

日大 FEL の現状と光源実用化に向けた改良

早川 恭史^{1,A)}、佐藤 勇^{A)}、早川 建^{A)}、田中 俊成^{A)}、横山 和枝^{A)}、境 武志^{B)}、菅野 浩一^{B)}、石渡 謙一郎^{B)}、橋本 英子^{B)}、中尾 圭佐^{B)}、藤岡 一雅^{B)}、村上 琢哉^{B)}、長谷川 崇^{B)}、宮崎 慎也^{B)}

^{A)} 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

^{B)} 日本大学理工学研究科 量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1

概要

日本大学電子線利用研究施設では、2001年5月に自由電子レーザー(FEL)発振を達成して以来、強度の増強と安定化に努めてきた。共振器に誘電体多層膜ミラーを用いることによって、シングルパスでの現象と思われる3次高調波の増幅の観測などの成果が得られたが、電子ビームの不安定性や共振器長の変動によって安定なFEL発振はまだ得られていない。

FELを応用実験のために各実験室に輸送・分配する光ビームラインの整備を進めているが、可変波長光源として光を供給するには共振器ミラーを現在の多層膜から金属ミラーに交換する必要がある。これに伴って、アライメント及びガイド用のレーザーをFEL共振器に導入するため、キューブ型ビームスプリッターを用いることにした。

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、2001年5月に波長 $1.5\mu\text{m}$ での自由電子レーザー(FEL)の発振に成功した^[1]。加速器として125MeV電子リニアックを用いているが、これは熱陰極DC電子銃を用いており、入射器にサブハーモニックバンチャーを使用していない、一般的なリニアックである。そのため、FEL発振は容易ではなかったが、RF窓の真空強化によるクライストロンの長パルス化、高速移相器を用いたRFアンブ位相変動の補償などによってリニアックの性能が向上し、マクロパルス幅 $20\mu\text{s}$ のビームを安定に供給することが可能となった。このことがFEL発振の成功に大きく寄与している^[2,3]。

ファーストレイジング以降、リニアックのさらなる安定化に努めるとともに、得られるFELの特性について調べるために様々な測定を行ってきた。FELゲインの向上は見られたが、発振はまだパルス間で不安定であり、FEL利得の飽和は達成されていない。

現在はFEL発振の達成とその基本特性の研究を目的として波長 $1.5\mu\text{m}$ をターゲットとした誘電体多層膜ミラーを共振器ミラーとして用いている。波長可変性を実現するためにはこれを金属ミラーに交換する必要がある。また、アライメントシステムもこれに適合したものに改良しなければならない。

2. LEBRA 近赤外 FEL の仕様

LEBRAのFELシステムは、125MeV S-band電子リニアックと平面アンジュレータ・光共振器で構成されている。当初は可視光領域でのFELを計画していたが、アンジュレータ磁石列が放射線ダメージにより減磁してしまったため、新たに近赤外用の磁石列を製作し、現在使用している^[4]。このシステムの仕様をTable1に示す。

電子リニアックの入射器にはRF電子銃やサブハーモニックバンチャーのような特殊な装置は導入していないが、7セル型プリバンチャーの効果により比較的短いバンチ長を実現することができる。

現在のところ、共振器ミラーとして誘電体多層膜ミラーを用いている。これはFEL発振達成を目標としてアライメントや測定のしやすさを優先させたもので、波長 $1.5\mu\text{m}$ をターゲットにしている。このプロジェクトの目的はFELを波長可変な光源として実用化し実際に応用研究に使用することであるので、本来は金属コートミラーを使うことになっている。金属ミラーの使用により、波長 $0.8\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$ の近赤外領域をカバーすることが可能となる。

Table 1: LEBRA-FEL の仕様

電子ビームエネルギー	50 - 125 MeV
加速周波数	2856 MHz
マクロパルス幅	20 μs
繰り返し	12.5 Hz
ビームバンチ長	3.5 - 10 ps
アンジュレータ周期長	48 mm
周期数	50
K値 (rms)	0.65 - 1.1
共振器長	6718 mm
FEL基本波長	0.8 - 5 μm

¹ E-mail: yahayak@lebra.nihon-u.ac.jp

現在、4 セットの共振器ミラーが用意されている。Table 2 はそれらの仕様である。FEL 発振を達成したのは誘電体多層膜ミラー 1 であり、それをそのまま使い続けている。金属コートミラーの皮膜には、赤外光に対する反射率に優れている Au を採用した。

Table 2: 共振器ミラーの仕様
ミラーの直径は全て 25mm

誘電体多層膜ミラー 1	
曲率半径	4.0 m
反射率@1.5 μ m	0.995
誘電体多層膜ミラー 2	
曲率半径	4.5 m
反射率@1.5 μ m	0.995
Au 皮膜ミラー 1	
曲率半径	3.681 m
光取り出し穴直径	0.5 mm
Au 皮膜ミラー 2	
曲率半径	4.5 m
光取り出し穴直径	0.2 mm

