

高繰り返し電子ビーム励起KrFレーザー増幅器の開発

奥田 功

(独)産業技術総合研究所 (〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2)

Development of a High-Repetition-Rate Electron-Beam-Pumped KrF Laser Amplifier

Isao OKUDA

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
Tsukuba Central 2, 1-1-1, Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

(Received October 20, 2003)

A high-repetition-rate electron-beam-pumped KrF laser amplifier under development at AIST is described. The outline of the laser system developed for long-time operations under repetitive pumping conditions is introduced and test results measured at a repetition rate of 1 Hz are presented. The laser system and experimental results are evaluated in view of future laser drivers of inertial fusion energy.

Key Words: KrF laser, High repetition rate, Electron beam, Lifetime, Laser driver

1. はじめに

レーザー核融合用のエネルギードライバーを想定した電子ビーム励起KrFレーザーの高繰り返し動作技術の開発について述べる。KrFレーザーはガス媒質故に高繰り返し動作において本質的な困難さが無く、内部効率が高いことに加えて、大面積電子ビームによって大容積レーザーガスを高効率で励起することが可能であり、大口径化、大出力化が容易である。更に燃料球へのエネルギー投入に有利な紫外域の波長を有し、波長幅が広いことからレーザービーム強度分布の平滑化、標的の一樣照射が容易である、等々、エネルギードライバーとしての能力を十分に有するレーザーと考えられている。このKrFレーザーの能力を引き出し、また照射実験に資するために、当所ではこれまで口径60 cmのレーザーガス容器及び出力窓を有する電子ビーム励起KrFレーザー装置“Super-ASHURA (Amp4)”の開発を行い、同レーザー増幅器から約3 kJのレーザー出力を得た¹⁾。このレーザー装置の外観をFig. 1に示す。この大口径レーザー増幅器の開発において得られた成果を基に、実用炉用ドライバーで要求される電子ビーム励起式KrFレーザーの高繰り返し動作技術の開発に着手した²⁾。現在当所で開発を進めている高繰り返し電子ビーム励起KrFレーザー装置をFig. 2に示す。

高繰り返し電子ビーム励起KrFレーザーの開発においては、従来の単発動作のレーザー装置では問題にならなかった様々な技術課題を解決する必要がある。すなわち高電圧電源の高繰り返し化、長寿命化、電子ビーム発生部及び光学素子の高耐力化等、多くの課題があり、各国で電子ビーム励起KrFレーザーを用いて様々な研究開発が進められている(米国NRL “Electra”(Fig. 3)³⁾、ロシアP. N.

Lebedev Phys. Inst. “Garpun”⁴⁾)。当所では高繰り返し動作の基本技術の開発を目標として、特に高電圧パルス電源、及び電子ビーム発生部の長寿命化のための研究開発を行っている。具体的には高電圧磁気スイッチをベースとした高電圧パルス回路を導入し、レーザー出力20 J規模の1 Hz動作のレーザー装置の開発を通して、電子ビームエミッターの長寿命化、ダイオード真空部とレーザーガスを隔てる電子ビーム透過フォイルの冷却等に関して研究開発を進めている。

2. 高繰り返しパルスパワー

電子ビーム励起KrFレーザー装置の高繰り返し動作のためには、まずパルスパワーシステムの長寿命化が必要であるが、そのために我々の装置では磁気スイッチをベ-

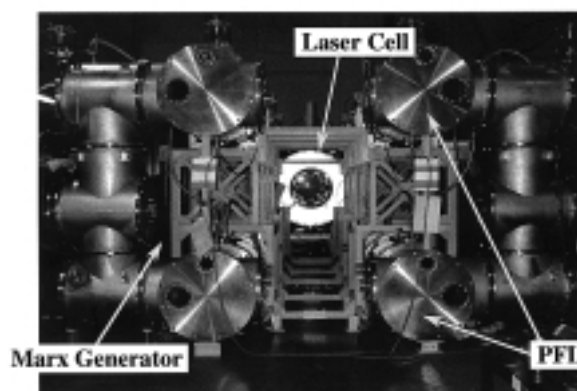


Fig. 1 60-cm-aperture electron-beam-pumped KrF laser, “ASHURA-Amp4”.

