

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390122

研究課題名(和文)放射光ビームラインにおける光位置モニタのパルス・モード計測

研究課題名(英文)Pulse-by-pulse x-ray beam position monitor for synchrotron radiation beamline

研究代表者

青柳 秀樹 (Aoyagi, Hideki)

公益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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：放射光施設の挿入光源ビームラインにおいて、ストリップライン型光電面を用いた検出素子の技術を応用した光ビーム位置のパルス・モード計測を実現するために、検出素子の高周波特性とともに、耐熱性を高めた光位置モニタを開発した。ダイヤモンド薄膜をヒートシンクに用いた独自の検出器を新しく考案し、試験機の設計・製作を行った。本試験機を偏向電磁石ビームラインの基幹チャンネル部に設置し、光位置モニタとしての総合的な動作試験を実施した結果、パルス長が目標値の半値全幅で1ns以下の単極性パルス信号として観測できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed a pulse-by-pulse X-ray beam position monitor for a synchrotron radiation beamline. In order to make it realized, it is necessary to enhance not only high frequency properties but also heat resistance. Therefore, we devised the original detector head equipped with a diamond film for a heat sink. We installed the prototype in a frontend of a bending magnet beamline and carried out performance tests. As a result, we found that a signal for this monitor has a unipolar pulse with the pulse length of less than 1 ns FWHM (full width at half maximum), which is our targeted value.

研究分野：放射光計測、真空工学

キーワード：量子ビーム測定手法 放射光 パルスモード計測 光位置モニタ マイクロストリップライン

1. 研究開始当初の背景

(1) 大型放射光施設 SPring-8 などの高輝度放射光を供用する施設では、研究対象とする反応を解明するために、極短時間に進展する現象を時分割計測で解析する手法が用いられている。これらの実験の精度や信頼性を高めるために、光源となる蓄積リングでの電子ビームの安定化は欠かせない。また、光の回折限界を目指した SPring-8 次期計画では、これまで以上にビーム安定性が求められることから、光源点における放射光ビームの“強度”、“位置”、“タイミング”を、パルス毎に正確に把握することが必要不可欠である。

(2) これまでにも実験エリア内であれば、アバランシェ・フォトダイオードなどの半導体検出器を用いた高速計測が放射光利用者によって実施されている。しかし、基本的にスリット、フィルター、モノクロメータ、ミラーなどの光学素子の下流での計測であるため、加速器の電子ビーム軌道の変位や不安定性を診断するためのモニタとしては活用することが出来ない。光源点における放射光ビームを診断するためには、光学素子の上流において大強度放射光を直接観測することが求められる。

(3) 現状の SPring-8 や他の多くの放射光施設では、金属面からの光電子放出を検出原理とするブレード形状の検出素子を光軸に平行に配置した光位置モニタがビームラインの最上流部に配置されている。しかし、従来の位置モニタは、徐冷の効率を高くするためブレード自体のサイズを大きくしており、素子の時定数を決定する浮遊電気容量が大きくなっていた。このためパルス毎の計測は不可能であった。この時定数を小さくするために素子のブレード形状を単に小型化するだけでは、大強度放射光による発熱の問題から大きな進展を期待することが出来ない。したがって、耐熱性を維持したまま特性インピーダンスを整合させることができる新しいアイデアが求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高い熱負荷に曝される放射光施設の挿入光源用ビームラインにおいて、今まで不可能であった大強度放射光パルスの“強度”、“位置”及び“タイミング”を計測することである。そのためには、放射光ビームの状態をパルス・モードで計測することが必要となるが、これを達成するために申請者らが世界に先駆けて提案し、原理を実証したストリップライン型光電面を用いた検出素子の技術を応用する。この技術をビーム診断系及びフィードバック制御系に取り入れることにより、パルス毎の放射光の安定化が促進され、時分割計測の更なる高精度化に寄与することが出来る。

