

DEVELOPMENT OF LOW-EMITTANCE PHOTO-CATHODE RF-GUN FOR SuperKEKB

Fusashi Miyahara[#], Takashi Sugimura, Satoshi Ohsawa
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

Abstract

In order to obtain a low-emittance and high-intensity electron beam for the SuperKEKB, improvement of the BNL type photocathode RF gun is studied by using numerical simulation. It was found that the electric field shape near the cathode surface strongly affected the beam size and emittance at the gun exit. The simulation predicted that the improved RF gun would give the normalized emittance of 8 mm mrad at a high charge of 5 nC/bunch.

SuperKEKBのための低エミッタンスフォトカソードRF電子銃開発

1. はじめに

KEKB ファクトリーの SuperKEKB 計画では低エミッタンスのナノビーム・スキームを追求し、ルミノシティをこれまでの 40 倍にする計画である。ナノビーム・スキームでは光学口径が KEKB のときにくらべてはるかに小さくなりビーム寿命が一桁短くなるため、入射ビームのバンチ当たりの電荷量もこれまでの 1nC から 5nC へ増やす必要がある。また、要求されるエミッタンスも KEKB に比べて一桁以上小さい。このため、電子陽電子リナックの改造・性能向上が必要となった[1,2]

これまで KEKB/PF 入射器では低エミッタンスの大電流ビーム生成を目的として KEK-ATF で運用実績のある BNL 型の 1.6 セルフカソード RF 電子銃[3]を基礎とした電子銃と Disk-and-Washer 型の RF 電子銃[4]の開発を並行して行ってきた。フォトカソード RF 電子銃では熱陰極 RF 電子銃で問題となるビームのバックボンバードメントによるビーム電流の不安定性が無い。バンチャが不要であるため、DC 電子銃で起こるバンチ圧縮過程でのエミッタンス増加を避けられる。また、陽電子生成用の大強度ビーム (10 nC/bunch) の電子源として既存の DC 電子銃をそのまま利用せざるを得ない場合も想定されるが、その場合でもコンパクトな構成の RF 電子銃は DC 電子銃との共存が容易である利点をもつ。

本稿ではバンチ当たりの電荷 5nC に対応するための BNL 型の電子銃の改良点と General Particle Tracer (GPT) [5]を用いたシミュレーション結果を報告する。

2. 電子銃・レーザーシステム

KEK-ATF の RF 電子銃ではソレノイドによる収束を最適化した構成で電荷量 1.6 nC に対して横方向のエミッタンス 1.3 π mm mrad を達成している。カソードに Cs₂Te を用いる事で電荷量 3.2 nC までの運転実績がある。また、真空を保ったままカソード表面のクリーニングと Cs₂Te の真空蒸着が可能なロードロックシステムも実用化している[3,6]。

表 1 に電子銃と目標とする電子ビームのパラメータ

とをまとめる。カソード表面の最大電場は ATF での運転実績のある 120 MV/m 程度を目指す。SuperKEKB では長期連続運転が要求されるため、カソードの安定性が重要となる。Cs₂Te は初期の量子効率率は約 1~10%と高いが、寿命 (1/e) が 1 nTorr の環境下で 100 時間程度と比較的短く、長期運転には 0.1%台での設計が必要になる。今回のような 50 Hz で数カ月連続運転を目指すには安定なカソードの確立が必須である。そこで量子効率は低いものの (10⁻⁵~10⁻⁴)、長寿命な Cu カソードの適用を検討している。量子効率の低さを補い、高い電荷を得るため波長の短いレーザーの利用を検討した。通常、フォトカソードでは波長 260 nm 付近のレーザーが用いられるが、波長を 200 nm にする事で 2 桁程度の量子効率の向上が期待できる。現在、中心波長 800 nm、パルス圧縮前のエネルギー 15 mJ の Ti:Sapphire レーザーシステムから 4 倍波を発生させ、波長 200 nm、200 μ J/pulse 級のハイパワーレーザーの試験を開始している。SuperKEKB へのリング入射で要求される規格化エミッタンスは 20 mm mrad 以下であり、電子銃から後ろのコンポーネントでのエミッタンス増加を考慮すると電子銃出口での規格化エミッタンスは 10 mm mrad 以下が要求されるとして電子銃開発を行っている。

