

熱陰極型高周波電子銃における逆流加速電子の陰極表面加熱の定量的評価

山根 功士朗、 留高 烈、 紀井 俊輝、 増田 開、 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、この高周波電子銃の課題は、陰極から引き出された一部の加速電子が逆加速電界により逆加速され陰極に衝突する、back-bombardment と呼ばれる現象が発生することである。この現象により陰極表面温度が上昇し電子放出量の増加が起こるため、加速効率が低下し、電子ビームの高輝度化の妨げとなる。そこで、本研究では粒子シミュレーションと電子ビーム方向と熱伝導を考慮に入れた 1 次元熱伝導方程式を用いた解析結果、および定量的評価について報告する。

1. はじめに

自由電子レーザー (Free Electron Laser : FEL) は、従来のレーザーのコヒーレントで単色であるという特徴に加え、高出力、高効率であり、しかも発振波長が連続的に可変で、原理的にマイクロ波から X 線領域に至るまで非常に幅広い波長領域の光を得ることができる。ただし、上で述べたような優れた特徴を生かした FEL 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。高周波電子銃は、電子発生部である陰極と加速部である幾つかの加速空洞から成っており、加速空洞内に高周波電界を閉じ込め、その位相の変化によって電子を加速させる構造になっている。高周波電子銃の放電限界強度は、例えば S バンドの場合 100 MV/m 以上で、従来からの静電型電子銃の数 MV/m に比べてはるかに高く、加速勾配が大きいため、僅かな距離で光速近くまでの加速が可能である。そのため、空間電荷効果による電子ビームの広がりが小さい。また、得られる電子ビームのエネルギーも、静電型電子銃の数百 keV に比べて、数 MeV と高く、高輝度な電子ビームの生成が可能である。

しかし、高周波電子銃には次のような課題がある。陰極から引き出された一部の加速電子は逆加速電界の影響を受け逆加速されて陰極に衝突する現象が起こる。これは back-bombardment 現象と呼ばれ、陰極として熱陰極を用いた場合に起こる。その結果、陰極表面温度の上昇によって電子放出量の増加を引き起こし、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、本研究においてはマクロパルス内での逆加速電子によるビーム特性への影響を評価するために、陰極内部での電子ビーム方向の熱伝導と逆加速電子のエネルギー分布を考慮に入れた熱伝導方程式を用いてマクロパルス内での陰極表面温度上昇を評価した。

2. 実験

実験装置は高周波電子銃、高周波電源、並びに電子ビーム測定装置から成る。ここでは高周波電子銃の仕様を表 1 に示す。また、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

共振周波数	2856 MHz
空洞数	4 1/2 (side-coupled)
出力エネルギー	4 MeV
出力電流	500 mA
パルス幅	3 μ sec at 10Hz
入射高周波電力	5 MW

電子ビーム生成中の陰極表面温度を赤外放射温度計で測定するとともに、四重極電磁石、双極電磁石および各種モニターをも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い、高周波電子銃の運転条件の評価に用いた。