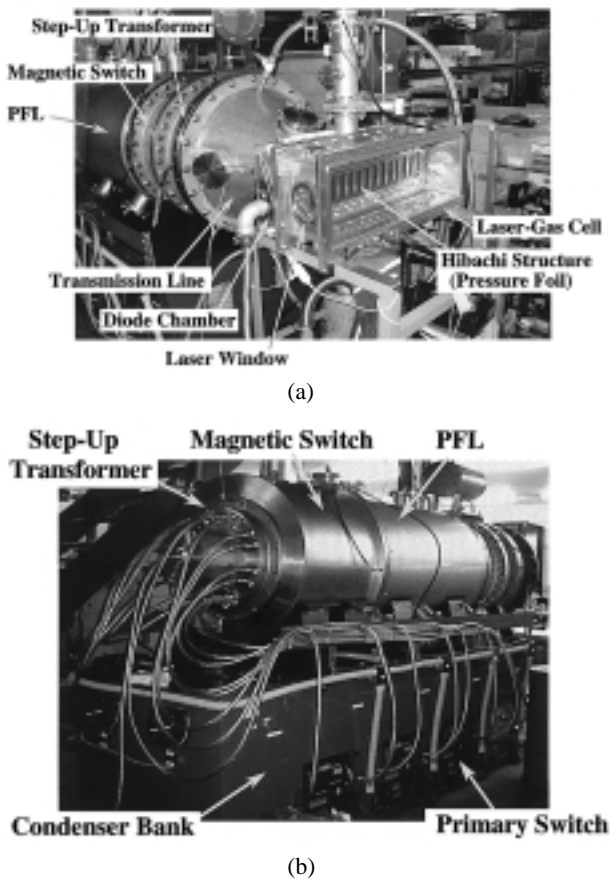


Fig. 2 High-repetition-rate electron-beam-pumped KrF laser under development at AIST. (a) Front view, (b) Rear view.



Fig. 3 High-repetition-rate electron-beam-pumped KrF laser "Electra" at NRL.

スとしたパルスパワー回路を整備した。パルスパワー回路の構成をFig. 4に示す。これまで大出力レーザー用の高電圧電源においては高電圧スイッチとしてスパークギャップが用いられてきたが、それらは特に長時間動作においては電極の消耗が大きな問題となっていた。そこで同高繰り返しレーザー装置の電源部ではスパークギャップを排し、長時間耐久性を有する磁気スイッチ及び昇圧トランスをベースとしたパルスパワー回路を導入した。同回路の動作としては、まず初段蓄積コンデンサー(8台並列、各30 kV充電)に定常的にエネルギーを貯え、各並列充電回路の主放電スイッチ(サイラトロン)、昇圧トランス(1:10)及び1段の磁気圧縮回路を経て純水充填のパルス成形線路(PFL)を充電する(300 kV, 0.2 μs)。PFL充電完了後、その出力側の磁気スイッチが動作して80 nsパルスが生成され、パルストランス(1:2)、同軸出力線路、及び真空隔壁を通して300 kVパルスを電子ビーム発生用ダイオードに伝搬する。なお磁気スイッチ及び昇圧トランスの磁性体コアには、比較的大きな磁束変化量(3.2 T)を有し、エネルギー損失の少ない鉄系アモルファスを用いている⁵⁾。また同装置の初段スイッチには現在放電スイッチを用いているが、固体スイッチ⁶⁾を用いることで電源の一層の長寿命化が可能である。

同パルスパワー回路において、PFLのスイッチングに磁気スイッチを用いることでPFLの充放電が1 Hz動作において長時間にわたり安定してなされている。PFL充電波形をFig. 5に示す。この波形はPFL出力側の昇圧トランス(1:2)の直後に模擬負荷を設置し、PFL出力端(水中)に置いた抵抗分圧器で測定した。この試験結果から、定格通りの高電圧パルス列(電圧 - 300 kV, パルス幅80 ns, 繰り返し頻度1 Hz)が、ショットごとのばらつき10 ns以下で安定して得られている⁷⁾。PFLのスイッチングに磁気スイッチを用いる場合、PFL充電中ダイオードにプレパルスが現れるが、出力線路に誘電率の大きい純水を充填し線路の容量を大きくしているため、プレパルスの大きさは電子ビームを発生させないレベル(< 30 kV)に維持されるので問題無い。必要に応じて出力線路の延長により更に容量を増やすことも可能である。また電子ビームダイオードからの反射波が磁気スイッチに戻った際、磁気コア中の磁束密度を減少させ磁気スイッチをオフにする恐れもあるが、出力線路の長さをPFLと同じ長さまで延長し伝搬時間を調整しているので問題無い。

