レーザー技術ノート

大出力レーザーシステムにおける
光シャッターの自動監視装置

山田 正*・金辺 忠*・中塚 正大*

(1984年12月18日 受理)

Automatic Monitor of Optical Shutter for High Power
Glass Laser System

Tadashi YAMADA*, Tadashi KANABE* and Masahiro NAKATSUKA*

(Received December 18, 1984)

1. まえがき

近年、慣性核融合研究の進展に伴ない、エネルギーギドライバーであるレーザーシステムの大型化が、急速なピッチで進められている^{1,2)}。我が国では、大阪大学レーザー核融合研究センターの大出力ガラスレーザーシステム「激光Ⅻ号」が順調な運転を続けており、世界最高の出力を誇っている。装置が大型化し、システムとして複雑になるにつれ、信頼性と、操作性の向上のため、自動化、省力化に努力がはられている。激光Ⅻ号システムでは、自動光軸調整装置を始め、レーザーオペレーターコンソール、光計測オペレーターコンソール、アライメント（光軸調整）オペレーターコンソール等、コンピューターや精密機械を駆使した、自動化、遠隔制御を取り入れ、わずか数人の技術者により運転できる省力化システムとして設計された。将来核融合が定常運転を開始した場合も、作業員や装置の安全性の面から、徹底した自動化が行なわ

れることはまず間違いないであろう。レーザーシステムの不安定動作発生の要因の一つに光シャッターの誤動作が挙げられる。光シャッターは、高利得増幅器間の寄生発振防止やプリパルス抑制の為に、ロッド増幅器間等に設置されるコンポーネントである。光シャッターの性能は、クロスポラライザーの消光比及び、駆動用の高電圧パルスのタイミング安定性により決定される。実際のレーザーショット時に起こり得る誤動作は、高電圧ドライバーの不動作及び、タイミングずれによる光透過率の大幅な変動である。この対策として激光Ⅻ号の運転プログラムでは、レーザーショット直前に、全ての光シャッター（計15台）の動作確認を、ユニバーサルカウンタで動作タイミングを測定することにより行ない、省力化のため、マイクロコンピューターにより、この動作確認の完全自動化を実施した。自動監視装置の設計にあたり、コストの低減化及び回路の簡素化に努めた。高速パルスの切り換えには、市販のシールドリレーを使用した。

* 大阪大学レーザー核融合研究センター（〒565 吹田市山田丘2-6）

* Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6, Yamada-Oka, Suita, Osaka 565)

Fig.1 Optical Layout of Gekko XII Glase Laser System.

シールドリレーは、高速パルス伝達（立ち上がり $\leq 1\text{ns}$ ）に十分な性能を持ち、長期信頼性も非常に高い結果が得られた。本報告では、自動監視装置の概略と、光シャッターの高速ドライバーであるサイラトロンとクライトロンの長期動作計性について述べる。

2. 光シャッター動作タイミング自動監視装置

激光Ⅻ号システムの光学的配置を Fig. 1 に示す⁴⁾。システム中に光学シャッターは、前置増幅器列に3台、主増幅器列に12台の計15台が設置されている。(OS25, OS50) このうち、前置増幅器列の2台の光シャッター(口径25φ)は、1台のドライバーで駆動されており、これは特に駆動需要が高いため、高速スイッチには、比較的寿命の高いサイクロンを1台で並列駆動している。その他の13台の光シャッタードライバーには、個々にクライトロンを高速スイッチとして使用している。激光Ⅻ号用発振器は、カイゼンガータイプ¹⁾を採用しており、励起ランプの点灯時刻、モードロックやQスイッチのタイミングに至るまで、全て電気信号により制御

Fig.2 Block diagram of the optical shutter timing measurment system.

されている。単一パルス抽出器や光シャッターのトリガー信号も、発振器のローカルコントローラーのタイミングパルス発生器により制御されているので、光シャッターの動作には、ローカルコントローラーの制御も必要となってくる。Fig. 2 に今回開発したタイミング測定システムの図を示す。発振器用ローカルコントローラーからのトリガー信号は、絶縁増幅器 (ISO AMP) と遅延発生器により、独立な15チャンネル分が出力される。このうち1チャンネルを、ユニバーサルカウンターのスタート信号とし、他のト

