

# CLEO/IQEC '98 の会議報告

## 「新レーザーと新光学材料」

分子科学研究所  
 猿倉 信彦

### Report on the CLEO/IQEC '98

**Nobuhiko Sarukura**

*Associate Professor, Laser Research Center, Institute for Molecular Science*

#### 1. はじめに

本年、5月3日から8日まで、米国サンフランシスコで、米国光学会 (OSA) 主催の CLEO/IQEC '98 が開かれた。ご存じのように、CLEO ではレーザーとレーザー応用に関する工学的研究報告が主であり、一方、IQEC では、理学的研究報告が主である。両会議とも光エレクトロニクスの広い分野とトピックスを対象としているだけに、10 近いパラレルセッションになっており、複数のトピックスに関する情報収集を位図した場合、かなりセッションの移動がきついが、それだけに高密度の新情報が収集可能であり有意義であった。

#### 2. 10 フェムト秒台の極短パルスレーザー光源の新展開

3年ほど前から、10 fsec 未満の極短パルスレーザー光源が、色々出てきているが、パラメトリックプロセスを用いた更なる波長領域の拡大が極短パルスレーザー光源の今年の新展開で

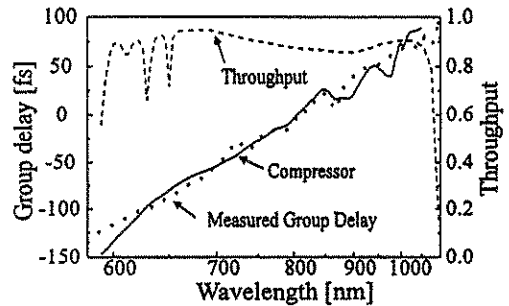


図1 (CThJ7) The measured group delay of the white-light continuum as derived from SHG FROG measurements (dots), the group delay (solid line), and throughput (dashed line) of the three-stage compressor.

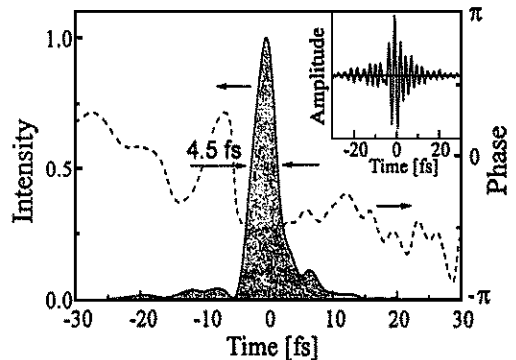


図1 (CThJ7) The intensity profile (solid line) and the phase (dashed line) of the compressed 4.5-fs pulse retrieved via SHG FROG. The real part of the electric field is shown in the inset.

あろう。オランダの Wiersma らは (CThJ7, 図1), キャビティダンプの 10 fsec チタンサファイヤレーザーを石英ファイバーによるパルス圧縮の際, 分散補償を緻密に行うことにより (図1上), 4.5 fsec の極短パルスを得ている (図1下)。また, パラメトリック増幅による極短パルスの発生に関しては, イタリアの De Sil-verstri ら (CME5) と東大の小林らのグループ (CPD11) が, 再生増幅後のチタンサファイヤレーザーからの 100 fsec, 1 mJ 程度の極普通の励起光を, 白色光のパラメトリック増幅に用いる際に, BBO に斜入射する事 (図2) により, 位相整合可能な利得帯域幅を広げて 10 fsec 程度の可視域の極短パルス発生に成功し

ているが, 東大の小林グループは, 励起光を斜入射させるだけでなく波面の空間傾きを補正するプリズムを導入することにより (図3, TP), 出力パルスの空間傾きを取り除くことに成功しておりパルス幅も 6.5 fsec とイタリアグループにまざっている。スイス工科大の Keller らは (CThC5, 図4), 半導体非線形ミラー, チャープ補償ミラー, 位相補償プリズム対を駆使したモード同期チタンサファイヤレーザーから 6.5 フェムト秒の極短パルスの発生に昨年成功しており, レーザー発振器から直接発生では世界最短記録であるが, 同じ発振器で 700 nm から 1000 nm の波長可変 30 フェムト秒パルスを得ている。

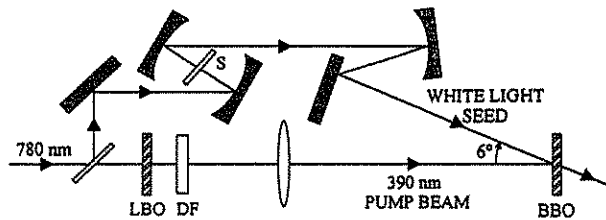


図2 (CME5) Setup for the noncollinear OPA. S: sapphire plate; DF: dichroic filter.

