

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25790078

研究課題名(和文) チェレンコフ光計測によるシングルショット縦方向位相空間測定システムの開発

研究課題名(英文) Development of longitudinal phase space measurement system employing Cherenkov radiation

研究代表者

南部 健一 (Nanbu, Kenichi)

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：100フェムト秒程度のバンチ長が要求されるテラヘルツ光源加速器の性能向上には、電子ビーム生成から加速までの間の縦方向位相空間分布の把握が必要不可欠である。本研究では、チェレンコフ光の放射角と電子の速度の間に強い相関関係があることを応用した新しい縦方向位相空間測定システムの研究を行った。設計した光学系は、縦方向位相空間を測定するのに十分なエネルギーおよび時間分解能を有しており、チェレンコフ放射エータについてもビーム試験を行い十分な性能を有していることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：An accelerator based light sources for intense coherent THz light requires the electron bunch length shorter than a few hundred femtosecond. In order to improve the performance of accelerator based light sources, it is indispensable to measure the electron distribution in longitudinal phase space for understanding the beam dynamics at the bunching section. In this study, the longitudinal phase space measurement system by Cherenkov light observation applying velocity dependence of opening angle has been developed. This developed system is composed of a special optical system and a Cherenkov radiator. The designed special optical system has sufficient resolution to measure the longitudinal phase space. The beam test of the Cherenkov radiator was performed at beam diagnosis section of t-ACTS. In addition, the clear Cherenkov ring was observed. This measurement system is a promising system for innovative beam diagnosis technology.

研究分野：加速器科学

キーワード：ビーム診断 縦方向位相空間測定 チェレンコフ放射

1. 研究開始当初の背景

コヒーレントテラヘルツ光源に代表されるような、バンチ長が 100 フェムト秒程度の極短バンチを必要とする加速器光源の性能向上には、電子ビームの生成から加速までの間の比較的低エネルギー領域 (2~3 MeV 程度) における縦方向位相空間分布の把握が必須である。縦方向位相空間を測定する手法として、測定対象となる電子ビームのエネルギーが 10 MeV を超えるような場合は、偏向電磁石下流などのエネルギー分散が大きな場所に光学的遷移放射スクリーンやチェレンコフラジエーターなどを設置し、そこから放射される光をストリークカメラ等で測定する手法が考案され実用化されていた。しかしながらこのようなエネルギー分散を用いた測定には、比較的に長いドリフト空間が必要になる。そのため電子ビームのエネルギーが 4 MeV 以下の場合、空間電荷効果等の影響が強く、その影響を無視できないため、原理的に測定が難しいという課題があった。また測定には偏向電磁石が必要となるため、任意の場所で測定を行うことができないという問題もあり、比較的低エネルギーにも適用可能で、かつ任意の場所で測定可能な縦方向位相空間測定手法の開発は非常に重要であったと思われる。

2. 研究の目的

本研究は、熱陰極高周波電子銃から引き出されるような、2~3 MeV 程度のエネルギーを有する電子ビームのシングルショット縦方向位相空間測定手法を確立し、そのビームの縦方向位相空間分布を測定するとともに、シミュレーションとの比較を行うことで、より精密なビーム調整や制御の可能性を探ることを目的として研究を行った。従来の測定手法をこのような低エネルギー領域までそのまま拡張することは空間電荷効果や測定スペースの点から困難である。低エネルギー領域にも適応できる縦方向位相空間測定には、空間電荷効果の影響を抑制するため、ドリフト空間を絶対的に短くする必要がある。本研究では測定対象となる電子ビームのエネルギーが 2~3 MeV 程度の場合、チェレンコフ光の放射角と電子の速度 (=エネルギー) に強い相関がある点に着目し、電子ビームから放射されるチェレンコフ光を計測することで、その縦方向位相空間分布のシングルショット測定を目指したものである。

3. 研究の方法

シングルショット縦方向位相空間測定を実現するためには、チェレンコフ光を発生させるチェレンコフラジエーターとチェレンコフ光の放射角度に応じて光検出器 (ストリークカメラ等) の測定面上に焦点を結ぶ光学系を開発しなければならない。そこでチェレンコフラジエーターの要求仕様を明らかにしたのちにその作製に着手するとともに、平

