

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

DESIGN AND PROTOTYPE OF PULSE-BY-PULSE X-RAY BEAM POSITION MONITOR USING DIAMOND HEAT SINK

青柳秀樹[#], 高橋 直

Hideki Aoyagi [#], Sunao Takahashi

Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

We have been developing a pulse-by-pulse X-ray beam position monitor for undulator beamlines. The technique of the detector head using the microstripline photocathode, which had been developed at SPring-8, was adopted to this monitor. The photocathode is metalized on a diamond heat sink to improve heat resistance property. Thermal finite element analysis, heating test, time domain reflectometry and transmissiometry of the prototype were carried out.

1. はじめに

光位置モニタは放射光施設における放射光ビームの位置変動を診断するためのツールとして幅広く利用されている。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。放射光利用実験において、極短時間に進展する現象を放射光ビームのパルス性を利用した時分割計測で解析する手法が増している。大型放射光施設 SPring-8 では、電子ビームの安定化の取り組みが精力的に行われており、中・長期のみならずパルス毎の安定化についても高いレベルで実現した[1,2]。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。これを克服するために開発されたのがストリップライン型ビーム位置モニタである[3,4]。このモニタの特徴は、高周波特性を極限まで向上させることを目的にインピーダンス整合したマイクロストリップラインそのものを検出素子の受光面としていることにある。すでに、偏向電磁石ビームラインにおいて、放射光ビームの動態(強度、位置、タイミング[5])をパルス毎に観測できることを実証済みであるが、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の設計と試作機の評価について報告する。

ストリップライン型ビーム位置モニタのアイデアをそのまま取り入れ、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原理的には可能である。しかし、これと同時に、耐熱性を向上させるための除熱の経路を確保することが困難となる。したがって、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を開始した[6]。

ここで重要な技術要素となるのが、ダイヤモンド・ヒートシンク自体の冷却方法である。最初に、最も接触熱コン

ダクタンスが高くなると期待できるロウ付け接合について検討した。ダイヤモンド・プレートとタングステン・ブロックのサンプルによる接合試験の結果、ダイヤモンドにクラックが入り破損しやすい点、ロウ付け真空槽の真空度の悪さから黒色の付着物の存在や電気的絶縁性の低下などの理由から、ダイヤモンドに対して直接ロウ付けすることは困難であると判断した。次に、ダイヤモンドと銅の間にインジウム箔(In, 融点 156°C)、若しくは、スズ箔(Sn, 融点 228°C)を挿入してクランプする方法を検討した。それぞれの箔をダイヤモンドと銅の間に挟み、一旦融点を約 10°C 超える温度まで加熱し、常温戻して観察したところ、銅とインジウム箔、及び、ダイヤモンドとスズ箔の組み合わせの密着性が良いように見受けられた。インジウムの融点は通常真空ベーキングの温度に近いことから、後述のホルダー加熱試験ではインジウム箔を挿入することとした。

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の実現に向けて以下のような観点で設計を進めた。Figure 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

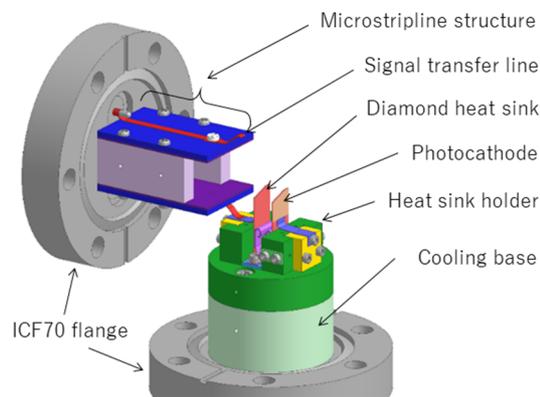


Figure 1: 3D image of a cooling structure and a microstripline structure.