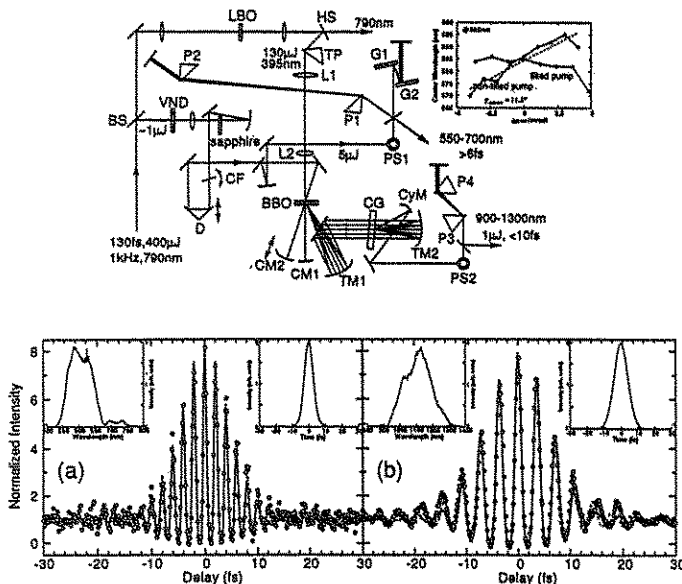


図3 Tunable sub-10-fs pulse generator

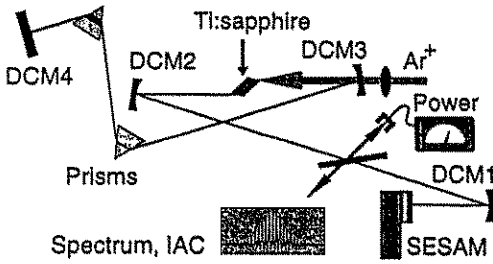


図4 (CThC5) Ti: sapphire laser, pumped by 7 W (all lines) of an Ar<sup>+</sup> laser. The cavity is formed by double-chirped mirrors (DCMs) and fused silica prisms, separated by 35 cm. The Ti: sapphire crystal is 2.3 mm thick with 0.25 wt.% doping. The output is characterized in terms of spectrum, interferometric autocorrelation, and power.

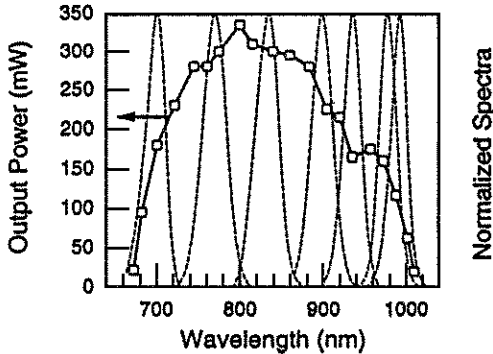


図4 (CThC5) Measured cw output power (squares) and typical pulse spectra (dashed curves) versus wavelength. The power is measured at one of the two laser outputs, the spectrum at the other (see Fig. 1).

### 3. ガラス材料を用いた超短パルスレーザー光源の新展開

100 フェムト秒程度の全固体モード同期レーザーの開発も、より簡便化を指向して依然続いており、その際、新ガラス材料が様々な形で重要な役割を果たしている。MIT の Fujimoto らのグループは過飽和吸収体として半導体ドープガラスや金属コロイドドープガラスを用いてモード同期チタンサファイアレーザーを構成した (CThC4, 図5)。スイス工科大の Keller ら

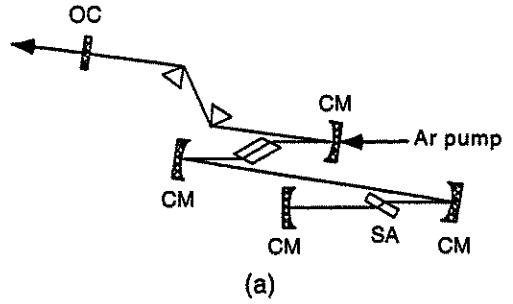


図5 (CThC4) (a) Cavity schematic: OC, output coupler; CM, curved mirror; SA, saturable absorber. (b) Saturable absorber structure: CG, colored glass; G, glue; S, substrate.

