

日大 FEL 用光陰極 RF 電子銃に関するシミュレーション

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)}、橋本 英子^{A)}、藤岡 一雅^{A)}、村上 琢哉^{A)}、長谷川 崇^{A)}、宮崎 慎也^{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

^{B)} 日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

概要

日本大学電子線利用研究施設 (Laboratory for Electron Beam Research and Application, 以下 LEBRA) では 100kV DC 電子銃、プリバンチャー、バンチャーから構成されている入射部を持つ 125MeV S-band リニアックを用いて、125MeV、20 μ sec の電子ビームを発生させ、近赤外領域 FEL 発振に成功した。しかし、紫外領域 FEL 発振の為には、現在より良質で安定な電子ビームが必要で、更なるリニアックの高度化が要求されると考えられる。その高度化の一環として、より小さいエミッタンスを得る為に、光陰極 RF 電子銃の開発を検討している。そこで RF 電子銃の空洞解析を行った。

1. はじめに

LEBRA では、2001 年 5 月の 1.5 μ m 赤外領域 FEL 発振^[1]以降、高度かつ先端的な利用研究に充分活用し得る良質なレーザーを利用施設に供給する為、電子ビームの安定化に関する研究を行ってきた。利用に向けての準備が進み、今年度中に開始される予定である。LEBRA が供給する FEL の波長領域は 0.3 ~ 5.0 μ m で、紫外から赤外までの広い範囲にわたっている。現在のリニアックから得られる電子ビームを用いて 1.5 μ m の赤外領域 FEL 発振を達成したが、紫外領域 FEL 発振の為により小さいエミッタンスの電子ビームが必要であると考えられる。そこで、電子を高電場で引き出し、加速することができる RF 電子銃^[2]を開発し、電子が低エネルギー状態にある時間をできるかぎり少なくして空間電荷による影響を抑え、エミッタンスの悪化を防ぐことを検討している。LEBRA では、熱陰極を採用した RF 電子銃の研究を行ってきた^[3,4]。今回は光陰極を採用した RF 電子銃を開発する。これにより、熱陰極を使った場合に問題となるバックボンバードメントによるパルス幅の制限を取り除くことができる。光陰極 RF 電子銃^[5]はよくバンチした電子を放出することができ、熱陰極に比べ電流密度の高いビームを得られる為、国内外を問わず、FEL 施設で活発に研究開発が進められている。しかし、LEBRA では電子励起時のパルス幅

は短くせず、電子銃の下流にアルファマグネットを設置してバンチングを行うことにする。

2. 現在の電子ビームの質

LEBRA 125MeV リニアックは 100kVDC 電子銃、プリバンチャー、バンチャー、4m 加速管 3 本で構成されている。表 1 に現在、リニアックより得られる電子ビームのパラメータを示す。電子銃から得られる電子ビームの規格化エミッタンスはマグネティックレンズを、加速器下流においては四極電磁石を用いてビーム径を変化させ、その集束力とビーム径の関係から求めた。ビーム径はワイヤースキャナーを用いて測定を行った^[6]。バンチ幅は電子ビームが放出する自発放射光をストリークカメラで測定して得られた。表に示されるような電子ビームを、アンジュレータに入射し、1.5 μ m の赤外 FEL 発振に達している。LEBRA では DC 電子銃からバンチャーまでの入射部の代わりに RF 電子銃とアルファマグネットを設置することで電子ビームの低エミッタンス化を目指す。

表 1. 電子ビームパラメータ

エネルギー	86.8 MeV
	最大 125 MeV
パルス幅	20 μ sec
繰り返し	2 ~ 12.5 Hz
規格化エミッタンス	
電子銃	8.93 π mm \cdot mrad
加速器下流	20.7 π mm \cdot mrad
電流	
電子銃放出電流	200 mA
加速器下流	100 mA
エネルギー分散	1 %
バンチ幅	<10 psec

現在の入射部に関して、マグネティックレンズが考慮できるように作り直された PARMELA を用いて、電子軌道計算を行った。粒子数は 999 個で、初期条件として、電子銃用相対論的電子軌道解析コード EGUN^[7]を用いて得られた結果を使用した。ここでは電子銃から 200mA の電子ビームが放出されていると

