

Comparing the Performance of PIN and Avalanche Photodiodes for Radiation Detection

放射線計測のための PIN フォトダイオードと アバランシェフォトダイオードの性能評価

NAO SHIBAUCHI¹, KENTO TOKUCHI², HIROKI IKOMA³, AMI KOSHIKAWA⁴, MOTOKI MURATA⁵
TATSUYA FURUNO⁵, MIHO TSUMURA⁵ & TAKAHIRO KAWABATA^{5*}

芝内菜緒¹, 徳地研人², 生駒洋樹³, 越川亜美⁴, 村田求基⁵
古野達也⁵, 津村美保⁵, 川畑貴裕^{5*}

¹Kyoto Girls' High School, 17 Kitahiyoshi-cho, Imakumano, Higasiyama-ku, Kyoto, Kyoto 605-8501, Japan

²Ritsumeikan Moriyama Senior High School, 250 Miyake-cho, Moriyama, Shiga 524-8577, Japan

³Tezukayama Senior High School, 3-1-3 Gakuen Minami, Nara, Nara 631-0034, Japan

⁴Faculty of Science, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan

⁵Graduate School of Science, Kyoto University, Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan

* kawabata@scphys.kyoto-u.ac.jp

¹京都女子高等学校 (〒605-8501 京都府京都市東山区今熊野北日吉町17)

²立命館守山高等学校 (〒524-8577 滋賀県守山市三宅町250番地)

³帝塚山高等学校 (〒631-0034 奈良県奈良市学園南3丁目1番3号)

⁴京都大学理学部 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

⁵京都大学大学院理学研究科 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

* kawabata@scphys.kyoto-u.ac.jp

Abstract

Scintillation detectors are widely used for measuring radiation. A scintillation detector is composed of a photodetector and a scintillator that emits photons when it absorbs ionizing radiation. A PIN photodiode is a kind of photodetector which has been used conventionally. An avalanche photodiode (APD) is another kind of photodetector that has come into use recently. Since the APD can amplify the photocurrent by applying a high reverse voltage, output signals from the APD are less likely to be affected by background noise than those from the PIN photodiode. We have evaluated the performance of scintillation detectors with either an APD or PIN photodiode based on energy resolution, linearity, and long-term stability. We found that the energy resolution of the APD is about twice as good as that of the PIN photodiode, and that the linearity of both detectors is equally good. The instability of the PIN photodiode was less than 2% after 7 hours, which was a factor of three smaller than that of the APD. We believe that the APD instability is due to temperature variation. In conclusion, scintillation detectors with an APD are useful for high-resolution spectroscopy of ionizing radiation if their temperature is properly controlled.

Key words: γ ray measurements, Scintillator, Photodiode, Resolution, Linearity, Long-term stability

要旨

PIN フォトダイオードは従来用いられてきた光検出器の一種である。一方、アバランシェフォトダイオード (APD) は電子と空孔の雪崩効果を利用することで、信号の増幅が可能な光検出器であり、PIN フォトダイオードに比べ、ノイズの影響を受

けにくくなることが期待される。本研究では、これら2つの光検出器を用いたシンチレーション放射線検出器について、検出器としての性能をエネルギー分解能・直線性・長期安定性の3点から検証した。その結果、エネルギー分解能はAPDの方が約2倍優れており、直線性は共に良く、PIN フォトダイオードの不安定性は7時間の観察で2%以下であり、APDより3倍以上変動が小さいことが分かった。信号波高の変動と温度変化には相関が見られるので変動の主な原因はAPDの温度変化であると考えられる。ゆえに、APDの温度を一定に保つ機器を導入すれば、APDは高分解能放射線計測に有効な光検出器となるであると結論される。

重要語句: γ 線計測, シンチレータ, フォトダイオード, 分解能, 直線性, 長期安定性

序論

放射線は理学・医学・工業など幅広い分野において利用されており、現代社会にとって重要な役割を果たしている一方で、放射線の利用には、常に過剰な被爆が健康被害をもたらすリスクを伴っており、目で見ることのできない放射線を正確に測定する高性能な放射線検出器の必要性はますます高まっている。

