

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2012-52841
(P2012-52841A)

(43) 公開日 平成24年3月15日(2012.3.15)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 T 1/20 (2006.01)	GO 1 T 1/20 G	2 G 0 8 8
GO 1 T 3/06 (2006.01)	GO 1 T 1/20 F	
	GO 1 T 1/20 L	
	GO 1 T 3/06	

審査請求 未請求 請求項の数 7 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2010-193699 (P2010-193699)	(71) 出願人	504151365 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 茨城県つくば市大穂1番地1
(22) 出願日	平成22年8月31日 (2010.8.31)	(74) 代理人	100100549 弁理士 川口 嘉之
		(74) 代理人	100090516 弁理士 松倉 秀実
		(74) 代理人	100113608 弁理士 平川 明
		(74) 代理人	100138357 弁理士 矢澤 広伸

最終頁に続く

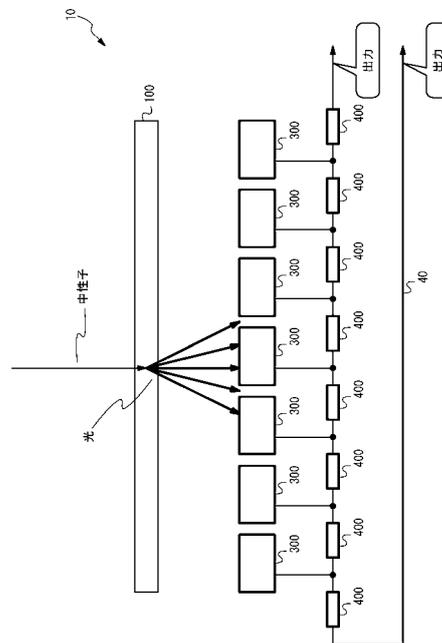
(54) 【発明の名称】 放射線検出装置

(57) 【要約】

【課題】 光検出器が出力する雑音を低減する放射線検出装置を提供する。

【解決手段】 放射線が入射する入射面を有し、入射した放射線から光を生成するシンチレータと、前記生成された光を検出する1次元状に配列された複数の光検出器と、所定の抵抗値部分を複数回延伸し、前記抵抗値部分ごとに分岐線を接続可能な線状抵抗部とを備え、前記光検出器は、光から電気信号を生成する光検出素子、及び、前記電気信号中で基準信号強度に達しない信号成分を抑圧し、前記基準信号強度に達する信号成分を抽出する信号抽出回路を有し、前記1次元状に配列された複数の光検出器に含まれるそれぞれの信号抽出回路の出力信号が前記分岐線を通じて前記線状抵抗部に入力され、前記1次元状に配列された光検出器の位置が、それぞれの光検出器の信号抽出回路の出力信号が入力される前記分岐線の接続位置における前記線状抵抗部の抵抗値に対応付けられる放射線検出装置とする。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

放射線が入射する入射面を有し、入射した放射線から光を生成するシンチレータと、前記生成された光を検出する 1 次元状に配列された複数の光検出器と、所定の抵抗値部分を複数回延伸し、前記抵抗値部分ごとに分岐線を接続可能な線状抵抗部とを備え、

前記光検出器は、光から電気信号を生成する光検出素子、及び、前記電気信号中で基準信号強度に達しない信号成分を抑圧し、前記基準信号強度に達する信号成分を抽出する信号抽出回路を有し、

前記 1 次元状に配列された複数の光検出器に含まれるそれぞれの信号抽出回路の出力信号が前記分岐線を通じて前記線状抵抗部に入力され、前記 1 次元状に配列された光検出器の位置が、それぞれの光検出器の信号抽出回路の出力信号が入力される前記分岐線の接続位置における前記線状抵抗部の抵抗値に対応付けられる放射線検出装置。

【請求項 2】

前記信号抽出回路は、前記基準信号強度をバイポーラトランジスタのベースバイアス信号で制御する請求項 1 に記載の放射線検出装置。

【請求項 3】

前記信号抽出回路は、前記基準信号強度をユニポーラトランジスタのゲートバイアス信号で制御する請求項 1 に記載の放射線検出装置。

【請求項 4】

前記信号抽出回路は、前記基準信号強度を比較回路の参照信号で制御する請求項 1 に記載の放射線検出装置。

【請求項 5】

前記信号抽出回路は、前記電気信号が入力される第 1 の入力端子と基準信号が入力される第 2 の入力端子とを加算する加算回路を含み、前記基準信号強度を前記基準信号で制御する請求項 1 に記載の放射線検出装置。

【請求項 6】

前記信号抽出回路は、前記線状抵抗部からの信号の入力を抑圧する回路を有する請求項 1 から 5 のいずれか 1 項に記載の放射線検出装置。

【請求項 7】

前記シンチレータの前記入射面と対向する面に設置され、前記シンチレータが生成した光を透過する光透過板を含む請求項 1 から 6 のいずれか 1 項に記載の放射線検出装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、放射線を検出する放射線検出装置に関する。

【背景技術】

【0002】

放射線を検出する放射線検出装置として、シンチレータ及び光検出器が使用されるものがある。シンチレータは、シンチレーション現象により、放射線を光に変換する。放射線検出装置は、シンチレータで変換された光を光検出器で検出することにより、入射される放射線を検出する。放射線には、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、X 線、中性子線、荷電粒子線等が含まれる。

【0003】

図 1 は、放射線検出装置に入射される放射線の例を示す図である。図 1 の放射線検出装置 3 は、放射線シンチレータ 1 及び光検出器 2 を含む。放射線シンチレータ 1 は、放射線を光に変換する。光検出器 2 は、放射線シンチレータ 1 で変換された光を検出する。放射線検出装置 3 に入射された放射線は、放射線シンチレータ 1 で光に変換され、変換された光が光検出器 2 で検出される。

【0004】

10

20

30

40

50

また、シンチレータで変換された光を複数の光検出器で検出することにより、放射線が入射した位置を特定できる放射線検出器が存在する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2008-8675号公報

【特許文献2】特開2009-121929号公報

【特許文献3】特開2009-25308号公報

【特許文献4】特開2004-264078号公報

【特許文献5】特開昭61-225683号公報

【特許文献6】特開2000-180551号公報

【特許文献7】特開平6-347557号公報

【特許文献8】特開昭60-73484号公報

【特許文献9】特開昭60-135883号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

放射線検出器において、シンチレータで変換された光によって放射線を検出する際、複数の光検出器を使用し、電荷分割法等により、放射線が入射された位置を特定することができる。また、広い領域で位置を検出する場合、より多くの光検出器を使用することがある。しかしながら、複数の光検出器を使用すると、光検出器の数に比例して発生する定常的なノイズが大きくなる。一方、光検出器に入射する光の総量は、光検出器の数を増やしても変化しない。よって、結果として、光検出器を増やすことにより、放射線検出器におけるS/N比(Signal to Noise ratio)が低下する。よって、各光検出器が出力する雑音を低減することが求められる。

【0007】

本発明は、光検出器が出力する雑音を低減する放射線検出装置を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

開示の放射線検出装置は、上記課題を解決するために、以下の手段を採用する。

【0009】

即ち、第1の態様は、

放射線が入射する入射面を有し、入射した放射線から光を生成するシンチレータと、前記生成された光を検出する1次元状に配列された複数の光検出器と、

所定の抵抗値部分を複数回延伸し、前記抵抗値部分ごとに分岐線を接続可能な線状抵抗部とを備え、

前記光検出器は、光から電気信号を生成する光検出素子、及び、前記電気信号中で基準信号強度に達しない信号成分を抑圧し、前記基準信号強度に達する信号成分を抽出する信号抽出回路を有し、

前記1次元状に配列された複数の光検出器に含まれるそれぞれの信号抽出回路の出力信号が前記分岐線を通じて前記線状抵抗部に入力され、前記1次元状に配列された光検出器の位置が、それぞれの光検出器の信号抽出回路の出力信号が入力される前記分岐線の接続位置における前記線状抵抗部の抵抗値に対応付けられる放射線検出装置とする。

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、光検出器が出力する雑音を低減する放射線検出装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

10

20

30

40

50

【図 1】図 1 は、放射線検出装置に入射される放射線の例を示す図である。

【図 2】図 2 は、中性子検出装置の構成例 (1) を示す図である。

【図 3】図 3 は、中性子検出装置の構成例 (2) を示す図である。

【図 4】図 4 は、中性子検出装置の光検出器及び抵抗の例を示す図である。

【図 5】図 5 は、中性子検出装置の光検出器の例 (1) を示す図である。

【図 6】図 6 は、中性子検出装置の光検出器の例 (2) を示す図である。

【図 7】図 7 は、電荷分割法により位置を算出した結果の例を示す図である。

【図 8】図 8 は、図 7 のグラフのバイアス電圧とピーク半値幅との関係の例を示す図である。

【図 9】図 9 は、中性子検出装置の光検出器の例 (3) を示す図である。

10

【図 10】図 10 は、中性子検出装置の光検出器の例 (4) を示す図である。

【図 11】図 11 は、中性子検出装置の光検出器の例 (5) を示す図である。

【図 12】図 12 は、中性子検出装置の光検出器の例 (6) を示す図である。

【図 13】図 13 は、中性子検出装置の光検出器の例 (7) を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下、図面を参照して実施形態について説明する。実施形態の構成は例示であり、開示の実施形態の構成に限定されない。

