

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651096

研究課題名(和文) マイクロバンチング不安定性の起源を探る電子ビームの縦方向位相空間の直接観測

研究課題名(英文) Direct observation of the longitudinal phase space distribution of electron beam for investigation of micro-bunching instability

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

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)：チェレンコフ光の放出角度の電子速度依存性を利用し、独自に考案したTurtle-Back Mirrorとよぶ非線形ミラーによって線状焦点に分光収束させ、低エネルギー電子の縦方向位相空間を精密測定手法の確立することを目指した。研究では、測定システム全体に渡って光学追跡計算を行ない、運動量 $2.4\text{MeV}/c$ の電子ビームに対して $1.15\text{keV}/c$ の運動量分解能、 0.74ps の時間分解能で縦方向位相空間を観測できることが分かった。一方、試作したTurtle-Back Mirrorの全体的な鏡面形状は満足されたが、大きい表面荒さが分解能を相当に損なうことから、大幅な改良が必要なが分かった。

研究成果の概要(英文)：Based on momentum dependence of Cherenkov opening angle, we have proposed a novel diagnostic system for direct observation of longitudinal phase space distribution of low energy electron beam. A specially designed "Turtle-back Mirror" confines the Cherenkov light onto a focal line, and the longitudinal phase space can be obtained by taking a temporal information together. We have examined the system resolution by numerical ray-trace simulation for whole optical system, and a momentum resolution of $1.15\text{keV}/c$ and a temporal resolution of 0.74ps were found out for the complete optics. Meanwhile a test piece of Turtle-Back Mirror was manufactured, and we investigated the performance of it. Although the overall shape of the non-linear surface satisfied the requirement, the surface roughness was really unsatisfactory for better resolutions. Further improvement of the mirror surface is required.

研究分野：ビーム物理学

キーワード：低エネルギー電子ビーム 縦方向位相空間 チェレンコフ光

1. 研究開始当初の背景

電子バンチ内の電子分布の揺らぎが自らのコヒーレント放射によって増幅されるとされている、マイクロバンチング不安定性の起源を実験的に明らかにするためには、ビーム生成から加速までの間の比較的低いエネルギー領域でのビームの縦方向位相空間分布を把握することが必要不可欠であり極めて重要である。通常は放射光あるいは遷移放射の観測によって電子ビームの特性を測定することができるが、電子銃から引き出された加速前の数 MeV 程度あるいはそれ以下の低エネルギー領域のビームでは、放射光の波長が極めて長波長になり測定が難しく、遷移放射は光放射確率が非常に小さく、測定し易い可視域近くの光は殆ど放出されない。従ってこのような低エネルギーの電子ビーム診断は極めて困難であり、もっぱら密度分布の揺らぎが存在するという前提でシミュレーションによる議論が行われてきた。

2. 研究の目的

屈折率が 1 以上で透明な媒質からのチェレンコフ光は、媒質を厚さに比例した強度の可視域波長が放出される。またその放出角度と荷電粒子の速度に強い相関があるため、放出角度と放出時間を同時に測定すれば縦方向位相空間を直接観測することになる。そこでマイクロバンチング不安定性の起源を実験的に明らかにするためのビーム診断装置として、独自に設計した放出角度の情報を位置情報に変換する、ビーム進行方向に放物面、ビーム方向の水平面に球面である特殊な局面を用いた非線形光学鏡 (Turtle-back mirror) を用いる縦方向位相空間測定システムを開発することが本研究の中心的な目的の一つである。図 1 に集光原理を示す。また、図 2 にチェレンコフ光の放出角の電子の運動量依存性を異なる屈折率の放射体について示した。

