

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11943

研究課題名（和文）挿入光源ビームラインで用いる高分解能パルス・モード計測型光ビーム位置モニタの開発

研究課題名（英文）Development of high-resolution pulse-mode X-ray beam position monitor for an insertion device 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・光源基盤部門・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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：大型放射光施設Spring-8の挿入光源ビームラインにおいて大強度放射光ビームのパルス毎の位置計測を実現するために、ダイヤモンド・ヒートシンクを基板としたブレード型検出素子を改良することにより、高耐熱・高分解能化を試みた。偏向電磁石ビームラインで評価試験の結果、半値全幅0.9nsの良好な単極性のパルス波形を観測した。ショット毎の分解能を評価したところ10 μ m以下であった。また、耐熱性の観点からも良好であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射光施設において、放射光ビームのパルス毎の動態を把握することにより、時分割計測等の利用実験の更なる高度化に寄与すると期待される。しかしながら、大強度放射光ビームラインの放射光ビームのパルス毎の位置を計測することは出来なかった。この目的を達成するために、私たちが世界に先駆けて提案し、原理を実証したマイクロ・ストリップライン構造の光電面を用いたパルス・モード計測型検出素子の技術を発展させることで、実用化に近づいた。

研究成果の概要（英文）：To realize a pulse-by-pulse beam position measurement of high-intensity synchrotron radiation beam at the SPring-8 insertion device beamlines, we attempted to improve heat resistance and position resolution by improving a blade-type detection element using a diamond heatsink substrate. As a result of evaluation tests in a bending magnet beamline, we observed good unipolar pulse waveforms with the full width at half maximum of 0.9 ns. The shot-by-shot resolution was evaluated to be 10 μ m or less. It was also confirmed that the heat resistance performance is satisfactory.

研究分野：放射光科学、加速器科学

キーワード：光ビーム位置モニタ 放射光ビームライン パルスモード計測 マイクロストリップライン ダイヤモンドヒートシンク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

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、物質科学、材料工学、構造生物学、分析化学などの様々な分野で、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、近年、一層活発に進められている。時分割計測の精度や信頼性を高めるために、放射光ビーム位置のパルス毎の安定化を進めることは欠かせない状況となっている。(通常の放射光利用実験では放射光を連続ビームとして計測に用いており、日単位の長期的な変位から 200 Hz 程度以下の変動が実験に影響する。一方で、時分割計測では電子ビームの孤立バンチからの単一放射光パルスの個々を計測に用いるため、最大では加速空洞の周波数 508 MHz の変動の影響を受ける。) SPring-8 では、光源となる蓄積リングでの電子ビームの中長期の安定化のみならず、バンチ毎の安定化への取り組みが精力的に行われており、既に様々な利用実験の研究成果も報告されている。現在、光の回折限界を目指した SPring-8 次期計画が進んでおり、これまで以上にビームの安定性が求められるという点においても、電子ビームの孤立バンチの変動に起因する放射光ビームの“光軸の変動”をパルス毎に正確に計測する技術を開発することが強く求められている。

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ビームの“位置”を最大 508 MHz のパルス・モードで計測することにある。これまで世界のどの放射光施設においても、大強度放射光のパルス毎の計測を行うことが出来なかった。我々独自の技術であるマイクロ・ストリップライン構造を有する検出素子の開発研究を進展させることで、高い熱負荷に曝される挿入光源用ビームラインにおいても、放射光ビームの動態をパルス・モードで計測することが可能となると考えた。しかしながら大強度放射光の放射パワーを直接受光する検出素子は、たとえ熱伝導率の高いタングステンなどの金属を用いたとしても、耐えることができないことから、物質中熱伝導率が最大であり、低原子番号で X 線の吸収率が低く耐熱性の優れたダイヤモンドをヒートシンクに採用する可能性を模索することとした。

3. 研究の方法

申請者らは、高周波特性において理想的であるストリップライン型検出素子を提案(特許登録: 第 4822261)し、実証した。本検出素子の構造は、光電面(受光面)となるストリップ導体を、電氣的絶縁性を保ち熱伝導率の高い誘電体基板を介して、GND 基板(冷却ベース)に取り付けることを特徴とする。試験用検出素子を偏向電磁石ビームラインにおいて評価試験を行なった結果、出力信号のパルス長を 0.2 ns FWHM に抑えることに成功し、2 ns 間隔のパルスを実際に分離できることを確認した。しかしながら、放射光の強度が格段に強い挿入光源ビームラインでの使用においては、一層の耐熱性の向上が必要であると伝熱解析等の結果から判断した。

