

FEL 共振器ミラーの反射率の測定

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

^{A)} 日本大学大学院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 日本大学理工学部船橋校舎

^{B)} 日本大学量子科学研究所

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

概要

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) の自由電子レーザー (FEL) システムでは狭帯域の誘電体多層膜ミラーを用い、波長 $1.5\mu\text{m}$ での FEL 発振の安定化を目指した加速器全般の調整とそれに基づく FEL 発振実験を繰り返してきた。

最近になって、誘電体多層膜ミラーの劣化によると思われる反射率の低下の兆候が顕著に見られたため、反射率の低下の程度およびその波長依存性を、光共振器内に蓄積された FEL 光の減衰特性の測定から求めた。この結果から、中心波長での反射率は初期の 99.5% から 98.5% へと低下していることが確かめられた。また、FEL の立ち上がり波形を利用して同時に行った FEL 利得の解析から、最大で 11% の利得が得られていることが分かった。

1. はじめに

可視～紫外領域での自由電子レーザー (FEL) では発振利得が小さいことから、光共振器ミラーとして高反射率の得られる誘電体多層膜ミラーが使われるが、その反射率低下は FEL 発振を容易に妨げ、大きな問題である。ミラーの反射率低下の主要な原因については、アンジュレーター光に含まれる高次光である高エネルギー光子との相互作用によって引き起こされる、ミラー表面へのカーボン堆積や多層膜中でのカラーセンター蓄積などが知られており^[1]、反射率回復技術も研究されている^[2]。

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では 2001 年 5 月に、中心波長 $1.55\mu\text{m}$ での反射率 99.5% 以上の誘電体多層膜ミラーを共振器に用いて FEL 発振に成功し、これまで電子ビーム安定化およびリニアックの高性能化による赤外 FEL の発振安定化の実験を続けてきた。表 1 にリニアックの仕様、表 2 に赤外アンジュレーターの仕様を示す。赤外アンジュレーターで目標としている FEL 発振波長範囲は $1\sim 5\mu\text{m}$ である。したがって、誘電体ミラーでは狭帯域のため近い将来金属ミラーに置き換える予定であるが、実験の都合で使用を継続してきた。

このシステムを用いて LEBRA ではいままでに約 100 時間の赤外 FEL 発振実験が行われてきた。今年になって誘電体多層膜ミラーの劣化によると思われる

表 1. 125MeV リニアックの仕様

加速周波数	2856 MHz
クライストロン最大出力	30 MW
クライストロン本数	2
電子ビームエネルギー	30~125 MeV
電子ビームエネルギー幅	0.5~1 %
マクロパルスビーム電流	200 mA
マクロパルス長	20 μs
加速繰り返し	12.5 Hz
マイクロパルス長	3.5 ps
マイクロパルスビーム電流	20 A
規格化ビームエミッタンス	20 $\pi\text{mm}\cdot\text{mr}$

表 2. 赤外アンジュレーターの仕様

アンジュレーター周期長	48 mm
アンジュレーター周期数	50
最小磁極ギャップ	29 mm
軸上最大磁場	0.33 T
最大 K 値	1.5
光空洞共振器長	6718.04 mm
FEL 波長	5~0.8 μm

る反射率の低下の兆候が、実験中に FEL 光の減衰波形の変化として見られるようになったため、反射率の低下を調べることにした。

2. 光ビームの検出

LEBRA での FEL の検出は図 1 のような観測システムを配置して行っている。図 1 においてアンジュレーターからの光のうち誘電体ミラーを透過した光は放射線遮へい壁で隔てられた隣の部屋に導かれる。赤外 FEL はコールドミラーを突き抜けて赤外線ディテクターに到達し、一方可視光などの高調波はコールドミラーで反射され、望遠鏡に導かれてカラー CCD カメラで観測することができる。高調波を観測することにより、電子ビームの形状および自発放射

¹ E-mail: t-hasegawa@lebra.nihon-u.ac.jp

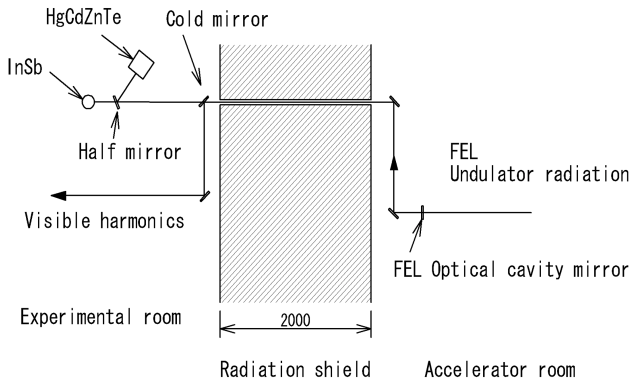


図1. アンジュレーター光観測システム。

光の分布を知ることができるので、ビーム調整においてモニター用に高調波の観測を行っている^[3]。また、赤外線ディテクターとして InSb と HgCdZnTe の二種類のディテクターを使っている。FEL の強度が弱い場合には高感度の InSb ディテクターを主に使い、強い場合には低感度の HgCdZnTe ディテクターを主に使って FEL の検出を行っている。赤外ディテクターの受光面積はどちらも 1mm^2 で、受光面の位置を He-Ne レーザーを用いてアンジュレーター中心軸に合わせてある。

