

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽

研究期間：2011～2012

課題番号：23656596

研究課題名（和文） コヒーレント放射光を用いたテラヘルツ波電子線分光の研究

研究課題名（英文） Study of terahertz-wave spectrophotometry by Compton backscattering of coherent synchrotron radiation

研究代表者

清 紀弘 (NORIHITO SEI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：20357312

研究成果の概要（和文）：

京都大学原子炉実験所の L バンドライナックを使用し、コヒーレント放射光をテラヘルツ光源として電子ビームと逆コンプトン散乱させ、理論と一致する逆コンプトン散乱光子スペクトルを得た。有機材料であるポリスチレンに対しコヒーレント放射光を利用したテラヘルツ波電子線分光を実施し、Martin-Puplett 干渉計による分光結果と同様の結果を得た。我々の研究成果は同時刻分光の新しいツールを示しており、テラヘルツ科学の発展に寄与するであろう。

研究成果の概要（英文）：

In an L-band linac at the Kyoto University Research Reactor Institute, we observed a continuous-spectrum light beam resulting from Compton backscattering by using coherent synchrotron radiation. A transmission spectrum of a polystyrene film in the millimeter-wave region was evaluated by measuring the spectrum of the Compton backscattered photon, and it roughly agreed with that measured by a Martin-Puplett-type interferometer. Our results promise to pioneer the terahertz science by providing a new tool of the simultaneous spectrophotometry.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：原子力学

キーワード：コヒーレント放射、放射光、テラヘルツ、ライナック

1. 研究開始当初の背景

現在のところ、生体への無侵襲イメージングや物質同定等の応用技術が飛躍的に発展しているテラヘルツ波応用を支えている分光手段は、時間領域分光法や波長可変光源の波長スキャンである。従って、ある物質の分光特性を調べる場合には、光学遅延回路を用いてプローブ光の遅延時間を走査するか、非線形光学結晶の結晶軸を制御してパラメトリック発振波長を走査していく必要があり、

分光特性を取得することにより同時刻性を失っている。

そこで我々はコヒーレント放射を用いたテラヘルツ波電子線分光法を考案した。テラヘルツ波電子線分光法とは、相対論的電子線によって発生したテラヘルツ帯の高強度コヒーレント放射を再び電子線へ正面衝突させることで、逆コンプトン散乱過程により分光測定可能な領域（可視域など）の光を発生し、分光測定する方法である。逆コンプトン

散乱光子は、電子線の進行方向の狭い立体角内に射出されるが、電子線のエネルギー拡がりを小さくしつつその散乱角を狭めることで、散乱光子は散乱前の光ビームのスペクトル情報を保持することになる。申請者らは、京都大学原子炉実験所のLバンドライナックで発生できるコヒーレント遷移放射を利用して、テラヘルツ波電子線分光の実証に成功した。しかし、遷移放射には可視域にも強い成分があり、分光測定の際にバックグラウンドとなってS/Nの劣化の要因になっていることが明らかになった。

2. 研究の目的

相対論的電子ビームを使用したテラヘルツ波電子線分光法は、テラヘルツ帯において原理的に同時刻分光が可能な斬新な分光法である。しかし、逆コンプトン散乱の断面積は非常に小さいために、テラヘルツ帯のスペクトル情報を転写する先の波長帯では放射を抑制する必要がある。そこで本研究では、テラヘルツ光源としてコヒーレント放射光を利用することを提案した。電子エネルギーが低い場合は、放射光の臨界波長を赤外域にすることができ、逆コンプトン散乱光子スペクトル測定においてバックグラウンドを無視することが可能になる。従って、電子ビームのマイクロパルス毎の分光計測が実現でき、繰り返しの高い実用的なテラヘルツ波同時刻分光の開発を期待できる。

現在、高性能な電子ビーム特性を実現できるエネルギー回収型リニアックが世界中で計画・建設されており、コヒーレント放射光による高出力テラヘルツ光源の開発が進め

られている。そこにテラヘルツ波電子線分光の技術を応用すると、加速器光源が有する高強度・高繰り返し特性を活かした分光測定技術を開拓できる。本研究では、コヒーレント放射光を用いて、我々が考案したテラヘルツ波電子線分光技術を発展させ、吸収分光測定の実用化を進めることが主たる目的である。

3. 研究の方法

テラヘルツ波電子線分光法にはテラヘルツ帯において強力な連続スペクトルを有する加速器光源が必要である。そのため、本研究は京都大学原子炉実験所のLバンドライナックを利用して実施した。この施設は、テラヘルツ帯のコヒーレント放射源の共同利用装置としては国内で唯一の施設であり、テラヘルツ波発生技術のみならず、高いレベルのテラヘルツ波測定技術を提供できる。既に我々は当該施設でテラヘルツ光源として供給されているコヒーレント遷移放射を利用してテラヘルツ波電子線分光を実証している。しかしながら、遷移放射には可視域～紫外域においても強力な成分を含むため、実用的なテラヘルツ波電子線分光を行うためには、テラヘルツ帯でコヒーレント放射光を発生させる必要がある。

