

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月22日現在

機関番号：85402

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21604017

研究課題名（和文） ダイヤモンド検出器を用いた高エネルギー電子ビームの計測技術

研究課題名（英文） Measurement of high energy electron beam using diamond detector

研究代表者

青柳 秀樹 (AOYAGI HIDEKI)

財団法人 高輝度光科学研究センター・光源・光学系部門・副主幹研究員

研究者番号：20416374

研究成果の概要（和文）：

X線自由電子レーザー施設において、電子ビームのハロー部が挿入光源の永久磁石に照射され、永久磁石が減磁してしまうことを防ぐためのインターロック用モニタ（ハローモニタ）を新しく開発し、実用化に導いた。このモニタは、耐放射線性の高いダイヤモンド検出器を真空ダクト内に装着し、電子ビームのハロー部の強度を高い感度で直接計測することが出来る。このモニタの検出部に RF フィンガーを導入することで電子ビームの航跡波の影響を抑制し高周波特性を向上させるなどの工夫を施すことにより、実用が可能となった。

研究成果の概要（英文）：

In the X-ray free electron laser facilities, if permanent magnets of insertion devices are irradiated with halo part of electron beam, they may be degaussed. In order to prevent this, an interlock monitor, which is a beam halo monitor, was newly developed, and it was led to practical use. This monitor is equipped with diamond detectors, which has high radiation hardness, in a vacuum duct, and can directly measure intensity of the halo part of the electron beam with high sensitivity. Wake field of electron beam can be controlled by introducing RF fingers, and high-frequency property was improved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：時限

科研費の分科・細目：量子ビーム科学

キーワード：ダイヤモンド検出器、加速器、電子線、計測工学、量子ビーム、パルス計測、インピーダンス整合

1. 研究開始当初の背景

研究開発当初、既に、8GeV 電子線形加速器と挿入光源を組み合わせた X線自由電子レーザーの建設計画が進められていた。しかし、挿入光源の永久磁石が 8GeV 電子ビームのハロー部の照射により減磁され、X線レーザーの発振に影響を与えることが懸念されていた。減磁を防ぐためには、ビームの電荷量に対し、 10^{-6} の割合の入射強度に対して感度を有することが必要とされていた。しかしながら、これまでの技術は、スクリーンモニターによるビームプロファイルの観測や計器用変流記 (CT, Current Transformer) 等によるもので、 10^{-3} 程度の感度しか期待できなかった。

ダイヤモンドは、機械的強度に優れ、物質中最大の熱伝導率を有し、絶縁性にも優れた物質として知られており、半導体検出器としても幅広く研究が行われている。ダイヤモンド検出器は、シリコン検出器に比べ放射線損傷を受けにくい、機械的強度が優れている、絶縁性が高いため暗電流が低いなどのいくつかの利点を備えている。しかしながら、実用的に使われている半導体検出器は、ほとんどがシリコン検出器であった。その理由は、ダイヤモンドの高コストの問題も無視できないが、依然としてダイヤモンドの合成技術は、シリコンで得られているレベルに達していないことが第一にあげられる。そのため、加速器施設などの高い放射線に曝される環境下においても半導体検出器を用いての放射線計測はほとんど試みられていない。

2. 研究の目的

ダイヤモンド検出器を用いて高エネルギー電子ビームの強度を高感度で測定することにある。X線自由電子レーザー施設の電子線形加速器において、ダイヤモンド検出器を真空ダクト内に取り付け、微弱な電子ビームのハロー部の強度を直接計測することを目的としている。パルス・モードで計測することにより、実効的な検出限界の下限値を向上させる。この技術により、挿入光源永久磁石の電子ビーム照射による放射線損傷を防ぐためのインターロック用モニターとして実用化させることを目指す。

3. 研究の方法

我々は、これまでにダイヤモンド検出器を用いて放射光施設における X線ビームライン用光位置モニターの開発を行ってきた。また、高周波特性を格段に向上させることを目的に、独自のアイデアに基づく、光電子放出型のストリップライン型放射光モニターの開発も行ってきた。

