コンファレンスレポート

第13回量子エレクトロニクス国際会議 (IQEC) レーザーとエレクトロ-optics会議 (CLEO)

山中 千代衛*・吉田 国雄*・佐々木 孝友**

XIII International Conference on Quantum Electronics Conference on Lasers and Electro-Optics

Chiyoë YAMANAKA*, Kunio YOSHIDA* and Takatomo SASAKI**

IQEC'84は1984年6月18日より21日, CLEO'84は1日おくれで19日より22日まで米国カリフォルニア, オレンジカウンティのアナハイムで併催された。

よくしられたようにIQECはレーザー関連の最も権威のある国際会議で歴史も古く, 取り扱う領域は基礎的, 学術的分野を中心としている。今回は採択論文 241, 期限後受付論文23であった。応募論文に対する採択率は40%, 招待論文は45篇である。

CLEOは会議名が示すようににより工業応用, 技術サイドの会議であり, きわめて広い分野をカバーしている。それでも光ファイバーや光機器などを専門とする別の会議が開催されつつあり, この分野の発展は留る処をしらぬように見える。今回は採択論文 379, 期限後受付論文21, 採択率は80%, 招待論文は56篇である。両会議に共通の招待論文は13篇であった。

両会議は別々の委員会で運営されており, IQECに関しては今回のQE Joint委員長はベルのJ. A. Glordmaine, 実行委員長は同じくベルのH. Kogelnik とカリフォルニア大のY. R. Shen, プログラム委員長がロチェスター大のM.

IQEC・CLEOにおける展示会

C. Richardsonとコーネル大のC. L. Tangである。恒例によって次会の実行委員長はプログラム委員長がつとめることになっている。日本のプログラム委員長は東工大の末松教授と筆者である。

CLEOに関しては実行委員長がスペクトライジクス社のD. T. Hodges とベルのW. T. Silfvast, プログラム委員長がIBMのG. C. BjorklundとジェットプロパルジョンのE. D. Hinkley, 展示委員長はニューポート社のT. S. Hsu, 日本のザブ委員長は日立の武田氏である。CLEOはIQECと異ってプログラム委員

* 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)

** 大阪大学工学部電気教室 (〒565 吹田市山田丘1-2)

* Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565)

** Faculty of Engineering, Osaka University (1-2 Yamadaoka Suita, Osaka 565)

会を専門別の10サブ委員会に分けて運営している。

両会議を併催するのは経済的理由によるもので、運営は全く別々に行われ、互に協力してカバーし合っている。とくに自由電子レーザーとレーザー医用には共催シンポジウムが設けられたし、また C. H. Townse, R. P. Feynman, J. W. Goodman, A. J. DeMeria の特別講演も共催であった。大規模な展示会が開催され、基礎から応用まで米国の層の厚さを十二分に公示していた。

筆者は IQEC の実行委員会、プログラム委員会および QE Joint 委員会に出席し、論文選定と次回以降の会議の検討に参画した。IQEC は 2 年毎の開催であり、CLEO は毎年開催であるから、1985 年は CLEO 単独で Baltimore, 5 月 21~24 日、1986 年に IQEC, CLEO 併催が Sanfrancisco, 1988 年には IQEC 単独で日本開催の線が出ている。最終決定は 10 月末に行われることになっている。

今回は阪大レーザー研より筆者の外加藤教授、中塚助教授、佐々木助教授、吉田講師が参加し 6 セッション併列の会議を分担してカバーした。またレーザー核融合と大出力レーザーに関して、2 篇の招待講演を発表した。わが国からの寄与は CLEO に関しては産業技術の展開に関連して、多数の発表が行われたが、基礎分野、新領域をカバーする IQEC においてはレーザー核融合など一部を除いては、わが国からの寄与が比較的小さく、最も新しい情報を呈供するはずの期限後受付論文の応募は皆無であった。今後の対応を考える上で十分反省を要することであろう。

それでは両会議の中から筆者の分担した調査範囲である新レーザー、レーザー核融合、自由電子レーザー、位相共役、レーザー同位体分離に関し二三のトピックスを紹介することにしよう。

