

特集

パルスパワー (その制御と関連現象)

レーザーにおけるパルスパワー技術

Pulsed Power Technology in Lasers

大和田野 芳郎*

Yoshiro Owadano

1. はじめに

レーザー、特にパルスガスレーザーの励起には高速の高電圧技術、いわゆるパルスパワー技術が必須であるが、レーザー自身が光エネルギーのパルス圧縮、尖頭パワーの増倍という優れた機能を持っているため、レーザー技術そのものを広い意味でのパルスパワー技術と考えることもできる。図-1にパルスレーザーにおけるエネルギーの流れを通常の電源から光出力にいたるまで模式的に示す。コンデンサへの電気エネルギー蓄積に始まって、何段かのパルス圧縮(パワー増倍)を経てレーザー媒質中にパワーが投入される。このエネルギーはレーザー上準位へ蓄積され、上準位の寿命に比べて充分短い光パルスによる誘導放出、種々の光学的方法による出力パルスの追圧縮などによって更にパワーは増倍される。光の領域での尖頭パワーは非常に高い値に達し、さらにレンズなどで集光した場合には空間的にも圧縮され、他の方法では得るのが困難な高いパワー密度、エネルギー密度が実現できる。本稿では、レーザーの励起に用いられる電気エネルギーに

関するパルスパワー技術の現状と共に、レーザーにおける高パワーの光エネルギーの技術についても紹介する。

2. レーザー励起用パルスパワー技術

ガスレーザー、特に大気圧付近の高い圧力でパルス動作する炭酸ガスレーザーやエキシマレーザーの様なレーザーは、数nsから数 μ sのパルス幅の放電や電子ビームによって励起される。通常、数Hz以上の繰り返しが必要される場合には、サイラトロンでスイッチングが可能な数十kVの電圧を用いた放電励起による小型レーザーが多い。この場合、放電パルス幅数十nsで最高1kHz近い繰り返し動作が可能である。放電パルス幅は、回路のLC積で決まるが、短いパルス幅、高い放電電流が要求される場合には、放電チャンネル自身をスイッチとしたLC反転回路や、可飽和インダクタンス素子をスイッチとしたパルス圧縮回路が用いられる。

