

# 非パルス計数型放射線検出回路の製作

下ヶ橋 秀典

高エネルギー加速器研究機構

## 1. はじめに

KEK-PF 電子蓄積リングトンネル内で放射線計測を行う場合、大きく分けて2種類のパターンがあることが判明している。1つ目は短時間で強いパターン。もう1つはリングの蓄積電子が発生するX線由来の放射線である。この2種類に対して検出可能な機器の開発を行っている。検出部としてシンプルな回路構成の放射線検出回路を試作した。机上テストを行なった後、トンネル内で実ビームによる検出波形観測を行った。今回はその報告を行う。

## 2. 検出部の回路構成の方針

これまで PMT とシンチレータを使用した放射線検出器を開発してきた。PMT では数 10 ns から 1  $\mu$ s 程度の時間応答で高感度かつ高 SN 比で検出できている<sup>[1]</sup>。一方で PMT では許容される平均電流が低く、DC 出力の場合、簡単に故障してしまう。ここでは PMT 程の高速応答は求めない代わりに、より堅牢な検出システムを構築することを目標とした。具体的な開発目標は以下の通りである。

### ・強度比例した計測

検出信号を DC 出力の大きさに計測（非パルス計数型）

### ・計測速度は 20 $\mu$ s 程度以下

この程度が価格や開発の難易度の面でも適切

### ・長時間の DC 出力を許容

光電子増倍管 (PMT) では苦手、フォトダイオード (PD) を使用

### ・検出信号の増強（高 SN 比化・検出範囲の拡大）

シンチレータ、プリアンプを検出部に内蔵

### ・死活監視機能

LED を検出部に組み込む

### ・高い保守性と多数設置の想定

検出部を消耗品と考えシンプルで安価にする

## 3. 検出部の回路設計と製作

今回、設計製作した回路は主に2種類である。

1つ目は PD1 個に IV 変換とアンプ (0-40 dB) のモデルで、PD1 個に IV 変換と増幅器がシリーズ接続されているタイプである。図1に回路構成図を示す。高い SN 比を得るためにこのような構成にした。

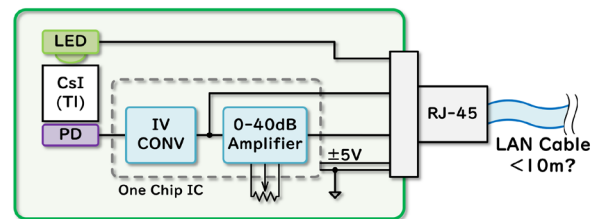


図1 Detection circuit (1PD Model).

図2に製作（試作）した検出部を示す。配線コネクタには RJ-45 を用いている。

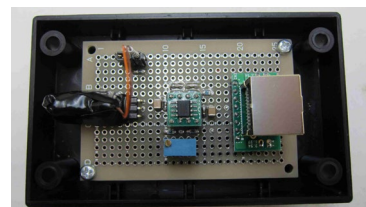


図2 Detection board (1PD Model).

もう1つは PD2 個にそれぞれに IV 変換を接続したモデルで、片方の PD にはシンチレータが無いモデルである。図3に回路構成図を示す。配線経路での同相ノイズを加速器トンネル外に設置した差動アンプにより除去する<sup>[2, 3]</sup>目的で製作した。両種類とも IV 変換までは同仕様である。

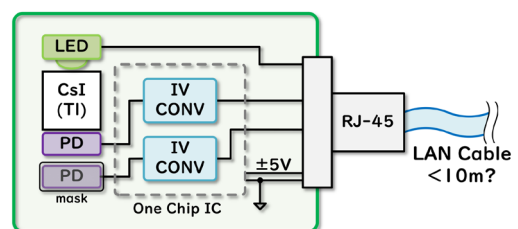
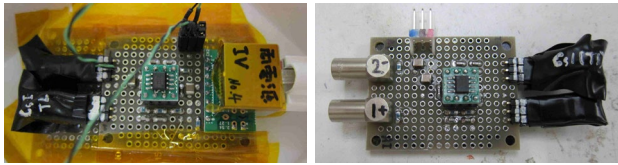


図3 Detection circuit (2PD Model).

図 4(a)に製作 (試作) した検出部 (回路) を示す。

他に図 3 構成で信号線を同軸コネクタ接続にしたモデル (図 4(b)) や単電源、50Ω ドライブモデル等を製作してテストしている。



(a) RJ-45 (b) coaxial  
図 4 Detection board (2PD Model).