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

仮定した。その結果バンチャー出口において水平方向規格化エミッタンスが $46.9\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、鉛直方向は $43.5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、ビームは放出電流の 76% に減った。また、図 1 にはバンチャー出口での電子ビームのプロファイルを示す。加速管出口でのエミッタンス測定結果と比べるとシミュレーションでは大きくなっているが、これは集束系のモデル化が不十分であるためと考えられる。エミッタンスが最適となるリニアック運転時のソレノイド、マグネティックレンズ、フォーカスコイルの磁場強度はシミュレーションに使った値と比べ小さい。各集束系の数値解析をし、その結果をもとに電子軌道計算を行う必要があると考えられる。

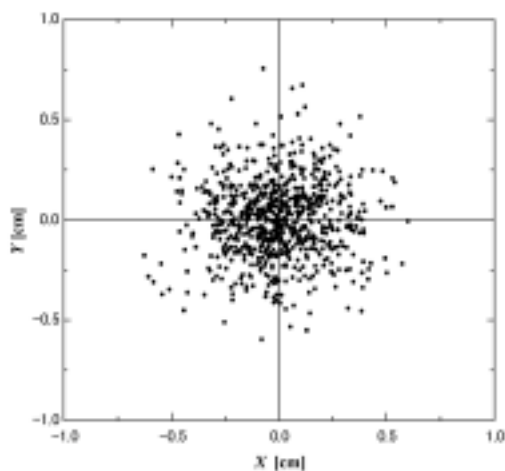


図 1 : PARMELA で計算した結果得られたバンチャー出口でのビームプロファイル

3 . LEBRA 用 RF 電子銃開発の現状

LEBRA では、以前より紫外領域 FEL 発振を目指し、RF 電子銃の研究開発を行い、単セル空洞にノーズコーンをつける方法やビームの進行方向に対して垂直に弱い磁場 (50 ~ 75G) をかける方法、またはサブハーモニック RF 電子銃にすることによるバックボンバードメント低減の効果に関する解析や、エミッタンスを小さく抑えるための形状を検討し、シミュレーションを行っていた。^[3,4] また、テスト空洞を製作し、リニアックの入射部にアルファマグネットとともに設置して、RF 系の試験運転を行った^[8]。現在、短パルス用クライストロン PV3030A1(三菱電機)を 2 本、20 μsec のパルス幅で使用し、1 本はプリバンチャー、バンチャー及び一本目の加速管へ、もう 1 本は下流 2 本の加速管にマイクロ波を供給している。RF 電子銃を設置する場合はプリバンチャーとバンチャーに入力している分を RF 電子銃空洞に入力する。

新しく開発する RF 電子銃では光陰極を採用する。ドライブレーザーには、LIGHTWAVE 社の CW モードロック Nd:YAG レーザーを種レーザーとし、POSITIVELIGHT 社のアンプシステムを用いて増幅し、パルス切り出しを行い、第 3 高調波 (355nm) にした光を使用する。アンプシステム出口でマイクロパ

ルス幅が 50psec、繰り返し 89.25MHz でマクロパルス幅 20 μsec 、繰り返し 12.5Hz、平均パワー 1W、ジッター 5psec のレーザーが得られる。ジッターは位相にして約 1° でありこれによるエネルギーの変動は問題ないと考えられる。また陰極材質は LaB_6 を使用する予定である。

4 . 空洞解析

RF 電子銃空洞の設計を SUPERFISH^[9]を用いて、1.6cell 型 RF 電子銃空洞についてシミュレーションを行った。ピーク電場が 100MV/m 程度になるようにして計算を行った。図 2 にその結果を示す。図の上部に RF 電子銃空洞形状と電磁場分布を、図の下部に電子進行方向の電場、半径方向の電場を示す。半径方向電場に関しては中心軸上から 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4mm ずれた位置における計算結果を示す。さらに、陰極付近の電場が半径方向の成分を持ち、電子ビームの拡がりを防ぐための工夫がなされた空洞形状に関してシミュレーションを行った。図 3 にはハーフセルの陰極がある面に突起をつけた形状をもつ RF 空洞を、図 4 には DC 電子銃のウェーネルト電極のような形状をもつ RF 空洞に関する結果を示す。この場合ハーフセルでのビーム進行方向最大電場は陰極面ではなく少し出口側にずれる。半径方向電場 E_r は電子ビームのエミッタンスを悪くする要因となると考えられる。図より E_r はディスクの角のあたりがピークになっている。また、電場は中心軸からずれるほど、半径方向成分が増え加速成分が減る為、RF 電子銃ではビームはできるかぎり細く保つ必要があると考えられる。突起をつけた場合に比べ、ウェーネルト電極のような傾斜を持たせた場合のほうが E_r のピークが陰極面に近い所に位置しており、優れていると推測される。

