

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651099

研究課題名(和文) コヒーレント遷移放射を用いたテラヘルツ帯円偏光光源の開発

研究課題名(英文) Development of Circularly Polarized Light Source in the Terahertz-wave Region with Coherent Transition Radiation

研究代表者

高橋 俊晴 (TAKAHASHI, TOSHIHARU)

京都大学・原子炉実験所・准教授

研究者番号：00273532

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：大強度のテラヘルツ光源であるコヒーレント遷移放射をさらに広く分光利用に展開するため、新たな円偏光生成技術の開発を行った。生成原理は、直交する2種類の直線偏光コヒーレント遷移放射を光の位相差とともに重ね合わせるだけの方法であるため、位相差を変えることにより簡便に偏光度を制御することが可能である。また波長板などの光学素子を用いる方法のように素材による光損失も生じないため、大強度のまま円偏光を生成できる優れた方法である。

研究成果の概要(英文)：For the spectroscopic purpose, various types of coherent radiation emitted from a relativistic electron beam have attracted a considerable attention as a new and powerful light source in the THz-wave region. Coherent transition radiation (CTR) is one of such a light source. Whereas synchrotron radiation has linear polarization along an electron orbit, the electric vector of transition radiation (TR) emitted from a metallic screen is axially symmetric with respect to the trajectory of an electron beam. Therefore, CTR is usually utilized as a non-polarized light source in the spectroscopic application. However, circularly polarized light has been useful in the circular dichroism spectroscopy. In this study a new technique of generation of circularly polarized THz radiation using two kinds of linearly polarized CTR with horizontal and vertical components. The polarization degree can be easily controlled by changing the phase difference between the two CTRs.

研究分野：赤外放射光

キーワード：電子線型加速器 放射光 遷移放射 コヒーレント 円偏光 テラヘルツ ミリ波

1. 研究開始当初の背景

遷移放射は、粒子加速器などで相対論的速度まで加速された荷電粒子が、金属の表面などの誘電率の異なる媒質間の境界を通過するときに発生する電磁波である。電子線型加速器(ライナック)のような高周波加速装置を用いる場合には電子は集群(バンチ)しており、集群の大きさよりも長い波長であるテラヘルツ・サブテラヘルツ帯において、大強度のコヒーレント放射が得られることが知られている。研究代表者はこれまで様々な発生機構のコヒーレント放射を観測し、その性質を解明してきており、コヒーレント遷移放射(CTR)についても、金属箔を放射体とした場合の基礎的性質について実験的に明らかにしてきた()。また、京都大学原子炉実験所の電子ライナックに、コヒーレント遷移放射を分光光源とする常設のミリ波・テラヘルツ帯分光光束ラインを世界で初めて設置し() 国内研究機関との共同研究として利用研究を進めている。遷移放射はビーム軸を中心に放射状に電場が分布しており、通常は非偏光の光源としての利用となる。直線偏光が必要な場合は偏光子を用いる。一方、磁性体やキラル化合物を測定する円二色性分光を行う場合の円偏光光源も分光利用を進展させる上で重要である。近赤外線よりも高エネルギーの波長領域では、一般的に 1/4 波長板を用いたり、円偏光アンジュレータからのシンクロトン放射光を用いたりする。しかし、ミリ波帯など長波長領域では 1/4 波長板などの光学素子を用いる方法は、厚く大型になるため光強度の損失を考えると現実的ではない。また赤外放射光では、電子の軌道面から外れた角度で円偏光を取り出す方法もあるが、偏光度の制御が難しい。そこで、簡便に制御可能な円偏光光源の開発が待たれていた。

2. 研究の目的

本研究は、電子線型加速器の短バンチ電子ビームから発生する大強度コヒーレント遷移放射を光源として、テラヘルツ・サブテラヘルツ領域における制御可能な円偏光発生技術を開発することを目的とする。本研究の最も重要なポイントは、遷移放射の放射体として2枚のワイヤーグリッド偏光子を用いて電場方向が直交する直線偏光を生成し、その間の位相差を制御して重ね合わせることにより円偏光を発生させる点である。偏光度の制御は遅延光学系により位相差を変化させるだけであるので非常に簡便である。加速器を用いたテラヘルツ光源開発の分野では、偏光子を放射体を使うこと自体が画期的で、その遷移放射の基礎的性質を実験的に解明することは学術的にも意義のあることである。

