

PIC SIMULATIONS ON AN RF GUN WITH A PHOTOCATHODE

Takashi Inamasu, Kiyoshi Yoshikawa, Masami Ohnishi, Yasushi Yamamoto,
Hisayuki Toku, Kai Masuda, Masaaki Sobajima, and Jiro Kitagaki

Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto 611, Japan

Abstract

Electron trajectories in an RF gun were calculated by a 2-D simulation code newly developed with full Maxwellian equations with space charge-effects taken into account self-consistently, to evaluate short pulse electron beam characteristics for FEL application. Especially, the beam emittance evolution was evaluated and, to reduce emittance growth, we carried out several ways for improvements.

光陰極型 RFgun の粒子シミュレーション

1. はじめに

高周波電子銃 (RFgun) は、静電場電子銃に比べて、はるかに高い電界 (100MV/m 以上) を印加することができるため、空間電荷力の働く低エネルギー状態にある時間を短くでき、低エミッタンスの大電流ビームを得るのに有利であり、また非常に小型化できる。しかし、熱陰極型 RFgun の問題点として、RF 電界による陰極への電子ビームの逆加速や、ビームエネルギーの広がりが挙げられる。

一方、光陰極型 RFgun は加速効率の良い位相時にレーザを陰極に照射し、短パルスで高電荷にバンチングされた電子ビームを得ることができるため、熱陰極型 RFgun 固有の問題点を解決することが可能である。本研究では、光陰極型 RFgun の短パルス高電荷の電子ビーム特性を計算機シミュレーションにより詳細に解析し、その特徴からより高輝度な電子ビーム生成のための探索を行った。

2. RFgun パラメーター

本シミュレーションには AET 社により開発された 4.5 セルの S バンド熱陰極型 RFgun¹⁾ を光陰極型に転用したもの、および SLAC 等で研究されている 1.6 セルの RFgun²⁾ の 2 つを用いた。ビームパラメーターは表 1 に示す。RFgun の電子軌道の解析には、研究室で新しく開発した二次元のクライストロンコードを移植して用いた^{3), 4)}。このコードでは空間電荷効果を含めて、すべての Maxwell 方程式を用いて解いている。

表 1 計算に用いた RFgun のパラメーター

	4.5セルRFgun	1.6セルRFgun
バンチ電荷	1nC	1nC
スポットサイズ	3mm	1mm
バンチ長	2ps	5ps
径、軸方向分布	flat top	flat top
レーザ入射位相	10度	45度
カソード表面電界	20MV/m	120MV/m
初期エミッタンス	0πmm•mrad	0πmm•mrad

3. 電子ビーム特性

図 1(a)に 4.5 セル RFGun 内の電子のスナップショットを示す。gun 出口での規格化 rms エミッタンスは $13.3\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ となり、電子ビームの gun 出口でのバンチ長は初期入射時間の 2.0ps に対して 10.7ps に広がる事が分かった。レーザ入射位相が 0 度のときのエミッタンスは $14.4\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ と大きく、入射位相が 20 度のときはビームエネルギーが 5%ほど落ちて加速効率が悪くなる事が判明した。図 1(b),(c)に磁場を印加したときのスナップショットと軸上の磁場形状を示した。このとき規格化 rms エミッタンスは $11.0\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ まで減少した。図 1(a)と(b)の磁場印加していない場合と、した場合とのエミッタンスの軸方向変化を図 2 に示す。図 2 より、磁場印加のない場合は空洞のノーズ部分でエミッタンスが大きくなっている事が分かる。これは、空洞のノーズ部分で半径方向の電界が半径に対して比例にならないためである(図 3)。磁場を印加した場合には粒子が磁場により半径方向 2mm 以内に収束され、半径方向電界の非線形性を受けないため、第 2 空洞以下ではエミッタンス変化が小さくなっている。しかし、短波長の自由電子レーザの発振には $1\text{--}3\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ の規格化 rms エミッタンスが要求されており、磁場印加した場合でもその要求を満たすことはできない。このような低エミッタンスビームを得るには、陰極付近でさらにエミッタンスを減らす必要がある。

そこでまず、ピアス型の陰極部の角度を大きくし、さらには取り除いてフラットにした(図 4 参照)。その結果、角度を大きくした場合のエミッタンスは $5.03\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ (磁場印加したとき $4.77\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$) となり、取り除いたときのエミッタンスはそれぞれ $3.79\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ ($1.61\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$) となり大幅にエミッタンスが改善された。