#### 4. 検出部の回路のシミュレーション

SPICE を用いて PD の出力を IV 変換した回路のシミュレーションを行った。PD の等価回路は電流源と端子間容量とシャント抵抗を平行接続してモデル化した<sup>[4]</sup>。図 5 は電流源の出力を PD 短絡電流の 1/3 に設定し、パルス幅を 1~10 μs 変化させた場合のシミュレーション結果である。パルス幅はシンチレータに減衰定数 1 μs の CsI(Tl)を用いるため、パルス最小幅を 1 μs にした。シミュレーションの結果、設定程度の入光があれば、放射線検出器として十分な出力が得られることが確認された。また、シミュレーションによってプリアンプの選定やパラメータの確認等を行うことが出来た。

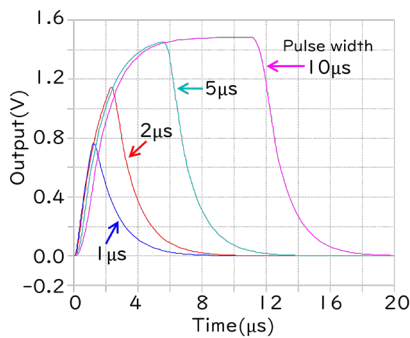


図 5 Simulation of detection circuits.

#### 5. 机上テスト (内蔵 LED を使用したテスト)

内蔵 LED を用いての机上 (非放射線環境) テストを行った。使用した検出部モデルは PD1 個に IV 変換とアンプ (0-40 dB) のモデル (図 1、図 2) で、アンプのゲイン設定は 34 dB とした。LED の駆動波形は矩形波 (パルス) でパルス電圧は 2.5 V、パルス幅は 10 μs、LED の制限抵抗は 1 kΩ となっている。図 6 に波形観測結果を示す。IV 変換波形はほぼシミュレーションと同様な波形となった。後段のアンプ出力は高利得設定であったため、電源電圧付近まで

振り切っている。使用状況によって利得を調整する必要があると考える。

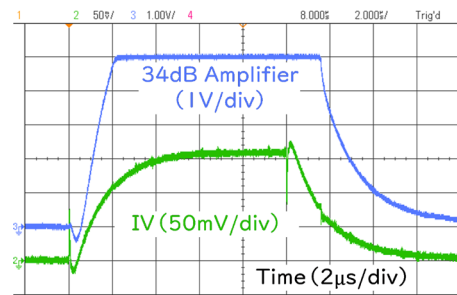


図 6 Testing on desktop using LED.

#### 6. 実ビームテスト (PF リング、入射点付近)

PF リング入射点付近に検出部を設置し、加速器運転状態での波形観測を行った。設置状況を図 7 に示す。検出部モデルは図 4 (b) の PD2 個の同軸コネクタ接続モデルを使用した。また、加速器室外の地下トレンチに差動アンプを設置している。

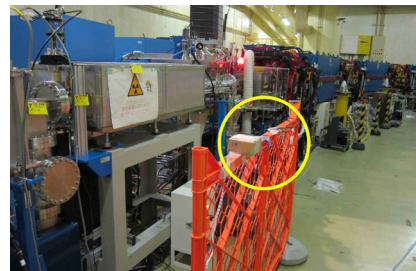


図 7 Set up near the injection point.

##### 6.1 ビーム入射時の放射線観測

ビーム入射時の検出波形を図 8 に示す。比較的大きな出力時の波形である。図中 PMT は光電子増倍管にシンチレータを組合せた既設の入射診断用ロスモニタの波形である。IV[CsI] はシンチレータ有りの PD の IV 変換出力、IV[no CsI] はシンチレータ無しの PD の IV 変換出力、Differential は差動アンプ (1 倍) の出力波形である。IV 変換出力はテストしたモデルでは負出力である。

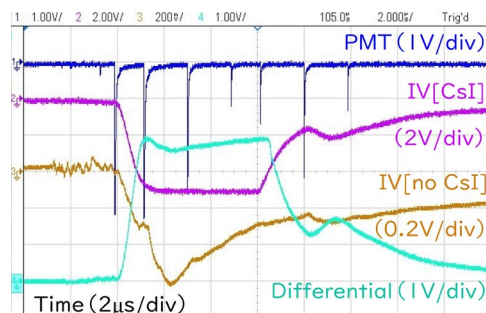


図 8 Near injection point at beam injection.

