

短パルスエミッターを用いた透過型低エミッタンス電子銃の開発

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

概要

RFGun は、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、高周波電場を用いた電子ビーム引き出しの為、さらにビームの低エミッタンス化を目指し加速勾配を引き上げた場合 RF エミッタンスの増加という相反する問題が出てくる。そこで、RFGun 空洞のカソード部分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引き出し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 エミッタンスを抑制した電子銃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。

1 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 のリニアック部においても数 $\pi\text{mm.mrad}$ の低エミッタンスビーム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。しかし、RFGun でさらに低エミッタンス化を考えた場合 RF エミッタンスが問題となってくる。これは、空間電荷によるエミッタンス増大を抑制する場合高い加速勾配、つまりは高い周波数が要求されるが、RF エミッタンスを抑制する場合には低い周波数が要求されるという相反する問題である。

そこで RFGun 空洞のカソード直前に電子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を行った後更に RFGun で加速することで RF 効果によるエミッタンスを抑制する電子銃が考えられている。この電子銃を開発する上で我々は、RFGun 空洞部分の製作、調整、実機の運用を過去 2 年間経験している為エミッター部分と短パルス高電圧装置の開発を重点的に行うことが出来るという利点もある。本報告では実用化に向けた高電圧短パルスエミッターを用いた RFGun の概要、及びそのシミュレーション結果、カソードとして使用予定の Cs-Te について蒸着試験を行ったのでその結果について以下に述べる。

2 電子銃の概要

RFGun 空洞部分については BNL GunIV タイプを用い、カソード部分を改良してエミッターを設置する。エミッター部のカソードは、光陰極とする。レーザーは現在 ATF の運転で用いているマルチバンチ生成用レーザー (10ps@FWHM, $\sim 1\mu\text{J}/\text{bunch}$) を用いる為、量子効率が高い Cs-Te を使用する。以下にエミッターとパルス電圧の概要及びカソードについて述べる。

2.1 エミッターとパルス電圧

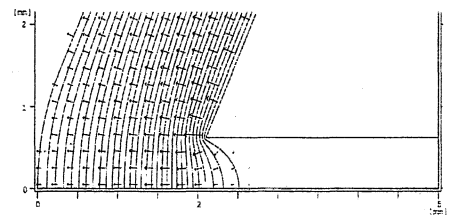
この電子銃で用いるパルス電圧として、次の条件を満たす事とする。

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。

約 10ps@FWHM のレーザーを使用する為、数 ns のパルス幅で印可できれば十分である。放電を考えた場合パルス幅が短いほど限界は引き上げられる。これらのことからエミッター電極間距離を 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非常に高いものとなり上記の条件を満たす。図 1 は、シミュレーションで用いたエミッター形状と電場分布を示している。

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も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。よって以下で行う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。

図 1: エミッター形状。横軸がビーム軸、縦軸が垂直方向としたときのエミッターの電場分布を表している。



* khase@post.kek.jp

2.2 カソード

カソードは、使用するレーザー側からの要請から量子効率の高いCs-Teを用いる。レーザー径は、初期エミッタンスを小さくする為1nCが取り出せる最小径より多少余裕を持った大きさとする。ここで仮定した最小ビーム径は、実際にATFでの運転で引き出されているビームのレーザー径と量子効率から電流密度を計算し求めた径である。

蒸着基板にはダイヤモンドを用いレーザーを背面から入射する透過型カソードとする。これにより、レーザー入射の軌道調整が容易となり、更に直前にピンホールなどを設置する事でカソード上でのレーザー照射位置や強度などの安定化に効果が期待できる。

3 ダイヤモンド基板へのCs-Te蒸着試験

透過型カソードの実現性を調べる為、ダイヤモンド基板にCs-Teを蒸着し寿命測定を行った。使用した人工ダイヤモンドは、紫外光領域(266nm領域)で十分な透過率を持つIIBタイプで、大きさは一辺が2.5mmの正方形、厚さが0.5mm、表面はスカイフ盤研磨されている。このダイヤモンドをφ2.4mmの穴が開けられたホルダーに固定し、大気中で入射光のパワーに対する透過率を測定した。この時、波長に対する透過率の依存性も測定し既知のデータと同じである事も確認した。次に蒸着用真空チャンバー内に設置しTeを10nm蒸着した。そしてカソードに電圧を印可し光電子を測定しながらCsを量子効率が最大値から下がり始めるまで蒸着した。この時紫外光は背面から照射した透過光を用いた。蒸着終了後は、 5×10^{-7} Pa以下の真空度で保管し、量子効率の変化を測定した。蒸着約1日後からの量子効率の変化を図2に示す。通常蒸着で用いているMoカソードなどの初期量子効率が10%を超えるのに対し、今回のダイヤモンド透過型測定では初期値が2%程度とかなり低い傾向にあった。また測定から得られた寿命は、約30日である。

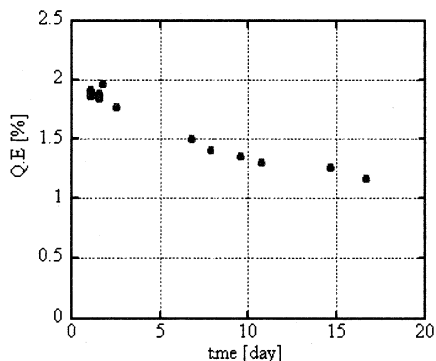


図2: ダイヤモンド基盤にCs-Teを蒸着したときの量子効率の変化。測定は透過光を用いて行っている。

4 シミュレーション

4.1 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[1]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)[2]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。