表 1: 電子銃の仕様と目標とするビームパラメータ

RF frequency	2856 MHz (S-band)
Field on cathode	~ 120 MV/m
Material of cathode	Cu, Cs ₂ Te
Laser Pulse (FWHM)	0.7~1.4 psec
Bunch charge	~5 nC
Normalized Emittanc	< 10 mm mrad
Bunch Length	1.3 mm
Energy Spread σ_E/E @7 GeV	0.08%
Repetition	50 Hz

3. シミュレーションを用いた評価

はじめに、GPT を用いて既存の BNL 型の電子銃で 5 nC の電荷を低エミッタンスで後のコンポネンに輸送可能かどうか調べた。空洞内部の電場は SUPERFISH を用いて計算した。表 2 にシミュレーション条件をまとめる。粒子が受ける横方向の力がビーム軸からの距離に比例する場合はエミッタンスが保存されるため、空間電荷効果による力が軸からの距離に比例する様に横方向の分布は理想的な一様分布とした。

表 2: シミュレーション条件

空間電荷効果ルーチン	Spacecharge3Dmesh
マクロ粒子数	6000
カソード表面の最大電場	120 MV/m
レーザースポットサイズ	1.75 mm (一様分布)
レーザーパルス幅	4 psec (一様分布)

電子銃出口でのビームサイズとエミッタンスが最小となるバンチの乗る初期位相を探したところ -60° 付近が良い事が分かった。図 1 に空洞内部でのビームサイズとエミッタンスの変化の様子を示す。黒色の丸が改良前、赤色の三角と青色の四角は空洞を改良 (後述) した後の計算に対応している。

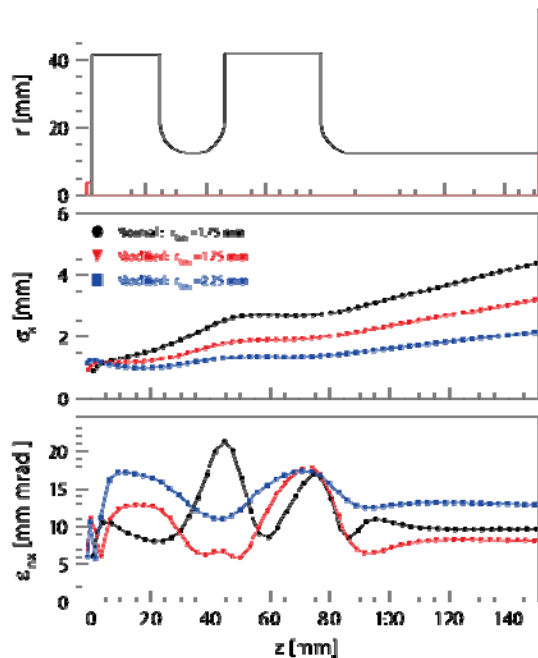


図 1: 空洞内でのビームサイズ σ_x と規格化エミッタンス ϵ_{nx} の変化の様子。黒色の丸は空洞改良前、赤色の三角は改良後に対応している。青色の四角は改良後の空洞でレーザースポットサイズを 2.25 mm とした計算に対応する。

ビームの広がりや空洞内の横方向の電場と空間電荷効果が原因である。エミッタンスはエネルギーの低いカソード近傍で決まっており、空洞内部の横方向

の電場が強い場所での増加はみかけの変化である。BNL 型をそのまま用いた場合、規格化エミッタンスは 10 mm mrad と十分小さいが、問題点はビームサイズの増加率が大きいことである。電子銃出口でのビームサイズ (Gaussian σ) が約 4 mm となっている。このビームを、加速管を通せるまで収束させるには 1T のソレノイド磁場が必要となってしまう (ATF のソレノイドは DC で 0.15 T 付近で運用している)。さらにソレノイドを用いて収束させた場合、エミッタンスの急激な悪化 (>100 mm mrad) を招く事が分かった。

バンチの電荷が大きい場合、強い空間電荷効果により方位角方向の速度が変化し、ソレノイド内での軸方向の速度が変化すること、動径方向の運動と粒子分布の変化に伴う粒子の作る電場の変化が原因でエネルギーが変化することが原因で動径方向に働くローレンツ力に非線形性が生じてエミッタンスが悪化することが分かっている [7]。したがって輸送可能な低エミッタンスビームを作るためには電子銃から放出される電子ビームの大きさとその変化率を可能な限り小さくする事が重要なポイントとなる。

