

[F16p08]

Design study of a $\pi/2$ mode standing wave RF gun with a thermionic cathode

Fumihiko Oda^a, Minoru Yokoyama^a, Akihiro Nakayama^a and Eiji Tanabe^b

^aKawasaki Heavy Industries Ltd.
118 Futatsuzuka, Noda, Chiba, 278 Japan

^bAET Associates, Inc.
1-3-4 Kamiasao, Asaoku, Kawasaki, Kanagawa, 215 Japan

A new type of RF gun with a thermionic cathode was designed. The fundamental design of the RF gun is the $\pi/2$ mode standing wave structure with two accelerating cavities and a couple-cavity located on the beam axis, so called on axis couple structure (OCS). This structure offers much stable operation for high beam current, owing to high group velocity and wide bandwidth. It is important to decrease damage onto the cathode by back bombardment especially for long macropulse operation, such as an FEL injector. Back bombardment as well as output beam profiles was simulated by using electromagnetic field analytic codes 'EMSYS'. The cavity was designed so as to minimize the back bombardment power without sacrificing beam emittance.

$\pi/2$ モード定在波型熱陰極 RFGUN の設計

1. 熱陰極 RFGUN の概要

高周波電子銃(RFGUN)は静電型電子銃に比べてはるかに大きな電界により電子を加速するためエミッタンスの増加を最小限に抑えることができ、かつ静電型電子銃+バンチャーのシステムに比べて装置を大幅に小型化できる。特に熱陰極を用いた RFGUN は、装置全体として小型・安価であり、カソード寿命についても信頼性の高い材質の製品が開発されている。その一方で RF の逆位相によりカソード方向に逆加速された電子(バックボンバードメント)により、放出電流が異常に増加するため、マクロパルス幅が制限されるという欠点がある。バックボンバードメントを低減し、長マクロパルス運転が可能となれば、熱陰極 RFGUN は小型・安価でかつ信頼性の高い入射器としてさらに幅広い応用が可能になる。

2. 本設計の目的

本設計では赤外領域のリニアック FEL への適用が可能な S-band 熱陰極 RFGUN の設計を目的とした。要求される電子ビームのスペックを表 1 に示す。

ピーク電流値	>	30	A
規格化エミッタンス	<	20	π mm-mrad
ビームエネルギー	>	1.5	MeV
エネルギー幅(FWHM)	<	60	keV
マクロパルス長	>	3	μ s

表 1 電子ビームの要求スペック

要求仕様を満たすためには、良好なエミッタンスを保ちながら、大ビームカレントを加速するためビームローディングに対して安定であること及び長マクロパルス運転を可能とするためバックボンバードメントを低減するこ

とが必要である。

3. シミュレーションコード

本設計には AET 社の円筒対称 2 次元電磁場解析・粒子軌道計算コード“EMSYS”を用いた。本コードは空洞内の電磁場中における粒子の運動の時間発展を解くものであり、粒子間及び粒子と空洞の相互作用を考慮している。このコードを用い、入力 RF、カソードのパラメータ及び空洞形状の最適化を行った。

4. 空洞形状

本設計では、2 つの加速空洞をビーム軸上の結合空洞により結合した構造(on-axis couple structure)[1,2]を採用することとした。図 1 に最適化された空洞の概形を示す。

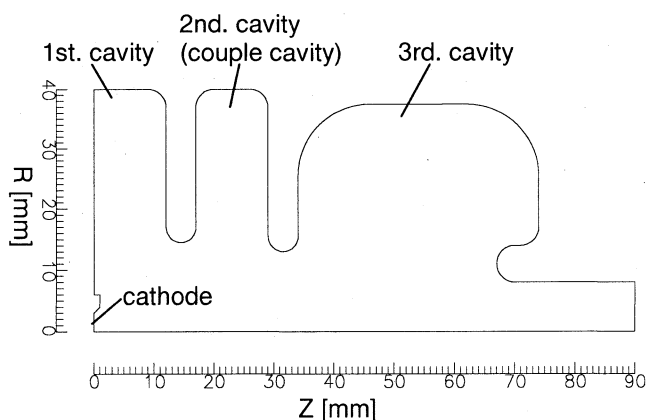


図 1 本設計による最適化空洞形状

第2空洞は結合空洞(couple cavity)であり、各加速空洞とはビーム軸上で電氣的に結合している[3]。この構造は、以下のような特徴を持っている。

- (a) 励振モードがRFの群速度が最大である $\pi/2$ 定在波モードであるので、ビームローディングに対して非常に安定で、チューニングが容易である。
- (b) 結合定数比を変えることで、第1空洞と第3空洞の電界強度比を自由に設計できる。
- (c) 空洞全体として軸対称の構造であり、製作の容易性に優れている上に、ビームに影響を与える非対称なモードの発生を極力抑えることができる。