4.2 シミュレーション

最初にPoissonで計算したエミッターの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空洞の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、ウェーネルト電極の傾きを最適化した。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。

次にエミッター出口(z=5mm)をRFGunのカソード面としてSuperfishで計算したエミッター付きRFGun空洞の電場分布を図3に示す。RFGun空洞先端にPoissonで計算したエミッターと同じ形状を最上流に作り、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、エミッタンス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=0.78mでの最小エミッタンスをRFGun空洞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。

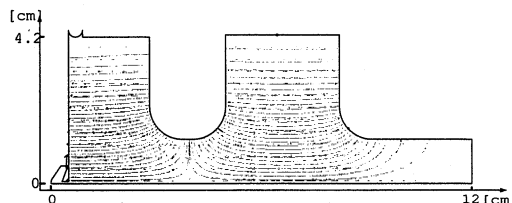


図3: Superfishで計算したエミッター付きRFGun形状。横軸がビーム軸、縦軸が垂直方向としたときの電場分布を示している。

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($r=0.9$ 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($r>0.56$ 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。以上のエミッター及びRFGun空

表 1: エミッター及び RFGun 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
共振周波数	2856MHz
カソード最大電界強度	100MV/m

洞における初期条件を表 1 にまとめる。この条件の下、シミュレーションを行った。図 4 は、エミッター部分でのマクロ粒子 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、平均の加速勾配は、約 0.65GV/m となっており RFGun と比較して 6 倍以上大きい。

図 4: 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。

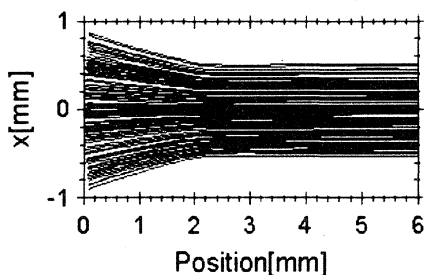


図 5: 進行方向に対するエミッタンスの変化。RFGun 空洞で増加したエミッタンスが、ソレノイド磁場によって補正されているのが分かる。

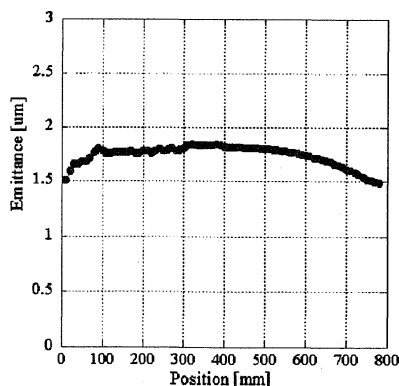


図 5 は、進行方向に対するエミッタンスの変化を示している。エミッタンスが、RFGun 空洞内で一度増加するが測定位置ではほぼ同じ値に戻っておりソレノイ

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。エミッター後エネルギー幅は増加したが、パンチ長は緩やかな増加に抑制された。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。 $z=0.78\text{m}$ では、電荷量: 0.99nC 、エネルギー: 7.2MeV 、エネルギー幅: 0.90% 、パンチ長: 16.3ps 、エミッタンス $1.48\pi\mu\text{m}$ という結果を得た。

図 6: 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。

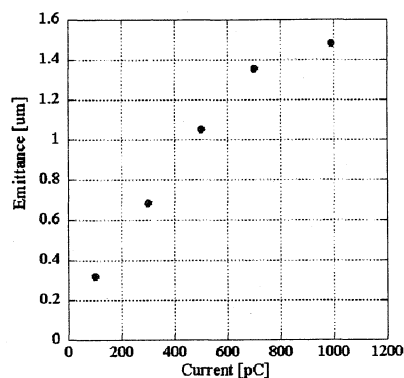


図 6 は、電荷量を変化させた時のエミッタンスの変化を示している。電荷量を減少させたときは、その都度レーザースポットサイズ、RF 位相、ソレノイド磁場の調整を行い最適化した。またレーザースポットサイズも先に仮定したように最小半径を下回らないよう注意した。RFGun 単体では難しい $1\pi\mu\text{m}$ 以下のエミッタンスを小電流域で生成出来ることが分かる。

5 まとめと今後の予定

現状の RFGun 空洞にエミッター機構を設置することで RF、空間電荷エミッタンスの抑制を行い低エミッタンス電子銃の開発を進めている。カソードには、ダイヤモンドを用い透過光を用いてビームを生成する透過型カソードを予定している。

この実現性を調べる為、Cs-Te の蒸着試験およびエミッター付き RFGun のシミュレーションを行った。蒸着の結果、透過光でも光電子を引き出せる事が分かった。更にシミュレーションで最適化の結果、 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。

今後更にエミッター形状の最適化を進め $1\pi\mu\text{m}@1\text{nC}$ 以下の低エミッタンス化を目指す。また、パルス電源の製作に取りかかり、パルス電圧を印可した時の Cs-Te の特性測定やエミッターの高電圧試験を行う予定である。

6 REFERENCES

- [1] J.H.Billen nad L.M.Young, "POISSON-SUPERFISH" Los Alamos National Laboratory report LA-UR-96-1834(revision March 14,2000)
- [2] GPT User Manual, Pulsar Physics, Flamingostraat24,3582 SX Utrecht, The Netherlands.