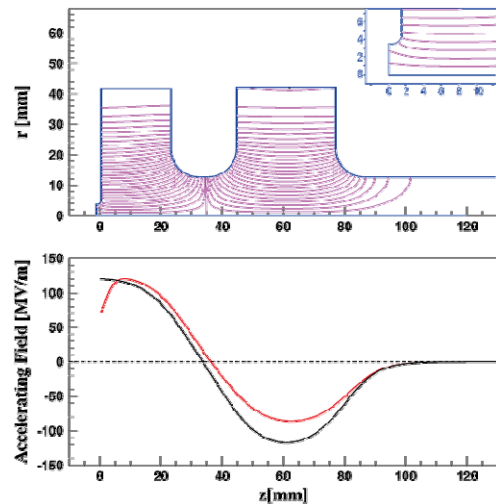


図 2: 空洞の構造と加速電場。上段は π モードのときの改良後の空洞の構造と空洞内の電気力線の様子、下段の実線は改良前 (黒色) と改良後 (赤色) の軸上の電場を表す。

4. 電子銃の改良のポイント

ビームサイズの増加はカソード近傍のエネルギーが低い部分での空間電荷効果による広がりや空洞の構造から決まる電磁場の横方向の発散力が原因である。図 2 上図に示した空洞内部の電気力線 (図は改良後に対応しているがカソード近傍を除けば改良前もほぼ同じ分布) から各セルの出口で電場による発

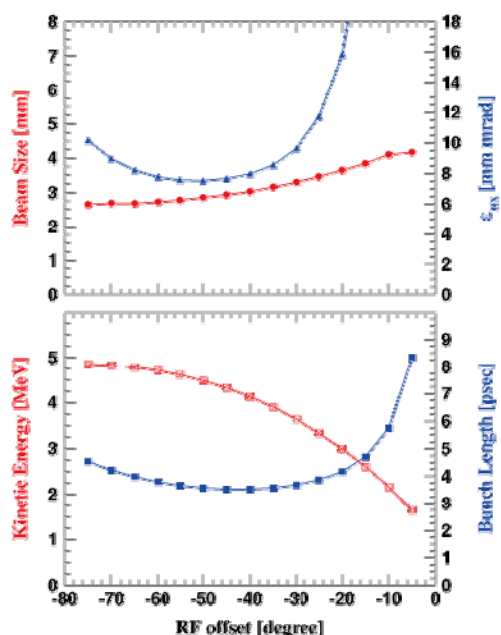


図3：電子銃出口 ($z=0.13\text{m}$) におけるビームサイズと規格化エミッタンス (上段)、平均の運動エネルギーとバンチ長 (下段) の初期位相依存性。

散力を受ける事がわかる。また、各セルの前半では磁場による収束力を、後半では発散力を受けている。横方向の電磁場は軸から遠ざかるほど大きくなるため、ビーム系を小さくすることが電磁場の悪影響を減らすことになる。

そこで空洞の図2に示す様に端盤にくぼみを持たせカソード近傍で収束力が生じる様に改良を試みた。カソード近傍ではバンチの外側は空間電荷効果で動径方向に約 18 MV/m の電場による力を受けるため、これよりも大きな収束電場を得られる様にくぼみの深さと半径を調整したところ、深さ 1.5 mm 、半径 3.5 mm 程度で良い事が分かった。ロードロックシステムのカソード部分は直径で 15 mm あるため改良のための加工は容易である。また、SUPERFISHによる計算から共振周波数の変化は -0.3 MHz であった。これはチューナーの調整、または端盤の微調整で対応する予定である。図2下段は改良前後の軸上の電場を示している。電場はカソードセルの最大電場が 120 MV/m とした。改良後のビームサイズとエミッタンスの変化を図1に赤色の三角で示した。ビームサイズが約 1 mm 、規格化エミッタンスが 2 mm mrad 程度減少したことが分かる。青色の四角はカソード表面でのレーザースポットサイズを 2.25 mm とした計算で、エミッタンスは 13 mm mrad となるが、ビームサイズがさらに 1 mm 小さくなっている。カソード表面でのレーザースポットサイズは電子銃から後ろのコンポーネントも含めた最適化が必要である。