[#]aoyagi@spring8.or.jp

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[7]、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。Figure 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。

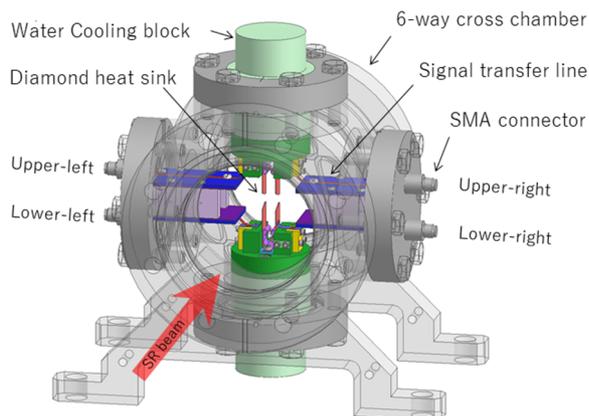


Figure 2: 3D image of a prototype with a 6-way cross chamber.

3. 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(20×8×0.3mm)、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。解析に用いた 1/4 モデルは、簡素化のために素子ホルダーと冷却ベースを円柱の一体物とみなしている。Figure 3 に解析結果の一例を示す。ダイヤモンドと銅の熱伝導率(TC)をそれぞれ 1,500、400W/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 10,000W/m²·K を仮定している。また、入熱はヒートシンク先端の領域(1mm×8mm×0.3mm)に分散させて 10W を付与している。この熱量は、標準型の挿入光源での通常使用で想定される最大

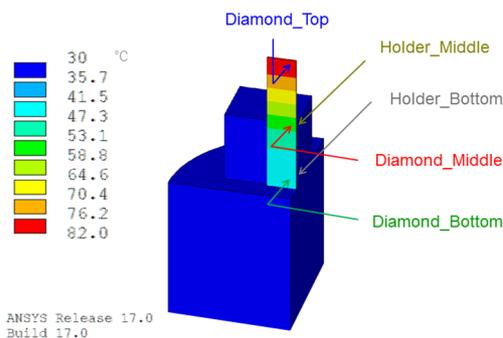


Figure 3: Quarter model for FEM.

値に相当する。冷却ベース底面に温度一定の条件(30°C)を付している。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、Fig. 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 10,000W/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、2,000W/m²·K 以下であれば温度上昇が 100°C を超えてしまうことなどが分かる。また、ビームラインの立ち上げ・調整時には最大入熱量が 25W 程度になることも想定されることから、Fig. 5 に、接触熱コンダクタンス 10,000W/m²·K を仮定した時の入熱量に対する各点の予想される温度を示す。以上のように、計算上は、現状の設計で使用可能であることを示している。

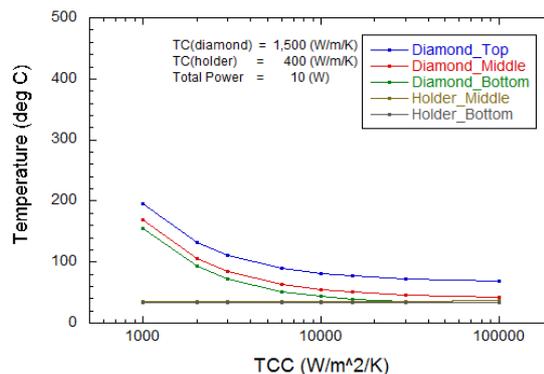


Figure 4: Thermal contact conductance (TCC) dependence of temperature.

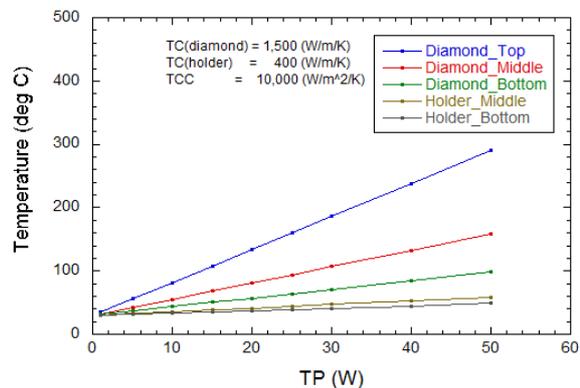


Figure 5: Total power (TP) dependence of temperature.