現在、様々な検出原理に基づく放射線検出器が利用されているが、そのうち、シンチレーション検出器は、最も広く用いられている放射線検出器の1つである。シンチレーション検出器は放射線が入射すると光を発するシンチレータとその光を電気信号に変換する光検出器の2つの部分から構成されている。光検出器としては、比較的安価な光電子増倍管やPIN フォトダイオードが従来から用いられている。

本研究では新しい光検出器として近年普及しつつあるアバランシェフォトダイオード (APD) に注目し、従来使用されてきた PIN フォトダイオードとの性能比較を行うことによって、より高性能の放射線検出器の開発を目指した。シンチレータとしては、高い発光量と短い減衰時間を持つ GAGG ($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{13}$) を用いた。

シンチレーション検出器に求められる性能として以下の 3 つが挙げられる。1 つ目はエネルギー分解能が高いこと。2 つ目は直線性があること。3 つ目は長期的な時間安定性があることである。エネルギー分解能とは、測定したい放射線による信号の波高と、測定におけるノイズの波高の比のことである。2 つ目の直線性とは、放射線がシンチレータ中で失ったエネルギーと、フォトダイオードが変換した電気信号の波高の間に比例関係があるかどうかということである。3 つ目の時間安定性については、実際の長時間測定において検出器の重要な性能の 1 つとなる。

PIN フォトダイオードと APD の比較を行う前に、これらの総称であるフォトダイオード (半導体光検出器) の構造について説明する。フォトダイオードとは、P 型と N 型の半導体を組み合わせた素子であり、光が入射すると電子と空孔の対が生成され、これらが電極へ向かって移動することで電流が流れる仕組みとなっている。順方向に電圧をかけた状態では、電場によって、陽極側の P 型半導体中の空孔が N 型半導体の方向へ、陰極側の N 型半導体中の電子が P 型半導体の方向へ移動し、P 型半導体と N 型半導体の接合部分へキャリアが流れ込むことにより電流を生じる。

一方、逆電圧を印加すると、電子と空孔は順方向電圧の場合と反対の方向へ移動し、接合部分 (空乏層) にキャリアがいなくなるため電流は生じない。この状態の空乏層に光が入射すると空乏層で電子と空孔が生成され、電流を生じる。つまり光が入射した時にのみ電流を生じる。このため、光検出を行う際には、フォトダイオードに逆電圧を印加する。

APD は PIN フォトダイオードに比べ、高い逆電圧を印加することができる構造を持つので、空乏層にキャリアが流れ込む際に、高いエネルギーを得る。これらのキャリアは、周囲の原子に衝突して、さらに電子と空孔を生成する。この結果、APD ではキャリアの数が雪崩的に増加し (アバランシェ増幅)、PIN フォトダイオードよりも大きい電流を生じる。

試料と方法

線源からの γ 線が GAGG シンチレータに入射すると、シンチレーション光が発生する。このシンチレーション光がフォトダイオードに達すると光電流を生じる。シンチレーション光を効率的にフォトダイオードへ収集するために、高い反射率を持つ 3M 社製の ESR フィルム (1) によって GAGG シンチレータを包装し、PIN フォトダイオードないし APD に接着する際には、SCIONIX 社製の光学用接着剤 RTV861 を用いた。

フォトダイオードから出力された電流を、電荷積分型前置増幅器により電圧に変換した後、整形増幅器によって増幅した。このとき、フォトダイオードには電荷積分型前置増幅器を介して逆電圧を印加した。

整形増幅器の出力波形はオシロスコープで観測するとともに、マルチチャンネルアナライザ (MCA) を用いて波高スペクトルを取得し、その半値全幅の値を用いてエネルギー分解能の評価を行った。

このとき、出力信号の波高が高くなればなるほど、MCA で取得したスペクトルでの全吸収ピークの中心値が大きくなり、オシロスコープで観測するノイズが大きくなるほど、スペクトル中の全吸収ピークの半値全幅が大きくなるという関係性がある。オシロスコープで観測した波形と MCA で取得した波高スペクトルの例を Fig. 1 (A) (B) に示す。

