

TIME RESOLVED MEASUREMENT OF FEL MICROPULSES USING FAST HOT ELECTRON BOLOMETERS

Fumi Yoshi Kamitsukasa ^{#,A)}, Hiroki Ohsumi^{A)}, Akinori Irizawa^{A)}, Masaki Fujimoto^{A)}, Keigo Kawase^{A)},
Ryuko Kato^{A)}, Masaki Yaguchi^{A)}, Akira Tokuchi^{A)}, Syoji Suemine^{A)}, Goro Isoyama^{A)},
Alexei Semenov^{B)}, Heinz-wilhelm Huebers^{B)}, Petra Thoma^{C)}, Alexander Scheuring^{C)},
Konstantin Il'in^{C)}, Michael Siegel^{C)}

^{A)} Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, Japan, 567-0047

^{B)} Institute of Planetary Research, German Aerospace Center
Rutherfordstrasse 2, 12489, Berlin, Germany

^{C)} Institute of Micro- and Nanotechnology Systems, Karlsruhe Institute of Technology
Hertzstrasse 16, 76187 Karlsruhe, Germany

Abstract

Radiation at 3THz or light of a 100 μ m wavelength generated with the THz-FEL at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University is measured using two superconducting hot-electron bolometers (SHEB); one with a NbN (normal superconductor) detector and the other a YBCO (YBa₂Cu₃O₇, high temperature superconductor) detector. Both detectors are fast enough to separately measure FEL micropulse at interval of 9.2 ns, which comprise four families of independent FEL micropulses. The single-shot time spectra, however, include significant amplitude noises compared to signals and hence it is difficult to analyze these spectra quantitatively. We try some kinds of numerical methods to reduce noises of the spectra measured with the YBCO detector and find the so-called MMSE-STSA (Minimum Mean-Square Error Short-Time Spectral Amplitude Estimator) method can significantly reduce effects of the noises. As a result, it is experimentally shown that four families of FEL micropulses develop independently and differently in the power saturation region.

高速ボロメータによる FEL ミクロパルスの時間分解測定

1. はじめに

RF 加速器を使用する共振器型自由電子レーザー (FEL) では、先行する電子バンチが放射・増幅した光パルスを対向する 2 枚の球面鏡による光共振器内に蓄え後続の電子バンチと相互作用させることによりレーザー増幅・発振を行う。この共振器内に閉じ込められた光パルスをミクロパルスと呼ぶが、往復の度に一定の割合でその一部が共振器から取り出されるため、FEL の出力は電子バンチの繰り返しと同期したミクロパルス列となる。1 連のミクロパルスからなる FEL 光をマクロパルスと呼ぶが、その強度の時間変化は FEL の成長過程を反映する。

大阪大学産業科学研究所 (以下、阪大産研と略す) L-band ライナックの FEL システムでは電子バンチの繰り返し周期が 9.2ns であるのに対し、ミクロパルスが共振器を往復する時間は 37ns であるので、光共振器には 4 個のミクロパルスが独立に成長する。マクロパルスの形状、又は FEL の成長過程を液体ヘリウム冷却 Ge:Ga 半導体検出器で測定しているが、同検出器は時間分解能が~10ns であるためミクロパルス列を分離できず、4 系列の平均波形を観測することになる (図 1)。マクロパルス内で

FEL 強度の変動が大きい場合には、個別の時間変化又は構造は平均化により歪められる。ミクロパルス強度の時間変化や増幅率等の FEL パラメータの変動量を正確に測定するには、シングルショットで、かつ、ミクロパルス列を分離した観測が求められる。

今回、ドイツ航空宇宙センター (DLR) とカールスルーエ工科大学 (KIT) で開発中の高温超伝導体 (YBa₂Cu₃O₇、以下 YBCO と略す) と通常の超伝導体である窒化ニオブ (NbN) の 2 つの超伝導物質を用いた高速検出器である超伝導ホットエレクトロンボロメータ (Hot Electron Bolometer、以下 HEB と略