そこで、本研究の目的である電子ビームの

ハロー部強度の直接計測を実現するために、上述の耐放射線性に優れたダイヤモンド検出器の技術とパルス信号を出力するための高周波特性の向上のための技術の二つを組み合わせることで、問題を解決することを目指した。

最初に、ダイヤモンド検出器単体の動作特性を評価するために 8GeV 電子ビームの照射試験を SPring-8 シンクロトロン・電子ビーム出射エリアで実施した。

また、ダイヤモンド検出器を装着した本モニターの試作機を 250MeV SPring-8 Compact SASE Source (SCSS) 試験機において実証試験を行い、(1)出力波形の確認、及び、環境ノイズによる影響の評価、(2)電子ビームのコア部による誘導電流 (航跡波) による影響の確認と高周波遮断フィルターによる抑制、(3)真空パイプ内壁等で生ずる二次電子や輻射による信号の評価、(4)検出器がビームの至近距離に配置された時の自由電子レーザー発振に対する影響の評価、の各項目について検証した。

次に、高周波特性の向上を達成するために、従来のモニター本体にストリップライン型伝送線路、高周波対応型 SMA 電流導入端子、及び、RF フィンガーの採用を試みた。250MeV SCSS 試験機において評価試験を行ない、航跡波の影響による高周波成分の抑制の効果について評価した。

最終的には、本モニターの実機を SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron Laser, 8GeV 電子ビーム線形加速) に設置し、微弱な電子ビームのハロー部の強度を直接計測することができるかを確認する最終動作試験を実施した。

4. 研究成果

(1) 試作機の製作と実証試験

ダイヤモンド検出器 (図 1) を装着したハローモニターの試作機 (図 2) を 250MeV SCSS 試験機において実証試験を行った。実証試験は、①出力波形の確認、及び、環境ノイズによる影響の評価 (図 3)、②電子ビームのコア部による誘導電流 (航跡波) による影響の確認と高周波遮断フィルターによる抑制 (図 4)、③真空パイプ内壁等で生ずる二次電子や輻射による信号の評価 (図 5)、④検出器がビームの至近距離に配置された時の自由電子レーザー発振に対する影響の評価 (図 6)、の各項目について検証した。何れの項目においても問題がないことを確認した。

中長期的な安定性を評価するために、ハローモニター専用の信号処理回路を製作し、データの同期収集システムを整備した。その結果、ダイヤモンド検出器の放射線損傷による出力信号の減衰等の現象はみられず、安定した

動作を確認することが出来た。

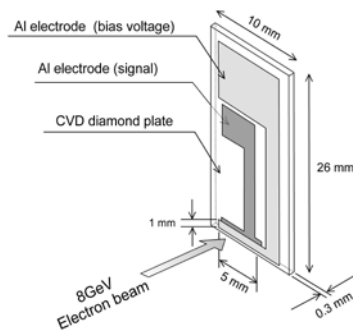
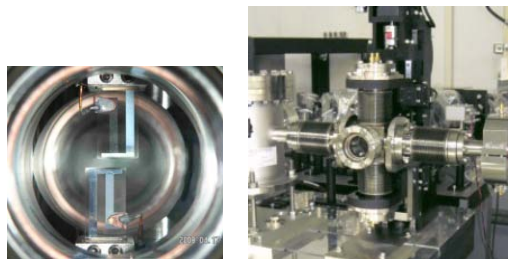


図1 試作機用ダイヤモンド検出器の構造



(a) (b)

図2 ハローモニタ試作機の写真 (a) ビーム・コア部の上下に配置したダイヤモンド検出器 (b) モニタの駆動装置

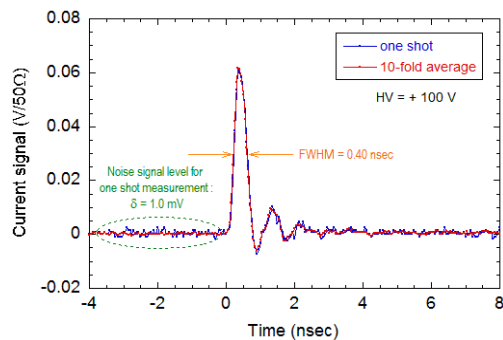


図3 ハローモニタのパルス波形 (青線は10回平均、赤線はシングル・ショット計測)