リガー信号は、遅延回路、ゲート回路を介し、光シャッタードライバーへと導かれ、駆動用高電圧パルスを発生させる。この高電圧パルスを分岐し、減衰器を通した後、ユニバーサルカウンターのストップ信号として用いる。ユニバーサルカウンターは、スタート信号から、ストップ信号までの時間差を $\pm 1\text{ ns}$ の精度で測定し、この時間差を光シャッタードライバーの動作タイミングとして監視する。(光シャッターを通過する、光パルスとの同期調整時の値を基準値とする。)このシステムでは、同時に14台のタイミング監視をする事は不可能であるため、Fig. 2に示すように、マイクロコンピュータ制御で、1台ずつの自動監視を行なっている。マイコンは、レーザー制御オペコンよりの全増幅器の充電開始信号を感知し、光シャッターのタイミング監視プログラムを始動する。14台中1台のみを動作させるために、トリガー線路途中にシールドリレーを利用したゲート回路を組み込み、これをマイコンにより制御し、該当シャッター以外のトリガー線路を全て遮断する。ストップ信号は、14台の出力パルス群から選択して

Fig.3 Flow chart of the measurement procedure.

カウンターに導くため、シールドリレーでマルチプレクサを構成し、マイコン制御で、監視対象の光シャッターからの高電圧パルスがカウンターに導入される。カウンターとマイコンは、GP-IBにより接続されており、カウンターにより計測されたデータは、ただちにマイコンに読み込まれる。動作プログラムのフローチャートをFig.3に示した。以上のように、マイコンにより光シャッターの駆動、計測、データの読み込みを、各光シャッターについて逐次行なっていく、全データ収集終了、ご各々の動作状態及び、タイミングの基準値からのズレ量を判断し、異常がある場合には、ローカルコントローラー表示パネル上の発光ダイオードや、CRT画面上において、レーザーショットが可能かどうかを表示した。全チェックに要する時間は約30秒程度で、現在までに動作回数は300回を超えているが、動作ミスは一度も無く、高い信頼性を得ている。

3. シールドリレーの特性

今回、トリガー線路開閉器とマルチプレクササーには、OMRON製G4 Y型高周波リレーを使用した。このリレーは入力周波数900MHzにおいて、アイソレーション65dB以上、挿入損失0.25dBと優れた高周波特性を持っている。リレーを13段直列結合した回路に、立ち上がり、 $\leq 1\text{ ns}$ のパルス信号を印加し、過渡応答特性を測定したが、立ち上がりのなまりは、1ns以下であり、減衰も反射も見られず、同軸リレーと

Fig.4 Input and Output wavefams through 13 stages in serial connection of shield relays. The horizontal sweep is 10ns/div and the vertical scale is 5V/div.

同等の性能を持つことがわかった。Fig. 4 に、リレー13段の入出力波形を示す。シールドリレーは、各端子にそれぞれ接点接地を持ち、同軸ケーブルでの配線が実装上容易となっている。リレー間の配線には1.5D-2V線を使用し、リレーは万能基板上に配置した。実装上の問題としては、リレーの表面がGNDとなっているため、密に配置した場合他のGNDと接触する場合があります、このため、接点部からの輻射電波がノイズとなり、回路に悪影響を与える。リレーの寿命に関しては、本システムでは負荷印加時の開閉を行わないので、完全に機械的寿命に依存しており、長寿命が期待される。

4. サイラトロンとクライトロン

Fig. 5 に、サイラトロン、クライトロンを高速スイッチに使用した、出力電圧パルスの波形を示す。クライトロンによる出力波形は、パルス発生回路のブルームラインで設定してある40 nsのパルス幅を持っている。波形平坦部の揺ぎは、測定系の反射等によるもので、平坦部での光透過率の変動は、5 %以下であった。光シャッターの開口時間も40nsで、透過光パルスの幅は0.1ns～1 nsであるため、ジッターとして±15ns程度の許容値を持つことになる。これに対し、サイラトロンの出力波形は、半値幅こそブルームラインで設定した20nsであるが、立ち上がり特性が悪いため、矩形波とはならず、光透

Fig. 5 High voltage waveforms driving the high speed switching elements, (a) Krytron and (b) thyatron. The horizontal sweep is 2ns/div and the vertical scale is 2.5KV/div. The waveform fluctuation on the flat top in (a) is due to measuring circuit.

(a)

(b)

Fig. 6 Delay time of the OS driving pulse generated with krytron as a function of the shot count. (a) After 6000 shots, (b) after 22000 shots.

