コンファレンスレポート

CLEO/QELS'96 報告

加藤 義章*・欠端 雅之**・伊藤 治彦***・藤本 靖*
 森 勇介†・羽鳥 伸明††
 水波 徹†††・江崎 瑞仙††††

Report on CLEO/QELS'96

Yoshiaki KATO, * Masayuki KAKEHATA, ** Haruhiko ITO, *** Yasushi FUJIMOTO *
 Yusuke MORI, † Nobuaki HATORI, ††
 Toru MIZUNAMI ††† and Mizunori EZAKI ††††

1. はじめに

青空の広がるアナハイム市(米国カリフォルニア州)にて、標記会議が6月2日(日)ー7日(金)に開催された。数年前はバブル崩壊に伴う不景気で日本からの参加者も減り随分さびしい感じがしたが、最近はすっかり活気が戻り、日本からの参加者も多く、講演、展示ともに充実した会議となった。参加者数は、会議途中の集計で約6300名であり、事務局によれば最終的に6700名程度に達するだろうとのことであった。1994年、1995年の参加者数(それぞれ6628名、6952名)に比べ、

今年は同程度のものである。参加者の内訳は、「講演出席」、「展示者」、「展示のみ見学」が各ほぼ2000、2500、2000人であり、展示のしめる割合が非常に大きくなっている。

プレナリーで、小原實氏(慶大)のOSAフェロー、小林功郎氏(NEC)のIEEE/LEOSフェローの受賞が発表された。また、山本喜久氏(スタンフォード大、NTT)、保立和夫氏(東大)がテュートリアル講演をされ、日本からの参加者として喜ばしいことであった。

発表論文数は合計1106件で、内訳は、プレナリー講演(45分)3、テュートリアル(60分)10、招

-
- * 大阪大学レーザー核融合研究センター(〒565 吹田市山田丘2-6)
 - ** 電子技術総合研究所(〒305 茨城県つくば市梅園1-1-4)
 - *** 神奈川科学技術アカデミー(〒213 川崎市高津区坂戸3-2-1 かながわサイエンスパーク)
 - † 大阪大学工学部(〒565 吹田市山田丘2-1)
 - †† 東京工業大学精密工学研究所(〒226 横浜市緑区長津田4259)
 - ††† 九州工業大学工学部電気工学科(〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)
 - †††† 慶應義塾大学理工学部電気工学科(〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)
 - * Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamada-oka Suita, Osaka 565)
 - * Electrotechnical Laboratory (1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305)
 - * Kanagawa Academy of Science and Technology (Kanagawa Science Park, 3-2-1 Sakato, Takatsu-ku, Kawasaki 213)
 - † Faculty of Engineering, Osaka University (2-1 Yamaka-oka, Suita, Osaka 565)
 - †† Precision and Intelligence Laboratories, Tokyo Institute of Technology (4259 Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama 226)
 - ††† Department of Electrical Engineering, Kyushu Institute of Technology (1-1 Sensuicho, Tobata, Kitakyushu 8040)
 - †††† Department of Electrical Engineering, Keio University (3-14-1 Hiyoshi, Kouhoku-ku, Yokohama 223)

待講演(30分)138, 一般講演918(口答発表(15分)641, ポスター発表277), ポストデッドライン(10分)37であった。招待及び一般講演(口頭発表)は、ほぼ10パラレルセッションで計143セッション(CLEO:82, QELS:37, Joint:15, LEAP:9), ポスターは3回に分かれて発表された。また、30件のショートコース(有料)が設けられた。

今回の新しい試みとしてLEAP(Lasers and Electro-optic Applications Program)が設けられ、レーザー・光学の利用者を対象として、商品化、ディスプレイ応用、特許、光学特性計測、システム設計の5テーマに関する講義、討論、実演等が行われた。また、学生の就職相談、米国における委員会報告等、実利的な企画が多く設けられ、光産業の確立と、そのための底辺の拡大に向けた努力が強く感じられた。

研究発表に関しては、最近は多様なトピカルミーティングでの発表に重点が置かれ、このような大きな会議で初めて発表される優れた論文が少なくなって来ているのが残念である。それでも色々な講演を聴いていると、これはと思われる発表に出会うことも多く、大変有意義であった。超短パルス、生物・医療応用、レーザー冷却によるボーズ・アインシュタイン凝縮等で最近急速な進歩が見られ、新しい商品開発と併せ、改めて米国のバイタリティに感銘を受けた。

さて、このように講演が多数になると、各研究者にとって有用な論文のみを選択するのが容易でなくなる。各分科の責任者は、招待講演と一般講演の組み合わせに工夫をこらし、その分科を魅力的にしようと試みている。セッションによっては、全てが招待講演で構成される場合もあるが、やはり新鮮な一般講演も必要で、適度のバランスが必要と感じられた。ポストデッドラインには、本当に新鮮な論文が発表されるので、このセッションをもっと強化するか、或いはポストデッドライン論文を一般講演セッションに組み入れる等、もう少し工夫が必要に思われる。

具体的な講演内容は各報告に記されるが、今回最も印象的だったのは、LD励起固体レーザーの高出力化が商品として確立してきたことであった。スペクトラフィジックス社に加え、コヒーレント社が単一モード連続発振でグリーン

5W出力、フランスのトムソングループのCMI社が多モード数kHz繰り返し発振でグリーン30W出力を商品化した。これらの大きな会社は高出力LDを自社生産し、今後の価格競争に備える体制を整えつつあるように見受けられた。LD励起Cr:LiSAFレーザーも商品化され、バッテリーでも運転できる軽量可搬の超短パルスレーザーが使用可能となり「実社会における超短パルス科学技術の始まり」(Wayne Knoxのプレナリー講演)が現実になりつつあると感じられた。またポストデッドライン論文で、TRW社が平均出力1kW及び6kWのLD励起Nd:YAGレーザーの開発状況を報告した。ARPAのサポートによるレーザー加工を目的とした大型計画の一環であり、現在3分の1モジュールで2kW出力を達成している。ドイツの「レーザー2000プロジェクト」と併せ、レーザー加工機へのLD応用が着実に進歩しつつある。

CLEO/QELSは、米国の東(ボルティモア)と西(アナハイム)で交互に開かれていたが、西海岸は2年後の会議からサンフランシスコで開催される。

なお、CLEOの兄弟会議としてCLEO/Europe及びCLEO/Pacific Rimが交互に開催され始めた。後者は昨年(1990年)の第1回に引き続き、来年の7月に第2回が幕張で開催される。末松、神谷両氏を委員長とし、実行及びプログラム委員会が活動を開始している。実行委員を仰せつかっている筆者としても是非有意義な会議にしたいと思っており、皆様のご指導、ご協力をお願いしたい。

(加藤義章)

2. 高強度物理、超短パルス発生

2.1 超短パルスレーザー

フェムト秒レーザーというセッションが二つ開催された。招待講演として、スイスFederal Institute of TechnologyのJ. P. Jungらから10fs代のパルス発生用の半導体可飽和吸収ミラーについて発表があった(CME1)。半導体ミラーは受動モード同期やKerrレンズモードロックレーザーのスターターとして使用されているが、半導体ブラッグミラーの反射帯域がスペクトル幅を制

Fig.1 Reflectivity of the thin low-finesse A-FPSA, 10-fs optical pulse spectrum, fluorescence spectrum of Ti:sapphire, output coupler (OC), Spectra Physics high reflector (HR), semiconductor AlAs/AlGaAs Bragg reflector (S-HR).¹⁾

限していた。今回、銀を高反射層として用いて広帯域化を実現した。金属膜の上に可飽和吸収体を成長するのが困難であるため、GaAs基板の上に銀を蒸着したものをSi基板に逆向きに取り付け、GaAs基板を銀ミラーの表面まで選択的にエッチングして製作している。73nmのスペクトル幅で12fsのパルスが得られている(Fig.1)。

ウィーン工科大のC. SpielmannらはSub-10fs Ti:sapphire lasers という招待講演を行った(CME3)。チャープミラーを用いたリング型発振器と、発振器の位相制御の可能性について報告した。リング共振器の高反射率の帯域は350nm程度であり、分散が無視できる帯域は200nm程度であった。コーティングした2枚のウェッジの反射で光を取り出すとともに分散の微調整を行い、7.5fsのパルスを得ている。また発振器からのフェムト秒パルス列の位相関係を測定し、その励起依存性を報告した。フィードバックにより位相を制御する方法として、フェムト秒パルスを金に照射したときのトンネルイオン化電流をモニタとして用いる方法を提案していた。

日本からはブラッグミラーを用いた1GHzの発振器について理研のZ. Liuらから報告があった(CME4)。実用的なレーザー開発を目標とし、高繰り返しと簡単な共振器構成が特徴である。1.02GHzで出力640mW、10.3psが得られ、外部圧縮により1.6psを得ている。

ファイバレーザのフェムト秒レーザは、2件報告があった。ひとつはMITのG. Lenzらから500mWのLD(980nm)でErファイバレーザを励起し、1ps、95mW、35.2MHzのパルスを発生し、外部圧縮により74fs、85mWを得た後、BBO結晶で波長変換し771nmで86fs、8.7mWを得ている(CME6)。予稿では73fs、3.2mWを報告している。ファイバレーザはLDで励起できる点が特徴であり、コンパクトになる。

もう一つは、Raytheon CompanyのR. C. Sharpらの報告で、ファイバ端面に半導体の可飽和ミラーを取り付けたツリウムドープファイバである(CME7)。50mWのLD励起で出力1mW、190fsが波長1.9 μ mで得られていた。12Vのバッテリーで動作可能とのことであり完成度の高いレーザであった。