本研究では、4 つの測定を行った。最初に、線源を ^{60}Co に固定し、2 つのフォトダイオードに印加する電圧を上げて行き、変化する信号の波高とノイズの値をオシロスコープで測定した。オシロスコープは Fig. 1 (A) に示すように、複数のイベントを重ねて画面に表示しているので、その最大値を目視で読み取った。ノイズレベルは放射線が計測されていない時の電圧の振れ幅から決定した。

その後、線源が ^{60}Co の時のエネルギー分解能を MCA で測定した。この時、Fig. 1 (B) に示すように、MCA で取得されたスペクトルにおいて、矢印で示した全吸収ピークの中心値と半値全幅からエネルギー分解能を計測した。それぞれのフォトダイオードで安全に印加できる電圧の最大値が異なるため、PIN フォトダイオードは 60 V のみの測定を行い、APD は 190 V から 335 V までの測定を行った。

さらに、2 つのシンチレーション検出器に一定の電圧を印加して、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{133}Ba の 3 つの線源に対して MCA で観測した全吸収ピークの位置を測定した。この 3 つの線源からは、特定のエネルギーを持つ γ 線が放出されることが知られてい

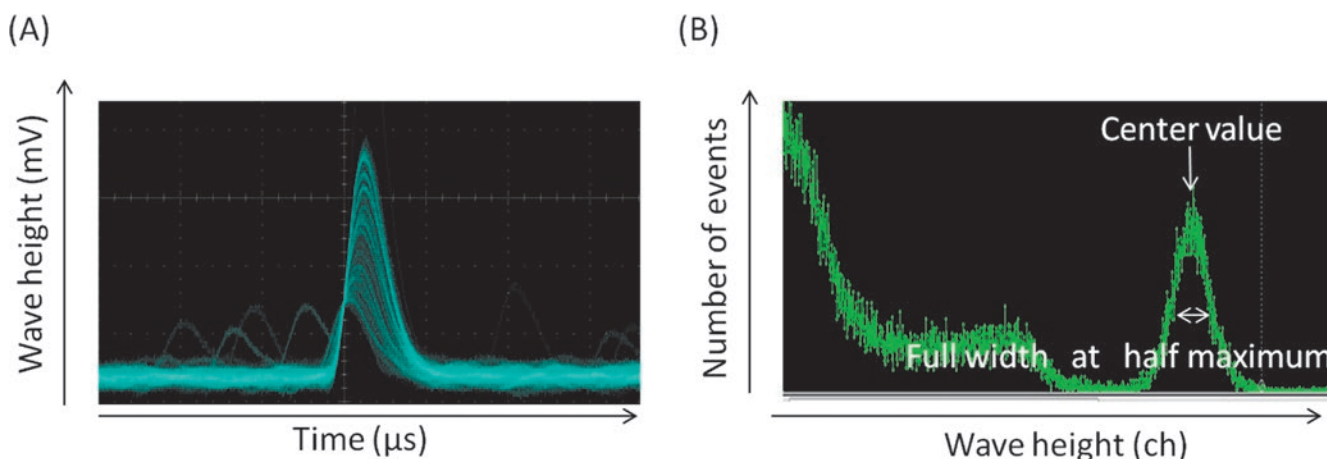


Fig.1. (A) Typical output waveform from a photodiode as measured with an oscilloscope. (B) Typical spectrum of pulse height from a photodiode as measured with a multichannel analyzer (MCA).

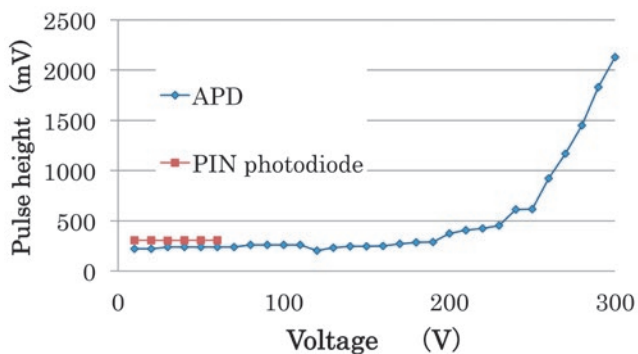


Fig.2. Output pulse height from APD and PIN photodiodes measured by an oscilloscope as a function of applied bias voltage.

