

(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2012-181065

(P2012-181065A)

(43) 公開日 平成24年9月20日 (2012.9.20)

(51) Int.Cl.  
G01T 3/08 (2006.01)

F I  
G O I T 3/08

テーマコード (参考)  
2 G O 8 8

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2011-43218 (P2011-43218)  
(22) 出願日 平成23年2月28日 (2011.2.28)

(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  
(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  
(72) 発明者 田中 真伸  
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  
最終頁に続く

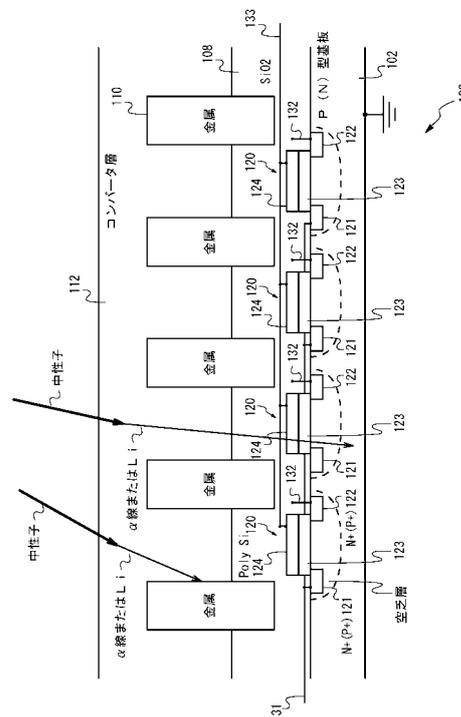
(54) 【発明の名称】 放射線検出装置

(57) 【要約】

【課題】放射線が入射された位置を特定できる放射線検出装置を提供する。

【解決手段】中性子と反応して荷電粒子を発生する変換部と、半導体基板に形成される前記荷電粒子を検出する複数の検出回路と、それぞれの前記検出回路に入射する前記荷電粒子の到来方向を制限する遮蔽部と、を備える放射線検出装置とする。また、それぞれの検出回路は、PN接合をさらに備える放射線検出装置とする。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

中性子と反応して荷電粒子を発生する変換部と、  
半導体基板に形成される前記荷電粒子を検出する複数の検出回路と、  
それぞれの前記検出回路に入射する前記荷電粒子の到来方向を制限する遮蔽部と、  
を備える放射線検出装置。

## 【請求項 2】

前記検出回路は、PN接合を含む  
請求項 1 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には、放射線を他の物質（コンバータともいう）と作用させて、間接的に放射線の検出を行うものがある。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】

熱中性子を検出する放射線検出装置として、コンバータにボロン10 ( $^{10}\text{B}$ ) が使用されるものがある。ボロン10は、中性子と核反応し、ヘリウム4 ( $^4\text{He}$ 、 $\alpha$ 線) とリチウム7 ( $^7\text{Li}$ ) を生成する。当該放射線検出装置は、 $\alpha$ 線やリチウム7を検出することにより、中性子を検出する。

## 【0004】

また、高速中性子を検出する放射線検出装置として、シンチレータ等を使用するものがある。シンチレータは、シンチレーション現象により、高速中性子と核反応し、放射線を光に変換する。当該放射線検出装置は、変換された光を検出することで、高速中性子を検出する。高速中性子のエネルギーは、一般的に、100 keV以上である。高速中性子のエネルギーは、熱中性子のエネルギーよりも大きい。

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0005】

【特許文献 1】特開 2002 - 270887 号公報

【特許文献 2】特開昭 63 - 40892 号公報

【特許文献 3】特開 2009 - 212162 号公報

【特許文献 4】特開昭 63 - 114177 号公報

【特許文献 5】特開平 7 - 176777 号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

熱中性子を検出する放射線検出装置は、コンバータで変換された粒子があらゆる方向に飛ぶ。そのため、検出器で検出した粒子の到来方向を特定することが難しい。従って、当該放射線検出装置は、中性子が入射された位置を特定することが難しい。

## 【0007】

また、高速中性子を検出する放射線検出装置は、シンチレータで変換された光は、様々な方向に広がるため、光の到来方向を特定することが難しい。従って、当該放射線検出装置は、中性子が入射された位置を特定することが難しい。

## 【0008】

本発明は、放射線が入射された位置を特定できる放射線検出装置を提供することを課題とする。

10

20

30

40

50

## 【課題を解決するための手段】

## 【0009】

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。

## 【0010】

即ち、第1の態様は、

中性子と反応して荷電粒子を発生する変換部と、

半導体基板に形成される前記荷電粒子を検出する複数の検出回路と、

それぞれの前記検出回路に入射する前記荷電粒子の到来方向を制限する遮蔽部と、  
を備える放射線検出装置である。

## 【発明の効果】

10

## 【0011】

本発明によれば、放射線が入射された位置を特定でき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】

## 【0012】

【図1】図1は、実施形態1の放射線検出装置の断面の例を示す図である。

【図2】図2は、実施形態1の放射線検出装置の上面方向から見た検出部の例を示す図である。

【図3】図3は、検出部の構成例を示す図である。

【図4】図4は、検出部の出力回路の構成例(1)を示す図である。

20

【図5】図5は、遮蔽金属の形状の斜視図の例を示す図である。

【図6】図6は、変形例の放射線検出装置の断面の例を示す図である。

【図7】図7は、変形例の放射線検出装置の上面方向から見た検出部の例を示す図である。

【図8】図8は、実施形態2の放射線検出装置の断面の例を示す図である。

【図9】図9は、実施形態3の放射線検出装置の断面の例を示す図である。

【図10】図10は、実施形態4の放射線検出装置の断面の例を示す図である。

【図11】図11は、第1コンバータ層および第2コンバータ層の感度の例を示す図である。

【図12】図12は、1つの検出部の出力回路の例(2)を示す図である。

30

【図13】図13は、1つの検出部の出力回路の例(3)を示す図である。

【図14】図14は、図12または図13の検出部の出力回路の具体例を示す図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0013】

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。

## 【0014】

〔実施形態1〕

(構成例)

図1は、本実施形態の放射線検出装置の断面の例を示す図である。放射線検出装置100は、P(N)型基板102、シリコン酸化膜(SiO<sub>2</sub>膜)108、金属(遮蔽金属)110、コンバータ層112、検出部120を含む。検出部120は、N(P)型半導体121、N(P)型半導体122、シリコン酸化膜123、ポリシリコン124を含む。また、放射線検出装置100は、配線131、配線132、配線133を含む。N(P)型半導体121、及び、N(P)型半導体122は、P(N)型基板102よりも不純物を含む割合が大きい半導体である。コンバータ層112側を上側、P(N)型基板102側を下側とする。P(N)型基板102、N(P)型半導体121、及び、N(P)型半導体122は、P型基板102、N型半導体121、及び、N型半導体122、もしくは、N型基板102、P型半導体121、及び、P型半導体122であることを意味する。図1におけるN(P)型半導体121は、配線131によって、それぞれ、接続される。

40

50

N ( P ) 型半導体 1 2 2 は、配線 1 3 2 によって、奥行き方向の N ( P ) 型半導体 1 2 2 ( 図示せず ) と接続される。各ポリシリコン 1 2 4 は、配線 1 3 3 によって接続される。配線は、金属配線が使用される。金属配線が使用されることで、高速読み出しが可能となる。配線は、ポリシリコンによる配線、基板内の N ( P ) 型半導体による配線が使用されてもよい。P ( N ) 型基板 1 0 2、検出部 1 2 0、及び、各配線を含む層を、回路層ともいう。

#### 【 0 0 1 5 】

P ( N ) 型基板 1 0 2 の上に複数の検出部 1 2 0 が形成される。各検出部 1 2 0 は、素子分離膜により、他の検出部 1 2 0 と分離されてもよい。素子分離膜は、検出部 1 2 0 で検出された信号が他の検出部 1 2 0 に影響を及ぼさないようにする。検出部 1 2 0 で検出された信号が他の検出部 1 2 0 に影響を及ぼさないのであれば、素子分離膜は、存在しなくてもよい。P ( N ) 型基板 1 0 2 は、例えば、シリコン基板である。P ( N ) 型基板 1 0 2 として、低抵抗シリコン基板が使用されうる。検出部 1 2 0 は、所定の周期で、2 次元に、配置される。

10

#### 【 0 0 1 6 】

検出部 1 2 0 は、N ( P ) 型半導体 1 2 1、N ( P ) 型半導体 1 2 2、シリコン酸化膜 1 2 3、ポリシリコン 1 2 4 を含む。N ( P ) 型半導体 1 2 1、及び、N ( P ) 型半導体 1 2 2 は、P ( N ) 型基板 1 0 2 にイオン注入することによって形成される。シリコン酸化膜 1 2 3、ポリシリコン 1 2 4 は、P ( N ) 型基板 1 0 2 の上に成膜されることによって、形成される。

20

#### 【 0 0 1 7 】

検出部 1 2 0 は、線や Li 粒子線である荷電粒子を検出する。検出部 1 2 0 は、PN 結合を有する。PN 結合は、低容量 PN 接合であってもよい。低容量 PN 接合が使用されることで、例えば、空乏層における抵抗と浮遊容量における時定数が小さくなり、高速読み出しが可能となる。線や Li 粒子線である荷電粒子を、検出部 1 2 0 に形成された PN 接合の逆バイアス時の空乏層によって検出する。線または Li 粒子線は、PN 接合の近傍の空乏層で、電子正孔対を発生させる。また、空乏層は、例えば、MOS ( Metal Oxide Semiconductor ) キャパシタ構造によっても形成されうる。即ち、空乏層は、MOS キャパシタ構造において、ゲート酸化膜直下に形成されうる。検出部 1 2 0 は、この電子正孔対による電流を検出することで、線または Li 粒子線の検出を行う。PN 接合は、例えば、トランジスタのドレイン領域、PN ジャンクション、及び、エピタキシャル層を含む PN ジャンクションであってもよい。検出部 1 2 0 の設置間隔が、放射線検出装置 1 0 0 の位置分解能である。ただし、コンバータ層 1 1 2 が厚い場合は、放射線検出装置 1 0 0 の位置分解能は、コンバータ層 1 1 2 の厚さにも依存する。放射線検出装置 1 0 0 は、検出部 1 2 0 で検出される微小信号を増幅する増幅回路を含みうる。

