

HIGH POWER OPERATION OF THE TERAHERTZ FEL AND ITS APPLICATIONS

Ryukou Kato^{1,A)}, Shigeru Kashiwagi^{A)}, Yutaka Morio^{A)}, Kenichiro Furuhashi^{A)}, Yoshikazu Terasawa^{A)},
Naoya Sugimoto^{A)}, Shoji Suemine^{A)}, Goro Isoyama^{A)}, Kimichika Tsuchiya^{B)}, Shigeru Yamamoto^{B)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, Japan, 567-0047

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

Abstract

We have been developing an FEL in the THz region based on the L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. Recent results of development will be reported including the wavelength spectra and the output power.

阪大産研テラヘルツFELの高出力動作とその利用

1. はじめに

テラヘルツ (THz) 帯は赤外とミリ波の間にある電磁波領域であり、レーザーの発達により著しい発展を遂げた可視～近赤外領域にくらべて、これまで強力な光源がなかったため、発生手法や検出方法の確立が遅れている。近年、フェムト秒レーザーをベースとしたTHz光源の開発により急速に広がりつつあるが、その強度はビームベースの光源にはるかに及ばない。電子ビームを起源とする光源としてはシンクロトロン放射と自由電子レーザー (FEL)がある。特にコヒーレント放射光はERLのように短いバンチ長の電子ビームが実現されるとTHz領域の強力な白色光源と成り得る。他方、THz領域で動作するFELは現在世界中で数台が稼働しているが、国内のFEL利用施設は近～中赤外に集中している。

我々は、阪大産研Lバンド電子ライナックを用いてTHz領域のFELの開発研究を行っている^{1,2}。波長70 μm でライナック改造後の再発振と出力飽和に成功した後³、FELの特性評価を行うとともに波長領域の拡大と出力増大に努めてきた。FEL発振に用いるマルチバンチ・モードのビーム調整範囲を拡大した結果、現時点での発振波長領域は25 μm ～147 μm (12THz～2THz) となり、ライナック改造前のFEL発振範囲をほぼカバーできるようになった。

2. ライナックシステムの変更とFEL波長範囲の拡大

FELの発振波長を100 μm 以上 (3 THz以下) に拡大するために、我々のFELシステムでは15 MeV以下の電子ビームが必要となる。Lバンド電子ライナックの改造以前には、プリバンチャー・バンチャー系と主加速管係で独立した2台のクライストロン・シ

ステムが存在したため、この調整は比較的容易であった。しかし、高安定化のための改造に際して、クライストロン・システムは1本に統合され、固定比率のハイブリッドにより、RFパワーの一部がプリバンチャー・バンチャー系に供給されるようになった。これにより、バンチャー系で利用可能な最大パワーは主加速管のRFパワーと一定比率に制約されるようになった。このRFパワーの分割比 (主加速管:バンチャー系=5:1) は、このライナックで利用頻度の高い運転モード (過渡モード、単バンチモード) での最大エネルギーを考慮して決定されており、低エネルギー運転時にはバンチング・パワーが不足

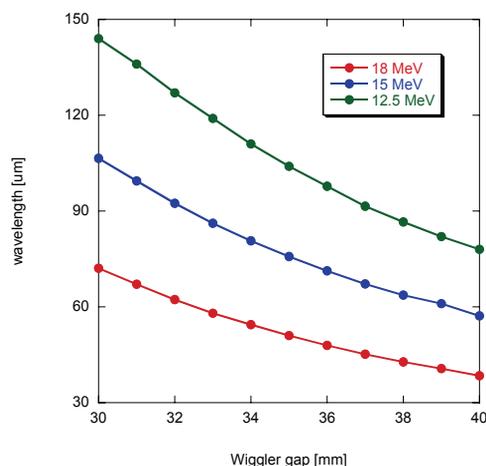


図1 ビームエネルギーとアンジュレータGapを変化させて測定されたFEL発振波長。

¹ E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp

する。FELで利用されるマルチバンチ・モードの場合、18 MeV 以下のビーム調整でバンチング・パワーが不足気味となり、15 MeV以下の調整ではより深刻な問題となる。

