

CHARACTERISTICS OF PHOTO-ELECTRON EMISSION FROM THE PHOTO-CATHODE RF GUN

Y. Yamazaki^{1A)}, K. Hirano^{B)}, M. Takano^{B)}, M. Fukuda^{B)},
T. Muto^{C)}, S. Araki^{C)}, M. Kuriki^{C)}, N. Terunuma^{C)}, H. Hayano^{C)}, J. Urakawa^{C)}

^{A)} Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)

Ibaraki, 311-1393

^{B)} National Institute of Radiological Sciences (NIRS),

Chiba, 263-8555

^{C)} High Energy Accelerator Research organization (KEK),

Ibaraki, 305-0801

Abstract

A test bench for multi-bunch photo-cathode RF gun has been developed at KEK-ATF for industrial and medical applications in collaboration among JNC, NIRS, and KEK. This RF gun is BNL-gun IV with a load-lock system to install Cs-Te photo-cathode. In this report, dependence on the laser injection phase for emission charge from the RF gun (Phase Plot) was investigated. Phase plot can reveal performance for the RF gun involving the quantum efficiency of the cathode, space charge effect, and laser pulse temporal shape.

フォトカソードRF電子銃における光電子放出特性

1. はじめに

近年RF電子銃は、高輝度電子ビームを得るための装置として開発が進み、LINACの入射部に多く採用されるなど、有用な加速器の構成要素として実用化されている。一方、RF電子銃は単体で、エネルギー数MeVの電子ビームを高輝度に発生できることから、医療や産業への利活用が、多くの研究機関で検討され始めている。KEKは、主にBNLが進めてきたRF電子銃の開発に貢献し、Sバンド1.6セルの加速空洞であるGunIVと呼ばれているRF電子銃を開発した。さらに、加速空洞にCs-Teカソードが使用可能なようにロードロックシステムを装着したフォトカソードRF電子銃を入射器に採用し、1nC以上のマルチバンチビーム（最大20バンチ）の発生に成功している[1]。我々は、この成果を元に、フォトカソードRF電子銃の医療、産業利用を目指したRF電子銃開発のための専用テストベンチを完成させた[2]。現在、バンチあたり3nC程度で100バンチのマルチバンチビームを発生させることに成功し、ビームパフォーマンスを評価している[3]。

フォトカソードRF電子銃において最も基本的なパラメータである引出電荷量は、RF加速位相に対するレーザー入射タイミングにより変化する。このRF電子銃から得られる電荷量のレーザー入射位相依存性（以下Phase Plotと呼ぶ）は、RFによる加速電界強度、レーザーのパルス幅、引き出された電荷による空間電荷効果などの影響を受ける。逆に言えば、Phase PlotはRF電子銃の重要な動作条件に関する情報を含

んでいる。本報告では、このPhase Plotに着目し、そこから得られるRF電子銃に関するパフォーマンスの評価を試みる。

2. RF電子銃の基本的理論

RF電子銃における基本的な理論はKim[4]によって発表され、さらにGao[5]らにより改良された。ここでは、その理論の中でPhase Plotを理解する上で重要となる関係を示す。

加速空洞にRFによって発生する軸上（z軸）の電界強度は定在波を形成し以下のように表される。

$$E_z(z,t) = E_0 \cos(kz) \sin(\omega t + \phi_0) \quad (1)$$

ここでカソード表面を $z=0$ とし、 $t=0$ のとき、レーザーがカソード表面に達するとする。 ω は加速電界の角周波数、 k は波数 $k=2\pi/\lambda$ 、 λ は電界強度の波長、 E_0 カソード表面上の最大加速電界を表す。 ϕ_0 はレーザーがカソード表面に達する時点でのRF初期位相を表す。カソードから射出した電子ビームは、初速がRF位相速度に比べて著しく遅いため、初期位相から位相の後れを生じながら、加速されていき、相対論的ビームに達すると、RF位相速度とともに運動する。そのときのRF位相を ϕ_f とする。 ϕ_f は ϕ_0 の関数になるが、ここでは(2)式であらわされるようなGao[5]が示した関数を採用する。また、1.6cell出口での電子ビームのエネルギー（ γ 形式）も初期位相の関数になり、1.6cellでの加