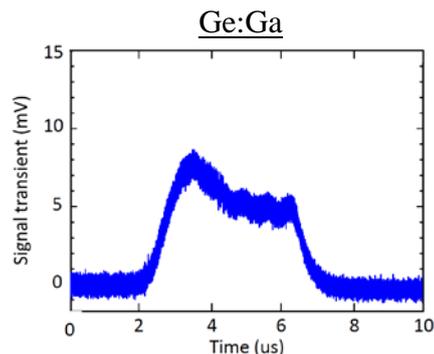


図 1 : Ge:Ga 半導体検出器で測定した FEL の時間波形。

[#] kamitsukasa25@sanken.osaka-u.ac.jp

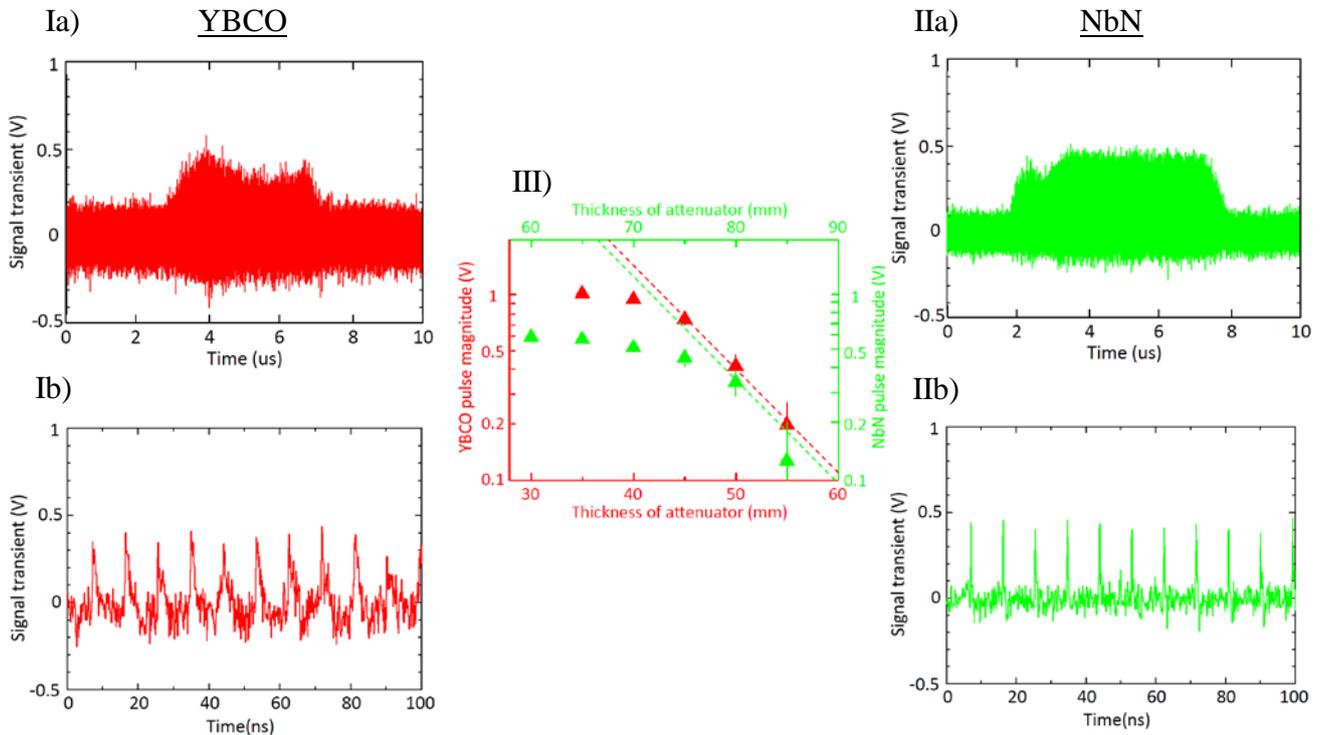


図 2 : (I) YBCO、(II) NbN 検出器で測定した FEL の時間波形。a) は FEL マクロパルスの波形を、b) はその拡大図であるマイクロパルス波形を示す。(III) 減衰器により入力光強度を調整したときの各検出器のピーク強度値の変化の図。減衰器の厚みの関数として示す。破線は線形応答領域を強調している。

