

LEBRA-FEL用光陰極RF電子銃の設計検討

菅野 浩一^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、境 武志^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、奥 洋平^{A)}、長谷川 崇^{A)}、宮崎 慎也^{A)}、稲垣 学^{A)}、城所 明生^{A)}、高崎 寛^{A)}

A) 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎 物理実験B棟

B) 日本大学量子科学研究所

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎 物理実験B棟

概要

高品質なFELを発生させるためには、光共振器に入射する電子ビームの電荷量、エミッタンスなどのパラメータが十分に要求される値を満たしていなければならない。エミッタンスは主に加速器入射部、特に電子銃の性能に依存する。高電界加速が可能なRF電子銃を採用すれば、空間電荷によるエミッタンスの増大を防ぐことが可能である。また、光陰極を用いれば、バックボンバードメントを防ぐことができる。そこでLEBRAでは光陰極を採用したRF電子銃の設計を行う。

1. はじめに

LEBRAの125MeV電子リニアックは100kVDC電子銃、7セルプリバンチャー、バンチャー、4m加速管三本とその他集束電磁石等で構成されている。このリニアックは電流200mA、エミッタンス20 $\mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ 、エネルギー広がり1%の電子ビームを光共振器に供給し、1.5 μm の赤外領域自由電子レーザーの発振を可能にした¹⁾。しかし、可視光・紫外領域発振のためには、より良質の電子ビームの供給が要求されると予想される。そこで、低エミッタンス化、大電流化が期待できる光陰極RF電子銃の導入を検討している。LEBRA用RF電子銃の目標値を表1にまとめた。

図1. シケインを用いた場合のRF電子銃光陰極用材料には量子効率の高いCs₂Teなどが有望視されているが、取り扱いは決して易しくはなく、システムも複雑になり、寿命も短い。そこでLEBRA用光陰極には、量子効率は劣るが、取り扱いやすく寿命が充分長いLaB₆を陰極材料に採用し、その分レーザーパルス幅を50psと長めに取り十分な電荷を得られるようにし、電子加速後にバンチするようなシステムを検討する。今回はシケインを用いてバンチ圧縮をするRF電子銃システムに関して検討する。

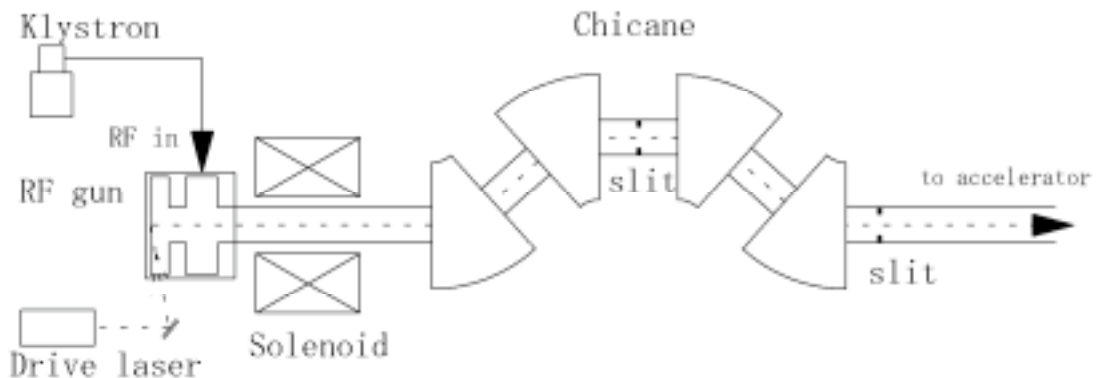
表1. RF電子銃目標値

電荷量	0.36 nC/bunch以上
バンチ長	3.5 psec以下
マクロパルス幅	20 μs
規格化エミッタンス	10 $\mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ 以下
エネルギー	3 MeV

