

熱陰極型高周波電子銃における 小径陰極を用いたビーム特性向上に関する研究

宮迫 敦、林 秀輔、紀井俊輝、増田 開、大垣英明、吉川 潔、山寄鉄夫

京都大学エネルギー理工学研究所

〒611-0011 京都府宇治市五ヶ荘

概要

我々はこれまでの研究により、陰極付近に外部磁場を印加することで、逆流電子を偏向させ、Back-bombardment 現象による陰極表面温度上昇を抑えることに効果があることを明らかにした[1]。今回の研究では、京大 FEL 計画で加速器へ入射を行う運転条件（入射高周波電力 7.4 MW）のもと、PARMELA[2]による電子の軌道計算と、一次元熱伝導モデル[3]により陰極表面温度の時間変化を計算し、陰極の径の大きさによる電子ビーム特性への影響に関するシミュレーションを行った。そして、京都大学エネルギー理工学研究所における熱陰極型高周波電子銃に適切な陰極径がどのくらいの大きさであるかをシミュレーションにより確認検証した。また、その陰極にどの程度の強度の磁場を印加するのが適切であるかを確認した。

1 背景

光共振器を用いる自由電子レーザー（Free Electron Laser : FEL）では長マクロパルスの電子ビームが要求されている。高周波電子銃は従来より簡便な装置により高輝度な電子ビームを生成可能である。しかしながら、逆流電子により陰極表面が加熱される Back-bombardment 現象によって、マクロパルス内でのビーム電流やビームエネルギーを一定に保つことが困難となっており、長パルス運転が困難である。光陰極を用いた電子銃使用は問題解決の方法のひとつであるが、この方法では高周波電子銃の簡便さを損ねてしまう。そこで、これまでに我々は Back-bombardment 現象のメカニズムを研究し、低エネルギーの逆流電子がマクロパルス内での陰極表面温度上昇に大きく影響していることを確認した。

逆流電子を磁場の効果で減少させるための実験を行った結果、外部磁場を印加することにより、電子ビームの有効パルス長が伸びることを確認した[3]。また、陰極の径を小さくすれば、外部磁場により偏向された逆流電子が陰極表面に衝突する面積が減少するために陰極表面への衝突を軽減することができるので、陰極の径を小さくすることは Back-bombardment 現象対策に効果が期待できる。よって今回のシミュレーションによりこのことを検証した。

今回の研究では、京大 FEL 計画で加速器へ入射を行う運転条件のもと、PARMELA による電子の軌道計算と、一次元熱伝導モデルによる陰極表面温度の時間変化の計算により、陰極の径を変化させることによる電子ビーム特性への影響を検証すると共に、各陰極径に対して適切な磁場の強さを求めた。

2 陰極表面温度上昇

陰極表面温度上昇を確認するためにまず PARMELA により粒子シミュレーションを行い、その結果を用いて、一次元熱伝導方程式を用いたモデルにより陰極表面温度のマクロパルス内での時間変化を計算した。

2.1 粒子シミュレーション

計算条件を表 1 に示す。

表 1: 計算条件

共振周波数	2856 MHz
入射高周波電力	7.4 MW
電流密度	10 A/cm ²
電界強度 (1 st half cell)	22 MV/m
電界強度 (2 nd ~5 th half cell)	~40 MV/m
陰極直径	2 mm, 4 mm, 6mm

京大 FEL 計画で加速器へ入射予定である電子ビームの条件を作るために、入射高周波電力を 7.4 MW にした。また、陰極直径については従来より使用の直径 6 mm のもの、直径 4 mm と 2 mm のものについてシミュレーションをした。そして、各陰極に対して様々な強度の外部磁場を印加してのシミュレーションも行った。外部磁場印加用コイルは陰極直後に設置し、以下の図 1 に示すように、磁場が電子ビーム進行方向に対して垂直にかかるようにした。