IV[Csl]は電源電圧に達する出力が観測された。IV[no Csl]でも 0.6 V の出力が観測された。Differential は  $IV[no Csl] - IV[Csl]$  の波形になっている。入射点での短時間で強い（ピークの高い）パターンの測定が可能であることが確認された。

### 7. 実ビームテスト（PF リング、ウィグラ下流）

PF リングウィグラ下流に検出部を設置し、加速器運転状態での波形観測を行った。設置状況を図 9 に示す。検出部モデルは図 4(a)の PD2 個の RJ-45 接続モデルを使用した。また、加速器室外の地下トレンチに差動アンプを設置している。



図 9 Set up downstream of the wiggler.

#### 7.1 入射時の放射線観測（蓄積電流 0mA）

ビーム入射時の検出波形を図 10 に示す。蓄積電流は 0 mA で、比較的大きな出力時の波形である。IV[Csl]の信号ピーク (0.6 V) が入射点付近に比べると低い測定可能であることが確認された。

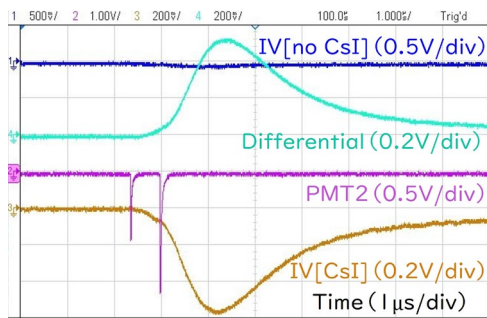


図 10 Downstream of wiggler at beam injection.

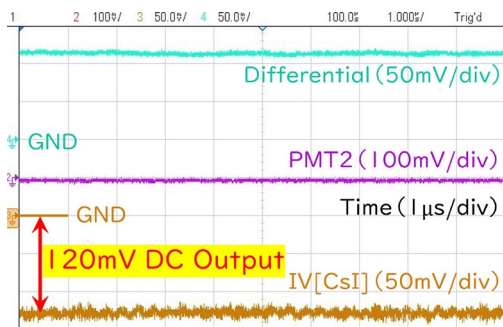


図 11 Downstream of wiggler at beam stored.

#### 7.2 ビーム蓄積時（450,420 mA）の放射線観測

蓄積電流 450 mA（マルチモード運転）時の検出波形を図 11 に示す。入射ビームは無し。IV[Csl]で DC 出力が 120 mV 観測された。リングの蓄積電子が発生する X 線由来の放射線について測定が可能であることが確認された。

図 12 にビーム蓄積電流 0 mA から 420 mA（ハイブリッドモード運転）に対する IV 変換出力を示す。リニアに変化していることが確認された。ただ、図 11 と比べると IV 出力電圧が低下している。測定条件が違うが、それを加味しても明らかに低下している。原因として、2つの測定の間には約 6 ヶ月間高放射線下に曝されていた期間があり、PD や電子部品の放射線損傷の可能性がある。詳細は今後調査する。

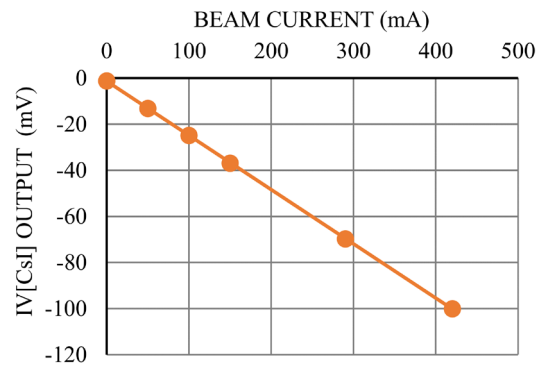


図 12 Beam current vs IV conversion output.

#### 7.3 100 kHz ノイズに信号が埋もれる現象

蓄積電流 450 mA（マルチバンチモード）時にビーム入射があった時の検出波形を図 13 に示す。検出器は図 2 を単電源にしたモデルである。IV 出力は正出力である。IV 出力に 100 kHz、20 mV 程度のノイズが観測された。環境の問題か回路の問題かは現在不明である。入射のピーク波形がノイズに埋もれてしまい、観測が困難である。今のところ机上テストでは確認されていない。原因の追及が必要である。

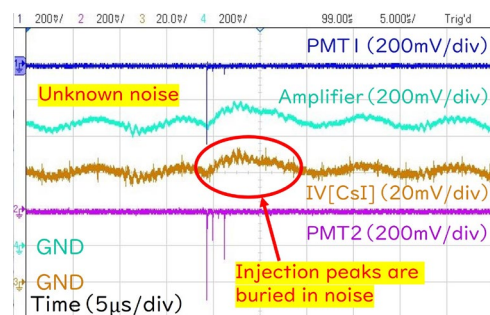


図 13 Phenomenon of signal buried in noise.