新レーザーのセッションではベルの W. T. Silfvast が High-gain lasers excited by inner shell photoionization from broadband soft X-ray laser produced plasmas を発表。

Cd, Ag, Zn の 4d 内殻の遷移を用いるレーザーの基礎研究である。12 eV のプラズマ黒体輻射 300 Å を用いると 10^8 W/cm^2 , 10^{14} の軟 X 線光子が出るので、これにより圧力 3 torr の気体 10^{17} cm^{-3} の密度、イオン化断面積 $\sigma_{PI} \sim 10^{17} \text{ cm}^2$ に吸収させ、誘導放出断面積 $\sigma_{STIM} = 10^{-13}$ にて

$$e^{\sigma_{N1}} = e^{10}, N = 10^{14}, l = 1 \text{ cm}$$

を得ると評価している。YAG とか CO₂ レーザーでタングステン照射し、X 線を発生、S U S のヒートパイプで発生した Cd 蒸気に吸収させて 4416 Å, gain 40 cm^{-1} 0.1 mJ, 5 kW を得ている。可視と紫外の tunable laser を用い、double transfer transition で可視と紫外のチューナブルレーザーを用いて VUV, XUV の発振を得ている。

レーザー核融合のセッションでは筆者が最初に座長をつとめたが、そこではロスアラモスの S. D. Rockwood が米国の研究状況を報告した。最も興味を引いたのは燃料ターゲットの分類に Direct, Indirect (radiation) Cannonball (hydrodynamic) と 3 種を上げ、大阪大学のキャノンボールターゲットを公認したことである。短波長レーザーの優位性を取り上げ、CO₂ レーザー Antares では 200 keV 近い高温電子の出現を報じた。また L L L のデーターとして小型プラズマと大型プラズマでは誘導ラマンやブリルアン放射が全くちがうことを強調した。エネルギー輸送抑制因子 f を 0.03 と評価するとともに形状に依存すると述べている。質量アブレーション率や圧力のデーターを上げ大阪のデーターを引用している。NRL の広帯域レーザーによるインコヒーレント実験にふれ、また X 線変換のデーターを与えた。CO₂ レーザー自身の将来について質問したところ、磁気利用ターゲットで当面研究をすすめ、高温電子制御を期待することであった。

自由電子レーザーのシンポジウムは会議の目玉の一つである。合計 18 篇の論文が 4 セッションにわたって発表された。最初の座長はロスアラモスの C. Brau, 3 年程前に筆者がロスアラモスを訪問し、自由電子レーザーの視察をした

時は、研究所の一隅で小型ライナックの小規模実験を始めたばかりであったが、今や自由電子レーザー開発の一方の旗頭として颯爽と登場してきた。シンポジウムの内容を概観すると次のようになる。

フランスのOrsayではJ. M. Ortegaによれば20年前のStorage ringを活用し、116~225 MeVの加速で可視光6500Åの発振に成功している。

米国のAustinでは理論的研究がM. N. Rosenbluthの指導でH. V. Wongにより行われ、サイクロトロン放射で電子速度分布の広がりを抑止するとともにポンデロ力で電子がトラップされない条件を求めている。

TRWのJ. EdighofferはStanfordと協力し、60 MeV, 2.5 A peak, 4 psの電子パンチで12.6 mのキャビティを用い、テーパーウイグラにて1.6 μm光を効率1.2%で発生している。

ベル研ではFIRレーザーの研究をマイクロトロンを用いて実施している。E. D. Shawによれば3 GHz, 10 MWの駆動で100 kW, 10~40 ps 100~400 μm波長光を得ている。これはSi応用の目的を持っている。

LANLでは6.9 mのキャビティ9~11 μm波長の光を30 ps 5 MW, 70 μs, 3 kWの出力で実現している。B. E. Newnamによるとキャビティ一長には最適値がある。

英国の計画も進展を見せており、Glassgowをはじめ全国協力ですすめられ5 mのウイグラで100 MeVの電子を使い1 MW, 50 ps, 2~20 μmの光を得ている。5 μsでは100 kWとなる。磁界を制御してグリーン化、ブルー化の予定である。発表者はC. R. Pidgeon。