行してチェレンコフ光測定光学系の設計と測定に適した電子ビームのパラメータサーベイを行い、それらの結果を踏まえて測定システム全体の性能評価と原理実証実験を行う。

4. 研究成果

(1) チェレンコフラジエーターの開発と特性評価

チェレンコフラジエーターの屈折率を検討した結果、エネルギー分解能の点から屈折率が 1.03~1.06 程度が最適であるとの結論が得られ、原子核実験等で実績のある屈折率 1.05 の疎水性シリカエアロゲルをチェレンコフラジエーターとして使用することにした。測定の際にはチェレンコフラジエーター上での電子ビームのプロファイルの影響が無視できないことが判明したため、ラジエーター上でのビームプロファイル測定が行えるような機能を有したチェレンコフラジエーターを開発した (図 1)。

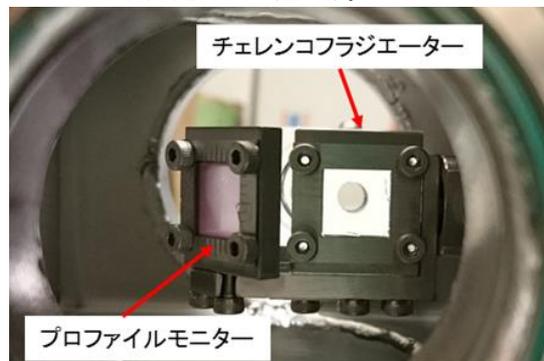


図 1. チェレンコフラジエーターとプロファイルモニター。チェレンコフラジエーターは厚み 1 mm の疎水性シリカエアロゲルである。またプロファイルモニターは厚み 0.1 mm のデマルケストである

本研究におけるチェレンコフラジエーターの重要度は極めて高く、想定した値と屈折率が僅かでも変化した場合、エネルギーの絶対精度が大幅にずれることが分かっており、大気中と真空中で屈折率が 2% 程度変化すると報告もあったため、干渉計を用いた真空中での屈折率測定を行った (図 2)。その結果、シリカエアロゲルの屈折率は大気中と真空中でほとんど変化しないことが確認できた。測定時には電子ビームをシリカエアロゲルに照射するため、シリカエアロゲルからの脱ガスによる真空悪化の影響が無視できないと考えられた。そこで東北大学電子光学研究センターの試験加速器 (t-ACTS) のビーム診断部でチェレンコフラジエーターのビーム試験を行った。その結果、シリカエアロゲルにビームを照射するとその時に発生するアウトガスによって、真空容器内の圧力は若干上昇するが、コンダクタンスを考慮することで、他の部分への影響を低減できる程度であることが分かった。

また本研究では、チェレンコフラジエー

ターから放射されるチェレンコフ光は、歪が極めて少ない円環状の光を想定している。そこで前述したビーム診断部で同様にチェレンコフ光発生試験を行った。その結果、ほぼ円環状のチェレンコフ光が発生していることが明らかとなった（図3）。50 MeV程度のエネルギーを有する電子ビームから放射されるチェレンコフ角はほぼ一定の値となる特性を生かし、本チェレンコフラジエーターのような、極めて薄いシリカエアロゲルの電子ビームによる屈折率測定についての可能性を見出すことが出来た。

