



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104169741 A

(43) 申请公布日 2014. 11. 26

(21) 申请号 201380014938. 2

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2013. 01. 29

G01T 3/00 (2006. 01)

G01T 3/06 (2006. 01)

(30) 优先权数据

61/595, 044 2012. 02. 04 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2014. 09. 18

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2013/023684 2013. 01. 29

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/116241 EN 2013. 08. 08

(71) 申请人 拉皮斯坎系统股份有限公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 T. 戈扎尼 M. J. 金 D. B. 希利亚德

J. 本达翰

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 郭定辉

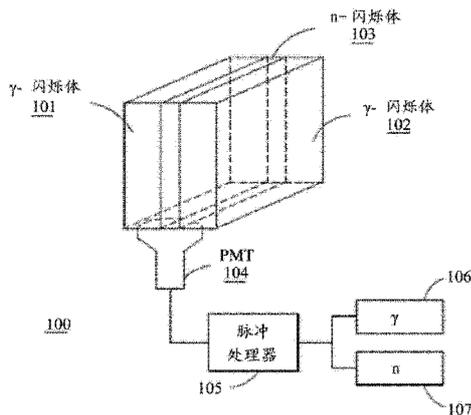
权利要求书2页 说明书15页 附图14页

(54) 发明名称

复合伽马中子检测系统

(57) 摘要

本发明提供了一种基于热中子吸收体的混合物的伽马中子检测器,该热中子吸收体在热捕获之后产生重粒子发射。在一种构造中,基于 B-10 的检测器用于平行电极板几何结构,该平行电极板几何结构将诸如聚乙烯的中子慢化片集成在电极板的背面上以热化中子,然后以高效检测它们。该慢化体还可以由塑性闪烁体片替换,以大面积光电倍增管观看该塑性闪烁体片以检测伽马射线。该检测器能够用于包括门式、行驶通过式、行驶过式、手持式和背负式的几种扫描构造。



1. 一种伽马中子探测器,包括:
中子敏感复合闪烁体的第一层;以及
伽马敏感闪烁体的第二和第三层,其中第一层位于第二层与第三层之间。
2. 根据权利要求1所述的伽马中子探测器,其中,所述第一层包括与 ZnS 混合的 Li-6、B-10、Cd 或者 Gd 中的一个。
3. 根据权利要求1所述的伽马中子探测器,其中,所述第一层通过蒸汽干燥包括粘合剂和溶剂的混合物中的 ZnS 或者 ZnS(Ag) 和 Li-6、B-10、Cd 或者 Gd 中的一个而形成。
4. 根据权利要求2所述的伽马中子探测器,其中,所述 Li-6 或者 B-10 相对于 ZnS 按体积具有 20%至 30%的浓度。
5. 根据权利要求1所述的伽马中子探测器,其中,所述第二和第三层包括有机固体闪烁体、无机固体闪烁体或者液体闪烁体中的一个。
6. 根据权利要求1所述的伽马中子探测器,其中,所述第二和第三层包括具有快速衰变时间的塑性闪烁体,并且所述第一层包括具有较慢衰变时间的闪烁体。
7. 根据权利要求1所述的伽马中子探测器,其中,所述第二和第三层比所述第一层厚。
8. 根据权利要求7所述的伽马中子探测器,其中,所述第二和第三层的厚度在 0.01m 至 0.20m 的范围内。
9. 根据权利要求1所述的伽马中子探测器,其中,所述第二和第三层分别形成不同厚度的前板和后板。
10. 根据权利要求1所述的伽马中子探测器,其中,多个所述伽马敏感闪烁体和多个所述中子敏感复合闪烁体在基本上垂直于入射辐射方向的方向上互相交替布置。
11. 根据权利要求1所述的伽马中子探测器,其中,多个所述伽马敏感闪烁体和多个所述中子敏感复合闪烁体互相交替布置并且以与入射辐射的方向的一角度定向。
12. 一种伽马中子探测器,包括:
塑性闪烁体的伽马探测器;
中子探测器,具有包括银活化 ZnS 和 Li-6 或者 B-10 中的一个的混合物的至少一个屏幕;以及
至少一个光电探测器,用于分别采集中子和伽马探测器产生的光并且将该光转换为中子和伽马事件。
13. 根据权利要求12所述的伽马中子探测器,还包括脉冲波形鉴别器,用于鉴别中子和伽马事件;并且其中所述至少一个屏幕嵌入塑性闪烁体中。
14. 根据权利要求12所述的伽马中子探测器,还包括位于至少一个屏幕与塑性闪烁体之间的反射箔;并且其中至少一个屏幕嵌入透明含氢光导管中。
15. 一种包括至少一个中子区的探测器,所述至少一个中子区包括:
第一和第二层,包括 B-10,用于捕获中子;以及
区层,包括气体,位于第一和第二层之间,其中当捕获中子时,第一和第二层发出带电粒子,该带电粒子使区层中的气体电离,以产生自由电子和离子对。
16. 根据权利要求15所述的探测器,其中,所述气体是氩气。
17. 根据权利要求15所述的探测器,其中,至少一个中子区还包括位置为第一和第二层在其间的聚乙烯的第三层和第四层。

18. 根据权利要求 15 所述的检测器,其中,至少一个中子区还包括位置为第一和第二层在其间的伽马敏感塑性闪烁体的第三和第四层。

19. 根据权利要求 15 所述的检测器,其中,多个中子单元区堆叠在一起,从而提高复合检测器的效率。

20. 根据权利要求 15 所述的检测器,其中,多个中子单元区堆砌在一起,从而提高复合检测器的面积和效率。

21. 根据权利要求 15 所述的检测器,其中,多个中子单元区以可折叠的几何结构保持在一起。

复合伽马中子检测系统

[0001] 相关专利申请的交叉引用

[0002] 本申请是对于优先权基于 2009 年 12 月 20 日提交的名称相同的第 61/289,207 号美国临时专利申请的于 2010 年 12 月 22 日提交的名称为“Composite Gama Neutron Detection System”的第 12/976,861 号美国专利申请的部分继续申请。

[0003] 此外,本申请是对于优先权基于 2008 年 6 月 11 日提交的第 0810638.7 号英国专利申请并且是 2009 年 6 月 11 日提交的 PCT/GB2009/001444 的国家阶段申请的、对于优先权于 2010 年 12 月 10 日提交的名称为“Photomultiplier and Detection System”的第 12/997,251 号美国专利申请的部分继续申请。

[0004] 本申请还对于优先权基于 2012 年 2 月 4 日提交的第 61/595,044 号美国临时专利申请。

[0005] 在此通过整体引用并入上述全部申请。

技术领域

[0006] 本申请总的来说涉及放射性材料检测领域,具体地说,涉及检测中子和伽马射线的系统和技術,并且更具体地说,涉及成本效益高、小型并且容易由可用材料制造的基于中子和伽马射线的检测系统和方法。

背景技术

[0007] 材料的物理运输,包括邮包、货物、原材料和其他商品的运输是任何经济的组成部分。通常,以运输容器或者货柜的方式运输材料。这种容器或者柜子包括半挂车、大卡车和火车以及集装箱船或者货运飞机能够承载的联运集装箱。然而,这种货运集装箱或者货物集装箱能够用于非法运输诸如核材料和放射性材料的违禁品。检测这些威胁要求特别是在国界或者州界以及诸如机场和港口的转运点的用于确定存在隐藏的核材料的快速、安全并且准确的检验系统。

[0008] 当前,采用无源和有源检测技术来检测隐藏的核材料。无源检测技术基于核威胁或者放射性威胁发出伽马射线,并且在某些情况下,发出能够检测到的中子、辐射的原理。尽管无源检测系统容易使用,但是它们存在许多缺点,包括因为诸如正扫描的车辆及其内的东西的自然背景的抑制、因为诸如陶土瓦、肥料等的非恶性货物的自然背景频谱的变化以及具有位于或者接近恶性线的伽马射线的货物中存在放射同位素的不可避免因素导致的错误肯定率和错误检测率高。此外,许多伽马源是自屏蔽的并且 / 或者从外部能够容易地屏蔽,这样使得它们难以检测,因为辐射吸入屏蔽中。此外,通常,伽马检测器使得中子检测器糟糕,并且良好的中子检测器常常是糟糕的伽马检测器。

[0009] 其他检测技术采用不带电粒子,诸如中子和光子(伽马射线)来辐照可疑集装箱。不带电粒子能够穿过高密物体,从而识别感兴趣的特定元素,因此,某些检测装置因为与正检验的物体中存在的特定元素相互反应而利用中子或者光子的吸收和 / 或者散射图形。第 5,006,299 号和第 5,114,662 号以及第 5,076,993 号美国专利中可找到这种装置的例子,

第 5,006,299 号和第 5,114,662 号美国专利采用热中子分析技术 (TNA) 来扫描易爆行李,并且第 5,076,993 号美国专利描述了基于脉冲式快速中子分析 (PFNA) 的违禁品检测系统。在此通过引用并入上述所有专利。

[0010] 诸如微分衰变分析 (DDA) 和在中子或者光子诱导裂变之后测量延迟伽马射线和中子的测量之类的有源检测技术能够用于检测存在裂变材料。优选地利用对互相的辐射不敏感的中子和伽马射线探测器测量辐射。延迟中子的检测是甚至在存在隐藏核材料的(各)屏蔽机构并且与延迟伽马射线相比背景仍然小的情况下,检测裂变材料的可靠方法。因为延迟中子的数量比延迟伽马射线的数量少两个数量级,所以要求高效大面积探测器在中子检测中最敏感。

[0011] 上面描述的每个检测系统都有缺陷。特别是,这些装置通常采用产生具有广谱能量的高能中子的加速器。以特定能量移动的中子的吸收/散射难以在不相互反应的情况下检测通过物体的给定大量中子。因此,装置产生的“指纹”极小,难以进行分析,并且通常导致非常大量的错误肯定或者错误否定检测结果。

[0012] 此外,公知的现有技术检测系统具有局限性,其设计和方法妨碍其实现低辐射剂量,这对检验中的人和环境构成威胁,也妨碍产生高质量的图像,高质量的图像是商业上接受的先决条件。