【0013】

ここでは、主として、中性子を検出する放射線検出装置、即ち、中性子検出装置について説明する。

20

【0014】

〔実施形態 1〕

(構成例)

図 2 は、中性子検出装置の例 (1) を示す図である。図 2 の例では、中性子検出装置 10 は、中性子シンチレータ 100、複数の光検出器 300、複数の抵抗 400 を含む。

【0015】

図 2 の中性子検出装置 10 は、平板状の中性子シンチレータ 100 と、中性子シンチレータ 100 の一方の面側に配置された光検出器 300 と、抵抗 400 とを有する。中性子シンチレータ 100 の光検出器 300 が配置された面と反対側の面に検出対象の中性子が入射される。

30

【0016】

中性子シンチレータ 100 は、中性子を光に変換する媒体である。中性子シンチレータ 100 として、例えば、ZnS、Li ガラス、LBO 単結晶が使用されうる。中性子シンチレータ 100 は、これらに限定されるものではない。

【0017】

光検出器 300 は、中性子シンチレータ 100 で変換された光を検出する。光検出器 300 は、入射された光を電気信号等に変換して出力する。光検出器 300 は、入射された光の量に依存した電気信号等を出力する。光検出器 300 は、例えば、入射された光の量に比例した電荷を出力する。光検出器 300 の光検出素子として、例えば、MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) といった半導体光検出器、光電子増倍管が使用されうる。中性子検出装置 10 には、複数の光検出器 300 が設けられてもよい。この複数の光検出器 300 は、直線上に設けられる。即ち、この複数の光検出器 300 は、一次元状に配置される。複数の光検出器 300 を用いることにより、中性子が入射された位置を算出することが可能となる。光検出器 300 から離れた位置に放射線が入射されると、当該光検出器 300 で検出される光は弱くなり、当該光検出器 300 からの出力は小さくなる。また、光検出器 300 から近い位置に放射線が入射されると、当該光検出器 300 で検出される光は強くなり、当該光検出器 300 からの出力は大きくなる。

40

【0018】

各光検出器 300 の出力は、抵抗 400 を直列に接続した電荷分割回路 40 に接続され

50

る。各抵抗400の抵抗値は、等しい抵抗値である。図2のように、電荷分割回路40の中の隣接する2つの抵抗400の接続部には、各光検出器300の検出信号が入力される。電荷分割回路40の中の隣接する2つの抵抗400の接続部は、分岐線を通じて、光検出器300に接続される。図2のように、電荷分割回路40の直列抵抗間に各光検出器300を接続することを「直列抵抗回路に光検出器300を抵抗分割して接続する」という。電荷分割回路40は、所定の抵抗値部分を複数回延伸し、これらの抵抗値部分ごとに光検出器300と接続する分岐線を接続可能な線状抵抗部とすることができる。

【0019】

各光検出器300の出力は、電荷分割回路40で抵抗分割される。抵抗400は、電荷分割用抵抗である。図2のように、電荷分割回路40の両端から出力が得られる。これらの出力に基づいて、電荷分割法等により、中性子が入射された位置を算出することができる。電荷分割回路40の両端には、例えば、電荷増幅器が接続される。電荷増幅器の出力は、例えば、A/D (Analog to Digital) 変換器等により、デジタルデータに変換されてコンピュータに入力される。当該コンピュータが、電荷分割法等により、中性子が入射された位置を算出する。

10

【0020】

図3は、中性子検出装置の例(2)を示す図である。図3の例では、中性子検出装置10は、中性子シンチレータ100、光透過板200、複数の光検出器300、複数の抵抗400を含む。ここでは、主に、図2の中性子検出装置10と異なる点について説明する。

20

【0021】

図3の中性子検出装置10は、平板状の中性子シンチレータ100と、中性子シンチレータ100の一方の面側に配置された平板状の光透過板200と、光透過板200の中性子シンチレータ100が配置された面と反対側の面側に配置された光検出器300と、抵抗400とを有する。中性子シンチレータ100の透過板200が配置された面と反対側の面に検出対象の中性子が入射される。

【0022】

中性子シンチレータ100と光透過板200とは、接触してもよい。また、光透過板200と光検出器300とは、接触してもよい。ここで、光透過板200は、入射された光を拡散する形態(例えば、光拡散ガラス)としてもよい。光透過板200が光拡散ガラスであるとき、光透過板200に入射された光は、光透過板200によって拡散される。光が拡散されると、光が、より多くの光検出器300によって、検出され易くなる。また、中性子を吸収するホウケイ酸ガラスを光拡散ガラスにすることで、光透過板200は、光を拡散しつつ、中性子を吸収することができる。光透過板200の厚さは、光検出器300の設置間隔と同程度以上にする。光を拡散する光透過板200の厚さを厚くすると、光が拡散された位置から光検出器300までの距離が長くなるため、光検出器に入射される光は弱くなる。一般に、光の強度は、光源からの距離の2乗に反比例する。しかし、光が拡散された位置から光検出器300までの距離が長くなると、光が拡散される範囲が大きくなり、光を検出する光検出器300の数が増える。多くの光検出器300で光を検出することで、光が入射された位置を算出する際の位置の精度が上がる。例えば、光透過板200の厚さが光検出器300の設置間隔と同じである場合、光透過板200の入射側の面で光が90度に拡散されたとすると、2個または3個の光検出器300によって、光が検出される。よって、光が複数の光検出器300で検出され、かつ、光検出器300に入射される光が弱くならないように、例えば、光透過板200の厚さは、光検出器300の設置間隔と同程度が望ましい。

30

40

【0023】

光透過板200は、入射される光を通過させる。また、光透過板200は、入射される中性子を吸収する。光透過板200として、例えば、ホウケイ酸ガラスが使用される。ホウケイ酸ガラスは、ボロン入りのガラスである。ボロン入りガラスは、中性子を吸収し得る。透過板200の厚さは、入射される中性子の量と、光検出器300に影響を及ぼす中

50

性子の量とによって決定されうる。光透過板 200 は、ホウケイ酸ガラスに限定されない。中性子シンチレータ 100 で変換されなかった中性子（中性子シンチレータ 100 を透過した中性子）は、中性子を吸収する光透過板 200 に吸収される。中性子シンチレータ 100 を透過した中性子が光透過板 200 に吸収されるので、光検出器 300 に入射される中性子が低減する。光透過板 200 は、光検出器 300 を中性子から保護する。

【0024】

中性子シンチレータ 100 で変換された光が拡散されず 1 つの光検出器 300 のみで光が検出される場合、光が入射された位置（中性子が照射された位置）を算出する際の位置分解能は、光検出器 300 の設置間隔程度に留まる。一方、光が拡散され複数の光検出器 300 で光が検出される場合、光が入射された位置の位置分解能は、光検出器 300 の設置間隔よりも小さくなる。複数の光検出器 300 で光が検出される場合、光検出器 300 間をそれぞれの出力電荷で按分した値により、位置を特定できるからである。

10

【0025】

電荷分割法

電荷分割法により、放射線が入射された位置を検出する方法について説明する。

【0026】

図 4 は、中性子検出装置の光検出器及び抵抗の例を示す図である。図 4 のように、複数の光検出器 300 が直線上に等間隔に配置される。光検出器 300 の間隔を、距離 W とする。光検出器 300 が配置される直線上で、一方の端の光検出器 300 の位置から外側に距離 W 離れた位置（位置 0）から、他方の端の光検出器 300 の位置から外側に距離 W 離れた位置（位置 L）までを距離 L とする。光検出器 300 の位置とは、例えば、光検出器 300 の光入射面の中心位置をいう。各光検出器 300 の出力は、電荷分割回路で抵抗分割される。電荷分割回路 40 の両端から出力電荷が得られる。

20

【0027】

光検出器 300 に光が入射されると、電荷が出力される。光検出器 300 からの出力電荷（電荷 Q_0 とする）は、当該光検出器 300 の位置から両端への抵抗値の比で分配される。ここで、一方の端で得られる出力電荷を電荷 Q_a 、他方の端で得られる出力電荷を電荷 Q_b とする。

【0028】

また、電荷 Q_0 が出力された光検出器 300 から一方の端までの抵抗値の和を R_1 、他方の端までの抵抗値の和を R_2 とする。一方の端で得られる電荷 Q_a は、次のように表される。

30

【0029】

【数 1】

$$Q_a = Q_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

同様に、他方の端で得られる電荷 Q_b は、次のように表される。

【0030】

【数 2】

$$Q_b = Q_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

40

複数の光検出器 300 で光が同時に検出された場合は、それぞれの光検出器 300 からの出力電荷が、両端への抵抗値の比で分配される。両端では、それぞれの光検出器 300 からの出力電荷の和として、電荷 Q_a 及び電荷 Q_b が得られる。