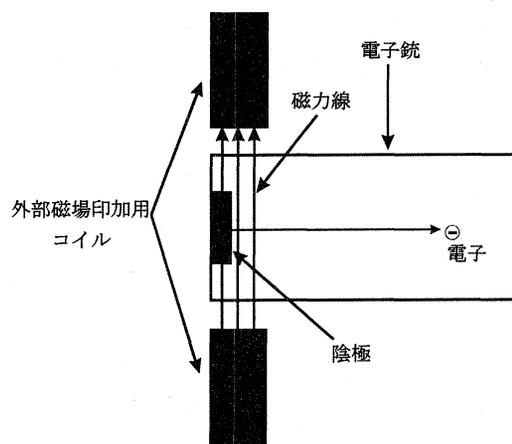


図 1: 外部磁場印加の概略図

図2にPARMELAにより計算した外部磁場印加とビーム電流の関係を示す。

陰極直径は6 mm (現在使用の陰極) と4 mm と2 mm の3種類についてPARMELAにより粒子シミュレーションを行った。また、それぞれの陰極には、0 Gauss、26 Gauss、32 Gauss、48 Gaussの磁場を印加した条件のもとでのシミュレーションを行った。その結果、図2より判断すると、直径2 mm、4 mm、6 mmの陰極においては径にかかわらず、50 Gauss以上の磁場を印加するとビーム電流の引き出しがほとんど無くなってしまった。これは、外部磁場強度を強くしすぎることにより、引き出し電子ビームそのものも偏向されてしまい、電子銃の空洞に衝突してしまうためだと考えられる。また、26 Gaussの外部磁場印加の条件までは引き出しビーム電流の様子はそれほど変化がなかった。

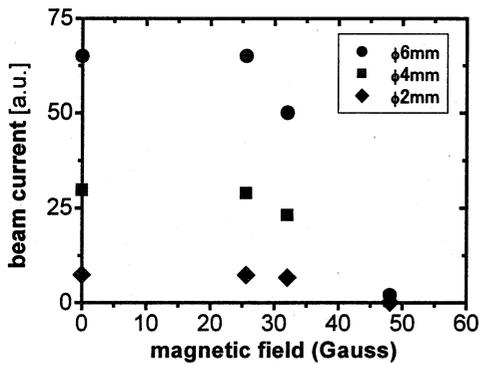


図2：外部磁場印加とビーム電流

2.2 一次元熱伝導モデルによる陰極表面温度上昇

一次元熱伝導方程式によるモデルによって、直径2 mm、4 mm、6 mmの3種類の径の陰極について、外部磁場を印加しない条件のもとで、陰極表面温度上昇を計算し、陰極径による陰極表面温度上昇への影響について調べた。図3に陰極径の違いによる表面温度上昇の時間発展を示す。

図3より、陰極径を小さくすることにより、陰極表面温度上昇を抑えることが可能であることが分かる。

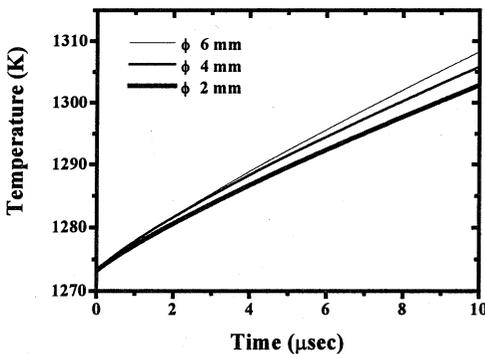


図3：径の違いによる陰極表面温度上昇

次にそれぞれの陰極に対して、0 Gauss、26 Gauss、32 Gauss、48 Gaussの磁場を印加した条件のもとで、一次元熱伝導モデルを用いて温度上昇の計算を行い、印加磁場強度による影響についても検証した。その陰極表面温度上昇の結果を図4、5、6に示す。

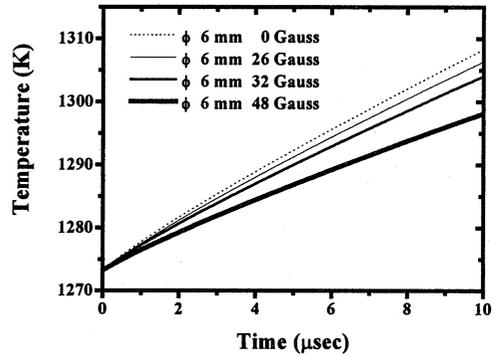


図4：陰極表面温度上昇 (陰極直径：6 mm)

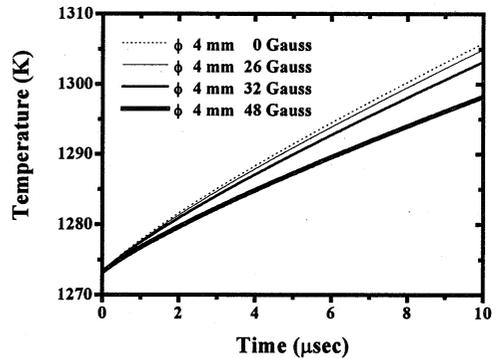


図5：陰極表面温度上昇 (陰極直径：4 mm)

