するセッションに属するものと非線形光学に属するものに別れており、大半は疑似位相整合(QPM)を用いた波長変換に関するものであった。第2の話題は、ピコ秒、フェムト秒の励起レーザーを用いたいわゆる短パルス光に関するものであった。このような傾向の中で、固体レーザーに関する報告との重複を避ける意味で、QPMの本質的な利用を除いた非線形波長変換技術の興味深い講演を紹介する。

3次の非線形効果である誘導ラマン散乱を利用した波長変換に関する発表がかなり増加していることが見受けられた。誘導ラマン散乱に関するものは、ほとんどがファイバや結晶を利用したものであった。とくに、ファイバ中でのラマン効果は、通信の分野で重要な問題となるため、発表件数が増加していると思われる。しかしながら、ガスを利用したものの中にも注目される講演があった。これまで、ガス中での誘導ラマン散乱は3次の非線形光学効果であるので効率的な波長変換には 100kW 以上の高い励起光強度を持ったパルスレーザーが必要であると考えられていた。しかしながら、 $R = 0.9999$ 以上の非常に高い反射率を持ったミラーが得られるようになり、ついに連続発振が確認されたのは昨年のである。今回は、効率と波長同調領域に優れた連続光による赤外のラマンレーザーの達成が報告された。概略をFig.13に示す。ラマン媒質には H_2 ガスが用いられた。励起レーザーは波長 752nm で、 100mW の半導体レーザーが用いられた。ラマン媒質である水素は、高いフィネスを持った共振器の中に満たされ、全反射鏡として反射率 $R = 0.99996$ 、出力鏡として $R = 0.9974$ のものが用いられていた。これにより、効率 63% の連続的なストー

Fig.13 Diode-pumped cw Raman down-conversion setup. Mirror M2 transmits the Stokes wavelength. (CPD 24 Fig.1, P. A. Roos, *et al.*)

クス光(波長1180nm)14mWが得られた(CPD24)。

次に、ポストデットラインで紹介された、電子制御による高速波長可変OPOについて紹介する。発表は、ドイツのKaiserslautern大学のグループのM. E. Kleinらによってなされた。電子制御による波長の同調は、波長可変レーザーの一つの重要な方向性と考えられる。このグループの場合、リング共振器と非常にブロードバンドに位相整合する温度制御したPPLNを用意しシンクロナスポンプによるOPOを構成した。この時、共振器内では波長により分散が異なり結果として共振器の1周期にかかる時間が波長により異なる。励起レーザーの繰り返しを電氣的に制御すると、ちょうど繰り返しと、共振器内の1周期にかかる時間がシンクロした光が成長し発振するので、繰り返しを制御することで、共振器内に発生するシグナル光の波長を選択することができる。この方法によって、波長1595nmから1709nm(signal), 2215nmから2026nm(idler)の波長領域で波長を選択することに成功している。励起レーザーは、モードロック半導体レーザーのMOPAシステムを使用し2.5GHzの繰り返しを $\pm 400\text{kHz}$ に制御した。励起入力0.9Wに対してidler 2.1 μm がパルス幅8ps, 出力78mWで得られている(CPD6)。

ポストデットラインでは、ニコンの大月らから全固体193nmの発生の報告があり注目を集めた。励起レーザーには、DFBレーザーとLNのモジュレーターおよびErファイバ増幅器が用いられ、1547nmにおいて1.7nsのパルス幅でパルスエネルギー40mJ, 1kHzの繰り返しで平均出力40mWのものが用いられた。193nmは、1547nmの光の8次の高調波として得られている。変換効率は7%との報告であった。Fig.8に実験装置の概略を示す。第2, 第3高調波には、Non-critical位相整合のLBOが用いられた。第2高調波は、LBOにより第4高調波に変換され、さらにBBO結晶により得られた第3高調波とのミキシングにより第7高調波が得られる。最後に、基本波と第7高調波がCLBOの中で第8高調波に変換される。近年、193nmのArFレーザーのリソグラフィ装置が出回り始めているので、オプティクスの検査や直描など今後の展開が期待される(CPD9)。

理化学研究所の著者のグループからは、Nd:YAGレーザーの第5高調波213nmを励起光源としてその4次の反ストークス誘導ラマン散乱を利用し157nmの真空紫外光が得られることが示された。概略をFig.14に示す。YAGを別のホスト結晶に変えて波長をシフトさせると、正確にF₂レーザーの波長に同調できることが提案された。励起レーザーは、パルスあたり800mJ, パルス幅8ns, 繰り返し10Hzのレーザーが用いられ、第5高調波で100mJ, 157nmでは1mJの出力が報告された。ラマンレーザーの場合、誘導散乱による利得の狭帯域化を無視すれば、スペクトル幅の限界はラマン媒質に用いられていた水素ガスのラマン線幅によって決定される。157nm光の発生では、ガスの圧力が3atmで用いられていたため、線幅はおよそ250MHzと予想される。この値に匹敵するスペクトル幅は、0.04pmである。157nmの光は、次世代のレーザーリソグラフィへの応用に注目されており、157nmにおける非線形結晶が存在しない現状では、1段ガスによる波長変換デバイスが必要なもの

Fig.14 Experimental arrangement for the generation of 157 nm light pulses. (CTuA26 Fig.1, S. Wada, *et al.*)

の157nmの光を固体レーザーベースで得る方法の1つである(CTuA26)。

非線形波長変換では、最近のトレンドとして、これまでの天然のバルクの結晶の性質を追求したものから、僅かではあるが、加工を施すことによって新しい性質を引き出し、よりよい非線形波長変換デバイスを得る試みがなされている。PPLNに見られるQPMはその代表例と考えられる。一方、もう一つの試みとして既に存在する結晶の組成を不純物(別の元素)で結晶の一部を置き換えることにより位相整合を制御する試みがなされている。大阪大学の佐々木先生のグループが行っているGdYCOBを用いたnon-critical位相整合によるNd:YAGレーザーの第2高調波発生、第3高調波発生が代表的な例である。

一方、赤外では千歳科学技術大学の高岡らが $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ のnon-critical位相整合についての研究が発表された。発表では、既にシステムでの評価がなされていた。励起レーザーには5WのLD励起Nd:YAGレーザーが用いられていた。70度に温度制御された2連のPPRTAを用いたOPOにより縮重点の2.128 μm で3Wの出力を得ている。得られた2.128 μm の光は、 $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ を用いたOPOに励起光として利用され、結果としてSignal3 μm 帯, Idler4 μm 帯に於いてSignal + Idler合わせて1.5Wの出力を得ている。位相整合条件をFig.15に示す。温度による波長制御が可能なnon-critical位相整合を得るために $X=0.288$ という値が選ばれている。結晶成長の制御技術と共に着目される結果である(CTuA9)。

波長変換素子として、最も注目されているPPLNの新しい応用に関する講演がなされていたので紹介する。講演では、イギリスのKent大学のH. Gnewuchらによってなされた。通常の波長変換に用いるのではなく、音響光学波長可変フィルター(AOTF)への利用が発表された。音響光学波長可変フィルターは印加するRFの周波数によって特定の波長の光のみの偏光を回転させる、あるいは僅かにずれた角度に回折させるデバイスであり、いずれの場合も波長選択に用いる。通常の構造は、音響波を LiNbO_3 に形成した電極に印加することにより音波を発生させる。これを結晶の側面に接着し音波を音響光学結晶に伝搬させ、入射光と

Fig.15 Phase-matching curves for $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ OPO pumped by a periodically poled RTiOAsO_4 OPO tuned at $2.128\ \mu\text{m}$. The dashed lines are the theoretical curves. $\bullet$: our experimental points. (CTuA9 Fig.1, K. Kato, et al.)

