

DEVELOPMENT OF HIGHLY QUALIFIED UV-LASER LIGHT SOURCE FOR RF GUN

H. Tomizawa, H. Dewa, T. Taniuchi, A. Mizuno, T. Asaka, K. Yanagida, S. Suzuki, T. Kobayashi, and H. Hanaki,
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (SPring-8)
1-1-1 Kouto, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

Abstract

We have been developing stable and highly qualified UV-laser pulse as a light source of the rf gun for an injector candidate of future light sources. Our gun cavity is a single-cell pillbox, and the copper inner wall is used as a photo cathode. In present status, the short pulse energy stability of laser has been improved down to 1.3 ~ 1.5 % (rms; 10pps; 10000 shots) at the third harmonic generation. The long stability depends on the stability of modelocking at oscillator. In this improvement we just passively stabilized the system. We considered environmental controls in clean room to reduce optical damage accidents and constructed a new humidity-controlled clean room in 2003. And we re-installed the total laser system in this room in 2004. The relative humidity of this new clean room at room temperature is in a region of 50 ~ 60 % with a stability of less than 2% (p-p). On the other hand, the ideal spatial and temporal profiles of a shot-by-shot single laser pulse are essential to suppress the emittance growth of the electron beam from a photo-cathode rf gun. This laser-shaping project has been started in two steps since 2002. As the first successful test run in 2002, with a microlens array as a simple spatial shaper, we obtained a minimum emittance value of 2π mm•mrad with a beam energy of 3.1 MeV, holding its charge to 0.1 nC/bunch. In the next test run in 2004, we prepared a deformable mirror for spatial shaping, and a spatial light modulator based on fused-silica plates for temporal shaping. We are applying the both adaptive optics to automatically shape the both spatial and temporal UV-laser profiles with a feedback routine at the same time. We report herein the principle and developing process of our laser beam quality control system.

フォトカソードRF電子銃のためのレーザ光源の高品質化

1. はじめに

SPring-8では低エミッタンス電子ビーム生成のために、Sバンド単空洞のフォトカソードRF電子銃装置を開発^[1,2]している。このフォトカソードRF電子銃の実用化には、高品質なレーザ光源の安定供給が必要である。我々はこの問題を重視し、レーザ光源の本格的な安定化試験と、その空間・時間プロファイルの整形実験を行うための恒温恒湿試験室を完成させた。この試験室は、電子銃試験用の新設遮蔽と共に、2003年度に完成した。

このレーザ装置の恒温恒湿試験室（クリーンルーム：クラス1000）は、レーザの長期安定化と、不安定性の要因究明のために建設された。この試験室では常に相対湿度が55%程度に維持されている。この相対湿度では静電気による帯電が、乾燥状態と比較して急激に低下することが知られているためである。この性質を利用し、光学系をはじめとする誘電体面での静電気の発生を防ぎ、集塵効果による塵の光学部品面上でのレーザによる焼き付けを防止するのが目的である。このような理想的な環境で、光源としてのレーザの安定度の原理実証が進むものと思われる。この試験室は環境パラメータを比較的自由に変化可能に設計されているので、環境変化に強いレーザの開発環境としても使用できる。

RF電子銃の研究においては、何よりもレーザ光の質的な改善が重点課題である。特に、レーザのパルスエネルギーの長期安定化、レーザの空間および時間プロファイルの改善は必須である。そのために、

これらの改善を中心にレーザの改造と調整を行なっている。このレーザシステムのパッシブ安定化の結果、レーザの安定度が第3高調波で1.3~1.5%までに改善されている。現状でUVレーザ（第3高調波）の長期安定度は、オシレータ・レーザ装置のモードロックの安定度でのみ決まる状態にまで要因が絞り込まれている。このオシレータのレーザ結晶でのポンピング光路の状態を監視し、調査した結果からポンピング光源の光路の不安定性が原因である可能性が高くなった。この解決は今後の検討課題である。

一方、レーザの空間・時間プロファイルの整形による最適化もパッシブな方法から始め、現在はアクティブな最適整形装置・方法を構築し、調整中である。既に2002年度に、レーザの空間プロファイルマイクロレンズ・アレイで円筒状に整形し、非線形な空間電荷効果を押さえることで、1バンチ当りの正味電荷量0.1nCにおいて、エミッタンスが 2π mm•mradの電子ビームが安定に得られるようなシステムを実現した。2004年度には、補償ミラーと石英板空間位相変調器を使ったレーザの空間・時間プロファイルの自動整形システムを組み上げ、現在までに空間整形のみ実験を行った。ビームのガウシアン整形までは可能であったが、フラットトップ化にはさらに非球面レンズ等の別の光学系が必要である。今後、両プロファイルを同時最適化（空間：フラットトップ・円筒状；時間：矩形パルス）する自動整形アルゴリズムを構築する。ここではレーザ光源の高品質化の進展状況を報告する。

