

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18422

研究課題名(和文) 熱流束計測に基づくX線自由電子レーザーのパルスエネルギー絶対測定

研究課題名(英文) Absolute pulse energy measurement of XFEL using pulse radiometer

研究代表者

田中 隆宏 (Tanaka, Takahiro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：30509667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、X線自由電子レーザー(XFEL: X-ray Free Electron Laser)のパルスエネルギーの絶対測定のため、熱流束測定に基づいた超高速応答のパルス放射計の設計、開発ならびに動作検証実験を行った。

パルス放射計は、XFELを全吸収する受光部、ヒートシンクならびに熱流束センサーで構成され、熱流束センサーを受光部とヒートシンクとの間に配置し、XFELを全吸収した際に生じる受光部からヒートシンクへの熱流束の変化を電圧信号として検出する。動作の実証実験をSACLAで実施し、XFELパルスに起因した信号の検出には成功したが、時間分解能が不十分であり、改良を進めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、従来の放射計の課題であった応答速度の飛躍的に向上させるため、従来の温度変化の測定から脱却し、熱流束の変化の測定に基づいた計測器を開発し、実証したことである。

既存の放射計の極低温放射計や常温放射計などは、温度測定に基づいて行われてきたため、出力が安定な光源(放射光やCWレーザー)に対しては有用であるが、パルス毎の強度変動が不可避であるXFELに対しては、この時定数の遅さは克服すべき課題となっていた。本研究で提案した熱流束測定に基づくパルス放射計は、既存の放射計の時定数の問題を克服する可能性の高い、世界的にも新しい試みである。

研究成果の概要(英文)：In this study, I have developed a new pulse radiometer for absolute measurement of the pulse energy of X-ray free electron laser Laser (XFEL).

The pulse radiometer consists of a cavity absorber that absorbs all the XFEL radiation, heat sinks and heat flux sensors. The heat flux sensors are placed between the cavity absorber and the heat sink. When the XFEL is completely absorbed by the absorber, the change of heat flux from the absorber to the heat sink is detected as the voltage signal. We have carried out a demonstration experiment at SACLA and successfully detected the signal caused by the XFEL pulse, but the time constant is insufficient for pulse resolved measurement for 60Hz repetition frequency of XFEL. Therefore, the pulse radiometer needs to be improved.

研究分野：計測器開発

キーワード：放射計 自由電子レーザー 校正 カロリメータ 放射光

1. 研究開始当初の背景

X線自由電子レーザー(X-ray Free Electron Laser: XFEL)には、ギガワット(10⁹W)以上のピーク強度、空間コヒーレンス、フェムト秒(10⁻¹⁵s)オーダーの短いパルス幅、といった従来のX線光源には無い特徴がある。この新奇な光源特徴を活かし、結晶化が困難な膜タンパク質の構造解析(新薬の開発期間の大幅な短縮化)や、化学反応中の原子・分子ダイナミクスの超高速現象の解明といった、基礎・応用の両面から研究が進められている。

XFELはショットノイズを種光としているため、XFELパルス毎の強度変動(標準偏差:10~50%程度)が原理的に不可避である。そのため、XFEL利用研究ではパルス強度モニターが必須となる。パルスエネルギーの絶対強度の測定には、ガス(希ガスや窒素)の電離量測定を利用した方法がある(ガスモニター)。しかし、ガスモニターは、ガスの電離断面積などの文献値に結果が左右される点や、XFELのような大強度の光源では局所的に電離密度が高くなり電離ガス間での再結合による検出器の飽和など、絶対強度モニターとしての課題が多い。

研究代表者は、放射光の絶対強度測定に関する独自の熱量計の開発技術を活かしてXFEL専用の極低温放射計を開発し、世界で初めてXFELの強度の絶対測定に成功した。その後、極低温放射計の性能と操作性を向上させた常温カロリメーターを新たに開発し、その性能を実証した。極低温放射計や常温カロリメーターといった温度測定に基づいた測定器は、測定器感度の波長依存性が1%未満と非常に小さく、検出器が飽和しないといったメリットがある。しかし、応答の時定数が10秒と長く、絶対測定は平均パワーに限定されている(XFELの繰り返しレートは最大60Hz、約17ミリ秒毎に1パルス)。そのため、従来の放射計の時定数では、各XFELパルスのパルスエネルギーの絶対測定は困難であった。

2. 研究の目的

既存の放射計は温度変化の測定に基づいており、これが応答時定数の長さの一因であった。そこで、温度変化の先行指標である熱流束の変化に着目した。本研究では、既存の放射計の動作原理である温度測定から脱却し、1,000倍(10秒から10ミリ秒)の応答速度を目標に、熱流束測定に基づいた超高速応答の放射計(パルス放射計)を実用化し、平均レーザーパワーではなくXFELパルス毎のパルスエネルギーの絶対測定を目指した。

