

AUTOMATIC MINIMIZATION OF ELECTRON BEAM EMITTANCE WITH THREE-Dimensionally SHAPING LASER PULSE FOR A LIGHT SOURCE OF RF GUN

Hiromitsu Tomizawa^{A)}, Hideki Dewa^{A)}, Tsutomu Taniuchi^{A)}, Akihiko Mizuno^{A)}, Takao Asaka^{A)}, Kenichi Yanagida^{A)}, Shinsuke Suzuki^{A)}, Toshiaki Kobayashi^{A)}, Hirofumi Hanaki^{A)}, and Futoshi. Matsui^{B)}

^{A)} Accelerator Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute (SPring-8)

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

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

Abstract

We have been developing a photocathode single-cell pillbox rf gun for future light sources since 1996 at SPring-8, to date having constantly achieved a very low dark current of 2.5 pC at the beam energy of 26 MeV with a chemical-etching processed cavity. For the last four years, we have been focusing on the development of a stable and highly qualified UV-laser source for the rf gun. The energy stability (rms) of the laser has been improved down to 0.2~0.3 % at the fundamental and 0.7~1.4 % at the third harmonic generation. This stability has been held for five months (Flash lamp have to be changed every 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 an UV-pulse stacker for temporal shaping. In the first test of 3D-laser shaping, we obtained a minimum horizontal normalized emittance of 3.05π mm mrad with a beam energy of 26 MeV, holding its net charge to 1.0 nC/bunch. We applied the Q-scan method to evaluate the emittance. The 3D shape of the laser was spatially top-hat (flattop) one with a diameter of 1.1 mm on the cathode and temporally a squarely stacked pulse with pulse duration of 10 ps (FWHM). In this study, we demonstrate 3D (both temporal (1D) and spatial (2D) short pulse (5~20 ps) laser beam) shaping as an ideal light source for stable generation of a low emittance electron beam at a high charge (1~2 nC/bunch).

R F 電子銃用光源レーザパルスの3次元形状制御による電子ビームの自動低エミッタンス化

1. はじめに

加速器将来計画に必要な低エミッタンス電子源で有望視されているのがフォトカソードRF電子銃である。このタイプの電子銃は100MV/mを越えるカソード表面最大電界のため、一般に暗電流値が多いのが難点であった。しかし、我々はこの空洞を独自開発した化学エッチング法¹⁾により、暗電流値を1パルス当たり2.5 pCにまで定常的に低減できている。

ところで、この電子銃では光電効果を利用するために、レーザ光源のパルス形状の最適化とその長期安定度が絶対条件となる。低エミッタンス電子ビームを実現するには、光源となるレーザパルスの3次元強度分布を空間電荷効果が低減するように理想的な円筒形状にしなければならない。そのために、レーザの空間プロファイルの整形に補償ミラーを、時間プロファイルの整形にパルススタッカーを採用した。この組み合わせによれば、両者の整形方法が干渉せず実施可能である。補償ミラーを遺伝的アルゴリズムの援用により使用すれば、どのような不均一なレーザ空間プロファイルも理想形状にするこ

とが可能となる。フォトカソードの量子効率の不均一性もあわせて、この補償ミラーによって解決することができる。パルススタッカーは、理想化された空間プロファイルを時間軸上で重ね合わせることで、円筒形状を実現する。SPring-8ではフォトカソードに時間応答が10 fs以下の銅を用いているので、時間プロファイルの歪みを考慮する必要がない。今後、高量子効率カソードを用いて時間応答によるパルス歪みが問題になる場合に備え、補償ミラーと同じように自由にパルス形状を自動最適化可能な補償光学系である空間位相変調器 (Spatial light Modulator: SLM) も合わせて開発している。

2. 3次元パルス整形光学システムの概要

実際の補償ミラーとパルススタッカーの光学的配置は以下ようになる。パルススタッカーでまず、パルススタック列を作り、その後の伝送光学系全体での正分散によるパルス幅の伸長で理想的に重なるようにそのパルス間隔を設定する。その伝送途中にある補償ミラーにより、カソード照射位置と等距離

においてプロファイラーで、レーザ直入射窓直前でスプリットしたレーザ参照光の空間プロファイルをモニタし自動最適化する^[2]。そのとき必ず、パルススタッカーの各段における空間プロファイルが同じになるように調整する。パルススタッカーは20psの最大矩形パルス幅が可能となる3段目まで用意した。