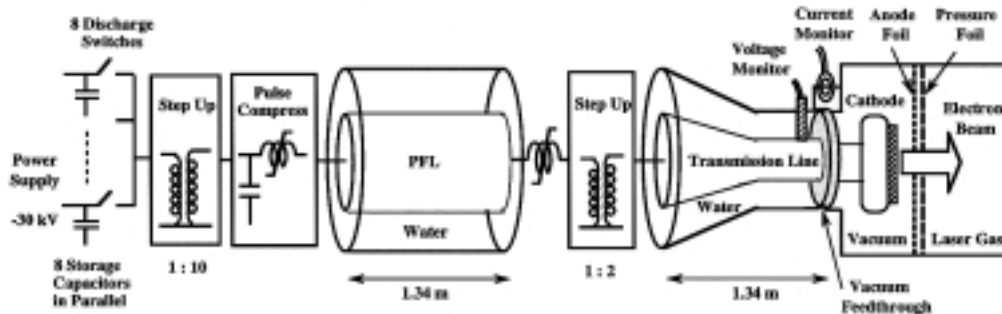


Fig. 4 Pulsed-power system of the high-repetition-rate electron-beam-pumped KrF laser.

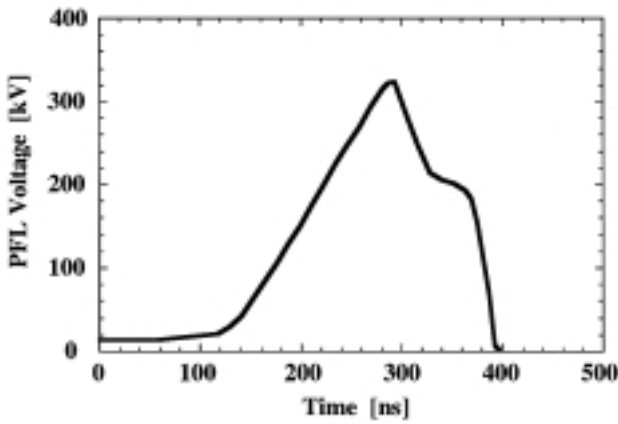


Fig. 5 Measured PFL waveform.

レーザー装置を大型化した場合においても磁気スイッチをベースとした回路が有効であるが、磁気圧縮では磁気スイッチの飽和インダクタンス及びエネルギー損失を考慮し、一般にパルス圧縮比を5程度としている。従って本装置は小規模なのでPFL充電側において磁気圧縮回路を1段としているが、装置を大型化した場合には多段の磁気圧縮回路が必要となり、その結果エネルギー転送効率が著しく低下する。しかし電子ビームダイオードに供給すべきエネルギーを多数のPFLに分割し、また高速大電流スイッチを用いることで、縮小された各PFLの容量を初段蓄積コンデンサーから直接充電することが可能である。この回路構成においては、初段蓄積コンデンサーとPFLの間を1段の昇圧トランスまたは線形誘導電圧重畳器(LIVA)のみによって接続することができる。LIVAを用いたPFL充電回路の構成例をFig. 6に示す。この様なPFL充電回路によって、初段蓄積コンデンサーから電子ビームダイオードまで80%以上の効率でエネルギーを転送することが可能となり、その結果レーザー光出力まで5.5%以上のレーザー装置の総合効率が可能と見積もられている⁸⁾。また初段スイッチに固体スイッチを用いることで更に長寿命化も可能であり、この様な簡素化したパルスパワー回

