

Characteristic evaluation of superconducting hot-electron bolometers for FEL experiments

○Hiroki Ohsumi, Ryuukou Kato, Akinori Irizawa, Keigo Kawase, Masaki Fujimoto, Fumiyooshi Kamitsukasa, Masaki Yaguchi, Goro Isoyama (ISIR, Osaka University), Alexei Semenov, Heinz-wilhelm Huebers, Alexander Scheuring, Konstantin Il'in, Michael Siegel (Institute of Planetary Research, DLR), Petra Thoma(Institute for Micro and Nanotechnology Systems, KIT)

Abstract

We are performing research use and development of FEL(free-electron laser) using the L-band electron linac of Scientific and Industrial Research, Osaka University. The Ge-Ga Semiconductor detector with the time resolution for 10 ns and Si bolometer with high detection sensitivity, PYRO which can be used at room temperature. The experiment which measures the time evolution of FEL using two kinds of superconductivity hot electron bolometers (HEB) was conducted. It is a detector using NbN and YBCO which Institute of Planetary Research, DLR and Institute for Micro and Nanotechnology Systems, KIT developed, and these can measure a terahertz wave at high speed, and detection sensitivity is also high. NbN detector is cooled by liquid helium, and the YBCO detector which is a high temperature superconductor on the other hand is cooled and used by liquid nitrogen. This announcement reports the preliminary result of having evaluated the characteristic of two kinds of detectors.

FEL 実験を目的とした超伝導検出器の特性評価

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た THz 自由電子レーザー (FEL) の研究開発を行っている。FEL 実験では、電子銃でパルス長 8 μ s の電子ビームを発生して、サブハーモニックバンチャーシステムで 9.2 ns 間隔のバンチ列変換し、加速管で約 15 MeV まで加速した後、周期長 6 cm で 32 周期のウィグラーに入射し、光共振器を用い FEL 発振を得る。

現在、発振された FEL は 10ns 程度の時間分解能を持つ Ge-Ga 半導体型検出器や検出強度の高い Si ボロメータ、更には室温で使用できる焦電素子 (PYRO) 等の特性の異なる様々な検出器を用いて測定を行なっている。

今回我々はドイツの惑星科学研究所とカールスルーエ工科大学が開発した検出感度が高く高速でテラヘルツ波を計測することが出来る窒化ニオブ (NbN) 及び YBCO を用いた 2 種類の超伝導ホットエレクトロンボロメータ (Hot Electron Bolometer) の導入を検討しており、本研究では検出器の持つ線形応答性等の特性について評価を行った。

2. 実験概要

今回の実験では、検出器飽和を避けるために光減衰材としてテフロンブロックを使用した。テフロンブロックの特性としては、5.53mm 毎に光の強度が半減するため、5mm 単位での減衰率は 54.79% としている。この減衰は同じ波長の FEL 光を用いて評価した。また 1 波形のデータではノイズの影響が大きいため、同じテフロンブロックの厚みに対して

50 波形のデータを取り、波形の平均を行った。また、当実験でのパラメータは以下の通りである。

表 1: 実験のパラメータ

ビームのピークエネルギー	14.96MeV
ウィグラーギャップ	30mm
Record Length	200,000
テフロンでの減衰	5.43mm で強度半減
Pulse Width	8.0us

3. YBCO 検出器について

3.1 YBCO での FEL 波形

YBCO で取得した FEL のシングルショット波形は

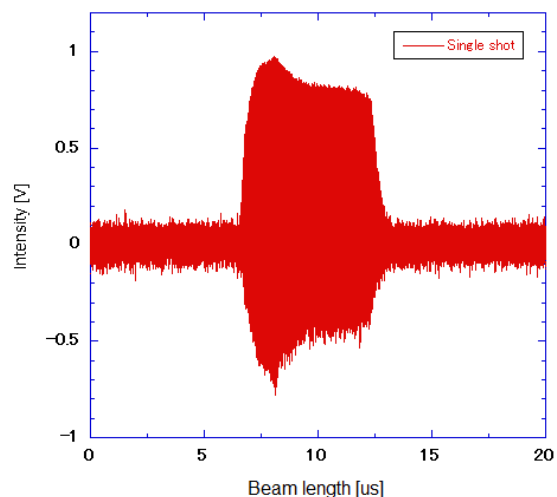


図 1: YBCO で取得した FEL 波形(Single shot)