電子ビームによる大型のガスレーザーの励起には、最低200~300kVのビーム電圧が必要となり、典型的な一次電源はマルクス発生器となる。図-2にパルス

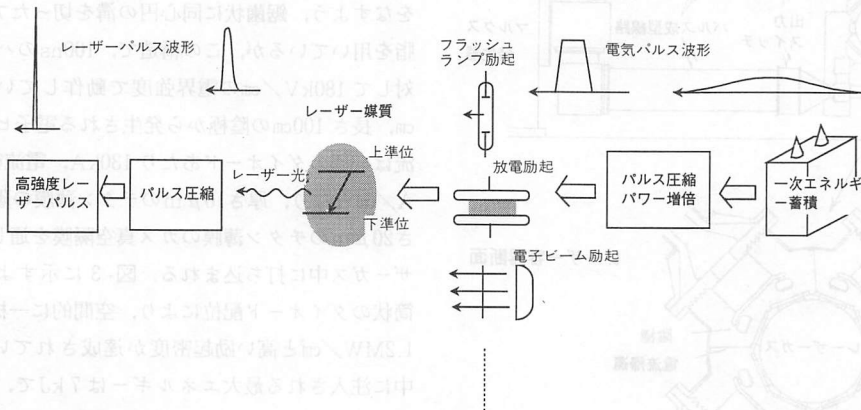


図-1 パルスレーザーにおけるエネルギーの流れ

*電子技術総合研究所 極限技術部高密度エネルギー研究室長
〒305 つくば市梅園1-1-4

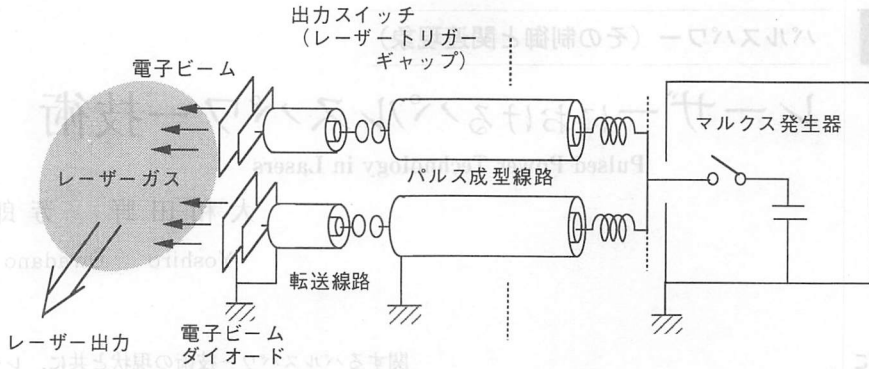


図-2 電子ビーム励起型ガスレーザーの構成

幅 50ns~1 μs の電子ビーム励起型のガスレーザーの構成の模式図を示す。マルクス発生器の内部インダクタンス (数 μH) のため動作時間は μs 程度と遅く、出力を一旦複数のパルス成型線路に転送し、充電が完了した時点で出力ギャップ (インダクタンス数十 nH) を閉じ、矩形の電圧パルス (パルス幅 100ns 程度) を取り出す。このようにしてパルス幅を約10分の1に圧縮しパワーの増倍を行なう。この電圧パルスを電子ビーム発生陰極に印加し、電界放出によって引き出された大電流電子ビームは、陽極薄膜とガスと真空を隔てる圧力隔膜を透過してレーザーガス中に打ち込まれる。図-3に同様の原理で設計された大出力KrFレーザー増幅器の外形を示す。これは、電子技術総合研究所においてレーザー核融合やX線レーザーの研究用に開発さ

れた、KrFレーザーシステム「ASHURA」の主増幅器 Amp-3 で、動作時間 95ns、最大出力 710J (7.5GW) を記録している¹⁾。マルクス発生器は、出力電圧 1 MV、蓄積エネルギー 40kJ で、直径 38cm の純水を誘電体とするパルス成型線路 (特性インピーダンス 4 Ω) 4 本を 0.9 μs で充電し、レーザーによってトリガーされる出力ギャップスイッチを閉じると、電圧 500kV、パルス幅 100ns、立ち上がり時間 25ns の電圧パルスが電子ビーム発生ダイオードに転送される。Amp-3 においては、パルス成型線路における最大電界強度は 180kV/cm で設計されている。ギャップ間隔 4 cm の出力スイッチには数気圧の SF₆ ガスが充填され、約 20mJ の KrF レーザーパルスによってギャップ中央にスパークを作ってトリガーした場合、インダクタンス 40nH の単一放電チャンネルで導通し、動作タイミングの誤差は 5ns 程度におさまる。高電圧パルスの真空への導入部分には、表面が等位面と 45度の角をなすよう、鋸歯状に同心円の溝を切ったアクリル樹脂を用いているが、この構造で、100ns のパルス幅に対して 180kV/cm の電界強度で動作している。幅 10 cm、長さ 100cm の陰極から発生される電子ビームの電流は一個のダイオードあたり 130kA、電流密度は 130 A/cm² となり、厚さ 10 μm のチタン薄膜の陽極と、厚さ 20 μm のチタン薄膜のガス真空隔膜を通して、レーザーガス中に打ち込まれる。図-3 に示すような、円筒状のダイオード配位により、空間的に一様で、最高 1.2MW/cm² と高い励起密度が達成されている。ガス中に注入される最大エネルギーは 7kJ で、その 10% がレーザー光のエネルギーとして取り出されている。現在、電総研をはじめとして世界で出力エネルギー 5 kJ~10kJ の KrF レーザーの開発が進められており、ここで使用される電圧は 1.5~2 MV、初期蓄積電気