4. ホルダー加熱試験

本モニタの伝熱特性を実験的に検証することを目的に、ホルダーの試作機にダミーのヒートシンクを取り付けて加熱試験を実施した。モニタの実際の使用条件に合わせるためには、ヒートシンクの先端部に入熱することが望ましいが、Fig. 6 に示すように本実験では、シートシンクの先端、及び、ヒートシンク直近の素子ホルダーの温度を熱電対(Tc)にて計測し、ホットプレートを用いて素子ホルダー底部を加熱した。Figure 7 は、ダミーのヒートシンクとしてリン青銅を取り付けて計測したものである。Figure 8 はダイヤモンドを取り付けている。また、両者ともに片方(Heat sink_A)のヒートシンクには熱接触を向上さ

せる目的でインジウム箔を挿入している。ダイヤモンド・ヒートシンクの場合とは対照的に、リン青銅・ヒートシンクの温度は冷却ホルダーの温度上昇に追いついていない。また、冷却ホルダーの温度が一定値に達した後も不安定である。これらの違いは、両者の熱伝導率の差にあると考えられる。一方で、両者ともにインジウム箔挿入の有無による差は有意に見られなかった。また、当初はダイヤモンド・ヒートシンクと冷却ホルダーとの温度上昇率の違いから接触熱コンダクタンスの定量的な評価をする予定であった。しかし、Fig. 8 に見られるように、両者の温度上昇率の違いは概ね 2°C 以内で、本実験の測定誤差と同レベルであったので、接触熱コンダクタンスの定量的な評価には至らなかった。参考までに、温度差 2°C を仮定すると接触熱コンダクタンスは約 $3,000[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$ に相当する。

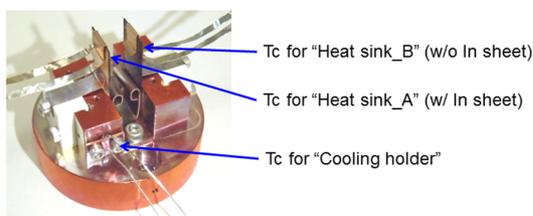


Figure 6: Prototype of heat sink holder for heating test.

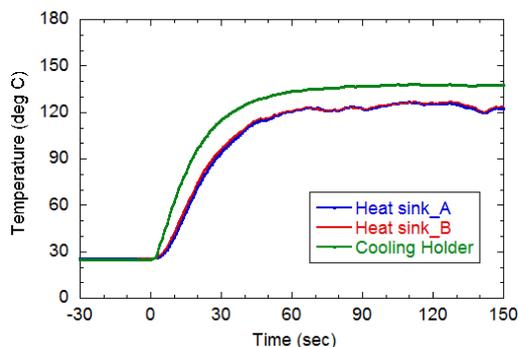


Figure 7: Temperature variation of phosphor bronze heat sink.

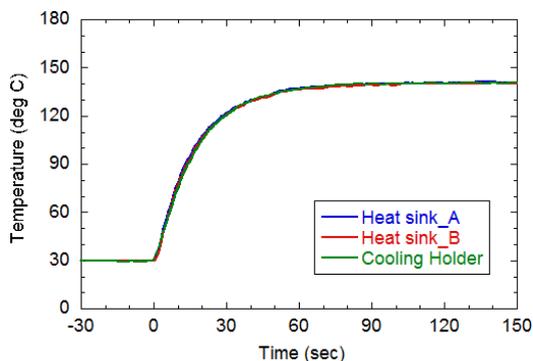


Figure 8: Temperature variation of diamond heat sink.