【0031】

光が散乱した場合、光検出器 300 は、発光位置に近いほど、強い光を検出する。光検出器 300 は、光の強度に応じた電荷を出力する。よって、複数の光検出器 300 で光が検出される場合、光検出器 300 の間隔よりも小さい値の位置分解能で、光が入射された

50

位置を算出できる。

【 0 0 3 2 】

得られた電荷 Q_a 及び電荷 Q_b から、光が入射された位置 x は、次のように表される。
位置 x は、光検出器 300 が配置される直線状の点である。

【 0 0 3 3 】

【 数 3 】

$$\frac{x}{L} = \frac{Q_b}{Q_a + Q_b}$$

ここで、電荷 Q_a 及び電荷 Q_b にそれぞれ雑音 n が含まれているとすると、位置 x は、
次のように表される。

【 0 0 3 4 】

【 数 4 】

$$\frac{x}{L} = \frac{Q_b + n}{Q_a + Q_b + \sqrt{2n}}$$

ここで、位置 x を求めるには、雑音 n が次の条件を満たさなければならない。

【 0 0 3 5 】

【 数 5 】

$$Q_a + Q_b \gg \sqrt{2n}$$

この式を満たさないときは、信号が雑音に埋もれ、位置を正確に算出できないからである。

【 0 0 3 6 】

このとき、位置 x は次のように表せる。

【 0 0 3 7 】

【 数 6 】

$$\frac{x}{L} = \frac{Q_b + n}{Q_a + Q_b + \sqrt{2n}} = \frac{\frac{Q_b + n}{Q_a + Q_b}}{\frac{Q_a + Q_b + \sqrt{2n}}{Q_a + Q_b}} = \frac{\frac{Q_b + n}{Q_a + Q_b}}{1 + \frac{\sqrt{2n}}{Q_a + Q_b}}$$

よって、位置 x は、次の式のように近似できる。

【 0 0 3 8 】

【 数 7 】

$$x \approx \frac{Q_b + n}{Q_a + Q_b} L = \frac{Q_b L}{Q_a + Q_b} + \frac{nL}{Q_a + Q_b}$$

ここで、第 2 項の $nL / (Q_a + Q_b)$ が、おおよその位置のゆらぎとなる。光検出器 300 の光検出デバイスの暗電流に基づく信号は、雑音 n の原因の 1 つである。

【 0 0 3 9 】

《 光検出器 (1) 》

図 5 は、中性子検出装置の光検出器の例 (1) を示す図である。光検出器 300 は、入射された光の信号を抽出する信号抽出回路を含む。ここでは、光検出器 300 の光検出デバイスとして、MPPC が使用される。図 5 の光検出器 300 は、可変抵抗 VR01、抵抗 R01、抵抗 R02、抵抗 R03、コンデンサ C01、コンデンサ C02、及び、MPPC を含む。光検出器 300 は、MPPC に光が入射されることにより光を検出する。図

10

20

30

40

50

5 の出力が、図 2 等の電荷分割回路 40 に接続される。

【0040】

抵抗 400 に効率よく電荷を供給するために、抵抗 R03 の抵抗値を暗電流を流すのに支障がない範囲でできるだけ大きな値にする。電荷分割回路 40 の抵抗値は、全体で 10 k 程度になる値を使用する。電荷分割回路 40 の抵抗値が小さいと、信号が熱雑音に対して相対的に小さくなり、よい SN 比が得られない。熱雑音は、抵抗 400 全体の抵抗値の平方根の逆数に比例する。よって、抵抗値が大きい方が、熱雑音が小さくなる。従って、電荷分割回路 40 の抵抗値が全体で 10 k 程度になるので、抵抗 R03 の抵抗値は、10 k ~ 100 k 程度にする。

【0041】

可変抵抗 VR01 を調整することにより、MPPC に印加する電圧の微調整ができる。抵抗 R02 の抵抗値と可変抵抗 VR01 の抵抗値との比により、MPPC に印加する電圧の調整範囲が決まる。例えば、抵抗 R01 の抵抗値が 4.7 k、抵抗 R02 の抵抗値が 500 k、可変抵抗 VR01 の最大抵抗値が 10 k、コンデンサ C01 の静電容量が 0.1 μF であるとする、抵抗 R02 の抵抗値と可変抵抗 VR01 の抵抗値との比により、2% の範囲で MPPC に印加する電圧の調整ができる。多くの MPPC の動作電圧が 70 V 近辺であり、そのばらつきが 1 V 以内であるので、抵抗 R02 の抵抗値と可変抵抗 VR01 とで、十分調整できる。例えば、基準となる LED (Light Emitting Diode) 光源等を使用し、各光検出器 300 において、出力値が一致するように可変抵抗 VR01 が調整される。

【0042】

光検出器 300 には、電源電圧 V0 が印加される。MPPC に光が入射されると、瞬間的に、抵抗 R03 に電位が発生する。この電位による電荷は、コンデンサ C02 を介して、光検出器 300 の出力パルスとして出力される。コンデンサ C02 は、信号の直流成分をカットする。

【0043】

《光検出器(2)》

図 6 は、中性子検出装置の光検出器の例(2)を示す図である。ここでは、光検出器 300 は、暗電流雑音を除去するために、バイポーラトランジスタを含む。図 6 の光検出器 300 は、可変抵抗 VR11、抵抗 R11、抵抗 R12、抵抗 R13、コンデンサ C11、MPPC を含む。図 6 の光検出器 300 は、さらに、抵抗 R14、抵抗 R15、コンデンサ C12、コンデンサ C13、及び、トランジスタ Q11 を含む。光検出器 300 は、MPPC に光が入射されることにより光を検出する。図 6 の出力が、図 2 等の電荷分割回路 40 に接続される。

【0044】

図 6 の光検出器 300 の、可変抵抗 VR11、抵抗 R11、抵抗 R12、抵抗 R13、コンデンサ C11、MPPC は、それぞれ、図 5 の光検出器 300 の、可変抵抗 VR01、抵抗 R01、抵抗 R02、抵抗 R03、コンデンサ C01、MPPC と同様に動作する。

【0045】

図 6 の光検出器 300 は、出力の増幅にバイポーラトランジスタ Q11 を使用する。図 6 のように、バイポーラトランジスタ Q11 のエミッタに出力抵抗 R15 が接続され、エミッタフォロワが形成される。エミッタフォロワは、増幅度 1 の回路として知られている。また、バイアス電圧 Vb をトランジスタ Q11 の順方向電圧付近に調節する。暗電流によるベースエミッタ間の電圧降下がバイポーラトランジスタがオンになる電圧を超えなければ、暗電流が増幅されないようになる。図 6 の光検出器 300 の増幅回路は、トランジスタの D 級増幅回路に相当する。図 6 の光検出器 300 の増幅回路は、光を検出した MPPC の信号を通過するようにする。即ち、図 6 の光検出器 300 の増幅回路は、暗電流雑音に基づく信号を出力しないようにする。

【0046】

10

20

30

40

50

ここで、具体例を示す。抵抗の抵抗値、コンデンサの静電容量、トランジスタの特性等は、ここに記載されるものに限定されるものではない。可変抵抗 $V R 1 1$ を $1 0 k$ 、抵抗 $R 1 1$ を $4 . 7 k$ 、抵抗 $R 1 2$ を $4 7 0 k$ 、抵抗 $R 1 3$ を $4 7 k$ 、抵抗 $R 1 4$ を $4 7 0 k$ 、抵抗 $R 1 5$ を $4 . 7 k$ 、コンデンサ $C 1 1$ を $0 . 1 \mu F$ 、コンデンサ $C 1 2$ を $2 2 p F$ 、コンデンサ $C 1 3$ を $2 2 0 p F$ とする。また、トランジスタ $Q 1 1$ の特性として、ベースエミッタ電圧 $V_{BE} = 5 0 0 \sim 6 0 0 m V$ で、コレクタ電流 $I_C = 0$ になるとする。また、トランジスタ $Q 1 1$ は、 $h_{FE} = 1 0 0$ とする。よって、バイアス電圧 $V_b = 5 0 0 \sim 6 0 0 m V$ となるように調整し、MPPCが光を検出していないときに、光検出器 $3 0 0$ が暗電流雑音に基づく信号を出力しないようにする。

【0047】

このとき、仮に、MPPCが光を検出して、抵抗 $R 1 3$ に $1 V$ の電位が、 $1 \mu s$ 間、発生したとする。すると、コンデンサ $C 1 2$ を通じて最大 $2 2 \mu A$ の電流がトランジスタ $Q 1 1$ のベース端子に流せる。また、トランジスタ $Q 1 1$ の h_{FE} が $1 0 0$ である場合には、抵抗 $R 1 5$ には、最大 $2 m A$ の電流が流れる。しかし、抵抗 $R 1 5$ は $4 . 7 k$ であるのでコンデンサ $C 1 2$ からの入力電圧 $1 V$ による電流は $0 . 2 m A$ で飽和し、ベース電流 I_B は $2 \mu A$ 程度のパルス信号に抑えられる。すると、バイポーラトランジスタ $Q 1 1$ がエミッタフォロワとして増幅度 1 で、入力信号(抵抗 $R 1 3$ の電圧)を増幅し、光検出器 $3 0 0$ は、抵抗 $R 1 3$ より若干低い $1 V$ 弱の電位を出力する。結果として、MPPCが光を検出していないときの暗電流による雑音が除去される。従って、複数の光検出器 $3 0 0$ をつないでも、ノイズが増大しない。