¹ E-mail: yamazaki@oec.jnc.go.jp

速経路の距離をLとすると(3)式で示される。よって、(3)式を用いれば、カソードの最大電界強度がわかれば、レーザー入射の初期位相により、電子銃出口の運動エネルギーが得られる。ここで、 α は加速電界の強度を表す無次元パラメータである。

$$\phi_f(\phi_0) = \frac{1}{\alpha \sin(\phi_0 + \frac{\sqrt{2\pi}}{6\alpha})} + \phi_0 + \frac{2\pi}{15\alpha} \quad (2)$$

$$\gamma(\phi_0) = 1 + \frac{\alpha}{2} \left(kL \sin(\phi_f) + \frac{1}{2} (\cos(\phi_f) - \cos(\phi_f + 2kL)) \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{eE_0}{m_0 c^2 k} \quad (4)$$

RF電子銃のようにカソード表面で、100MV/m以上の電界強度が印加される場合、引出電荷量は外部電界によるSchottky効果によって、仕事関数の大きさが減少する。この効果を含んだRF電子銃のカソードから得られる電荷量 Q_0 は(5)式のように表される[6]。ただし、初期量子効率（Schottky効果なし） QE_0 、レーザーエネルギー W_L 、レーザー光子のエネルギー $h\nu$ 、 β はfield enhancement factor、 kT_e はeffective thermal energyを表す。

$$Q_0(\phi_0) = e \frac{W_L}{h\nu} QE_0 \exp(\beta \sqrt{E_0 \sin(\phi_0)}) \quad (5)$$

$$QE = Q_0(\phi_0) / \left(e \frac{W_L}{h\nu} \right) \quad (6)$$

$$\beta = \frac{e}{kT_e} \sqrt{\frac{e}{4\pi\epsilon_0}} \quad (7)$$

3. Phase Plotから得られる情報

Phase Plotは、式(5)の関数を実験的に取得したものに他ならない。入射するレーザーパワーを固定して、レーザー入射位相を変化させながら、電子銃からのビーム電荷量を計測していく。その際、RF電子銃から発生した電子ビームを、計測するモニターまですべて輸送することが重要となる。今回、我々が使用したRF電子銃のテストベンチにおいて、ビームを集束させるソレノイドの出口から20cmほど下流にあるICT（CT波形を積分して総電荷量を測定可能）により、発生電荷量を測定している。以下にPhase Plotから得られる注目すべき情報について述べる。

3.1 RF位相に対するレーザー入射位相

Phase Plotの波形から、RF位相に対するレーザー入射位相が決定できる。式(5)から、最大電荷量はレーザー入射位相 ϕ_0 が90度のときである。したがって、90度の点を合理的に決められれば良い。Phase Plotから得られた数値から、 $\ln[QE]$ vs. $\sqrt{E_0 \sin(\phi_0)}$ （以下QE Plotと呼ぶ）をプロッ

トする。QE Plotは、式(5)の関係が支配的であれば、測定結果は直線で現れる。直線に乗るような ϕ_0 軸を選び、電界強度最大の点を90度とした。その直線の傾きから β 、切片から QE_0 が求められる。QE Plotの際、最大電界強度の E_0 は加速空洞性能（Q値、R/Q）、入力RFパワーから求める[3]。

3.2 レーザーパルス幅

(5)式では、レーザー強度分布が ϕ_0 位相に δ 関数的にカソードに照射される場合に相当する。しかし実際には、レーザー強度の時間分布は有限な広がりを持ちガウス分布に近い。したがって、Phase Plotは、(5)式の波形にレーザーの時間強度分布（ガウス分布等）が畳込（convolute）されたものとなる。 ϕ_0 が0度以下、90度以上の波形のスロープにその効果が現れる。QE Plotにおいては、直線の傾きが不連続に変化して現れる。

