コンファレンスレポート

CLEO/IQEC '86報告 I

— レ ー ザ ー —

山中龍彦*・加藤義章*・藤井義正**・中山 高***
大和田野芳郎†・名井康人††・緑川克美†††

Report on CLEO/IQEC '86 I

— Laser —

Tatsuhiko, YAMANAKA*, Yoshiaki KATO*, Yoshimasa FUJII**,
Takashi NAKAYAMA***, Yoshirou OWADANO†,
Yasuhito MYOI†† and Katsumi MIDORIKAWA†††

第14回 I Q E C と C L E O '86 の合同会議が
6月9日(月)から13日(金)にかけてサンフ
ランシスコのモスコンセンタで開催された。
このモスコンセンタはサンフランシスコの都
市開発再の一環として建設されたコンベンショ
ンセンタである。

I Q E C は2年に一度開催される量子エレク
トロニクスの国際会議で、主にレーザーおよび
その関連の基礎的な諸問題がテーマとなってい

る。C L E O はレーザー応用を中心テーマとす
る米国の国内会議であるが、ヨーロッパ、ソ連、
日本、中国にサブコミティーが設置されており、
実質的国际会議である。会議は毎年、東海岸と西
海岸で交互に開催され、大規模な展示会が併設
され、技術交流、情報交換に大いに寄与している。

C L E O の単独開催でも出席者が3,000人を
越す大会議であるが、今回は I Q E C との合同
となったため出席者は6,300人を越す前代未聞

* 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)

** 住友金属鉱山(株)電材研 (〒198 東京都青梅市末広町1-6-1)

*** 三菱電機(株)中央研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)

† 電子技術総合研究所 (〒305 茨城県新治郡桜村梅園1-1-4)

†† 三菱電機(株)応用機器研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)

††† 理化学研究所 (〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1)

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

** Electronics Materials Laboratory, Sumitomo Metal Mining Co., LTD (1-6-1, Suehiro-cho, Ohme-shi, Tokyo, 198 Japan)

*** Mitsubishi Electric Corp., Central Research Laboratory (1-1, Tsukaguchi-Honmachi 8-chome, Amagasaki, Hyogo 661)

† Electrotechnical Laboratory (1-1-4, Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305)

†† Mitsubishi Electric Corp., Product Development Laboratory (8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki 661)

††† RIKEN, The Institute of Physical and Chemical Research (2-1, Hirotsawa Wako-shi, Saitama 351-01)

の大会議となった。このうち日本よりの参加者は70余人であった。

発表論文数は IQEC, CLEO を合わせて 900 件以上となった。発表はパラレル 8 セッションの口頭発表と昼休みを利用したポスターセッションで行なわれた。口頭発表 8 セッションのうち IQEC が 3 セッション(初日のみ 4 セッション), CLEO が 5 セッションであった。1 セッションの時間は 1.5 時間で、招待講演 1~2 件を含め 4~5 件の論文が発表される。

会議は IQEC, CLEO の賞授与式とプレナリーセッションで始まった。大きな賞としては OSA より C.H. Townes 賞が UC Berkeley の Yuen-Ron Shen に、また IEEE より D. Sarnoff 賞が東工大の末松安晴教授に授与された。プレナリーセッションではカリフォルニア工科大学の J.A. Westphal 氏、L'ANL の C. Brau 氏、マックスプランク量子光学研究所の H. Walther 氏、ユタ大学の J. Dixon 氏が、それぞれ "The hubble space telescope", "Free electron lasers", "Radiation interaction of single atoms in cavity", "Laser surgery and the physical science" と題して講演した。

今回の会議の特徴はシンポジウムや特別セッションが企画され、当面の重要なテーマについて討論された点である。IQEC, CLEO 合同のシンポジウムでは "Topical meeting on tunable solid state laser" の報告を基に新しい固体レーザー素子については討論された。また IQEC 独自のシンポジウムとして 1) Cavity quantum electrodynamics, 2) Squeezed state, 3) Free electron laser, 4) Interaction of laser light with plasma, 5) Fundamental physics with lasers, 6) Movement of atoms with laser beams, の 6 テーマが持たれた。一方 CLEO では半導体プロセスのためのレーザー加工の諸問題を討論する特別セッションが設けられ、メーカーよりの報告をもとに討論された。

本稿では X 線レーザー、固体レーザー、半導体レーザー、エキシマーレーザー、CO₂ レーザ

ーについて報告する。色素レーザー、銅蒸気レーザーについてはレーザー同位体分離・レーザー化学の稿で記述する。自由電子レーザーに関しては通して聴かれた方が見当たらなかったの

で割受させて載く。
レーザー核融合・レーザープラズマ相互作用、レーザー同位体分離・レーザー化学、光通信、半導体レーザープロセッシング、非線形光学を中心とした量子エレクトロニクス関係については別稿で報告する。

