

TiN 付きのセラミックブレイクを利用した壁電流モニター TITANIUM NITRIDE-COATED CERAMIC BREAK FOR WALL CURRENT MONITORS WITH AN IMPROVED BROADBAND FREQUENCY RESPONSE

菖蒲田義博^{*A)}、外山毅^{B)}
Yoshihiro Shobuda^{*A)}, Takeshi Toyama^{B)}
^{A)}JAEA/J-PARC
^{B)}KEK/J-PARC

Abstract

The beam impedance of a ceramic break with thin titanium nitride coating (TiN) consists of resistive wall term caused by TiN, radiation term, and capacitive term made by the ceramic itself in parallel. The entire wall current continues to run in TiN even when the skin depth is much larger than the chamber thickness, except for the extremely thin TiN (typically below ~nm). This characteristic is useful in developing a wall current monitor with an improved frequency response.

1. はじめに

金属製のチャンバーに挟まれた短いセラミックのリングを「セラミックブレイク」と呼ぶ。陽子シンクロトロン内の偏向電磁石付近では、外部磁場によってチャンバー上に生じる渦電流の影響を緩和するためセラミックブレイクをチャンバー間に挿入する [1]。また、陽子ビームの一部がチャンバー内面に衝突することで生じる電子の二次放出を抑制するため、このセラミックブレイクの内面は、数 10nm 程度の薄い窒化チタン (TiN) を施されることもある [2-4]。

陽子シンクロトロンで大強度ビームを実現するために、このようなセラミックブレイクが作るビームのインピーダンス [5-7] は精力的に研究されてきた [8-10]。現在、このインピーダンスは、セラミックブレイクからの放射損失、セラミックが作る容量項、及び TiN が作る抵抗の並列回路で近似できることが分かっている [10]。この時、TiN の厚さを薄くするとインピーダンスは高くなる。それは、スキンドープスが TiN の厚さより大きい低周波領域では壁電流は TiN のみを流れようとし、その直流抵抗を感じるからである。これは、セラミックブレイクのインピーダンスが、広帯域で周波数に依存しなくなることを意味している。

従って、薄い TiN を施したセラミックブレイクを使うと縦方向のビーム形状を精度良くモニターできる。本報告では、主に理論と測定の観点から上記の原理の実証試験結果を説明する。

2. セラミックブレイクのインピーダンス

長さ g のセラミックブレイクを考える。セラミックの比誘電率を ϵ' 、厚さ t の TiN の導電率を σ_{TiN} 、セラミックブレイクの外半径と内半径を a_2 と a で与えた時、低周波 ($f < c/\pi g$) では、セラミックブレイクのインピーダンス $Z_{cerTiN,L}$ は次のように近似される [10]。

$$Z_{cerTiN,L} \simeq \frac{1}{\frac{j\omega a_2(J+Y)}{cZ_0} - \frac{j2\pi c a_2 \kappa_{TiN} \tanh \kappa_{TiN} t}{g\omega Z_0} + \frac{j2\omega \epsilon' \pi a_2 (a_2 - a)}{cZ_0 g}} \quad (1)$$

ここで、 f は周波数、 c は光速、 j は虚数単位、 $\omega = 2\pi f$ 、 $Z_0 = 120\pi$ 、

$$\kappa_{TiN} = \sqrt{\frac{j\omega Z_0 \sigma_{TiN}}{c}} \quad (2)$$

Equation (1) の分母の第 1 項はチャンバー内 (J に比例する項) と外部自由空間 (Y に比例する項) に向かう放射損失由来の項、第 2 項は、TiN 由来の抵抗性アドミッタンス、第 3 項はセラミックに起因する容量性アドミッタンスを示している。第 2 項は高周波側で抵抗性インピーダンスを再現し [5]、低周波側で直流抵抗を再現する。この式の構造から、ビームのエネルギー損失上有利である限り、TiN を薄くしても、壁電流は実効的に TiN 上を流れ続けることがわかる。

なお、数 10nm 程度の薄い TiN を持つセラミックブレイクのインピーダンスを数値的に求めるには、非常に小さなメッシュサイズが必要となるため、この手法は一般に不適當である。セクション 3 では、その手法の限界の一旦を示す。