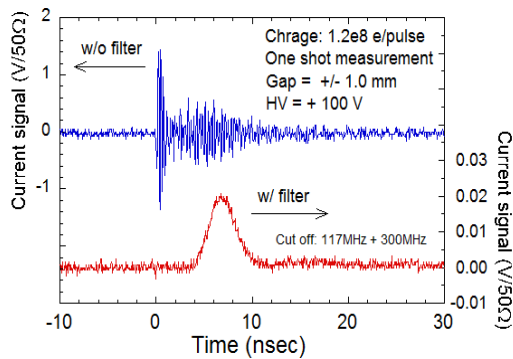


図4 誘導電流の影響とその抑制 (上:LPF無、下:LPF有).

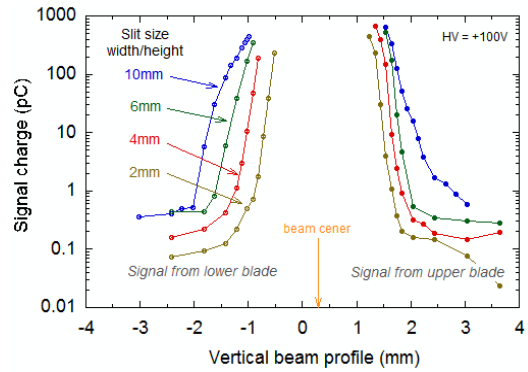


図5 真空パイプ内壁等で生ずる二次電子や輻射による信号の評価

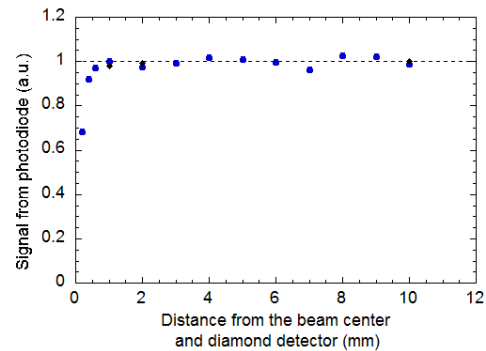


図6 レーザー発振に対する影響

(2) 実機用ハローモニタの設計

① ダイヤモンド検出器の最適化

実用化に向けて、構造を最適化したダイヤモンド検出器を製作した。素子を小型化することにより、検出器がもつ電気容量を小さくし高周波特性を高め、同時に、後述のRFフィンガーを採用した実機用装置の設計を容易にすることができた。評価試験をSpring-8のシンクロトロン・電子ビーム射出エリアで実施した。8GeV電子ビームを直接ダイヤモンド検出器に照射した時のパルス出力を観察することによってその検出効率を算出した。ビーム試験の結果、従来の検出器と同等の検出効率と広いダイナミック・レンジを有することを確認した。

② 高周波対応型検出器ホルダー

実効的に検出効率を高めるため、更なる高周波特性の向上に取り組み、超高真空対応かつ高周波特性においても優れた伝送線路としてストリップライン型伝送線路、高周波対応型SMA電流導入端子を備えた検出器ホルダーを設計製作した(図7)。

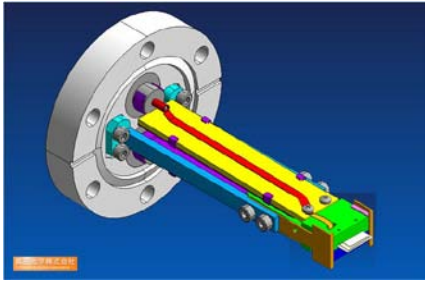


図7 ダイヤモンド検出器を取り付けた高周波対応型電流導入端子付きフランジ

③ RFフィンガーの採用

電子ビームの航跡波による影響を抑えるためのRFフィンガーを採用した実機用装置を設計・製作した。また、250MeV SCSS 試験機において評価試験を行ない、航跡波の影響による高周波成分を10分の1以下に抑制できることを確認した。ダイヤモンド検出器を電子ビームのコア部に近付けても、電子ビームの質を劣化させないことを確認した。