の相互作用により、入射光、出射光、音波間で位相整合条件が整う波長の選択がなされる。音波の周波数を変えると位相整合条件が変わるので、選択される光の波長を選択することができる。この講演は、音波発生源の LiNbO_3 にあらかじめ印加する音波と回折させる波長間での位相整合条件を考慮した周期の分極反転による加工を施すと、 LiNbO_3 そのものがAOTFとしての働きを担うようになるというものであった。これは、分極反転による位相整合条件の達成を波長変換素子ではなく、音響光学素子に適用した初の例と考えられる。例えば、 1300nm から 1600nm までのAOTFを製作するには、 $17.25\mu\text{m}$ から $22\mu\text{m}$ までの周期の分極反転が必要で、この時、デバイスに印加するRFは 300MHz から 360

MHz であった。(CFJ5)

(和田 智之)

6. 高性能レーザーデバイス

Solid-State Lasersで発表された固体レーザーの種類をTable 1にまとめた。総数は72件で、その内30件がNdレーザー、続いてYbレーザーの14件と $1\mu\text{m}$ レーザーで全体の61%を占めている。確立されたレーザーと思われがちなNd:YAGにおいても、G. J. Spuhlerら(CMQ3)はSESAMsを用いた受動モードロックにおいてパルス幅 21ps 、パルスエネルギー $0.5\mu\text{J}$ で繰り返し 55MHz と平均出力 27W を達成したり、I. Shojiら(CTH9)が多結晶の高透過YAGセラミックスに高濃度のNdイオンを添加することで高効率化を図り、 1mm 以下のマイクロチップ構成において単結晶の2.3倍の出力を得るなど、進展が見られた。また、Ybレーザーは、ダイオード励起による室温発振の報告以来10年近くが経過し、次世代レーザーとしての認識が定着しつつある。高出力化に関しては、R. J. Beachら(CTuE1)によりホローレンズダクトとYAGエンドキャップを拡散接合したデュアルロッドを用いて、CW動作で 1080W ($M^2 \sim 13.5$, 効率27.5%)、Qスイッチ動作で 532W ($M^2 \sim 2.2$, 効率17%)が得られている。一方、熱効果が少ないディスクレーザーではドイツのK. Contagらが4段構成によりCW出力 1070W を効率48%で達成した(CTuE3, Fig.16)。単一ディスクで最大出力 500W 以上が得られるものの横モード特性が悪くなるため励起密度を $5.5\text{kW}/\text{cm}^2$ までとし、多段構成にすることで高品質化、高出力化を図った。また、スイスのJ. A. der Auらは(CMQ1)シュツツガルツ大学で開発されたディスクYb:YAGにSESAMsを用いることで 680fs で $1.06\mu\text{J}$ の超短パルスを平均出力 15.8W (繰り返し 15MHz)で得ている。また、フランスのC. Honningerら(CMW4)は、 3mm 長のYb:GdCOBにSESAMsを併用することでダイオード励起で 90fs のパル

Table 1 Laser Materials of "Solid-State Lasers".

	YAG	YVO ₄	YLF	Glass	COB	LiCAF/ LiSAF	S-FAP	Mg ₂ SiO ₄	Al ₂ O ₃	etc.	total
Nd	CMJ3, CMJ5, CMQ3, CTuE2, CTuE4, CTuE5, CTuK5, CThD1, CThD2, CThJ6, CThM2, CThM9, CThM11, CThM19, CFH5 (15)	CMD2, CThD6, CThM3, CThM6, CThM16, CThM19, CMJ7 (7)	CTuE6, CThD3, CThJ2 (3)	CMJ4,	CThM8,					CTuK4, CTuK6, CThM14 (3)	30
Yb	CMJ6, CMQ1, CTuE1, CTuE3, CTuK2, CThD4, CThJ5, CFH6 (8)			CMD3, CMQ2 (2)	CMD5, CTuK1 (2)		CMD4, CMJ1 (2)				14
Er (, Yb)	CFA4(Cr,Tm,Er:YAG) (1)		CFA2, CFA3 (2)	CTuK3, CThJ4 (2)						CFH4, CFA3 (2)	7
Tm (, Tb or Yb)			CThM15, CThM20, CFA1(3)	CFH2							4
Ho (, Tm)	CThD7, CThJ3, CThM5 (3)		CFA1								4
Cr	CMQ5, CThJ1 (2)					CTuK7		CMQ4, CThM21 (2)		CThM4	6
Ti									CMQ6, CThM7, CThM18 (3)		3
etc.	CMD1					CMD7				CMD6, CFA5 (2)	4
total	30	7	9	6	3	2	2	2	3	8	72

* etc. ; Nd:YALO₃ (CTuK4), Nd:KGd(WO₄)₂ (CTuK6), Er:ZBLAN (CFH4), Er:YSGG (CFA3), Pr:Yb:YAG (CMD1), Cr:CdSe (CThM4), Dy:KPB₂Cl₆(CFA5), Dye:polymer(CMD6)

Fig.16 Output power and beam quality for different resonator configurations. (CTuE3 Fig.1, K. Contag, *et al.*)

ス光を繰り返し100MHz, 平均出力40mWで達成しており今後の展開が期待されている (Fig.17). また, 広い蛍光幅を応用した広帯域波長可変レーザーとしては同じくフランスのF. Druonら (CTuK1) が, Yb:GdCOBによりスロープ効率77%で69nmの波長可変特性を得ている. 一方, J. Saikawaら (CThJ5) は, Yb:YAGを用いて蛍光幅の10倍近い85nmにも及ぶ波長可変特性を実現した. さらに, 共振器内部SHG構成により, 青緑光域で22nmの連続波長可変動作を実現し, ホログラフィック体積メモリに適用し, 同一位置で周波数

Fig.17 Laser setup. (CMW4 Fig.1, C. Hönninger, *et al.*)

領域に多重化されたメモリ動作を確認している.

次に, Applications of Nonlinear Opticsで発表された非線形光学材料の発表分布をTable 2に記載する. ここでは総数95件の内32件がLiNbO₃に関する報告であり, また, QPMの報告件数は計49件と複屈折位相整合(BPM)の46件を上回り, 改めて研究の傾向が変化していることを確認した. まずQPMの高出力化であるが, Y. Hiranoら (CPD7) から光損傷に強いMgO添加のPPLN(1mm厚, 30mm長)による光パラメトリック発振(OPO)において平均出力60.2W(1.57μm, 3.3μm)を効率61%(49%, 17.3%)で得たとの報告があった. また, QPMでは反転周期を少しずつ変化させたり, 複数の周期を同時に作り付けることで多機能化が図れる. A. Galvanauskasら (CPD3) はチャージングにより超短パルス光の群速度分散制御するパルス圧縮により, パルス幅100fsで平均出力13Wを得ている. さらに, QPM間隔を制御することにより広帯域な波長可変特性も可能となる. A. Englanderら (CThQ4) は1つのPPKTP(0.5mm×30mm)にSHG部とOPO部を作り付けアップコンバージョンOPOにより1064nm励起で770nmの出力を最大効率55%で得ている. また, 信号処理応用としてZ. Zhengら (CTuD4, CME6) は, スペクトラム拡散通信の超短パルスCDMAにPPLNを使うことを試み, 10Gbit/s以上の高速で1mW以下の低いしきい値, 30dBにも及ぶ高いコントラストが得られると報告している. また, G. W. Rossら (CWH3) より分極反転では屈折率は変わらないが高調波の位相は制御できることを利用した新たな二次元のNonlinear Photonic Crystal (2D-NPC) が紹介された. 六角形状のHEXLNへの入射角を変えることで発生高調波次数や出射角が制御できる (Fig.18). Solid-State Lasers及びApplications of Nonlinear Opticsで非線形波長変換により達成された波長域をTable 3に示す. 179件の内, 可視・紫外域の発表は38件に留まった. 一方, 赤外領域は非線形光学材料の品質が向上したことやQPMによる

Table 2 Nonlinear Materials of "Applications of Nonlinear Optics".

	LiNbO ₃	LiTaO ₃	KTP	LBO	BBO	CLBO	GdYCOB	AgGaS ₂	GaAs	etc.	total
BPM	CWN4, CWN5, CWS2 (3)		CMU1, CMU2, CMU6, CMU7, CWH6 (5)	CMU4, CTuA12, CTuA16, CThW6, CMQ1, CThD3, CThJ5 (7)	CMU1, CMU2, CMU4, CTuA8, CTuA29, CTuJ2, CThD5, CThJ6, CThM11 (9)	CMU5, CTuA8, CTuA10, CThM1 (4)	CTuA11, CTuA29, CMD4, CMD5, CFN1, CThH7 (6)	CMC6, CTuA9, CWS4 (3)		CTuA15, CTuD6, CMC7, CMO2, CWN1, CWN3, CThJ7, CThM12, CFA6 (9)	46
QPM	CMC1, CMC2, CMO7, CTuA7, CTuA14, CTuA27, CTuA30, CTuD4, CWH1, CWH2, CWH3, CWH4, CWH5, CWN2, CThC7, CThQ1, CThQ2, CThQ3, CThQ4, CThQ5, CThQ6, CThW1, CThW2, CThW3, CThW4, CThW5, CMD3, CMQ1, CMQ2 (29)	CMC4, CMU3, CWN2, CMD2 (4)	CMC5, CMU3, CTuA30, CWS3, CThQ4, CMD2, CThJ6 (7)						CMO3, CTuD5, CFN3 (3)	CMC3, CMO4, CMO5, CTuA9, CThJ7, CThM12 (6)	49
total	32	4	12	7	9	4	6	3	3	15	95

* etc.: QPM-fiber(CMO5), QPM-KN(CMC3, CThJ7, CThM12), QPM-RTA(CTuA9), QPM-glass(CMO4)
BPM-KTA(CTuA15, CFA6), BPM-ZGP(CMC7), BPM-CdSe(CMO2, CFA6),
BPM-KDP(CTuD6), BPM-CdGeAs₂(CWN3), BPM-AgGa_{1-x}In_xSe₂, Cd_{1-x}Hg_xGa₂S₄(CWN1)