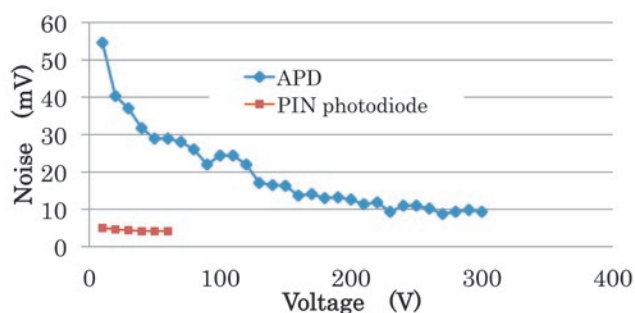


Fig.3. Noise level of APD and PIN photodiodes measured by an oscilloscope as a function of applied bias voltage.

る。これにより、放射線のエネルギーと検出器の出力の直線性を評価した。

最後に、線源を ^{22}Na に固定し、2つのシンチレータに一定の電圧を印加し、MCAで観測した全吸収ピークの位置を長時間にわたって観測し、同時に測定した室温の変化と比較した。

結果

エネルギー分解能について

フォトダイオードに印加した電圧と波高との関係をおシロスコープで調べた結果を Fig. 2 に示す。APD は 200 V 以上で電圧の増加とともに、波高も急激に高くなっている。PIN フォト

ダイオードは印加電圧が 60 V と低いため、波高はほとんど変化していないことが読み取れる。

次に、同時に測定したノイズの電圧に対する変化を Fig. 3 に示した。PIN フォトダイオードはノイズの電圧依存性が小さいのに対し、APD は入力電圧を増加させるとともにノイズが急激に減少していくことが明らかとなった。波高に対するノイズの比は PIN フォトダイオードで約 10% (60 V) であるのに対し、APD は約 2.0% (300 V) であった。この比の値はエネルギー分解能に相当するので、APD を用いたシンチレーション検出器は PIN フォトダイオードを用いたシンチレーション検出器に比べ、エネルギー分解能の観点において優れているということが分かる。

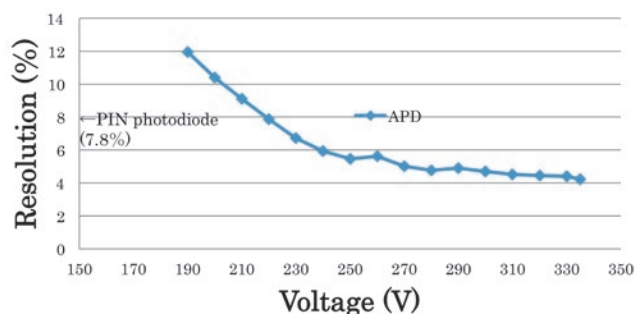


Fig.4. Energy resolution of a scintillation detector with APD for 1275 keV γ rays from ^{22}Na as a function of applied bias voltage. The horizontal arrow shows the energy resolution of a scintillation detector with a PIN photodiode.

序論で波高に対するノイズの比がエネルギー分解能を表すと述べたが、この結果はオシロスコープでの値であり、目視で値を読みとったため正確とは言い難い。より正確な評価のために、MCAで取得した波高スペクトルから全吸収ピークの半値全幅と中心値の比によってエネルギー分解能を定義して、測定を行った。MCAにより計測したエネルギー分解能の逆電圧依存性を Fig. 4 に示す。PIN フォトダイオードを用いたシンチレーション検出器のエネルギー分解能は最大電圧 60 V で 7.8% であるのに対し、APD を用いたシンチレーション検出器では逆電圧を増加させるほどエネルギー分解能が向上し、最大電圧 335 V で約 4.0% となった。この結果から APD を用いたシン