2. シケインを用いたRF電子銃システム

2.1 システム概要

図1にシケインを用いた場合のRF電子銃システムの概略を示す。このシステムは大まかに光電子発生用のドライブレザーと光陰極、RF電子銃空洞、集束用ソレノイド、バンチ圧縮用シケインからなる。



¹ E-mail: tekkamen@lebra.nihon-u.ac.jp

2.2 ドライブレーザーと光陰極

光電子励起用レーザーはLIGHTWAVE社のCW mode-locked Nd:YAGレーザーをPOSITVELIGHT社のアンプシステムで増幅しパルスを切り出して繰り返し89.25MHz、エネルギー40mJ/pulse、パルス幅50psのNd:YAGレーザーの第三高調波(355nm)を使用する。陰極材料は 10^{-4} の量子効率が得られるLaB₆^[2]を想定すると電荷は1nC/bunch程度得られる。

2.3 RF電子銃空洞

シケインを用いてバンチ圧縮を行う場合、電子の引き出し・加速だけでなく、バンチ内前方の電子エネルギーは低く、後方の電子は高くなるようなエネルギー差をもつ電子ビームバンチを発生できるRF電子銃空洞を設計しなければならない。そこで、第一セルで電子を引き出し、第二セルでバンチ後方に前方より大きな電場がかかるような役割を持たせたS-band 1.5cellモードのRF電子銃空洞を設計する。表2に今回検討したRF電子銃空洞のパラメータを示す。

表2. RF電子銃のキャビティ特性

周波数	2856	MHz
モード	π	
Q値	14500	
シャントインピーダンス	27.6	M Ω / m
入力電力	5.0	MW
カップリング	2.5	
加速エネルギー	3.2	MeV
カソード表面最大電場	66	MV/m
ピーク電場	86	MV/m

2.4 シケイン

シケインに入射される電子のエネルギーが高ければ飛行距離は短く、エネルギーが低ければ飛行距離は長くなる。従って、前方の電子が持つエネルギーが後方の電子が持つエネルギーより低いバンチをシケインに入射すると、後方の電子は前方の電子に比べ飛行距離が短いので前方電子に追いつきバンチすることができる。シケインは同じ偏向角 θ 、軌道半径Rをもつ四つのベンディングマグネットを使用すると仮定する。

3. シミュレーション

前節に述べた内容を考慮し、電荷1nC/bunch、レーザースポット径1mm、パルス幅50psを初期条件とし、RF電子銃からシケイン出口までの電子軌道シミュレーションを行った。図2に計算結果の最適化された電子軌道と電子のドリフトとともに変化するバンチ長の変化を示す。図2-B)のバンチ長は半値幅であらわしている。バンチ長1mmはおよそ3.5psに相当する。図3には陰極から1.74m程飛行した電子

