

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2023
課題番号：18K11919
研究課題名（和文）可視チェレンコフ放射によるTHz帯コヒーレント放射の完全同期電場検出法の開発

研究課題名（英文）Development of a Technique for Complete Synchronous Electric Field Detection of Terahertz Coherent Radiation Using Visible Cherenkov Radiation

研究代表者
高橋 俊晴（Takahashi, Toshiharu）
京都大学・複合原子力科学研究所・准教授

研究者番号：00273532
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：電子加速器の短バンチ電子ビームから発生するサブテラヘルツ領域の大強度コヒーレント遷移放射の電場を、外部レーザーを使わず、同一バンチから発生する可視域チェレンコフ放射をプローブとして電気光学(EO)検出する技術開発の過程で、可視域チェレンコフ放射の性質や光輸送における迷光除去に関する実験上の知見を得ることができたが、検出技術の実証には至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子加速器を使って発生させるサブテラヘルツ波長領域の大強度コヒーレント放射を用いて物質の光学的な性質を特徴付けるパラメータを求める際、間接的に計算上のテクニックを使うことなく、測定された電場から直接求めることができるようになること、また検出器に使用する液体ヘリウムの世界的な供給不足の影響も避けることができることから、サブテラヘルツ・ミリ波領域における物質の光学的性質のデータベース構築に貢献する。

研究成果の概要（英文）：In the process of developing an Electro-optic (EO) sampling technique of the electric field of high-intensity coherent transition radiation in the sub-terahertz range, generated from short-bunch electron beams in an electron accelerator, using visible Cherenkov radiation generated from the same bunch as a probe without using an external laser, we were able to gain experimental insights into the properties of visible Cherenkov radiation and the elimination of stray light in optical transport. However, we did not achieve a demonstration of the EO detection technique.

研究分野：量子ビーム科学

キーワード：テラヘルツ チェレンコフ放射 遷移放射 コヒーレント放射 電子線形加速器

1. 研究開始当初の背景

短バンチ電子ビームから発生するテラヘルツ・サブテラヘルツ領域のコヒーレントな放射は、1989年に東北大学原子核理学研究施設(現電子光科学研究センター)電子ライナックで初めて観測された。時を同じくして、超短パルスレーザー(フェムト秒レーザー)を光伝導アンテナや非線形素子に照射することによりテラヘルツ光を発生させ、励起レーザーの一部を使って光伝導アンテナや電気光学素子によりテラヘルツ光をプローブするテラヘルツ時間領域分光法が米国で開発された。

加速器を用いたコヒーレント放射については、偏向電磁石により加速度を受けた際のシンクロトロン放射、金属の表面などの誘電率の異なる媒質間の境界を相対論的電子が通過する時に発生する遷移放射(Transition Radiation)、開口を通過する時に発生する回折放射、誘電媒質中や近傍を通過する時に発生するチェレンコフ放射、回折格子を通過する時に発生するスミス・パーセル放射が観測され、光源としての特徴が実験的に調べられてきた。その結果を踏まえ京都大学複合原子力科学研究所電子ライナックにコヒーレント放射専用の分光ビームラインが整備され利用研究が行われているほか、他の電子ライナック施設でもコヒーレント放射の光源開発が行われている。そこでは大強度のパルステラヘルツ光が利用できるが、テラヘルツ光検出には液体ヘリウム冷却ポロメータやテラヘルツカメラが用いられ、光強度すなわち振幅の情報のみが得られるに留まる。そのため、測定対象試料の光学定数(複素屈折率の実部と虚部すなわち屈折率 n と消衰係数)を得るためには、分光データを Kramers-Kronig 解析という数値計算にかけなければならない。

一方、テラヘルツ時間領域分光法については、フェムト秒レーザーが容易に入手できるようになったこと、大規模な装置や液体ヘリウムが不要なことなどから、世界的に利用が広まってきた。一番のメリットは、光強度ではなく光電場を直接観測するため、振幅と共に位相情報が得られるため、光学定数を直接実験的に決定できることである。但し、テラヘルツ光の強度は励起レーザーの性能に依存するため、パルス強度を上げるのはハードルが高い。そのため、既存の技術で容易に大強度のパルステラヘルツ光が得られる加速器光源において、直接電場検出を行う新たな分光方法を開発することが課題となっている。

2. 研究の目的

電子ライナックの短バンチ電子ビームから発生するサブテラヘルツ領域の大強度コヒーレント遷移放射の電場を、外部レーザーを使わず、同一バンチから発生する可視域チェレンコフ放射をプローブとして電気光学(EO)検出する技術を開発することを目的とする。

加速器を用いたテラヘルツ光源開発の分野においては、フォトカソード電子銃を備えた電子ライナックや、大強度レーザーによるバンチスライスを行うリング型光源で、そのレーザーの一部をプローブ光とすることによりEO検出が可能である。一方、大きな割合を占める熱陰極電子銃を用いる電子ライナックでは、EO検出を行う手段がなく、ポロメータやテラヘルツカメラを用いて光強度すなわち振幅の情報のみを得るしかなかった。しかし、熱陰極電子銃を使う電子ライナックは大電流を加速できる、すなわち、バンチ内電子数を大きくできるというメリットがあり、より大強度のテラヘルツ光源となる。そのような汎用的な電子ライナックにおいて、同一バンチから発生する可視光によりテラヘルツ光をプローブし電場検出することは画期的な試みであり、時間ジッターのない完全に同期した電場振幅と位相の検出が特色である。

