

自己相関法を用いた FEL ミクロパルスの計測

MEASUREMENT OF THE FEL MICRO PULSE USING AUTOCORRELATION METHOD

大角寛樹, 加藤龍好, 川瀬啓悟, 入澤明典,
藤本将輝, 矢口雅貴, 船越壮亮, 堤亮太, 磯山悟朗

Hiroki Ohsumi^{A)}, Ryuko Kato^{A)}, Keigo Kawase^{A)}, Akinori Irizawa^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)}, Masaki Yaguchi^{A)}, Sosuke Funakoshi^{A)}, Tsutsumi ryota^{A)}, Goro Isoyama^{A)}

^{A)} Osaka University, Institute of Scientific and Industrial Research

Abstract

We are doing development of the free electron laser (FEL) of a far infrared region, and research of FEL physics. FEL is reflecting the time structure of an electron beam, that is, Hundreds of micro pulses with time width(20ps~30ps) comparable as electronic Bunche exist, additionally there constitute a macro pulse from standing in a line with the time interval for 9.2 ns. In order to measure the time structure of a FEL pulse, Ge-Ga detector is usually used, but since the time resolution of Ge-Ga detector is later than 10 ns, it cannot decompose and measure a FEL micro pulse. Since the time structure of a FEL micro pulse can acquire complementary information to the wavenumber spectrum measured with a diffraction grating spectroscope, it is an interesting subject of research. The test experiment of the autocorrelation technique which used the Michelson interferometer several years ago was conducted, the interference pattern was measured, and optical resonator length dependence was acquired. The test experiment of the autocorrelation technique which used the Michelson interferometer several years ago was conducted, and optical resonator length dependence was acquired by measuring an interference pattern. This research is scheduled to resume the experiment of the FEL time structure by the autocorrelation technique which used the Michelson interferometer, and to extend it to measurement in the large domain of FEL of operation from reappearance of a former experiment. The outline of an interferometer experiment, the obtained experimental result, and its analysis result are reported this time.

1. はじめに

我々は、大阪大学産業科学研究所の L バンド電子ライナックを用いてテラヘルツ(THz)領域の自由電子レーザー(FEL)物理の実験研究を行なっている。産業科学研究所の FEL では、電子銃で発生したパルス超 $8\mu s$ の電子ビームを 108MHz 及び 216MHz のサブハーモニックバンチャー、1.3GHz のプリバンチャー、バンチャーを用いてパルス長 20~30ps のマイクロバンチを 9.2ns 間隔列で発生させ、L バンド加速管で約 1.2~1.8MeV まで加速した後、周期長 6cm³² 周期のウィグラーと長さ 5.531m の光共振器に入射し、FEL 光を取り出している。これまでは、FEL 光パルスの測定に対して、GeGa の半導体型検出器や Si ボロメータなどの検出器を使用してきた。しかし、20ps~30ps の電子マイクロパルスが放つ FEL ミクロパルスはそれと同程度の時間幅であると考えられる。そのため、10ns 程度の応答速度である GeGa やそれよりも遅い Si ボロメータでは FEL ミクロパルスの詳細な情報を得ることはできなかった。そのような問題から、今回は検出器の応答から直接マイクロパルス構造を求めていくのではなく、新たにマイケルソン干渉計を導入し、自己相関法によって FEL ミクロパルスの情報を計測した。

2.実験の背景

今回の測定では以下の条件で測定を行った。

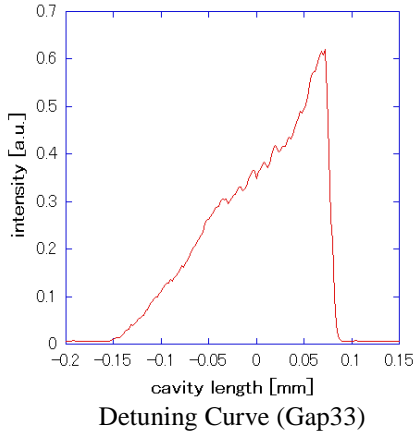
| | |
|----------------|----------------------------|
| 電子ビームのピークエネルギー | 15MeV |
| ウィグラーギャップ | 31mm, 33mm |
| 検出器 | Energy meter(Φ 10mm) |

