

TIMING CONTROL OF A HIGH VOLTAGE PULSE DEFLECTOR TO STABILIZE EUV LASER LIGHT AT THE SCSS TEST ACCELERATOR

Naoyasu Hosoda^{A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}, Yuji Otake^{A)},
A) RIKEN/SPring-8

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

Abstract

A high-voltage pulse deflector cuts out a single bunch beam of 1 ns from a long beam pulse of more than 2 μ s generated with a single crystal thermionic gun at the SCSS test accelerator. In order to realize a stable EUV laser, we should precisely control the deflector gate timing, which determines a beam arrival time at a 238-MHz pre-buncher cavity. Unfortunately, the deflector timing system was not enough for our requirement in an early stage, because the gate timing drifted due to a temperature change of a timing module. In addition, machine operators of the accelerator often manually had to tune the gate timing for the stable machine operation. To ameliorate this situation, we improved the timing monitor system of the high-voltage pulse passing through the deflector strip line. The detail of the improvements were exchanging an IC in a level converter module to improve a temperature coefficient and replacing a manual delay line with a remote control one. We also introduced a PID control system using the remote control delay line to automatically stabilize the timing. At the result, the stability of the EUV laser is not affected by the deflector gate timing anymore.

SCSS試験加速器におけるEUVレーザー安定化のための高電圧パルスディフレクターのタイミング制御

1. はじめに

SCSS試験加速器では、単結晶CeB₆をカソードに用いたパルス熱電子銃からの2 μ s幅の電子ビームを高電圧パルスディフレクターで切り出すことで、1ns幅の単バンチを生成している^[1]。バンチの幅を制御するためには一般的に制御グリッドが使われるが、それは単結晶カソードで発生した均一な電子ビームのエミッタンスを増大させてしまう。低エミッタンスを出来るだけ保持するため、SCSSでは制御グリッドの代わりにパルスディフレクターを採用した。ディフレクターはDC偏向電磁石、長さ150mmの1対のストリップライン電極、そしてコリメーターで構成され、高速高電圧パルスを電極に印加することで、その時だけビームを振り戻し、コリメーター下流に通過させるものである。コリメーターを通過したビームは238MHzサブハーモニック空洞へ入射し、速度変調ビーム圧縮が始められる。ビームを切り出すタイミングに変動があると、バンチアップの位置と前後の電子ビームの分布が異なってくるので、レーザー発振部、すなわち電子ビーム密度のピーク位置のエミッタンスやピーク電流にばらつきが生じる。このため最終的なEUVレーザー発振が不安定になってしまう。すなわちディフレクターのゲートタイミングは常に安定であることが要求される。

試験加速器のビーム運転を開始して以来、特に装置の始動時に環境の温度変化の影響がディフレクターのタイミング系に大きく現れ、ビーム運転で問題になっていた。またこのタイミングの補正は、装置の運転員が手動でトロンプーン型の位相器を動か

すことで行っていた。これは運転員の負担が大きく非効率であった。そこで変動要因の抑制と、それでも残った変動を自動補正する対策を行った。本報告では、それらについて報告する。

2. ディフレクターのタイミング系とこれまでの問題点

2.1 ディフレクターのタイミング系の概要

図1に、ディフレクター用トリガー回路とそのモニターシステムの構成を示す。二重線枠の機器は後から変更・追加した機器であって、当初は無かったものである。まず、加速器全体のトリガーの元となるマスタートリガーを、SCSSで開発した三菱電機特機システム製5712MHz同期型トリガー遅延ユニット(TDU)を用いて遅延する^[2]。TDU出力の遅延は4.2ns毎なので、さらに細かく調整するために次にディレイラインを用いる。図中ではパルスモーター制御のものであるが、当初は日本高周波製手動位相調整器を用いていた。この後、レベル変換器でTDU出力のLVPECLをKentech製高速高電圧パルサーPBG1/Sが受け付ける0-10Vレベルへ変換している^[3]。高速高電圧パルスのパルス高は+3.3kV、幅2ns、パルス立ち上がり時間200psである。ストリップラインを通過したパルスは、アッテネーターで減衰させた後クライストロンギャラリへ戻し、オシロスコープでモニターしている。