Cr:LiSAFはLD励起で100fs以下のパルスを発生できるレーザとして盛んに研究されてきたが、今回は応用に用いることを主眼とした報告がMITのS. Tsudaらからなされた(CMK3)。可飽和ブラッグミラーを用いて共振器を構成し報告では励起にLDアレイを用いた場合とMOPAを用いた場合の特性の比較をした結果、MOPAを用いたほうが出力・スロープ効率ともに高く、セルフスタートで88mW、91fsが167MHzで得られていた。バッテリーによりLDを駆動させた場合で1.25時間動作するそうである。パルス幅などは特に優れてはいないが、応用として細胞の2光子蛍光顕微鏡やテラヘルツ電磁波発生によるガス分析、イメージング等の結果を報告した点が興味深かった。

同じくCr:LiSAFではLD励起の報告がSt. Andrews大学のM. P. Crittendenらからあった(CMK6)。セルフインジェクションロックのLDを一個だけ用いて励起し、75mW程度の励起で100fs以下のパルス発生がなされていた。セルフインジェクションロックによりLDのビーム広がり角が10倍以上改善されたことが主な原因である。結晶の端面に全反射コートして球面ミラーの間に配置することにより結晶内でのフォーカスを小さくするようにしている。150mWの励起で最短55fsが得られている。共振器の構成上ビームが結晶内をずれて通るために、角度のずれに

よる結晶の複屈折性が生じ、チューニングカーブにはモジュレーションが生じている。Cr:LiSGaFを用いた結果は強励起において高い出力が得られ、170mW 励起のときに出力 11.5mW, 87fs が得られている。また、展示場ではコヒーレント社がLD励起のCr:LiSAFを展示していた。A4程度の大きさの箱に入っており波長可変性などは備えていないが、60fs 以下のパルスが 100mW 以上で得られるそうである。

2.2 高次高調波発生

高次高調波発生のセッションは二つ設けられた。理論的な研究が進み物理的に不明な点が少なくなってきたようであるが、いくつか興味深い報告があったので紹介する。

クラスターからの高次高調波発生が Imperial College, Univ. of California Berkeley, LLNL (Lawrence Livermore National Laboratories) のグループから招待講演として報告された (JTU A1)。相互作用領域でのガス密度を同じにしておき、ガスジェット中にクラスターが存在する場合とクラスターのない静圧での高調波の特性を比較すると、前者には集光強度に対する飽和が少なく、より高次までの高調波の発生が観測された。クラスター内の電場が外部よりも増大することが原因である。クラスターによる効果が確認されたとはいえ、その効果が少ないのが残念である。

Fig. 2 Variation in high-harmonic emission in argon as a function of transform limited excitation laser pulse width.²⁾

同じく招待講演で Maryland Univ. の H.M. Milchberg のグループからプラズマ導波路を用いた高調波発生ということで報告があった (CTu A3)。93年にプラズマ導波路が報告されて以来、いくつかのプロポーザルがなされ、予備的実験も進められている。プラズマ導波路中での位相整合による差周波混合や X 線のパラメトリック増幅についてアイデアを紹介していた。

Michigan Univ. の A. Rundquist らは 25fs のパルスを用いた高次高調波発生について招待講演を行った (JTU C1)。基本波のパルス幅を狭くすることで、従来観測されていたものよりも短波長の高調波の発生を観測した (Fig. 2)。Xe, Kr, Ar, Ne を用いた場合に、中性原子から発生していると考えたと従来のモデルでは説明出来ない高次の高調波を観測したことになる。パルス幅が短くなりパルスの立ち上がりが速くなることで、イオン化しないで残っている中性原子がより高い強度で相互作用するためであると説明している。彼らは近似したポテンシャルでの一次元のシュレジンガー方程式を解いてイオン化の発展や基本波のチャープの効果を検討しており、理論的に説明できるとのことであった。短パルス化で新しい現象が現れた。同じく招待講演で Louisiana State Univ. の K. J. Schafer から超短パルスによる高次高調波の理論的な解析の報告があった (JTU C2)。発表ではパルス幅が 27fs と 108fs の場合のイオン化の発展と相互作用強度を比較し、短パルスにした方がより高い強度で相互作用することを示した。また高調波の位相とパルス圧縮の可能性を報告した。計算によると高調波はほぼ線形のチャープを持っているので、分散補償すれば数フェムト秒のパルスになるとのことである。例えば 27fs の基本波で Ar 中で発生させた 51 次の高調波は圧縮前は 8fs であるが補償すれば 1.8fs になり、カットオフに近い領域の高調波では隣り合う 3 つの高調波をまとめて圧縮することで 0.5fs 程度のパルスがコントラスト 10:1 程度で得られるとの計算結果を示した。

また、高調波のパルス幅測定実験の報告が 2 件あった。Berkeley National Lab. の T. E. Glover らは、高調波 (軟 X 線) と短パルスレーザー (70fs) を He ジェット中に集光した場合に軟 X 線でイオン

化した電子のエネルギー分布を測定すると、電子が光子を吸収あるいは放出することによるサイドバンドの発生と (Fig. 3), ポンデロモティブポテンシャルによるエネルギーのシフトを報告した (JTua5)。これを用いてレーザーと高調波パルスの相互相関波形を得、高調波のパルス幅を測定した。Ar 中の 23 次のパルス幅は 50fs であるが、基本波の強度を 36% 増大した場合の高調波のパルス幅は 120fs に増大している。この原因は、基本波の空間分布が高調波のパルス幅に影響するということであった。計算によると空間的にガウシアンのパルスを用いた場合には強度を増大するとパルス幅が増大していた。またフラットトップの空間分布を持ったパルスを用いた場合には位相整合の影響により発生する高調波のパルスは強く変調された形になり、パルス幅が短くなるということである。実験的な確認がなされるとおもしろい。

もう一つは東大物性研の小林らによるものである (JTua6)。Xe で発生した高調波と 300fs の基本波を Kr ジェット中に集光する。中性の Kr は 9 次の高調波に対して吸収があるが基本波が入射するとイオン化により吸収がなくなるため、基本波をゲートとして高調波の透過率を観測し、9 次の高調波のパルス幅を 260fs と測定した。また観測された数ピコ秒の吸収の回復は、従来は速

い再結合によるものと考えていたが、中性原子の複数の励起準位が同時に励起され、これが緩和することによる吸収の回復であろうとのことであった。

電総研の欠端(筆者)らはイオン化ポテンシャル付近のエネルギーを持つ高調波の偏光特性について、その発生メカニズムについての報告を行った (JTua4)。基本波の偏光度を変化させて特性を測定すると特定の次数の高調波が単調に減少しない特性を持つ。原因として中性原子中での周波数混合過程が考えられる。

2.3 フェムト秒パルスの位相・振幅制御

招待講演として、イタリア CNR の M. Nisoli から中空ファイバによるパルス圧縮が報告された (CTua5)。140fs, 660μJ, 1kHz のレーザーを各種希ガスを充填したセルの中においたコア径 50~120μm, 長さ 70cm の中空ファイバに集光し、透過したパルスをプリズムで分散補償する (Fig.4)。ファイバのコア系に対する透過率や各種ガスでのスペクトルを観測し、コア径 70μm のときに 50% 程度の透過率を得ていた。パルス圧縮のベストデータは、Kr ガス 2 気圧の場合に 10fs, 320μJ を得ており、パルスの空間モードはガウシアンに近い。従来のファイバを用いたコンプレッサーに比較して、ガス圧力で媒質の非線形性を微調整出来るのが特徴である。

Univ. of California, San Diego の C. P. J. Barty らはチャープパルス増幅におけるスペクトル狭窄化の解決方法を報告した (CTua2)。再生増幅器の中に利得の中心で損失が大きくなるように薄膜ポラライザーで作成したエタロンを挿入し、損失の中心波長と損失の大きさを調整することでスペクトル狭窄化を回避し、1mJ レベルでスベ

Fig.3 Photoelectron spectra obtained in the presence (solid curve) and absence (dashed curve) of the laser pulse. The inset shows an expanded view indicating a ponderomotive shift of the photoelectron peaks to lower energy.³⁾

Fig.4 Experimental setup for pulse compression.⁴⁾

Fig. 5 Amplified spectral output of amplifiers for a normal regenerative amplifier, and a ring regenerative amplifier.⁵⁾

クトル幅70nmから90nmを得ている (Fig. 5)。さらに増幅し圧縮して18fs, 4.4TWパルスを得ている。

2.4 高強度超短パルスレーザー

招待講演でLLNLのM.D. Perryらからベタワットレーザーが報告された(CMI4)。1 kJ 程度の出力をビーム径約60cmにし, 75×94 cm²のAu コートの回折格子で圧縮し, ベストデータで55J, 480fs, 1.15 PWを達成した。回折格子のダメージスレッショールドは420mJ/cm²である。96年会計年度で1.25PWを達成し, 98年にはICFのFast Ignitorの実験を行う予定でありそれまでには回折格子を誘電体多層膜のものに置き換える予定である。

Univ. of California, San DiegoのC. P. J. Baryが, 再生増幅器の中にエタロンを挿入するスペクトル整形を用いた10fs領域でのマルチテラワットチタンサファイアレーザーシステムについて報告した(CWI1)。10Hz動作の高出力数1DTWシステム, 50Hz動作の数TWシステムと, そしてkHz動作のTWシステムを予定しており, 現在50Hzシステムが18fs, 4.4TWで動作している。これに10HzのYAGの2倍波5Jで励起する増幅器を一段加え, 今後15fs, 1J以上のシステムにする予定である。またkHzシステムの構想は10mJ, 1kHzを目標とし, 固体に集光したときに発生するX線进行分析に応用したいとのことであった。