3. 研究の方法

(1)実験は京都大学原子炉実験所の電子ライナックを用いて行われた。これまで遷移放射

の放射体として使われてきた金属箔に代わりワイヤーグリッド偏光子に置き換え、短バンチ電子ビームが偏光子を通過する際に発生するコヒーレント遷移放射の基礎的性質を明らかにした。主な測定項目は、放射強度、スペクトル分布、形成層の長さとの関係、偏光度などである。これらの測定には、Martin-Puplett 型フーリエ変換干渉分光計と液体ヘリウム冷却 Si ポロメータを用いた。(2)円偏光の生成には単色光を使う必要があるため、分光装置として回折格子型分光器を用いるが、本ビームラインに設置されている分光器制御装置は旧式であったため、新たに波長と位相差を同期させて制御できるよう、ステップモータ制御に改修した。(3)位相差を遠隔操作するため、真空仕様の光源精密制御装置を製作した。この装置を用いて、偏光方向が直交する2種類の直線偏光 CTR を、ある位相差をつけて重ね合わせることにより円偏光を生成した。生成原理を図 1 に示す。

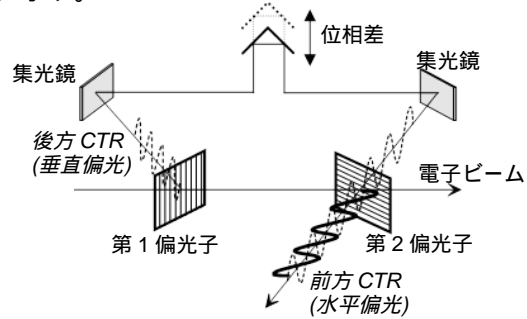


図1 円偏光生成原理の模式図

第1偏光子からの垂直偏光 CTR は遅延光学系を通過するため、第2偏光子から放射される水平偏光 CTR よりも遅れて到達する。しかし図 2 に示すように、電子ビームは全く同一形状のマイクロバンチから成る時間構造をしているため、これまでの研究により各バンチからの光束どうしても干渉性があることが明らかにされている()。そのため本研究では、第1偏光子で CTR を発生するバンチと9個離れて後から来るバンチが第2偏光子で生成する CTR との重ね合わせを行って円偏光を生成した。

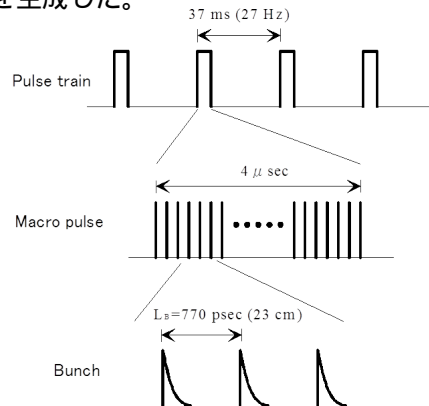


図2 電子ビーム時間構造

4. 研究成果

(1)ワイヤーグリッド偏光子を放射体としたCTRの基礎的性質を調べるため、図3のような実験配置でCTRの測定を行った。

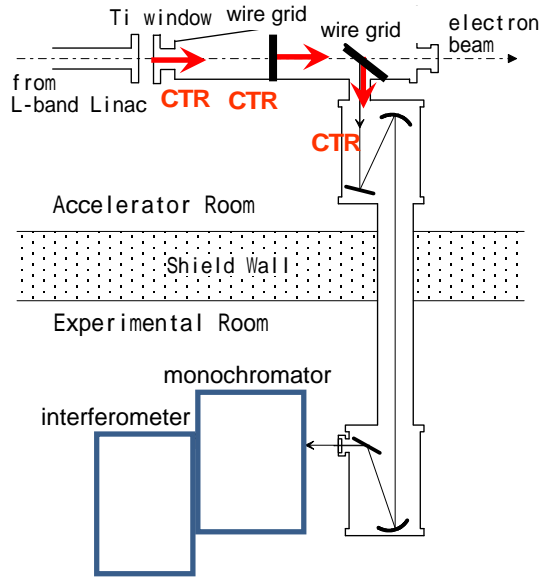


図3 CTRの性質を調べるための配置

この実験配置では、上流チタン窓からのCTRと2枚のワイヤーグリッド(WG)からの3種類のCTRの重ね合わせを観測することになる。WGは直径10 μm のタングステン線を25 μm 間隔で張ったもので、SPECAC社製である。また2枚のWG間隔は発光長と呼ばれている。まず、第1WGと第2WGともにグリッド方向が垂直な場合の結果を示す。図4は発光長を変えて測定したスペクトルである。

