

Measurements of the pulse length of the FEL nonlinear harmonics radiation

K.Hayakawa^{1,A)}, K.Yokoyama^{2,A)}, K.Nakao^{B)}, I.Sato^{A)}, T.Tanaka^{A)}, Y.Hayakawa^{A)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} Graduate school of Science and Technology, Nihon University
1-8-4 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8301

Abstract

The pulse length of the fundamental and the nonlinear harmonics of the FEL generated at LEBRA have been measured simultaneously by means of Michelson interferometer. The nonlinear harmonics is thought of as the coherent radiation emitted from the micro-bunches corresponds to each harmonics formed by the fundamental radiation. In this measurement, the wavelength of the fundamental radiation is 1500nm, then, the wavelength of the second and third harmonics are 750nm and 500nm respectively. The fundamental radiation is detected by using InGaAs photodiode and the second and third harmonics are detected by using Si photodiode. Measured pulse length of the fundamental radiation is about 65 μ m and the second and the third harmonics is about 35 μ m and 43 μ m of FWHM.

FEL非線形高調波パルス長の測定

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)で発生している自由電子レーザーは、当初の予定よりはるかに高いゲインを有していることが判明した。これは、加速器最終段の加速管の位相が独立に制御できることから、その下流の運動量アナライザー(90度偏向系)との組み合わせによって、マグネティックバンチャーを構成し、非常に幅の狭い、ピーク電流の大きなバンチが形成されていると考えられる。バンチ長測定の一手段として、FEL光の自己相関による干渉パターンの測定を始めた^[1]。干渉計の半透過鏡にはカタログに掲載されている中では最長波長の1500nm用を使用した。この測定中に、非線形高調波もそれとわかる干渉性を示していることが明らかになったので、その特性を調べるため、基本波と高調波の同時測定を行なった。

2. 実験装置

2.1 干渉計

干渉計は図1に示すように、マイケルソン型で、4枚の全反射鏡、3枚の半透過鏡、4台の光検出器から構成される。光検出器は基本波用に、InGaAsのフォトダイオード、高調波用にSiのフォトダイオードを使用した。FELビームラインの取出しポートから大気中に取り出された光は、2枚の全反射鏡によって、干渉計の光軸に入射される。入射光は半透過鏡1によって二分割される。反射光はリファレンスに用いるため、さらに二分割されて、検出器1、2に導かれる。透過光は半透過鏡3でもう一度分割され、固定の全反射鏡4と可動の全反射鏡3に導かれる。この光が戻って再び合流したところで干渉を起す。干渉光は光検出器3及び4に到達する。基本波の波長を1500nmにすると2次及び3次高調波の波長はそれぞれ、750及び500nmになるが、InGaAsフォトダイオードは800nm以下の波長の光に対してはほとんど感度を持たない上、基本波の光強度は高調波に比べて圧倒的に強いので、基本波は波長選択のフィルタリングをする必要はなく、減光措置を施すだけで測定できる。2次及び3次高調波は共にSi検出器が感度を持つ波長である。これらはフィルターによって分離できるが同時測定をするためにはさらに半透過鏡を増やさなければならない。この実験の場合、パルス幅が非常に短いことから、半透過鏡3の基板を通過する時の屈折率と光速の違いによる光路長の違いによって空間的に分離した信号として取出すことが可能である。

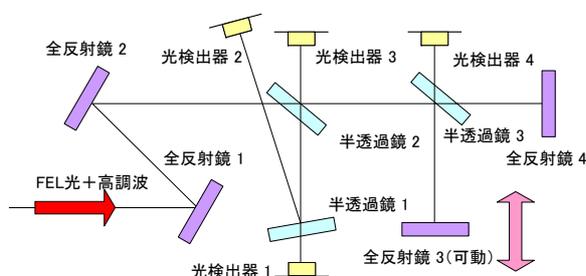


図1. マイケルソン型干渉計、ディテクター及び鏡の配置。ディテクターはSi及びInGaAsフォトダイオード。

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

² Present affiliation: High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

2.2 データ集積

ディテクター4台からの信号は、増幅した後、Tektronix社製のオシロスコープTDA3014Bによって波形表させている。この波形信号をEthernetを介してパーソナルコンピュータに取り込む。可動鏡は1軸の移動ステージの上に全反射鏡を固定したもので、ステッピングモーターによって駆動され、パーソナルコンピュータからの指示に従って移動する。移動ステップサイズは、最短25nmである。波形の取り込み及びステージの移動は加速器のトリガーに同期して行われ、現状の2Hz運転では全イベントの取り込みが可能である。

