

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：84502  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21K12530  
研究課題名(和文) ダイヤモンド検出素子を用いた放射光ビームのパルス・モード計測と伝送線路の耐熱化

研究課題名(英文) Pulse mode measurement of synchrotron radiation beam using diamond detection elements and heat resistance of transmission lines

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・ビームライン技術推進室・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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：大型放射光施設Spring-8の放射光ビームラインにおいて、パルス毎にビーム位置を正確に計測することが求められていた。しかし、パルスモード計測型光位置モニタの試作機では、十分な位置分解能が得られなかった。そこで、検出素子の形状に新しいアイデアを取り入れて、挿入光源ビームラインにての評価試験を実施した結果、目標の10ミクロン以下を達成した。また、大強度の放射光により生じる放出光電子の空間電荷効果の影響の問題が回避されていることを実証した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

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、極短時間に進展する現象を時分割計測で解析する手法を用いた利用実験が活発に実施されている。しかし、高熱負荷・超高真空・非破壊の条件下で、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ことは困難であった。本研究により、パルスモード計測型X線ビーム位置モニタを安定して動作させることが可能となった。

研究成果の概要(英文)：In the synchrotron radiation beamlines at Spring-8, it is necessary to accurately measure photon beam position pulse by pulse. However, the prototype of pulse-mode X-ray beam position monitor did not provide sufficient position resolution. Therefore, we introduced new idea in the shape of the detection elements and conducted evaluation tests at an insertion device beamline, and as a result, we achieved the target of 10 microns or less. It was also demonstrated that the problem of the space-charge effect of emitted photoelectrons caused by high-intensity synchrotron radiation was avoided. This study has enabled stable operation of a pulse-mode X-ray beam position monitor.

研究分野：放射光計測技術

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

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 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、極短時間に進展する現象を時分割計測で解析する手法を用いた利用実験が活発に実施されている。そのプローブである放射光ビームの“光軸の変動”をパルス毎に正確に計測することが求められていた。しかしながら、その計測は、検出素子自体が高熱負荷・超高真空・ビーム非破壊の条件下におかれていることから、これまで実現されることはなかった。

研究者代表者らは独自のアイデアに基づき、耐熱性に優れ、特に高周波特性が理想的であるストリップライン型光電素子を提案し、マイクロ・ストリップライン型光電面を用いた光電素子を開発した。この素子を SPring-8 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 (508 MHz) のパルスを実際に分離できることを確認した。この結果は、パルス毎の位置計測の可能性を示唆するものであった。しかし、伝熱解析等の結果等から、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判断した。

この技術を発展させて、耐熱特性の優れたダイヤモンド薄板をヒートシンクと用いて、かつ、放射光の光軸に対して平行に配置することで熱負荷を低減させる方法を試みた[1]。先端部の受光面(光電面)となる電極(Ti スパッタ成膜)は、可能な限り電極を小型化して光電素子の時定数を決定する浮遊電気容量を最小限に抑える設計とした。しかしながら、目標とする位置分解能(10  $\mu\text{m}$  以下)を確実に達成するには十分とは言えない状況であった。位置分解能を向上させるためには、光電子放出を利用した検出素子を検討し直す必要があると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、放射光ビームのパルス毎の位置検出の分解能を実用レベルに高めることである。それを達成させるためには検出素子の出力信号の強度を高めることが必要であった。当初の計画では、ダイヤモンド半導体検出素子の電極をマイクロ・ストリップラインに成型した受光素子を新しく開発し、かつ、発生した単パルス信号を歪ませることなく超高真空容器の外に送信するパルス信号伝送路の耐熱化を目指すこととした。更には、この研究によって、ダイヤモンド半導体が硬X線に対して高効率に応答する特性を活かしたパルスモード計測技術の新たな展開が期待できると考えた。

### 3. 研究の方法

検出素子の出力信号の強度を高めることを目的に、光電子放出を原理とする検出素子の形状を改良した。パルスモード計測型光位置モニタは従来型のモニタと同じく、4枚のブレード形状の検出素子を光軸近傍の上下左右に配置させ、各検出素子の信号比を位置情報として読み出すものである。検出素子の光軸方向のサイズを前述の試作機に比べて2倍の16 mmとすることで、実効的な受光面積を増大させた。また、検出素子を光軸に対して約1/20の傾きを持たせた配置とすることで、放射光はブレードの片方の側面に照射される(図1)。これにより、放射光の受光面積が実効的に広がるとともに、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った。また、徐熱性能を高めるために、ヒートシンクはくさび型金具を用いて冷却ベースに内側から押し付けて固定する構造に改良した。