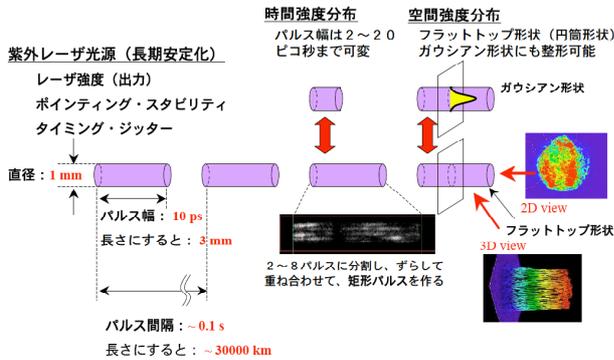


図1：レーザパルスの3D強度分布整形システム

2.1 UVパルススタッカーの原理

パルススタッカーとは、波長回転板と偏光ビームスプリッターで構成され、波長板で45° 直線偏光にされたパルスレーザ光を偏光スプリッターキューブにより各偏光成分 (S偏光とP偏光パルス) に分岐し、再びスプリッター (この場合は合成用) にて光路差をつけて再合成する光学系である。実際は、最終的に各強度比を波長板の回転角で微調することで、カソード面上で各偏光パルス列が同じ強度になるようにして、パルス幅と同じ間隔に並べた合成パルス列が出来る。S偏光パルスとP偏光パルスは再合成時の光路差が、例えば750 μm の時に2.5psの時間的オフセットに相当する。図2に示すように、各短パルスビーム (2.5ps) の立ち上がり (1 ps程度) での5~20psの矩形合成波形が可能である。

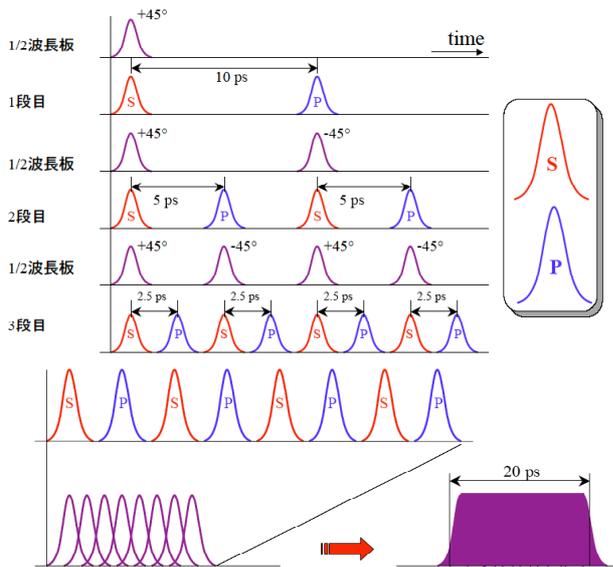


図2：パルススタッキングのタイミングチャート

2.2 UVパルススタッカーの光学系と使用方法

今回用いた偏光スプリッターキューブは、その破壊閾値を上げるため、光学セメント接着式ではなく、オプティカルコンタクト方式 (昭和オプトロニクス社製) を用いた。また、各光学ホルダーは長期安定性があるものを厳選、ないものは新たに設計・製作し光学キット化した^[3]。

この光学系はS偏光を基準としてP偏光で光路差を調整する機構になっているため、常に合成パルスの先頭は1段目のS偏光パルスと一致し、それを基準とするRF電子銃へのレーザ入射位相は、この光学系の調整によりずれることがない。また、図2に示した3段で20psの矩形パルスとなる構成の場合、1段目のP偏光をマスクすれば10psに、2段目までのP偏光をマスクすれば5psと、段階的に変えられる。この時、合成レーザパルス全体のパルスエネルギーは初段の波長板を回転させることで調整可能となる。

図3、4に実際の3段構成のパルススタッカー光学系の構成図と写真をそれぞれ示す。

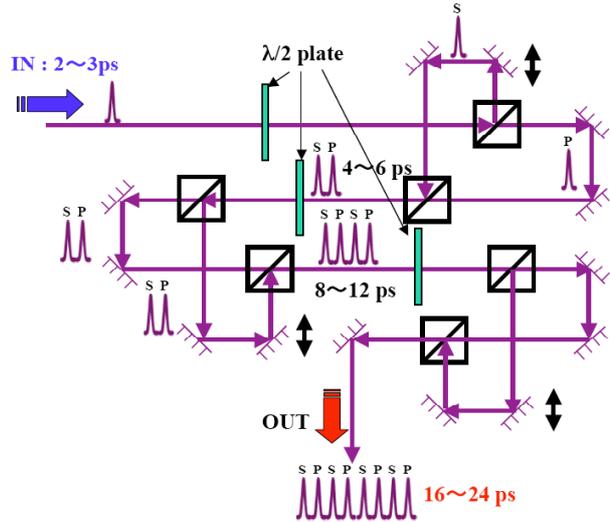


図3：合計3段から成るパルススタッカーの光学系

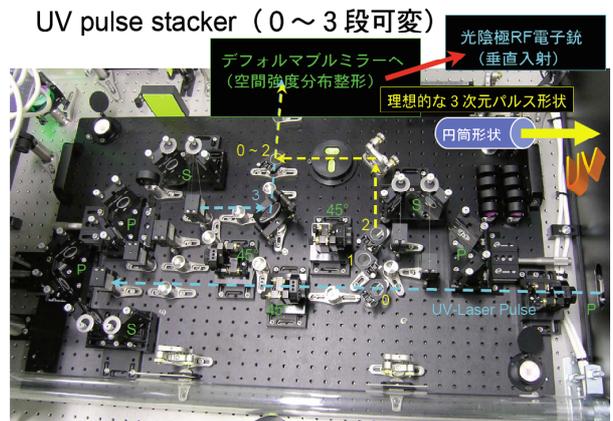


図4：完成した3段パルススタッカーの写真

ただし、パルス形状の安定化にはレーザの位置安定性 (pointing stability) と出力安定性 (power stability) が本質的に要求されるため、次章に述べる高度安定化光源が必要となる。

