

UNIPOLAR SIGNAL FROM A SYNCHROTRON RADIATION BEAM MONITOR WITH MICROSTRIPLINE

Hideki Aoyagi^{1,A)}, Sunao Takahashi^{A)}, Hideo Kitamura^{A, B)}

A) JASRI / SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

B) RIKEN / SPring-8, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

Abstract

We have developed a pulse-by-pulse synchrotron radiation (SR) beam monitor with microstripline structure, which produces unipolar signals. The detector head having the microstripline structure is composed of a metal line (copper), ceramic plates (aluminum nitride) and a cooling base (cooper tungsten). The metal line functions as a photocathode. This monitor was designed to monitor not only the pulse-by-pulse photon beam position, but also the SR pulse intensity and the pulse timing. Feasibilities have been demonstrated. The monitor is useful also for electron beam accelerators.

単極パルス信号を出力するストリップライン型放射光モニター

1. はじめに

大型放射光施設であるSPring-8は、次のような特徴を有する。真空封止型アンジュレータによる超高輝度X線ビーム^[1]、電子ビーム軌道の高い安定性^[2]、低いエミッタンス^[3]、トップアップ運転^[4]、バンチ毎のフィードバック^[5,6]などである。また、ユーザーの要求に合わせて、バンチ間隔や各バンチの電流値を任意に設定することができる。これらの性能を十分に活用する精密な実験は今後更に増加するものと考えられる。従って、X線ビームのパルス毎の強度、位置、タイミングといった動態を直接観測することが必要となってくる。

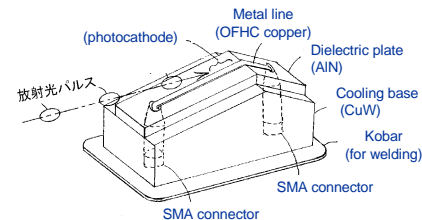
現行の光位置モニター^[7]は、他の施設と同じように耐熱性を重視して光電子放出を検出原理とするブレード型素子を採用しており、検出素子の時定数は比較的大きな値（出力信号の半値全幅で約20nsec）を持っている。そこで我々は、パルス毎のビーム診断を目標に開発研究^[8,9,10]に取り組み、光電面に全く新しい形状であるストリップライン（細線）型を採用し、特性インピーダンスを50Ωに整合させた検出素子を提案した^[11]。

2. モニターの構造

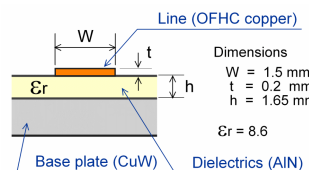
本モニターの検出素子は、図1(a)に示すように、SMAコネクタに直結する無酸素銅製のラインを光電面に持つ。ラインは冷却効率を高めるために誘電体プレート上にロウ付けされている。ラインの幅は1.5mm、長さは60mmとした。誘電体の材質は高熱伝導率を有する窒化アルミニウム（誘電率8.6）を選択した^[12]。光電面は、熱特性向上のために光軸に対して斜めに配置している。図1(b)に示すように、誘電体プレートの厚さは1.65mmとし、特性インピーダンスを50Ωに整合させた^[13]。冷却ベースには、高熱伝導率・低熱膨張率を有する銅タングステ

ンを用い、更に熱膨張による歪みを緩和するためにスリットを設けている（図1(c)）。

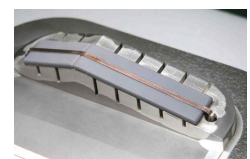
図2は、ネットワークアナライザーを用いて透過特性を測定したものである。約9GHzに見られる深い谷は、SMAコネクタの真空を封じるセラミック部品の外径に依存する遮断周波数に対応する。



(a) 概略図



(b) 断面図



(c) 写真

図1：検出素子の構造

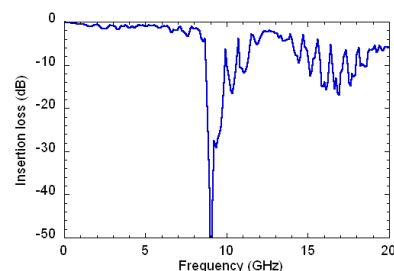


図2：検出素子の高周波特性

¹ E-mail: aoyagi@spring8.or.jp

本モニターは、文献[14]で提案されているような据付精度の向上のためにセラミックス上にマイクロストリップライン構造を形成したrf-BPMに、直接X線ビームを照射できるように耐熱性を飛躍的に高めたものである。

図3に示すように、本検出素子を真空容器に取り付け、対面に高電圧電極を配して光電子放出を制御している。また、検出素子の上流側に、不必要な放射光を除去するためのマスクを取り付けた。モニター本体は、水平・鉛直方向の駆動のためにステージに乗せている。ビームテストのために、SPring-8偏向電磁石ビームラインの基幹チャンネルに設置した。