フランスのENSTAのA. Antonettiらは25TWの

チタンサファイアシステムを報告した(CWI2)。Offner型のストレッチャーを用いて30fsのパルスを300psに広げ, 10Hzの3段の増幅器で増幅する。一段目は8パスで2段目が5パス3段目が4パスであり, それぞれ励起エネルギーと取り出しエネルギーは一段目が80mJ, 4mJ, 二段目が1J, 300mJ, 三段目が4J, 1.6Jである。コンプレッサー後で32fs, 800mJ, 25TWを得ている。マルチパス増幅の構成ながらガウシアンに近いビームパターンで回折限界の約2倍程度のビーム質であった。パルスの形は sech^2 よりも広いもののコントラストは 10^6 程度ある。コンプレッサーは直径2mの真空容器に入っており, すぐに応用が行える状況である。

LLNLのJ. Zweibackらのグループからチタンサファイアのレーザーシステムの発表があった(CMI3)。製作の構想として三つに分けられる。3段増幅後で200mJ(圧縮後, < 50fs, 2TW) 10Hz, 4段増幅後圧縮して> 1J, < 50fs(20TW) 1Hz, 5段増幅を加え圧縮後で5J, < 50fs(100TW), 1shot/8min. の予定である。今回は初めの100mJ, 50fs, 10Hzのシステムについての報告であった。ストレッチャーで20fsのパルスを600psまで引き延ばすために, 4つの光学部品から構成されるコンパクトなストレッチャーを考案して用いていたが, 4次分散の影響のため, 増幅なしで圧縮してもパルスが80fsまで広がっていた。ストレッチャーに使用していたパラボラを球面鏡に変えることで多少改善され50fs以下に圧縮出来たが, 発振器のパルス幅に比較すると十分に補償が行われていないようである。

2.5 高強度物理

TW赤外レーザーパルスと相対論的電子ビームとの相互作用によるフェムト秒X線パルスの発生というタイトルでBerkley National Labs.のA. H. Chinらから報告があった(JTuF1)。線形加速器からの50MeV, パルス幅15ps, 2nC/pulseの電子ビームを100μm以下に収束し, 90度方向から波長800nm, 50fsのチタンサファイアレーザーを30μmに集光し, エネルギー30keV(スペクトル幅0.4Å)のX線(5×10^4 photon/pulse)を発生させる (Fig.6)。このX線のパルス幅は300fs, 広が

Fig. 6 Thomson scattering geometry.⁶⁾

り角は10mrad, 繰り返しは線形加速器の繰り返して制限され2Hzである。また電子ビームとレーザーパルスとのジッターの標準偏差は2psに制御されている。現在, フェムト秒X線源の特徴を生かした分析等の研究を進めているとのことである。

2.6 その他

New trends in gas and free-electron lasersというセッションでロシアのLevedev 物理学研究所のB.N. Chichkovらが短パルスレーザー励起によるコヒーレントXUV光源というタイトルで招待講演をおこなった(CThS1)。再結合方式の軟X線レーザーとして価数の低い酸素イオンの励起状態の遷移を用いる方式を紹介したが, 得られた利得長積が1.4と小さく原理実証段階と感じた。またプラズマ中での位相整合による差周波混合による特定次数の高調波発生効率の改善を報告した。プラズマの分散特性により位相整合条件を満たすためXe中でチタンサファイアの基本波と2倍波を集光し, 高調波の差周波過程による9次の高調波発生効率の改善が観測されていた。

またポスターセッションにおいて, 電総研の奥田らはSuper-ASHURAのレーザーエネルギー取り出しについて報告し(CThK60), NTTの中野らはチタンサファイアレーザーをダブルパルスにしてAl表面に集光したときのスペクトル特性と時間特性の報告をおこなった(CThK61)。

(欠端雅之)

3. レーザー冷却, ボーズ・アインシュタイン凝縮, 原子光学

QELSのセッションでは, ボーズ・アインシュタイン凝縮に関する話題が目玉であったが, 特に新しい結果が発表されたというわけではなかった。前年度は丁度ブレイクスルーの期間に当たっており, もう少しで臨界値を越えそうだという報告がなされたりして結構盛り上がっていたが, 今回は1周年記念ということでこれまでの総括的報告ばかりであった。

最初にボーズ凝縮を成功させたコロラド大グループの中心的存在であるC.E. Wiemanのチュートリアル講演(JTuD1)に引き続き, Bose-Einstein condensationのセッションでは全て招待講演で4件の発表があった。Wiemanのは全くありきたりの話でつまらなかったが, 彼の信条であるのか「半導体レーザーだけでボーズ凝縮ができる」という経済性を強調していた。彼はしばらく前に「レーザー冷却実験キット」なる広告をPhysics Today誌に載せていたが, そのうち「ボーズ凝縮実験キット」も売り出すかも知れない。半導体レーザーを用いてガラスセル内に原子を冷却・トラップする実験はもはや学部学生向けと言えるぐらいスタンダードな技術として確立したが, 10年程の間にボーズ凝縮でさえどこでもやれる実験になるのではなかろうか。

ボーズ凝縮の招待講演のうち3件が実験に関するもので, コロラド大/JIRAのRb(QWD1), MITのNa(QWD2), ライス大のLi(QWD4)の発表があった。MITのグループの発表では, ボーズ凝縮の瞬間をコンピューター上の動画にして映していた。Liのボーズ凝縮は他のものとは違って, 安定でない引力相互作用の元で起こる点が興味深い。原子気体はdiluteであるがidealではないとのこと。理論を含め今後の発展が期待される。

レーザー冷却した原子を用いる研究は多様化し, コヒーレント非線形レーザー分光, 衝突現象を含む冷却原子間の相互作用, 非古典的な原子の運動, 冷却原子の操作, 量子光学への応用などへと広がりを見せている。もはや, 「レーザー冷却原子を使っている」のが当たり前という感すらある。

Fig.7 Excited state population ρ_{33} as a function of the time. The relative phase $\Delta\phi$ between the three exciting lasers is swept. Note that these data represent demonstration of an optical interval of $\pm 12\text{THz}$.⁷⁾

カルテクの H. J. Kimble のグループは、Cs の MOT での二光子励起における量子干渉から 12THz の光周波数の復調 (Fig.7) を行った (QMD2)。英国の M. J. Snadden らは、ドーナツ型 MOT の作り方およびその高分解能分光への応用を述べた (QMD3)。また、ブラジルの J. W. Tabosa らは、冷却 Cs 原子を用いて光位相共役の実験を行い、四光波混合について説明した (QMD4)。クイーンズランド大のグループは、レーザー冷却されて光ポテンシャル中に閉じ込められた Na 原子の運動量分布におけるノイズとカオス性について論じた (QWH3)。Long-Range Interaction のセッションでは、レーザー冷却原子の諸性質—光イオン化の偏光依存性 (QTuC1)、分子化した Na の超微細構造およびゼーマン効果 (QTuC2)、Li の $2p$ 状態の寿命 (QTuC3)、冷却原子衝突 (QTuC4)—に関する報告がなされた。

今回の特色として、原子ビームおよびレーザー冷却原子の操作に関する新しい研究が集まった。これらは原子光学的手法を用いて原子の運動や状態をより高精度にかつ選択的に制御することを目指したものである。サセックス大の E. Hinds のグループは、スピン偏極した原子を反射するための磁気原子ミラーについて報告した (QTuE3)。市販されている磁気テープやフロッピーディスクを利用している点が興味深く、97% の反射率を達成しているとのこと。ロチェス

Fig.8 Sketch of an atomic funnel made by a conical hollow prism to pour cold atoms dropped from a MOT into an atomic waveguide. A blue-detuned doughnut beam from below produces an evanescent wave on the inner wall of the prism by total reflection, while a weak pumping beam irradiated from above cools atoms accelerated by gravitation.⁸⁾

ター大の N.P. Bigelow のグループによる "Neutral atom vulve" の発表は、コロラド大の E. Cornell, C. E. Wieman らのグループが行ったガラス毛細管中シアン・レーザー光を用いて原子をガイドする実験に着想を得たもので、毛細管側面からレーザー光を照射することによって原子ビームの出射を制御しようとするものである (QTuE1)。なお、先のコロラド大の研究に関して、D. Z. Anderson による講演があった (QFA3)。KAST の伊藤 (筆者) らは、コロラド大のグループとは独立に、エバネッセント光を用いて原子を一次元的に閉じ込めてガイドする原子誘導路について提案し、数 μm という小さな中空径を持つ中空光ファイバにてその実験を行っている。今回、レーザー冷却した原子を原子誘導路に導くのに必要な原子漏斗 (Fig.8) に関して発表を行った (QTuE5)。モンテカルロ・シミュレーションによって、80% 以上の Rb 原子を MOT から原子漏斗を通して送り出すことが可能であると見積もられた。このような技術は、原子リソグラフィーをはじめと

Fig.9 Evidence for superradiant and subradiant spontaneous emission of a two-ion crystal. The data fits the no-free parameter theory with a likelihood of a fit to the 1-atom lifetime (dotted line) is $P < 0.005$, a standard deviation effect.⁹⁾

する次世代の "Atom Photonics" として発展することが期待されている。

今回のQELSのセッションでは、日本の大学・研究所からの参加は筆者のみという状況で、ボーズ凝縮をはじめとする物理の基礎分野関連の研究への寄与が甚だ少ないように思われる。国内の学会での動向を見ても、この分野では最先端の研究からの日本の立ち後れが目立つ。イオン・トラップの話題に関していうと、NISTのグループはトラップした1個のBeイオンの運動のFock, coherent, thermal, squeezed, Schrodinger-Catの各状態の検出(QWH1)および量子ゲート(QFA4)について述べ、IBMのグループは2個のトラップしたBaイオン間の相互作用に基づくsuper/sub-radiance (Fig.9)について報告した(QWH2)。日本では最近になってやっと単一イオンのトラップに成功したばかりであり、10年程の遅れが生じている。ここでは一例を挙げたが、日本発の研究がもっと出てしかるべきであるとAnaheim Marriotのサロンにて筆者はひとり寂しく思うのであった。

