

## パルス・モード計測型光位置モニタの実証試験

### DEMONSTRATION OF PULSE-MODE X-RAY BEAM POSITION MONITOR

青柳秀樹#, 古川行人, 渡辺篤雄, 高橋 直

Hideki Aoyagi #, Yukito Furukawa, Atsuo Watanabe, Sunao Takahashi

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

#### Abstract

Aiming at measuring a pulse-by-pulse photon beam position at the SPring-8 insertion device beamline, we have been developing a pulse-mode X-ray beam position monitor (XBPM), which is photoemission type. A photocathode is titanium electrode that is sputtered on a diamond heat sink to achieve high heat resistance. This monitor is equipped with microstripline structure for signal transmission line. We have designed and manufactured the prototype, and demonstrated feasibility at the SPring-8 bending magnet beamline. As a result, we observed a unipolar single pulse with the pulse length of less than 1 ns FWHM and confirmed that it has pulse-by-pulses position sensitivity. This monitor can be used as DC mode XBPM with good stability and good resolution.

#### 1. はじめに

放射光施設の挿入光源ビームラインにおいて、パルス毎に計測することを目指したパルス・モード計測型光位置モニタの開発を進めている。幅広く利用されている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[1]。しかし、検出素子の浮遊電気容量やインピーダンス不整合の問題から、信号出力の時定数の増大と反射によるリングングの発生が問題となり、パルス毎のビーム位置を計測することは不可能であった。そこで我々は、SPring-8 独自のアイデアに基づくストリップライン型光電面を用いた光位置モニタ[2,3,4]の技術を取り入れることにより問題の解決を試みた。光電面の耐熱性を高めるために多結晶ダイヤモンドをヒートシンクに採用し、検出素子の受光部を小型化することで浮遊電気容量を低減させる構造とした[5]。また、モニタの真空容器内にマイクロストリップライン構造の信号伝送路を備えることにより、生成した単パルス信号の減衰や反射を防ぐ機能を付加した。

#### 2. 試作機の設計と製作

パルス・モード計測型光位置モニタは従来のモニタと同じく光電子放出型で、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、各ブレードの信号比を位置情報として読み出すタイプである。本モニタでは、ヒートシンクの母材を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、ブレードを小型化している。従来のモニタでは、ブレードを光軸に平行に取り付けていたので、放射光が照射されるブレードの端面からの光電子放出が支配的であった。本モニタでは、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ように設計した。それにより、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なる効果が生まれ、光電子放出を効率良く制御することが可能となった。

耐熱性を持たせなければならない検出部については伝熱解析を実施し、ヒートシンクと冷却ホルダの間の接触熱コンダクタンスを  $10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  以上とする必要があることが分かった [6,7]。そこで、ヒートシンクと冷却ホルダの間には  $50 \mu\text{m}$  厚程度のインジウム箔を挿入することにより、接触熱コンダクタンスの向上を図った。Figure 1 にヒートシンク及び冷却ホルダの写真を示す。

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した。高周波特性試験については、事前に検出部の試作機を用いて単パルス入力による時間領域反射率測定を行い、サブナノ秒の単極性パルス信号が得られることを実測により確認した[6,7]。Figure 2 にストリップライン構造を持つ信号伝送路[8]の写真を示す。

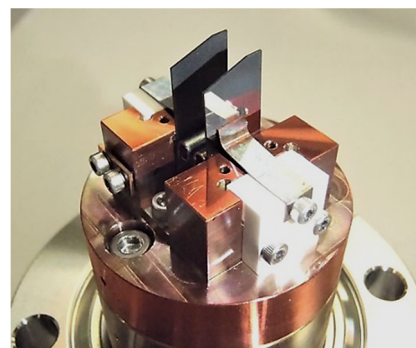


Figure 1: Photograph of diamond heatsinks and a water cooling base. The size of the heatsinks is  $20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ . The heatsinks are mounted on the cooling base.

#aoyagi@spring8.or.jp

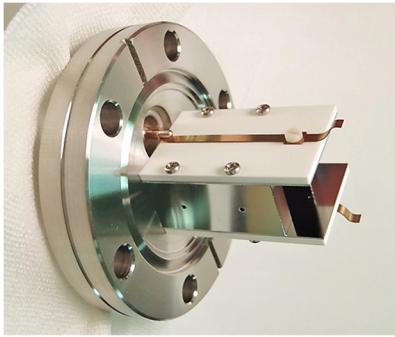


Figure 2: Photograph of a signal transmission line with microstripline structure, which is mounted on an ICF70 flange.