3. 研究の方法

本研究は、パルス放射計の設計(シミュレーション)、テスト運転、XFELを用いた動作実証試験、という流れで進めた。

まず、パルス放射計本体の開発では、微小受光部の開発(既存の検出部体積の1/1000程度)と、有限要素法に基づく熱解析シミュレーションを用いたパルス放射計全体の熱設計を行った。微小受光部の設計では、モンテカルロシミュレーションを用いて、XFELに対して既存の検出部と同等の吸収率(99%以上)となるような構造を求めた。

設計後、パルス放射計本体の組み立てと計測系の構築を行った。最初の動作検証では、XFELを用いず、パルス放射計に内蔵したヒータを用いた自己テストを実施した。その結果、熱流束信号の安定性ならびにSN比が悪く、XFELのパルスエネルギー測定に十分な精度ではないことが明らかとなった。この主因は、外気温の変動によるパルス放射計内部の温度変化(熱流束)であると考えている。そのため、外気温の変化を抑制する機能(真空チャンバーの温度調整機能)の追加などの改良をパルス放射計に施し、精度向上を図った。

最後に、XFELのパルスエネルギーの絶対測定の実証実験を行った。実験は、国内唯一のXFEL施設である理化学研究所にあるSACLA(Spring-8 Angstrom Compact Free-electron LASer)の軟X線FELのビームラインBL1で行った(図参照)。実験に使用した光子エネルギーは約100eV、パルスエネルギーは約26μJ/pulse、XFELパルスの繰り返し周波数は60Hzであった。最初に、既存の絶対測定器である常温放射計(申請者が以前に製作)を使い、平均パルスエネルギーの絶対値を測定し、ビームラインに常設の透過型パルス強度モニターを校正した。その次に、開発したパルス放射計をセットし、パルス放射計と校正されたパルス強度モニターで同時に個々のXFELパルスのパルスエネルギーの測定し、両者の測定値との比較によってパルス放射計の測定値の妥当性を検証した。

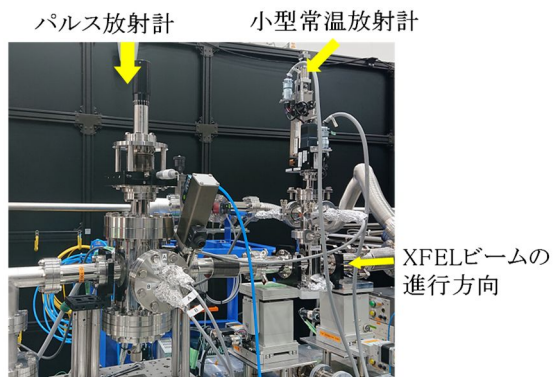


図: SACLAでのパルス放射計の動作実証試験の様子(上流側に透過型のガスモニターを設置)

4. 研究成果

前述の SACLA での動作実証試験において、パルス放射計と強度モニターで同時に XFEL パルスのパルスエネルギーの測定し、両者の測定値を比較した結果、パルス放射計からは XFEL パルスに起因した約 30mV 程度の出力信号が計測され、XFEL パルスの検出の実証は成功した。しかし、時間分解能が 200 ミリ秒程度と、60Hz の繰り返しのパルスを分解するには不十分であった。この時間分解能の低下の原因は、受光部が XFEL パルスを吸収した後に熱平衡状態に戻るまでの時間が長いことが考えられる。そこで、今後、ペルチェ素子による排熱機構の強化を図り、時間分解能の向上を目指す。また、パルス放射計の海外施設での利用を目指しているため、ドイツの XFEL 施設である European XFEL と共同で、放射計による XFEL の平均レーザーパワーの絶対測定を行い、予備データの取得を行った。

以上のように、熱流束測定による XFEL パルスの検出の実証には成功した。今後、時間分解能を向上させることにより、本測定機の実用化を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 田中隆宏	4. 巻 16
2. 論文標題 放射計による自由電子レーザーのパワーの絶対測定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 原子衝突学会誌	6. 最初と最後の頁 28-39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takahiro Tanaka
2. 発表標題 Radiometers for free electron lasers
3. 学会等名 304th PTB-Seminar VUV and EUV Metrology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takahiro Tanaka, Alexander Gottwald, Roman R. Klein, Udo Kroth, Hendrik Kaser, Reiner Thornagel, Janin Lubeck, Andrey A. Sorokin, Kai Tiedtke and Mathias Richter
2. 発表標題 Comprehensive evaluation of a compact room-temperature radiometer
3. 学会等名 Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI 2018)（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

海外表彰

・Takahiro TANAKA, Asia Pacific Metrology Programme(APMP)Young Metrologist Prize 2019, Australia, Dec. 2019

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----