CLEO/QELS'99報告

宅間 宏, 小林 孝嘉*, 関川 太郎**, 玉木 裕介***, 西山 伸彦****,
吉村 政志*****, 平野 嘉仁†, 五神 真††, 上妻 幹男†††, 鳥井 寿夫††††,
板谷 太郎†††††

日本原子力研究所 光量子科学センター (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)

*東京大学 理学部物理学科 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

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

***慶應義塾大学 理工学研究科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

****東京工業大学 精密工学研究所 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田 4259)

*****大阪大学 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

†三菱電機(株) 情報技術総合研究所 (〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1)

††東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

†††東京大学大学院 相関基礎科学系 (〒153-0041 東京都目黒区駒場 3-8-1)

††††学習院大学 理学部物理 (〒171-8588 東京都豊島区目白1-5-1)

†††††電子技術総合研究所 電子デバイス部 (〒305-8563 茨城県つくば市梅園1-1-4)

Report on CLEO/QELS'99

Hiroshi TAKUMA, Takayoshi KOBAYASHI,* Taro SEKIKAWA,** Yusuke TAMAKI,***

Nobuhiko NISHIYAMA,**** Masashi YOSHIMURA,***** Yoshihito HIRANO,†

Makoto GONOKAMI,†† Mikio KOZUMA,††† Yoshio TORII,†††† and Taro ITATANI†††††

Kansai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

**Department of Physics, Faculty of Science, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033*

***Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581*

****Faculty of Electric Engineering Department of Science & Technology, Keio University*

3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522

*****Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology*

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

******Department of Electrical Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871*

†Information Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-1 Ofuna, Kamakura, Kanagawa 247-8501

††Department of Applied Physics, School of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

†††Institute of Physics, University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-0041

††††Department of Physics, Gakushuin University, 1-5-1 Mejiro, Toshima-ku, Tokyo 171-8588

†††††Electron Devices Division, Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8563

(Received July 5, 1999)

1. はじめに

今回のCLEO/QELSも極めて盛会で、展示への参加者を含めて5,600人以上の登録者を記録したとのことである。欧米での光技術全般に対する期待は大きく、21世紀における主要な産業技術の一つとして学会だけでなく産業界の関心も非常に大きなものがある。これに比べるとわが国の政府も産業界も今一つ光産業の重要性への認識が甘いように感じられる。

最近の量子エレクトロニクスの流れの特徴としてレー

ザーの性能のいろいろな面での著しい進歩を先ず挙げることができるが、今回のCLEOにもその特徴は明確に見られた。過去の量子エレクトロニクス技術の進歩は、ある段階でレーザーの性能が進歩し、それに続いて新しい応用が開かれるというパターンで展開されてきた。レーザー性能の進歩は応用の可能性を高めるから当然とも言えるが、むしろ応用を意識してレーザー性能を追求する姿勢が必要である。

二十世紀のレーザー技術は、レーザーの精密度を殆ど理論的限界まで高めることに成功し、各種の学術的応用を

じめ、計測、通信、情報などの技術分野で画期的な展開を見せた。一方で加工から核融合に至る広汎なレーザーエネルギーの応用分野では、フォトンの価格が高価なためにはかばかしい展開が見難かった。最近の傾向はレーザーの小型化、高輝度化、高効率化に関しての進歩が著しく、21世紀に向けてのレーザーエネルギー応用の大きな展開が期待される。

先ず半導体レーザー励起の固体レーザーの性能の向上が引き続き進んでいるのは重要な意義を持つ傾向である。今回の大きな進展の中で、Ybガラスファイバレーザーの高出力化に注目したい。Yb系レーザーは、エネルギー構造からの当然の帰結として、(高効率)→(低ポンピングレベルでの吸収が大きい)→(高輝度ポンピングの必要性)→(ファイバレーザーの優位性)という思考の流れが必然的に行われなければならない。Yb系に限らず、ファイバレーザーは、ポンピングの効率、単一モード出力化、冷却などいろいろな点において有利なことは言うまでもなく、今回のCLEOでも活発なセッションが組まれた。

ファイバレーザーの重要性は、いち早く植田(電通大)らによって指摘されてきたが、日本国内の産業界での一般的認識は欧米に比較して低かった。現在ファイバレーザーの研究は中心的課題の一つであり、Yb系レーザーはその一例に過ぎないが、欧米ではすでにかなりの高出力(平均出力100W級)の市販品が生まれている。

なお、今のところ一般の固体レーザーではまだNd系がやや優位性を保っているが、レーザーの構造的工夫と半導体レーザーの高輝度化によって、産業応用分野でのYb系レーザーの一般的優位性が確立されるのも時間の問題と考えられる。

このような流れを見て強調したいのは、すべて理論的な必然性にしたがって技術が進展していることである。技術の展開についてスコープを描くとき、如何に基礎的な思考と信念とが重要であるかを示す一例として肝に銘じたい。

超高強度場効果に関するセッションでは、ローレンス・リバモア国立研究所の単発200TWのTi:sapphireレーザーが注目された。大型Ti:sapphire結晶を用い、大型のガラスレーザーで励起することによって、単発ながら照射強度の最高記録(10^{21}W/cm^2)を達成した点で大きな意義を持つ。またミシガン大学の相対論効果の検証は、高強度光によって電子の運動による磁場の影響が大きくなることを定量的に検証した点で見事であった。その他、興味ある成果が高強度場のセッションや超高速現象のセッションで発表されたのは、この領域が最先端領域として発展を続けていることの反映と考えられる。

今後ますます重要性が高まると予想される半導体レーザーでは、今回も日本で突破口が開かれたブルー・グリーン・レーザーについて、論文数は少ないが関心は極めて高いものを感じた。量子井戸構造などの人工的構造材料が有効に利用される領域としても興味を持たれるところである。

一方、QELSでは、97年にノーベル賞の対象となった中性

原子のレーザー冷却は、ボーズ・アインシュタイン凝縮系(BEC)の時代に突入した感がある。世界各地でBECが実現し、見事な原子波の干渉実験の成果が示され、まさに「原子レーザー」が実現したことを実感した。

さて、最近のCLEO/QELSに出席して感じるのは、CLEOとQELSとの実質上の一体化である。QELS関係のセッションにおける出席者数は減っていないし、討論も相変わらず活発ではあるが、登録者の数を見る限りではCLEOが増えてQELSは減る一方とのことである。基礎と応用の一体化はよいことで、この領域の円熟度を示すと考えてよさそう。事実、CLEOのセッションの内容でQELSのセッションとしても馴染むものは多い。ヨーロッパでは始めから実質的に一体化している。この表面的な現象を見て、QELS不要論が出たとすればとんでもない短絡的思考といわざるを得ない。

基礎と応用との時間的ずれが急速に短くなった現在、画期的な応用の展開には基礎がますます重要であるし、適切な基礎研究課題の選択には応用に関するインサイトが不可欠である。このことを研究者が認識し、説得に努力することによって、日本国内でも21世紀の産業技術における光学技術の重要性が社会的認識を得られるのではないかと思われる。

(宅間 宏)

2. 超高速現象

超高速現象に関するセッションは10駒あり、CTuL, Ultrafast optoelectronics, CTuR, Ultrafast shaping and optimization, JTuC, Ultrafast chemistry, QtuJ, Ultrafast relaxation processes, CWL, Ultrafast material dynamics, CThC, Ultrafast laser material modulation, CThL, Ultrafast pulse generation I, CThR, Ultrafast pulse generation II, CFA, Ultrafast pulse characterization I, CFG, Ultrafast pulse characterization IIであった。全体で150駒のセッションのうち6%に相当する非常に幅の広い重要な分野である。これまでの会議と比較しても発表全体の推移からみても、最近特に進展していることが顕著であったといえる。さらに、これ以外のセッションやポストデッドラインペーパーのセッションでも、超高速現象関係の発表がかなりの数であった。各セッションで発表が5, 6件あるので総数50~60件もあり、パラレルセッションで同時に発表が行われたものもあり、全部を網羅するのは不可能である。本稿では筆者が実際に講演を聴き評価できたものについて以下に記すことにしたい。

新しい非線形光学のセッションのQMB5で昨年不幸にして亡くなったMoscow大のKroteevのグループから、「光結晶中での光パルス圧縮」の発表があった。これまでフォトリック結晶を用いたパルス成形問題はピコ秒時間領域の研究だけであったが、ゆっくり変化する崩壊関数(SVEA)が成立しないくらい短いフェムト秒パルスについて理論的考察を行っている。それによると、mm以下の幾何学的厚さでパルス圧縮を行うことができる。

火曜日の午前後半のセッションCTuF “Few-optical-cycle pulse generation”において短パルス発生に関する興味深い発表が沢山なされた。まず、MITのIppenのグループ

Fig.1 Laser setup: DCMs: M_1 - M_6 , silver mirrors M_0 and M_7 , CaF_2 -prisms P_1 , P_2 , fused quartz prisms P_3 , P_4 . X: Ti:sapphire crystal, OC: output coupler, L: 10 cm lens. (CTuF1, F. X. Kärtner, *et al.*)

(CTuF1, 招待講演)から, Fig.1のような配置を用いて, レーザー共振器から発生するパルスとしては, これまでで最も短い5.5fsのパルスを繰り返し100MHzで得ることができた. このため, 400nm以上の利得スペクトルバンド幅にわたる99.87%以上の高反射率の二重チャープ鏡を用いることにより, 350nm以上の広いスペクトル領域の群速度分散の補償を可能にした. 更に, チャープ補償用に低分散の CaF_2 プリズム対を用いて, これまでよりもより正確にチャープ補償ができた. この結果共振器から sech^2 波形を仮定して, 5.5fsパルスが得られた. スペクトルのフーリエ変換からは, 限界パルス幅は5.4fsとなる (Fig.2). 白色干渉の方法で群速度遅延は 2fs^2 であった. 既存の方法を採用して非常に細かい設計をして共振器から最短パルスを得ている.