【0048】

図7は、電荷分割法により位置を算出した結果の例を示す図である。図7のグラフは、図6の光検出器 $3 0 0$ を有する中性子検出装置 $1 0$ に、実際に基準となるLED光源による光を照射し、図4の出力電荷 Q_a 及び Q_b を所定時間毎に取得し、位置を電荷分割法により算出し、チャンネル毎に(位置毎に)カウント(計数)したものである。ここでは、 $1 c m$ あたり $5 9$ チャンネルとしている。つまり、光検出器 $3 0 0$ が配置される直線を $1 / 5 9 c m$ 毎のチャンネルに分割して、チャンネル毎に位置をカウントしている。この分割の幅は、自由に設定できる。ここでは、 Q_a と Q_b との和が閾値としての所定の値を超えたもののみカウントしている。この所定の値は、光検出器 $3 0 0$ が光を検出しているとみなされる値のうち最低の値とする。図7のグラフでは、バイアス電圧 V_b が、 $4 6 2 m V$ 、 $5 0 9 m V$ 、 $5 1 8 m V$ 、 $5 8 9 m V$ 、 $6 2 4 m V$ 、 $8 1 7 m V$ 、 $1 1 3 8 m V$ の場合について測定している。バイアス電圧 V_b は、バイポーラトランジスタ $Q 1 1$ のベースバイアス信号に相当する。各バイアス電圧 V_b の測定において、各チャンネルのカウント数の合計が、所定のカウント数になるまで、測定している。また、ここでは、中性子検出装置 $1 0$ は、 $1 6$ 個の光検出器 $3 0 0$ (MPPC)を有する。MPPCは、 $5 m m$ 間隔で直線上に配置されている。

【0049】

図7の横軸はチャンネルであり、縦軸はカウント数である。チャンネルは、光検出器 $3 0 0$ が配置される直線上の距離に対応する。図7のグラフは、 $6 2 0 c h$ から $6 6 0 c h$ までを抜粋したものである。 $6 2 0 c h$ から $6 6 0 c h$ までで、ほぼ $7 m m$ である。

【0050】

バイアス電圧 V_b が大きい場合、トランジスタ $Q 1 1$ のベース電位が上がり、小さな信号であっても増幅される。即ち、バイアス電圧 V_b が大きい場合、MPPCが光を検出していない場合であっても、暗電流による電位が増幅される。

【0051】

バイアス電圧 V_b が小さい場合、トランジスタ $Q 1 1$ のベース電位が下がり、小さな信号は増幅されない。即ち、バイアス電圧 V_b が小さい場合、暗電流による電位は増幅されない。しかし、バイアス電圧 V_b を低くしすぎると、MPPCが検出した弱い光の信号も検出されなくなる。

【0052】

10

20

30

40

50

例えば、図7のグラフで、バイアス電圧 V_b が509 mVである場合、635 ch付近のピーク近傍以外のチャンネルでは、ほとんどカウントされていない。これは、光が検出されない位置のMPPCの暗電流の影響をほぼ除去していることを意味する。バイアス電圧 V_b が509 mVである場合、及び、462 mVである場合も同様に、光が検出されない位置のMPPCの暗電流の影響をほぼ除去している。

【0053】

また、バイアス電圧 V_b が462 mVである場合、バイアス電圧が低すぎるため、MPPCが検出した弱い光の信号が検出されなくなる。弱い光を検出した光検出器300の信号が出力されない。また、検出された強い光の信号も若干弱められて出力される。これらの影響により、光が入射された位置を算出する際の位置の精度が下がる。

10

【0054】

一方、バイアス電圧 V_b が1138 mVである場合、ブロードなピークになっており、ピーク近傍以外のチャンネルでも、カウントされている。ピークのカウント数は、バイアス電圧 V_b が509 mVの場合と比べて、小さくなっている。バイアス電圧 V_b が高いため、各光検出器300でMPPCでの暗電流に基づく小さな信号が除去されずに出力される。この信号が、位置を算出する際のノイズになっている。

【0055】

図8は、図7のグラフのバイアス電圧とピーク半値幅との関係の例を示す図である。バイアス電圧 V_b が509 mVである場合、最もピーク半値幅が小さい。このピーク半値幅は、図6の光検出器300を使用する中性子検出装置10の位置分解能に相当する。即ち、本測定で用いた中性子検出装置10では、バイアス電圧 V_b を509 mV程度にすることが望ましい。バイアス電圧 V_b を509 mV程度にすることで、光検出器300は、MPPCの暗電流の影響を除去でき、かつ、MPPCで検出した弱い光の信号を出力できる。よって、中性子検出装置10は、光が入射された位置（放射線が入射された位置）を精度よく算出することができる。ただし、以上の値は、測定例であり、適切なバイアス電圧 V_b は、暗電流値、素子毎、素子を製造するロット毎に異なる。

20

【0056】

《光検出器(3)》

図9は、中性子検出装置の光検出器の例(3)を示す図である。ここでは、光検出器300は、暗電流雑音を除去するために、ユニポーラトランジスタ(FET: Field Effect Transistor、電界効果トランジスタ)を含む。図9の光検出器300は、可変抵抗 V_R 21、抵抗 R 21、抵抗 R 22、抵抗 R 23、コンデンサ C 21、MPPCを含む。図9の光検出器300は、さらに、抵抗 R 24、抵抗 R 25、コンデンサ C 22、コンデンサ C 23、及び、トランジスタ Q 21を含む。光検出器300は、MPPCに光が入射されることにより光を検出する。図9の出力が、図2等の電荷分割回路40に接続される。

30

【0057】

図9の光検出器300の、可変抵抗 V_R 21、抵抗 R 21、抵抗 R 22、抵抗 R 23、コンデンサ C 21、MPPCは、それぞれ、図5の光検出器300の、可変抵抗 V_R 01、抵抗 R 01、抵抗 R 02、抵抗 R 03、コンデンサ C 01、MPPCと同様に動作する。

40

【0058】

図9の光検出器300は、出力の増幅にユニポーラトランジスタ Q 21を使用する。図9のようにトランジスタ Q 21のソースに出力抵抗 R 25が接続され、ソースフォロワが形成されている。ソースフォロワは増幅度1の増幅回路として知られている。また、バイアス電圧 V_b をトランジスタ Q 21のカットオフ電圧付近に調節し、暗電流雑音がユニポーラトランジスタ Q 21の閾値 V_{th} を超えないようにバイアス電圧 V_b を調節し、暗電流が増幅されないようにする。バイアス電圧 V_b は、ユニポーラトランジスタ Q 21のゲートバイアス信号に相当する。図9の光検出器300の増幅回路は、トランジスタのD級増幅回路に相当する。図9の光検出器300の増幅回路は、光を検出したMPPCの信号のみを通過するようにする。即ち、図9の光検出器300の増幅回路は、暗電流雑音に基

50

づく信号を出力しないようにする。

【0059】

ここで、具体例を示す。抵抗の抵抗値、コンデンサの静電容量、トランジスタの特性等は、ここに記載されるものに限定されるものではない。可変抵抗 $V R 2 1$ を $10 k$ 、抵抗 $R 2 1$ を $4.7 k$ 、抵抗 $R 2 2$ を $470 k$ 、抵抗 $R 2 3$ を $47 k$ 、抵抗 $R 2 4$ を $470 k$ 、抵抗 $R 2 5$ を $4.7 k$ 、コンデンサ $C 2 1$ を $0.1 \mu F$ 、コンデンサ $C 2 2$ を $22 p F$ 、コンデンサ $C 2 3$ を $220 p F$ とする。また、トランジスタ $Q 2 1$ の特性として、ゲートソース電圧 $V_{GS} = -600 mV$ 以下で、ドレイン電流 $I_D = 0$ になるとする。よって、バイアス電圧 $V_b = -500 \sim -600 mV$ となるように調整し、MPPCが光を検出していないときに、暗電流雑音を感じないようにする。

10

【0060】

このとき、仮に、MPPCが光を検出して、抵抗 $R 2 3$ に $1 V$ の電位が、 $1 \mu s$ 間、発生したとする。すると、コンデンサ $C 2 2$ を通じて、トランジスタ $Q 2 1$ のゲート端子に $1 V$ 程度の電位が発生する。また、トランジスタ $Q 2 1$ にはドレイン電流が流れ、抵抗 $R 2 5$ には、電位が発生し、相応のゲートソース電圧 V_{GS} を保つ。即ち、トランジスタ $Q 2 1$ は、増幅度 1 のソースフォロワとして動作し、光検出器 300 は、抵抗 $R 2 3$ より若干低い $1 V$ 弱の電位を出力する。結果として、暗電流による雑音だけが除去される。従って、複数の光検出器 300 をつないでも、ノイズが増大しない。