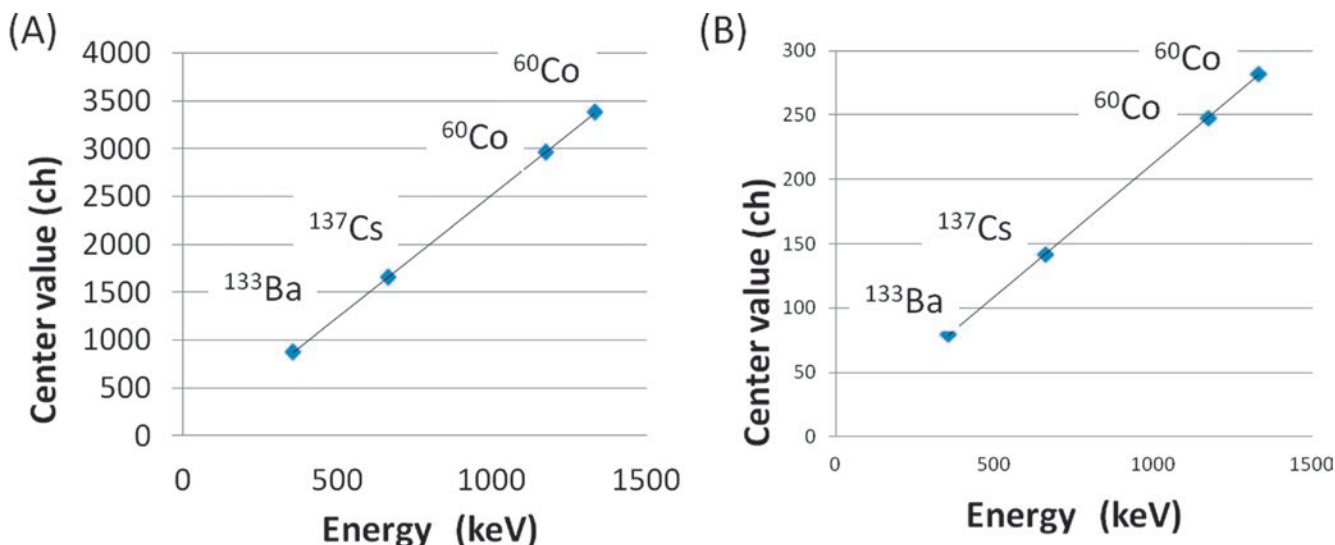


Fig.5. Photopeak positions for γ rays from various standard sources in the pulse-height spectrum obtained by an APD (A) and a PIN photodiode (B). The dependence of the energy of γ rays on the output center value of the APD are measured by a MCA.

チレーション検出器は、PIN フォトダイオードを用いたシンチレーション検出器に比べて、エネルギー分解能が約 2 倍優れていることが分かる。

Table 1. Energies of major γ rays emitted by ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{133}Ba .

^{60}Co : 1173.2 keV, 1332.5 keV
^{137}Cs : 661.7 keV
^{133}Ba : 356.0 keV

直線性について

3つの異なる線源を用いて γ 線のエネルギーと検出器出力の中心値を調べた結果を Fig. 5 (A) (B) に示す。 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{133}Ba はそれぞれ表 1 に示すエネルギーの γ 線を放出する。これら 4 つのエネルギーの γ 線に対して、PIN フォトダイオードと APD に、それぞれ 60 V と 330 V の逆電圧を印加して、MCA で観測される全吸収ピークの中心値を測定した。この結果から両者ともエネルギーと中心値が比例関係にあることが読み取れ、直線性が高いことがわかる。線形フィットにより見積もった R2 乗値は両者とも 1 に非常に近い値となった。つまり、 γ 線のエネルギーとフォトダイオードから出力する信号の波高は良い比例関係にあることが確認された。

長期時間安定性について

次に計測開始時の全吸収ピーク位置を基準とし、時間変化によって全吸収ピークの位置がどの程度変化するかを調べた結果を Fig. 6 に示す。グラフの縦軸は開始時を 1 とした相対変化である。7 時間後に PIN フォトダイオードを用いたシンチレーション検出器の出力波高は約 2.0% 減少し、APD を用いたシンチレーション検出器の出力波高は約 7.0% 減少した。つまり、APD の出力波高の長期時間変化は PIN フォトダイオードに比べて約 3.6 倍大きく、APD は長期安定性について劣っていることが分かった。