す) ^[1]を使用し、FEL の時間分解測定を試みた。その結果、マイクロパルス列を分離して観測でき、FEL マイクロパルスを 4 系列の構造に分けることができた。他方、HEB の出力は SN 比が悪く、シングルショットの波形は定量的な解析が難しいので、ソフトウェア的にノイズを低減する処理を施し、4 系列の FEL マイクロパルスが別々の成長過程を辿る様子を観察した。高速検出器を用いて測定した時間波形の解析と、観測した FEL の時間発展について報告する。

2. HEB による FEL の測定

2.1 測定システム

阪大産研の L-band ライナックは、マルチバンチモードで最大 880 バンチの電子ビームを加速でき、108MHz のサブハーモニック RF システムにより決まるバンチ間隔 9.2ns の電子ビームが FEL に入射される。電子ビームは長さ 5.5m の光共振器中で 4 個の FEL マイクロパルスを飽和パワーレベルまで増幅する。上流側ミラー中心の 3mm φ の結合穴から光を取り出し、真空輸送路を通して HEB 検出器に導入する。^[2]

電子ビームのエネルギーは 15MeV で、ウイグラーの磁極ギャップ 30mm (K 値 1.47)、FEL の波長は 105 μm で実験を行った。

YBCO 検出器は液体窒素で冷却して使用する一方、NbN 検出器は液体ヘリウムで冷却して使用する。両

検出器の出力は共に、帯域幅 0.01–26GHz のバイアス・ティーと 0.1–4GHz の 40dB ゲインのアンプを介して、2.5GHz・最大サンプリング数 10GS/s のデジタルオシロスコープ (Tektronix DPO7254) で読み出される。

2.2 時間波形

2 種類の HEB により測定した FEL マクロパルスの時間波形を図 2 (I) と (II) に示す。YBCO と、NbN 共に 9.2ns 間隔のマイクロパルスを分離している。拡大図に示すマイクロパルスの形状も両者に共通しており、正に急峻に振れた後、負方向に振れた後尾を引く。正負両側への振れ面積は等しく、各マイクロパルス 1 個を含む 9.2ns の時間領域での強度の積分値はほぼ 0 である。また、YBCO と NbN で測定した時間波形の FEL のマクロパルスが存在しない領域の波形から、振幅の分散値によって定義したノイズレベルはそれぞれ 0.07V、0.043V である。

図 2 (III) は、検出器の前に減衰器としてテフロンを置き、その厚さを変えて測定した光強度をテフロンの厚みの関数として示す。波長 100 μm 付近でテフロンの減衰率は 5mm で 1/2 程度である。検出器出力が入射光の強度に比例するならば、出力電圧は指数関数的に減少するため、片対数で描くと直線になる。この減衰線からずれて一定値に近づく領域は検出器の飽和領域である。YBCO の線形応答領域は

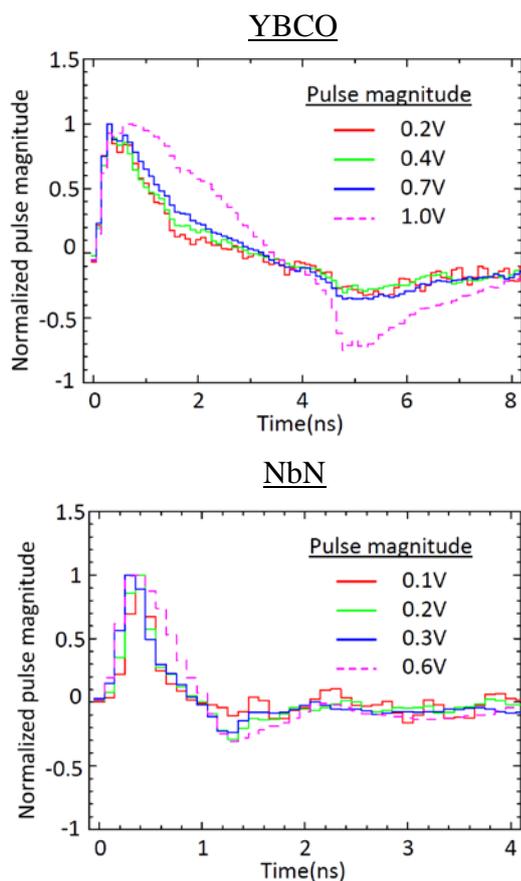


図 3：ピーク強度で規格化した平均のマイクロパルス波形（上：YBCO、下：NbN）。実線は線形応答領域、破線は飽和領域での応答波形を示す。

0.8V 以下、NbN では 0.4V 以下の領域である。他方、測定下限は出力に含まれる電氣的ノイズにより制限を受ける。線形測定範囲の最大値とノイズレベルの比でダイナミックレンジを定義すると、両者共に約 10dB である。両検出器ともダイナミックレンジが狭く、前述の FEL の個別の時間変化を観察するためにはノイズの低減が必須である。この問題に対して、今回は数値処理によってノイズの低減を試みた。その内容と結果について次節で説明する。

