

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

宮迫 敦¹、 林 秀輔、 紀井 俊輝、 増田 開、 大垣 英明
吉川 潔、 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。本研究では、back-bombardment現象の軽減方法として、高周波電子銃の外部から磁場を印加することで陰極表面に衝突する逆流電子を偏向する実験を行い、その効果を評価した。

1. はじめに

自由電子レーザー (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といった特徴を有する。ただし、このような優れた特徴を持つ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。

しかし、高周波電子銃では、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back-bombardment現象が起こる。熱陰極を用いた場合、電子の陰極への衝突により陰極表面温度が上昇し、電子放出量の増加を引き起こす。その結果加速効率が低下し、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。

我々は、マクロパルス内での逆流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。その結果、陰極表面温度上昇に低エネルギーの逆流電子が大きく影響し、これらを取り除くことで陰極表面温度上昇を大幅に抑えることが可能であることが分かった[1]。

そこで本研究では、back-bombardment現象の軽減

表 1 : 高周波電子銃の仕様

共振周波数	2856 MHz
空洞数	4 1/2 (サイドカップル)
出力エネルギー	4 MeV
出力電流	500 mA
パルス幅	3 μ sec at 60 Hz
入力高周波電力	5 MW
カップリング係数 β	3.24

方法として、高周波電子銃の外部から磁場を印加することで陰極表面に衝突する逆流電子を偏向する実験を行い、実験により測定された電子銃の出力電子ビームの特性から、外部磁場印加によるback-bombardment現象の軽減方法を評価した。

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。高周波電子銃の仕様を表 1 に、実験装置の概略図を図 1 に示す。

本実験に用いた外部磁場印加用コイルは、逆流電子を偏向するためのもので、図 2 のように陰極付近にC型コイルを設置した。

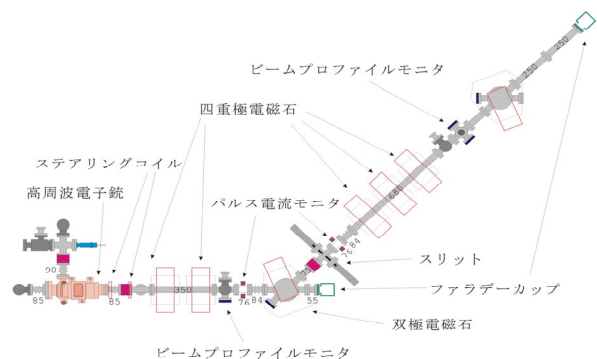


図 1 実験装置概略図

¹ E-mail: a-miyasako@iae.kyoto-u.ac.jp

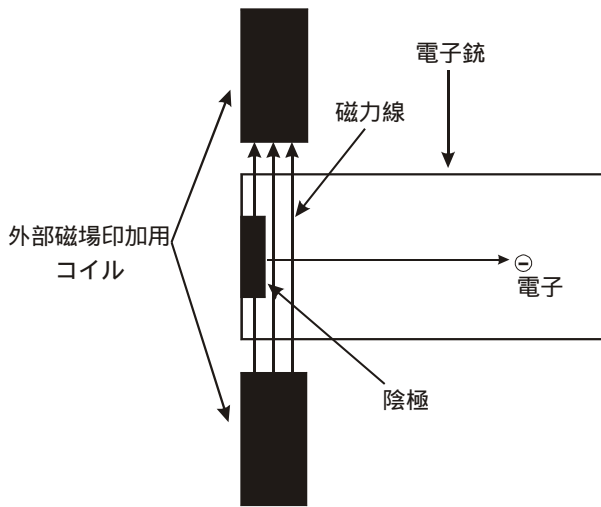


図2 外部磁場印加の概略図

3. 実験結果

今回の実験では、パルス幅と出力ビーム電流、電子ビームエネルギーを外部磁場印加の条件のもとで測定した。出力ビームの電流とエネルギーは、外部磁場印加により変化が予想される出力電子ビームの特性を調べるために測定した。