[0013] 尽管希望同时使用无源和有源检测技术,但是需要的是成本效益高、小型并且由可用材料制造中子探测器的基于中子和伽马射线的检测系统和方法。

[0014] 最常采用的中子探测器是 He-3 气体比例室。在此,He-3 与中子交互反应,以产生 He-4 离子。在探测器的电场中使该离子加速到足够高能量的程度,从而使其他气体原子电离。如果仔细控制,能够使气体产生雪崩击穿,从而导致位于探测器的输出的可测量电流脉冲。通过对气体加压,能够将通过热中子在气体中相互反应的速率提高到合理水平。然而,He-3 是较稀少材料,并且自然界中不存在。这样使得可用性和将来提供这种探测器具有某种不确定性。此外,运输加压 He-3 管要求特殊许可,这样可能存在麻烦并且可能存在问题。

[0015] 全球采用的最通用无源放射性材料探测器在上部采用中子慢化体 105,该中子慢化体 105 具有:嵌入其内的多个 He-3 探测器管 116,该 He-3 探测器管 116 由铅屏蔽 108 覆盖;以及下部,该下部包括塑性闪烁体和 PMT(光电倍增管)嵌入其内的慢化体 110,如图 1A 所示。然而,该探测器构造仍采用稀少 He-3。此外,图 1B 示出伽马射线和中子探测器分离的另一个通常采用的探测器。如图 1B 所示,与塑性闪烁体 110 相邻布置包括多个 He-3 探测器管 116 的中子慢化体 105,该塑性闪烁体 110 包括 PMT115 和铅屏蔽 108。然而,该探测器构造仍采用稀少 He-3,并且呈现较大脚印。

[0016] 已经有用于替换 He-3 探测器的几个替代探测器。然而,这些探测器中的许多探测器也对伽马射线敏感,在必须将中子与伽马射线区别开的应用中,这是不能接受的。

[0017] 因此,需要一种成本效益高、小型并且由可用材料容易地制造中子探测器的基于中子和伽马射线的检测系统和方法。此外,需要一种使中子和伽马射线探测器分离的成本效益高的小型检测系统。

发明内容

[0018] 在一个实施例中,本申请描述了一种薄镀层 ^{10}B 平板电离室中子探测器,能够利用

该薄镀层 ^{10}B 平板电离室中子检测器作为当前辐射门式监视器 (RPM) ^3He 检测器的直接非正式替换。

[0019] 在一个实施例中,本说明书的检测器包括夹在硼喷涂阳极和阴极电极板之间的氦气体区。

[0020] 在一个实施例中,多个区堆叠在一起,以提高检测器的内在效率。在一个实施例中,检测器是多层的,并且包括 20 以上的层。

[0021] 在一个实施例中,“堆砌”多个检测器单元区,以实现至多 1 平方米的面积。在一个实施例中,为了容易运输,折叠大检测器单元。

[0022] 在一个实施例中,采用平行板几何结构,该平行板几何结构将诸如聚乙烯的中子慢化片集成在电极板的背面,以热化中子,然后以高效检测它们。任选地,能够利用塑性闪烁体片替换慢化体,可以以大面积光电倍增管观看该塑性闪烁体片,以除了中子还检测伽马射线,与现有 RPM 的情况相同。

[0023] 本说明书还描述了结构和制造简单、容易与单元区检测器成比例、容易适应各种应用并且成本低的大面积检测器。

[0024] 在一个实施例中,本说明书描述了中子单元区检测器,该中子单元区检测器包括:第一层和第二层,该第一层和第二层包括聚乙烯,用于慢化快速中子;第三和第四层,包括 B-10,用于捕获慢化的快速中子,其中第三和第四层位于第一和第二层之间;并且气体区层位于第三和第四层之间,当捕获中子时,该第三和第四层发出带电粒子,该带电粒子使气体区层中的气体电离,以产生自由电子和离子对。

[0025] 在一个实施例中,中子检测器包括多个单元区检测器,该单元区检测器堆叠,从而提高检测器效率。

[0026] 在另一实施例中,本说明书描述了伽马中子单元区检测器,该伽马中子单元区检测器包括:第一层和第二层,该第一层和第二层包括伽马敏感塑性闪烁体,用于慢化快速中子,并且检测伽马射线;第三和第四层,包括 B-10,用于捕获慢化的快速中子,其中第三和第四层位于第一和第二层之间;并且气体区层位于第三和第四层之间,当捕获中子时,该第三和第四层发出带电粒子,该带电粒子使气体区层中的气体电离,以产生自由电子和离子对。

[0027] 在一个实施例中,伽马中子检测器包括多个单元区检测器,该单元区检测器堆叠,从而提高检测器效率。

[0028] 在一个实施例中,塑性闪烁体包括:设置于玻璃层之间的有机固体闪烁体、无机固体闪烁体或者液体闪烁体中的至少一个。

[0029] 在另一实施例中,本说明书描述了制造检测器中使用的按比例缩小、低成本、大面积硼衬底的方法,该方法包括:将薄铜箔片用作金属基底;将铜箔附接到刚性层,以形成复合基底,从而提供大面积结构强度;通过将复合基底浸在三氯化铁溶液中,蚀刻堆砌图形和各电线到复合基底中;将复合基底安装在滚筒上,以用于真空沉积;以及使硼沉积在铜箔的表面上,以形成所述硼衬底,其中利用掩模阻挡硼沉积到电线上。在一个实施例中,铜箔的厚度在 50 至 100 μm 的范围内。在一个实施例中,刚性层包括卡普顿层。

[0030] 在一个实施例中,制造大面积硼衬底的方法可选地包括通过将硼衬底层叠在聚乙烯片上制造快速中子检测器的步骤。

[0031] 附图中更详细示出本发明的上述以及其他实施例,并且下面提供更详细描述。

附图说明

[0032] 当结合附图研究时,通过参考下面的详细描述,将明白本发明的这些以及其他特征和优点,因为更好地理解它们。

[0033] 图 1A 示出采用 He-3、包括中子慢化体和塑性闪烁体的现有技术的放射性材料检测器;

[0034] 图 1B 示出采用 He-3、包括中子慢化体和塑性闪烁体的现有技术的放射性材料检测器;

[0035] 图 1C 示出根据本发明一个实施例的复合伽马中子检测器的原理布局;

[0036] 图 2 示出基于银活化硫化锌的混合物的典型中子检测器;

[0037] 图 3 示出也将塑性闪烁体用于伽马射线检测的基于银活化硫化锌的混合物的典型中子检测器;

[0038] 图 4 示出利用基于银活化硫化锌的中子检测器的实验结果;

[0039] 图 5 分别示出对于伽马相互反应和中子相互反应的时间的函数的脉冲信号;

[0040] 图 6 示出伽马射线与中子测量信号之间的差别;

[0041] 图 7A 示出为了提高中子敏感度具有多层伽马和中子检测器材料的本发明的检测器的一个实施例;

[0042] 图 7B 示出为了提高中子检测效率具有有角度检测器板的本发明的检测器的另一个实施例;

[0043] 图 8 示出用于本发明的检测系统的典型读出电路;

[0044] 图 9 示出由汽车驱动的本发明的伽马中子检测器的典型应用;

[0045] 图 10 示出行驶通过扫描构造的伽马中子检测器的另一种典型应用;

[0046] 图 11 示出与用于产生复合伽马中子 X 射线图像的移动 X 射线扫描仪组合的伽马中子检测器的又一种典型应用;

[0047] 图 12 示出门式或者龙门构造的组合伽马中子检测器和基于 X 射线的成像系统的另一实施例;

[0048] 图 13 示出根据本发明一个实施例的便携式构造的伽马中子检测器;

[0049] 图 14 示出根据本发明一个实施例的基于平行板的硼 -10 (B-10) 检测器;

[0050] 图 15A 示出第一实施例中的快速中子检测器几何结构;

[0051] 图 15B 示出第二实施例中的快速中子检测器几何结构;

[0052] 图 16A 示出对于制造本说明书的 B-10 检测器能够实现可量测性的典型方式;

[0053] 图 16B 示出对于制造本说明书的 B-10 检测器能够实现可量测性的典型方式;

[0054] 图 16C 示出对于制造本说明书的 B-10 检测器能够实现可量测性的典型方式;

[0055] 图 17 是示出本说明书的 B-10 检测器的检测效率的曲线图;

[0056] 图 18 是示出与基于 ^3He 的微分衰变分析 (DDAA) 检测器相比,本发明的 ^{10}B 中子检测器的快速中子检测效率的曲线图;

[0057] 图 19A 示出制造本说明书的大面积硼基底的第一制造步骤;

[0058] 图 19B 示出制造本说明书的大面积硼基底的第二制造步骤;

- [0059] 图 19C 示出制造本说明书的大面积硼基底的第三制造步骤；
[0060] 图 19D 示出制造本说明书的大面积硼基底的第四制造步骤；
[0061] 图 19E 示出制造本说明书的大面积硼基底的第五制造步骤；以及
[0062] 图 19F 示出制造本说明书的大面积硼基底的第六制造步骤。

具体实施方式

[0063] 本说明书公开了一种在伽马和中子特征显著分离的情况下，利用复合伽马中子探测器检测放射性威胁的系统和方法，能够构造该复合伽马中子探测器，以对伽马检测和中子检测都具有高敏感性。本发明的系统以最小错误报警实现最大威胁检测，并且因此提高吞吐量。

[0064] 此外，本说明书描述了成本效益高、小型并且容易由可用材料制造中子探测器的复合伽马中子检测系统和方法。

[0065] 本说明书描述了多个实施例。为了使所属技术领域的技术人员实施本发明，提供如下公开内容。不应当将本说明书中使用的语言理解为任何一个特定实施例的一般否定，也不能用于超出在这里所使用的术语的意义限制权利要求书。在此定义的一般原理可以应用于其他实施例和应用，而不脱离本发明的实质范围。此外，所使用的术语和用语是为了描述典型实施例，并且不应当理解为限制意义。因此，赋予本发明最大的范围，包括符合在此公开的原理和特征的许多替代、修改和等同。为了清楚起见，未详细描述与在本发明所属技术领域内公知的技术材料相关的细节，从而不会不必要地妨碍本发明。

[0066] 几个原子核具有大截面，用于检测热质子。这些原子核包括： ^3He 、 Gd 、 Cd 以及两个特别大的大截面原子核： ^6Li 和 ^{10}B 。在所有情况下，在大截面原子核与热中子相互反应后，结果是高能离子和二次高能带电粒子。