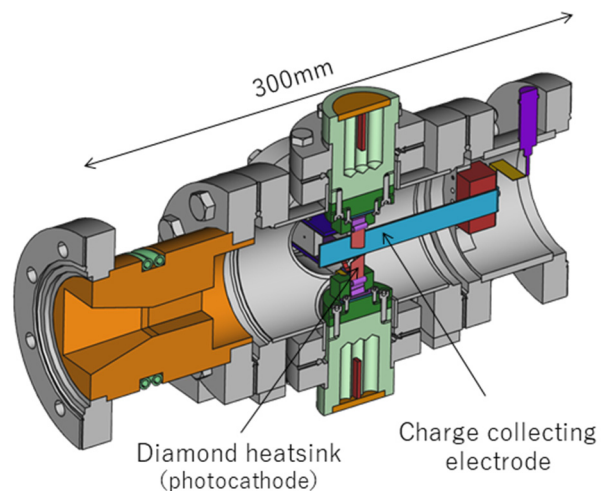
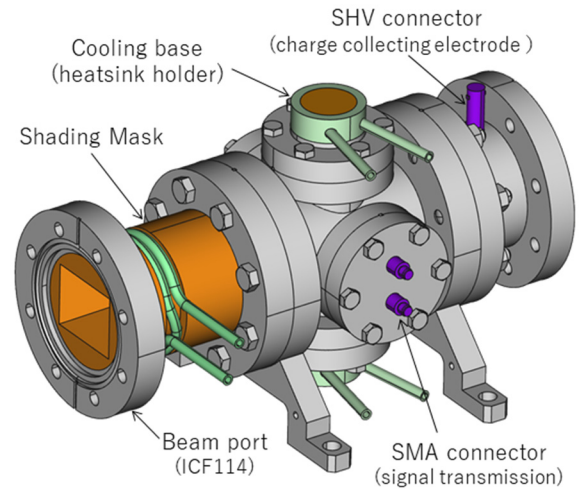


Figure 4: Structure of a monitor chamber.

Figure 3 に、ヒートシンク及び冷却ホルダ (Fig. 1) とストリップライン構造を持つ信号伝送路 (Fig. 2) を組み合わせた図を示す。また、本モニタ全体の構造を Figure 4 に示す。遮光マスクは、放射光がホルダ部に照射されるのを防ぐために六方クロス真空容器の直上流に固定した。挿入光源の上下流の偏向電磁石からの放射光が左右に広がって照射されるので、それを遮ることが主な目的である。光電子収集電極(阻止電極)を検出素子の左右両側に配置させることにより検出素子から真空中に放出される光電子を収集、若しくは、抑制する。従来型のモニタと同じ DC モードでの計測時は、+100 V 程度の電圧を印加し光電子を収集することで出力信号が安定しモニタとしての精度が向上する。パルス・モード計測を行う時は、パルス波形を崩すエネルギーの低い光電子の放出を抑制するためにマイナスの電圧を印加して、パルス波形を最適化させる。

本モニタを SPring-8 偏向電磁石ビームライン BL02B1 フロントエンドに設置し、総合的な動作試験を実施した。4 つの信号線のうち、UL(upper-left)の信号ケーブルは、波形観測のために減衰の小さい SUCOFEED 1/2" を敷設した。残りの 3 つの信号線は、DC モードでの測定が主体となるので、S\_04272\_B を敷設した。

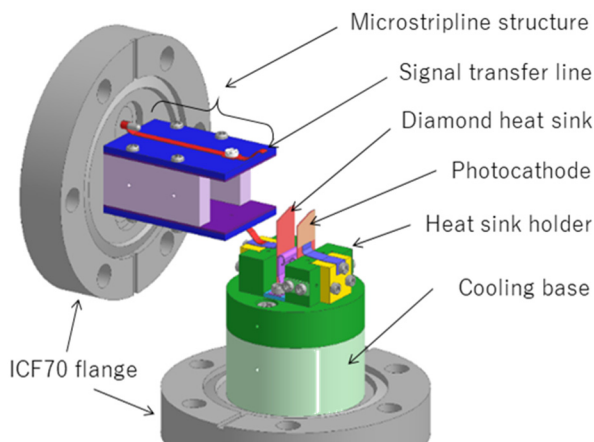


Figure 3: Combination of a detector head and microstripline structure.