30

#### 【 0 0 1 8 】

図 2 は、放射線検出装置の上面方向から見た検出部の例を示す図である。図 2 の例では、検出部 1 2 0 の個数が 1 2 個としているが、検出部 1 2 0 の個数が 1 2 個に限定されるものではない。図 2 の例では、N 型半導体 1 2 1、N 型半導体 1 2 2、ポリシリコン 1 2 4、及び、各配線が示される。図 2 の例では、放射線検出装置 1 0 0 は、トランジスタ 1 4 1、トランジスタ 1 4 2、縦方向スイッチ 1 5 1、横方向スイッチ 1 5 2、アンプ 1 6 0 を含む。N 型半導体 1 2 1、N 型半導体 1 2 2、及び、ポリシリコン 1 2 4 は、図 2 の縦方向及び横方向に、周期的に配置される。配線 1 3 1 は、列ごとに各 N 型半導体 1 2 1 を接続する。配線 1 3 2 は、配線 1 3 1 の方向と異なる方向の列ごとに各 N 型半導体 1 2 2 を接続する。配線 1 3 3 は、各ポリシリコン 1 2 4 を接続する。

40

#### 【 0 0 1 9 】

配線 1 3 1 の各列は、1 つのトランジスタ 1 4 1 に接続される。各トランジスタ 1 4 1 は、電源及び縦方向スイッチ 1 5 1 に接続される。縦方向スイッチ 1 5 1 は、スイッチとしてのトランジスタ 1 4 1 のうち 1 つを、オンにする。これにより、オンにされたトランジスタ 1 4 1 に接続される配線 1 3 1 を介して、N 型半導体 1 2 1 に電圧が印加される。

50

## 【 0 0 2 0 】

配線 1 3 2 の各列は、1 つのトランジスタ 1 4 2 に接続される。各トランジスタ 1 4 2 は、電源及び横方向スイッチ 1 5 2 に接続される。横方向スイッチ 1 5 2 は、スイッチとしてのトランジスタ 1 4 2 のうち 1 つを、オンにする。これにより、オンにされたトランジスタ 1 4 2 に接続される配線 1 3 2 を介して、N 型半導体 1 2 2 はアンプ 1 6 0 に接続される。

## 【 0 0 2 1 】

配線 1 3 3 は、各ポリシリコン 1 2 4 に所定の電源電圧を供給する。ポリシリコン 1 2 4 に供給される電源電圧により、ポリシリコン 1 2 4 の近傍の P 型基板 1 0 2 に空乏層が形成される。即ち、シリコン酸化膜 1 2 3 直下に空乏層が形成される。当該電源電圧を制御することによって、空乏層の大きさが、制御されうる。

10

## 【 0 0 2 2 】

トランジスタ 1 4 1 は、縦方向スイッチ 1 5 1 により制御され、縦方向スイッチ 1 5 1 によりオンにされた場合、導通する。トランジスタ 1 4 2 は、横方向スイッチ 1 5 2 により制御され、縦方向スイッチ 1 5 1 によりオンにされた場合、導通する。

## 【 0 0 2 3 】

縦方向スイッチ 1 5 1 は、接続されるトランジスタ 1 4 1 を制御して、電源と N 型半導体 1 2 1 との間の導通を制御する。横方向スイッチ 1 5 2 は、接続されるトランジスタ 1 4 2 を制御して、N 型半導体 1 2 1 とアンプ 1 6 0 との間の導通を制御する。

## 【 0 0 2 4 】

N 型半導体 1 2 1、N 型半導体 1 2 2、及び、ポリシリコン 1 2 4 は、それぞれ、M O S トランジスタの、ソース、ドレイン、及び、ゲートに相当する。

20

## 【 0 0 2 5 】

N 型半導体 1 2 1 及びポリシリコン 1 2 4 に印加される電圧は、同一でもよい。

## 【 0 0 2 6 】

検出部 1 2 0 の構成は、図 2 の例に限定されるものではなく、例えば、D R A M (Dynamic Random Access Memory) のように、各検出部 1 2 0 がコンデンサを有し、電子正孔対による電荷をためてもよい。また、検出部 1 2 0 の構成は、C M O S (Complementary Metal Oxide Semiconductor) センサのように、各検出部 1 2 0 が増幅器を有してもよい。また、検出部 1 2 0 からの電流の読み出しの構成は、D R A M の構成、もしくは、C M O S センサの構成と同様であってもよい。検出部 1 2 0 からの電流の読み出しの構成は、これらに限定されるものではない。

30

## 【 0 0 2 7 】

P 型半導体 1 2 1 等が使用される場合は、図 2 において電源の正負の向きが逆になる。

## 【 0 0 2 8 】

図 3 は、検出部の構成例を示す図である。電極のポリシリコン 1 2 4 に正の電圧を印加すると、P 型基板 1 0 2 の正孔は、ポリシリコン 1 2 4 から離れる。P 型基板 1 0 2 のポリシリコン 1 2 4 近傍には、空乏層が形成される。このとき、空乏層に荷電粒子 ( 線または L i 粒子線 ) が入射すると、荷電粒子は空乏層に電子正孔対を発生させる。

## 【 0 0 2 9 】

空乏層に電子正孔対 ( キャリア ) が発生すると、N 型半導体 1 2 1 と N 型半導体 1 2 2 との間の電位差により、N 型半導体 1 2 1 と N 型半導体 1 2 2 との間に電流が流れる。この電流を検出することにより、荷電粒子の入射を検出することができる。空乏層に電子正孔対 ( キャリア ) が発生すると、電子正孔対は、空乏層の抵抗と浮遊容量による時定数で減衰する。電子正孔対が消滅する前に、N 型半導体 1 2 1 と N 型半導体 1 2 2 との間に電位差を発生させることにより、検出部 1 2 0 は荷電粒子の入射を検出することができる。空乏層の大きさは、ポリシリコン 1 2 4 に印加する電圧により制御されうる。空乏層の大きさを制御することにより、荷電粒子の検出感度を調整できる。即ち、空乏層を大きくすることにより、荷電粒子によってより多くの電子正孔対が発生するため、検出部 1 2 0 は、荷電粒子を検出しやすくなる。

40

50

## 【 0 0 3 0 】

図 4 は、1つの検出部の出力回路の例(1)を示す図である。図 4 のダイオードは、例えば、検出部 1 2 0 の P N 接合およびゲート酸化膜直下の空乏層による検出部分(以下、空乏層を持つ検出部分をダイオードということにする)に相当する。ダイオードには、逆バイアスがかけられている。この逆バイアスは、すべての検出部 1 2 0 の P N 接合に共通に印加されてもよい。抵抗は、例えば、M O S トランジスタの三極管領域を利用した抵抗(高抵抗)や、拡散、ポリシリコン等で製作した抵抗(高抵抗)である。検出部 1 2 0 に、荷電粒子が入射すると、ダイオードに電流が流れる。この電流による電荷が、コンデンサを介して、出力される。このコンデンサは、存在しなくてもよい。

## 【 0 0 3 1 】

図 1 2 は、1つの検出部の出力回路の例(2)を示す図である。図 1 2 のダイオード及び抵抗は、図 4 のダイオード及び抵抗と同様である。図 1 2 の増幅器は、例えば、M O S トランジスタである。ダイオードには、逆バイアスがかけられている。この逆バイアスは、すべての検出部 1 2 0 の P N 接合に共通に印加されてもよい。検出部 1 2 0 に、荷電粒子が入射するとダイオードに電流が流れ、この電流による電荷が検出器のもつ容量で電圧に変換され増幅器により増幅され、出力される。

10

## 【 0 0 3 2 】

図 1 3 は、1つの検出部の出力回路の例(3)を示す図である。図 1 3 のダイオードは、図 4 のダイオードと同様である。図 1 3 のスイッチは、例えば、M O S トランジスタによって形成される。図 1 3 の増幅器は、図 1 2 の増幅器と同様である。ダイオードには、逆バイアスがかけられている。この逆バイアスは、すべての検出部 1 2 0 の P N 接合に共通に印加されてもよい。検出部 1 2 0 に、スイッチがオフの際に、荷電粒子が入射するとダイオードに電流が流れ、この電流による電荷が検出器のもつ容量で電圧に変換され増幅器により増幅され、出力される。

20

## 【 0 0 3 3 】

図 4、図 1 2、図 1 3 のような出力回路の出力は、例えば、増幅回路や計数回路に接続されることにより、計数され得る。また、P N 接合の近傍の空乏層は、当該コンデンサになりうる。即ち、空乏層内に蓄えられた電荷が、信号として出力されうる。当該信号は、例えば、D R A M の読み出しの構成と同様の構成により、検出部 1 2 0 毎に読み出される。この場合、読み出し用のトランジスタを、例えば、遮蔽金属 1 1 0 の下側に設けることにより、荷電粒子の影響による誤信号の影響を低減できる。