本企画に御協力頂いた諸先生方に、この場を借りて感謝の意を表します。(山中龍彦)

1. X 線レーザー

X 線レーザーの研究が着実な進歩を遂げている。ここでは IQEC の発表から見た研究の現状を紹介しよう。

1) リバモア研究所では、金属コートをしたプラスチック薄膜をターゲットとし、高出力レーザー光(波長 0.53 μm) を線状に集光している。Se での ASE 発振の成功は良く知られている。(Phys. Rev. Lett. **54**, (1985) 106, 110)。その後、利得長を更に長くし、4 cm 迄のデータを得ている。206 Å の発振光は、3 cm 迄は指数関数的に増加し、4 cm 附近から低下し始める。低下する前の出力は 1 MW に達し、この値はほぼ飽和強度に相当する。観測された出力の飽和と低下の原因は、プラズマ中での XUV 光の屈折によるものと考えられ、均一密度分布のプラズマを作ることが今後の課題とされる。Se に加え、Y, Mo の Ne 様イオンによる発振が観測されており、現在 Gd, Eu の Ni 様イオンにおける発振が試みられている。現在得られている最短発振波長は、Gd コートターゲットにおける再結合プラズマ中での O イオンの 102.5 Å 線である。レーザーにおけるスペクトル輝度は 10^{22} であり、シンクロトロン放射光 10^{14} より 8 桁も高い。

プリストン大学プラズマ物理研究所では、強力磁場により膨張を抑えたプラズマで反転分布を作り、C イオンでの発振 ($\lambda=182 \text{ Å}$) に成功している (Phys. Rev. Lett. **55**, (1985))

1753)。その後このレーザーの特性を更に詳しく調べた。その結果、発振光の角度拡がり、5~10mrad(実験条件による)とかなり小さいこと(プラズマ密度が低いので屈折の効果が小さい)、またピーク出力は約100 kWであることが明らかになった。これらの測定はエネルギー300 J、パルス幅80 nsのCO₂レーザー光を用いて行われた。現在1 kJ級のCO₂レーザーを用いた実験を準備中である。また2つのレーザーを用いた新しいアプローチの実験を計画している。この方式ではCO₂レーザーによりKr様イオンを作り、超短パルスのKrF⁺レーザーにより $4s^2 4p^6 \rightarrow 4s^2 4p^4 5s^2$ の励起を行い、 $4s^2 4p^4 5s^2 \rightarrow 4s^2 4p^5 5s$ のレーザー発振を得る。例えばCdの場合、発振波長は89 Åとなる。この方式の成功の可否は未知であるが興味深い試みである。

X線レーザー研究の現状と将来に関するレビューがM. Key(ラザフォード研究所)により行われた。これは英国及びフランスの最近の結果も含む面白い内容であった。英国では直径約70 μmの細いカーボンファイバーを0.53 μmレーザー光(70ps, 20J)で照射し、断熱膨張プラズマ中で反転分布を生成している。H様イオンにおける182 Å光の強度は、ターゲット長に対し指数関数的に増加することが観測され、これより増幅係数が4 cm⁻¹と求められた。また時間分解スペクトルより、増幅のピークはレーザーピークに対し900 ps後である。シミュレーションではこれらの値が15cm⁻¹、400 psとなるため、まだ実験とシミュレーションの良好一致は得られていない。フランスではエコールポリテクニクのガラスレーザーを用い、Alターゲット(平面固体ターゲット)を照射している。Li様イオンにおける5 f → 3 d遷移による105.7 Åの強度が、ターゲット長を0.7 mmから10mmにしたとき強くなることから増幅が得られたと発表しているが、まだデータが少く説得力に欠ける。M. Keyの話の重点は、短波長化のスケールングにおかれた。彼の解析によれば、再結合プラズマ方式における短波長化の限界は40 Å附近となる。今後実験的にレーザー遷移にかかわる各

種パラメータのスケールングを求める必要がある。

ソ連の研究をI. V. Sobelmanが紹介する予定であったが、残念ながら講演が取消された。今回のCLEO/IQECではソ連の講演はいくつかの例外を除いて取り消され、米国で開催される国際会議の難しさを感じさせた。

(加藤義章)

2. 固体レーザー

今年のCLEO/IQECの大きな特徴の一つは、固体レーザー関連のセッションが非常に多く、かつ活発であったことである。特に、この会議の直前、6月4~6日に開かれた「波長可変固体レーザートピカルミーティング」にも参加し、その熱気に興奮していたこともある。しかし、米国をはじめ外国の研究が非常に活発であるのに反して、我国からの寄与が余りにも少いことに、多少の不安が残った。特に米国では産官学協力体制ができつつある。基礎研究、結晶材料開発、レーザー装置開発、応用開発が揃って、強力に押し進められている。これらの成果は近い将来レーザー産業にも大きな変化をもたらす動きとして注目される。

