

産研 FEL 光共振器の詳細評価

DETAIL STUDY OF THE FEL OPTICAL RESONATOR AT ISIR

川瀬啓悟^{#, A)}, 加藤龍好^{B)}, 磯山悟朗^{C)}

Keigo Kawase^{#, A)}, Ryukou Kato^{B)}, Goro Isoyama^{C)}

^{A)} QST

^{B)} KEK

^{C)} ISIR, Osaka University

Abstract

The resonator loss is evaluated for the free electron laser oscillator at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. Experimentally the loss is measured for the wavelength range from 40 to 110 μm using a fast pyroelectric detector by changing the undulator gap. From the point of view of optics and geometry, the loss is also evaluated for each possible origin. In this presentation, we show the recent results of the experimental measurement for the resonator loss and geometrical considerations and prospects of future work.

1. はじめに

大阪大学産業科学研究所(産研)量子ビーム科学研究施設に設置されている L-バンド電子加速器を用いた自由電子レーザー(FEL)は現在、強力なテラヘルツ光源として物性物理や分子科学などの様々な研究へ利用されている[1, 2]。そのため、光源としての FEL の基礎特性を詳細に評価することは、すべての利用研究に対して重要な基本情報を提供する。FEL の基礎特性を評価する上で、定量的な光強度の時間発展の評価は重要である。その中で、光共振器の損失は最も基本的なパラメータのひとつである。そこで本研究では、光共振器の損失について、これまでの実験におけるマイクロパルス光強度の波形計測の結果を解析し、その光強度減衰から評価する。また、FEL 光共振器の設計および幾何学的仕様から見積もられる共振器損失についても評価し、波長特性も含めた実験結果と比較する。これにより、産研テラヘルツ FEL の光増幅の時間発展について、より定量的な研究へつなげることが期待できる。

本発表では、本研究についてこれまでに実施した研究の予備的な結果を報告し、今後の指針について述べる。

2. 光強度減衰の計測

共振器損失による FEL 光パルス強度の減衰は、電子ビームによる FEL 増幅のない、すなわち、電子バンチ列がなくなった後の光パルス強度の変化を評価すればよい。本研究では、光強度に対して線形性のよい高速応答の焦電素子検出器(P5 Ultra-fast Pyroelectrics, Molelectron Detector, Inc.、以下 P5 検出器と略称)を利用して測定した。

FEL は電子ビームのエネルギーとアンジュレータの磁場強度を変えることで、自由に波長を選択することができる。一般に電子ビームのエネルギーを変えることよりもアンジュレータのギャップを変えることの方が著しく容易であるため、本研究ではアンジュレータギャップを変化させ

ることのみで、光波長を変化させている。産研 FEL のアンジュレータギャップは最小で 30 mm であり、50 mm 程度までエネルギーメータ(J-25MB, Coherent Inc.)により検出可能な FEL を発生させることができる。可変波長範囲は、電子ビームのエネルギーを 15 MeV の場合で、ピーク波長として 40 – 110 μm である。

典型的な P5 検出器による FEL パルス列の検出波形を Fig. 1 に示す。パルス列の終端部は電子パルスがなく、光強度の減衰は共振器損失によるものである。この減衰を指数関数でフィットすることで、減衰率を得る。例として、アンジュレータギャップを 37 mm とした時の減衰領域の光強度の変化を Fig. 2 に示す。ここでは、複数回の測定について各パルスのピーク値を抽出し、同じタイミングの値を平均することで光強度としている。減衰部分の指数関数によるフィットは信号強度を V 、バンチ番号を x とし、

$$V = \exp(\alpha - \beta x) + \gamma \quad (1)$$

を用いる。ここで α, β, γ はフィッティングのパラメータである。

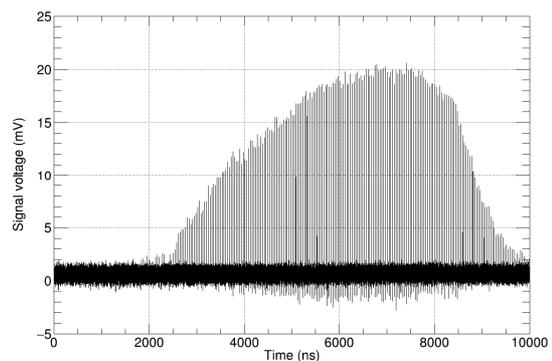


Figure 1: Typical waveform of the FEL pulses measured by the P5 pyroelectric detector.

[#] kawase.keigo@qst.go.jp

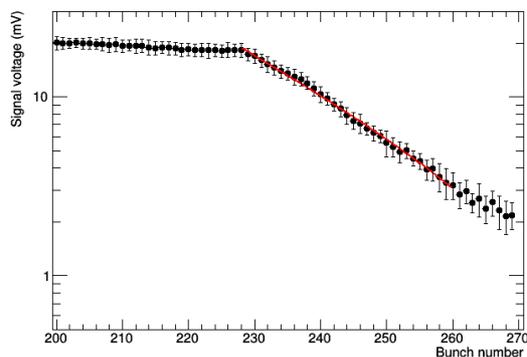


Figure 2: Typical data plot of the averaged signal peaks at the decaying range. The red line is the fitting line with Eq. 1.