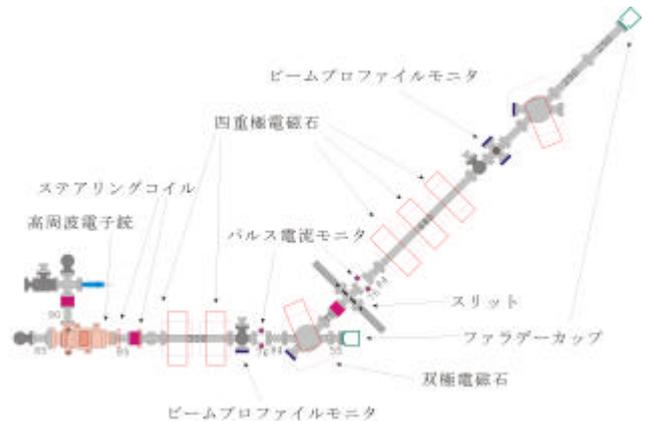


図 1 実験装置概略図

3 . 解析方法および結果

3.1 解析方法

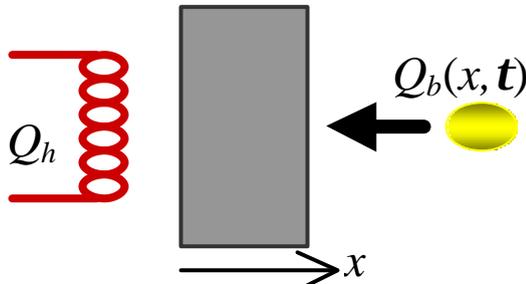


図 2 1次元熱伝導モデル

まず、陰極とその周辺に対して、

- ・ 熱の放出は陰極表面からのみ生ずる。
- ・ 陰極の裏側に存在するセラミックスに関しては、その物性値が不明なので、セラミックスもタングステンとみなし、厚さが 2 mm の陰極とする。陰極への熱供給はヒーターと逆加速電子が与える熱量のみである。
- ・ 逆加速電子が失う運動エネルギーはすべて熱量に変換する。
- ・ マクロパルス内では、陰極表面の熱は陰極内部にのみ伝導するので、熱伝導は電子ビーム方向のみ生ずる。

と仮定したモデルを考え、1次元熱伝導方程式をたてた。図 2 はそのモデルの概略図であり、(1)式に得られた陰極内の 1次元熱伝導方程式を示す。

$$CrV \frac{\partial T}{\partial t} = l \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_b(x, t) \quad (1)$$

但し、 C は陰極の熱容量、 r は陰極の密度、 V は陰極の体積、 l は熱伝導率、 T は陰極の温度、 t は時間、 x は陰極裏面からの電子銃出口方向の距離、 $Q_b(x, t)$ は逆加速電子が陰極に与える熱量を表わし、 Q_h はヒーターからの熱供給量で境界条件を求める際に使用した。本研究では陰極をタングステンと仮定し、以下の物性値を使用した。

$$\begin{cases} C = 5.67 \times 10^{-8} [J / \text{sec} / m] \\ r = 19000 [kg / m^3] \\ l = 155 [J / kg / K] \end{cases}$$

また、逆加速電子が陰極へ与える熱量は、京都大学エネルギー理工学研究所粒子エネルギー研究分野で

開発された粒子シミュレーションコード KUBLAI コード[1]を利用し計算を行なった。図 3 に入射高周波電力 4 MW、電流密度 10 A/cm²における逆加速電子のエネルギー分布を示す。

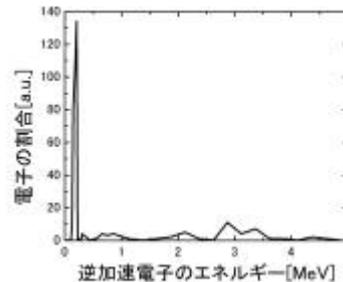


図 3 逆加速電子のエネルギー分布

3.2 解析結果

まず、マクロパルス内における逆加速電子と陰極間での熱のやり取りが電子ビーム特性に大きな影響を与えている可能性が考えられることから陰極内部の発熱分布を考慮するためのモデルとして、

- ・モデル 1 逆加速電子のエネルギーが陰極全体に付与されるとした場合。
- ・モデル 2 逆加速電子のエネルギーから陰極内での飛程を計算し、発熱分布を考慮して付与した場合。