以下、各セッション毎に概要をまとめる。

2.1 新固体レーザーに関するCLEO/IQEC共同シンポジウム(発表4件)

「波長可変固体レーザートピカルミーティング」(OSA, IEEE共催)の共同議長であったDe ShazerとHuberによって会議の報告と紹介がなされた。この会議はオレゴン州のフッド山の麓、ジグザグの山小屋風ホテルで行われた。参加者約200人の大多数は米国人で、独12人、英、仏、伊、スイスが4~6人、他に日本、イスラエルが各2名であった。日本からの参加者が少く、報告がなかったのが残念であった。来年は10月末Williamsburg, VAで開かれる。日本から多くの参加があることを期待したい。

報告は53件に及び、特にArレーザー励起によって、室温CW波長可変Ti³⁺:Al₂O₃レーザーの成功が2件なされ注目された。770 nmにて

1.6 W, 693 ~ 948 nm 迄連続可変と報告されている。報告件数も $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ が 11 件と一番多く、従来の CZ 法以外に Vertical Freeze 法や育成後の熱処理によって低損失結晶が得られたこと、Nd:YAG 第 2 高調波による励起やフラッシュランプ励起による発振、増幅が可成り進んだことが注目された。Cr ガーネット結晶や稀土類添加弗化物結晶は励起状態からの吸収や光誘起カラーセンタに関して分光学的な研究が進められている。アレキサンドライト結晶はアライド社と仏のグループから 100 W 以上の発振器及び増幅器の開発および LD 光のインジェクションロッキングが報告された。その他新しい結晶として、 $\text{Cr}:\text{ScBO}_3$, $\text{Ce}:\text{R}_2\text{SiO}_5$ ($\text{R}=\text{Gd}, \text{Y}, \text{La}\dots$), $\text{Nd}:\text{Na}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{F}_{2.2}$ 等が報告された。特に $\text{Nd}:\text{Na}_{0.4}\text{Y}_{0.6}\text{F}_{2.2}$ は蛍光寿命が長く、LD 励起レーザー材料として注目される。カラーセンタレーザーでは OH^- や CO_3^{2-} ドープアルカリハライドで 1.4 ~ 2.1 μm の可変波長が得られている。

2.2 ダイオード励起固体レーザー (4 件)

今回の CLEO 固体レーザーの話題の一つはダイオードアレイ励起固体レーザーの成功である。非常に小型にでき、高出力高効率でかつビームクオリティが良い。増幅用マスタ発振器やインジェクション用発振器として最適である。また 400 mW LD 励起によって、YAG, キャビティ内 KTP による SHG を用いて、20 mW の緑色レーザーが得られており、ポインタとして実際に使っていたのが印象的であった。弱い LD 励起を有効に用いるには、長い蛍光寿命のレーザー結晶でパルス動作が適しており、また SHG 用には偏光したレーザーが適している。その為 YAG, YLF 等の結晶の比較がなされている。一方で Nd:Glass は吸収帯をゲイン幅が広いため、LD の波長制限がゆるく、かつモード同期で高い尖頭出力が得られるため、SHG 用 LD 励起固体レーザーとして優れているとの報告があり注目される。

2.3 高度レーザー技術 (5 件)

海中への通信用に、Ce の共鳴線 455 ~ 459 nm で発振する固体レーザーが検討されている。SHG 又はパラメトリック増幅等を用いる方式が考えられている。

$\text{Nd}:\text{La}_2\text{Be}_2\text{O}_5$ (BEL) 結晶は dn/dT が零になる結晶方位が見つかったため、熱レンズ効果や熱応力複屈折のない固体レーザーとして注目される。またマルチミラーによる波長選択性と熱レンズ効果の補正等により、1.3 μm Nd:YAG レーザーの高出力化に成功した。5 Hz の繰返しでパルス当り 8 J, 50 Hz で 165 W が得られている。

2.4 Nd レーザー技術 (5 件)

高出力の固体レーザーを実現する方法としてスラブ型レーザーが注目されている。8 × 16 × 140 mm³ の Nd:YAG スラブを用い、20 Hz で 500 mJ/pulse (10 W) の回折限界に近い出力を得ている。スラブの大きな面には水冷を可能にし、垂直入射の寄生発振を抑制するためにコーティングが採用されており、二枚貝 (Clam shell) 型二重楕円反射鏡を用いている。一方、 $\text{La}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}$ (LNA) 結晶を用いて室温連続発振に成功している。Ar レーザー励起で 10%, Kr レーザー励起で 26% の効率を得られている (1.054 μm 発振)。Lyot 型フィルタを用いて 1.082 μm で 75 Å の幅でチューニングが可能であり、これを用いて He^{3+} の核偏極 50% を達成するのに成功している。その他 Nd, Cr:GSGG の Cr 濃度の最適化, Nd:YAG と Nd:リン酸系ガラスの比較等が報告された。