そこで開発の方向性を見直し、検出素子を薄板形状とし放射光にほぼ平行に配置させることにより熱負荷を低減させ、かつ、小型化して検出素子の時定数を決定する浮遊電気容量(時定数)を最小限に抑える方法により、目標を達成しようと考えた。実際に使用するモニタの高周波性能を満たすためには、モニタ真空容器内の信号伝送路のインピーダンス整合も同時に達成することが求められる。

最初に、信号伝送路のインピーダンス整合の技術について述べる。電子ビーム用ハローモニタを開発した時に採用したマイクロ・ストリップライン構造を有する信号伝送路の技術を取り入れる。検出素子のインピーダンスは整合していないが、検出素子をできるだけコンパクトに設計するなどして浮遊電気容量(時定数)を小さくすることで、パルス長 0.33 ns FWHM の出力波形を得ることが出来た。(電子ビーム・ハローモニタの開発研究: 科研費 基盤研究(C)(H21-23) 課題番号 21604017) なお、このハローモニタは、多結晶ダイヤモンドを半導体検出器として用いているが、微弱電子ビームのハローの計測を目的としていたので、耐熱性についての考慮はなされていない。

次に、検出素子の耐熱化と小型化の方法について述べる。ヒートシンクの母材を小型の薄板形状(膜厚 0.3mm)の多結晶ダイヤモンドとすることで耐熱性と徐熱効果を高めた。ダイヤモンドは熱伝導率が物質中最大で電氣的絶縁も得られることから、ダイヤモンド薄板の先端に受光面(光電面)となる電極(チタン蒸着)を配線させる構造を採用した。

これらの二つの基本技術を取り入れたパルス・モード計測型の検出器を設計・製作し、偏向電磁石ビームラインにおいて評価試験を行なった結果、パルス長が 0.8 ns FWHM の出力波形が得られることを確認した。本結果は、大強度放射光を直接受光することのできる挿入光源ビームライン用のパルス・モード計測型光位置モニタの実現が可能であることを示唆する。(パルス・モード計測の実証試験: 科研費 基盤研究(C)(H26-28) 課題番号 26390122)

しかしながら、光位置モニタとしての必要とされる位置分解能(10 μm 以下)を達成するためには、出力信号の電荷強度が不足していることが課題として残された。検討の結果、目標の位置分

解能を達成するためには、出力信号の電荷強度を現在得られている値の30倍以上に高めることが必要であることが分かった。そこで、本研究では、この課題を克服するために、新しく次のような技術・工夫を取り入れた。

小型化を最優先して設計した検出素子の受光面を、高周波特性を著しく低下させない範囲で可能な限り大きくし、及び、放射光が受光面に対して浅い角度で照射させる工夫をすることで、信号量の増大を図る。

検出素子の取り付け方法を改良し、素子ホルダーとの接触面の熱伝達率を向上させ、大強度放射光の熱負荷に耐えられる構造とすることで、信号量の増大を図る。

本研究において、上記の技術・工夫を取り入れることにより、ダイヤモンド・ヒートシンクを用いた高耐熱パルス・モード放射光位置モニタを設計・製作、及び、評価試験を行い、位置分解能 $10\mu\text{m}$ 以下で、パルス毎のビームの動態を計測できることを明らかにする。

4. 研究成果

(1) 検出素子の形状の改良

これまでの従来型光位置モニタの検出素子(タングステン・ブレード型)の形状は直線的に成形していた。しかし、一般的に刃に挟まれる角での温度は高くなることから、曲線的な成形を従来型の光位置モニタに対して試みた。図1に、改良前後の素子形状と配置の違いを示す。空間電荷効果を軽減するためには、ブレード検出素子と光電子収集電極との間に高い電界を生じさせる必要がある。従来の検出素子は光軸と平行に配置させていたので、実際の受光面はブレードの端部に集中していた。そのために実効的な電界は効率よく光電面に印加されていなかった。新しい設計では、光軸方向に対して $1/60$ の傾きで配置させる“ハの字型”とすることにより、ブレード側面の広い範囲が光電面となるように工夫した。これにより、ブレード型検出素子と光電子収集電極との間に印加される電界によって光電子を引き出す効果が向上、つまりは、空間電荷効果を軽減することができると期待できる。また、ブレードの成形に曲線を取り入れることにより、エッジ部による熱負荷の集中を緩和させている。図2に傾斜配置型光位置モニタに実装した様子を示す。挿入光源ビームラインにおいて、光電子収集電極の印加電圧に対する各ブレード型検出素子の電流信号の依存性を測定したところ、プラトー領域の下限値電圧が上昇し、フィリングの影響軽減に大きな効果があることを示した。また、耐熱性の観点からも問題の無いことを確認した。