3. 研究の方法

(1) 従来の標準的な光位置モニタは光電子放出型で、耐熱性を高める観点から検出素子として主にブレード型のタングステンが用いられている。しかしながら、これまでの光位置モニタは検出素子の物理的サイズから浮遊電気容量が大きく、時間分解能が制限され、放射光ビームのパルス毎の計測はできなかった。そこで、格段に放射光のパワーの強い挿入光源ビームラインで使用可能とするために、ダイヤモンドをヒートシンクに用いたパルス・モード計測型光位置モニタを新しく開発することとした。

(2) ダイヤモンド・ヒートシンクの表面にインピーダンス整合をとった電極を配線することは耐熱性の問題から非常に困難であるため、検出素子の受光部近傍については、インピーダンスの不整合を受け入れ、受光面の有効面積を十分確保しながら可能な限り浮遊電気容量を小さくし、時定数 ($\tau = RC$) の増大を抑える方針で設計した。

4. 研究成果

(1) 試作機の設計と製作

パルス・モード計測型光位置モニタの実現に向けて以下のような観点で設計を進めた。図1に示すように、ストリップライン構造の金属ラインに放射光ビームを直接照射させるのではなく、ダイヤモンド・ヒートシンク上に検出素子としての受光部を構成し、4枚の検出素子を光軸とほぼ平行に配置させることによって実効的な照射断面積を減らす耐熱構造とする。ダイヤモンド・ヒートシンクの素子ホルダーは ICF70 フランジに溶接した冷却ベースの上に取り付ける。それとは別に、ストリップライン構造を有した信号伝送路を ICF70 フランジに取り付け、左右両サイドのポートより導入する。冷却機構と信号伝送路を分けることによって、ストリップライン型ビーム位置モニタに比べれば高周波特性をある程度犠牲にすることになるが、冷却の効率は格段に向上することが見込まれる。

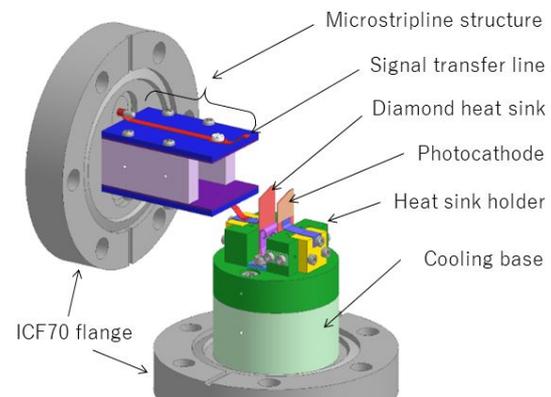


図1 冷却機構とマイクロストリップライン構造

図2に六方クロス型真空容器に上下方向から検出器ホルダー用フランジ2組と、左右方向から信号伝送路用フランジ2組を取り付けた様子を示す。

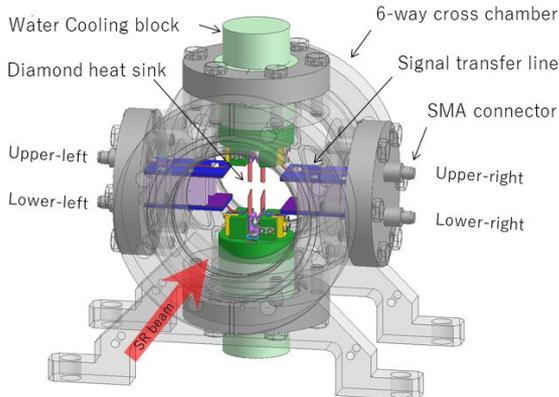


図2 六方クロス真空容器に取り付けた試作機

(2) 伝熱解析

本モニタの伝熱特性を評価するために、ダイヤモンド・ヒートシンク(20 mm×8 mm×0.3 mm)、素子ホルダー、冷却ベースについて有限要素法(ANSYS® Release17.0)による伝熱解析を実施した。図3に、解析に用いた1/4モデルと解析結果を示す。ダイヤモンドと銅の熱伝導率(TC)をそれぞれ 1,500、400 W/m·Kとし、ヒートシンクと銅製素子ホルダーの間の接触熱コンダクタンス(TCC)は 10,000 W/m²·Kを仮定した。また、入熱はヒートシンク先端の領域(1 mm×8 mm×0.3 mm)に10 W(標準型の挿入光源での通常使用で想定される最大値に相当)を分散させた。また、接触熱コンダクタンスの見積もりは困難を伴うことから、図4に示すように、接触熱コンダクタンスを変化させて各点の温度の値をプロットした。この結果から、接触熱コンダクタンス 10,000 W/m²·Kを大きく超える値を持たせてもそれほど有効でないことや、逆に、2,000 W/m²·K以下であれば温度上昇が100を超えてしまうことなどが分かる。