2.5 遷移金属固体レーザー (6 件)

$\text{Cr}:\text{KZnF}_3$ と Cr, Nd ドープおよび Cr ドープ GSGG, GSAG 結晶の比較をし、熱レンズ効果, UV 光励起カラーセンタが $\text{Cr}:\text{KZnF}_3$ の方が少く、入力パワーに対し安定であると報告している。Ti:Al₂O₃ の室温連続発振成功と熱特性等の研究が報告されている。Cr:GSAG, GSGG の比較がなされ、直径 5 mm, 長さ 50 mm

Cr濃度 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ のGSAGで出力 206 mJ, 微分効率 0.24 %が得られている。やはり熱レンズ効果に注意した共振器設計が必要であるが, GSAGではカラーセンタが殆んどできないと報告している。その他に新結晶 Cr: ScBO₃の報告とアレキサンドライトレーザーのカラーセンタによるQスイッチングの報告がある。

2.6 新固体レーザー (6件)

モード同期レーザーをパルス増幅することによって, パルス列レーザー光とし, KTP結晶によって50%以上のSHG変換効率を得た。単純にスケールアップを行うと, $3 \times 3 \text{ mm}^2$ KTPで3Jの $0.53 \mu\text{m}$ の光が得られると報告している。また $3 \times 75 \text{ mm}$ Nd:YAGを用い熱レンズ効果に変化しても安定な共振系を設定することで, 出力を従来の6Wから15Wに向上させることに成功している。モード同期で13W, 90psも得られている。その他, 液晶を用いたソフトアパーチャ, 半径方向に反射率の異なるエタロンミラーを用いた不安定共振器, 縦単一モード発振モノリシックレーザー用ミラー, 波長可変単一波長Nd:YAGレーザーの通倍光を用いたドップラ一分光法等が報告されている。

2.7 赤外固体レーザー (4件)

785 nm LDアレイ励起を用いて, 77 K, Ho: YAGレーザーの発振に成功している。 $2.1 \mu\text{m}$ にて2.7 mW, 効率19%であった。一方, Cr, Tmで増感したHo: YAGレーザーは室温, Krレーザー励起で発振している。

2.8 非線形光学及びレーザーホスト材料 (5件)

有機非線形光学材料のレビューに続いてKTPの報告が3件あった。電気光学効果, 重水置換, Fe不純物による着色, 強誘電性分域, フラックス法成長, エピタキシャル成長等が報告されている。またGSGGのコングルエント組成が $\text{Gd}_{2.96}\text{Sc}_{1.96}\text{Ga}_{3.14}\text{O}_{12}$ と求められている。この組成比は従来の報告と異っており興味深い。

その他のセッションとして次のものがある。

2.9 固体レーザーと遠赤外レーザー (IQEC) (固体レーザー関係4件, LNA結晶も含まれている。)

2.10 ポスターセッション (CLEO15件, IQEC2件)

2.11 ポストデッドラインペーパー (CLEO (3件) ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ を用いたパラメトリック発振器を含む。))

以上固体レーザー関係で63件の報告があり内容も豊富であった。また展示会場も非常に活気があり, 将来に期待する所大であった。

(藤井義正)

3. 半導体レーザー

この項目については, CLEO関係で, 5件の招待講演, post-deadline論文5件を含めた計63件の論文が発表された。会場には沢山の聴講者が集まり, 熱心な質疑応答があり, 従来通りCLEOの中心議題の一つであった。この項目に関連したセッションは9つで, Optical Bistability, Diode Laser Array 1, 2, 3, Diode Laser Devices, Distributed Feedback Lasers, Semiconductor Laser Devices, Semiconductor Laser Switching, Ultrafast Optoelectronic Devices and Phenomenaである。これらの中から注目に値するものを紹介する。

3.1 Optical Bistability

ベル研究所のD.A.B. Miller等が, Self-electrooptic effect device (SEED)構造を用いた 2×2 の光双安定スイッチ・アレイの試作と, その動作特性について報告した。2500層からなるGaAs/GaAlAs超格子構造で構成されており, これまで双安定性特性を制御するため用いられていた外部固定抵抗の代りに, 素子構

Fig. 1 Schematic of monolithic high-power laser structure.

Fig. 2 Output power vs current for 1-cm laser bar with 150- μ s pulse width.