Fig.18 Photograph of the HEXLN crystal showing the excellent uniformity and detailed structure (inset). The period of the domain-inverted pattern is 18 μm . The first Brillouin zone is illustrated on the right. (CWH3 Fig.1, G. W. Ross, *et al.*)

新しい方式が登場したこともあって多くなっている。中赤外域をNd:YAGレーザーで発生させる試みとしてはK. L. Vodopyanovら(CMC6)によりtype-II AgGaS₂-SROにより3.9~11.3 μm のアイドラ光が各々スロープ効率22%, 41%で得られている。しきい値は85 μJ , 出力は370 μJ (6 μm)程度であった。また, Er, Cr, Tm:YSGGレーザー(波長2.93 μm)を用いたtype-I ZnGeP₂-SROにより1mJ以下のしきい値で38~12.4 μm のアイドラ光が, 最大出力1.2mJ(波長6.6 μm)で得られた(CMC7)。さらに, Siエタロン挿入によりOPO線幅は5~6 cm^{-1} から0.5 cm^{-1} までと狭帯域化された。しかし, いずれも非線形光学定数や損傷しきい値が小さく, 長波長域での吸収が大きいためP. Schunemannは(CWN1), 5~20 μm 発生用に1 μm レーザー励起ではAgGa_{1-x}In_xSe₂を, 2 μm レーザー励起ではCd_{1-x}Hg_xGa₂S₄をNCPMが可能な新材料として紹介した。また, QPM構造では高い非線形定数を有するLiNbO₃が使用可能になるため可能性が広がる。T. J. Kulpら(CThW1)は, パルスエネルギー650 μJ の小型単一周波数Nd:

Fig.19 Outline of the fabrication process for OPGaAs films. $\pm$ indicates sign of d_{eff} . (CFN3 Fig.2, L. A. Eyres, *et al.*)

YAGマイクロレーザー励起のPPLN-OPG/OPAシステムにより波長1.47~1.61, 3.15~3.88 μm の領域で可変な狭線幅(0.05 cm^{-1})赤外光源を開発し, ガスセンシングに適用した。L. A. Eyresら(CFN3)は, 中赤外域の発生に90pm/V以上の高い非線形定数と46W/mKにも及ぶ熱伝導率を有するGaAsを用いることを提案している。彼らはGe層を途中に挟んだ副格子エピタキシー法による5 μm 程度のGaAs-QPM(周期212 μm)をHVPE法で200 μm 厚まで成長させCO₂レーザーのSHGに成功している(Fig.19)。現段階では周期間の散乱等により理論通りの特性は得られていないが可能性

Table 3 Converted Wavelength of "Solid-State Lasers" and "Applications of Nonlinear Optics".

	UV	VIS	Near IR		Mid IR	Far IR / THz	etc.	Total
	0.1~390nm	390~760nm	760~1400nm	1.4~3mm	3~25mm	25~5000mm		
BPM	CThD5, CThJ6, CThM1, CThM11, CMU1, CMU2, CMU4, CMU5, CTuA8, CTuA10, CTuA11, CTuA16, CTuA29, CTuJ2, (14)	CMD4, CThD3, CThJ5, CThJ7, CThM11, CThM12, CThM21, CMU6, CMU7, CTuA12, CTuA29, CTuD2, CTuD6 (13)	CMC6, CMO2, CTuA17 (3)	CTuA19, CWH6 (2)	CFA6, CMC6, CMC7, CTuA9, CTuA15, CWN1, CWN3, CWS4 (9)	CTuA7, CWN4, CWN5 (3)		44
QPM		CMD2, CMD3, CMQ1, CThJ6, CMQ3, CMO4, CWH3, CWU3 (8)	CMQ2, CMC1, CMO5, CTuA30, CTuD4, CTuD5, CWH3, CWN2, CThQ4, CThQ5, CThQ6 (11)	CMC4, CTuA30, CWH1, CWH2, CWH4, CWH5, CThC7, CThQ1, CThQ2, CThQ3, CThQ5, CThW1, CThW5 (15)	CMQ1, CMC2, CMC3, CMC4, CTuA7, CTuA27, CWH4, CWS3, CThQ3, CThQ5, CThW1, CThW2, CThW3, CThW4 (14)		CMO7, CTuA14 (2)	50
Fiber				CTuD1, CThC6 (2)				2
Raman	CTuA26	CThM13, CTh2 (2)	CThM13, CTuA28, CThC1, CThC4 (4)	CThM3, CMO1, TChC3 (3)				10
Total	15	23	18	22	23	3	2	106

は大きい。非線形波長変換では通信や計測を目的として赤外域関連発表が多くなっているが、最近実用化が進んできたファイバアンプでは手軽に高輝度光が得られるため、T. Ohtsukiら(CPD9)はCLBOを用いた合計5段の波長変換により40 μ J(平均出力40mW)の1547nmパルス光から8倍波の193nm光を効率7.0%(平均出力2.8mW)で得ており注目された。可視・紫外光源の全固体化、高出力化要求は根強く、今後もレーザーや非線形波長変換材料などでのブレークスルーが望まれている。(平等 拓範)

7. THz電磁波の発生と応用

THz電磁波の発生、検出と応用に関する発表は主にIR/THz Generation (CWN), THz Imaging, Ranging and applications (CThR), THz Optoelectronics (CThR), THz, Coherent Phonons and Bloch Oscillations (QFD)の4セッションで行われた。このほか、Poster Session (CThM)での発表や発生方法や応用に関連したセッションでの発表も合わせて33件の発表があった。

THz電磁波の発生、検出では、依然としてフェムト秒レーザー励起の広帯域THz電磁波に関連したものが多く、発生メカニズムの検討、高輝度光源、1.55 μ m帯レーザーによる動作などが報告された。

フェムト秒パルスを照射したGaAs(100)から発生するTHz電磁波強度の磁場による増大について、8Tまでの磁場強度依存性が報告された(CThX2)。また、S. Ono(東京理科大)らのグループから、フェムト秒Ti:sapphireレーザーで励起されたInAsが発生するTHz電磁波強度について、励起レーザー入射角と磁場印加方向の最適化が報告された(CThX3)。高出力化に最適な励起構成は、基板平面に平行な印加磁場と励起光のブリュースター角入射であることが見出されている。

S. Kono(通信総合研究所)らのグループからは、半導体表面からのTHz電磁波放射のメカニズムについて報告がなされた(CThX6)。フェムト秒レーザーで励起したInSb(111)から発生するTHz電磁波の要因として変位電流成分と差周波混合成分の寄与が分離された。両成分のスペクトル上の干渉によって結晶方位角回転に伴ったTHz電磁波スペクトル変化が現れることが示されている。

光スイッチや非線形光学結晶をミキサーとしたTHz電磁波発生、検出器は、光ファイバ増幅器や超高速光デバイスの進展に伴って光通信波長帯での動作が課題となっている。低温成長GaAs(以下LT-GaAsと略す)フォトコンダクティブ素子は、バンドギャップが広い1.55 μ m帯に感度はないが、以前から2光子吸収を介したTHz電磁波の発生、検出が行われることが報告されていた。M. Tani(通信総合研究所)らは、1.55 μ m帯フェムト秒ファイバレーザーをトリガに用いたLT-GaAsフォトコンダクティブ素子でのTHz電磁波の検出について報告した(CThR6)。780nmパルスをトリガにした場合の約10%という、従来から言われている2光子吸収によるTHz電磁波検出だけでは説明できないほど高い検出感度を得た。その高い検出感度はLT-GaAs中の過剰Asによって作られる中間準位を介した2段階の光吸収

によってなされていることを指摘している。

一方で電気光学結晶の透明波長領域でのEO検出及び光整流によるTHz電磁波発生は半導体のようなバンドギャップの制約を受けないため、波長1.55 μ m帯の光源を用いたTHz電磁波の発生、検出は可能である。M. Li(Rensselaer Polytechnic Institute)らのグループでは波長1.55 μ mのフェムト秒ファイバレーザーで励起した有機非線形光学結晶DAST及びGaAs結晶の光整流によるTHz電磁波の発生、検出に初めて成功している(CThX7)。DAST結晶の1.55 μ m帯におけるa軸の光波長帯の群屈折率とTHz帯の屈折率はそれぞれ2.21と2.28、GaAs結晶ではそれぞれ3.54と3.37である。どちらも1.55 μ m帯でTHz電磁波と光パルスの速度整合が取れるため効率良いTHz電磁波の発生、検出に応用できる。DAST結晶は、高い非線形光学定数(840pm/V@1542nm)と電気光学定数(75pm/V@820nm)を持ち、有力なTHz波帯の非線形光学結晶のひとつであるが、これまでTHz波帯の特性評価は少なかった。P. Y. Han(Rensselaer Polytechnic Institute)らは、時間分解分光法をDAST結晶のTHz波帯での特性評価に応用した(CThX4)。DAST結晶の損失が問題にならない反射測定の配置と1/4波長板による複屈折性の補償法を用いて0.2THzから3THzまでの広い周波数帯域の複素誘電率測定を報告した(Fig.20)。

T. Hatanaka(東北大学)らのグループからはDAST結晶中の差周波混合(DFG)によるTHz電磁波発生が報告されている(CTuA7)。差周波数がTHz程度まで近接した2光波を発生するため、シグナル波が2波長で発振する光パラメトリック発振器(OPO)を応用した点が新しい。2種類の周期の反転分極を1枚のLiNbO₃基板上に縦列に作製し、波長間隔を2nmから22nmまで変化できる2波長のシグナル発振を実現している。周期分極反転LiNbO₃(PPLN)OPOを縮退点付近で安定に動作させることは困難であるが、この発表の手法では独立した2台のOPOとして扱えるため、2波長の差周波

Fig.20 Experimental reflectivity of DAST and the fitting curves using oscillator model along a axis (a) and b axis (b). (CThX4 Fig.1, P. Y. Han, et al.)