### 3. パルス・モード計測における性能評価

#### 3.1 波形の観測

Figure 5 に、本モニタの代表的な出力信号の波形を示す。蓄積リングのフィリング・パターンは“1/7 filling + 5 bunches”で、孤立バンチの部分を観測した。波形観測用のオシロスコープは、4 GHz B.W.、20 GS/s、100 回平均の条件でデータを収集した。半値幅 (FWHM) 0.8 ns の波形が得られた。Figure 6 に示すように、光電子収集電極の電圧を変化させてパルス波形を観測した。パルス波形 (波高、長さ) は電圧の極性や高さに大きく依存する。マイナスの電圧を印加することで光電子の放出を抑制することができることから、パルス幅が小さくなることが分かる。しかしながら、マイナス電圧を高くするにつれてパルス波形の尖頭部のダブルピークが顕著になっている。この原因は、真空容器内での高周波成分の共鳴では説明できない。共鳴なら時間をかけて減衰するはずだからである。同じ理由で、ブレード先端とマイクロストリップライン

構造の終端との間の反射でもないと考えられる。そこで、以下のように考えるとダブルピークが理解できる。第 1 ピークは、放出光電子の中で収集電極の電圧にほとんど影響されないほど高いエネルギーを持つ光電子が収集電極に到達することにより得られる。また、第 2 ピークは、エネルギーの低い光電子が、収集電極の電圧により減速されながらも少し遅れて収集電極に到達していることにより得られる。

Figure 7 に、本モニタを従来のモニタと同じ DC モードで使用し、光電子収集電極の電圧に対する電流信号の変化を測定した結果を示す。各ブレードの信号出力は、収集電極の電圧を変化することにより大きく変化していることが分かる。収集電極の電圧が 0 V 付近で傾きが大きく、マイナス側での阻止効果が大きい理由は、本モニタのブレードは光軸に対し平行から少し傾きを持たせ、ブレード外側の片面にしか放射光を照射していないことにより、収集電極がブレード外側と接近した配置をしており、実効的な電界が高くなるからである。これにより数 10 V 程度の遅い電子の放出を抑制し、パルス長が増大するのを抑制することができる。収集電極の電圧が +40 V 以上では、出力電流値が一定値を保っている。Figure 6 に見られる、パルス波高がより高くなりつつもテールが短くなり、積分電流値が一定になっている現象と矛盾しない。

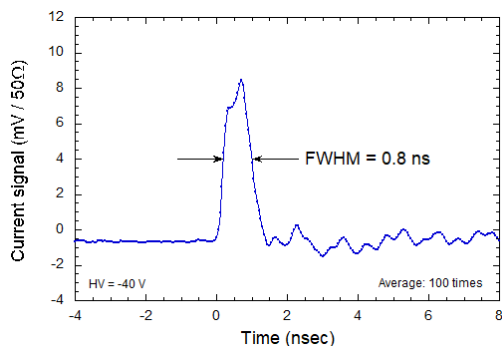


Figure 5: Pulse shape of current signal of the pulse-mode XBPM.

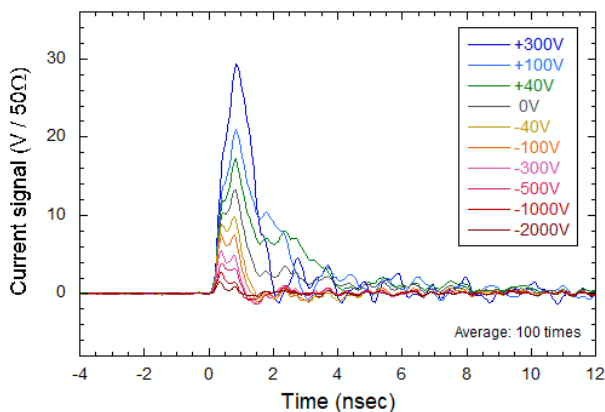


Figure 6: Voltage dependence of pulse shape.