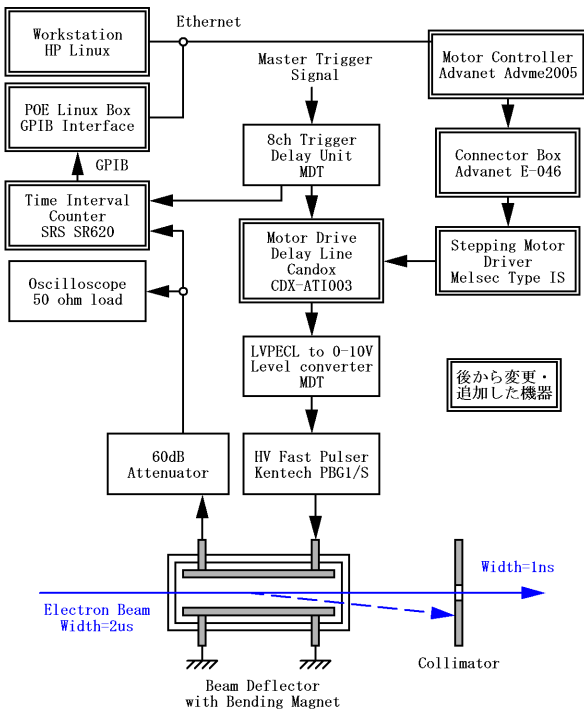


図1：ディフレッター用トリガー回路とそのモニターシステムの構成

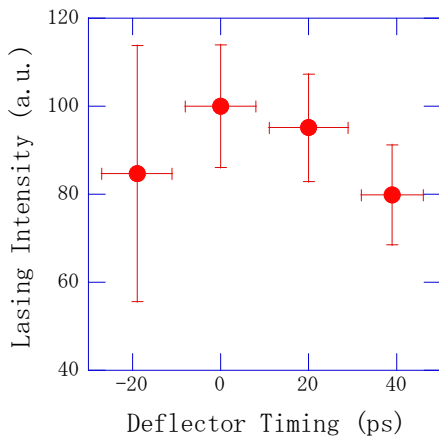


図2：ディフレッター動作時間のモニター値とレーザー強度の関係

2.2 これまでの問題点

図2にディフレッター動作時間のモニター値とEUVレーザー強度の関係を示す。もっとも強度が強かったタイミング設定値を0psとし、またその時の強度を100とした。エラーは1標準偏差である。20ps変化すると、レーザー発振強度がショット毎に大きく変動したり、平均強度が下がったりしてしまうことがわかる。問題は、238MHzサブハーモニック空洞へのビーム到達位相がドリフトしてしまうことであった。各部の調査の結果、クライストロンギャラリーの温度変化により、ディフレッターが動作するタイミングが変動しているらしいことがわかった。上に述べたタイミング機器を調べたところ、

レベル変換器の遅延時間の温度依存性が198ps/°Cと大きく、特にオペアンプの前段で論理反転に用いているIC、74LS06の影響が大きいことがわかった。またドリフトを補正するために手動位相調整器が収められている19インチラックの扉を開けると、さらにラック内温度が急激に下がって不安定になることも問題であった。

後述するハードウェアの対策と整備後、このシステム全体の温度依存性は、40ps/°Cと小さくなった。しかしそれでもラック内温度は最大で2°C程度の日変化があるため、タイミングの調整無しでは、レーザー発振を維持できない。しばらくの期間は、運転員が運転端末上でタイミングモニター値を監視し、かつ手動で補正していた。頻繁に補正するのは運転員の負担が大きく、そうでなければドリフトが少し残ってしまっていた。

3. 変動要因の抑制と自動補正

3.1 変動要因の抑制

以上から、常にディフレッタータイミングの変化をモニターできるようにすること、各機器の温度変化依存性を小さくすること、そして遠隔で詳細に遅延量を設定出来るようにすることが必要になった。そして最終的には、それでも残るタイミングの変動を、フィードバックで常に自動で補正することを目指すことにした。

まずディフレッタータイミングの変動をモニターするために、最小ビット4ps、分解能25psであるタイムインターバルカウンター（Stanford Research System製SR620）を設置した。これにディフレッターから戻ってきたモニター信号と、TDUの別チャンネルからの遅延信号を入力し、その2信号の時間差を測定する。データはGPIB経由で常にデータベースへ収集することにした。レベル変換器は74LS06を高速な74F04へ変更することで、単体の温度依存性は26ps/°Cに大きく改善した。ディレイラインは、遅延範囲最大2ns、分解能1psであり、かつパルスモーター駆動のCandox製CDX-ATI003へ変更した。パルスモーターはVMEモーターコントローラ（Advantec製Advme2005）で制御する。

3.2 それでも残った変動の自動補正

ディフレッタータイミングのモニター値が一定になるように、ディレイラインの遅延時間を自動補正するPIDプログラムを作成した。その機能構成図を図3に示す。PID制御の基本式は次式で表される¹⁴⁾。

$$MV = K_p \left(e + \frac{1}{T_I} \int edt + T_D \frac{de}{dt} \right)$$

ここで、MV：PID制御出力、e：偏差（目標値－測定値）、 K_p ：比例ゲイン、 T_I ：積分時間、 T_D ：微分時間である。これに次の特徴を加えて拡張している。

- 測定値はPk-Pkで約40psのノイズがある。実際には温度ドリフトはゆっくりであるので、この影響を避ける必要がある。そこで偏差を1次遅れフィルターに通している。