この他NRL, UC Santabarbara, New Mexico大, Milano大, Stanford大, BNLなどから基礎的なビーム波動相互作用の発表があった。

位相共役に関しては、まずR. W. HellworthのUse of phase conjugation for physical measurementという展望発表があり、ホログラムのアナロジーで4波混合位相共役の説明。いろいろの物理計測、とくに2光子ドップラフ

リー分光への応用、半導体中の電荷担体のトラップとか不純物イオンや励起色素の特性計測への利用が概説された。

一連の発表の中で注目をあびたのは英国、Imperial CollegeのM. J. Damzen. Applications of the Brillouin mirror for the control of high power lasersである。ブリルアン散乱を用いて、レーザービームの質の向上、強力化、パルス短縮、広域ASEの除去が示された。この種のブリルアン鏡はガスとか液体であるから、損傷しきい値が高く、安価且つ大型化が可能で、増巾器間の結合防止にも使われる。80気圧のメタンセルを用いすぐれた特性を得ている。この応用は大出力ガラスレーザーの性能向上に導入すべきものであろう。また位相共役の発表はCLEOでも行われた。

次にレーザーによる同位体分離であるが、最も重要なのはウラン、プルトニウムの分離である。米国LLNLでは大規模な研究に発展中でレーザー核融合研究チームと略同一スケールのチームAVLIS計画が稼働している。ちなみに仏では遠心分離方式を中止し、レーザー法に切り換えた由である。LLLの方法はいわゆる原子法であって、U金属蒸気を銅蒸気レーザーポンプの色素レーザーで分離する方式である。150 Wの銅蒸気レーザーは当初の寿命4時間から1000時間に延長され、実用化研究が始まろうとしている。

この他レーザー励起拡散に関するBrown大, Cold jet法による重金属の分光について理研, GTEにおける水銀の濃縮, Oak Ridgeの共鳴イオン化によるKr原子の分離などが報告され、強い関心をあつめた。(山中千代衛)

レーザー核融合用のエネルギードライバーとして稼働中のレーザーでは、大阪大学の“激光Ⅻ号”が世界で最大出力を誇っているが、米国のカリフォルニア大学ローレンスリバモア国立研究所(略してLLNL)では出力100 kJの大出

力ガラスレーザー“NOVA”を精力的に建設中で、今年11月には爆縮実験を開始する予定である。これらの大出力ガラスレーザー光をKDP結晶によって波長変換し、 2ω 、 3ω 、 4ω 光を発生させる準備も各研究所で着々と進行している。また、出力1MJの大出力ガラスレーザーの設計も開始されており、このレーザーに用いられる光学部品を同時に開発している。

本報告では、主として核融合用大出力ガラスとその材料開発のセッションについて述べ、光ファイバーについても簡単に触れる。

先づ、LLNLの発表を述べる。LLNLのD. Milamらは、波長351、266、248 nm レーザー用高耐力AR膜について報告した。この短波長レーザー用高耐力AR膜は多孔性シリカ膜を基板上に生成したもので、次の様な手法で膜を形成する。①Fig. 1に示すような化学構造式をもつポリマー溶液に石英基板を浸す、②窒素ガス雰囲気中で基板をゆっくり引上げる、③450～500℃の酸素ガス炉で加熱し、膜中の炭素を除去する、④0.0002モルのHFでエッチングする。以上の過程を経て多孔性シリカのAR膜が基板上に生成される。このAR膜は、Westinghouse社の研究開発センターで開発された。ガラス基板の両面に厚さ500～600nmのAR膜を生成した場合に、波長350～1064nmの領域での透過率は99%以上であったが、パルス幅0.6ns、波長355nmでのレーザー耐力は平均で2.1J/cm²と低い値を示した。このためLLNLで引き続き高耐力化を目指して開発が行なわれた。現状では、膜厚90nmに対してレーザー耐力は6～9J/cm²であり実用上使用できそうである