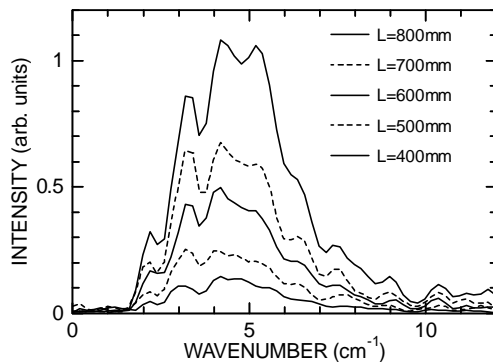


図4 発光長ごとのスペクトル

発光長が長くなるに伴い光強度が大きくなることからわかる。このデータから、波長ごとの強度変化の様子をプロットしたものを図5に示す。金属箔からのCTRの場合、放射強度は発光長の2乗に比例することが、過去の実験と理論からわかっている。図5の結果を

$$y = x^a$$

でフィッティングしたところ、 a の値として2.6から3.0が得られ、これまでの金属箔放射体の場合の値よりも大きくなっているが、その理由については現在検討中である。

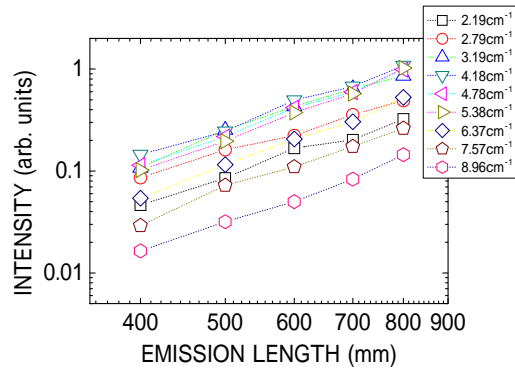


図5 各波長での発光長と放射強度の関係

次に、第1WGのグリッド方向は水平、第2WGが垂直の場合のスペクトルを図6に、強度と発光長との関係を図7にそれぞれ示す。

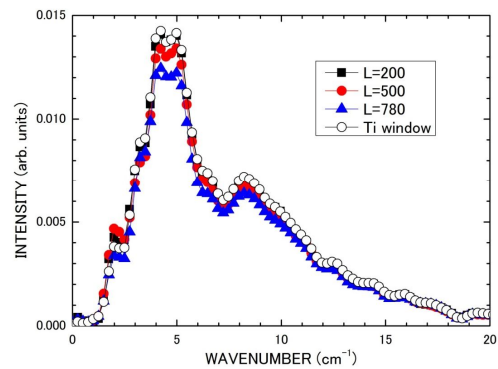


図6 発光長ごとのスペクトル

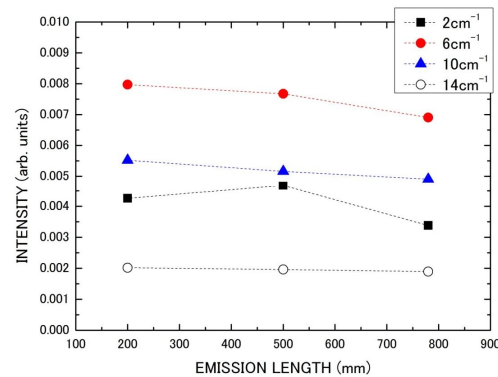


図7 各波長での発光長と放射強度の関係

図6、図7ともに、発光長を変えても観測される光強度は大きく変わらないことを示している。また、図6の白丸は第1WGを取り外した場合のスペクトルであり、他のスペクトルとはほぼ変わらない強度となっている。このことは第2WGからのCTRは観測にかかっていないことを示している。以上の結果から、WGを放射体とした場合のCTRの偏光方向は、前方放射、後方放射ともにグリッドの向きと平行の方向になることが初めて明らかにされた。