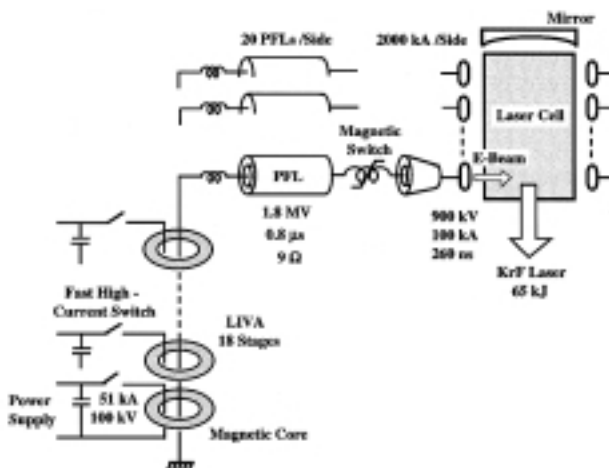


Fig. 6 Conceptual design of a high-efficiency pulsed power system using a linear induction voltage adder (LIVA) for a 65 kJ KrF laser module of a multi-megajoule laser-driver system.

路を用いることにより、レーザードライバーに要求される大エネルギー化、高効率化、高繰り返し化を同時に達成できると期待される。

3. 電子ビームダイオード及びHibachi構造

電子ビーム励起KrFレーザー装置では、真空中に置かれた大面積の平面陰極と陽極フォイルの間で電子ビームを発生、加速させ、陽極フォイル及び圧力フォイル(真空部とレーザーガスの隔膜)を通して大気圧程度のレーザーガス中に電子ビームを打ち込む。ここで陽極フォイル及び圧力フォイルを支持し、同時に電子ビーム透過口の役割を果たす機構がHibachi構造と呼ばれるものである。電子ビーム発生部(ダイオード)及びHibachi構造をFig. 7に示す。電子ビーム透過口(69 × 11 cm²)には、レーザーガス圧に対して圧力フォイルを支持するために、幅0.8 cmのリップを5 cm間隔で配置している。ここで陽極フォイルにはチタン(10 μm厚)、圧力フォイルにはHavar(後述)を用いており、両フォイルの間はダイオード側に真空引きしている。このHibachiでは、後述の様にフォイル支持用のリップ中に冷却水を流せる構造としているが、電子ビーム透過口の開口率は既存装置と同程度(84%)であり、電子ビームの透過損失は小さい。なお陰極表面の電界放出板(65 × 8 cm²)には現在ベルベットを使用しており、陽極-陰極(A-K)間隔は3 cm、ダイオードインピーダンスは約7 Ωとしている。

このダイオード及びHibachi構造を用いて得られたダイオード電圧、電流波形をFig. 8に示す。1 Hzでの連続動作においてダイオード電圧、電流波形は安定しており、パルスあたりの電子ビームエネルギーは580 Jが得られている。これまでに1 Hzの繰り返し頻度で電子ビームパルスを約1000ショット連続して発生させ、陽極フォイル及び圧力フォイルを通してレーザーガス中に電子ビームを打ち込んだ。この連続ショット数は、初段放電スイッチの誤動作に伴う運転シーケンスによって制限されたものである。ダイオードの真空度は1 Hz動作の開始時に 4.4×10^{-6} Torrで、約90ショット後に 1×10^{-4} Torrに達し、以降連続動作の終了まで $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ Torrの真空度を維持した⁹⁾。ダ

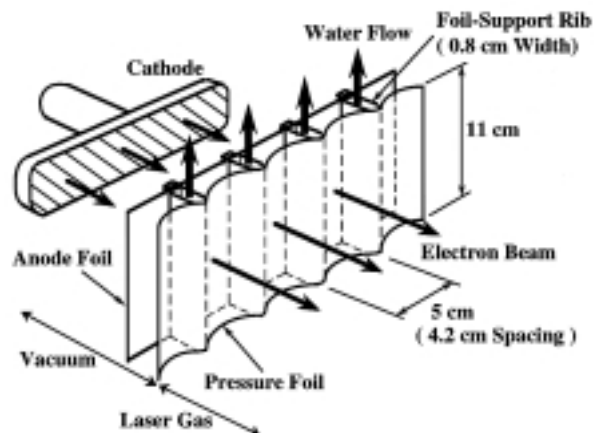


Fig. 7 Hibachi structure and electron-beam diode.