3. インピーダンスの測定

TiN を施した長さ 10mm のセラミックブレイクのインピーダンスを測定する。そのため、セラミックブレイクを長さ 470mm の SUS チャンバー ($a = 65$ mm, $a_2 = 70$ mm) で挟み、その両端を 242.85mm のテーパー管でさらに挟んだ。内部導体をチャンバーの中央に配置し、特性インピーダンスが $Z_{50}(= 50 \Omega)$ になる同軸構造を作った。テーパー管の電圧定在波比 (VSWR) は 1GHz まで 1.1 以下である [11]。また、チャンバーの上下流側のポートはネットワークアナライザ [12] のポート 1、2 に接続した。

* yoshihiro.shobuda@j-parc.jp

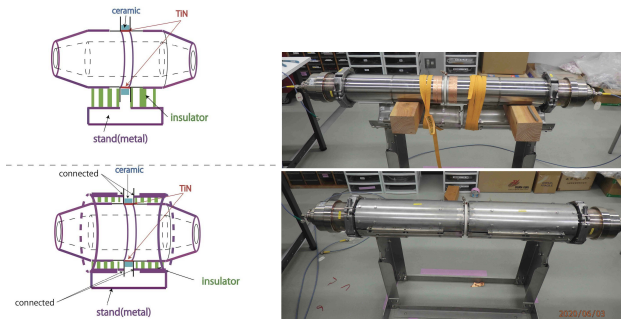


Figure 1: Schematics (left) and the photos (right) of the measurement setups.

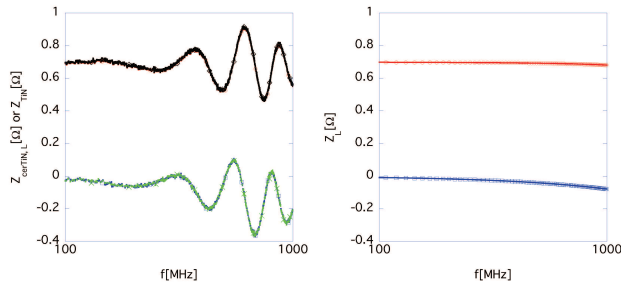


Figure 2: Measurements (left) and theoretical (right) results of the longitudinal impedance. The horizontal axis is frequency in logarithmic scale.

Figure 1 の左図は、右の写真に対応するセラミックブレイクのセットアップの模式図である。上段の図では、セラミックブレイクは金属製の台の上で絶縁体（緑色）によって支えられ、TiN のみ壁電流が流れる。一方、下段では、壁電流は TiN と金属台両方に流れる。インピーダンスの測定では、上図のみ考える。以後、壁電流に対するセラミックブレイクの「電気的なインピーダンス」は Z_{TiN} と書く。

測定結果 (左) と理論結果 (右) ($t = 10\text{nm}$, $\sigma_{TiN} = 3.5 \times 10^6 \text{ [S/m]}$ と仮定した。) を Fig. 2 に示す。右図の赤と青は $Z_{cerTiN,L}$ の実部と虚部である。左図で $Z_{cerTiN,L}$ (赤/青) と Z_{TiN} (黒/緑) の (実部/虚部) を

$$Z_{cerTiN,L} = -2Z_{50} \log\left[\frac{S_{12}}{S_{12}^{(ref)}}\right], \quad (3)$$

$$Z_{TiN} = 2Z_{50} \frac{\left(1 - \frac{S_{12}}{S_{12}^{(ref)}}\right)}{\frac{S_{12}}{S_{12}^{(ref)}}}, \quad (4)$$

に従って計算した [7, 13, 14]。但し、 S_{12} と $S_{12}^{(ref)}$ は、セラミックブレイクの場合とそれを銅のパイプに置き換えた場合の S 行列の 1,2 成分である。両者の実験結果の差は無視できる。それは、この周波数領域では、セラミックブレイクのサイズ 10mm が、波長に比べて十分小さいためである。また、高周波側の振動を除き理論は測定結果を説明できる。この振動は、テーパ管とそれに挟まれる中央同軸管とのインピーダンス・ミスマッチに起因する系統誤差と推