以上の他に、近接場光学のセッションにおいて、単一分子の観測に関する複数の講演があり関心を集めていた。また、反転分布のないレーザー発振に関するセッションが設けられ、一聴に値するものと思われたが、この時間筆者は近

Fig.10 Experimental setup of the Ce:LiSAF/Ce:LiCAF MOPA system.¹⁰⁾

所のデズニーランドに視察に出かけていた。

(伊藤治彦)

4. 固体レーザー

固体レーザー関連はTunable Solid State Laser[5件], Microchip Laser[6件], High Power Lasers and Applications[3件], High Power Diode-pumped Lasers[6件], Laser Fusion[10件], Glass and Other Laser[6件], Cr Laser[7件]のセッションがあり総計で43件の発表があった。全体として固体レーザーの技術は成熟の領域に達していると考えられる。固体レーザーの応用とその高出力化に重点が置かれていたように思われる。

4.1 Tunable Solid State Laser (CTuJ)

Tunable Solid State Laserの発表はCe:LiCAF, Ti:sapphire, LiF Color Centerに関するものであった。紫外コヒーレント光源は半導体製造の露光装置など加工装置としての応用価値が高い。N.SarukuraによりCe:LiSAF/Ce:LiCAFのMOPA systemを用いた全固体紫外光源の報告があった(CTuJ5)。励起はNd:YAG(4w, 266nm)を用い、発振器としてCe:LiSAF, 増幅器としてCe:LiCAFにより構成されている(Fig.10)。Ce:LiCAFを増幅器として用いたのは誘導放出断面積がCe:LiSAFよりも低く飽和ビーム強度を高くとれるためである。このシステムにより290nm,

590ps, 3 μ Jの発振器光が300 μ Jまで増幅され, 全固体紫外コヒーレント光源の可能性が示されたものと考えられる。今後Ceドープの材料で誘導放出断面積が小さく良質な材料が開発されればさらに高出力の紫外光源が得られる可能性がある。Ti:sapphireではA-O素子を用いたDirect electronic tuning法や高平均出力レーザーが報告されていた。

4.2 Microchip Laser (CTuP)

Tm:YAG, Er:Yb:Glass, Nd:YAG/KNbO₃, Nd:YVO₄, Nd:LaSc₃(BO₃)₄の発表があった。Tm:YAG(700 μ m-thick)は2013~2028nmの領域でエタロンを用いたFeedbackでsingle-frequencyで最大65mWを得ている。またNd:YAG/KNbO₃はNd:YAG(1mm-thick)により発生した946nmの光をKNbO₃(1.5mm-thick)の結晶により波長変換する構成になっており, 1.2W(0.5W)のダイオード励起で473nmで25mW(5mW)の出力を得ている。

Microchip Laser材料として注目される材料としてNd:LaSc₃(BO₃)₄の報告が2件あった。Nd:LaSc₃(BO₃)₄は濃度消光の原因となるCross-RelaxationのProcessを生じにくく, Nd濃度10%まで濃度消光による蛍光寿命の減少は確認されない

Fig.11 Layout of the Q-switched Nd:LSB laser with an A-FPSA directly attached to the crystal.⁽¹¹⁾

(CWF45)。従ってマイクロチップレーザーに適した材料である。この結晶の最初の報告はCLEO'94にあり, 今回はそのCW, Q-switchなどのレーザー動作に関するものである。B. Braunのグループ(CTuP5)により, 25%Nd:LSB, TEM₀₀, Q-switchパルス動作モードで, 180ps, 0.1 μ J/pulse, 110kHzの動作が報告されていた(Fig.11)。また, V.G.Ostroumovのグループ(CTuP6)により10%Nd:LSBで531nm光を, Q-switchパルス動作モードで190mW(750mW励起), cw-modeでは出力0.8W(1.1W), 励起2.7W(5.6W), slope efficiency 44%(27%)が報告されていた。

4.3 High Power Diode-pumped Lasers (CWN)

C.D.Marshallらのグループ(CWN4)によりYb:Sr₅(PO₄)₃Fの報告があった。Yb:Sr₅(PO₄)₃Fは次期核融合用レーザー材料として注目されている材料の一つである。結晶は2×2×0.5cm³のスラブ形状で, ~20J/1msの高出力半導体レーザーダイオード(LD)により励起される。LD光はレンズダクトを用い85%の効率でレーザー媒質とカップリングされる。また, 冷却はHeガス流(4atm, Mach0.1)を用いている。Heガスを用いることで冷却媒質による擾乱の影響を押さえている。このシステムにより2J/pulse, 25Hz, 50Wの出力を得ている(Fig.12)。その他, Tm:YAGはcw-2 μ mで20W, Nd:YAGは11Wで35%の効率(polarized-TEM₀₀), Nd:YLFは28.4W励起により10.7Wの出力(TEM₀₀)の報告があった。

Fig.12 Rep-rated performance of diode-pumped gas-cooled slab laser.⁽¹²⁾

4.4 Laser Fusion (CWO, CThD)

RochesterによるOMEGA-upgrade Nd:glass laser system, NIFとフランスからMultisegment Nd:glass Amplifier, LLNLのグループからLG-750, LG-770 燐酸ガラスのGain saturationの報告とSSDによるビームスムージング, Nike-KrFによる照射均一(1%, $9 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$)が紹介されていた。

4.5 Glass and Other Laser (CThI)

U.Griebnerのグループ(CThI1)によりYb-phosphate glass laserで出力0.20mJ(横励起@975nm, slope効率42%, 1025~1060nm)が得られている。ガラスのサイズは4mm³, 濃度は15wt%である。Nd doped quartz glassではZeoliteXをドープ補助剤として用いることでそれまで困難であった高濃度ドープが可能となり(3.0wt%程度), 量子効率の改善が得られている(Y.Fujimoto : CThI3)。これにより, 高繰り返しなど過酷な使用条件に耐えうるレーザー材料の可能性が示された。

4.6 Cr Laser (CFE)

Cr⁴⁺の活性核を用いたレーザーに関しては, Cr⁴⁺:phosterite, Cr⁴⁺:YAGの報告があった。Cr⁴⁺:YAGは1540nmで70mW, 110fsを得ている(CFE3)。Cr:LiSAFは1.1Wのcw動作, Q-switch パルス動作モードで7μJ, 5kHzが報告されていた。

(藤本靖)

5. 非線形光学材料

非線形光学材料に関するセッションとしては, Materials characterization and detection, Quasi-phase-matching, Second harmonic generation, Nonlinear optical materials, UV generation, Inorganic optical materials, Visible and NIR frequency generation等があった。今回報告があった主な材料としては, LiNbO₃ (LN), LiTaO₃ (LT), KTiOPO₄ (KTP), K₃Li₂Nb₅O₁₅ (KLN), CsLiB₆O₁₀ (CLBO), Ca₄Gd(B₃O₁₂)₃ (GdCOB), Li₂B₄O₇ (LBO), CdGeAs₂が上げられる。

LN, LT, KTPに関して, Crystal TechnologyのJundt氏より招待講演がなされた(JTu11)。疑似位相整合用基板としてLN, LT, KTPを比較した場合, LTがダメージしきい値が高く, 紫外域の透過性に優れているため特性的には最も優れている。しかし, 育成温度がLNよりも500°Cほど高温なので育成が困難となり, その結果, 高価格になるという問題がある。コストと特性の両方を考えた場合, 疑似位相整合OPO用基板としてLNが最初に実用化させると考えられている。また, KTPはLNやLTとは異なりメルトから育成ができないため結晶の不均一性が問題となると報告された。LNを用いた疑似位相整合OPOによる波長可変赤外光発生に関する発表では, Periodically Poled LN (PPLN)により, 発振しきい値4.5W, 1.064μmの入力13Wにおいて波長3.3μmで1.25W, 1.57μmで0.36Wの出力が得られていた(CThA3)。

ボレート系材料としては, 紫外光発生用としてCLBO, 及びLBO, 緑光発生用としてGdCOBの発表があった。筆者らによるCLBOの講演では, CLBOの育成からその紫外光発生特性, 不純物ドーピング効果などのレビューを行った。Nd:YAGレーザーの5倍高調波発生により2.3Wの紫外光発生や酸化アルミドーピングによる結晶硬度の向上等を報告した(CWA3)。三菱マテリアルによるLBOの発表では, 非線形光学定数はKDPよりも小さいものの, 吸湿性や硬度, 結晶育成に関して優れた特徴を示していることが報告された(CWA2)。フランスで開発されたGdCOBは, 結晶が硬く吸湿性も少ないなどの特長を示しており, 非線形光学定数も1.2pm/V程度なので新しい緑光発生用ボレート結晶として期待できるとのことであった(CWG1)。

(森勇介)

6. 半導体レーザー

半導体レーザーに関しては, DFB and DBR Semiconductor Lasers, Semiconductor Lasers Dynamics, High Power Laser Diodes, High Power Emitters, Mid-Infrared Diode Lasers, Integrated Semiconductor Laser Sources, 1.55μm Single

Frequency Semiconductor Lasers, VCSEL I・II, Quantum Well Physics, Visible Semiconductor Light Sourcesの12のセッションとポスターセッションに分かれて、それぞれ活発な議論が行われた。いずれの分野においても、着実な技術の進歩が感じられるが、特に今回の会議においては面発光レーザーの技術革新が印象深かった。以下に、いくつか興味深い発表について報告する。

6.1 面発光レーザー

昨年のCLEOで、AlAs酸化膜を用いた構造で世界最低しきい値を持つ面発光レーザーが登場して以来、AlAs酸化膜構造面発光レーザーに関して様々な報告がなされている。Sandia National Lab.のK. D. Choquetteは、低しきい値面発光レー

