

# 熱陰極高周波電子銃における back-streaming 電子の定量的評価

紀井 俊輝<sup>1</sup>、甘崎 哲、堀井 智弘、増田 開、吉川 潔、大垣 英明、山崎 鉄夫  
京都大学エネルギー理工学研究所  
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

## 概要

高周波電子銃 (RF gun) は高周波加速による加速電界の高さから高輝度電子ビーム生成に有効とされている。しかし、高周波の逆加速電界によって電子が逆流し陰極に衝突するため、陰極温度が上昇しパルス時間内で電流密度を一定に保持できないという問題がある。陰極に光陰極を用いる方法はこの問題の解決に有効であるが、装置の規模が大きくなり取扱が困難となることから、当グループでは取扱の容易な熱陰極を用いた解決方法の研究をおこなっている。本稿では、RF gun を用いた電子ビーム生成前後における熱陰極表面の温度測定結果、及び逆流電子熱量の定量的評価について報告する。

## 1. はじめに

相対論的速度の電子ビームを周期的磁場中で蛇行させる際に放出される光を増幅し生成する自由電子レーザー (Free Electron Laser : FEL) は従来のレーザーとは異なり波長可変の自由度が大きく、また大出力化、高効率化の潜在能力も高く新たな光源として期待されている。自由電子レーザーの発振および、性能向上においては、大電流の電子ビームを同一軌道上を蛇行させることが重要である。そのためビーム電流の増大とともに、エネルギー、運動方向の均一化といったビーム品質の向上が特に重要である。

高周波電子銃は高い加速電界を生成することが可能で、FEL 発振に必要な高輝度相対論的電子ビーム源として注目されている。ところが、高周波を用いて加速するため一部の電子が陰極へ逆加速される back-bombardment 現象により陰極が加熱され、安定した電子ビーム生成が困難になるという問題がある。スタンフォード大学グループは電子銃に磁場を印加することによる問題の軽減法を提案している<sup>[1]</sup>が、正常に引き出される電子軌道へも影響があるため、理想的な解決策とはなっていない。

これまでに我々が行った電子ビーム特性の計測ではビームパルス後半において陰極加熱に起因すると思われるビーム電流の増大とそれに伴うビームエネルギーの低下や逆流電子によると思われる陰極中央部の損傷が観測されている。そこで、電子銃内部で

の電子軌道の計算機シミュレーションを行ったところ、高エネルギーの電子が陰極中央部へ収束されやすいということが判明し、中央部に穴をあけた中空型熱陰極が back-bombardment 現象の軽減に効果的である可能性があることが予測された。<sup>[2,3,4]</sup>

そこで、本研究では穴開き陰極を用いて電子ビーム生成を行いビーム特性の測定を行い、同時に赤外線放射温度計を用いてビーム生成中の陰極表面温度の観測を行うことで、逆流電子による陰極加熱現象の定量的評価をおこなった。

## 2. 実験装置

実験装置は、高周波電子銃、赤外線放射温度計、電子ビーム診断系からなる。実験に用いた高周波電子銃および赤外線放射温度計の仕様を表 1、2 に、実験装置の概略図を図 1 に示す。

表 1 : 高周波電子銃の仕様  
(AET MG-500)

Resonant frequency	2856MHz (S-band)
Number of cavity	4+1/2 (side-coupled)
Beam energy	4MeV
Beam current	500mA
Incident RF power	5MW

表 2 : 赤外線放射温度計の仕様  
(Chino IR-FAS FL3)

Effective area	φ2mm
Focus	200mm
Lens diameter	φ5mm
Sampling interval	25msec
Temperature range	600-1800°C

電子ビーム生成中の陰極表面温度を赤外線放射温度計で測定するとともに、電子軌道制御電磁石および各種モニターを持つビームラインを用いて、引き出し電流、ビーム像、エネルギー分布の測定を行った。また、ビーム生成条件を解析するため、高周波電子銃への入射電力、および高周波電子銃からの反射電力の測定も同時に行った。