【0061】

《光検出器(4)》

図10は、中性子検出装置の光検出器の例(4)を示す図である。ここでは、光検出器 300 は、暗電流雑音を除去するために、コンパレータを含む。図10の光検出器 300 は、可変抵抗 $V R 3 1$ 、抵抗 $R 3 1$ 、抵抗 $R 3 2$ 、抵抗 $R 3 3$ 、コンデンサ $C 3 1$ 、MPPCを含む。図10の光検出器 300 は、さらに、抵抗 $R 3 4$ 、コンパレータ 31 、スイッチ $S W 3 1$ 、及び、コンデンサ $C 3 2$ を含む。光検出器 300 は、MPPCに光が入射されることにより光を検出する。図10の出力が、図2等の電荷分割回路40に接続される。

20

【0062】

図10の光検出器 300 の、可変抵抗 $V R 3 1$ 、抵抗 $R 3 1$ 、抵抗 $R 3 2$ 、抵抗 $R 3 3$ 、コンデンサ $C 3 1$ 、MPPCは、それぞれ、図5の光検出器 300 の、可変抵抗 $V R 0 1$ 、抵抗 $R 0 1$ 、抵抗 $R 0 2$ 、抵抗 $R 0 3$ 、コンデンサ $C 0 1$ 、MPPCと同様に動作する。

30

【0063】

光検出器 300 には、電源電圧 V_0 が印加される。MPPCに光が入射されると、瞬間的に、抵抗 $R 3 3$ に電位が発生する。コンパレータ $C P 3 1$ は、所定の電圧 V_b と、抵抗 $R 3 3$ に発生した電位とを比較する。コンパレータ $C P 3 1$ は、比較回路の1つである。電圧 V_b は、あらかじめ設定される一定の値である。電圧 V_b は、比較回路の参照信号の一例である。コンパレータ $C P 3 1$ は、抵抗 $R 3 3$ に発生した電位が、電圧 V_b より大きい場合、スイッチ $S W 3 1$ を導通する。スイッチ $S W 3 1$ が導通すると、MPPCに光が入射されたことによる電位による電荷が、コンデンサ $C 3 2$ を介して、光検出器 300 の出力電荷として出力される。コンデンサ $C 3 2$ は、信号の直流成分をカットする。

40

【0064】

また、コンパレータ $C P 3 1$ は、抵抗 $R 3 3$ に発生した電位が、電圧 V_b より小さい場合、スイッチ $S W 3 1$ を導通させない。なお、電圧 V_b は、直流であるため、コンデンサ $C 3 2$ でカットされる。よって、光検出器 300 は、出力電荷として、ほぼ0を出力する。

【0065】

ここで、所定の電圧 V_b は、MPPCの暗電流によって、抵抗 $R 3 3$ に発生する電圧より高い値に設定する。この値は、実験的、経験的に決定されればよい。これにより、MPPCの暗電流による雑音が、出力されない。

50

【 0 0 6 6 】

《 光検出器 (5) 》

図 1 1 は、中性子検出装置の光検出器の例 (5) を示す図である。ここでは、光検出器 3 0 0 は、暗電流雑音を除去するために、オペアンプを含む。図 1 1 の光検出器 3 0 0 は、可変抵抗 $V R 4 1$ 、抵抗 $R 4 1$ 、抵抗 $R 4 2$ 、抵抗 $R 4 3$ 、コンデンサ $C 4 1$ 、M P P C を含む。図 1 1 の光検出器 3 0 0 は、さらに、抵抗 $R 4 4$ 、抵抗 $R 4 5$ 、コンデンサ $C 4 2$ 、ダイオード $D 4 1$ 、及び、オペアンプ $I C 4 1$ を含む。抵抗 $R 4 5$ は、フィードバック抵抗である。光検出器 3 0 0 は、M P P C に光が入射されることにより光を検出する。図 1 1 の出力が、図 2 等の電荷分割回路 4 0 に接続される。

【 0 0 6 7 】

図 1 1 の光検出器 3 0 0 の、可変抵抗 $V R 4 1$ 、抵抗 $R 4 1$ 、抵抗 $R 4 2$ 、抵抗 $R 4 3$ 、コンデンサ $C 4 1$ 、M P P C は、それぞれ、図 5 の光検出器 3 0 0 の、可変抵抗 $V R 0 1$ 、抵抗 $R 0 1$ 、抵抗 $R 0 2$ 、抵抗 $R 0 3$ 、コンデンサ $C 0 1$ 、M P P C と同様に動作する。

【 0 0 6 8 】

図 1 1 の光検出器 3 0 0 は、出力の増幅にオペアンプ $I C 4 1$ を使用し、フィードバック抵抗 $R 4 5$ と並列にダイオード $D 4 1$ を接続して雑音を除去する。また、バイアス電圧 $V b$ をダイオード $D 4 1$ のカットオフ電圧付近に調節し、暗電流雑音を超える信号でなければ、増幅されないようにする。オペアンプ $I C 4 1$ を使用することにより、信号の極性は反転するが、抵抗 $R 4 3$ と抵抗 $R 4 5$ との比で増幅でき、増幅率だけダイオード $D 4 1$ のカットオフ電圧の急峻度を大きくできる。図 1 1 の光検出器 3 0 0 の増幅回路は、光を検出した M P P C の信号のみを通過するようにする。即ち、図 1 1 の光検出器 3 0 0 の増幅回路は、暗電流雑音に基づく信号を出力しないようにする。

【 0 0 6 9 】

ここで、具体例を示す。抵抗の抵抗値、コンデンサの静電容量、トランジスタの特性等は、ここに記載されるものに限定されるものではない。可変抵抗 $V R 4 1$ を最大 1 0 k、抵抗 $R 4 1$ を 4 . 7 k、抵抗 $R 4 2$ を 4 7 0 k、抵抗 $R 4 3$ を 4 . 7 k、抵抗 $R 4 4$ を 1 0 k、抵抗 $R 4 5$ を 1 0 k、コンデンサ $C 4 1$ を 0 . 1 μF 、コンデンサ $C 4 2$ を 2 2 0 p F とする。ここで、抵抗 $R 4 4$ の抵抗値と抵抗 $R 4 5$ の抵抗値とは、同一である。また、ダイオード $D 4 1$ の特性として、順方向電圧 $V_F = 1 8 0 m V$ 以下で、順方向電流 $I_F = 0$ になるとする。よって、バイアス電圧 $V b = - 2 0 0 m V \sim - 3 0 0 m V$ となるように調整し、M P P C が光を検出していないときに、光検出器 3 0 0 が暗電流雑音に基づく信号を出力しないようにする。

【 0 0 7 0 】

オペアンプ $I C 4 1$ の入力端子間がイマジナリーショートである。オペアンプ $I C 4 1$ の出力電圧を $V o u t$ 、抵抗 $R 4 3$ の入力電位を $V i n$ とすると、次のようになる。

【 0 0 7 1 】

【 数 8 】

$$\frac{Vout}{R45} = - \left(\frac{Vin}{R43} + \frac{Vb}{R44} \right)$$

$$\therefore Vout = - \frac{R45}{R43} Vin - \frac{R45}{R44} Vb = -2.1 \times Vin - Vb$$

M P P C が光を検出していない状態では、抵抗 $R 4 3$ の入力電位 $V i n$ の絶対値が、バイアス電圧 $V b$ (= - 2 0 0 m V ~ - 3 0 0 m V) の絶対値よりも小さい。このとき、オペアンプ $I C 4 1$ の出力電圧 $V o u t$ がダイオード $D 4 1$ のカットオフ電圧を超えると、ダイオード $D 4 1$ に順方向の電流が流れ、増幅がされない。暗電流による抵抗 $R 4 3$ の電圧 $V i n$ とバイアス電圧 $V b$ とがオペアンプの加算回路によって反転増幅されると、抵抗 $R 4 5$ の電圧がダイオード $D 4 1$ のカットオフ電圧を超え、ダイオード $D 4 1$ に電流が流

10

20

30

40

50

れるからである。一方、MPPCが光を検出した場合、抵抗R43の電位(V_{in})が大きくなるため、電圧 V_{out} がダイオードD41のカットオフ電圧を超えず、抵抗R43と抵抗R45との比で信号が増幅される。例えば、MPPCが光を検出したことにより、抵抗R43に1Vの電位が発生したとすると、抵抗R41には、-2.1Vの電圧が発生する。この電圧は、ダイオードD41の逆電圧になるため、ダイオードD41には電流が流れない。例えば、抵抗R44と抵抗R45とが等しいとき、光検出器300は、オペアンプの加算回路により、抵抗R43と抵抗R45との比から増幅された電圧からバイアス電圧 V_b が引かれた電圧による電荷を、コンデンサC42を介して、出力パルスとして出力する。コンデンサC42は、信号の直流成分をカットする。バイアス電圧 V_b は、加算回路における基準信号の一例である。