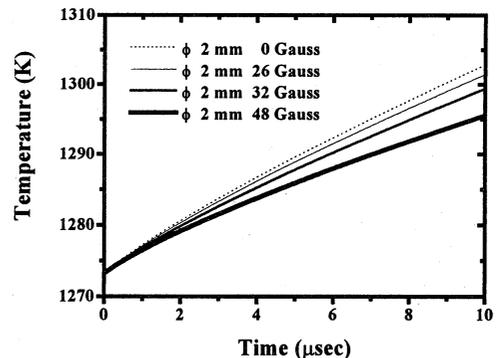


図6：陰極表面温度上昇 (陰極直径：2 mm)

2.3 陰極表面温度上昇の様子の評価

図4、5、6よりどの径の陰極に対しても、印加磁場強度を強くするにつれて陰極表面温度上昇を抑えることが可能であることが分かった。また、どの陰極に対しても 26 Gauss の磁場では陰極表面温度上昇をそれほど大きく抑えることはできなかった。よって陰極表面温度上昇を抑える効果を大きくするためには、それ以上の強度の外部磁場を印加する必要があることが分かった。

また、図2より外部磁場印加強度を大きくしすぎることにより引き出しビーム電流は小さくなってしまふので、京大 FEL 装置においては、Back-bombardment 現象による陰極表面温度上昇を大きく抑え、かつ、適度なビーム電流を引き出すためには、どの径の陰極に対しても約 32 Gauss の外部磁場を印加するのが適度であると考えられる。

よって、以下の図7に各陰極に対して 32 Gauss を印加した条件のもとでの陰極表面温度上昇の様子を示す。

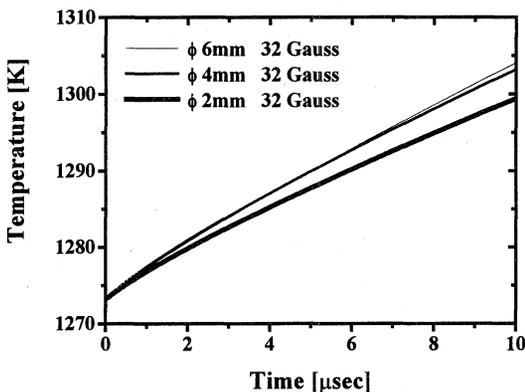


図7：印加磁場 32 Gauss のもとでの陰極表面温度上昇

2.4 陰極表面温度上昇の評価

以上より入射高周波電力 7.4 MW の条件においても、外部磁場が Back-bombardment 現象による陰極表面温度上昇に対して効果があることが確認され、また、陰極の径を小さくすることによる効果も確認された。

これまでの実験ではマクロパルス内での温度上昇が約 15 °C までであれば電子銃からビームを引き出すことが可能であった[1]。よって入射高周波電力 7.4 MW の条件でのマクロパルス幅を、温度が 15 °C 上昇するまでの時間として評価すると、従来の実験条件である、直径 6 mm の陰極に外部磁場の印加をしないという条件では、マクロパルス幅は 3.8 μsec が得られる。一方、直径 2 mm の陰極に 32 Gauss の外部磁場を印加する場合、パルス幅は 5.2 μsec となる。よって、直径 2 mm の陰極に 32 Gauss の外部磁場を印加することでパルス幅は従来より 36 % 増加することが期待できる。

3 まとめ

今回の PARMELA と一次元熱伝導方程式を用いた一次元熱伝導モデルによる計算によるシミュレーションにより Back-bombardment 現象対策としては、径の小さな陰極を用いることが有効であり、さらに適切な強度の外部磁場を印加することでその有効性はさらに大きくなり、陰極表面温度上昇を抑えることが可能であることを確認することができた。

具体的には高周波電力 7.4 MW を入射し、直径 2 mm の陰極を用いて、外部磁場を 32 Gauss 印加することで、パルス幅は 5.2 μsec まで伸び、加速管に入射する電子ビームの特性としてはある程度満足のいくものが生成されると予想される。近日中に、今回行ったシミュレーションの条件で実験を行い、陰極の径と最適な外部磁場印加強度の組み合わせについて検証する予定である。

参考文献

- [1] 宮迫 敦, et al. “外部磁場印加による熱陰極型高周波電子銃のビーム特性の改善”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (July 30- August 1, 2003, Tokai, Japan) p200-202
- [2] James H. Billen, Loyd M. Young. PARMERA, chapter LA-UR-96-1835.2002.
- [3] T. Kii, et al., Nucl. Instr. and Meth. A 483(2002)310-314