

## Conceptual design study on a tabletop seeded-THz FEL

Keisuke Higashimura<sup>A)</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>A)</sup>, Toshiteru Kii<sup>A)</sup>, Ryota Kinjo<sup>A)</sup>, JEONG Young Uk<sup>B)</sup>, Heisun Zen<sup>A)</sup>,  
Kai Masuda<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

<sup>B)</sup> Korea Atomic Energy Research Institute  
P.O.Box 105, Yuseong, Daejeon, Korea, 305-353

### Abstract

We have studied on designing a tabletop seeded-THz FEL which is consisted of a photocathode RF gun, a hybrid staggered array undulator, and injection-seeded THz parametric generator. Electron beam from photocathode RF gun was optimized by changing RF electric field and laser injection phase. Solenoid magnetic field was also optimized for the purpose of focusing the electron beam at the center of undulator. Undulator's position was determined by matching center of the undulator to the beam waist. The power of FEL was calculated by using optimized electron beam and adjusting undulator's position. We found that FEL power can be saturated and the whole system can be packed into 4m length.

## 卓上seeded-THz FELの概念設計

### 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では光陰極高周波電子銃と短周期アンジュレータを用いたTHz領域の卓上FEL装置の実現にむけて研究を行っている。本計画では短周期アンジュレータの候補として、バルク超伝導磁石を使用したハイブリッドスタガードアレイアンジュレータ<sup>[1]</sup>を検討している。更にSASE-THz FELにシード光として波長可変THzパラメトリック発生器<sup>[2]</sup>を用いることでTHz領域での卓上FELの実現を目指す。

今回はシミュレーションコードを用いて電子銃からアンジュレータまで電子ビーム及びFELを計算した。計算コードParmelaを用いて高周波電子銃の空洞内電界及び光陰極へのレーザー入射位相を変え、電子ビームの最適化を行った。またシステムを簡素化し最小の構成とするため、エミッタンス補償用ソレノイドによってアンジュレータ中心で電子ビームをフォーカスさせた。これらの最適化したパラメータによってFELの発振が可能かGENESIS1.3を用いて計算した。

### 2. 光陰極型高周波電子銃

アンジュレータ入射直前までの電子ビームパラメータを計算するために、シミュレーションコードParmelaを用いた。電子ビームはKEK-ATFタイプ1.6空洞光陰極型高周波電子銃<sup>[3][4]</sup> (図1)によって生成するものとする。光陰極に入射する光源はNd:YAGレーザーの第四高調波を想定している。パラメータは波長263 nm、パルス幅10 ps、バンチ電荷1 nC/bunchとして計算を行った。また電子ビームはガウス分布をとっているものと仮定し、陰極上のビー

ム半径は0.7 mm (rms)とした。

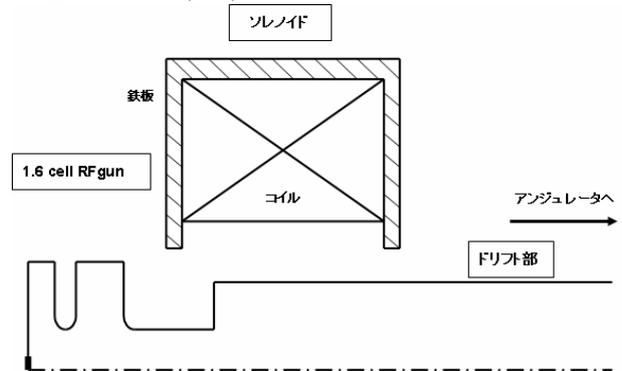


図1 1.6空洞高周波電子銃システム

#### 2.1 空洞内電界とレーザー入射位相

空洞内電界は50 MV/m、60 MV/m、65 MV/m、70 MV/m、75 MV/mの5種類に関して計算をおこなった。またレーザー入射位相を主に30°から55°の領域において変化させた。ソレノイド磁場は2000 Gであるとした。計算より求めたカソードより77.45 cmの位置における電子ビームのエネルギー、エネルギー幅、ピーク電流及び規格化エミッタンスをそれぞれ図2、図3、図4、図5に示す。

シード光源として考えている光注入型THz波パラメトリック発生器が発生させる光のうち、もっとも高いパワーである0.2 Wを出すのは160 μmから285 μmの波長の光である<sup>[2]</sup>。迅速なFELパワーの飽和のためにはFELの波長もその領域であることが望ましく、K値が2のアンジュレータを考える場合電子ビームのエネルギーが4.7 MeVから6.5 MeVの場合に

その波長のFELを得ることができる。空洞内電圧が75 MV/m以上であったとき電子ビームのエネルギーが6.5 MeVを超えることが図2より読み取れるので、空洞内電界は75 MV/mを超えないことが求められる。またエネルギー幅もFEL発振のためには1%以下であることが望ましい。さらにピーク電流が高い方がFELの飽和には有利であり、図4より空洞内電界が大きいほどより高いピーク電流を得ることがわかる。またレーザー入射位相が30°から40°の電子ビームが最も高いピーク電流を持つことも図4より読み取れる。