2. レーザ装置の構成と長期安定化の試み

2.1 CPA-Ti:Saレーザ装置の初期構成

RF電子銃のレーザ装置の元の構成は以下の通りである。チャープ・ミラー方式のTi:Saレーザ発振装置（フェムトレーザ社製）をフェムト秒（20 fs）のシード光として用いている。このオシレータ・レーザ装置はモードロック時に、中心波長が790 nm、スペクトル幅（FWHM）が50 nmで発振する。このシード光は繰返し周波数が89.25 MHzになるように、常に光共振器長をピエゾ・ミラーでフィードバック制御している。このシード光をチャープ・パルス増幅器内にあるポッケルスセルでポンピング光（YAGレーザ）の繰返し周波数10 Hzに同期させて切り出し、最終的にパルスエネルギーを30~60 mJまで増幅する。この増幅光を3倍高調波（263 nm）に変換し、長さが総計70 cmの合成石英ロッドでそのパルス幅を50 fsから5 psまで伸張し、最終的にパルスエネルギーが200~400 μ Jの紫外光源を得る。以前のパルスエネルギーの安定度は、3倍高調波において、短期で3~5%、長期で10%であった。

2.2 恒温恒湿クリーンルームの新設

レーザ光源の本格的な安定化試験と、その空間・時間プロファイルの整形実験を行うための恒温恒湿試験室（クリーンルーム：クラス1000）を新設した。図1に示すこの試験室は、レーザの長期安定化とその支配的要因究明のために、温湿度を比較的自由に調整出来るようになっている。また、温湿度モニターは天井とレーザ定盤上の2箇所、切り替える方式を採用している。レーザ調整中は人の影響の少ない天井で、人が中にいないときは定盤上で制御する。最終的なレーザの無人調整を視野に入れている。

実際の運転では、この恒温恒湿試験室は常に相対湿度が50~60%に2% (p-p) の安定度で維持されている。これは静電気の発生を防ぐことで、集塵効果による塵の光学部品面上でのレーザによる焼き付けを防止するのが目的である。したがって、本試験室の床、天井、壁はすべて帯電防止仕様になっている。



図1：レーザの恒温恒湿クリーンルーム

2.3 レーザ装置の長期安定化対策と監視システム

恒温恒湿試験室の新設により環境全体の安定化を実現した。しかし、レーザのパルスエネルギーの長期安定性には、オシレータのポンピング光源と増幅器のポンピング光源（YAGレーザ）の安定化が必要である。前者に対しては、オシレータの結晶とレーザ管体の温度変形低減用の水冷ベースプレートのチラーを別にし、それぞれ最適な温度で安定化をした。同時に、後者のYAGレーザもその管体の温度変形低減用の水冷ベースプレートを製作した。サーモグラフィで温度分布の変化を監視することで、安定化最適温度（25℃）を割り出した。また、チャープ・パルス増幅器内にあるポッケルスセルと2段の増幅系のTi:Sa結晶を水冷化し、熱による変化と局所的な熱の発生源を無くした。その結果、レーザの安定度が第3高調波で1.3%~1.5%（10pps; 10000shots）まで改善されるに至っている。

これら一連の安定化の結果、第3高調波での長期安定化の障害は、オシレータ・レーザ装置のモードロックの不安定度のみとなった。この最後に残った問題を解決するために、オシレータのレーザ結晶のポンピング光路状態を常時監視できるカメラを設置した（図2参照）。調査した結果、ポンピング光源の光路の不安定性が原因であることが濃厚になった。現在、その解決策を検討中である。



図2：常時モニタしたオシレータ結晶部の画像写真は蛍光が異常状態で少し緑かっている。正常時は結晶全体が赤く、モードロック時は輝度高くなる。

3. レーザ空間・時間プロファイル整形

3.1 マイクロレンズアレイによる整形

図3に紫外レーザのカソード表面位置での空間プロファイルを示す。図の左にホモジナイザーなしの場合、右にホモジナイザー光学系により円筒型に整形した場合を示す。これらのプロファイルはレーザ光をRF空洞に入射する手前でスプリットし、その位置からカソード表面までの距離と同じになる位置で、レーザ・プロファイルモニター（スピリコン社製LBA300-PC）を用いて計測した。

レーザの空間プロファイルを図3の左から右のように改善することで、それを光源として生成される電子ビームのエミッタンスは、そのバンチ当りの正味電荷量が0.1nCのときに、3.3から2.3 π mm \cdot mradに低減することを2002年度に示した^[2]。