[0067] 例如，利用下面的等式能够特征化中子与 ^{10}B 原子核的相互反应：

[0068] 等式 1： $n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^7\text{Li} + ^4\text{He}$ (945 靶， $Q = 4.79\text{MeV}$)

[0069] 在此，括号中示出截面和 Q 值， Q 值是相互反应释放的能量。

[0070] 同样，下面的等式特征化中子与 ^6Li 原子核的相互反应：

[0071] 等式 2： $n + ^6\text{Li} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He}$ (3840 靶， $Q = 2.79\text{MeV}$)

[0072] 公知带电粒子和重离子在凝聚体中具有小移动范围，通常从相互反应的点仅移动几微米。因此，围绕相互反应点的能量沉积率高。在本发明中，含有中子截面大的原子核的分子与被能量沉积激发时提供闪烁响应的分子混合。因此，当与闪烁材料相互混合时，中子与 ^6Li 或者 ^{10}B 的相互反应例如导致发出闪光。如果该光通过介质传播到光电探测器，则可以将光信号转换为电子信号，该电子信号表示中子相互反应期间沉积的能量的量。

[0073] 此外，诸如 Cd 、 Gd 的材料和不发出重粒子而具有高热俘获截面的其他材料产生基本上同时发出的低能量内转换电子、俄歇电子、 X 射线和伽马射线，能量范围从几 keV 到几 MeV 。因此，诸如氧硫化钨 (GOS) 和钨酸钨 (CWO) 的一层这些材料当在闪烁体基体中混合时或者当在闪烁体中制造时将产生光（可能比较重的粒子少）。 GOS 通常伴有两个催化剂，导致慢速衰变 (1ms 数量级) 和快速 ($5\mu\text{s}$ 数量级)。 CWO 具有较快的衰变常数。根据总能量，非常大一部分能量将沉积在该层中，同时一些电子使能量沉积在周围的闪烁体中。此外，热捕获之后产生的大量 X 射线和伽马射线在周围的闪烁体中相互反应。因此，中子相互反应

将导致慢速衰变常数和快速衰变常数的事件。在许多情况下,中子信号包括带慢速分量和快速分量的信号(称为“重合”),因为电子在该层中交织和伽马射线在周围闪烁体中相互反应。

[0074] 能够对包围 Li-6 或者 B-10 原子核的材料的闪烁响应调谐,使得该光能够通过具有为了仅对伽马辐射做出响应而选择的特性的第二闪烁体,诸如一个实施例中的塑性闪烁体。在另一个实施例中,包围 Li-6 或者 B-10 的材料不是闪烁体,而是仅对中子敏感的检测器中产生的透明非闪烁塑料。

[0075] 因此,塑性闪烁体对中子和伽马均敏感。当检测器中的 H 热化并且然后捕获中子时,发出并且通常能够检测到 2.22MeV 伽马射线。这样,本发明实现能够以高敏感性检测中子和伽马辐射的复合伽马中子检测器。此外,本发明的复合检测器还提供伽马特征与中子特征的良好分离。在此应当注意,除了带电粒子,B-10 产生伽马射线。因此,利用中子捕获之后产生伽马射线的材料,结果是检测到类似伽马射线。然而,大多数应用都希望检测中子;因此,本发明的检测器的优点在于还检测中子。

[0076] 图 1C 示出根据本发明一个实施例的复合伽马中子检测器 100 的原理布局。参考图 1C,该检测器设计采用两个伽马敏感的闪烁板(伽马检测器)101 和 102 包围单个中子检测器 103。中子检测器 103 还包括中子敏感复合闪烁体的单个平板,在该复合闪烁体中,诸如 Li-6 或者 B-10 的中子敏感材料的原子核与诸如 ZnS 的闪烁材料混合。在一个实施例中,在保持由 ZnS 有效闪烁响应的同时,对于中子敏感材料(诸如 Li-6),能够实现按体积计算 20-30% 的密度。

[0077] 在一个实施例中,伽马检测器板由诸如但是并不局限于有机闪烁体和无机闪烁体的固体闪烁材料制造,该有机闪烁体包括固体塑性闪烁体(例如,NE102)和蒽,该无机闪烁体包括 NaI(Tl)、CsI(Tl)、CsI(Na) 和 BaF₂。

[0078] 在另一个实施例中,可以在玻璃板之间布置液体闪烁体来用作伽马检测器。这些常常采用以蒽分子作为基本组分与有机金属化合物形成的有机溶剂,以增强闪烁效率和因此总的来说比固体闪烁体更容易使用。

[0079] 在一个实施例中,中子检测器可以包括粘合剂分子,诸如但是并不局限于溶解在适当溶剂中作为基本底物的苯乙烯。因为溶剂蒸发,一旦干后形成的塑性膜非常稳定并且具有自支承性。闪烁材料(例如,ZnS)和中子的特定元素(即,Gd、Li、B)在溶剂蒸发之前与溶剂和粘合剂互相混合。因为溶剂蒸发,所以形成全部三种组分的均质混合。

[0080] 在变型实施例中,Gd、Li、B 填料液体闪烁体(通常基于具有适当有机金属化合物的蒽分子来提高闪烁效率)能够密封在伽马闪烁板之间的间隙中。有利的是,薄玻璃挡板布置于中子闪烁体与伽马检测器之间,以防止两个闪烁体材料之间发生化学反应。

[0081] 在一个实施例中,对于大固定现场安装的最大 2m×1m 的手动应用,典型板尺寸在 0.1m×0.1m 的范围内。如果大于这种最大尺寸,光采集开始成为问题,因为物理处理和封装成为问题。如果小于该最大尺寸,检测效率开始降低到低于有效水平,导致逐步延长测量时间。

[0082] 在一个实施例中,伽马检测器比中子检测器厚。有利的是,对于大固定现场系统,伽马检测器的厚度不小于 0.01m(对于手动应用)至 0.2m。与后伽马检测器相比,可以将前伽马检测器优化为不同的厚度,以将整个伽马和中子检测效率提高到最高。例如,0.05m 的

前伽马检测器和 0.1m 的后伽马检测器可以应用于大固定现场系统。为了将伽马相互反应的概率降低到最低,并且将光离开闪烁体的机会提高到最高,中子检测器通常薄。基于固体屏幕闪烁体的典型中子检测器在 0.5-1mm 的厚度范围内,而液体中子闪烁体可以在 0.01 至 0.05m 的厚度范围内。

[0083] 来自伽马检测器 101、102 和中子检测器 103 的光信号由一个或者多个光电检测器读出,在一个实施例中,光电检测器是光电倍增管 (PMT) 104。因此,将光信号转换为电子信号,然后,脉冲处理器 105 处理该电子信号,该脉冲处理器 105 分别指定由于伽马和中子相互反应 106 和 107 导致的相互反应。

[0084] 在一个实施例中,有利的是,伽马敏感板 101 和 102 由衰变时间快的塑性闪烁体制造,诸如短于 $0.1 \mu s$ 的衰变时间。此外,有利的是,中子检测器 103 的 Li-6 或者 B-10 原子核与衰变时间较慢的诸如 ZnS 的闪烁材料混合。在一个实施例中,闪烁材料的衰变时间大于 $1 \mu s$ 。伽马检测器中的闪烁体的衰变时间和中子检测器中的闪烁体的衰变时间之差有助于在伽马特征 106 与中子特征 107 之间实现显著分离。通常,希望选择原子量低的闪烁材料来将导致增强伽马中子排斥的通过伽马射线的直接激发概率降低到最小。

[0085] 在另一个实施例中, Li-6 或者 B-10 与响应非常快 ($\sim 10ns$) 的材料混合并且由响应速度低 ($\sim 1ns$) 的材料包围。

[0086] 请注意,如果包围 Li-6 使用的材料是非常快速闪烁体,则特别是当不利用闪烁体包围其时,检测器能够以非常高的辐射强度测量中子。

[0087] 所属技术领域的技术人员明白诸如 ZnS 的闪烁材料能够吸收其自己的光,并且因此,对 ZnS 的基于闪烁体检测器的厚度有限制。请注意,该厚度通常仅有几毫米。此外,由于在发生每个闪烁事件时各向同性发出光,所以有效地在能够同时从屏幕的两层捕获发出的光的宽面积屏幕中形成闪烁体。因此,在一个实施例中,基于闪烁体中子检测器 103 设计为面积宽的屏幕,使得可以以高效率从屏幕的两侧采集光。

[0088] 请注意,1mm 厚的 Li-6/ZnS 屏幕的检测效率与直径为几厘米的加压 He-3 气体比例管的检测效率处于相同数量级。即,对于非常小的尺寸,与加压 He-3 气体管相比,本发明的基于 Li-6/ZnS 的中子检测器具有等同或者更高的检测效率。

[0089] 因此,在一个实施例中,中子检测器基于银活化硫化锌的混合物,该混合物含有具有高热中子捕获截面、发出诸如 6Li 或者 ^{10}B 的重粒子的材料。即,该混合物包括在热捕获之后发出重粒子的热中子吸收体。图 2 示出一个这种典型中子检测器 200。参考图 2,检测器 200 包括一个或者多个薄屏幕 201,该一个或者多个薄屏幕 201 包括基于 ZnS(Ag) 的混合物,如上所述。在一个实施例中,屏幕 201 具有约 0.5mm 的厚度,并且嵌入透明含氢光导管 202 中。光导管 202 还用作中子慢化体。ZnS(Ag) 磷屏幕中的中子相互反应产生的光通过光导管 202 进入诸如光电倍增管 (PMT) 203 的光电检测器,该光电检测器产生由计数器 204 利用其对中子计数的信号。

[0090] 利用相同的基本电子零件,以同步伽马射线检测也能够实现上述技术。因此,检测器 200 还包括塑性闪烁体 205,该塑性闪烁体 205 用作伽马射线检测器和慢化体。塑性闪烁体可以由聚乙烯基甲苯或者 PVT 或者所属技术领域内公知的其他适当塑性闪烁体材料构成。闪烁体 205 中的伽马射线相互反应产生的光由另一个 PMT206 检测,该 PMT206 产生由计数器 207 利用其对伽马射线事件计数的信号。在一个实施例中,计数器 207 是用于测量

伽马射线的频谱的多通道分析仪 (MCA)。

[0091] 反射箔 208 布置于塑性闪烁体 205 与 (各) 屏幕 201 之间,以防止来自中子和伽马检测材料的光信号互相污染。因此,利用反射器防止伽马射线产生的光与中子产生的光由同一个 PMT 采集。这样防止由伽马射线导致的错误中子计数。由于反射器 208 的缘故,屏幕中的中子相互反应产生的一些光将被返回光导管。