Fig.13 Modulation responses at different bias currents.¹³⁾

Fig.14 Light output versus current for a $1 \times 1 \mu\text{m}$ oxide aperture 840nm VCSEL that operates as a laser at injection currents greater than 580nA.¹⁴⁾

ザーの流れについて招待講演を行った(JTuH1)。やはりAlAs酸化膜による電流閉じ込めが、最近の劇的なしきい値低減の主要因であるとしていた。The University of Texas at AustinのD.L. Huffakerらは、酸化したAlAs膜が、外気やエッチャントに対して非常に安定であることを示し、その酸化膜を用いた低しきい値面発光レーザーを製作していた(JTuH5)。しきい値は本会議中最低の $38 \mu\text{A}$ であった。Sandia National Lab.のA. Marらは、InGaAs/GaAs活性層の上下にAlAs酸化層を用いた構造で、高速変調を行っていた(CMH4)。Fig.13に示すように、バイアス電流4.5mAの時の3dB帯域で16.3GHzの高帯域変調を得ている。Sandia National LaboratoriesのK. L. Learらは、EL 32 pp.459-460で同グループから $1 \mu\text{A}$ 以下の発振が得られたとの報告についての追加報告を行っていた(JTuH4)。つまりDigestの内容とは全く異なった内容であった。結論から述べると、Fig.14に示すような $1 \mu\text{A}$ 以下の発振と言うのは誤りで、CW電流を上げていった時に回路の一部のキャパシタンスにたまった電荷が瞬間に流れ、発振の様なI-L特性が得られているためであるとのことであった。今後、低しきい値動作を確認するのに、このような電氣的なノイズをも考慮しなくてはならない領域に入ってきたようである。

Fig.15 Continuous wave output power versus current for 2mm and 4mm cavity length lasers of broadened-waveguide wafer. Heatsink temperature : 15°C .¹⁵⁾

Fig.16 Differential gain and BER penalty for 2.5Gbit/s, 100km as a function of chip temperature.¹⁶⁾

Fig.17 Electroluminescence spectrum for sample with resonator length $L=1780\mu\text{m}$; inset shows temperature dependence of wavelength and threshold current density.¹⁷⁾

6.2 量子井戸・量子ドットレーザー

David Sarnoff Research Center の D. Z. Garbuzov らは, broadened wavelength AlGaAs/GaAs QW レーザーで, 高出力を得ていた (CTuC5)。heatsink 温度 15°C , 共振器長 2mm, 4mm のレーザーに対して, CW 動作でいずれも 4W の出力を記録していた (Fig.15)。Alcatel SEL Research Center の H.P. Mayer らは, 歪み量子井戸活性層を用いて広い温度領域で高ビットレートを達成した (CWR1)。量子井戸数は 3 から 8 まで変え, 歪み量は $+1.1\%$, 埋め込み ridge 構造をとっている。このうち 6QW のデバイスが最も良い特性を示し, -40°C から $+95^\circ\text{C}$ の範囲で 2.5Gbit/s の高ビットレート動作を達成している (Fig.16)。A.F. Ioffe Physical-

Fig.18 Devices structure : A semiconductor waveguide, consisting of two mirrors and a cavity containing QWs, is coupled to a passive polymer waveguide. Gain is provided by pumping one half of the semiconductor, and only the phase-matched wavelength that couples between the two guides (dashed line) can lase.¹⁸⁾

Fig.19 Schematic laser structure of FG-ECL. It consists of an InP-based MQW semiconductor optical amplifier (SOA) and FG.¹⁹⁾

Technical Institute of Academy of Science の P. S. Kopev らは, 自己形成 InAs-GaAs 量子ドットレーザーについての招待講演を行った (JThC1)。Fig.17 に示すように, 80-220K の低温領域での特性温度ではあるが, 530K という数字を出していた。220K を超えるくらいから, キャリアがドット中に閉じ込まりにくくなるようである。

6.3 DFB・DBR, 集積半導体レーザー

T. J. Watson Research Center の B. Pezeshki らは, grating を用いない新しい構造の波長安定レーザーを報告した (CMF4)。一般に DFB・DBR レーザーでは複雑なパターンニングや 1 回以上の再成長

が必要となるが、このグループでは、Fig.18に示すような2つの導波路をもつ構造を1回の成長で形成し、波長の選択・安定化を図っている。Sumitomo Electric IndustriesのA. Hamakawaらは、fiber-grating external-cavity-laserを用いて、広い温度領域で波長安定化を行っていた(CWL3)。構造はFig.19に示すようなもので、温度変化に対して0.005nm/°Cの波長安定性であった。

6.4 可視半導体レーザー

青色領域レーザーにおいては、やはり日亜のGaN系レーザーが群を抜いているが(CML1)、GaN・AlGaN・InGaNの誘導放出光を比較したAT&T Bell Lab.のD. Wiesmannら(CTHP2)、GaN系歪み量子井戸の利得を理論的に求めたSandia National Lab.のW. W. Chowら(CTHP3)、GaN系材料で紫外領域のレーザーのしきい値電流密度を見積もったUniv. of New MexicoのP. G. Eliseevら(CTHP4)と、活発な議論が見られた。

6.5 その他

長波長帯面発光レーザー用の反射鏡を、AlAsSbの酸化膜を用いて形成する基礎実験についての報告が、Sandia National Lab.のO. Blumらからあった。Raman散乱解析やSEM観察から、AlAsSbが Al_xO_y に変化していることが確認されている。

(羽鳥伸明)

7. ファイバ、ファイバレーザー、ファイバグレーティング

7.1 ファイバ

光ファイバに関する講演は、主にFibers, Devices, and Sensors (CWK)のセッションで行なわれた。光ファイバに電界をかけるpolingに関して2件発表があり、Univ. New MexicoのLongらは、光ファイバの電気光学効果を利用し変調器等のデバイスとするための新構造について(CWK1)、またUniv. SouthamptonのKazanskyらは、2%の効率の第二高調波発生について報告した(CWK2)。また光ファイバに超音波を加え、スイッチ(CWK4, Univ. Southampton, Culverhouse

ら)や変調器(CWK5, Univ. Kent, Pannellら)に用いる研究もあった。また、紫外光に対するphotosensitivityはグレーティングの形成にも関係しているが、ロシアGeneral Physics InstituteのStarodubovらは、欠陥準位について新しいエネルギー構造を提案した(CWK3)。九州工大の水波(筆者)は欠陥準位の二光子吸収スペクトルを報告した(QTuD6)。ファイバセンサーに関しては、東大の保立はチュートリアル講演(JThB2)で、本年5月に札幌で開かれたOFS(光ファイバセンサ国際会議)の概要を紹介し、また光ファイバジャイロの進歩について述べた。OFSでは物理量センサの発表が増加の傾向にあり、多数のファイバグレーティングを用いる大規模なシステムなども報告されたが、CLEO/QELSではUniv. KentのRaoからこの種のシステムの報告があった(CWC4)。

7.2 ファイバレーザー

ファイバレーザーに関する発表は相変わらず多く、短パルス化とその高出力化等が進展している。主なセッションはCTuU: 高出力ファイバレーザー・増幅器および応用, CFD: 超高速ファイバレーザーI, CFI: 同II, CME: フェムト秒レーザーIである。

高出力ファイバレーザーのセッションでは、Naval Research Lab.のGoldbergらは、Er/YbドープファイバにV溝を切り、ここから励起する簡単な方法を提案し(出力154mW)(CTuU1)、Max Born InstituteのGlasらはM字型屈折率分布のNdドープファイバで1.3Wの出力を得たが(CThK7)、昨年のような高出力(Ndドープファイバでは13W)は報告されなかった。ナノ秒パルスではレーザーダイオードのパルスをEr/Ybファイバ増幅器で増幅し、25kWのパルスが得られていた(CTuU3, ドイツIPG Laser社, Gapontsevら)。また広帯域スペクトル光源としては、Imperial CollegeのChernikovらがQスイッチしたYbドープファイバとファイバ内ラマン効果により、1.08-2.2μmで10kW, 5nsのパルスを得た(CTuU4)。またMITのSwansonらはNdドープファイバのASEのスペクトルを長周期ファイバグレーティングを挿入して均一化し、半値幅約50nm, 40mW

の出力を得た(CTuU5)。

フェムト秒ファイバレーザ全般については、MITのHausは招待講演(CFI1)で、有効なモード同期方式として、カー効果による偏光回転を利用する方式(P-APM)のリングレーザ、これに分散の異なるファイバを加えて、リング内でパルスの伸張と圧縮を行なうもの(SP-APM)、および能動モード同期方式を挙げ、最短パルスが得られるのは第二の方式で63fsであると述べた。また同じグループは79fsのパルスの第二高調波をとり、73fs, 91pJ, 772nmのパルスに変換した(CME6)。またPurdue Univ.のChangらは分散補償ファイバによる全ファイバ外部圧縮器により62fsのパルスを得ていた(CThK5)。

フェムト秒ファイバレーザの高出力化については、IMRA America社から多数の発表があった。二重クラッドのEr/Ybファイバを用い偏光回転を利用した受動モード同期により170fsパルス(エネルギー1nJ, 平均パワー3mW)を発生させ(CFD1, Fig.20), これを二段のErドープファイバ増幅器とファイバグレーティングのパルス伸張/圧縮器との組合せによりフェムト秒パルスを1nsに伸張してから増幅して圧縮し、パルス幅310fs, 平均パワー0.6~1W(エネルギー30-50nJ)の出力を得た(CFD4, Fig.21)。また、一段のみの増幅器とファイバグレーティングの組合せによっても350-455fs, 50nJの出力を得た(CFD8)。多重量子井戸を可飽和吸収体とするものでは、

Fig.20 Setup of harmonically mode-locked cladding-pumped fiber laser.²⁰⁾ FR=Faraday rotator, P=polarizer.