は、Nd や Yb ドープのガラスレーザーで、以前に彼女らが考案したライン集光により熱の問題を軽減し、モード同期平均出力 1 W を 20 W 励起で達成している (CThP3, 図6)。また、ミシガン大の Mourou らのグループは、Yb ドープのガラスの再生増幅器から 100 mJ ものエネルギーを得ている (CW12)。

また、米国のイムラからは (CThJ5, 図7), Er ドープファイバーでチャープパルス増幅システムをくみ、平均出力 300 mW, パルス幅 300 fsec, 繰り返し 5 MHz, 780 nm の第二高調波を得ている。これは実効的に、市販のモード同期チタンサファイアレーザーと同程度に近づいており、真にターンキーシステムとして用いることのできるフェムト秒レーザーへの今後の発展が期待される。その際、前年度開発された、QPM パルス圧縮器 (LN の QPM 素子でドメイン反転間隔を変調し第二高調波発生とパルス圧縮を同時に可能とした素子) とクラッド励起の Er/Yb ドープファイバー増幅器を用いたのがこのような優れた特性のキーテクノロジーとなっている。Er ドープファイバー, Yb ドープガラスなど何れにせよ、新ガラス材料が次

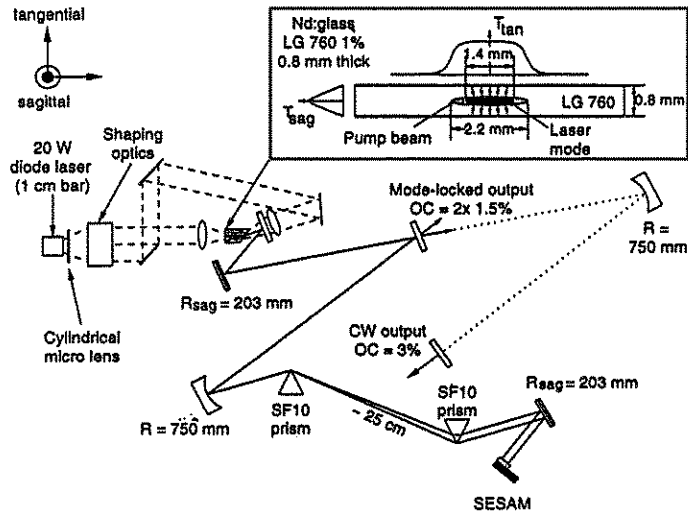


図6 (CThP3) Schematic setup of the high-power Nd: glass laser. Solid lines represent the beam in the mode-locked cavity, dotted lines indicate the cw laser setup.

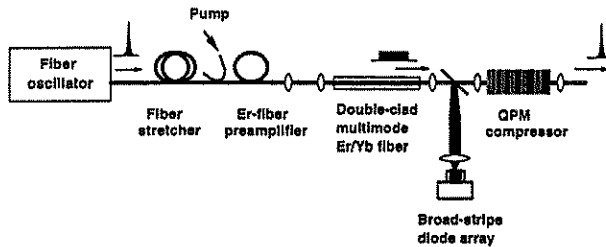


図7 (CThJ5) High-power compact Er/Yb fiber CPA system using a chirped QPM-grating compressor.