[0092] 图 2 的设计提供了一种小型伽马射线 / 中子检测器,其具有标准电子零件和非常高的伽马射线抑制性的优点。少量伽马射线将与 Li-6 板相互反应,并且产生强度低的信号。通过以一些中子检测为代价设置阈值,能够消除该信号。在一个实施例中,在中子通道 204 中能够采用脉冲波形鉴别器来增强伽马射线抑制性。

[0093] 图 3 示出同时进行中子和伽马射线检测的另一个典型检测器 300。在这种情况下,光导材料由塑性闪烁体 301 替换,该塑性闪烁体 301 用作伽马射线检测器、慢化体和光导管。检测器 300 还包括屏幕 302,优选地,该屏幕 302 薄,并且由基于 ZnS(Ag) 的混合物制造用于中子检测。在 ZnS(Ag) 与塑性闪烁体 (PVT) 产生的脉冲 304 之间利用脉冲波形鉴别器 (PSD) 电路 303 使中子与伽马射线事件分离。此外,因为屏幕中的中子相互反应产生的光与 PVT 基于相同的衰变时间并且将由 PSD 消除,所以实现伽马射线抑制性。所产生的光通过透明的中子减速介质 301 传播到光电倍增管 (PMT) 305,在光电倍增管 305 将光转换为可测量信号,以测量伽马和中子事件。混合中子 / 伽马射线检测器的优点是能够采用同一个 PMT 测量中子和伽马事件。

[0094] 图 4 示出具有嵌入光导管中具有两倍 ${}^6\text{LiF}$ 浓度和厚度的 LiF:ZnS(Ag) 屏幕的典型检测器的性能。图 4 所示的结果说明重量比为 1:2 而屏幕厚度为 0.45mm 的信号。同时采用嵌入聚乙烯中的 1、2 和 3 个 LiF:ZnS(Ag) 屏幕获得类似结果,并且实现约 12% 至 22% 的检测效率。所属技术领域内的技术人员明白该效率与紧密封装的三行 ${}^3\text{He}$ 检测器能够实现最高效率相当,该最高效率约为 25%。

[0095] 图 4 中的信号分布说明未将所有粒子能量吸收都转换为光,并且一些光被屏幕吸收。这说明需要综合优化,在该综合优化中,获得正确 ${}^6\text{Li}$ 浓度,以实现高中子吸收,同时在闪烁体中仍有足够高的相互反应,以产生相当高的光输出。屏幕厚度、屏幕的数量有机慢化体的厚度也是重要的优化参数。

[0096] 对于针对中子检测的应用,ZnS(Ag) 磷的主要优点是,与伽马射线相互反应产生的电子相比的对于重粒子的大量光输出。此外,因为屏幕的厚度小,所以伽马射线的检测效率低。此外,由于与 ZnS(Ag) 屏幕中的电子产生的光类似,PVT 光的时间衰变是 $\sim 3\text{ns}$,所以 PSD 也抑制伽马射线在 PVT 中的相互反应。

[0097] 所属技术领域内的技术人员明白,感兴趣放射性材料产生的中子具有一个能量范围,并且随着相互反应的中子的能量降低,检测器中的中子的相互反应效率通常显著升高。因为该原因,大多数 He-3 检测器都位于富氢减速材料中,诸如聚乙烯,其功能是促进高能量中子散射,使得它们丧失大量能量从而提高 He-3 气体比例计数器中的检测概率。在本发明中,有利的是,设计伽马检测器,以实现伽马检测和中子减速的双功能,从而进一步改善中子检测效率。塑性闪烁体材料是非常有效的慢化体,因为该特征包括在整个检测器设计中。

[0098] 图 5 示出脉冲信号,该脉冲信号是时间与本发明的复合检测器中的伽马相互反应

和中子相互反应的函数。参考图 5, 中子敏感闪烁体的闪烁特性曲线 502 与周围的伽马敏感检测器的特性曲线 501 显著不同。还能够对这两个特性信号 501 和 502 调谐, 以呈现显著不同。这可以利用适当脉冲波形鉴别方法实现。因此, 在本发明的一个实施例中, 确定检测器中沉积的总能量和相互反应的类型。在通过分析脉冲信号的峰值幅值能够确定总能量时, 通过分析闪烁脉冲的衰变率, 确定相互反应的类型。

[0099] 图 6 示出当将模拟脉冲波形鉴别应用于使伽马射线与中子事件分离时, 对于 ^{252}Cf 和 ^{60}Co 放射源鉴别伽马射线和中子。曲线 601 表示对由 ^{60}Co 发出的伽马射线的测量, 曲线 602 表示对由 ^{252}Cf 发出的中子的测量。所属技术领域内的技术人员明白, 在一个实施例中, 这两个曲线分离并且可以不同地区别开。

[0100] 在一个实施例中, 通过从测量的中子数中减去伽马射线的校准量, 改善伽马射线抑制性。

[0101] 在一个实施例中, 有利的是, 在检测器的输出直接执行数字脉冲处理。由于数据速率可以相当高, 所以检测器的处理有助于将该数据过滤到低带宽, 以传输到其他处理系统。可以利用该数据监视检测到的放射性量, 并且利用一些装置产生适当报警和 / 或者显示数据。

[0102] 在本发明的又一个方面中, 请注意, 中子的反应也可能产生相关伽马射线辐射。例如, 在 Gd-157 的中子反应中, 激发的 Gd-158 原子核随着伽马射线的发出而衰变。在中子相互反应的有限时间内产生该伽马射线, 并且因此, 可以利用脉冲波形鉴别与时域相关的原理, 结合中子闪烁体响应, 包括在周围的伽马检测器中测量的伽马射线响应, 以产生复合信号。

[0103] 尽管图 1C 示出复合检测器的典型构造, 但是可以建立变型检测器构造, 从而进一步增强中子和伽马检测效率。两个典型变型构造示于图 7A 和图 7B。如图 7A 所示, 第一构造在基本上垂直于入射辐射 705 到达方向的方向上, 互相交替布置多层伽马敏感闪烁体片 701 和中子敏感闪烁体板 702。在该构造中, 伽马中子检测器的效率与检测器板材料的板的数量成正比; 但是这样降低了效果, 因为与检测器后面的层相比, 在检测器的第一层中优先吸收辐射。当以这种构造布置检测器板时, 显著增强中子敏感性。

[0104] 在图 7B 所示的另一个构造中, 互相交替布置伽马检测器材料 710 和中子检测器材料 720 的多层, 并且使它们的方位与进入辐射 715 的方向倾斜。即, 层 710 和 720 不平行于进入辐射 715 的方向。检测器板倾斜的这种检测器构造显著提高中子检测效率。这是因为, 这种情况下的中子或者光子通过敏感检测器板的路径长度较长, 与图 7A 所示的板的布置相比, 这样有助于提高检测效率。然而, 这种构造的检测器制造也更昂贵, 并且要求更大的读出电路。

[0105] 所属技术领域内的技术人员明白, 还可以有闪烁体材料和光电检测器的其他构造, 并且根据其对应用的适用性, 可以选择任何构造。因此, 参考图 1、7A 和 7B 描述的本发明的复合伽马中子检测器并不局限于带 Li-6/ZnS 中子检测器的塑性闪烁体伽马检测器。在一个实施例中, 例如, 利用 NaI(Tl) 作为伽马检测器以及利用具有非常快速衰变时间的基于锂、硼或者钷的液体闪烁体, 可以构造复合检测器。在此, NaI(Tl) 伽马检测器将提供关于伽马射线相互反应的显著脉冲高度信息, 而中子检测器将继续提供关于入射中子通量的信息。

[0106] 应当明白,使用带适当光耦合材料的反光涂层将改善整体光采集效率,并且因此,改善检测器响应的均度。还应当明白,还可以利用光学光导管和闪烁体材料的形状改善检测系统的光采集效率。此外,还应当明白,可以利用围绕闪烁材料添加的诸如铅、聚乙烯和镉箔的辐射屏蔽材料降低检测系统对自然产生的背景辐射的响应。

[0107] 在本发明的又一个实施例中,可以采用因为快速和热中子相互反应而提供不同脉冲波形的中子闪烁体,每个脉冲波形都与对伽马检测器选择的脉冲波形不同。

[0108] 图 8 示出典型检测器读出电路体系结构。参考图 8,电路 800 包括光电倍增管 (PMT) 801,该光电倍增管 (PMT) 801 利用与接地阳极 803 保持高负压的阴极 802 工作。阳极 803 通过变压器 805 与高速采样模数转换器 (ADC) 805 交流耦合。ADC805 形成来自 PMT801 的进入信号的时域采样。在一些实施例中,ADC 以等于或者大于 100MHz 的时钟速度工作,以对精确测量幅值高度和升高的和降低的衰变时间提供至多 10ns 的采样周期。在一个实施例中,有利的是,滤波电路包括在 PMT801 与到 ADC805 的输入之间,以用作奈奎斯特滤波器,从而防止采样数据不希望地混叠。在一个实施例中,利用交流耦合变压器 804 作为电感部件,实现 LCR 多极滤波器。

[0109] 在变型构造中,利用大带宽模拟放大器,PMT801 可以直流耦合到 ADC805 的输入端。各种其他电路配置对于所属技术领域内的技术人员显而易见。

[0110] 有利的是,直接将 ADC 产生的数字数据送到数字处理电路,诸如现场可编程门阵列 (FPGA) 806。FPGA 执行高速数字脉冲波形处理,并且构造该 FPGA,以 (1) 记录脉冲的到达时间;(2) 确定该脉冲的振幅;以及 (3) 确定脉冲的后沿时间,以鉴别中子相互反应和伽马相互反应。将逐脉冲数据送到随机存取存储器 807,并且然后,利用计算机 808 上运行的软件程序分析该逐脉冲数据,以求解相对于动态调节基线的检测计数率。可以通过可视显示屏幕 809、可视指示器、声频发声器或者任何其他适当装置,对操作员指示该结果,以当检测到放射性物质时,发出信号。