最近、他のライナック利用者から低エネルギービームの利用要求が出されていたこともあり、2種類の異なるパワー分割比のハイブリッドが用意された(2:1と1:1)。このハイブリッドに交換することで、より低エネルギーでの運転が可能になった。現時点でビームエネルギーは13 MeV以下まで調整可能となり、確認されたFEL発振波長は最長147 μm であった。エネルギーとアンジュレータGapを変化させながら測定されたFELの発振波長の例を図1に示す。

3. FELの増幅利得

テラヘルツ領域では最初自発放射として放射された光が、光共振器を往復するたびに指数関数的に増幅される。光強度が増大するにつれてポンデラモティブポテンシャル内での位相の回転は大きくなる。やがて電子がアンジュレータの前半ではFEL光を増幅しながらも、その後半では光を吸収するようになり、FEL増幅利得は低下する。利得が光共振器の1往復あたりの損失と同じになるとFEL光の成長は止まる。FEL増幅利得を評価するためにはマクロパルス内の各位置で単位時間当たりの光の成長率を測定すればよいが、指数関数的に強度が変化するため、測定する位置ごとに適切な厚みの減衰材(テフロンブロック)を使用して検出器の感度を線型応答の範囲にとどめておく必要がある。図2に波長105 μm でマクロパルス長を変化させながら測定したFELの増幅利得を示す。ここでは、時間の原点は電子ビームパルスの先頭を基準にしている。2.8 μs の位置の利得は減衰材無しで測定され、正味の利得は66%に達

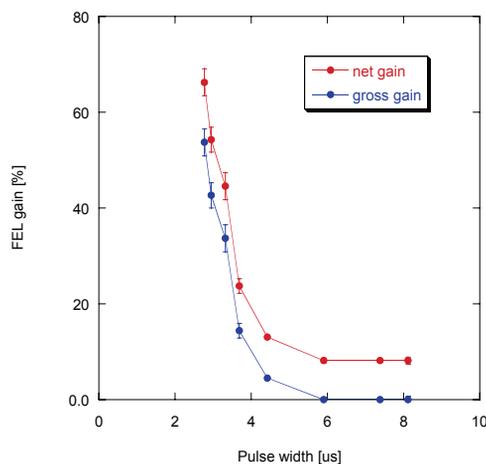


図2 FEL増幅利得の時間的変化。青線は光共振器損失込みの実際の利得、赤線は正味のFEL利得。

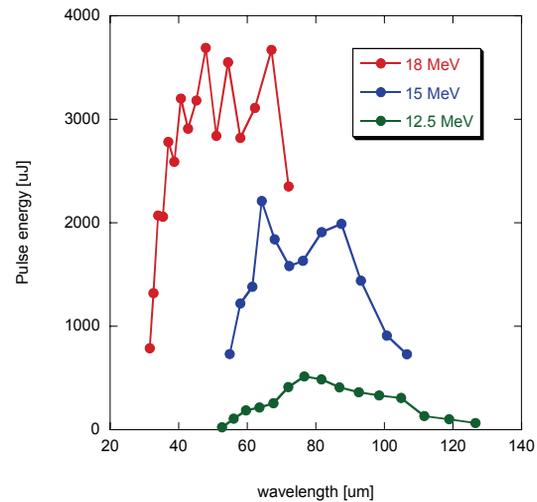


図3 FELマクロパルス当たりのエネルギー

する。これはライナックの改造前に出力飽和に達していなかった頃に測定された結果と一致する。

4. FELの飽和出力の増大

FELの飽和出力強度は、レーザー用のエネルギーセンサー(コヒーレント製、J-25MB-LE)を用いて評価された。このセンサーはメーカー出荷時の較正係数(信号強度からエネルギーへの換算計数)がCO₂レーザー近傍の波長までしか評価されていない。そのため波長15 μm での換算係数を用いた。検出効率には長波長側でより低下する傾向にあるため、実際の光出力は測定された値よりも若干大きな値になると考えられる。回折格子分光器の光取出し窓の位置(大気側)で測定されたFEL光のマクロパルス当たりのエネルギーを、図2に示す。図中の値は連続する100マクロパルスの平均値であり、その標準偏差を誤差棒として示している。