表 1 実験パラメータ

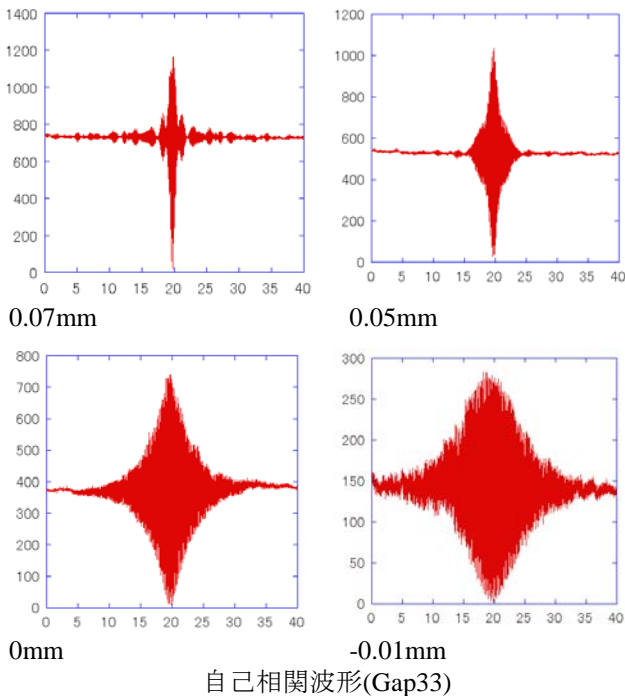
次に今回使用したマイケルソン干渉計について説明する。まずマイケルソン干渉計に入射された FEL は 1 段目のスプリッター(6 μm のマイラー)によって、2 つの光へと分けられる。片方はリファレンス光として窓から取り出され、もう一方は 2 段目のスプリッター部へと入射される。2 段目のスプリッター(12 μm のマイラー)では、反射された光は固定鏡で更に反射され、再度スプリッター部へと戻ってくる。同様に透過した光も鏡によって反射されるが、こちらは移動鏡を使用しており、移動鏡移動分の 2 倍だけ光路差が取られる。そして戻ってきた 2 つの光は互いに干渉しながら窓から取り出され、検出器へと入射される。

2.自己相関波形の測定(Gap33)

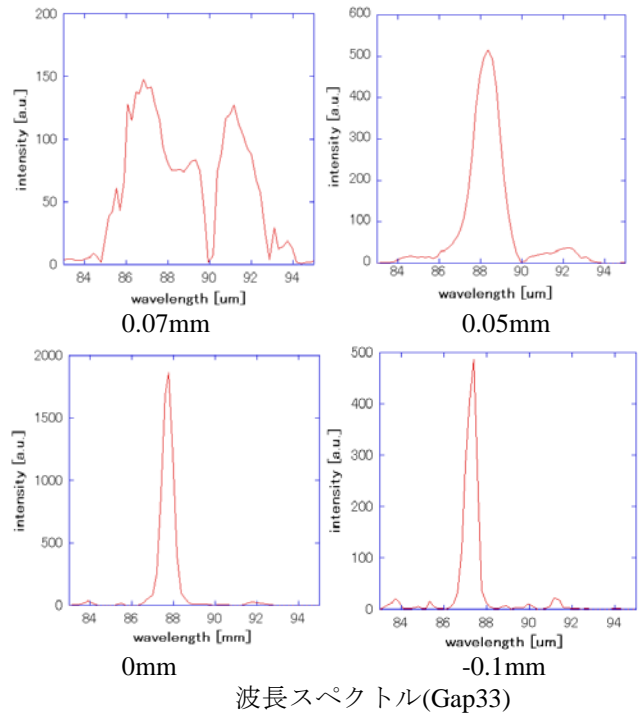
まず水の吸収が少ないと考えられる Gap33 で測定した。その際の Detuning curve は以下ようになる。



この Detuning Curve において、共振器の長さが短くなる方向に空洞長を変えていった。共振器長 0.07mm、0.05mm、0mm、-0.1mm の点で計測した自己相関波形は以下ようになる。