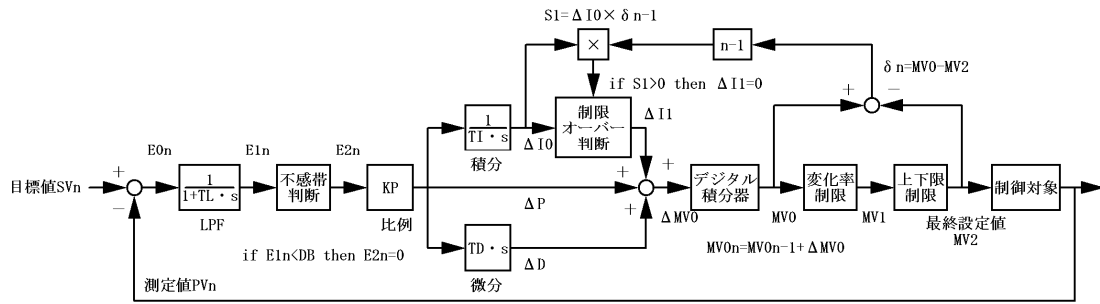


図3：ディフレクタータイミングのモニター値が一定になるようにディレイラインの遅延時間を補正するPIDプログラムの機能構成図

- ディレイラインは機械的に電気長を変えるため、その動作回数は、メーカー保障では往復20000回と有限である。そこで頻繁に動かすことを避けるために不感帯を設け、偏差が不感帯に入っている場合は、偏差を切り捨てる。
- ディレイラインの動作範囲は有限であり、またパルスモーターで駆動するので、その変化率も有限である。そこでそれらの制限値に達しても制御性を劣化せず継続させるため、制限オーバー判断を行っている。

このプログラムは運転端末として用いているHPワークステーションで動作させている。制御周期は、主に温度ドリフトの補正が目的であることや頻繁な動作を出来るだけ行いたくないことなどから5秒と遅くしているが、十分である。

図4は、ディフレクタータイミングのモニター値と、19インチラック内の温度の関係を示している。タイミング値はフィードバック目標値を0psとしている。途中でPID制御をオフからオンにしているが、オン時には温度が変動してもタイミング値は安定していて、PID制御が目的通りに動作していることがわかる。

4. まとめ

ここまでのすべての結果としてPID自動制御を用いてディフレクタータイミングを安定化したときの、

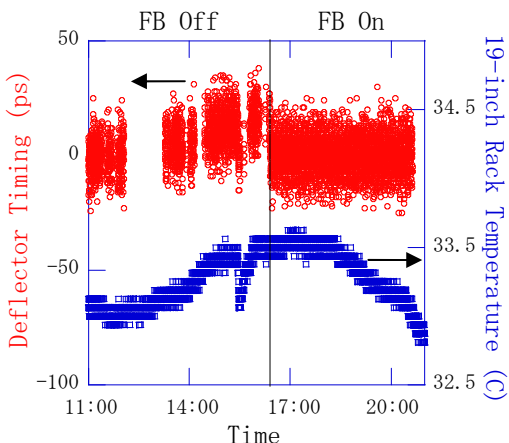


図4：ディフレクタータイミングのモニター値と、19インチラック内の温度の関係

EUVレーザー強度の変動の様子を図5に示す。タイミング値はフィードバック目標値を0psとしている。またレーザー強度は、平均値を100としている。この3時間中のタイミングモニター値の標準偏差は8.1ps、レーザー強度の標準偏差は11%で、とても安定であった。

SCSS試験加速器はXFELのテストマシンとして建設されたが、昨秋からはユーザー運転も始まり、レーザーの長時間安定度はますます重要になっている。我々は不安定要素のひとつであったビームディフレクターのタイミングの安定化を行い、これを原因とするレーザーの変動を抑えることができた。

参考文献

- [1] 渡川 et al., "低エミッタンス・短バンチ電子ビーム生成のためのビームディフレクターの開発", 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会, 仙台, 2006年8月2日
- [2] 細田 et al., "5712MHz同期型時間遅延VMEモジュールの開発", 第2回日本加速器学会年会・第30回リニアック技術研究会, 佐賀, 2005年7月20日
- [3] 細田 et al., "SCSS試験加速器のタイミングシステム", 第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会, 仙台, 2006年8月2日
- [4] 広井・宮田, "シミュレーションで学ぶ自動制御技術入門", CQ出版社, 2004年

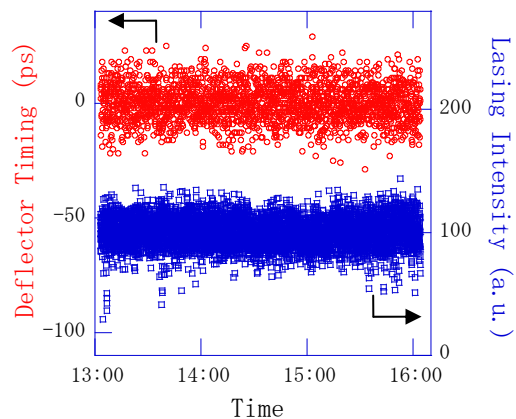


図5：PID自動制御実行中のディフレクタータイミングのモニター値と、レーザー強度の関係