この時の運転条件は、陰極表面温度1017 Kであり、電子銃に投入した高周波はパルス幅6 μs で電力 $P_{in}=3.48$ MWであった。

3.1 パルス幅と外部磁場の関係

パルス幅は加速効率が低下し、電子銃からビームが引き出されなくなるまでの時間と定義し、双極電磁石の前のパルス電流モニタ (CT) を用いて測定した。

図3より、外部磁場を強めるに従って、出力電子ビームのパルス幅が延びているのが分かる。また、このことより、外部磁場を印加することが、逆流電子の陰極への衝突を回避し、陰極表面温度上昇を抑えることに効果があるものと予想される。

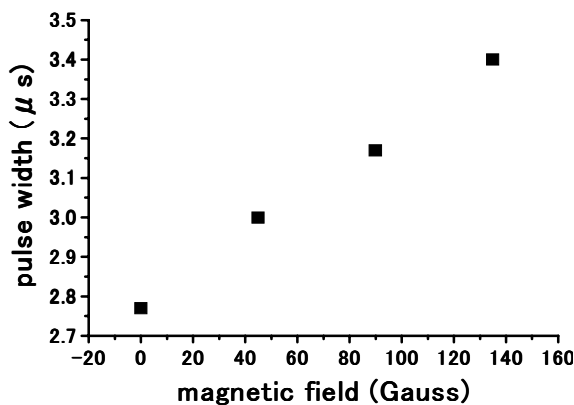


図3 パルス幅と各外部磁場の関係

3.2 出力電子ビーム電流と外部磁場の関係

出力ビーム電流は直線ビームライン末端のファラデーカップを用いて計測した。

図4より、外部磁場を強めるに従って、出力電子ビーム電流が減少していることが分かる。このことは、外部磁場印加によって、電子銃内で逆流電子だけでなく出力電子ビームも偏向されてしまうために、電子銃内で電子ビームが壁に衝突して消失するので電流が減少してしまっていると考えられる

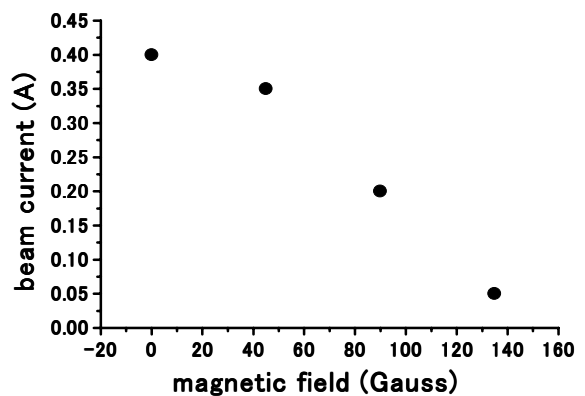


図4 電流と各外部磁場の関係

3.3 出力電子ビームエネルギーと外部磁場の関係

出力電子ビームエネルギーは、双極電磁石とビームライン末端のファラデーカップを用いて測定した電荷量をもとに、平均エネルギーとして算出した。

図5より、印加磁場約15 Gaussまでは出力電子ビームエネルギーの上昇が見られたが、それ以降はあまり変化が見られなかった。印加磁場により逆流電子だけでなく、磁場の影響を受けやすい低エネルギー出力電子も偏向し、消失したために平均エネルギーが多少上昇したものと考えられる。

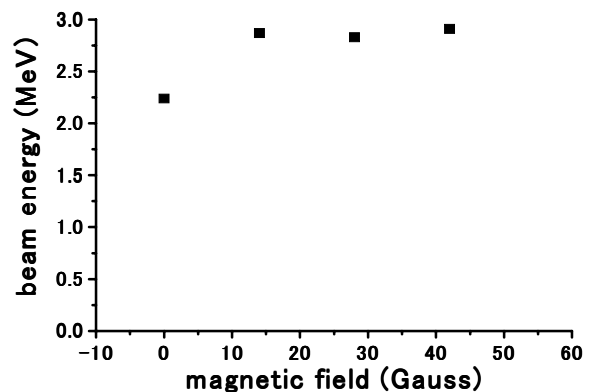


図5 出力電子ビームエネルギー

4 . 考察

図4, 5より、逆流電子を偏向するための外部磁場として有効と考えられるのは約20 Gauss程度であると考えられる。図3より、20 Gaussの外部磁場を印加した時の電子ビームのパルス幅は約3.06 μs であり、外部磁場を印加しなかった場合に比べて約0.4 μs 伸びていることになる。