10

【0072】

《光検出器(6)》

図12は、中性子検出装置の光検出器の例(6)を示す図である。ここでは、光検出器300は、暗電流雑音を除去するために、バイポーラトランジスタ、ダイオードを含む。図12の光検出器300は、可変抵抗VR51、抵抗R51、抵抗R52、抵抗R53、コンデンサC51、MPPCを含む。図12の光検出器300は、さらに、抵抗R54、抵抗R55、抵抗R56、抵抗R57、コンデンサC52、コンデンサC53、及び、トランジスタQ51、ダイオードD51を含む。光検出器300は、MPPCに光が入射されることにより光を検出する。図12の出力が、図2等の電荷分割回路40に接続される。

20

【0073】

図12の光検出器300の、可変抵抗VR51、抵抗R51、抵抗R52、抵抗R53、抵抗R54、抵抗R55、コンデンサC51、コンデンサC52、MPPC、トランジスタQ51は、それぞれ、図6の光検出器300の、可変抵抗VR11、抵抗R11、抵抗R12、抵抗R13、抵抗R14、抵抗R15、コンデンサC11、コンデンサC12、MPPC、トランジスタQ11と同様に動作する。ここでは、主に、図6の光検出器300と異なる点について説明する。

【0074】

ここで、具体例を示す。抵抗の抵抗値、コンデンサの静電容量、トランジスタの特性等は、ここに記載されるものに限定されるものではない。可変抵抗VR51を10k、抵抗R51を4.7k、抵抗R52を470k、抵抗R53を4.7k、抵抗R54を47k、抵抗R55を1k、抵抗R56を4.7k、抵抗R57を100k、コンデンサC51を0.1 μ F、コンデンサC52を220pF、コンデンサC53を22pFとする。また、トランジスタQ51の特性として、ベースエミッタ電圧 $V_{BE} = 500 \sim 600$ mVで、コレクタ電流 $I_c = 0$ になるとする。また、トランジスタQ51は、 $h_{FE} = 100$ とする。

30

【0075】

このとき、仮に、MPPCが光を検出して、抵抗R53に1Vの電位が、1 μ s間、発生したとすると、コンデンサC52を通じて最大220 μ Aの電流がトランジスタQ51のベース端子に流せる。また、トランジスタQ51の h_{FE} が100である場合には、抵抗R55には、最大22mAの電流が流れる。しかし、抵抗R55は1kであるのでコンデンサC52からの入力電圧1Vによる電流は1mAで飽和し、ベース電流 I_B は10 μ A程度のパルス信号に抑えられる。すると、バイポーラトランジスタQ51が入力信号(抵抗R53の電圧)を増幅し、抵抗R55の電位は、抵抗R53より若干低い1V弱となる。また、トランジスタQ51のコレクタに接続された抵抗R56には、4.7倍された逆電位の電圧が出力される。

40

【0076】

さらに、この逆電位の電圧に基づく出力を電荷分割回路40に給電する給電回路が、ダイオードD51、抵抗R57、コンデンサC53となる。当該出力とコンデンサC53との間に、ダイオードD51及び抵抗R57が並列に接続される。MPPCが光を検出する

50

と、抵抗 R 5 6 の電位が下がる方向に振れる。このとき、ダイオード D 5 1 及びコンデンサ C 5 3 を通じて、この逆電位の電圧に基づく出力パルスが電荷分割回路 4 0 に出力される。

【 0 0 7 7 】

ここで、ダイオード D 5 1 の順電圧は、ノイズ除去に寄与する。M P P C からの信号がなくなると、抵抗 R 5 6 の電位が上がる方向に振れるので、ダイオード D 5 1 に逆方向の電位がかかり、ダイオード D 5 1 には電流が流れない。よって、抵抗 R 5 7 の抵抗だけでコンデンサ C 5 3 の放電がされる。

【 0 0 7 8 】

また、M P P C に信号がなく、他の光検出器 3 0 0 の M P P C で信号があった場合、電荷分割回路 4 0 から、コンデンサ C 5 3 を通じて、電位が下がる方向に信号が漏れてくる。このとき、ダイオード D 5 1 に逆電位がかかる方向であるため、ダイオード D 5 1 には電流は流れない。よって、抵抗 R 5 7 のみがコンデンサ C 5 3 に直列に入ることになるので、M P P C からの信号の増幅に対する影響、及び、電荷分割回路 4 0 への影響を抑えられる。従って、複数の光検出器 3 0 0 をつないでも、ノイズが増大しない。

【 0 0 7 9 】

《 光検出器 (7) 》

図 1 3 は、中性子検出装置の光検出器の例 (7) を示す図である。ここでは、光検出器 3 0 0 は、暗電流雑音を除去するために、オペアンプ、ダイオードを含む。図 1 3 の光検出器 3 0 0 は、可変抵抗 V R 6 1、抵抗 R 6 1、抵抗 R 6 2、抵抗 R 6 3、コンデンサ C 6 1、M P P C を含む。図 1 3 の光検出器 3 0 0 は、さらに、抵抗 R 6 4、抵抗 R 6 5、抵抗 R 6 6、コンデンサ C 6 2、ダイオード D 6 1、ダイオード D 6 2、及び、オペアンプ I C 6 1 を含む。抵抗 R 6 5 は、フィードバック抵抗である。光検出器 3 0 0 は、M P P C に光が入射されることにより光を検出する。図 1 3 の出力が、図 2 等の電荷分割回路 4 0 に接続される。図 1 3 の光検出器 3 0 0 は、図 1 1 の光検出器 3 0 0 (光検出器 (5)) と共通点を有する。ここでは、主に、図 1 1 の光検出器 3 0 0 と異なる点について説明する。

【 0 0 8 0 】

オペアンプ I C 6 1 の出力電位に基づく出力を電荷分割回路 4 0 に給電する給電回路が、ダイオード D 6 2、抵抗 R 6 6、コンデンサ C 6 2 となる。M P P C が光を検出すると、オペアンプ I C 6 1 の出力電位が下がる方向に振れる。このとき、ダイオード D 6 2 及びコンデンサ C 6 2 を通じて、この電位に基づく出力パルスが電荷分割回路 4 0 に出力される。ダイオード D 6 2、抵抗 R 6 6、コンデンサ C 6 2 による給電回路は、図 1 2 の光検出器 3 0 0 のダイオード D 5 1、抵抗 R 5 7、コンデンサ C 5 3 による給電回路と同様の機能を有する。

【 0 0 8 1 】

また、ダイオード D 6 2、抵抗 R 6 6、コンデンサ C 6 2 による給電回路は、図 9 または図 1 0 の光検出器 3 0 0 に、図 1 3 の光検出器 3 0 0 と同様に、適用されうる。このとき、光検出器 3 0 0 からの出力パルスの正負によって、ダイオード D 6 2 の向きが変更されうる。

【 0 0 8 2 】

(実施形態の作用効果)

中性子検出装置 1 0 は、入射された中性子を中性子シンチレータ 1 0 0 により光に変換する。中性子検出装置 1 0 は、変換された光を複数の光検出器 3 0 0 で検出し、中性子が入射された位置を算出する。中性子検出装置 1 0 は、M P P C 等の光検出デバイスで発生する暗電流等によるノイズを、パイポーラトランジスタ、ユニポーラトランジスタ、コンパレータ、オペアンプ等を使用する回路で低減する。中性子検出装置 1 0 では、ダイオード、抵抗、コンデンサによる給電回路 (例えば、ダイオード D 5 1、抵抗 R 5 7、コンデンサ C 5 3 による給電回路) により、暗電流による信号が、電荷分割回路 4 0 に出力されにくくなる。また、中性子検出装置 1 0 では、当該給電回路により、光検出器 3 0 0 は電

10

20

30

40

50

荷分割回路 40 から信号の影響を受けにくくなる。各光検出器 300 から出力される雑音が低減されるため、多くの光検出器 300 及び抵抗 400 を接続した場合であっても、荷分割回路 40 の両端から得られる出力のノイズが大きくなる。中性子検出装置 10 によれば、光検出デバイスで発生する暗電流等の影響を除去することにより、精度よく、中性子の入射された位置を算出することができる。

【0083】

(変形例)

上記の実施形態では、中性子を検出する中性子検出装置 10 について説明した。中性子検出装置 10 の構成は、中性子線以外の他の放射線を検出する放射線検出装置に適用される。他の放射線には、例えば、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、X線、荷電粒子線等

10

【0084】

放射線検出装置では、中性子シンチレータ 100 の代わりに、検出対象の他の放射線に対応する放射線シンチレータが使用される。放射線シンチレータは、入射された放射線を光に変換する。放射線シンチレータとして、検出対象の放射線に対応するものが選択される。

【0085】

放射線検出装置では、光透過板 200 として、例えば、鉛ガラス、アクリルガラスが使用される。光透過板 200 は、検出対象の放射線を吸収するものが選択される。鉛ガラスは、光を通過させ、アルファ線、ベータ線、ガンマ線、X線、荷電粒子線等の放射線を吸収する。アクリルガラスは、光を通過させ、アルファ線等の放射線を吸収する。また、光透過板 200 として、可視光を通過し、可視光より高い周波数を有するX線、ガンマ線を遮蔽する、ローパスフィルタ、バンドパスフィルタが使用される。光透過板 200 として、光を拡散するものが使用されてもよい。

