

EXPERIMENT AND ANALYSIS ON BACK-BOMBARDMENT EFFECT IN AN THERMIONIC RF GUN

Tomohiko Yamaguchi^{*)}, Ryuta Ikeda, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hisayuki Toku,
Kiyoshi Yoshikawa, Tetsuo Yamazaki

Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gokasho, Uji - city, Kyoto, 611-0011, JAPAN

Abstract

RF gun, as you know, can accelerate electrons with high electric field, compared with the conventional electrostatic gun, resulting in generating high-brightness electron beam with high current, low emittances, and so on. In the case of using thermionic cathode, there are some advantages in lower costs, easier treatment, and apparatus simplicity. On the other hand, there are disadvantages as well; back-streaming electrons make cathode temperature unstable and its current density on cathode surface tend to be unstable, too. To point out how to solve this problem, KUBLAI simulation code was developed and electron trajectories was calculated. It is numerically found that back-streaming electrons converged and concentrated onto the center of cathode surface. This result led us to using hollow cathode to overcome back-bombardment effect. In this work, we measured cathode surface during generating electron beams by using the slab cathode for 4.5 S-band thermionic RF gun to evaluate quantitatively the back-bombardment effect.

熱陰極型電子銃における back-bombardment 効果に関する実験及び解析

1. 序論

高周波電子銃は、従来の静電型電子銃に比べて加速電界を高くすることができ、電子をより短時間で加速することができるため、空間電荷力のために起るエミッタンスの増大を少なくすることができる。この点から、RF gun は大電流、低エミッタンスといった高輝度電子ビームを生成できると期待されている。RFgun の陰極材より電子塊を得る手段として、熱電子放出、光電子放出、電界電子放出などがあるが、低コスト、装置の簡便さ、取扱の容易さという長所を持った熱陰極が望ましい。

一方、熱陰極の使用において、高周波電界により加速された逆流電子が陰極に衝突し、陰極表面の温度を不安定にし、結果として陰極表面の電流密度を一定にできないという欠点があるため、数 μ s 以上の長パルス運転が困難である。SLAC では、電子ビームの進行方向に垂直な方向の磁場をかけることにより、逆流電子の軌道を陰極から反らし、電子の陰極衝突を避けるという方法がとられているが[1]、back-bombardment の問題が完全に解決されたわけではない。

^{*)} Tomohiko Yamaguchi, 0774-38-3423,
guchi@iae.kyoto-u.ac.jp

この問題を解決することは熱陰極型高周波電子銃を使用した高輝度電子ビーム生成には必要不可欠である。back-bombardment の問題を解決する手法を探るため、2次元粒子シミュレーションコード KUBLAI[2,3]を開発し、電子軌道計算を行ったところ、逆流電子は陰極の半径方向に収束され、陰極の中心に集ることが明らかになった[4]。この結果から、中空陰極を使用することにより、平板熱陰極使用時とほぼ同程度の電子ビームを生成することができるだけでなく、back-bombardment の効果を大幅に軽減できる可能性があることも同時にわかった[4]。

そこで本研究では、平板熱陰極を用いた時の back-bombardment の効果を検証するため、京都大学エネルギー理工学研究所所属の 4.5 空洞 S バンド高周波電子銃[5]を使用した電子ビーム生成時における陰極表面の温度測定を行い、back-bombardment の効果を定量的に評価することを試みた。

2. 実験装置

図1に本研究における実験系について模式的に示す。熱陰極は直径約 6mm、厚さ 1mm のタングステン製の平板状のものを使用した。電子ビーム生成時及び非生

成時における陰極表面の温度測定はチノー社製ファイバー式赤外放射温度計 IR-FA3S1 を使用して行った。高周波電子銃のレーザーポートを通して、温度計から放射されるレーザーを利用して陰極表面の中心を合わせ、陰極表面から放射センサの距離を 200mm になるように注意して設置した。カソード表面の直径 2mm の領域から放出される波長 $0.9\ \mu\text{m}$ の赤外線は 200mm 先にある直径 5mm の集光レンズにより集められ、光ファイバーを通り、温度計の本体部にあるシリコン製の赤外線検出素子によって電流信号に変換される。変換された電流信号は本体部より出力され、温度計測モジュールにより 0.5sec 間隔で測定された。