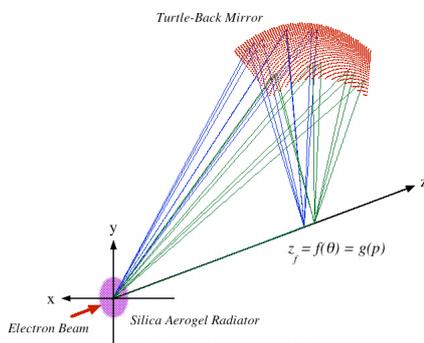


図 1 Turtle-back mirror の集光原理

3. 研究の方法

チェレンコフ光の放出角度の情報を位置情報に変換する非線形反射鏡および光検出

器までチェレンコフ光を輸送するための非線形光学系のパラメータを決定する。またチェレンコフ光を発生させるためのチェレンコフラジエーターに要求される性能を明らかにする。電子ビーム取り出し窓での散乱や、非線形光学系での収差や設置誤差による影響を見積もるために、測定システム全体をシミュレーションし評価・検証を行う。その後、原理実証実験を行い開発したチェレンコフラジエーターや非線形光学系の妥当性の検証を行った後に、システム全体の性能評価を行なう。

シリカエアロジェルなどの屈折率が小さい薄膜放射体におけるチェレンコフ光の開口角の電子の運動量依存性を図 2 に示した。屈折率が小さいほど開口角の運動量に対する変化量が大きい、チェレンコフ光放出の運動量しきい値が高くなるので、適切な屈折率を選択する必要がある。本研究では 1.05 のシリカエアロジェルを用いることとした (図 3)。

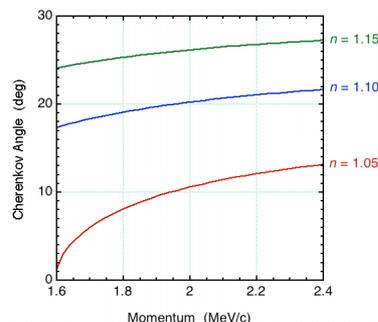


図 2 チェレンコフ光放出角度の電子運動量依存性



図 3 超低屈折率 1.05 のシリカエアロジェル

4. 研究成果

数値的な光学追跡シミュレーションで原理的な測定精度を見積もった結果、運動量が 2.4 MeV/c、規格化エミッタンスが 0.25 π mm mrad の電子ビームの場合、原理的な測定精度はエネルギー分解能が 1.15 keV/c、時間分解

能が 0.74 ps となり、縦方向位相空間を可視化するのに十分な測定精度が得られることが明らかとなった。

しかしながら図 4 に掲げた試作機の非線形反射鏡の面精度を計測したところ、放物面軸の焦点距離の 2 倍である曲面パラメータの設計値 350 mm に対して、 349.50 ± 0.13 mm と満足できる結果を得たが、表面荒さ精度（ラフネス）は極めて悪いことが分かった。このラフネス測定結果を考慮したシミュレーションを行った結果、縦方向位相空間の可視化に必要な角度-位置分解能すなわちエネルギー分解能が得られないことが明らかとなった。Turtle-back mirror の面形状は球面と放物面を組み合わせているが、作製そのものについて技術的に大きな問題はない。しかしながらアルミ金属を削りだす通常の製造法ではラフネスがかなり大きいことが分かった。本研究で必要とする鏡面サイズと精度を得るには特殊な研磨装置から開発しなくてはならないことが、専門メーカーとの議論等から今後の最大の課題として判明した。

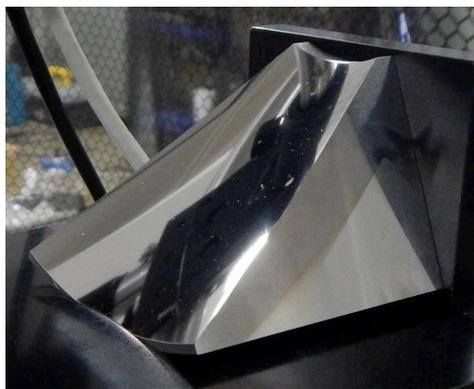


図 4 Turtle-back mirror の試作機

また当初は、チェレンコフラジエーターであるシリカエアロゲルが破損した場合、電子銃や加速管の高周波空洞を汚してしまう可能性が高いことから、これを真空容器の外に設置し、真空と大気の遮断は薄いベリリウム窓を用いることとしたが、ベリリウム窓通過時の電子ビームの散乱による影響を見積もった結果、エネルギーおよび時間分解能の両者に重大な影響があり、薄いベリリウム窓であっても縦方向位相空間分布の測定が困難で