定される。

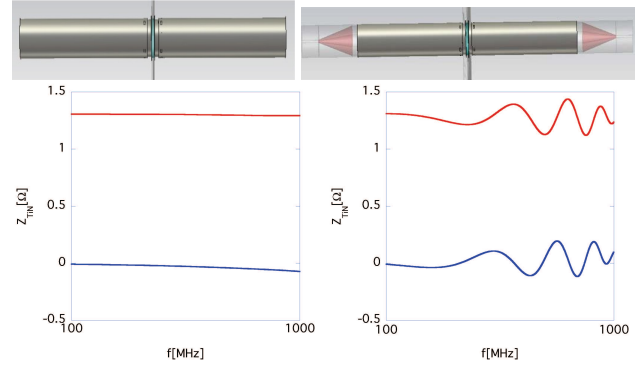


Figure 3: Simulations of the longitudinal impedance without (left) and with (right) tapers in the setup shown in the upper figures. The horizontal axis is frequency in logarithmic scale.

この推論を裏付けるため、‘tabulated surface impedance’ 模型を使って、CST [15] で数値計算を行うことにする。まず、テーパを無視した場合の数値計算結果を Fig. 3 の左図に示す。赤と青は、それぞれインピーダンスの実部と虚部を示す。実部は、(理論値/測定値) の 1.85 倍となっているものの一定値を示す。この不一致の原因は、‘tabulated surface impedance’ 模型が 1 層 1 次元模型のためと推定される。また、虚部は、セラミックの効果で容量性になっているように見える。しかし、これは偶然である。‘tabulated surface impedance’ 模型は、「不透性」の材料を仮定するので、原理的に TiN の外側の効果をシミュレートできないことに注意が必要である。

このような数値計算手法の持つ限界を認識した上で、テーパ管の影響を数値計算に含めてみる。テーパ管は、1GHz まで VSWR が 1.1 以下という条件を満たすようにモデル化した。Figure 3 の右図の数値計算結果は、Fig. 2 の左図の測定結果と同じ振幅 0.2 Ω の振動を示している。この結果は、「振動は、インピーダンス・ミスマッチに起因する。」という当初の推論を間接的に裏付けている。

最終的に Fig. 2 から言える重要な結論は、インピーダンスが周波数に大きく依存していないこと。そして、以下のような厚みを持つ抵抗性チャンバーのインピーダンスに従わないことである [5]。

$$Z_{res} = gZ_0 \frac{(1+j)\sqrt{\frac{2\omega}{cZ_0\sigma_{TiN}} \tanh[(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\sigma_{TiN}}{2}}t]}}{4\pi a}. \quad (5)$$

4. ビーム形状とセラミックブレイク上の信号の関係

4.1 測定設定

次にチャンバーに入射した電流（ビーム）パルスが、セラミックブレイク上でどのようにモニターされるか調べる。Figure 4 に 2 種類の測定のセットアッ

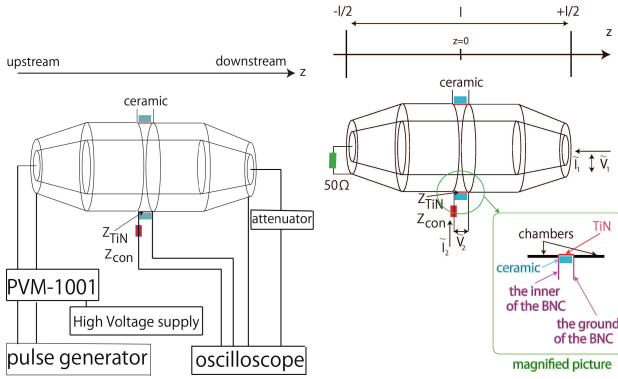


Figure 4: Schematic of the measurement setups to observe the relation between the voltage V_2 on the ceramic break and the pulse signal V_1 on the inner conductor.