世代の超短パルスレーザー光源において極めて重要であることは間違えない。

#### 4. 新固体レーザーなどのトピックス

新固体レーザーのトピックスを列挙する。阪大の佐々木らのグループは、GdYCOB という新ボレート結晶を育成し、Nd:YAG レーザーの3倍波をノンクリチカルに位相整合し発生出来ることを報告した (CWG2, 図8)。これは、Nd:YAG レーザーの4倍波, 5倍波における彼らのCLBOと同様に重要な発明である。またその他の紫外レーザー関連の研究としては、Nd:YAG レーザーの5倍波励起の新レーザー媒質 Ce:LLF を用いたサブナノ秒全固体紫外

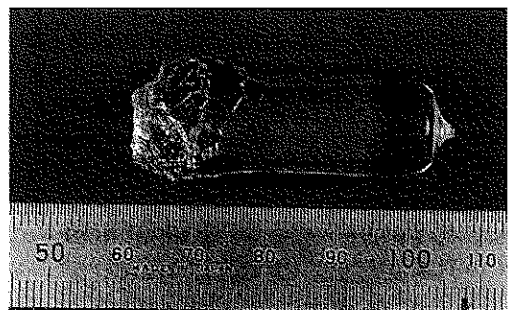


図8 (CWG2) Single crystal of  $YCa_4O(BO_3)_3$  (YCOB) grown by the conventional RF-heating Czochralski method.

レーザー光源も分子研の著者らのグループから報告された。(CWF41, 図9\*) 半導体レーザー励起固体レーザーの報告としては、三菱電機

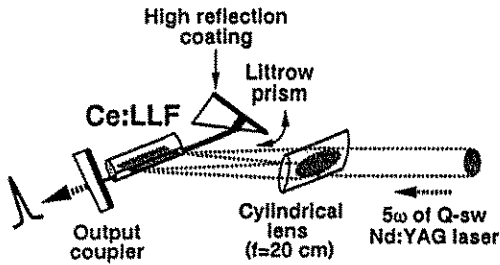


図9 (CWF41) Short-cavity, tilted-incidence-angle ( $\theta=70^\circ$ ) transverse pumping tunable Ce:LLF laser optical layout. The pumping pulse was focused by a 20-cm focal length cylindrical lens that was also tilted so that the cylinder generatrix was parallel to the side window of the laser crystal.

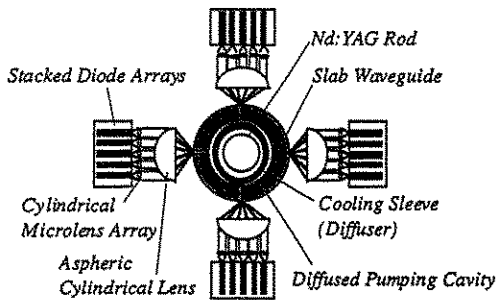


図10 Cross sectional view of high pump power, low aberration pump module.

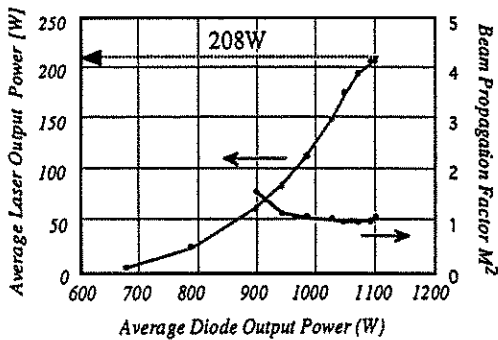


図10 Diode output average power dependence of output average power and  $M^2$ .

の平野らのグループは、208 W の TEM00 の出力を、1.1 kW 半導体レーザー励起 Nd:YAG レーザーから得ており (CPD1, 図10) 好評であった。また、昭和オプトロニクス

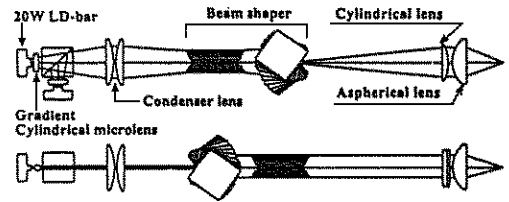


図11 (CThA1) Schematic of focusing arrangement with stacked-glass plate beam shaper.

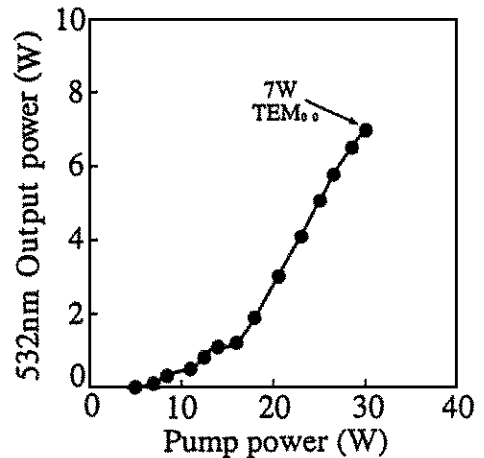


図11 (CThA1) Input-output data of intracavity-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser. 7 W, TEM00 green light was obtained for 30 W pumping power.