数を広い範囲で安定に変化させる事が可能となっている。PPLN結晶は、その高い変換効率と変化に富んだデバイス作製の可能性を持ち、可視から赤外光領域の波長変換素子として不動の地位にある。この発表は、PPLNによる光制御性をDAST結晶DFGによるTHz電磁波発生に応用した例である。

一方でPPLNからのTHz電磁波の発生がT. B. Norris (University of Michigan)らのグループによって報告された(CPD2)。原理的にはフェムト秒レーザー光を励起光源とした光整流と同じであるが、PPLNを非線型光学結晶に用いることで、擬似速度整合が取れる周波数成分のみ選択的に発生するフィルタの役目をしている。この結果、周波数1.8THzにおいてフェムト秒レーザー励起としてはきわめて狭いスペクトル線幅18GHzのTHz電磁波を発生している(Fig.21)。ドメインの数が多いほど波長選択性は強くなるため、相対的なスペクトル線幅 $\Delta\nu/\nu$ は、PPLNのドメイン数を N として $2/N$ で与えられる。温度を18Kまで冷却することによってLiNbO₃結晶の吸収が激減し、長さ7.2mmのPPLNも利用可能となった。この結果相互作用するドメイン数が増加、バンド幅が18GHzまで狭くなっている。PPLNの設計は自由度が高く、今後スペクトル波形の制御や波長可変THz光源への応用など幅広い展開が期待される。

最後にLiNbO₃結晶を用いたTHzパラメトリック発振器では光注入により1GHzを切るTHzスペクトル幅が報告されている(CWN4)。(今井 一宏)

THz電磁波の応用に関して14件の報告があった。この中からTHz波応用、技術において興味深い内容に関して報告する。

まず、最近新しく提案されたTHz波の応用であるTHz rangingに関してオクラホマ州立大学から今後のranging計測の方向性について報告があった(CTHR1)。THz ranging計測では、フェムト秒超短パルス光を用いてphotoconductive switchから発生されるTHz波のインパルス波形、広帯域性の特徴を利用し、照射された物体の各部で反射、散乱されたTHz波を約600fs光ゲート式検出器を用いて高分解能で時間波形の計測を行う。本計測で検出されたTHz波パルス群は、時間的に各々分離でき、反射・散乱等の物理的メカニズムの周波数解析を行うことを可能とする(Fig.22)。本計測は、従来までTHz波入射方向と散乱光検出方向の関係を固定または鋭角にして計測を行っていたが、この角度を可変とすることで(同グループによりポスターセッションで

Fig.21 THz power from the 7.2 mm PPLN crystal vs optical pump power at 800 nm. THz waveform and power spectrum for 200 mW of pump power are also shown. (CPD2 Fig.3, T. B. Norris, *et al.*)

Fig.22 Measured response of alumina sphere. (a) Overall scattered time-resolved electric field showing transients due to specular (S), surface (θ), and axial (AX) reflection. (b) Measured spectra of isolated scattering mechanisms. (CTHR1 Fig.1, M. T. Reiten, *et al.*)

報告されていた。(CTHR4))さまざまな角度で散乱光を測定できるようになる(Fig.23)。この技術を用いることによって物体のimage reconstructionや、さらに偏波情報を取得することでTHz波偏光解析も可能である。

Rice大学からは、single-cycle THz波パルスのimagingにおいて、2つの表面の接着不具合などを計測する際、コヒーレント長よりギャップ幅が狭くなってしまい感度が落ちてしまうことに対して、マイケルソン干渉計を用いた方式のTHz波トモグラフィに関して報告があった(CTHR2)。干渉計を用い光路長の調整で通常方式では小さなTHz波形変化も感度良く計測できる。実測例として鏡に貼られた50 μ m厚の粘着テープ(パルスのコヒーレント長の1/6に相当)のimagingを行っていた(Fig.24)。

Rensselaer polytechnic InstituteのX.-C. Zhangらのグループからは、THz Electro-Optic (EO) imagingにおいて近接場2次元imagingに関して報告があった(CTHR3)。同グループは、従来からZnTe結晶のEO効果を用いてTHz imagingを行ってきた。今回、空間分解能を向上させるためサンプルをZnTe

Fig.23 Impulse scattering measurement from an alumina cylinder over a range of bistatic angle from 119 to 141 degrees. The temporal and amplitude shifts of surface and transmitted waves are clearly visible. (CTHR1 Fig.2, M. T. Reiten, *et al.*)

Fig.24 Images comparing maximum peak-to-peak amplitude of (a) the normal, noninterferometric imaging and (b) interferometric imaging. The sample consists of two $\sim 50\text{-}\mu\text{m}$ thick pieces of adhesive tape on a flat metal surface. In the upper image, only the edges of the two tape strips are faintly discernible. In the lower image, they are much more obvious, also, the tape strip on the right has two air bubbles, only discernible in the interferometric image. A median filter was used on both images. (CThR2 Fig.3, J. L. Johnson, *et al.*)

に近づける方法を試みた。従来方式では、サンプルとZnTeの間には距離があったためプローブ光をZnTeを透過させてCCDで検出できたが、今回はサンプルをZnTeに接して反射方式でプローブ光の検出を行いimagingに成功している(Fig.25)。結局、本方式では従来の3倍の分解能を得ている。また、同グループはTHz波の発振タイミングとCCD検出タイミングを別途発振器で制御し、Lock-in検出にてS/N比の向上も行っていた(CThM22)。さらに、DASTの複素誘電率を測定し、THz帯高速EOセンサーとして可能性を示していた(CThX4)。結晶性の改良によりTHz帯の高速EOデバイスだけでなくGHz $\sim$ THzの広い周波数応答特性からマイクロ波フォトニクス、導波路変調器への応用の可能性を示していた。

ドイツのHalbleitertechnik II研究所から、THz分光の感度向上技術の報告があった(CThX1)。薄膜の吸収や遅延時間を計測する場合、相互作用長が短いためS/N比が問題となってくる。レーザー出力の長時間に亘る揺らぎ成分によって積算計測では感度向上は見込めないため、同グループでは基板上に評価したい膜を半分領域に着け、その境界領域にTHz波を照射し試料を振動させることによってLock-in検出を可能にした。サファイア基板上にフォトレジストを塗布したもので評価を行って実証していた。この方法によってS/N比が 10^6 から 10^{10} に向上されていた。ま

Fig.25 Real-time 2D THz near-field imaging of a metal word "THz". (CThR3 Fig.3, Q. Chen, *et al.*)

た、同グループからマイクロマシーニング技術によって作製されたGHz帯、THz帯の導波路やアンテナコンポーネントのTHz波分光の報告があった(CThX5)。ワイヤグリッドを使用した光学系で150GHzから3THzの領域における180GHz設計のアンテナ付き導波路の周波数特性やコルゲートホーンからの2.5THz付近の近接場放射パターンを計測した例を示していた。また、別の技術的な報告でAlliedSignal社からPhotomixerで発生させたCW THz波の検出方法としてEO素子ZnTeへのプローブ光にPhotomixer励起光源に使用した2波を用いる方法を報告していた(CThM41)。本方法ではLock-in効果によってノイズ成分抑制でき、また一般に使うポロメータとは異なり位相情報も検出可能となる。

以上の様々な技術による分光・imagingは、他にもTHz波時間分光によるII-VI族CdTeの分光(CThM23)や粉末中にある物体のimaging(CThM42)などが報告されていた。最後に筆者グループにより0.95 $\sim$ 2.6THzの広帯域で連続的同調可能なTHzパラメトリック発振器による大気と塩化水素ガスの分光に成功した報告を行ったことも追記する。

(南出 泰重)