ブを示す。左が時間領域での右が周波数領域でのセットアップである。

左図では、テーパ管の上流側のポートがパルスジェネレーター [16] に接続されており、パルス電圧モジュール (PVM-1001 [17]) で、入力振幅は最大 1kV まで増幅される。測定では 60ns のフラットトップタイムを持つ、立ち上がり時間が 5ns、立ち下がり時間が 5ns のパルスを発生させた。テーパ管の下流側のポートは、アッテネータ [18] を介してオシロスコープ [19] に接続する。セラミックブレイク上には、BNC コネクタを取り付ける。Figure 4 右図の拡大図のように、TiN、上流側と下流側の両チャンバー、BNC コネクタのインナー/グラウンドを電氣的に接続する。セラミックブレイク上のポートはオシロスコープに接続して、その電圧を観測した。

Figure 4 の右図では、チャンバーの上流側のポートを Z_{50} の整合抵抗で終端する。チャンバーの下流側のポートはネットワークアナライザのポート 1 に接続し、セラミックブレイク上のポートはネットワークアナライザのポート 2 に接続する。この測定により、チャンバーの下流側のポートと、セラミックブレイク上のポートの関係を周波数領域で理解できる。

Figure 4 の右図の S 行列成分を $S_{12}^{(mon)}$ 、Fig. 4 の左図のチャンバーの下流側のポートと、セラミックブレイク上のポートの電圧のフーリエ成分を \tilde{V}_1 、 \tilde{V}_2 、 l をセットアップの全長、 L と C をセットアップの同軸構造が作る単位長さあたりのインダクタンスとキャパシタンスと書くと、 $Z_{50} \gg Z_{TiN}$ の場合 \tilde{V}_1 、 \tilde{V}_2 の関係は

$$-\frac{e^{-j\omega\sqrt{LC}\frac{l}{2}}\tilde{V}_2}{\tilde{V}_1} \simeq e^{j\omega\sqrt{LC}\frac{l}{2}}S_{12}^{(mon)}, \quad (6)$$

と近似される [20]。さらに、セラミックブレイク上のポートの BNC に付随するインピーダンスが無視できる場合は、

$$-\frac{e^{-j\omega\sqrt{LC}\frac{l}{2}}\tilde{V}_2}{\tilde{V}_1} \simeq \frac{Z_{TiN}}{Z_{50}}, \quad (7)$$

と簡化される [20]。ここで、Eq. (6)、(7) の左辺の指数関数因子とマイナス記号は、チャンバーの下流端とセラミックブレイク上のポート端間の時間差、及び BNC 端子のセットアップ条件に由来する信号極性を表している。

なお、指数関数因子は、セラミックブレイク上のポート端を Z_{50} で終端し、ネットワークアナライザのポート 2 をチャンバーの上流端につなぎ変えた後、測定した S 行列成分 ($(S_{11}^{(thr)}, S_{12}^{(thr)}), (S_{21}^{(thr)}, S_{22}^{(thr)})$) を用いて、

$$e^{j\omega\sqrt{LC}\frac{l}{2}} = \pm \frac{1}{\sqrt{S_{11}^{(thr)} + S_{12}^{(thr)}}}, \quad (8)$$

と求められる。ここで、符号 \pm は、指数関数因子の引数の虚部 ($\omega\sqrt{LC}l/2$) が、正の値となるように決める。

4.2 測定結果

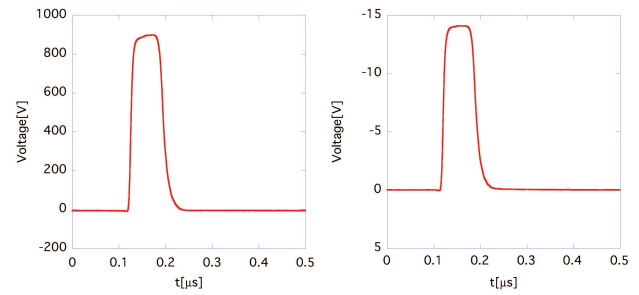


Figure 5: The signal at the downstream end of the chamber (left) and the monitored signal on the ceramic break (right).