共振器が短くなるにつれて、自己相関波形の相関幅は短くなっている。また MirrorPosition0.07mm 辺りで見ていたサイドのビート構造は中央のビートが大きくなるに連れて見えなくなっている。次のこれらの自己相関波形に対してフーリエ変換を行った。自己相関法においては自己相関波形(インターフェログラム)をフーリエ変換することにより、周波数領域についての議論を行うことができる。実際に各波形についてフーリエ変換を行うことで得られた波長スペクトルは以下ようになる。



自己相関波形において非常に幅の短かった空洞長では波長スペクトルは非常にブロードな形をとっている。これは波長の成長が飽和に達し、かわりに他の波長を成長させているためであると考えられる。また、波長スペクトルの中にある谷の構造が存在している。これは成長している波長と波長のあいだの構造であるとも考えられるが、強度をみるとほぼゼロに落ちているため、他の物質による吸収ではないかと考えられる。実際に干渉計窓から検出器までは数 cm ほど距離があいており、その間の水蒸気によるものではないかと推測される。更に、一般的に水は波長 89.2um や 92.8um あたりに吸収波長を持っており、この波長は 0.07mm での谷の波長とほぼ一致する。このことから、波長 89.2um や 92.8um にある谷の構造は水の吸収であると考えられる。また、自己相関波形でブロードな幅を持っていた共振器長では非常に細い波長スペクトルとなっている。

3.水蒸気吸収の除去

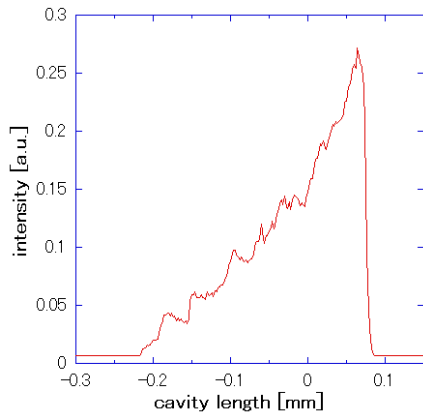
前節では水の吸収が測定データに対して非常に大きい変調を与えていると考えられた。水の吸収が比較的少ない Gap でさえ波長スペクトル幅が広がることで吸収の影響を大きく受ける。その影響を除去するため、新たに乾燥空気を生成する装置を導入し、大気中の水蒸気を乾燥空気で置換するという方法を行った。乾燥空気生成には、ANEST IWATA の SLP-22ECD と CKD の HD-1.5 という 2つの装置を使用した。乾燥機以前の大気圧の状態では、大気温度 26°C において湿度 70%(露点温度 20°C)であった。その状態から第一段目の装置によって湿度 30%にまで落とされ、更に 2 段目のシリカゲルを用いた装置によっ

て露点温度-17.2°Cから-70°Cの間にまで乾燥させた。

4.自己相関波形の測定(Gap31)

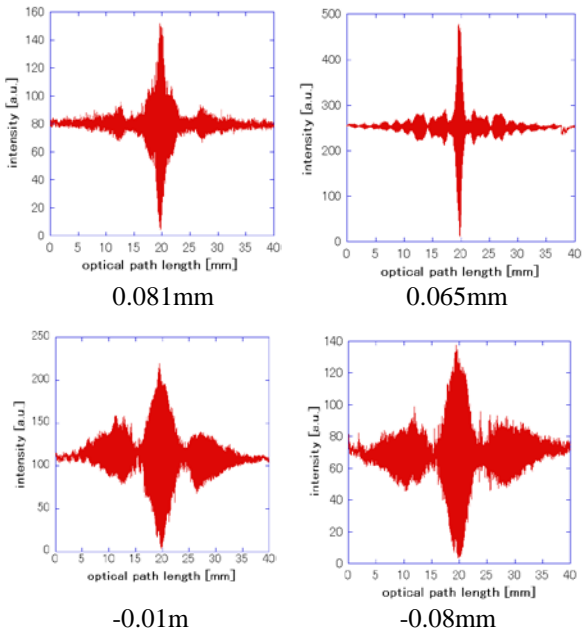
4.1 自己相関波形の測定

次にこの乾燥空気を用いて水蒸気吸収が非常に大きいと考えられる Gap31 で共振器長を変え、乾燥空気ありとなしのパターンを比較した。Gap31 での Detuning Curve は以下ようになる。