そこでまず、コヒーレント遷移放射を発生させている真空チャンバー内に脱着が可能な、小型偏向磁石を使用したコヒーレント放射光発生・輸送装置を構築する。小型偏向磁石には極性が異なる一対の既存の永久磁石型偏向磁石を利用し、図1が示すようにLバンドライナックの電子ビーム軌道を平行にシフトできるように調整している。

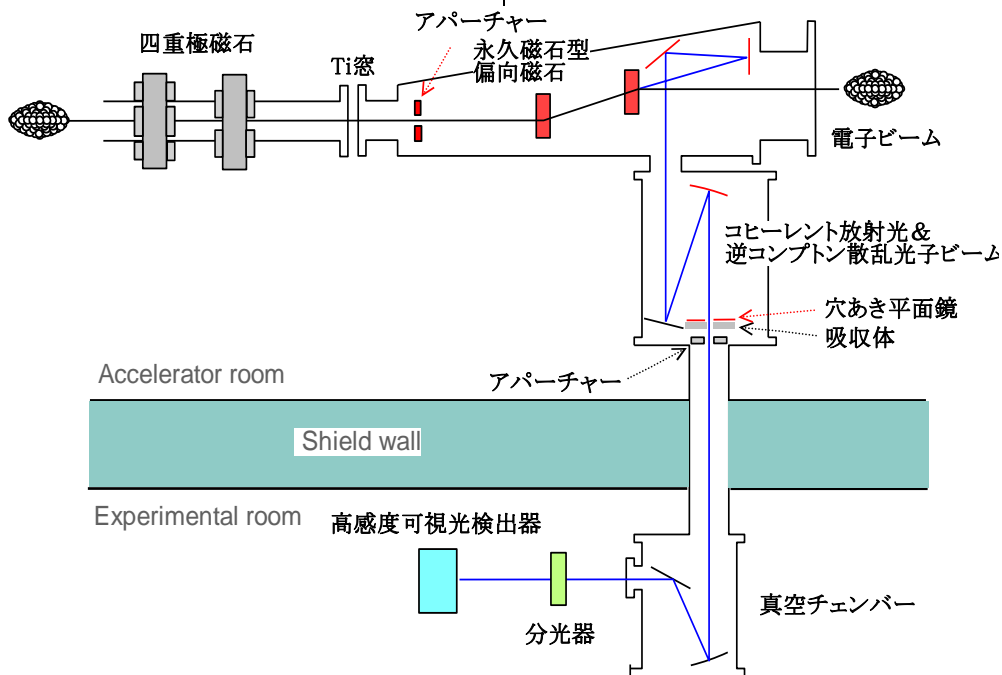


図1 京都大学ライナックにおけるテラヘルツ波電子線分光実験の概要

Lバンドライナックの通常運転における電子ビームエネルギーは約40MeVであるが、本研究課題においては小型偏向磁石による臨界波長を赤外以上の波長域にする必要があるため、電子ビームエネルギーを20MeV以下にして運転する。逆コンプトン散乱による光子発生収量を増大させるためには、一对の永久磁石型偏向磁石間の中央で電子ビームサイズを極小化させるべきであり、Lバンドライナック終端に一組の四重極磁石を追加して、電子ビームサイズを5mm以下にする。まずは高強度コヒーレント放射光のための電子ビーム最適化や、既存のテラヘルツ光ビームラインを使用したコヒーレント放射光スペクトル測定を行う。

次に、コヒーレント放射光を利用したテラヘルツ波電子線分光の実証実験を行う。コヒーレント放射光を電子ビームと逆コンプトン散乱させるため、テラヘルツ光輸送路に中空平面鏡を設置し、一对の永久磁石型偏向磁石間にて衝突できるように調整する。逆コンプトン散乱によって発生した可視光以下の波長の光子ビームは極めて狭い放射角内に放出されるので、中空凹面鏡から射出することができる。

さらに、中空平面鏡を透過した逆コンプトン散乱光子ビームをアパーチャーを使用して絞ることで、光子ビームのエネルギーを狭い幅の中にそろえることが可能になる。逆コンプトン散乱光スペクトルを高感度な可視域分光測定器を使用して測定し、コヒーレント放射光スペクトルとの関係を解明する。可視域の光が逆コンプトン散乱由来であること確認するために、中空平面鏡の直前に中空テラヘルツ波吸収体を挿入できるように配置する。さらに、中空テラヘルツ波吸収体に換えて、ポリエステルなどの有機固体材料を中心とした試料を挿入してテラヘルツ波吸収スペクトル測定を行い、コヒーレント放射光を用いたテラヘルツ波電子線分光の実効性を立証する。

