

高電圧短パルスエミッターを用いた RFGun の設計研究

長谷川 豪志,* 早野 仁司^{a)}

総合研究大学院大学加速器科学専攻 茨城県つくば市大穂 1-1

a) 高エネルギー加速器研究機構 茨城県つくば市大穂 1-1

Abstract

RFGun は、これまで低エミッタンス電子銃として実用化され一定の成果を上げてきた。しかし、さらに低エミッタンス化を行う場合加速勾配を引き上げる必要があり、それによる RF エミッタンスの増加という相反する問題と放電限界の問題を解決するかあるいは使用周波数を上げなければならない。そこで、RFGun に非常に短いパルス電圧を印可し $\sim 1\text{GV/m}$ の高い加速勾配でビーム加速出来る全段加速機構を作ることによって、放電限界の上昇と RF エミッタンス抑制を行う方式について検討を行った。本報告では、この電子銃の概要及びシミュレーションについて報告する。

はじめに

KEK-ATF では、将来のリニアコライダー実現に向けて低エミッタンス、マルチバンチビームの生成、ビーム測定系の開発を行っている。この一貫として熱電子銃とバンチャー系からなるインジェクター部をフォトカソードを用いた RFGun に置き換えるべく 2001 年には銅カソードを用いたシングルバンチビーム実験、2002 年には Cs-Te を用いたマルチバンチビーム生成実験を行った。これら一連の実験結果に基づき、2002 年 10 月の運転からインジェクター部に RFGun を常設しビームの高品質化に向けた R&D を進めている。そして、これまでの研究から KEK-ATF においても数 $\pi\text{mm.mrad}$ のエミッタンスが得られるまでになっておりビームの低エミッタンス化に RFGun は、一定の成果を上げている [1, 2]。

しかし、RFGun を用いて今以上の低エミッタンス化を考えた場合 RF 効果によるエミッタンス増加を最小にする為には低い周波数が要求され、空間電荷効果によるエミッタンス増加を抑える為には更に高い加速勾配、つまりは高い周波数が要求される。これらの限界を上回り、低エミッタンス化を進める方法として RFGun のカソード直前にエミッターを設置し、非常にパルス幅の短い高電圧を印可し初期加速したビームを RFGun 空洞に導入し更に加速する事が考えられている。

パルス高電圧を印可することで RF 効果によるエミッタンス増加がなく、また非常に短いパルスのため放電限界電圧が引き上げられ初期加速勾配が非常に高くなり空間電荷効果によるエミッタンス増加を更に抑制できる。これまでのシミュレーションから RFGun での最小エミッタンスは、ハーフセルでほぼ決まっており同じエネルギーまで十分の一の距離で加速できるこの方法はビームの低エミッタンス化に非常に有効である。またこの電子銃の実用化を考えた場合、ATF においては RFGun 部分の製作、調整、実機の運用は過去 2 年間で経験しておりエミッター部分の開発を重点的に行うこと

が出来る。

今回は、実用化に向けて高電圧短パルスエミッターを用いた RFGun についてのシミュレーション結果について報告する。

パルス電圧とエミッター

この電子銃で用いるパルス電圧として、次の条件を満たす事が必要である。

1. 電圧パルス幅は、ビーム幅より十分長くエミッターを通過しているビームを加速し続ける。しかし、放電限界を十分引き上げることが出来る長さである事。
2. パルス電圧による加速勾配が、RF による加速勾配より高くなるようピーク電圧、電極間距離を決める。

我々が用いているレーザーは、約 10ps@FWHM 程度であるため数 ns のパルス幅を考えれば十分である。またパルス電圧での放電を考えた場合短いほど限界は引き上げられる。このシミュレーションでは電極間距離を 2mm、電圧を 2MV とした。そのとき加速勾配は 1GV/m となり RFGun のカソード表面での加速勾配と比べても非常に高いものとなり上記の条件を満たす。ここで電極間距離を 2mm とした場合、10ps のレーザーパルスは約 3mm のためビーム先端が加速区間を過ぎてビームはすべて生成されていないことになる。電圧のパルス幅をビームに対して十分取っている為ビームが存在するときは、電極間に DC 電圧が印可されている。よって以下のシミュレーションでのエミッター部分は、DC 電圧での加速として扱うことにする。