のエネルギー分布と

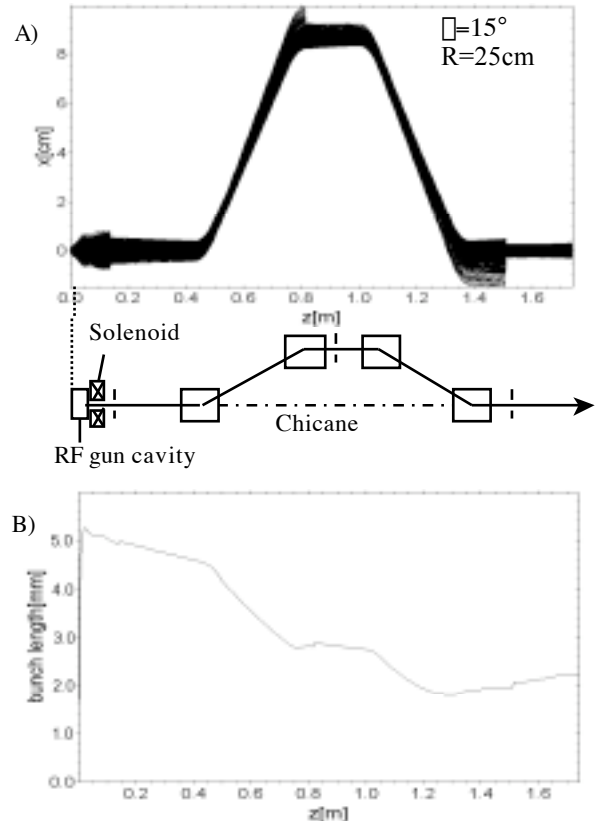


図2：シケインによるバンチ圧縮を用いたRF電子銃システムに関するシミュレーション結果。A)電子軌道と各装置の位置、B)バンチ長の変化。

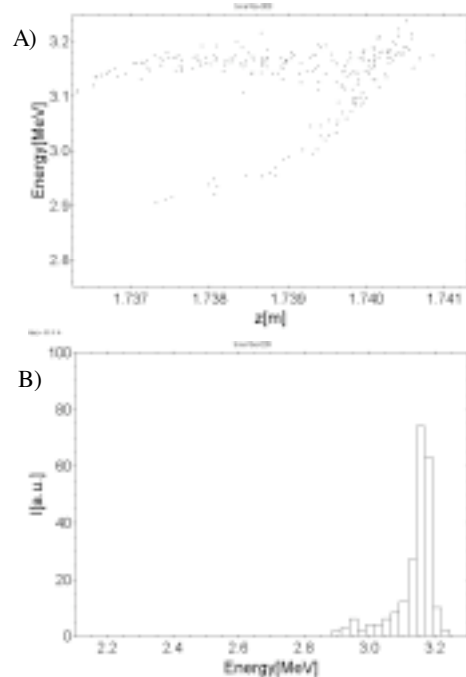


図3：陰極から1.74mはなれた位置でのエネルギー分布。A)ビーム進行方向位置に対するエネルギー分布、B)エネルギースペクトル。

スペクトルを示す。この電子ビームのエネルギー広がり率は2.3%である。シケイン下流に設定したギャップ5.6mmのスリットで規格化エミッタンスを $10\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ に制限した場合、電荷は 0.22 nC/bunch しか得られず、目標値に達していない。次に、RF電子銃空洞の陰極の周りにDC電子銃のwehnelt電極に相当するようなスロープを設けた場合のシミュレーションを行った。図4にバンチ長とエネルギー分布の計算結果を示す。