20

【0086】

放射線検出装置は、放射線シンチレータで変換されなかった放射線を、放射線を吸収する光透過板に吸収させる。光透過板に放射線が吸収されるため、光検出器に入射される放射線が低減する。これにより、放射線による光検出器の損傷を低減させることができ、光検出器として放射線による影響を受けやすいものを使用できる。

30

【符号の説明】

【0087】

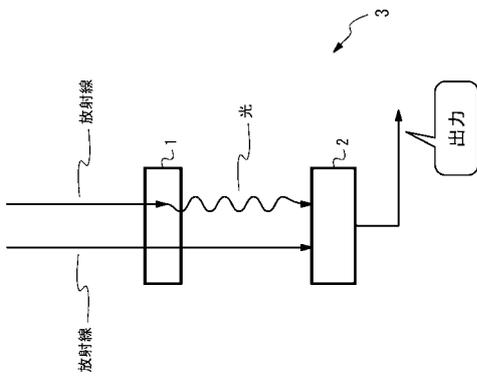
1	放射線シンチレータ
2	光検出器
3	放射線検出装置
10	中性子検出装置
40	電荷分割回路
100	中性子シンチレータ
200	光透過板
300	光検出器
400	抵抗
C01	コンデンサ
R01	抵抗
VR01	可変抵抗
V0	電源電圧
Vb	バイアス電圧
Q11	バイポーラトランジスタ
Q21	ユニポーラトランジスタ
CP31	コンパレータ
SW31	スイッチ
IC41	オペアンプ