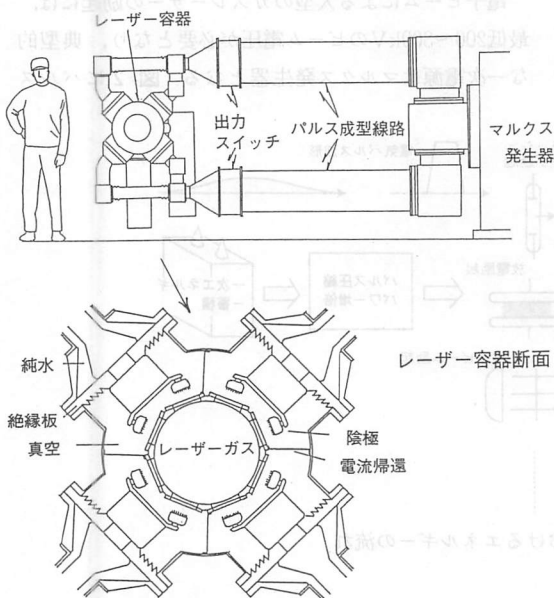


図-3 大出力KrFレーザー「ASHURA」の主増幅器

エネルギーは数百kJになるため、さらに高い電圧、大きな電流の制御技術が必要となる。ここに述べた例は、基本的に単発動作しか想定していない電源であるが、近年、サイリスタなど固体スイッチの使用可能な電圧から出発し、多段昇圧・パルス圧縮を用いた、高繰り返し動作（～100Hz）の数百kVの電源²⁾が開発されている。電子ビーム透過膜からの熱除去など技術的課題は残されているが、大出力レーザーの繰り返し動作が身近なものになりつつあり、その応用が期待される。

3. レーザーにおけるパワー増倍

種々の方法で励起したレーザー媒質の上準位から、上準位の寿命 (τ_u) より十分短い幅 (τ_l) のレーザーパルスによる誘導放出でエネルギーを取り出すとき、 $\sim 5 \times E_s / \tau_l$ 程度のパワー密度の出力が得られる。ここに E_s はレーザー媒質によって決まる飽和エネルギー密度である。一方、 τ_u より十分長いパルス幅での出力は $\sim 5 \times I_s$ ($I_s = E_s / \tau_u$: 飽和パワー密度) であるので、短パルスの増幅によって、 τ_u / τ_l に比例する光のパワー増倍ができることになる。この増倍率は10⁴倍以上にも達するため、励起に要するパワーからレーザー光への変換効率をかけてもなお、大きな値になる。KrFレーザーの場合、上準位寿命1～2 ns

に対して、0.1ps程度の極短パルスの増幅が可能のため、10ns程度のパルス幅で動作させた場合に比べて数万倍（励起に要するパワーからは数千倍）高いパワーが得られる。前述の「ASHURA」では、パルス幅10 nsの場合、6ビーム出力の合計で40GWのパワーが得られるが、パルス幅を10psにすると、2 TW (2×10^{12} W) のピークパワーが得られる。より短い0.4psのパルス幅では、1.5Jとエネルギーは小さいながら4 TWのピークパワーが報告されている³⁾。最近では、飽和パワー密度の大きな Ti : Sapphire などの固体レーザーを用いて、小型のシステムながら0.1ps程度の極短パルスの増幅により1 TWを越える出力を高繰り返しで得られるようになってきた。現在、30TW (30J, 1 ps) という最高のピークパワーがガラスレーザーによって得られている⁴⁾。

またこのような短いパルス幅の領域では、パルス幅の延長と圧縮が比較的容易に行なえる。Chirped Pulse Amplification (CPA) と呼ばれる方法が最近開発されたが、これは、0.1～1 ps のパルスを単一モードファイバーや回折格子対など正の波長分散を与える素子を用いて数千倍にパルス幅を拡大し、増幅器で増幅した後、再び逆の波長分散を持つ素子によって、パルス幅を元の幅に圧縮する方法である。最終パルス圧縮のエネルギー効率は50%程度で、分散素子の口径と損傷閾値で出力が制限される。この方法を用いると、増幅中のパワー密度が数千分の一に下げられるので、固体レーザー媒質や透過光学素子が持つ非線形屈折率に基づく波面の乱れや光学損傷を防ぎ、同一のパワーを取り出すために必要なレーザー媒質の口径を小さくできる。このため、テーブルトップのテラワット出力のレーザーが最近多く開発されている。図-4に4 TWの出力を達成した Ti : Sapphire レーザーにおけるCPAの例を示す⁵⁾。

数psから100nsのパルス幅の領域で動作するパルス幅圧縮法に誘導ラマン散乱を用いる方法がある。図-5に後方ラマン散乱を用いたパルス圧縮法を示すが、(ラマン活性ガス)を充填した圧力容器のなかで、パルス幅の長い励起光と、波長が媒質分子の振動（または回転）準位分だけ波長が長く（一次ストークス光成分）幅の短いパルスをすれちがわせると、励起光からストークス光へ誘導後方ラマン散乱によってエネルギーが移乗し、初期のパルス幅比のパルス圧縮とパワーの増倍が起こる。KrFレーザーなど紫外域の光に対して誘導散乱断面積が大きく、数気圧のメタンガスを用い