造内に負荷抵抗を集積化することにより 2×2 のアレイ化を実現した。素子は $200 \times 200 \mu\text{m}$ のメサ構造で、動作波長域は、バイアス電圧 4 ~ 40 V に対して 834 ~ 859 nm, またスイッチング動作電力はスイッチング速度に依存し $1 \mu\text{s} \sim 10 \text{s}$ に対して $1 \text{mW} \sim 40 \text{pW}$ である。アレイを構成する各素子の特性は極めて均一で、今後の高速光演算および交換等の基本素子として注目される。その他 post-dead line 論文で, British Telecom. の Webb 等が, レーザーの双安定性を用いた中継器としての regeneration と retiming 機能を発表したのが目新しかった。

3.2 Diode Laser Array

多数の論文が発表され, 多大の関心と呼んだ。アレイを構成する各半導体レーザーの放射光間に位相整合をとる研究, 位相整合よりもむしろ

アレイ全体の総出力に注目する研究と 2 つにわかれる。研究開発目標としては, 人工衛星間の空間伝播による光通信, バンドルファイバで同一信号を多数の出力端へ分配することなどが予想される。高出力関係では, 特に Spectra Diode Labs の Harnagel 等の発表が注目された。構造および出力特性を Fig. 1, Fig. 2 に示す。CW ではないがパルス幅 $150 \mu\text{s}$, 繰返し同期 20ms (duty ratio $1/133$) で 11W の高出力が得られたと予稿集には書いてあるが, 口頭発表では, たしか 25W まで可能と報告された。従来の最大出力としては, パルス幅 $< 1 \mu\text{s}$ で 10W ; CW で 4W が報告されている。デバイス構造の図から明らかのように, 間隔 $400 \mu\text{m}$ でアレイ化されているのでコヒーレントに光出力が結合されていない。

また二次元面上にマトリックス状に半導体レーザーを集積化した例が MIT の Walpole 等によって発表された。ここでは InGaAsP 材料で DFB 構造レーザーをエッチングと mass transport 法で作成する既発表のデバイスに, 外部ミラーを出力端に集積して, 出力光を基板と垂直方向に出射させた。今回は 4×4 のマトリックスを構成することにより 270mW の出力を得ている。16 個の半導体レーザーのうち 2 個を除き, しきい値電流は $11 \sim 14 \text{mA}$ の範囲内に納っている。この研究報告も各レーザーから出射された光は, コヒーレントに結合されていない。このようなデバイスも光演算回路用素子として注目される。

3.3 Distributed-Feedback Laser

発光層に多量子井戸構造をもつ分布帰還型レーザーで短波長, 長波長の二つの波長領域で各々一つづつ発表された。量子井戸を用いた DFB レーザーの発表は今回が初めてである。始めてである。この構造で期待される重要な機能の一つとして, チャーピング特性の向上がある。短波長帯では三菱電機中研の野田等が, 量子井戸幅約 $120 \text{\AA}$, バリア幅 $35 \text{\AA}$ の 6 周期超格子構造を MBE 法で形成し, DFB 用グレーテ

ングのピッチを2534 Åにして、横方向の閉ぢ込めをリッジ型で構成した半導体レーザーを発表した。量子井戸幅、バリア幅から当然量子効果が期待できる。しきい値電流は約38 mAで、活性層がヘテロ構造のときにくらべ2/3に減少し、チャージングはヘテロ構造に比較して1/3以下と報告された。ブラッグ波長を利得ピークよりも短波長側に約100 Å程度ずらして設定し detuning を行っていることが注目された。

また一方、長波長領域ではベル研の Dutta 等の発表によるもので、超格子構造は液相成長法によるためか量子井戸幅は約200 Å、横方向の閉ぢ込めは DCPBH で行っている。しきい値電流はヘテロ構造と比較して殆んど同程度、CWのスペクトル幅も同程度であるが、チャージングはヘテロ構造のときに比べて1/2程度に減少していることが報告された。

3.4 その他

東工大末松教授や日立中研松村氏の招待講演は多大の関心と呼んだ。国内では発表済みの内容であるが、海外の研究者にとっては初めてであり、技術上の重要性が高いため好評であった。末松教授の発表内容は、レーザー発振波長の温度変化によるゆらぎを注入電流の増減によって等価屈折率を変化させて補償するものである。また松村氏の発表は、日本でOEICと呼称されるオプトエレクトロニック素子、光子素子、電子デバイスのモノリシック集積回路で、4個のDFBレーザーと2×2反射型光スイッチが集積されている。この光・電子集積回路は、光通信や光情報処理技術へ応用されることが期待される。

なお今回のCLEO/IQEC会議の初日の朝、末松教授は半導体レーザー分野での業績に対してIEEE学会からDavid Sarnoff賞を受賞した。技術立国を目指す日本の技術者として喜ばしいことである。(中山 高)

