

高速 THz 検出器を用いた FEL パルスの時間分解測定

TIME RESOLVED MEASUREMENT OF FEL MICROPULSES USING FAST THz DETECTORS

船越壮亮^{#, A)}, 川瀬啓悟^{A)}, 加藤龍好^{A)}, 入澤明典^{A)}, 藤本将輝^{A)},
矢口雅貴^{A)}, 堤亮太^{A)}, 宮崎数磨^{A)}, 堤亮太^{A)}, 磯山悟朗^{A)}

Sousuke Funakoshi^{A) #}, Keigo Kawase^{A)}, Ryukou Kato^{A)}, Akinori Irizawa^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)},
Masaki Yaguchi^{A)}, Ryota Tsutsumi^{A)}, Goro Isoyama^{A)}

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

Abstract

Characteristics of fast THz detectors are studied to directly measure micropulses of the THz-FEL at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University. They are a pyroelectric sensor and Schottky diode detector. Time resolutions of both detectors are high enough to separately measure FEL micropulses at interval of 9.2ns. The response of both detectors is measured at a 70 μ m wavelength by varying the intensity of the input radiation using Teflon blocks as attenuators. The pyroelectric sensor shows non-linear response and hysteresis effects in the high intensity region and the linear response range is below 3 mV. The Schottky diode detector shows typical V-I characteristics of a diode and the linear response range is up to 10 mV. Because the diode detector shows no hysteresis effects, it can be used even in the higher power region using a calibration curve to convert the output voltage to the intensity of the input radiation. The time-resolved detuning curve of the THz-FEL is measured with the Schottky diode detector.

1. はじめに

RF 加速器により加速される多バンチ電子ビームを用いる共振型自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) では、先頭の電子バンチがウィグラー内で放射した光は、対向する 2 枚の球面鏡により構成する光共振器内を往復して後続の電子バンチ列と繰り返し相互作用して増幅され、レーザー発振に至る。共振器内を往復する光パルスは球面鏡で反射する際に一定の割合で外部に取り出される為、光共振器の往復時間間隔の光パルス列を構成する。一定間隔で取り出される FEL パルスをマイクロパルスと呼び、その並びをマクロパルスと言う。マイクロパルスの時間変化は光共振器内の FEL パルスの成長過程や減衰などを反映する。

大阪大学産業科学研究所 (以下、阪大産研) では、L-band 電子ライナックを用いた遠赤外領域の共振型自由電子レーザーを開発・研究している。L-band ライナックを FEL 用に運転する時の電子バンチの間隔は 9.2ns である一方、光共振器内を FEL パルスが往復する時間は 37ns である為、共振器内には 4 つの FEL パルスが発生し、4 系統のマイクロパルスが各々電子バンチ列と相互作用し、強度が発展する。我々は液体ヘリウム冷却 Ge:Ga 半導体検出器を用いてマクロパルスの形状を計測し、FEL の成長過程を研究している。Ge:Ga 半導体検出器の時間応答は数十 ns とマイクロパルス間隔に比べて遅い為、図 1 に示す様に 4 系統のマイクロパルスを分離して計測する事が出

来ず、4 系統の光マイクロパルスの平均値を測定することとなる。マイクロパルス強度の時間変化や増幅率等の FEL 動作を示す物理量を正確に測定するには、シングルショットでマイクロパルス列を完全に分離した観測が必要である。

今回、マイクロパルス列の分離を試みる為に 2 つの高速 THz 検出器を使用した。1 つは、焦電効果を利用して光を電気信号へと変換する Coherent 社の P5-00 である。もう 1 つの高速 THz 検出器はショットキー効果を利用した Virginia Diodes 社の QOD である。これら 2 つの高速 THz 検出器を用いてマイクロパルスの分離と検出器の特性測定を試みた。

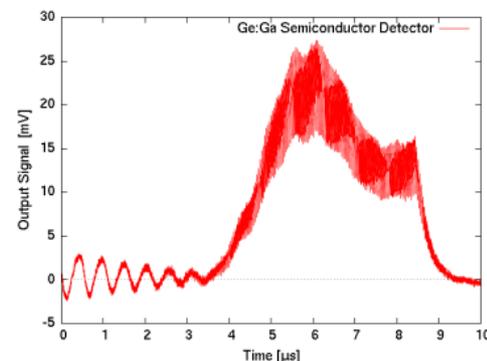


Figure 1: FEL macropulses measured with a Ge:Ga semiconductor detector.

