

Production of electron beam with constant energy by controlling input power into a thermionic RF gun

Ohkawachi Norihito, Satoshi Sasaki, Takumi Shiizama, Masatsugu Nakano, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki, Kiyoshi Yoshikawa, Tetsuo Yamazaki
Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

Although a thermionic RF gun is compact and economic, it is difficult to produce electron beam of pulse width longer than a few μsec with constant energy owing to inherent back-bombardment effect. In this work we tried to keep beam energy constant in macro pulse duration by feeding modulated RF power. We also tried to perform transient analysis with equivalent circuit taking into account the back-bombardment effect in macro pulse duration. We found that the degradation of the peak energy of the beam could be kept below 100 keV in the macro pulse duration of $8\mu\text{sec}$.

熱陰極型RF電子銃への入射電力制御による一定エネルギー電子ビーム生成

1. はじめに

自由電子レーザー (FEL) を発振するには、高品質な電子ビームの発生源が必要とされる。装置の小型化、経済性、簡易さを考慮した場合には熱陰極型RF電子銃の利用が理想的であるが、高周波電力の逆位相で逆加速された電子が陰極に衝突するback-bombardment現象が起き、電子ビームの質が悪化するという問題点がある。

我々はこれまで熱陰極型RF電子銃の性能改善についての研究を行ってきた[1,2]。本研究では、back-bombardment現象による電子ビームの品質低下を、電子銃に入射する高周波電力波形を制御することにより軽減する実験を行い、この手法が効果的であることを確認した。また、その効果を裏付けるために、back-bombardment現象を考慮に入れた電子銃内での過渡現象の解析も行った。

2. 実験装置および測定系

本実験で用いた実験装置および測定系の概略図を図1に示す。陰極には半径3 mmの多孔質タングステンの合浸カソードを用いている。高周波電力波形の制御は、クライストロンに直流パルス電力を供給する、高圧パルス形成装置の内部可変リアクトルを遠隔で調節し、回路定数を変化させて電力増幅率を変えることにより行った。

実験は、陰極からの引き出し電流量、および入射高周波電力を変えながら、高周波電力波形制御を行う場合と行わない場合に分けて行った。

電子ビームの特性は装置中の各所に取り付けられたcurrent transformer(CT)、Faraday cup(FC)によって測定した。また、電子ビームのエネルギースペクトルの分析は、偏向電磁石とスリット、その後のCTによって行った。

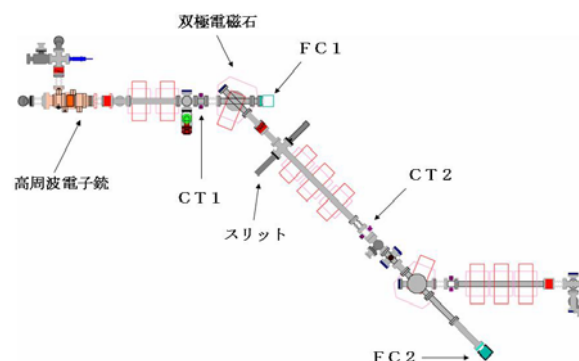


図1：実験装置および測定系

3. 実験結果

電子銃への入射高周波電力波形を制御することによって、マクロパルス後半では低下していた電子ビームのピークエネルギーを4 μsec にわたって一定にすることに成功した。図2に制御前後の入射電力波形を示す。ここで、入射電力は制御前が7.74 MW、制御後が7.79 MWであり、引き出し電流量は共に220 mAである。また、図3にCT2でのピークエネルギー8.6 MeVをもつ電子のビーム電流波形を、図4にマクロパルス内でのピークエネルギーの時間変化を示す。

図3より、高周波電力波形制御がマクロパルス長および電流量の増加に効果的な手段であることが分かった。図4においては、マクロパルス後半で低下していたエネルギーが、入射高周波電力波形の制御により一定に維持されていることが確認でき、ビームエネルギー低下を高周波電力で補償することが有効であることが確認された。