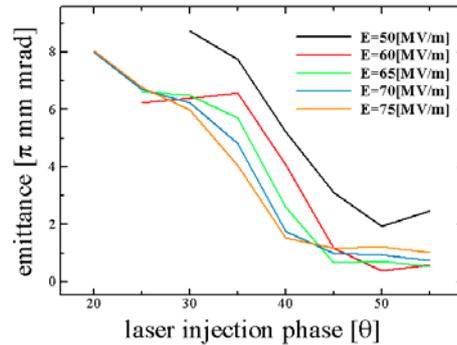


図5 電子ビームのエミッタンスの変化

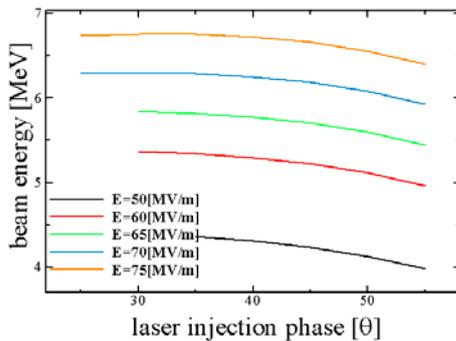


図2 電子ビームのエネルギーの変化

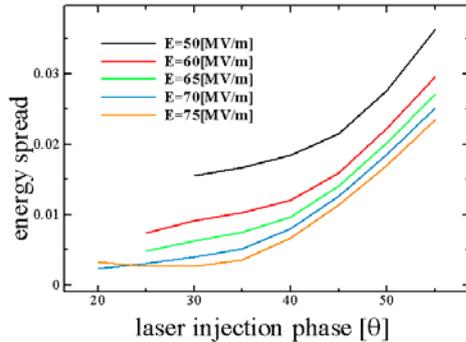


図3 電子ビームのエネルギー幅の変化

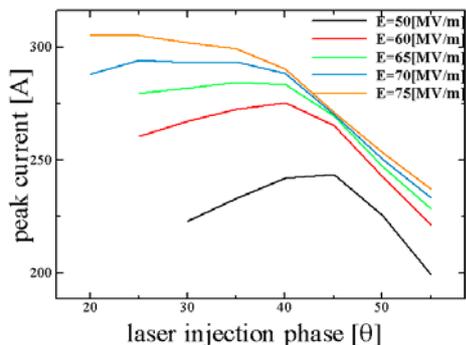


図4 電子ビームのピーク電流の変化

次に効率良くFELと電子ビームが相互作用するためには電子ビームを絞る必要がある為、エミッタンスも低く抑える必要がある。レーザー入射位相が30°から40°の時、電子ビームは空洞内電界が大きいほどエミッタンスは良い値をとるのが分かる。さらにレーザー入射位相が低くなるにつれてエミッタンスが急激に悪化することが読み取れる。

したがってレーザー入射位相40°、空洞内電界が70 MV/mのもとで生成した電子ビームが現在考えているTHz FELの発振に最適であることがわかる。

### 3.2 ソレノイド磁場

ここでは電子ビームの半径と移動距離との関係をソレノイド磁場の値を変えつつ計算した。空洞内電圧を70 MV/mと設定してソレノイド磁場を1800 Gから2300 Gへと変化させた。カソードからの距離が4.12 mとなる点までビーム半径の変化を求めた。

レーザー入射位相を40°とした場合のビーム半径の変化を図6に示す。ソレノイド磁場が1900 G以下の場合、ビーム半径は単調増加するのみで最小値をとらないことがわかる。逆にソレノイド磁場が2000 G以上の場合ビーム半径はウェストをもち、ソレノイド磁場の値が大きくなるにつれてビームの絞りも大きくなる。

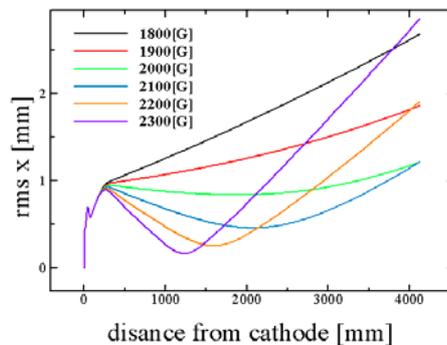


図6 ソレノイド磁場に対するビーム半径の変化

アンジュレータ内のシード光はガウスビームでありアンジュレータの中心でビームウェストが存在すると仮定すると、シード光と電子ビームのウェストが重なる時にシード光とビームとの相互作用が最も

強く働くこととなり、FELの発振に有利に働く。したがって電子ビームのウェストができるようなソレノイド磁場の強さを選び、かつウェストがアンジュレータの中心と重なるようにアンジュレータの位置を決める。