図2に電子ビーム波形と FEL 検出波形の例を示す。

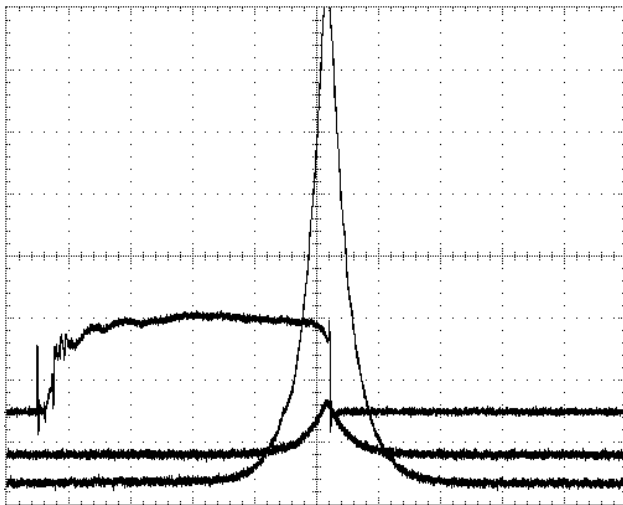


図2. Linac の電子ビーム波形およびアンジュレーター出力光のディテクター検出波形。a) : ファラデーカップによる電子ビーム波形 (40mA/div) , b) : InSb による $1.5\mu\text{m}$ FEL 光の検出波形 (100mV/div) , c) : b) の 1V/div スケールでの波形。水平軸スケール: $4\mu\text{s}/\text{div}$ 。

3. 波形解析

電子ビームの先頭がアンジュレーターに入射してから共振器中に光が蓄積される様子を数式化して考える。アンジュレーターで最初に放射された光がミラー間を n 回 ($n = 0, 1, 2, \dots$) 往復する間には、光が往復する毎にこの光と同期して次々とアンジュレータ

ーに入射した電子から自発光と FEL 光が放出され蓄積・重畳される。その時観測システムにある赤外線ディテクターで得られる出力電圧を V_n とすると以下のような単純化した関係式を仮定することが出来る。ただし、FEL が飽和しない場合を考える。

$$V_n = AI_u \{ (1-R)B + C_T \} \quad (1)$$

$$B = \left\{ C_L \sum_{k=0}^n (1+G)^k R^{2k} + C_A \sum_{k=0}^n R^{2k} \right\} \quad (2)$$

ここで I_u は電子ビーム電流、 A はディテクターの感度と幾何学的要因による検出率を考慮した係数、 R は共振器内の各ミラーの反射率、 G はマクロパルス内で一定と仮定した FEL の利得である。光の往復回数 n は共振器長から、ビームパルスの始まりから経過した時間 t と $t = 44.8n \text{ ns}$ の関係がある。上式ではまた、アンジュレーターで放射される基本波を、共振器に反射率 R で蓄積されるうち FEL 発振に寄与する成分と寄与しない成分、さらに反射率 0 で完全にミラーを透過する成分、の 3 つの成分に分けると仮定して単純なモデルを考えている。ここでは光全体のうち FEL の発振に寄与する割合を C_L 、共振器内に蓄積されるものの発振に寄与しない割合を C_A 、共振器内に蓄積されずミラーを透過する割合を C_T とおいた。したがって

$$C_L + C_A + C_T = 1 \quad (3)$$

である。

また、電子ビームマクロパルスが終わった後では、ディテクター出力にはミラーでの透過損失による減衰のみが反映するので、最初のビーム入射から数えて n 往復後の出力は

$$V_n = V_{n_f} R^{2(n-n_f)} \quad (4)$$

と表される。ここで n_f と V_{n_f} はそれぞれマクロパルス終了時の光往復回数とディテクター出力である。

以上のことから FEL の立ち上がりと減衰の波形を測定すると、(1)、(2)、(4)式による波形解析からミラーの反射率を求め、さらに FEL の発振利得を推定することができる。

FEL が発振していない状態ではディテクターの出力が小さくノイズが大きいため、測定ではある程度強く発振している状態のディテクター出力波形を、デジタルオシロスコープで取り込むことにした。上の議論を元に、FEL 発振が見られる範囲でアンジュレーター磁極ギャップを変えて取得した波形データの解析を行ない、ミラー反射率のギャップ依存性、つまり FEL 波長依存性を求めた。

