レーザーエコー 3

レ　ー　ザ　ー　に　つ　い　て

宅　間　　宏*

High Power Laser for Thermonuclear Fusion
Research

Hiroshi TAKUMA*

今回のセミナーは、レーザー光とプラズマの相互作用の問題や爆縮の安定性などが中心課題であったが、第1日目はレーザーを中心としたセッションを持ち、Lubin (Rochester大)によりRochester大学におけるガラスレーザーを中心とした高出力レーザー開発の状況が報告され、霜田(東大)によるレーザーの効率向上に関するコメント、宅間(阪大)による大阪大学のディスクレーザーを中心とした我が国の高出力ガラスレーザーの現状報告、泉谷(保谷ガラス)による新しいレーザーガラスの開発に関するコメント、そして中井(阪大)による大阪大学の高出力CO₂レーザーの報告が行なわれた。

まず、Rochester大学のガラスレーザーは、Fig.1に示すような構成からなり、単一モード

ガラスレーザー発振器の出力を2段の前段増幅器、4段のロッド型中間増幅器によって200~350Jにまで増幅し、最後に4列に分けてディスク型増幅器でそれぞれのビームを増幅して、4ビームの出力を合わせてパルス幅600psecにおいて最大1.4kJ、100 psecにおいて400Jをターゲット上に集光し得る能力を持っている。各出力ビームの直径は11cm、全断面積は380cm²、出力パルス幅はFWHMで10⁻⁹~10⁻¹⁰secの範囲で可変、出力ビームの開き角は4 mradである。

このレーザーシステムの特色は、前段増幅器と中間増幅器の間にアポダイズ絞りを挿入して自己集束によるフィラメントの生成を防止していること、ディスク型のレーザー硝子の間にBK7のプリズムを挿入して、その間に屈折率を合

Fig. 1 Schematic diagram of the glass laser system at Univ. of Rochester.

* 大阪大学レーザー工学研究施設

* Institute of Laser Engineering, Osaka University

せた冷却液 (DMSO) を順還させて温度を一定に保ち出力の安定とくり返しの早さについて向上を計っていること、ミニコンピューターによって設定値を制御することにより、安定な動作を行ない得ることなどである。また、基本的な設計思想として、自己集束効果を抑制するために、 $\int ndx$ を最小にすることを重点においている。特に、11秒毎に安定した動作が可能であることは、実際にレーザーを用いて実験を行なう上に著しく有利である。

これに対し、大阪大学のガラスレーザーは、Fig. 2 のような構成で、最終的には有効径 8 cm のディスク型主増幅器で最大 250 J の出力を 2 ~ 10 nsec 可変のパルス幅で取出すことができる。

Fig. 2 Schematic diagram of the 250J Nd: glass laser system at Osaka Univ.

現在は単一ビームであるが、ロッド型増幅器最終段の出力を 4 ビームに分け、それぞれのビームに、同様のロッド型増幅器とディスク型増幅器を増設することにより、4 ビーム 1 k J と拡張することは可能である。

阪大のディスク型主増幅器は、従来のガラスレーザーの構造を大きく変えない範囲で可能な限り高いポンピング効率を得ることを第一の要求とし、試作にあたっては、簡単な計算機シミュレーションによってオプティマムな条件を見出す技術の確立に努め、今後のスケールアップに備えて技術的基礎を固める方針をとった。

その結果ポンピング効率は 0.51% と従来より著しく高い値を得、小信号利得の均一性、飽和増幅器としての特性など、予測値と実用上十分一致する結果を得た。その一例として、入力エネルギーの増加に伴う利得の変化の計算値と

実測値のプロットを Fig. 3 に示す。

Fig. 3 Large signal gain of two disc laser heads (8 disc). Solid lines show the results of the calculation.

このように、基本的には、核融合研究用高出力ガラスレーザーの技術的格差は、日米の間に殆んど見られないと思われる。しかし、より安定な動作のためには、計算機による各パラメータの制御などの点について、研究室と人員の不足によるハンディキャップの存在することは見逃し得ない事実である。

以上で示されたように、レーザー核融合の科学的検証実験 (SFX) に必要と考えられている 1 kJ 級の出力は、ガラスレーザーによって現実のものとなっている。しかし、実際に核融合炉が実用的意義を持つためには、レーザーの効率が少なくとも 5% 以上はなくてはならない。霜田のコメントは、効率という観点から現存のレーザーを見出すことにより、より高い効率の可能性を探ろうとするものである。レーザーの全効率 η_{TOTAL} を、全励起エネルギーのうち媒質の励起に使われる割合 η_{pump} 、媒質のエネルギーが、レーザー準位の励起に使われる量子効率 η_{qua} 、ポンピング光とレーザー光のエネルギーの比 $h\nu/h\nu_p$ 、励起された媒質の中レーザー作用に寄与する部分の体積率 η_{vol} 、ポンピングによって貯えられた負温度のエネルギーが有効にレーザー出力として取出せる割合 η_{EXTR} と分け、

$$\eta = \eta_{pump} \cdot \eta_{qua} \cdot (h\nu/h\nu_p) \eta_{vol} \eta_{EXTR} \quad (1)$$