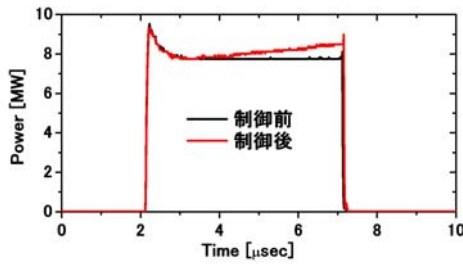


図2：制御前後の入射電力波形

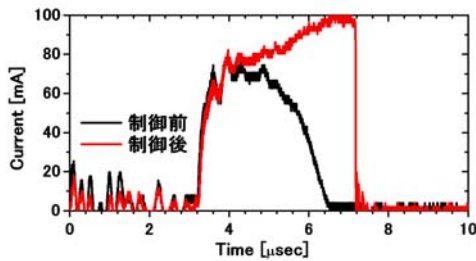


図3：CT2でのビーム電流波形

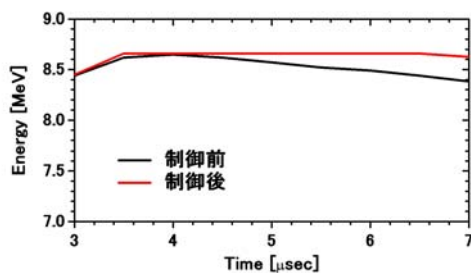


図4：ピークエネルギーの時間変化

4. 解析方法

4.1 解析の概要

Back-bombardment現象の影響は、電子銃内の空洞電圧と陰極表面電流密度により異なる。そこで、本研究では、空洞電圧と陰極表面電流密度の変化に伴うビームローディングの変化を考慮し、等価回路モデルを用いて電子銃内の電力過渡解析を行った。このとき、逆流電子の陰極内での阻止能を考慮しながら陰極内の熱の移動を計算して求めた陰極表面電流密度と、空洞電圧より、ビームローディングを計算している。

4.2 陰極表面電流密度の解析

まず、シミュレーションPARMELA[3]を用いて、電子銃内の空洞電圧と陰極からの引き出し電流から各エネルギーでの逆流電子の個数を計算して、データベース化しておく。この結果を用いてそれぞれのエネルギーの逆流電子が陰極内部に与える熱量を計算する。このとき、陰極を2000枚の非常に薄いディスクとして考えて計算している。

ここで、逆流電子が陰極の温度上昇に与える影響を解析するため、飛程Rに関する半経験式であるTIOの式[4]を用いた。この式においては、陰極内の

電子のstragglingの効果が考慮されている。このTIOの式を以下に示す。

$$R = \frac{a_1}{\rho} \left\{ \frac{\ln[1+a_2(\gamma-1)]}{a_2} - \frac{a_3(\gamma-1)}{1+a_4(\gamma-1)a_5} \right\} \quad (1)$$

$$a_1 = 2.335A/Z^{1.209} \quad a_2 = 1.78 \times 10^{-4} Z$$

$$a_3 = 0.9891 - (3.01 \times 10^{-4} Z)$$

$$a_4 = 1.468 - (1.180 \times 10^{-2} Z)$$

$$a_5 = 1.232/Z^{0.109} \quad \gamma = (E + m_0c^2)/m_0c^2$$

ただしRは飛程(m)、 ρ は吸収体の密度(kg/m³)、Aは吸収体の質量数、Zは吸収体の原子番号、Eは電子の運動エネルギー(MeV)を表す。

(1)式を用いて、陰極表面からの深さと単位深さあたりに失うエネルギーとの関係性を求めた。ここで、陰極をタングステンとみなし、物性値として $\rho=19000 \text{ kg/m}^3$ 、 $A=183.85$ 、 $Z=74$ を使用した。こうして求められたエネルギーにより陰極の各スライスにおける温度上昇を計算した後、(2)式に示す一次元熱伝導方程式を用いて陰極温度の時間発展を求めた。熱伝導のモデルを図5に示す。ここで、(2)式においてcは比熱容量、 ρ は陰極の密度、Vは陰極の体積、Tは温度、 λ は熱伝導率、tは時間、zは陰極表面からの距離、 $Q_b(z,t)$ は逆流電子が陰極に与える熱量をあらわす。

$$c\rho V \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_b(z,t) \quad (2)$$

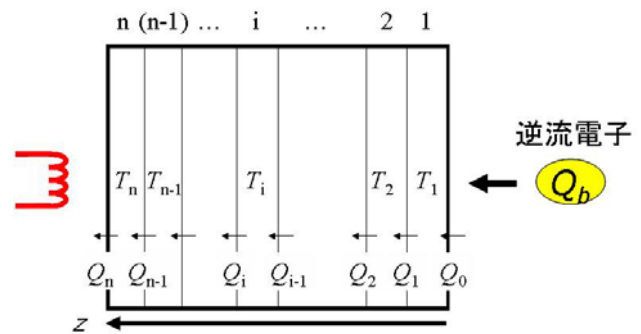


図5：各ディスク間の熱の移動

このようにして求められた陰極温度の時間発展より、陰極表面電流密度が求められる。陰極温度と陰極表面電流密度の関係は、本研究で用いた陰極については、Heat Wave Lab社の陰極性能試験結果での関係を用いている。