図2に最適化形状の軸上電界分布を示す。

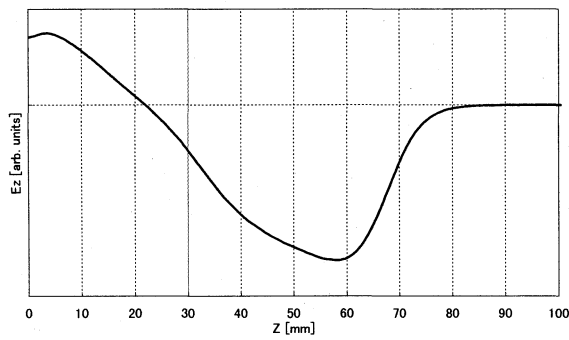


図2 軸上電界強度分布

5. ビームダイナミクス

表2に入力RF及びカソードのスペックを示す。

放出電流密度	16 A/cm ²
カソード径	ϕ 6 mm
入力RFパワー	4.5 MW
入力カプラ結合定数	6

表2 入力RF・カソードのスペック

カソードは酸化陰極を用いることを仮定し、計算に用いた電流密度は16A/cm²である。

第1空洞・第2空洞間の結合定数を k_{12} 、第2空洞・第3空洞間の結合定数を k_{23} とすると、次のような関係が成り立つ[4]。

$$k_{12} / k_{23} = \{(R/Q)_1 V_3\} / \{(R/Q)_3 V_1\}$$

ここで $(R/Q)_n$ は第n空洞のシャントインピーダンスを表す。従って、空洞間結合定数比(k_{12}/k_{23})を変えることで、第1空洞と第3空洞の電界強度比を変えることができる。この特長を生かし、ビームエミッタンスを犠牲にすることなく、バックボンバードメントが最小になるように形状及び電界強度比(空洞間結合定数比)を最適化した。

最適化空洞のスペック及びビーム軌道解析の結果を表3に示す。また出力ビームのエミッタンスプロット及びエネルギー分布を図3に示す。

空洞間結合定数	k_{12}	3.6 %
	k_{23}	1.4 %
カソード上電界		30 MV/m
最大軸上電界		65 MV/m
最大表面電界		140 MV/m
ピーク電流値		30 A
規格化エミッタンス		11 π mm-mrad
ビームエネルギー		1.9 MeV
エネルギー幅(FWHM)		30 keV