20 Gaussの外部磁場をかけた状況について、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を行った。粒子シミュレーションにはParmela(V3.27)[2]を用いて逆流電子の個数とエネルギーを求めた。尚、V3.27からParmelaでは外部静磁場のバックグラウンドを取り入れる計算が可能になっている。そこで、本コイルにより発生できる磁場分布の3次元分布を、計算コードRadia[3]を用いて計算し、これをParmelaに入力した。熱伝導シミュレーションには本研究グループで開発した計算コード[4]を用いた。

図6にその結果を示す。図6より、外部磁場を印加していない時の陰極表面温度上昇はマクロパルス長3.0 μs の間に11.5 Kであるのに対して、20 Gaussの外部磁場を印加した時の陰極表面温度上昇は10.3 Kであり、約10.4 %温度上昇を抑えられることが示された。また、外部磁場を20 Gauss印加した際の温度上昇のシミュレーション結果を外挿すると、およそ0.33 μs の時間経過後に外部磁場を印加した場合の陰極表面温度が、外部磁場を印加しなかった場合の陰極表面温度に到達する。この値は実験で得た値である0.4 μs とほぼ一致している。

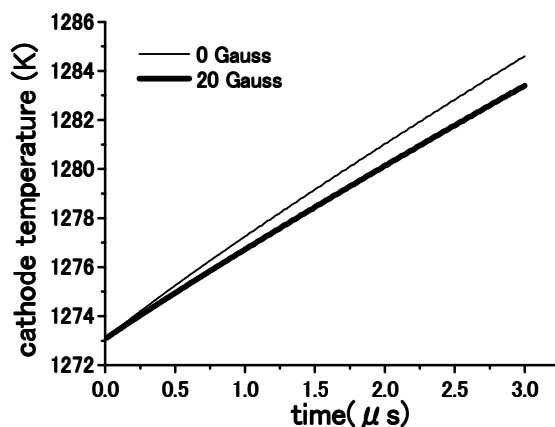


図6 陰極表面の温度上昇計算結果

5 . 結論

今回の実験により分かったことを以下に示す。

- 外部磁場を印加することによって、出力電子ビームのパルス幅を伸ばすことができる(20 Gaussの外部磁場を印加することで、出力電子ビームのパルス幅が約0.4 μs 伸びることが測定できた)。また、粒子と熱のシミュレーション計算により外部磁場の印加をすることで逆流電子の陰極表面への衝突を回避し、陰極表面温度上昇を抑えることに効果があることが分かった。
- 印加する外部磁場として20 Gauss程度が、本実験の条件では最適であると考えられる
- 外部磁場の印加することで電子ビーム特性を大幅に改善するには至らなかった。
- 外部磁場を印加することで出力電子ビームの電流値を下げてしまい、出力電子ビーム特性が劣化するという問題点が生じることが分かった。

今後はこれらの問題点に留意して、ビーム特性の更なる改善を試みる必要がある。

6 . 今後の方針

本研究の結果よりback-bombardment現象のより効果的な軽減方法について検討する。陰極表面温度上昇に大きな影響を与える低エネルギーの逆流電子が陰極表面に衝突することを回避するためには、陰極半径を小さくすることが考えられる。これは、陰極半径が小さいと、弱い磁場でも逆流電子の陰極表面への衝突を回避することができ、また、出力電子ビームにも影響が少なくなると考えられるからである。

よって陰極半径を小さくし、かつ最適な外部磁場を印加することで、より電子ビーム特性の改善に繋がるものと考えられる。

7 . 参考文献

- [1]山根 功士朗：京都大学エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻修士論文(2003)
- [2]James H.Billen Loyd M.Young.PARMERA,chapter LA-UR-96-1835.2002.
- [3]P. Elleaume, O. Chubar and J. Chavanne : Proc. PAC97 Conference, Vancouver, "Computing 3D Magnetic Fields from Insertion Devices" (9P27) (1997)
- [4]T.Kii,et al.,Nucl.Instr.and Meth.A 483(2002)310-314