次にSt. Andrews大のSibbettのグループ (CTuF2) は, Fig.3に示すようなリング型共振器の自己モード同期レーザーを開発した. 二次元安定解析領域の中央にデザインすることができるので最大出力が得られる. また, パルスが共振器の中の結晶を一回だけしか通過しないので, 結晶での分散を最小にできる. さらに外部からフィードバックの効果に対して強い. パルス伝搬の方向は, 可能な二方向のうち増幅結晶に入って直後に増幅される方向を選んだ. このレーザーからパルス幅13fs, パワースペクトル幅55nmのパルスが得られ, 従って時間バンド幅積0.33が得られフーリエ限界に極めて近いパルス発生ができたことがわ

Fig.2 Measured IAC, (dots) and IAC derived from the spectrum assuming zero phase distortions on the spectrum (solid line). (CTuF1, F. X. Kärtner, *et al.*)

Fig.3 Cavity schematic of self-modelocked Ti:sapphire ring laser. (CTuF2, T. Beddard, *et al.*)

かる. 平均出力は1.4W, 尖頭出力1MW, パルスエネルギー13nJに相当する. このようなリング共振器配置で, 特別仕様の短いチタンサファイア結晶や薄い反射鏡を用いることなしにサブ15fsで高平均出力パルスの発生に成功した.

NTTの鳥塚ら (CTuF3) は, 全固体をモード同期Cr:LiSAFレーザーから, チャープ補償用に13K7プリズム対を用いた場合に12fs, LaKLプリズム対の場合に10fsというパルスの発生を行った.

Max Born研究所のPetrovら (CTuF4) は, $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 結晶を基にしたOPGにより中心波長 $3\mu\text{m}$ で5サイクルに相当する42fsパルスを発生した. これまでこのスペクトル領域は, BBO結晶では発生が困難で, KTP結晶では群速度不整合 (GVM) のため150fs程度のパルス幅しか得られなかったのであるが, GVMの小さい $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ を用いたためこのような短パルス発生が可能になった.

東大の小林ら (CTuF5, 招待講演) は, フェムト秒位相変調白色光の非同軸パラメトリック増幅にパルスフロント整合条件を満たすような励起配置をとる装置を開発した. その概要をFig.4に示す. これにより, 信号光として可視光領域の550nm-700nmというある程度の広さのスペクトル範囲で, 波長可変なサブ8fsパルスの発生に成功した. 更に, アイドラー光についても, 中心波長900nmから $1.3\mu\text{m}$ までの近赤外域で波長可変な9fsパルスの発生に成功した. パラメトリック増幅器の励起には, 再生増幅されたチタンサファイアレーザー (790nm, 1kHz, パルスエネルギー400 μJ) の第二高調波 (パルスエネルギー100 μJ) を用い, プリズムで励起パルス面を傾斜させた. 増幅されるフェムト秒白色光は基本波 (120fs, 400 μJ) の極く一部分 ($\sim 1\mu\text{J}$) を, 厚さ2mmのサファイア板に集光することによって発生させた. このとき自己収束によって安定な単一フィラメントが形成され, その中でスペクトル再現性の良い自己位相変調が発生する. 信号光として, Fig.5に示すように, ほぼフーリエ変換限界であり可視光で最短の4.7fsパルスが得られた. 非同軸光パラメトリック増幅であるため, 近赤外域のアイドラー光は必然的に7°という大きな広がりをもった角分散を示す. これを補償するため凹面鏡, 円筒面鏡, 回折格子の組み合わせを用いて, 1mrad以下のビームダイバージェンスにすることができた. またこれを用いてポリジアセチレンの一重項励起子を励起し, 三重, 二重, 一重結合の伸縮振動モード間のエネルギーフローを実時間的に観測した. 分子振動モード間のエネルギー移動の様子を, 実時間的に観測したのはこれが初めてである.

Fig.4 Schematic of the visible sub-5-fs generator. BS, beam sampler; HS, harmonic separator; TP, FS prism for pulse-front tilting; L₁, L₂, $f = 200$ and $f = 71$ -mm lenses; SM's, spherical mirrors ($r = 100$ mm); VND, variable neutral-density filter; WSM, spherical mirror ($r = 120$ mm); CF, cut-off filter; D, optical delay line; PS, periscope; P₁, P₂, 45°, FS prisms in the minimum deviation; TBS, thin beam splitter; CCM's, corner-cube mirrors; BPF, bandpass filter; PMT, photomultiplier; PD, photodiode. (CTuF5, A. Shirakawa, *et al.*)

Fig.5 (a) Spectrum of the full-bandwidth signal. (b) FRAC trace of the compressor output. Measured (solid curve), FT-fit (full circles) and sech²-fit (dashed curve) traces are shown. In the inset shown are the TL (dashed curve) and estimated (solid curve) intensity profiles. The TL pulse width is 4.4 fs, whereas the FT-fit (sech²-fit) pulse width is 4.7 fs (3.5 fs). (CTuF5, A. Shirakawa, *et al.*)

短パルスレーザーの超高速光エレクトロニクスへの応用も盛んである。Allied SignedのNahata(CTuL1)は、光整流による電気パルス発生用の高分子薄膜の下層に形成された共平面ストリップライン型導波路の上下面被ふく層としてアクリル樹脂を用いた。これにより非線形材料を含めた全体の誘電率が小さく超高速応答を可能にし、これ

までで最短の170fsの電気パルス発生に成功した。

ポストデッドラインペーパーの中でも超高速現象、パルス発生などの研究発表がかなりの件数あった。Lawrence Berkeley LaboratoryのSchoenleinら(CPD5)はパルス幅30psのバンチした電子パルスと一緒に500μJ, 60fs, 800nmのレーザーパルスと一緒にウィグラー中を進行させた。フェムト秒レーザーの強い光電場はウィグラー中で電子を加速するため、レーザーパルス幅によって決まる短い時間だけ電子的加速により約8MeVのエネルギー変調を受ける。その部分だけ電子ビームに直交する方向へ空間的にシフトさせて分離し、その部分からのシンクロトロン放射をパルス光(X線)として実験に用いる。残った電子ビームからはダークソリトンのシンクロトロン放射が起こり、これが電子ビームと同期しているので、電子線と放射光(X線)とを組み合わせたポンプ・プローブ型の実験への応用が考えられる。可視域の放射光について、励起レーザー光との交差相関をとったところ、380fsであった。これはウィグラーや偏向磁石等の分散効果によるので、それらを改良することにより将来100fs以下の放射光パルスの発生も可能であろうと予測している。東大物性研関川ら(CPD7)は、Xeガスを用いて発生した高次高調波のうち9次よりも高いものを除いたパルスの多光子イオン化による自己相関波形を測定することによりパルス幅を計測し、さらに高調波の負チャープを1mmのLiF板を通過させることにより補償し、最短13fsパルスが得られたことを報告した。

QTuJのUltrafast relaxation processesのセッションでは、主にバルクあるいは量子井戸構造半導体中の荷電担体、プラズモン、励起子等の超高速なエネルギー緩和や位相緩和に関する実験が報告された。Karlsruhe大のSteinbachら

Fig.6 Coherent control FWM-experiment (linear scale) under conditions as (QTuJ1, Fig.1). The time delay of the phaser-locked pulses t_{11} , is parameter as indicated. For clarity, the traces are vertically displaced. The prominent 2-phonon oscillation with period ≈ 65 fs = 131 fs/2 is highlighted in the inset. (QTuJ1, Chemla, *et al.*)

Fig.7 Four-wave mixing signal (linear scale) versus real-time t for selected time delays t_{21} as indicated on the RHS. Also, note the different multiplication factors as indicated. GaAs, $T = 399$ K, excitation with ≈ 10 fs optical pulses, $n_{eh} = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The position of the echo for an ideal photon echo is indicated by the dashed line. (QTuJ4, Chemla, *et al.*)

(QTuJ1)は、100nm厚のZnSeバルク結晶について13fsパルスを用いた二パルス四光波混合(FWM)の実験を行った。そのFWM信号の中に $n=1$ フォノン以外に $n=2$ フォノンによる信号も見出した。位相をロックした二パルスをFWMの第二パルスの代わりに入射し、その位相を変えることにより、 $n=1$ フォノンの信号を抑制し、 $n=2$ フォノン信号を強めたり逆にしたりするコヒーレント制御の実験を行った (Fig.6)。Karlsruhe大のHugelら (QTuJ4)は、10fsパルスを用いて室温300KでGaAsの位相緩和でエコー信号が指数関数的に減衰することを示した。第一、第二パルス間隔を $t_{21} = t_2 - t_1$ とした場合、時間分解信号は、 $t_{21} < 0$ の場合に片側指数関数の形から、 $0 < t_{21} < 50\text{fs}$ では通常的光子エコーと同じような $t = t_{21}$ に極大をもつ信号が現れる (Fig.7, 8)。更に、 $t_{21} > 50\text{fs}$ では波形は対称に近くなり、理想的なエコーの場合より、遅延が短くなり、信号パルス幅は広がる。この結果は、伝導帯の高いエネルギーの電子はより速い位相緩和を示すことで説明され、15fsの時間積分エコー信号減衰時間は、平均的な値にすぎない。 $t_{21} = 0$ 近辺で現れる約50fsの周期的信号は、非マルコフの電子—電子散乱に依るという以前同じグループの実験から出された結論と整合している。

