

## Beam Loading Compensation in Thermionic RF Gun by Using RF Detuning

Heishun Zen<sup>1</sup>, Ryota Kinjo, Keisuke Higashimura, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

### Abstract

A new beam energy compensation method was investigated, which can suppress the beam energy drop in a thermionic RF gun caused by the beam current increase due to the back-bombardment effect. The method is to feed a RF power with slightly higher (detuned) frequency to the gun. The principle of this method is based on that the increment of the beam conductance could be cancelled out by the increment of beam susceptance. As a result of numerical simulation, the increase of current density on the cathode surface from 47 to 176 A/cm<sup>2</sup> can be compensated by 550 kHz detuned RF power. Results of experiment showed a good agreement with the simulation, and the effectiveness of this method was demonstrated.

### 高周波周波数デチューニングによる熱陰極高周波電子銃内での ビームローディング補償

#### 1. はじめに

熱陰極高周波電子銃は数MeVと言ったエネルギーを持つマルチバンチ高輝度電子ビームを容易に生成可能であると共に、DC電子銃の様にバンチャが必要なく、光陰極高周波電子銃の様に高価なレーザを必要としないため、安価でコンパクトな加速器システム実現に適しており、その応用が期待されてきた。しかしながら、電子銃内で電子が逆流し、陰極に衝突、陰極が加熱され、陰極温度上昇に伴い電流が増加し、その結果として空胴電圧が低下するback-bombardment現象[1]の為、その応用は限られた範囲に留まっている。これまで、陰極表面への外部磁場印加[2]、入射高周波電力制御[3]等、色々な対策が採られてきたが、その効果は限定的なものであった。我々のグループでは、電子銃等価回路モデルの詳細な検討により、新しいエネルギー補償方法を発見した。それは電子銃の共振空胴に共振周波数よりも数100 kHz程度高い周波数の高周波電力を入射する(周波数デチューニング)というものである。本手法は、back-bombardment現象によるマクロパルス中でのエネルギー低下を補償するために追加の装置を一切必要とせず、その方法も非常に単純である為、今後の熱陰極電子銃を電子源とした加速器システムの応用範囲拡大に貢献できるものと考えられる。

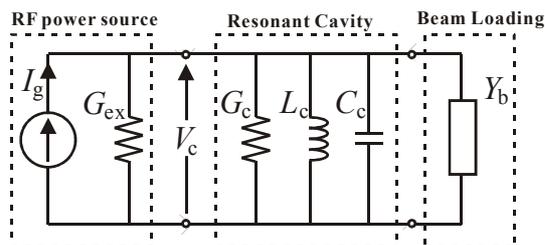


図1: 高周波電子銃の等価回路

<sup>1</sup> E-mail: [heishun@iae.kyoto-u.ac.jp](mailto:heishun@iae.kyoto-u.ac.jp)

#### 2. 原理

高周波源、共振空胴および電子ビーム負荷は図1に示す等価回路で置き換える事が可能である。ここで、ビーム負荷 $Y_b = G_b + jB_b$ は電子銃の空胴電圧 $V_c$ 、陰極表面電流密度 $J_c$ に依存する。この等価回路モデルを用いると、ビームエネルギーを決定する空胴電圧 $V_c$ の絶対値は次式で表される。

$$|V_c| = \frac{|I_g|}{\sqrt{(G_c + G_b + G_{ex})^2 + (B_c + B_b)^2}} \quad (1)$$

back-bombardment現象とは、逆流電子による熱入力により、マクロパルス内で陰極表面電流密度が増加し、ビームアドミタンスが変化・空胴電圧が低下し、エネルギーが低下する現象である。式(1)の両辺を陰極表面電流密度 $J_c$ で偏微分すると、次式が得られる(ここで $G_c$ 、 $G_{ex}$ 、 $B_c$ 、 $I_g$ は $J_c$ に依存しない定数)。

$$\frac{\partial |V_c|}{\partial J_c} = \frac{-I_g}{\{(G_c + G_b + G_{ex})^2 + (B_c + B_b)^2\}^{3/2}} \times \left[ (G_c + G_b + G_{ex}) \frac{\partial G_b}{\partial J_c} + (B_c + B_b) \frac{\partial B_b}{\partial J_c} \right] \quad (2)$$

図2に粒子軌道計算により得られた、我々の電子銃におけるビーム負荷の空胴電圧・陰極表面電流密度依存性を示す。この図において、ビームコンダクタンス $G_b$ は常に正であり、 $J_c$ 変化に対して正の傾き( $\partial G_b / \partial J_c > 0$ )、ビームサセプタンス $B_b$ は常に負であり、 $J_c$ 変化に対して負の傾き( $\partial B_b / \partial J_c < 0$ )を持つ。一般的に、高周波電子銃はビーム負荷が存在する状