シミュレーション

シミュレーションコード

今回の研究においてエミッターの電場とエミッタンス補正用ソレノイド磁場、及び RFGun 加速空洞内電場の計算は、それぞれ POISSON-SUPERFISH[3] を用いて行った。更にこれらのコードで計算した電磁場の結果をマップ情報として General Particle Tracer(GPT)[4] に取り込みシミュレーションを行った。

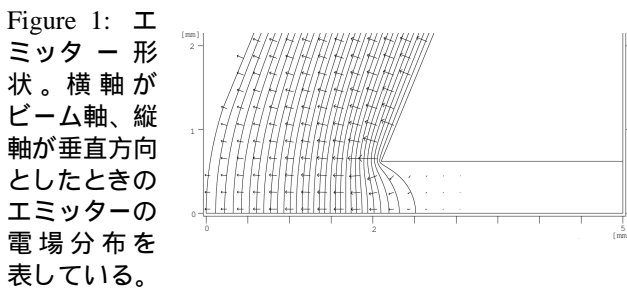
GPT は、ビームを指定したレーザー幅で引き出すことができる。つまり 10ps のレーザーは 10ps の時間間隔で電子をカソードから引き出している。更に全マクロ粒子について指定した時間幅で計算、出力させる事が出来る為各コンポーネント内でのビーム軌道を時間もしくは空間でトレースすることが可能である。また、今回使用した空間電荷効果の計算 (3D) は個々のマクロ粒子同士の相互作用を直接計算している為、計算上の仮定は含まれていない。

* khase@post.kek.jp

以下のシミュレーションでは、ビーム生成部のエミッターとエミッターに RFGun 空洞を接続した場合についてそれぞれ行った。

エミッター

Poisson で計算した形状と電場分布を図 1 に示す。引き出されたビームは電極間で加速後アノード孔と RFGun ハーフセルで発散方向の電場を受ける。よってカソードを半径 4mm の球面とし、近傍をウェネルト電極形状とした。これによりビームは収束力を受けて RFGun 空洞に導入される。またアノードまでの距離は、高電界を確保する為 2mm とした。



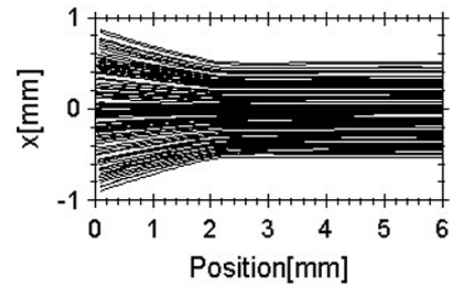
入射レーザーは、ビーム軸に対して進行方向と横方向に分けそれぞれガウス分布 ($\pm 3\sigma$) と均一分布 ($r=0.9\text{mm}$) を仮定した。レーザーサイズは、ATF での運転において実際に取り出されているビームの電荷量とそのときのカソード上レーザースポットサイズを仮定したうえで最大電流密度を計算し、1nC を取り出す事が出来る最小半径を下回らない大きさ ($r>0.56\text{mm}$) で最適化した値である。また粒子の初期エネルギーとして 0.4eV を仮定し、均一に速度分布を与えた。以上のエミッターにおける初期条件を表 1 にまとめる。

Table 1: エミッターの初期条件

カソード 電位	-2MV
カソード 半径	1.25mm
カソード 曲率	4mm
電極間距離	2mm
アノード 孔	1.24mm
電荷量	1 nC
レーザーパルス幅 (FWHM)	10 ps
レーザーサイズ (均一)	1.8 mm
粒子の初期エネルギー (均一)	0.4eV