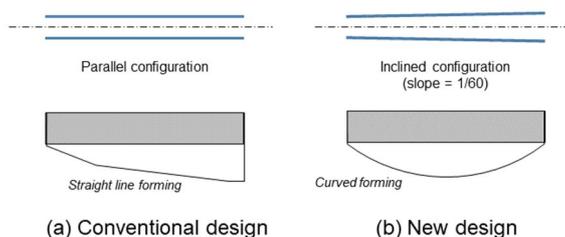


図1 ブレード型検出素子の概略図

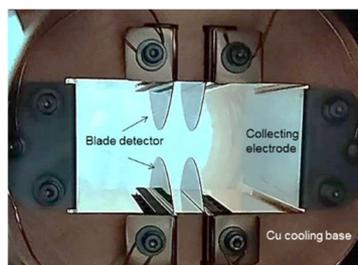


図2 検出素子の実装

(2) パルス・モード計測型光位置モニタの検出素子の改良

初号機のパルス・モード計測型光位置モニタの検出素子(基板:ダイヤモンドヒートシンク)の光軸方向の長さは 8mm としていたが、信号出力を増大させるために2倍の 16mm とした。また、受光部の形状は、円弧形状の下流部で光軸に最も近づき、接線が光軸に平行となるように設計した。検出素子の取り付けには、熱接触面積を増やすために2枚の検出素子の間にくさび型の銅ブロックがインジウム箔を挟んで挿入されている(図3)。検出素子とホルダーの接触面の熱伝達を高める最適方法を探るために検出素子ホルダーを試作し、様々な形状の部品で試行を繰り返した。その結果、素子を取り付けの際には板バネを用いて、くさび型金具を適度な圧力を光軸方向に加えているが、固定した後は板バネを取り外すこととした。検出素子は光軸に対して約 $1/20$ の傾きを持たせ、主にブレードの片方の側面に照射される。これにより、光電子収集電極とブレード側面にチタンが蒸着された光電面との間に印加される電界が一様と

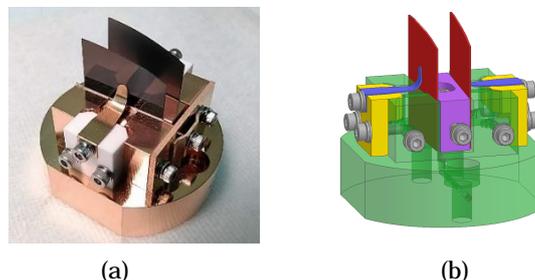


図3 ダイヤンドヒートシンクを基板とした検出素子の形状と取り付け方法

なる効果生まれ、光電子放出を効率良く制御することが可能となる。検出素子で発生した単極性パルス信号を取り出すために、真空容器内の信号伝送路にストリップライン構造を採用し、パルス信号の減衰や反射が起きないようにする必要はあるが、この部分は初号機で開発した信号伝送路を用いた。検出素子ホルダー、及び、ICF70 フランジに装着した冷却ベースについては、新規に製作した。

(3) 基本動作の確認

偏向電磁石ビームラインにおいて評価試験を実施した。本モニタによって観測されたパルス波形を図4に示す。図4(a)は、光電子収集電極にマイナス電圧（光電子の放出を抑制）を印加したもので、パルス長は0.9 ns FWHMであった。また、図4(b)は、プラスに印加（光電子の放出を促進）したもので、電圧を高くすることで出力電荷が増大した。これらの結果は、初号機の検出素子と比べると、パルス長は同等であり、出力電荷は2倍程度である。