チャンバーの下流側ポートとセラミックブレイク上のポートで信号を観測した結果を Fig. 5 に示す。セラミックブレイク上の信号 (右) は、チャンバーの下流側ポートの信号 (左) をよく再現する。また、両者の最大値の比は

$$\frac{g}{\sigma_{TiN}2\pi at Z_{50}} \simeq 0.014, \quad (9)$$

で求められ、Eq. (7) と無矛盾である。

さらに、測定データが Eq. (6) を満たすかを調べた。まず、オシロスコープの観測結果をフーリエ変換し、Eq. (6) の左辺を算出した。次に、ネットワークアナライザで観測した $S_{12}^{(mon)}$ を Eq. (6) の右辺に代入した。Figure 6 に Eq. (6) の右辺と左辺を示す。赤 (実線) と青 (破線) は右辺の実部と虚部を、紫 (実線) と緑 (破線) は左辺の実部と虚部を示す。実部虚部共 100MHz 以下ではよく一致するが、高周波側で一致が悪くなる。これは、オシロスコープで測定したパルスの時間領域の精度が不足するためである。

今回の測定では 8 ビットの垂直分解能をもつオシロスコープで帯域幅を 500MHz に、サンプリングレートを 5GS/s に設定した。また、データは 100 回の平均をとった。ところが、Fig. 7 が示すように、入力

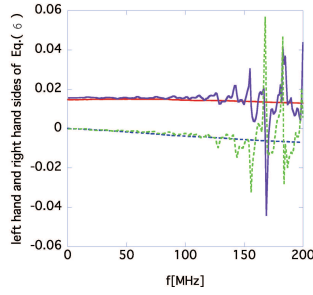


Figure 6: Comparison between the left- (purple/green) and right-hand (red/blue) sides of Eq. (6) for the ceramic break in the upper figures of Fig. 1.

パルスのフーリエ成分の絶対値 $|\tilde{V}_1|$ は 100MHz 付近を超えると急激に減少する。そのため、有意なデータは 100MHz 以下に制限される。原理的には、入力パルスを δ 関数に近づけることで有効周波数範囲を広げることができるが、現在のパルス発生器 [16] の立ち上がり/立ち下がり時間の最小値は 5ns である。

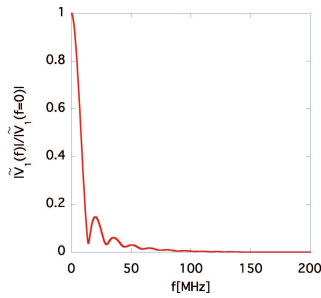


Figure 7: Normalized Fourier transformed current pulse $|\tilde{V}_1(f)|/|\tilde{V}_1(f=0)|$.

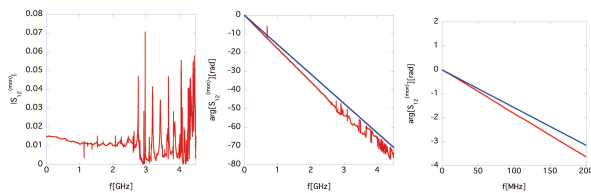


Figure 8: Amplitude (left) and phase (center/left) of $S_{12}^{(mon)}$ for the ceramic break in the upper figure of Fig. 1, where the right figure is a scaled-up figure of the center figure from 0 to 200 MHz.

次にネットワークアナライザを用いて、4.5GHz まで $S_{12}^{(mon)}$ の特性を直接観測した。Figure 8 は、 $S_{12}^{(mon)}$ の振幅 (左) と位相 (中央/右) を示したもので、右図は中央図の 0 ~ 200MHz の拡大図である。中央図と右図の青線は、 $-2\pi f \sqrt{LC}l/2$ を示している。振幅の一樣性と位相の直線性は 2.5GHz 付近まで良好である。(指数関数型 [21]、三角型と五角型 [22] などの) 電極型モニターでは $S_{12}^{(mon)}$ の振幅は $f=0$ から

増加するので、この点では TiN を施したセラミックを応用した本モニターの周波数特性は優れていると言える。

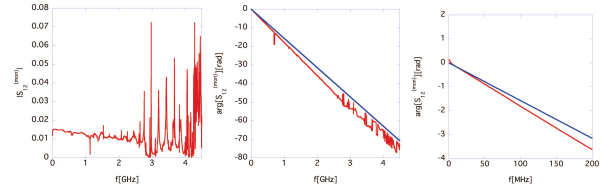


Figure 9: Amplitude (left) and phase (center/left) of $S_{12}^{(mon)}$ for the ceramic break in the lower figures of Fig. 1, where the right figure is a scaled-up figure of the center figure from 0 to 200 MHz.