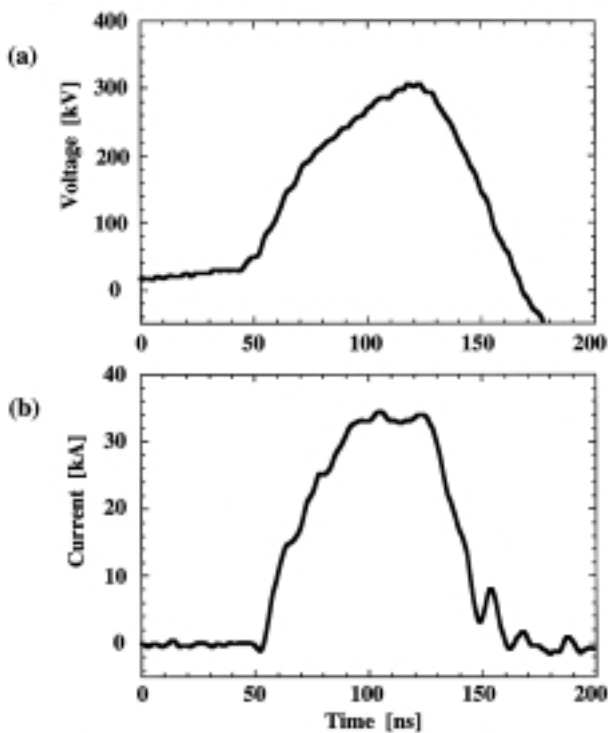


Fig. 8 Measured diode voltage (a) and current (b) waveforms.

イオード真空度の時間変化をFig. 9に示す. この連続運転の終了時においても真空度は安定しており, ダイオードの真空に関しては1000ショット以上の連続1 Hz動作が可能であった. ダイオードの真空劣化は, 繰り返し頻度, 電子ビームエネルギー, 及び連続運転時間を制限することになり, またA-K間の短絡, 真空沿面の絶縁破壊をもたらす恐れもあるが, 実験においてそのような問題は見られていない. なおこれまで同一の圧力フィルムにおいて, 合計約8,000ショットの電子ビームを得ている. このショット数は初段放電スイッチの誤動作に起因したダイオード電圧の不安定化(A-K短絡による陽極及び圧力フィルムの損傷)で決まっており, 圧力フィルム自体はまだ寿命に達していない.

電子ビームエミッターとしては, 現在ビームの一様性を考慮してベルベットを使用しているが, 今後の一層の長時間運転に向けて高耐久性を有する電子ビームエミ

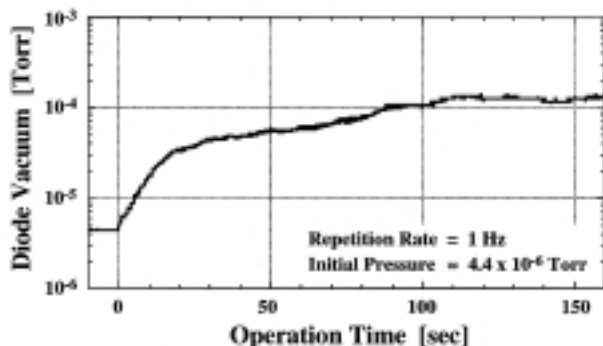


Fig. 9 Temporal evolution of the diode vacuum in a 1 Hz operation.

ターの開発が重要となる. 高繰り返し動作実験と平行してこれまでに様々なエミッターを試作し, その高耐力化, 高性能化を進めてきた(鋸歯状電界放出エミッター, 高融点ナノ材料を用いたエミッター¹⁰⁾, 高融点材料の表面に微細加工を施したエミッター¹¹⁾, 誘電体表面の部分放電を利用したエミッター, 等). 特に誘電体をベースとしたエミッターは既に長寿命が報告されており¹²⁾, また低ガス放出が期待できるのでダイオード真空度の維持にも有効であろう. まだ最終的な長寿命エミッターの選択には至っていないが, これまでの我々の経験を基に, 長時間耐久性を有し, ビーム一様性に優れたエミッターの実現は可能と考えられる.