[0111] 实现脉冲波形鉴别的各种其他方法对于所属技术领域内的技术人员显而易见。

[0112] 图 9 示出汽车驱动扫描构造中移动系统中的复合伽马中子检测器的应用。参考图 9,将伽马中子检测器 901 布置于车辆 902 中。该构造允许从一点到另一点快速重新定位检测器 901,并且该构造还用于在车辆沿着公路通过时变换扫描车辆。在该实施例中,将车辆 902 行驶到诸如路边的位置,并且启动检测系统 901。在一个实施例中,位于车辆 902 上的一个或者多个传感器(未示出)确定存在要扫描的通过被检物,诸如通过的车辆,并且自动接通检测系统 901。一扫描了车辆,就自动断开伽马中子检测器 901。一完成在给定位置扫描,就能够使车辆 902 行驶到新位置,并且根据要求可视扫描。该特征提供以合理的转换方式随机位置扫描的能力。

[0113] 当在扫描现场没有源扫描车辆时,利用处于断开状态的伽马中子检测器记录自然背景辐射,并且利用该自然背景率设定适当告警阈值,发生告警阈值时,在扫描仪处于接通状态时,在通过的车辆中检测到附加放射性。

[0114] 在另一个应用中,复合伽马中子检测器 901 安装在能够以公知速度行驶通过静止目标的车辆 902 中。随着车辆 902 行驶,刺激辐射发出数据,以确定在静止被检物中存在放射性材料。

[0115] 图 10 示出处于行驶通过扫描构造的一个或者多个复合伽马中子检测器的另一个

应用。参考图 10,在具有左侧、右侧和上侧、诸如 1004 的货车能够行驶通过的模式构造中,布置多个复合伽马中子检测器 1001、1002 和 1003,作为固定行驶通过系统。处理来自检测器 1001、1002 和 1003 的信号并且将结果显示在显示器 1005 上。显示器也连接到听觉报警 1006 和视觉报警 1007,当被扫描的车辆 1004 上怀疑有放射性材料时,自动产生听觉报警 1006 和视觉报警 1007。可以利用显示器 1005 和报警 1006 和 1007 上的结果确定是否需要进一步搜查车辆 1004,并且将该车辆转移到等待区,例如,做手动搜查。图 10 所示的行驶通过扫描系统还采用交通控制系统 1008,该交通控制系统 1008 操纵阻挡 1009,以使车辆停止供检验。扫描结果一出现在显示器 1005 上,阻挡就自动升起。

[0116] 在变型构造中,本发明的一个或者多个伽马中子检测器安装有在机场采用的行李处理系统。这样,也可以利用本发明的系统检测通过航站楼行李中的放射性材料。在另一个变型构造中,可以将本发明的一个或者多个伽马检测器安装在航空货物处理设施中和废金属处理设施的入口处。

[0117] 在本发明的又一个实施例中,伽马中子检测器与移动 X 射线扫描仪组合,以产生复合伽马中子 X 射线图像。这示于图 11 中。参考图 11,伽马中子检测器 1101 安装在移动 X 射线扫描仪 1100 上。该移动 X 射线扫描仪 1100 还包括安装在车辆 1103 上的 X 射线扫描系统 1102。在这种情况下,在由 X 射线扫描系统 1102 传输 X 射线图像的同时,获取来自伽马中子检测器 1101 的放射性信号。这样使来自伽马中子检测器 1101 的信号与 X 射线图像数据相关,从而帮助操作员确定在检验的货物中存在放射性材料。可以采用第 10/201, 503、10/600, 629、10/915, 687、10/939, 986、11/198, 919、11/622, 560、11/744, 411、12/051, 910、12/263, 160、12/339, 481、12/339, 591、12/349, 534、12/395, 760 和 12/404, 913 号美国专利申请中公开的任何移动系统,在此通过引用合并所有这些美国专利申请。

[0118] 在又一个实施例中,以门式或者龙门式构造,本发明的伽马中子检测器与 X 射线成像系统组合。参考图 12,多个伽马中子检测器 1201 与以门式构造布置的 X 射线传输系统 1202 在一起。所检验的被检物或者车辆能够通过该门或者龙门。这种操作方式还使放射性信号与所检验的被检物的 X 射线图像相关,从而提高检测效率。例如,在 X 射线图像中观察到存在高衰减区伽马射线和 / 或者中子信号的少量增加低于阈值表示存在屏蔽放射性源。

[0119] 图 13 示出便携式手持构造的伽马中子检测器的另一个构造。参考图 13,示出了伽马中子检测器仪表 1300。该仪表包括主单元 1301 和手柄 1302。在一个实施例中,复合伽马中子检测器(未示出)的闪烁板位于主单元 1301 中,而有利的是,电子零件和电池位于仪表的手柄 1302 中。嵌入式指示器 1303 将关于仪表 1300 的附近存在的辐射量的反馈提供给操作员。该构造对于随机搜索,特别是小被检物,以及搜索车辆中的角落或者角部,非常有用。

[0120] 本发明的新颖方法将中子闪烁检测器与伽马检测器组合,以形成混合伽马中子检测器。该方法具有检测双特征的优点,从而提高检测效率。此外,利用脉冲波形鉴别方法,本发明的系统还使中子信号与伽马信号良好分离。根据应用,本发明的系统可以用于各种构造中,包括但并不局限于:固定式、行驶通过门式、龙门式、便携式和手持式。组合检测器可以用于海运货物检验以及陆地转运点和废金属处理设施的车辆检验,用于行李和航空货物扫描中。本发明的组合中子伽马检测器和 / 或者中子检测器部分和 / 或者伽马检测器部分还要满足辐射检测 ANSI 标准。

[0121] 与基于 He-3 的系统相比,该基于 He-3 的系统因为 He-3 的供给不足存在问题,本发明并不局限于使用带特定原子核的系统。如上所述,对于本发明的系统,诸如锂 (Li-6)、硼 (B-10)、镉 (Cd)、钆 (Gd) 以及氦 (3-He) 的中子热捕获截面大、发出粒子的任何适当材料都可以用于放射性材料检测。该特征有助于使得成本和供给可控。此外,与基于 He-3 的系统相比,本发明的组合伽马中子检测器更小型并且更轻,因为在一个实施例中,本发明的检测器仅使用一组电子零件,而基于 He-3 的系统采用多组电子零件。在此,应当注意,在其他实施例中,本发明可以采用多组电子零件。

[0122] 世界各地采用的大多数门式辐射监视器 (RPM) 都将塑性闪烁体用于检测伽马射线,而将慢化的 ^3He 检测器用于测量中子。重要的是,请注意,在典型的 RPM 中,对于为了降低成本的次优慢化构造,对每个模块仅采用一个或者两个 ^3He 管。这样实现百分之几的中子检测效率。

[0123] 所建议的中子检测器能够替换门式辐射监视器 (RPM) 中的 ^3He 检测器,因为其中子检测和伽马射线检测能力与 ^3He 的检测能力相同。此外,本发明的检测器不含有有害材料、在市售、不需要特殊运输许可、机械性能和环境方面非常坚固、并且容易以合理的成本生产。该检测器也适合手持式和背负式检测器,这种手持式和背负式检测器的效率比 ^3He 的效率。最后,本方法适合集成的中子和伽马射线检测器,因为其采用具有较简单和小型电子零件的单个 PMT。

[0124] 如上所述,就像 ^3He , ^{10}B 具有大热中子捕获截面,并且发出两个可检测到的高能带电粒子,但是与 ^3He 不同, ^{10}B 在自然界充足。另一方面, ^3He 的供应迅速减少,并且因此, ^3He 气体非常昂贵,并且难以获得。尽管在过去,涂硼检测器可用,并且例如,涂硼检测器用作反应堆中子通量监视器,但是效率低,限制了其用途。

[0125] 因此,本说明书在一个实施例中描述了薄涂敷 ^{10}B 平板电离室中子检测器,其可以用于直接下降替换当前的门式辐射监视器 (RPM) ^3He 检测器。在各种实施例中,涂敷 ^{10}B 具有 0.1 至 2.0mm 范围的厚度。在一个实施例中,涂敷 ^{10}B 意味着通过涂敷层进入气体室的带电粒子的能量损失大。较厚的涂敷层意味着通过涂敷层进入气体室的带电粒子的能量损失大。这对信号不利。然而,较厚的涂敷层能够提高检测效率,而降低达到特定效率所需的层数。

[0126] 在一个实施例中,本说明书的检测器包括插在涂敷硼的阳极与阴极板之间的氦气体区。

[0127] 在一个实施例中,采用平行板几何结构,该平行板几何结构使诸如聚乙烯的中子慢化片结合在电极板的背面,以热化中子,并且然后,以高效检测它们。任选地,由利用大面积光电倍增管可以观察的塑性闪烁体代替慢化体,以除了中子还检测伽马射线,与现有 RPM 的情况相同。

[0128] 本说明书还描述了结构和制造简单、容易与单元区检测器成比例、容易适应各种应用并且成本低的大面积检测器。

[0129] 在一个实施例中,如上所述,对基于 ^{10}B 的大面积 ^3He 替换检测器的开发集中在利用图 14 所示的平行板电离室原理。参考图 14,一个单元区检测器的基本几何结构包括夹着气体区 1403 的、被高压偏压的第一硼层 1401 和第二硼层 1402。该两个硼层捕获热中子。当捕获中子时,发出两个带电粒子 ^7Li 和阿尔法并且使气体电离,从而产生自由离子和电子。

[0139] 图 16B 示出按比例缩小本发明的检测器的另一个实施例。在一个实施例中，“堆砌”单元区，以实现至多 1m^2 的面积。检测器矩阵 1606 中的每个方块 1605 代表一个单元区检测器，并且通过具有 10 块 \times 10 块检测器，能够实现大面积。每个块都具有馈入数据获取系统的独立电线 1607。各块由用于电绝缘的凹槽 1608 分离。

[0140] 在又一个实施例中，图 16C 示出可折叠几何结构的检测器 1610，通过如图 16B 所示以折叠方式将 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的检测器一起装接在封装内，该可折叠几何结构的检测器 1610 能够达到非常大的面积。折叠使得检测器更具可运输性，当展开时，该检测器实现非常大的检测面积，从而提高检测效率。