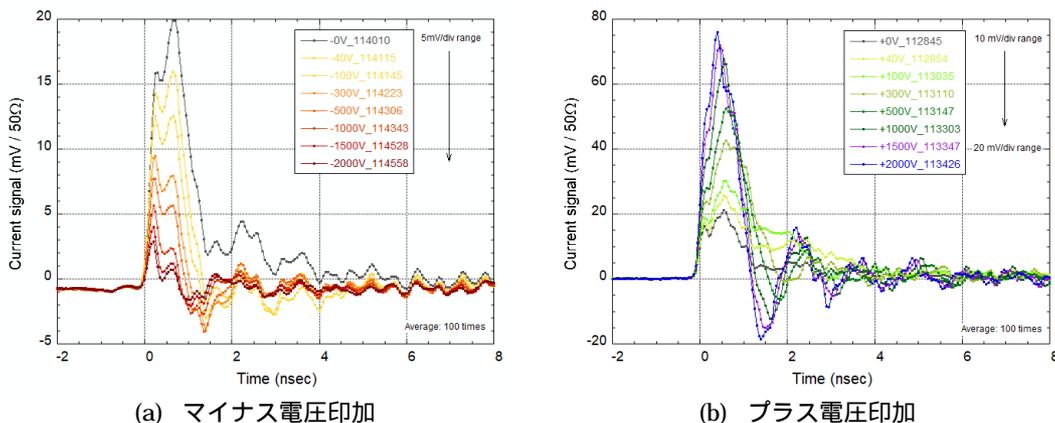


図4 パルス波形の収集電極電圧依存

パルスの生信号をアナログ的な差分回路を構成して、位置敏感型のパルス信号の生成が可能であることを確かめた。UR(Upper-Right)信号を分配器で二つに分けて、ひとつはオシロスコープ側につなぎ、もう一つをスタブ・ケーブルの先端の閉口端で位相を反転させる。LR(Lower-Right)信号は、スタブ・ケーブルの先端を開口端とすることで同位相のままとする。反転したUR信号と同位相のLR信号の合成によって差分信号が生成される。

図5に実験結果を示す (a): 信号増幅器 (25 倍) 及びローパスフィルタ未使用、(b): 両方使用)。先行するパルスは、UR 信号と LR 信号のそれぞれが最短経路で合成された “和” 信号である。8.6 ns、及び、26 ns 後のパルスは、それぞれのスタブ・ケーブル (a) 1 m、及び、(b) 3 m) の先端で反射された後に合成された “差” 信号である。モニタ本体を鉛直方向に 0.1 mm ステップで走査した時の位置の変化に対して、“和” 信号のパルスの電荷は一定であるが、“差” 信号のパルス波高は敏感に反応しており、ビーム位置に対して有感であることが分かる。

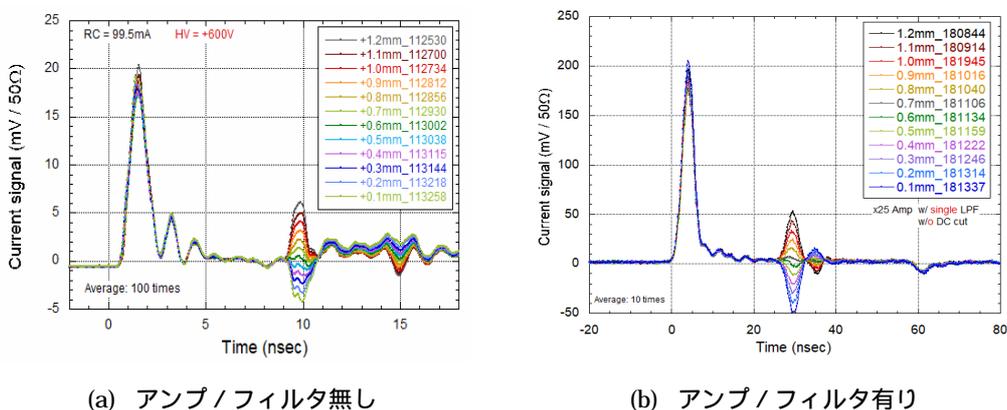


図5 アナログ差分回路による位置情報の出力

(4) 分解能の評価

本モニタで得られるショット毎の分解能の評価するために、高速アンプ (増幅率: 25 倍) を用いた。更に、パルス波形を整えるためにローパスフィルタ (遮断周波数: 117 MHz + 300 MHz) を使用した。図6で示すように、高速アンプだけ使用の時はリングングが発生するが、ローパス

フィルタを用いることによって、単極性の波形となる。また、適切なローパスフィルタの使用は、ノイズフロアの改善に効果があることも分かる。UR 信号と LR 信号をデジタル・オシロスコープで連続的に観測し、差分を計測した。図 7 に、UR 信号と LR 信号の波形とその差分を表示したオシロスコープの画像を示す。パルスのピーク位置から ± 5 ns の領域を積分し、差分の変動量を測定したところ、パルスの積分値に対して 0.72 % RMS であった。モニタの検出素子の配置で決まる補正係数 1.04 を考慮するとビーム位置の変動量として $7.5 \mu\text{m}$ RMS に相当する。しかしながら、パルスのピーク位置から ± 5 ns の領域以外においても、同等の差分の変動量が観測されたことから、現在到達し得る分解能としては、 $7.5 \mu\text{m}$ RMS と評価することが出来る。