4. 圧力フィルムの温度管理

高繰り返しレーザー装置では, 電子ビームが陽極フィルム及び圧力フィルムを通過する際, 電子ビームエネルギーの一部がフィルムに蓄積し, フィルムは繰り返し加熱されることによって高温に達する. その結果, 特に圧力フィルムの張力低下によって, レーザー装置の運転時間が制限される可能性がある. 従って電子ビーム発生部における今一つの重要な課題は, 圧力フィルムからの熱の除去である. 同レーザー装置における圧力フィルムの冷却は, レーザーガスの対流, 熱放射と共に, フィルム支持リブ中に流す冷却水への熱伝導によって行っている(Fig. 7). 圧力フィルムには高温においても大きな張力を有し(1410 MPa, 800 K), またフッ素に対する耐性に優れたコバルト合金(Havar¹³⁾)を用いている. 陽極フィルムには現在チタンを用いているが, 高融点, 高熱伝導率を有するモリブデン等の使用も想定される. このように大きな張力を有する合金の使用により, 圧力フィルムの厚みを12 μm 程度まで薄くすることが可能である. 密度の違いを考慮すると, この圧力フィルムの電子阻止能は23 μm 厚程度のチタンに相当し, これは既存装置の場合と変わらない. またこのHibachiでは陽極フィルムと圧力フィルムの間には冷却ガスを流さず, 前述の様に電子ビーム透過口の開口率も大きいので, 電子ビーム透過率を既存の単発動作のレーザー装置と同程度に維持しつつ圧力フィルムを冷却することが可能である.

フィルムの冷却性能の評価を目的として, 現在1 Hz動作の下で圧力フィルムの温度測定を進めている. 実験ではレーザーガスは循環させず, 圧力フィルム正面のレーザーガス容器壁に設置したCaF₂窓を通して, 赤外線カメラ(波長3~5 μm)を用いて圧力フィルムの温度計測を行っている. 測定結果を計算結果とともにFig. 10に示す¹⁴⁾. 横軸は, 圧力フィルムに蓄積する電子ビームの平均蓄積パワー P_{dep} (単位面積, パルスあたりの電子ビーム蓄積エネルギー \times 繰り返し頻度)である. P_{dep} 値は電子ビームエネルギーの測定値(<360 J/パルス), 及び陽極フィルムの透過率, 圧力フィルムの蓄積率の各計算値(94%, 13%/250 kV)⁷⁾を基に算出した. ここでHibachi(フィルム支持リブ)の幾何学的透過損失(16%)は P_{dep} 値に影響しない. 圧力フィルムの温度は水冷リブで囲まれた電子ビーム注入

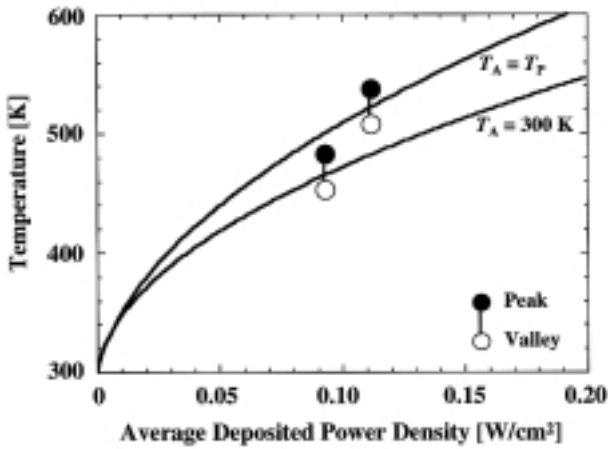


Fig. 10 Pressure-foil temperature (T_p) as a function of average deposited electron-beam power density in the pressure foil (P_{dep}). Measured peak and valley temperatures are shown as solid dots and open circles, respectively. Calculated lines are for two anode-foil temperatures assumed (T_a): 1) $T_a = 300$ K, 2) $T_a = T_p$.

($4.2 \times 11 \text{ cm}^2$)の中央において最大となり、1 Hzの電子ビーム打ち込みに伴って1秒間隔のパルス列として観測されるが、Fig. 10の測定値はその温度変動の上限と下限を示している。圧力フォイルの温度計算はフォイル周囲の温度、放射率、形状等を全て考慮する必要があり複雑であるが、ここでは電子ビーム注入口の中心部のみについて定常状態を仮定して行った⁷⁾。圧力フォイルの冷却機構はレーザーガス中での自然対流(アルゴン1気圧)、及び圧力フォイル両面からの熱放射(フォイル放射率 = 0.2)とした。圧力フォイルは熱伝導率が小さく(13 W/mK)、水冷リブの間隔が大きいため(5 cm)、注入口中心部では熱伝導を無視した。陽極フォイルの温度は、1)室温の場合(300 K)と、2)圧力フォイルと等しい場合(陽極フォイル、圧力フォイル間の放射熱交換を無視した場合)の2通りの温度を仮定した。実験の測定範囲($P_{dep} < 0.11 \text{ W/cm}^2$)では、測定結果は計算結果でほぼ説明されている。圧力フォイルの張力を考慮し、フォイルの許容温度を800 K程度¹³⁾と仮定しているが、測定されたフォイル温度はこの範囲に十分収まっている。現在、平均蓄積パワーを $P_{dep} = 0.15 \text{ W/cm}^2$ 程度まで増加させて実験を続けているが、張力低下に起因するフォイルの損傷は見られていない。

