

INVESTIGATION OF THz RADIATION FROM SASE FEL AT FEL-TUS

T.Suganuma^{1,A)}, T.Hiramatsu^{A)}, M.Yoshida^{B)}, T.Imai^{C)}

A) Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

B) High Energy Accelerator Research Organization 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

C) FEL-TUS:IR-FEL Research Center of Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 278-8510

Abstract

We are attempting a THz radiation with the use of Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE) Free Electron Laser (FEL) at IR FEL Research Center of Tokyo University of Science (FEL-TUS). The existing FEL device, where the resonator was installed, is improved a quality. The DAW RF-gun was developed to obtain the high density electron beam required for SASE-FEL. The condition for THz radiation is optimized using the GENESIS simulation code. In this report, we present the result of the simulation, and the operation status of the installed DAW RF-gun.

FEL-TUSでのSASE-FELによるTHz波発振の研究

1. はじめに

本研究ではSASE-FELによるTHz波の発振を目指している。現在東京理科大学にある赤外自由電子レーザー研究センター(FEL-TUS)において遠赤外領域(FIR)の共振器型FELの性能向上を行っている。我々はFIR-FEL性能向上のためDAW型RF電子銃を製作した。DAW型RF電子銃は現在の電子銃に比べ、高密度電子ビームを生成でき、高い増幅率を得られるため、本研究では既存のアンジュレータを用いたSASE-FELの発振の可能性を検討している。本発表ではこのDAW型RF電子銃の粒子シミュレーション、FIR-FELにおける性能試験の経過について報告するとともに、THz波を発振させるために行ったFEL発振のパラメータの最適化、ビーム輸送のためのオプティクスについて報告する。

2. DAW型RF電子銃

SASE-FELとは単一通過型のFELであり、Shot Noiseを種として増幅、飽和を行う。SASE-FELの発振には共振器型FELに比べ、一度の通過で高い増幅を得ることの出来る高密度電子ビームが必要となる。我々は高密度電子ビームの生成が可能となるDisk-And-Washer型(DAW型)電子銃の開発を行った。

現在改良を行っているFIR-FELはSバンド電子ライナックであるため、DAW型RF電子銃はそれに合わせて設計した。

2-1. 特長

DAW型RF電子銃の概略図を図1に示す。特長は空洞内部にディスクと電子走路となるビームパイプが存在することで、これにより電子走路とエネ

ギーの輸送路が独立する。電子ビームはビームパイプ間を通過するときに加電界を受ける。

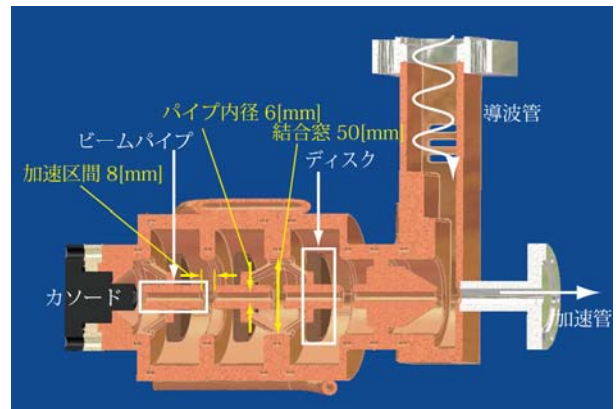


図1 : DAW型RF電子銃 概略図

2-2. DAW型RF電子銃の利点

i) 電子ビームの高密度化

DAW型空洞はビームパイプの径、長さを自由に決定できる。パイプ先端が電極になるため、カソード面に電極を十分近づけて進行方向に並行な電界を作り出せる。これにより電子ビームの低エミッタンス化が可能となる。またパイプ径を絞ることで鏡像電荷の影響により空間電荷効果を緩和でき、低エミッタンスを保つことが可能である。

電子ビームは加速区間を通過した後、パイプ内では電磁界の影響を全く受けないため、加速区間距離と位相反転時間が独立して考えられる。そのためパイプ長、パイプ間距離の調整を行うことで電子ビームのTransit Time Factorの調整が可能となり、効率の