図5に検出素子に用いたヒートシンクの材質(熱伝導率)を変えた時の最大到達温度の変化を示す。熱伝導率が1,500 W/(m·K)を超えるダイヤモンドをヒートシンクに用いた場合、最大到達温度は許容範囲以下に抑えることができるが、銅やタングステンを用いた場合は、最大到達温度は許容値を超えてしまうことが分かる。

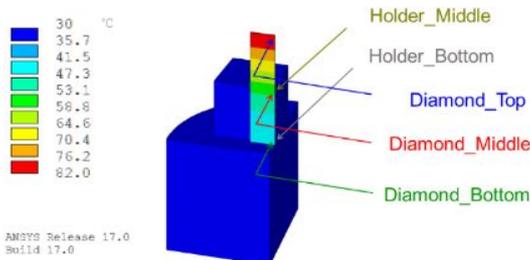


図3 1/4モデルと解析結果

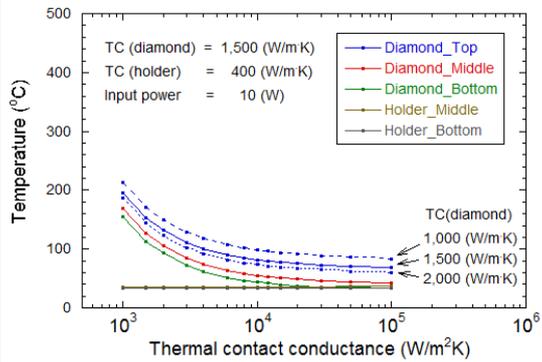


図4 到達温度の接触熱コンダクタンス依存性

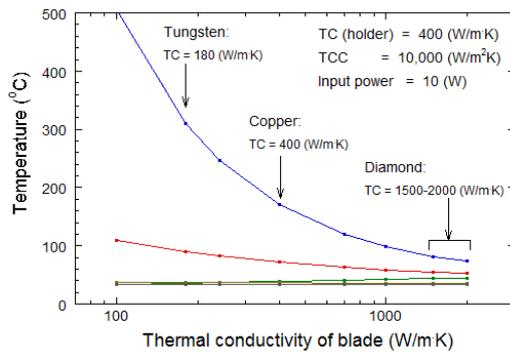


図5 材質の違いによる最大到達温度の変化

(2) 高周波特性の評価試験

本モニタの高周波特性を評価するために、単パルス入力によると時間領域反射率測定法(Time Domain Reflectometry, TDR)を用いた。この測定は真空容器内にプローブを入れる必要がないことから、時間領域透過率測定法(Time Domain Transmissiometry, TDT)に比べると検出器の保護の観点からも簡便な方法である。図6にTDR測定の設定アップを示す。入力信号は、出力信号の解釈の容易さから単極性の単パルス(FWHM:140 psec)とした。波形観測は、帯域4 GHz、20 GS/sのオシロスコープを用いた。

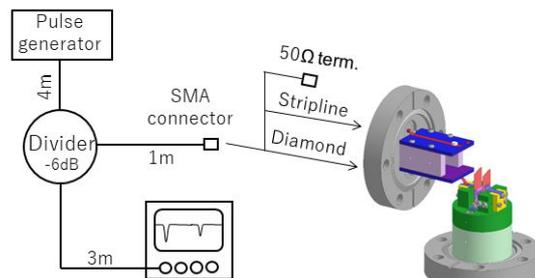


図6 TDR実験の設定アップ

図7に実験結果を示す。時刻 $t = 0$ ns のパルスは直接観測された入力パルスである。時刻 $t = 9 \sim 10$ ns の波形はモニタ内で反射した出力パルスである。被測定物の状態を変えて測定し、条件(1)から(5)の順に、実際に装着された検出素子の状態に近いものとなっている。ダイヤモンド・ヒートシンクを装着した条件(5)では、ダブルピークの反射波

