

Particle Simulation of Thermionic RF Gun with Triode Structure

Koichi Kusukame, Toshio Fukui, Yoko Nakai, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki,
Tetsuo Yamazaki, Kiyoshi Yoshikawa
Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

Thermionic RF guns show advantageous features compared with photocathode ones such as easy operation and much higher repetition rate of micropulses, both of which are suitable for their application to high average power FELs. They however suffer from the back-bombardment effect, i.e., in conventional RF guns, electrons are extracted from cathode also in the latter half of accelerating phase and tend to back-stream to hit the cathode, and as a result the macropulse duration is limited down to several micro sec. Against this adverse effect in thermionic RF guns, introduction of the triode structure has been proposed, where the accelerating phase and amplitude nearby the cathode can be controlled regardless of the phase of the first accelerating cell in the conventional RF gun. Our one-dimensional particle simulation results predict that the back-bombardment power can be reduced by 99 % only with 30-40 kW RF power fed to the grid in the present triode structure with an optimal phase difference from the RF induced in the main accelerating cavities. We also carried out two-dimensional particle simulations to evaluate emittance of the refined RF gun.

三極管構造を用いた熱陰極型高周波電子銃における粒子軌道計算

1. はじめに

自由電子レーザー (FEL) の高性能化には電子ビームの高輝度化が必要不可欠であり、電子ビームの輝度には電子銃の性能が大きく関係する。高輝度化を目指して開発された高周波電子銃の一つに、コンパクトで経済的な電子源として、熱陰極を用いたものがある。しかし、熱陰極高周波電子銃では、陰極から引き出された一部の加速電子が減速電界の影響を受け、陰極に衝突するback-bombardment現象^[1]が起こる。これは高輝度化の大きな妨げとなる。

そこで本研究では、熱陰極型高周波電子銃に三極管構造^[2]を用いて、back-bombardment現象の効果を軽減し、高輝度電子ビームを生成する方法について、粒子シミュレーションによって検討した。

2. 三極管構造

本研究では、三極管構造によるback-bombardment現象の軽減効果を調べるため、4.5空洞の熱陰極型高周波電子銃にて、我々が用いている従来型と三極管型を比較した。

図1は従来型の4.5空洞の熱陰極型高周波電子銃の模式図である。三極管型高周波電子銃では、従来型の陰極が挿入されている部分に新たな共振空洞を作り、三極管構造とした。

図2では従来型の熱陰極型高周波電子銃(a)と、三極管構造を用いた改良型(b)の陰極付近の構造を示す。

三極管型では1st cellと陰極表面の間にグリッドを

設置し、新たな共振空洞を設けた。陰極-グリッド間に新たに高周波電界を誘起することで、加速空洞の加速位相と独立して、陰極表面の加速位相を制御することが可能になる。これにより、陰極表面から電子が引き出される位相を調節することで、1st cell以降での逆流電子を減らし、back-bombardment現象による影響を軽減することが期待できる。