(2)上記の結果から、放射体にWGを用いることにより直線偏光が得られることが明らかになったので、遅延光学系を含む光源精密制御装置を製作し、円偏光の発生実験を行った。

第1WGからの水平偏光した後方CTRを遅延光学系に通して位相差を持たせた後、第2WGからの水平偏光した前方CTRに重ね合わせた。電子ビームのエネルギーは42MeV、マクロパルス幅は33ns、パルス繰返しは20Hzであり、平均ビーム電流は0.5 μ Aであった。通常の分光測定ではMartin-Puplett型フーリエ変換干渉分光計を用いるが、円偏光生成に必要な位相差は波長ごとに異なるため、単色光に分光できる回折格子型分光器を用いた。この分光器は本研究の事業計画のひとつとして、ステップモータ方式に改修されたものである。分光波長は2.3mmに設定した。遅延光学系にはシグマ光機製のX軸精密ステージを使用しており、制御プログラムLabVIEWから簡単にコントロール可能である。円偏光の生成前に、まず第1WGおよび第2WGそれぞれの直線偏光CTRの偏光度を確認した。図8に第1WGからの水平偏光CTRの偏光ダイアグラムを、図9に第2WGからの垂直偏光CTRの偏光ダイアグラムを示す。偏光解析は、検出器の入口に検光子(ワイヤグリッド偏光子)を置いて行った。

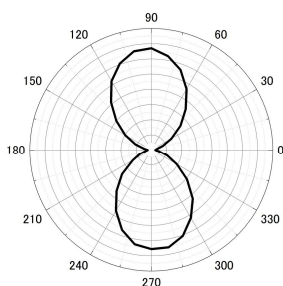


図8 第1WGからの水平偏光CTR

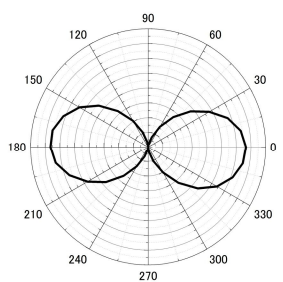


図9 第2WGからの垂直偏光CTR

このダイアグラムにおいては、90°と270°の方向が水平面を表し、0°と180°が垂直面を表している。このように、ワイヤグリッドからのCTRはほぼ完全な直線偏光となっていることがわかった。

次に、上記の各直線偏光間に $\pi/2$ の位相差を付けて重ね合わせた場合の偏光ダイアグラムを図10に示す。ダイアグラムは真円に近く、ほぼ完全な円偏光が得られたことを示している。位相差 $\pi/2$ 以外でも偏光解析を行い、遅延光学系のX軸ステージを設定するだけで様々な偏光度の円偏光・楕円偏光を生成することができた。これにより、本研究の目的とした、テラヘルツ帯円偏光生成技術の開

発は達成された。

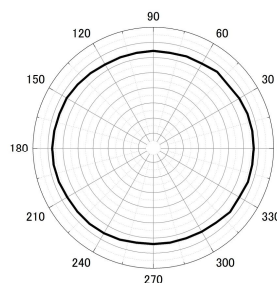


図10 位相差 $\pi/2$ とした場合の偏光ダイアグラム

<引用文献>

- 高橋 俊晴、解説「コヒーレント放射光」、日本加速器学会誌「加速器」2巻、2005、11-19
 T. Takahashi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **69**, 1998, 3770-3773
 Y. shibata *et al.*, Phys. Rev. A **44**, 1991, R3445-R3448

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

高橋 俊晴、ワイヤグリッド偏光子を放射体としたミリ波帯コヒーレント遷移放射の基礎的性質、第27回日本放射光学会年会、2014年1月11日~13日、広島国際会議場(広島県・広島市)

Toshiharu Takahashi, Property of Linear Polarized Coherent Transition Radiation Emitted from Wire-Grid Radiators, The 7th International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources, 2013年11月10日~14日, Lorne (Australia)

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 俊晴 (TAKAHASHI, Toshiharu)
 京都大学・原子炉実験所・准教授
 研究者番号：00273532