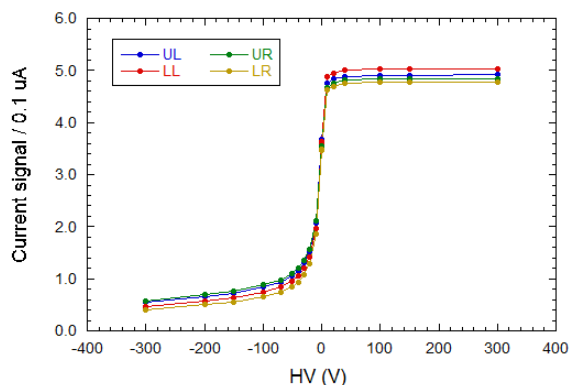
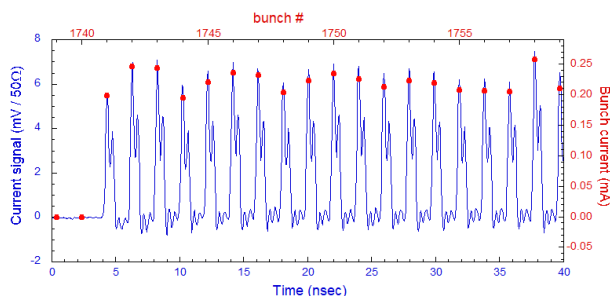


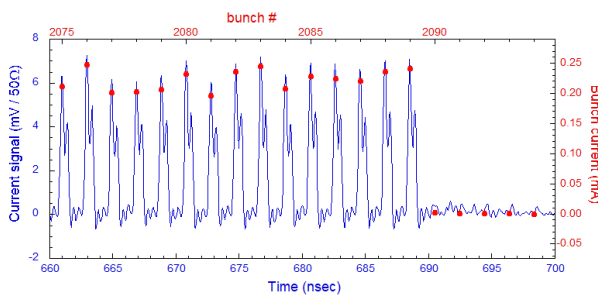
Figure 7: Voltage dependence of DC current signal.

### 3.2 パルス波高の応答

入射 X 線に対する本モニタ出力のパルス波高の応答 (線形性) を評価するために、フィリング・パターン“1/7 filling + 5 bunches”のパルス・トレイン部の波高を蓄積リングのバンチ電流値と比較したグラフを Figure 8 に示す。バンチ電流値の縦軸 (右側) は、先頭パルスの波高に一致するようにスケールした (Fig.8 (a))。本モニタのパルス波高は、蓄積リングのバンチ電流値に忠実に応答していることが分かる。但し、2 番目以降のパルスはバンチ電流値に比べて 1 割ほど高くなっている。この理由は、Fig.8 (b) でパルス・トレインの最後尾パルスにテールが見られるように、トレインの中間部でも先行するテールの上にパルスがパイルアップしているからである。



(a) Head of pulse train



(b) Tail of pulse train

Figure 8: Pulse shape (blue line) vs bunch current (red dot).



### 3.3 位置感度信号の生成

2つ乃至4つのパルス信号から位置の情報に変換するためには、まず個々のパルスの電荷を定量化してから演算する必要がある。パルスの生信号を合成することによって、位置感度信号の生成が可能であることを確かめた。Figure 9 に信号回路の構成を示す。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。Figure 10に実験結果を示す。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。約8.6 ns後のパルスは、それぞれのスタブ・ケーブル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。

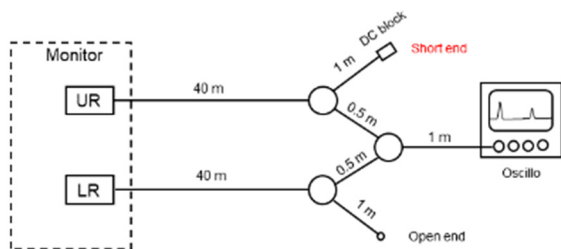


Figure 9: Setup of generation of position sensitive signal.

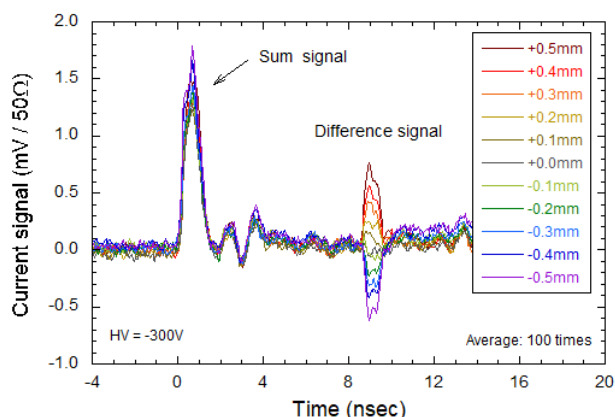


Figure 10: Position sensitivity of Pulse-mode measurement signal.