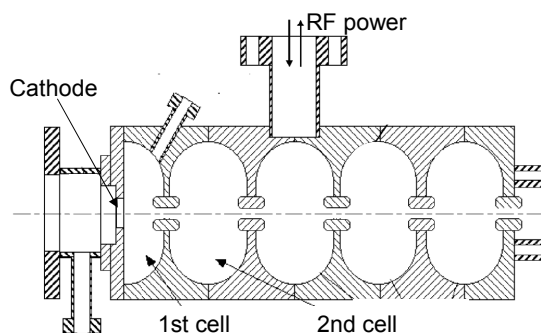


図1：4.5空洞の熱陰極型高周波電子銃

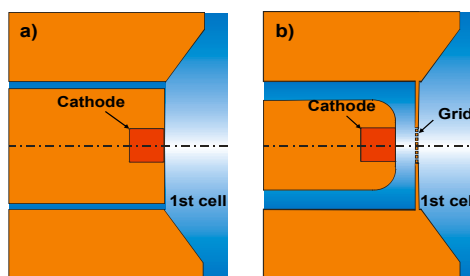


図2：陰極付近の構造 a)従来型では陰極が加速空洞に露出 b)三極管構造ではグリッドの右側と左側の高周波電界に位相差を作る。

3. 粒子シミュレーション手法

本研究では、三極管構造を用いた高周波電子銃の有効性を、粒子シミュレーションによって検討した。初めに、今回用いた解析コードについて説明する。

まず、KUEMS^[3]にて電子銃内に立つ軸対称固有モードを求め、その軸上の電界振幅を使って、陰極より引き出された電子の軸上での位置の時間変化を計算する（一次元粒子軌道解析）。この一次元コードを用いて、陰極-グリッド間の距離、電界強度、加速空洞の高周波電界との位相差を変えて、電子位置の時間変化を計算した。その結果から、生成ビームのピーク電流、back-bombardmentのパワーとエネルギースペクトルを計算した。ここでは空間電荷効果は無視した。

次にこれによりback-bombardmentパワーが小さく抑えられる条件を求めた。その条件で、電子ビームの半径 r 方向の電子の動きも考慮した二次元粒子軌道解析コードKUBLAI^[3]を用いて計算を行った。KUBLAIでは空間電荷効果も考慮に入れて計算した。

4. 結果

4.1 一次元粒子軌道解析結果

図3は、陰極-グリッド間距離を1mm、電界強度を45MV/mとした場合の位相差と生成ビームのピーク電流、back-bombardmentパワーの関係を示した図である。図3より位相差を $0.8\pi\text{rad}$ から 1.3π (-0.7π) radとした場合に、従来型と比べてback-bombardmentのパワーが非常に小さくなることがわかる。最もパワーが小さくなるのは、位相差を 1.27π (-0.73π) radとした場合で、従来型に比べて0.5%となり、最大でback-bombardmentのパワーを99.5%軽減できると期待される。

また、このときピーク電流も従来型の2.5倍程度の値が得られており、生成ビームの短パンチ化も期待される。

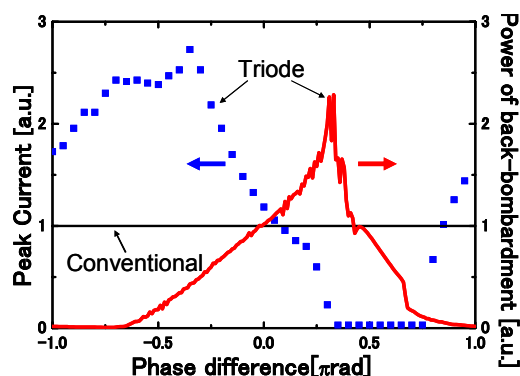


図3：グリッド左右の高周波電界の位相差による、ピーク電流とback-bombardmentパワーの変化。従来型での値で規格化した。(1.5Aと高周波一周期(0.35ns)あたり2.29nJ)

電子位置の時間変化について、従来型の場合を図4、三極管型の場合を図5に示した。図4と図5 a), b)を比較して従来型に見られた逆流電子が三極管型では大幅に減少していることが確認された。

