

INJECTION LASER EFFECT ON TRANSVERSE EMITTANCE IN A PHOTOCATHODE RF ELECTRON GUN

Ryo Moriyama^{1 A)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Ryunosuke Kuroda^{B)}, Shigeru Kashiwagi^{C)},
Hitoshi Hayano^{D)}, Junji Urakawa^{D)}

^{A)} Advanced Research Institute for Science Engineering, Waseda Univ,
3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568

^{C)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University,
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization,
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

Production of low-emittance electron bunch from a photocathode RF-Gun has been developed in Waseda University. The characteristics of Electron beam is mostly determined by a parameter of UV laser. In this paper, we improve the spot form of UV laser on cathode to generate a lower emittance electron beam. It was done by changing the injection form of UV laser. And then transverse emittance of improved electron beam was measured by double slits scan technique which was developed in this laboratory. As a result of changing the injection form, transverse emittance was reached about $3 \pi \text{ mm mrad}$. This value is about half of previous results.

フォトカソードRF電子銃におけるレーザー入射法改善による低エミッタンス電子ビームの生成

1. はじめに

早稲田大学理工学総合研究センターでは、フォトカソードRF-Gunを中心としたコンパクトな加速器システムを構築し、逆コンプトン散乱による軟X線発生実験^[1]、パルスラジオリシス実験^[2]などの応用実験を行っている。近年、フォトカソードRF-Gunを用いた応用実験の高度化のため、更なる電子ビームの高品質化がもとめられている。そこでフォトカソードRF-gunにおける電子ビームの横方向エミッタンスに着目し、更なる電子ビームの高品質化を目的として研究を行っている。

フォトカソードRF-Gunによる電子ビームは、その機構上UVレーザーの性質が大きく反映される。そこで本研究では、入射UVレーザーの入射方法変えることによってカソード上でのUVレーザーの形を変化させ、電子ビームの低エミッタンス化を試みた。さらに当研究室で開発し、既に報告されているダブル・スリット法^[3]によりそのエミッタンスを測定した。

2. レーザープロファイルの改善

今回の実験では低エミッタンス化のために、UVレーザーの入射条件の改善を行った。これまでの入射法ではUVレーザーをカソードに対して斜めに入射

していた（斜入射）。この入射法だとカソード上でのUVレーザーのプロファイルは楕円になってしまう。そこで今回は以下の2種類の改善された入射法によってカソード上でのUVレーザーのプロファイルが真円になるようにした。1つに、下流ビームライン内に設置されたミラーによってUVレーザーをカソードに対して垂直に入射する方法（垂直入射）、2つ目に入射角は斜入射と同じであるが、UVレーザーのプロファイルをプリズムにより入射前に楕円に整形しておく方法（プロファイル整形）、この二通りの入射法を試みた。（図1参照）以上の従来の斜入射を合わせた3通りのUVレーザー入射条件により電子ビームを生成し、エミッタンスを測定した。

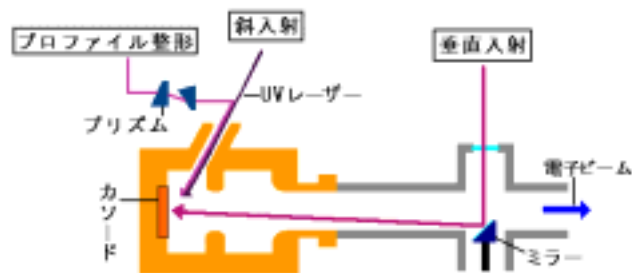


図1：レーザー入射法概要図

¹ E-mail: r_wood331@moegi.waseda.jp

3. ダブル・スリット法によるエミッタンス測定

3.1 フォトカソードRF-Gunにおけるエミッタンス

フォトカソードRF電子銃から生成される電子ビームのエミッタンスは、

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_{th}^2 + \varepsilon_{rf}^2 + \varepsilon_{sc}^2 + E_{external}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで ε_{th} は、熱エミッタンス、 ε_{rf} は加速RFによるエミッタンス、 ε_{sc} は空間電荷効果によるエミッタンスを表している。これらのエミッタンスはそれぞれ簡単に以下のように表すことができる^{[4] [5] [6]}。

$$\varepsilon_{th} \propto R_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_{rf} \propto \sigma_x^2 \sigma_z^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{sc} \propto \frac{Q}{\sigma_z} \frac{\sigma_z}{(3\sigma_x + 5\sigma_z)} \quad (4)$$