Fig.1 Structural formula

が、問題点としては、AR膜面が比較的に柔らかであるため、クリーニングペーパーなどを用いて膜面を洗浄することができない、AR膜を基板両面に施した場合の透過率は、Fig. 2に示すように $\lambda/4$ の単層膜と同じような特性を示すため、広帯域とならない。

現在大出力ガラスレーザーの励起用フラッシュランプには、セリウムを添加した石英管が使用されている。L. P. Bsadleyらは、溶融石英管で製作されたフラッシュランプの点灯条件と励起効率（レーザー出力Plaser/ランプ入力Plamp）の関係を調べた。本実験では、0.4～1μmの発光波長帯域にわたって、ランプ入力と発光スペクトル強度との関係を測定した。この結果、ランプの爆発割合（ランプの入力エネルギー/ランプの爆発エネルギー）が0.1の

Fig.2 Measured transmittance for a silica substrate with porous silica coatings on both surfaces. The smooth curve is calculated transmittance for a coating containing 52% silica and having a physical thickness of 47nm. The lower curve is transmittance for bare polished fused silica.

時に、最大励起効率率は16%になることが明らかにされた。実際のガラスレーザーではこのような高い励起効率率は得られていないので、今後は新しい増幅器構造の高効率ガラスレーザーを開発する予定である。

ディスクガラスの周囲には、パラスチック発振防止用としてレーザーガラスと屈折率が等しく、 $1.05\mu\text{m}$ 光を吸収するエッジコートを実施していたが、この方法は光学的には優れているが、非常に高価であるという欠点があった。J. E. Murray らは、従来の方式にとって代るものとしてシリコンラバーエッジクラディングを開発した。Fig. 3 に示すように、自然放出光を吸収する吸収フィルターガラスをディスクガラスの周囲におき、これをシリコンラバーでサンドイッチにする方式が採用された。使用されるシリコンラバーは、フレネル反射が生じないようにレーザーガラスやフィルターガラスと屈折が等しいこと、泡や散乱体がないこと、フラッシュランプや自然放出光によって損傷を受けないこと、ディスクガラスに伝わる衝撃を吸収すること、等の条件を備えることが必要である。市販のシリコンラバーの屈折率は1.42であり、ガラスの屈折率よりかなり低いのでメチル置換基とフェニル基を含む2種類のシロキサンモノマーを合成して作った。フェニル基の重量%を63%にするとシリコンラバーの屈折率は1.52となった。このシリコンラバーを口径31.5cmのディスク増幅器用レーザーガラスに適用した所、 $\alpha D = 3.9$ (α : 小信号利得係数, D : 長軸の長さ) となった。また、フラッシュランプ及びレーザー光に対するレーザー耐力は、それぞれ 5 J/cm^2 と 15 J/cm^2 となり、充分高い値を示すことが分

Fig. 3 Silicone rubber edge cladding.

った。

J. Goldhan らは、グロー放電電極を有する大口径ポッケルスセルを開発した。従来のポッケルスセルはKDP結晶の両端にリング状の電極を設けてスイッチング電圧を印加していたが、この方式では口径が10cm以上になると均一な電場を印加する事が困難なため、入力パターンと同じ出力パターンを得ることができない。KDP結晶の両面部分に5~10TorrのHeガスを導入してグロー放電させ、 $5 \times 5 \times 1\text{ cm}$ のKD*Pポッケルスセルにスイッチングパルス印加実験をした所、パルス幅25ns、立上り1nsの20KVパルス電圧を発生させることができた。Fig. 4は、ポッケルスセルに電圧を印加するための回路を示す。2台のサイリコンがグロー放電電圧とスイッチングパルス電圧を発生させるのに使用されている。次に、 $27 \times 27\text{ cm}$ のKDPを使ったポッケルスセルにグロー放電をさせたのち、スイッチング電圧を印加してレーザー波形を観測したところ、スイッチング電圧波形に相当するレーザー波形を得ている。

非線形光学のセッションで興味深い発表は、北テキサス州立大学の W. Williams らによって行われた波長 0.53 と $1.06\mu\text{m}$ のレーザー光に対する非線形屈折率 n_2 の測定である。サンプルガラス中で発生した位相歪みは、自由空間を伝搬させたビームの遠視野像を測定することによって計算式を使って求めた。Table 1に各材料の n_2 の値を従来の測定値と比較して示す。