また、ピーク強度で規格化した平均のマイクロパルス波形を図 3 に示しておく。両検出器ともに飽和状態に至らない、すなわち、超伝導転移内での応答時間や波形は保存されている。応答時間を FWHM で定義すると、YBCO、NbN それぞれ $\sim 1\text{ns}$ 、 $\sim 0.3\text{ns}$ である。

3. ノイズ除去

HEB 検出器で測定したシングルショットの FEL 時間波形から数値処理によりノイズの低減を試みた。

YBCO 検出器の FEL 測定波形の周波数スペクトルを図 4 に示す。FEL の入力がある場合のスペクトルと入力のない場合のノイズのスペクトルを描く。

FEL の入力があるときは、間隔 9.2ns のマイクロパルス列に応じた 108MHz の基本周波数とその倍周波数にピークを持つスペクトルとなる。また、それらの周波数の周辺にはサイドバンドがあり、これは FEL のマイクロパルス波形による構造と考えられる。また、アンプとオシロスコプの帯域制限が原因と考えられる、低周波側 ($< 30\text{MHz}$)・高周波側 ($> 3\text{GHz}$) のスペクトルの下降がある。FEL 入力 / 無入力に関係なく同量の広い周波数領域に跨るホワイトノイズが存在しており、ノイズと信号には相関はないと推察する。このノイズに対し、3.1–3.3 の処理を行い、FEL マクロパルスの形状の救出を試みた。

また、処理結果の尤もらしさを確認するには、Ge:Ga 検出器によって同時に測定された波形を参照する。Ge:Ga 検出器は線形領域で動作している。比較の簡便さから、同じく線形領域で動作させた YBCO の波形 (図 2 (I)) を使用する。

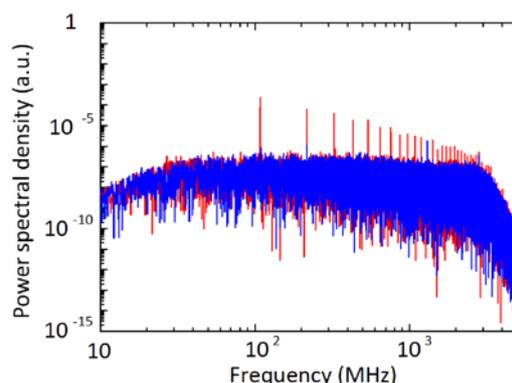


図 4：YBCO 検出器による FEL 測定波形から計算した周波数スペクトル。赤：FEL 入力時のスペクトル、青：無入力時のノイズのスペクトル。

3.1 積分法

FEL の時間波形を各マイクロパルスを含む 9.2ns の時間領域で積分する。図 3 より、HEB 検出器で測定するマイクロパルス波形は線形領域であれば形状は保存し、マイクロパルスのピーク強度とその波形の面積は比例するので、マイクロパルスエネルギーの評価にはピーク強度と面積の両方が使用可能である。9.2ns の範囲で積分することにより、その時間以下の周期のノイズを抑制する。ただし、HEB 検出器の波形は正負両方に振れるため、積分の際には振幅の絶対値を用いて計算する。YBCO 検出器で測定した FEL の時間波形をこの方法で処理した波形と、さらにその後 FEL4 系列に分離した波形を図 5 (I) に示す。

Ge:Ga 検出器の波形と比較して、傾向は似るものの依然としてノイズレベルが高く、絶対値積分のために光の無い領域でもノイズを積分し、マクロパル

スの構造がその量に埋もれている。

3.2 フィッティング

次に、マイクロパルス波形が一定であることを利用して、各パルスにフィッティングをした。図 3 のマイクロパルス波形をモデル化し、それぞれのパルスに対して振幅方向にスケールすることで最小二乗フィットし、そのスケールファクターをマイクロパルスの強度とした。フィッティング処理の際にはモデル波形を時間方向に振ることはせず、FEL のジッターは考慮しない。1 つのマイクロパルスのフィッティングに用いる点数は 90 個とした。