## 4. DCモードにおける性能評価

### 4.1 位置感度と分解能の評価

本モニタは、パルス・モード計測用に設計されているが、従来のモニタと同等の使い方もできることを確認した。

本モニタの感度及び分解能を算出するために、鉛直方向のスキャン測定を行った。Figure 11 に、0.2 mm ステップのスキャン測定の結果を示す。補正係数  $A_y$  として 1.25 の値を得た。また、鉛直方向の走査範囲 Vertical position =  $\pm 0.5$  mm の広い範囲で直線性を保っていることがわかる。Figure 12 では、分解能を確認するために 1 分間隔で 1  $\mu$ m のステップで走査した測定の結果を示す。各データは、時定数が約 1 秒の ADC を用いて 6 秒毎のサンプリングで取得した。この結果から、分解能として 0.12  $\mu$ m RMS の値が得られた。

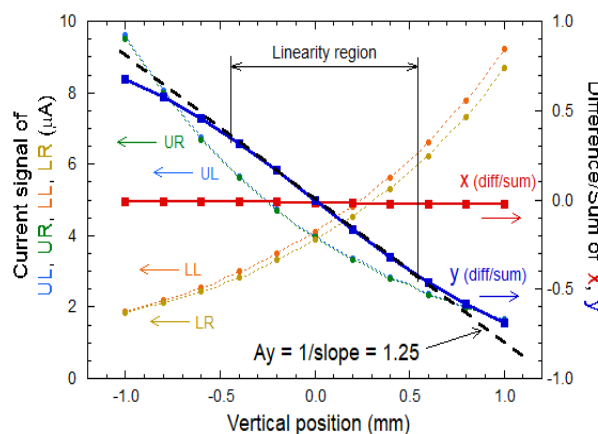


Figure 11: 0.2 mm step scan.

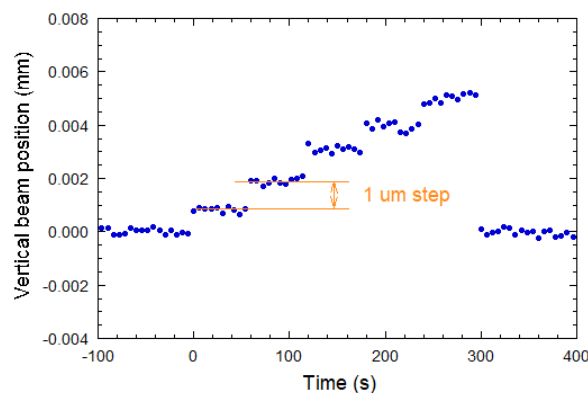
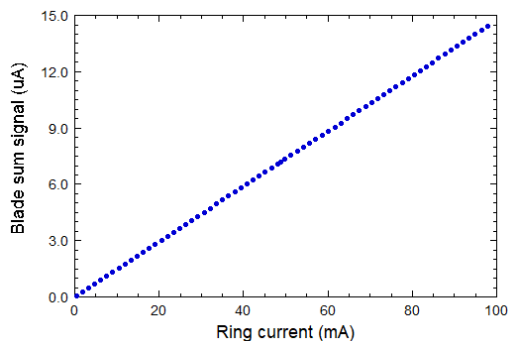


Figure 12: 1  $\mu$ m step scan.

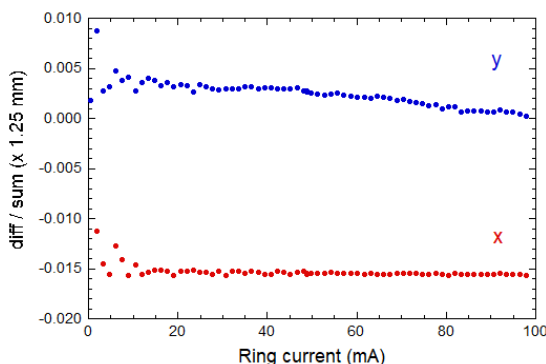
### 4.2 出力信号の直線性の評価

Figure 13 (a) に示すように、蓄積リング入射中の蓄積電流値と4枚のブレードからの直流信号の和の値は、良い比例関係がある。このグラフから、線形性として 0.3 % の値を得た。

次に、4 つブレードの信号量から“差/和”の演算をした結果を Figure 13 (b) に示す。偏向電磁石ビームラインからの放射光は水平方向に広がっているので、蓄積電流値が増加しても、水平方向(x)の動きは観測されていない。これはモニタが正常に動作していることの証しである。従って、鉛直方向(y)の 4  $\mu$ m 程度の変位は有意であると判断できる。



(a) Blade sum signal vs ring current.



(b) Difference/Sum vs ring current.