4. エキシマレーザー

4.1 放電励起エキシマレーザー

エキシマレーザー関係の発表について、先ず放電励起形のレーザーから述べる。この分野では高い平均パワー、長い動外寿命を追及する研究が精力的に続けられている。先ず米国XMR社のButcher等から、平均パワー300 W、繰返し500 HzのXeClレーザーが発表された。これは磁気スイッチ付PFNとコロナ予備電離方式を採用しており、電源、ガス循環器を含む本体は60 cmφ×1 mの円筒に納められている。またLumonics社のWeeks等は、コンピュータ制御の150 Hz、40 WのKrFレーザーで10⁸ショット、約1カ月の動作寿命を報告した。これは1日当たり約20%のガス補充を自動的に行うもので、レーザー部分の効率4%、ガス循環器その他を含めた総合効率2.5%が得られている。フランスAix-Marseille大学ではkW級XeClレーザーを開発中で、テスト装置LUXで1 kHz動作時の出力150 W、効率2%がFontaine等から報告された。この装置はX線予備電離にワイヤーイオンプラズマガンを用い、短時間では2 kHzが可能な電源を持っている。

米国Los Alamos研究所のSze等は、インダクタンス安定化電源を持つXeClレーザーモジュールStablexを4台並べて動作させ、70~250 nsのパルス幅を得た。これを用いて1 kHz、400 Wの装置を開発中である。またXeClレーザーにおいて、ハロゲンドナーとして電子付着係数の小さいCCl₂F₂を用いると、HClの場合より20%パルス幅が延びることがロンドン大のOsborne等から、窓の汚染の原因と防止法についてNothrop社のGrossmanから報告があった。

他に、狭スペクトル幅(～0.004 Å)の発振器と増幅器の組合わせでXeCl、KrF、ArFレーザーの波長同調範囲とロッキング効率を測定した結果が、Lambda Physik社のRuckle等とジェット推進研究所のPacala等から報告された。いずれの場合も自由発振スペクトル幅よりやや広い範囲でロッキングがかかり、中心波長付近ではほぼ100%のロッキング効率を得られた。また米国Helionetics社のAkens等は、

Fig. 3 The Los Alamos short-pulse multi-kilojoule angular multiplexed KrF inertial fusion laser system.

単発 5.5 J の X 線予備電離形 KrF レーザーを開発し、回折限界の 4 倍のビーム拡がり角を得た。

4.2 電子ビーム励起エキシマレーザー

電子ビーム励起形のエキシマレーザーの開発は、主に核融合や X 線レーザー等の物性研究を目的として行われている。Los Alamos 研究所からは、現在世界最大の核融合研究用 KrF レーザーシステム Aurora (Fig. 3 参照) の開発状況について、Rosocha 等が報告した。口径 1 m × 1 m、出力 10 kJ、パルス幅 650 ns の LAM を最終段とする 4 台の電子ビーム励起増幅器は全て完成しており、現在 5 ns × 96 のパルススタック光学系を設置中である。このうちの半分の 48 ビーム (2 ~ 3 kJ) を束ねた片側ターゲット照射実験が計画されている。100 kJ 増幅器 PAM をもとにした MJ システム Polaris の計画は見送られたそうである。また可飽年吸収体として O₃ が単パルス用には優れた特性を示すことも報告された。

英国 Rutherford Appleton 研究では、KrF レーザー Sprite が出力 150 J、50 ns で定常的に運転され、既に多くのターゲット照射実験に単独で用いられているが、現在、短パルス増幅システム化が進められており、前置増幅器 Goblin による短パルス (5 ~ 12 ns) の増幅実験が Shaw 等によって行われた。その結果、5 ns パルス増幅において、レーザー媒質はエネルギー蓄積形

の特性を示し始めることが実証された。被増幅パルスの幅をピコ秒にまで短くし、ターゲット上で 10^{18} W/cm^2 のパワー密度を達成する計画が進められている。

物性研の Watanabe 等は、高出力ピコ秒 KrF レーザーシステムを既に完成させた。短パルス発生部の出力パルス幅は 20 ps 以下が得られており、最終段電子ビーム励起増幅器はパルス幅 70 ns で 160 J を発生している。各増幅器のトリガは、レーザートリガされた電気パルスと直接レーザートリガの併用で、ジッタは 1 ~ 2 ns である。

電総研の Owadano 等は核融合研究用 1 kJ 級 KrF レーザーシステムの間中段増幅器として、出力 174 J (パルス幅 85 ns)、総合効率 1.9 % の 2 方向電子ビーム励起レーザーを開発した。マルクス発生器を 1 台しか用いず、コンパクトで高効率の設計になっている。