5. 信号伝送路の高周波特性評価

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時間領域透過率測定法 (Time Domain Transmissiometry, TDT) と時間領域反射率測定法 (Time Domain Reflectometry, TDR) を用いた。通常は、矩形波入力信号の立ち上がり、若しくは、立ち下がり部を利用するが、出力信号の解釈の容易さから単極性の単パルス (FWHM: 140psec) を入力信号とした。

本モニタの実際に使われる形態は、ダイヤモンド・ヒートシンク先端の検出素子の電荷の変化を計測器側へ伝送するものである。したがって、プローブを介して検出素子から直接入力した単パルス信号が透過する様子を観察することで実際の出力信号の時間構造を予測することができるのではないかと考えた。実験のセットアップを Fig. 9 に示す。この実験でも、ハンドリングの失敗を警戒してダイヤモンド・ヒートシンクは本番用でないダミーを使用した。図には示していないが、ノイズの少ない信号を得るためにはプローブのシールド側をプローブに近い位置で真空容器に接地させることが重要である。Figure 10 に、1) デバイダで分岐した入力信号 (黒)、2) ケーブル同士 (プローブと SMA コネクタ) を短絡した場合の透過信号 (緑)、3) プローブをストリップライン構造の先端に接続した時の透過信号 (青)、4) 検出素子の先端に接続した時の透過信号 (赤) のそれぞれの時間構造を示した。ストリップライン構造の先端からの出力信号 (青) は、短絡の信号に比べると 0.4nsec の遅延 (ストリップライン構造の時間的長さに相当) があるものの、時間構造を概ね保持していることが分かる。検出素子を介しての信号 (赤) にはダブルピークがみられる。これは、ダイヤモンド・ヒートシンク上の検出素子とストリップラインまでの区間はインピーダンス整合が取れていないことの結果である。

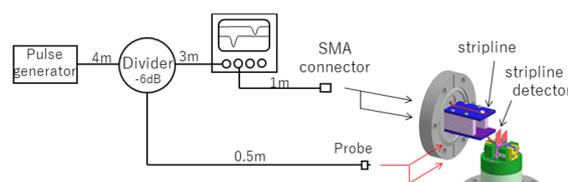


Figure 9: Experimental setup for TDT.

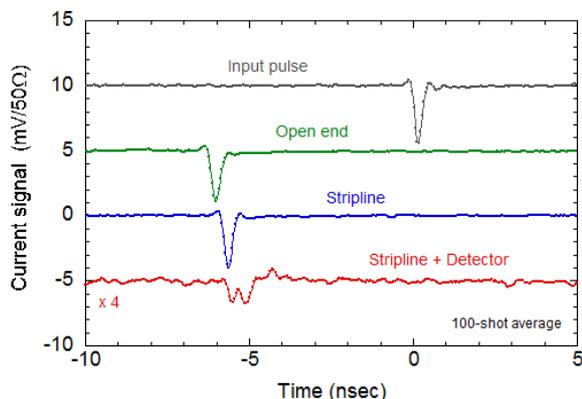


Figure 10: Experimental results of TDT.

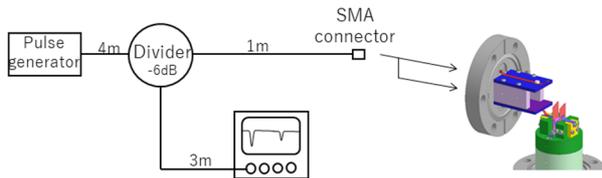


Figure 11: Experimental setup for TDR.

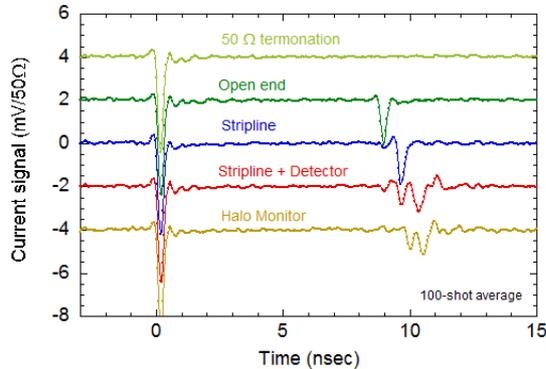


Figure 12: Experimental results of TDR.