8. 光通信

インターネットを始めとするデータ通信需要の急激な増大と歩調を合わせて、光ファイバ通信システムの大容量・高速化、および全光ネットワーク化を目指した研究開発が幅広く精力的に進められている。このことは、今年3月に開催されたOFC2000(Optical Fiber Communication Conference 2000)の参加者数の驚異的な伸びにも現れている(前年度比65%増の約17000人が参加した)。CLEOではOFCとは異なり、大容量通信システム自体に関する報告は少ないが、大容量・高速システムを構成するために必要なサブシステムやデバイス、およびそれらに関連する基礎的な新しいアイデアについての報告が数多くなされた。Lightwave Communications and Networksのカテゴリのもとに設けられたセッション数はポスターセッションを含めて12であり、84件の発表(そのうち、チュートリアル6演2件、招待6演4件)がなされた。また、光通信に関連するポストデッドライン6演数は約10件であった。これらの中で発表件数が比較的多かった、1. 超高速光スイッチおよび光信号再生/波長変換、2. WDM伝送およびネットワーク用デバイス、3. 分散マネージメントソリトン伝送、に関するいくつかの発表内容を以下に紹介する。

8.1 超高速光スイッチおよび光信号再生/波長変換

毎秒数十Gbit以上の高速データを単一チャネルで伝送するOTDM(Optical Time Division Multiplexing)システムにおいて、短パルスの変調、多重、および多重分離などの操作を行うためには、超高速光スイッチが不可欠であり、その中でも半導体光増幅器(SOA)の非線形性を利用した光スイッチが低電力動作が可能で集積化に向くという点で有望視されている。

Princeton大学のToliverら(CWD2)は、3種の干渉計構造

(ループ干渉計, 制御光と被制御光の伝搬方向が逆方向のマッハツェンダー干渉計, 制御光と被制御光の伝搬方向が同方向のマッハツェンダー干渉計)を用いたSOA光スイッチのゲート形状を比較し, 制御光と被制御光の伝搬方向が同方向のマッハツェンダー干渉計が高速性の点で最も優れていることを示した. 同じくPrinceton大学のZhouら(CMY4)は, ループ干渉計型SOA光スイッチのゲート幅を調整することによって信号パルス幅変換およびフォーマット変換(RZ→NRZおよびNRZ→RZ)を実現できることを示した.

超高速光スイッチの通信への応用の一つに, 全光信号再生器がある. これは, 信号パルスの振幅, 波形, およびタイミングを, 光-電気変換せずに光信号のまま再生する装置であり, 大規模の光ネットワークを実現する際に必要となる. AlcatelのLeclercら(CMY5: 招待6演)は, ソリトン伝送系において信号パルス列から抽出したクロック信号によって信号パルス列を変調する信号再生方式, およびマッハツェンダー干渉計型SOA光スイッチを用いた信号再生器の特性を紹介した. Leclercらはまた, 前者の信号再生方式を用いた160Gbit/s (4ch×40Gbit/s), 10000kmの周回伝送実験の結果を報告した(Fig.26).

なお, 多くの全光信号再生器は, 再生器内に用意された新しい波長のキャリアを入力信号で変調することによって光信号の再生を行うので, 信号再生の機能と同時に波長変換の機能も有する. Swiss Federal Inst. of TechのDulkら(CWI1)およびデンマーク工科大学のPoulsenら(CWI2)は, マッハツェンダー干渉計型SOA光スイッチを用いて, エルビウム添加ファイバ増幅器の2つの帯域(CバンドとLバンド)にまたがる波長変換実験を行った. CWI1では40Gbit/sの高速信号の波長変換が可能であることが, また, CWI2では変換後の信号が80kmの標準単一モードファイバを伝送可能であることが示された.

超高速全光スイッチは, SOAの非線形性の他に, 光ファイバの非線形性を用いて実現することもできる. NTTのTakara(CTuM1: 招待講演)は種々の超高速全光信号処理デバイスを用いたOTDM伝送システムの概要と実験例を紹介した.

8.2 WDM伝送およびネットワーク用デバイス

高密度の長距離WDM伝送を実現するためには, ファイ

Fig.26 Experimental loop configuration. Transmitter and receiver setups are also shown in insets. (CPD14 Fig.2, O. Leclerc, et al.)

バの非線形性がもたらすチャンネル間クロストークを十分に抑圧することが必要である. Fondazione Ugo BoldoniのMateraら(CTuG1)は, ゼロ分散波長付近での四光波混合の抑圧のためには, 信号パルスとして比較的幅の狭いRZパルスを用い, パルス重なりが少なくなるようにタイミングを調整することが有効であることを示した. また, CIENAのSongら(CTuG2)は, 高次の四光波混合による伝送特性劣化の程度を明らかにした.

WDM伝送システム用の多波長短パルス光源として, ファイバの非線形性を利用して短パルスのスペクトル幅を拡大した後に, フィルターを用いて所望の信号スペクトルを切り出す方法(supercontinuum光源)がある. LucentのBoivinら(CTuG6)は, 短パルス光源として通常用いられている能動モード同期レーザーの代わりに, 電界吸収型変調器によるパルス発生器を用いることによってより良質なsupercontinuum多波長信号を生成することができることを示し, 40ch×9.953Gbit/s, 544kmのWDM伝送実験を行った.

WDM伝送システム関係の他の発表としては, Purdue大学のShenらによるWDM信号とCDMA信号の多重伝送についての実験報告(Fig.27 (a), (b))があった. この伝送方式においては, WDMのみの伝送の場合にどうしても未使用となるチャンネル間のガードバンドをCDMA信号が有効に利用し, システムの周波数利用効率が全体として向上することである.

WDMネットワークデバイスに関しては, 波長ルーチング技術を用いた最大スループットが320Gbit/s (10Gbit/s×32波長チャンネル)の光パケット交換器の基礎的な実験報告(NTTのHabaraら(CWD1)), 波長可変ファイバブラッググレーティングを用いた光クロスコネクトの実験の報告(Southern California大学のSongら(CWD6))等があった.

8.3 分散マネージメントソリトン伝送

分散値の絶対値が比較的大きな異常分散ファイバと正常分散ファイバを交互に接続して伝送路を形成する分散マネージメントは, WDM伝送時に問題となるチャンネル間

Fig.27 (a) Schematic diagram of the CDMA detection path in the hybrid optical WDM-CDMA system. (CMR3 Fig.1, S. Shen, et al.) (b) Schematic diagram of a WDM detection module in the hybrid optical WDM-CDMA system. (CWK61 Fig.1, S. Shen, et al.)

四光波混合を抑圧する方法として重要である。このような分散マネージメントを施した伝送路においては、光パルスが感じる平均の分散性と平均の非線形性のつりあいによって形成される定常パルス解が存在し、分散マネージメントソリトンなどと呼ばれる。分散マネージメントソリトンは、長距離伝送用の信号形式として種々の優れた性質をもつことがわかっており、ここ数年活発な研究の対象となっている。

Roma大学のZitelliら(CMF4)は、ファイバの分散値の変化が完全に周期的でなくても、分散値反転の1周期で平均した平均分散値がほぼ一定に保たれるならば、安定なパルス伝搬が可能であることを示した。また、Rochester大学のLakobaら(CMF6)は、ソリトンパルスが非ソリトン分散波を捕獲しながら伝搬する効果が、通常のソリトンと分散マネージメントソリトンとは異なり、そのために、分散マネージメント伝送の場合のほうが偏波モード分散による伝送特性劣化が小さくなることを示した。

また、毎秒数十Gbit以上の超高速の伝送においては、増幅器間隔(数10km)よりも頻繁に(数kmごと)分散値を反転させた高密度分散マネージメントを用いることが伝送特性の向上のために有効であることが知られており、NRLのKaecheleら(CMR2)はこの手法を用いて200Gbit/s, 100kmの伝送実験を行った。(松本 正行)

9. Photonic Band Gap

フォトニック結晶(Photonic Crystal)は今回QELSで特集したトピックの一つでもあり、セッションがNonlinear Optics, Resonators, Waveguides, Emitters, General, Emissionに細分され6駒もの時間がとられていた。その他にも関係するセッションとしてFabrication and Characterization of Periodic Structures, Photons in Confined Structuresなどにおいても多様なアプローチで多くのフォトニック結晶関係の論文発表があった。その中からいくつかを紹介したい。

まずToronto大のS. JohnがTutorial講演(QMB1)をおこなった。彼はフォトニック結晶中の欠陥による光の局在の提唱者である。最近ではインバース・オパール構造(微小球を3次元的に配列した後、隙間を高屈折率媒質で埋め、微小球をエッチングで溶かした構造: Fig.28)の実験を共同で進めている。これまで材料としてTiO₂やGeが報告され

Fig.28 SEM micrograph of an interior surface of macro-porous titania made with 550-nm polystyrene spheres. (CTuB2 Fig.1, J. D. Thorne, *et al.*)

ているが、今回Siを使うことで通信波長1.5 μ mにバンドギャップをもち、高屈折率比かつ低吸収である構造を実現した。また、その構造に液晶を注入し、複屈折材料の光学特性の評価を行った。講演の後半では量子論的にフォトニック結晶における光の局在について説明した。