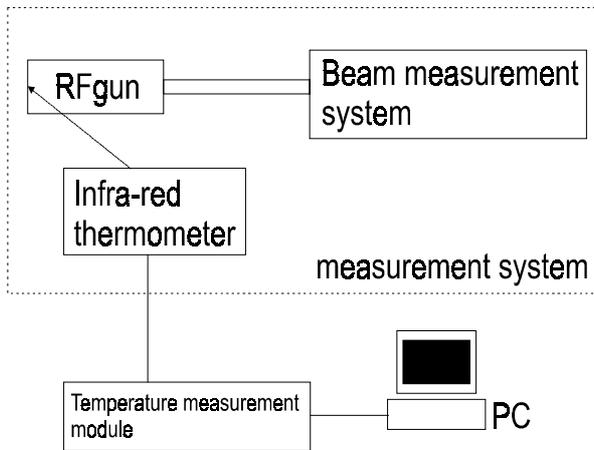


図 1 測定系の模式図

3. 実験条件及び結果

RFgun の運転条件は入射高周波電力 5.6MW、平均ビーム電流は 1010mA、共振周波数 2858.59MHz、電圧定在波比 2.01、電子ビームのピークエネルギーは 2.39MeV、マクロパルス幅 $2\ \mu\text{sec}$ 、マクロパルスの繰返し 1Hz で約 80 分間電子ビームの生成を行った。

図 2 に電子ビーム非生成時及び生成時における陰極温度の変化のグラフを示す。陰極表面の温度は電子ビーム非生成時において 1045 に保持されていた。ビーム生成時において、陰極表面の平均温度は 1067.3 となっている事がわかった。これより back-bombardment による陰極表面の温度変化がビーム生成前後で平均 20、最高 30 の温度変化があることが確認できた。さらに、ビーム生成時においては 44.5sec の温度変動が観測され、back-bombardment によるマクロパルス内での温度上昇も確認できた。

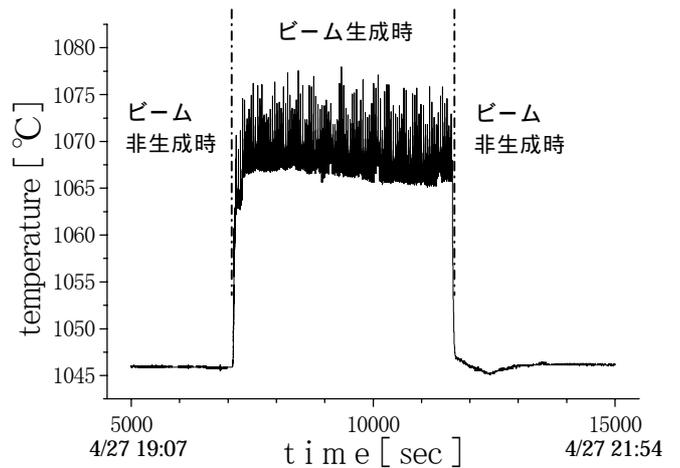
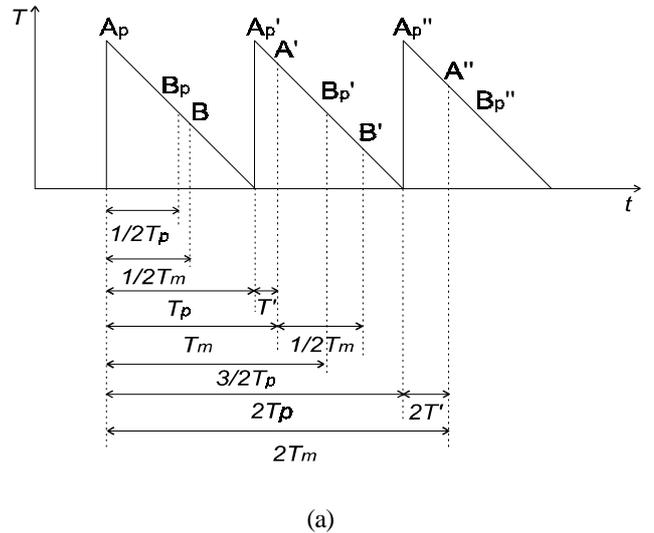
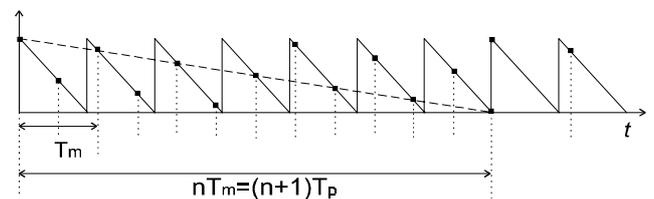


図 2 電子ビーム生成前後における陰極表面の温度測定



(a)



(b)