30

## 【 0 0 3 4 】

図 1 4 は、図 1 2 または図 1 3 の検出部の出力回路の具体例を示す図である。図 1 4 の回路には、4つのM O S トランジスタ(A、B、C及びD)が含まれる。図 1 2 のような出力回路では、M O S トランジスタ A が抵抗として機能し、M O S トランジスタ B がダイオードとして機能し、M O S トランジスタ C および M O S トランジスタ D が増幅器として機能する。端子(a)は、M O S トランジスタ A に接続される。ここで、端子(a)の電圧を調整することにより、M O S トランジスタ A を抵抗(高抵抗)として機能させることができる。また、図 1 3 のような出力回路では、M O S トランジスタ A がスイッチとして機能し、M O S トランジスタ B がダイオードとして機能し、M O S トランジスタ C および M O S トランジスタ D が増幅器として機能する。ここで、端子(a)の電圧を調整することにより、M O S トランジスタ A をスイッチとして機能させることができる。

40

## 【 0 0 3 5 】

検出部の出力回路は、図 4、図 1 2、図 1 3、図 1 4 等の例に限定されるものではない。

## 【 0 0 3 6 】

各検出部 1 2 0 の上には、シリコン酸化膜 1 0 8 が形成される。シリコン酸化膜 1 0 8 の厚さ(高さ)は、例えば、4乃至7  $\mu\text{m}$ である。

## 【 0 0 3 7 】

シリコン酸化膜 1 0 8 の上には、コンバータ層 1 1 2 が形成される。コンバータ層 1 1

50

2は、ボロン10 ( $^{10}\text{B}$ )を含む。コンバータ層112は、ボロン10 ( $^{10}\text{B}$ )のみであってもよい。コンバータ層112に入射した中性子(熱中性子)は、ボロン10 ( $^{10}\text{B}$ )と核反応し、 $\alpha$ 線およびLi粒子線を生成する。このとき、 $\alpha$ 線およびLi粒子線は、それぞれ、1 MeV程度のエネルギーを有する。生成した $\alpha$ 線及びLi粒子線は、互いにほぼ逆方向に放出される。従って、シリコン酸化膜108側には、 $\alpha$ 線およびLi粒子線のうちの一方が入射する。1.5 MeVの $\alpha$ 線のボロン10中の飛程は、4  $\mu\text{m}$ である。また、900 keVのLi粒子線のボロン10中の飛程は、2  $\mu\text{m}$ である。コンバータ層112とシリコン酸化膜108の厚さは、 $\alpha$ 線またはLi粒子線が検出部120に到達する程度の厚さとされる。また、コンバータ層112の厚さが小さいと、中性子が $\alpha$ 線及びLi粒子線に変換される割合が減少する。コンバータ層の厚さ(高さ)は、例えば、1乃至5  $\mu\text{m}$ である。ここでは、コンバータ層112は、ボロン10を含むが、中性子を他の物質等に変換する物質として、例えば、熱中性子を光に変換するLiFやZnS等のボロン10以外の物質が使用されてもよい。

10

**【0038】**

また、ポリシリコン124の上方を除く部分には、遮蔽金属110が形成される。即ち、放射線検出装置100の上面側からみると、ポリシリコン124(検出部120)を囲うように遮蔽金属110が形成される。

**【0039】**

図5は、遮蔽金属の形状の斜視図の例を示す図である。図5の遮蔽金属110は、全体が直方体で、検出部120の部分に溝が形成された形状をしている。この形状により、溝部分の真上方向から入射する荷電粒子は検出部120に入射し、斜め方向から入射する荷電粒子は遮蔽金属110にあたり検出部120に達しない。図5の例では、遮蔽金属の溝の(断面の)形状は正方形であるが、正方形に限定されるものではなく、長方形、円形などの他の形状であってもよい。ただし、遮蔽金属の溝の(断面の)形状は、検出部120の形状と同様の形状が望ましい。遮蔽金属110の形状は、図5の例に限定されるものではない。

20

**【0040】**

遮蔽金属110として、例えば、アルミニウム、銅、銀、タンゲステンなどが使用される。遮蔽金属110は、 $\alpha$ 線やLi粒子線を、一方のシリコン酸化膜108から隣接するシリコン酸化膜108に透過しない幅を有する。遮蔽金属110の幅は、例えば、アルミニウムは5  $\mu\text{m}$ 、銅は3  $\mu\text{m}$ 、銀は3  $\mu\text{m}$ 、タンゲステンは2  $\mu\text{m}$ である。遮蔽金属110の幅は、中性子の検出効率を考慮すると、小さいほうが望ましい。遮蔽金属110にあたった $\alpha$ 線などは、検出部120で検出されないからである。

30

**【0041】**

P(N)型基板102、シリコン酸化膜108、遮蔽金属110、コンバータ層112、検出部120、配線131、配線132、配線133を含む半導体装置は、通常の半導体プロセスにより製造可能である。当該半導体装置は、次のように製造することができる。

**【0042】**

P(N)型不純物を添加したシリコンウェハ(単結晶基板)の表面に、例えば、熱酸化法により、シリコン酸化膜層を成膜する。次に、シリコン酸化膜層にフォトリソ膜を形成する。そして、フォトリソグラフィ等により、N(P)型半導体121及びN(P)型半導体122のレジストパターンを転写し、N(P)型不純物イオンを注入して、N(P)型半導体を形成する。レジストパターンを除去した後、表面全体にシリコン酸化膜層を成膜する。

40

**【0043】**

さらに、表面全体に電極膜層を形成する。電極膜の形成は、例えば、CVD(Chemical Vapor Deposition、化学気相蒸着)法、ALD(Atomic Layer Deposition、原子層蒸着)法またはPVD(Physical Vapor Deposition、物理気相蒸着)法を用いてもよい。電極膜層は、例えば、ポリシリコンである。

50

## 【0044】

次に、フォトリソグラフィ等により、N(P)型半導体121及びN(P)型半導体122に電極を形成するためのレジストパターンを転写し、シリコン酸化膜層、電極膜層を除去する。これにより、ポリシリコン124が形成されうる。電極としてのポリシリコン124は、ポリシリコン膜の代わりに、TiAlN膜、Ta<sub>2</sub>N膜、TaC膜、TaCN膜等が使用されてもよい。また、スパッタリング等により、金属材料を積層して、電極、配線層等を形成する。また、P(N)型基板102の下側に電極となる金属層を形成する。

## 【0045】

次に、フォトリソグラフィ等により、レジストパターンを転写し、不要な金属を除去し、N(P)型半導体121等の電極、配線等を形成する。配線は、半導体装置の周囲から取り出されうる。レジストパターンを除去した後、さらに、表面全体にシリコン酸化膜を成膜する。

10

## 【0046】

次に、フォトリソグラフィ等により、遮蔽金属110を形成するためのレジストパターンを転写し、遮蔽金属110となる部分をエッチングすることにより、シリコン酸化膜を除去する。シリコン酸化膜を除去した部分に所定の金属材料を積層する。これにより、遮蔽金属110が形成される。遮蔽金属110は、複数のビアを隙間なく接続することで形成されてもよい。

## 【0047】

次に、フォトリソグラフィ等により、コンバータ層112を形成するためのレジストパターンを転写する。即ち、遮蔽金属部分をマスクし、シリコン酸化膜部分をエッチングする。シリコン酸化膜を除去し部分にコンバータ層112を形成する。コンバータ層112には、CVD法などによる成膜と同時にボロン10(<sup>10</sup>B)を導入する方法、成膜後にボロン10(<sup>10</sup>B)をイオン注入する方法などにより、コンバータ層112にボロン10(<sup>10</sup>B)を含ませることができる。

20

## 【0048】

このようにして、P(N)型基板102、シリコン酸化膜108、遮蔽金属110、コンバータ層112、検出部120、配線131、配線132、配線133を含む半導体装置が製造されうる。

## 【0049】

(動作例)

放射線検出装置100における中性子検出の動作について説明する。放射線検出装置100のコンバータ層112側から中性子が入射されると、中性子は、コンバータ層112のボロン10と核反応(<sup>10</sup>B(n,  $\gamma$ )<sup>7</sup>Li反応)し、 $\alpha$ 線及びLi粒子線に変換される。 $\alpha$ 線及びLi粒子線のうちの一方は、シリコン酸化膜108側に放出される。この放出される方向は、中性子の運動方向とほぼ同方向である。

30

## 【0050】

シリコン酸化膜108側に放出された荷電粒子線は、シリコン酸化膜108、ポリシリコン124、シリコン酸化膜123を突き抜け、検出部120の空乏層に入射する。検出部120の空乏層は、ポリシリコン124に接続される電極(ゲート電極に相当)から印加される逆バイアス電位によって、形成される。検出部120の空乏層に荷電粒子が入射されると、荷電粒子は、電子正孔対を発生させる。検出部120の空乏層に発生した電子正孔対(電荷)は、空乏層の静電容量により保持される。空乏層に保持される電荷は、N(P)型半導体122に接続される電極(ドレイン電極に相当)により、検出される。検出部120は、空乏層に保持される電荷を検出することで、荷電粒子( $\alpha$ 線またはLi粒子線)の検出を行う。

40

## 【0051】

荷電粒子が、遮蔽金属110にあたった場合、検出部120では検出されない。当該荷電粒子は、遮蔽金属110で減衰し、検出部120に達しないからである。遮蔽金属110により、検出部120で検出される中性子(荷電粒子)の到来方向が制限される。

50

## 【0052】

また、中性子の運動方向と、シリコン酸化膜108側に放出される荷電粒子の運動方向の角度の差は、最大で10度程度である。従って、ある検出部120で、荷電粒子が検出された場合、当該検出部120のほぼ真上に、中性子が入射されたと考えられる。よって、放射線検出装置100は、どの検出部120で、荷電粒子を検出したかにより、どの位置に中性子が入射したかを認識することができる。即ち、放射線検出装置100は、荷電粒子を検出した検出部120のほぼ真上に中性子が入射されたと判断できる。また、放射線検出装置100は、検出部120の設置間隔の位置分解能で、中性子が入射された位置を判断できる。