40

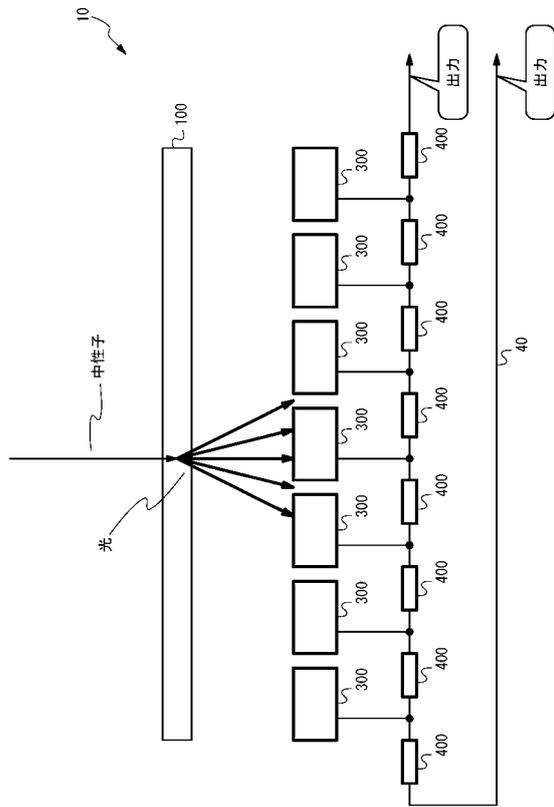
50

D 4 1 ダイオード

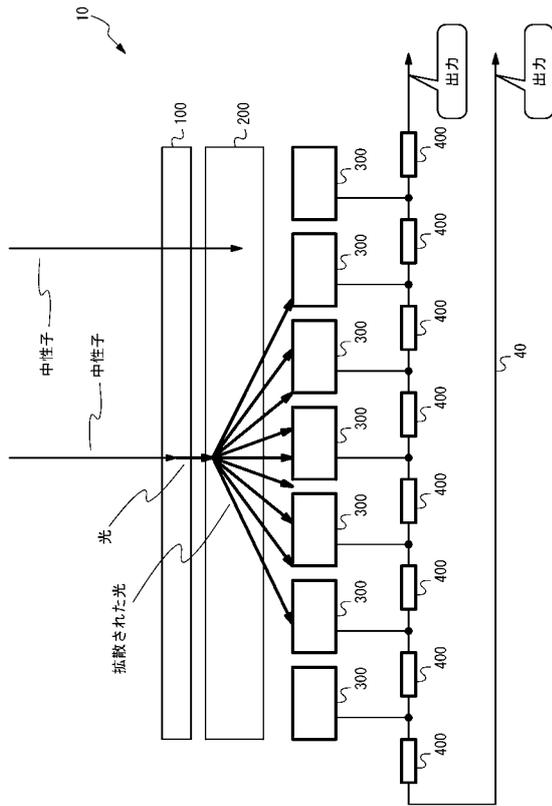
【 図 1 】



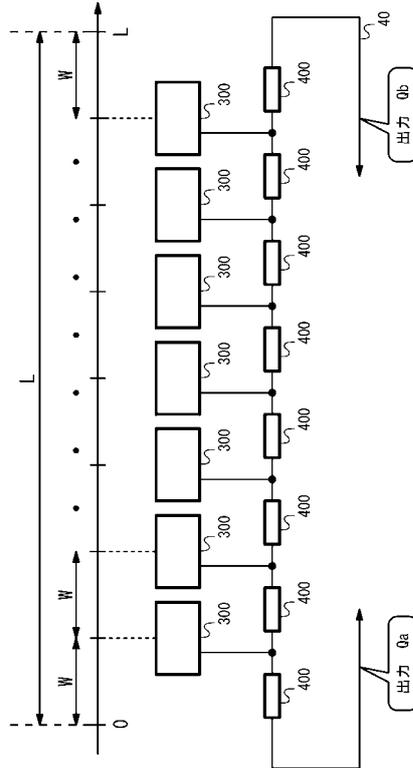
【 図 2 】



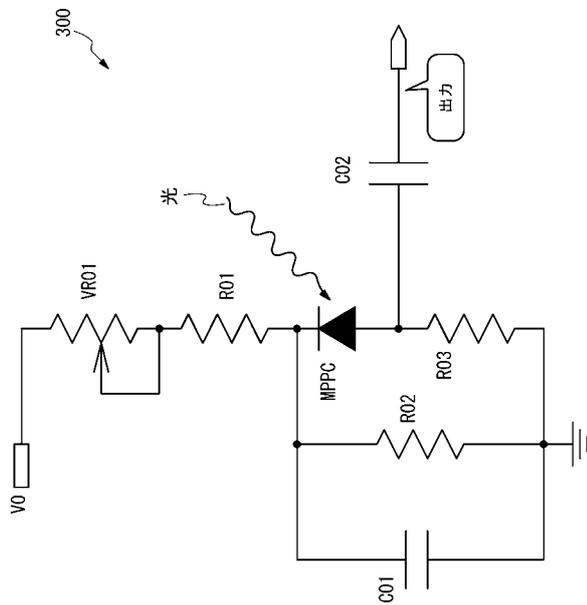
【図 3】



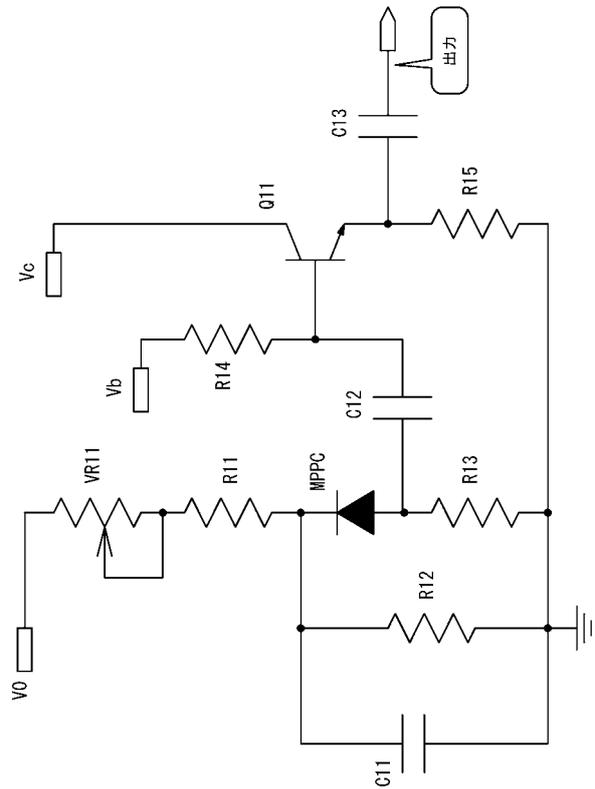
【図 4】



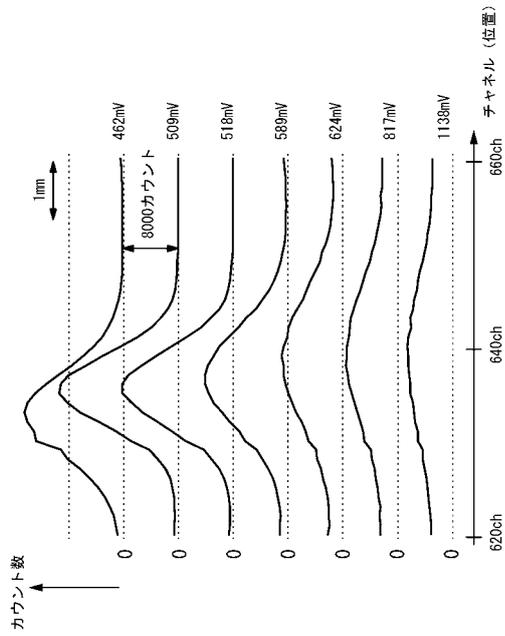
【図 5】



【図 6】



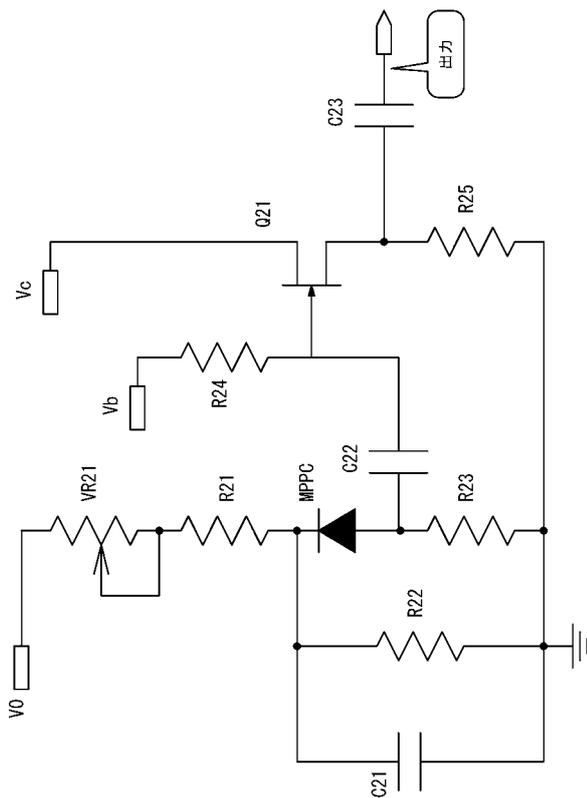
【 図 7 】



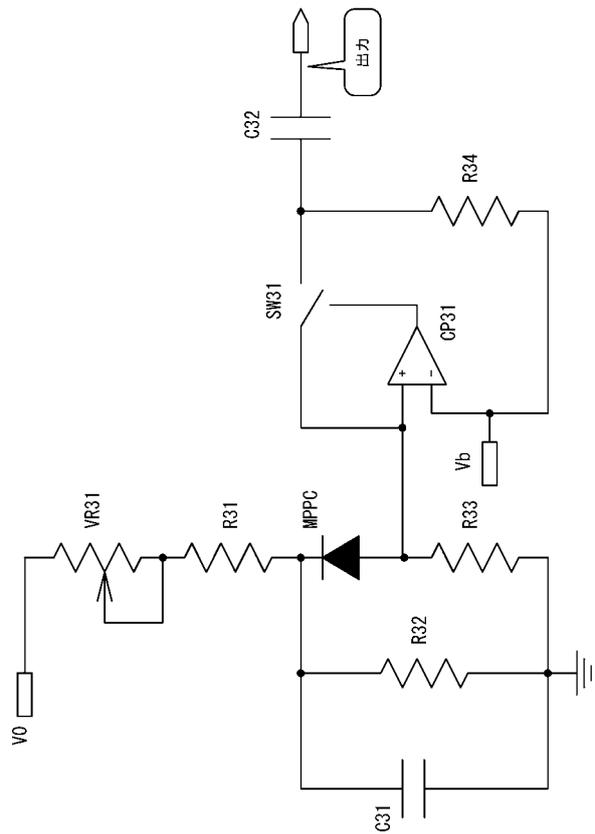
【 図 8 】

バイアス電圧	ピーク半値幅
462mV	1.9mm
509mV	1.6mm
518mV	1.7mm
589mV	2.2mm
624mV	3.1mm
817mV	3.4mm
1138mV	5.1mm

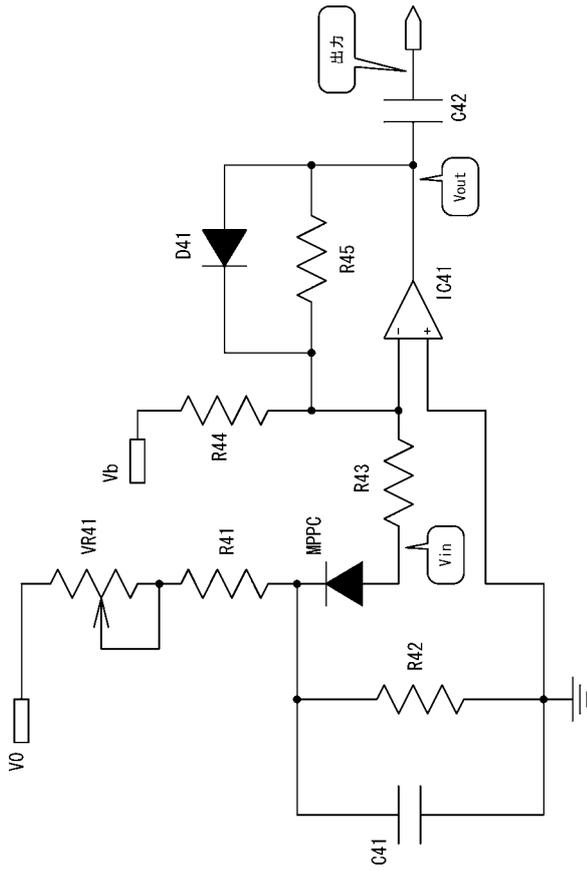
【 図 9 】



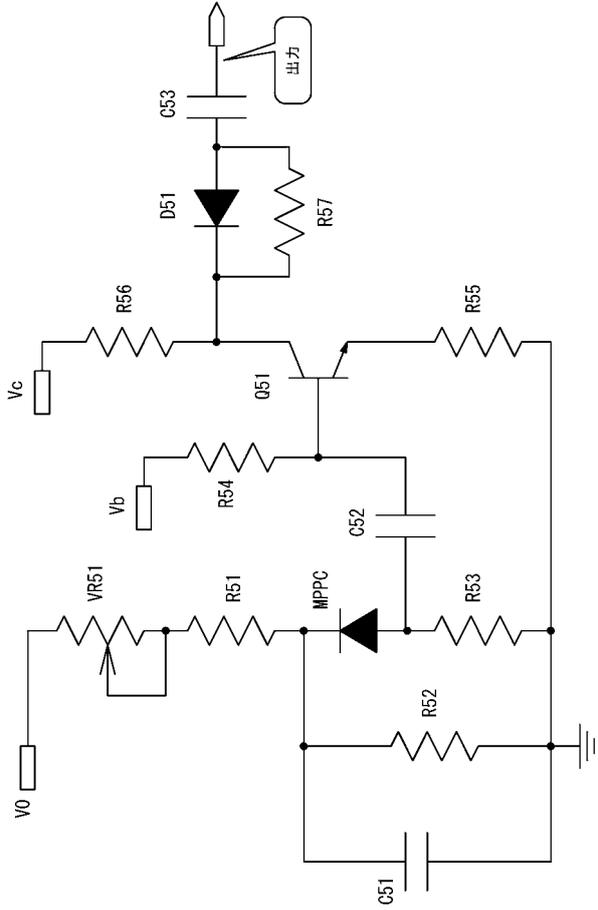
【 図 10 】



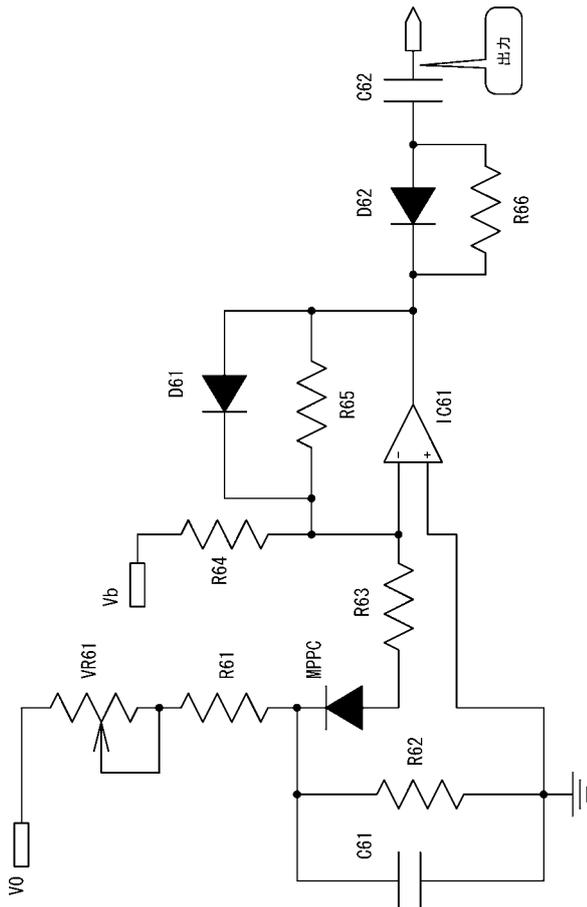
【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



フロントページの続き

(72)発明者 佐藤 節夫

茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

(72)発明者 武藤 豪

茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構内

Fターム(参考) 2G088 FF09 GG19 JJ04 JJ09 JJ29 JJ31 JJ33 JJ35 JJ36 KK05
KK21 KK27 KK35 LL11