[#] sfunakoshi25@sanken.osaka-u.ac.jp

2. 時間分解能

図 2 は、焦電素子とショットキーダイオードで測定したマイクロパルス列を示す。両者のピーク幅はマイクロパルスの時間間隔 9.2ns より十分に狭く、共に 4 系統のマイクロパルス列を分離できた。

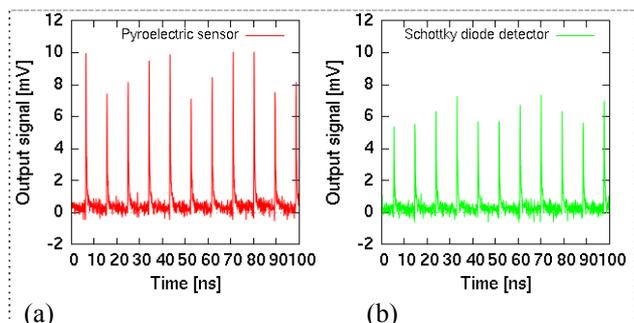


Figure 2: FEL micropulses measured with a pyroelectric sensor (a) and a Schottky diode detector (b).

3. 入出力特性

3.1 測定システム

阪大産研の L-band 電子ライナックはマルチバンチモードでは最大 880 個からなる電子バンチ列を加速することが出来る。バンチ列間隔は 108MHz で励振するサブハーモニックバンチャーによって決まり、前述のように 9.2ns である。この電子ビームは加速管で 15MeV まで加速され、FEL 装置へと導かれる。共振器を抜けた FEL 出力光は光輸送路を通過後、高速 THz 検出器へと導かれる。実験はウィグラーの磁極間隙 36mm で行い、FEL 出力光の波長は 70 μ m であり、ショットキーダイオード検出器には静電気による破壊を防ぐために Mini-Circuits 社のバイアスティー ZFBT-6GW+ を用いて DC 的にはダイオード出力を短絡している。高速焦電素子検出器とダイオード検出器の両者の出力に対してアンプを使用せず、直接 4.0GHz・最大サンプリング数 20GS/s のデジタルオシロスコープ (Rohde&Schwarz RTO 1044) で読み出す。

3.2 入出力特性

高速焦電素子検出器への入射光強度を光減衰材 (Teflon) を用いて変化させて FEL マクロパルスを計測すると、本来同形であるはずのマクロパルスの形状が大きく変化する問題が生じた。そこで、入力光に対する検出器の応答を調べた。問題は、検出器応答の線形性であり、小信号領域では検出器は線形に反応すると仮定し、FEL マクロパルスの形状を正確に反映する最大入力強度、言い換えると最大出力で夏を測定した。

加速器が安定で FELFEL マクロパルスの形状が大きく変化しないと、ある一定強度以下のマクロパルスをリファレンスとし、各時刻でのマイクロパルスの強度比をとって相関関係を調べた。図 3 に高速焦電素子及びショットキーダイオード検出器の自己相関関係を示す。これから焦電素子検出器は出力電圧信号が 3mV 未満、ショットキーダイオード検出器

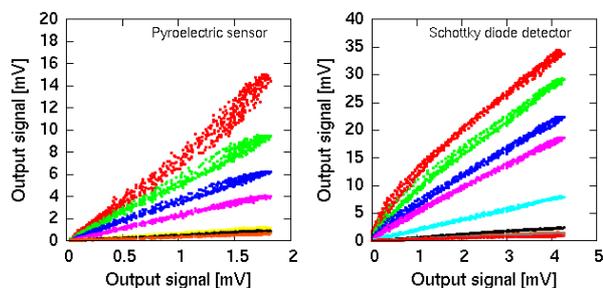


Figure 3: Intensity responses of the pyroelectric sensor (a) and the Schottky diode detector (b). The horizontal axis of each panel shows the output voltage for the low intensity THz radiation as a reference and the vertical axis shows the output voltage for the high intensity radiation. The plots present correlations between output signals and the reference signal.