改良後のビームサイズ、規格化エミッタンス ϵ_{nx}

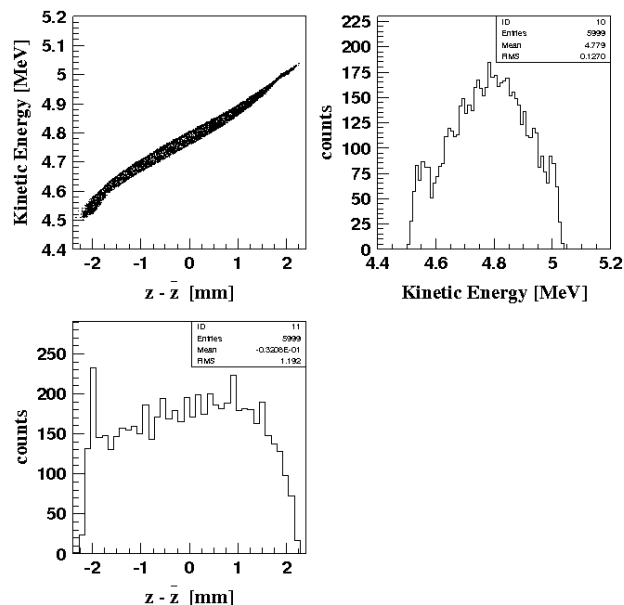


図4：電子銃出口 ($z=0.13\text{m}$) に縦方向位相空間分布。横軸はビームの中心位置からのずれ、縦軸は運動エネルギーを表す。右図と下図はそれぞれ運動エネルギーとビーム位置方向への射影を表す。

と平均の運動エネルギー、バンチ長の初期位相依存性を図3に示す。ビームサイズは初期位相を早める事で減少し、 $-40\sim -60^\circ$ 付近で 8 mm mrad の低エミッタンスビームを得た。運動エネルギーとバンチ長(Gaussian σ)はビームサイズとエミッタンスが小さくなる -60° 付近でそれぞれ 4.8 MeV 、 3.8 ps となった。バンチ長は空間電荷効果の影響で伸びているがバンチ圧縮をせずに S-band の加速管に入射することが可能である。

図3に電子銃出口での縦方向位相空間分布を示す。空間電荷効果でバンチ前方のエネルギーは上がり、後方は下がっている。バンチ長は RMS で 1.2 mm で電子ビームの要求を満たしている。またエネルギー広がり RMS で 2.7% となった。エネルギー広がりはこの後 7 GeV まで加速するので、要求に比べて十分小さくなる。

5. まとめと今後の課題

SuperKEB の要求を満たすため、入射器の増強が必要となった。ATF で開発された BNL 型のフォトカソード RF 電子銃のカソード側端板をわずかに掘り下げることによって 10 mm mrad 以下の低エミッタンス電子ビームを生成可能であることが分かった。今回はレーザースポットサイズやくぼみの形状の最適化までは行わなかったため、最適化によりさらにビームのサイズとその変化率及びエミッタンスを小さくできる可能性がある。

また、今回の計算ではレーザーが一様分布であることを仮定したが、現在のレーザーシステムでは横方向に一様な分布を作る事は困難であるため、レーザーの光学系の開発やカソード部分の改良が必要である。

さらに電子銃から後のコンポーネントの設計を含めた評価が今後の課題である。

参考文献

- [1] T. Sugimura, et al., "The LINAC UPGRADE PALN FOR SUPERKEKB", Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, May 23-28, 2010.
- [2] T. Kamitani, et al. "UPGRADE OF KEKB INJECTOR LINAC FOR SUPERKEKB", Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010.
- [3] N. Terunuma, et al., "Improvement of an S-band RF gun with a Cs₂Te photocathode for the KEK-ATF", Nucl. Instr. And Meth. A631(2010) 1.
- [4] T. Natsui, et al, "SuperKEKB 用高電荷低エミッタンス DAW 型高周波電子銃の開発", Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [5] General Particle Tracer, <http://www.pulser.nl/gpt/>
- [6] 照沼信浩、他、"フォトカソード RF 電子銃カソードロードロックシステム",第 27 回リニアック技術研究会、2002 年 8 月.
- [7] B.E. Carlsten, "Emittance Growth of an Intense Electron Beam", Proceedings of 17th IEEE Particle Accelerator Conference (PAC97:1997), 1914