処理された波形を図 3 (II) に示す。3.1 の積分に比べると光の無い領域でベースが下がった分、より Ge:Ga に近い波形となっている。しかし、全体に積分法と同程度のノイズが残っており、4 系列に分離された波形の個性も有意には見えない。

3.3 MMSE-STSA 法

MMSE-STSA (Minimum Mean-Square Error Short-Time Spectral Amplitude Estimator) 法とは、推定の信

号と真の信号の振幅スペクトルの平均二乗誤差を最小にする信号強調方式である。信号とノイズに相関はなく、それぞれのスペクトル要素がガウス型ランダム変数であるとするモデルに基づく。主に音声分野で利用される技術である。^[3]

十分短い時間ではスペクトル要素同士は弱相関であり、中心極限定理によりガウス分布に従う。MMSE-STSA 法はそのガウス型統計モデルに合うように波形を短時間の分析フレームに分け、それぞれのフレームを DFT したのちに真の信号スペクトルの推定を行う。

無雑音信号振幅スペクトル A_k 、雑音振幅スペクトル D_k 、雑音混入信号振幅スペクトル R_k とすると、推定無雑音信号振幅スペクトル \hat{A}_k は以下の式で計算される。(添え字 k はスペクトル要素番号)

$$\hat{A}_k = \Gamma(1.5) \frac{\sqrt{\nu_k}}{\gamma_k} M(-0.5; 1; -\nu_k) R_k$$

$$\nu_k = \frac{\xi_k}{1 + \xi_k} \gamma_k, \quad \xi_k = \frac{E[A_k^2]}{E[D_k^2]},$$