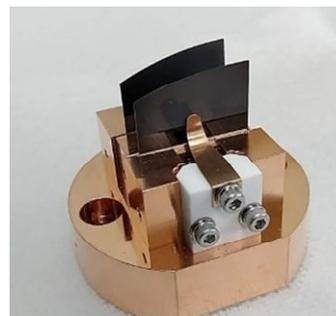


図1 検出素子冷却ベースの写真

### 4. 研究成果

#### (1) 偏向電磁石ビームラインにおける評価試験[2]

検出素子の形状を新しく改良したパルスモード計測型光位置モニタ (Pulse-mode X-ray beam position monitor, PM-XBPM) を偏向電磁石ビームラインに設置した(図2、図3)。出力信号の応答を評価するために、蓄積リングの電子ビームシェーカを用いて垂直方向のベータatron振動を励起し、電子ビーム位置モニタの値と比較する試験を実施した。蓄積リングのフィリングパターンは単一のシングルバンチ(孤立バンチ)とし、バンチ電流値は実際のユーザー運転で用いられるレベルの2mAとした。孤立バンチには、ビームシェーカにより垂直方向に摂動を与えた。その結果、蓄積リング Single-pass Beam Position Monitor (SP-BPM) によるターン毎の測定値と本モニタによって観測されたターン毎の変動を比較したところ、良い相関関係が得られた。しかし、パルス毎の分解能を評価した結果、9 $\mu\text{m}$  stdであった。十分な結果を得られるには至らなかった要因は、偏向電磁石ビームラインでは出力信号の強度が十分に得られなかったからだと考えた。そこで、本モニタを放射光の強度が格段に強い挿入光源ビームラインに移設しての評価試験を実施した。

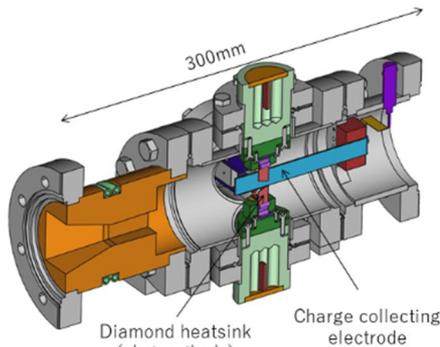


図2 モニタ本体の内部構造

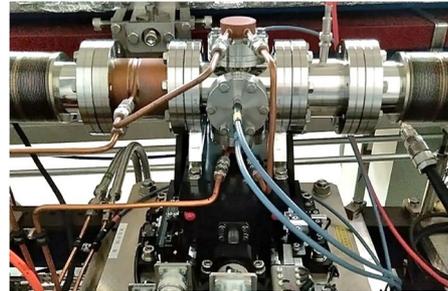


図3 偏向電磁石ビームラインに設置

(2) 挿入光源ビームラインにおける評価試験[3,4]

位置感度の評価

蓄積リングのビームシェーカを用いて水平/垂直方向にベータatron振動を励起することにより、挿入光源ビームラインに設置された PM-XBPM の位置感度の評価試験を実施した(図4)。

図5に PM-XBPM と SP-BPM で測定された値の相関を示す。PM-XBPM で測定された振幅を縦軸、SP-BPM で観測される摂動振幅から PM-XBPM の位置で推定される振幅を横軸にプロットしたグラフを示す。垂直方向(a)、水平方向(b)ともに良い線形性を確認した。但し、SP-BPM から推定される摂動振幅に対して、水平方向で1%低く、垂直方向で7%大きな値であった。不一致が生じた原因は、本測定で用いた PM-XBPM の補正係数は暫定的な値を用いていたことや、SP-BPM で測定した電子ビームの振幅に変換する係数を算出する際の統計誤差が影響していると思われる。