3. レーザ光源の長期安定度の現状

現在までのパッシブな安定化の結果、テラワットレーザ光源の長期安定度で世界記録を達成している。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。昨年度からUVレーザ光源 (THG) の長期安定度が、オシレータ・レーザ装置のモードロックの安定度のみで決まるレベルに達したため、フェムトレーザ社と協力し、その長期安定化の研究を開始した。現状で無調整の連続運転の記録は4.5ヶ月で、RFとのタイミング調整でモードロックが外れるまで、レーザパルスエネルギーの安定度は0.3%(peak-to-peak)、スペクトルの中心波長 (795 nm) および幅 (FWHM: 36 nm) は変化しなかった。その後現在に至るまでの3ヶ月も調整時以外は安定である。

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2ヶ月の寿命 (妥当な安定度を考慮した場合) 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構築している。フラッシュランプ励起を半導体レーザ励起に置き換え、レーザを全固体化すれば、1年間の連続運転が実現可能である。現状ではレーザ光源全体の最長連続運転時間は2ヶ月である。

4. スタッキングによるパルス整形結果

レーザ3D整形の結果は、空間プロファイル整形およびその最適化制御用の遺伝的アルゴリズムについては、昨年度発表^[2,4]した通りなので、ここでは時間プロファイル整形の結果についてのみ報告する。

4.1 ストリークカメラによる測定結果

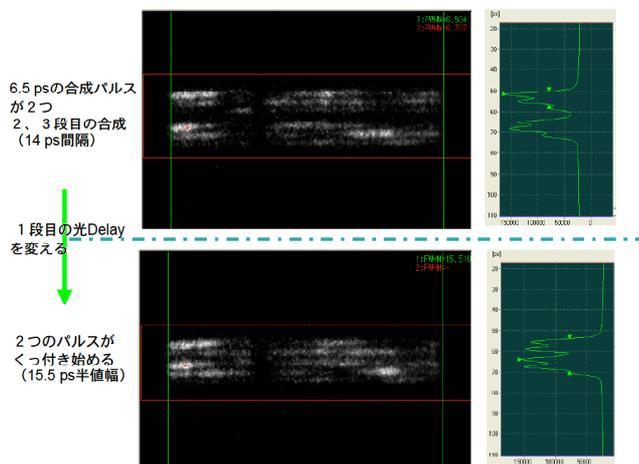


図5: 3段パルススタッカーによる8パルスのスタッキングの状態 (Hamamatsu Fesca200で測定)

3段のパルススタッカーで合計8個パルスをS、P偏光が交互になるように時間軸上に等間隔に重ねた (図5)。伝送光学系媒質中での正分散により各パルスは伸びて理想的に重なり合う。最終的なパルスの重なり状態の確認は電子ビームを計測して行う。

4.2 エネルギー分散部での電子ビームによる確認

レーザ入射位相を意図的に電子ビームのエネルギー拡がりが大きくなるRF位相にし、電子銃下流の偏向電磁石で曲げたところにあるプロファイラとファラデーカップで、各パルスの重なりと個々のパルスのRF位相差をビームエネルギーの位相依存性から計測し、各パルス間の時間差を調整する。



図6: 2段パルススタッカーによるスタッキングの状態 (写真左) (分散部での電子ビームで測定)

5. レーザ整形のまとめと低エミッタンス電子ビームの現状

今回、レーザの空間および時間プロファイルの整形に補償ミラーとパルススタッカーをそれぞれ採用し、互いに干渉せずに独立に整形可能なことを実証した。現状で2段のパルススタッカーによる10psの合成パルスで、電荷量1nC/bunch (26 MeV) の時の水平エミッタンスで $3.05 \pi \text{ mm mrad}$ まで観測された。今後、3段までの合成パルスを20psにして、更なる低エミッタンス化を図る。現状の問題点としてQスキャンのモニタ部に厚さ $50 \mu\text{m}$ のデマルケスト蛍光板を用いているが、滲みによるエミッタンスの見かけの悪化が考えられるので、今後OTRモニタに交換する。また、各レーザパルスが正確に2.5psでない可能性があるため、レーザコンプレッサーを微調しその最適化と検証を行う予定である。

参考文献

- [1] H. Tomizawa, et al., Proc. of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2004) 147.
- [2] H. Tomizawa, et al., Proc. of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2005) 52.
- [3] (株) ルミネックス: <http://www.luminex.co.jp>
- [4] H. Tomizawa, et al., Proc. of the 27th International Free Electron Laser Conference, (2005) 138.