同様の測定をいくつかのアンジュレータギャップに対して実施、解析した結果を Fig. 3 に示す。ここでは、共振器内の単一周回での損失を $L(\%)$ として、Eq. (1)のパラメータ β を用いて、

$$L = [1 - \exp(-\beta)] \times 100 \quad (2)$$

と書く。この結果から、アンジュレータギャップが短くなるにつれて、40 mm から 34 mm 程度まではおおよそ一定の損失であるが、34 mm から 30 mm にかけて損失が増加する傾向にあることがわかる。対応する典型的な波長はアンジュレータギャップ 34 mm に対して 84 μm 、30 mm に対して 110 μm である。なお、アンジュレータギャップ 30 mm、31 mm についてはこれまでのところ、信号強度が小さかったため、結果のばらつきが大きい。

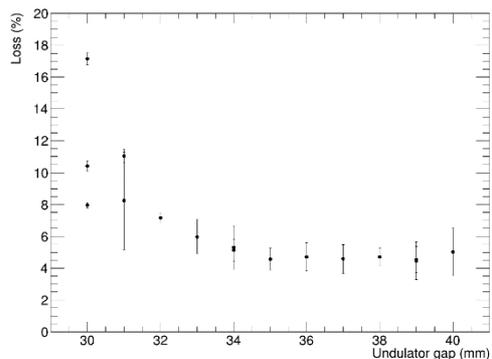


Figure 3: Single round-trip loss for each undulator gap.

3. 光共振器の幾何学的仕様と共振器損失

測定で得られた共振器損失の妥当性を評価するために、光共振器の幾何学的仕様から見積もることができる共振器損失について議論する。産研 FEL において共振器損失の要因と考えられるものは、結合孔からの結合損失、共振器ミラーの有限の大きさに起因する回折損失、共振器ミラーの反射率についての反射損失、真空ダクトの開口制限に関する回折損失が考えられる。

結合損失は、ミラー上でのビーム強度分布に対する結合孔領域のビーム強度の比として見積もることができる。2 枚の共振器ミラーのうち、電子ビームの進行方向について上流側のミラー(M1)には中心に直径 3 mm の結合孔が、下流側ミラー(M2)には直径 1 mm の結合孔があり、FEL は M1 の結合孔より取り出されて、計測、利用されている。各ミラー上でのビームサイズは、参考文献[1]において定義されているガウスビームに対するスポット半径 w を用いて、典型的な波長 λ に対して Table 1 にまとめる。合わせて、見積もられる結合損失 L_{coupl} も併記する。

Table 1: Spot Sizes of the FEL on the Resonator Mirrors for Typical Wavelengths and Corresponding Coupling Losses

λ (μm)	w_{M1} (mm)	w_{M2} (mm)	L_{coupl} (%)
120	19.9	16.5	1.3
100	18.2	15.1	1.6
70	15.2	12.6	2.3
50	12.8	10.6	3.2

ミラーの反射率は、ここで議論する遠赤外領域において、金コートミラーはおおよそ 99%以上の反射率で波長依存無くほぼ一定と見なせるので[3]、ミラーの反射損失は 1-2%程度と見積もることができる。

ミラーサイズによる損失は、共振器ミラー上での光の分布の外縁部の強度比として考えることができる。ここで用いているミラーの有効径は直径 80 mm であり、これによる損失は波長 120 μm においても 0.1%以下と見積もることができる。上の Table 1 に記したように、波長が短くなるにつれてミラー上でのビームサイズは小さくなるため、短波長ではより損失は小さくなる。

真空ダクトの開口制限による損失は、共振器系の中心にあるアンジュレータダクトによる制限が考えられる[4]。このダクトの長さは 2 m で、開口制限は垂直方向が ± 12.5 mm、水平方向が ± 21 mm である。ビームエンベロープの中心から上下流 1 m のところにこのような開口制限があった場合、ガウスビームの損失率は波長 100 μm で 0.3%程度、波長 70 μm では 0.04%程度である。

以上より、幾何学的仕様から見積もられる損失は、70 μm 以下の短波長では結合損失と反射損失でほぼ決まる。一方 70 μm 以上では、単純な開口制限による強度損失だけでは見積もり不足となる。よって、より詳細な見積もりが必要である。

4. まとめと今後の指針

産研 FEL の光共振器損失について、その波長依存性を測定し、共振器の幾何学的仕様からの評価を検討した。測定から得られた結果として、波長 84 μm よりも短い場合、おおよそ共振器損失は 5%程度で一定、それよりも長い場合、波長が増えるに従い損失が増加する傾向にある。

幾何学的仕様による損失の見積りでは、長波長におけるアンジュレータダクトの開口制限による損失を強度損失のみからでは、計測結果を説明できない。そのため、共振器内を多数回伝播する光電場の繰り返し数値計算

[5 - 8]をすべての共振器構成要素を含めて実施し、回折損失を見積もることが今後の課題である。

謝辞

本研究では、日本学術振興会科学研究費助成事業（課題番号 15K13407）および物質・デバイス領域共同研究拠点の共同研究プログラム（課題番号 20172012）の助成を受けている。ここに謝辞を申し上げる。

参考文献

- [1] H. Hoshina *et al.*, *Sci. Rep.* 6 (2016), 27180, pp. 1 – 6.
- [2] M. Nagai *et al.*, *New J. Phys.* 19 (2017), 053017, pp. 1 – 9.
- [3] https://www.thorlabs.co.jp/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=8851
- [4] R. Kato *et al.*, *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A* 407 (1998), pp. 157 – 160.
- [5] G. Fox and T. Li, *Bell System Tech. J.* 40 (1961), pp. 453 – 488.
- [6] Y. Nakajima, unpublished (1996).
- [7] R. Kato, unpublished (1999).
- [8] R. Nagai *et al.*, *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A* 475 (2001), pp. 519 – 523.