[0141] 通过绘制与具有 4atm 压力的 2 英寸直径 ^3He 管实现相同热中子检测效率 1702 所需的 ^{10}B 层 1701 的数量，图 17 示出本发明的 B-10 检测器的检测效率。在典型情况下，计算 $1\mu\text{m}$ 厚的每层的捕获事件数量。因为含硼金属中的 1.47MeV 阿尔法粒子大小为约 $3.5\mu\text{m}$ ，所以选择该厚度。如果硼层太厚，则在该层内，带电粒子丧失其所有能量，并且消失，对信号没有作用。参考图 17，可以看出，与 ^3He 管实现相同的热中子检测效率需要 40 个 $1\mu\text{m}$ 厚的 ^{10}B 层，如线 1703 所示，该热中子检测效率约为 85%。

[0142] 大面积 ^{10}B 热中子检测器还可以是良好快速中子检测器。在许多有源探测技术中，检测表示隐藏特殊原子核材料的快速中子。图 18 将本发明的 ^{10}B 中子检测器的快速中子检测效率与基于 ^3He 的微分衰变分析 (DDAA) 检测器进行比较。在检测器中热化的探测源中子衰变后，DDAA 技术能够检测热中子诱导裂变中子。该图示出因为聚乙烯在 ^{10}B 检测器内成层，而作为聚乙烯厚度的函数的 ^{10}B 中子检测器的衰变时间 1801 和检测器的检测效率 1802 的曲线图。

[0143] 在检测效率为 25% 的情况下，DDAA 检测器实现 $40\mu\text{s}$ 的衰变时间。这意味着，对于与 DDAA 检测器相同的衰变时间， ^{10}B 中子检测器中的每个聚乙烯层必须为 6mm 的厚度，如曲线 1801 所示。因此， ^{10}B 中子检测器此时的内在检测效率约为 20%，如曲线 1802 所示，与 DDAA 检测器非常类似。

[0144] 图 19A 至 19F 以步骤方式示出在一个实施例中，在制造本发明的单元区检测器时采用的面积为约 1m^2 的大面积硼衬底层的生产过程的一个实施例。所建议的该方法遵循已有的半导体技术，其经济并且可扩展。

[0145] 如图 19A 所示，在步骤 1900，为了具有良好导电性，非常薄的铜箔片 1911 用作金属基底。在一个实施例中，铜箔 1911 的厚度在 $50\text{--}100\mu\text{m}$ 的范围内。在一个实施例中，铜箔片 1901 具有 100cm^2 的面积。

[0146] 如图 19B 所示，在步骤 1910，将铜箔 1911 附于诸如卡普顿层的更刚性层 1912，这样实现大面积结构强度。然后，将铜层 / 卡普顿层浸在三氯化铁溶液中，以蚀刻 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 块图形和各电线。

[0147] 一旦蚀刻了迹线，就将该层安装到卷筒 1921 上，进行真空沉积，如图 19C 所示，作为步骤 1920。

[0148] 如图 19D 所示，步骤 1930 示出硼 1931 沉积在铜面 1911 上。为了沉积，附于卷筒 1933 的衬底围绕喷涂室（未示出）旋转。在一个实施例中，喷涂室包括用于 $\text{B}_{10}\text{C}/\text{B}_4\text{C}$ 喷涂的磁控管 1934。利用线性喷涂源 1934，能够降低目标衬底距离，并且能够制约硼在一个方向上的流失。此外，通过最大化磁控管功率密度并且通过比例法，能够提高沉积率。在

一个实施例中,在喷涂时,在硼目标中嵌入额外电子发射器。在一个实施例中,利用额外电子提高沉积的稳定性和温度,这样实现更快速和更稳定的硼膜。授予 Hilliard 的名称为“Electron-Assisted Deposition Process and Apparatus”的第 7,931,787 号美国专利描述了额外电子发射器,在此通过应用合并该美国专利的全部内容。

[0149] 因为硼导电,所以利用掩模 1935 阻挡硼沉积在蚀刻的电线上,因此,防止电线短路。

[0150] 如图 19E 所示,在步骤 1940,在沉积了硼后,从真空中取出大面积硼层 1941,并且准备好安装在检测器上。

[0151] 如图 19F 所示,在可选步骤 1950,在该检测器上制造快速中子检测器,其中硼 / 铜 / 卡普顿层 1951 层叠在聚乙烯片 1952 上。

[0152] 在制造了每层后,正如参考图 15a 和 15b 所述,每个单独衬底层在该检测器中堆叠 / 成层,从而提高硼量,并且将中子检测效率提高到最高。

[0153] 因此,本发明的单元区检测器包括夹着气体区的至少两个涂硼金属层。在一个实施例中,检测器包括多个单元区检测器,该单元区检测器包括全部 20 个以上的层。

[0154] 对于快速中子(裂变频谱),大多数中子需要在硼捕获发生之前慢化。应当注意,捕获截面随着中子能量的降低而升高。一旦进行了慢化,硼就吸收或者捕获中子,这样发出带电粒子。由于以 180 度发射粒子,所以只有一个通过气体区,产生可检测电子 / 离子。如果第一聚乙烯或者闪烁体层不慢化快速中子,则第二层这样做,直到第 n 层,从而提高检测效率。尽管注意到中子在第一次碰撞中可能丢失所有能量,但是这不是通常情况,因此,在包括附加聚乙烯或者闪烁片的每个堆叠层中需要使用整个单元区检测器。因此,在将多个层附加到该堆叠时,检测多个中子的概率升高。

[0155] 上述例子仅用于说明本发明的系统的许多应用。尽管在此已经描述了本发明的几个实施例,但是应当明白,可以以许多其他特定形式实施本发明,而不脱离本发明的实质范围。因此,将本例子和本实施例看作说明性的而非限制性的,并且在所附权利要求书的范围内,可以修改本发明。