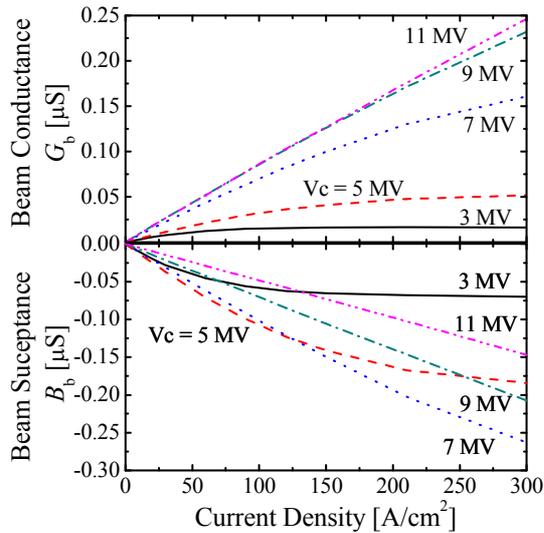


図2: ビーム負荷の陰極表面電流密度 $J_c$ 依存性

態での共振条件 ( $B_c + B_b = 0$ )において運転されている。そのため、右辺[ ]中の第一項のみが残り、 $\partial G_b / \partial J_c > 0$ であることから、 $\partial |V_c| / \partial J_c < 0$ となる。これはback-bombardment現象によりビームエネルギーが低下する事を表す。

ここで、 $\partial B_b / \partial J_c < 0$ である事に着目すると、空洞サセプタンス $B_c$ を正にとる(運転周波数を共振周波数よりも高く、デチューニングする)事で $G_b$ の変化を $B_b$ の変化で打ち消し、空洞電圧低下を緩和する事が可能である事がわかる。また、適切なデチューニング量(=入射高周波周波数 - 空洞共振周波数)を選ぶ事で、初期条件下で $\partial |V_c| / \partial J_c = 0$ となる条件を実現する事が出来る。その条件は次式で表される。

$$B_{c0} = \left\{ -(G_c + G_b + G_{ex}) \frac{\partial G_b}{\partial J_c} \Big/ \frac{\partial B_b}{\partial J_c} \right\} - B_b \quad (3)$$

マクロパルス中で陰極が加熱され、 $J_c$ が増加していくと $G_b$ 、 $B_b$ が増加し、式(3)により決定される最適空洞サセプタンス条件が変化していく。このことから、この手法で補正可能な陰極表面電流、ビーム負荷変化には限界がある事が予想される。

### 3. 数値解析

数値計算を用いて、我々の電子銃の典型的な運転条件における補正効果と補正限界を調べた。計算にはこれまで、我々の研究グループで開発されてきた、back-bombardment現象を考慮に入れた熱陰極高周波電子銃の過渡応答計算コード[3]を用いた。このコードはビーム負荷、逆流電子による陰極への熱入力を元に、電子銃空洞電圧と熱陰極温度の時間発展を同時に解くことで、電子銃からの反射波、ビームエネルギー変化を再現する事に成功している。計算に用いた電子銃パラメータを表1に示す。

表1: 電子銃パラメータ

共振周波数[MHz]	2855.955
カップリング $\beta$	2.79
Q値	12500
$R/Q$ [ $\Omega$ ]	980
陰極半径 [mm]	1
陰極材質	LaB <sub>6</sub>
初期陰極温度 [ $^{\circ}$ C]	1630
投入電力 [MW]	8
RF マクロパルス幅 [ $\mu$ s]	5

#### 3.1 ビームエネルギーのデチューニング量依存性

図3に各運転周波数でのピークエネルギーの時間発展を示す。また、各条件での陰極表面電流密度は図4の様にマクロパルス中で増加している。共振周波数とデチューニング量 $\Delta f$ を大きくしていくに従って、ビームエネルギーが最大8.3 MeVから5 MeVまで低下していくと共に、マクロパルス中でのエネルギー低下が緩和され、一定に近づいている事が見て取れる。デチューニング量 $\Delta f = 545$  kHzの条件において、完全に陰極表面電流密度変化、ビーム負荷の変化に対してピークエネルギーが変化しない条件が達成されている。また、デチューニング量 $\Delta f$ を645 kHzにするとマクロパルス中でエネルギーの上昇がみられた。

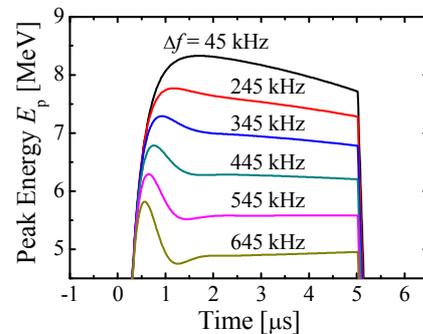


図3: 各デチューニング量でのピークエネルギー時間発展

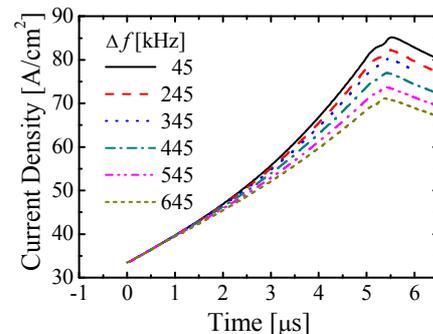


図4: 各デチューニング量における陰極表面電流のマクロパルス中での変化

### 3.2 エネルギー補償の限界

計算において入射する高周波パルスのマクロパルス幅を14  $\mu\text{s}$ とし、デチューニング量545 kHzを与えた場合のピークエネルギーの変化、陰極表面電流密度の変化を調べた。図5にピークエネルギーと陰極表面電流密度の時間変化を示す。

