コンファレンス・レポート

第2回KrFレーザー技術に関するワークショップ

神 成 文 彦*

Report on 2nd Workshop of KrF Laser Technologies

Fumihiko KANNARI*

1. はじめに

9月19日から22日にかけてカナダのアルバータ州バンフにおいて第2回KrFレーザー技術に関するワークショップが開催された。第1回は、昨年4月に米国ニューメキシコ州サンタフェにおいてロスアラモス研がホストとなって開催されており、今年はそれを受けてアルバータ大学がホスト役となって行われた。このワークショップは、KrFレーザーといってもICFドライバとしての電子ビーム励起方式を中心とした高出力KrFレーザーに関する、パルス・パワー技術、レーザー動力学、レーザー光学系、光学材料、ターゲット実験について小規模ながら実際の当事者が集まって当面の問題点と開発研究の方向付けを確認しようという意図で開催された。昨年同様約70-80人の研究者が、ロスアラモス研、NRL、アルバータ大、ラザフォード研といった実際にICF用にKrFレーザを大型化している研究所から参加した。その他、スペクトラ・フィジックス社、AVCO、スペクトラ・テクノロジー社 (STI)、リバモア研、サンディア研、中国、マックス・プランク研からも出席があった。日本からは、電通大から植田、米田両氏、電総研の奥田氏、と筆者の4名が参加した。

ワーク・ショップは、7件の招待講演を含ん

で30件の口頭発表と10件のポスター発表に加えて、2時間半にわたる所謂ワークショップが6テーマについてそれぞれ行われた。会議は、午前と夕食後に限られ、昼食後は自由行動になっており観光シーズンもピークを過ぎて比較的落ち着いた、穏やかな気候のバンフ、レイク・ルイズの散策を楽しんだ参加者が多かった。

会議全体の印象としては、ロスアラモス研、NRLの研究が、横軸を時間とした時に、ここ数年の傾きの延長として緩やかに前進はしているものの目を惹くような結果、構想は発表されなかった。東西緊張緩和に伴うDOD関連の研究費の削減によってか景気の良い話は全くなく、AVCOやSRI社の人員削減に象徴されるような、今までのようなDOD主体の米国のレーザー研究が不調であるという印象が強かった。アルバータ大からも、後述するようなkJレベルのKrFレーザー構想の話が発表されたが、予算については見通しが明るいとは言えないようである。色々なデザインは現状の技術をもってすれば可能であると思うが、全体の予算の流れをKrFレーザーの方に向けられるに十分なターゲット・プラズマやビーム伝送の実験が現状では貧弱のような気がする。

昨年は、電総研からの発表がきわだっていたが、今年は電通大からのコンポーネント開発やターゲット実験の発表が好評で中規模ながら地

*慶応義塾大学理工学部電気工学科 (〒233 横浜市港北区日吉3-14-1)

*Faculty of Science and Technology, Keio University (3-14-1, Hi-yoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223)

道な日本の研究から良い結果が得られているのは誇らしいことである。一方ヨーロッパでは、ICFドライバとしてよりも高ピーク出力の短パルスKrFレーザーとして 10^{15} Wレベルのレーザー建設構想がマックス・プランク研とラザフォード研から発表され、その準備段階はすでに両研究所共開始されている。放電励起エキシマレーザーのユーレカ・プロジェクトと同様にヨーロッパ統合と並行して楽観的過ぎると思われる大きなレーザーに関する大型プロジェクトが、どういう形にせよヨーロッパで生まれそうである。

第3回のワークショップはそういうこともあってか、1992年にラザフォード研がホストになってイギリスで開催される予定である。

2. KrFレーザーシステムの現状

ロスアラモス研は、今年になって1月から8月までに約50ショットのターゲット実験を行い、約1kJを3–20nsのshaped beamで $600\mu\text{m}$ 以下のスポットサイズ内に集光できるようになっている。48ビームの出力のばらつきは約16% rmsで、ターゲット上でのASEに対するaspect比はピーク出力で 10^7 である。発振段における $150\text{--}200\text{cm}^{-1}$ の広帯域巾パルスや、プレパルス成分を伴う人為的にプラズマ実験用に最適化されたパルスの成形、増幅についても報告された。広帯域幅パルスは今年のCLEOで発表されたようにエタロンを用いてKrFの利得スペクトルの両端に2本発振させて増幅過程でちょうどその間を埋めてスペクトル幅を拡げようというものであるが、現状では何らかの吸収媒質によって窪みが残ったままである。今後1–3年間で48ビームの最適化を行い5kJをターゲットに集光できる方向にもっていき、その際に、パルスの時間形状、スペクトルをプラズマ実験に最適のように成形する技術を確立していくそうである。

