パルスパワー技術の概観

正員 大和田野 芳 郎 (電子技術総合研究所 高密度エネルギー研究室)

1. はじめに

電気その他のエネルギーの高密度状態を実現し、これを利用する技術を総称してパルスパワー (英語では Pulsed Power と表わす場合が多い) 技術と呼ぶ。エネルギーを、時間的、空間的に圧縮する技術ともいえる。利用しやすさから電気エネルギーを対象にする場合が多いが、古風に書けば、「高速大電力制御技術」であろうか。近年、高出力のレーザの励起や自由電子レーザ用のビーム加速、輝度の高い X 線の発生などの需要の増加に伴って、電源側には従来より高いパワーやパワー密度、また高い頻度での繰り返し動作が要求されるようになってきており、これに必要なエネルギー蓄積素子、スイッチング素子などの技術も着実に進歩してきている。

図 1 に、本稿で概観する利用分野のパルス幅とピークパワーを示す。半導体リソグラフィ、製品検査、X 線顕微鏡などに利用する高輝度 X 線源としては高温 (温度 数千万度) 微小プラズマが優れており、この生成にはギガワット (GW, 10^9 W) 級の出力パワーを有するプラズマピンチ装置や、同程度の電源で励起されたレーザが必要となる。ミリ波から遠赤外にいたる波長領域での強力な光源として期待されている自由電子レーザに必要な大電流電子ビームを加速するためには、電圧 1 メガボルト (MV) 以上で高繰り返し動作が可能な電源が必要である。

エキシマレーザや軟 X 線レーザのように、短波長で寿命の短いレーザを励起するには、短時間にギガワットからテラワット (TW, 10^{12} W) パワーを媒質中に注入する必要がある、さらに実用慣性核融合の実現

図 1 パルスパワー技術の利用分野

には 100 テラワット以上のパワーが要求される。

技術的に見ると、パルス幅 $1 \mu\text{s}$ 以下では、単純なコンデンサや多段衝撃電圧発生器 (マルクス発生器) の放電だけではなく、何らかの電氣的なパルス幅圧縮が必要となり、さらに、 1 GW 以上のパワーでパルス幅を数 ns 以下にするには、スイッチング速度の速い光 (レーザ光) に変換する方が一般的になる。パルス幅数 ns 以下、パワー 100 テラワットに至る領域はレーザ光の独壇場である。また、1 ショットあたりの電気エネルギー 100 J までの領域では、数十 Hz から数百 Hz の繰り返し動作が製品として実現している。単発エネルギー 1 kJ 以上になると、数分に 1 ショットの繰り返しという、いわゆる single shot machine が多いが、各素子技術の進歩に支えられ、今後の高繰

Overview of the Pulsed Power Technology.

By Yoshiro Owadano, Member (Electrotechnical Laboratory, High Density Energy Section)

キーワード: パルスパワー, 高電圧電源, スイッチ, 繰り返し

図2 パルスレーザにおけるエネルギーの流れ

り返し動作へ向けての開発が最も期待される領域である。

本稿では、主に高出力レーザの励起に用いられるパルスパワー技術を中心に、現状と展望を述べてみたい。

2. 高繰返しレーザ用電源技術

まず、パルスレーザを例に、通常の電源から光出力にいたるまでのエネルギーの流れとパルスパワー要素技術を図2に模式的に示す。コンデンサなどへの一次エネルギー蓄積が始まって、何段かのパルス圧縮（パワー増倍）を経て、気体の放電、電子ビームの打ち込みなどによってレーザ媒質中にパワーが投入される。

パルス圧縮には、図2に示すような回路や分布定数線路が用いられる。コンデンサや線路などの中間エネルギー蓄積を設けることにより、ここからの出力インダクタンスを大幅に低減することができ、出力パルス幅は圧縮され、電流は増倍される。

数 Hz 以上の繰返しが要求される場合には、スイッチング素子としてこれまでに主にサイラトロン（水素などを充てんした放電管）が用いられ、これで扱うことができる 30 kV 程度の電圧を用いてパルス幅数十 ns で放電励起が行われてきた。図3に、最も単純な放電励起レーザの電源回路を示す。一次コンデンサ C_S に蓄積されたエネルギーは、主スイッチ SW を閉じることによりピーキングコンデンサ C_P に低速（0.2 μ s 程度）で転送される。ここに L_S （数百 nH）は回路のインダクタンスで、サイラトロンの保護のため初期電流を制限する役目も果たしている。 C_P の充電が完了し、レーザ電極間の電圧がしきい値を越えた時点で放電が始まり、極力小さくとられたインダクタンス L_P （数 nH）を介して高速時間（約 20 ns）で媒質中にエネルギーが供給される。

