

OPTIMIZATION OF 3D-SHAPED LASER PULSE LIGHT SOURCE FOR A PHOTO-CATHODE RF GUN

H. Tomizawa^{*A)}, H. Dewa^{A)}, T. Taniuchi^{A)}, A. Mizuno^{A)}, T. Asaka^{A)}, K. Yanagida^{A)}, S. Suzuki^{A)},
T. Kobayashi^{A)}, H. Hanaki^{A)}, and F. Matsui^{B)}

Accelerator Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute (SPring-8)
1-1-1 Kouto, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan^{A)}

Creative & Advanced Research Department, Industrial Technology Centre of Fukui Prefecture
61 Kawaiwashitsuka-cho, Fukui City 910-0102, Japan^{B)}

Abstract

We have been researching a photocathode single-cell rf gun for future light sources since 1996, to date having achieved a maximum field gradient of 187 MV/m with a chemical-etching processed cavity. For the last three years we have been focusing on the development of a stable and highly qualified UV-laser source for the rf gun. The UV-laser pulse (10 Hz) energy is 850 μ J/pulse at maximum. The energy stability (rms) of the laser has been improved down to 0.2~0.3 % at the fundamental and 0.7~1.3% at the third harmonic generation. This stability can be held for two months continuously, 24 hours a day. The improvement is the result of being able to stabilize the laser system in a humidity-controlled clean room. In addition, 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 the rf gun. We prepared a deformable mirror for spatial shaping and a spatial light modulator based on fused-silica plates for temporal shaping. Precompensating with a deformable mirror, we obtained a minimum horizontal normalized emittance of 1.74 π mm mrad with a beam energy of 28.8 MeV, holding its net charge to 0.09 nC/bunch. We applied the Q-scan method to evaluate the emittance. The 3D shape of the laser was spatially a top-hat one with a diameter of 1 mm on the cathode and temporally a function of $\text{sec}^2(t)$ with a pulse duration of 5 ps (FWHM). We are currently preparing both of the adaptive optics to automatically optimize the electron beam parameters for lower emittance with a feedback routine.

レーザパルス3次元形状制御によるフォトカソードRF電子銃の最適化

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最適化整形実験を恒温恒湿試験室（クリーンルーム：クラス100~1000）で行っている。

この試験室では常に相対湿度が55%程度に維持され、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している。このような理想的な環境で、24時間営業運転用のRF電子銃光源としてレーザの長期安定化（数ヶ月連続ノンストップ）を目指している。

同時に、この理想的環境で得られた知見を、一般環境への適用（東京大学上坂研究室）やコンパクトレーザ整形システムの開発（先進小型加速器事業）、フラットトップ整形方法のレーザ加工機への応用（福井県工業技術センター）など、より広範な応用に向けた共同研究も行っている。

フォトカソードRF電子銃の研究において、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。一般的に装置の安定化の手順は、まずは本質を抑えパッシブに安定化を目指し、次に原理的に不可能または環境などの現実の制約条件でパッシブな安定化で不十分な場合に初めてアクティブな制御の導入とするべきであろう。我々のレーザの安定化は現在、パッシブな安定化を終え、アクティブな安定化を導入しているところである。現在までのパッシブな安定化の結果、レーザ出力の長期安定度が3倍高調波（THG:263 nm）で0.7~1.3%（rms）まで改善された。またオシレータ・レーザ装置の更新により、連続運転期間は2~3ヶ月になると期待されている。

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^[2]、現在はアクティブ制御に基づいた補償光学系に移行している。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パルス3次元形状自動最適化システムを完成した^[3]。現在、空間プロファイルにおいてはほぼ完全なフラットトップ化を実現している。時間プロファイルも基本波ではピコ秒の矩形パルスの発生には成功しているが、その3倍高調波（THG）変換装置は別途製作し、現在調整中である。

レーザの空間プロファイルを補償ミラーで遺伝的アルゴリズムの援用のもと、円筒状に自動整形した。

^{*} E-mail: hiro@spring8.or.jp

この理想的な空間プロファイルを活かすように従来の斜め入射から直入射に入射光学系を変更し、1インチ当りの正味電荷量0.088nCにおいて、エミッタンスが $1.7\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ の電子ビームが安定に得られるところまで確認している。

今後、時間プロファイルと空間プロファイルと同時に最適化（矩形パルス；パルス幅10 ps）するために、ストリーク・カメラを用いたフィードバック自動整形システムを構築する。ここではレーザー光源の高品質化の進展状況と空間プロファイルの自動最適化の結果を報告する。時間プロファイル整形に関しては紙面の関係上、ここでは割愛するので文献^[3]を参照していただきたい。

2. レーザ装置および入射光学系の現状

2.1 CPA-Ti:Saレーザー装置の現状

現在までのパッシブな安定化の結果、RF電子銃のレーザー光源の長期の安定度化に成功している。パルスエネルギーの長期安定度（rms）は、3倍高調波（THG:263 nm）で0.7～1.3%，基本波（中心波長：790 nm）で0.2～0.3%まで改善されている。