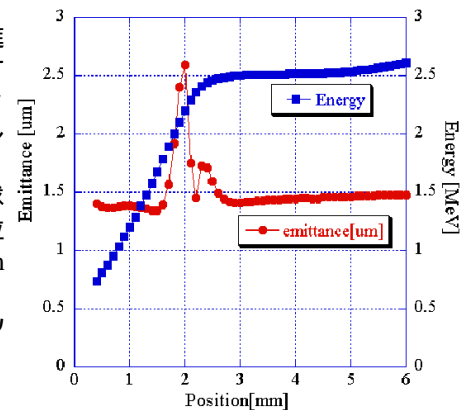
この条件の下、シミュレーションを行った。図 1 は、マクロ粒子 100 個を仮定したときの Horizontal 平面に射影したビーム軌道の変化を進行方向に対して示している。球面カソードを仮定している為外側の粒子が $z=0.2\text{mm}$ から放出されており、収束効果でアノード孔での発散が抑制されていることが分かる。このビームが受ける加速電場は、アノード孔が有る為完全な平行平板の場合に比べて低くなる。しかし、カソードから引き出された粒子が受ける平均の加速勾配は、 $>0.65\text{GV/m}$ となっており

Figure 2: 進行方向に対するビーム軌道の変化。ビームが球面上から引き出されている事と収束されている様子が分かる。



RFGun と比較して 6 倍以上大きい。図 3 は、進行方向に対するエミッタンスとエネルギーの変化をプロットしたグラフである。アノード孔を通過した粒子の平均エネルギーは、2MeV を越えており RFGun 単体時のハーフセルでの加速分を 2mm の電極間で達成している。その為エミッター部分でのエミッタンス増加が抑制されている事が分かる。 $z=5\text{mm}$ (RFGun カソード表面の位置) では、電荷量: 0.99nC、ビームエネルギー: 2.5MeV、エネルギー幅: 0.13%、パンチ長 (FWHM): 16.1ps、R.M.S 規格化エミッタンス: $1.47\pi\mu\text{m}$ という計算結果を得た。

Figure 3: 進行方向に対するエミッタンスとエネルギーの変化。カソードが球面の為測定位置は 0.3mm から始まり、0.1mm ステップでプロットしている。



エミッター & RFGun 空洞

次にエミッター出口 ($z=5\text{mm}$) を RFGun のカソード面として RFGun 空洞で更に加速する。図 4 に Superfish で計算した RFGun の電場分布を示す。RFGun には先端に Poisson で計算したエミッターと同じ形状を最上流に

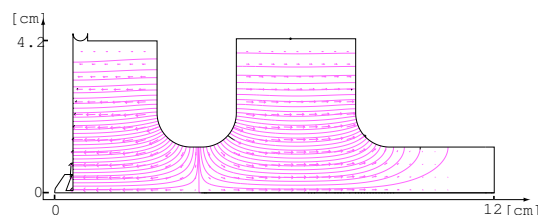
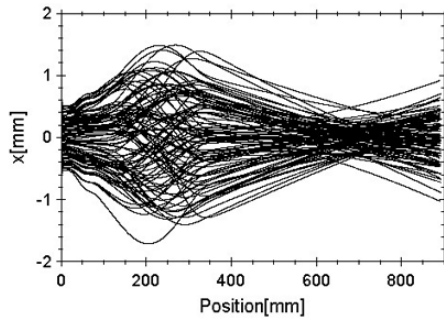


Figure 4: Superfish で用いたエミッター付き RFGun 形状。横軸がビーム軸、縦軸が垂直方向としたときの電場分布を示している。

Figure 5: 進行方向に対する各マクロ粒子の軌道変化。RFGun 空洞で発散電場を受けた粒子が測定点付近に収束されている。



作り、周波数 (2856MHz)、フィールドバランス調整を行った。そしてシミュレーションでは、カソード最大電場: 100MV/m を仮定した。更に RFGun 出口には、エミッタ補正用ソレノイド電磁石を設置し、ドリフトスペース後 $z=0.78\text{m}$ での最小エミッタンスを RFGun の位相調整とソレノイドの磁場調整を交互に何度か行い最適値を計算した。

図5は、マクロ粒子 100 個を仮定したときの Horizontal 平面に射影したビーム軌道の変化を進行方向に対して図示した。ソレノイド磁場中でビームが受ける平均磁場は、0.31T である。ビーム外周の粒子は磁場による変位が大きくエミッタンスを大きくしていると考えられる。大きな変位の粒子はエミッターから RFGun 空洞に入った時からすでに外側に発散しているが、これは RFGun 空洞においてビーム径が大きくなるほど外側の粒子はハーフセルで大きな発散電場を受ける為である。これは、ビーム径を出来るだけ小さくする事、つまりエミッター形状の最適化で解決できると考えられる。