次に、Fig. 1 の下段のセラミックブレイクを考える。この場合、金属製の台の影響で壁電流の経路が変形する。Figure 9 に、 $S_{12}^{(mon)}$ の振幅 (左) と位相 (中央/左) の測定結果を示した。この場合も 2.5GHz 付近までは、振幅の一樣性と位相の直線性は良好である。但し、Fig. 8 と比較すると $|S_{12}^{(mon)}|$ はわずかに減少し、 $arg[S_{12}^{(mon)}]$ は低周波でわずかに増加す (誘導的になる)。

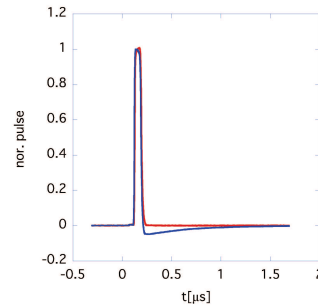


Figure 10: The signal at the downstream end (red) of the chamber and the monitored signal (blue) on the ceramic break in the lower figure of Fig. 1.

Figure 10 は、このわずかに変調した $S_{12}^{(mon)}$ の振幅と位相がモニターされたパルスに与える影響を時間領域で表したものである。パルスの頭頂部が欠け、テールは減少した後、約 $1\mu s$ でゼロに回復している。そこで、Eq. (6) を利用して、モニターされたパルスを次のように校正する。

$$V_{1,c}(t) = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{2\pi} \frac{e^{j\omega(t-\sqrt{LC}l)} \tilde{V}_2(\omega)}{S_{12}^{(mon)}} W(\omega). \quad (10)$$

ここで、 $V_{1,c}(t)$ は校正されたパルス、 \tilde{V}_2 はオシロスコープで観測された電圧のフーリエ成分、 $W(\omega)$ は以下のような

$$W(\omega) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos(\pi(\frac{\omega}{2\pi \omega_{in}} - 1.0)), & \text{for } 0 \leq \frac{\omega}{2\pi \omega_{in}} \leq 1, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (11)$$

窓関数である [23]。但し、 win は台形ビームパルスで決まるウィンドウパラメータで、(今は立ち上がり時間が 5ns なので)、200MHz と選んだ。Figure 11 をみると、パルスの頭頂部とテール部の歪みが回復し、 $V_{1,c}(t)$ は Fig. 10 の赤線を再現する。

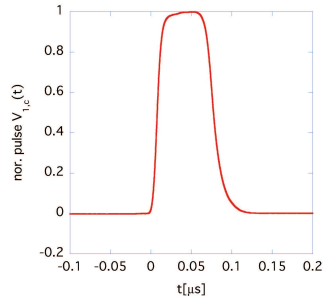


Figure 11: Reproduced current signal by using the monitored signal.

5. まとめ

数 10nm 程度の薄い TiN を施したセラミックブレイクのインピーダンスを考えた時、数値計算によるアプローチにはいくつかの欠点があり、正確には記述できない。そこで、本報告ではまず、理論と測定の見点からこの特性を解明した。理論的には、セラミックブレイクのインピーダンスは TiN に起因する抵抗、放射損失項、およびセラミック自体に起因する容量項の 3 つの成分の並列回路で記述できる。そして、スキンドプスが TiN の厚みより大きい周波数領域では、壁電流は TiN の中を流れ続ける。これは、セラミックブレイクのインピーダンスが周波数に強く依存しなくなることを意味する。実際の測定でも、ビームのインピーダンスは、非常に低周波側から GHz 領域に渡るまで、TiN の直流抵抗で記述できることが確認できる。