Bath大のR. St. J. Russellは招待講演(QME3)で同グループが提案・展開しているフォトニック結晶ファイバ(Fig.29)のレビューを行った。フォトニック結晶ファイバではコア径を従来のファイバに比べ著しく小さくすることができ、高い非線形効果を得ることができる。実際、波長850nmのYAGレーザーを入射し数十cm伝搬させることで、青色から1.6 μ m程度までの超広帯域スペクトルを実現した。これは同時開催された展示会でもレーザーメーカーからデモンストレーションがなされていた。またファイバ作製技術も以前より向上されて均一な構造が形成できるようになり、散乱損失低減が行われ0.08dB/m程度まで実現できている。またQFA2では同じBath大のW. J. Wadsworthらがフォトニック結晶ファイバ(Fig.30)の分散符号が反転する波長付近にてソリトン効果を報告した。

フォトニック結晶導波路については、2次元構造に関していくつか報告があった。中でもCaltechのM. Loncarらは(JMA4)、SOI基板に電子ビームリソグラフィと反応性ドラ

Fig.29 Scanning electron micrograph of a modified dispersion PCF. $\Lambda = 1.74 \mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.8$, Core diameter = $2.0 \mu\text{m}$. (QFA2 Fig.1, W. J. Wadsworth, *et al.*)

Fig.30 a) to c) Measured GVD of modified dispersion PCF with various values of crystal pitch, Λ . d) GVD of bulk silica for comparison. The GVD of conventional single mode fibres must lie below this line. (QFA2 Fig.2, W. J. Wadsworth, *et al.*)

Fig.31 Guiding of light around a 60° bend in a photonic crystal waveguide. (JMA4 Fig.1, M. Loncar, *et al.*)

イエッチングにより線状欠陥のある孔列を加工し、その後コア下部のSiO₂層をフッ酸で溶かし、メンブ레인型(上下クラッドが空気)のフォトニック結晶導波路を作製した。波長1.55μmの光をファイバからバットカップリングで入射し、60°曲りを含む約200μmの伝搬を観察した(Fig.31)。

発光制御については2次元フォトニック結晶を用いた報告がいくつかなされた。その中でもCaltechのJ. Vuckovicらが招待講演(JMB3)で、InGaAs量子井戸を平坦なAgミラーと2次元ホールアレイ付きAgミラーで挟んだ構造のLEDを用い、表面プラズモンを介して自然放出光の増強効果を報告した。

非線形効果については、北大の井上らが(QMB2)PbOガラスに空孔を形成した2次元フォトニック結晶を用いた2次高調波発生を報告した。Nd:YAGレーザーで波長1.2~1.5μmの光を入射すると、周期構造によるグレーティングベクトルを考慮した位相整合条件を満たす波長675nmで2次高調波のピークが観測された。またカタールニヤ大のC. Cojocaruらが(QME2)非線形材料であるKTPの両端に1次元フォトニック結晶(誘電体多層膜)を設けて共振器を形成した。基本波(1064nm)と2次高調波を入射し、2波の位相差や遅延時間により基本波の透過・反射率の制御をおこない、将来のAll Optical switchingへの発展の可能性を示した。

その他、東北大の佐藤らが(QTuC5)多層膜積層技術(スパッタ成膜とスパッタエッチングの組み合わせ)を応用した自己クローニング法によりTiO₂/SiO₂からなる可視域フォトニック結晶を報告した。さらに、光ピックアップなどに利用できる波長板や回折格子型偏光分離素子への応用について報告した。またNew Jersey工科大のM. Ajgaonkarらが(QWI1), TEOSの加水分解により径の揃ったオパール球を形成・配列して3次元フォトニック結晶を作製した。その後イオン注入によりErイオンをドーブし、吸収端付近での透過率の角度依存性を評価した。

この他にも興味深い発表が多くあったが、紙面の都合で割愛することをご了解いただきたい。(佐藤 尚)

10. Bose-Einstein Condensation (BEC)

1995年の米国JILAでのBECの実証以来、1997年にはMITで原子波レーザーが誕生し、昨年は米国NISTの準連続原子波レーザーや非線形原子波光学、独国マックスプランク研究所での連続原子波レーザーが相次いで報告され、ハー

バード大学の遅い光、MITでの原子の超放射、米国JILAでの原子気体の量子渦生成、フェルミ縮退の始まりの観察、東大での原子波干渉計、原子波の増幅、電通大での実時間原子ホログラフィーなど、BECに関わる一連の成果が世界に発信された。米国物理学会の100周年記念大会に発表が流れた昨年のQELS'99とは異なり、今年のQELS2000はこの分野の最新の成果が勢揃いした感がある。BECに関しては、QWB「Bose-Einstein condensation and collision resonances」、QThK「Bose-Einstein condensation」、QThO「Degenerate gases and atom lasers」の3セッションがあり、その他関連するものでQWE「Electromagnetically induced transparency and optical coherence」、QWJ「Slowlight and electromagnetically induced transparency」、QWK「Cold molecules and spectroscopy of cold atoms」、QWO「Optical lattices」、QThB「Atom optics and chaos」、QThF「Cooling, trapping and spectroscopy」などがあり、関連発表を含めると約60件の講演があった。

プレナリーセッションでは、1997年に水素原子のBECを初めて実現したMITのKleppner教授の講演があった。教授が水素のBECを目指し始めたのは実に20年以上も前のことになる。結果としてアルカリ金属原子に水素原子冷却で開発した蒸発冷却を適用されBECを先に実証されてしまう形になったが、それでも水素のBECの実現に固執続け実証するに至った、その情熱に改めて感服した。

現在世界の20機関でBECが実証、追試されてきているが、その後どういう方向で研究が展開していくのだろうかということに興味を持ちつつ講演を聴いた。1つの方向は、米国ライス大のHulet教授らのグループ(QWB2)とテキサス大のHeinzen教授らのグループ(QWB3)から、凝縮体の2光子光誘起会合反応により2原子分子を誘導的に形成する報告があった。極低温の凝縮体中で化学反応を起こさせ、極低温の分子の形成や、原子より大きい粒子である分子のBECを目指しているということだ。ライス大の方では、⁷LiのBEC(温度800nK, 原子数106)を磁気トラップ中に捕捉し、Fig.32に示すように ω_1 の励起光を照射し、3重項状態の⁷Li₂結合上準位の $v=72$ の振動準位よりわずかに下方の仮想準位に励起し、 ω_2 の反ストークス光を発生させ、結果として⁷Li₂の結合3重項状態の下準位の $v=10$ に遷移させ、極低温の⁷Li₂分子を形成した。Fig.33が示すように最適な離調で

Fig.32 Molecular potentials and energy levels for the stimulated two-photon photoassociation described in this paper. Binding energies, E_B , are relative to the dissociation limit of the corresponding potential. (QWB2 Fig.1, J. M. Gerton, *et al.*)

Fig.33 Two-photon photoassociation spectrum of the $v = 10$ vibrational level in the $a^3\Sigma_u^+$ Molecular potential. The dark squares are the normalized data obtained as described in the text and the solid curves is a fit using the thermal-Lorentzian convolution. The fit corresponds to a temperature of 800 nK and a Lorentzian width of 5 kHz. (QWB2 Fig.2, J. M. Gerton, *et al.*)

は分子生成が窺われる22%の原子数の減少が見られた。テキサス大ではFig.34に見られるように ^{87}Rb のBECを初期状態とし、 $^{87}\text{Rb}_2$ 分子の2光子光誘起会合反応を報告した。

BECの原子光学への展開については、ハノーバー大学のErtmer教授らのグループから報告があった(QWB5)。Fig.35に示すように青色方向に大きく離調したレーザー光により作り出された光双極子力による跳ね返りやFig.36の同じく青色方向に大きく離調したラゲル gaussian モードのビームの導波路による凝縮体の直線上の断熱膨

Fig.34 Stimulated Raman coupling between free and bound states of atoms in a Bose-Einstein condensate. (QWB3 Fig.1, R. H. Wynar, *et al.*)

Fig.35 A Bose-Einstein condensate (a) and a thermal ensemble (b) of rubidium atoms bouncing off an atom mirror. (QWB5 Fig.1, C. Wieman, *et al.*)

Fig.36 Atoms from a Bose-Einstein condensate loaded into a waveguide and moving slowly in the z -direction due to a slight slope of the donut mode laser beam generating the waveguide. Broadening of the cloud due to heating effects and due to expansion of the BEC is observed. (QWB5 Fig.2, C. Wieman, *et al.*)

張が報告された。

超流動性に関わる研究では、昨年MITがNa凝縮体の中に青色方向に大きく離調したレーザービームをある速度以下で走査してもエネルギーの散逸が起こらないことを示した。さらにJILAでは2成分の凝縮体中の量子渦の形成を実現した。ここでは仏国パリ高等師範学校のDalibard博士らの成果(QThK1)を報告する。音響光学素子を使って16μmの変位をレーザービームに与え、あたかも「光学的なスプーン」を駆使しているように凝縮体をかき混ぜる手法である。もちろんさらにレーザーによる双極子ポテンシャルは加えている。結果としてFig.37に示すように周波数が147Hzまでは量子渦が現れなかったが、さらに上げると150Hzまでで1つの渦糸が、172Hzまでで2から4の渦糸が、さらに上げて210Hzまでには複雑な渦糸列の構造が現れた。特にトラップの束縛を緩めた場合に多数の渦糸からなる渦糸列が形成できることを示した。