他にも多数興味深い研究発表がなされたが紙数の都合で割愛させていただく。(小林 孝嘉)

3. 高出力超短パルスレーザー

ここ数年、レーザー技術に関しては、高出力超短パルスチタンサファイアレーザーのピーク強度の記録更新が話題の一つであったが、最近一服の感がある。今年は、背景光の強度比やアダプティブオプティックスを用いた波面

Fig.8 The position (a) and the width (b) (full width at half maximum FWHM) in realtime of the FWM-signal versus time delay t_{21} as extracted from the data shown in (QTuJ4, Fig.1). The dashed lines show the behavior of an ideal echo. The time-integrated FWM-signal is shown for reference (c). (QTuJ4, Chemla, *et al.*)

制御など、パルスの“クリーン度”を向上し実際の集光強度を上げる方向に関心が向かっていた。

まず、CTuD1でミシガン大学のWangらが40TW, 10Hzフェムト秒チタンサファイアレーザーの開発の報告を行った。レーザー物理、技術の観点からは新しいことはなかったが、FROGによる位相測定、集光径、背景光との強度比の性能評価を行っていた。CTuD2では、UCサンディエゴ校のグループが60TWチタンサファイアレーザーの開発とその性能評価の報告を行った。ヘリウムガスのイオン化で強度の校正を行い (Fig.9)、最終的な集光エネルギーは $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ と見積もっていた。その光をアルゴンガスへ集光し16個のイオンまで観測した。CTuD3は招待講演で、1.1TW、繰り返し1kHzチタンサファイアレーザーの開発がフランスのグループから報告された。5台ものNd:YLFレーザーを用い、再生増幅、3段のマルチパスによる増幅を行っている (Fig.10)。stretcherでの波面のゆがみがパルス圧縮後のパルスの裾になるとし、 $\lambda/40$ と $\lambda/100$ の鏡を使ってstretcherを構成した。また、再生増幅器中でのスペクトルの狭帯域化を防ぐため、複屈折フィルターを用いてスペクトルコントロールを行っている。マルチパス増幅は熱レンズ効果を考慮して設計を行った。増幅中に得る分散が非常に多いため、最終的なパルス圧縮はstretcherと異なる刻みの回折格子 (stretcherでは1200 ℓ/mm , compressorでは1500 ℓ/mm)を用いて行った。最終的には18.5fsのパルス幅を得

Fig.9 Mean and standard deviation of the experimental and retrieved PGFROG time marginal (a). Mean and standard deviation of the retrieved spectral phase (b). (CTuD2, B. C. Walker, *et al.*)

Fig.10 Amplifier experimental setup. (CTuD3, V. Bagnoud, *et al.*)

た (Fig.11). パルスの背景光との強度比は 10^{-4} と報告していた。これに関連して, CWF16で同じグループが複屈折フィルターを使った再生増幅器の報告をしていた。複屈折フィルターをスペクトルコントロールに使う問題点として, 裏面反射により主パルスの裾に子パルスができることをあげていた。その強度比は 10^{-2} であった。CTuD4では, ミシガン大学のMourou教授のグループから, deformable mirrorを用いた波面整形の報告があった。パルス増幅中, 光学素子の不完全性, 熱, Kerr効果などによりパルスの波面が乱れ集光径が大きくなってしまいが, deformable mirrorにより補償することができる。講演では, チタンサファイア, Nd:glassのハイブリッドレーザーの基本波, 第二高調波がほぼ回折限界まで絞れることを示した (Fig.12)。第二高調波

Fig.11 Autocorrelation function of the amplified pulses. The deconvolution gives a 19.3 ± 2 fs duration. (CTuD3, V. Bagnoud, *et al.*)

を発生させることは, パルスの裾を落とす効果もあり実効的な集光強度を上げる。CTuD5でも, deformable mirrorを用いたTWレーザーの波面整形の報告がフランスのLULIのグループからあった。CTuD6ではCTuD4に関連し, KDP結晶を2枚用いて群速度遅延を補償して60%の高効率で第二高調波を発生させ (Fig13), deformable mirrorを使って $2 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ に集光した結果が報告された。CTuD7では, TW炭酸ガスレーザーを用いて電子加速を行おうとする試みが報告された。ponderomotiveエネルギーは波長の2乗に比例するので, 長波長のレーザーを用いるのが得策ということであった。

応用では, 近年, 可視以上の長波長の超短パルスレーザーを, 様々な方法でX線領域へ変換する研究が盛んに行われている。その観点から, JTuD1でのミシガン大学のUmstadter

Fig.12 Experimental phase of the laser: Distorted (A), 0.7λ peak-to-valley and corrected (B), 0.3λ peak-to-peak. Below is represented a lineout of the calculated focal spot knowing the phase and the intensity of the beam: A, distorted beam, B corrected beam, C flat phase (diffraction limited). (CTuD4, J. Queneuille, *et al.*)

Fig.13 Schematic of SHG in KDP type II crystal with pre-delay. (CTuD6, A. Maksimchuk, *et al.*)

の相対論領域での電子と光の相互作用の報告やCPD5のローレンスバークレー研究所のSchoenleinのフェムト秒シンクロトロン光源を開発したとの報告が興味深かった。後者のフェムト秒シンクロトロン放射光の発生機構は次の通りである。シンクロトロン電子バンチとフェムト秒レーザーの相互作用によりパルス幅と同程度の時間広がりを持つ電子バンチを取り出す。放射光の時間幅は電子バンチの時間的広がりによって決まるので、切り出された電子バンチからの放射光はフェムト秒の時間幅を持つ (Fig.14)。シンクロトロン放射光であるため、硬X線から赤外領域までのスペクトルをもっており、波長可変である点

が非常に特徴的である。報告では、可視域の光をチタンサファイアレーザーとの交差相関法で測定した例を示した。もともと17ps程度であったシンクロトロン放射光から60fsのチタンサファイアレーザーで切り出された光のパルス幅は、161fsであった。パルス幅は、シンクロトロン軌道内での分散によって広がっている。もとの電子バンチのうち、切り出された部分は電子の数が減り凹みは必ずある。実際に測定すると112fsの凹んだ放射光が発生しており、凹んだ部分をdark pulseと呼んでいた (Fig.15)。この様に高出力超短パルスレーザー開発の進展に伴い高出力超短パルスレーザーの応用も多岐にわたるようになった。高出力超短パルスレーザー技術、高強度電場下での物理の更なる進歩のみならず、今後は、高出力超短パルスレーザーを励起光源とした短波長光源の実用化による高出力超短パルスレーザーの多くの研究者への普及を期待したい。

(関川 太郎)

4. 短波長コヒーレント光源

本章では、はじめに高次高調波の発生とパルス圧縮についての報告、次に軌道放射光のフェムト秒パルス化についての報告、最後に軟X線レーザーについての報告をする。

Fig.14 Schematic illustration of the technique for generating femtosecond synchrotron pulses. (a) laser/electron beam interaction in resonantly-tuned wiggler, (b) separation of accelerated femtosecond electron slice in a dispersive (bend) section, and (c) generation of femtosecond x-rays at a band-magnet beamline. (CPD5, R. W. Schoenlein, *et al.*)

Fig.15 Cross correlation of visible synchrotron pulse with femtosecond laser pulse (and schematic illustration of the corresponding region of the electron bunch): (a) overall synchrotron pulse, (b) femtosecond dark pulse from on-axis radiation, and (c) femtosecond pulse from off-axis radiation. (CPD5, R. W. Schoenlein, *et al.*)

高次高調波とは高次の非線形光学現象により発生するものである。直線偏光のレーザーパルスを $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上の強度で原子ガスに照射すると著しい非線形効果により数十次、数百次の高調波が発生する。97年には高次高調波の最短波長が水の窓域に達した。残るテーマは発生効率の増大とアト秒パルス発生との2つである。

玉木ら(JWA2)は、レーザーガイディングを利用した高調波の発生効率増大についての招待講演を行った。近赤外レーザーパルスと高次高調波との位相整合により、レーザーガイディングによる相互作用長の増大を実現し、高調波の発生効率が二桁以上に増大したことを示した。これは巨視的位相整合と微視的位相整合の組み合わせにより常に高次側の高調波のみが増幅されることによると考察した。Fig.16が観測された軟X線スペクトルであり、媒質やガイディング法によらず常に高次側のみが位相整合が満たされて高調波の発生効率が増大していることを確認している。ガイディング法としては中空ファイバを用いた方法と自己導波現象を利用した方法を用いた。CUOS (Center for Ultrafast Optical Science) のDurfeeら(JWA1)も中空ファイバを用いて4種類のガスにおいて常に高次側の高調波だけが增加すると報告し、昨年の報告での常に27次だけ増加するという結果から訂正していた。これらの報告により、高調波の問題点であった変換効率という点が改善され、この方法論がさらなる変換効率の増大を導くと考えられている。

高次高調波の目を見張るべき特徴はその時間分解能で

Fig.16 Observed high-harmonic spectra. (a) was obtained with uncalibrated spectrograph when 2 mJ, 80 fs Ti:sapphire laser pulses propagated in a 3-cm Ar-filled hollow fiber. (b) was obtained when 5 mJ, 80 fs laser pulses in 30-Torr neon gas. Line emission appeared on both sides of lower order harmonics are the second-order diffraction of higher order harmonics. Dots emphasize harmonic intensities of first-order diffraction. (JWA3, Y. Tamaki, *et al.*)