過率変動を数%以内に押さえるためのジッターの許容値は、±5 nsに制限されてしまう。Fig. 6 に、本装置で得たデータの約5ヶ月間にわたる、クライトロン動作の長期安定性の結果を示す。縦軸は、タイミング制御の主トリガーパルスからの遅延時間の計測値である。図の(a)は、13台中最もジッターの少ないドライバー（クライトロンの累積ショット数6000回）(b)は、13台中最もジッターの少ないドライバー（クライトロンの累積ショット数22000回）の長期データを示した。クライトロンの長期性能について、

次の事が言える。クライトロンの使用回数が少ない状態での動作ジッターは、短期的には ± 1 ns以下の高い安定性を持つ。尚、カウンターの計数精度が2 nsであるので、実際のジッターは、かなり小さいと言える。ただし、低い確率で10 ns程度の大きなジッターが生じる傾向があり、これは他の全てのクライترونについて言える性質である。クライترونが、経時的に劣化してくると、この大きなジッターの生ずる確率がかなり高くなり、平均ジッターも ± 10 nsに及ぶことになる。クライترونは、駆動頻度が増すにつれ、動作タイミングが少しづつ早くなる。現状としては累積駆動数の多いクライترونについても、ジッターは ± 10 ns程度なので、ジッター許容値 ± 15 nsのスペックを充分満たしており、使用には差し支えが無いと判断できる。動作チェックプログラムでは、基準タイミングからのズレが、15 ns以上になるとアラーム表示を行なう。

次にサイラトロンの長期データについて述べる。サイラトロンを安定に動作させるためには、動作直前に10分程度以上のウォーミングアップ時間が必要であり、ウォームアップヒーターで充分加熱しておく。激光Ⅷ号システムでは、ヒーターの寿命等を考慮して、レーザーショット10分前から、サイラトロンのウォームアップを開始している。実際のレーザー運転プログラムでは、主放電前のPILC放電の実施によりウォームアップを開始する。Fig. 7にサイラトロンの長期動作安定性、Fig. 8にはウォームアップ時間に対する動作タイミングの変動を示す。サイラトロンはクライترونに比べ、平均動作ジッターは ± 2 ns程度でやや劣るように見えるが、Fig. 8より明らかなように、サイラトロンの動作タイミングはウォームアップ時間に左右される。現状では、このウォームアップ時間の変動がジッター変動の要因となっている。ウォームアップ時間を一定に保つようにレーザー運転を行えば、 ± 1 nsの安定性は簡単に得られる。また長期的に見ても、クライترونに見られるような突発的に大きなジッターの発生も、経時

Fig.7 Delay time of the OS driving pulse generated with thyatron as a function of the shot count. After 10000 shots.

Fig.8 Dependence of the delay time of the thyatron as a function of warming up time of the cathode.

的なタイミングのずれも無く、非常に安定である。

以上のように、クライترونは高速スイッチとしての立ち上がり特性の早さに優れているが、寿命が比較的短く、長期動作による劣化でジッターの増大が著しい。これに対しサイラトロンは、立ち上がりの早さこそクライترونには及ばないが、短期的にも長期的にも非常に優れた安定性を持ち、寿命が非常に長い。(激光Ⅷ号システムで使用しているサイラトロンは、既に10000回以上の駆動回数を経ているが、経年変化は全く見られていない。)

5. まとめ

大出力レーザーシステムにおける多数の光シャッターの動作安定性を保証するため、動作タイミングの監視を自動化した。パルスカウンター、マイコン、シールドリレーの組み合わせによる、大口径光シャッターの自動タイミング監視装置について述べた。市販のシールドリレーが、高速パルス（立ち上がり $\leq 1\text{ ns}$ ）の切り換えリレーとして、 50Ω ケーブルとのインピーダンス不整合も見られず、良好な特性で使用できることがわかった。高速スイッチとしてのサイラトロンは、短期的ジッターは $\pm 1\text{ ns}$ と安定であるが、低い確率で大きなジッターを持ち、劣化に伴ない大きなジッターの起こる確率が高くなる傾向を示した。サイラトロンは短期的にも長期的にも高い安定性を持ち、10000 ショット

程度では劣化が見られない。光シャッターのタイミング調整の為に導入したマイクロコンピュータは、発振器冷却器用の、市水フィルター、純水フィルター、イオン交換樹脂のメンテナンス管理、発振器励起ランプの寿命監視等にも用いられ、またテンポラルアナライザーとの併用により、発振器の出力波形の監視、記録も実施されている。また、複合パルス生成時のデータ解析プログラムも登載されており、マイコン1台で幅広い用途に利用でき、より省力化することが可能となった。

参 考 文 献

- 1) 山中千代衛他：レーザー研究, 11, 586 (1983)
C. Yamanaka, et al., IEEE, J. Quart, Electron
QE-17, (1981) 1698
- 2) D. R. Speck: et al., IEEE, J. Quart, Electron
QE-17, (1981) 1599