沢らのグループは新考案のビームシェイパーを半導体レーザーの集光光学系に用いることにより共振器内 SHG 発生 Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーから 7 W の TEM00 の出力えており (CThA1, 図11), 米国スペクトラフィジックス社のミレニアとほぼ同等の性能を実現しており, 国内レーザー装置産業の発展を予感させる。

レーザーの加工应用に関する特記すべき報告として、ドイツのハノーバーのグループからの超短パルスレーザーによるアブレーションの実験の報告によると、超短パルスレーザーを用いることにより、熱による加工ばけの問題を既知のように軽減出来るだけでなく、レーザーの偏光を円偏光にすると、溝方向により各偏光成分の反射率の差で生じる加工不均一が解消される

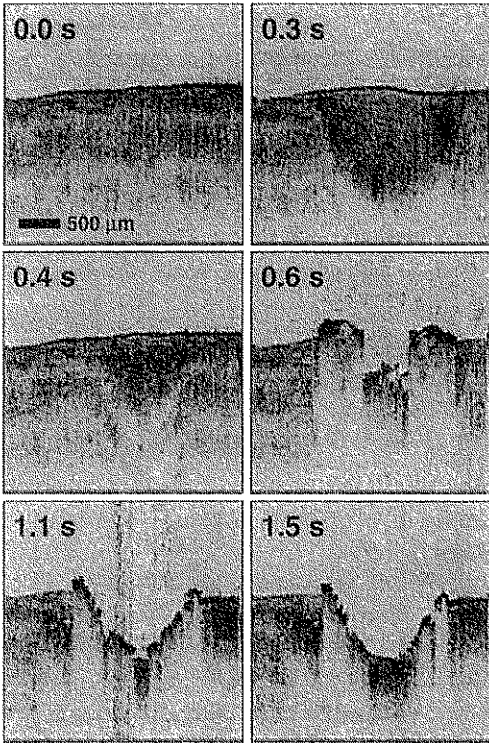


図 12 (CTuL2) OCT image-guided surgical ablation. Unexposed tissue at 0.0 s followed by rapid thermal heating (0.3, 0.4 s) and finally mechanical disruption, carbonization, and crater formation (0.6–1.5 s).

という実用上重要な報告があった (CFD3)。光計測に関する重要な報告では、MIT の Fujimoto らのグループがかねてから開発していた光コヒーレント断層撮影装置 (optical coherent tomography) が、レーザーメスを用いた手術のリアルタイムモニターとして使用可能であることを示した報告があり (CTuL2, 図 12), 大きなレーザーや光計測技術の医療応用への更なる発展が期待される。

5. 超短パルスレーザー誘起 THz 電磁波光源の物理

超短パルスレーザー光を誘電体や半導体に照射すると THz 電磁 (遠赤外線, あるいは, サブミリ波) がはっせいすることは, Blember-

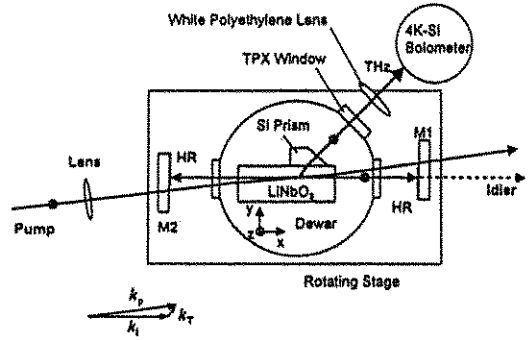


図 13 (CThY2) Schematic diagram of the experimental apparatus. Inset shows the noncollinear phase-matching condition.