3. 非線形高調波

自由電子レーザーの非線形高調波は、基本波によって密度変調された電子ビームの放出するコヒーレントな自発放射光だと考えられる。1個の電子の放出するアンジュレーター光の強さを p とすると、 n 個の電子の放出するアンジュレーター光の強さ P は $P = np(1+n|F|^2)$ である。右辺第2項がコヒーレント放射の部分で、電子数の2乗とForm factor F の2乗に比例する。このForm factorを1粒子1次元(W. B. Colson^[2])のモデルで計算すると、コヒーレント放射光の強さはFELの強さの次数乗に比例する事が容易に示される。これが非線形高調波の立ち上がりの早さがFELの次数倍にみえる理由である。光パルスの長さについては、FELが飽和している場合はこの関係が崩れると思われるし、電子の分布も考慮しなければならないので、簡単ではない。詳しい解析は行っていないが、非常に単純化して、電子ビームもFEL光も同じ幅のガウス分布をしていて、かつアンジュレーター中での光パルスに対する電子パルスの遅れは無視できると仮定する。FEL光の進行方向の長さを σ とすると、2次の高調波では $\sigma/2$ 、3次の高調波に対しては $\sigma/\sqrt{5}$ となる。逆に、バンチの長さが光パルスよりずっと長いと仮定すると、2次の高調波では $\sigma/\sqrt{2}$ 、3次の高調波に対しては $\sigma/\sqrt{3}$ となる。いずれの場合も次数の高い高調波ほど短いパルスになることが予想される。

4. 実験

この実験を行ったときの加速電子エネルギーは100MeV、アンジュレーターを通過する電流はマイクロパルス内の平均で、50~80mA、アンジュレーターのK値が1.18になるようにギャップを調整し、1500nmで発振するように調整した。SiのCCDカメラを装着した分光器で、2次及び3次高調波の波長を確認し、InGaAsのダイオードアレイを装着した分光器で基本波の波長を確認した。

4.1 干渉パターン

実験結果の一部を図3. (a, b)に示す。縦軸は光の相対強度、横軸は可動鏡の位置で、単位は μm である。濃く見えるほうが基本波による干渉パターン、

前景になっている方がSiディテクターによって観測された高調波の干渉パターンである。波長の違いによって、この程度異なった位置で干渉が観測される。基本波の干渉している範囲はa,bで少し異なるが、200 μm 程度である。高調波の信号で、160 μm 付近に見える塊が2次の高調波の、260 μm 付近に見える塊が3次の高調波の干渉パターンである。

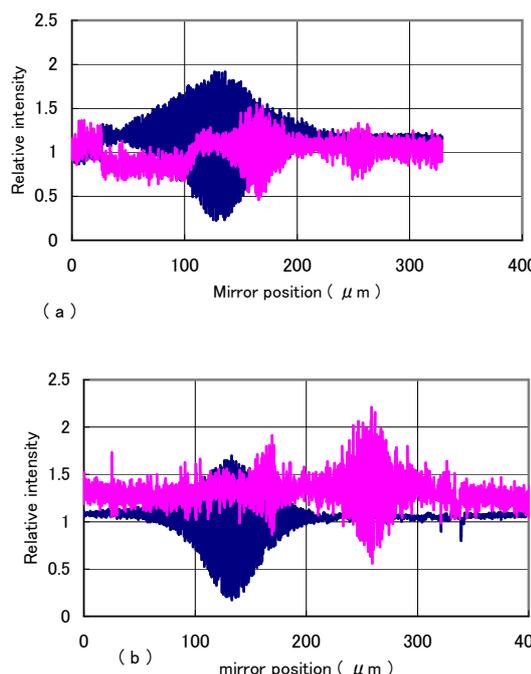


図2. 基本波及び高調波の干渉パターン(a)は2次の高調波が強くなるように調整された場合、(b)は3次の高調波が強くなるように調整された場合。

4.2 高調波の相対強度

図2の高調波の干渉パターンを比較すると明らかであるが、2次及び3次の高調波の相対的な強さが変化している。光共振器は銅基盤に銀コートした鏡を使い、上流側の鏡の中心に穿たれた直径0.3mmの穴を通して光を取出している。また、高調波の次数によって放射される光の角度分布が異なる。鏡の向きによって決まる光軸は必ずしも鏡の中心をとおるとは限らないし、電子ビームの軌道も光軸と完全に一致しているわけではないであろう。従って、光共振器の中では各次数の光の強度比が一定であっても、電子ビーム及び光共振器の調整によって、取出された光の強度分布が異なっていると考えられる。奇数次の高調波の角度分布が前方に鋭いピークを持つことを考慮すれば、3次高調波が強くなるように調整された状態が、光軸が鏡の中心を通り、かつ電子ビームの軌道と一致した状態に近いと考えられる。

