

# S P r i n g - 8 フォトカソード R F 電子銃における 電子ビームの低エミッタンス化

富沢 宏光<sup>1</sup>、出羽 英紀、谷内 努、水野 明彦、安積 隆夫、  
柳田 謙一、鈴木 伸介、小林 利明、花木 博文  
高輝度光科学研究センター 放射光研究所  
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1 (SPring-8)

## 概要

フォトカソード R F 電子銃の実験においてはその紫外レーザー光源の安定性や、空間電荷効果を低減するようなレーザーの空間及び時間プロファイルの整形など、克服すべきレーザーに関する技術的課題が多い。本システムにおけるレーザーの空間プロファイル整形はマイクロレンズ・アレイを用いることで実現した。現在までに本 R F 電子銃試験装置において、そのレーザー光源の安定化と空間プロファイルを円筒状に整形をすることで、安定に低エミッタンス電子ビーム（1バンチ当りの正味電荷量が  $0.1 \text{ nC}$  で、 $2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ ）を実現できるようになった。このときのカソード面上最大電界強度は  $1.35 \text{ MV/m}$  で、電子ビームのエネルギーは  $3.1 \text{ MeV}$  である。ここでは、主にレーザー光源の改善過程と低エミッタンス電子ビーム生成研究の現状を報告する。

## 1. 序論

本研究の目的は自由電子レーザーや逆コンプトン散乱などの X 線光源発生装置が必要とする低エミッタンス短バンチ電子ビームの生成である。その開発の一環として、SPring-8 でのフォトカソード R F 電子銃の研究が 1996 年から開始された<sup>[1]</sup>。我々はこの R F 電子銃からのビームを用い、そのエミッタンスのビーム電荷量依存性を系統的に測定した。本実験はこの電子銃のシステム・パラメータ（R F 位相、カソード面上のレーザーの空間および時間プロファイル、レーザーパルスのエネルギー、カソード表面状態、ソレノイド磁場中心軸とカソード面上のレーザー照射面の中心が電子ビーム加速軸にあるようにするアライメント）をすべて固定して行なった。このようにして生成した電子ビームのエミッタンスはダブル・スリット法を用いて測定した。この方法はいわゆるマルチ・スリット法<sup>[2]</sup>のようなシングル・ショットで測定する方法ではなく、1 時間程度の測定時間を必要とする。このことはダブル・スリット法で測ったエミッタンスはその中にビームのパラメータ変動を含むため、シングル・ショットで測定できる方法で得られる値よりも実際は大きな値が出る。しかし、この電子銃からのビームはマルチ・ショットでの応用が期待されているために、ダブル・スリット法のような長時間測定によるエミッタンスの値が再現性を伴って小さいことが重要である。

<sup>1</sup> E-mail: hiro@spring8.or.jp

本電子銃の研究においては、何よりもレーザー光の質的な改善が重点課題である。特に、レーザーのパルスエネルギーの長期安定化、レーザーの空間および時間プロファイルの改善は必須であるため、これらの改善を中心にレーザーの改造と調整を行ってきた。本レーザーシステムの安定化の結果、1 週間程度は調整なく安定にレーザー光が供給できるようになった。そのため 1 日がかりのダブル・スリット法の測定でも、低エミッタンス電子ビームの測定が可能になった。また、レーザーの空間プロファイルをマイクロレンズ・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  $0.1 \text{ nC}$  において、エミッタンスが  $2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  の電子ビームが安定に得られるようになった。本論文中におけるエミッタンスは、すべて規格化  $r m s$  エミッタンスの意味で用いることにする。

## 2. 実験装置

### 2.1 エミッタンス測定装置

図 1 に本試験装置のエミッタンス測定装置の概略図を示す。本ダブル・スリット・モニターは 2 枚のスリット（幅： $0.3 \text{ mm}$ 、厚さ： $8 \text{ mm}$ ）が  $4.6 \text{ cm}$  の間隔で配置されたものである。ビーム電荷量は本システムの直線部に配置されたファラデーカップで電流値として測定する。このエミッタンス測定装置の分解能は、ビーム・エネルギーが  $3.1 \text{ MeV}$  のとき、 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  である。