## 【0053】

ここで、図2を用いて、放射線検出装置100による荷電粒子の検出について説明する。放射線検出装置100に中性子(熱中性子)が入射すると、コンバータ層112で荷電粒子に変換される。各検出部120は、トランジスタのソースとしてのN型半導体121、トランジスタのドレインとしてのN型半導体122、トランジスタのゲートとしての各ポリシリコン124を含む。

## 【0054】

トランジスタのゲートとしての各ポリシリコン124には、電源により所定の電圧が印加されている。当該電圧により各ポリシリコン124の近傍のP型基板102には、空乏層が形成される。

## 【0055】

放射線検出装置100は、縦方向スイッチ151及び横方向スイッチ152により、任意の検出部120に電圧を印加し、信号を取り出すことができる。ここで、例えば、ポリシリコン124Aが含まれる検出部120(図2の左上)の空乏層に、荷電粒子が入射したとする。空乏層に荷電粒子が入射すると、電子正孔対が発生する。検出部122の信号を取り出す場合、縦方向スイッチ151は、トランジスタ141Aをオンにし、横方向スイッチ152は、トランジスタ142Aをオンにする。このとき、トランジスタのソースとしてのN型半導体121Aと、トランジスタのドレインとしてのN型半導体122Aとの間の電位差により、N型半導体121AとN型半導体122Aとの間に、電子正孔対がキャリアとなり、電流が流れる。この電流がアンプ160を通して検出されることにより、検出部122における荷電粒子の入射を検出できる。当然に、他の検出部120についても同様である。即ち、縦方向スイッチ151及び横方向スイッチ152を適切に切り替えることにより、放射線検出装置100は、すべての検出器120において発生した電子正孔対(キャリア)による電流を検出できる。また、放射線検出装置100は、縦方向スイッチ151及び横方向スイッチ152の状態により、どの検出部120において発生した電子正孔対(キャリア)による電流かを認識できる。即ち、放射線検出装置100は、どの検出部120で荷電粒子が入射したかを認識できる。即ち、放射線検出装置100は、荷電粒子が入射した検出部120の位置の上方を、中性子が入射した位置と判断できる。また、放射線検出装置100は、縦方向スイッチ151及び横方向スイッチ152により、任意の検出部120から、電流を検出するようにすることができる。放射線検出装置100は、縦方向スイッチ151及び横方向スイッチ152の状態と、検出部120の位置(座標)との対応付けを格納する対応テーブルを有してもよい。放射線検出装置100は、当該対応テーブルにより、中性子が入射した位置を判断できる。放射線検出装置100は、例えば、ポリシリコン124の中心の位置を、検出部120の位置とすることができる。

## 【0056】

(変形例)

次に変形例について説明する。当該変形例は、上記の構成との共通点を有する。従って、ここでは、主として相違点について説明し、共通点については、説明を省略する。ここでは、N(P)型半導体121を省略する例を示す。

## 【0057】

図6は、変形例の放射線検出装置の断面の例を示す図である。変形例の放射線検出装置1100では、検出部120は、N(P)型半導体122、シリコン酸化膜123、ポリシリコン124を含む。図6におけるN(P)型半導体122は、配線132によって、N(P)型半導体122(図示せず)と、それぞれ、接続される。各ポリシリコン124は、配線133によって、奥行き方向のポリシリコン124(図示せず)と接続される。

【0058】

図7は、変形例の放射線検出装置の上面方向から見た検出部の例を示す図である。図7の例では、検出部120の個数が12個としているが、検出部120の個数が12個に限定されるものではない。図7の例では、N型半導体122、ポリシリコン124、及び、各配線が示される。図7の例では、放射線検出装置1100は、トランジスタ171、トランジスタ172、縦方向スイッチ181、横方向スイッチ182、アンプ160を含む。N型半導体122、及び、ポリシリコン124は、図7の縦方向及び横方向に、周期的に配置される。配線132は、列ごとに各N型半導体122を接続する。配線133は、配線132の方向と異なる方向の各ポリシリコン124を接続する。P型半導体122等が使用される場合は、図7において電源の正負の向きが逆になる。

10

【0059】

配線132の各列は、1つのトランジスタ171に接続される。各トランジスタ171は、電源及び縦方向スイッチ181に接続される。縦方向スイッチ181は、スイッチとしてのトランジスタ142のうち1つを、オンにする。これにより、オンにされたトランジスタ171に接続される配線132を介して、N型半導体122はアンプ160に接続される。

20

【0060】

配線133の各列は、1つのトランジスタ172に接続される。各トランジスタ172は、電源及び横方向スイッチ182に接続される。横方向スイッチ182は、スイッチとしてのトランジスタ172のうち1つを、オンにする。スイッチをオンにされた列の各ポリシリコン124に所定の電源電圧が供給される。ポリシリコン124に供給される電源電圧により、ポリシリコン124の近傍のP型基板102に空乏層が形成される。電源電圧を制御することによって、空乏層の大きさが、制御されうる。空乏層の大きさを制御することにより、荷電粒子の検出感度を調整できる。即ち、空乏層を大きくすることにより、荷電粒子によってより多くの電子正孔対が発生するため、検出部120は、荷電粒子を検出しやすくなる。

30

【0061】

放射線検出装置1100による荷電粒子の検出について説明する。放射線検出装置1100に中性子(熱中性子)が入射すると、コンバータ層112で荷電粒子に変換される。

【0062】

各ポリシリコン124には、横方向スイッチ182の動作により、所定時間毎に、列ごとに電源により所定の電圧が印加される。当該電圧により各ポリシリコン124の近傍のP型基板102には、空乏層が形成される。

【0063】

ここで、例えば、横方向スイッチ182によりトランジスタ172Aがオンにされるとする。このとき、ポリシリコン124Aが含まれる検出部122(図7の左上)の空乏層に、荷電粒子が入射したとする。空乏層に荷電粒子が入射すると、電子正孔対が発生する。縦方向スイッチ181は、トランジスタ171Aのスイッチをオンにしたとき、ポリシリコン124Aと、トランジスタのドレインとしてのN型半導体122Aとの間の電位差により、電子正孔対をキャリアとして、電流が流れる。この電流がアンプ160を通して検出されることにより、検出部120における荷電粒子の入射を検出できる。他の検出部120についても同様である。横方向スイッチ182によって、ポリシリコン124に電圧が印加されると、大きな空乏層が発生する。当該空乏層に荷電粒子が入射すると、電子正孔対(キャリア)が発生する。縦方向スイッチにより、キャリアが発生した検出部120とアンプ160とが導通すると、当該キャリアによる電流が検出される。横方向ス

40

50

スイッチ 152 により、電圧が印加される検出部 120 (ポリシリコン 124) が切り替えられる。放射線検出装置 1100 は、例えば、縦方向スイッチ 181 を横方向スイッチ 182 による切替周期よりも速い周期で適切に切り替えることにより、各検出部 120 からの電流 (信号) を検出することができる。放射線検出装置 1100 は、縦方向スイッチ 181 及び横方向スイッチ 182 の状態により、どの検出部 120 において発生した電子正孔対 (キャリア) による信号かを認識できる。

【0064】

放射線検出装置 1100 は、放射線検出装置 100 と比べて、簡易な構成となる。

【0065】

(実施形態 1 の作用効果)

放射線検出装置 100 のコンバータ層 112 は、入射する中性子がボロン 10 と核反応することにより、線および Li 粒子線の荷電粒子に変換する。荷電粒子は、シリコン酸化膜 108 を介して、検出部 120 に入射される。荷電粒子は、検出部 120 の PN 接合近傍の空乏層で、電子正孔対を発生させる。検出部 120 は、この電子正孔対による電流を検出することで、荷電粒子の検出を行う。検出部 120 に入射される荷電粒子は、当該検出部 120 のほぼ真上方向から入射した中性子による荷電粒子である。検出部 120 のほぼ真上方向以外の方向からの荷電粒子は、遮蔽金属 110 により遮蔽される。よって、検出部 120 のほぼ真上方向以外の方向から、当該検出部 120 に荷電粒子は入射しない。荷電粒子を検出した検出部 120 のほぼ真上が、中性子が入射された位置となる。即ち、遮蔽金属 110 により検出部 120 に入射する荷電粒子の方向が特定されるため、荷電粒子を検出した検出部 120 の位置が、中性子の入射位置に対応する。よって、放射線検出装置 100 における中性子が入射された位置の分解能は、検出部 120 の設置間隔となる。

【0066】

放射線検出装置 100 は、ゲート電圧 (ポリシリコン 124 に印加する電圧) を制御することにより、空乏層の大きさを調整できる。検出部 120 の検出感度は、空乏層の大きさに依存する。よって、放射線検出装置 100 は、ゲート電圧 (ポリシリコン 124 に印加する電圧) を制御することにより、検出部 120 の検出感度を調整できる。

【0067】

また、シリコン中の電子正孔対の移動度は速く、かつ、検出部 120 の空乏層は狭いため、信号の消滅の時定数は、1 ns 以下である。従って、放射線検出装置 100 は、高速に荷電粒子の検出を読み出すことができ、検出部 120 のデッドタイムを短くすることができる。

【0068】

さらに、放射線検出装置 100 を 2 次元平面に多数敷き詰めることにより、位置分解能の高い放射線検出を大面積において行うことができる。

【0069】

変形例の放射線検出装置 1100 についても同様である。

【0070】

(実施形態 2)