3 . 近赤外 FEL の現状

LEBRA において 2002 年 6 月現在までに FEL 発振に成功しているのは多層膜ミラー 1 を用いた、波長 1.5 μ m 近傍のみである。FEL は高調波とともに下流の共振器から取り出しているため、コールドミラーと呼ばれる光学素子を用いて赤外基本波と可視高調波を分離し、測定している^[5]。この測定系で高調波 SASE とと思われる現象の観測にも成功している^[1]。

3.1 FEL ゲインとパワー

赤外の基本波の測定には高感度の InSb 検出器を用いている。図 1 はこの検出器で FEL を測定したときのシグナルである。FEL 発振をしているために光強度が強く、検出器は飽和してしまっている。このときの FEL ゲインと共振器のロスシグナルの立ち上がり減衰から見積ることができる。このケースでは、1 パスあたりの共振器ロスは 2.5% であり、ネットのゲインは 9.5% である。現在、最大で 10% 前後のゲインが得られている^[6]。しかしながら、これまでのところ FEL ゲインの飽和は、まだ観測されていない。

パワーメータ（焦電素子タイプ）を用いて、マクロパルスあたりの FEL パワーの測定を行ったところ、図 1 の場合で約 1mJ であった。マクロパルス内の平均パワーに換算すると、50W に相当する。

3.2 パルス間不安定性

FEL の発振は達成したが、その FEL ゲインはマクロパルス間で大きく変わり、場合によっては発振が間歇的になる。FEL の増幅が途中で挫折し、再び立

ち上がっていくイベントが頻繁に観測されることもあり、RF の位相変動などがこの不安定性の原因として考えられる。

また、現在使用している共振器ミラーの曲率半径が短いので、光と電子ビームが安定に相互作用するためにはビーム軌道の安定性に関してシビアである。電源変動によるビーム軌道のふらつきによって FEL の発振が不安定になっている可能性もある。

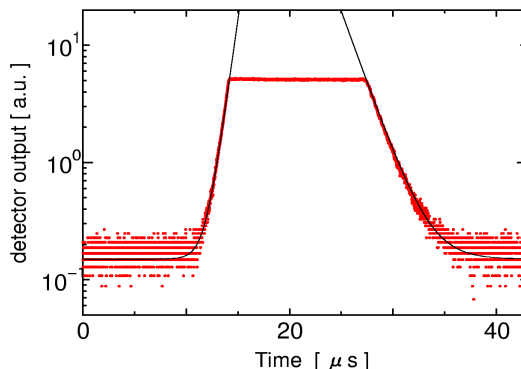


図 1 : 赤外検出器 (InSb) 出力
1 パスあたりの FEL ゲインは 9.5%、
共振器ロスは 2.5%

3.3 長時間オペレーションに伴う不安定性

電子銃周辺でのチャージアップが原因と思われる、ゆっくりとしたエミッションの減少とそれに続く放電によって、FEL 発振を長時間維持するのが困難であった。しかし、カソード電極の交換によりこの問題はほぼ解消された^[7]。