ある。高調波のパルス幅や時間位相を測定することにより、高次高調波の発生メカニズムはもちろんのこと、非常に魅力的な「軟X線アト秒パルス発生」への指針が得られる。

物性研の関川ら(CPD7)はポストデッドラインペーパーで高調波の時間位相の測定法を開発し、また応用としてパルス圧縮のデモンストレーションを行った。Fig.17に示す実験装置でヘリウム原子の4光子イオン化を利用して5次高調波の自己相関波形を測定し、高調波に分散を与えたときのパルス幅変化を観測した。高調波の負分散が励起レーザー強度の変化によって与えられている様子がFig.18に明解に示されている。この実験結果からTi:sapphireレーザーシステムのcompressorのグレーティング間隔の最適位置からの変化量が $\pm 400\mu\text{m}$ の近傍でレーザー強度がちょうどLiFによる正分散を打ち消す負分散を持つことが分かる。これに対して最適位置ではレーザー強度が強すぎるために負分散が大きすぎてパルス幅が広がってしまう。また挿入するLiF板の厚さとパルス幅の関係からチャープ量を導き出した。この2つの独立した方法によってどちらの方法でもレーザー強度が与える負分散量がponderomotive

Fig.17 Experimental setup for the fourth-order autocorrelation measurement. The inset shows the autocorrelation function, of which FMHW is 14 fs corresponding to the pulse width of 13 fs. (CPD7, T. Sekikawa, *et al.*)

Fig.18 Pulse width of the 5th harmonic as a function of the laser chirp after passing through a LiF plate of thickness 1 mm. The atomic dipole phase is proportional to 28Up. (CPD7, T. Sekikawa, *et al.*)

energyの25倍という同じ結果を得た。これらの結果から最適な実験条件を導き、115fs励起で13fsの高調波出力を得た。より高いイオン状態を利用することにより原理的にはさらに高い次数の自己相関波形を得ることも期待できる。2つのビームを平行にすれば、より高い時間分解能が得られ平行状態が達成されれば原理的にはフェムト秒以下のパルス測定も可能である。

もう一つのアト秒発生に関する発表は、Univ. of MichiganのDurfeeら(QPD3)のポストデッドラインペーパーである。基本波と第2高調波を中空ファイバへ入射し、アルゴンガス密度を増加していくと高調波の放射が消えるという予稿での結果はさておき、アルゴンで31次からカットオフ次数の39次まで非常にスムーズなスペクトル発生を観測したという話があった。このようなカットオフ近傍での特殊なスペクトル構造は、31次から39次までの高調波の発生において発生源である電子の軌道が単一であることに起因する。微視的な電子軌道が同じであることから、巨視的な伝搬によってスペクトル構造が乱されない。このスペクトル領域では高次の分散が小さく非常に圧縮しやすい。前述する高調波の圧縮との組み合わせでアト秒軟X線パルス発生に大きく前進しつつある。

高次高調波以外の超短パルスのX線発生源としては、電子ビームとフェムト秒レーザーとの相互作用を利用したものがある。Lawrence Berkeley National LaboratoryのShoenleinら(CPD5)はAdvanced Light Sourceからのパルス幅30psの電子ビームと増幅した60fsのフェムト秒レーザーを同軸上で重ね、電子ビームの一部を光励起した。Fig.14が実験の概念図であり、Fig.15が得られた結果である。Fig.15(a)が30ps電子ビームから放射された光のパルス波形であり、この中心部分がフェムト秒レーザーとの相互作用によって切り取られている。Fig.15(b)がその暗パルスを示したものであり、Fig.15(c)が励起された電子ビームのみから放射された光のパルス波形である。軌道放射光はどのスペクトルでも同じ時間波形で発生するのでこの結果は直ちにフェムト秒X線パルスの発生の実現と換言できる。

Colorado State UniversityのRoccaら(JWC6, JWC7)は小型で高平均出力かつ高コヒーレンスなキャピラリ放電型軟X線レーザーについて発表した。波長46.9nm, $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-4}$ のスペクトル幅、7Hzの繰り返し動作で平均出力1mW以上、ピーク出力100kW以上、連続運転可能時間30分、レーザーサイズ1m×0.4mという素晴らしい装置である。この波長での輝度を軌道放射光と比べると 10^5 以上であり、このレーザーはすでに産業利用に近いレベルに達している。是非予稿集と合わせてOpt. Lett. 22 (1997) 796をご覧ください。

最後に、これらの研究分野でキーとなる技術は高出力のフェムト秒レーザーである。成熟しつつあるフェムト秒レーザーの次のステップは先端的にはスペクトル整形とスペクトル位相制御そして波面制御の組み合わせによるピーク強度の増加であろう。また電源まで含めたシステムの小型化が応用上課題になってくるだろう。特に、フェムト秒レーザーの心臓である発振器の小型化・安定化に加えて高繰り返し・高パルスエネルギー化が強く望ま

れる。

(玉木 裕介)

5. 半導体レーザー

半導体レーザー関連としてはCLEOにおいて12のセッションがあった。その中でも最も多かったセッションが面発光レーザー関連の3セッション、ついで、可視光レーザー、通信用レーザーの2セッションと続く。やはり米国での面発光レーザーの人気は高く、日本国内との大きな温度差を感じた。光データコムの需要に伴って当分この人気は維持しそうである。

面発光レーザーのセッションにおいては、1.55 μ m帯面発光レーザーに進展が見られた。これまでこの波長帯の面発光レーザーは、GaAs系の面発光レーザーにくらべ電気、光学特性のよい反射鏡がないということが問題であった。フランスOpto+のStarckらはFig.19のようにInP上に非常に格子の異なるGaAs/AlAs反射鏡を製作することを可能とし室温連続動作で1mW以上の出力を出す事に成功した(CThO1)。また、カリフォルニア大学のAlmuneauらはInP上に格子整合可能なAlGaAsSb/AlAsSb反射鏡を使い面発光レーザーを製作し室温パルス動作ながら7mW近くの光出力を実現している(Fig.20)。現在のところデバイスの抵抗が高いようであるが、これは、成長上のミスで、すぐ解決できるとのことである(CPD16)。このいずれのデバイスも電流注入にトンネル接合を用いていることがポイントで、これにより反射鏡の電気特性の悪さを解決している。一方で面発光レーザーの出力光制御にも関心が寄せられ、(311)基板を利用した偏波制御面発光レーザー(CThU5)をはじめ、様々な偏波制御法についての報告が行われた。新しいものとしては京大のImadaらにより2次元フォトリソ結晶を導入した面発光レーザーの報告も行われた(CThO2)。また、隣り合った素子をカップリングさせ素子

Fig.19 Structure and light-current-voltage characteristics of the planar proton implanted metamorphic tunnel junction VCSEL. (CThO1, C. Starck et al.)

Fig.20 Light power and applied voltage as a function of the injected current at room temperature. (CPD16, G. Almuneau *et al.*)

間での出力光の位相をそろえるといった試みも報告された(CPD25)。

GaN系青色レーザーでは、あまり目だった進捗は報告されなかった。ひとまず主な研究機関はcw発振を達成し、その先で停滞しているという感じであろうか？その中でもHVPE選択成長で垂直ファセットをもつ六角柱を製作し、光ポンプでの共振(周回モード、縦方向ともに)の報告(CTuI6)や、活性層のバリア層の組成を非対称にすることによりピエゾ効果による発光効率低下を抑えるという方法の提案(CTuU2)などが行われた。また、日本では既に応用物理学会や電子情報通信学会等で発表が行われているが東大の荒川教授のグループによるInGaAs光励起面発光レーザー(CPD15)(Fig.21), InGaAs-量子ドットレーザーがそれぞれCLEO, QELSで報告が行われた。

通信用レーザーでは、DBRレーザーに関する報告が多かった。また、近年めざましい進歩を遂げている量子ドットにおいて富士通の向井らは1.3 μ m端面出射型レーザーを報告した。その光出力特性をFig.22に示す。低成長レート、InGaAsによるInAsドットのカバーにより高密度かつ比較的大きな量子ドットを実現し、波長1.3 μ mでの発振へとつながったようである。しきい値は25°Cにおいて8mAと比較的低い(CPD18)。今後の展開が楽しみである。

中赤外波長のレーザーにおいては、Sb系のType II量子井戸レーザーに関し多くの発表が行われた。この系ではType IIであることによる発光効率の悪さと電流注入、室温による発振が困難という問題を抱えているが、着実にそれは解決しつつある印象を受けた。波長域3~6 μ mでの200K以上における光ポンプcw動作(CTHE3)や、電流注入型デバイスでの高出力動作(CTHE5)などが報告された。一方、カスケードレーザーではFig.23のように活性層としてバリア層を薄くし隣の井戸とカップリングさせたバンドを形成し、発光させるといった超格子カスケードレーザーの報告がLucentのベル研究所やノースウェスタン大学などからあり発光波長17 μ mでの発振(JMA4)や、発振波長7.3 μ mで300Kでのしきい値電流密度が3.4kA/cm²(CTHE4)などの

Fig.21 Emission from the single VCSEL was measured at room temperature. (a) Emission intensities accumulated for 180 pulses are plotted as a function of excitation energy per one pulse. (b) Emission spectra from the VCSEL at various excitation powers are shown. The spectral linewidth drastically changed from 0.9 nm below threshold to less than 0.1 nm (resolution limit) above threshold. (CPD15, T. Someya *et al.*)

Fig.22 CW light output versus injected current characteristics. Threshold current (I_{th}) was 8 mA. Lasing spectra at 9 mA ($\sim 1.1 \times I_{th}$) is shown as an inset, indicating the lasing wavelength of 1.31 μ m. (CPD18, K. Mukai, *et al.*)