次に実施形態 2 について説明する。実施形態 2 は、実施形態 1 との共通点を有する。従って、ここでは、主として相違点について説明し、共通点については、説明を省略する。実施形態 2 では、実施形態 1 のシリコン酸化膜 208 の部分も、コンバータ層とする。

【0071】

(構成例)

図 8 は、本実施形態の放射線検出装置の断面の例を示す図である。放射線検出装置 200 は、P (N) 型基板 202、金属 (遮蔽金属) 210、コンバータ層 212、検出部 220 を含む。検出部 220 は、N (P) 型半導体 221、N (P) 型半導体 222、シリコン酸化膜 223、ポリシリコン 224 を含む。また、放射線検出装置 200 は、配線 231、配線 232、配線 233 を含む。

10

20

30

40

50

## 【0072】

シリコン基板202、金属（遮蔽金属）210、コンバータ層212、検出部220は、それぞれ、実施形態1のシリコン基板102、金属（遮蔽金属）210、コンバータ層212、検出部220と同様である。N（P）型半導体221、N（P）型半導体222、シリコン酸化膜223、ポリシリコン224は、実施形態1のN（P）型半導体121、N（P）型半導体122、シリコン酸化膜123、ポリシリコン124と同様である。配線231、配線232、配線233は、実施形態1の配線131、配線132、配線133と同様である。

## 【0073】

実施形態2では、実施形態1におけるシリコン酸化膜108の部分をコンバータ層212としている。シリコン酸化膜108の部分をコンバータ層212とすることにより、この部分においても、中性子を荷電粒子（線またはLi粒子線）に変換することができる。コンバータ層212は、例えば、実施形態1のようなシリコン酸化膜をポストプロセスにより削り、ボロン10を埋め込むことにより形成される。また、シリコン酸化膜が存在しないことにより、荷電粒子の減衰を抑制することができる。遮蔽金属210は、実施形態1の遮蔽金属110と同様に形成される。

10

## 【0074】

遮蔽金属210の高さ（厚さ）は、例えば、2μm以上とする。遮蔽金属の高さが小さいと、検出部220に入射する斜め方向の荷電粒子の量が多くなり位置分解能が低下するからである。また、コンバータ層212の高さ（厚さ）は、例えば、2乃至4μmとする。中性子（熱中性子）とボロン10とが核反応することにより生成される線およびLi粒子線は、それぞれ、1MeV程度のエネルギーを有する。1.5MeVの線のボロン10中の飛程は、4μmである。また、900keVのLi粒子線のボロン10中の飛程は、2μmである。このため、コンバータ層212の高さ（厚さ）は、2乃至4μm程度が好ましい。コンバータ層212の上面と遮蔽金属210の上面とは、同一平面に存在してもよい。遮蔽金属110とP（N）型基板102との間の距離は、1μm程度が好ましい。

20

## 【0075】

放射線検出装置200は、実施形態1の図2で示される放射線検出装置100の構成と同様の構成を有する。

30

## 【0076】

（動作例）

放射線検出装置200における中性子検出の動作について説明する。放射線検出装置200のコンバータ層212側から中性子が入射されると、中性子は、コンバータ層212のボロン10と核反応（ $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応）し、線及びLi粒子線に変換される。線及びLi粒子線のうちの一方は、検出部220側に放出される。検出部220側に放出された荷電粒子線は、検出部220で検出される。検出部220側に放出された荷電粒子線の一部は、遮蔽金属210に当たる。検出部220に荷電粒子が入射されると、荷電粒子は、検出器220のPN接合近傍の空乏層で、電子正孔対を発生させる。検出部220は、この電子正孔対による電流を検出することで、荷電粒子（線またはLi粒子線）の検出を行う。また、荷電粒子が、遮蔽金属210にあたった場合、検出部220では検出されない。当該荷電粒子は、遮蔽金属210で減衰し、検出部220に達しないからである。放射線検出装置200には、実施形態1のようなシリコン酸化膜108が存在しないため、放射線検出装置200では荷電粒子がシリコン酸化膜で減衰することはない。

40

## 【0077】

また、放射線検出装置200は、実施形態1の放射線検出装置100と同様に、検出部220の設置間隔の位置分解能で、中性子が入射された位置を判断できる。

## 【0078】

（実施形態2の作用効果）

50

放射線検出装置 200 のコンバータ層 212 は、入射する中性子がボロン 10 と核反応することにより、線および Li 粒子線の荷電粒子に変換する。荷電粒子は、実施形態 1 の放射線検出装置 100 のように、シリコン酸化膜で減衰されることはない。よって、放射線検出装置 200 は、放射線検出装置 100 よりも、効率よく、中性子の入射を検出することができる。

#### 【0079】

##### 〔実施形態 3〕

次に実施形態 3 について説明する。実施形態 3 は、実施形態 1 及び実施形態 2 との共通点を有する。従って、ここでは、主として相違点について説明し、共通点については、説明を省略する。実施形態 3 では、放射線検出装置 100 または放射線検出装置 200 と同様の構成を積層する。実施形態 1 及び実施形態 2 の放射線検出装置は、主に、熱中性子を検出する装置であったが、本実施形態の放射線検出装置 300 は、高速中性子を検出する。

10

#### 【0080】

##### （構成例）

図 9 は、本実施形態の放射線検出装置の断面の例を示す図である。放射線検出装置 300 は、P(N)型基板 302、検出部 320、金属（遮蔽金属）310、コンバータ層 312 を含む。P(N)型基板 302、検出部 320、金属（遮蔽金属）310 は、それぞれ、実施形態 2 の P(N)型基板 202、検出部 220、遮蔽金属 210 と同様である。放射線検出装置 300 では、P(N)型基板 302、検出部 320、金属（遮蔽金属）310、及び、コンバータ層 312 を含む層が、複数層、積層される。図 9 の例では、各層を、上の層から、第 1 層、第 2 層、第 3 層とする。図 9 の例では、3 層であるが、2 層以上であればよく、3 層に限定されるものではない。また、放射線検出装置 300 で積層される層は、実施形態 1 の放射線検出装置 100 と同様の層であってもよい。最上層以外の層は、金属（遮蔽金属）310、コンバータ層 312 を含まなくてもよい。層と層との間は、密着される。

20

#### 【0081】

コンバータ層 312 は、パラフィン、ポリエチレン等の水素を多く含む物質を含む。コンバータ層 312 は、水素を多く含む物質のみであってもよい。コンバータ層 312 に入射した中性子（高速中性子）は、所定の確率で、水素原子核（ $H^+$ ）と衝突し、水素原子核を弾き飛ばす。弾き飛ばされた水素原子核は、エネルギーが高いため、遮蔽金属 310 を透過しうる。従って、遮蔽金属 310 は存在しなくてもよい。即ち、遮蔽金属 310 の代わりに、シリコン酸化膜であってもよい。また、放射線検出装置 300 が、実施形態 2 の放射線検出装置 200 と同様の層を含む場合、遮蔽金属のないコンバータ層が、検出部 320 に接してもよい。コンバータ層 312 の材料と高さ（厚さ）は、例えば、ポリエチレンで  $50\ \mu\text{m}$  とすることができる。コンバータ層 312 は、厚すぎると位置分解能が低下し、薄すぎると水素原子核を弾き飛ばす中性子の割合が減少する。

30

#### 【0082】

検出部 320 は、水素原子核（荷電粒子）を、検出部 320 に形成された低容量 PN 接合の逆バイアス時の空乏層によって検出する。水素原子核は、PN 接合の近傍の空乏層で、電子正孔対を発生させる。検出部 320 は、この電子正孔対による電流を検出することで、水素原子核の検出を行う。複数の層の検出部 320 で検出された場合、検出された検出器 320 の位置を一直線で結ぶことで、水素原子核の入射方向が分かる。検出部 320 の設置間隔が、放射線検出装置 300 の位置分解能である。ただし、コンバータ層 312 が厚い場合は、放射線検出装置 300 の位置分解能は、コンバータ層 312 の厚さ（ $D$  とする）にも依存する。ここで、角度  $\theta$  は、放射線検出装置 300 の放射線入射面（コンバータ層 312 の上面）の法線方向と、水素原子核の入射方向のなす角の角度であるとする（図 9 参照）。コンバータ層 312 の厚さが検出部 320 の設置間隔よりも十分大きい場合、放射線検出装置 300 の位置分解能は、角度  $\theta$  以下の陽子線のみを使用するとすると、 $D \tan \theta$  となる。

40

50

## 【 0 0 8 3 】

( 動作例 )

放射線検出装置 3 0 0 における中性子検出の動作について説明する。放射線検出装置 3 0 0 のコンバータ層 3 1 2 側から中性子が入射されると、中性子（高速中性子）は、所定の確率で、水素原子核を弾き飛ばす。水素原子核（陽子線）は、荷電粒子である。水素原子核は、検出部 3 2 0 で検出される。検出部 3 2 0 には、逆バイアスが印加され、PN 接合近傍に空乏層が形成される。検出部 3 2 0 に水素原子核が入射されると、荷電粒子は、検出器 3 2 0 の PN 接合近傍の空乏層で、電子正孔対を発生させる。検出部 3 2 0 は、この電子正孔対による電流を検出することで、水素原子核（陽子線）の検出を行う。また、高速中性子に弾き飛ばされた水素原子核は、エネルギーが大きく、他の層（下層）の検出部 3 2 0 でも検出されうる。多くの場合、高速中性子に弾き飛ばされた水素原子核（陽子線）は、複数の層の検出部 3 2 0 で検出される。陽子線の軌跡は、ほぼ一直線になる。