NRLのNIKEプロジェクトは、Echelon-freeのISI (Induced Spatial Incoherence) を用いて人為的にコントロールされた完ぺきに近い (< 1%) 均一な集光プロファイルを>3kJのエネ

ルギーレベルで達成しようという目的で進められており、 $20\times 10\text{cm}^2$ 口径の放電励起前置増幅器、20cm直径の電子ビーム励起増幅器は完成している。発表では、放電励起レーザーを用いた小規模でのISIの実験結果と最終段増幅器としての $60\times 56\times 200\text{cm}^3$ の5kJレーザーの設計について報告があった。ISIは、回折限界の60倍の平坦なビームプロファイルを達成していたが、平坦度はまだ3%であった。最終段増幅器の設計については、励起が強すぎてASEあるいは寄生発振によって設計値通りの出力が出ないのではないかという意見が多かった。

電通大からは、ここ数年のコンポーネントあるいは増幅スキームの開発結果のレビューが発表され、電子ビーム用カソード、アノード、可飽和吸収体用色素、偏光ビーム増幅、多層膜鏡、ファラデー回転素子がポスター発表と合わせて紹介された。また、最近のプラズマ実験の結果も簡単に紹介され、ほぼ100%に近い吸収が248nmで得られることや、ブリルアン散乱において500nmレーザー光照射時とは反対のred-shiftが観測されたことを発表した。

3. 電子ビーム技術およびレーザー動力学

ロスアラモス研の電子ビーム技術も、やっと攻めるべきポイントまで到達してきたという感じで、電子ビームの高効率発生とガス中への伝播に開発の着眼が動いてきた。現在のLAMはダイオード中で160kJの電気エネルギーがありながらガス中には53kJしか蓄積されていない。現在銅のストライプ補強をしたKapton膜を用いてHibachi構造の開口比を65%から85%に増大させようとしている。ただし、膜の補強に用いられているエポキシ材の不均一性が寿命に影響しないか疑問ではある。また、アノード膜でのプラズマ生成が高電界下では真空アークを起こすので、この真空アークが起きないようなアノードの加熱条件を決めると自動的に取り出さるレーザーの最大値 (J/1. atm) が制限されてしまうという、おもしろい解析がRosochaから報告された。この場合レーザーの効率は

10%と仮定しているが、LAMではこの値が115J/1. atmで実験値とも一致する。従来電子ビーム励起では、ガスが電源の負荷にならないのでガスに入るエネルギーは本質的には制限されないはずなので議論を呼んでいた。また、3Dのparticle-in-cellモデルが電子ビームダイオード用に開発され、電子エネルギー分布やプラズマ不安定性についても解析されていた。Maxwell社とNRLからも電子ビームエネルギーの蓄積の測定や小信号利得、取り出し効率について発表されていたが、見るべきものはなかった。

Kineticsについてはロスアラモス研でもまだかなりの人員をさいて行われているが、今にしてまだKrFの反応kineticsがkey issueであるとは考えられない。前述のような、広帯域巾増幅やパルス成形の実験自体は評価に値するが、今更この反応の反応定数が大きいとか小さいとかいうのは学問的には意味があってもICFドライバ開発の重要な研究項目ではないであろう。そういうことがもし重要ならば数kWの放電励起エキシマレーザー開発プロジェクトなどは進められないことになる。STIのKimuraからkineticsにおける問題点がまとめられたが、10年前に挙げられたであろう項目がほとんど残っており、逆に言えばそれほど重要ではないということである。強いて挙げれば、ASEと寄生発振を技術的面からいかに抑制するか、またその影響を設計段階でいかに制度良く見積れるかであろう。実際LAMのASE評価は現状ではモデルが過大評価であるとのことである。

唯一kinetics関連で筆者が学問的に興味をひかれたのは、ロスアラモス研のPattersonが、最近STIがKrFのSide-lightを分光測定した実験結果をモデルで説明するためには、KrF (D) 準位から (B) 準位の各振動準位へのnon-sequentialな移行が必要であると報告した点と、ラザフォード研で短パルス増幅器用に100Torr近い低圧力を想定して小信号利得を測定した点であった。KrF上準位の振動緩和は取り出し効率のうえでかなりモデルの面からは重要である。低圧力のKr/F₂ガスでは、生成効