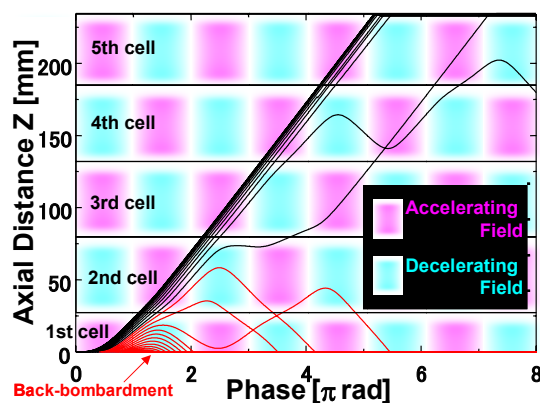


図4：従来型の電子銃のビーム位置と時間変化に関する計算結果。(Z=0を陰極表面とする)逆流電子が陰極に衝突するback-bombardment現象が確認される。

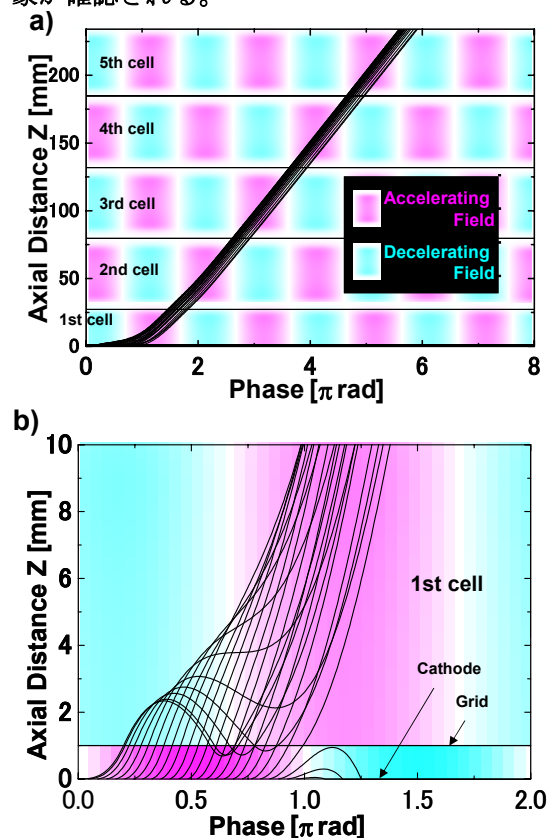


図5：a)三極管型電子銃のビーム位置と時間変化に関する計算結果。b)陰極付近の拡大図。back-bombardment現象の軽減を確認。

さらに、陰極に衝突する逆流電子のエネルギースペクトルを図6に示した。これより、数 μs のマクロパルス内で、陰極表面の温度上昇に非常に大きな影響を与える低エネルギーの逆流電子^[4]についても、三極管型によって軽減できることがわかる。

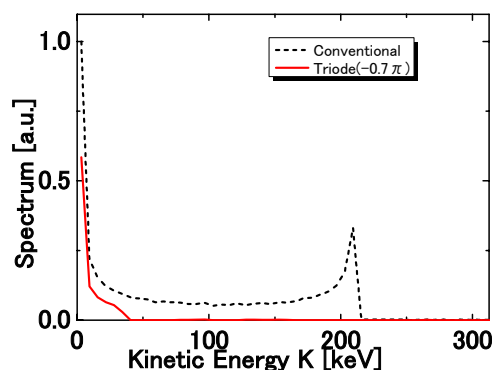


図6：陰極衝突電子のエネルギースペクトル

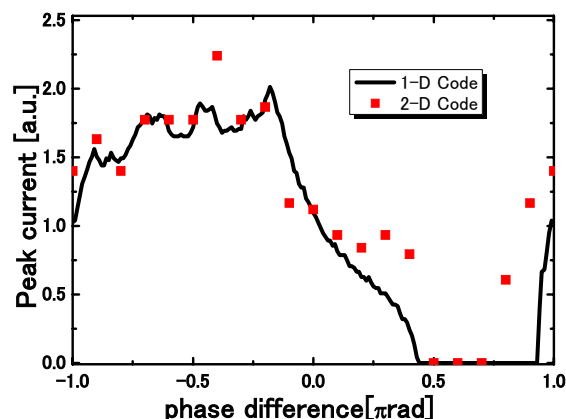


図8：1st cell出口でのピーク電流の比較。
従来型の値で規格化。(1.8A)