最後に特に印象に残った講演を紹介したい。すでにBECに成功しているアルカリ金属原子に ^{87}Rb 、 ^{23}Na 、 ^7Li がある。このうち ^{87}Rb と ^{23}Na はs波散乱長が正であり、原子同士は斥力相互作用になる。したがって原子気体の安定なBECを形成できる。一方 ^7Li は散乱長が負であり、原子同士には引力相互作用が働く。引力相互作用は密度の高い領域を作ろうとするので、一様な系ではBECが起こらないと信じられている。しかしライス大の ^7Li のように、原子数がある臨界値よりも小さければポテンシャルエネルギー、運動エネルギー、引力相互作用エネルギーの全エネルギーに極小値が存在し、準安定なBECが存在することになる。この準安定な引力相互作用のBECがひとたび崩壊するとどうなるかということが少し前から話題になっていた。数μmの大きさの準安定なBECがひとたび崩壊すると、数Åの反応芯が見えるまで収縮し、原子密度が高くなると束縛状態を形成し、束縛状態の形成によって生じる巨大な潜熱を放出することになる。放出された潜熱は原子の運動エネルギーに転化され、超新星の大爆発に匹敵する、原子集団の大爆発を起こして飛び散るだろうと予測されていた。今回BEC

Fig.37 Transverse absorption images of a Bose-Einstein condensate stirred with a laser beam (after a 27 ms time-of-flight). For all three images, the condensate number is $N = 140\,000 (\pm 50\,000)$ and the temperature is below 80 nK. The rotation frequency is respectively (a) 145 Hz, (b) 152 Hz; (c) 163 Hz. The magnetic trap frequencies are 220 Hz (transverse) and 12 Hz (longitudinal). (QThK1 Fig.1, K. W. Madison, *et al.*)

を初めて実証したJILAのグループがこの量子爆発とでもいえる現象を実現、観察したことを初めて報告(QWB4)した。

この実証は彼らだからこそできたという感がある。彼らは磁場なしで散乱長が大きく負になる ^{85}Rb に注目した。もちろん磁場なしでは最大で80個程度の原子からのBECしか生成できないことになるが、印加磁場を変えて散乱長を自在に変えることができるFeshbach共鳴効果を絶妙に利用した。バイアス磁場を上げていくと約150Gまでは散乱長は大きく負に留まっているが、156~166Gのわずかに10Gの間だけ散乱長は正になる。それ以上上げるとまた負になる。この僅か10Gの間のバイアス磁場を制御する事で、3nK, 10000個以上の原子数の ^{85}Rb のBECを実現した。Na凝縮体のFeshbach共鳴は2年前にMITから報告されているが、凝縮体が突然崩壊する難点があった。彼らの ^{85}Rb のBECは10秒間生き続けることができ、信頼性が高いことを強調していた。彼らは ^{85}Rb の安定なBECをまず作り、そのあとバ

イアス磁場を急激に167G以上にして、その後の量子崩壊現象を観察した。結果として飛び散った痕跡や、水平方向、垂直方向に順次収束する現象も観察した。凝縮体が内部に崩壊していく様子は時間スケールとして5ms程度と予測され今回詳細な報告はなかったが、超新星の爆発にも匹敵する「Bosenova」の量子爆発現象という新現象の出現によって、新しい量子爆発現象の解明や、コヒーレント分子形成法としての可能性など、今後の発展が大いに期待できる素晴らしい内容だった。(熊谷 寛)

11. 量子ドットおよび量子ドットレーザー

今回の会議において、セッションのタイトルに量子ドット (quantum dot) が含まれるものは、CLEOに2つ、QELSに5つあった。特にQELSの5つは光結晶 (photonic crystal) 関連の6つに次いで多く、この分野が相変わらず多くの研究者に興味を持たれていることが分かる。合計7つの量子ドット関連のセッションにおける総論文数は42件で、この他に近接場光学 (near-field Optics), 光結晶, 非線形材料 (nonlinear materials) などの他のセッションにおける関連論文を含めると、50件程度はあったであろう。

量子ドットの自己形成現象が発見されて以来この分野は急速に発展したが、ここ1~2年での量子ドットレーザーの特性改善には目を見張るものがある。量子ドットレーザーにおいては、しきい値電流の大幅な低減、温度特性の改善、通信の大容量化につながる高速化と狭スペクトル線幅化など、様々な効果が理論的に期待されるため、並列光インターコネクション用超低消費電力レーザー、温度制御フリーレーザー、超高速変調レーザーなどへの応用が考えられる。現在最も研究されているのはInGaAs/GaAs量子ドットレーザーであるが、この材料系が成功すると、温度特性に優れた長波長の半導体レーザーがGaAs基板上でできること、高性能長波長面発光レーザーが実現できること、などへの期待感が大きい。

量子ドットレーザーの研究は、発振波長が1.3 μm に達した1昨年あたりから、ヨーロッパや日本に加えて、北米の大学の精力的な研究も目立つようになった。CLEOにおける量子ドットレーザーのセッションを通じては、トップグループの技術レベルは現在ほぼ横一線であるとの印象を受けた。同セッションの冒頭には、富士通研究所のMukaiによる招待講演が行われた(CWL1. 但しTechnical Digest中のproceedingはcommitteeのミスで間違っている)。富士通研究所のグループは昨年、世界で初めて、実用波長である1.3 μm での室温連続発振を達成している。講演では、1.3 μm 帯で発光するInGaAs/GaAs量子ドットの気相成長による自己形成技術を1994年に世界に先駆けて発明したことを皮切りに、最近の室温連続発振に至るまでの技術開発の経緯の紹介、および、量子ドットレーザー特有の物理に関する実験や理論に関する議論が展開された。一般講演におけるトピックスは、まず、Univ. of TexasのParkは、VCSELでは一般的な技術である酸化膜電流狭窄を用いたストライプレーザー構造を量子ドットレーザーに用いて、しきい値1.2mA、電流密度に換算すると19A/cm²を達成したことを

報告した(Fig.38). この値は, 歪量子井戸レーザーでも報告されたことのない極めて低い値である. 発振波長も $1.33\mu\text{m}$ であり, 今後が期待できる. また, この酸化膜電流狭窄構造は他の研究グループでも採用されており, かなり有効のようであった. Univ. of New MexicoのHuang(CWL5)と富士通研究所のMukai(CWQ2)からは, $1.3\mu\text{m}$ でのCW発振を, 100° の高温まで達成したことが報告された. また, これらのレーザーの内部損失は 1cm^{-1} と極めて小さく, 量子ドットの吸収損失の少なさを印象づけた(Fig.39). Univ. of New MexicoのLiuは, $1.3\mu\text{m}$ の量子ドットレーザーにおける, モード利得の電流密度依存性を報告した(Fig.40). 彼等の報告によると, 量子ドット1層のモード利得は最大 4.5cm^{-1} であり, 彼等のデバイスの光閉じこめ係数にもよるだろうが, 量子井戸に対してのはっきりとした優位差はまだ見えてこない. 但し, 利得に関しては, Univ. of MunichのLinkが, ドットの密度を 10^{11}cm^{-2} まで上げることで, 材料利得 $20,000\text{cm}^{-1}$ (ドット層7層)という高い値を報告していた(QMJ7).

QELSにおける量子ドット関連のセッションのタイトルは, Single Quantum Dots, Dynamics of Quantum Dots, Electronic Structure of Quantum Dots, Semiconductor Quantum Dots,

Photonic Dots and Quantum Dots, である. 量子ドットを舞台とする新しい物性研究の花盛りであり, 例えばZeeman coherence(QMH1, QMH2)やhomogeneous broadening(QMH6, QTuH4, 他), またPLのcoherent oscillation(QMJ2およびQMJ4)を観察してdephasing timeを見積もる試みや(Fig.41), 光学非線形性なども詳しく調べられていた. この他, NSOMを用いたSingle dot spectroscopyも, 定着した感があった. 目新しいものとしては, セッションのタイトルにもあるPhotonic Dotsが目を惹いた. フォトニックドットとは, 空間的に孤立した, 光の波長程度の3次元サイズを持つフォトニック結晶のことである. Univ. of ArizonaのKhitrovaが, フォトニックドット単一では離散的なフォトニックバンドが形成され, これを周期的に並べていくのに従ってフォトニックバンドが連続的へと変化する様子を実験的に示したのは, 驚かされた(QWC1). また, 同セッションではフォトニック結晶中に量子ドットを導入することで光を制御する試みも報告された(QWC3). この方面の今後の発展も, 楽しみである.