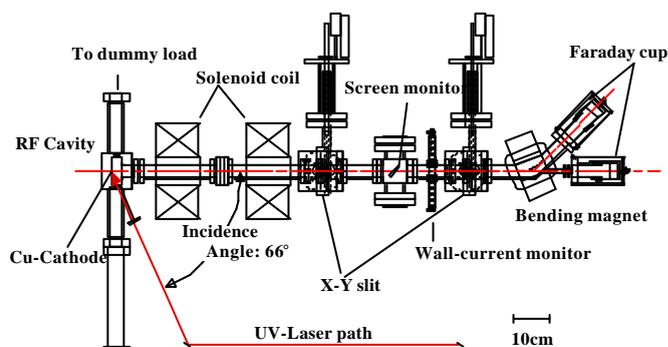


図 1 : R F 電子銃ビーム診断システム

電子ビームのエネルギースペクトルは偏向電磁石で曲げた後のファラデーカップを利用して測定する。

このビーム診断装置で2つのスリットを交互にスキャンすることにより、水平方向( $x, x'$ )または垂直方向( $y, y'$ )の2次元配列データがそれぞれ得られる。この配列データを用いて、規格化rmsエミッタンスの定義式からエミッタンスを算出する。

## 2.2 CPA-Ti:Sa レーザ装置

本RF電子銃のレーザ装置はチャープ・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(20fs)のシード光として用いている。このレーザ装置は中心波長が790nm、スペクトル幅(FWHM)が50nmで発振する。このシード光は繰返し周波数が89.25MHz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の繰返し周波数10Hzに同期させて切り出し、パルスエネルギーが30~60mJまで増幅する。この増幅光を3倍高調波(263nm)にして、長さが総計70cmの合成石英ロッドでそのパルス幅を50fsから5psまで伸ばし、最終的にパルスエネルギーが200~400μJの紫外光源を得る。実用上、レーザのパルスエネルギーの長期安定性が求められるために、再アライメント等の改善を行った。その結果、基本波(790nm)で2%、3倍高調波(263nm)で3%の安定度を1週間程度保てるようになった。

## 2.3 レーザの空間プロファイル整形光学系

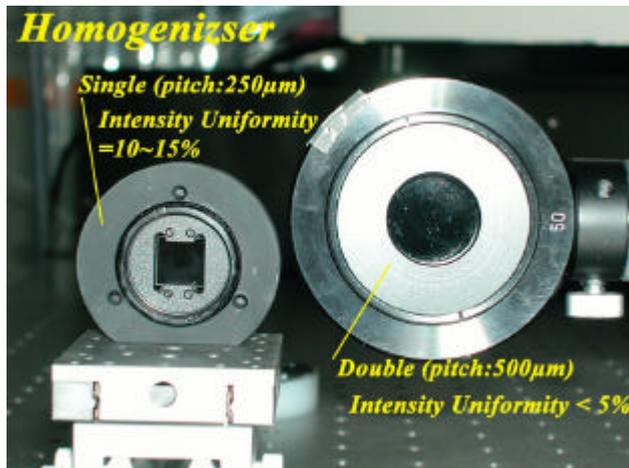


図2: マイクロレンズ・アレイの写真

本レーザ装置からの紫外レーザの鉛直面空間プロファイルは不均一で、低エミッタンス電子ビームを生成するためには不十分なものである。それゆえに、この空間プロファイルを改善するためにマイクロレンズ・アレイをホモジナイザーとして用いた。このマイクロレンズ・アレイは六角形の小さな凸レンズの集合体で、それぞれが250μmの間隔で2次元的に配列された集合体である(図2参照)。このアレイの紫外光(263nm)の透過率は約80%である。このホモジナイザーと凸レンズを任意の間隔

で配置することで、あらゆる不均一なレーザの鉛直面空間プロファイルをシルクハット型(フラットトップで円筒形)にすることができる(図3参照)。このシルクハット型の鉛直面空間プロファイルは、もし十分にレーザパルス幅が長いならば、電子ビームバンチ内に非線形な空間電荷効果を生じさせない理想的なビーム形状である。

## 3. 実験結果

### 3.1 紫外レーザの空間プロファイルが電子ビーム・エミッタンスに及ぼす影響

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シルクハット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0.2nCのときに、3.3から2.3mm·mradに低減された。