率が悪いからあるいは振動緩和が完べきではないために圧力と小信号利得が比例しない。学問的には、一度理由を明らかにしておいたほうが良いであろう。

4. 光学システムおよび次期システム設計

ラザフォード研のShawより当該研究所の100kJ・KrFレーザー構想のレビューがあった。100kJは、12.5kJのコンポーネント開発を基盤にしている。すでにそのcase study用のSuper SPRITEと呼ばれる7 kJ増幅器の建設は着手されており、そのMarx/PFLについてはポスター発表された。発表では、Raman combining法のASE除去の上での有用性が強調され、Raman変換の効率は外部効率で40%程度であるが、ビーム品質も高いのでターゲット上での輝度は単純なMultiplexingよりも良くなるとの見積であった。ラザフォード研では、ICFよりX線レーザー励起用の10ps近傍の短パルス発生に着目しており、エネルギー蓄積能力の低いKrFを励起時間いっぱいにわたって高い取り出し効率で利用するためには、発表されたような短パルスのパルス列の複数ビームでMultiplexingして、Ramanの励起とRaman変換後に2段階にわたってbeam combiningする方法は有効である。100kJ・KrFレーザーはEurolaserと呼ばれるプロジェクトでフランスのガラスレーザー開発と競争していくようになっており、5年間で12.5kJ (Raman出力100TW/ns)、さらに9年間で100kJ (Raman出力1 PW/ns) をそれぞれ44Mecu, 133Mecuで建設しようという構想である。12.5kJコンポーネントは、1 m口径の増幅器であり、ビーム数は64本である。予算については未だ未定で当面はSuper-SPRITEの開発を進めていく予定であり、3 kJ/3 psで1 PWの出力までは達成可能であると述べていた。

また同じくラザフォード研から248nmにおける非線形効果について発表があった。光学材料中での多光子吸収、Self Phase Modulation (SPM) はよくいわれるが、伝播中の空気によるSPM、回転Raman散乱についても報告された。

SPMは、 $\int Idl=150\text{TW/cm}$ でかなりのスペクトル幅の増加を起こす。回転Ramanは、発振段で transfer limited よりもかなりスペクトル幅の広い入力パルスを発生させると、スペクトルの端の成分がRaman変換の種として働いてしまうため、損失が高くなってしまうとのことである。外部共振器によって短パルス色素レーザーを安定化して transfer limit のパルスを用いることによって 40TW/cm でも回転Ramanによるスペクトルの拡がり観測されていない。また光路を Ar で充たすことも有効である。

NRLのLehmbergからは、NIKEのISIに関する光学系について発表があり、ビーム質に係わる要素として、レンズの色収差、レーザーガス中のハロゲン密度の変化、その不均一性による屈折率のダイナミックな変化、光学素子の表面状態、空気による乱れを挙げていた。屈折率については、過去にXeFについて報告された例があるのみであり、測定されればおもしろい。

アルバート大学から発表された $1\text{ kJ}/6\text{ ns}$ の KrFレーザーは、従来のA/B増幅器にさらにB増幅器を1台追加しており、ISIを用いて $100\text{ }\mu\text{m}$ の集光サイズを想定している。光学系は、光学系の直径を小さくしてコストを減らすためにレンズ系を用いている。

ロスアラモス研から発表された 100 kJ の Laser Target Test Facility (LTTF) および 3 MJ のデザインは、近年特に技術、コンポーネント開発において break through があったわけではないので、従来の設計方針を用いており特記することはない。ちなみに、LTTFのゴールはパルスのアスペクト比 10^7 以上、 $0.05 < \Delta\omega/\omega_0 < 0.5\%$ 、フォーカス径 $500\text{ }\mu\text{m}$ である。反射鏡は、 1.4 m 径を基準にして用い、 60 kJ の電子ビーム・ダイオードで $120 \times 260 \times 310\text{ cm}^3$ のセルを励起し、それを3台用いる。

5. ピコ秒レーザー

今回からは、ICFに限らず High Brightness Laser として短パルス KrFレーザーもセッションに加えられた。が、一般にICF用に開発して

いるロスアラモス研、NRLの研究者の関心は薄かったようであった。

ラザフォード研からは 40 ps と 12 ps パルスでの Raman Beam Combining 実験について詳細な報告がなされた。増幅された8ビームのうち7ビームが、セグメント鏡を用いて均一に励起された CH_4 ガスによって1本のRamanビームに変換され、この時出力は、 40 ps パルスで 5 J 、 12 ps パルスで 4 J であった。後者の出力は石英の2光子吸収で制限されている。ただし、その吸収を最低限に抑えるよう 2 mm 厚の窓材を使っており将来は CaF_2 に代えるそうである。 40 ps パルスでは、ポンプ光に対して約 $1/5$ 倍のビーム拡がり角の改善が達成されており、回折限界の $5-6$ 倍である。ターゲットに集光した場合ショット平均 2.5 J 、 $1 \times 10^{17}\text{ W/cm}^2$ が $8\text{ }\mu\text{m}$ 径にて得られている。ターゲット実験の結果、ビームにたいして直交方向のエネルギー拡がりガラスレーザーに比べて大きくX線レーザーの励起には短所になると報告された。しかし、水素、ヘリウム様のスペクトルが支配的でプラズマ温度が十分高いことは証明された。 12 ps パルスは、線状集光で $1 \times 10^{15}\text{ W/cm}^2$ 、スポット状集光で $3 \times 10^{17}\text{ W/cm}^2$ が得られており、さらにエネルギーの直交方向への移動も 40 ps パルスに比べてかなり抑えられている。