室温の変化により、真空ダクトやコンクリート壁が伸縮して共振器長が変動してしまう。図 2 は FEL 発振を維持するために必要な共振器長の変化を室温

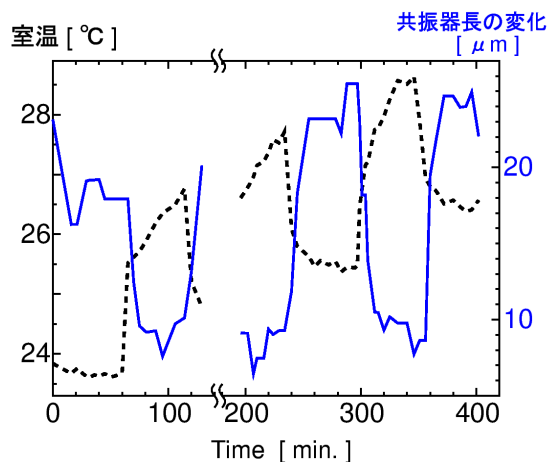


図 2 : 室温の変化と共振器長の相関
実線 : 共振器長の変化, 破線 : 室温

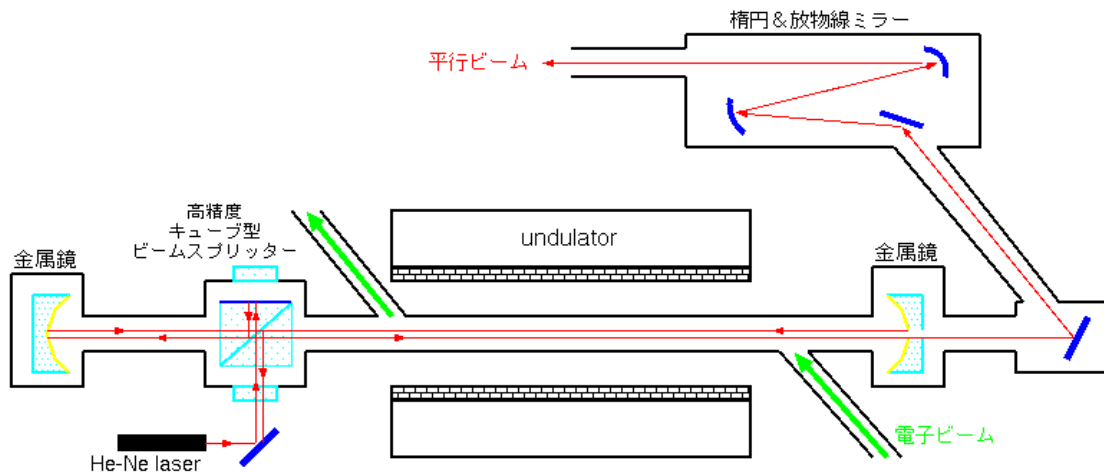


図3：金属ミラーに対応した光学アライメント系

と共にプロットしたものである。共振器長の変化は piezoelectric の印加電圧から校正している。図のように共振器長は室温に追従しており、その変化率は共振器 1m あたり約 $0.8\mu\text{m}/\text{m}$ であった。これはコンクリートやステンレスの線膨張率の 1/10 程度であり、室温に直接従う膨張を見ているわけではない。建屋が土に埋まっているため、コンクリート内部の温度変化とそれに伴う膨張は室温変化に比べかなり抑えられていると考えられる。それよりむしろ、温度膨張によって架台にひずみが生じ、それが共振器長の変動に反映している可能性が高い。架台の強化と壁や床への固定が変動の抑制に効果的であると思われるので、現在この作業を検討中である。

また、FEL 発振の頻度が増えるにつれて多層膜共振器ミラーの反射率が劣化していくという問題も発生している^[8]。LEBRA では電子ビームの間引きを行っていないので、ミラーの耐久性に関して非常に厳しいと予想される。

4．光源実用化へ向けた課題

FEL を波長可変光源として運用するには、共振器ミラーを金属コートミラーに交換する必要がある。多層膜ミラーでの経験から、電子ビーム軌道の変動の影響を受けにくいミラーのほうが安定な発振のためには良いと考えられる。従って、ミラーの曲率半径が現在使用しているものよりも少し長い Au 皮膜ミラー 2 (Table 2) を用いることを予定している。

金属ミラーにした場合、従来のように多層膜ミラーを透過する He-Ne レーザを用いてアライメントを行うことが難しくなる。そこで、屈折によるビーム位置のずれが起こらないキューブ型ビームスプリッターを共振器内に導入することにした。図3は FEL システムの光学系と予定されているアライメント用レーザの光路を示した概念図である。FEL ビームは楕円ミラーと放物ミラーで構成されるユニットで平

行化されて利用実験室まで輸送されるが^[9]、He-Ne レーザビームは各実験室でのガイド光の役割もする。末端の実験室までの光路は約 30m あるので、このビームスプリッターには高精度のものが要求される。

光源として FEL を安定に供給するためには、長時間発振を維持しなければならない。そのためには共振器長の温度変化による変動をできるだけ抑制するとともに、piezoelectric で微調整してやる必要がある。室温などの変化をリファレンスとして利用し、共振器長の補正を自動化することが可能であると思われる。そのための課題として、最適と思われる測定点の選定や、共振器長変動の温度変化に対する移動量のキャリブレーション手法の確立などが挙げられる。

参考文献

- [1] Y. Hayakawa, et al., Nuclear Inst. and Methods A 483 (2002) p. 29.
- [2] T. Sakai, et al., Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) p.222.
- [3] K. Yokoyama, et al., Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) p.231.
- [4] K. Hayakawa, et al., Proc. of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2000) p.56.
- [5] Y. Hayakawa, et al., Proc. of the International Symposium on IR FEL and its Application, to be published.
- [6] Y. Tanaka, et al., Proc. of the International Symposium on IR FEL and its Application, to be published.
- [7] K. Kanno, et al., Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) p.73.
- [8] T. Hasegawa, et al., Proc. of this Meeting. (8P-43)
- [9] E. Hashimoto, et al., Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, (2001) p.243.