RFフィンガーの材質は、通常、バネ性に富むベリリウム銅を採用する。しかし、高いエネルギーの電子が材質中の散乱により二次電子・輻射を放出する影響を最小限に抑えるために、原子番号の比較的小さいアルミ窓付のRFフィンガーを開発した。この効果を確かめるために、8GeV電子ビームによる照射実験とモンテカルロ・シミュレーション・コード(EGS5)により、定量的な評価を行なった。その結果、0.1tのアルミ窓付RFフィンガーを採用することで、二次電子・輻射の影響による出力信号の変化は、数%程度に抑えられることを示した(図10)。

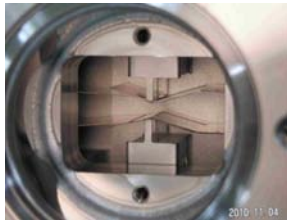


図8 検出器に装着したRFフィンガー

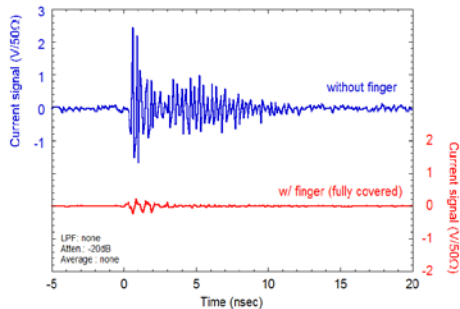


図9 RFフィンガーの装着による航跡波の抑制

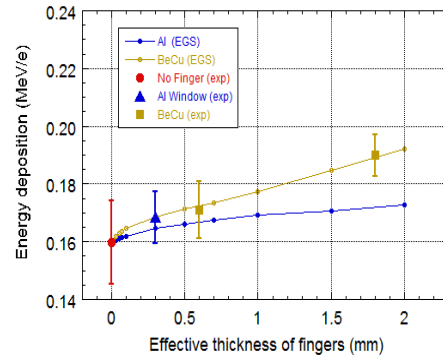


図10 二次電子・輻射の影響に関するシミュレーション

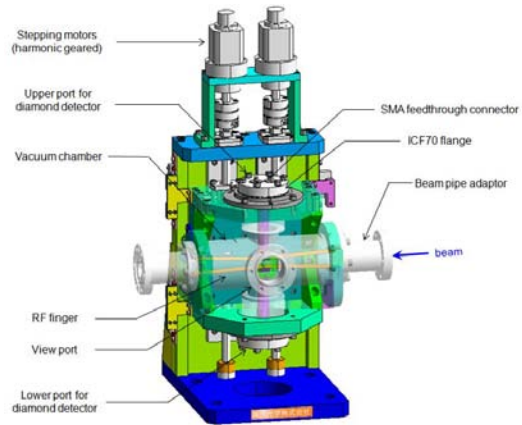


図11 実機用ハローモニタの構造

(3) 実機用ハローモニタの製作と性能確認

① 構造

前述の最適化されたダイヤモンド検出器、高周波対応型検出器ホルダー、RFフィンガーを採用した実機用ハローモニタを製作した(図11)。モニタ真空容器内での航跡波の反射を防ぐ目的のため、円形ビームダクトとの滑らかな連結を可能とするビームパイプアダプターを取り付けている。ビーム中心軸の上下に配したダイヤモンド検出器は、独立した駆動機構を有し、挿入光源の永久磁石Gapの動きに連動できる。

