

平成 30 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13394

研究課題名(和文) コヒーレントチェレンコフ光を用いたテラヘルツ域のz偏光生成の試験研究

研究課題名(英文) Pilot study for z-polarization production by using coherent Cherenkov radiation in THz frequency region

研究代表者

濱 広幸 (Hama, Hiroyuki)

東北大学・電子光物理学研究センター・教授

研究者番号：70198795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：真空と屈折率が異なる媒体を相対論的電子が通過する際に放出される、ラジアル偏光したチェレンコフ光を用いて、伝搬方向にのみ光電場が存在するZ偏光状態を創出することを本研究の目標とする。可干渉なコヒーレント放射を発生する約80フェムト秒の超短パルス電子ビームの生成技術確立し、リング状のチェレンコフ光を10m以上離れた検出器まで光量を失わず輸送する特殊なミラーシステムを開発した。荷電粒子からの放射シミュレーションコードを独自に開発した。干渉条件が長波長になるにしたがい緩くなるため、テラヘルツ域ではチェレンコフ光リングは空間的に広がり、単純な集光では完全なz偏光場は形成できないことが分かった。

研究成果の概要(英文)：Final goal of this research study is production of z-polarization light by using radially polarized Cherenkov radiation that is emitted from electrons passing through dielectric medium. We have established a linac scheme for production of very short electron pulses, such as ~80 femtosecond, to produce coherent radiation. In addition a specially designed mirror system to transport the ring shape Cherenkov light onto a detector located more than 10 m downstream was fabricated.

A computing code for radiation from moving charge has developed by ourselves and we found that the z-polarization state is unlikely to be produced by means of simple focusing process because spatial condition for interference in longer wavelength such as Terahertz region becomes lax.

研究分野：ビーム物理学

キーワード：z偏光 チェレンコフ光 コヒーレント放射

1. 研究開始当初の背景

例えば電子レンジのようにギガヘルツ帯周波数領域の電磁波は通信分野のみならず身近な民生品にも広く応用されているが、更に高周波数領域で電波と光の中間的な性質を持つテラヘルツ (THz) 波は、かつては強力な光 (波) 源がなく、テラヘルツギャップとも呼ばれていた。しかしながら近年はレーザーや半導体技術の進展をうけて、様々な THz 波源や検出器が開発されるようになった。今日では、高速な通信技術や物質の構造・機能の学術研究に応用されている。その意味ではもはやテラヘルツギャップは存在しないと言えることができるが、光科学分野では光の重要なパラメータの一つである偏光特性についての未だ開拓すべき課題があると思われる。

1980 年代後半に発見された加速器からの短パルス電子ビームが発生するコヒーレント放射は、その強度が電子数の二乗に比例することから、ビーム診断のみならず光科学分野の強力な光源として開発研究が精力的に行われてきた。近年では電子ビームのバンチ長が 100 フェムト秒 (約 30 μm) 以下まで短くすることが可能になり、THz 周波数域のコヒーレント放射が得られるようになった。

電子からの放射の偏光は、電子の運動に支配される。電子の偏向時に発生するシンクロトロン放射は軸上で直線偏光であり、電子に螺旋運動を与えれば円偏光成分が現れる。一般に光の偏光は光電場即ち伝搬方向に垂直な横方向成分の偏りを意味する。従って加速器光源ではビーム運動の制御で THz 波の偏光を意図的に操作することができる。一方、最近のレーザー技術では横方向偏光に加えて伝搬方向に電場が振動する z 偏光が生成できるようになり 3 次元空間での物質の光電場応答を調べられるようになった。しかしながら現在でも THz 帯域の偏光操作は容易でなく、とりわけ z 偏光の生成・制御に関する研究はこれまで殆どなかった。

2. 研究の目的

シンクロトロン放射と発生機構が異なるチェレンコフ光は、誘電体などの真空と屈折率が異なる媒体中を相対論的電子ビームが通過する際に放出されるほぼ 100% のラジアル偏光した極めて鮮明なリング状の放射である。電子ビームのバンチ長が極端に短い場合、これより長い波長域でのチェレンコフ光は位相が揃った可干渉な光になるため、光学素子で集光する際に光の伝搬方向に垂直な電場は全て打ち消され、伝搬方向にのみ電場が存在する z 偏光状態の光になると考えられる。z 偏光は、当然ながら横波ではないためその状態では光として見えないエバネッセント波であり、かつては存在を認識されていなかったが、近年の光学素子の進化で直線偏光からラジアル偏光やアジマス偏光が作り出されるようになり、これらを集光する時に

