

## 加速器・ビーム科学部会セッション

## 大電流電子線加速器の現状と応用展開

## High-current electron accelerators and applications

(2) 阪大産研 L バンド電子ライナックの高度化と  
高強度 THz 自由電子レーザーの開発(2) Upgrade of the L-band Electron Linac and Development of the High-Intensity THz Free-Electron Laser  
at ISIR, Osaka University\*磯山 悟朗<sup>1</sup><sup>1</sup>大阪大学産業科学研究所

## 1. 序論

自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) は高エネルギー電子ビームの運動エネルギーを直接、高強度単色コヒーレント光に変換する装置である。FEL は高エネルギー電子ビームを発生する加速器と、周期磁場により電子ビームを蛇行運動させて光を発生・増幅するウイグラー、光を貯めて繰返し増幅する光共振器より構成される。FEL には、高出力、動作波長領域を選ばない、単色で連続可変である、光への変換効率が高いという原理的な特徴がある一方、装置が大型で高価であるため、FEL は通常のレーザーの動作が難しい波長領域、即ち赤外線や X 線領域で主に使われている。国内で稼働している FEL は X 線と軟 X 領域で理研の SACLA、可視紫外と赤外線領域では日大電子線利用施設の FEL、赤外領域領域では京大エネルギー理工学研の KU-FEL、東京理科大の FEL-TUS、遠赤外・テラヘルツ領域では阪大産研 FEL がある。

THz 領域の FEL 動作には技術的な難しさが有る。FEL の動作には光のコヒーレント長、又は波数が少なくともウイグラーの周期数以上必要なため、FEL 用の加速器として多く使われる加速周波数が 2.8 GHz の S バンド電子ライナックでは、電子バンチが数ピコ秒程度であるため長波長領域の動作は難しい。もう一つの要素は、長波長領域で急速に増大する開放型光共振器の回折損失である。ウイグラーの磁極ギャップが最も大きな制限要因であるので、長波長領域での回折損失の増加を避けるため、ウイグラー内の真空ダクトを THz 波の導波管として利用する手法がとられる場合もあるが、周波数により発振不能なストップバンドが発生することも知られている。

本講演では、阪大産研 THz-FEL 開発の歴史と最近の高度化について紹介する。

## 2. 阪大産研 THz-FEL

阪大産研の FEL は日本で唯一、世界でも 10 に満たない THz-FEL の一つである。FEL に使われる電子加速器の多くは専用に設計・建設され、更に使用されるものであるが、この FEL は、1978 年に建設されて以来、主にパルスラジオリシスによる物質・材料科学の研究に活発に利用されている電子エネルギー 40 MeV の L バンド電子ライナックを使用する。FEL の開発研究は 1980 年代終わりに放射線実験所 (当時) の将来計画の一つとして始められ、1994 年に波長 32~40  $\mu\text{m}$  で最初の発振に成功した。しかし、L バンドライナックは FEL 用に設計されたものではなく電子パルスの長さが実質 2  $\mu\text{s}$  で FEL の増幅回数が 50 回程度に制限されるため、FEL のパワー飽和に至る大強度運転は実現できなかった。L バンドライナックの加速周波数は 1.3 GHz と前述の S バンドの半分であり、ライナック加速管の内径が倍のため大強度電子ビームの加速が可能であると共に、電子バンチが約 20 ps と長いため長波長領域の FEL に適している。問題は長波長領域での回折損失の増大であるが、我々は光共振器反射鏡の直径を 60 mm から 80 mm に拡大すると共に、共振器内の真空ダクトを順次改造しながら波長を長波長側に拡大する実験を行い、1998 年に波長 150  $\mu\text{m}$ 、周波数 2 THz での発振に成功した。この波長は当時、RF ライナックを用いた FEL としては世界で最も長い FEL 発振であった。しかし、L バンドライナックは 20 年以上前に建設された古い加速器のため FEL 用運転の再現性と安定性に難があると共に増幅回数が少なくパワー飽和に達することができなかった。そのため FEL 強度は弱く不安定であり利用研究に供することは出来なかった。

Lバンドライナックの大規模改修が2002年に認められ、運転の安定性と再現性を目指す改造を行なった。その際、FELの増幅回数を4倍に増やす長パルスモードをライナックに追加した。その結果、FELのパワー飽和と安定性向上が得られた。FELは、電子バンチと同じ間隔でマイクロパルスが数マイクロ秒並びFELマクロパルスを構成する。この時マクロパルスの最大エネルギーは波長70 $\mu\text{m}$ 、周波数4.3 THzで最大3.5 mJ、マイクロパルスのエネルギーは約10  $\mu\text{J}$ に達した。このマイクロパルスエネルギーはヨーロッパのTHz-FELが同じ波長領域で発生するマイクロパルスエネルギーと同程度の値である。