② 性能確認と運用実績

本モニタをSACLA(SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsar, 8GeV電子ビーム線形加速)に設置し、微弱な電子ビームのハロー部の強度を直接計測することができるかを確認する最終動作試験を実施し、以下の結果を得た。

- ・パルス動作する加速器クライストロン等から発生する電氣的な環境ノイズの影響を受けない。
- ・線形加速器部及びビーム輸送部で発生する輻射、二次電子等の影響を受けない。
- ・線形加速器直下流のアライメント用アンジュレータから放射されるX線の影響を受

けない。

・装着されたRFフィンガーが航跡波の影響を抑制し、高周波特性を向上させている。

また、本モニタを実際に利用し、ビームパイプ全体に広がるハロー成分が無いことも確認し、SACLAの通常運転時における電子ビームのハロー部は±2mm程度に集中していることを直接的に観測した(図12)。また、ダイヤモンド検出器を電子ビームに接近させてもXFEL発振の阻害要因にならないことも確認した(図13)。

本研究で開発したダイヤモンド検出器を用いた高エネルギー電子ビームの強度を計測する手法は、検出限界を 2×10^3 e/pulseに引き下げることに成功し、放射光施設の電子ビーム加速器において、アンジュレータ永久磁石の電子ビーム照射による放射線損傷を防ぐためのインターロック用センサーとして不可欠なものとして位置付けられている。

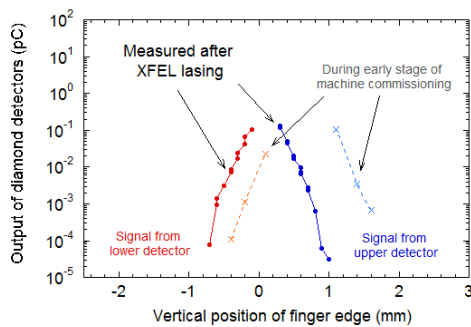


図12 通常運転時における電子ビームのハロー部プロファイル測定結果

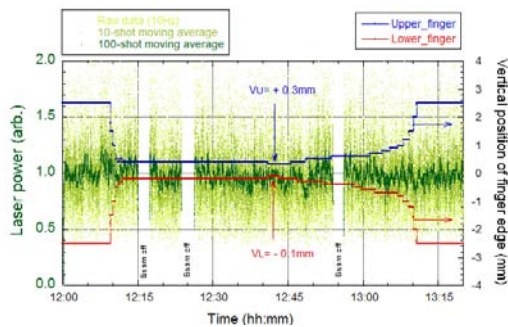


図13 XFEL発振に対する影響

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7件)

- ① Hideki Aoyagi, Yoshihiro Asano, Toshiro Itoga, Nobuteru Nariyama, Teruhiko Bizen, Takashi Tanaka, Hideo Kitamura, "Pulse-mode measurement of electron beam halo using diamond-based detector",

Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 15, 022801 (2012)、査読有、DOI:10.1103/PhysRevSTAB.15.022801

- ② H. Aoyagi, Y. Asano, H. Kitamura, T. Tanaka, "Operational Results of the Diamond-based Halo Monitor during Commissioning of SPring-8 XFEL", Proceedings of 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC2011), p1218-1220, 2011、査読無、<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2011/papers/tupc091.pdf>

- ③ H. Aoyagi, T. Bizen, N. Nariyama, S. Suzuki, K. Fukami, T. Aoki, Y. Asano, T. Itoga, H. Kitamura, T. Tanaka, "Diamond-based Beam Halo Monitor Equipped with RF Fingers for SACLA", Proceedings of the 10th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC2011), p12-14, 2011、査読無、<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/DIPAC2011/papers/moob03.pdf>

- ④ H. Aoyagi, T. Bizen, N. Nariyama, Y. Asano, T. Itoga, H. Kitamura, T. Tanaka, "Improvement in High-Frequency Properties of Beam Halo Monitor Using Dimond Detectors for XFEL/SPRING-8", Proceedings of the 32nd Free Electron Laser Conference (FEL2010), p700-703、査読無、<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/FEL2010/papers/thoc4.pdf>