10

## 【 0 0 8 4 】

複数の層の検出部 3 2 0 で陽子線が検出された場合、陽子線が検出された検出部 3 2 0 を一直線で結び、陽子線が検出された検出部 3 2 0 が存在する層のうち最上層の層のコンバータ層と、当該一直線とが交差する位置が、中性子が入射した位置となる。中性子が入射した位置とは、中性子が水素原子核を弾き飛ばした位置である。陽子線を検出した検出部 3 2 0 の位置が一直線にない場合には、放射線検出装置 3 0 0 は、陽子線を検出した検出部 3 2 0 の位置の座標（3次元座標）を用いて、最小二乗法等により一直線を求め得る。よって、層が多くなるほど、陽子線を検出する検出部 3 2 0 が多くなり、陽子線の軌跡をより正確に求められる。陽子線の軌跡を正確に求めるために、各層の検出部 3 2 0 の位置、及び、各層の位置を正確に配置することが求められる。検出部 3 2 0 の位置の誤差が大きいと、陽子線の軌跡の誤差が大きくなるからである。

20

## 【 0 0 8 5 】

また、第 1 層の表面の法線の方向から、第 1 層の表面に対して陽子線を入射し、複数の層の検出部 3 2 0 で、キャリアを検出することにより、検出部 3 2 0 の位置を校正することができる。即ち、キャリアを検出した検出部 3 2 0 が第 1 層の表面の法線方向に存在していると判断される。各層の検出部 3 2 0 が、各層内において正確に位置し、各層間の距離が既知であると仮定すると、第 1 層の表面上で、少なくとも 2 箇所以上から陽子線を入射し、複数の層の検出部 3 2 0 で、キャリアを検出することで、すべての検出部 3 2 0 の位置を校正することができる。各層における検出部 3 2 0 の間隔よりも高い精度で陽子線の入射位置を制御できる場合、検出部 3 2 0 の位置の校正を各層における検出部 3 2 0 の間隔よりも高い精度で行うことができる。つまり、検出部 3 2 0 の位置が検出部 3 2 0 の間隔よりも高い精度で決定される。検出部 3 2 0 の位置を正確に求めることで、陽子線の軌跡をより正確に求められる。

30

## 【 0 0 8 6 】

( 実施形態 3 の作用効果 )

放射線検出装置 3 0 0 は、複数の層を備える。各層は、シリコン基板 3 0 2、検出部 3 2 0、金属（遮蔽金属）3 1 0、コンバータ層 3 1 2 を含む。各層は、遮蔽金属、シリコン酸化膜 3 0 8 を、含まなくてもよい。最上層以外の層は、コンバータ層 3 1 2 を含まなくてもよい。コンバータ層 3 1 2 は、水素を多く含む物質を含む。

40

## 【 0 0 8 7 】

放射線検出装置 3 0 0 のコンバータ層 3 1 2 では、入射する中性子（高速中性子）が水素原子核を弾き飛ばす。弾き飛ばされた水素原子核（陽子線）は、検出部 3 2 0 に入射される。陽子線は、検出部 3 2 0 の PN 接合近傍の空乏層で、電子正孔対を発生させる。検出部 3 2 0 は、この電子正孔対による電流を検出することで、陽子線の検出を行う。陽子線は、エネルギーが高いため、下層の検出部 3 2 0 においても、検出される。陽子線を検出した複数の検出部 1 2 0 を結ぶ一直線と、当該検出部 3 2 0 のうち最も上層の検出部 3 2 0 の層のコンバータ層 3 1 2 とが、交差する位置が、中性子が水素原子核をはじき飛ばした位置である。即ち、放射線検出装置 3 0 0 は、この位置に、中性子が入射したと判断

50

できる。

【0088】

コンバータ層の厚さに対して検出部320の設置間隔が十分小さい場合、放射線検出装置300の位置分解能は、検出部320の設置間隔となる。コンバータ層312の厚さが検出部320の設置間隔よりも十分大きい場合、放射線検出装置300の位置分解能は、角度以下の陽子線のみを使用するとすると、 $D \tan$  となる。

【0089】

放射線検出装置300にガンマ線が入射された場合、1つの検出部320のみが、信号を生成する。一方、陽子線は、複数の検出部320で検出される。従って、放射線検出装置300は、ガンマ線と陽子線との分別をできる。

10

【0090】

〔実施形態4〕

次に実施形態4について説明する。実施形態4は、実施形態1、実施形態2、及び、実施形態3との共通点を有する。従って、ここでは、主として相違点について説明し、共通点については、説明を省略する。実施形態4では、実施形態3と同様に、放射線検出装置100または放射線検出装置200と同様の構成を積層する。実施形態4の放射線検出装置400は、熱中性子、及び、高速中性子を検出する。

【0091】

（構成例）

図10は、本実施形態の放射線検出装置の断面の例を示す図である。放射線検出装置400は、P(N)型基板402、検出部420、金属(遮蔽金属)410、第1コンバータ層412を含む。これらは、それぞれ、実施形態2のP(N)型基板202、検出部220、遮蔽金属210、コンバータ層212と同様である。放射線検出装置400は、さらに、第2コンバータ層414を含む。第2コンバータ層414は、実施形態3のコンバータ層312と同様である。放射線検出装置400では、P(N)型基板402、検出部420、金属(遮蔽金属)410、第1コンバータ層412、及び、第2コンバータ層414を含む層が、複数層、積層される。図10の例では、各層を、上の層から、第1層、第2層、第3層とする。図10の例では、3層であるが、2層以上であればよく、3層に限定されるものではない。また、放射線検出装置400で積層される層は、実施形態2の放射線検出装置100と同様のシリコン酸化膜を含む層であってもよい。最上層以外の層は、金属(遮蔽金属)410、第1コンバータ層412及び第2コンバータ層414を含まなくてもよい。層と層との間は、密着される。第1コンバータ層412の位置と第2コンバータ層414の位置とは、入れ替わってもよい。

20

30

【0092】

第1コンバータ層412は、実施形態1のコンバータ層112または実施形態2のコンバータ層212と同様の層である。また、第2コンバータ層414は、実施形態3のコンバータ層312と同様の層である。即ち、第1コンバータ層では、熱中性子はボロン10と核反応をし、第2コンバータ層では、高速中性子は水素原子核を弾き飛ばす。

【0093】

図11は、第1コンバータ層および第2コンバータ層の感度の例を示す図である。図11の例では、第1コンバータ層412がボロン10で厚さ5 $\mu$ m、第2コンバータ層414がポリエチレンで厚さ50 $\mu$ mである。図11のグラフは、中性子のエネルギーに対する各コンバータ層の感度を示すグラフである。図11の例では、低いエネルギーの中性子に対しては、第1コンバータ層412のほうが感度がよく、高いエネルギーの中性子に対しては、第2コンバータ層414のほうが感度がよい。中性子のエネルギーに対する放射線検出装置400の感度は、これらのグラフを足しあわせたものになる。

40

【0094】

（動作例）

放射線検出装置400における中性子検出の動作について説明する。放射線検出装置400の第1層の第2コンバータ層414側から熱中性子が入射されると、熱中性子は、第

50

1 コンバータ層 4 1 2 のボロン 1 0 と核反応 ( $^{13}(\text{n}, \gamma)\text{Li}$  反応) し、線及び Li 粒子線に変換される。この動作は、実施形態 1 の放射線検出装置 1 0 0 の動作と同様である。また、放射線検出装置 4 0 0 の第 1 層の第 2 コンバータ層 4 1 4 側から高速中性子が入射されると、高速中性子は、所定の確率で、第 2 コンバータ層 4 1 4 の水素原子核を弾き飛ばす。この動作は、実施形態 3 の放射線検出装置 3 0 0 の動作と同様である。

【0095】

放射線検出装置 4 0 0 は、1 つの検出部 4 2 0 で信号を検出した場合、熱中性子が入射されたとして、実施形態 1 と同様に、熱中性子が入射された位置を求める。即ち、放射線検出装置 4 0 0 は、信号を検出した検出部 4 2 0 のほぼ真上の第 1 コンバータ層 4 1 2 に熱中性子が入射されたと判断する。

10

【0096】

また、放射線検出装置 4 0 0 は、複数の検出部 4 2 0 で信号を検出した場合、高速中性子が入射されたとして、実施形態 3 と同様に、高速中性子が入射された位置を求める。即ち、放射線検出装置 4 0 0 は、信号を検出した検出部 4 2 0 を一直線で結び、信号を検出した検出部 4 2 0 が存在する層のうち最上層の層の第 2 コンバータ層 4 1 4 と、当該一直線とが交差する位置が、中性子が入射した位置と判断する。

【0097】

よって、放射線検出装置 4 0 0 は、エネルギーの低い中性子からエネルギーの高い中性子まで、中性子が入射された位置を検出することができる。

20

【0098】

(実施形態 4 の作用効果)

放射線検出装置 4 0 0 は、2 種類のコンバータ層を有する。放射線検出装置 4 0 0 は、2 種類のコンバータ層を有することで、中性子の広いエネルギー幅に対し感度を有する。また、放射線検出装置 4 0 0 は、3 次元に検出部 4 2 0 を配置することで、中性子が入射された位置を精度よく検出することができる。

