

Improvement of the performance of thermionic RF gun by controlling RF power

Kazushi Hayakawa, Shio Murakami, Heishun Zen, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki, Tetsuo Yamazaki,
Kiyoshi Yoshikawa
Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

In a thermionic RF gun, cathode temperature rises in a macropulse owing to the back-bombardment phenomenon, and the electron-beam current from the cathode increases. Then, the energy of the electron beam decreases in the macropulse. In order to solve this problem, we tried a method of keeping beam energy constant by controlling the RF power. By this method, the pulse width was extended from 3.1 μs to 4.1 μs , and dramatic increase in beam current was observed.

高周波電力の制御による熱陰極型高周波電子銃の性能改善

1. はじめに

自由電子レーザー (FEL) は、多くの優れた特徴を持つが、その開発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。この高輝度化を狙って開発された電子銃に、高周波電子銃がある。

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逆加速電界の影響を受け逆加速され、陰極に衝突するback-bombardment現象が起こる。それによって陰極表面温度が上昇し、電子放出量がマクロパルス内で増加するので、加速効率が低下し、ビームエネルギーが変動するため高輝度化の大きな妨げとなる。

そこで本研究では、電子銃へ入射する高周波電力を制御することで、ビームエネルギーを一定に維持する方法の有効性を試みた。

2. 実験装置と測定系

電子ビームを加速するためには、高周波電子銃の空洞の共振周波数に近い高周波電力を高周波電子銃に入力して高周波電界を誘起する。電子を数MeVまで加速するためにはクライストロンによって数MWの高周波電力を供給する必要がある。このクライストロンを動作させるためには、発振器で生成された高周波をアンプにより数百Wまで増幅してクライストロンに入力すると共に、高周波電力を増幅するための電子を引出す高圧パルス形成装置が必要である。

2.1 高圧パルス形成装置

我々が使用している高圧パルス形成装置(日新電機社製)のは、出力パルス電圧が定格で170 kVのとき定格電流は140 A、パルス幅は最大10 μs でパルス繰り返しは最大10 ppsである。また、この高圧パルス形成装置は小型であることと、内部の可変リアクトル(図1)を遠隔で調節することにより出力電圧波

形を微調整できることが大きな特徴である。こうすることで、リップル率が0.3 %以内の高い平坦度で、かつ、安定度の高い出力電圧が得られる。本研究では、この可変リアクトルを調整することによって、電子銃へ入射する高周波電力を制御する。

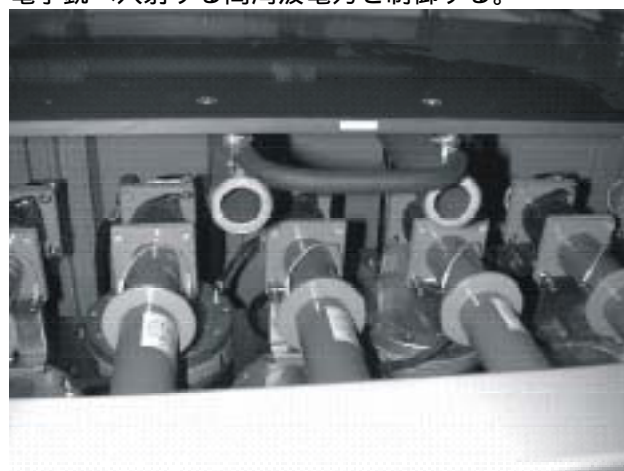


図1：可変リアクトル

2.2 測定系

本研究で用いた測定系の概略図を図2に示す。

本研究では、半径1 mmの陰極を用い、陰極表面温度を1020 $^{\circ}\text{C}$ に設定して実験を行った。また、ビーム特性を評価するため、出力ビーム電流波形、電子ビームのエネルギースペクトルを測定した。

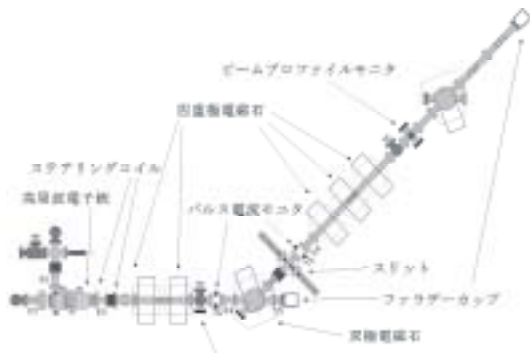


図2：測定系の概略図

3．実験結果

本実験では、まず矩形の高周波電力入射時における電子ビームのエネルギースペクトルを測定した後、back-bombardment現象による陰極表面電流の増加に最適化された高周波波形をつくり、その時の電子ビームのエネルギースペクトルを測定した。