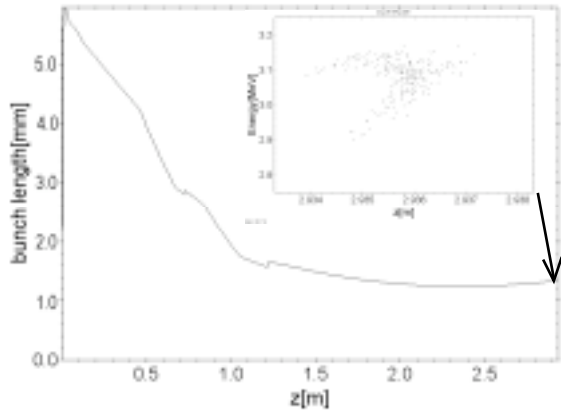


図4：RF電子銃空洞にスロープがある場合のバンチ長変化とシケイン直後のエネルギー分布。

シケイン下流に設定したギャップ4.0mmのスリットでエミッタンスを $12\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ に制限した場合、電荷量は 0.27 nC/bunch となった。バンチ長に改善の効果が現れたが、これは、陰極周辺でのスロープによる集束効果でシケインに入射される電子ビームのエミッタンスが良くなったためと考えられる。しかし、シケインの効果が認められるものの、依然目標値には達していない。ここで、シケインを通さない場合についてのシミュレーション結果を図5に示す。ただし、陰極から0.75mの位置にギャップ6.5mmのSlit1、1.44mの位置にギャップ6mmのSlit2を配置した。この時、得られる電子ビームの電荷量は 0.39 nC/bunch で規格化エミッタンスは $12\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{mrad}$ であった。また、エネルギー分布の変化を表す。図6より、バンチ先頭部にある低エネルギー電子が取り除かれていることがわかり、大きな広がり角を持っているとわかる。速度変調の影響があることもこの図よりわかる。以上より、今回検討した電子銃は、電子エネルギーの割にバンチ長が長いことエネルギー広がりが大きくなってしまっている。そのため、速度変調の影響がありエネルギー分布が変化してしまっていることがわかる。3.2MeV程度で50psの電子ビームをシケインでバンチする場合は速度変調が起こりにくい程度のエネルギー差をバンチ内につくる必要があると考えられる。

6. まとめ

シケインを用いてバンチ圧縮をするRF電子銃システムについて検討した結果、今回検討したRF電子銃

は速度変調の影響が強く、シケインも充分には活かされていないことがわかった。今後、バンチ内のエネルギー差を小さくできるパラメータを模索しシケインを効果的に活用すること、また、 α マグネットを用いた場合についても検討し目標値を満足するRF電子銃システムの開発を進める。

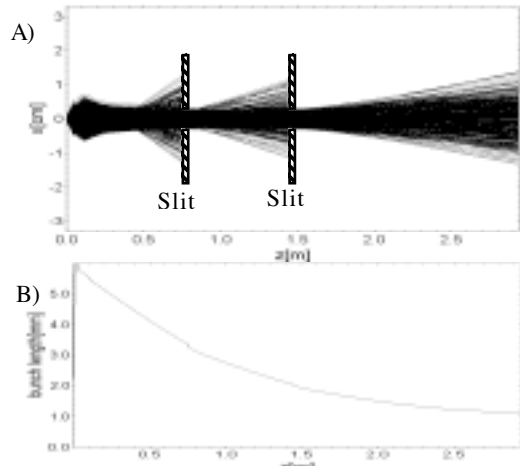


図5：シケインを通さない場合の電子軌道解析結果、A)電子軌道、B)バンチ長変化。

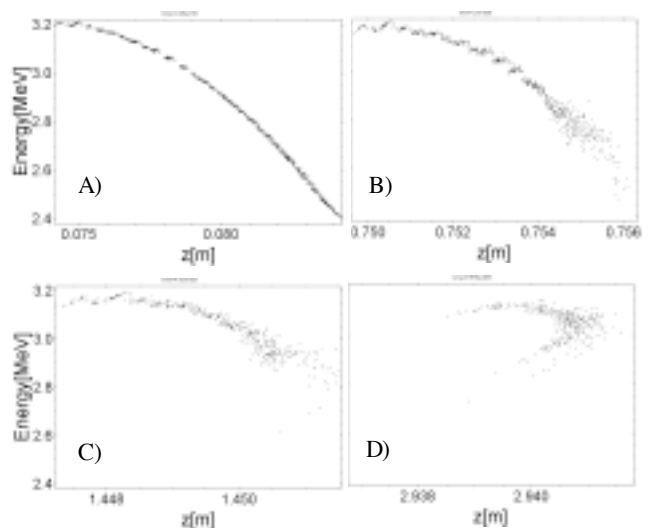


図6：エネルギー分布変化。A)RF電子銃直後、B) Slit 1直後、C) Slit2直後、D)システムの最後。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et. al. "First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of $1.5\text{ }\mu\text{m}$ " Proceedings of the 23rd International Free Electron Laser Conference and 8th FEL User's Workshop (Darmstadt, Germany 2001.8), NIM A483 (2002) pp. 29-33.
- [2] 浅川誠 他、"自由電子レーザー用光陰極の開発", The review of Laser Engineering, Vol. 23, No. 1 January 1995,pp.55-67.