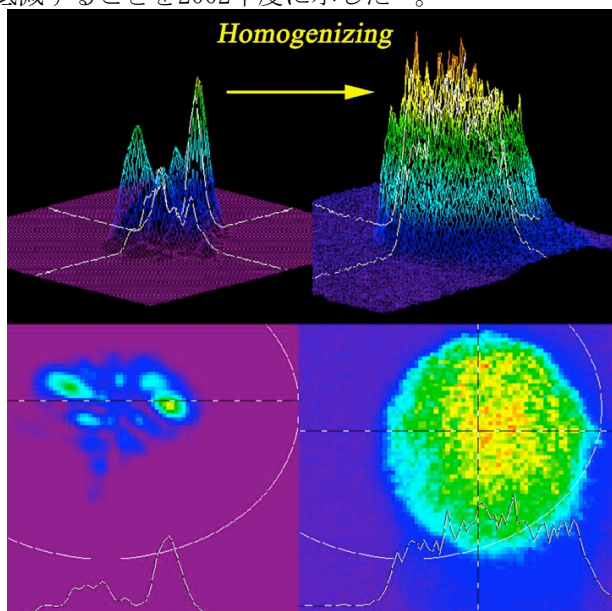


図3：レーザの空間プロファイル改善の結果

3.2 レーザ空間・時間プロファイル自動最適化装置

本年度、補償ミラーと石英板空間位相変調器を組み合わせたレーザの空間・時間プロファイルの自動整形システムを完成させた。現在までにレーザの空間整形のみ実験を行った。現状ではまだ共に手動で調整中であるが、今後は両プロファイルを同時最適化する自動整形アルゴリズムを構築する予定である。

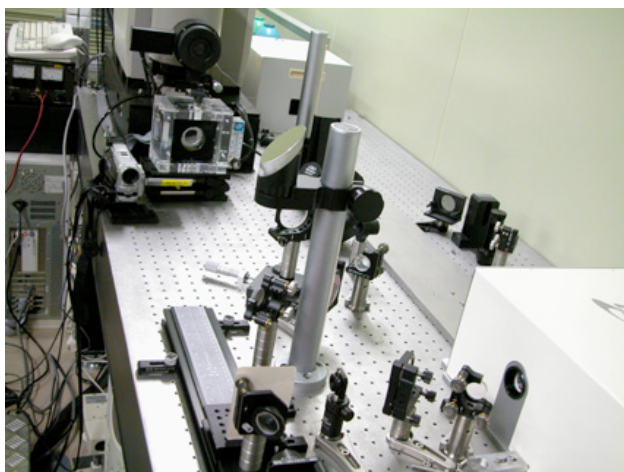


図4：空間・時間プロファイル自動最適化装置
写真右側：箱がサイバーレーザ社製空間位相変調器
写真左側：補償ミラー（上側）と2回反射用光学系

3.3 補償ミラーによる整形結果

現在までに空間整形のみの実験を行った。補償ミラーの変形量が少ないため、2回反射させる光学系

を選び、非点収差を避けるため入射角度を小さく取った。図5にレーザ・プロファイルモニター（スピリコン社製LBA300-PC）を用いて計測した結果を示す。結果として、ビームのガウシアン整形は可能であったが、フラットトップ化には非球面レンズとの組み合わせが必要である可能性がある。

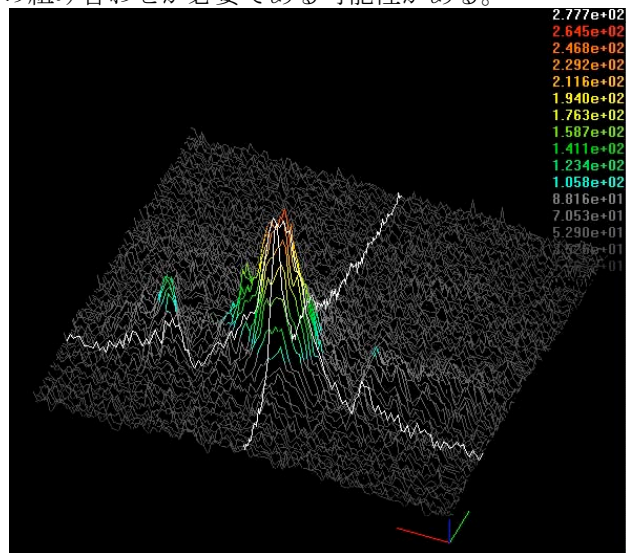


図5：レーザの空間プロファイル整形の結果

4. まとめと今後の課題

今回、RF電子銃の重点課題であるレーザ装置安定化とその研究のために、恒温恒湿試験室を新設した。この試験室の完成によりレーザ光の質的な改善の研究が進んでいる。特に、レーザのパルスエネルギーの長期安定化、空間および時間プロファイルの改善の現状を報告した。ここでのレーザのパッシブ安定化の結果、レーザの安定度が第3高調波で1.3%~1.5%まで改善されるに至っている。レーザ全体の長期安定化には、オシレータ・レーザ装置のモードロックが安定でなくてはならない。これが解決すれば、レーザ光源の長期安定度を保証できる。

一方、レーザの空間・時間プロファイルの整形もマイクロレンズ・アレイによるパッシブな整形方法からアクティブ制御光学系に進展している。今回は、補償ミラーと石英板空間位相変調器を使ったレーザの空間・時間プロファイルの自動整形システムの進捗状況を紹介した。今後、両プロファイルを同時最適化（空間：円筒状；時間：矩形パルス）する自動整形アルゴリズムを構築し、波面制御まで行う予定である。最終的には生成された電子ビームをモニターし、カソード面のQE分布やパルスの歪みも合わせて補償するシステムに発展させる予定である。

参考文献

- [1] T. Taniuchi et al., Proc. of 18th. Int. Free Electron Laser Conf., Vol.2, 137, Rome, 1996.
- [2] H. Tomizawa et al., Proceedings of the 2002 European Particle Accelerator Conference, 1819, Paris, July 2002.