過渡的な状態として z 偏光が意図的に生成できるようになった。しかしこれらは 2 μm 以下の通常のレーザーの波長範囲で可能であり、テラヘルツ波長域では偏光素子は開発途上であることもあり、このような偏光特性操作は試されていない。しかしながら z 偏光をプローブとした光反応やイメージングにおいて、従来の横方向偏光では得られない新たな情報をもたらすと期待され、応用分野も広いと考えられる。本研究は、小型電子加速器からの高輝度電子ビームで生成する THz 領域のコヒーレントチェレンコフ光を用いて、z 偏光状態への偏光整形技術の確立を目指して、チェレンコフ光の特性に理論的・実験的にアプローチするものである。

3. 研究の方法

チェレンコフ光は、放射媒体 (ラジエータ) 内を光速より速い速度で荷電粒子が通過する際、速度に依存した広がり角で前方コーンにリング状に放出されることが良く知られている。単一粒子が放つチェレンコフ光は、ほぼ完全なラジアル偏光であると考えられる。相対論的電子ビームは速度が限りなく光速に近く、各々の電子の横方向運動量が小さい、すなわちビームエミッタンスが小さい場合、電子バンチ全体が放つチェレンコフ光は横方向にほぼ 100% のコヒーレンスを持つ波面が揃った光になる。また電子バンチが非常に短い場合、これより長い波長領域では進行方向についても可干渉光即ちコヒーレント放射になる。従って、チェレンコフ光の位相を崩すことなく集光できれば、z 偏光状態を作り出せる事が可能である。加速器における先端的なバンチ圧縮技術を用いると 100 μm 以下の電子バンチ生成が可能なので、THz 域のコヒーレント放射を得る事ができる。そこで、1) コヒーレント放射発生のための超短パルス電子ビーム発生技術の確立、2) ラジエータから発生するチェレンコフ光を、波面を崩さず観測点まで輸送するミラーシステムの開発研究、3) チェレンコフ光の空間分布等の測定および理論との比較、4) チェレンコフ光発生シミュレーションコード開発と実験値と比較する物理量の抽出、これらを具体的な研究内容とした。

1) 東北大学電子光理学研究センターの 50MeV 試験加速器 (t-ACTS) は短バンチ生成専用設計された電子加速器であり、加速構造中速度圧縮法で 100 フェムト秒のバンチ長を達成しているが、更に高周波位相や電子銃のタイミング等の各種加速器パラメータを、低エミッタンスで安定なフェムト秒電子パルス生成に最適化する。

2) チェレンコフ光はラジエータの屈折率で決まる開き角 (チェレンコフ角) で放出される。光学ガラスは透明なチェレンコフラジエータとして考えられるが、屈折率が 1.5 程度あるため開き角は 50° にもなり、短距離で大きく広がる為に利用しづらい。そこでラジエ

ータには屈折率が 1.05 と小さいシリカエアロゲルを用いる。チェレンコフ光は 17.8° の開き角を持つが、やはりこのままでは容易に輸送できないが、円錐 (axicon) ミラーと逆円錐ミラー (inverse axicon) を組み合わせて、広がりを抑制して測定器まで輸送するシステムを設計・製作する。

3) チェレンコフ光を真空槽から取り出すために、背後にビームを通過させる穴を持つ平面ミラーをおき、蛍光板のビームプロファイルモニターとラジエータをラダーに連結し容易に交換する直線導入器からなるシステムを開発する。取り出し窓においた投影スクリーンでの散乱光を CCD カメラで撮像してチェレンコフ光の空間分布の観測を行う。

4) チェレンコフ光の古典電磁気学的解釈は Tamm と Frank によってなされているが (1958 年ノーベル物理学賞)、詳細な特性はマックスウェルの方程式と波動方程式を正しく解かなくてはならない。そこで Lienard-Wiechert ポテンシャルの数値積分計算を行い、空間分布や波長分布を求めるシミュレーションコードを開発する。