図 1 の様になる。この波形は FEL 光のマクロパルスを表しており、時間的に非常に小さいマイクロパルス群から構成されている。このマクロパルスの一部を抽出し、マイクロパルス波形の構造を表したグラフは図 2 の様になる。

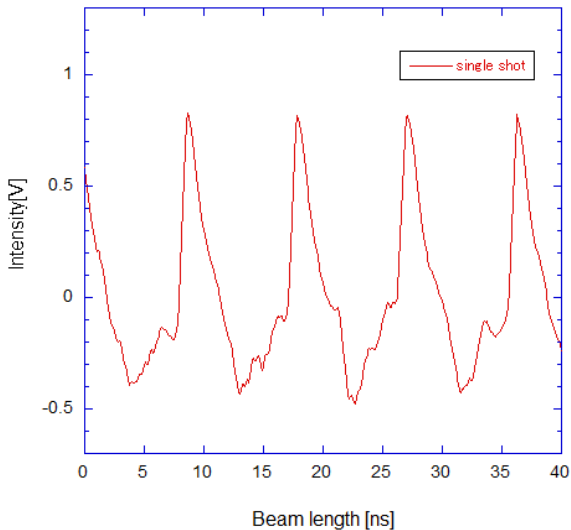


図 2:FEL で取得した FEL 波形(Micro pulse)

この図では 100ps 間隔でプロットしており、9.2ns の幅を持つマイクロパルスの山を非常に鮮明な形で見ることができている。Ge-Ga 検出器と比べても極めて時間分解能が高い。

また図 1 のゼロレベル付近を見る限り、现阶段ではノイズの影響が非常に大きい。そのため、取得した 50 波形を用いて平均化を行い、ノイズの影響を軽減させた。ノイズ処理を行った後のマクロパルス波形は図 3 のようになる。

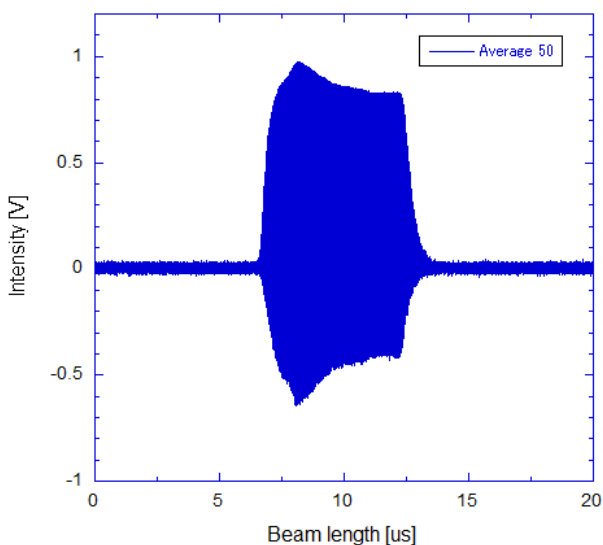


図 3:YBCO で取得した FEL 波形(Average 50)

ノイズ処理前に比べて、全体の信号レベルを保持したままノイズのレベルを低く抑えることができています。この平均化を行った上でのマイクロパルス波形は図 4 のようになる。

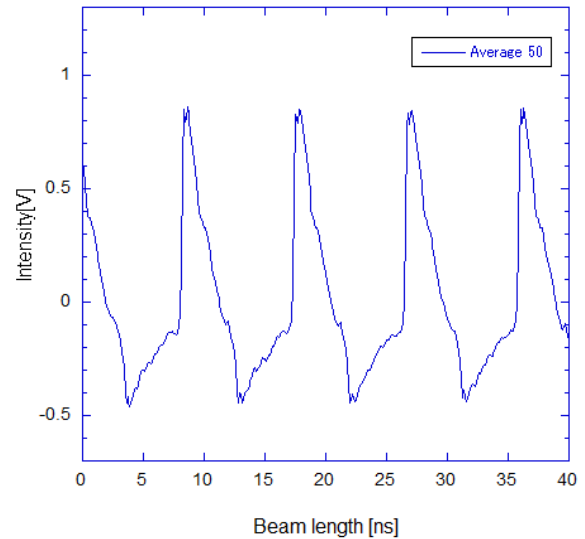


図 4:YBCO で取得した FEL 波形(Micro pulse)