<sup>1</sup> E-mail: kii@iae.kyoto-u.ac.jp

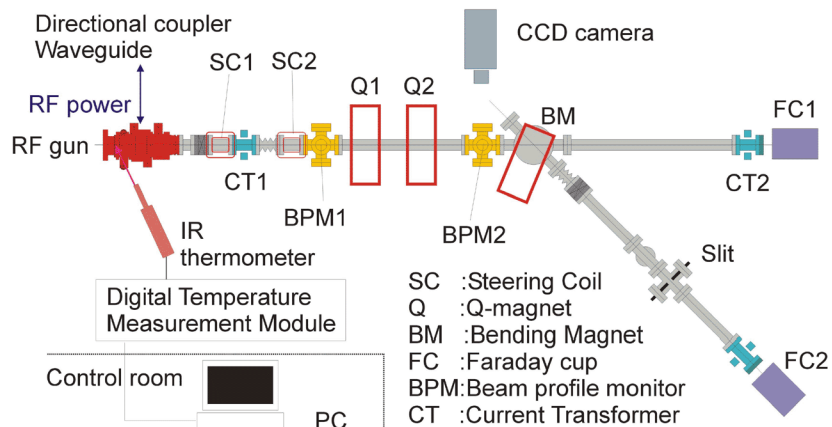


図 1 : 実験装置概略図

### 3. 実験結果

実験は平板熱陰極および中空熱陰極を用い、パルス幅 2~3  $\mu\text{sec}$ 、パルス繰り返し数 1~10 pps、入射高周波電力 0~8 MW で行った。陰極を加熱するヒーターへの入力電力は約 22 W で電子による加熱がないビーム生成前の温度はおよそ 900  $^{\circ}\text{C}$  であった。

高周波電力が入射されると、陰極表面の温度は逆流電子の衝突により上昇し、上昇割合は入射電力の増加とともに増大した。典型的な温度変化を図 2 に示す。

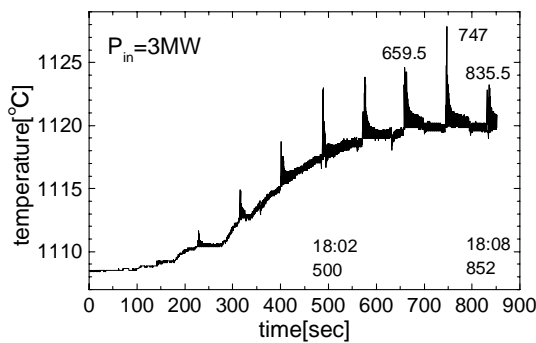


図 2 : 典型的な高周波電力入射に伴う温度上昇

陰極への逆流電子の定量的な評価は図 3 に示す陰極における熱移動のモデルを用い、熱伝導方程式を解くことにより行った。

陰極における熱伝導方程式は式 (1) によって与えられる。

$$C \frac{dT}{dt} = Q_h + Q_b - (AT^4 + BT + X). \quad (1)$$

ここで  $Q_h$  はヒーターからの熱供給量、 $Q_b$  はビームによる熱供給量、 $T$  は表面温度である。また、 $A$  は熱放射によるエネルギー流出を決める定数、 $B$  は熱伝導によるエネルギー流出を決める定数とし、 $X$  は電子銃の形状、温度によって決まる定常的な熱流入

を表す定数、 $C$  は陰極形状、材質などで決まるが、このモデルでは陰極の大きさを定めずに熱の入出力だけを取り扱っているため任意の定数とした。 $A, B, X, C$  の各定数は、定常状態における熱入力と温度の関係、およびヒーターへの熱入力を遮断した際の温度変化から決定した。