4. 研究成果

1) 空間プロファイル

厚さ 1 mm のラジエータから放出されたチェレンコフ光を取り出し窓の上においた後方投影スクリーンに於て、光源点から約 9 cm の位置でのリングイメージを観測した (図 1)。このように鮮明にリング全周を観測した例はこれまで殆どない。電子ビームは有限な空間広がりを持つため、チェレンコフリングの線も有限の幅を持つ。理論的にはラジエータの厚みは関係しないことが分かっているが、この線幅はビームサイズから予測される幅より大きい。この原因は後にアキシコンミラーシステムの開発時に概ね明らかになった。良く知られているように誘電体の屈折率は周波数依存性がある。実験では赤から青の可視光の狭い波数領域で感度のある CCD で行ったが、屈折率の周波数依存性の影響が無視できないことが分かった。本研究で用いたシリカエアロゲルの波長依存の屈折率測定は容易でないこともあり、これまで行われていなかった。リング線幅の精密測定についてはバンドパスフィルターを用いる必要があることが分かったと同時に、屈折率の波長依存性にチェレンコフ角は敏感であるため、ラジエータの屈折率をあらかじめ正確に知ることは必須であることが明らかになった。

2) 光輸送ミラーシステム

理想的には図 2 (左図) に示したようにチェレンコフ角を相殺する角度の円錐面の組み合わせを使って平行光にする輸送が望ましいが、屈折率の僅かな差異によって発散あるいは収束が残ることは否めない。しかしながら実際には代表的な一つのチェレンコフ角を選択せざるを得ない。真空槽や取り出し

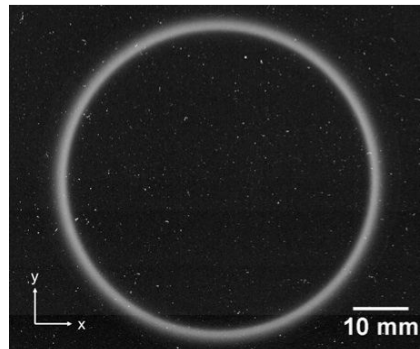


図 1 投影スクリーンで観測したチェレンコフリング

窓のサイズから輸送経路を決定し、円錐ミラーと逆円錐ミラー (図 2 右) を製作した。鏡面精度は $\lambda/4$ とし、表面はテラヘルツ光を良く反射するように金コートを施した。そのため、観測可能波長は 450 nm 以上となった。

実機を使った実験では、緑色で 0.3 度ほど広がり角が残ったが、約 10 m 離れたストリークカメラまでの輸送が問題なく行え、バンチ長測定に成功した。

3) 数値シミュレーション

よく知られている Lienard-Wiechert ポテンシャルを用いた放射を表す式を、荷電粒子が速度を変えずラジエータ内を直進する条件で近似式が求まる。チェレンコフ角はほぼ一意的に決まることが分かるが、しかしながら光の周波数に依存する項が完全な farfield 近似であることも含めて、所謂 Tamm 問題が無視されていることが分かる。

そこで Lienard-Wiechert ポテンシャルを近似せずに逐次積分するコードを開発し、チェレンコフリングの空間プロファイルの波長依存性を調べた。コードは、ビームが空間広がりや運動量広がりを持つことも取り入れられるように多粒子系で計算を可能にしているところが特徴的である。図 3 に計算例を示した。観測点は 10m の完全な遠方とした。波長によりチェレンコフ光のリング線幅が大きく変わっていることが分かる。300 nm では画素分解能が足りず、殆どリング線が見えないので省いた。30 μm のプロファイルで分かるように周囲にいくつかの干渉線が見える。チェレンコフリングは干渉効果が波長に

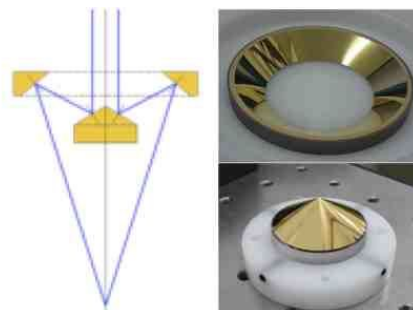


図 2 光輸送アキシコンミラーシステム

よって大きく変わるために、長波長領域では干渉条件が緩くなるために量やけることがよく分かり、 $300\ \mu\text{m}$ ($= 1\ \text{THz}$) では輪郭すら分からない。これを一次元に射影したグラフが図4である。チェレンコフ角は短波長でよく一致しているが、超波長ではピークを見いだすことが困難になっている。