Single shot のマイクロパルスに比べて、細かい山は増えているように見られるが、全体的に平均化の前よりもなめらかになっている。

3.2 YBCO の線形応答性

YBCO では、減衰材であるテフロンブロックの厚みを 35mm から 55mm まで 5mm 間隔で増加させていき、Peak Height での線形応答性を調べた。その測定の結果が図 5 のようになる。

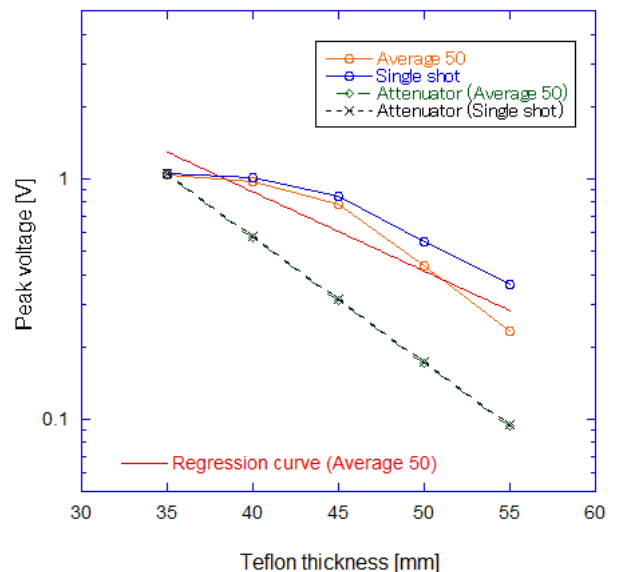


図 5: PeakHeight での線形応答性(YBCO/35-55mm)

緑線と黒線はテフロンブロックの特性から本来取るべき減衰率 54.79%を 35mm での強度を始点にして表した直線である。赤線は平均化された波形の Peak による点での回帰曲線(指数減衰)であり、減衰率は 68.41%となる。

また 45mm から 55mm にかけては線形性を持っているが、35mm から 40mm の間では非常になだらかな形となっている。原因としては、35mm から

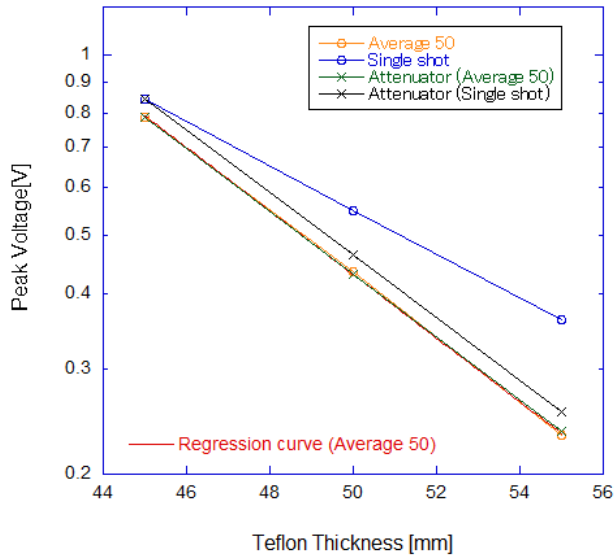


図 6: PeakHeight での線形応答性(YBCO/45-55mm)