3.3 RF電子銃の空間電荷制限効果の影響

3.1の過程で求められた β は、カソード表面の状態やカソード近傍でのビームの空間電荷による電界強度の減少が含まれたものとなる。 QE_0 はカソードの外部電界がない場合の量子効率をあらわし、表面の仕事関数の変化が影響する。

4. 試験結果

ここでは2. 3.で議論したPhase Plot波形の試験データ例を示す。特に、レーザーの密度を変化させたデータを取得した。この違いは、空間電荷効果の影響を抽出できることが予想される。試験データは、RF空洞への入力パワー12MWで、計算によるとカソード表面の最大電界強度は112MV/mであった。ビーム条件は20バンチ（2.8nsec間隔）、繰返し12.5ppsであった。使用したレーザー波長はNd:YAGの4倍高調波（266nm）の紫外光である。レーザーの入射角度は、RF電子銃下流にシケインを配置しているため、正面入射が可能である。

レーザー密度を変化させるために、図1に示したように3パターンのレーザー空間分布の条件をつくった。また、バンチあたりのパルスは、別途ストリークカメラで測定して、FWHMで17psecのガウス分布であった。表1に、それぞれのレーザー条件に対する射出最大電荷量の結果をまとめた。

表1 レーザー条件と射出電荷量

	Laser density [MW/cm ²]	20bunches Max. charge [nC@90deg]	Charge density [nC/cm ²]
data			
LS1_L100	33.9	16.9	345.9
LS1_L10	3.4	1.8	37.7
LS2_L100	0.8	23.5	10.8
LS1hp_L100	126.7	43.9	811.6

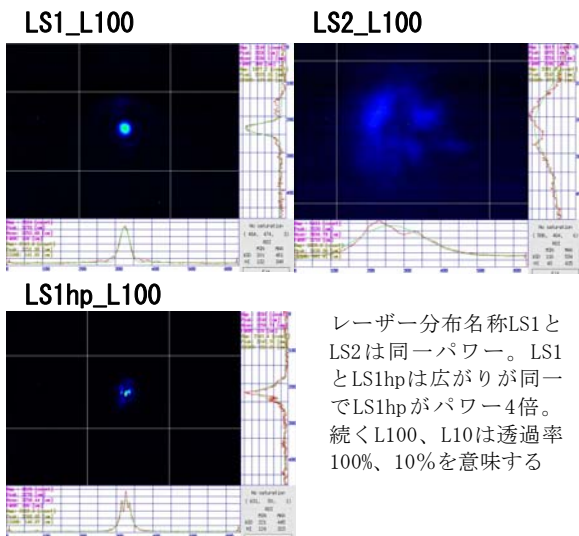


図1 レーザー条件と空間プロファイル

図1に示したそれぞれのレーザー条件で得たPhase Plotの結果をピーク値1で規格化した波形を図2に示す。横軸のPhase値は、Phase Plotから得られるQE Plot (図3) の折り返し点 (90度付近) が直線になるように決定した。今回の条件では(3)式から求められるRF電子銃出口で電子が射出できる位相条件 (カットオフ) は最高130度であるが、実際にはこの付近での運動エネルギーが0に近いので、Phase Plotのカットオフは低位相側にシフトすると考えられる。図中に、実験データに合うカットオフと思われる付近の値、110、120度の波形を重ねた。図2において、理論曲線は式(5)にレーザー時間分布 (FWHM17psec、ガウス分布) を畳み込んで得た。理論曲線はLS1_L100, LS1hp_L100 (空間電荷効果の影響が大きいケース) の波形に近く、空間電荷効果の影響が少ないケースへの一致がよくないことがわかった。図3から得られる β は、LS2_L100, LS1_L10 (空間電荷効果の影響が低いケース) ではほぼ一致し、空間電荷効果が高い場合には小さくなる。 QE_0 は個々で一致していない。