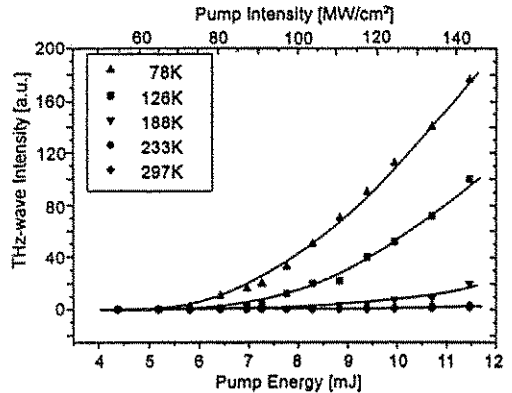


図 13 (CThY2) Measured variation of the THz-wave output with input pump energy at various temperatures.

gen のころからしられており, その後, Auston らにより精力的に研究された。しかしながら, 当時, 励起用超短パルスレーザー光源は, 扱いが悪い上に出力の小さい色素レーザーであったために研究の広がりは一今一つであった。しかしながら, 1990 年以降, 扱いの良い高出力のモード同期チタンサファイアレーザーが一般的になると実験が大幅に容易になったためか, レーザー誘起 THz 電磁波の研究や, THz 領域の分光光学や画像計測応用実験が盛んになってきており完成度の高い研究が数多く報告された。この様な研究を進めるためには, 遠赤外や THz 電磁波領域での, より高出力かつ

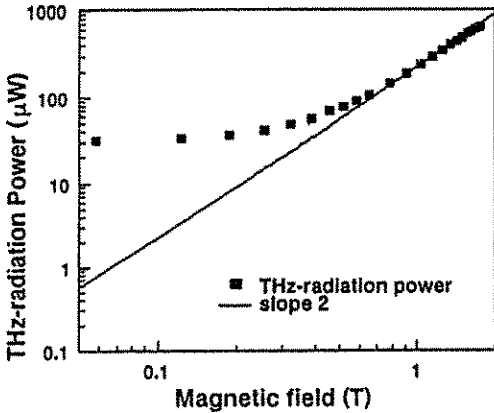


図 14 (CTuB5) Magnetic field dependence of terahertz-radiation power. Terahertz radiation from In As (solid squares) increased dramatically as magnetic field increased. The solid line indicated slope 2.

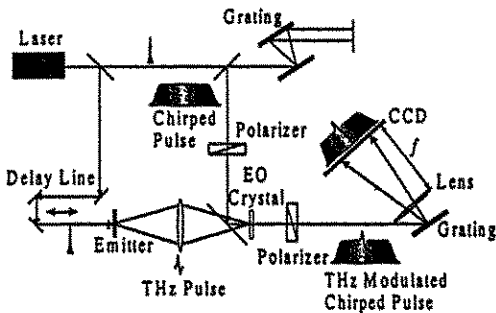


図 15 Schematic of experimental setup of electro-optic measurement with a chirped optical probe beam.

簡便な光源が必要となる。

今回の CLEO/IQEC から THz 電磁波に関連する印象的な研究を幾つか紹介する。東北大学の伊藤らのグループは、LN のパラメトリック発

振器を低温に冷やすことにより、フォノンの吸収を低減させ出力の増大を実現している。(CTuY2, 図 13\*) また、通総研の阪井らのグループは、超伝導体を用いた THz 電磁波発生素子におけるメモリー効果を報告している (CTuB6)。分子研の著者らのグループは、強磁場中に置いた InAs 半導体から、テラヘルツ電磁波の発生と、磁場により THz 電磁波の偏光が劇的に変化することを報告した (CTuB5, 図 14\*)。また、米国の Zhang らのグループは、ZnTe を用いた EO 素子を用いて、チャープしたパルスで THz 電磁波を検出することにより、単一ショットでのパルス波形の計測を可能とした。(CPD9, 図 15\*)

## 6. まとめ

ここ数年で飛躍的に進歩した、10 フェムト秒領域の超短パルスレーザー光源の進歩は、目を見張るものがある。また、ファイバーレーザーベースの超短パルスレーザー光源も、応用上きわめて重要になると考えられる。さらに、超短パルスレーザー光源の一般化により推進されたレーザー誘起 THz 電磁波の研究の発展や、THz 電磁波を用いたイメージング技術などの工学的応用のさらなる展開が今後期待されるであろう。これらの研究の新展開を支えている原動力は、様々なガラス材料に代表される新光学素子であり、会議に参加して、これらの研究を我が国でももっと活発化すべきだと感じました。