

赤外自由電子レーザー用熱陰極 RF 電子銃の性能評価

小田史彦^{1,A)}、横山 稔^{A)}、三浦秀徳^{A)}、傍島正朗^{A)}、小池英仁^{A)}、能丸圭治^{A)}、河合正之^{A)}、黒田晴雄^{B)}

^{A)} 川崎重工業株式会社 技術研究所

〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118

^{B)} 東京理科大学 総合研究所 赤外自由電子レーザー研究センター

〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641

概要

川崎重工業(株)が開発した中赤外領域の自由電子レーザー装置 (KHI-FEL)の電子源/初段加速部として用いられている熱陰極型 RF 電子銃について、そのビーム特性を測定したところ、バックボンバードメントによる影響 (マクロパルス内の電流増加・マクロパルス繰り返し数の制限)は空洞構造のみならず、カソード材質・形状にも大きく依存することがわかった。以下この測定結果について考察する。

1. はじめに

川崎重工業(株)は小型リニアックをベースとしたコンパクトな中赤外領域の自由電子レーザー装置 (MIR-FEL)を開発^[1]し、1999年東京理科大学赤外自由電子レーザー研究センター(FEL-SUT)^[2]に設置を完了、2000年7月に初発振を達成、同9月に FEL 出力が飽和値に達し、現在は FEL のユーザー利用への供給を開始している^[3]。

この装置の電子源/初段加速部として用いている

熱陰極型 RF 電子銃は非常にコンパクトな構成で高輝度の電子ビームを発生させることができるという特徴を持つ反面、陰極からの放出電子の一部が RF 減速位相により陰極方向に逆加速され、マクロパルス内で陰極温度が上昇する現象(バックボンバードメント)によりマクロパルス長、マクロパルス平均電流及びマクロパルス繰り返し数が制限されることはよく知られている。

本 FEL 装置に用いている RF 電子銃の空洞形状を図 1 に示す。この空洞の基本構造は二つの加速空洞の間に結合空洞を持つ On-axis Coupled Structure (OCS)であり、第 1 加速空洞の電界強度を比較的小さくする(～25 MV/m)ことにより、カソード表面へのバックボンバードメントパワーを低減している。シミュレーションコード(EMSYS)による計算では OCS 空洞のバックボンバードメントパワーは同じビームエネルギーを発生させる単空洞の約 50%であることが確かめられている^[4]。以下 OCS 空洞のビーム特性について述べると共に、OCS 空洞と単空洞の比較、およびカソード材質による比較を行った結果から考察を行う。

2. OCS 空洞 RF 電子銃のビーム性能

現在 FEL 装置は OCS 空洞には LaB₆ 単結晶を実装したものを用いて運転を行っている。図 2 上段に FEL 運転モードにおける(a)RF 反射及び(b)ビーム電流のマクロパルス時間波形を示す。ここでビーム電流波形については RF 電子銃下流側の α マグネット部で低エネルギービームのカットを行い平坦な時間波形が得られるように調整している。ビーム電流は主加速管 (3m CG structure)の前(CM1)、後(CM2)及びアンジュレータ下流側(CM3)において測定したものであり、RF filling time に相当する立ち上がり部(～0.5 μ s)を除いてほぼ 100%のビームをアンジュレータ下流まで輸送することに成功している。この運転モードでは平均電流値 120 mA (36 pC/bunch)、マクロパルス幅は flat top 部で約 5.5 μ s を得ている。ビーム電流値及びマクロパルス幅はバックボンバードメントにより制限されており、ビーム電流を大きくするとマクロパルス幅 (の flat top 部) が短くなる。またミクロパルス長は OTR 光の時間構造をストリークカメラ (Hamamatsu, FESCA-200)で測定^[5]した結果、2～3 ps