光ファイバーに関しては、Bell研の A. R. Chraplyvy らは石英に D_2 ガスを拡散させて $1.56\mu\text{m}$ で動作するラマンレーザーを発表した。実験装置を Fig. 5 に示す。励起用光源としては、パルス幅120ps、繰り返し100MHzのモード同期YAGレーザーが使用された。 $1.06\mu\text{m}$ の励起によってファイバーからは、シリカからの $1.12\mu\text{m}$ の一次ストークスラマンと D_2 からの $1.56\mu\text{m}$ の一次ストークスラマン光が放射される。シリカのラマン利得は D_2 の場合よりも僅かに高いため、ポンピング光をシリカの発振閾値より僅かに低く抑え、 $1.56\mu\text{m}$ 光は光ファ

Fig.4 Electrical circuit used to drive the 5-×5-cm aperture plasma electrode Pockels cell.

イバーを数回以上通過させる事によって充分な利得を得た。一例として、励起パワーが85Wの場合、 $1.56\mu\text{m}$ のピークパワーは8Wであり、スペクトル幅は 6.5cm^{-1} であった。このスペクトル広がり、ファイバー中での自己位相変調による。

Fig.5 Schematic diagram of synchronously pumped gas-in-glass laser. The dichroic beam splitter transmits $1.06\mu\text{m}$ and reflects $1.56\mu\text{m}$ light. The long-pass filter passes $1.56\mu\text{m}$ and suppresses silica Stokes at $1.12\mu\text{m}$.

Table I. Measurements of n_2 at 0.53 and $1.06\mu\text{m}^a$

Material	Wavelength (μm)	n_2 ($\times 10^{-13}$ esu)	n_2 ($\times 10^{-13}$ esu)
		This Work	Others Workers
CS_2	1.06	128 ± 10	$125 \pm 30^{(3)}$
	0.53	123 ± 10	
NaCl	1.06	1.37 ± 0.15	$1.22 \pm 0.21^{(4)}$
	0.53	1.38 ± 0.13	
SiO_2	1.06	0.62 ± 0.03	$0.95 \pm 0.10^{(4)}$
	0.53	0.60 ± 0.04	
BK-7	1.06	1.45 ± 0.15	$1.46 \pm 0.10^{(1)}$
	0.53	1.01 ± 0.08	

a) The errors shown for this work are relative errors deduced from scatter in the data over many measurements. The dispersion in n_2 is expected to be accurate to within the error bars shown, since absolute errors, such as energy measurements, are expected to be the same at both wavelengths.

Fig.6 Experimental setup. Two detectors have been used when recording the spectrum of the output light. A germanium avalanche photodiode (Ge apd) and a photomultiplier (PM). O_1 - O_4 are microscope objectives and lenses.

Fig. 7 Spectrum of the output light. The dotted line represents the third harmonic light emission, the power level of which is ~ 20 dB below the 532-nm line. $2p$ is the pump frequency.

フランスの CGE 研究センターの J. M. Gobriagues らは、長さ10mの GeO_2 - SiO_2 楕円形ファイバーにモード同期 Qスイッチ YAG レーザー光 (最大出力30kW)を照射して 2ω , 3ω 光の発生を観測した。平均コア径は $4.6\mu\text{m}$ 楕円率は10%である。実験装置を Fig. 6 に、ファイバーの出力端からの放射光スペクトルを Fig. 7 に示す。900–1500nmのIR スペクトルは、誘導ラマン散乱及び4光子混合過程により生じたものである。 2ω と 2ω より約20dB 低い 3ω 光が発生したが、これらの高調波はファイバーの軸方向に沿って発生したものでなく、ファイバーのクラッド内を伝搬している。