3. 研究の方法

実験は京都大学複合原子力科学研究所電子ライナックに設置されているコヒーレント放射専用の分光ビームラインにおいて実施した。光源部は電子ビームが通過するため、ターゲット室と呼ばれる照射室に実験の都度、光源室真空チェンバや集光室真空チェンバを設置する。光が導かれるビームラインは実験室に常設であり、通常分光実験の場合はフーリエ変換干渉分光計や回折格子型分光器を使用するが、本研究の場合は実験室で集光された後にEO検出の装置を設置した。ビームラインの概略を図1に示す。

当該ライナックの運転条件はエネルギー42 MeV、マクロパルス幅47 ns、パルス繰り返し周波数60 Hzとした。ライナックは加速マイクロ波周波数1.3GHzのLバンドライナックであり、大多数の2.8GHzのSバンドライナックに比べ国内に2台しかなく、大電流を加速できる特徴的なライナックである。一方マイクロバンチは長く、発生するコヒーレント放射はサブテラ

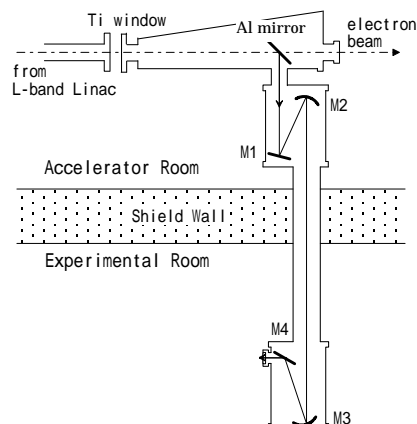


図1 コヒーレント放射光ビームラインの概略

ヘルツ領域からミリ波領域となる。

4. 研究成果

まず、E0 検出装置における可視光とサブテラヘルツ光の強度レベルを見積もること、及び E0 検出に必要なポッケルス効果が観測できることを確かめるため、光学定盤上に図2のように可視プローブ光の光路差を設ける部分を省いた簡易装置を組み実験を行った。可視プローブ光の検出には2個のフォトダイオードを用い、出力を2入力のロックインアンプに入れて出力の差をバランス検出した。E0結晶には ZnTe を用いた。光源室については図3のようになっており、電子ビームは光源室入口の真空隔壁を兼ねた厚さ 30 μm のチタン箔を通過する際にコヒーレント遷移放射を発生すると同時にアルミを蒸着した厚さ 1 mm の石英ガラス平面鏡を通過する際にも光が反射する方向にコヒーレント遷移放射を発生する。二つの発光点からのコヒーレント遷移放射の重ね合わせとなるが、チタン箔と平面鏡の間隔は 1 m であり、42 MeV 電子ビームの速度はほぼ光速のためサブテラヘルツ領域での両者のコヒーレント遷移放射には位相差が生じず一つの光源としてみなすことができる。

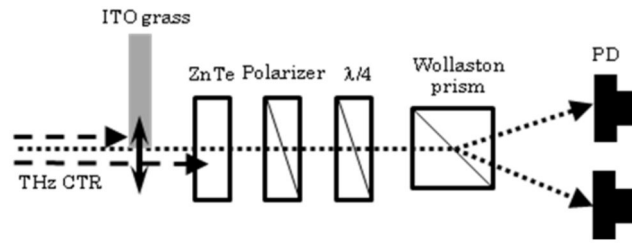


図2 簡易 EO 検出装置の概略

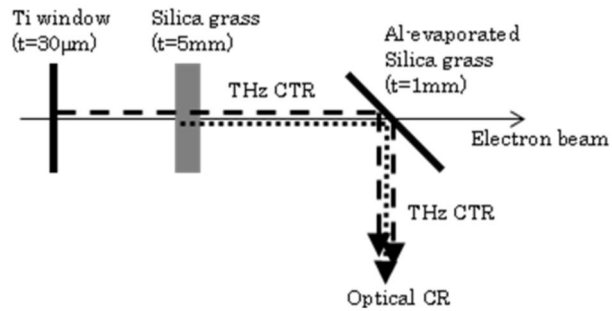


図3 光源室の概略

一方、可視プローブ光の光源としては、図3に示すように厚さ 5 mm の石英ガラスを電子ビームが通過する時に発生するチェレンコフ放射を使った。石英ガラスを電子ビームが通過する際にはサブテラヘルツ領域のコヒーレント遷移放射やコヒーレントチェレンコフ放射も発生するが、チタン箔で発生するコヒーレント遷移放射よりも弱いと考えなくてよい。