KrF レーザー物性については、高い内部効率が予想されていた高 Kr 濃度媒質の特性について、Rutherford Appleton 研の Kannari 等及び電総研の Owadano 等からそれぞれレーザー強度 $< 10 \text{ MW/cm}^2$ 、 $10 \sim 20 \text{ MW/cm}^2$ の領域での測定結果が報告された。いずれも励起密度 1.4 MW/cm^3 までの範囲では、あまり大幅な改善は認められなかった。また KrF レーザーの主要な吸収体と考えられていた Kr₂F の吸収率が実際にはかなり低いことが電通大の Hakuta 等から報告された。他に KrF レーザーでは、電通大の Ueda 等が、共振器共振器中にファラデー回転子を挿入したユニークな発振器を発表した。

ArF レーザーについては、慶応大の Kumagai 等から、低圧力 (650 Torr) の Ne 無し媒質を縦打込み電子ビーム装置で励起したところ、95 J の出力が得られたとの報告があった。オランダの Twente 大の Peters 等は、高圧力 (~ 6 bar) の場合には、逆に Ne をバッファガスにした方が単位体積当りの出力が増加すると報告し、同軸形の高密度励起装置で 46 J/リットルを得ている。XeF レーザーについては Spectra Technology 社及び Avco 研究所から出力の増加、ガス劣化

のメカニズムについて報告があった。エキシマレーザーではないが、慶応大の Suda 等からは縦打込み電子ビーム装置を用いた HF レーザーによって 4.5 kJ という大出力を得たとの報告があった。(大和田野 芳郎)

5. 工業用 CO₂ レーザー

Industrial CO₂ laser technology のセッションでは 20 kW レーザーの発表が 2 件行われた。1 件は Alberta 大学の Seguin らによる招待講演で、他の 1 件は Hitachi の Kuwabara らによる講演である。

Seguin らの開発したレーザーは放電方式として UV 光予備電離による励起方式、通称 PIE (Photoinitiated Impulse-enhanced Electrically excited) を採用している。PIE は、その構成を Fig. 4 に示すが、もともと TEA レーザーの放電方式として開発されたものである。Seguin らはこの方式のインパルス動作の高繰り返し化と、低ガス圧力領域への拡張により放電を CW 化し、さらに放電ボリュームを増大させることにより 20 kW レーザーを開発した。Fig. 5 は 20 kW レーザーの外観写真である。

発振出力 20 kW は放電入力 260 kW (放電電流 65 A, 放電電圧 4 kV) において得られている。発振効率は 8 % である。レーザーガスは圧力 50 torr, 約 5 % の CO₂ を含んでいる。6 台のブローにより約 55 m/s の流速を得ている。共振器は

Fig. 5 Photograph of 20-kW CO₂ PIE industrial prototype.

Fig. 6 Laser output characteristics.

Fig. 4 Schematic diagram of PIE excitation process for TEA lasers.

不安定形共振器で、放電空間の屈折率不均一性のビームへの影響を除くため、光路は折り返し構成となっている。ビーム外径は約 10 cm で、ZnSe 窓を通して取り出された。

また、20 kW 出力をダイレクトに測定できるカロリメトリック形のパワーメータも開発され、これについても言及された。

3 軸直交形の PIE 20 kW レーザーに対して、Hitachi の Kuwabara らは高速軸流形で出力 20 kW を得ている。Fig. 6 はその出力特性である。

放電によりレーザーガスの温度は放電管中心部で約 120℃ に上昇し、レーザーガスはビームに対して曲率半径 140 m の凹レンズとして作用する。このため共振器内部を往復するビームは拡がりながら伝搬し、損失の増大を招く。この拡がりを共振器により補正した結果が Fig. 6 の (b) の出力特性で、補正前の共振器による特性 (a) に現われている出力飽和がみられない。ちなみにガス流速は 150 m/s とのことである。

共振器は不安定形で、増幅媒質を含めた共振器内ビームのシミュレーションコードによる計算結果と、実際に得られたビームのパターンとの比較の結果、良い一致が認められると発表された。

大出力レーザーによる加工は計 4 件の報告があった。

Fiat Auto の La Rocca は Fiat 社内におけるレーザーの適用例について述べたクランクシャフトの焼き入れ、ギアの歯車とシャフトの溶接、プラスチック部品の切断等である。

プラスチック部品の切断は 3 次元加工であり、5 軸制御システムにより行われる。5 軸のうち、X、Y、Z の 3 軸はガントリー部が、残りのあおり、回転の 2 軸はノズル部が受け持つ構成である。焼き入れ関係では、加工のみでなく、熱入力の理論式から求められた理論結果との比較検討も行われている。

実ラインへの応用はかなり進んでいる印象を受けたが、特に新しい技術は見られなかった。講演の最後に 1985 年度の日本のレーザー装置の生産台数、市場規模のグラフが示され、日本が世界のレーザー産業に対して大きな寄与をしていることが述べられた。