## 8. 実ビームテスト (マルチとハイブリッド)

図 14 に (a)マルチバンチモードと (b)ハイブリッドモードの観測波形 (450 mA 蓄積時) の比較を示す。観測場所は入射点付近で使用検出部は図 4 (b) の PD2 個の同軸コネクタ接続モデルである。ハイブリッドモードで周回周期ごとに 100 MHz 以上の波形が観測された。シンチレータの有無に関わらず同じ出力レベルで観測された。波形は両極性であり、PD の受光による出力では無いように見える。直接電子部品に作用しているようだが、原因は不明である。図 14(b)では差動アンプ出力 (Differential) で 100 MHz 以上の成分は除去されているが、差動アンプの帯域が 10 MHz であるので差動の効果というより、帯域によるものであると考える。

## 9. まとめ

今回、以下のことを行った。

- ・ 検出部の回路構成の方針を策定した
- ・ 2 種類の検出回路を製作した
- ・ 回路シミュレーションを用いて動作の確認とパラメータの決定をした
- ・ 内蔵 LED を用いての机上 (放射線環境外) テストを行った
- ・ 入射点付近に検出回路を設置して実ビームによる波形観測をした
- ・ ウィングラ下流に検出回路を設置して実ビームによる波形観測をした
- ・ ウィングラ下流での 100 kHz ノイズを確認した
- ・ マルチバンチモードとハイブリッドモードの検出波形の違いを確認した

現時点で差動アンプを用いた同相ノイズ除去の仕組みを採用するかどうかの判断は出来ていない。

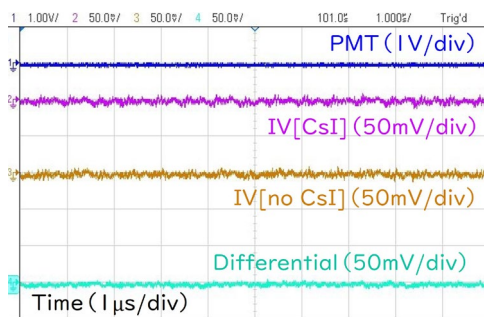
また、配線ケーブルについて、設置の利便性が高い LAN ケーブル (RJ-45) とノイズ耐性高い同軸ケーブルのどちらを採用するかは、今後の評価を通して判断する。LAN ケーブルは 2 m までに限定する、あるいは信号線は同軸ケーブルでそれ以外は LAN ケーブルにする等々の方式も考えられる。

## 10. 今後

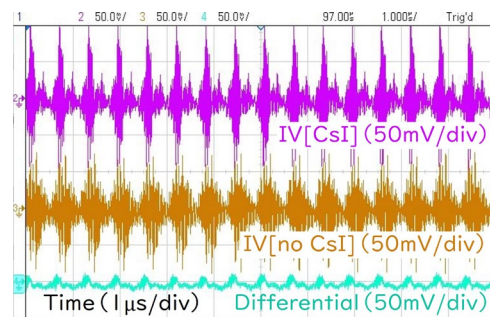
今回行った波形観測では、原因不明の事象や判断が出来ていない問題が確認されている。それらの原因追及と対策を講じることが今後の課題である。また、回路方式をある程度絞り込んだ後には量産化に向けて検出部回路の基板化と筐体製作を行う予定である。さらに、現在粘着テープで固定している PD とシンチレータを納める遮光ホルダの検討、製作を行う予定である。そして、PD や電子部品の放射線耐性についてもテストを実施する予定である。

## 参考文献

- [1] H.Sagehashi et al., "TEST OF DETECTION UNIT FOR THE CERL HIGH-SPEED LOSS MONITOR", Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2014), Aomori, Japan, Aug. 2014, pp. 1231-1233.
- [2] Y. Shimosaki et al., "DEVELOPMENT OF BEAM LOSS MONITOR FOR THE SPRING-8 STORAGE RING", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, pp. 1284-1286.
- [3] Y. Shimosaki et al., "MEASUREMENT OF BEAM LOSS DISTRIBUTION IN THE SPRING-8 STORAGE RING", Proc. 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2009), Ibaraki, Japan, Aug. 2009, pp. 275-277.
- [4] ANALOG DEVICES フォトダイオード回路設計ウィザード. <https://tools.analog.com/jp/photodiode/>



(a) Multi-bunch mode



(b) Hybrid mode

図 14 Comparison of waveforms near the injection point (stored current 450mA).