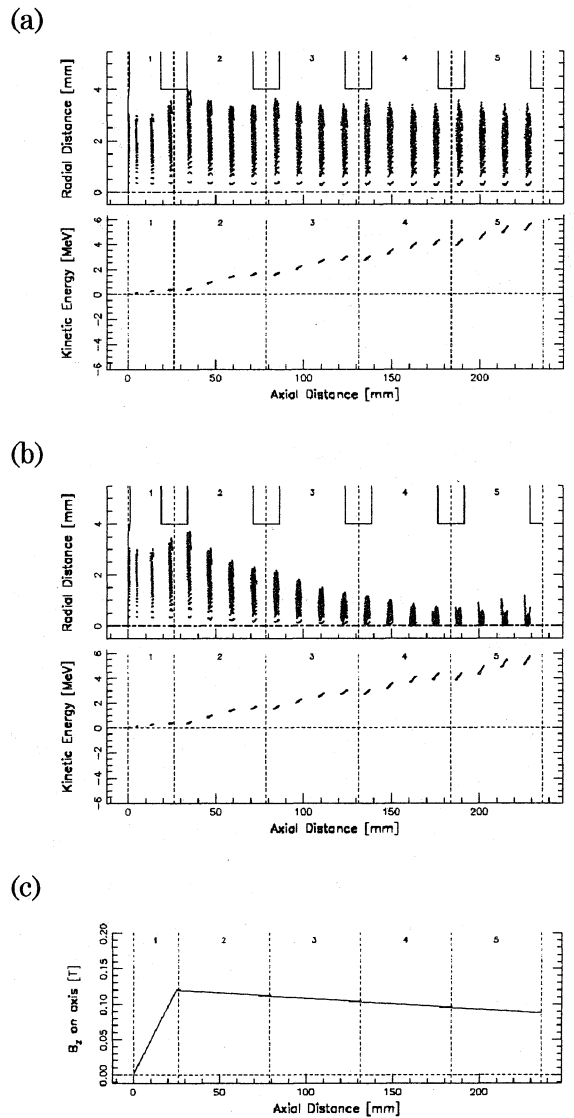


図 1 4.5セル RFGun のスナップショット図
(a)磁場印加なし(b)磁場印加あり(c)軸上磁場形状

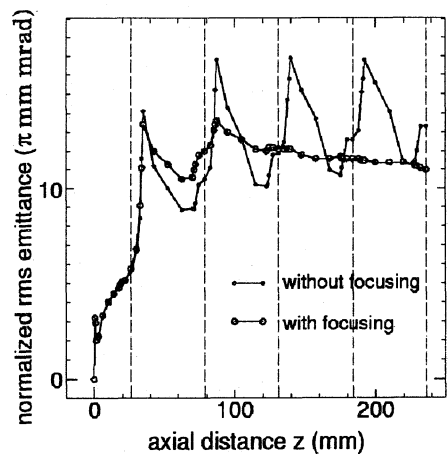


図 2 4.5セル RFGun のエミッタンス変化

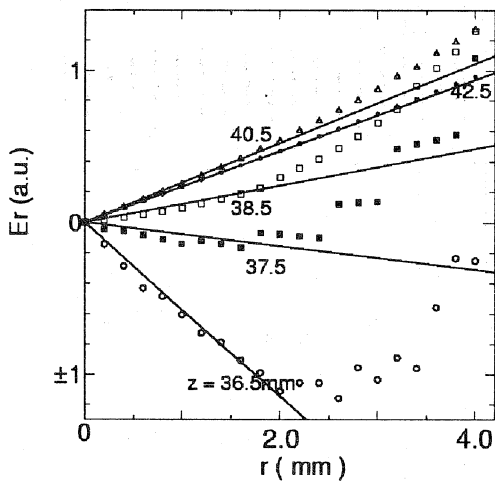


図3 4.5セルRFgunの空洞ノーズ部における半径方向電界

この4.5セルRFgunは、熱陰極型として開発されたため光陰極型としては次の2つの不利な点があると考えられる。1つは、熱絶縁のための溝のエッジ部やピアス型の陰極部のために半径方向電界の非線形性が生じること(図4)。2つめは、入射位相0度から10度に入射された電子の加速効率をよくするように設計されているため陰極付近での加速RF電界が小さいことである。

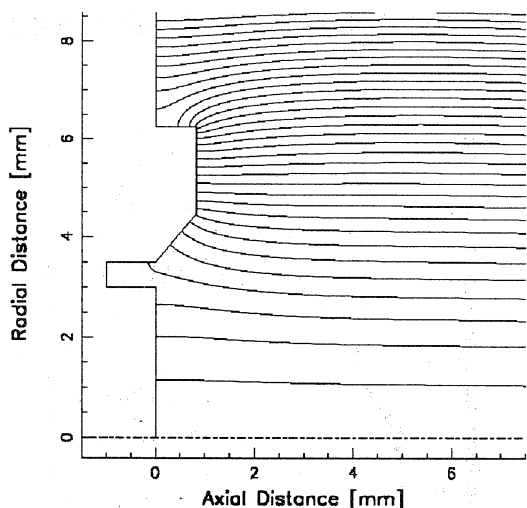


図4 4.5セルRFgunの陰極形状および陰極周辺での電気力線

次に、SLACなどで用いられている1.6セルのRFgunを本研究室のコードにより解析した結果を示す。このRFgunでは陰極付近の電界が120MV/m以上と4.5セルRFgunの6倍の強さを持ち、また入射位相も45度付近で最もよい効率になるため、陰極付近で高電界を受けることができる。解析の結果、gunの出口での規格化rmsエミッタンスは $3.36\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ となり、またバンチ長も初期入射時間の5.0psに対して5.8psに抑えられ、空間電荷効果による広がりが少ないことが分かった。

4. まとめ

光陰極型RFgunにおける短パルス高電荷の電子ビームでは、空間電荷効果が非常に大きい。そのため特に陰極付近で、できる限り高電界により加速する事が必要であり、それによってより低エミッタンスで短バンチの電子ビームを得ることができる。

空洞のノーズ付近など半径方向電界が半径に対して非線形になる場所でエミッタンスが増大する。これを防ぐため、磁場印加により、電界の非線形性を受けない程度まで半径方向に収束させることが有効である。

熱陰極型RFgunを光陰極型として用いるには、陰極周辺で高電界を印可できないこと、および陰極部の形状が問題となる。

以上の結果を踏まえることで、光陰極型RFgunによって、より高輝度な電子ビームを生成することが可能であろう。

参考文献

- 1) 稲増崇, et al. Proceedings of the 21st Linear Accelerator meeting in Japan, 71
- 2) D.T. Palmer, et al. In Proc. 1995 IEEE Particle Accel. Conf. 2432 (IEEE, 1996)
- 3) 増田開、京都大学修士論文(1995)
- 4) 稲増崇、京都大学卒業論文(1996)