図3に示すように可視光とサブテラヘルツ光は同じ光軸を通ってくるが、サブテラヘルツ光の有無による違いを観測するため図2に示すような ITO ガラスを挿入した。ITO ガラスは可視領域では透明であるがサブテラヘルツ領域の光は透過せず反射するため、ITO ガラスを光路上に挿入することによりサブテラヘルツ光だけを遮ることができる。測定の結果、ITO ガラスの挿入の有無で 15% 程度の強度の差があり、ポッケルス効果の確認ができた。

しかしこの実験体系では可視光の検出強度が弱くノイズが大きいので、可視プローブ光に光路差を付けてサブテラヘルツ光のスペクトルを測定する E0 検出には不十分であることもわかった。短パルスレーザーと非線形素子を組み合わせたテラヘルツ時間領域分光法ではプローブ光がレーザーであるため単色であるが、本実験ではチェレンコフ放射をプローブ光としているため白色光である。そこで本実験でもプローブ光を単色とすべく、チェレンコフ放射の放射体にバンドパスフィルターを用いることとし、バンドパスフィルターから発生するチェレンコフ放射のスペクトルを測定した。

使用した回折格子型分光器は日本分光(株)製 CT-10、検出器はフォトマル PM-51S である。チェレンコフ放射の放射体として使うバンドパスフィルターはエドモンドオプティクス社の中心波長 430 nm、厚さ 3.3 mm のフィルターである。比較のため、同程度の厚さ 3.1 mm の石英ガラスからのチェレンコフ放射及び放射体を何も置かない場合のスペクトルを測定した。結果を図4に示す。黒色の丸が石英ガ

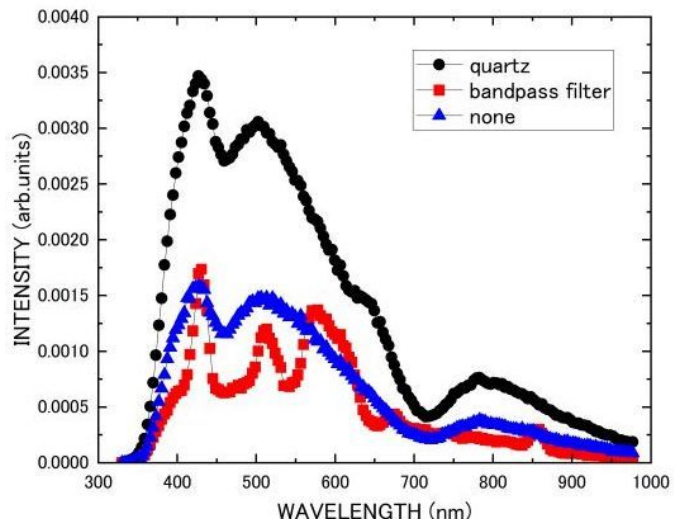


図4 可視領域のスペクトル

ラスを放射体とした場合、赤色の四角がバンドパスフィルターを放射体とした場合、青色の三角が放射体として何も置かない場合である。バンドパスフィルターは干渉フィルターであるため、中心波長 430 nm とその 2 次高調波の 860 nm 付近に鋭いピークが見える。しかし全体の強度は何も放射体を置かない場合とほぼ変わらない強度となっている。何も放射体を置かない場合の光は、チタン箔とアルミ蒸着平面鏡からの可視域遷移放射と考えられる。本実験の光学系は放射体の位置を発光点として検出器位置で集光するようなレイアウトになっており、遷移放射はその光軸から外れるため寄与は小さいと考えていたが、かなりの割合が迷光として検出器に入ってくるのがわかった。またバンドパスフィルターからのチェレンコフ放射についても予想された強度ではなかったことから、可視域のプロープ光を工夫する必要があることがわかった。

以上のように、本研究期間内では、当初の目的である可視域チェレンコフ放射をプロープ光としたサブテラヘルツ領域コヒーレント遷移放射の E0 検出を実証することはできなかったが、バンドパス干渉フィルターからの可視域チェレンコフ放射の性質や金属配管内を光輸送する場合の迷光除去についての知見が得られた。今後は研究を通じて得られた知見を活かして E0 検出に適した可視域プロープ光を追求することによりコヒーレント遷移放射の E0 検出が実現可能になるであろうと考える。

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 0件）

1. 著者名 清紀弘, 高橋俊晴	4. 巻 29
2. 論文標題 コヒーレント共鳴後方折放射による準単色テラヘルツ光源の研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Infrared Science and Technology	6. 最初と最後の頁 49-56
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 清 紀弘、小川 博嗣、早川 恭史、境 武志、住友 洋介、田中 俊成、早川 建、高橋 由美子、野上 杏子、全 炳俊、大垣 英明、高橋 俊晴
2. 発表標題 テラヘルツ帯コヒーレント放射源の新規開発と電子バンチ波形観測への応用
3. 学会等名 第29回日本赤外線学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清 紀弘、小川 博嗣、早川 恭史、境 武志、住友 洋介、田中 俊成、早川 建、高橋 由美子、野上 杏子、全 炳俊、大垣 英明、高橋 俊晴
2. 発表標題 テラヘルツ帯コヒーレント放射源の新規開発と電子バンチ波形観測への応用
3. 学会等名 第34回日本放射光学会年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------