IBM の Seksinsky らはグリーンセラミックのレーザーによる穴あけ加工について報告した CO₂、YAG、エキシマの各レーザーと機械加工による穴の形状比較、レーザーパラメータが及ぼす影響等が報告された。

残りの 2 件は大出力 CO₂ レーザーによる溶接特性についての報告である。

筆者らは、不安定形共振器から出射されるリ

ング状ビームの伝搬特性を求める解析式について報告した。この解析式を用いると任意個数のレンズあるいは球面ミラーを含む伝送光学系に対し、ビーム径、中心強度の変化を簡単に求めることができる。さらに 20 kW レーザー装置からのビームを最長 34.3 m 伝送して Bead-On-Plate 溶接を行ない、短距離伝送の場合の特性と比較検討した。溶接テストによる溶け込み深さは伝送距離が長いと浅くなる。この傾向はレーザー出力が大きい程顕著であるという結果を得ている。

他の 1 件は Westinghouse の Carlson による発表で、溶接の比エネルギーと溶け込み深さについての報告である。溶接の比エネルギー J はレーザー出力 P と溶接速度 v の比、すなわち $J = P / v$ で与えられ、最も効率良く溶接ができる J の値を実験的に見出した。実験はレーザー出力を 4 ~ 11 kW まで変化させ、同一の溶け込み深さが得られるように溶接速度を変化させて行なわれた。その結果、 P に対して J は下に凸の曲線となり、 J の極小値が存在することがわかった。この結果は v を適切に選べば、少ないレーザー出力で同一の溶け込み深さが得られる条件が存在することを示している。彼らのレーザー装置と光学系では、 J の極小値は 5.5 kJ/cm とのことである。

(名井康人)

6. CO₂ 及び CO₂ 励起レーザー

CO₂ 及び CO₂ 励起レーザーのセッションでは、6 件の講演があったが、その中で筆者の興味をひいたものについて報告する。

M. Piche 等は、焦点の位置に結合孔を持った負ブランチ共焦点形不安定共振器の特性についての解析と実験結果を報告した。理論的な解析から示されたこのタイプの共振器の特徴は、フレネル数が大きくなるにつれてモード分離がよくなる点にあり、あるフレネル数以上ならば大口径で単一モードが得られるところにある。実験では、放電体積 $9 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ の TEA CO₂

レーザーにマグニフィケーション $M=5.0$, フレネル数 $N_F=1.5$ の共振器を用いて, 単一モードで12 Jの出力を得た。このときのビーム径は4 cmである。

カナダのJ. Reid等のグループは, 以前より4.3 μm レーザーを開発してきたが, 今回は, この4.3 μm レーザーを光源として, CO_2 分子を光励起した結果, 20%/cmという高い利得係数を得たと報告した。ピークパワー60 kW, パルスエネルギー9 mJの4.3 μm レーザー光を内径1 mm長さ5.5 cmの毛細管内の CO_2/He 混合ガスに照射した。このときの全圧は1,000 torrで CO_2 濃度は1%であった。レギュラーバンドとシークエンスバンドの利得係数を測定しその比から得られた振動温度は約5,000Kに達した。Reid等の考察では, このような高い振動温度が達成できた理由は, 光励起では放電励起で問題となるような電子による失活がないためであり, 逆に放電励起で利得が低いのは主に電子による振動緩和が大きな原因であることが示されたと結論している。

筆者等は, 16 μm 水素ラマンレーザーの励起光源として開発している波長連続可変 TE CO_2 レーザーシステムについて発表した。本システ

ムは, 小型の紫外光予備電離型発振器と放電体積 $1.5 \times 3 \times 50 \text{ cm}^3$ のX線予備電離型増幅器で構成され, 1 J以上の出力が得られた。講演では主に高気圧レーザーを設計する際に問題となるX線の予備電離特性に関して, 動作圧力や入力密度依存性及び励起回路の影響などについて報告した。

その他, これは同位体分離のセッションでの招待講演であったが, 西独の Uranit のグループの16 μm ラマンレーザーに関する発表が興味深かった。マルチパスラマンセルは液体窒素冷却で49パス (200 m) である。 CO_2 レーザー光3.7 Jの単独入力に対して得られた16 μm ストックス光出力は0.2 Jと効率はまだ低いが。TEA CO_2 レーザー光と同時に高気圧レーザーからの連続波長可変光をラマンセルに入射し, 4光波混合により16 μm 帯で2波長のストックス光を同時に得ている。このとき波長可変光の入力エネルギーは200 mJで, 得られたストックス光出力は10 mJ以下であった。このシステムは, 10 Hz で2~3時間程度動作するということがあるが, UF_6 への照射効果に関しては発表されなかった。

(緑川克美)