

FEL 発振によって強調された 3 次高調波の測定

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

^{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

^{B)} 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

概要

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では可視光であるアンジュレータ放射光の 3 次高調波が FEL 発振した時に強調される現象が観測された。そこで、この現象を調べるためにスペクトルを解析した。光のスペクトルは 2 つのピークから構成されており、電子ビームが 1 つのマクロパルス内に 2 つのエネルギーピークを持つと考えられる。さらに、2 つのマクロパルス内で加速器の調整次第でどちらのピークからも FEL 発振を生ずることがわかった。

1. はじめに

日本大学電子線研究施設(LEBRA)では、短波長自由電子レーザー発振を目指し、125MeV の電子線形加速器を基盤とした波長可変な単色光源の開発を目指し、近赤外から可視領域までの FEL の開発を進めている。2001 年に、波長 $1.5\mu\text{m}$ での FEL 発振に成功した。

我々は、FEL の基本的特性を調べるため、測定系の整備をすすめ、高調波スペクトルの測定、マクロパルス内での増幅の様子を調べている。現在、FEL の強度は光共振器に蓄積される自発放射光の約 10^8 倍に達しているが、しかし、FEL の飽和に至っていない。

光共振器の反射鏡は誘電体多層膜からなっている。高反射率の波長範囲が 200nm 程度、レーザーが発振する基本波長 $1.5\mu\text{m}$ 付近は、99.5% の反射率である。基本波発振が強くなると、 $0.5\mu\text{m}$ 波長の可視光強度が 3 次高調波の自発光強度の $10\sim 10^5$ 倍になる現象を観測した。

2. アンジュレータと光共振器の仕様

FEL 発生装置は加速器と FEL 発振を行うアンジュレータ及び両端にミラーを配置した光共振器からなる。現在のシステムは波長 $0.8\sim 5\mu\text{m}$ の近赤外領域をターゲットとしている。リニアックと FEL

表 1 リニアックと FEL 発生装置の仕様

Electron linac	
beam energy	50–125 MeV
acceleration	2856 MHz
beam pulse duration	20 μm
beam intensity	200 mA
repetition rate	12.5 Hz
normalized emittance	20π mm mrad
Planar undulator	
magnet array type	Halbach
material of magnets	Nd-Fb-B
number of period	50
total length	2400 mm
effective K-value	065–1.1
Optical cavity	
cavity length	6728 mm
mirror type	multi-layer or metal coat

発生装置のパラメータを表 1 に示す。

3. 測定システムの概要

FEL スペクトルの測定システムを図 1 示す。トンネルの入り口のコールドミラーによって赤外である FEL 基本波と可視であるアンジュレータ放射光の 2 次、3 次高調波に分けられる。赤外である基本波(FEL)は HgCdZnTe 赤外線検出器、InSb 赤外線検出器によって観測される。

同時に測定される可視光の輸送ラインは、石英ミラーを使用することによって CCD カメラ、スペクトルメータ、フォトダイオードの 3 本のビームラインに分割され、ビームプロファイルの観測、フォトダイオードによる強度測定、スペクトル分光を同時に行うことが可能である。LEBRA では、2m のコンクリートのシールドを通して隣接される実験室まで輸送される。また、分光器では、分光した像を加速器に同期した冷却 CCD カメラで取得している。それによって、マクロパルスあたりのスペクトルを得る。