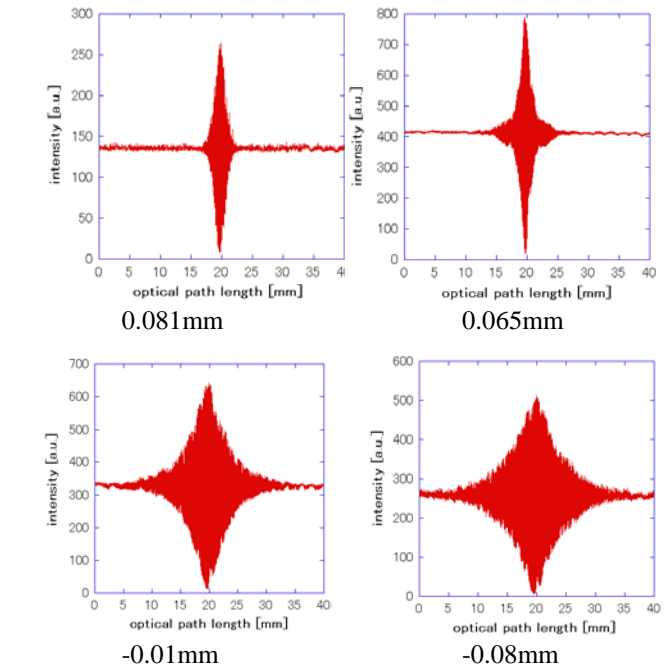
Detuning Curve (Gap31)

まずこの DetuningCurveにおいて、共振器長 0.081mm、0.065mm、-0.01mm、-0.08mm の点で計測した水の吸収あり自己相関波形は以下ようになる。



自己相関波形(Gap31 露点温度 20°C)

次に乾燥空気を使い、大気中の水蒸気を取り除いた時の自己相関波形は以下ようになる。



自己相関波形(Gap31 露点温度 17.2°C以下)

サイドに見えていた複数のビート構造が水の吸収を取り除くことにより消えた。インターフェログラム全体の強度も大幅に増加している。

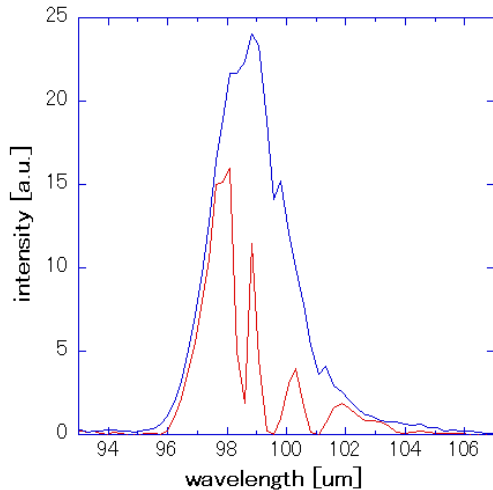
次に共振器長の点を増やし、自己相関波形の相関幅(FWHM)を求めた。自己相関波形は 2 つ光の光路差を取って干渉させているため、求めた相関幅の半分が FEL ミクロパルスの半値幅に相当すると考えられる。よって、ここから得られた FEL ミクロパルスの半値幅は以下ようになる。

| 共振器長 | 相関幅 → パルス幅 |
|-----------|----------------------------|
| 0.081mm | 6.76ps(2.78mm) → 3.38ps |
| 0.077mm | 5.98ps(1.43mm) → 2.99ps |
| 0.065mm | 8.62ps(1.45mm) → 4.31ps |
| 0.03mm | 16.41ps(2.38mm) → 8.21ps |
| -0.01mm | 25.54ps(7.42mm) → 12.77ps |
| -0.08mm | 32.22ps(9.57mm) → 16.11ps |
| (-0.18mm) | 33.68ps(12.82mm) → 16.84ps |