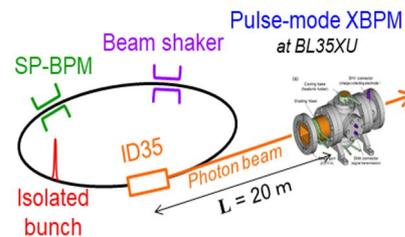


図4 位置感度測定の設定アップの概略

分解能の評価

帯域 4GHz のオシロスコープを用いて分解能を評価したところ、水平  $4.5\mu\text{m}$  std / 垂直  $4.5\mu\text{m}$  std の値が得られた。オシロスコープ内蔵の機能を利用して帯域をデジタル的に 200MHz に設定した場合、分解能は水平  $1.7\mu\text{m}$  std / 垂直  $1.2\mu\text{m}$  std まで高められることが分かった。ローパスフィルターを用いると観測されるパルス長が伸びてしまうが、バンチ間隔が広い場合には、高速 ADC でパルス波高を読み出す際には有効な手段である。

Top-up 入射時のビーム振動

ユーザー運転中に2種類のフィリングパターンでパルス毎のビーム振動を観測した。“203 bunches mode (バンチ電流値 0.5mA、バンチ間隔 23.6 ns)”においては、蓄積される全パルスを個別に観測した。図6(a-c)に水平方向のビーム振動、図6(d-f)に垂直方向のビーム振動を示す。バンチ間隔 23.6 ns のパルスが個別に、かつ、振動が収斂するまでをつぶさに観測できている様子が分かる。また、“11/29-bunches + 1 bunch mode (5 mA 孤立バンチ)”においては、入射パルスが入射後約 500  $\mu\text{s}$  に亘り振動が継続することを観測した。なお、この入射時のビーム振動は、いずれのフィリングパターンにおいても数 100  $\mu\text{s}$  後には十分に減衰しており、ユーザー運転に影響を与えていないとされている。

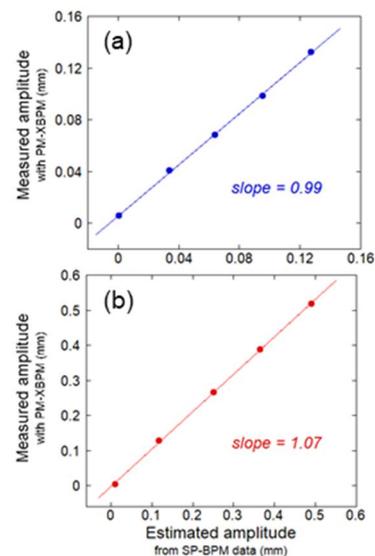


図5 PM-XBPM と SP-BPM の相関。(a) 水平方向、(b) 垂直方向。

(3) 空間電荷効果の影響の評価

本モニタが動作原理とする光電子放出型は、バンチ電流値が高いと単一の放射光パルスによって放出された光電子が自身の電界で反発力を受けて、電流信号が不安定になる現象が引き起こされる。これを回避するために、従来の直流モード型と同様に、4枚の検出素子を傾斜配置とすることで、放出される光電子に対する空間電荷効果の影響を低減する構造を取り入れている。パルス毎の位置分解能を向上させるためには放射光パルスからの電流信号を大きくすることが有利であることから、この空間電荷効果の影響の問題を解決することを避けては通れない。