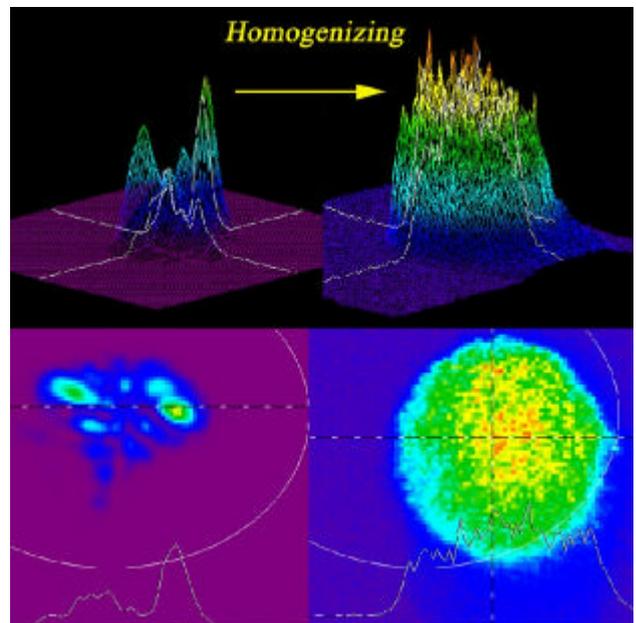


図3: レーザの空間プロファイル改善の結果

### 3.2 レーザパルスの時間プロファイル

図4に紫外レーザパルスの1ショット(図中右下)と100ショット平均(図中右上)した時間プロファイルを示す。この時間プロファイルは最高分解能が200fsのストリークカメラ(浜松ホトニクス社製C6138;FESCA-200)で測定した。この紫外レーザ光のパルス幅(FWHM)は約5psであった。

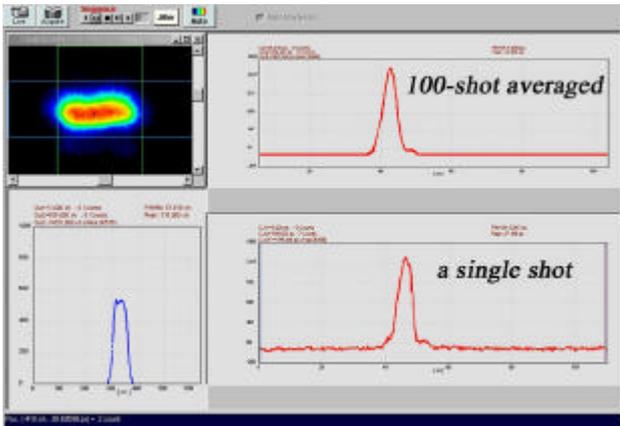


図4：紫外レーザーパルスのストリーク画像

### 3.3 エミッタンスのビーム電荷量依存性

本RF電子銃で、安定に達成された最大のビーム・エネルギーは4.1 MeVで、そのときのカソード表面上の最大電界は175 MV/mであった。このときのRFパルス幅は0.5 μsで、電子ビームの暗電流値は1パルス当たり0.17 nCだった。