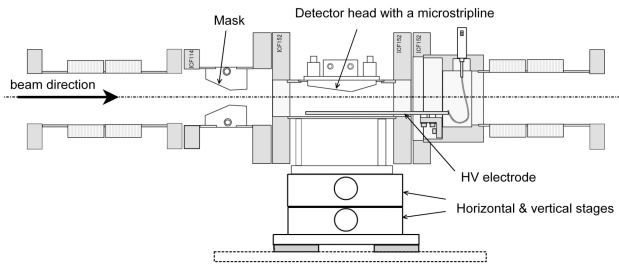


図3：モニターの全体図

3. 基本動作試験

図4は、SPring-8蓄積リングのパルス・トレインを帯域50GHzのサンプリング・オシロを使用して観測したものである。通常の電子ビーム用のrf-BPMとは対照的に、本検出素子による出力信号は、正の単極性となることが特徴である。また、半値全幅は約0.2nsecで、パルス間隔が約2nsecの各パルスを十分に分離して観測することが出来た。しかしながら、メインのパルスとは別に、“肩”の部分が存在する。これは、光電子が放出される際に生じる高周波ノイズと思われるが、改善することは可能と考えている。また、パルス強度モニター、パルス毎の位置モニター、およびパルス・タイミング・モニターとしての基本動作については、次項で詳しく述べる。

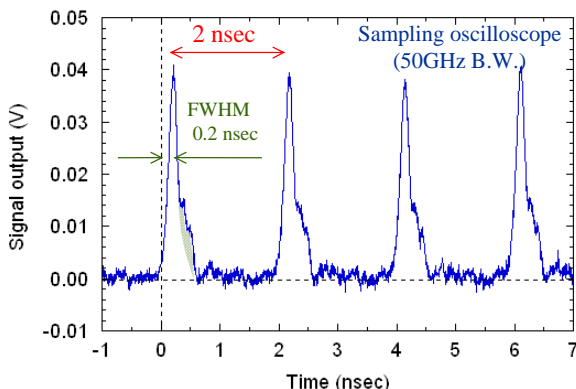
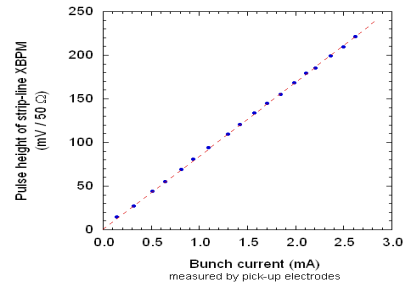


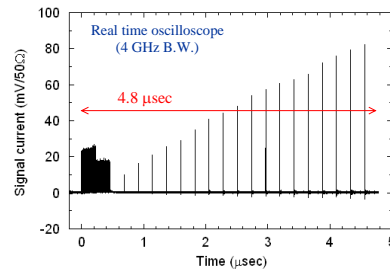
図4：観測された単極パルス信号

3.1 パルス強度モニター

パルス強度モニターとしての機能を果たすためには、パルス波高が電子ビームのバンチ電流値に比例していることが必要である。図5(a)に示すように、本検出素子が出力するパルス波高(縦軸)は、蓄積リングのピックアップ電極が出力するパルス波高(横軸)に完全に一致している。標準偏差は、バンチ電流値に換算すると、6 μ Aである(バンチ電流値1mAに対して0.6%)。図5(b)のように、リアルタイム・オシロを使用することによって蓄積リングのすべてのバンチに対応するパルス強度も計測することが出来る。



(a) パルス波高の線形性



(b) リング全周に対応するパルス強度

図5：パルス強度の測定

3.2 パルス毎の位置モニター

位置モニターとして動作するためには、パルス波高がビーム位置に応じて線形に変化することが必要である。図6に示すように、鉛直方向の走査に応じてパルス波高が、一定の区間で線形に反応した。このモニターでは、線形の範囲が約1mmであることが分かる。また、1%の読み取り誤差が生じると仮定すると、このグラフの傾きから位置分解能は約10 μ mとなる。