UVレーザー光源（THG）の長期安定度が、オシレータ・レーザー装置のモードロックの安定度でのみ決まる状態になったため、フェムトレーザ社のFEMTOSOURCE SYNERGYを2005年4月から導入した。現状での連続運転期間は1ヶ月を超えているところである。オシレータのレーザー結晶内でのポンピング光路の状態を調査した結果、その光路位置の不安定性がモードロックの長期の不安定性の原因であることが明らかになったため、オシレータ出力をフィードバックし、常時安定な最適値になるようにポンピング光路を自動制御するシステムも併せて導入した。

これによりレーザー光源装置のシード光源は二重化され、即座に切り替え可能になっている。この新オシレータはモードロック時に、中心波長が790 nm、スペクトル幅（FWHM）が40～50 nmで安定に発振するように最適化している。THGのプロファイルが均一な分布になるためには、高調波変換結晶の厚さとレーザーパルス幅のマッチングが重要なためである^[3]。そのため、シード光のスペクトル幅は40 nm程度にしている。また、繰返し周波数が89.25 MHzになるよう、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。

現状で長期安定連続運転の上限を決めているのは、レーザー増幅器のポンピング光源であるフラッシュランプの連続3ヶ月の寿命とその長期ドリフトのみである。この対策として、フラッシュランプの印加電圧の自動最適化システムを2005年度中に完成する予定である。もちろん半導体レーザーを用いた全固体励起レーザーに移行すれば、1年間の連続運転を実現でき、上記の問題は解決するがランニング・コスト等を考え、現状のテスト段階では導入を検討していない。

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レーザー）

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 mJまで増幅する。この増幅光をTHG（263 nm）に変換し、長さが45 cmの合成石英ロッドでそのパルス幅を80 fsから9 psまで伸張し、最終的にパルスエネルギーが500～850 μJ の紫外光源を得られるようにしている。

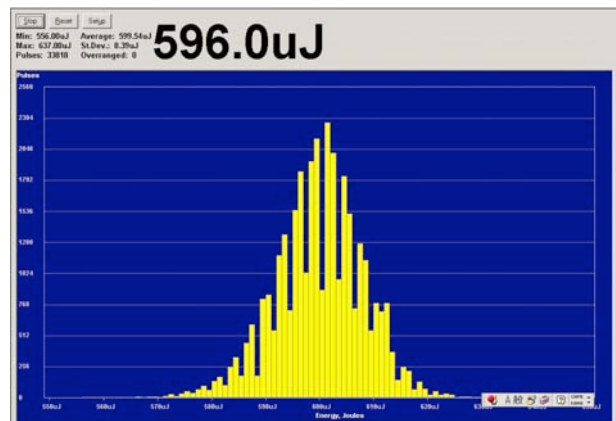


図1：THGのパルスエネルギーの安定度（rms）
測定時間は33,818ショットで、安定度は1.4%（rms）。

2.2 直入射光学系への移行

従来の斜入射の方法では理想的な空間プロファイルを活かすことができない。XとYエミッタンスを共に最小化するためには、レーザー入射系には以下の2つの要求がある。一つはカソード面で真円状スポットを実現する。もう一つは、カソード照射面に同時には波面が到達することである^[2]。これらを実現するためにはレーザーをカソード面上に垂直に入射してやる必要がある。斜め入射でもシリンドリカル・レンズと回折格子による反射等を用いることで、それぞれ楕円上照射面と波面の問題を解決できるが、レーザー整形の光学システムとの組み合わせの相性が悪く、調整を困難にする。直入射光学系における問

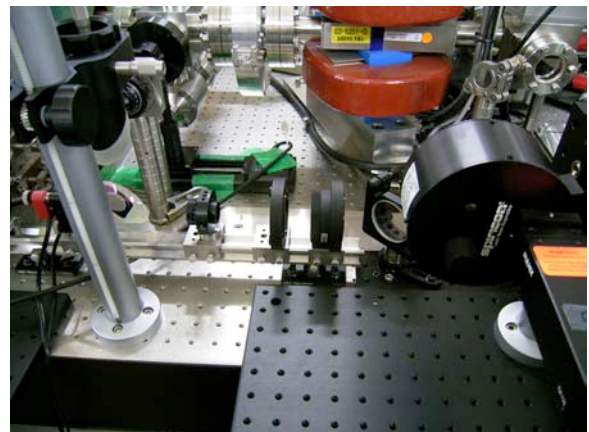


図2：カソード面直入射光学系

入射角は2度以下、写真右端のレーザープロファイラーはカソード面上でのレーザープロファイルと同じになるように、スプリッターからカソードと等距離に配置

題点は、入射光軸をできるだけカソード面に垂直になるようにするとワーキング・ディスタンスが長くなってしまふことである。これによりレーザ光源の品質によってはカソード面で理想的なビームサイズへの集光を難しくする場合が多々ある。マイクロレンズ・アレイ^[2]やディフューザー^[4]での空間プロファイル整形では、レーザ光の品質が本質的に悪化するため、1 mほど離れたカソード面上での理想的なスポット径への集光が困難であるのが一般的である。この問題は、補償ミラーと自動的に最適値を探索する遺伝的アルゴリズム^[3]の導入によって解決した。