Fig.21 High-power femtosecond fiber system.²¹⁾

ATTのTsudaらは235fsのパルス幅を得(CFD2)、Raytheon社のSharpらはTmドープファイバから190fs, 1.9μmのパルスを得た(CME7)。なお、展示会において600fsのファイバレーザが紹介されていた。繰り返し周波数の向上については、NTTの中沢らはLiNbO₃変調器で200GHzを得ていた(CPD14)。

upconversionのファイバレーザについては、Tm:ZBLANファイバのavalanchepumpingの報告があったのみであった(CThK9, Univ. Southampton, Shepherdら)。

7.3 ファイバグレーティング

今回初めて、ファイバグレーティングとその応用のセッション(CWC)が設けられた。Optical Fiber Technology Center(オーストラリア)のOuelletteは招待講演(CWC1)でチャープしたグレーティングの分散補償やパルス圧縮への応用について紹介し、ファイバグレーティングを製造する会社が多数現われており、分散補償器の市販も近いと述べた。E-TEK Dynamics社のPanらは、ファイバグレーティングによって励起用のレーザ(0.98μm)を狭帯域化・安定化したファイバ増幅器を発表した。ファイバ以外の部分は14ピンのパッケージに収められておりコンパクトである(CWC2, Fig.22)。なお展示会においても、レーザダイオードのピグテイルにグレーティングを書き込んだ製品が展示されていた。Univ. SouthamptonのLiuらは、ファイバグレーティングに超音波を伝搬させて変調を行なうこ

Fig.22 Description of a miniature EDFA component inside a 14-pin butterfly package.²²⁾

とを提案し、85%の反射率を得ていた(CWC3)。またフェーズドアレイ・アンテナに応用する研究が2件あり、ファイバ上の各グレーティングの位置によって時間差を付けることができる(CWC5, Aston Univ. Molonyら, CWC6, UCLA, Tongら)。またGaAs/AlGaAs量子井戸をtunable filterとしてファイバグレーティング・センサーの読み出しに用いる研究もあった(CWC7, McMaster Univ., Wuら)。

また大容量光通信のセッションで、長周期ファイバグレーティングを利得均一化に用い、20波多重、100Gbit/sの通信が報告された(CMA1, ATT, Bergano)。(水波徹)

8. 光学材料

光学材料の作製とその特性に関連するセッションは、Inorganic Materials(CWG), Photonic Bandgap Materials(CThJ), Fabrication of Microstructures(CThQ), Semiconductor Materials(CThU), CWFのポスター発表があり、筆者の発表のあったCWGのInorganic Materialsのセッションを中心に無機光学材料に関する発表について幾つか報告する。

Ecole Nationale Supérieure de Chimie de ParisのG.Akaらは、新しい非線形オキソホウ酸塩結晶を発見し、フェムト秒ブロードバンドパルスによ

るその特性評価を行った(CWG1)。ここでは、そのオキソホウ酸塩結晶の1つで、一致融解でCZ引き上げ法により育成されたGdCOB(融点1480°C)について報告している。結晶は吸湿性ではなく、良好な機械的な特性を持ち研磨も簡単で化学的にも安定である。現在の結晶の典型的なサイズは、50mm径の長さ100mmであるが、成長条件が易しいためさらに大きな結晶作製も期待できると報告した。フェムト秒ブロードバンドパルスによりその特性を評価し、比較のためにBBO結晶を用いた。測定値より計算された結果は、第2高調波発生に対しては800nmから3.5μmまで位相整合を取ることが可能で、そのときwalk-off角13mrad(1.064μmのSHGにおいて)とBBOに比べ約6倍程小さく、かつより大きな許容角を持つことが示された。しかし、1.3μmにおける実効非線形係数の比較においては、4つの位相整合可能な面の1つで最も大きい係数を持つXZ面においてType Iで、BBOの50-70%の値であった。

筆者らは、非常に小型で低しきい値・高効率のレーザー発振が期待できる導波路型の固体レーザー結晶薄膜の作製とその特性について報告した(CWG2)。従来法と異なるレーザーアブレーション堆積法によりNd:YAG(Y₃Al₅O₁₂)固体レーザー結晶薄膜を様々な基板上に作製することを試み、Si, GGG(Gd₃Ga₅O₁₂), SGGG, YAG単結

Fig.23 Schematic of a frequency-quadrupled passively Q-switched microchip laser.²³⁾

晶基板上にそれぞれ堆積させた。格子整合のとれたガーネット基板上ではエピタキシャル成長され、また格子不整合の大きな Si 基板上においても非常に配向性の高い Nd:YAG 薄膜が得られ、それらの光学特性は何れも Nd:YAG バルクレーザー結晶と変わらないことがわかり、導波路型の固体レーザー結晶薄膜の作製法として有効であることが示された。また、液相エピタキシャル (LPE) 法により作製された固体 (レーザー) 光学結晶薄膜に関する発表は、Univ.of Southampton の D.P. Shepherd らが Nd:YAG 導波路において高利得の増幅 (CFJ4) を報告し、M.I.T.Lincoln Lab. の J.J.Zayhowski (CWA6) は招待講演で昨年引き続き Nd:YAG と Cr:YAG (可飽和吸収体) による受動型 Q スイッチマイクロチップレーザーと非線形結晶を組み合わせた周波数変換について報告し、LETI の L.Fulbert らもまた LD 励起の Nd:YAG と Cr:YAG による受動型 Q スイッチマイクロチップレーザーによる距離測定について (CTuF6)、また NTT 光エレクトロニクス研の加藤らは埋め込み導波路型 Yb:GGG レーザーの 1.025 μ m 室温発振 (CFJ7) を報告している。

Univ.of Southampton の D.P.Shepherd ら (CFJ4) は、5mm 長の Nd:YAG 導波路において入射レーザー (チタンサファイア) パワー 520mW の励起に対して、ダブルパスでその小信号 cw 利得は 230 (23dB) で、また 0.3mW の入力でこの増幅器からの増幅シグナルは最大 20mW まで得られた。同様に高出力ブロードストライプ型のダイオードにより 1W で励起したときその小信号 cw 利得は 450 (26.5dB) を越え、0.2mW 入力で増幅シグナルは最大 16.5mW まで得られた。こうしたプラナー

Table I Energy/pulse obtained for the first five harmonics of the 1.064 μ m Nd:YAG Laser Line.²³⁾

Wavelength (nm)	1064	532	355	266	213
Energy/Pulse (μ J)	8	3.5	0.3	0.7	0.01

型導波路は低出力の励起に対して大きな利得を示すこと、比較的簡単な実験装置であることから高出力の LD 励起増幅器として魅力的である。M.I.T. の J.J.Zayhowski (CWA6) は、Fig.23 に示すファイバ結合された cw の LD 励起により受動型 Q スイッチマイクロチップレーザーと非線形結晶を組み合わせた周波数変換において、パルス幅 440ps、繰り返し 10kHz で Nd:YAG レーザーの 1.064 μ m、第 2-5 高調波 (532, 355, 266, 213nm) の出力は 1 パルスあたりそれぞれ 8, 3.5 (ω -2 ω 変換効率 44%), 0.3, 0.7 (2 ω -4 ω 変換効率 20%), 0.01 μ J であると報告した (Table I)。また、LETI の L. Fulbert ら (CTuF6) は、Nd:YAG 受動型 Q スイッチマイクロチップレーザーから得られたレーザー光 (単一モードの TEM₀₀ 回折限界, 1 パルスあたりのエネルギー 1 μ J でパルス幅 750ps、繰り返し 10kHz) を用いて距離測定を行った (Fig.24)。そのシングルショットあたりの精度は ± 10 cm であった。ピーク出力 400W における動作では、測定可能な距離はターゲットが白紙や車のボディ等の場合 250m 以上、反射 (アルベド) の低い車のタイヤや黒い布がターゲットのときは 70m 以上であった。霧中では LD による距離測定よりも良好な結果が得られた。また現在はデバイスのミニチュア化と長距離用に波長 1.55 μ m のマイクロチップの開発をしていることを報告した。NTT の加藤ら (CFJ7) は GGG 基板上にイオンビームエッチングと LPE 法を用いて幅 7 μ m のチャンネル型の埋め込み導波路型 Yb:GGG レーザーを作製し、チタンサファイアレーザー 0.941 μ m 励起により単一モードで波長 1.025 μ m において室温発振した。このとき、しきい値は 80mW、スロープ効率は 13.4% であった。Yb レーザーの発振波長は、1.3 μ m ファイバ増幅器 (PDFA) の Pr イオンの吸収中心に近く、その励起光源への適用の可能性を持つため光ファイバと結合さ

Fig.24 Schematic of the microchip laser range finder. The beam divergence can be changed by moving the positive lens.²⁴⁾

せた導波路集積レーザーデバイスの研究開発は興味深いものとする。

NTT光エレクトロニクス研の石橋らは、 $1.5\mu\text{m}$ 通信波長域での超短パルス光源に期待される $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ レーザー結晶のレーザー加熱ペDESTAL 成長 (LHPG) 法による育成においてファセットの抑制が行えることを報告した (CWG3)。ファセット成長によって生じるコアは、レーザー発振に不適である。ここでは、LHPG 法により育成した YAG 結晶のファセットの形成をクロスニコル法により検討し、その結果、 $\langle 100 \rangle$ から 15° の方位に育成した時にコアの無い結晶が得られたことを示した。この方法を用いて Cr, Ca を添加した $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ レーザー結晶により、発振実験を行ったところ、出力結合 1% において、しきい値 1.4W 、スロープ効率 9% が得られたと報告した。また、この発表以外にも $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ レーザー結晶の育成と特性に関しては、Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics の P. Deng らによって Cr^{4+} 高濃度ドープの Cr, Ca, (Mg):YAG の結晶成長について (CWF40) の報告が、また T.J. Carrig ら (Coherent Technologies) によって $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ と Cr, Ca:GGG の特性の比較 (CWF38) の報告がなされた。T.J. Carrig らは、Cr, Ca:GGG の特性 (室温における吸収測定、蛍光測定 (偏光依存性)、蛍光寿命の温度依存性) を調べ、 $1.46\mu\text{m}$ における誘導放出断面積 $3.7 \times 10^{-19}\text{cm}^2$ 、 $1.45\mu\text{m}$ における蛍光寿命