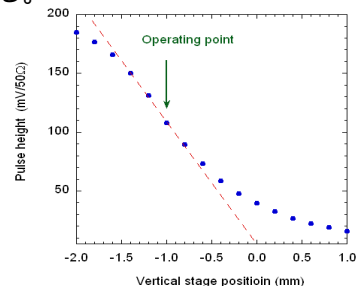


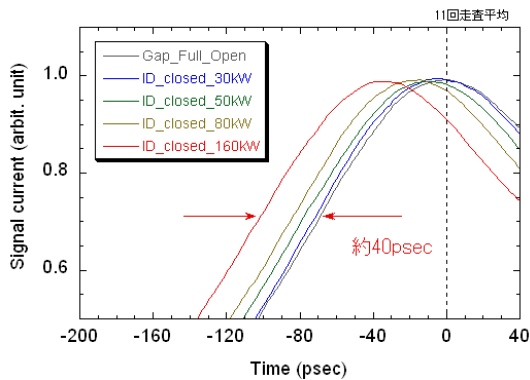
図6：鉛直方向の走査による波高の変化

3.3 パルス・タイミング・モニター

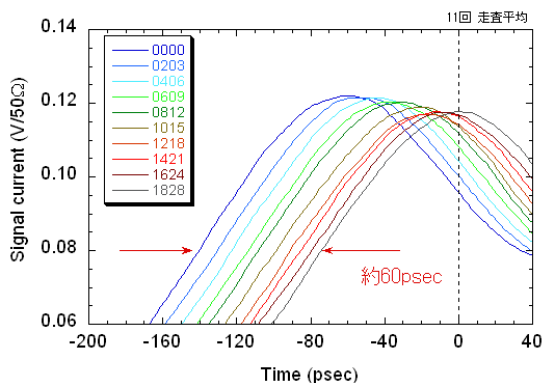
2通りの方法により、パルス・タイミング・モニターとしての動作を確認した。

図7(a)に示すように、挿入光源(ID)を閉めることによるパルスのタイミングの変化を観測した。挿入光源を閉めて放射パワーが増加すると、エネルギー損失を補うために電子ビームのRF位相が進行していることが分かる。タイミングの変化はエネルギー損失に概ね比例し、160KWのエネルギー損失で約40psecのタイミングの進みが生じた。(挿入光源による放射パワーは、真空封止型アンジュレータ1台あたり目安として約10KWである。)

2つ目の方法として、図7(b)に示すように、加速空洞内のビーム負荷の回復によって変化するパルス・タイミングを観測した。この時のフィリング・パターンは“1/12-filling + 10 bunches mode”で、空洞内のビーム負荷は、蓄積リングの12分の1に対応する連続した電子バンチにより生じる。このビーム負荷は数マイクロ秒かかって回復し、途中に現れる10個の孤立バンチを観測することによってそれを知ることが出来る。1番目のパルスは10番目のパルスに比べると、約60psecの進みがあることが分かった。(蓄積リングのハーモニック・ナンバーは2436で、図中の数字は電子ビームのバンチ番号を示す。)



(a) 挿入光源の放射パワーによる影響



(b) 加速空洞内のビーム負荷による影響

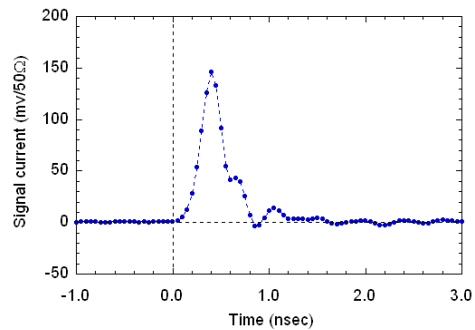
図7：パルス・タイミングの測定

4. 信号処理

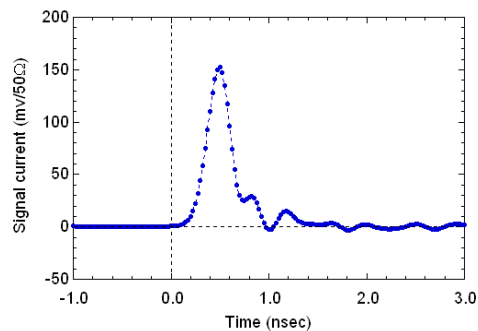
モニターの精度を高めるためには、検出素子自体の性能を上げるだけでなく、信号処理について検討することも必要である。そこで、オシロスコブのサンプリング・レートによる分解能の違い、及びフィルター等による信号の加工について紹介する。

4.1 サンプリング・レートの違い

図8に示すように、同じパルスを測定する際にサンプリング・レートを変えると分解能に大きな影響を与えることが予想される。そのため、必要とされる分解能に応じて計測器を選ぶ必要がある。また、計測器のアナログ周波数帯域(BW)も得られる出力信号に影響を与えるので、注意しなければならない。



(a) 20GS/sec (BW = 4.0GHz)

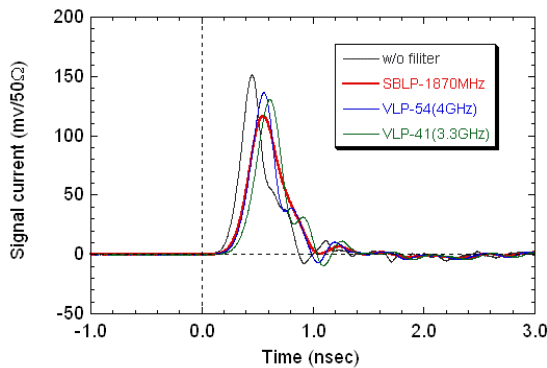


(b) 40GS/sec (BW = 2.5GHz)