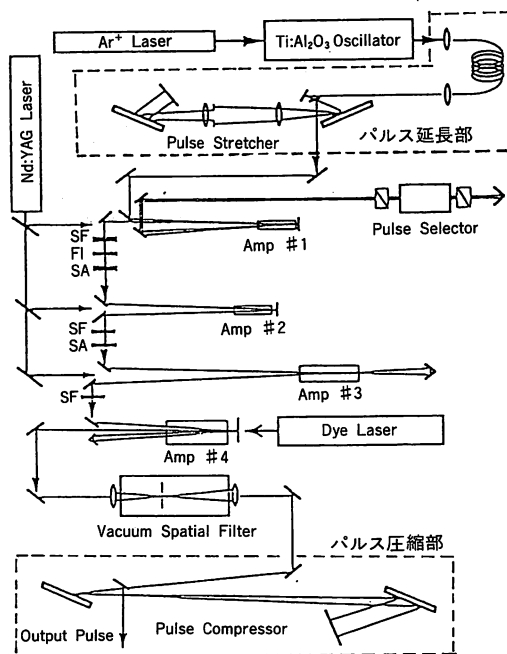


図-4 4 TW, 0.1ps, Ti : Sapphireレーザーの構成⁵⁾

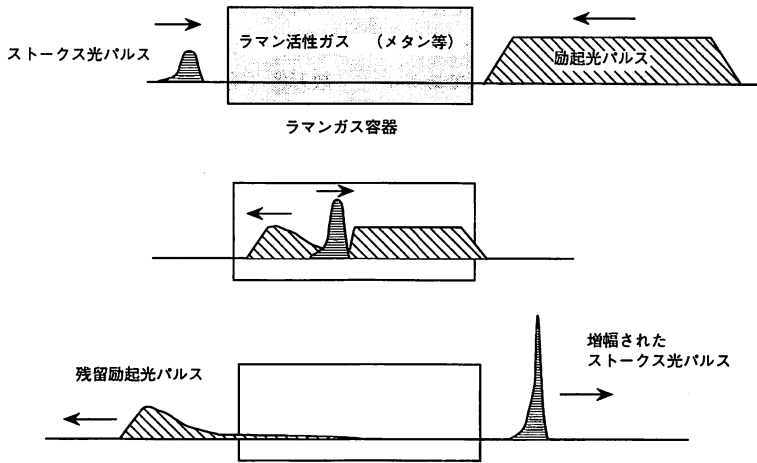


図-5 後方誘導ラマン散乱によるパルス圧縮の原理

て50~60%の高い変換効率が得られるが、パルス幅の圧縮比を上げると、ストークス光自身が2次ストークス光を発生しエネルギーは順次長波長側へ移行してしまうので、種々の方法で高次のストークス光を除去しなければ、パワーの増倍率は6程度が限界である。ただし、ストークス光のパルス幅が、媒質の振動の緩和時間より短い場合には、高次ストークス光の発生は抑制され、数十倍のパワー増倍が報告されている⁶⁾。

4. おわりに

レーザーの周辺での電気と光のパルス圧縮とパワーの増倍に関する技術の現状を概観した。特に、レーザー光のピークパワーの増大は近年著しく、レンズによって集光した場合には $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ という、原子内部のクーロン電界に匹敵する強度に達してきた。これらの先に何が現われるのか不透明ではあるが、一つの技術の極

限を究める意味で興味は尽きない。またこれらの非常に高いパワー、エネルギー密度をより身近なものにするためにも、パルスパワー技術の今後の進歩をおおいに期待する。

参考文献

- 1) 大和田野芳郎, ほか4名; 大出力KrFレーザー「ASHURA」と多重パルス増幅, 電子技術総合研究所彙報, Vol. 56, No. 2 (1992), 229~244
- 2) 二宮紀彦, 徳地明, 吉本宏; 電源技術, 平成2年電気学会全国大会講演論文集(2) (1990), S. 1-19
- 3) S. Watanabe, et al; Multiterawatt ecimer laser system, J. Opt. Soc. Am., B 6 (1989), 1870
- 4) K. Yamakawa, et al; Prepulse-free 30TW, lps Nd; glass laser, Opt. Lett., Vol. 16 (1991), 1593
- 5) S. Sullivan, et al; Multiterawatt, 100fs laser, Opt. Lett., Vol. 16 (1991), 1406
- 6) 木村一彦, ほか3名; KrFレーザーの高圧縮率ラマン変換, 電気学会研究会資料, OQD-91-5 (1991), 37