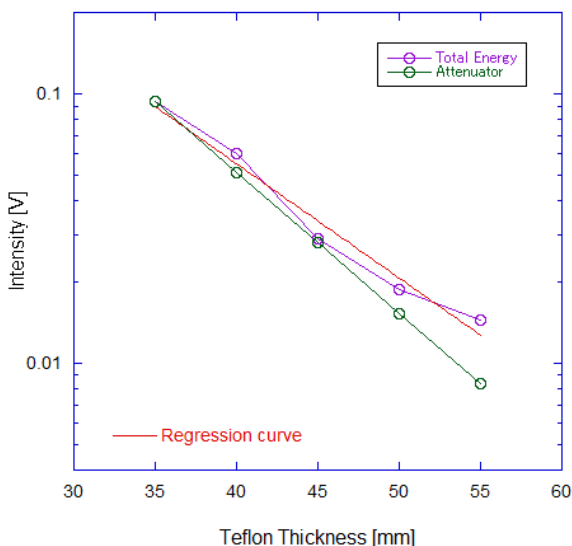


図 7: Total Energy での線形応答性(YBCO/35-55mm)

40mm ではピーク高さが検出器飽和の領域に達している可能性が考えられる。その事から、40mm 以前を省き、45mm から 55mm までで表した図は図 6 のようになる。

図 6 からわかるように、45mm から 55mm の間で

は Average 50 は回帰曲線(指数減衰)及びアッテネータの減衰とほぼ一致している。

45mm から 55mm の間では、波形平均では 54.79%となり、テフロンブロックの 54.79%との誤差は 0.36%となる。45-50mm と 50-55mm でもほぼ変動はなく、2 区間での誤差は 1%程度である。このことから平均化された YBCO の Peak では 45mm から 55mm の間で減衰材に順応した非常に高い線形応答性を持っていると考えられる。

次に、YBCO で検出した FEL 波形の総エネルギー量で線形応答性を確認する。波形全体で積分を行い、各テフロン毎に描いた図は図 7 のようになる。

全エネルギーでは、PeakHeight で線形応答性が見られなかった 35mm から 45mm においても線形応答性が見られており、逆に 45mm 以上では線形応答性が失われ始めている。これは Peak が飽和しても全体で見れば飽和は一部分であるということと、逆に信号レベルが低いところでは Peak が見えてもそれ以外の信号はノイズに埋もれているという事からきている。

4. NbN 検出器について

4.1 NbN での FEL 波形

次に NbN での解析を行う。NbN(窒化ニオブ)は 1940 年頃に発見された超伝導物質であり、18K に転移温度を持つため、液体ヘリウム温度を用いて冷却が行われる。まず NbN で測定される FEL 光の波形は図 8 のようになる。

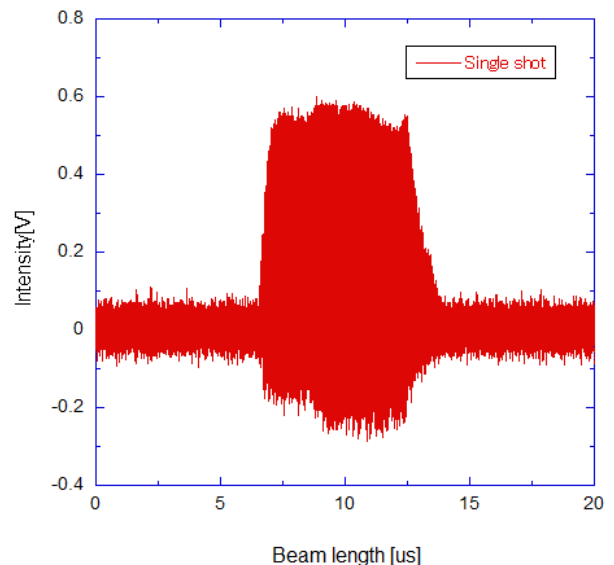


図 8: NbN で取得した FEL 波形(Single shot)

これはテフロン 60mm からテフロンブロック 70mm での NbN の Single shot の波形であるが、マクロパルスは YBCO に比べて波形の上部が少し平坦である。そのため NbN においては、70mm でも光が飽和に達し始めていると考えられる。