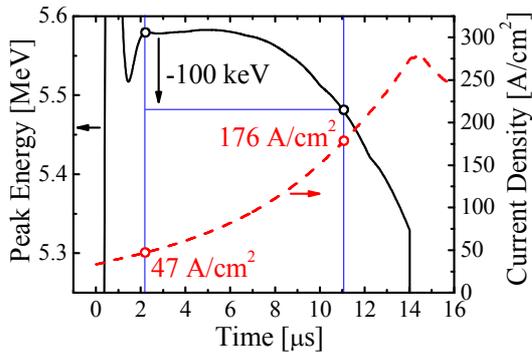


図5：デチューニング量545 kHzを与えた場合のピークエネルギー、陰極表面電流密度の時間変化

陰極表面電流密度が50~100  $\text{A}/\text{cm}^2$ の間である場合には、そのエネルギー変化は20 keV程度であり、ほぼ一定であるが、それ以上に陰極表面電流密度が増加するとビームエネルギーは低下していく。エネルギー低下100 keVまでを許容するならば、約175  $\text{A}/\text{cm}^2$ が限界である。この手法を用いる事で、非常に大きな電流密度変化(約4倍)を補正する事が可能である事が分かる。また、この条件では時間にして約9  $\mu\text{s}$ に相当する。

### 4. 実験結果と数値計算結果との比較

図6に実験結果および、数値計算結果を示す。条件は入射高周波のマクロパルス幅が5.4  $\mu\text{s}$ であること、初期陰極温度が実験では未知であることを除き、表1に示した計算結果と同一である。また、実験においては電子銃からの出力ビームの総電荷量を一定にするように、ヒーター電流を調整している為、各条件で陰極温度が異なる。図6より、実験でも計算同様に、エネルギー低下が低減されていることが分かる。また数値計算において、初期陰極温度を調整するのみで、実験結果を再現する事に成功した。なお、電子銃からの高周波電力の反射波形も同様に良く再現されている。これらの結果より、今回の実験では従来FEL光共振実験を行っている約7 MeV付近のビームエネルギーが得られる程度の周波数差しか与えなかったが、より大きな周波数差を与える事で前述の数値計算結果の様に、エネルギー低下を打ち消す事が出来ると予測される。

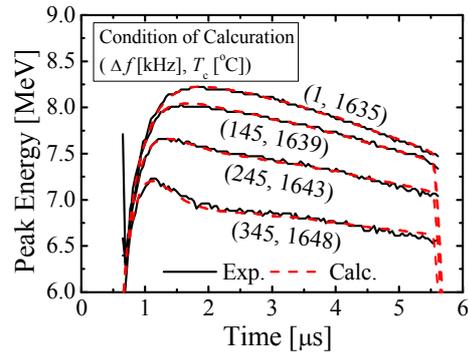


図6：ビームエネルギーのマクロパルス中での時間発展(実験と計算の比較)

### 5. 結論

熱陰極高周波電子銃において、入射高周波電力周波数をデチューニングすることで、back-bombardment現象により生じるビームエネルギー低下を低減する方法を提案した。等価回路モデル、数値計算によって、本手法を用いることで理想的にはマクロパルス内のエネルギー補償が可能になる事が示された。また、我々の電子銃の典型的な運転条件では、550 kHz程度の周波数差を与えてやれば良い事、約4倍といった非常に大きな陰極表面電流密度の上昇を補償可能である事が分かった。実際の実験においても、入射高周波電力周波数をデチューニングする事でエネルギー低下の低減が観測された。また、実験の結果を数値計算によって良く再現できることが分かった。今回の実験結果では345 kHz までしか周波数差を与えていないが、今後さらに大きな周波数差を与え、完全にエネルギー低下を打ち消す事が出来るかどうかを確認する予定である。

また、現在は300 kHz程度の周波数デチューニングと従来から導入されている高周波電力制御を併用し、電子ビーム電流を平均 110mA、マクロパルス幅を5.5  $\mu\text{s}$ に伸ばす事に成功し、この条件下で約13  $\mu\text{m}$ 帯でのFEL飽和を達成している[4]。

### 謝辞

最後に本研究に関して、色々とコメントを頂きました京都大学エネルギー理工学研究所長崎百伸教授、韓国原子力研究所Dr. Young Uk Jeong先生に感謝を表したいと思います。

### 参考文献

- [1] C.B. McKee, et al., NIM, A296 (1990), 716-719
- [2] C.B. McKee, et al., NIM, A304 (1991), 386-391
- [3] T. Kii, et al., AIP Conference Proc., 879, (2006), 248-251
- [4] T. Kii, et al., in these proceedings