FEL ミクロパルス幅(Gap31)

ミクロ電子バンチ長は 20ps から 30ps であるが、それから作られる FEL ミクロパルスは約 3ps から 17ps 程度となっている。

また波長スペクトルについても比較を行った。
共振器長 0.081mm における水の吸収ありとなしの比較は以下ようになる。

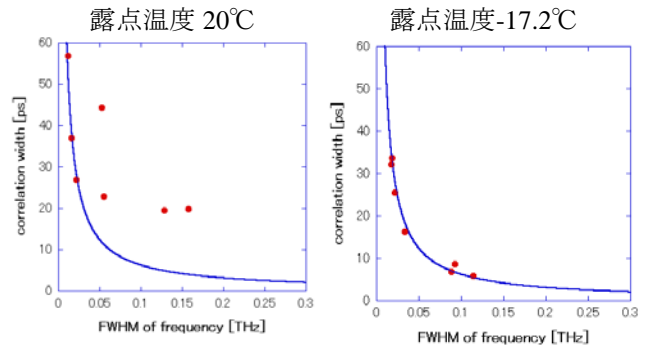


水蒸気吸収の比較(Gap31 共振器長 0.081mm)
[青線:露点温度 20°C、赤線露点温度-17.2°C以下]

水蒸気のある側(赤線)では 98.59um、99.57um、101.08um 付近に強い吸収が見られる。その谷の構造が、水蒸気を取り除いた側(青線)では完全には取り除けてはいないものの非常に弱い吸収となっている。また、水の吸収が無いと考えられる 96um から 97um では波形がほぼ一致しており、これらのことから大気中の水蒸気は波長スペクトルに対して大きな影響を与えていると考えられる。

4.2 フーリエ変換限界

次にフーリエ変換限界について考える。まずフーリエ変換限界パルスはパルス幅とスペクトル幅がフーリエ変換の関係にある時の光パルスのことをいう。つまり波長スペクトルによって合成されるパルスの中で最短のパルス幅を与えるパルスである。このフーリエ変換極限にあるパルスは非常に高いコヒーレンスを持っていると考えられ、その事から評価した自己相関波形の相関幅はフーリエ変換極限の曲線に達していればコヒーレンス長であるといえる。フーリエ変換限界は自己相関の相関幅を $\Delta\tau$ 、周波数スペクトル幅を $\Delta\omega$ とした時に、 $\Delta\tau\Delta\omega \geq k$ といった形で表される。今回は実際に Gap33 の値を用いて比較を行った。また、そのままでは評価できないため今回はガウシアンでフィットした。ガウシアンでのフーリエ変換限界の値は $\Delta\tau\Delta\omega=0.622$ である。水の吸収あり(露点温度 20°C)となし(露点温度-17.2°C)での比較は次のようになる。



フーリエ変換限界の比較(Gap 33)

水蒸気吸収ありでは、吸収によってガウシアンから大きくずれているため、あまり高い一致をしていないが、相関幅 20ps 付近で別のライン上に乗っているため、ガウシアンとは別の値でフーリエ変換限界に達しているのでは無いかと考えられる。また水蒸気吸収なしでは、0.622の値に非常に良く一致しており、自己相関幅はコヒーレントな状態であると考えられる。

5. まとめ

今回、マイケルソン干渉計を用いて自己相関波形の計測を行った。そこから FEL ミクロパルス構造の評価を行い、FEL ミクロパルスは 3ps~17ps 程度の幅を持っていることがわかった。本来 FEL ミクロパルスはスリッページの効果から電子マイクロバンチ長よりも 10ps 程度長くなるのではないかと考えられているがそれに反した結果が得られている。またマイクロパルスの構造について、正確な評価は行っていないものの、ガウスの誤差関数から FEL ミクロパルスはガウシアン構造を持っていると考えられる。理論では FEL ミクロパルスはガウシアン構造をとると考えられているため、これは理論に一致している可能性が高い。加えて、自己相関法による遠赤外線領域の FEL の測定は水の吸収を大きく受けているため、測定を行う際には乾燥空気などによって大気中の水蒸気を取り除く必要がある。