4. 結果とまとめ

今回の測定はすべて 86.8MeV に加速した、マクロパルス電流約 60mA の電子ビームを用いて行った。図3に測定されたディテクター出力波形を片対数表

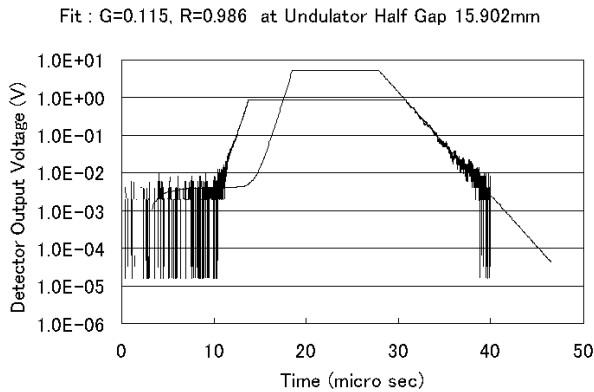


図 3. FEL 光受光強度波形の片対数表示グラフ。実線はミラー反射率 98.6%、FEL 利得 11.5%とした時のシミュレーションの結果を示す。

示した例を示す。ここで、ディテクター出力が約 1V で飽和しているのは、オシロスコープのフルスケールの設定による。

(1)~(4)式のパラメータを調整することにより検出波形の立ち上がりと減衰の波形をシミュレーションした結果を図 3 の実線で示してある。検出に用いた高感度の InSb ディテクターは増幅器が約 5V で飽和する。共振器に蓄積された光強度に対応するディテクター検出信号電圧は数 mV であるため、この 10^6 倍程度以上と予想される FEL 発振時の飽和波形はこのままでは見ることが出来ない。

パラメータの調整は、目でグラフの一致を見て行った。図 3 の例では電子ビーム終了後の光強度の減衰からミラー反射率を 98.6%と推算し、さらに FEL の立ち上がりから FEL 利得は 11.5%と推算された。シミュレーションで FEL の立ち上がりのタイミングが実測波形と異なるのは、FEL が飽和せず電子ビームの終了時から強度が減衰すると仮定して減衰曲線が一致するよう全てのパラメータを調整しているためである。電子ビーム終了時での自発放射光に対する FEL の強度比は 10^7 程度と見積もられるので、実際には FEL が飽和している可能性がある。

このような解析作業を、それぞれのアンジュレーターギャップにおいて測定したディテクター出力波形について行った。得られた結果と、メーカー（シグマ光機）による製作時の反射率測定データとの比較を図 4 に示す。ただし、現在 LEBRA の不安定な発振の状況では FEL スペクトルを測定するのが難しいため、FEL の波長はアンジュレーターギャップと電子ビームエネルギーから概算したので、波長の絶対値は一致が良くない。

測定は 2 日間に渡っているが、菱形の記号で示されている 1 日目の結果では反射率の平坦な領域で段差が生じているのが分かる。この時、測定の時系列では最初は段差のある位置を起点に左側の方向に、次に境目から右の方向に測定を行っていた。また、2 日目の結果は 1 日目の結果に見られた段差付近を測定したものである。

図 4 の比較から分かるように、メーカー測定による中心反射率 99.6% に対して 1 日目の結果では 98.9%、2 日目では 98.5% まで反射率が低下している。また、1 日目の結果において見られた反射率の段差および 1 日目と 2 日目の結果の違いは、1 日目の測定途中で反射率が変化したことによると解釈することが出来る。

結果として、ミラー 1 枚当たりの反射率は製作時より 1% 劣化していることになるが、これがアンジュレーターの上下にあるミラー両方に生じているのか、あるいは下流のミラーが特に劣化が著しいのか判断することは出来ない。これについては、波長可変にするために金属ミラーに変更した際に、改めて取り外したミラーの反射率を確認する必要がある。

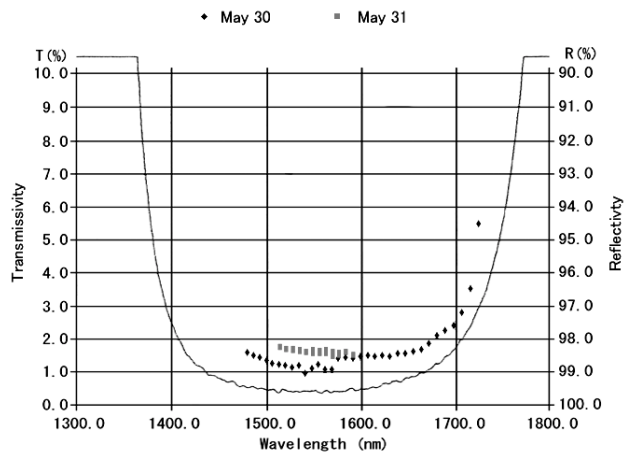


図 4. 反射率測定結果の比較。実線はメーカー測定による反射率の波長依存性で、中心で反射率 99.6%。菱形および四角記号の点は今回の測定結果で、最終的に約 1% 反射率が劣化している。測定点の波長の絶対値は確かめていない。

参考文献

- [1] U. Bizzarri et al., Rivista Nuovo Cimento 10 (1983) 1.
- [2] K. Yamada et al., Nucl. Instr. Meth. A358 (1995) 392.
- [3] 田中俊成 その他, Proc. 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 246.