は 29K において $17.5\mu\text{s}$ 、室温 294K において $1.6\mu\text{s}$ であると報告した。また、Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics の P. Deng らは、 Cr^{4+} 高濃度ドープ Cr, Ca, (Mg):YAG の結晶成長について主にアニーリング処理前後の Cr の変化について報告している。CZ 法により育成された Cr, Mg:YAG, Cr, Ca:YAG の 4 配位 Cr^{4+} 濃度が酸素雰囲気中の高温アニールにおいて結晶内での反応過程により増加し、 Cr^{4+} イオンの YAG 格子の 6 配位のサイトから 4 配位サイトへ移動が 900°C 以上 1300°C までの領域で起こる。従って、 $900 \sim 1300^\circ\text{C}$ の温度領域で、 Cr^{4+} 濃度は増加し、 $[\text{Cr}^{4+}]_t$ は 1300°C 以上で安定し、これ以上変化は生じないことが示された。それに伴う吸収特性の変化、蛍光寿命依存性等も報告された。

Scientific Materials Corp. の R. Equall らは coherent-transients による光信号処理、光メモリー応用のための Tm^{3+} ドープのガーネット材料の開発について報告した (CWG4)。これらの物質は光記録密度の動作上の 1 ピクセルあたりの記録密度の限界は不均一と均一ライン幅の比率により与えられ、不均一ライン幅がデータのバンド幅の限界を与える。ここでは、本研究において用いていた $\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ より特性が改善される新しい Tm^{3+} 材料について検討した。ホスト材料として、以前用いた YAG 中においては変動する Al の核スピンの不均一ライン幅の増加に大きく寄与してい

Fig.25 Experimental setup to study the dynamics of domain formation. The crystal's 180° domain structure becomes imprinted on the signal beam by two-beam coupling with the pump beam in the crystal. We record features in real time using a CCD camera and video recorder.²⁵⁾

Fig.26 A three-dimensional map of the domains present inside the BaTiO_3 crystal (FRANK) prior to applying any DC field. The c-axis dimension is compressed to improve the visibility of the domains. We obtained the three-dimensional data using a setup similar to the one shown in Fig.25, except that the pump beam is focused to look at only a narrow slice of crystal. We then step the pump beam along the length of the crystal and subsequently reconstruct these slices into a 3-D map.²⁵⁾

たため、同じガーネットの $\text{Tm}^{3+}:\text{YGG}$ にし、AlからGaに変わること核磁気を減少し、不均一ライン幅を増加させることで、均一ライン幅が1kHzとなり(YAGの時より1/3の値)、また不均一ライン幅は2.5倍の50GHzで不均一と均一ライン幅の比率は 5×10^7 ($\text{Tm}^{3+}:\text{YAG}$ は 7×10^6)と改善された。次にdephasing時間から検討し、ホスト

材料のイットリウム珪酸塩と Y_2O_3 は磁気dephasingを減少し、非常に狭い均一ライン幅を与え、 $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ において温度に大きく依存するという問題点を持つが、均一ライン幅は14kHz(1.24Kにおける790.427nm遷移)、不均一と均一ライン幅の比率は 7×10^7 となることを報告した。

Univ. of Southern CaliforniaのJ. Feinbergらは、 BaTiO_3 フォトリフラクティブ結晶内の隠された 180° ドメインをダイナミックにマッピングする検出法を報告した(CWG5, Fig.25)。本発表では、以前彼らが報告した 180° ドメインの3次元マッピングの手法²⁶⁾をさらに発展させ、 180° ドメインの生成を実時間で観測できる方法を報告しており、ポーリング中のこれらのドメインの動きを非常に凝った映像で説明し聴衆を楽しませた(Fig.26)。Fig.25に示すように BaTiO_3 結晶のc軸に沿って伝搬するシグナル光がa面から入射する励起光とフォトリフラクティブ二光波混合過程を介して結合する。ここでシグナル光が結晶のc軸の各部の方位に依存して増幅または減衰されることを利用し、 180° ドメインの有無が2次元画像としてスクリーンに投影される。さらに、 BaTiO_3 結晶のc軸面に透明電極を蒸着し、電界を印加しポーリングしたときのドメインの変化をダイナミックに観察した。こうした研究は、光学結晶の評価としての 180° ドメインの検出としての有用性のみにとどまらず、ドメイン反転のメカニズムを解明する大きな足がかりとなる。また、ドメイン反転を利用したフォトリフラクティブ回折格子の定着は、ホログラフィック光メモリにとっても重要な技術であり、光メモリ材料としてのフォトリフラクティブ結晶の実用化に貢献する可能性も大きい。この方法はフォトリフラクティブ効果の最も基礎的な二光波混合過程のみを用いた非常に単純な方法であり、なんら高価な機器を用いるものではないが、非常に明瞭に 180° ドメインを3次元化することのできる画期的な発案である。

Univ. of SouthamptonのR. Asaiらは、導波路デバイス用のGa-La硫化物(GLS: Ga_2S_3 - La_2S_3)薄膜について報告した(CWG6)。GLSガラスは $0.65\mu\text{m}$ ~ $10\mu\text{m}$ にわたり透明であり、La成分は活性なレーザーや光増幅の材料である希土類ドーパ

トイオンに対してとても高い可溶性を持つ。またGLSガラスの低いフォノンエネルギーにより、無放射遷移レートは低く、以上のことより中赤外域でこの材料をホスト材としてレーザー動作が期待でき、高品質の膜においては $5\mu\text{m}$ に近い波長でのレーザー動作の可能性を持つ。さらにこの物質の普通と異なる特性はバンドギャップ以上の光(波長 $0.5145\mu\text{m}$ かそれ以下)による露光により1%以上の屈折率変化が可能となることである。ここではレーザーアブレーション法によって、GLSガラス薄膜を作製し、その作製条件による膜組成の変化、隣接するスポット間の反射率差を利用した新しい測定法による膜の屈折率差の測定、導波路構造の作製について報告した。

(江崎瑞仙)

9. レーザープロセシング

レーザープロセシング関連のセッションはLaser Ablation and Deposition(CWE), Laser Material Processing(CThC), Laser Micromachining(CThH)があり、また、光学材料の作製とその特性関連のセッションのPhotonic Bandgap Materials(CThJ), Fabrication of Microstructure(CThQ)においてもレーザープロセシング、光学材料関係の報告があり、この中から興味深い講演の幾つか紹介したいと思う。

Fig.27 SEM photograph of a hole drilled in steel with femtosecond laser pulses at a wavelength of 390nm.²⁷⁾

チタンサファイアレーザーのフェムト秒パルスを用いたアブレーション、マイクロマシーニングについてLaser Zentrum Hannover e.V.のC.Mommaら(CWE3)とUniv. of MichiganのX. Liuら(CThH2)によって2件報告された。Laser Zentrum Hannover e.V.のC.Mommaら(CWE3)は、アブレーションターゲットとして金属、シリコン、セラミックスを選び、パルス幅(200fs-5ns)とレーザー強度(10^{11} - 10^{16}W/cm^2)の2つのパラメータを広範囲にわたり変化させたときのレーザーパルス時間の影響、プロセスにおけるレーザー強度(パルスエネルギー)の影響を1パルスあたりのアブレーション深さをもとに考察した。低いパルスエネルギー(20mJ以下)では1パルスあたりのアブレーション深さはパルス幅に影響を受けず、高いエネルギーではパルス幅は600fs-1psの間でアブレーション深さが最大になりパルス幅依存性が顕著になること、また長いパルス幅領域(5ps)ではプラズマ遮蔽作用によりアブレーション深さは減少することを報告し、またこれらの現象を簡単な1次元の熱拡散方程式をもとに説明した。フェムト秒パルスを用いることにより1パルスあたりのアブレーション深さは非常に深く、銅のアブレーションにおいては $50\mu\text{m}$ 以上の深さが得られ、また様々な材料においてフェムト秒パルスを用いた場合、熱的な損傷の少ない良好な結果が得られることを報告した(Fig.27)。Univ. of MichiganのX. Liuら(CThH2)は、同様にチタンサファイアレーザーのフェムト秒パルスを用いたマイクロマシーニングについて報告した。彼等は、超短パルスレーザーを用いる利点としてレーザー誘起のブレイクダウンのしきい値がナノ秒からピコ秒、サブピコ秒領域になると急激に減少し、必要とされるエネルギーが少なくて済むこと、通常のレーザーパルスでは集光された領域からの熱拡散により周辺部の加熱を引き起こすが、フェムト秒領域ではパルス時間内で熱拡散が無視できるので局所的に熱を運ぶことが可能であることであると説明し、実験としてパルス幅200psと80fsのレーザーを用いたときの結果を比較した。レーザーフルエンスをしきい値近くになるようにコントロールすることでレーザーのスポットサイズ以下の

Fig.28 Comparison of micromachining of PET plastic with different pulse widths: (a) - (b) 80-fs pulses, and (c) - (d) 200-ps pulses. The laser wavelength was at 800nm, and the spot size was $19\mu\text{m}$ full width at $1/e^2$ points. (a) $5\mu\text{J}$ /pulse, the sample was translated at 20 mm/s; (b) $5\mu\text{J}$, 8 mm/s; (c) $20\mu\text{J}$, 15mm/s; (d) $150\mu\text{J}$, 20mm/s.²⁸⁾