図6は、進行方向に対するエミッタンスの変化、表2は、 $z=0.78\text{m}$ での計算結果をまとめて示している。エ

Figure 6: 進行方向に対するエミッタンスの変化。RFGun 空洞で増加したエミッタンスが、ソレノイド磁場によって補正されているのが分かる。

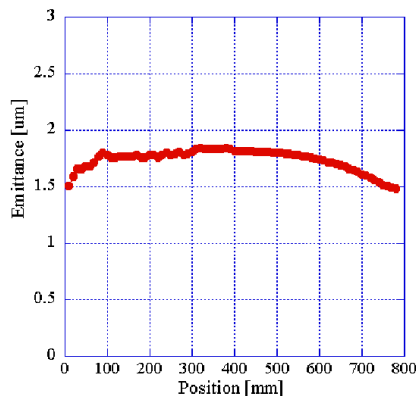
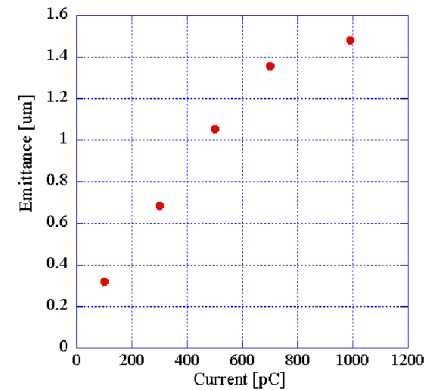


Table 2: エミッター&RFGun でのシミュレーション結果

電荷量	0.99nC
ビーム到達エネルギー	7.2 MeV
エネルギー幅	0.90%
パンチ長 (FWHM)	16.3 ps
RMS 規格化エミッタンス	$1.48 \pi \mu\text{m}$

Figure 7: 電荷量に対するエミッタンスの変化。電荷量とスポットサイズを最適化することで $1\pi\mu\text{m}$ を下回るビームが生成できる。



ミッタンスが、RFGun 空洞内で一度増加するが測定位置ではほぼ同じ値に戻っておりソレノイド磁場によるエミッタンス補正効果が有ることが分かる。またエネルギー幅が増加しているが、パンチ長も緩やかな増加に抑制されている。この事からエミッターにおいて 2MeV 程度まで加速したビームは RFGun 空洞で品質を損なうことなく加速できる事が分かる。

図7は、電荷量を変化させた時のエミッタンスの変化を示している。電荷量を減少させたときは、その都度レーザースポットサイズ、RF 位相、ソレノイド磁場の調整を行い最適化した。またレーザースポットサイズも先に仮定したように最小半径を下回らないよう注意した。RFGun 単体では難しい $1\pi\mu\text{m}$ 以下のエミッタンスを小電流域で生成出来ることが分かる。

まとめと今後の予定

RFGun に代わる低エミッタンス電子銃の実現性を調べる為 RFGun に短パルス高電圧を印可し初期加速するエミッターを接続した形状の電子銃のシミュレーションを行った。最適化の結果、1nC でエミッタンス: $1.48\pi\mu\text{m}$ を得た。また電荷量を減少させていくと $1\pi\mu\text{m}$ を下回るエミッタンスのビームが生成できる事が分かった。

今後エミッター形状、また今回用いたエミッターと RFGun 空洞のアノード孔形状は、電場が集中する形状のままなので曲率を付け電場の集中を弱める形状の最適化さらに進める。これによって $1\pi\mu\text{m}@1\text{nC}$ の低エミッタンス化を目指すと共に実用化に向けたエミッター部分の R&D を進める。

REFERENCES

- [1] 早野他、ATF コラボレーション、本研究会 (WC-2)
- [2] 栗木他、ATF コラボレーション、本研究会 (WP-22)
- [3] J.H.Billen nad L.M.Young, "POISSON-SUPERFISH" Los Alamos National Laboratory report LA-UR-96-1834(revision March 14,2000)
- [4] GPT User Manual, Pulsar Physics, Flamingostraat24,3582 SX Utrecht, The Netherlands.