データを示していた。

高出力レーザーでは、様々な波長での高出力化について報告された。しかもほとんどのデバイスで電気変換効率が50%程度まで達しており、高効率動作を実現している。

全体の印象としては、特に目立ったものはないが、それぞれが着実に進歩しつつあるという感じである。ただ、気になるのは日本の研究機関の元気のなさであり、経済状況もあると思うが、活躍を期待したいものである。

(西山 伸彦)

Fig.23 Conduction band profile of two chirped SL active regions with the connecting injector under an applied electric field of 2.05×10^4 V/cm. The moduli squared of the wavefunctions and the two minibands into which the states are grouped are also shown. The lifetimes are determined by optical phonon emission and for the lowest state of miniband II we compute at cryogenic temperature $\tau_{II} = 0.5$ ps, while for the uppermost state of miniband I we obtain $\tau_I < 0.3$ ps, with a relaxation time between them of $\tau_{I,I} = 3.6$ ps. (JMA4, A. Tredicucci, *et al.*)

6. 波長変換素子

非線形光学結晶を利用した波長変換については、いくつかのセッションに分かれて報告があった。この分野の傾向として、紫外光発生に優れたCsLiB₆O₁₀ (CLBO), β -BaB₂O₄ (BBO), 可視から近紫外域の変換に適したLiB₃O₅ (LBO)などは、既に基本的な変換特性が調べられているので、実際にそれらを組み込んだシステムの報告が多く、赤外光領域では疑似位相整合型のperiodically poled LiNbO₃ (PPLN)やperiodically poled KTiOPO₄ (PPKTP)などを用いたOPOについての発表が多かった。ここでは「Diode-Pumped Neodymium Lasers」, 「Frequency Conversion I~III」, 「Ultraviolet Generation」, 「Nonlinear Optical Crystals」等のセッションから、材料を中心に興味を引いたものを紹介する。

オーストラリアのMacquarie大学からは、LiIO₃結晶の誘導ラマン散乱とLBOの第2高調波発生を利用した全固体黄色レーザー光源の報告があった(CMA3)。LD励起Nd:YAGレーザーの共振器内部に2つの結晶を挿入して、0.96 W (7kHz)の高出力を得ている。LiIO₃から発生する1次ストークス光の波長は1160nmで、LBOは温度調節によってその第2高調波を非臨界位相整合条件で発生させることができる。

ドイツのMax-Born-InstituteからKB₅O₈ · 4H₂O (KB5)結晶を用いた真空紫外光(波長: 166nm)の発生が報告された(Fig.24)。100fsのTi:sapphireレーザー(600μJ, 1kHz)を基本光源として、赤外光のOPG(1.15-1.6μm)と第4高調波(189-210nm)の発生を行っている。これらをKB5(5×5×0.5mm, y軸)に入射させ、和周波発生によって166-172nmの真空紫外光を得ている。この時のパルス幅は200-220fsである。KB5は実効非線形光学定数が0.04pm/Vと小さいものの、大

Fig.24 Normalized VUV spectra demonstrating the achieved SFG tuning range. Both the FH and the signal wavelengths were varied here to satisfy the condition for noncritical phase-matching along the y-axis. (CTuB4, V. Petrov, *et al.*)

きな複屈折率と近赤外から真空紫外にわたる広い透過領域を有するため、真空紫外域での波長変換が可能となる。

ドイツのKaiserslautern大学からCLBOを使った266nmの紫外光励起OPOの報告があった(CMG1)。発表では励起用紫外光源の開発にも触れており、基本波光源として、LD励起Nd:YVO₄レーザー(7ps, 82MHz, 27.4W)を用いて、LBO(25mm), CLBO(10mm)からそれぞれ第2, 第4高調波を発生させている。それぞれ71%, 49%の高い変換効率で、7.9Wの266nm光を得ている。出力の安定性は4.7W時、2時間以上の測定で4%以下である。この光源を用いて10mmのCLBOからのOPO実験を行っている。結晶中での励起光のウォークオフを避けるために、入射方向を共振方向から3°ずらしている。442-480nmと597-668nmの可視領域でのチューニングが可能で、135mWの励起光に対して26mWのシグナル光を得ている。

同じグループからBBOのOPOとその第2高調波発生も報告された(CTuB5)。励起光源はNd:YAGレーザー(1kHz, 11ns, 8.5W)の第3高調波で、2つのLBO結晶を用いて3.2Wの紫外光を発生させている。type-IIのBBO(7×5×0.5mm)を利用してOPOを行い、スペクトル幅の狭い(4cm⁻¹), 400-710nmの光を得ている。OPOの光からBBOで第2高調波発生を行い、205-355nmの連続波長可変を実現している(Fig.25)。この光源は分光や大気微量ガスの検知に十分利用できることである。

三菱電機の小島からは、高出力高繰返し全固体紫外レーザーの報告を行った(CTuB6)。自社開発のQスイッチLD励起Nd:YAGレーザーからの第2高調波100W(10kHz, M²~8)を基本光源に使用している。第4高調波(266nm)の発生には140℃に加熱した長さ15mmのCLBOを用い、20.5Wの高出力紫外光を得ている(Fig.26)。この時の変換効率は19.4%, パルス幅は46nsであった。CLBO素子の寿命については現在調査中とのことであった。

ウシオ電機の大迫からは、CLBO結晶の特性と応用について招待講演があった(CTuB7)。講演内容はこれまでに取り組んできた、ArFエキシマレーザー(193nm)代替用全固体光源の開発が中心であった。最近のトピックスとしては、

Fig.25 UV output power of the frequency doubled signal radiation of the BBO OPO pumped with 2.7 W of 355 nm pump radiation. (CTuB5, M. Peltz, *et al.*)

Fig.26 Average UV output power as a function of average green input power. (CTuB6, T. Kojima, *et al.*)

1W, 5kHzの196nm紫外光発生が挙げられる。システムはNd:YLFのMOPAと、Ti:sapphire, 5つの波長変換ステージから構成されている。可視, 近紫外光への変換にはLBOを, 紫外光の発生にはCLBOを用いている。Nd:YLF(1047nm)の第3高調波とTi:sapphire(785nm)の和周波によって241.6nm光を発生させ, Nd:YLFの残留基本波との和周波によって1Wの196.3nmを発生させている。高出力が得られた理由

として, 強い残留基本波(15W)を利用し, 最終段のCLBOを非臨界位相整合条件で使用したことが考えられている。

千歳科学技術大学の高岡らは, $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ 結晶 ($x = 0.474$) による非臨界位相整合条件での CO_2 レーザーの第3高調波発生について報告を行った(CWF57)。この結晶は温度調節によって9.2714-10.5910 μm の非常に広い波長域で非臨界位相整合することが明らかになった。精度の良い屈折率波長分散式(セルマイヤー方程式)や組成分散式についても発表があった。

中国のChenらのグループからは $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$ (KAB) 結晶の講演が予定されていたが, 今回はキャンセルであった(CFF1)。ダイジェストでは, Nd:YAGレーザーの第2, 第4高調波の発生が可能ことが確認されている。阪大の著者らのグループは, $\text{Gd}_3\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{O}(\text{BO}_3)_3$ (GdYCOB) 結晶の紫外光によるグレイトラック損傷の発生と, 結晶加熱による改善策について報告した(CFF2)。また, CLBO表面の耐レーザー損傷性の向上についての報告も行った(CFF6)。Arイオンビームのエッチングによって, 光学研磨工程で埋没した研磨剤を除去し, 紫外光(266nm)に対する素子寿命を改善している。

GdCOB系結晶については, 他に5件の発表があり, レーザー媒質をドープしたときの発振特性やセルフダブリングについての報告であった。一般的に, レーザー発振はYb:GdCOBの効率77%(CThJ5, フランス)のような高効率の特性が得られるが, セルフダブリングの変換効率を高くすることは難しいようである。単一素子としての魅力は持つものの, 実用レベルの光源にするには更なる改良が必要である。フランスのAugéらはNd:GdCOBのマイクロチップグリーンレーザー(共振器長5~8mm)の開発を試みたり, 自己和周波発生(1090+812→465nm)によるブルー光発生についての研究も行っている(CFF3)。(吉村 政志)

7. 高出力レーザー

Table 1に連続発振およびロングパルス動作における高出力レーザーの報告結果をまとめて示す。Yb:YAGで1kW以上, Nd:YAGで3kW以上の高平均出力動作が報告された。Yb:YAGの高出力動作に関しては, ローレンスリバモ

Table 1 High average power solid state lasers.