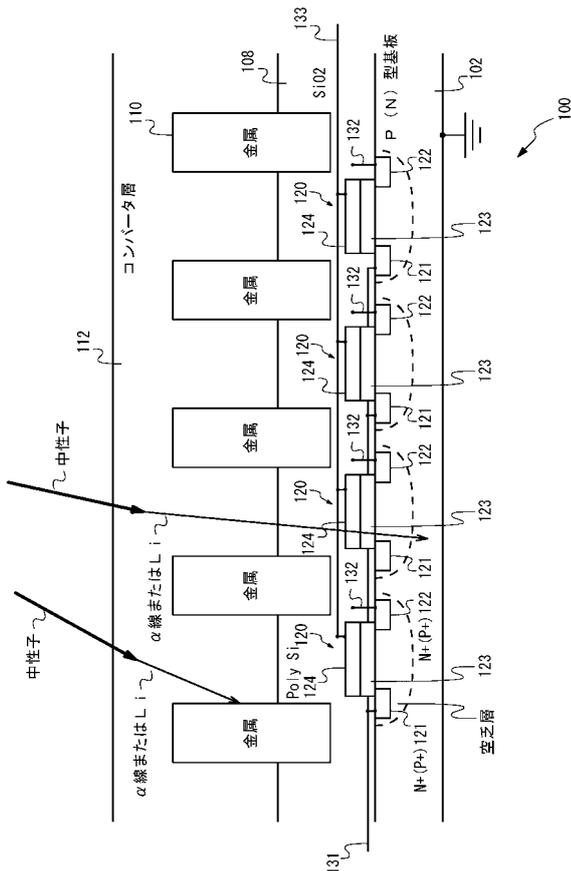
【符号の説明】

【0099】

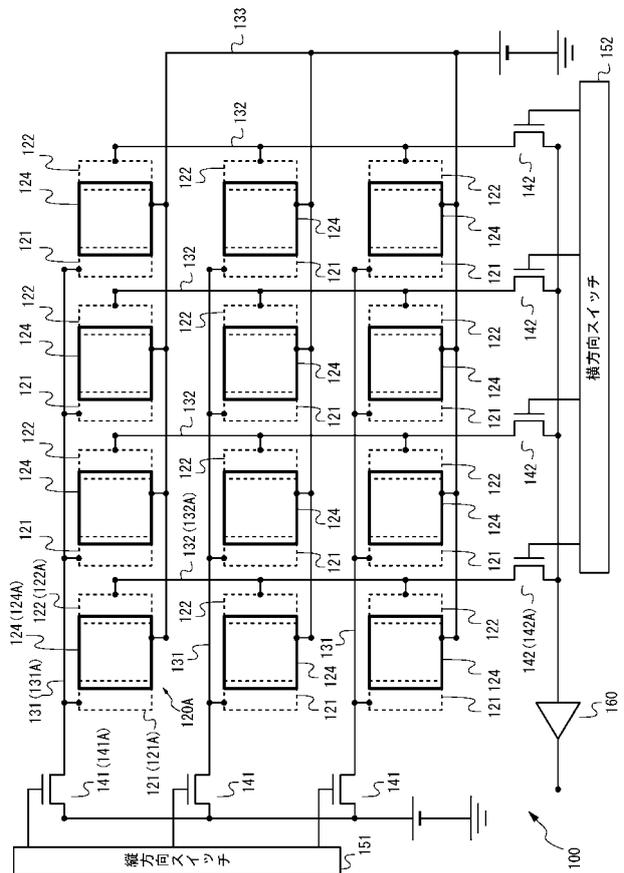
1 0 0	放射線検出装置	
1 0 2	P ( N ) 型基板	
1 0 8	シリコン酸化膜 ( S i O <sub>2</sub> )	30
1 1 0	金属 ( 遮蔽金属 )	
1 1 2	コンバータ層	
1 2 0	検出部	
1 2 1	N ( P ) 型半導体	
1 2 2	N ( P ) 型半導体	
1 2 3	シリコン酸化膜 ( S i O <sub>2</sub> )	
1 2 4	ポリシリコン	
1 3 1	配線	
1 3 2	配線	
1 3 3	配線	40
1 4 1	トランジスタ	
1 4 2	トランジスタ	
1 5 1	縦方向スイッチ	
1 5 2	横方向スイッチ	
1 6 0	アンプ ( 増幅器 )	
1 7 1	トランジスタ	
1 7 2	トランジスタ	
1 8 1	縦方向スイッチ	
1 8 2	横方向スイッチ	
2 0 0	放射線検出装置	50

- 2 0 2 P ( N ) 型 基 板
- 2 0 6 素 子 分 離 膜
- 2 1 0 金 属 ( 遮 蔽 金 属 )
- 2 1 2 コ ン バ ー タ 層
- 2 2 0 検 出 部
- 3 0 0 放 射 線 検 出 装 置
- 3 0 2 P ( N ) 型 基 板
- 3 0 6 素 子 分 離 膜
- 3 1 0 金 属 ( 遮 蔽 金 属 )
- 3 1 2 コ ン バ ー タ 層
- 3 2 0 検 出 部
- 4 0 0 放 射 線 検 出 装 置
- 4 0 2 P ( N ) 型 基 板
- 4 1 0 金 属 ( 遮 蔽 金 属 )
- 4 1 2 第 1 コ ン バ ー タ 層
- 4 1 4 第 2 コ ン バ ー タ 層
- 4 2 0 検 出 部