¹ E-mail: j6208614@ed.noda.tus.ac.jp

良い電子バンチングを行うことが出来る。

ii) 自由度の高い設計

電子ビーム軌道とエネルギー輸送路が独立しているため、空洞間の結合係数を大きく取ることが出来る。結合係数が大きいと空洞どうしの共振周波数の許容範囲が広くなり、空洞製作における調整が軽減される。今回の設計では結合係数は0.13となる。

iii) 放電の減少

電極間を十分近づけられるため、空洞内最大電界強度と軸上電界強度の比を抑えることが出来る。よって放電を減少させることが可能となる。

2-3. 粒子シミュレーション

DAW型RF電子銃から生成される電子ビームの粒子シミュレーションをPARTICLE-STUDIOを用いて行った。粒子シミュレーションでは旧電子銃とDAW型で生成される電子ビームの性能比較、また十分な電流量を得るために電子放出面積の広いカソードを用いることで生成される電子ビームの性能を求めた。以下にシミュレーションで用いたパラメータとその結果を示す。入力RFパワーはFELTUSの性能に準拠したものである。このシミュレーションによりDAW型RF電子銃では効率良く高密度電子ビームを得られることが示された。

表2：シミュレーションより得られた電子ビームの性能・比較結果

入力パラメータ	
入力RFパワー	2[MW]
ビームエネルギー	2[MeV]

	旧電子銃	DAW型	
		現状	SASE用
○設定値			
カソード直径 [mm]	1.75	1.75	5.0
○結果			
エミッタンス π [mm-mrad]	9.55	2.43	7.98
バンチ長 (FWHM)[ps]	5	1.5	1.5

3. DAW型RF電子銃の性能試験

DAW型RF電子銃は製作後、既存のFIR-FELへインストールした。今回カソードは性能試験のため、旧電子銃で用いられていた直径1.75[mm]のLaB6を使

用する。

設計においてDAW型RF電子銃の運転パラメータは、FIR-FELの旧電子銃と同じく、共振周波数2855.71[MHz]、RFパワー2[MW]のときの軸上最大電界強度が57.6[MV/m]になるようにした。また旧電子銃運転時のRFのパルス幅は6.8[μs]である。現在は入射RF周波数2855.71[MHz]、パワー1.2[MW]、パルス幅3.5[μs]までのエージングを終えている。図2はその条件時において測定したものであり、RFの入射波、反射波を左図に、α-マグネット直後の電子ビームの電流量のCT波形を右図に示した。

RF波の入射波、反射波の測定は熱カソードから電子を生成させながら行った。今回のDAW型RF電子銃はビームローディングを考慮して、全体で結合度βが1になるように設計を行った。左図より実際に入力したRFの反射波がゼロになっていることが分かる。これはRFが電子ビームでのエネルギー損失の分を含めて、設計通りに空洞内部で共振している(β=1)ことを示している。今後は入射RFパワーを上げていき、パルス幅を伸ばすことで運転パラメータの値までエージングを行う。またそのときのβを確認する。

右図より電子ビームの電流量が56[mA]であることが確認出来た。

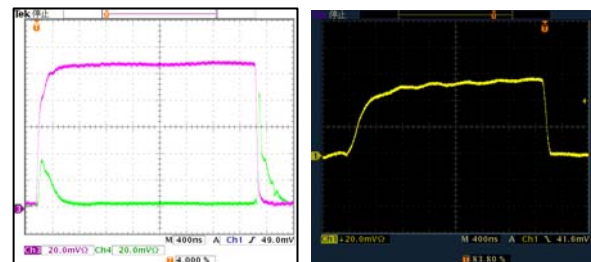


図2：性能測定の結果

左図はDAW型RF電子銃に入射したRFの入射波(ピンク)・反射波(緑)を測定したもの。右図はα-マグネット直後の電子ビームの電流量を測定したCT波形。

4. SASE-FELのシミュレーション

SASE-FELによるTHz波発振のシミュレーションにGENESISを用いた。粒子シミュレーションよりDAW型RF電子銃から生成される電子ビームの性能が得られたので、既存のアンジュレータを用いたときのFEL発振のパラメータの最適化を行った。表3に各パラメータ、図3にそのときのFELパワーの増幅の様子を示す。スリッページ効果に関してはα-マグネットによるバンチ長の引き延ばしが可能と考え、バンチ長を調整して計算を行った。また発振波長は0.178[mm] (1.75[THz])とした。

このシミュレーションよりSASE-FELのピークパワーが1.49[W]であることが得られた。図3にアン

ジュレータ内の中心軸上に対するFELパワーを示した。

表3：シミュレーションに用いた各パラメータ

アンジュレータ	
周期長	0.07[m]
周期数	25
K値	1.44
全長	1.75[m]
電子ビーム	
γ	20
ビーム半径:X	0.87[mm]
ビーム半径:Y	0.25[mm]
エミッタンス:X	7.98π [mm-mrad]
エミッタンス:Y	7.98π [mm-mrad]
ピーク電流値	60.7[A]
バンチ長	14.8[ps]