次に、Fig.11 に示すセットアップで、反射の様子を観察した。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、検出器の保護の観点からも簡便な方法である。測定結果を Fig. 12 に示す。いずれの反射波の形状も Fig. 10 の透過波によく似た形をしていることが分かる。但し、ストリップライン構造と検出素子を経由した信号波形(赤)は反射により反復し、リングングの持続時間が長くなっている。Figure 12 には、ハローモニタの開発のために評価試験を行ったハローモニタ試作機の TDR の結果(黄)も示している。Figure 13 には、ハローモニタから出力される実際のパルス波形[8](黒)を示す。TDR に見られるダブルピークの幅(黄)が 0.5nsec である一方で、検出器としての実際のパルスの長さは 0.4nsec FWHM であることが分かる。このことから、本モニタの出力波形は、当初の計画通り、サブナノ秒の単極性パルス信号となることが期待できる。

6. まとめ

放射光施設における挿入光源ビームラインでの使用を目指し、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を設計し、試作機の評価試験を実施した。伝熱解析により、ダイヤモンド・ヒートシンクと冷却ホルダーとの熱接触コンダクタンスの値を $10,000\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ と仮定した場合、現状の設計で使用可能であることが示された。ホルダー加熱試験により、ダイヤモンド・ヒートシンクの冷却ホルダーに対する温度の追従性が高いことが示された。信号伝送路の高周波特性評価により、サブナノ秒の単極性パルス信号が得られることが示された。

今後は実機を製作し、電極付きダイヤモンド・ヒートシンクによるオフラインでの高周波特性評価、及び、ビームラインに導入して総合動作試験を実施する予定である。

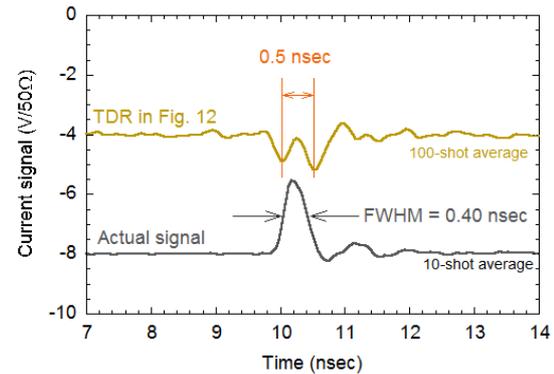


Figure 13: TDR and actual pulse shape of the halo monitor.

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いる。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プロトタイプ的设计・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。本研究は JSPS 科研費 26390122 の助成を受けている。

参考文献

- [1] T. Nakamura *et al.*, “Transverse bunch-by-bunch feedback system for the SPring-8 storage ring”, Proc. of the 9th EPAC 2004, 2646.
- [2] T. Nakamura, K. Kobayashi, “FPGA based bunch-by-bunch feedback signal processor”, Proc. of ICALEPCS 2005, PO2.022-2.
- [3] 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).
- [4] H. Aoyagi *et al.*, “Performance of Frontend Pulse-by-Pulse SR Beam Monitor with Microstripline Structure”, AIP Conf. Proc. 879, 1018 (2007).
- [5] H. Aoyagi *et al.*, “Pulse-by-pulse X-ray Beam Monitor Equipped with Microstripline Structure”, Proc. of DIPAC2011, MOPD91, 260-262.
- [6] 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).
- [7] H. Aoyagi *et al.*, “Electron beam halo monitor for the SPring-8 Angstrom Compact Free-Electron Laser”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 032802 (2013).
- [8] H. Aoyagi *et al.*, “Pulse-mode Measurement of Electron Beam Halo using Diamond-based Detector”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 022801 (2012).