次に、NbN のマイクロパルスを確認したのが図 9 である。

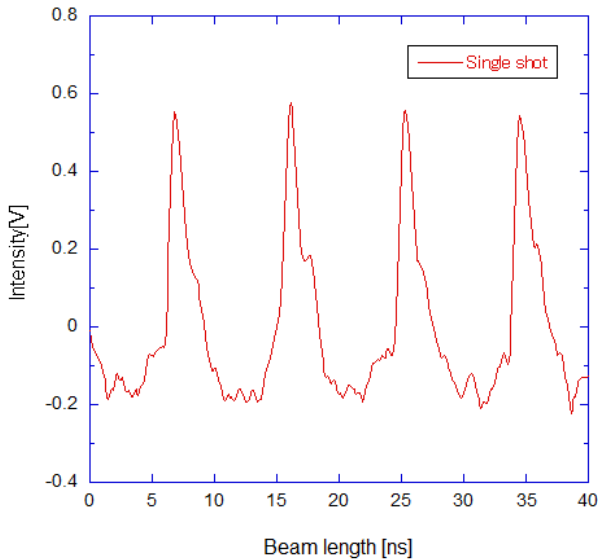


図 9: NbN で取得した FEL 波形 (micro pulse)

YBCO と同様に 100ps 間隔でプロットした。このグラフでは YBCO に比べて立ち上がり立ち下りが早くなっているように見られる。

次に波形平均をとった後の FEL 波形は図 10 の様になる。

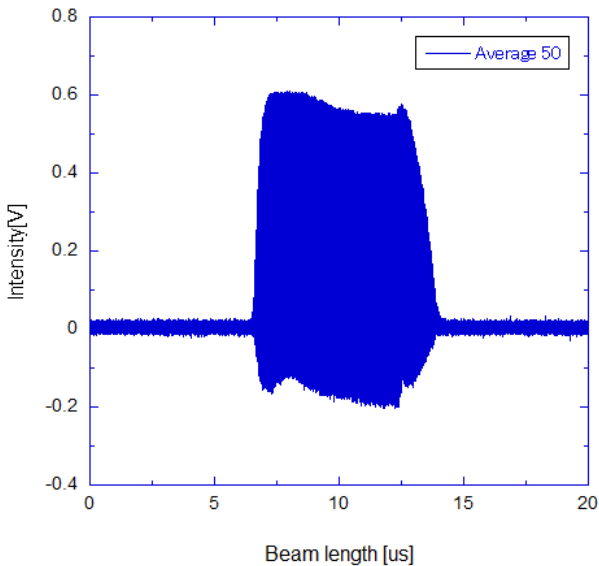


図 10: NbN で取得した FEL 波形 (Average 50)

NbN でも YBCO と同様に、ノイズのレベルを軽減させることができた。YBCO から比較すると、飽和は 3us から 4us の付近で発生しているように思われる。

Average 50 でのマイクロパルスは図 11 のようになる。

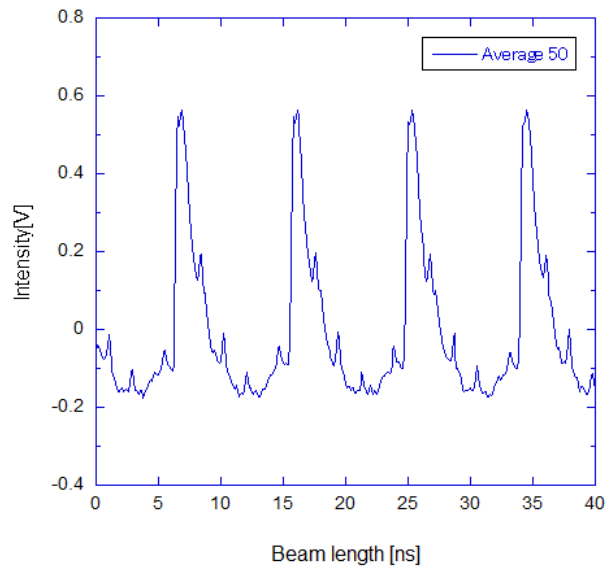


図 11: NbN で取得した FEL 波形 (Micro pulse)