媒質	波長(μm)	出力	効率(光-光)	ビーム品質	講演番号	研究機関	特長
Yb:YAG	1.03	1.08kW(CW)	27.5%	$M^2 = 13.5$	CMF2	LLNL	2rod補償
Nd:YAG	1.06	3.3kW(平均)	35%	$M^2 \sim 185$	CMF5	東芝	ロッド
		3.6kW(平均)	-	$M^2 \sim 3.5$	LTuB3	TRW	スラブ
		1~3kW(CW)	-	$M^2 \sim 36$	LTuB2	Rofin-Sinar社	販売ベース
		120W(CW)	51% slope	$M^2 \sim 30$	CMF6	Stanford大	伝導冷却スラブ
		65W(CW)	43%	$M^2 \sim 1.7$	CMF3	Stuttgart	ディスク
Nd:YLF	1.05	100W(平均)	33%	$M^2 \sim 10$	CMF7	三菱電機	伝導冷却ロッド
Nd:YVO ₄	1.06	53.5W(CW)	27%	$M^2 \sim 1.7 \times 1.2$	CPD1	Q-peak Incorporated	側面励起
	1.34	24.5W(CW)	12%	$M^2 \sim 1.2 \times 1.2$			MOPA
Yb fiber	1.12	110W(CW)	58%	$M^2 \sim 1.1$	CPD11	SDL, Inc.	2重クラッド

ア国立研究所のE. C. Honeaらから1件報告された(CMF2)。このグループではこれまでホロー型のレンズダクトを用いた共振器内に配置可能な端面励起型Yb:YAGロッド(2mm ϕ)を1本用いた高出力レーザーの報告を行なっているが、今回2本のロッドを用いロッド間に旋光子を配置する熱複レンズの補償(熱複屈折の補償と等価)を行なうことで、出力1080W, M² 13.5という高出力、高輝度化を達成した。また、1本のロッドによる低パワー時の熱複屈折補償法として、昨年サザンプトン大から提案された1/4波長板を用いる方法も実証しており、励起入力1.8kW(出力100Wレベル)でも効果があることが示された。一方、Nd:YAGの高出力動作に関しては、東芝の高瀬らからロッドレーザーを用いた出力3.3kWのレーザーが報告された(CMF5)。ここでは、励起を行なうLDアレーのスロー軸方向をロッド軸と垂直に配置し、励起光のフローチューブに対する透過率を改善し、ファースト軸方向をロッド軸と垂直に配置した従来に比べ高い励起効率を実現している。この他にもレーザー加工のセッションで、日米欧でそれぞれ行なわれているレーザー加工プロジェクトにおけるNd:YAGレーザーの高出力

Fig. 27 Cross-sectional view of the edge-pumped slab laser geometry. The conductively-cooled slab is clamped in a water-cooled aluminum housing. Double-pass pumping is provided by a diffuse reflector below the slab. Indium foil is used to ensure a uniform contact between the Nd:YAG slab and the cooling surface. (CMF6, T. S. Rutherford, *et al.*)

動作が報告され、各プロジェクトの成果としてそれぞれで3kW以上の出力が報告された。特に、TRW社のスラブレザーでは、出力3.6kWでM²が3.5という高出力、高輝度動作が実現されている(LTuB3)。Yb:YAGとNd:YAGの比較という点では、MITのT. Y. Fanが招待講演(CMF1)で、概ねの高出力レーザー用途(出力<10kW)においては、Nd:YAGがYb:YAGに比べて優れた特性が得られるだろうとの知見を述べたのが印象的であった。

これらの固体レーザーの出力限界に向けての高出力競争以外では、伝導冷却方式による高出力レーザーがスタンフォード大学、三菱電機から報告され、伝導冷却による100W以上の平均出力がそれぞれ報告された。Fig. 27に、スタンフォード大のT. S. Rutherfordらから報告された励起構成を示す(CMF6)。Nd:YAGスラブのジグザグ伝搬の反射面をコーティングにより形成し、このコーティング面を金属面に熱伝導させ熱を奪っている。一方、励起光は入射開口の小さいファイバとし、これ以外の面を反射面とすることで、励起光をスラブ内に閉じ込め高励起効率を得ている。一方、ロッドを用いた三菱電機の柳澤らから報告された(CMF7)励起構成をFig. 28に示す。Nd:YLFロッドの周りに熱伝導率の高いMgOブロックを薄い液体層を介して熱接触させ、熱拡散器として用い、MgOブロックの広い面積を持つ側面から放熱することで冷却パスの熱抵抗を減じている。また、MgOブロックの周りに反射コートをし、励起光を閉じ込める構成で励起効率の向上を図っている。

Nd:YAGでは、100Wクラスのレーザーが数多く報告されるようになってきたが、これ以外の媒質においての高出力化も進んでいる。Nd:YLFでは、前述の三菱電機が2ロッドで100W以上、Nd:YVO₄では、MOPA構成(5ロッド)で50W以上、2ロッドを用いた発振器で35Wの高出力動作が報告された。Fig. 29に、ポストデッドラインペーパーでQ-Peak IncorporatedのK. J. Snellらから報告されたNd:YVO₄のMOPA構成を示す(CPD1)。側面励起されたロッド内をビームをずらしながら複数回レーザー光を通過させて空間的な励起分布とレーザー光の重なりを大きくする励起ヘッドを5個用いている。一方、Fig. 30は、Spectra-Physics社のW. L. Nighanらから報告されたNd:YVO₄の発振器構成である

Fig. 28 Cross sectional view of conductive-cooled Nd:YLF rod laser. (CMF7, T. Yanagisawa, *et al.*)

Fig.29 Schematic of the five gain module Nd:YVO₄ MOPA system. (CPD1, Kevin J. Snell, *et al.*)

Fig.30 Configuration of the fiber-coupled diode-bar-pumped Nd:YVO₄ laser. A periodic resonator is employed utilizing two "Z" building blocks. The total length is ~ 50 cm. (CMA1, William L. Nighan, *et al.*)

(CMA1). 15Wのファイバ出力励起光を4本用いて、2本のロッドを両端面励起している。端面励起においては、熱収差による回折損失がTEM₀₀モード出力を劣化させることが知られているが、ロッド中心に均一励起部分を作り、励起部分よりレーザービーム径を小さくすることで熱収差の影響を減じ、取り出し効率94%で35Wの出力を得ている。

結晶材料では無いが、ポストデッドラインペーパーで報告された2重クラッドYbファイバレーザーでの出力110W、効率58%の横基本モード発振は、今回のCLEOにおけるト

ピックスの一つである。Fig.31は、SDL社のV. Dominicらから報告されたファイバレーザーの構成である(CPD11)。出力45Wの高輝度励起光を偏波合成し、両端面励起する構成で180Wの励起光を、Ybファイバの170μm×300μmの矩形クラッドに入射している。共振器は、ファイバ端面におかれた励起光透過でレーザー光反射のダイクロイックミラー(DM1)と、クリープされた他端(反射率~4%)で構成している。驚いたことにシングルモードのコア径は9.2μmで、出力端面におけるパワー密度は連続波で300MW/cm²以上にもなっている換算となる。ファイバレーザーに関しては、レーザー加工のセッションで、日本のレーザープロジェクト(フォトン計測・加工プロジェクト)において開発中のkWクラスの側面励起型であるディスクファイバレーザーには多くの感心が寄せられるとともに、ポストデッドラインペーパーで、サザンプトン大のA. B. Grudininからやはり側面励起型が報告され(CPD26)、今後、ファイバレーザーが本当の意味で固体レーザーに競合する高出力レーザーとなっていくことを実感した。

高平均出力動作に対して、レーザー加工や高効率波長変換をターゲットに、高ピーク出力化の報告も数多くなされている。Table 2にQスイッチパルス動作における高出力レーザーの報告結果をまとめて示す。Fig.32は三菱電機の平野らから報告された(CMF4)高平均出力、高ピーク出力、

Fig.31 Layout for the high power fiber laser. The acronyms are: PBS-polarization beam splitters, HWP-zero-order half-wave plates, AL-aspheric lenses, and DM-dichroic mirrors. The upper left hand corner shows the lens and razor edge used for the M² beam quality measurements. (CPD11, V. Dominic, *et al.*)

Table 2 High average power Q-switched solid state lasers.

媒質	波長(μm)	平均出力	パルス幅(ns)	ピーク出力	ビーム品質	講演番号	研究機関	特長
Yb:YAG	1.03	183W/5kHz	73ns	500kW	M ² = 2.4	CMF2	LLNL	-
Nd:YAG	1.06	230W/32kHz	32ns	900kW	M ² = 1.6	CMF4	三菱電機	QCW励起 ロッド
		8kpps						
		550W/5kHz	150ns	700kW	M ² ~3	LTuB3	TRW	CW励起 スラブ
		1.25kW	-	2.5MW	M ² ~7	LTuB3	GE	MOPA
							FiberTek	
Nd:YLF	1.05	50W/150Hz	36ns	9.3MW	M ² ~2.5	CMF7	三菱電機	伝導冷却ロッド MOPA
Nd:YVO ₄	1.06	50.7W/50kHz	10ns	101kW	M ² ~1.7×1.2	CMF7	Q-peak	側面励起
	1.34	23.5W/50kHz	28ns	17kW	M ² ~1.2×1.2		Incorporated	MOPA

Fig.32 The experimental set-up used for Q-switch and green generation. (CMF4, Y. Hirano, *et al.*)

高輝度を目指したNd:YAGレーザーの構成である。Qスイッチ動作において高効率を得る高繰返し条件において、低熱負荷条件でレーザー媒質の利得をあげ高ピーク出力(短パルス幅)を得るために、励起LDとしてQ-CW LDを用い、平均出力220W, ピーク出力0.9MW, M^2 1.6を得ている。

(平野 嘉仁)

8. 原子光学

量子エレクトロニクスおよびレーザー分光の基礎分野では近年中性原子のレーザー冷却とそれを用いたボーズ・アインシュタイン凝縮の研究が非常に注目を集めている。ここ数回のCLEO/QELSやIQECでも常にホットな研究成果が報告されてきた。今回のQELSのオールセッションとして、ボーズ凝縮のセッション2つ、原子光学、光格子等がもうけられた。原子光学関係の口頭発表は33件で内9件が招待講演であった。ポスターは12件であった。論文数はやや少な目であったし、実験の最前線の報告も少なかったように思う。この分野の研究者のメインの発表の場がAPSのMarch Meetingや原子分光国際会議などに移っているのではないと思われる。ポストデッドラインセッションでも原子光学関係の発表は2件のみであった。ポストデッドライン論文の一つは東大のグループによるもので昨年末に本邦初のボーズ凝縮を実現したグループからの干渉実験の報告であった。これについては後で詳しく触れる。ここでは、今回の会議の講演の中からいくつか重要な成果について以下に紹介する。