4. 研究成果

逆コンプトン散乱衝突点付近にて電子ビームサイズを極小にするために、加速管の下流に一对の四重極磁石を配置した。当初は当該課題の予算にて四重極磁石を調達する予定であったが、実際の支給額が要求額に満たなかったため、大阪大学より譲渡されたものを使用した。Ti窓の間に蛍光板を挿入し、電子ビームが発生する遷移放射光のスポットサイズを、2次元ステージに設置したピンホールとCCDカメラを使用して測定した。電子ビームエネルギー32MeVの時に計測した四重極磁石の収束力とスポットサイズの関係を図2に示す。この測定によりビームエミッタンスが明らかになり、電子ビームが放射光を発生

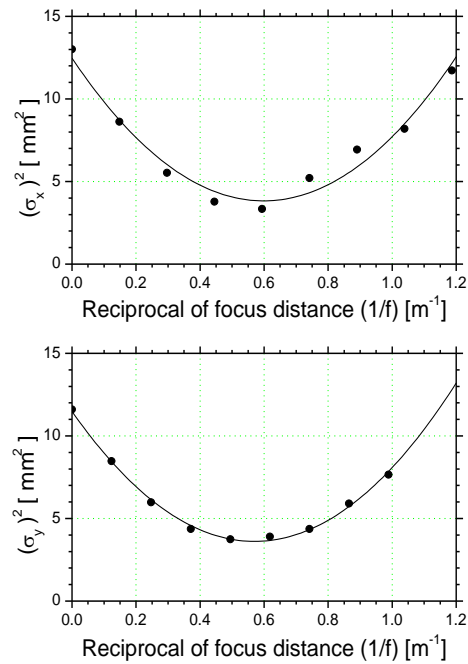


図2 四重極磁石の集束力とビームサイズの関係

させる場所においてビームサイズを極小にする運転設定や、その際のビームサイズが5mm以下であることが明らかになった。

コヒーレント放射光を発生させるため、磁石長50mmかつ磁石間隙40mmの永久磁石型偏向磁石を2台、放射光発生用の真空容器に挿入した。磁石間隙の中心における磁場は0.155Tである。2台の偏向磁石の間隙は216mmで、電磁石から磁場が漏れないように磁場中心から75mmの位置に磁気シールドが設置されている。ライナックの加速周波数は1.3GHzなので、電子ビームのマイクロパルス間隔は約230mmであり、偏向磁石間でコヒーレント放射光と逆コンプトン散乱できる電子バンチ数は1つである。偏向磁石から射出されたコヒーレント放射光は2枚の平面ミラーで反射されて、焦点距離1.5mの凹面鏡によって平行光束化される。平行光束となったコヒーレント放射光は、隣室まで輸送されて、マイラー窓を通じて大気に射出される。図3は大気に射出されたコヒーレント放射光をMartin-Puplett干渉計を使用して測定したスペクトルである。この図が示すように、コヒーレント放射光スペクトルは波数3cm⁻¹付近で最大値を有する。電子ビームエネルギーが18.9MeVであったため、逆コンプトン散乱光子のスペクトルは波長500nm付近に最大値を有すると予測された。