### 3. 高安定化と高強度化

FELの安定性は電子ビーム源であるLバンドライナックの安定性に依存する。超電導ライナックとは異なり常伝導ライナックはパルス運転をするため、RFパワーを一定に保つ帰還制御が不可能である。前回の大規模改修では、外部の影響による変動を低減するため、自動電圧調整機による入力AC電圧の安定化と、加速管などの冷却水温度の100分の1度台の安定化、インバーター方式空調機による室温の安定化を図ると共に、内部要因としては、ほぼ全ての電源類を更新して高安定化を目指した。特にライナックのビームの安定性に大きな影響を与えるクライストロンモジュレーター電源は、長い矩形パルスを発生するためのPFNと呼ばれる充電回路にインバーター方式の高圧電源から電荷パルスを送ることにより設定値まで充電する。PFNに充電した電荷を高速高電圧大電流スイッチであるサイラトロンで放電させ、昇圧トランスを介してクライストロンに流して大パワーRFパルスを発生する。インバーター電源のスイッチング周波数は数10 kHz程度のため限られた充電時間に送るパルス数の揺らぎが充電電圧の精度を制限する。充電電圧の精度を高めるために設定値に近づくとパルスの幅を制限してゆっくり充電したり、インピーダンスが高い充電ケーブルを従来の物に平行に追加して、設定値に近づくと高インピーダンスケーブルに切り替えて高い精度で充電する方式を開発して充電電圧の精度を数10 ppmにまで高めた。しかし自発放射からパワー飽和まで7桁以上増大するFELパルスの強度揺らぎは大きいと原因を調べたところガス封入電子管であるサイラトロンで発生する揺らぎが原因であることが分かった。そこで、静電誘導型サイリスタを10直列6並列合計60個使った25 kV、6 kAの半導体スイッチを開発した。この結果、FELパルスの変動は格段に減少した。

もう一つの課題はFELの高出力化である。FELの出力を高める効果的な手法は電子ビームの強度を高めることであり、現在使用している電子銃陰極(Eimac, YU-156)は面積が3 cm<sup>2</sup>と大きく定格で18 A以上の電流を引き出すことができるが、FEL用のパルス幅8  $\mu\text{s}$ の電子ビームを15 MeVまで加速する加速管のビーム負荷が大きく、0.6 A入射が限界である。このFEL用運転モードでは、バンチの数を減らしてバンチ当たりの電荷を出来るだけ大きくするため単バンチビームの発生に使用するSHB(Sub-Harmonic Buncher)システムを使う。LバンドライナックのSHBシステムは加速用RF周波数1.3 GHzの12分の1、即ち108 MHzのRF空洞が2台と6分の1の共振周波数、216 MHz空洞1台の3台で構成されている。2番目の108 MHz空洞と216 MHz空洞を励振して電子銃からパルス幅8  $\mu\text{s}$ でピーク電流0.6 Aのパルス電子ビームを入射すると電子ビームは108 MHzの周期で集群するため、バンチ当たり1 nCで9.2 nsの間隔を持つ多バンチ電子ビームが加速される。FELの光共振器は長さ5.53 mであり、ここをFELパルスが往復する時間はバンチ間隔の4倍である36.8 ns、周波数は108 MHzの4分の1、即ち27 MHzである。FEL発振は、光共振器を往復する度に後続の電子バンチに増幅されて発振に至るため、光共振器の中に4個のFELパルスが独立に発振する。これを108 MHzモードと呼ぶ。ここ議論から分かるようにFEL発振には1個のFELパルスで十分のため、電子バンチの間隔を4倍に広げてバンチの電荷量を4倍に増やすと、加速管でのビーム負荷は108 MHzモードと同じでビーム電流を4倍に高めることが出来る。この運転モードを実現する方法の一つは、SHBシステムに27 MHz空洞を追加することであるが、容易ではない。そこで、電子銃のグリッドに-150 Vで幅5 nsのパルスが36.8 nsの間隔で8  $\mu\text{s}$ 続くグリッドパルサーを開発して、バンチ電荷量が4 nCでエネルギーの揃った8  $\mu\text{s}$ の電子ビームの発生に成功した。この電子ビームを使い波長70~80  $\mu\text{m}$ 、周波数3.8~4.3 THzでマクロパルスエネルギーが10 mJのFEL発生に成功した。FELマクロパルスの長さは4  $\mu\text{s}$ 程度であるので約100個のマイクロパルスが含まれるので、マイクロパルスエネルギーは概算で100  $\mu\text{J}$ に達する。27 MHzモードと呼ぶこの新しいFELモードでは、従来の108 MHzモードに比べて電荷量は4倍であるがマイクロパルスエネルギーは10倍に増加した。その後、ライナックとFELの運転を最適化して108 MHzモードでマクロパルスエネルギーで13 mJ、

27 MHz モードで 28 mJ の出力エネルギーを得た。更に最近、27 MHz モードのライナックの動作を少し変更して最大マクロパルスエネルギー55 mJ を得ている。

---

\*Goro Isoyama<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University