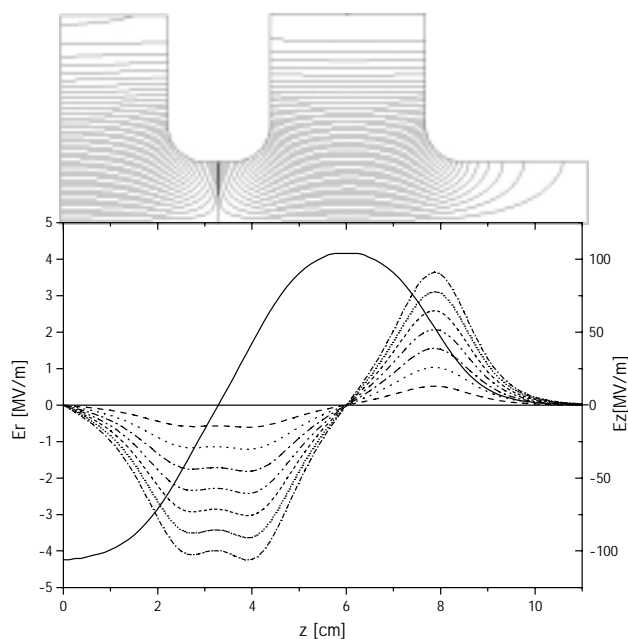


図 2 : SUPERFISH で計算した結果得られた 1.6cell 型 RF 電子銃の電磁場分布。点線が半径方向電場、実線がビーム進行方向電場。

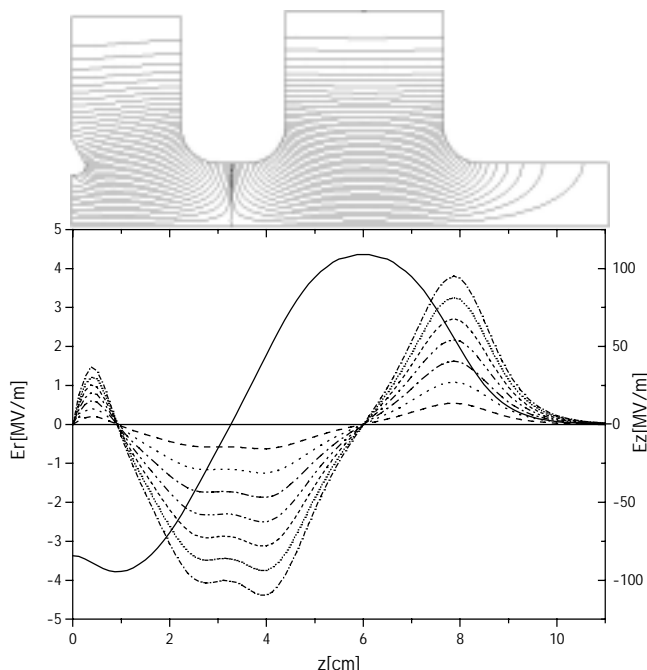


図3：SUPERFISH で計算した結果得られた陰極付近に突起をつけた RF 電子銃の電磁場分布。点線が半径方向電場、実線がビーム進行方向電場。

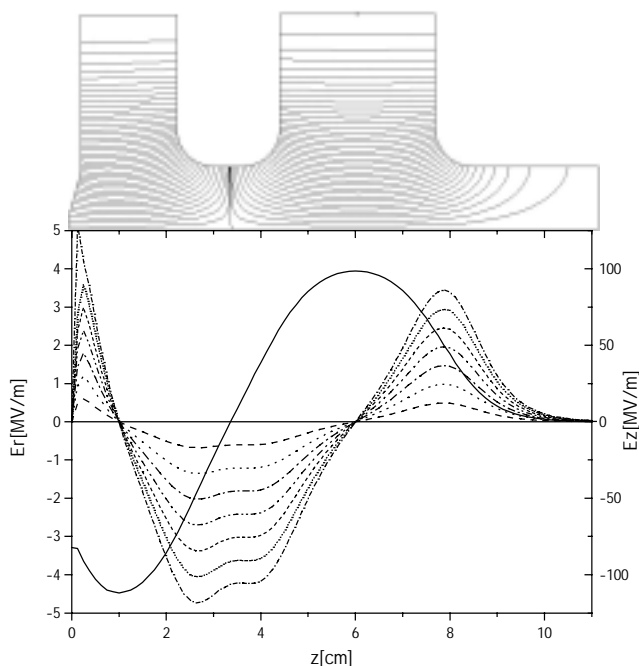


図4：SUPERFISH で計算した結果得られた陰極付近をウェーネルト電極のような形状にした RF 電子銃の電磁場分布、点線が半径方向電場、実線がビーム進行方向電場。

5. まとめ

FEL 用 125MeV 電子リニアックの入射部に関する軌道解析を PARMELA で、光陰極 RF 電子銃空胴の電磁場解析を SUPERFISH で解析した。RF 電子銃空

胴に関しては陰極付近に電子ビームが集束するような電場ができるような 2 種類の空胴形状に関して計算を行った。その結果より陰極付近に突起をつけるより、DC 電子銃のウェーネルト電極のような形状にしたほうがエミッタンスを小さく抑えることができると推察した。

6. 今後の課題

陰極付近をウェーネルト電極のようにするとエミッタンスが小さく抑えることができると推察したが、このことに関して電子ビーム軌道解析を行って検証する。その他の空胴形状などについても検討したのち、LEBRA リニアック用の RF 電子銃として最適な形状・パラメータを決定し空胴の製作をする。ただし、PARMELA ではアルファマグネットのシミュレーションを行うことができない。そこで、LEBRA で独自に作成したコードを用いて計算する。このコードは SPREAD (Simulation PProgram for Electron Accelerator Design) と呼んでおり、アルファマグネットを考慮した電子軌道解析が行える。そして、RF 電子銃空胴の低電力試験、空胴内に励振される電磁場分布の確認および導波管との結合係数の調整などを行う。また、大電力試験を行う為のテストベンチ組み立て、大電力投入時の熱的変形、空胴内放電の有無の確認を行う必要があると考えられる。

光陰極に関しては、LaB₆ 陰極の量子効率の測定を行う。光陰極からの電子放出は表面状態に強く依存する。また、LEBRA 用電子銃ではマクロパルス幅が 20μsec という長い電子ビームを放出する必要があるため陰極に関する工夫が必要と考えられる。

また、加速 RF を 32 分周した信号により、ドライブレザーにトリガーをかけ、RF に同期したレーザーパルスになる為の調整や RF 電子銃を加速器に組み込むためのレーザービームライン設計などシステムの構築を行う。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et al., "First lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5μm" Nucl. Instr and Meth.A(2002),Vol483/1-2,pp.29-33(NIMA18811)
- [2] C.Travier,Particle Accelerators.36,(1991),33
- [3] K.Hayakawa, et al., "Study of an RF-GUN" Proceedings of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 20-22, 1994
- [4] K.Hayakawa, et al., "Study of an RF-GUN II" Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Osaka, Sep. 6-8, 1995
- [5] J. Clendenin, et al., "RF Guns and the production of polarized electrons" NLC-Note-20
- [6] K.Kanno, et al., "電子銃の低エミッタンス化による入射部の高度化" Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [7] W.B.Herrmansfeldt, "EGUN -an electron optics and gun design program" slac report 331 1988
- [8] T.Tanaka, et al., "Test operation of the RF system of the 125MeV LINAC at Nihon University" Proceedings of the 22th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Sep. 9-11, 1997
- [9] James H. Billen and Lloyd M. Young "POISSON SUPERFISH", LA-UR-96-1834,