近年、アモルファス金属磁性体の飽和特性を利用した磁気スイッチが L_S の替わりに用いられるようにな

図3 放電励起レーザの電源回路

図4 固体スイッチを用いたパルス圧縮・昇圧回路

った。磁気スイッチは、通過電流があるしきい値を越えた時点で急激にインダクタンスが減少するもので、サイラトロンに要求される初期電流立ち上がり時間が 1/10 に緩和され、また逆流電流も阻止されるようになったため、サイラトロンの寿命が大幅に延びている。現在、放電パルス幅 20 ns 付近で最高 1 kHz 近い繰返し動作が可能である。

さらに、主スイッチ SW を電界効果トランジスタ (FET) やゲートターンオフ (GTO) サイリスタなど各種半導体素子に置き換えることも可能になってきた。特に、GTO サイリスタには、スイッチングに要する時間（ターンオン時間）が 3 μ s と長いですが、電流 10 kA とサイラトロンと同程度流すことができ、耐圧と電流上昇率はそれぞれ 4 kV、 10^{10} A/s とサイラトロンの 1/10 程度まで性能が上がってきている。初期スイッチング電圧 3 kV から出発しても、図4に示す

ような昇圧トランスと磁気スイッチを組み合わせたパルス多段回路によって、最終出力 200 kV、20 kA パルス幅 100 ns で、最大繰り返し 100 Hz の全固体素子電源も出現している⁽¹⁾。ここでは、後段になるほど磁気スイッチの飽和インダクタンスを小さくして次段への充電時間を短くすると同時に、トランスによって電圧を上げている。この電源は、1 ショットあたりのエネルギー数十 J と比較的大きなレーザの電源に適しているばかりでなく、自由電子レーザ用電子ビームの加速電源としても用いられている。

3. 大出力レーザ用電源技術

より大型のガスレーザの励起には、パルス幅 50 ns ~ 1 μ s の電子ビームが用いられる。最低 300 kV 前後のビーム電圧が必要で、典型的な一次電源はマルクス発生器となる。マルクス発生器自身は、内部インダクタンス（通常数 μ H）のため放電時間が数 μ s 程度と遅く、通常、この出力をいったん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スイッチを閉じることにより、矩形の電圧パルス（パルス幅数百 ns 程度）を取り出す。このスイッチの電流、通過電荷量は、それぞれ 100 kA、10 mC を越えるため、ギャップスイッチが主流である。この電圧パルスを電子ビーム発生陰極に印加し、大電流電子ビームをレーザガス中に打ち込んで励起する。

マルクス発生器自身も内部にギャップスイッチをもつが、近年、耐圧 50 kV、100 Hz で動作可能なギャップスイッチが開発されており、比較的小型であれば、10 Hz 程度の繰り返し動作は可能である。

パルス成型線路など二次エネルギー蓄積素子には、誘電率の高い純水（比誘電率 80）、エチレングリコール（比誘電率 40）などの液体を同軸構造の導体間に充てんしたものが使われる。特に純水は、負極性の場合には絶縁油と同程度の絶縁耐力をもち、微小な絶縁破壊にも優れた回復力を有するので、非常に有用である。

パルス成型線路の出力スイッチとしては、通常、ギャップスイッチが用いられる。充てんガスには、合成空気、アルゴンガス、SF₆ ガスなどが用いられるが、1 MV 級の耐圧をもたせる場合には間隔数 cm のギャップに SF₆ ガスを数気圧充てんする。また、このスイッチのトリガには、トリガピンを用いた電気的なトリガも用いられるが、トリガ系統の絶縁が簡単で動作タイミングのばらつきが小さいレーザトリガ方式が有用である。KrF エキシマレーザなど紫外レーザを用いる場合には、図 5 に示すように、ギャップ間げき中