の 2 通りを考え、陰極表面における温度上昇の結果の比較を行った。まずモデル 1 として陰極全体に 0.136 J の熱量が均等に与えられると仮定した場合を、そしてモデル 2 として電子総数の最も多い 210 keV の逆加速電子(図 1 参照)が 0.136 J の熱量を与えると仮定した場合を用いて、それぞれの陰極表面温度上昇の変化を解析した(図 4) [2] [3]。図 4 から分かるように、モデル 1 を用いて陰極表面の温度上昇を計算したところ、温度上昇は 1 程度となったが、モデル 2 では、陰極表面近くで多くのエネルギーを失い、集中的に陰極表面近傍を加熱するため、11 にも及ぶ温度上昇が計算結果として得られた。この結果より、電子ビーム特性を評価するために、陰極内部の発熱分布を考慮にいれたモデルを用いることが必要である。

次に逆加速電子のエネルギーの違いによる陰極表面の温度上昇への影響を評価するために、マクロパルス内における逆加速電子の持つエネルギーをそれぞれ 0.21 MeV, 1 MeV, 3 MeV として、陰極表面の温度上昇への影響の違いを求めた。マクロパルス内における陰極表面の温度上昇をそれぞれ 1J 当たりの温度上昇に換算して求めると、0.21 MeV のときは 166, 1 MeV のときは 31, 3 MeV のときは 9 となり(図 5)、低エネルギーの逆加速電子の影響は非常に大きいことがわかる。以上から、陰極表面の温度上昇には、低エネルギーの逆加速電子が深刻な影響を与えていることがわかる。そして、この結果から図 3 の

場合の運転条件において、電子ビーム出始めから 3 μsec の間に陰極表面温度は 1000 から 1011 へ上昇し、同時に陰極表面電流密度は 10.4 A/cm^2 から 11.7 A/cm^2 に達した。これはおよそ 10 % の増加である。[4]

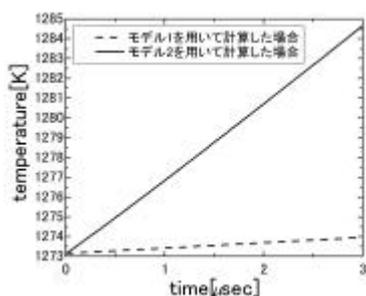


図 4 マクロパルス内における陰極表面の温度上昇

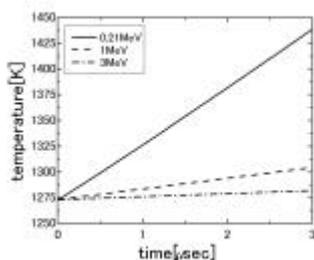


図 5 逆加速電子のエネルギーの違いによる陰極表面の温度上昇 (1 J 当たり)

4 . 結論

Back-bombardment 現象の軽減法を探るため、電子ビームに影響を与えると思われるマクロパルス内の温度上昇について 1 次元熱伝導方程式を用いることで評価した。

- マクロパルス内における陰極表面温度上昇への影響を評価するためには、逆加速電子のエネルギーが陰極全体に均等に熱量を与えるモデルよりも、陰極内部での発熱分布を考慮したモデルを用いることが重要である。
- マクロパルス内における陰極表面の温度上昇は低エネルギーの逆加速電子からの寄与が大きかった。
- 粒子シミュレーションで得られた逆加速電子のエネルギー分布を考慮に入れることにより、典型的運転条件下ではマクロパルス内で陰極表面温度が 11 へ上昇し、電流密度はおよそ 10 % 上昇することがわかった。

今後は、マクロパルス内における陰極表面の温度上昇に大きな影響を与える低エネルギー逆加速電子を外部磁場により偏向し、ビーム特性の評価を行うことを計画している。

5 . 参考文献

- [1] Kai Masuda :Ph. Dthesis, Dept. of Engineering, Kyoto Univ.
- [2] T. Kii, S. Amasaki, et al., Nucl. Instr. And Meth. (in press)
- [3] S. Amasaki, Tomohiro Horii, Kii Toshiteru, Kai Masuda, Hisayuki Toku, Hideaki Ogaki, Kiyoshi Yoshikawa, Tetsuo Yamazaki, The 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, 211 (2001)
- [4] Heat wave: 技術資料