が観測されているが、受光部近傍におけるインピーダンスの不整合に起因すると考えている。しかしながら、図8に示すように、電子ビーム用ハローモニタの TDR 測定(7)ではダブルピークが見られたが、実際に運用中の出力信号波形(8)は 0.4 ns FWHM の単極性パルスが発生していることから、図7(5)に見られるダブルピークは、本モニタの高周波特性を大きく損なうものでないと判断できる。

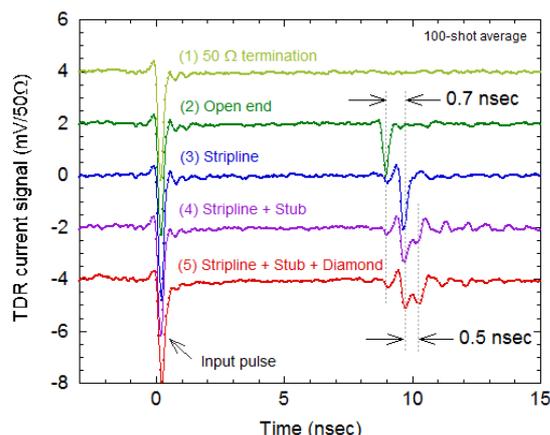


図7 TDR 測定の実験結果

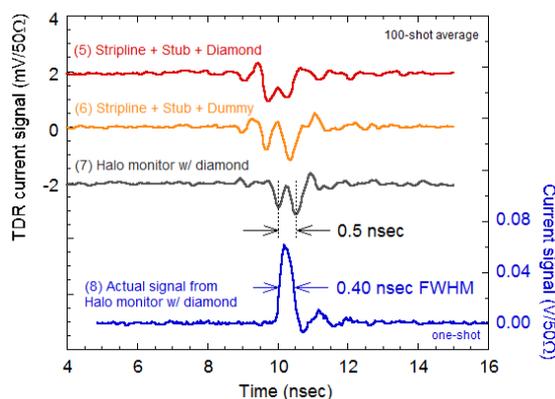


図8 TDR 測定と実際の波形との比較

(3) 試験機による総合動作試験

図9に示すように、パルス・モード型光位置モニタの試作機を設計・製作した。ダイヤモンド・ヒートシンク上にメタライズした検出素子は、銅製水冷ベースと一体化させた検出器ホルダーに取り付けた。マイクロストリップライン構造を有するパルス信号伝送ラインは、大気側と SMA コネクタを介して接続される。出力パルスの特性を変化させることのできる光電子収集電極は検出素子の近傍に配置し、大気側との接続は SHV コネクタとした。遮光マスクは余分な光を遮るためにモニタ本体の上流側に固定した

試作機を偏向電磁石ビームラインの基幹チャンネル部に設置し、光位置モニタとしての総合的な動作試験を実施した。その結果、図10に示すように、期待通りのパルス長(半値全幅で 1 ns 以下)の単極性パルス信号の観測に成功した。