マクロパルス当たりの最大エネルギーは波長67 μm において3.7 mJであった。このときGe:Ga 半導体検出器で測定したFEL光のマクロパルスの持続時間は約3 μs であり、これによりマクロパルス内のピークパワーは約1 kW以上と評価された。マクロパルスの中には9.2 ns 間隔のマイクロパルス列が含まれる。1マイクロパルス当たりのエネルギーは10 μJ 以上となり、オランダFELIXのFEL1の出力と同等の光出力となった。このマイクロパルスの持続時間を大雑把に電子バンチの時間幅(約20 ps)と同程度と仮定するとマイクロパルス光の推定ピークパワーは約0.5 MWとなる。2枚あるダイヤモンド真空窓の取り出し効率を70%、光共振器との結合度を2-3%とすると、光共振器内に蓄積されているピークパワーは40 MWと推定される。

5. FEL高次高調波

プラナー型アンジュレータを用いたFELでは、電子の軌道は正弦波形からずれることにより、基本波だけでなく高次高調波が観測される。我々もFELの付随する2次と3次の高調波を観測した。2次高調波を測定したときのスペクトルを図4に示す。ここでは2次高調波のピーク波長をGe:Ga 検出器の感度波長範囲内にとどめる為に、電子ビームのエネルギーを14 MeVに調整し、基本波の波長を122 μm としている。強度の弱い2次高調波と基本波を連続して測定するために、この測定では減衰材（60 mm厚のテフロンブロック）をはずして測定している。Ge:Ga 検出器は過大な光入力に対して、出力が頭打ちになるのではなく、出力の線形性が失われる形で飽和現象が現れる。そのため基本波のスペクトルは、減衰材で入力光を抑えた場合（図中、青線）に対し、極端に裾野が広がったスペクトルとして観測されている。100 μm カットオフの長波長透過フィルターの使用により、これら高調波が観測できなくなることから、分光器内部の迷光等ではないことを確認している。過大光に対する検出器の感度の線形性がないことと、感度の波長依存性の補正がなされていないため、2次高調波と基本波の強度の比較はできていないが、今後黒体放射等の基準光源を用いて検出器の較正、減衰材の波長依存性の評価を行う予定である。

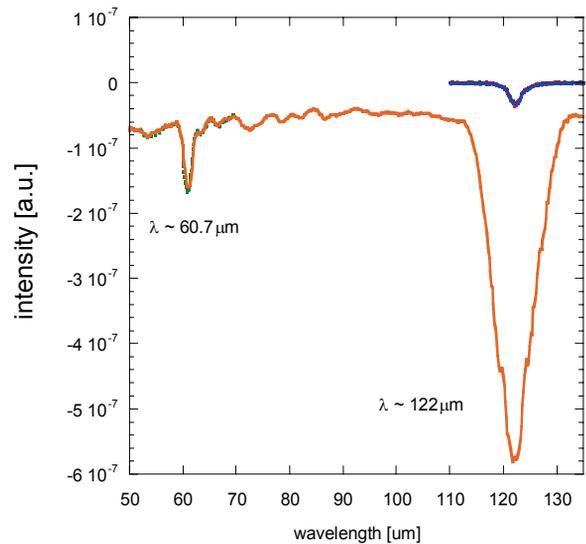


図4 FEL基本波(122 μm)と2次高調波(60.7 μm)のスペクトル（赤線）。基本波のスペクトルは検出器に強力な光が入射されたため飽和している。青線は減衰材（60mm厚のテフロンブロック）を検出器の前に挿入して測定した基本波のスペクトル。

6. テラヘルツ光の試験利用

昨年度よりFELを光源としたテラヘルツ光の試験利用を開始した。現在、「テラヘルツ波による半導体中の不純物拡散制御」、「テラヘルツ帯非線形光学効果の研究」、「テラヘルツ領域における癌凍結組織の透過スペクトル計測」の3件の研究科題が採択されて、高出力テラヘルツ光の利用が試みられている。

参考文献

- [1] S. Okuda, Y. Honda, N. Kimura, J. Ohkuma, T. Yamamoto, S. Suemine, T. Okada, S. Ishida, T. Yamamoto, S. Takeda, K. Tsumori, and T. Hori, Nucl. Instr. Meth. A358, 244-247 (1995).
- [2] R. Kato, S. Kondo, T. Igo, T. Okita, T. Konishi, S. Suemine, S. Okuda and G. Isoyama, Nucl. Instr. Meth. A445, 169-172 (2000).
- [3] G. Isoyama, R. Kato, S. Kashiwagi, T. Igo and Y. Morio, Infrared Phy. & Technol. 51, 371-374 (2008).