4.2 二次元粒子軌道解析結果

一次元粒子軌道計算の結果を受けて、back-bombardmentのパワーを小さく抑えられる条件において二次元粒子軌道計算を行った。図7は従来型と三極管型の二次元粒子軌道計算の結果である。これより、back-bombardmentの軽減、ビームの短パンチ化が確認でき、ビーム径が大きくなっていることも分かった。また、図7a), b)は1st cellの高周波電界に対して、同じ位相でのスナップショットであり、三極管型では従来型に比べてビームの位置が進んでいることがわかる。

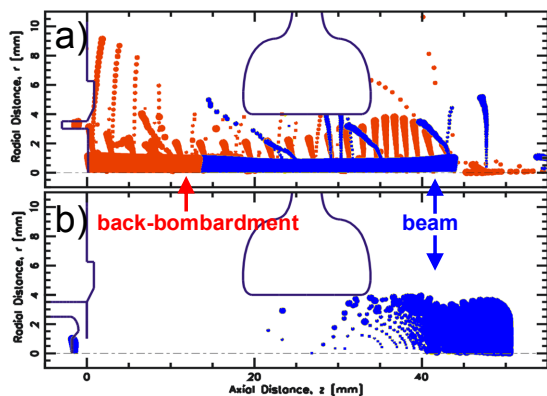


図7：KUBLAI計算結果(スナップショット)

a)従来型 b)三極管型

また、back-bombardmentパワーについては、陰極表面電流密度を $30\text{A}/\text{cm}^2$ とした場合、高周波電界の一周期(0.35ns)で、従来型が116.8nJとなるのに対して、三極管型では0.4nJとなり、これはback-bombardmentパワーを99.6%以上軽減できることになる。つまり、一次元粒子軌道計算と同様に、back-bombardment現象の軽減が期待できる結果となった。ここで一次元解析の結果よりback-bombardmentパワーが小さいのは、一次元解析では半径方向の粒子の動きを考えていないため、本来陰極の周りの壁に衝突している電子も、陰極に衝突したものとして計算しているためだと考えられる。

ビームのピーク電流についても1st cell出口で調べたところ、図8のように一次元での結果にほぼ一

致した。ここで電子銃出口ではなく、1st cellの出口で比較したのは、三極管型では図7から分かるように、ビームの広がりが大きく、電子銃壁で電子の損失があり、電子銃出口では評価できないためである。

二次元解析ではエミッタンスの計算も行ったが、電子銃出口で $20\pi\text{mmrad}$ と非常に大きいことが分かった。原因は、1st cell入り口付近で、電子が停滞している時間があり、その間に空間電荷力を受けることと、ビームが加速最適位相より進んでいることだと考えられる。低エミッタンス化を目指した三極管構造の最適化が必要である。

5. まとめと今後の課題

本研究では、熱陰極型高周波電子銃に三極管構造を用いて、back-bombardment現象の効果を軽減し、ビームエネルギーを一定に維持する方法の有効性を検討した。

粒子軌道解析の計算結果から、三極管構造を用いることにより、back-bombardmentパワーを従来型の0.35% (一周期あたり0.4nJ)程度に軽減できる結果を得た。

今後は、生成電子ビームの高輝度化、低エミッタンス化とback-bombardment現象の軽減を同時に達成するため、三極管構造の最適化が必要である。

また、back-bombardmentの陰極表面温度上昇への寄与は、逆流電子のエネルギー分布によるため、エネルギースペクトルを考慮した陰極温度上昇への寄与を評価することが必要である。

6. 参考文献

- [1] T.Kii et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 507 (2003) 340-344
- [2] E. Tanabe et al., Proc. of 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug 7-9, 2002, Kyoto, Japan (in Japanese).57
- [3] K.Masuda, "Development of Numerical Simulation Codes and Application to Klystron Efficiency Enhancement", a dissertation of Ph.D. Kyoto University
- [4] K.Yamane et al., Proc. of 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Aug 7-9, 2002, Kyoto, Japan (in Japanese).163