径の小さな穴開けが可能となることを示し、このとき 80fs パルスによる穴は何れの穴も一樣できれいに加工されたが、200ps では一樣な穴とはならず、200ps の場合しきい値近くのマシーニングではアブレーションされるものとされないものが生じ、これは熱拡散とショック波の影響によるものであるだろうと報告した(Fig.28)。これらの結果より、フェムト秒パルスの利点を活かしたマイクロマシーニングは非常に有効な手法であり、フェムト秒のチタンサファイアレーザーは既に商品化され多くの研究機関において用いられるようになってきており、実際に今回こうしてプロセシングの tool として使われるようになってきていることは非常に興味深い。

Univ. of New Mexico の X.Chen らによってナノメータ構造作製のための新しい手法として多重露光干渉リソグラフィ法について報告された (CThJ5)。この手法は、現存するレーザー光源とレジスト、高価ではない光学系を用いた非常に簡単な手法(周期、位相、方向を変えた多重干渉露光)で焦点深度の制限を受けず、広い範囲にわたりその臨界サイズ $\lambda/4$ の大きさのパターン

Fig.29 Isolated 180-nm-wide line on a $2\text{-}\mu\text{m}$ pitch in $1.1\text{-}\mu\text{m}$ thick resist formed by two beam interference at $\lambda = 364\text{ nm}$.²⁹⁾

を与えられる。これらの多重露光法を可能とする moire アライメント技法を開発し、これらを応用して 180nm のラインパターン形成や様々な複雑な 2 次元アレイの形成を行った (Fig.29)。臨界サイズが $\lambda/4$ の大きさと与えられるので、Nd:YAG レーザーの第 4 高調波を用いれば 100nm を切る 75nm のラインパターンが実際に得られ、さらに短い ArF や KrF、 F_2 レーザーの使用によりさらに微細化は可能になるものと考えられる。この手法は新しい半導体のリソグラフィ技術として、また光波長領域の 3 次元フォトニックバンド結晶の作製法として期待できるものと考えられる。

この Photonic Bandgap Materials (CThJ) のセッションにおいて光波長領域の 3 次元フォトニックバンド結晶の新しい作製法について京大の野田ら (CThJ2) が発表した。実際に、ミリ波、マイクロ波領域においてはバンドギャップの形成が既に実験的に確かめられているが、光波長領域になると波長が短くなるためその作製プロセスが難しくなるので光波長領域での 3 次元フォトニックバンド結晶は実現されていない。しかしながら、しきい値の無いレーザーや自然放出の抑制等の応用として期待されているのは、この

Fig.30 Proposed method of realizing 3-D photonic crystal: (a) growth of AlGaAs and GaAs layers, (b) stripe formation on the GaAs layer, (c) stacking of the striped wafers and wafer-bonding, (d) selective etching of substrates and AlGaAs layers, (e) cleaving wafers and repeating processes corresponds to asymmetric face-centered cubic structure. Not only the stripe pattern but also any other patterns such as cross pattern can be utilized as the unit structure. For the wafer alignment, the observation of a deflected laser beam pattern can be utilized.³⁰⁾

光波長領域での3次元フォトリックバンド結晶の開発である。この発表では、ウェーファーボンディング法と微細加工技術を組み合わせた新しい手法を提案している (Fig.30)。材料としてAlGaAs/GaAs半導体を選び、AlGaAsは選択エッチングプロセスにおけるエッチングストップ層として、GaAsをフォトリック結晶を形成するために用いている。電子ビームリソグラフィとドライエッチングプロセス (反応性イオンエッチング) によりストライプパターンを形成し、それをウェーファーボンディング法 (アライメントにレーザービームによる回折パターンを利用) により3次元立体構造にし、非対称面心立方構造のフォトリックバンド結晶を形成法できると報告している。この構造は、既にマイクロ波の領域で

は機械的に作製した0.3cm径の Al_2O_3 を用いてバンドギャップの形成が示されているので、ここで0.8-10 μm の波長に対しては、そのストライプ幅と厚みが0.1-1.0 μm であれば可能であり、既存のプロセス技術により形成可能であると考えられる。現在は、ストライプ幅1.00 μm 、積層数4層に成功しているが、残念ながらその光学特性については報告されなかった。この他にも、波長850nmと980nmにおける2次元のフォトリックバンドギャップミラーについてCalifornia Institute of TechnologyのJ. O'Brienらが、またNorthwestern Univ.のJ.P. Zhangらは1次元フォトリックミラーをマイクロキャビティーに取り入れた自然放出を制御したレーザーデバイスを提案し、実際にフォトリックワイア上にエッチングにより作製した波長1.5 μm 域のミラー特性を評価した。フォトリックバンドギャップ物質の研究は近年理論を中心に盛んに行われ、実験的にはミリ波、マイクロ波領域に限られていたものが、このような微細加工技術により光波長領域のフォトリックバンド結晶の形成が可能となれば、その応用は非常に広がるものと思われる。

(江崎瑞仙)

参 考 文 献

- 1) I. D. Jung, R. Fluck, G. Zhang, F. X. Karter and U. Keller: *Technical digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'96)*, Vol.9, 1996 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D. C., 1996), p.27.
- 2) A. Rundquist, I. Christov, Z. Chang, J. Zhou, J. Peatross, M. M. Murnane and H. C. Kapteyn: *ibid.*, p.113.
- 3) T. E. Glover, R. W. Schoenlein, A. H. Chin and C. V. Shank: *ibid.*, p.93.
- 4) M. Nisoli, S. De Silvestri and O. Svelto: *ibid.*, p.189.
- 5) C. P. J. Barty, Ting Guo, C. LeBlanc, G. Korn, C. Rose-Petruck, F. Raksi, J. Squier, K. R. Wilson, V. V. Yakovlev and K. Yamakawa: *ibid.*, p.187.
- 6) A. H. Chin, R. W. Schoenlein, T. E. Glover, C. V. Shank, W. P. Leemans, P. Volfbeyn, R. Govil, K.-

- J. Kim and S. Chattopadhyay: *ibid.*, p.182.
- 7) N. Ph. Georgiades, E. S. Polizik and H. J. Kimble: *ibid.*, p.15.
- 8) H. Ito, K. Sakaki, T. Nakata, W. Jhe and M. Ohtsu: *ibid.*, p.91.
- 9) R. G. DeVoe and R. G. Brewer: *ibid.*, p.142.
- 10) N. Sarukura, Z. Liu, S. Izumida, Y. Segawa, M. A. Dubinskii, V. V. Semashko, A. K. Naumov, S. L. Korableva and R. Yu. Abdulsabirov: *ibid.*, p.112.
- 11) B. Braun, F. X. Kartner, U. Keller, J.-P. Meyn and G. Huber: *ibid.*, p.176.
- 12) C. D. Marshall, L. K. Smith, S. Sutton, M. A. Emanuel, K. I. Schaffers, S. Mills, S. A. Payne, W. F. Krupke and B. H. T. Chai: *ibid.*, p.322.
- 13) A. Mar, K. L. Lear, K. D. Choquette, S. P. Kilcoyne and K. M. Geib: *ibid.*, p.46.
- 14) K. D. Choquette, R. P. Schneider Jr., K. L. Lear, K. M. Geib, H. Q. Hou, H. C. Chui, M. H. Crawford and W. W. Chow: *ibid.*, p.203.
- 15) D. Z. Garbuzov, J. H. Abeles, N. A. Morris, M. G. Harvey and J. C. Connolly: *ibid.*, p.80.
- 16) H. P. Mayer, M. Klenk, W. Idler, J. Bouayad-Amine, G. Laube and P. Pagnod: *ibid.*, p.334.
- 17) P. S. Kopev, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, I. V. Kochnev, N. A. Bert, A. Yu. Egorov, A. E. Zhukov, V. V. Komin, A. O. Kosogov, I. L. Krestnikov, M. V. Maximov, S. S. Ruvimov, A. V. Sakharov, Yu. M. Sherniakov, A. F. Tsatsul'nikov, S. V. Zaitsev, Zh. I. Alferov and D. Bimberg: *ibid.*, p.383.
- 18) B. Pezeshki, F. Agahi, J. A. Kash and H. C. Chui: *ibid.*, p.35.
- 19) A. Hamakawa, T. Kato, H. Kobayashi, J. Fukui, T. Nakabayashi, T. Katsuyama, G. Sasaki, M. Shigehara and Y. Hattori: *ibid.*, p.315.
- 20) M. E. Fermann, D. Harter, J. D. Minelly and G. G. Vienne: *ibid.*, p.493.
- 21) A. Galvanauskas, M. E. Fermann, D. Harter, J. D. Minelly, G. G. Vienne and J. E. Caplen: *ibid.*, p.495.
- 22) J.J. Pan, J. Chen, Y. Shi, L. H. Wang, P. Jiang and M. Shih: *ibid.*, p.242.
- 23) J.J. Zayhowski: *ibid.*, p.237.
- 24) L. Fulbert, R. Accomo, E. Molva, p. Besesty and A. Mouttet: *ibid.*, p.98.
- 25) V. Grubsky, S. MacCormack and J. Feinberg: *ibid.*, p.302.
- 26) S. MacCormack, J. Feinberg and B.A. Wechsler: *Photorefractive Materials, Effect and Devices, 1995 Technical Digest*, Estes Park, Colorado, paper MPB 13.
- 27) C. Momma, S. Nolte, B. Chichkov, F. von Alvensleben, *Technical digest of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'96)*, Vol.9, 1996 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D. C., 1996), p.254.
- 28) X. Liu, D. Du, A.-C. Tien and G. Mourou: *ibid.*, p.376.
- 29) X. Chen, S. H. Zaidi and S. R. J. Brueck: *ibid.*, p.390.
- 30) S. Noda, N. Yamamoto and A. Sasaki: *ibid.*, p.388.