とあらわし、各因子について各種のレーザーに関して論じ、極めて高い効率を持ち得るレーザーとして、半導体アレイを用いる提案も行なわ

れた。

特にガラスレーザーの効率向上については、宅間によって、霜田、宅間、富山（日立）、加藤（電総研）らの討論の結果出た新形式が提案された。これはFig. 4のように、ガラスディスクの表面からGaAs発光ダイオードによってポンピングを行ない、ガラスの1面には、ポンピング光に対して反射防止、レーザー光に対して100%反射を行なう多層膜を、他面には、逆にポンピング光を100%反射してレーザー光に対しては反射防止の多層膜を付けるもので、10%近くの η_{TOTAL} を得る可能性がある。発光ダイオードが高出力のポンピングは当面不可能ならば、放電管によるポンピングでも、この配置によれば η_{TOTAL} は著しく向上する筈である。

Fig. 4 Conceptual diagram of high efficient glass laser

R_p , R_L : The reflectivities of multilayer coating on the glass surface for pumping and laser light, respectively.

これに対して、Lubinからコメントがあり、同様の考えのレーザーで、放電管励起のものが、Rochester大学でテスト中であり、確かに高い効率を得ているとの事で、講演者を驚かせた。

ガラスレーザーの限界としては、効率の問題の他に熱伝導性が悪いことによる冷却速度の問題は、容易に克服し得る難点である。ディスク型レーザーは、冷却のために都合のよい構造ではあるが、数秒に1度程度のくり返し速度を大幅に向上することは不可能に近いと考えられる。

そこで、より有望な核融合レーザーのアプローチとして、エキシマーレーザー、あるいはエキシマーから共鳴エネルギー移動によって励起状態の分子（あるいは原子、それらのイオン等）

を発生する広義のエキシマーレーザーの研究が盛んになりつつある。この会議では、これらのレーザーを研究中の専門家が出席しなかったのは残念であったが、Lubinによると、波長3000~5000Å、効率10%、出力1kJを目標に、エキシマーから酸素原子へのエネルギー移動によるレーザーが5ケ年計画で進行中との事である。

ガラスレーザーに戻ると、アメリカのオーエンス・イリノイ社と並んで、保谷ガラス社の製品が、主要な高出力レーザー用材料として知られている。泉谷は、現在のけい酸ガラス系から、リン酸ガラス系へ変えることによって、誘導放出断面積を向上しうること、また材質を選ぶことにより、非線型光学定数の著しく小さいレーザーガラスを作る可能性のあること等を述べ、特に後者については出席者から著しい興味が示された。非線型効果による自己集束が、現在ガラスレーザーの出力限界となっているので、この問題が解決すれば、高出力ガラスレーザーの設計と取扱いは著しく楽になる。

炭素ガスレーザー、特に電子ビーム制御型TEAレーザーは、出力波長が長い(10.6μm)という難点を除けば、極めて有能なレーザーである。阪大のCO₂レーザーシステムは、Fig. 5に示すような構成で数百ジュールパルス幅2nsecを目標に開発中であるが、現在発振段では100mJ 3nsecの出力が得られ、第1段増幅器を発振器として30ns 6Jの出力を第2段増幅器によって、80Jにまで増幅している。発振器と2段の増幅器がうまく連動すれば、50J以上の出力を3nsec以下のパルス幅で取出し得てであろう。

Fig. 5 E-beam controlled CO₂ laser system, 200J, 1ns.

核融合用炭酸ガスレーザーで最も実績のある

Los Alamosから、レーザーそのものの発表がなかったのは残念であった。しかし、ターゲット実験の様子や、K. Boyerとの非公式な会話によって推測すると、Los Alamosといえども、短パルスで数%の効率を得ることはまだむづかしく、また寄生発振によって高出力化も限定され、ようやく 1.5 nsec 200Jが得られるよう

になった段階のようである。当初の計画は1kJだったのが、1 kJ用としては、更にスケールアップをせざるを得ないように見える。スケールアップには、より深刻な寄生発振の影響を覚悟しなければならない。ガラスレーザーと異なり、CO₂レーザーには、今後の研究にまたなければ 1nsec程度のパルスで1 kJ の出力には致らないように思われる。