スタンフォード大学の M. M. Feier らは、単結晶ファイバーの成長について報告した。Fig. 8 に単結晶ファイバーを成長させるための方法を示す。 CO_2 レーザーを軸方向に対称となるように全周から照射して種結晶を除々に引き上げる。成長速度は $1\sim 10\text{mm/min}$ である。この方法によって5種類の単結晶ファイバー (Al_2O_3 , $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}:\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Nd}:\text{YAG}$, and LiNbO_3) を成長させた。例えば、 $5\text{cm}^1 \times 25\mu\text{m}^0$ の LiNbO_3 の場合、直径の変位1%に対し光学的損失は約0.5%と評価された。また、 $5\text{cm}^1 \times 170\mu\text{m}^0$ のルビーファイバーでは、632.8nm における光学的伝送損失は0.044dB/cmであった。この実験においては、クラッデ

Fig. 8 Schematic diagram depicting fiber growth.

イングは使われていない。

(吉田国雄)

今回二つの会議に出席し、特に感じられたのは IQEC より CLEO の方が大いに勢況であったという事である。レーザーの実用化が大幅に進んでいる現状では、これは当然の結果かも知れない。大学サイドの研究者は今こそオリジナルな研究を行うべきであるという思いを強く持った。また中国からの参加者がずい分多かった。CLEO のレーザー展示ショーではブースも出ており、いかにも現在の中国の現状を反映している感じがした。レーザーの基礎的な幅広い研究が盛んに行なわれているようで将来ののびを感じさせた。

筆者が分担した調査範囲の中から、非線形光学結晶、新固体レーザーについて、二・三トピックスを紹介する。

1. 非線形光学結晶

今回新しい非線形光学材料として注目されたのは β - BaB_2O_4 結晶である。この他には KTP

(KTiOPO_4) のレーザー特性について何件かの報告があった。

1.1 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 結晶

中国科学院福建物質結構研究所所長の Chen Chuangtian が IQEC で招待講演として報告した。お世辞にも上手な英語とは云えないが、極めて情熱的に、かつ大きな声で話しているのが印象的であった。この結晶は $1890\text{\AA} \sim 30000\text{\AA}$ の間に透過領域を有し、かつ非線形定数が KDP の数倍あるという事で紫外域の高効率高調波発生用として興味深いものである。2000 $\text{\AA}$ を超すと効率の良い波長変換素子は現在殆んどないと云ってよいので、紫外外へ、紫外へと研究の対象が向いている現在、大いに注目を注ぎたいと思われる。

結晶構造は R 3 グループに属し格子定数は、 $a=b=12.532\text{\AA}$, $c=12.71\text{\AA}$ である。High temperature solution による Top seeding method で製作され、Melting point 1095°C , Transition temperature $925 \pm 5^\circ\text{C}$, モース硬度 4 というのである。直径 30mm ^φ, 厚さ 10 mm の結晶の写真を示していた。非常に透明度がよいものであった。1.06 μ 光の 2 倍高調波光, 4 倍高調波光に対する位相整合角と実効非線形光学定数 d_{eff} を Table 2 に示す。温度位相整合も可能で、1.06 μ 光に対し整合温度中心が約 450°C , 整合半値幅が約 100°C もある。変換効率の実験は出力 15 MW の 1.06 μ 光を用いて行なわれており、結晶長 4.3 mm の $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ に対し $\eta=35\%$ が得られている。これに対し 30 mm の KDP では $\eta=39\%$ であった。これより KDP よりもかなり効率が高い事が分る。レーザー損傷閾値は出力 150 mJ, 7.5 ns の Q スイッチ YAG レーザー光により

Table 2 Phase matching angle and nonlinear optical constant of $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$

	2ω 1.06 $\mu \rightarrow 0.53\mu$	4ω 0.53 $\mu \rightarrow 0.266\mu$
θ_m	21°	48°
d_{eff} (計算値)	$3.46 d_{36}$ of KDP	$2.51 d_{36}$ of KDP