図 5 大電流用各種ギャップスイッチ

央付近にレーザを集光し、光絶縁破壊によって部分的に放電路を形成してトリガする。大気圧の SF₆ ガスに対しては、10 mJ 程度の小さなレーザエネルギーでトリガ可能で、レーザパルスに対する導通タイミングのばらつきは 5 ns 程度と、非常に優れた特性を示す。このような単一放電路のスイッチのインダクタンスは約 10 nH/cm と比較的大きいが、より高速のスイッチングが要求される場合には、図 5 のレールギャップスイッチまたは多段ギャップスイッチのように多数の放電チャネルを並列動作させるようなスイッチが用いられる。レールギャップは、電圧 100~200 kV の領域で、多段ギャップは 1 MV 以上の領域での使用に適しているが、いずれの場合にも、レーザトリガなど十分立ち上がりの早いトリガパルスが要求される。

電子ビームを用いる場合には、真空側の絶縁隔壁の表面の絶縁耐力が問題になる。通常、この沿面放電の耐電圧を上昇させるために、電界が絶縁物表面と約 45 度の角度をなし、表面に沿った電子なだれ増倍が起きにくくなるよう形状を設計する。図 6 に 2 種類の形状を示す。このような構造は、パルス幅 100 ns に対し、約 200 kV/cm の耐電圧を有し、高電圧真空導入端子として広く用いられている。

以上のような各素子技術を組み合わせた装置の例として、電子技術総合研究所においてレーザ核融合などの研究用に開発された、KrF レーザ「ASHURA」⁽²⁾ の主増幅器 Amp-3 を図 7 に示す。この電子ビーム励起型増幅器は、励起用の電子ビーム出力 20 kJ（ビーム

図 6 高電圧真空導入端子の構造

図 7 大出力 KrF レーザ「ASHURA」の主増幅器

電圧 400 kV、全電流 500 kA、パルス幅 100 ns) に対し、レーザー光最大出力 710 J (7.5 GW) を記録している⁽³⁾。

マルクス発生器は、出力電圧 1 MV、蓄積エネルギー 40 kJ で、直径 38 cm 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 4Ω) 4 本を並列に充電する。線路のレーザートリガ出力ギャップスイッチを閉じると、パルス幅 100 ns、立ち上がり時間 25 ns 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。高電圧パルスの真空への導入部分には鋸歯状に同心円の溝を切ったアクリル樹脂を用いており、電圧 400 kV に対して直径は 30 cm と小さい。レーザーガス容器の周りに円筒状のダイオードを配置することにより、空間的に一様で、高いレーザーガス励起密度が達成されており、ガス中に注入されたエネルギーの 10% と、極めて高い効率でレーザー光エネルギーが取り出されている。

現在、電総研をはじめとして、世界で出力エネルギー 5 kJ～10 kJ の KrF レーザ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り、種々の開発が進められている。一方、パルスあたりのエネルギー数 J から数十 J の中規模のレーザーに対しては、数 Hz 以上の繰り返し動作の需要が大きく、今後の電源技術の進歩が大いに期待されるところである。

4. おわりに

レーザー用電源周辺でのパルスパワー技術を概観した。これらは、レーザーの分野では知られている技術であるが、他分野への、より大きな広がり期待して、あえて紹介した。より大きなエネルギー、より高いピークパワーを、手軽に、できれば高い繰り返し頻度で使いたいという要求は、今後様々な分野でますます増大すると考えられる。各素子の固体化は、大きな潮流として今後さらに進められ、そのためには、半導体素子や高機能材料の開発が欠かせないだろう。

一方、エネルギーをレーザーによって光に変換すると、さらに時間的・空間的に圧縮することが可能になり、既に 10^{21} W/cm^2 という、途方もない強度に達している。これらの先に何が現われるのか物理的にも不透明ではあるが、一つの技術の極限を究める意味で興

味は尽きない。これらの非常に高い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。

(平成5年1月14日受付)

文 献

- (1) 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, S.1-19
- (2) 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」電総研彙報, 56, 2, 229 (平4)
- (3) Y. Owadano, et al.: "Development of a High-Power KrF Laser System, ASHURA", *Laser and Particle Beams*, 3, 389 (1989)

大和田野 芳 郎 (正員)

昭和26年11月8日生。54年3月東京大学電気工学博士課程修了。同年電子技術総合研究所入所。以来、レーザー核融合、大出力KrFレーザーなどの研究開発に従事。現在、極限技術部高密度エネルギー研究室長。工学博士。