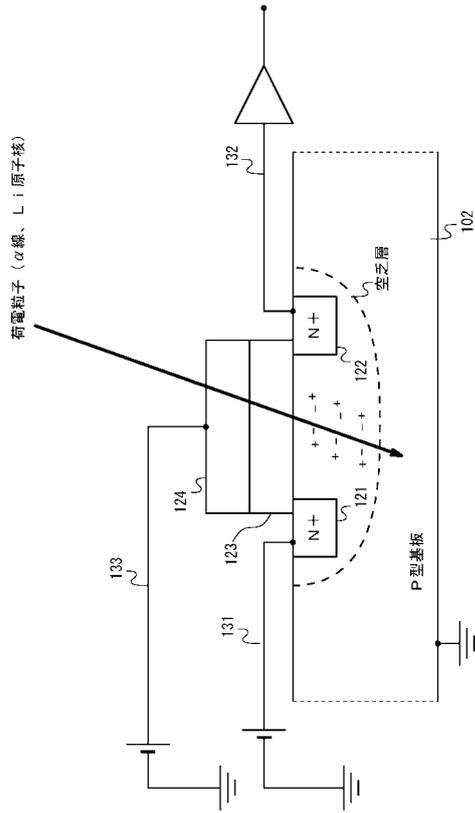
【 図 1 】



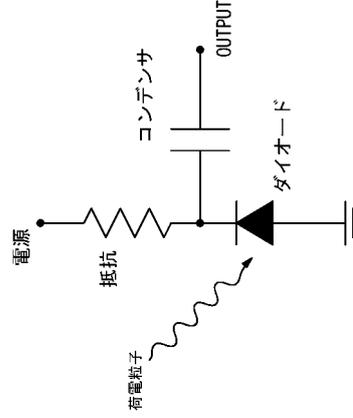
【 図 2 】



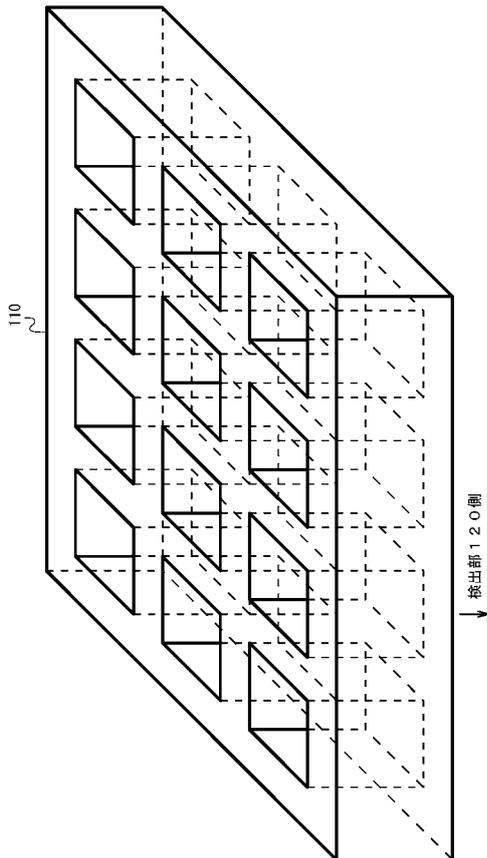
【 図 3 】



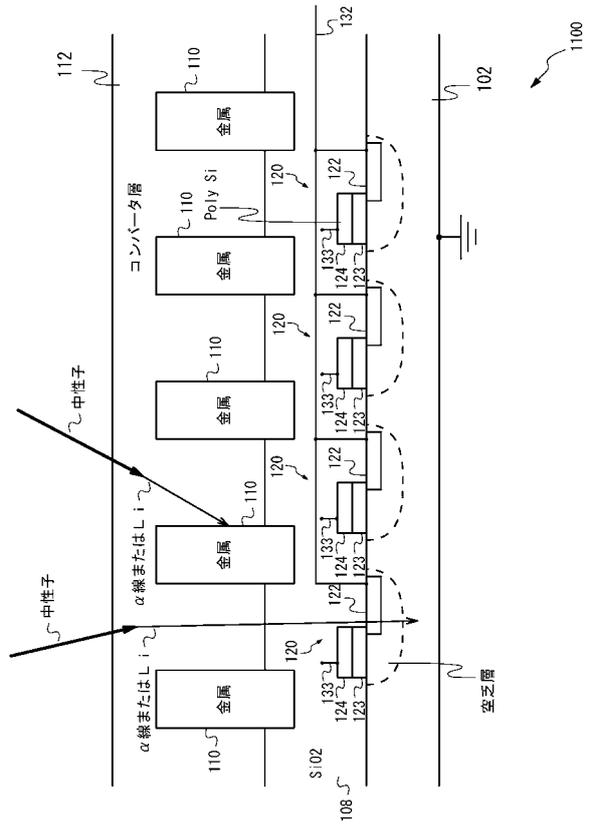
【 図 4 】



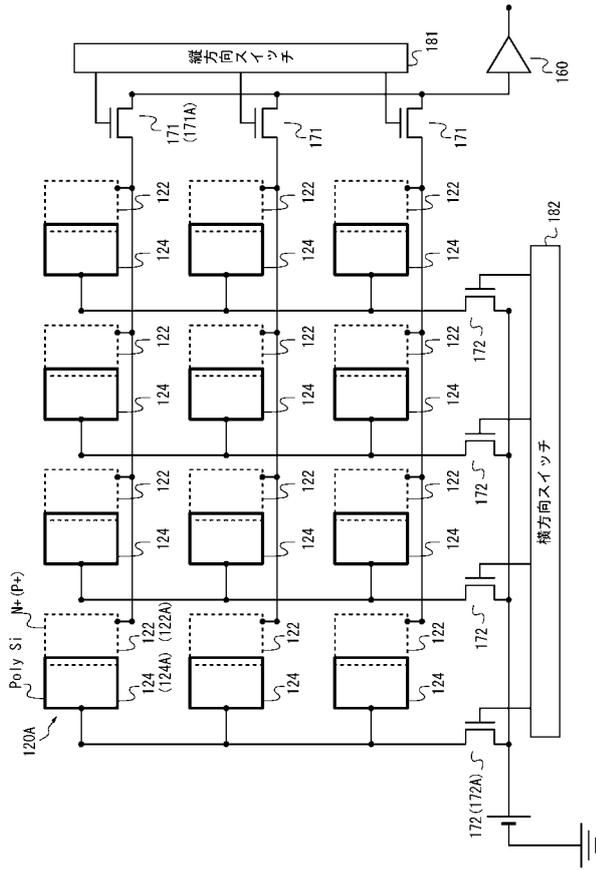
【 図 5 】



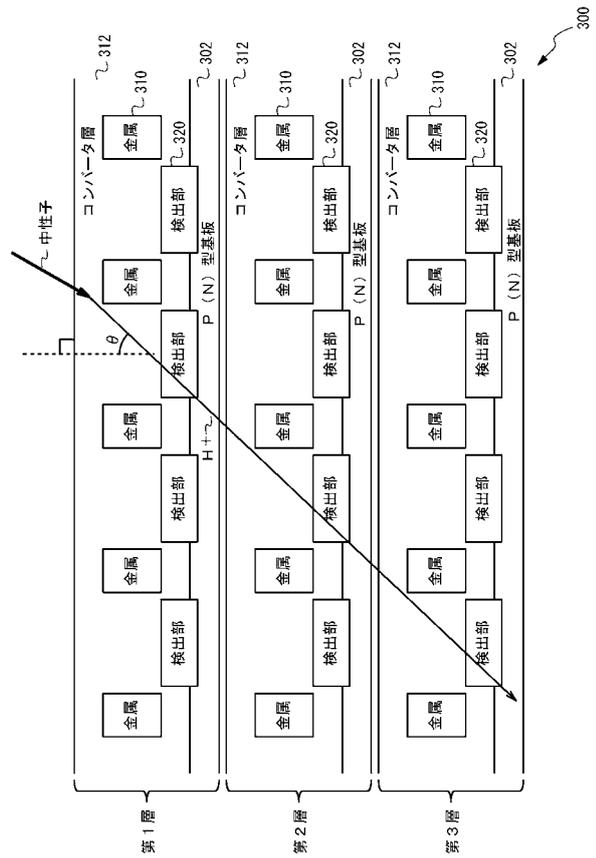
【 図 6 】



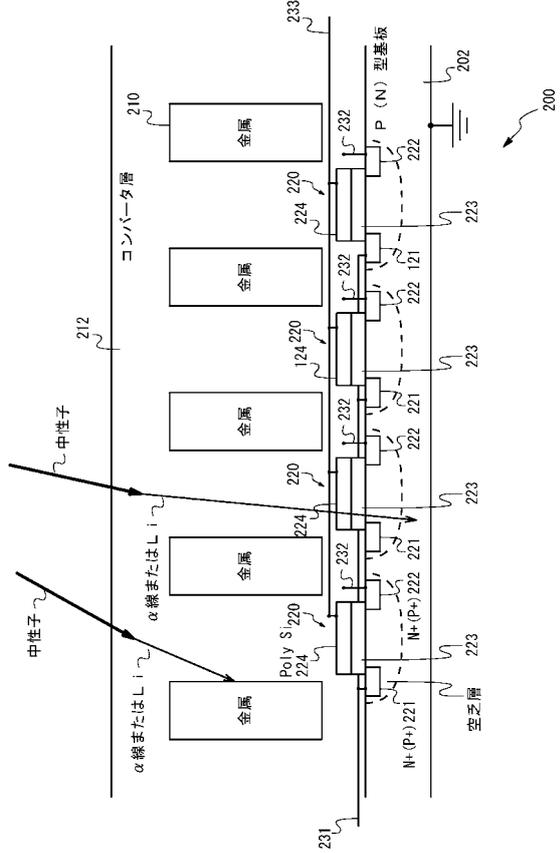
【図7】



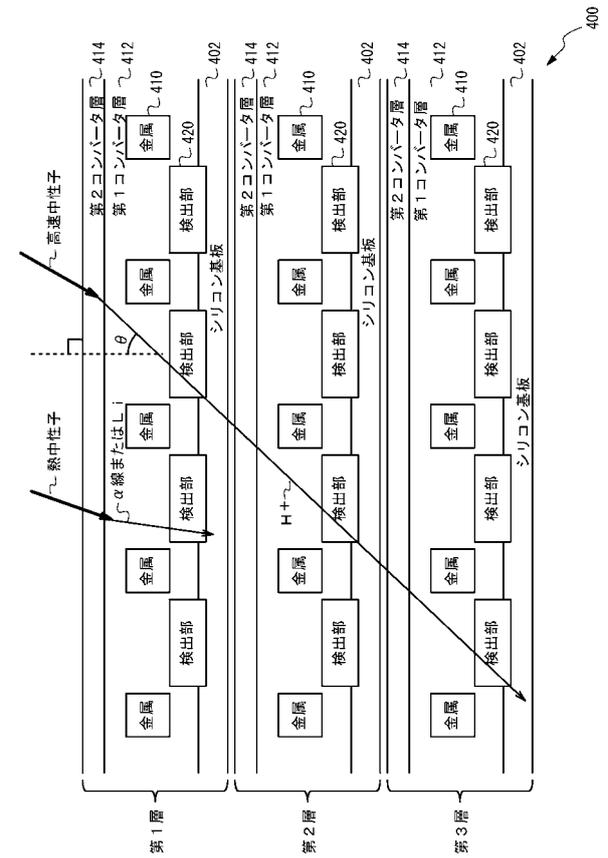
【図9】



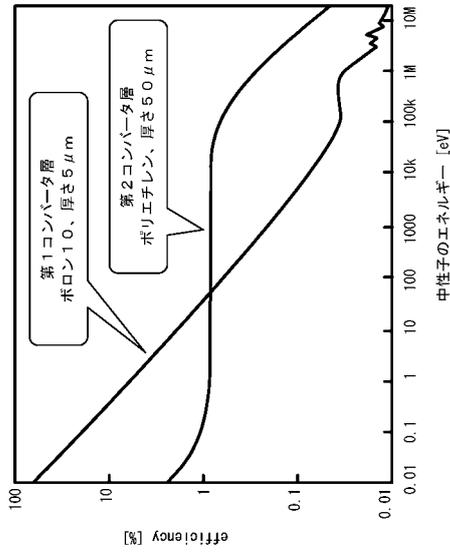
【図8】



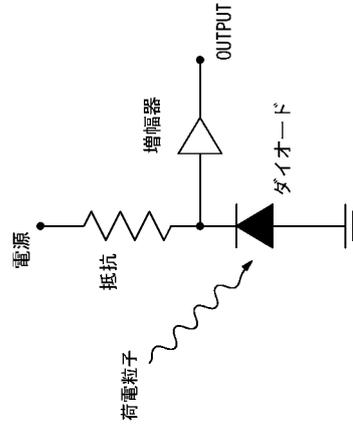
【図10】



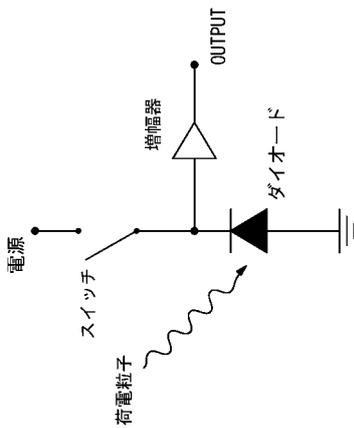
【 図 1 1 】



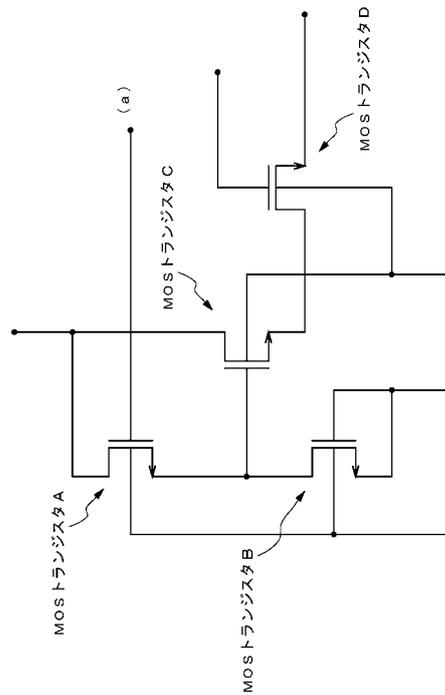
【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 田中 秀治  
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 内田 智久  
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 身内 賢太郎  
京都府京都市左京区吉田本町 国立大学法人京都大学内
- Fターム(参考) 2G088 FF09 FF18 GG21 JJ05 JJ29 JJ37 KK29 KK35