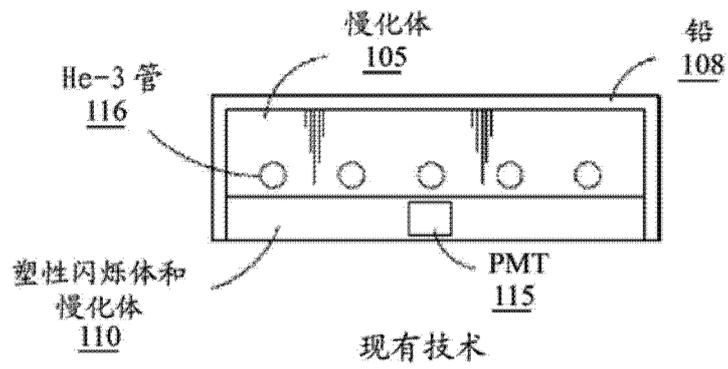


图 1A

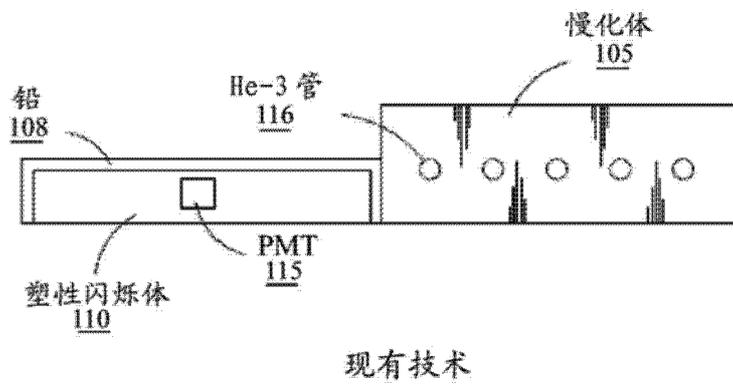


图 1B

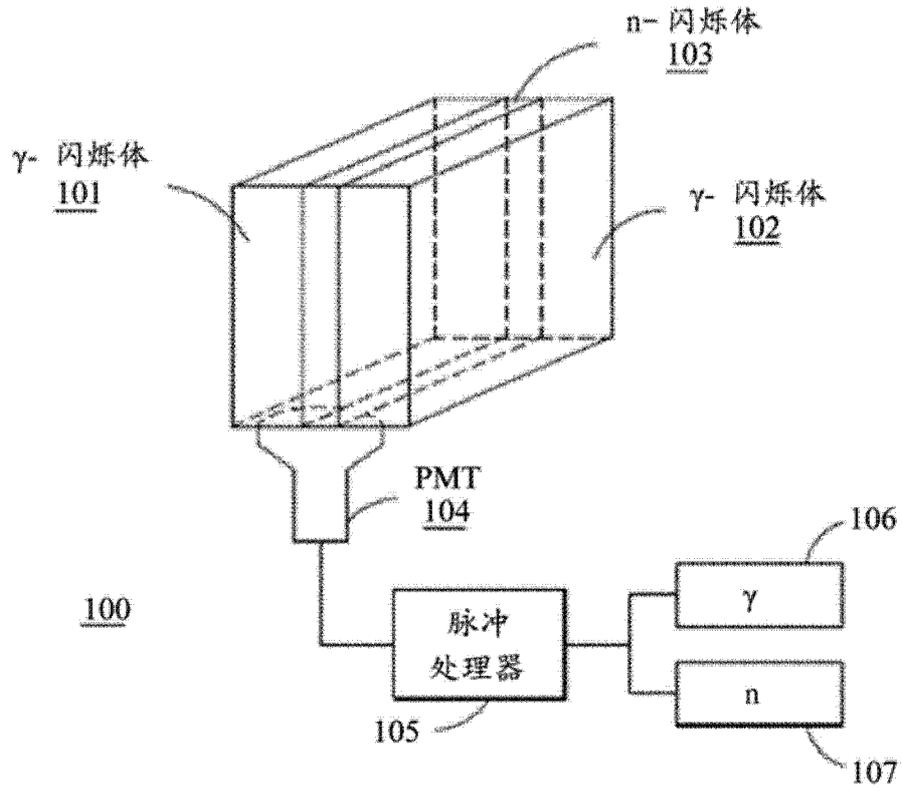


图 1C

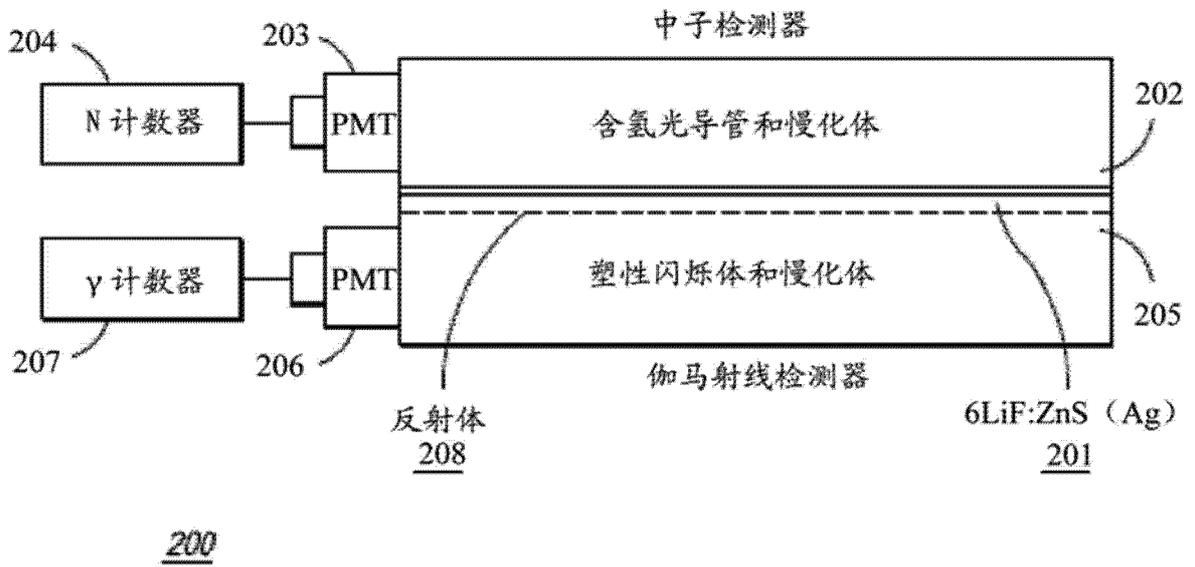


图 2

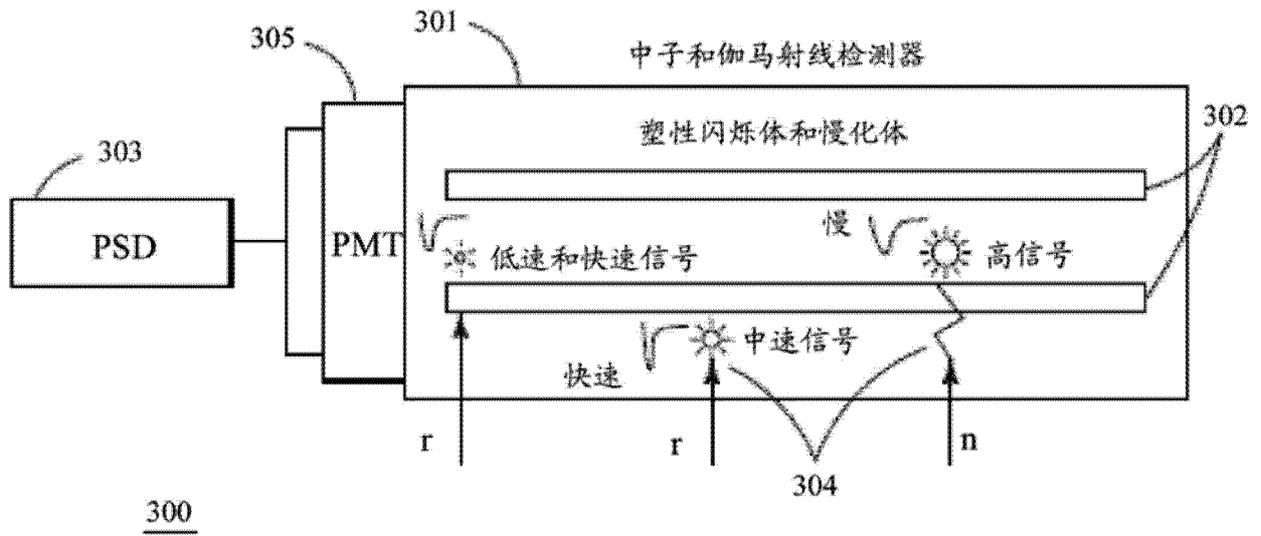


图 3

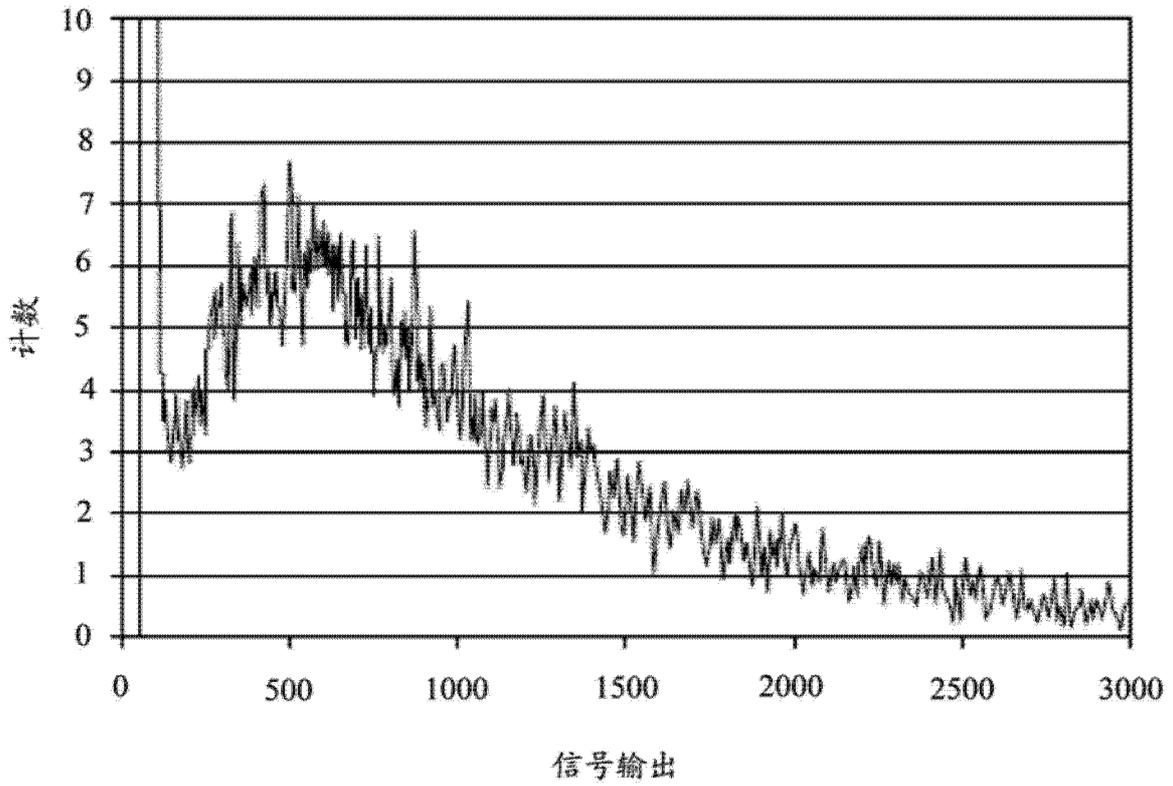


图 4

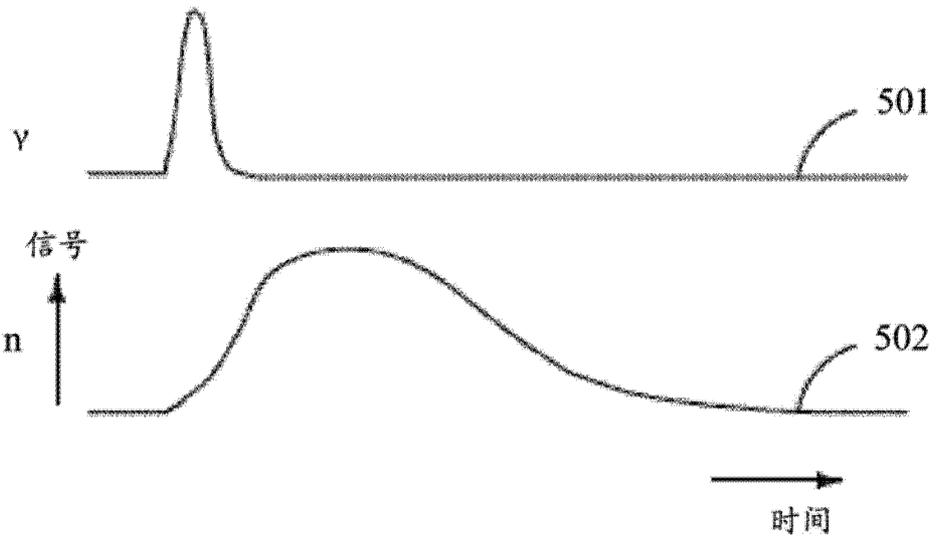