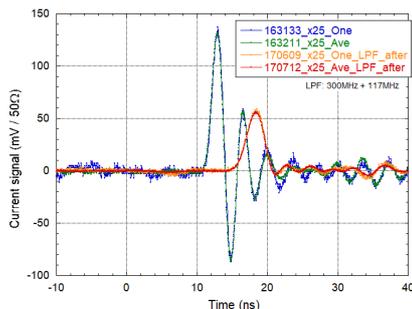


図 6 高速アンプとローパスフィルタを使用した時の波形の変化

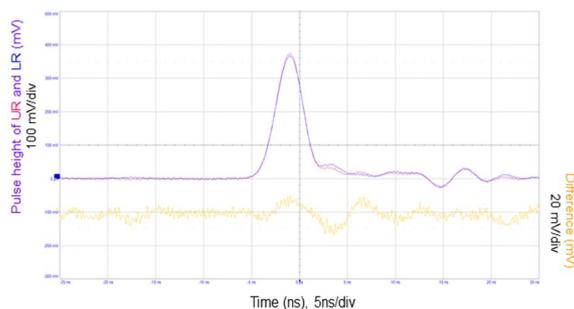


図 7 UR 信号と LR 信号の波形とデジタル差分

(5) まとめと今後の展望

パルス・モード計測型光位置モニタに用いるダイヤモンド・ヒートシンクを基板とした検出素子において、信号量増大のために光軸方向の長さを 2 倍とし、耐熱性の向上のために曲線的な成形を取り入れた。また、検出素子とホルダーの接触面の熱伝達を高めるための工夫を施した。

偏向電磁石ビームラインにおいて評価試験を実施した。初号機の検出素子と比べると、パルス長は同等であり、出力電荷は 2 倍程度と増大したことを確認した。スタブ・ケーブルの開口端と閉口端からの反射パルスを合成することにより、直読可能な位置敏感型のパルス信号が生成されることを確認した。分解能の評価において、高速アンプとローパスフィルタを使用して UR 信号と LR 信号の差分の変動量を測定したところ、フロアノイズと同程度であることを確認した。本モニタの現在到達し得るショット毎の分解能は $7.5 \mu\text{m}$ RMS 程度と推定できる。

今後の展望として、出力信号が増大する挿入光源ビームラインに本モニタを移設して、分解能が向上することや耐熱性に問題の無いことを確かめる計画である。分解能の向上のためには、検出素子にダイヤモンド半導体を使用することも効果があると期待できる。また、系統的な分解能評価試験や実際の運用のためには、高速 ADC を備えたデータ収集システムの導入が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Aoyagi Hideki, Furukawa Yukito, Takahashi Sunao, Watanabe Atsuo	4. 巻 24
2. 論文標題 Pulse-mode x-ray beam position monitor prototype for a synchrotron radiation beam line	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Accelerators and Beams	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.032803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hideki Aoyagi, Yukito Furukawa, Sunao Takahashi
2. 発表標題 Inclined X-ray Beam Position Monitors to Reduce Influence of Filling Pattern for the SPring-8 Photon Beamlines
3. 学会等名 9th International Beam Instrumentation Conference（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青柳 秀樹、古川 行人、高橋 直
2. 発表標題 SPring-8における新設計の傾斜配置型光位置モニタと蓄積リングのフィリング・パターンによる影響削減
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideki Aoyagi, Yukito Furukawa, Sunao Takahashi
2. 発表標題 Evaluation and Reduction of Influence of Filling Pattern on X-Ray Beam Position Monitors for SPring-8
3. 学会等名 10th International Particle Accelerator Conference（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青柳 秀樹、高橋 直
2. 発表標題 X-ray beam position monitor to mitigate influence of filling pattern at SPring-8
3. 学会等名 第16回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Aoyagi, Yukito Furukawa, Atsuo Watanabe, Sunao Takahashi
2. 発表標題 Demonstration of a Newly Developed Pulse-by-pulse X-Ray Beam Position Monitor in SPring-8
3. 学会等名 7th International Beam Instrumentation Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青柳 秀樹、古川 行人、高橋 直
2. 発表標題 SPring-8蓄積リングにおける光位置モニタの性能と光軸変動の観測
3. 学会等名 第15回日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------