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

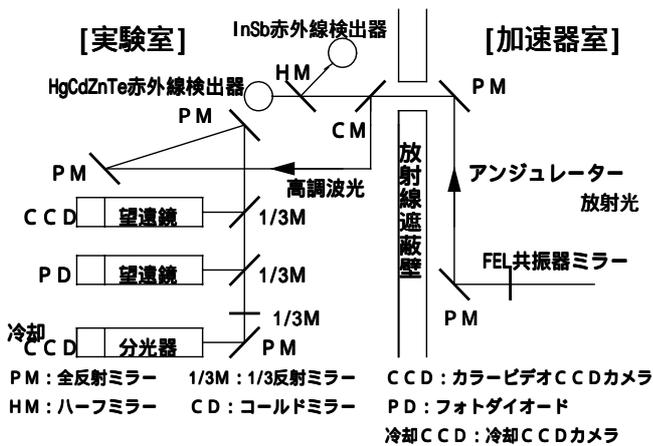


図1 スペクトル測定装置の配置。

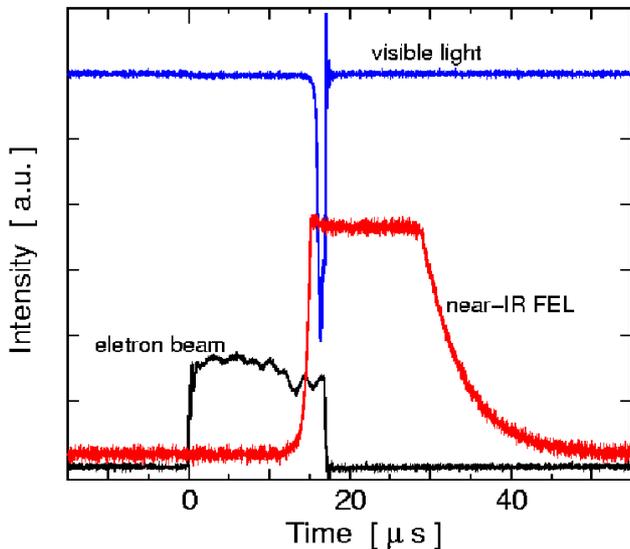


図2 フォトダイオードで3次高調波を測定したときのビーム電流と赤外領域のFEL。

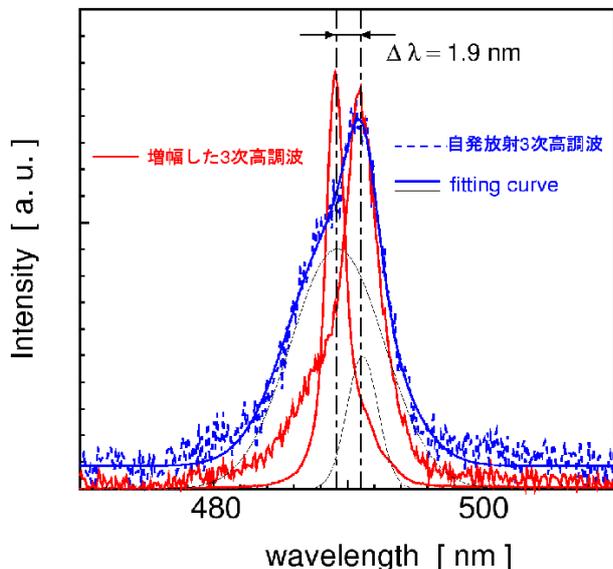


図3 スペクトル測定の結果。点線が自発放射3次高調波。細線が、増幅した3次高調波。

4.放射光のスペクトルの計測結果

2.1 測定結果

上記のシステムで、FELの測定で興味ある現象が見つかった。このときの電子ビームのエネルギー86.8MeVで行ったときの実験データである。CCDカメラで可視光フラッシュ(3次高調波)を目撃した。これは、FEL発振に伴い急激に増幅していることがわかった。この現象の時間構造を測定するため、Siフォトダイオードを望遠鏡の接眼部につけ測定した。これにより得られたデータを図2に示す。FEL基本波のゲインが大きくなった時にのみ、この増幅が確認された。増幅した時のゲインが基本波FELよりも大きいことから、その現象は非線形高調波と呼ばれる現象ではないかと考えられる。

2.2 スペクトル分析

測定によって得られたスペクトルを図3に示す。から得られたデータより分析した結果を図3に示す。2つのピークが重なったような形状をした自発放射3次高調波が、増幅するとき決まった波長で発振せずに、ある波長幅で発振していることが分かった。その間隔 $\Delta\lambda = 1.9\text{nm}$ である。これよりアンジュレータの自発光の式

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left\{ 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right\} \quad (1)$$

(1)から $\theta = 0$ の場合、 λ がシフトしたときの波長のずれは

$$\lambda + \Delta\lambda = \frac{\lambda_w}{2(\gamma + \Delta\gamma)^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\Delta\gamma}{\gamma}} - 1} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta E}{E} = 0.2\% \quad (4)$$

光のスペクトルは2つのピークから構成されており、電子ビームが1つのマクロパルス内に2つのエネルギーピークを持つと考えられる。さらに、2つのマクロパルス内で加速器の調整次第でどちらのピークからもFEL発振を生ずることがわかった。(4)式より、電子ビームのエネルギー差 $\Delta E = 0.168\text{MeV}$ である。この原因として、1つ目に、オーバーバンチングによる可能性も挙げられる。2つ目にパルスの途中で位相がずれていることが挙げられる。このような、不安定なビームの状態であっても加速器の調整によって発振しうることが増幅した高調波スペクトルから分かる。また、最近LEBRAにおいて実験中、基本波の発振が途中で挫折する現象が確認

されている(図4)。このことは、後者の原因とも結びつくのではないと思われる。

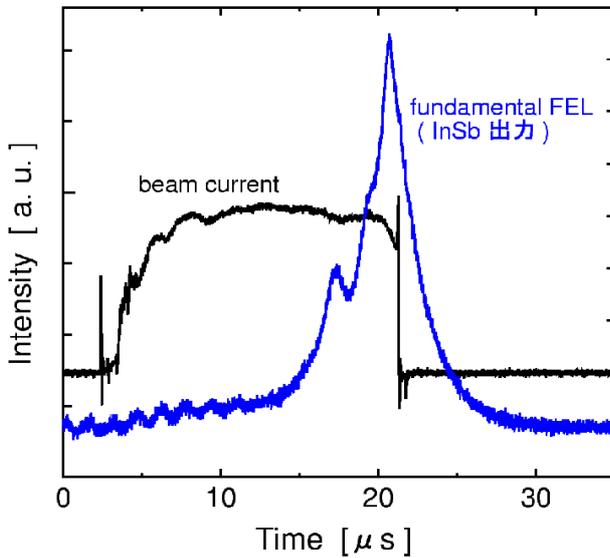


図4 フォトダイオードで3次高調波を測定したときのビーム電流と赤外領域のFEL。基本波FELが増幅過程途中、挫折している。

5. まとめと今後の課題

2つのピークを持つビームの状態をさらに分析し、原因を探る。また、光のスペクトルを使って電子のバンチの様子、位置の計測するシステムを確立する予定である。

6. 参考文献

- [1]Y.Hayakawa.,et.,Proc.of FEL Conf.DarmstadtGermany
- [2]T.Tanaka,et.,Proc.of 26th Linear Accelerator Meeting in Japan,246(2001)
- [3]H.Nakazawa et al.,Proc. Of 23th Linear Accelerator Meeting in Japan,84(1998)
- [4]Z.Huang and K.Kim,Phys.Rev.E62.(2000)