の方は出力電圧信号が 10mV 未満であれば線形応答を示すと推測される。

次に、FEL 光を 2 つに分割し、一方は高速焦電素子検出器で、もう一方はショットキーダイオード検出器で検出する。両検出器の前に光減衰材を置き、検出器に入る光強度を適度に調整した。この時、一方の検出器に入る光強度を先ほど推定した入出力が線形に反応する領域内に収まるように入射光強度を調整する。この出力を基準にし、もう一方の高速 THz 検出器の入力光強度依存性を測定した。図 4 は一方の高速 THz 検出器をリファレンスに用い、他方の入力強度を変えた時の相関関係である。この結果から高速焦電素子は線形応答領域が 3mV 未満、ショットキーダイオードは入力信号強度が大きくなるに従って出力信号強度が低くなることがわかった。

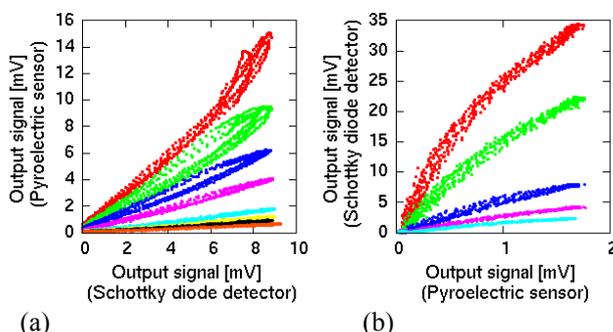


Figure 4: Intensity response of the pyroelectric detector with respect to the Schottky diode detector (a) and of the Schottky diode detector to the pyroelectric detector (b).

4. ショットキーダイオード検出器の校正

ショットキーダイオード検出器の非線形応答を補正して線形化するための応答関数を求める。

一般にショットキーダイオード検出器の V-I 特性は整流方程式

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

に従う。 I_s は半導体の拡散とダイオードの面積によって決まる定数であり、 q は単位電荷(素電荷)、 n は理想係数で通常 1~2 である。また、ショットキーダイオードに流れる電流と入射光のパワーは

$$P = \frac{I}{r} \quad (2)$$

の関係にある。 r はショットキーダイオードの受光感度である。(1)式を V について解き、(2)式を用いると、入射光パワーと電圧の間には

$$V = \frac{nkT}{q} \log_e \left(\frac{r}{I_s} P + 1 \right) \quad (3)$$

の関係が成り立つ。図 5 の相関図より、高速焦電素子の出力は入射光のエネルギーに比例するので、式(3)による回帰分析を行う。入力光に対するショットキーダイオード検出器の応答が緑色の線でパラメーターが得られる。これにより式(1)とパラメーターを使いショットキーダイオードの出力電圧から入射パワーが求まる。図 6 にダイオード検出器で計測した FEL マクロパルスの波形と式(3)によりパワーに変換した波形を示す。図 6 左は縦軸が線形で右は対数目盛で示す。図 6 の右図では、電子バンチ列が通過した時間 6.5 μ s 以後に、共振器に蓄積された光が指数関数的に減衰する過程を再現しているのがわかる。

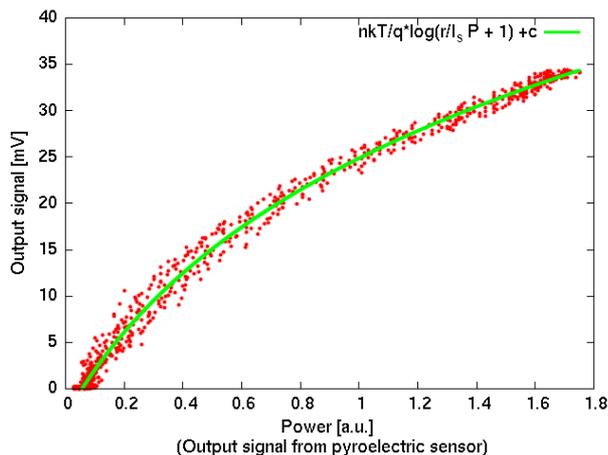


Figure 5: Output voltage of the Schottky diode detector as a function of the input intensity. The solid line is a least-square fit of Eq.(3).