ただし、 R_0 はレーザースポットサイズ、 σ_x はビームサイズ、 σ_z はバンチ長、 Q は電荷量を示す。

測定を行う上でまず重要なことは、3種類の入射法の違いによるエミッタンスの変化をみるために各入射法における電子ビームの電荷量を揃えることである。それは空間電荷効果によるエミッタンスが、次式のように電荷量 Q に比例するからである。

$$\varepsilon = \sqrt{aQ^2 + \varepsilon_0^2} \quad (5)$$

ここで a は空間電荷効果によるエミッタンスの強さを示す係数、 ε_0 はその他のエミッタンスであり、熱エミッタンスと加速RFによるエミッタンスの和を表す。

3.2 ダブル・スリット法

エミッタンスの測定法としては、 Q スキャン法が広く用いられているが、早稲田大学の電子ビームのエネルギーは約4.5MeVと低いので空間電荷効果の影響が無視できなくなる。そこで、空間電荷効果による測定誤差の少ないダブル・スリット法を用いた横方向エミッタンス測定システムを使用した。

ダブル・スリットスキャン法とは、ビームライン上に設置されたスリットにより電子ビームを細かく切り取り、その下流で切り取られた電子ビームの電荷量を測定することにより電子ビームの位相空間分布（エミッタンス）を求める方法である。今回の測定では、UVレーザーのスポット形を変えたときの電荷量とエミッタンスの関係を測定した。

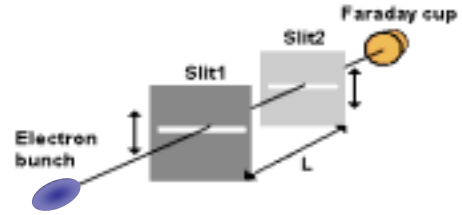


図2：ダブル・スリット法概念図

さらにダブル・スリット法を位相空間分布上で説明する。図3の斜線部分がスリット1で切り取られた部分の電子ビームである。スリット間がドリフトスペースだと仮定すると、スリット1で切り出された電子ビームは、スリット2に輸送される間に位相空間上で横に広がる。さらに、スリット2で細かく小片に分割し、分割した小片の電荷量を測定し、それらを総合してスリット1上での運動量方向の強度分布を再現する。同様の事をスリット1を動かして測定すれば全体のエミッタンス（位相空間分布）が求まる。

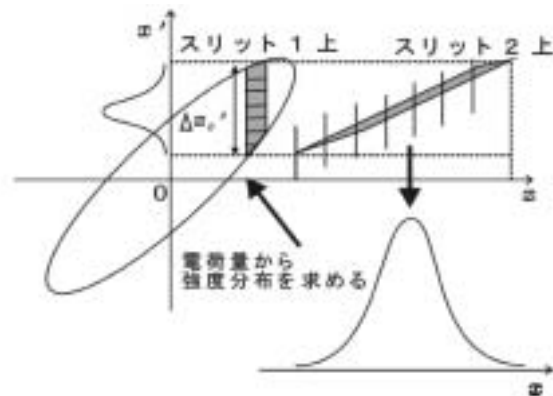


図3：位相空間上におけるダブル・スリット法概念図

3.3 測定条件

通常3種の入射法で同条件のUVレーザーを用いた場合、プロファイル整形や垂直入射ではその機構上UVレーザー強度が斜入射に比べて減少してしまう。この理由から、実際に測定する際は次の様な手順を経て測定を行った。

①3種類の入射法における電子ビームの最大電荷量を約500pCにUVレーザー強度などを調整して揃える。

②その上で入射法ごとに電荷量の等しい、RF位相3点を選び測定を行う（各位相10,20,30 degでの電荷量は約100,200,300 pC）。さらに以上のようにして決めた位相ごとにソレノイド電磁石の電流値を変えてエミッタンスを測定し、最適化を行った。