レーザー入射位相が $40^\circ$ 、空洞内電界が $70 \text{ MV/m}$ 、ソレノイド磁場が $2100 \text{ G}$ のときに生成された電子ビームについて考えた。この電子ビームのウェストはカソードより $2.067 \text{ m}$ の位置にある。アンジュレータの長さは予め別の文献より得た電子ビームのパラメータ<sup>[5]</sup>を用いて計算を行い、その結果飽和に必要なアンジュレータの長さは $2.5 \text{ m}$ という結果が得られた。ハイブリッドスタガードアレイアンジュレータは $1 \text{ T}$ 程度のピーク磁場強度をかけることが可能と考えられる<sup>[1]</sup>ので、アンジュレータの1周期の長さが $2 \text{ cm}$ 、 $K$ 値は $2$ と設定してある。よってアンジュレータの長さを $2.5 \text{ m}$ として、アンジュレータの中心がウェストと重なるようにアンジュレータの位置を設定すると、アンジュレータの電子ビーム入射口はカソードより $0.82 \text{ m}$ の距離にあると設定すればよい事になる。

#### 4 . FEL発振計算

3章において最適化された電子ビーム条件を用いてGENESIS1.3においてFEL発振が可能であるかどうか計算を行った。ビームはレーザー入射位相が $40^\circ$ 、空洞内電界が $70 \text{ MV/m}$ 、そしてソレノイド磁場が $2100 \text{ G}$ という条件のもと生成されたものとした。またアンジュレータの長さは $2.5 \text{ m}$ 、1周期の長さが $2 \text{ cm}$ 、 $K$ 値は $2$ 、そしてアンジュレータの電子ビーム入射口はカソードより $0.82 \text{ m}$ の距離にあるとして設定をおこなった。

また発振波長は $185.0 \mu\text{m}$ とする。表2にアンジュレータ入射時の電子ビームパラメータを示す。

表2 電子ビームパラメータ

規格化エミッタンス(x)	$1.77 \pi\text{mm-mrad}$
規格化エミッタンス(y)	$1.63 \pi\text{mm-mrad}$
エネルギー幅	$0.80\%$
x 方向ビーム半径	$0.74 \text{ mm}$
y 方向ビーム半径	$0.72 \text{ mm}$
Twiss parameter $\alpha_x$	$2.95$
Twiss parameter $\alpha_y$	$1.95$
ピーク電流	$288 \text{ A}$
ビームエネルギー	$6.25 \text{ MeV}$
シード光出力	$0.2 \text{ W}$

GENESISによって計算されたアンジュレータ内の位置に対するFELパワーを図7に示す。

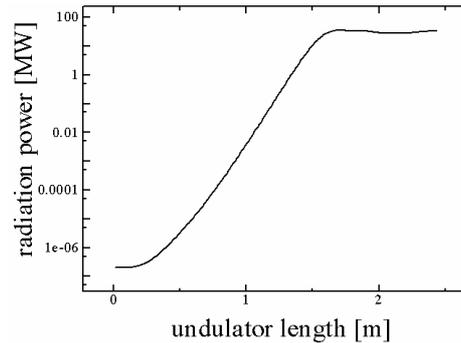


図7 最適化された電子ビームに発振されたFELパワーの飽和

図7より最適化されたビームパラメータによってFEL発振が可能であることがわかる。飽和時のFELパワーは $30 \text{ MW}$ 程であると計算できた。アンジュレータの内部 $1.8 \text{ m}$ の位置にてFELはすでに飽和しており、アンジュレータ長を $2.5 \text{ m}$ より短くしても飽和が可能であると考えられる。カソードからアンジュレータの電子ビーム入射口までの長さは $0.82 \text{ m}$ なので全体で考えても全長 $4 \text{ m}$ 以内に構成を収めることが可能であると考えられる。

#### 5 . まとめ

光陰極高周波電子銃、短周期アンジュレータ、それに波長可変THzパラメトリック発生器を用いたTHz領域の卓上FEL装置のシミュレーションによる概念設計を行った。電子ビームの最適化によりFELの発振が可能となることが計算より導かれた。

ただし今回の計算は最低限の構成について行ったものであり、シード光のアンジュレータ入射に必要なベンドマグネット等の構成要素については仮定をしていない。またTHz光の回折ロス等も仮定していない。今後は卓上seeded-THz FELの実現に向けて必要な構成要素についてより現実的な設計を行っていく予定である。

#### 参考文献

- [1] R.Kinjo, et al., "Design Study on a Short-Period Hybrid Staggered Array Undulator by Use of High-Tc Superconductor Bulk Magnets", in these proceedings.
- [2] K. Kawase, et al., Applied Physic Letters, vol. 80, no. 2, pp. 195 (2002)
- [3] F.Sakai, et al., Japanese Journal of Applied Physics, vol. 41, pp.1589 (2002)
- [4] J.Yang, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 491, pp.15 (2002)
- [5] R. Kuroda, et al., International Journal of Modern Physics B, vol. 21, pp.488 (2007)