求めており約 $2\text{GW}/\text{cm}^2$ で十分高出力に耐えられるものと思われる。紫外域での実験はまだなされていないようである。

1.2 KTP 結晶

KTP (Potassium Titanate Phosphate: KTiOPO_4) 自体は以前に報告された結晶であるが、バナナ ($\text{Ba}_2\text{Na}_2\text{Nb}_5\text{O}_{15}$) と同程度の非線形光学定数を持ち、かつ吸湿性がない、熱的に安定、レーザー耐損傷性が $100\text{MW}/\text{cm}^2$ 以上で高い等の理由から、これを用いて安定な高繰返し、高出力のグリーン光 (0.53 μ) を得ようとする方向での研究がなされている。紫外光発生は透過の点から用いる事ができない。用途として紫外光発生の為の光源, 加工, 医用があり、メーカーサイドが力を入れている。

結晶は Orthorhombic 構造, 2 軸性で hydrothermal に育成される。

XMR Inc. では Nd: YAG レーザーの CW 励起, 20 kHz Q スイッチングで KTP を共振器内に入れる方法により平均 9 W の 0.53 μ 光を得ている。彼等はこれにより, GaAs, Si, Cu, Au 等のカッティングを行なった結果を示した。このほか Melanin, Hemoglobin, Xanthophyll 等の色素が 0.53 μ で 80% 以上の吸収を持つため医用に有効であることを指適していた。

General Electric 社も同じように CW 励起した Nd: YAG レーザーの 5 kHz Q スイッチング光でタイプ II KTP (結晶長 3.5 mm) を用い 6 W のグリーン光を得ている。同一励起の LiIO_3 (タイプ I, 10 mm 長) では 2 W 位が得られたが、レーザー損傷のためこれ以上の出力を得ることができず、KTP の優位性を示していた。

この他 Quantronix Corp. からは Type II の KTP をダブラーに、Type II の KD*P をトリプラーに用いた高繰返し紫外光 (0.35 μ) 発生の報告があった。Fig. 9 にその発生方法を示す。これは polarization mismatch method と称するものでレーザー核融合で 3 倍波の高効率変換法として採用された手法である。出力 1.2 MW (120 mJ) の 1.06 μ を用い 2 倍波で 0.61 MW

Fig. 9 Frequency tripling scheme with type II crystals.

(61mJ), 3倍波で 0.18MW (18mJ) を得ている。KTPは $3 \times 3 \times 5.3$ mm, KD*P は $12 \times 12 \times 30$ mmのものをういた。

その他に水溶性結晶の表面処理としてローレンスリバーモア研究所からKDPのコーティングに関する発表があった。エチレンテトラシケートの加水分解を用いSiO₂膜をコートするもので温度を上げてコートできないKDP等には有効な手法である。レーザー耐損傷性も0.35 μ光に対し 4 J/cm²以上が得られている。ただ現時点ではメカニカルに極めて弱く、触れる事ができないという欠点がある。他の材料にもいろいろ応用できそうな方法で興味が持たれた。

2. 新固体レーザー

新固体レーザーが近年盛んに研究されるに至っている。1つはレーザー核融合用エネルギードライバーとして高出力、高繰返しを固体レーザーにより得ようとする動きである。もう1つ

は加工、医用、分光等を主とした産業用として従来のYAGレーザーを上まわる高効率、高繰返し、Tunableなレーザーを得ようとする動きである。CLEOではこの種の関係の発表が招待講演3件を含み約20件あった。Tunabilityを得るためにCr, Ti, Co等のイオンを添加した材料と、高効率化を目的にCrイオンのエネルギー移動を利用したNd:レーザー材料の2つの研究が行なわれている。レーザー媒質の形状に関しては高繰返し時における熱的歪を小さくするため、従来のロッド型のものに代わり、スラブ形状、Active Mirror形状のものが試みられ、高効率高出力のものが得られ始めている。加工用には終局的に1kW以上の平均出力を得る事を目標としている。

2.1 新固体レーザー材料

ローレンスリバーモア研究所のW.F.KrupkeとMIT.Lincoln研究所のP.F.Moultonの2名がCLEOで招待講演を行なった。

Table 3はTunable solid state laserとして会議で報告されたものについて材料と動作波長についてまとめたものである。Crを添加したGSGG, GGG, エメラルド, アレキサンドライト等は実用段階に近いが、その他のCo, Ti等を添加した材料については小片の結晶についてレーザー発振が得られている程度である。