$$\gamma_k = \frac{R_k^2}{E[D_k^2]}$$

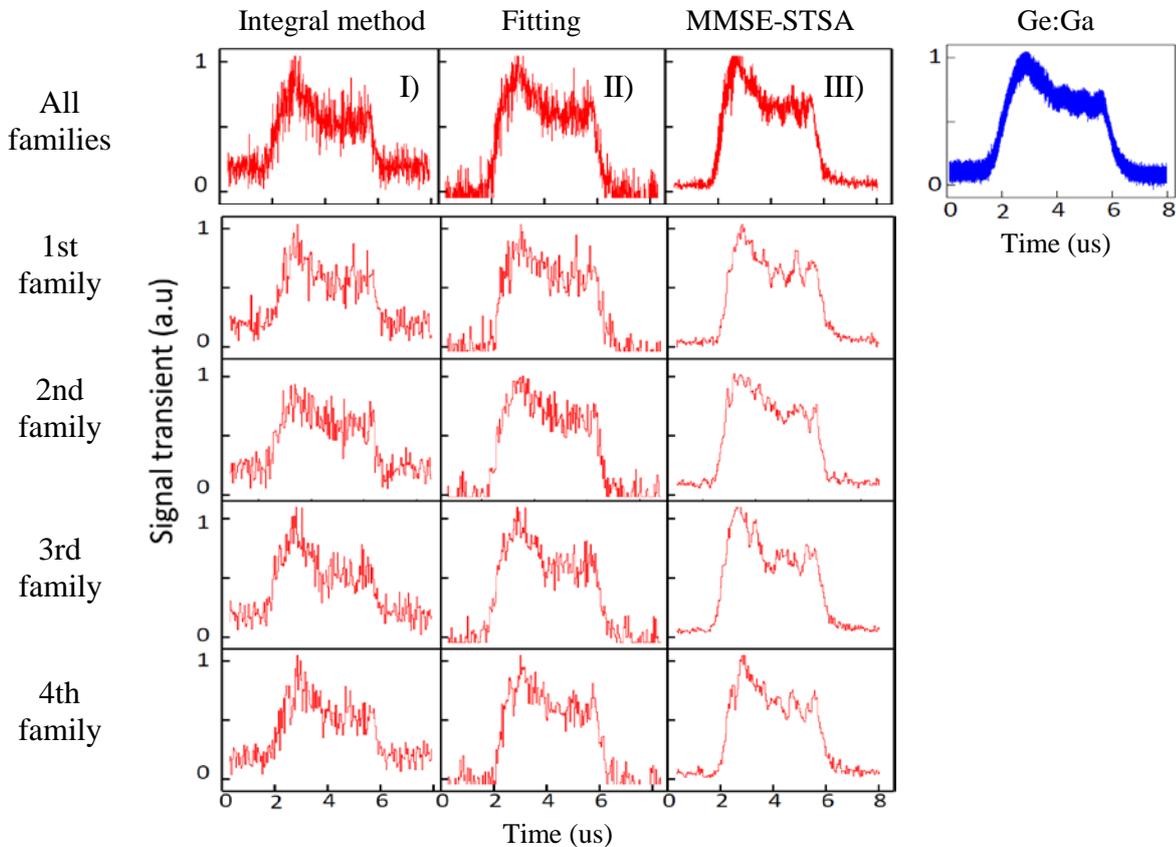


図 5 : ノイズ処理後の YBCO の時間波形。I) 積分法、II) フィッティング、III) MMSE-STSA 法の結果を示す。上 1 列は FEL4 系列の混合波形を示す。2~5 列は FEL4 系列のそれぞれの成長波形である。IV) は Ge:Ga 検出器で測定された波形を示す。

$M(a; c; x)$ は合流型超幾何関数であり、 ξ_k, γ_k はそれぞれ事前 SN 比、事後 SN 比と呼ばれる。事前 SN 比中の A_k には前フレームで求めた \hat{A}_k の利用が推奨されている。

HEB で測定した FEL の時間波形をまず 4 系列に分離した後、そのそれぞれを 1024 点の分析フレームに 1/2 ずつオーバーラップしながら分け、ハニング窓を掛けて DFT 後、MMSE-STSA 法を適用、逆 DFT し分析フレームを各位置で足し上げる。さらに、その後 3.1 の積分を施すことでノイズの低減を図った。各系列の成長過程とそれら 4 系列の混合波形を図 3 (III) に示す。

処理された 4 系列の混合波形と Ge:Ga 検出器で同時に測定された波形は FEL の飽和領域で良い一致を示す。一方、立ち上がり立ち下がり部分では処理波形の方がより急な傾斜となっている。これは MMSE-STSA 法を用いて処理した場合だけでなく、複数回の測定の平均波形を比較した際にも見られ、Ge:Ga 検出器の応答時間が遅いことを原因として起こっていると考えられる。また、4 系列に分離された波形には混合波形とは別の構造が見られ、それらも互いに異なる成長過程を辿っているように見られる。これらはフィッティングで処理された波形とも同じ傾向が観察される。

ノイズ低減処理により波形に歪みが生じている可能性があるため、これらが真の波形と断定できないが、推定値として傾向は掴めている様子である。現在、この手法の信頼性の確認を進めている。

4. まとめ

阪大産研 L-band ライナックの THz-FEL を、YBCO と NbN の 2 種類の超伝導物質を用いた高速検出器である超伝導ホットエレクトロンボロメータを使用して時間分解測定した。両検出器とも間隔 9.2ns の FEL ミクロパルスを分離し、同 FEL の独立な 4 系列の成長を区別することができた。しかし、これらの検出器で測定したシングルショットの FEL の波形は SN 比が悪く、定量的な解析は難しいので、YBCO 検出器の測定波形を用いてソフトウェア的にこれらのノイズを低減する手法を探った。結果、MMSE-STSA 法によって大きくノイズを低減できることが分かり、FEL4 系列が飽和領域で各々異なる成長過程を辿ることが観察された。

- [1] P. Probst, A. Scheuring, M. Hofherr, D. Rall, S. Wunsch, K. Il'in, M. Siegel, A. Semenov, A. Pohl, V. Judin, A.-S. Muller, A. Hoehl, R. Muller, and G. Ulm, Appl. Phys. Lett. 98, 043504 (2011).
- [2] G. Isoyama, R. Kato, S. Kashiwagi, T. Igo, and Y. Morio, Infrared Phy. & Technol. 51, 371-374 (2008).
- [3] Y. Ephraim and D. Malah, IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. ASSP-32, no.6, 1109-1121 (1984)