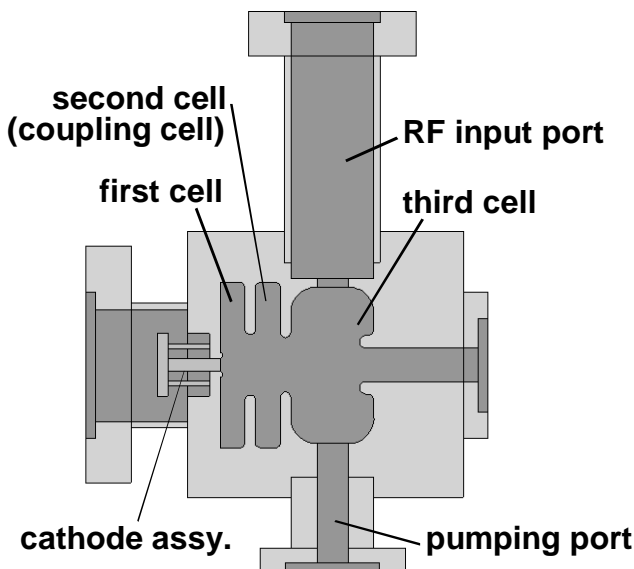


図 1 : OCS 空洞の断面図

¹ E-mail: oda_f@khi.co.jp

と評価した。パンチ長を 2.5 ps と仮定するとピーク電流値は約 17 A となる。

RF 電子銃からの出力エネルギー分布の測定結果を図 2 下段に示す。A~E の記号は図 2 上段の時間軸に配した記号 A~E に対応する。マクロパルス後半に行くに従って、マクロパルス内での電流増加に伴うビ

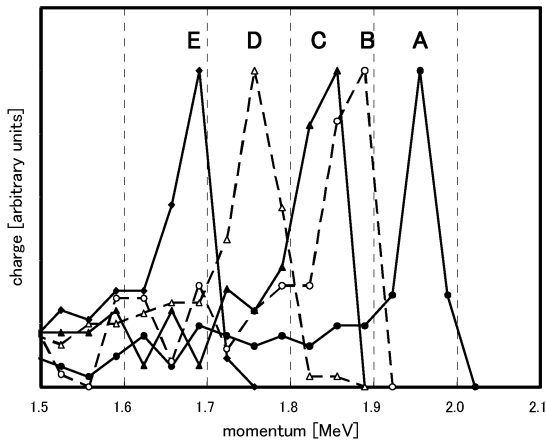
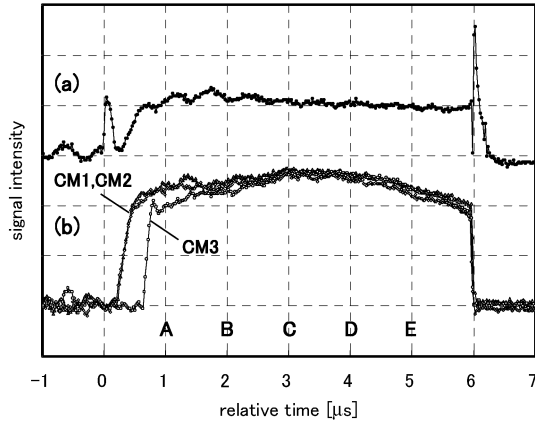


図 2 上： (a)RF 反射及び(b)ビーム電流値のマクロパルス時間波形(50 mA/div.)

下： RF 電子銃からの出力エネルギー分布

ームローディング増加によりビームエネルギーが低下している(1.95 MeV→1.68 MeV)。

カソード表面近傍にはバックボンバードメントを低減するために横方向の磁場を印加し逆加速される電子を偏向させている。この横方向磁場 (B_x) の効果を調べるために、 $B_x=0, 70, 100$ Gauss 印加条件下でマクロパルス繰り返し数を変化させたときにカソードから同じエミッションを得るためのカソードヒータ電力を測定した結果を図 3 に示す。各条件ともマクロパルス繰り返しの増加と共にカソードヒータ電力は単調に減少しており、バックボンバードメントによりカソード温度が上昇していることを示している。また図 3 において、マクロパルス繰り返し数に対す