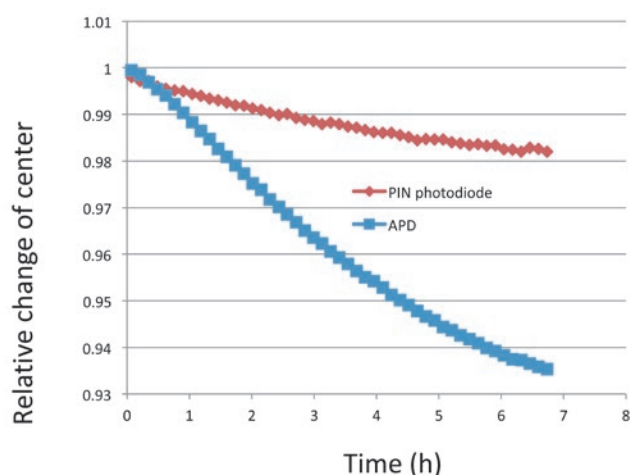


Fig. 6. Relative change of photopeak position in the pulse-height spectrum as a function of time.

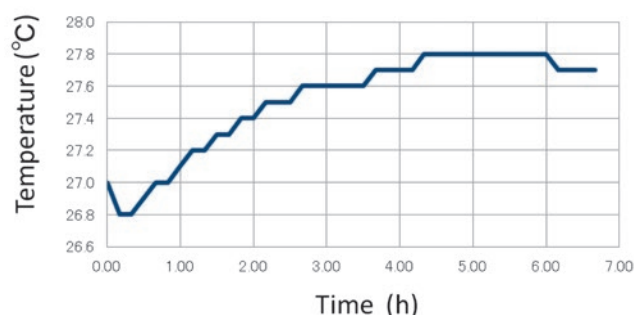


Fig. 7. Room temperature as a function of time during measurements for Fig. 6.

考察

以上の結果より、エネルギー分解能については雪崩効果により信号の増幅が可能である APD の方が高く、直線性は双方とも良く、長期安定性は PIN フォトダイオードの方が良いことが分かった。

シンチレーション検出器に求められる性能は、エネルギー分解能が高いこと、直線性があること、長期安定性が高いことという 3 つである。エネルギー分解能の観点からは、APD の方が光検出器として優れていると言える。しかし、APD は長期安定性について劣っており、何らかの改善が必要である。

Fig. 6 において観測された時間変化の原因を調べるために、同時に測定した室温の時間変化を Fig. 7 に示す。これら 2 つの結果を比べると室温がなだらかに上昇するとともに全吸収の中心値が変化しているため、長期時間変化の原因の 1 つが室温変化であると考えられる。

そこで、解決策の 1 つとしてフォトダイオードの温度管理を行うことが考えられる。つまり、APD を用いたシンチレーション検出器に対して、温度制御装置を導入し、APD の温度を一定に保つことができれば、長期安定性が改善され、PIN フォトダイオードを用いたシンチレーション検出器よりも総合的に性能の良い検出器を実現できると期待される。今後の課題としては、温度制御装置と組み合わせた検出器を開発し、実際に長期安定性がどの程度改善されるかを検証する必要がある。

今回の結果から、短時間の計測であるが分解能が重視されるような用途には APD を用いた検出器が適していることが明らかとなった。

謝辞

今回 ELCAS の専修コースで 5 ヶ月間にわたり、京都大学理学部で実験を行いました。実験の指導や準備、補佐をしてくださった京都大学原子核ハドロン物理学研究室の皆様に深く感謝いたします。また、ELCAS の企画の運営、連絡等を行ってくださった ELCAS 事務局担当者の皆様には大変お世話になりました。

参考文献

1. 3M | 使用 | 液晶ディスプレイ関連 | 製品とサービス <<http://www.mmm.co.jp/display/spec/>> [accessed 25 Jan. 2016]