図 3(a)温度測定モジュールの測定周期のずれと温度勾配の周期との 1 周期分のずれ

(b) n 周期分の温度測定と周期関数の周期

この測定結果からマクロパルスの繰返し 1 周期内での温度変化を図 3 に示す原理に従って解析を行った。

今、back-bombardment は1秒毎に起り、マクロパルス内において逆流電子は $2\mu\text{sec}$ の間に熱量を加えているので、測定時刻に対する温度変化は各周期内ではほぼ単調減少になると思われる。そこで便宜上温度変化を周期 T_p ののこぎり波型の周期関数で表現する。温度計測モジュールの測定周期は T_m とし、マクロパルス内での温度変化を $1/2$ 測定周期ずつ測定するものとする。もし、測定誤差がなく、温度勾配の周期と測定周期が一致していれば、時間の経過に関わらず温度計測モジュールは図 3(a)中の点 A, B_p という2点しか測定できない。周期関数の周期と測定周期の間に周期のずれ T' があれば、周期関数は時間の経過に従って、図 3(a)の点 A, 点 B, 点 A', 点 B' ... と測定される。温度計測モジュールが再び周期関数の測定開始点を測定したときに測定周期 T_m による測定が n 回行われれば、周期関数は1周期につき1点ずつ、合計 $(n+1)$ 周期分測定されたことになる。よって、温度測定結果は見かけ上図 3(b)の破線の様に周期 nT_m となる。

今回の実験結果は、マクロパルス内での温度変化の周期と温度計測モジュールの測定周期に 0.022sec の相対的なずれがあったために、温度計測モジュールの測定が 44.5sec という長期的な周期で行われたと思われる。よって、この長周期のグラフを温度勾配の周期、つまりマクロパルスの繰返し時間で規格化することにより、実際の温度変化が明らかになると思われる。図 2 に示した 44.5sec 分の温度計測データを並べ替え、繰返し時間で規格化したグラフを図 4 に示す。これより、マクロパルスの繰返し時間内に起った back-bombardment による陰極温度の変化は約 8 であることがわかった。

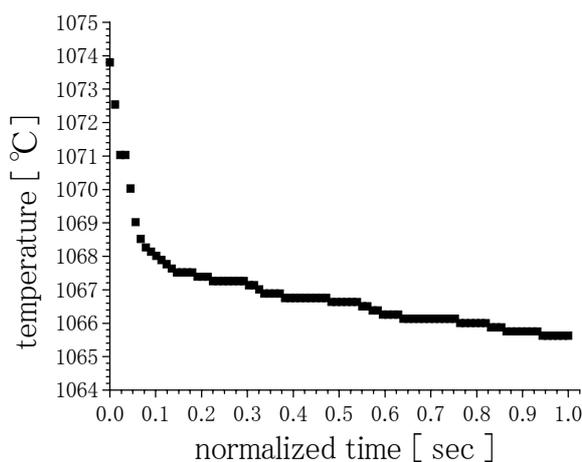


図 3 繰返し時間内における陰極温度変化

電子ビーム生成時における陰極表面の平均温度上昇

及びマクロパルスの繰返し周期内での温度変化から back-bombardment の影響を定量的に評価するには、陰極表面における熱伝導と熱輻射を考慮した熱的解析が必要である。また、この結果を比較することで KUBLAI コードの検証や高精度化を行うことが可能になる。

4. 結論

back-bombardment の効果を定量的に評価するため、熱陰極電子銃を用いた電子ビーム生成時において、陰極表面の温度測定を行なった。その結果、電子ビーム生成前後で back-bombardment により陰極表面の温度が約 20 上昇していたことがわかった。また、繰返し幅と温度計測モジュールの測定周期の相対的なずれから、マクロパルスの繰返し時間内における温度変化の測定ができる可能性が示唆された。今後は back-bombardment の定量的な評価について陰極表面における熱移動の計算及び粒子シミュレーションにより検討していく予定である。

参考文献

- [1] C.B. McKee and John M.J. Maday, Computer Simulation of Cathode Heating by Back-bombardment in the Microwave Electron Gun, Nucl. Instr. and Meth. A296(1990),716-719
- [2] Yasushi Yamamoto, Takashi Inamasu, Kai Masuda, Masaaki Sobajima, Masami Ohnishi, Kiyoshi Yoshikawa, Hisayuki Toku, Eiji Tanabe, Nucl. Instr. and Meth. A393(1997),443-446
- [3] Kai masuda, Development of Numerical Simulation Codes and Application to Klystron Efficiency Enhancement ,Ph.D thesis , Kyoto University(1997)
- [4] 稲増 崇,高周波電子銃における電子ビーム特性解析,京都大学工学部電気工学第二学科 学士論文 (1996)
- [5] Kai Masuda, Ryuta Ikeda, Tomohiko Yamaguchi,Toshiteru Kii, Kiyoshi Yoshikawa, Tetsuo Yamazaki, Present Status of RF gun for Highly Brilliant Electron Beam Production in Kyoto University, The 12th Symposium on Accelerator and Technology, Waco, Japan(1999), pp-57-59