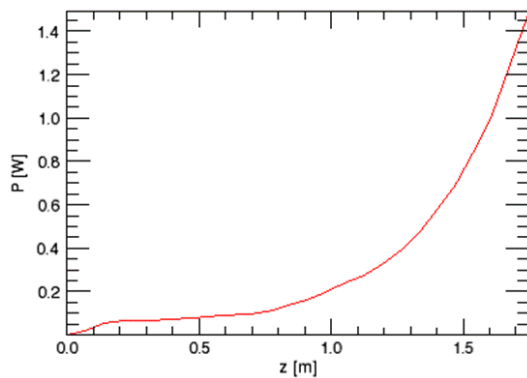


図3：GENESISによって計算されたアンジュレータ内の中心軸上に対するFELパワー

4. ビームオプティクス

SASE-FEL発振に求められる性能を持つ電子ビームをアンジュレータに入射するため、電子銃からアンジュレータまでのビーム輸送の計算をする。図4に本研究で使用するFIR-FELの概略図を示した。これらの加速管、電磁石等の配置は共振器を用いたFEL発振を行うために設計されたものである。

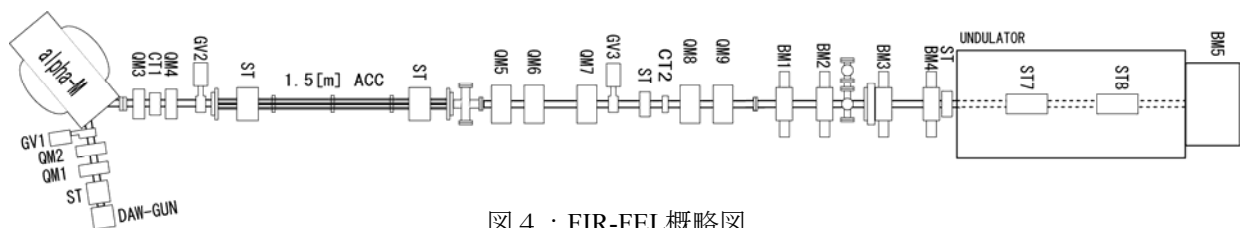


図4：FIR-FEL概略図

ビーム輸送の計算には、加速器オプティクス設計に使われるSADを使用した。図5に現状のFIR-FELにおけるlatticeと β 関数の関係を示した。今後はこのシミュレーションを基に、実際のFIR-FELにおいて電磁石の磁場のパラメータ調整を行う。

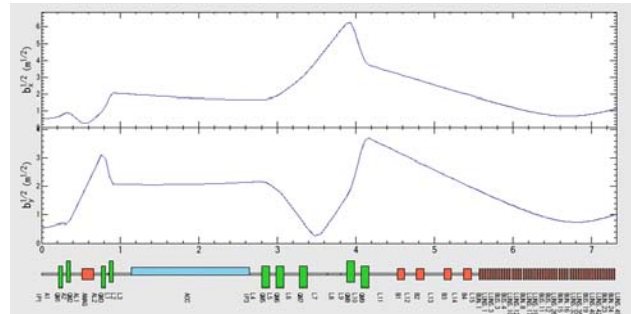


図5：FIR-FEL Latticeと β 関数

5. まとめ

DAW型RF電子銃より得られる高密度電子ビームのシミュレーションを行った。また実際のFIR-FELにおいて性能試験を行い、空洞内部に設計通りの共振が起きていることを確認した。SASE-FEL発振のシミュレーションよりFELパワーの増幅を確認することが出来た。今後はSASE-FEL発振のための課題として、出力ピークパワーの増大の手段を考える必要がある。また最適な条件を持つ電子ビームをアンジュレータに入射するため、ビーム輸送の調整のためのシミュレーションを行っていく。

参考文献

- [1]平松崇英, “DAW型高周波電子銃の開発”, 東京理科大学修士論文, 2008
- [2] <http://pbpl.physics.ucla.edu/~reiche/index.html>
- [3]P.H.Schmidt et al, “Design and optimization of directly heated LaB6 cathode assemblies for electron beam instruments”J.Vac.Sci.Technol,vol.15,no.4,pp.1554-1559,July/Aug.1978