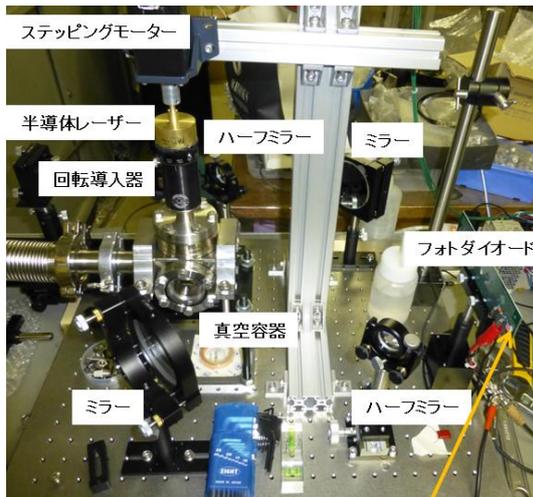


図2. チェレンコフラジエーターの屈折率測定装置。試料（シリカエアロゲル）を回転させ、その時に生ずる光路差をマッハ・ツェンダー干渉計で検出し屈折率を測定する



図3. 観測されたチェレンコフリング。解析の結果、x軸方向の半径が27.4 mm、y軸方向の半径は27.6 mmであった

(2) チェレンコフ光輸送系の設計と光学素子の評価

チェレンコフ光を輸送する光学系には、時間情報を壊さずにチェレンコフ光の角度を光検出器の測定面上の位置に変換する機能が求められる。検討の結果、分散の影響や光学素子の作製の点から反射光学系で構築することにした。光学系は、主にチェレンコフ光の放射角度に応じて、直線状に焦点を結ぶ

特殊な放物-球面鏡（Turtle-back ミラー）と真空容器から大気中にチェレンコフ光を取り出す際に使用する、シリンダリカル放物面鏡と、取り出した光を光検出器まで輸送する放物面鏡と平面鏡から構成される（図4）。理想的なセットアップではエネルギー分解能は1.2 KeV、時間分解能は0.7 ps程度であることが、シミュレーション計算から明らかとなり、目標としていた測定精度を達成することができた。しかし一方では、その測定精度はTurtle-back ミラーの設置精度に大きく依存することが判明した。Turtle-back ミラーは一般的なミラーと異なり、調整の指標がないため、精密位置調整機構のみでは調整が困難であり、その調整方法については今後の課題であると考えている。

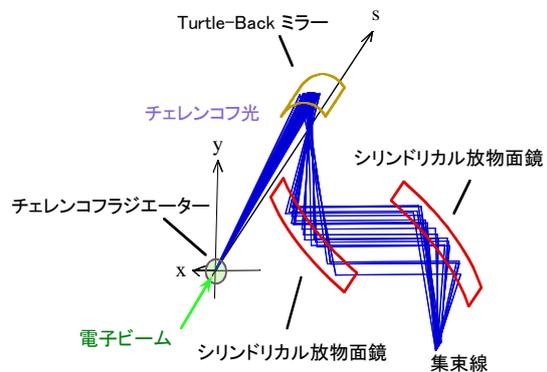


図4. チェレンコフ光輸送系の概念図。真空容器から大気中に光を取り出す際に使用する真空窓での分散や屈折による影響を排除するためにシリンダリカル放物面鏡を用いて平行光に変換している

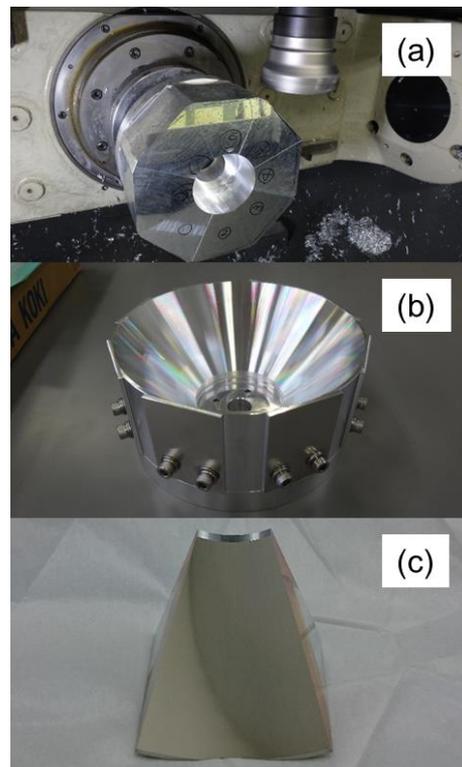


図5. (a) 切削加工中、(b) 機械加工完了後、(c) 完成した Turtle-back ミラー

光学素子については、実際に Turtle-back ミラーを製作し (図5)、その表面形状と表面粗さについて評価を行った。表面形状については、ほぼ設計値通りであることが明らかとなったが、表面粗さについては、一般的な光学ミラーと比較して2桁以上悪いことが判明し、この原因としては、放物面形状であるため、研磨が難しく、そのため機械加工の跡が残ってしまったためと考えられる。この問題の解決には、専用の研磨装置の開発や、作製方法の抜本的な見直し、蒸着時の膜厚制御による表面精度の改善など、いくつかの候補があると思われるが、この点については今後の課題とした。