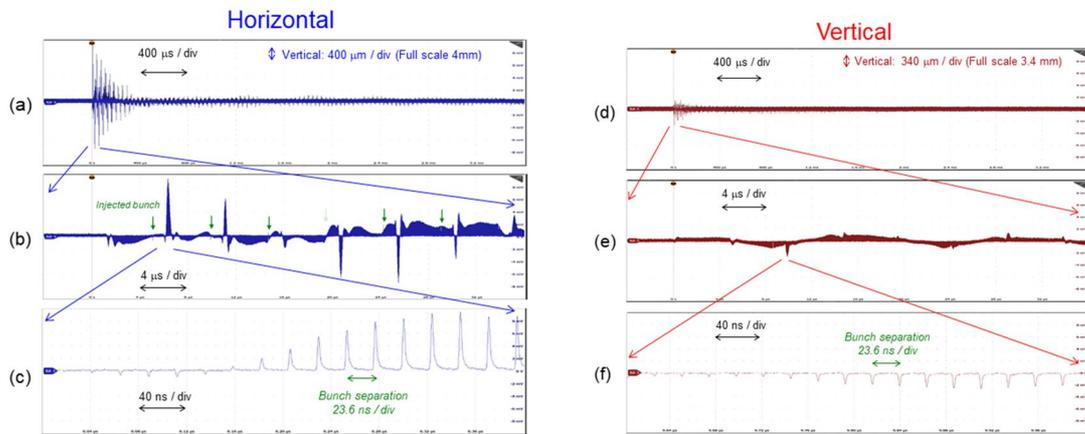


図6 ビーム入射時のビーム振動の観測。オシロスコープ(Tek MS064B)の画像。

空間電荷効果の影響を見積るために独自に考案した、光電子収集電極に印加するバイアス電圧に対する電流信号の応答を評価する方法を実施した。その結果、図7に示すように、空間電荷効果が最も大きく現れる蓄積リングのフィリングパターン(“2/29-filling + 26 bunches”)かつ、挿入光源が最大出力を発生する最小ギャップ値(ID gap = 9.6mm)において、通常の運用よりも十分に低いバイアス電圧(+100V)の印加で出力信号の安定領域が確保できることを確認した。PM-XBPMの空間電荷効果の影響を低減させる性能は、従来の直流モード型よりも上回っている。これは、高周波特性を向上させるために検出素子を小型化したことで、検出素子受光面の電界が効率よく増大されているからと考えられる。

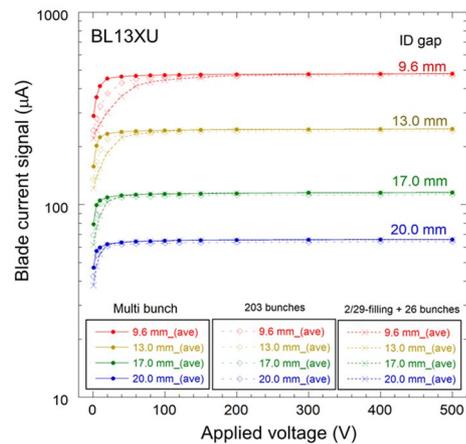


図7 バイアス電圧に対する電流信号の応答。(通常の運用では、バイアス電圧は+500Vに設定)

これまでに、良好な位置感度(線形性)とマイクロオーダーの分解能に加え、空間電荷効果の影響の問題が回避できていることを確かめた。また、これらの評価実験を通じて高熱負荷に対する耐久性も確認することが出来た。本研究によりPM-XBPMの実用機としての信頼性が総合的に評価できたと考えている。今後は、蓄積リングのビーム診断だけでなく、放射光ビームラインの時分割計測の高度化のために応用されることが期待される。

<引用文献>

- [1] H. Aoyagi et al., “Pulse-mode x-ray beam position monitor prototype for a synchrotron radiation beam line”, Phys. Rev. Accel. Beams 24, 032803 (2021).
- [2] H. Aoyagi et al., “Toward higher resolution in pulse-mode x-ray beam position monitor”, Proc. of PASJ2021, THP026.
- [3] H. Aoyagi et al., “Pulse-by-pulse photon beam position measurements at the SPring-8 undulator beamline”, Proc. of IBIC2022, M03C3.
- [4] H. Aoyagi et al., “Evaluation of a pulse-mode x-ray beam position monitor for a synchrotron radiation beamline”, Proc. of PASJ2022, FROB07.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H. Aoyagi, H. Osawa, K. Kobayashi, T. Fujita, S. Takahashi
2. 発表標題 Pulse-by-pulse photon beam position measurements at the SPring-8 undulator beamline
3. 学会等名 The 11th International Beam Instrumentation Conference 2022 (IBIC 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青柳秀樹, 大沢仁志, 小林和生, 藤田貴弘, 高橋直
2. 発表標題 放射光ビームラインにおけるパルス・モード計測型光位置モニタの評価
3. 学会等名 第19回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青柳秀樹, 大沢仁志, 藤田貴弘, 高橋直
2. 発表標題 パルス・モード計測型光位置モニタの高分解能化に向けて
3. 学会等名 第18回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青柳秀樹, 高橋直
2. 発表標題 SPring-8における光位置モニタのフィリング・パターン変更による影響評価
3. 学会等名 第20回 日本加速器学会年会
4. 発表年 2023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
---------	---------