YBCO と同じく細かい山は Single shot と比べて鋭くなっている。飽和領域での波形で平均を行うと、このような針の構造を持つようになる。

4.2 NbN の線形応答性

YBCO と同様にリニアリティの評価を行った。

NbN ではテフロンブロックは 60 から 5mm 毎に 90mm までの間で測定している。加えて、NbN でのテフロンブロックは YBCO と違い、2つのテフロンブロックを利用して 60mm+Xmm という形で厚みを増やしている。テフロンブロック 60 から 85mm での Peak のグラフは図 12 のようになる。

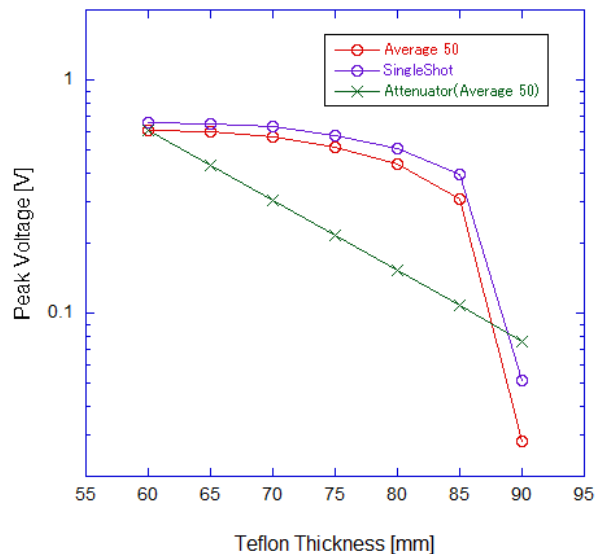


図 12: Peak での線形応答性 (NbN/60-85mm)

ここからわかるように、平均化された波形の Peak では減衰率は 88.08% となり、YBCO の減衰率 54.79% よりも減衰が弱く測定されている。

より減衰の大きくなる 75mm から 85mm の間でプロットしたグラフは図 13 の様になる。

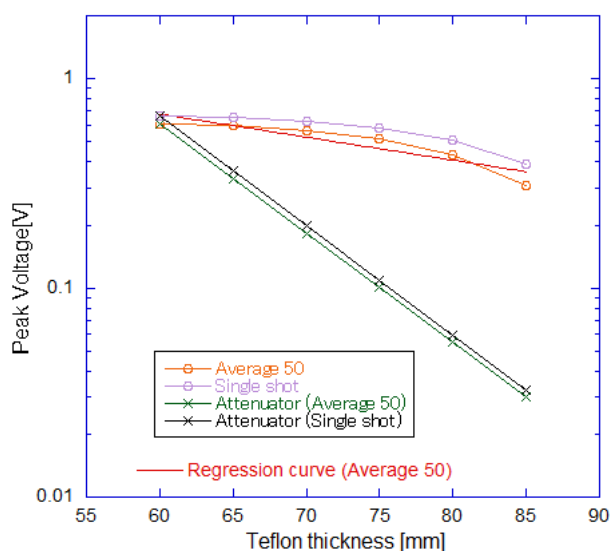


図 13: Peak での線形応答性(75-85mm)

比較的テフロンブロックの減衰率に近い 75mm から 85mm の区間でも減衰率は 77.08% である。各 5mm 区間ごとでも減衰率は数%ずつ変動していき、54.47% の減衰率をとるのは 85mm から 90mm の区間のごく僅かな部分だけである。このことから、NbN の Peak に関してはほぼ線形応答性が無いと考えられる。

5. まとめと今後の課題

高温超伝導体 YBCO と NbN を用いた熱型検出器の特性評価を行った。波形のグラフやピークでの解析からわかるように、YBCO は検出可能領域内では、テフロンブロックの減衰率に順応した高い線形応答性を持っていると考えられる。また NbN に比べてより強い強度でも YBCO は液体窒素温度で使用することができ、取り回しの利便性や維持にかかるコスト面でも、液体ヘリウムを使用する NbN よりも導入するメリットは大きい。今後は更に詳しく評価を行うために、飽和付近での測定や光子量での線形応答性の評価等を行いたい。