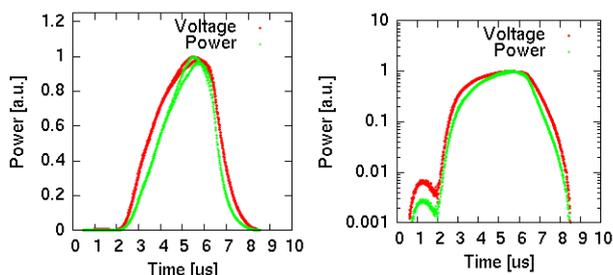
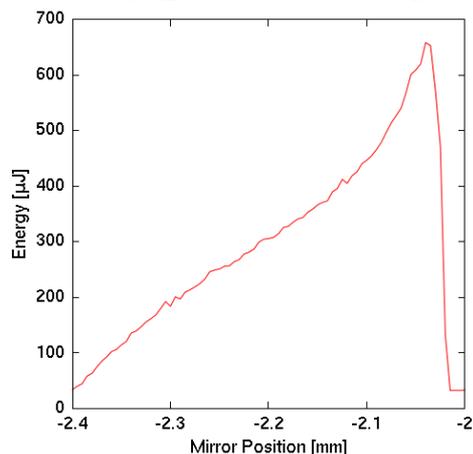


Figure 6: Macropulse profiles measured with the Schottky diode before and after the connection in the linear scale (a) and in the semi-logarithmic scale (b).

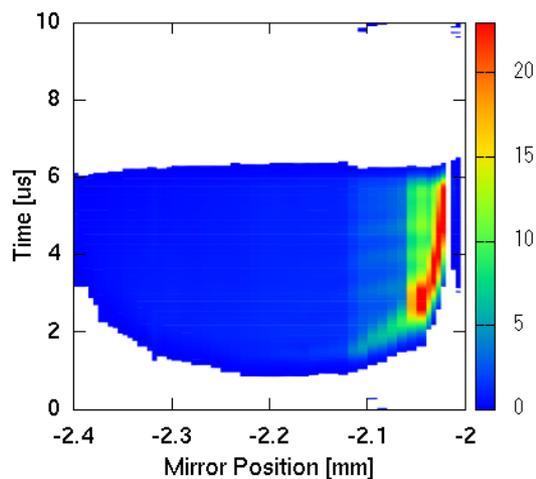
5. ディチューニング曲線

ディチューニング曲線(detuning curve)とは、光共振器の長さを変えた時の FEL 出力の変化を表す曲線である。校正係数が求めたショットキーダイオード検出器を用いてディチューニング曲線の時間発展を測定した。

従来、マクロパルスのエネルギーを測定してディチューニング曲線を得てきたが m ショットキーダイオード検出器を用いてディチューニング曲線の時間発展を調べた。図 7 の植えずは通常のマクロパルスのエネルギーに対するディチューニング曲線である。下図は 4 系統のマイクロパルスの内の 1 つのマイクロパルスのディチューニング曲線の時間発展である。共振器長を長くすると、ある共振器長からマクロパルスに周期的な振動が表れ、さらに共振器長を長くすれば、周期的な構造が無くなるのが観測された。



(a)



(b)

Figure 7: Detuning curve measured with an energy meter (a) and the time-resolved detuning curve obtained using the diode detector (b).

6. まとめ

阪大産研の THz-FEL の出力を 2 種類の高速度 THz 検出器を用いて時間分解測定した。両検出器は共に

9.2ns 間隔の FEL ミクロパルス完全に分離することが出来、入力強度に対する出力応答を測定した。波長 $70\mu\text{m}$ で測定した結果、高速焦電素子は出力 3mV 以下で入射光強度に対して線形に応答し、ショットキーダイオード検出器では、ダイオード特有の非線形応答が現れた。線形領域で用いる高速焦電素子検出器を参照光に用いてショットキーダイオード検出器の応答関数を求めた。校正したショットキーダイオード検出器を用いてディチューニング曲線の時間発展を測定した。