この特性は、広帯域の周波数特性を持つ壁電流モニターの開発に役立つ。電流 (ビーム) パルスとセラミックブレイク上のモニター信号は Eq. (6) に従うので、その周波数特性は $S_{12}^{(mon)}$ で理解できる。測定では、セラミックブレイクのモニターは良好な $S_{12}^{(mon)}$ の振幅の一様性と位相の直線性を 2.5GHz 付近まで示した。実際のセラミックブレイクは、金属製の台の影響のため、モニター信号はインダクティブな効果で歪むが、Eq. (6) を利用するとそれは校正できる。

一般に電極型 (指数関数電極、三角電極、五角形電極) のモニターでは、 $|S_{12}^{(mon)}|$ は周波数に対してゼロから増加するので、モニターは電流 (ビーム) パルスの微分波形を出力する。これに対し、セラミックブレイクを利用したモニターは、周波数に対し $|S_{12}^{(mon)}|$ は一定になるので、電流 (ビーム) パルス形状を直接出力できる。

謝辞

JAEA/KEK の J-PARC プロジェクトのメンバーの皆様に感謝いたします。本研究は KAKENHI (17K05124) の支援を受けて行われたものです。

参考文献

- [1] Y. Shobuda, Y. Irie and S. Igarashi, Phys. Rev. ST Accelerators and Beams, **12**, 032401 (2009).
- [2] K. Ohmi, T. Toyama and C. Ohmori, Phys. Rev. ST Accelerators and Beams, **5**, 114402 (2002).
- [3] K. Ohmi, T. Toyama and C. Ohmori, Phys. Rev. ST Accelerators and Beams, **6**, 029901(E) (2003).
- [4] Y. H. Chin *et al.*, in Proc. 39th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB'06), Tsukuba, Japan, 2006, TUBX01, pp. 125–127.
- [5] A. W. Chao, *Physics of collective beam instabilities in high energy accelerators*, (Wiley, New York, 1993).
- [6] B. W. Zotter and S. A. Kheifets, *Impedances and wakes in high-energy particle accelerators*, (World Scientific, Singapore, 1998).
- [7] *Handbook of Accelerator Physics and Engineering* edited by A. W. Chao and M. Tigner, (World Scientific, Singapore, 1999).
- [8] Y. Shobuda, Y. H. Chin and K. Takata, Phys. Rev. ST Accelerators and Beams, **10**, 44403, (2007).
- [9] Y. Shobuda, Y. H. Chin and K. Takata, Phys. Rev. ST Accelerators and Beams, **12**, 094401 (2009).
- [10] Y. Shobuda, Y. H. Chin and K. Takata, Phys. Rev. ST Accelerators and Beams, **17**, 091001 (2014).
- [11] NIKOHA, https://www.nikoha.co.jp/coax_component/cat01_class07/1228.html
- [12] Agilent Technologies, Now, Keysight Technologies, <https://www.keysight.com/jp/ja/home.html>
- [13] H. Hahn and F. Pedersen, BNL50870, (1978)
- [14] H. Hahn, Phys. Rev. ST Accelerators and Beams, **3**, 122001, (2000)
- [15] CST STUDIO SUITE, <http://www.cst.com>
- [16] <https://www.tek.com/> Tektronix, KEITHLEY 3390 50MHz Arbitrary Waveform Generator
- [17] <https://www.digikey.com/product-detail/en/directed-energy-inc/PVM-1001-P/2145-PVM-1001-P-ND/10268386>
- [18] <http://www.tmele.jp/english/>, Tamagawa Electronics Co. Ltd, UFA-100NPJ-20
- [19] <https://www.tek.com/> Tektronix, DPO 5054 Digital Phosphor Oscilloscope
- [20] Y. Shobuda and T. Toyama, Phys. Rev. Accelerators and Beams, **23**, 092801, (2020).
- [21] T. P. R. Linnear, CERN ReportNo. CERN-SPS-ARF-SPS/78/17, 1979; T. P. R. Linnear, IEEE Transactions on NS-2626, 3409 (1979).
- [22] Y. Shobuda, Y. H. Chin, K. Takata, T. Toyama, and K. Nakamura, Phys. Rev. Accelerators and Beams, **19**, 021003, (2016).
- [23] G. Harris, Proc. IEEE **66**, 51, (1978).