逆コンプトン散乱が生じるためには、電子ビームから発生したコヒーレント放射光を再び電子ビームに戻す必要がある。そこで、平行光束化された光路に、中心の直径20mm

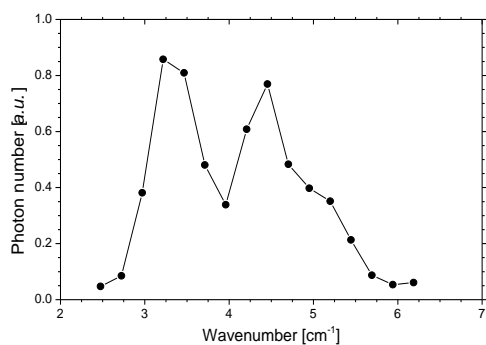


図3 コヒーレント放射光スペクトル

のみ未蒸着な石英基板アルミ平面鏡を設置した。この石英基板アルミ平面鏡には、コヒーレント放射光を電子ビームに戻すだけでなく、逆コンプトン散乱によって発生した散乱光子ビームのエネルギーフィルターの役割も担っている。石英基板アルミ平面鏡を透過した光から逆コンプトン散乱光子を取り出すために、石英基板アルミ平面鏡と同じ形状を有するミリ波吸収体をその平面鏡の直前に挿入し、吸収体の有無によるスペクトルの差を観測した。石英基板アルミ平面鏡を透過した光は、マイラー窓の代わりに取り付けられた石英窓から大気へ放出され、分光器を通して光電子増倍管によってフォトカウンティングされる。電子ビームのエネルギー広がりは約 11% であるので、分光器の波長分解能は約 5% に設定し、観測される逆コンプトン散乱光子のエネルギー広がりは約 13% とした。その結果、コヒーレント放射光スペクトルから予測される形状とほぼ同形の逆コンプトン散乱光子スペクトルを得ることができた。逆コンプトン散乱光子とバックグラウンド光子の比は、テラヘルツ光源として遷移放射を使用する時よりも 3 倍以上大きくなった。しかし、バックグラウンドの方が信号よりも大きいことは改善されなかった。その理由は、偏向磁石から射出されるコヒーレント放射光のわずかな成分のみを逆コンプトン散乱に使用しているからである。使用されなかったコヒーレント放射光は真空容器内を散乱されて電子ビームと逆コンプトン散乱し、可視以下の波長域にバックグラウンドを生じる。今後は、真空容器内で反射されるコヒーレント放射光を効率よく吸収して取り除けるように、ミリ波吸収体を配置することを考えている。

しかしながら、有意な逆コンプトン散乱光子スペクトルを計測できたので、コヒーレント放射光を利用したテラヘルツ波電子線分光実験を実施した。石英基板アルミ平面鏡の上流に厚さ 0.3mm のポリスチレン膜を配置し、逆コンプトン散乱によって発生する光子ス

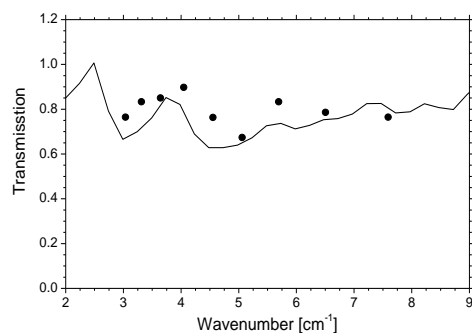


図4 テラヘルツ波電子線分光法（黒丸）および干渉計（実線）によるポリスチレン膜の透過率

ペクトルを計測することで、テラヘルツ帯の透過スペクトルを計算した。コヒーレント放射光は試料を往復するため、試料の実効的な厚さは 0.6mm である。図 4 にはテラヘルツ波電子線分光によって測定されたポリスチレン膜の透過率と Martin-Puplett 干渉計によって計測した透過率が示されている。波数 3.7cm^{-1} 付近の極大を捉えるなど、テラヘルツ波電子線分光と干渉計との測定結果は一致していた。我々の実験結果は、電子ビームのマイクロパルスから高出力テラヘルツ光を放射可能な先端的加速にも応用できる。そこでは、ナノ秒スケールでテラヘルツ吸収の連続的な分光測定が可能になる。本研究成果は、新しいテラヘルツ分光応用への道を拓くだろう。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Norihiro Sei and Toshiharu Takahashi, "TERAHERTZ-WAVE SPECTROPHOTOMETRY ; EXPERIMENTS OF COMPTON BACKSCATTERING OF CONTINUOUS-SPECTRUM COHERENT TRANSITION RADIATION", Proceedings of the 33rd international free electron laser conference, Shanghai, 2012, 125.

<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/FEL2011/html/author.htm>

- ② Norihiro Sei, Hiroshi Ogawa, Ken Hayakawa, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Keisuke Nakao, Takeshi Sakai, Kyoko Nogami and Manabu Inagaki, "Observation of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA", J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013) 045104.

DOI: 10.1088/0022-3727/46/4/045104

[学会発表] (計5件)

- ① 清 紀弘、高橋 俊晴、“コヒーレント放射光を用いたテラヘルツ波電子線分光実験の計画”、第25回日本放射光学会年会、2012/1/8、鳥栖市民文化会館(佐賀県)
- ② Norihiro Sei, Hiroshi Ogawa, Ken Hayakawa, Toshinari Tanaka, Yasushi Hayakawa, Keisuke Nakao, Kyoko Nogami and Manabu Inagaki, “Development of intense terahertz-wave coherent synchrotron radiation at LEBRA”, The 34th international free electron laser conference, 2012/8/29、奈良県新公会堂(奈良県)
- ③ 清 紀弘、高橋 俊晴、“加速器光源によるテラヘルツ波電子線分光の実証実験”、テラヘルツ分光法の最先端IV、2012/10/25、筑波大学(茨城県)

[図書] (計1件)

- ① Norihiro Sei and Toshiharu Takahashi、和泉出版印刷、“KURRI Progress Report 2011”、2012、pp. 287.

[その他]

ホームページ:

<http://unit.aist.go.jp/riif/ja/results/thesis/qrg.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清 紀弘 (NORIHITO SEI)

産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号: 20357312

(2) 研究協力者

高橋 俊晴 (TOSHIHARU TAKAHASHI)

京都大学原子炉実験所・研究炉安全管理工学研究分野・准教授

研究者番号: 00273532