本研究で開発した測定システムは比較的エネルギーが低い電子ビームの縦方向位相空間分布の測定を行うのに十分な精度を有していることがシミュレーションから明らかとなったが、今後は光陰極高周波電子銃から引き出されるような、より高いエネルギーを有する電子ビームの縦方向位相空間分布測定の実現に向けて測定システムの研究を進める。

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 南部健一, 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 長澤育郎, 高橋健, 東谷千比呂, 小林恵理子, 齊藤寛峻, 阿部太郎, 濱広幸, LFCカメラ用チェレンコフラジエーターの評価, 第12回日本加速器学会年会論文集 (2015) pp1193-1197, 査読無

http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/THP0/THP078.pdf

② K. Nanbu, K. Kashiwagi, H. Hinode, Y. Shibasaki, T. Muto, I. Nagasawa, S. Nagasawa, K. Takahashi, C. Tokoku, A. Lueangaramwong, H. Hama, Linear Focal Cherenkov-Ring Camera for Single Shot Observation of Longitudinal Phase Space Distribution for Non-Relativistic Electron Beam, Proc. International Beam Instrumentation Conference 2014, pp385-388 (2014), 査読無

<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IBIC2014/papers/tupf26.pdf>

③ 南部健一, 柏木茂, 日出富士雄, 柴崎義信, 武藤俊哉, 長澤育郎, 永沢聡, 高橋健, Anusorn Lueangaramwong, 濱広幸, LFCカメラ用シリカエアロゲル輻射体の真空中での特性評価, 第11回日本加速器学会年会論文集 (2014) pp725-728, 査読無

http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP0/SAP085.pdf

[学会発表] (計6件)

① 南部健一, Anusorn Lueangaramwong, 日出富士雄, 柏木茂, 武藤俊哉, 柴崎義信, 高橋健, 長澤育郎, 東谷千比呂, 永沢聡, 齊藤寛峻, 濱広幸, 縦方向位相空間測定のためのLFCカメラの開発, 日本物理学会第71回年次大会、東北学院大学 (仙台市)、2016年3月19日

② 南部健一, 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 長澤育郎, 高橋健, 東谷千比呂, 小林恵理子, 齊藤寛峻, 阿部太郎, 濱広幸, LFCカメラ用チェレンコフラジエーターの評価, 第12回日本加速器学会年会, プラザ萬象 (敦賀市), 2015年8月6日,

③ 南部健一, 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 齊藤寛峻, 阿部太郎, 柴崎義信, 長澤育郎, 高橋健, 東谷千比呂, 濱広幸, 縦方向位相空間測定のためのLFCカメラの開発 (II), 日本物理学会第70回年次大会、早稲田大学 (東京都)、2015年3月22日

④ 南部健一, 柏木茂, 日出富士雄, 柴崎義信, 武藤俊哉, 長澤育郎, 永沢聡, 高橋健, A. Lueangaramwong, 濱広幸, LFCカメラ用シリカエアロゲル輻射体の真空中での特性評価, 第11回日本加速器学会年会, リンクステーションホール青森 (青森市), 2014年8月9日

⑤ A. Lueangaramwong, F. Hinode, S. Kashiwagi, T. Muto, I. Nagasawa, S. Nagasawa, K. Nanbu, Y. Shibasaki, K. Takahashi, K. Yanagi and H. Hama, Linear Focal Cherenkov-ring Camera for Direct Longitudinal Phase Space Measurements, 第11回日本加速器学会年会、リンクステーションホール青森 (青森市)、2014年8月9日

⑥ A. Lueangaramwong, F. Hinode, S. Kashiwagi, T. Muto, I. Nagasawa, K. Nanbu, Y. Shibasaki, S. Takahashi, K. Yanagi, H. Hama, Study of Longitudinal Phase Space Distribution Measurement via a Linear Focal Cherenkov Ring Camera, 第10回日本加速器学会年会、名古屋大学 (名古屋市)、2013年8月5日

[その他]

ホームページ

<http://denpa.lns.tohoku.ac.jp/abpd/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

南部 健一 (NANBU KEN-ICHI)

東北大学・電子光物理学研究センター・技術専門職員

研究者番号: 00422072