このシミュレーション結果が正しいとすると、長波長領域では光の進行方向の広がりを持つため、ラジアル偏光度が低い可能性があり、即ち偏光度が高いTHz域のz偏光を生成しづらいのではないかと、という疑問が生じる。これらについては今後の課題であり、チェレンコフ光の特性を多角的に調べる必要を示唆していると結論できる。

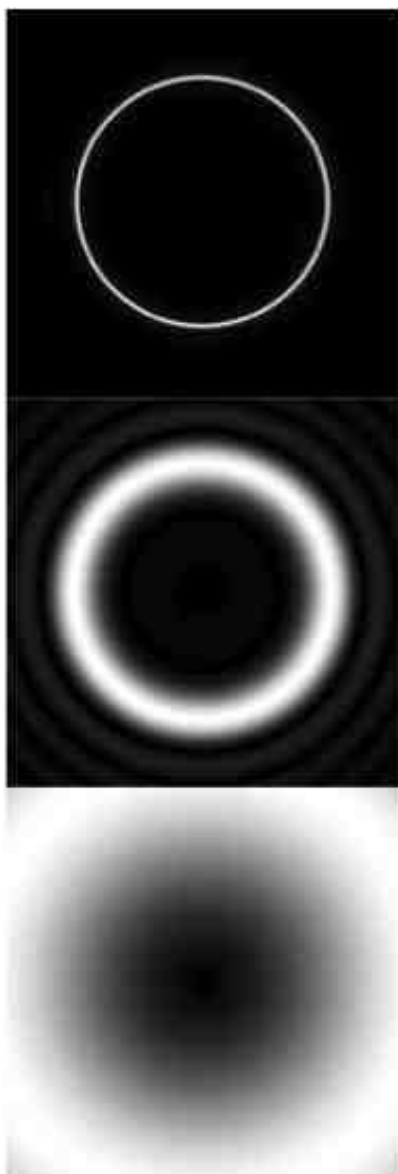


図3 屈折率1.05のラジエータからのチェレンコフ光の空間プロファイル。波長は上から $3\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ および $300\ \mu\text{m}$ 。

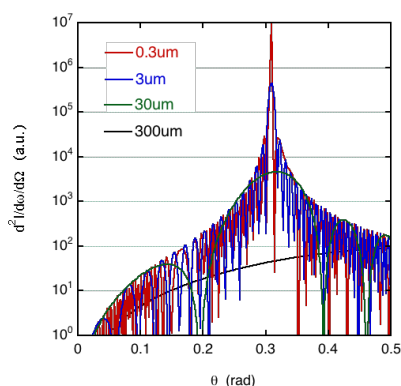


図4 角度分布の波長依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Hiroyuki Hama, "Numerical Study of Cherenkov Radiation from Thin Silica Aerogel", Proceedings of 38th International Free Electron Laser Conference (2017) webpage.

〔学会発表〕(計 3 件)

Hiroyuki Hama, "Production of z-Polarized Coherent Cherenkov Light in the THz Region", 8th International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy using Accelerator Based Source, 2015.10.14, Long Island, New York, USA.

Hiroyuki Hama, "Variable Polarized Narrowband THz Source Based on Undulator Super-Radiance"(invited), EMN Meeting on Terahertz, 2016.5.16, San Sebastian, Spain.

Y. Saito, H. Hama, et al., "Evaluation of the Extremely Short Electron Bunch Length Measurement with Cherenkov Radiation", 第14回日本加速器学会年会, 2017年8月1日、札幌.

〔その他〕

ホームページ等

<http://tansei.lns.tohoku.ac.jp/abpg/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

濱 広幸 (HAMA, Hiroyuki)

東北大学・電子光理学研究センター・教授
研究者番号：70198795

(3)連携研究者

南部健一 (NANBU, Ken-ichi)

東北大学・電子光理学研究センター・技術
専門職員

研究者番号：00422072

東谷千比呂 (TOHKOKU, Chihiro)

東北大学・電子光理学研究センター・技術
一般職員

研究者番号：20450190

(2015年のみ)