Figure 13: Linearity of DC mode.

#### 4.3 長期安定性の評価

本モニタの長期的な安定性を評価するために、ユーザ運転中に記録されているデータベースを用いた。Figure 14に示すように、鉛直方向(y)は約2ヶ月間でマイナス方向にドリフト( $\Delta \text{diff/sum} = 0.02$ )している。補正係数  $A_x = 1.25$  を考慮すると  $25 \mu\text{m}$  である。一方、その間の水平方向(x)の値は極めて安定( $\Delta = 1 \mu\text{m}$ )である。この値は、モニタ自体の安定性として評価できる。なお、鉛直方向に見られるステップ構造は、ビーム廃棄等による再入射のタイミングで生じている。

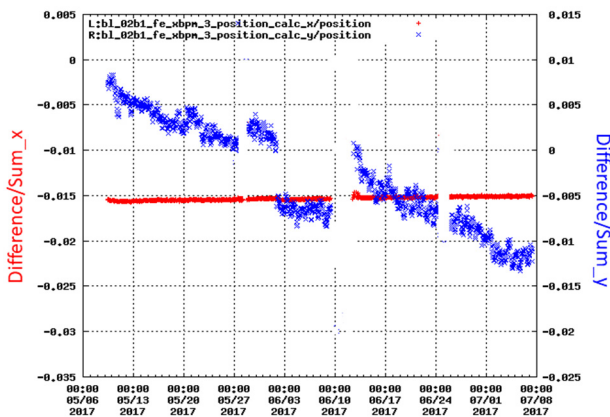


Figure 14: Stability for two months.

## 5. まとめ

パルス・モード計測型光位置モニタを新しく設計・製作し、SPring-8 偏向電磁石ビームライン BL02B1 フロントエンドにて総合動作試験を実施した。出力信号として単極性の単パルス波形 ( $0.8 \text{ ns FWHM}$ ) を得た。パルス先端がダブルピークになった原因について定性的に理解した。パルス波高は蓄積リングのバンチ電流値に比例し、光電子収集電極の電圧の調整で出力波形を制御することができる。スタブの開口端や閉口端での反射波を合成することで、直読可能な位置感度信号が得られることを示した。DC モードでの鉛直方向のスキャン測定から補正係数を算出し、分解能  $0.12 \mu\text{m RMS}$  を得た。また、良好な直線性 ( $0.3 \%$ )、及び、長期安定性 ( $1 \mu\text{m}/2 \text{ month}$ ) を確認した。

## 謝辞

本研究を進める上で公益財団法人高輝度光科学研究センターの中村剛氏、小林和生氏、木村滋氏、大沢仁志氏に貴重なアドバイスを頂いて。本報告の実験で使用したパルス・モード計測型光位置モニタの設計・製作は真空光学株式会社の協力を得ることによって実現した。本研究を遂行するにあたり JSPS 科研費 26390122 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] H. Aoyagi *et al.*, “Blade-type X-ray beam position monitors for SPring-8 undulator beamlines”, Nucl. Instr. and Meth. A 467-468, 252-255 (2001).
- [2] H. Aoyagi *et al.*, “Unipolar signal from a synchrotron radiation beam monitor with microstripline”, Proc. of the 3rd Annual Meeting of PASJ 159-162 (2006).
- [3] H. Aoyagi *et al.*, “Performance of Frontend Pulse-by-Pulse SR Beam Monitor with Microstripline Structure”, AIP Conf. Proc. 879, 1018 (2007).
- [4] H. Aoyagi *et al.*, “Pulse-by-pulse X-ray Beam Monitor Equipped with Microstripline Structure”, Proc. of DIPAC2011, MOPD91, 260-262.
- [5] H. Aoyagi *et al.*, “Design of X-ray beam position monitor equipped with microstripline structure for undulator beamline”, Proc. of the 12th Annual Meeting of PASJ 1224-1226 (2015).
- [6] H. Aoyagi *et al.*, “Design and prototype of pulse-by-pulse x-ray beam position monitor using diamond heat sink”, Proc. of the 13th Annual Meeting of PASJ 1118-1121 (2016).
- [7] H. Aoyagi *et al.*, “Mechanical design of pulse-by-pulse x-ray beam position monitor using diamond heat sink”, Proc. of MEDSI2016, WEPE10, 333-335.
- [8] H. Aoyagi *et al.*, “Pulse-mode Measurement of Electron Beam Halo using Diamond-based Detector”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 022801 (2012).