高出力、高効率用材料としてはCrを添加し

Table 3 Tunable solid state lasers.

laser material	Operating Wavelength (nm)	Pump. Source
Cr ³⁺ : GSGG (Gd, Sc, Ga Garret)	745—820	lamp
Cr ³⁺ : GGG (Gd, Ga Garret)	760	lamp
Cr ³⁺ : Emerald (Be ₃ ·Al ₂ (SiO ₃) ₆)	751—759	lamp
Cr ³⁺ : Alexandrite (BeAl ₂ O ₄)	701—818	lamp
Cr ³⁺ : Na ₂ Li ₃ Ga ₂ F ₁₂	776	Dye laser
Cr ³⁺ : KZnF ₃	880	Dye laser
Co: MgF ₂	1500—2300	1.33 μ Nd: YAG
Co: KMgF ₂	(77°K)	
Ti: Al ₂ O ₃	660—986	Dye laser
Ti: YAlO ₃		

たNd:GSGGレーザー（またはGGGレーザー）が最も期待できる。YAGと異なり結晶育成時に中心にコアを持たないため断面の大きなものを得ることが容易であり、かつバブルメモリーとして素材的に大分以前から大型の結晶が製作されていたこと等がこの種のレーザーが最も進んでいる理由と思われる。

Krupkeの報告では $5\phi \times 50\text{mm}^2$ のロッドを用いてノーマル発振で効率4.5%（出力0.2J）を得ている。Nd濃度は $2 \times 10^{20} \text{ ion/cc}$ 、Cr濃度は $2 \times 10^{20} \text{ ion/cc}$ である。同じ装置でYAGの場合は効率1.9%程度であった。Moultonの報告では $5\phi \times 75\text{mm}^2$ のGSGGを用い繰返し20Hzで平均40Wの出力を得ておりYAGに比べ約2倍の5%の変換効率であった。GSGG, GGGはYAGに比べ熱的歪がやや大きい。GTE Government Systemsが熱的集束効果は約6倍高いと報告していた。また励起ランプの紫外光によるSolarizationの問題もあるようである。

2.2 スラブ型レーザー

スラブ形レーザーの概念をFig. 10(a)に示す。レーザービームを媒質中でジグザグに全反射さ

(a) Slab laser

(b) Active mirror amplifier

Fig. 10 Two types of high repetition laser.

せながら通すことにより媒質中における場所的な熱歪みをキャンセルするもので従来のロッド型より高繰返し、高出力が期待できる。

ローレンスリバーモア研究所のJ.L.EmettはCLEOで“Potential of Solid State Lasers for High-Average Power Applications”と題する招待講演を行なった。彼等はレーザー核融合ドライバーとして固体レーザーを用いる事を真剣に検討している。レーザー媒質中でのSymmetry energy depositionが極めて重要でありFig. 10(a)に比べ(b)のActive Mirror型では対称性を欠く点から問題があることを指摘していた。レーザー媒質に2気圧のHeガスを冷却剤として用い 100kW/m^2 の熱除去が行なえる等各種のレーザー材料に対する高繰返し、高出力レーザーの検討結果を報告していた。

スラブ型レーザーの家験としてはGeneral Electric社の招待講演があげられる。彼等は $6.4 \times 45 \times 250\text{mm}$ のLHG5スラブガラスを用い10Hz繰返しQスイッチパルスで2.5J（25W平均）を得ている。また $8 \times 16 \times 128\text{mm}$ のスラブ型YAGで320Hz繰返しQスイッチパルスで0.25J、（80W平均）を得ている。住友金属鉱山(株)からは $7 \times 35 \times 115\text{mm}$ のスラブ型GGGの発振特性が報告された。TRW Inc.はActive Mirror型の増幅装置を発表した。 $80\phi \times 12\text{mm}$ のLHG5ディスクガラスを2枚用い $13\text{mm}\phi$ のXeランプ6本で励起、出力として5Hz、平均120Wを得ていた。

今後GSGG, GGGの新素材を用いたこの種のレーザーの大型化が進み出力1KWレーザーの出現は時間の問題と思われる。

(佐々木孝友)