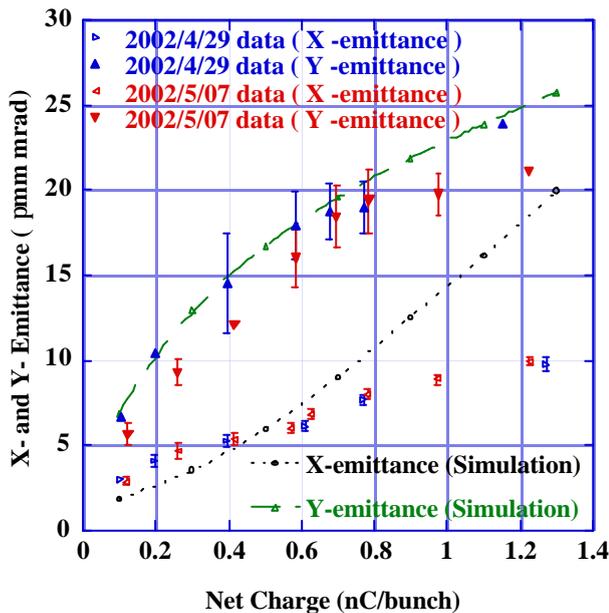


図5：同時計測した水平および垂直エミッタンスのビーム電荷量依存性とその計算値

本節に示すエミッタンス測定実験時に用いたビーム・エネルギーは3.1 MeV、カソード表面上の最大電界は135 MV/m、暗電流値は1パルス当たり0.02 nCであった。このときの量子効率 $\eta$ は約 $5 \times 10^{-5}$ であった。本測定においてレーザーパルス・エネルギー以外のパラメータはすべて一定に保った。カソード面上のレーザースポットの直径（垂直方向）は1.5 mmであった。図5に水平および垂直エミッタンスのビーム電荷量依存性を複数回の測定結果で示す。これらの結果からエミッタンス測定が再現性をもっていることが分かる。各測定点の誤

差棒は、エミッタンス算出時のガウシアン・フィットの妥当性を示したものである。

## 4. 計算結果とまとめ

図5に実験結果とともに示した数値計算の結果から明らかなように、バンチ電荷量が0.8 nC以下では実験結果と一致している。実験および数値計算の結果は、いずれも垂直エミッタンスが水平エミッタンスよりも高い値を示している。これはレーザー入射角度が大きく、カソード面にレーザー波面が同時に到達しないためである。したがって、水平と垂直エミッタンスがともに低くなるためには、カソード面に対して垂直にレーザー光を入射してやればよい。我々が開発した3次元粒子追跡法によるコード<sup>[3]</sup>でそれぞれの最適値を探した。結果として、レーザーパルスが幅20 psでフラットトップ、さらにレーザー入射角が0°のときに、水平および垂直エミッタンスがともに最低値になることが明らかになった。この理想的なレーザーパルス幅(20 ps)と入射角度(0°)の場合と本実験(5 ps; 66°)の場合、それぞれのエミッタンスのビーム電荷量依存性の数値計算の結果を比較して示す。理想的な場合でも水平と垂直なエミッタンスの値が異なるのは、RF空洞のRFポートが水平方向にのみ付いているために、カソード表面上での電場の広がり方が方向によって異なるためである。今後、入射角度0°の光学系、紫外レーザーの時間プロファイルのフラット化とパルス幅拡大のための光学系を導入することで理想的な低エミッタンス電子ビームの生成が期待できる。

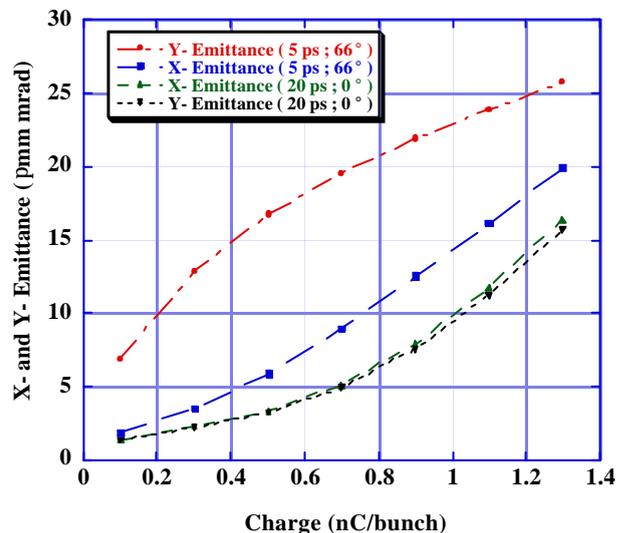


図6：理想的なレーザーパルス幅と入射角度の場合と本実験の場合の数値計算結果の比較

## 参考文献

- [1] T. Taniuchi et al., Proc. of 18th. Int. Free Electron Laser Conf., Vol.2 p.137, Rome, 1996.
- [2] S. G. Anderson et al., Physical review special topics - accelerators and beams, Vol.5 p.014201 2002.
- [3] A. Mizuno et al., "Simulation for an RF gun test apparatus in the Spring-8 Linac", PAC'99, p.2749 New York, April 1999.