全体の印象であるが, まずデバイスでは, $1.3\mu\text{m}$ の量子ドットレーザーの性能はかなり上がって来ており, 量子井

Fig.38 LI and lasing spectrum showing 1.2 mA threshold current and $1.33\mu\text{m}$ lasing wavelength. (CWL6 Fig.2, G. Park, *et al.*)

Fig.40 Ground state modal gain as a function of threshold current density. (CWL2 Fig.1, G. T. Liu, *et al.*)

Fig.39 The linear dependence of the inverse differential quantum efficiency η_d^{-1} for both factors on the cavity length L under cw operation for lasers with $W = 8.4\mu\text{m}$ and $W = 27.4\mu\text{m}$. Both linear fits have the same y-intercept that gives an internal quantum efficiency of $\eta_i = 65.4\%$, while their slopes yield the internal cavity loss α_i , which is 0.97cm^{-1} for lasers with $W = 8.4\mu\text{m}$ and 0.77cm^{-1} for lasers with $W = 27.4\mu\text{m}$. (CWL5 Fig.2, X. Huang, *et al.*)

Fig.41 PL (Solid circles) and first order pulse autocorrelation (open circles) as a function of coarse delay. Solid line is a biexponential fit. Inset is an enlargement around 3.6 psec, showing the oscillations in the PL as a function of fine delay. (QMJ4 Fig.1, A. S. Lenihan, *et al.*)

戸レーザーと遜色のないものになりつつあると言える。性能を決める量子ドットの密度・均一性は多くの研究機関で現在ほぼ同等であり、量子井戸レーザーをリプレイスするには、もう一段のブレイクスルーが欲しいところである。また、量子ドットの物性研究は今なお盛んであり、今後このなかから、量子ドットを用いた新しいデバイスの種が出てくることを期待したい。(向井 剛輝)

12. Near Field Optics

Near Field Optics関連の発表は、セッションとしてはQELSでのNear-field Optics (QMF), Near-field Optics of Nanostructures (QMC)の2つであり、内容としては近接場光学顕微鏡(NSOM)に関係するものが多かった。特に、計測手段に光ファイバプローブのNSOMを用いた物性研究、その中でも、半導体量子ナノ構造に関するものの割合が依然として高かった。この研究分野では、単一量子構造(単一の量子細線や量子ドット)内での電子状態やキャリアの緩和、ダイナミクスなどに関心もたれており、その点において、高分解能を有するNSOMが非常に有効な手段となっており、上述のセッション(QMC)だけでなく、量子ドットの電子物性に関するセッションでもいくつか報告があった。

ただ、最近の傾向としては、NSOMを計測手段として使用するにしても、その高空間分解能のみを利用した単純な反射、透過、発光測定だけでなく、光源にフェムト秒レーザーを組み合わせた時間分解測定やポンププローブ測定、また、非線形効果を利用するなどこれまでマクロ的に行なわれていた測定方法がNSOMで実現されてきており、本会議でもそのように非常にテクニカルな手法を用いた研究報告が大部分であった。

NSOM以外では、単一分子計測に関連して、誘電体界面に近接して置かれた双極子からの放射パターンやその金属、誘電体近接効果に関するもの、また、その集光効率に関するものがいくつか報告されていた。

はじめに、NSOMに関連した発表を測定手法の観点から報告する。まず、Invited talkとして、ドイツPhilipps大のKnorrから、NSOMプローブと半導体ナノ構造との間での近接場応答を空間、時間分解で計算し、量子構造中の励起子ダイナミクスについての報告がなされた(QMC1)。

NSOMを用いた物性計測では、ドイツMax-Born研究所のEmilianiからは、2台のフェムト秒レーザーを使用し、空間分解能200nm、時間分解能200fsでのポンププローブ実験の報告があり、GaAs(311)A面上に成長した単一量子細線中のキャリアダイナミクスが調べられていた(QFF5)。ここでは、NSOMプローブによる局所反射率の変化をポンプがfar-fieldによるグローバル励起とNSOMプローブによる局所励起のそれぞれで測定し(Fig.42)、その差分から量子細線中のキャリア拡散長を見積もっていた。

また、スイス連邦工科大のAchermannからもfar-fieldとnear-fieldのモードを組み合わせた類似のポンププローブ実験が報告され、V型GaAs量子細線での量子準位の空間分布マッピングから、約1ML相当の界面ゆらぎが見積もられていた(QMC6)。

Fig.42 Pump-induced change in QWR reflectivity $\Delta R_{QWR}/R_0$ as a function of the pump and probe delay time. The pump laser at 1.52 eV creates carriers in high-lying QWR states and in the embedding QW. The probe laser at 1.46 eV is set to the QWR absorption resonance. (a) Far-field excitation, (b) Near-field excitation. (QFF5 Fig.2, V. Emiliani, *et al.*)

また、Max-Born研究所の上述の同じグループ(Intoniti)らから、結合量子細線-ドット構造における細線からドットへの励起子の空間的な流れ込みの様子をNSOMを用いて観察した結果についても報告されていた(QMC3)。励起光をNSOMプローブから照射し、量子ドットからの発光をfar-field光学系で検出する構成として、励起位置を走査することで、ドットへ流れ込むキャリアの空間分布を150nmの空間分解能で観測していた。Fig.43は励起を量子細線の吸収に共鳴させた場合であり、量子細線からのキャリアの流れ込みが画像化されている。このような時間分解、空間分解実験を系統的に行なうことで、量子構造内の低次元キャリアのダイナミクスがより詳細に理解できるものと期待できる。

また、東京大学の戸田らは、モードロックTi:sapphireレー

Fig.43 Two-dimensional NSOM images recorded with a pulled coated tip at 10 K and 50 K for QWR resonant excitation and detection at the quantum dot PL peak. (QMC3 Fig.3, F. Intonti, *et al.*)

Fig.44 (a) PLE from a single dot around $E_{\text{rel}} = 40$ meV on an expanded scale. The dashed line shows the laser spectrum whose line-width is sufficiently narrow to not excite other peaks. (b) The oscillation amplitude of the time integrated PL as a function of the pulse delay. Inset: interference oscillations around 15 ps on an expanded scale with sinusoidal fits through the data points. As shown in this figure, there are strong interference oscillations, indicating the autocorrelation function of the carrier wavefunctions. (c) The quantum interference between two resonances, which may be attributed to virtual states coupled to the localized phonons. (QMJ2 Fig.1, Y. Toda, *et al.*)

ザーを励起光源に、illumination-collectionモードでのtime correlation測定について報告していた(QMJ2)。ファイバプローブでの分散を考慮した光パルスを用いることで時間分解能1psが実現されており、自己形成InAs単一量子ドットでの励起キャリアのコヒーレンス緩和の様子が観測されていた(Fig.44)。

NSOMの半導体物性計測以外の応用としては、オランダTwente大のBalistreriらから、NSOM(PSTM)を用いた光導波路中の光位相の空間分布測定に関する報告があった(QMF6)。導波路表面の近接場光をファイバプローブで検出して導波路中での光の位相、振幅の分布の様子を可視化することで、TEとTMモード間の干渉の様子などを明らか

Fig.45 The Fourier image of emission obtained in the solid-immersion geometry, and the calculated emission pattern. (QTuA25 Fig.2, K. Koyama, *et al.*)

にしていた。また、JST、東工大の犬塚グループからは、NSOMプローブからの近接場光を利用したPhoto-enhanced CVD法によるZn, ZnOドット成長(QMF4)や、近接場光による原子トラップ、原子操作を目指したファイバプローブでのトラップポテンシャルの計算(QMF5)などの報告があり、様々な分野への応用を目指した研究も精力的に行なわれているようである。

NSOM以外の近接場光に関する報告では、東大の小山らが、近接場光を利用したソリッドイマージョンレンズ(SIL)での集光効率を議論するため、誘電体に近接して置かれた双極子からの放射パターンを計算していた(QTuA25)。Fig.45のように放射パターンが誘電体側に偏っており、それが双極子と誘電体界面との距離に敏感であること、また、角度分布から検出効率を上げるには十分なNAが必要であることなどが報告されていた。また、色素ドーピングしたポリスチレン微小球での実験(界面からの距離約70nm)で約70%の高い集光効率を観測しており、さらに近接させる(<10nm)ことで90%以上の集光効率を実現できることを示唆していた。また、同じグループの吉田からは実際にSILを半導体量子構造の物性研究へ応用した報告がなされていた(QMC5)。

一方、Twente大のGersenらからは、単一分子(双極子)からの放射パターンへのNSOMプローブの影響、逆に、プローブによる放射パターンのコントロールという観点から、金属-誘電体構造が近接した条件下での放射パターンを計算し、その角度分布の非対称性を実験的に確かめていた(QMF3)。単一分子計測では、双極子からの放射パターンや近接場分布が、双極子の向きや近接する基板、観測プローブなどに大きく影響されることから、このような近接場での相互作用を考慮した議論の必要性が改めて認識させられた。(吉田 正裕)