3. レーザ空間プロファイル自動最適化

3.1 補償ミラーと遺伝的アルゴリズムによる整形

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。図の左に補償ミラー^[3]の59チャンネル全ての電極印加電圧がゼロの場合を、右に遺伝的アルゴリズム^[3]により各チャンネルへの印加電圧を自動最適化して円筒状に整形した結果を示す。これらのプロファイルはレーザ光を加速器ビームラインの真空窓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。

図3右のような改善後、さらに図3右下の不均一なレーザ強度分布を均一化する評価関数での自動最適化を行った。その結果、均一な強度分布が得られたが外形の立ち上がりは多少鈍くなった。このレーザパルスを光源として生成される電子ビームの水平エミッタンスは、その正味電荷量が0.088nC/bunch、パルス幅5 p s、カソード面スポット径1 mm、ビームエネルギー28.82MeVのときに、 $1.76 \pm 0.056 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ になった。このエミッタンス測定系については文献^[4]を参照のこと。

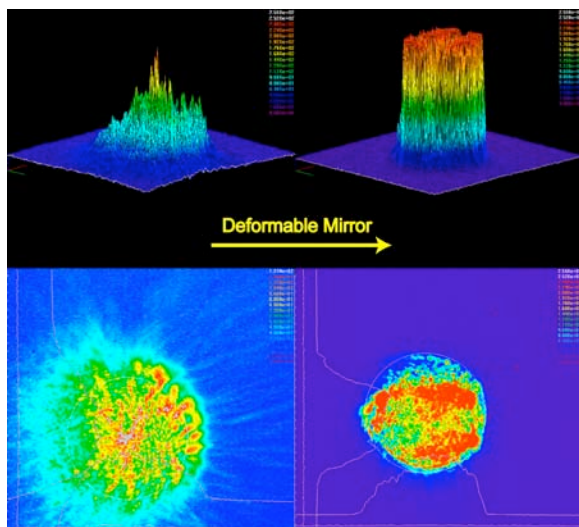


図3：レーザの空間プロファイル最適化の結果

3.2 電子ビームプロファイルの自動最適化試験結果

さらに電子ビームプロファイルをRFgun空洞下流のプロファイルモニターでCCDにより観測し、その画像データを遺伝的アルゴリズムを用いて補償ミラーにフィードバックすることにより、カソード面のQE不均一分布も同時に補償する自動最適化試験を行った。これにより最適化された電子ビームの水平エミッタンスは、上述と同条件で $1.74 \pm 0.047 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ になった。この測定結果を同条件で測定された垂直エミッタンスと共に図4に示す。

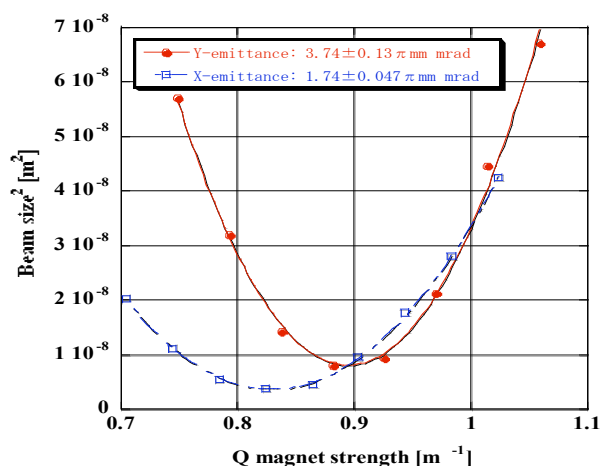


図4：自動最適化ビームのエミッタンス測定結果
X, Yエミッタンス共に同じヘルムホルツコイル（HC）電流の設定値（HC1:33A; HC2:27A）で測定。

4. まとめと今後の課題

今回、補償ミラーを用いたレーザの空間プロファイルを自動最適化するアルゴリズムを完成し、外形上はほぼ理想的な立ち上がりの鋭いトップフラット形状を実現できた。また、生成された電子ビームをモニターし、カソード面のQE不均一分布も補償する自動最適化試験を行ったが、目立ったエミッタンスの改善は得られなかった。今後、エミッタンス測定の結果を直接フィードバックしてのレーザパルス3次元形状の自動最適化を行う予定である。

また、直入射光学系への変更を行ったがまだ最適化が不十分である。真空中に置いた折り返しミラーでのケラレ等で約80%の損失があり、正味電荷量が1 nCまでの実験が出来ていない。この問題を解決する光学系への変更を行っているところである。

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.
- [3] H. Tomizawa et al., Proceedings of workshop ERL2005, Newport News, March 2005. (to be published in NIM-A).
- [4] A. Mizuno et al., Proceedings of PAC2005, Knoxville, USA, May 2005 (to be published).