参考文献

- [1] M. Kuriki et al., ATF-04-04(2004)
- [2] K. Hirano et al., EPAC2004.
- [3] K. Hirano et al., in this meeting.
- [4] K. J. Kim, Nucl. Instr. And Meth., A275(1989)201-218.
- [5] J. Gao, KEK-ATF-04-01(2004)
- [6] J. E. Clendenin et al., SLAC-PUB-7760(1998)

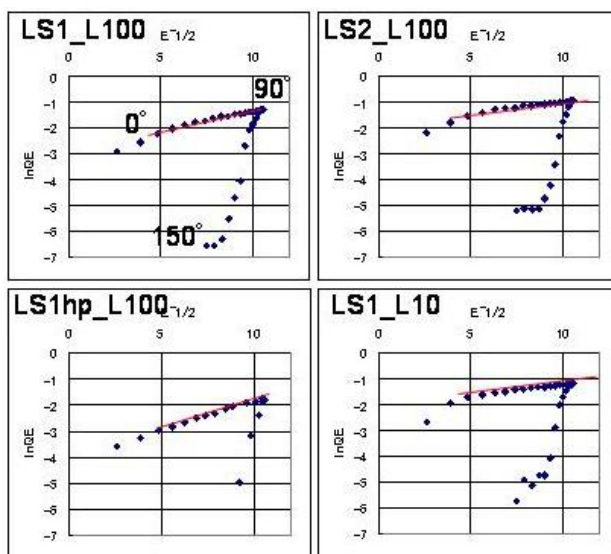


図3 各条件でのQE Plot ($E \equiv E_0 \sin(\phi_0)$)
(赤線の付近での直線フィットから
 QE_0 、 β が求められる)

表2 β 、 QE_0 の解析結果

	LS1_L100	LS2_L100	LS1_L10	LS1hp_L100
β	0.121	0.073	0.072	0.186
QE_0	0.074	0.173	0.139	0.023

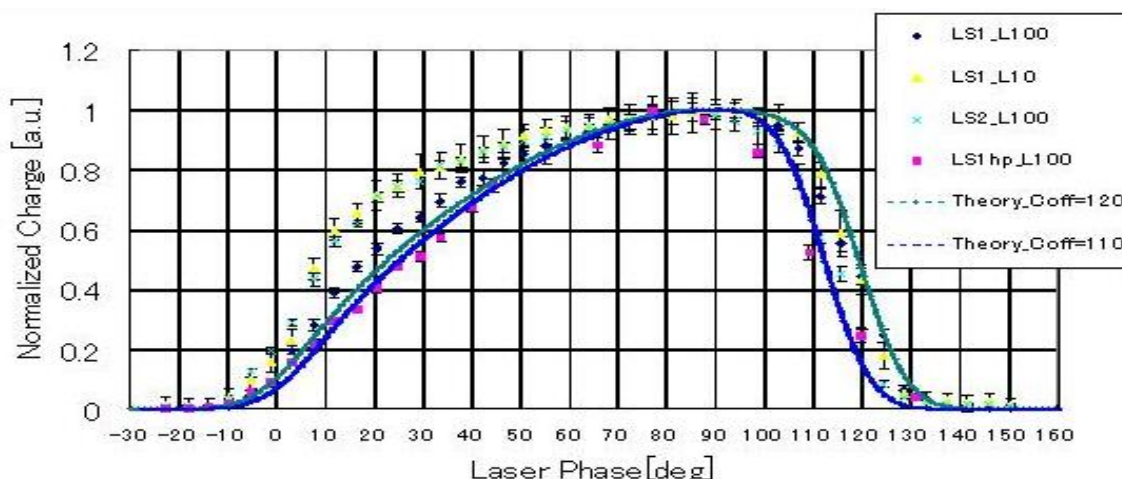


図2 各条件でのPhase Plot (ピーク値が1になるように規格化)