マックス・プランク研からは、東大物性研の遠藤氏が $10 \times 10\text{ cm}^2$ 口径の 500 fs パルス増幅用放電励起 KrF レーザ装置について発表した。放電励起では、口径の増大と共にヘッドのインダクタンスが大きくなるので励起密度が低下してしまうのが欠点であるが、この場合 500 fs パルスに対して $3\%/ \text{cm}$ の小信号利得が得られていた。マックス・プランク研では、独自に $100\text{ J}/100\text{ fs}$ の PW 級レーザーの開発が行われるそうであり、低圧ガスを用いた進行励起型の増幅器が想定されている。

電総研からは、 $21\text{ J}/10\text{ ps}$ という高い出力の発表があった。特徴としては、6ビームの multiplexing を行い可飽和吸収体を用いて前置増幅器からの ASE レベルを低くし、ターゲット上で

10^9 パルスのアスペクト比を達成している点である。再結合型のX線レーザー励起には、 $30\text{J}/10\text{ps}$ が必要と見積っており、今後の結果が楽しみである。

この他、短パルスレーザーについてはポスター発表で発振段の色素レーザーについて外部共振器を用いたラザフォード研と、LLG社の分布帰還型色素レーザーを用いたアルバータ大から発表があり、筆者はコヒーレント増幅の計算モデルの結果とGated Gain Amplification方式による増幅時のASEの減少について計算モデルの結果を発表した。

6. その他

個別の発表に加えてConcurrent Workshopと称した2テーマ並列の意見交換のセッションが以下の5テーマについて行われた。1) E-Beam, 2) Kinetics, 3) Optics, 4) Advanced Systems, 5) Picosecond Lasers.

筆者は1), 3), 5) に出席したので大まかな議論の様子を紹介すると、Pulse Powerについては、電子ビームの発生とHibachi構造/アノード膜の透過特性の効率を上昇させる点に議論が集中した。さしあたっては、ロスアラモス研のE-Gun Test Facilityでの彼らの新しいCu/Kaptonアノード膜と開口率85%のHibachiの実験結果待ちというところである。Kapton膜と F_2 ガスの反応性とその影響については、各研究所でまちまちの意見であったが、電通大の実績から今後はKapton膜主体で良いと思われる。Opticsについては、リバモア研のMurrayがDupon社のfluorinated co-polymerの薄膜が $1.6\mu\text{m}$ から 200nm スペクトル領域で高い透過率を持ちかつ 535nm では $40\text{--}50\text{J}/\text{cm}^2$ のダメージしきい値を持つことを紹介した。リバモア研では、KDPや反射鏡のARコートとして用いているとのことで、ラザフォード研やマックス・プランク研のような短パルスKrFレーザーを開発しようとしているところでは、増幅器のガス圧を 100Torr 位まで落としたときに窓材として利用できるのではないかと期待しているようであっ

ワークショップの行なわれたバンフ・センター

た。一方従来のICFドライバー用としてのKrFレーザーのための大口径鏡の開発、とくにダメージしきい値の改善については、ロスアラモス研のKrFプロジェクトの当初からもっと定期的に開発費をさいて企業と共同で開発してくるべきで、毎年ただ企業自身のR & Dの結果を期待していてもだめだという厳しい意見も聞かれ、もっともだという感がした。常にコスト計算では、光学系の占める割合が最も大きい割には、開発費にかかる予算も人員数も少ないのは明らかである。電通大の植田氏からフッ素系材料による多層膜コート鏡で高いダメージしきい値が得られている日本の現状が紹介され注目されていた。また、日本の CaF_2 結晶も注目されているが、機械的ストレスがかかった時の複屈折と表面散乱が大きいのが問題である。短パルスレーザーのセッションでも光学材料についての情報交換が多く、 $1\text{--}5\text{ps}$ のパルス巾で $1\text{J}/\text{cm}^2$ のダメージしきい値が全反射鏡で得られていた。前述のDupon社のテフロン系薄膜 (AF2400)

については短パルスでも特性が測定されており, $30\text{mJ}/\text{cm}^2$, 500fs のパルスでも85%以上の透過率を有している。

日本では, ICFドライバーとしてのKrFレーザー開発や, High Brightnessエキシマレーザーについて, 大規模な構想は最近聞かれないが,

欧米で盛んになれば復活してくるであろうから, 今までのような着実なコンポーネント技術開発や基礎的プラズマ実験のデータを蓄積しておくことが重要で, そうすればいざとなっても決して遅れをとることはないように思われた。