現在の実験条件($P_{dep} = 0.1 \sim 0.2 \text{ W/cm}^2$)において、電子ビーム注入口の中心部における圧力フォイルの冷却機構は、フォイル両面からの熱放射とレーザーガス中の自然対流がともに50%程度と計算から見積もられる。他方、将来のレーザードライバーを想定しレーザー装置を更に高繰り返し化、大出力化した場合には、レーザーガスを循環し強制対流によって圧力フォイルの冷却を行う。このようにレーザーガス中の対流冷却を増強した条件においても、既に圧力フォイルの冷却試験が開始されている¹⁵⁾。現在我々のレーザー装置では、自然対流の条件下(フォイル温度500~700 K)において1~2 Hzの繰り返し頻度で動作試験を行い、圧力フォイル、フォイル支持機

構、及びレーザー装置全体の耐久性の評価を続けている。

5. 高繰り返しレーザーガス励起

以上の結果を基にして行ったレーザーガスの高繰り返し励起試験の結果を示す。この実験ではHibachi構造を通して、レーザーガス中(1200 Torr)に1 Hzの繰り返し頻度で電子ビームの打ち込みを行った。測定したレーザーガス圧力の時間変化をFig. 11に示す。この結果から、電子ビームエネルギーが1 Hzの繰り返し頻度でレーザーガス中に連続的に蓄積していることがわかる。ガス中への蓄積エネルギーはFig. 11に見られる圧力パルス列のそれぞれの波高から、パルスあたり280 Jと計算される(初段蓄積2 kJ, 電子ビーム580 J)。1 Hz動作における飽和レーザー増幅は未着手であるが、既に60 cm口径の電子ビーム励起KrFレーザーにおける飽和増幅実験において、レーザーガス中の蓄積エネルギーの9%(内部効率)をレーザー光として取り出せることが確認されている¹⁶⁾。従ってFig. 11の結果は、レーザー窓の口径(13 cm)をガス容器断面積($19 \times 29 \text{ cm}^2$)に等しくし飽和増幅を行った場合、パルスあたり25 Jのレーザーエネルギーを1 Hzの繰り返し頻度で連続的に取り出したことに相当する¹⁷⁾。

6. まとめ

現在進められている高繰り返し電子ビーム励起KrFレーザーの開発状況について述べた。パルスパワーに関しては磁気スイッチをベースとした回路で高耐久化が可能であり、初段スイッチに固体スイッチを用いることで一層の長寿命化も見込まれる。また高速大電流スイッチ及び多数のPFLを用いた回路構成により、初段蓄積コンデンサーから電子ビームダイオードに至るまで、高効率でエネルギーを転送することが可能である。電子ビームエミッターに関しても現在続けられている電子放出板の高耐久化、高性能化により、高繰り返しレーザー用の長寿命エミッターの実現が可能であろう。圧力フォイルの温度管理に関しては、将来のレーザードライバーで想定さ

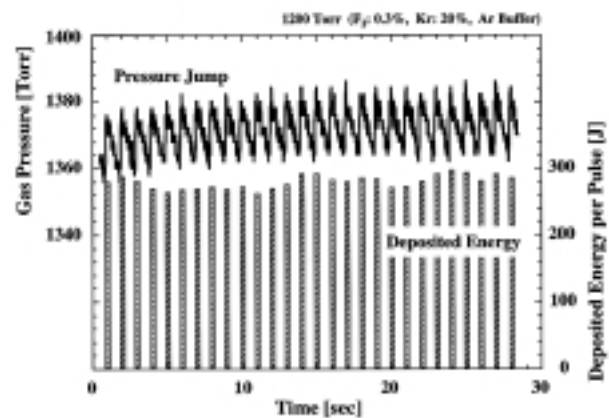


Fig. 11 Measured pressure jumps and deposited electron-beam energy per pulse in the laser gas.