まずボーズ凝縮のセッションの最初の講演はMITのKleppnerによる水素のボーズ凝縮に関する報告(題名は“Observation of Bose-Einstein condensation in atomic hydrogen by laser spectroscopy”)であった。水素のボーズ凝縮の実現には実に22年を要しついに昨年8月に成功した。水素原子という最も単純な原子でのボーズ・アインシュタイン凝縮の実現は既に実現されているアルカリ原子とはまた違った意味合いのある歴史的な大きな業績であると感じた。講演では水素のボーズ凝縮に至る過程に加え、分光学的に凝縮原子をどのように観測するかということについて詳しい説明が行われた。ボーズ凝縮の観測には1S-2Sの2光子遷移が用いられた。ボーズ凝縮の観測には原子の密度の測定が必須である。ここでは原子密度に依存した共鳴のシフトをkHzオーダーで精密に捉えることで非常

に定量的に密度を評価できることが示された。これは紫外領域での高精度の分光技術に基づくもので、今世紀後半でのレーザー分光技術の集大成ともいえるものである。ボーズアインシュタイン凝縮した水素原子はアルカリ原子の場合とはかなり違ったパラメータ領域にある。原子数は 10^9 と桁違いに大きいし、温度は40 μ K程度であり、アルカリ原子のサブ μ Kとは大きく異なる。この意味で水素のボーズ・アインシュタイン凝縮の実現は低温物理学に新たなインパクトをもたらすことは間違いなく、今後の展開が楽しみである。尚実現に至るまでの解説はPhysics Today 51 (邦訳パリティ 14 (1999) 43)にある。

ボーズ凝縮セッションのつづいての実験報告はワシントンNISTのW. D. Phillipsらのグループから行われた(題名は“Atom optics with Bose-Einstein condensation”)。彼等のグループは昨年1月にナトリウム原子のボーズ凝縮に成功して以来、光定在波とボーズ凝縮体との相互作用に関する数多くの精力的な研究をすすめてきている。今回の発表はその総合報告ともいえるもので、ボーズ凝縮体のコヒーレント回折現象に始まり、それを利用した高指向性原子レーザーの開発、非線形原子波光学の実現といった全く新しい研究分野の開拓がなされた。発表時間の関係で報告はされなかったが、彼等のグループは原子レーザーのコヒーレント長の測定にもすでに成功している。グループはまず生成したナトリウムのボーズ凝縮体に短時間光定在波を照射することで原子を回折させ、凝縮体を空間的に複数個に分裂させた。これは定在波を形成している対向するレーザー光によって異なる運動量状態間の誘導ラマン遷移が引き起こされ、原子が光子反跳運動量をうけとった結果と解釈するとわかりやすい。ボーズ凝縮体は10 μ m程度の長距離にわたってコヒーレンスを維持しているため、光定在波を照射することはacシュタルク効果によって周期的位相分布を原子波動関数にマッピングすることと同じである。したがってこの実験は一種の原子ホログラフィーであると彼等のグループは主張していた。位相をマップした結果が単なる回折だということで、ホログラフィーという言葉に抵抗を感じる者もあるかと思うが、彼等はこの技術を延長してソリトンやボアテクスを生成することまで考えており、ホログラフィーという一般化された概念に基づいて系統的に研究を進めるやりかたにはうならされる。

彼等は次のステージとして、進行定在波を凝縮体に照射した場合に起こる共鳴回折現象を観察した。定在波をある一定の速度で進行させると、原子の分散関係によって決まる共鳴条件がみたされ、その結果として原子に対して決められた方向に決められた運動量を与えることが可能となる。先程の回折に対して、共鳴ブラッグ回折を起こしたと考えるとわかりやすい。この高い指向性に着目して、彼等は磁場トラップ中のボーズ凝縮体をブラッグ回折させることで原子レーザーを実現することを考えた。進行定在波を形成する二つのレーザー光の偏光と差周波数を制御することで、原子の回折と同時に原子のスピン状態までも変化させ、磁場トラップから好きな方向に原子を解放しコヒーレントな原子ビームを作ること成功した。原

子レーザーは現在MIT Ketterleグループ、Max-Planck Hanschグループ、Yale Kasevichグループ、そしてNIST Phillipsグループの計4グループで成功しているが、原子の出射方向と運動量とを重力とは無関係に自由にかつ正確に制御できるタイプの原子レーザーはNISTグループのもののみである。原子レーザーを用いて干渉計を組み、重力測定をおこなったりジャイロを構築するといったことを行う際、原子レーザーの出射方向を自由に換えられるということが本質的な意味を持ってくる。また彼等の実験では、磁場トラップ中の凝縮体からわずかずつ原子が光反跳運動量をうけとって射出される。このような条件下では、磁場トラップ中で蓄えられたmean-field斥力相互作用が空間的に等方的に解放されず、原子が射出された方向に集中的に解放される。そのため、原子レーザーの断面方向の運動量幅は実に $0.004\hbar k$ という驚異的な値となった。これは原子レーザーの広がり角度として数mradに対応し、商品化されている光レーザーのそれとほぼ同じ性能を与える。なおブラッグ回折に関する解説はM. Kozuma *et al.*: Phys. Rev. Lett. **82** (1999) 871に、原子レーザーに関する解説はE. W. Hagley *et al.*: Science **283** (1999) 1706に詳しい。

彼等の次なる実験ステージは、こうした高い指向性を持つコヒーレント原子波束を利用して、光でいうところの非線形光学、つまり非線形原子波光学を実現しようというものであった。具体的には4原子波混合を実現した。光を用いて4光波混合を行う際には媒体が3次の非線形性を持つことが必要となる。彼等は凝縮体の高密度性から生じるmean-field相互作用を3次の非線形として利用することを考えついた。これは次のように考えるとわかりやすい。二つの原子波束が対向方向からお互いにおつかりあったとする。波束間にコヒーレンスがあれば、波動関数が互いに干渉することで、原子波束が重なった領域に周期的な原子密度分布の変化が生じる。つまり原子回折格子が形成される。ここに3番目の原子波束を入射させたとして、通常の冷却原子のように原子密度が低ければ、3番目の原子波束は何もなかったかのようにこの原子回折格子を素通りしてしまう。しかしボーズ凝縮体のように密度が高いと、原子回折格子において原子密度の高い部分ではmean-field斥力相互作用が強くなり、そこに入射した原子波は周期的な斥力ポテンシャルを感じることになる。そのため原子波の回折が生じ、4番目の波束がうまれることとなる。彼等はボーズ凝縮体をブラッグ回折させることで、3つの異なる運動量を持つ原子波束を生成し互いに混ぜあわせた。波束の運動量と進行方向は位相整合条件をみたすようにあわせられた。その結果、4番目の波束が理論と一致する方向と運動量で射出されるのを観測した。彼等のグループは、同様の手法を用いてSHGや6原子波混合などを行うことも考えたようである。しかしながら原子系を用いた場合にはその対称性ゆえにSHGを行うことは残念ながらできない。また6原子波混合を行うには、グロスピタエフスキー方程式でサポートされる以上の高次の項の寄与を期待しなければならないが、このような高次の項の影響がでるとしたらかなりの高密度のボーズ凝縮体が必要となる。しかしそのような高密度状態では3体衝突が起こって凝縮相自

体が維持されなくなってしまうため、これもまた観察が難しいようである。なお4原子波混合に関する解説はL. Deng *et al.*: Nature **398** (1999) 218に詳しい。

ボーズ凝縮に関する実験報告として最後に、昨年12月にRbのボーズ凝縮に成功した日本の久我グループによるものを紹介したい。この結果はポストデッドラインに発表された。題目は("Atom wave interferometer for a Bose-Einstein condensate with Bragg diffraction")であった。彼等はNISTグループによって開発されたブラッグ回折の技術を利用して100%のコントラストを持つマッハツェンダー原子波干渉系を構成した。ボーズ凝縮を一回生成するのにかかる時間は、グループによってもまちまちだが、数十秒から数分程度である。したがって原子ビームの場合と異なり、ボーズ凝縮体を利用した干渉計では、原理的に考えて干渉プロットを作成するのに膨大な時間がかかってしまう。そのため利用価値が少ないと考えがちだが、彼等のグループは従来の原子干渉計の延長としてこの方法を評価しているわけではなかった。この干渉計を利用することで凝縮体の空間位相分布といった、これまで検出が難しかった物理特性の観察が可能となるとというのが彼等のグループの主旨であった。アルカリ原子のボーズ凝縮体を持つ物理的特性のほとんどは、光吸収2次元イメージから測定される。しかしボーズ凝縮体の大きさが $10\mu\text{m}$ 程度と非常に小さいこと、そしてイメージングの空間分解能が数ミクロンしかないことから、すべての情報を単なる吸収イメージから得ようとするには限界がある。例えばボアテックスの持つ角運動量などは、ボアテックスの核の大きさが小さいために通常のイメージングでは検出が困難である。しかし干渉を利用することで情報をイメージングの分解能内の空間構造にやきなおし、定量的にかつ正確に測定することが可能と久我グループでは考えている。