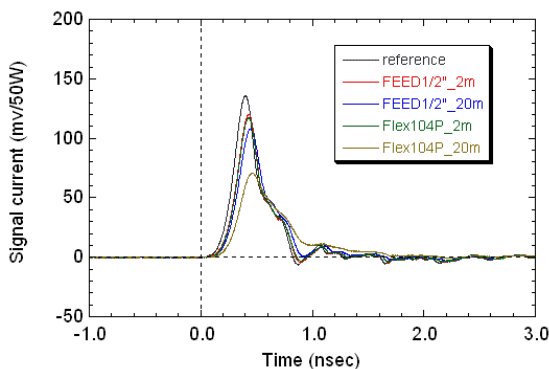
図8：サンプリング速度の違い

4.2 フィルター、及びケーブルによる違い

図9(a)に示すように、フィルターを通して出力信号を計測することによって、波形が整えられ信号解析に有利な場合がある(SBLP-1870MHz)。但し、移送特性の悪いフィルター(VLP-54,41)を用いると逆効果である。また、図9(b)に示すように、ケーブルを長くすると損失の影響があるので、低損失ケーブル(SUCO FEED1/2"等)を使用することが有効である。一般に、遮断周波数の高いケーブル(SUCO Flex104P等)は損失が大きくなるので、長い距離の信号伝送には、不向きといえることができる。



(a) フィルターの特性による違い



(b) ケーブルの種類と長さによる違い

図9：出力したパルス波形の変化

5. まとめ

単極パルス信号を出力するストリップライン型放射光モニターを開発し、実証試験を行った。パルス強度モニターとして強度分解能1%以下、パルス毎の位置モニターとして位置分解能10 μ m以下、及びパルス・タイミング・モニターとして時間分解能10psec以下を達成していることが明らかになった。本モニターは、他の原理に基づくX線検出器と比較すると、耐熱性・耐放射線性において非常に優れていることを特徴とする。

今後の課題として、SMAコネクタのRF特性、及びマイクロストリップラインの平面構造とコネクタ側の同軸構造との接続部のインピーダンスへ整合を改良した検出素子の検証を進める予定である。また、出力信号からの情報を効率的に得るためには、計測器、高周波回路、ケーブルの選択等は十分吟味する必要がある。

本モニターは、放射光施設におけるX線ビームの診断のために開発されたものであるが、単極性の出力信号を発生するという観点において、電子線加速器のビーム診断においても有用であると考えている。

謝辞

試験機の設置、データの収集はJASRIビームライン・技術部門の佐野睦氏、渡辺篤雄氏のサポートのもとに実施された。信号解析プログラムの開発は、JASRI加速器部門の大島隆氏、吉岡正倫氏によるものである。JASRI加速器部門のスタッフには、多くのアドバイスを頂いている。KEKの早野仁司氏には、文献[14]に関連して多くの情報を頂いている。本検出素子の詳細設計及び製作は京セラ株式会社の岩本晃一氏らが担当した。

参考文献

- [1] H. Kitamura, J. Synchrotron Rad. (1998). 5, p. 184.
- [2] H. Tanaka, Proc. of the NANOBEAM 2005, 36th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, p. 12.
- [3] M. Takao et al., Proc. of the 3rd Asian Particle Accel. Conf., 2004, p. 49.
- [4] H. Tanaka et al., Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., 2004, p. 222.
- [5] T. Nakamura, K. Kobayashi, Proc. of ICALEPCS 2005 PO2.022-2.
- [6] T. Nakamura et al., Proc. of the 9th European Particle Accel. Conf., 2004, p. 2649.
- [7] H. Aoyagi, T. Kudo, and H. Kitamura, Nucl. Instr. And Meth., A 467-468 252-255 (2001).
- [8] T. P. Kudo, H. Aoyagi, M. Awaji, T. Kobayashi, and H. Kitamura, Proc. of the 8th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, 2003, p.521.
- [9] H. Aoyagi, T. Kudo, T. Matsushita, S. Takahashi, K. Iwamoto, T. Kitamura and H. Kitamura, Proc. of the 9th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, 2006.
- [10] H. Aoyagi, S. Takahashi, K. Iwamoto, T. Sugimoto and H. Kitamura, Proc. of International Workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation, 2006.
- [11] H. Aoyagi, M. Sano, S. Takahashi, and H. Kitamura, Proc. of the 9th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, 2006.
- [12] <http://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/material.pdf>
- [13] <http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool.htm>
- [14] H. Hayano et al., Proc. of the 6th European Particle Accel. Conf., 1998, p. 1523.