陰極表面電流の増加に最適化された高周波波形とは、back-bombardment現象が引き起こす陰極表面電流の増加が、加速効率の低下を招き、ひいてはビームエネルギーが変動してしまうという問題点を解決するために、ビームエネルギーが一定に保たれるように調整された高周波電力波形のことである。

3.1 高周波電力

リアクトル調整による、高周波電力波形最適化の前後における高周波電力の波形を図3に示す。高周波電力は、マクロパルス中で双極電磁石の後のパルス電流モニタ(CT)に電流波形が観測され始めて2 μs 後から、徐々に大きくなっていくように調整した。これは、後に示すように、矩形波の場合は、この時間からピークエネルギーが落ち込み始めるからである。

この図の場合、リアクトルの調整によって高周波電力は約5 MWから1 MW程度上昇し、6 MW程度に達している。

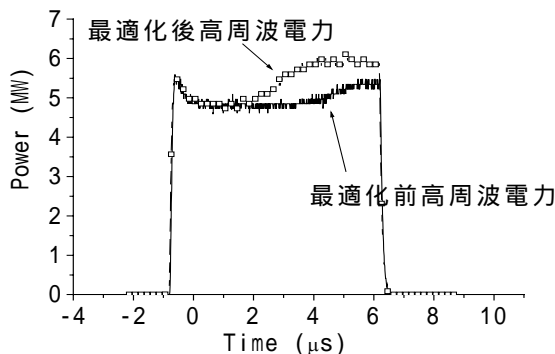


図3：高周波電力波形

3.2 ビーム電流

図4に、ピーク・ビームエネルギーが10.3 MeVのビームエネルギーの場合の電流波形を示す。これは、双極電磁石の後のパルス電流モニタ(CT)を用いて測定した。この図より、リアクトルを調整し、入射電力を最適化することで、パルス幅が3.1 μs から4.1 μs に伸び、電流量のピークも、40.6 mAから87.5 mAへ増えたことが分かる。

入射電力を最適化する前は、パルス幅が狭く、マクロパルス中において電流量がほぼ一定の波形となっている。それに対し、高周波電力を最適化すると、パルス幅が伸び、マクロパルス中において電流量が増大していく波形が観測された。

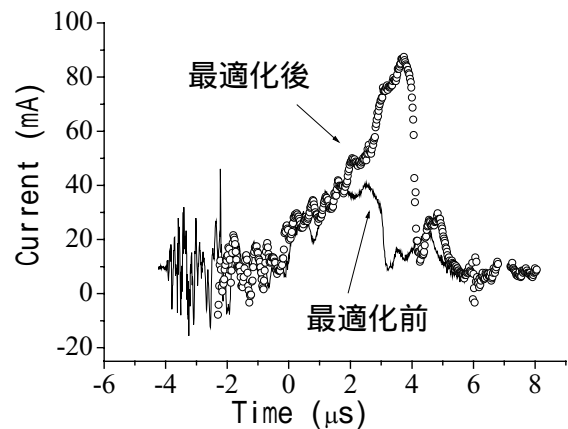


図4：ビーム電流波形

3.3 ビームエネルギーの時間構造

図5にビームエネルギーの時間構造を示す。これより、高周波電力を最適化する前は、2 μs からビームエネルギーが落ち込んでいるが、高周波電力を最適化することで、4 μs までビームエネルギーが一定の値に維持されている様子が見える。

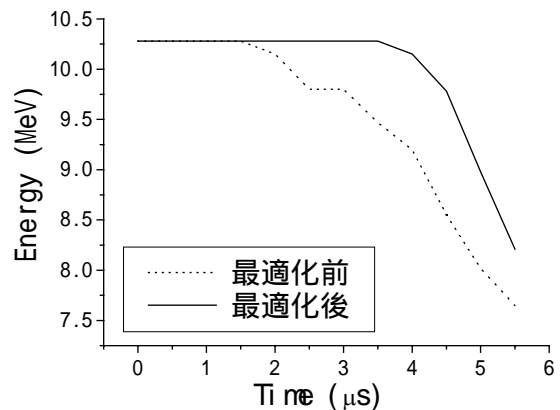


図5：ビームエネルギーの時間構造

4．考察

実験により、矩形の高周波電力を入射する場合に

比べ、ビームエネルギーの減少にあわせて高周波電力を増大させることで、ビームエネルギーの減少を抑制できることが分かった。これは、back-bombardmentが引き起こす電流増加によるビームエネルギーの減少を、高周波電力の増分が相殺した為と考えることが出来る。