4. 測定結果

4.1 電荷量測定結果

同条件のUVレーザー（ $165\mu\text{J}$ ）を使用して3種類の入射法におけるUVレーザーの偏光角を変化させた際の電荷量の変化を図4に示す。

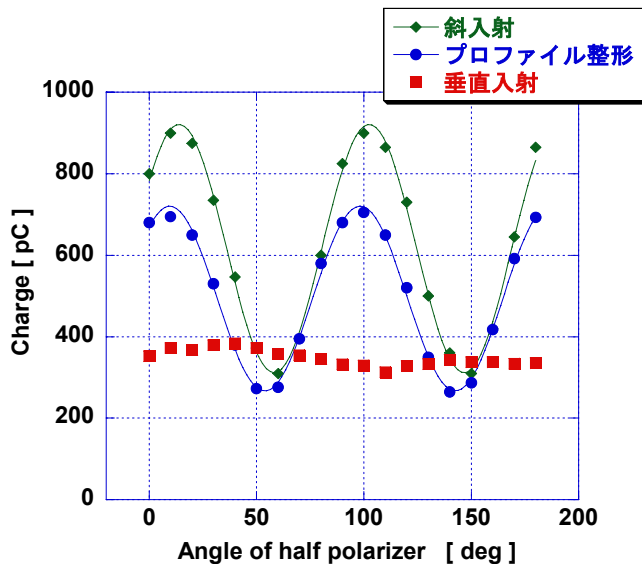


図4：UVレーザーの偏光角に対する電荷量の変化

4.2 エミッタンス測定結果

ダブル・スリット法により得られた各入射法、位相30 degでの最適化された電子ビームの位相空間分布を図5に示す。プロファイル整形、垂直入射は共に斜入射に比べ格段に小さくなっていることがわかる。

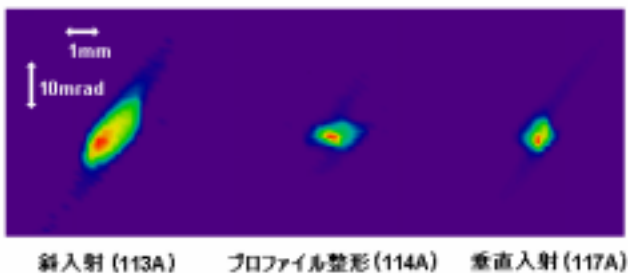


図5：各入射法における位相空間分布（位相30deg）

図5のように測定された位相空間分布より求めたエミッタンス値を図6に示す。

図6から分かる通り、垂直入射、プロファイル整形共にエミッタンスは同程度小さくなった。どの位相においても従来の斜入射に比べて1/2程度のエミッタンスとなった。さらに位相10 deg (100 pC) では $3\pi\text{mm mrad}$ というFEL発信にも利用が可能な世界でも最高水準の電子ビームが得られた。

このように改善されたどちらの入射法でも高品質

電子ビームが生成できた、しかし垂直入射では斜入射と同程度の電荷量を出すためには、UVレーザーの出力を大きくしなければならないことや、コンポネント設置が難しいといった特徴がある。よってプロファイル整形による入射法がより有用であるといえる。

低エミッタンス化に至った要因としては様々なことが考えられるが、主にバンチ長とビームサイズの縮小に伴う加速RFによるエミッタンスが小さくなったことや、バンチ長の縮小によるエナジースプレットの減少などがあげられる。

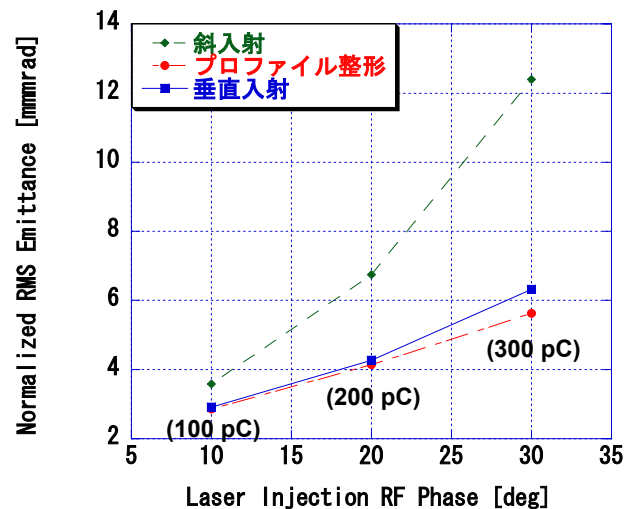


図6：エミッタンス測定結果

5. まとめと今後の予定

UVレーザーの入射法を変えることにより、電子ビームの低エミッタンス化に成功した。又この結果を受けて、プロファイル整形による入射法が非常に有用であることが分かり、この入射法の常設に至った。しかし、今回低エミッタンス化に至った要因についてすべてわかった訳ではない。そのため、今後RF-Gunにおけるエミッタンスの増大について、シミュレーションによる更なる解析を行う必要がある。

参考文献

- [1] S. Minamiguchi, et al., Proceedings of this Meeting 21P104
- [2] T. Kuribayashi, et al., Proceedings of 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Funabashi, 2004, p.383
- [3] N.Kudo, et al., "Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan", Tokai, 2003
- [4] Kwang-Je Kim, Nucl. Inst. Methods A275, 201-218, (1989).
- [5] W. S. Graves et al., Proc. of PAC'01, 2227 (2001)
- [6] J. E. Clendenin, Proc. of LINAC'96, 298-302 (1996). Sitges, June 1996