れるフォイル温度領域において動作試験が行われており、更に繰り返し頻度及び電子ビームパワーを増大して耐久性の確認がなされつつある。以上の成果を基にレーザードライバで要求される大エネルギー、長寿命、高効率、高繰り返し動作を可能とする核融合用KrFレーザーの基礎技術が確立されるものと考えられる。その他光学窓の高耐力化等、レーザーシステム全体の長寿命化を図る必要があるが、現在行われている各種耐久性試験を通して、エネルギードライバとしてのKrFレーザー装置の信頼性が確認されるものと期待される。

謝 辞

レーザー装置の写真提供に対して、米国NRLのF. Hegeler氏に感謝する。本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

参考文献

- 1) I. Okuda, E. Takahashi, I. Matsushima, Y. Matsumoto, H. Yashiro, E. Miura, T. Tomie, and Y. Owadano: *Fusion Engineering and Design* **44** (1999) 377.
- 2) I. Okuda, E. Takahashi, I. Matsushima, Y. Matsumoto, S. Kato, and Y. Owadano: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 1152.
- 3) J. D. Sethian, M. Friedman, J. L. Giuliani, R. H. Lehmborg, M. Myers, S. P. Obenschain, P. Kepple, F. Hegeler, M. F. Wolford, S. B. Swanekamp, D. Weidenheimer, D. Welch, and D. V. Rose: *Third Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, Monterey CA, Sep 7-12, 2003. Paper ThF1. 3.* To be published in *Fusion Science and Technology*.
- 4) V. D. Zvorykin, S. V. Arlantsev, V. G. Bakaev, E. V. Polyakov, P. B. Sergeev, G. V. Sychugov, and D. A. Zayarnyi: *Third Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, Monterey CA, Sep 7-12, 2003. Paper Tu1.1.2.* To be published in *Fusion Science and Technology*.
- 5) C. H. Smith: *IEEE Conf. Rec. of the 1988 Eighteenth Power Modulator Symp.* (1988) p.336.
- 6) S. Schneider and T. F. Podlesak: *Digest of Tech. Papers, 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf.* (1999) p.214.
- 7) E. Takahashi, I. Okuda, Y. Matsumoto, I. Matsushima, S. Kato, K. Kuwahara, and Y. Owadano: *Proc. SPIE* **3886** (2000) p.391.
- 8) I. Okuda, E. Takahashi, and Y. Owadano: *Appl. Phys. B* **71** (2000) 247.
- 9) I. Okuda, J. Ma, E. Takahashi, I. Matsushima, Y. Matsumoto, S. Kato, and Y. Owadano: *Appl. Phys. B* **72** (2001) 623.
- 10) I. Okuda, E. Takahashi, and Y. Owadano: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 5407.
- 11) I. Okuda, E. Takahashi, and Y. Owadano: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 7168.
- 12) N. M. Bykov, V. P. Gubanov, A. V. Gunin, S. D. Korovin, O. P. Kutenkov, V. F. Landl, S. D. Polevin, V. V. Rostov, G. A. Mesyats, and F. Ya. Zagulov: *Digest of Tech. Papers, 10th IEEE Int. Pulsed Power Conf.* (1995) p. 71.
- 13) *Technical Data Sheet of Hamilton Precision Metals, Inc.*
- 14) 奥田 功, G. Huailin, 高橋 栄一, 松嶋 功, 松本 裕治, 加藤 進, 大和田野 芳郎: 第49回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (2002) 28a-ZE-12.
- 15) F. Hegeler, M. C. Myers, J. D. Sethian, M. Friedman, M. F. Wolford, S. B. Swanekamp, D. V. Rose, and D. Welch: *Third Int. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications, Monterey CA, Sep 7-12, 2003. Paper TuPo1.31.* To be published in *Fusion Science and Technology*.
- 16) I. Okuda, E. Takahashi, and Y. Owadano: *Appl. Phys. B* **72** (2001) 897.
- 17) 奥田 功, W. Jin, 高橋 栄一, 松嶋 功, 松本 裕治, 大和田野 芳郎: 第50回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (2003) 28p-YR-2.