表3 最適化空洞と出力ビームのスペック

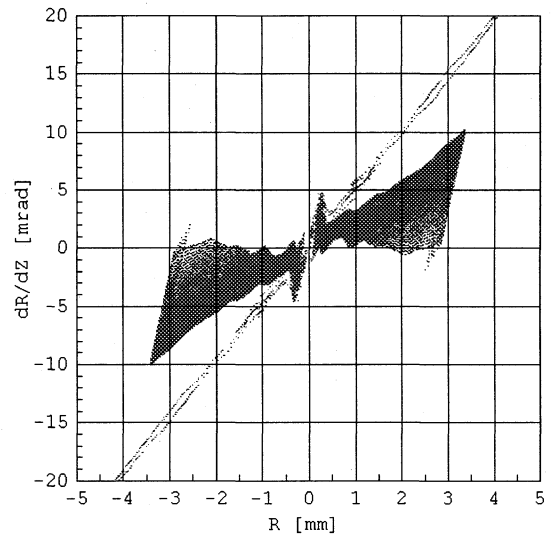


図3 出力ビームのエミッタンスプロット

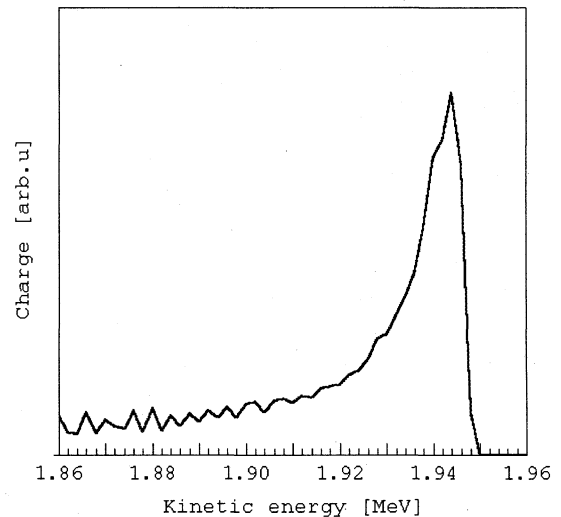


図4 出力ビームのエネルギー分布

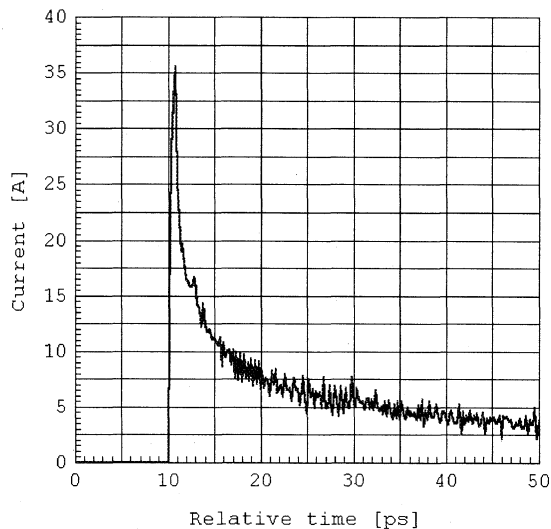


図5 出力ビームの時間分布

6. バックボンバードメント

本設計による RFGUN と、BNL タイプ 1.6 空洞 RFGUN[5](カソードは同じものを用いたと仮定した。)についてバックボンバードメントの比較を行った結果、約 40%バックボンバードメントパワーを低減することができた。マクロパルス長 $5 \mu\text{s}$ 、繰り返し数 10pps とすると、平均バックボンバードメントパワーは約 1.1W となる。

本設計の最適化空洞と BNL タイプ空洞のバックボンバード電子のエネルギー分布を図 6 に示す。

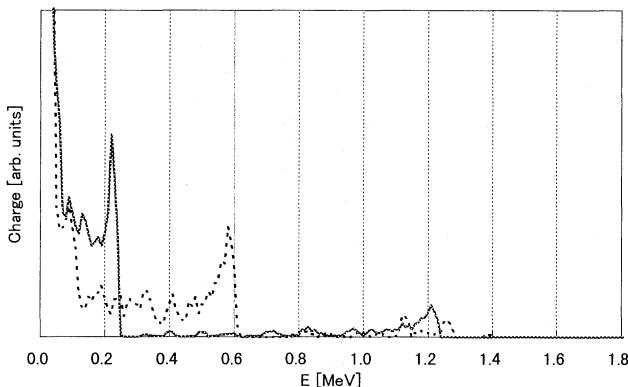


図6 バックボンバード電子のエネルギー分布
(実線:本設計、点線:BNLタイプ)

図4より、第1空洞及び第3空洞(第2加速空洞)から逆加速された電子を表すピークが見られ、本設計空洞では、第1空洞からの電子のピークのエネルギーが小さく(約 $0.6 \rightarrow 0.2\text{MeV}$)なっており、第1空洞の電界強度を小さくしたことで、第1空洞からの電子の寄与が大きく減少していることがわかった。

バックボンバードメントパワー密度の径方向分布を図7に示す。

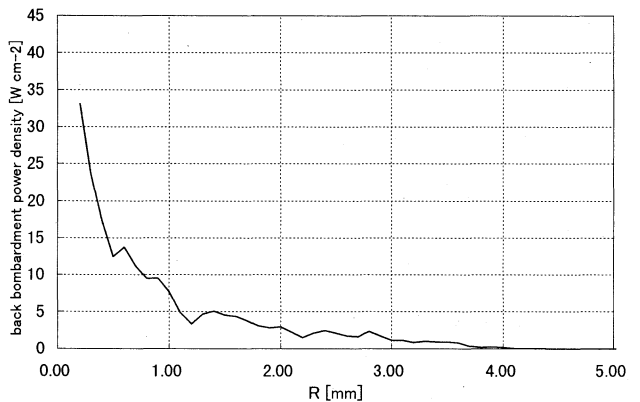


図7 バックボンバードメントパワー密度の径方向分布

図7よりカソード中心部ほどバックボンバードメントパワー密度が大きいことがわかる。これは第1空洞及び第3空洞(第2加速空洞)から逆加速された電子がカソード中心付近に収束しながら衝突することが原因であることがわかった。

カソード中心に穴を開け、中心部へのバックボンバード電子をビームダンパで受ける構造のカソードを用いれば、バックボンバードメントの影響を大幅に低減することができると考えられる。

7. まとめ

ビームローディングに対して非常に安定な、新しい構造(on axis couple type)の RFGUN 空洞についてシミュレーションコードを用いた最適化設計を行った。結合空洞との結合定数比(k_{12}/k_{23})により、第1空洞と第3空洞の加速電界比を大きく変えることができ、バックボンバードメントについてはこの特徴を活かして、大幅に低減できることを示した。また、中空構造のカソードを用いることでさらにバックボンバードメントの影響を低減できることを示した。

今後、本設計を基にモックアップ空洞による低電力試験、空洞の製作・試験を順次行っていく予定である。

Reference

- [1]T. Nishikawa et al, Rev. Sci. Inst. **37**, 652, (1966)
- [2]E. A. Knapp et al, Rev. Sci. Inst. **39**, 979, (1968)
- [3]Y. Yamazaki, Proc. 1992 Linear Accel. Conf., 580, (1990)
- [4]M. Foley et al, Proc. 1993 Part. Accel. Conf., 852, (1993)
- [5]D. T. Palmer et al, Proc. 1995 Part. Accel. Conf., 982, (1995)