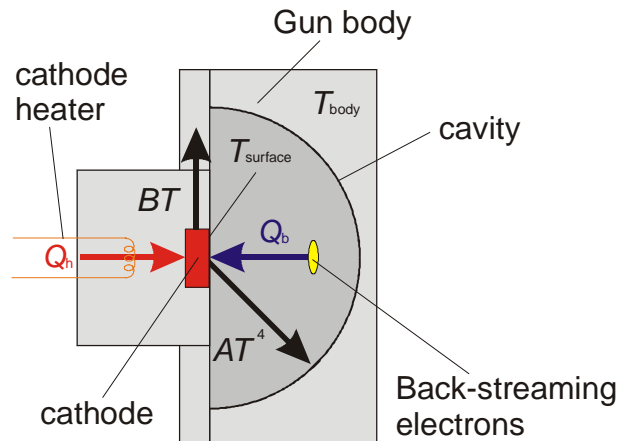


図 3 : 陰極への熱移動モデル

ここで決定された定数および、電子ビーム生成中の平均温度および温度変化の微視的特性を用いビームによる熱供給量  $Q_b$  を計算した。

図 4 に中空陰極を用いてパルス繰り返し数 1,3,5 pps にてビーム生成を行った際の温度上昇から求めた逆流電子による陰極への熱供給量の測定結果を示す。解析により得られた熱量をヒーターから陰極への平均的な供給熱量と比較するため、パルス状の逆流電子の熱量を 1 秒間あたりの平均熱量に換算したものをを用いた。得られた結果は電子銃内部における電子軌道計算の結果とおおよその一致を示した。

高繰り返し運転で入射電力が大きい場合、逆流電子による熱量は 10 W に近づき、ヒーターへの入力電力と比べ無視することができないほどの寄与があることが明らかになった。中空陰極の使用にもかかわ

らず、このような大きな流入熱量が観測された原因は、陰極を加熱するヒーター保持部に構造上、穴をあけることができず、逆流電子がヒーター部を直接加熱したたことにあると考えられる。

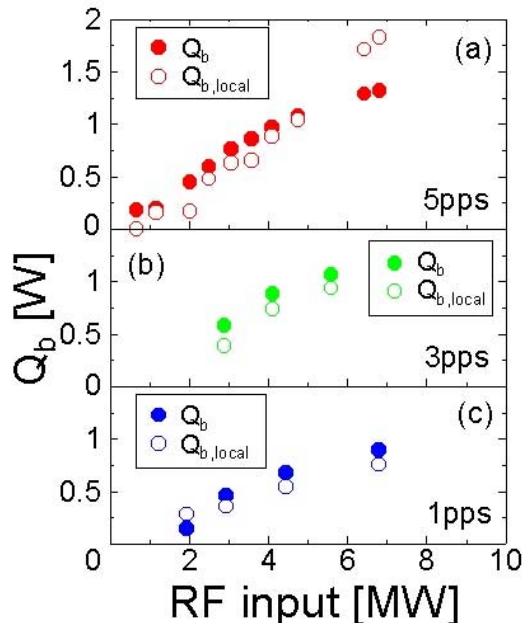


図4：中空陰極を用いたビーム生成中の高周波入射電力と陰極への戻り電子による1パルスあたりの流入熱量の関係 図中 $Q_b, Q_{b,local}$ は解析方法の違いを表す。

#### 4. まとめと今後の課題

高周波電子銃運転中の陰極表面の温度計測はこれまでに例がなく、本研究で得られた結果は電子銃内

部における電子の挙動を理解するためにきわめて重要である。平板、中空熱陰極を用いたビーム生成中の温度計測により、特に高繰り返し運転時に逆流電子による影響が無視できないほど大きくなることが明らかになった。

本研究の解析では、運転中の平均温度の上昇から平均流入熱量を求めたが、加速される電子ビームの高品位化のためには、パルス持続時間2~3  $\mu\text{sec}$ における熱流入、陰極表面温度の時間発展の解析がさらに重要である。そこで今後は、平板、中空熱陰極を用いたビーム生成時の引き出し電流の時間変化や、エネルギー分布の時間変化、入反射高周波電力の時間変化といった詳細なビームパルス特性、高周波特性の計測を行うことを計画している。また、同時にパルス持続時間内における温度上昇を考慮したシミュレーションモデルの構築も行う予定である。

#### 参考文献

- [1] C.B. McKee and John M.J Maday, Nucl. Instr. and Meth., A296 (1990), 716-719
- [2] Kai Masuda, Development of Numerical Simulation Codes and Application to Klystron Efficiency Enhancement, Ph. D thesis, Kyoto University (1997)
- [3] Takashi Inamasu, Numerical Analysis of Electron Beam in an RF gun, Bachelor thesis of Kyoto University, (1996)
- [4] Yasushi Yamamoto, Takashi Inamasu, Kai Masuda, Masaaki Sobajima, Masami Ohnishi, Kiyoshi Yoshikawa, Hisayuki Toku, Eiji Tanabe, Nucl. Instr. and Meth. A393 (1997), 443-446