4.3 高周波電子銃内の空洞電圧の解析

高周波源、導波管、電子銃、電子ビームを図6に示す等価回路で表現し、この回路方程式を解くことによって空洞電圧と反射電力波形を求めた。このとき、陰極表面電流密度と空洞電圧から、粒子シミュ

レーションコードKUBLAI[5]を用いて回路上の電子ビームのコンダクタンスとサセプタンス成分が決まり、電子ビームの負荷を求めることによって回路方程式を解いている。



図6：等価回路モデル

5. 実験結果と解析結果の比較

解析と実験それぞれにより求めた反射電力波形の比較を行った。図7に入射高周波電力波形制御後の反射電力波形を示す。図7に示すように、よく一致した。また、図8に示すように、空洞電圧の変化とピークエネルギーの変化には相関関係があり、空洞電圧を一定に保つことによりピークエネルギーを一定に保つことができるということがわかった。さらに、入射電力を初期値8 MWで約1.6 MWの制御幅とし、初期陰極表面電流密度を2.28 A/cm²として計算すると、8 μsecにわたってピークエネルギーの低下を100 keV以下に保てるということが分かった。図9にこのときの波形制御を行った入射高周波電力波形を、図10にそのときの空洞電圧の時間変化を示す。

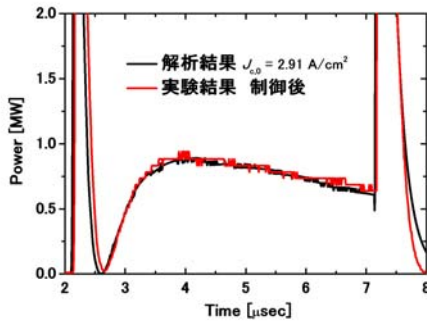


図7：制御後の反射電力波形

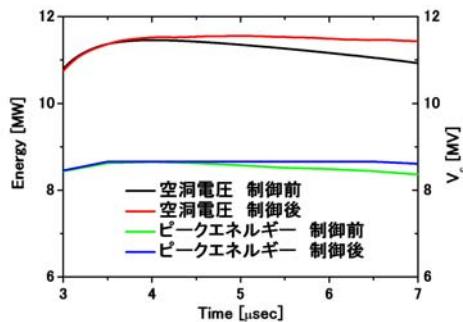


図8：空洞電圧とピークエネルギーの時間変化

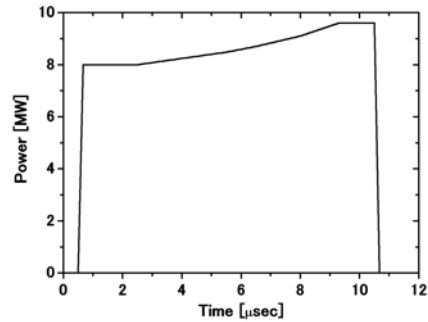


図9：波形制御を行った入射電力波形

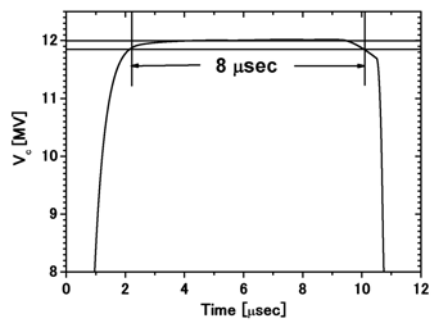


図10：空洞電圧の時間変化

6. まとめ

入射高周波電力波形制御が、ビームエネルギーの低下を軽減することに有効であると実験により確認できた。また、上記の解析により実験結果をうまく再現できた。さらに、8μsecにわたってピークエネルギーの低下を100keV以下に保てるということが計算により予測された。

7. 参考文献

[1] 中井陽子、他：第2回日本加速器学会年会報告集、p.720-722(2005)
 [2] T. Kii et al., Proceedings of the 26th International Free Electron Laser conference, (2004) pp443-446.
 [3] Loyd M. Young, James H. Billen : LA-UR-96-1835(2002)
 [4] M. J. Berger and S. M. Seltzer : STOPPING POWER AND RANGES OF ELECTRONS AND POSITRONS(2ndEd.), NBSIR(1982)
 [5] 増田 開：京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻博士論文(1995)