る必要なヒータ電流減少の傾きはマクロパルスあたりのバックボンバードメントパワーを示しており、

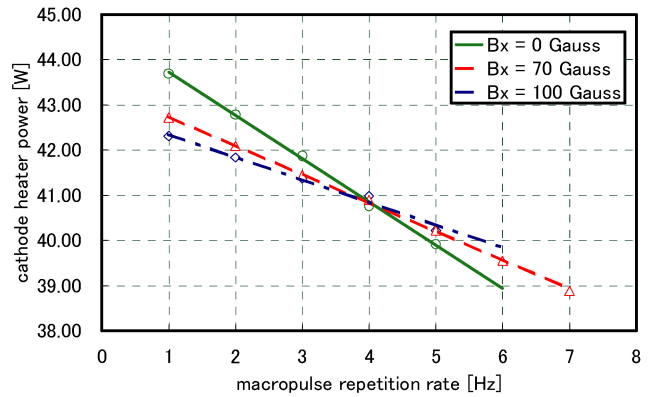


図 3：エミッションを一定に保つためのカソードヒータ電力とマクロパルス繰り返し数の関係 (OCS 空洞 RF 電子銃)

$B_x=0, 70, 100$ Gauss に対してそれぞれ 0.98, 0.64, 0.50 W/pulse と見積もられる。この結果は B_x の印加によりカソード表面へのバックボンバードメントの影響は低減していることを示唆している。しかしビームシミュレーションによるとバックボンバードメントパワーは $B_x=0$ で 0.06 W/pulse と見積もられ、測定結果とは一桁以上の差がある。これはバックボンバードメントとヒータによる加熱とでは、カソード温度上昇への寄与の効率に差があることを示していると考えられる。

3. 単空洞 RF 電子銃との比較

本 FEL 装置に単空洞 RF 電子銃^[6]を取り付け OCS 空洞 RF 電子銃との性能比較を行った。実装したカソードは共に LaB₆ 製である。ただしカソード直径は OCS 空洞が 1.7 mm に対し、単空洞は 3.0 mm のものを用いた。

単空洞 RF 電子銃について、OCS 空洞 RF 電子銃で得られるビーム電流とほぼ同じ条件(平均ビーム電流値 100 mA、マクロパルス幅 5.5 μ s、 $B_x=70$ Gauss)で図 3 と同様の測定を行った結果を図 4 に示す。

図 4 の結果よりマクロパルスあたりのバックボンバードメントパワーは OCS 空洞の約 6 倍の 3.49 W/pulse と見積もられ、OCS 空洞では単空洞に比べてバックボンバードメントの影響が低減されていることを示している。

また、マクロパルス繰り返し数はバックボンバードメントにより制限されており、繰り返し数を大きくするとエミッションが不安定となる現象が OCS 空洞、単空洞共に観測された。安定なエミッションを保てる最大繰り返し数は OCS 空洞が 10 Hz 以上であったのに対して、単空洞では約 2 Hz であった。この結果も OCS 空洞ではバックボンバードメントが低減されていることを示唆するものと考えられる。

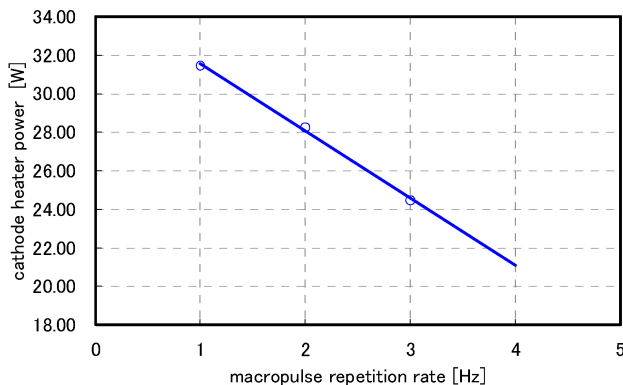


図4：エミッションを一定に保つためのカソードヒータ電力とマクロパルス繰り返し数の関係 (単空洞 RF 電子銃)