今回の実験条件について、粒子シミュレーションコードParmela(V3.30)^[1]と高周波電子銃の等価回路モデル(図6)^[2]を用い解析を行った。

等価回路モデルは高周波電源部分と高周波電子銃部分、電子ビーム部分で構成される。以下に、各部分の等価回路モデルについて説明する。

高周波電源は等価電流源で表し、その電流値を i_g とする。 G_{ex} は、高周波電源から見た導波管のコンダクタンスである。

高周波電子銃は空洞共振器であるので、漏れコンダクタンス G_c のLCG_c共振回路で等価的に表すことが出来る。また、空洞電圧は V_c で表す。

電子ビームは、アドミッタンス Y_b を用いて表される。 Y_b は V_c と陰極表面電流 J_c の関数である。

また、各々の値は、 $G_c=7.977*10^{-2}$ (S), $G_{ex}=2.2996*10^{-1}$ (S), $L=5.468*10^{-8}$ (H), $C=5.6727*10^{-14}$ (F)を用いた

Parmelaでは、電子銃内部の平均電圧と陰極表面電流をパラメータとし、その条件における出力電流、ビームエネルギー、ビームローディングを計算した。その値を用い、高周波電子銃の等価回路モデルより変数を変換することで、各陰極表面電流について、高周波電力とビームエネルギーの関係を求めた。求めた結果を図7に示す。

このグラフより、同一高周波電力の下では陰極表面電流密度が増加すると、ビームエネルギーが下がっていく様子が見える。また、ビームエネルギーが10 MeV程度においては、1 MWの高周波電力の増大によって約30 A/cm²の陰極表面電流密度の増加がカバーできることが分かる。

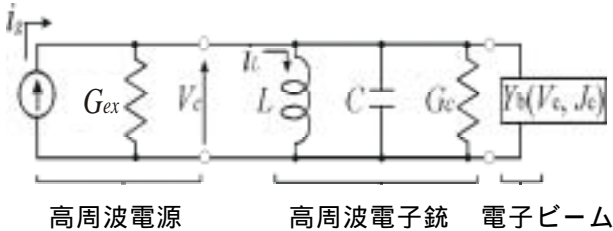


図6：高周波電子銃の等価回路

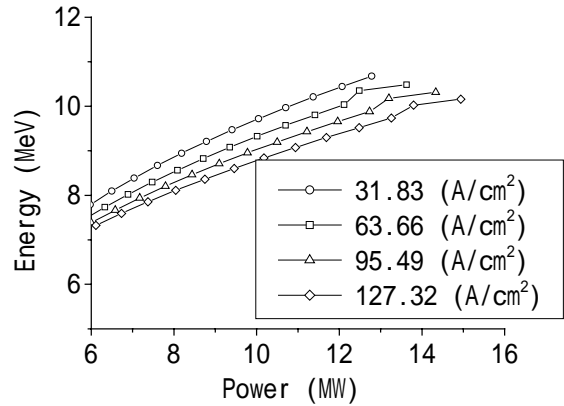


図7：計算機シミュレーションによる高周波電力とビームエネルギーの関係

5. まとめと今後の課題

本実験では、ビームエネルギーを一定にするため、高周波波形を変化させるという方法を試みた。この方法は、図4に見られるようにビームのパルス幅を1 μs程度伸ばし、ビーム電流の劇的な増加をもたらした。また、この結果が定性的には粒子シミュレーション結果と一致することが確かめられた。

しかし、このシミュレーション結果は、現実の値とずれており、定量的な評価には至らなかった。

このずれの原因としては、等価回路モデルの物理量が4年前の測定時と現在でずれている可能性があること、高周波が溜まっていく過渡的な現象を考慮に入れてないこと、電子ビームが増大していった時の共振周波数のずれを考慮に入れていないことが挙げられる。今後は、これらを考慮に入れたシミュレーションをすると共に、得られた電子ビームを加速管で効率的に加速する為の研究が必要である。

6. 参考文献

- [1] James H. Billen, Loyd M. Young, PARMERA, chapter LA-UR-96-1835.2002.
- [2] 池田 竜太：京都大学エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻修士論文(2000)