- ⑤ H. Aoyagi, T. Bizen, N. Nariyama, Y. Asano, T. Itoga, H. Kitamura, T. Tanaka, "Feasibility Tests of the Beam Halo Monitoring System for Protecting Undulator Permanent Magnets against Radiation Damage at XFEL/SPring-8", Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC2010), p2851-2853、査読無、<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC10/papers/wepeb068.pdf>

- ⑥ Hideki Aoyagi, Toshiro Itoga, Nobuteru Nariyama, Teruhiko Bizen, Takashi Tanaka, Hideo Kitamura, Yoshihiro Asano, "Measurement of Electron Beam Halo with Diamond Detector", Proceedings of the 24th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK Proceedings 2010-10, p73-81, 2010、査読有、<http://ccdb5fs.kek.jp/tiff/2010/1025/10250>

10.pdf

- ⑦ H. Aoyagi, T. Bizen, K. Fukami, N. Nariyama, Y. Asano, T. Itoga, H. Kitamura, T. Tanaka, "Beam Halo Monitor using Diamond Detector for Interlock Sensor at XFEL/SPring-8", Proceedings of the 9th European Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators (DIPAC2009), p219-221, 2009、査読無、<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/d09/papers/tupb24.pdf>

[学会発表] (計5件)

- ① Hideki Aoyagi, Teruhiko Bizen, Toshiro Itoga, Nobuteru Nariyama, Yoshihiro Asano, Hideo Kitamura, Takashi Tanaka, "Proposal of a Diamond-based Beam Halo Monitor for an Energy Recovery Linac", 50th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Energy Recovery Linacs (ERL2011)、招待講演、2011年10月17日、高エネルギー加速器研究機構(茨城県)
- ② Hideki Aoyagi, Teruaki Hasegawa, Teruhiko Bizen, Yoshihiro Asano, "Geomagnetic Shield for Entrance Area of Undulators at SACLA", 第8回日本加速器学会年会予稿集、TUPS161、ポスター発表、2011年8月2日、つくば国際会議場(茨城県)
- ③ 青柳秀樹、糸賀俊朗、成山展照、備前輝彦、田中隆次、北村英男、浅野芳裕、「電子ビーム・ハローモニタ用アルミ窓付RFフィンガー」、第24回日本放射光学会年会予稿集、p66、口頭発表、2011年1月9日、つくば国際会議場(茨城県)
- ④ 青柳秀樹、糸賀俊朗、成山展照、備前輝彦、田中隆次、北村英男、浅野芳裕、「XFELにおける電子ビーム・ハローモニタの開発」、第23回日本放射光学会年会予稿集、p59、口頭発表、2010年1月7日、イーグレひめじ(兵庫県)
- ⑤ Hideki Aoyagi, Toshiro Itoga, Nobuteru Nariyama, Teruhiko Bizen, Takashi Tanaka, Hideo Kitamura, Yoshiro Asano, "Feasibility Tests of Beam Halo Monitor using Diamond Detector", 第6回日本加速器学会年会予稿集、p456-458、口頭発表、2009年8月6日、日本原子力開発機構(茨城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青柳 秀樹 (AOYAGI HIDEKI)
財団法人 高輝度光科学研究センター・光源・光学系部門・副主幹研究員
研究者番号：20416374

(2) 研究分担者

浅野 芳裕 (ASANO YOSHIHIRO)
独立行政法人 理化学研究所・XFEL 研究開発部門・グループ・ディレクター
研究者番号：40354980
(H21→H22：連携研究者)

成山 展照 (NARIYAMA NOBUTERU)
財団法人 高輝度光科学研究センター・光源・光学系部門・主幹研究員
研究者番号：20344393
(H21→H22：連携研究者)

糸賀 俊朗 (ITOGA TOSHIRO)
財団法人 高輝度光科学研究センター・XFEL 研究推進室・研究員
研究者番号：90525362
(H21→H22：連携研究者)

(3) 連携研究者

以上