4.3 光パルス長

干渉パターンからパルス長を正確に求めるのは、FELの場合、揺らぎが大きいため難しい。しかしおおまかな値の算出は可能である。図2において、横軸は鏡の位置を示すスケールであるから、光路長の変化はこの倍の長さになる。また干渉パターンの長さは元の光パルスの長さの2倍になる。図2(b)では、基本波の干渉パターンは半値全幅でおよそ130 μm 、3次の高調波はおよそ85 μm 、2次の高調波図2(a)から求めるとおよそ70 μm と見込まれる。3章の単純化したモデルでは、3次の高調波の長さが説明できない。基本波が平坦部を持つような波形をしてなおかつバンチ長が長ければ説明できるが、その場合2次の高調波の長さ(短さ)がうまく説明できない。偶数次の高調波の場合、波束の一部しか外部に取出されないと考えればよいのだが、現在は未解決である。

4.4 スペクトル

干渉の測定と平行して、スペクトルの測定を行った。図2(b)の状態のときに得られたスペクトルを図3に示す。電子ビームの状態によってはピークが移動したり、複数のピークが現れたりする。この現象は高調波において特に顕著に見られる。半値全幅をこれらのスペクトルから読み取った。2次の高調波のスペクトルは左右非対称になっていて、二つのピークが重なっていると思われる。メインのピークの左半幅の2倍を半値全幅とした。これとは別に、干渉パターンの半値幅を用いて、スペクトルの評価を行った。パルス波形として、あまり不自然でなければどのような波形を仮定してもほぼ同じ値になる。半値全幅(FWHM)は図2の横軸のスケールで測った値、基本波と3次高調波については図2(b)から読み取り、2次の高調波については図2(a)から読み取った。結果を表1に示す。この結果は分光器で測定した結果と非常によく一致しており、両者の測定に矛盾がないことを保証している。

表1 干渉パターンから導いたスペクトル幅と、干渉計を用いて測定したスペクトル幅

	FWHM	Interferometer	Spectrometer
1st	65 (μm)	1.0 (%)	0.93 (%)
2nd	35	0.95	0.95
3rd	43	0.5	0.6

5. まとめ

波長1500nmでFELを共振させ、その干渉を測定していた時に、高調波も高い干渉性を示すことが観測された。基本波および高調波の干渉パターンの同時測定を行い、各次数の光パルス長を評価した。このパルス長から算出したスペクトル幅の値は、分光器を使ったスペクトルの測定結果とよく一致している。しかし、パルス長の関係がこのようになる理由はこの実験からは解明できなかった。

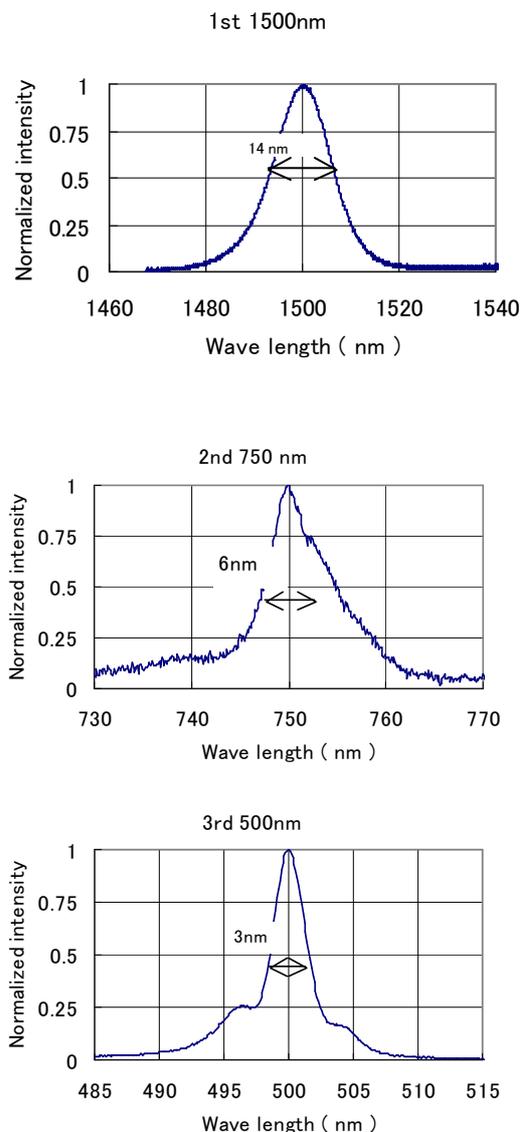


図3 分光器で測定した図2(b)の状態におけるスペクトル。矢印と数字は半値全幅を表す。

参考文献

- [1] K.Yokoyama, et al, "MEASUREMENT OF ELECTRON BUNCH LENGTH AT LEBRA" Proceedings of the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Narashino, Aug. 4-6, 2004
- [2] W.B.Colson "ONE-BODY ELECTRON DYNAMICS IN A FREE ELECTRON LASER", Phys. Lett 67A(1977)190