彼等の干渉計の原理は次のようになっていた。ブラッグ回折では進行定在波を照射する時間をコントロールすることで、運動量0の状態から運動量 $2\hbar k$ の状態へと回折される原子のポピュレーションを自由に調整することができる。彼等は、照射時間の異なるブラッグ回折をミラーとビームスプリッターとして用いた。 $\pi/2$ パルスに相当するブラッグ定在波をあてることで、原子を0運動量と $2\hbar k$ 運動量の50%ずつの重ねあわせにした。一定時間待つと2運動量状態は、それぞれの速度で空間的に分離していく。つぎに π パルスをあてることで運動量を0から $2\hbar k$ 、 $2\hbar k$ から0へと交換する。分離された波束は再びお互いに近づきはじめる。完全に二つの波束が重なったところで、最後にもう一度 $\pi/2$ パルスをあてることで、原子をもとの0運動量状態へと戻した。干渉計が実現されていることを確かめるには、最後に照射する $\pi/2$ パルスの定在波の位相をずらしながら、2運動量状態のポピュレーションの変化をみればよい。彼等は位相シフトにともなってポピュレーションが正弦波的に変化することを観察することに成功した。

この1,2年の間に最も困難とされていたボーズ凝縮の実験が世界的に普及してきた。現在のところ、これまでレーザー冷却原子で行われてきた原子光学の実験を極限までつきつめようという動きが主なようである。しかし原子

光学は基本的に原子の持つ1次のコヒーレンスを利用したものであり、これまでのレーザー冷却の歴史と同様の長い時間、こうした研究が続くとは思えない。今後はボーズ凝縮体を利用した量子コンピューティングなどといった、まったく新しい分野の開拓が急速になされていくのではないだろうか。(五神 真, 上妻 幹男, 鳥井 寿夫)

9. 超高速光電子デバイス

CLEO'99における超高速光電子デバイスについて報告する。関連する主なセッションは、(1) Ultrafast Opto-Electronics (CTuL), (2) Terahertz Optoelectronics (JThA), (3) Terahertz (JThC, JThD), (4) Photonic A/D Converters and Terminal Processing (CtuN)である。会議の傾向として、高速光通信に直結するデバイス・システムに関する発表は、OFC (Optical Fiber Conference)へと集約されて減少傾向にあるが、新たにTHz(テラヘルツ)に関する3つのセッションがQELSと共催されるなど、テラヘルツとその応用に関する研究発表が大幅に増大した。本章では、THzの発生と検出、高速光スイッチング技術、デバイス応用について報告する。

9.1 THzの発生と検出

発生に関しては、応用を目指しての高輝度THz光源の研究開発が進んでいる。Ping Gu(通信総合研究所)らのグループは、InSbからの光励起THzの0.23Tまでの磁場依存性を測定した(Fig.33)。InSbは、InAsに対して約3倍の移動度を有し電子の有効質量が約半分である。従って、ローレンツ力による光励起キャリアの加速度が大きくなることから、磁場印加時のTHz電磁波の放射強度の増大が顕著になる。0.23Tの磁場を加えた時の放射強度は、InAsの場合の約2倍であることが報告された。S. Izumida(分子科学研究所)らのグループからは、磁場印加によるTHzスペクトル制御の発表(JThA4)において、永久磁石を利用した手のひらサ

Fig.33 Magnetic field dependence of the radiation power for the horizontal (a) and vertical (b) components as well as the sum (c) of the two components. (JThA5, P. Gu, *et al.*)

Fig.34 Measured output characteristics of idler waves from LiNbO₃ and MgO: LiNbO₃ OPOs at a fixed pump energy (38 mJ). (CThuH1, J. Shikata, *et al.*)

イズの高輝度THz発生装置の紹介がなされた。手のひらサイズにもかかわらず、1T以上の磁場を実現しており、小型高輝度THz光源の実用化へ向けて大きく前進した。J. Shikata(東北大学)らのグループは、MgOをドープすることにより、OPOによるLiNbO₃からのTHz電磁波の出力を4倍にまで高めることに成功した(CThuH1)。測定結果をFig.34に示す。励起光の入射角度を調整することにより、0.9~3.0THzの波長可変のTHz光源を実現している。

検出に関しては、簡便・高感度・高帯域という点から、チタンサファイアレーザーとZnTe結晶を組み合わせた電気光学サンプリング法による測定が様々なグループにより行われた。Q. Chen(Rensselaer Polytechnic Institute)らのグループは、信号検出のための変調方式を強度変調から位相変調にすることにより、2倍の信号強度の増大を得た(JThA2)。推定されるS/Nは30dB以上であり、紙幣の透かし認識への応用を行った(Fig.35)。一方、G. Gallot(Oklahoma State University)らのグループは、ZnTeの結晶厚さとカットオフ周波数のトレードオフについての講演を行った(JThD1)。測定結果の定量的な解析を行うためには、結晶のfilter functionを考慮する必要があると、5THz以上の測定には結晶厚0.1mm以下が必要との計算結果が示された。

Fig.35 THz images of watermark in (a) 100 U. S. Dollar, (b) 100 Germany Mark, and (c) 20, British Pound. (JThA2, Q. Chen, *et al.*)

9.2 高速光スイッチング技術

光スイッチング技術としては、R. Takahashi (NTT光エレクトロニクス研究所)らのグループから、完成度の高い光・光スイッチの発表がなされた(CThF4)。素子の構成をFig.36に示す。ベリリウムを添加したInGaAs量子井戸のキャリア再結合寿命がフェムト秒領域であることを利用した光・光スイッチである。ポンプ光入射時の量子井戸の高速可飽和吸収特性を利用して、シグナル光を切り出すノーマリー・オフ型の光・光スイッチである。偏波無依存にするために、シグナル光を2つの偏光成分に分離して試料に入射する。各偏光成分に対応する試料上の2つのビームスポットに対して、光・光スイッチング動作を行った後、両成分を合波して出力する。切り出されたシグナル光のパルス幅は300fsであり(Fig.37)、ポンプ光エネルギー10pJにおいてOn/Off比30dBが得られている。また、On/Off比がシグナル光の偏光状態によらず30dBが得られている。K. T. Hall (MITリンカーンラボ)らのグループは、100GHzにおける光DMUXの実験を行った(CTuW1)。クロック光パルス(12.5GHz)とデータ光パルス(100GHz)を、半導体光増幅器(SOA)中での非線形干渉(4波混合)を利用する方式である。TOAD型とUNI型(Fig.38)の2種類について実験を行っ

Fig.36 Experimental setup for enhancement of on/off ratios and polarization insensitivity using spin polarization. The inset represents a schematic structure of the device. (JThF4, R. Takahashi, *et al.*)

Fig.37 Experimental results of on/off ratios as a function of pump pulse energies. The inset represents a time-resolved switching characteristic. (JThF4, R. Takahashi, *et al.*)

Fig.38 Schematic drawing of the (a) TOAD and (b) UNI. In these experiments the nonlinear switching elements are semiconductor optical amplifiers (SOA's). (CTuW1, K. H. Hall, *et al.*)

た。TOAD型では、クロック光パルスとデータ光パルスがSOAに逆方向から入射するのに対して、UNI型が同じ方向からSOAに入射する。TOAD型では、干渉計としてのSOAの長さにより100GHzにおける符号誤り率(BER)が 10^{-4} 以下に下がらないのに対して、UNI型は100GHzにおいても実用レベルであるBER 10^{-10} レベルを実現している(Fig.39)。

9.3 デバイス応用技術

受光素子の高速化、大出力化のためには、暗電流の低減と印加電圧の向上が望まれる。更に、伝送線路の高周波特性の向上も受光器からの信号取り出しの観点からも重要である。T. Itatani (電子技術総合研究所)らは、光吸収層下部に電流ブロック層を導入することにより、キャリアの実効的な走行距離を低減して電子増倍現象を抑制することにより、暗電流の低減と素子耐圧20V以上を実現した(Fig.40)。素子のインパルス応答は4V印加時に800fsと高

Fig.39 Experimental results of the switching operation. The plots show the 12.5 Gb/s baseline (solid circles) as well as the results of demultiplexing a 12.5 Gb/s data stream from a 25 Gb/s data stream (squares), a 50 Gb/s stream (triangles) and a 100 Gb/s stream (hexagons). (CTuW1, K. H. Hall, *et al.*)

Fig.40 IV characteristics of the photoconductive switch. (CTuL2, T. Itatani, *et al.*)

Fig.41 Schematic drawing of the device. A coplanar stripline transmission line is embedded in a multi-layer polymer structure. The acrylate layers are used to minimize radiation losses. (CTuL1, A. Nahata, *et al.*)

速応答を実現している。A. Nahata(Allied Signal Inc.)らのグループは、放射損失を抑えるために、有機材料である

Fig.42 Temporal waveform observed with the excitation beam (a) centered between the transmission line and (b) 25 μm outside of the transmission line structure. The distance from the generation to sampling points is $\sim 125 \mu\text{m}$. The waveforms are offset from the origin for clarity. (CTuL1, A. Nahata, *et al.*)

Acrylateで挟んだ導波路を作製し(Fig.41),そのインパルス応答をEOサンプリング法により測定した(CTuL1). 125 μm 伝搬した点におけるインパルス幅は170fsと非常に短いものであり(Fig.42),放射損失の抑制が高周波伝送線路の広帯域化に有効であることを示した。M. Nagel(RWTH, Aachen)らのグループは、EOサンプリング法を用いてミリ波ストップバンドフィルターの評価を行った(CTuL4)。電界の空間分布の測定は、これまでの純電気的な方法では困難なことから、EOサンプリング法が、ミリ波・マイクロ波領域でのデバイス評価・設計支援ツールとして今後応用されることが期待される。(板谷 太郎)