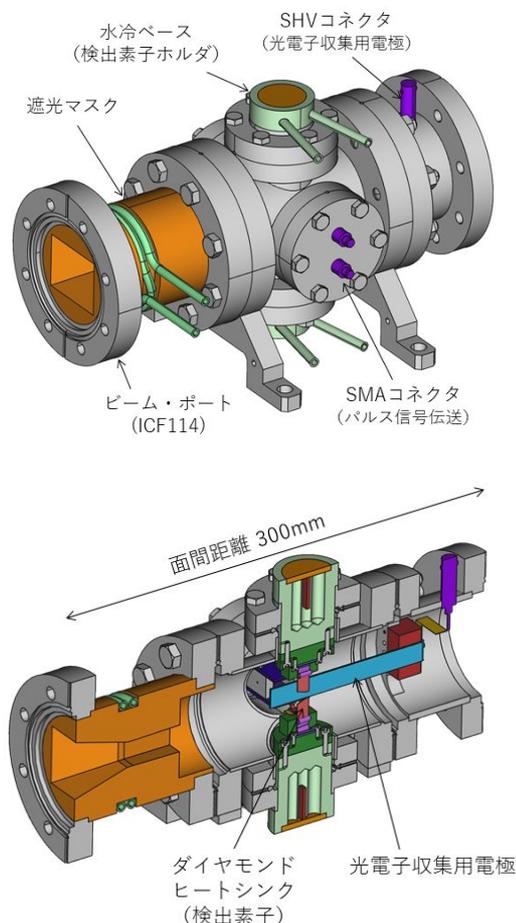


図9 モニタ本体の構造図(下は断面図)

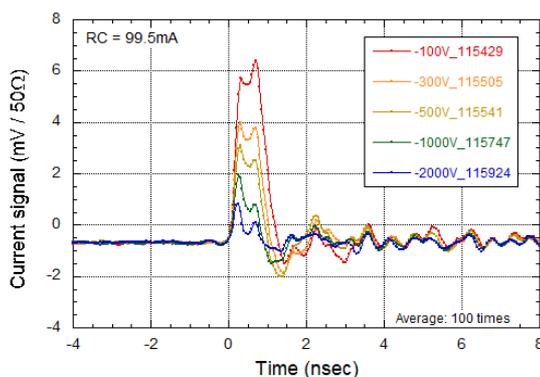


図10 単極性パルス信号の観測

また、次のような基本性能評価も実施した。放射光照射時の真空の変化に問題は見られなかった。温度上昇等による素子の損傷の影響は見られなかった。パルス信号の S/N 比については、目標値に達しておらず、改良の必要がある。放射光強度と出力信号との線形性は約 0.2% が得られ当初の予想以上に良好であった。位置感度特性は従来型の光位置モニタと同等であり、セベラルバンチ・モードの任意のパルスに対して位置の測定感度があることを確認した。パルスタイミングの計測が出来ることを確認した。長期的な安定性に問題なかった。

本研究において、新しいアイデアに基づいたパルス・モード計測型光位置モニタを製作し、基本的な機能を初めて実証することができた。これにより、放射光施設における電子ビームのパルス毎小野安定化が促進され、時分割計測等の更なる高度化に寄与することが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

青柳秀樹、渡辺篤雄、高橋直「パルス・モード計測型光位置モニタの耐熱特性の改善」、第30回日本放射光学会年会、2017年1月7日～9日、神戸芸術センター(神戸市)

Hideki Aoyagi, Sunao Takahashi, "Mechanical design of pulse-by-pulse x-ray beam position monitor using diamond heat sink", The 9th Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI2016)、2016年9月11～16日、バルセロナ(スペイン)

青柳秀樹、高橋直「ダイヤモンド・ヒートシンクを用いたパルス・モード計測型光位置モニタの設計と試作機の評価」、第13回日本加速器学会年会、2016年8月8～10日、幕張メッセ国際会議場(千葉市)

青柳秀樹、高橋直「ストリップライン構造を有する挿入光源ビームライン用光位置モニタの設計」、第12回日本加速器学会年会、2015年8月5～7日、プラザ萬象・あいあいプラザ(福井県敦賀市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青柳 秀樹 (AOYAGI, Hideki)
公益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

(3) 連携研究者

中村 剛 (NAKAMURA, Takeshi)
公益財団法人高輝度光科学研究センター・加速器部門・主幹研究員
研究者番号：90360841

小林 和生 (KOBAYASHI, Kazuo)
公益財団法人高輝度光科学研究センター・加速器部門・副主幹研究員
研究者番号：30649249

木村 滋 (KIMURA, Shigeru)
公益財団法人高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・副主席研究員
研究者番号：50360821

大沢 仁志 (OSAWA, Hitoshi)
公益財団法人高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・研究員
研究者番号：00443549