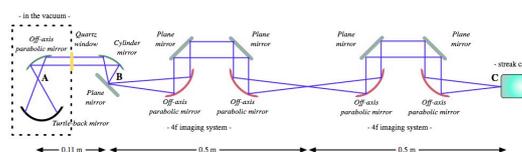


図 5 4f イメージングシステムによるチェレンコフ光輸送

あることからチェレンコフラジエーターは真空中に設置しなければならないことが明らかとなった。

一方、非線形光学系の開発では、図 5 のような 2 組の軸外し放物面鏡と平面を組み合わせた 4f 光学系を用いることで、チェレンコフ光をほぼ劣化なしで、光検出器まで輸送することが可能であることがシミュレーションにより示唆された。原理的には 4f 光学系を複数組み合わせることで、チェレンコフ光を遥か遠方の光検出器まで劣化なしで輸送できることを意味している。

以上の研究結果から考案した低エネルギー電子ビームの縦方向位相空間直接観測システムは、非線形反射鏡の表面磨き精度をかなり上げる必要があるが、実際に電子ビームを十分良好な時間-運動量分解能で観測できる能力を持つことを、概ね明確にすることができたと結論できる。

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 1 件)

- ① K. Nanbu, H. Hama, F. Hinode, S. Kashiwagi, A. Lueangaramwong, T. Muto, I. Nagasawa, S. Nagasawa, Y. Shibasaki, K. Takahashi, C. Tokoku, “Linear Focal Cherenkov-Ring Camera for Single Shot Observation of Longitudinal Phase Space Distribution for Non-Relativistic Electron Beam”, 査読無し, Proc. International Beam Instrumentation Conference 2014 (2014) TUPF26.

[学会発表] (計 7 件)

- ① K. Takahashi, S. Kashiwagi, F. Hinode, T. Muto, A. Lueangaramwong, S. Nagasawa, H. Saito, K. Nanbu, Y. Shibasaki, I. Nagasawa, C. Tokoku, H. Hama, “Diagnostic System for Longitudinal Phase Space Distribution of Low Energy Electron Beam Employing Silica Aerogel Cherenkov Radiator”, Korea-Japan Workshop on Accelerator-Based Advanced Light Source 2015, 2015.3.13, Daejeon, Korea.
- ② A. Lueangaramwong, F. Hinode, S. Kashiwagi, T. Muto, I. Nagasawa, S. Nagasawa, K. Nanbu, Y. Shibasaki, K. Takahashi, K. Yanagi, H. Hama, “Linear Focal Cherenkov-ring Camera for Direct Observation of Longitudinal Phase Space of Non-relativistic Electron Beam”, 第 11 回日本加速器学会年会, 2014 年 8 月 9 日, 青森市.
- ③ A. Lueangaramwong, T. Hara, F. Hinode, S. Kashiwagi, T. Muto, I. Nagasawa, S.

Nagasawa, K. Nanbu, Y. Shibasaki, K. Takahashi, K. Togawa, K. Yanagi, H. Hama,
“Study of Longitudinal Phase Space Distribution Measurement via a Linear Focal Cherenkov Camera”, 第10回日本加速器学会年会, 2013年8月5日, 名古屋大学.

[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

(2) 研究分担者

原 徹 (HARA, Toru)

独立行政法人理化学研究所・先端ビームチ

ーム・チームリーダー

研究者番号：00280727

渡川 和晃 (TOGAWA, Kazuaki)

独立行政法人理化学研究所・先端ビームチ

ーム・前任研究員

研究者番号：00342816