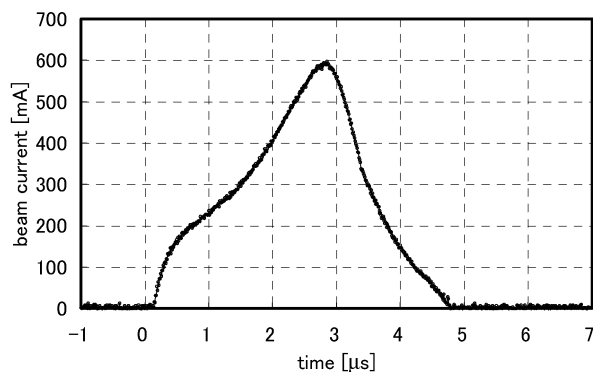


図5：OCS 空洞 RF 電子銃に dispenser タイプカソードを実装したときの電流波形の例

4. カソード材質による比較

OCS 空洞に dispenser タイプ(W-BaO,CaO,Al₂O₃)カソード(直径 6.0 mm)を実装してビーム電流特性を調べたところ、マクロパルス内での電流上昇が LaB₆カソードを用いた場合に比べて遙かに大きく、マクロパルス幅は 3 μs 以下に制限された。図5に dispenser タイプカソードを用いたときの電流波形の例を示す(但し図5では低エネルギービームのカットは行っていない)。ビーム電流はマクロパルス内で急激に増加し、マクロパルス開始から 3 μs 以降はビームローデ

ィングによる周波数シフトのためビームエネルギーが急激に低下している。

dispenser タイプカソードで急激な電流増加が起こる原因として以下が考えられる。

- 1) カソードの仕事関数(～2.4 eV)が小さく、運転時のカソード温度が低い(～1000℃)ため、温度上昇によるエミッション増加量が大きい。
- 2) カソード径が大きい(6.0 mm)ため、カソード面へのバックボンバードメントパワーが大きい。
- 3) ヒータ電力が比較的小さい(～25 W)ためバックボンバードメントパワーによる影響が相対的に大きい。

5. まとめ

小型リニアック FEL 装置(KHI-FEL)の電子源として新開発した OCS 空洞 RF 電子銃により、平均電流 120 mA、マクロパルス幅 5.5 μs のビームを加速することに成功し、現在は定常的に FEL のユーザー利用運転を行っている。マクロパルスの繰り返し数とカソードヒータ印加電力の関係から、横方向磁場の印加がバックボンバードメントの低減に有効であることが判った。また単空洞 RF 電子銃との比較により OCS 空洞がバックボンバードメントの影響を低減していることが確認された。LaB₆カソードと dispenser タイプカソードの比較により、空洞形状のみならずカソード材質・形状等がマクロパルス内の電流上昇には大きく影響していることを示唆する結果を得た。バックボンバードメントを定量的に理解し、その影響を最低限に抑える最適化設計を行うためには、カソード部の熱伝導及び熱輻射を含めた解析を行う必要があると考えられる。

参考文献

- [1] M.Yokoyama, F.Oda, H.Koike, A.Sobajima, M.Kawai, K.Nomaru, H.Hattori, H.Kuroda, Nucl. Inst. and Meth., to be published.
- [2] H.Kuroda, M.Kawai and A.Iwata, Proc. of the 12th Russian Synchrotron Radiation Conference (1998)
- [3] M.Yokoyama, F.Oda, H.Miura, H.Koike, A.Sobajima, M.Kawai, K.Nomaru, H.Hattori, H.Kuroda, Nucl. Inst. and Meth., Proc. of this meeting.
- [4] F.Oda, M.Yokoyama, A.Nakayama and E.Tanabe, Nucl. Instrum. & Methods A 429 (1999) 332
- [5] F.Oda, M.Yokoyama, M.Kawai, M.Sobajima, H.Koike, to be published in Nucl. Instrum. & Methods A
- [6] Ch,Tang, Y.Lin, J.Xie, D.Tong, Y.Wu, Y.Wang, X.Zhao, Nucl. Instrum. & Methods A 421 (1999) 406