图 5

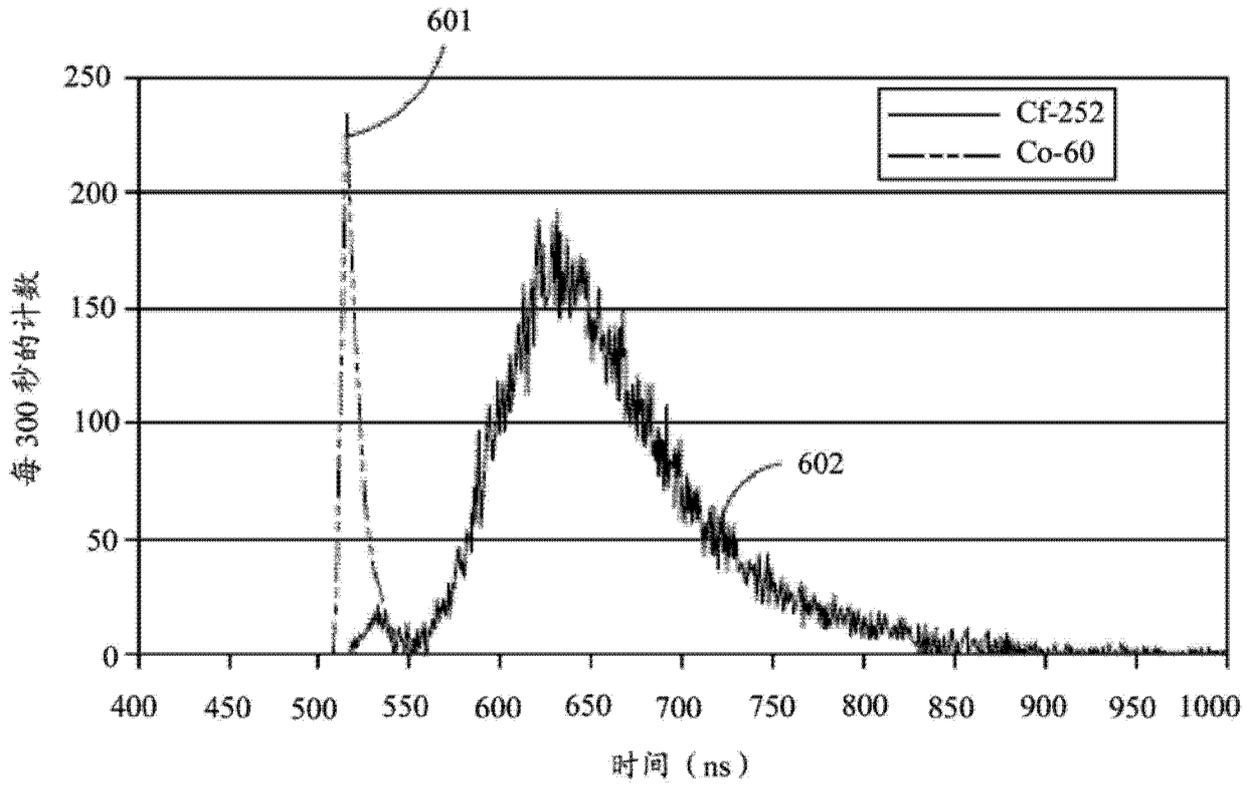


图 6

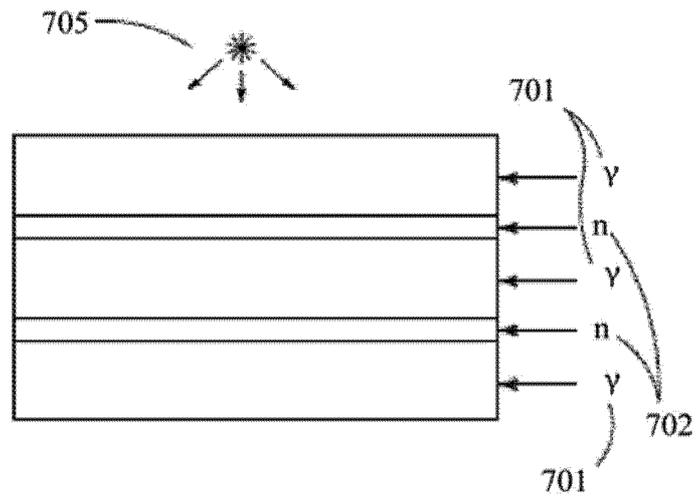


图 7A

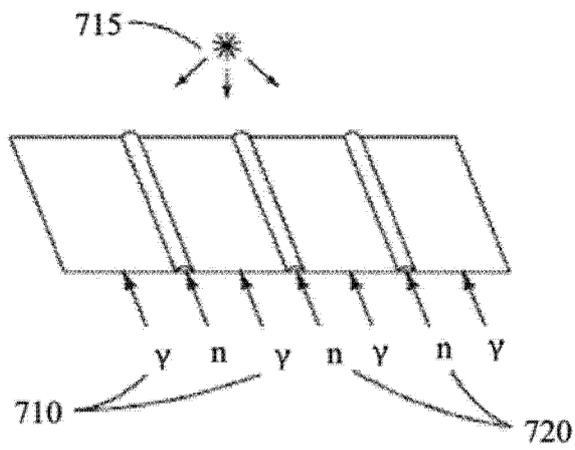


图 7B

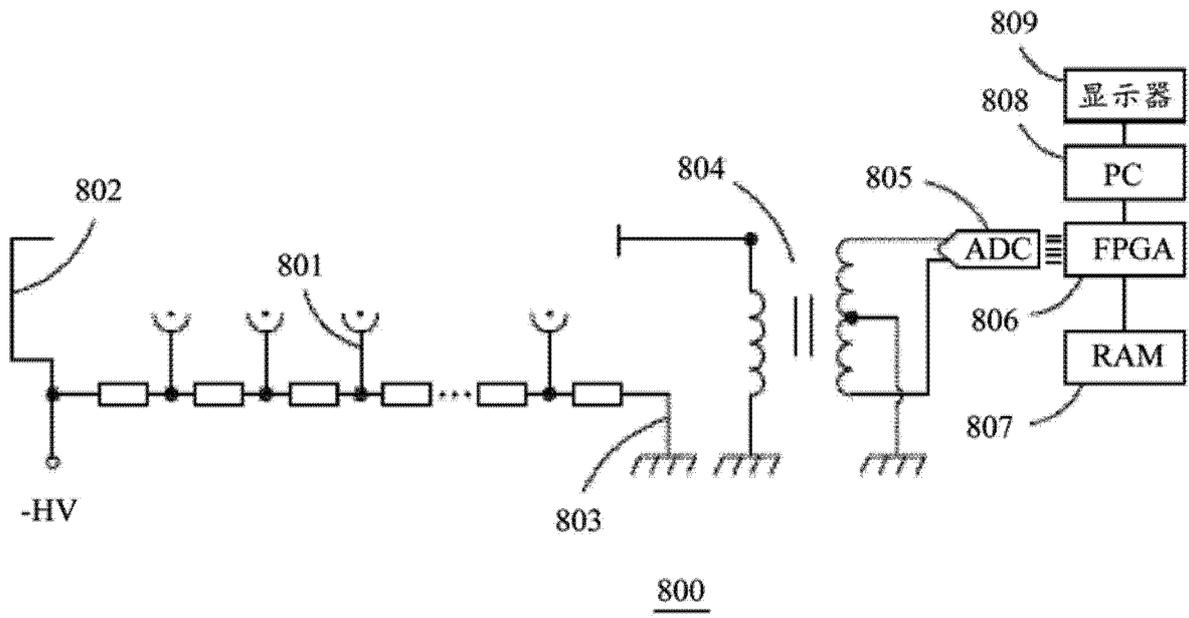


图 8

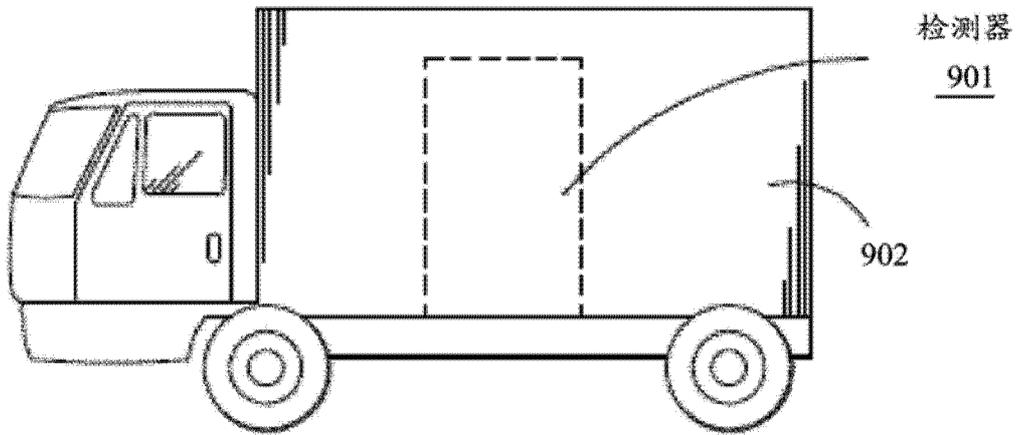


图 9

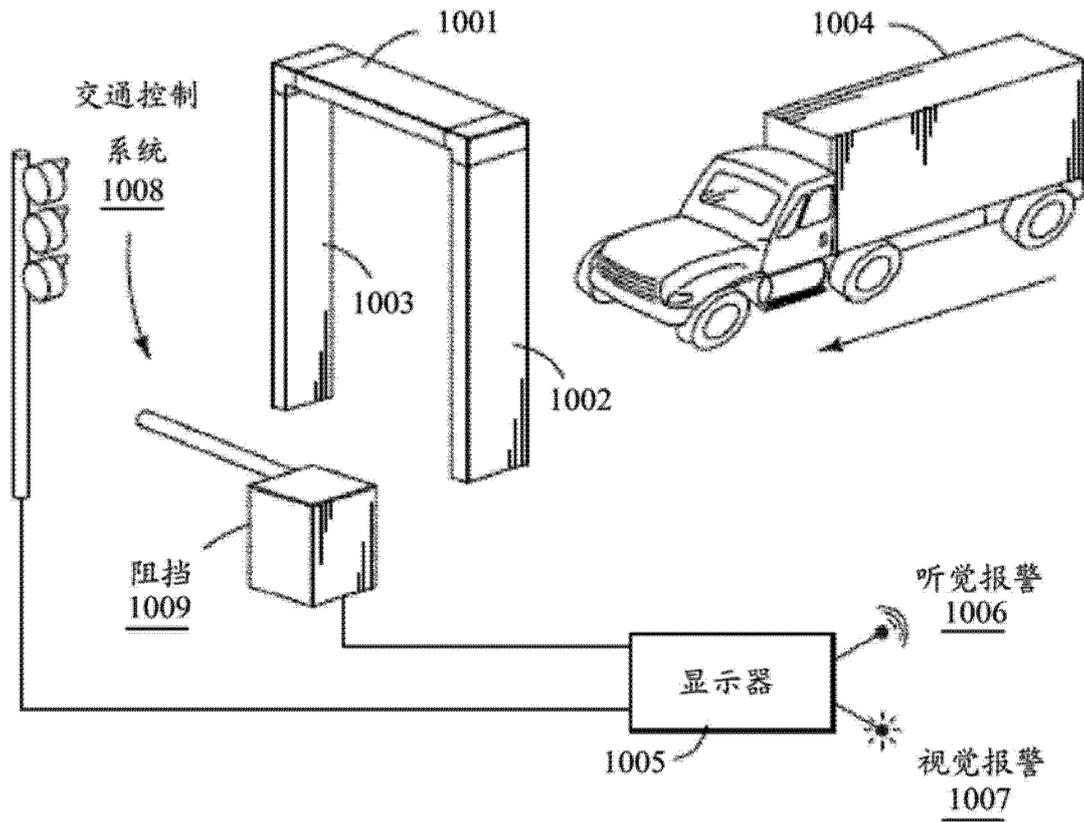


图 10

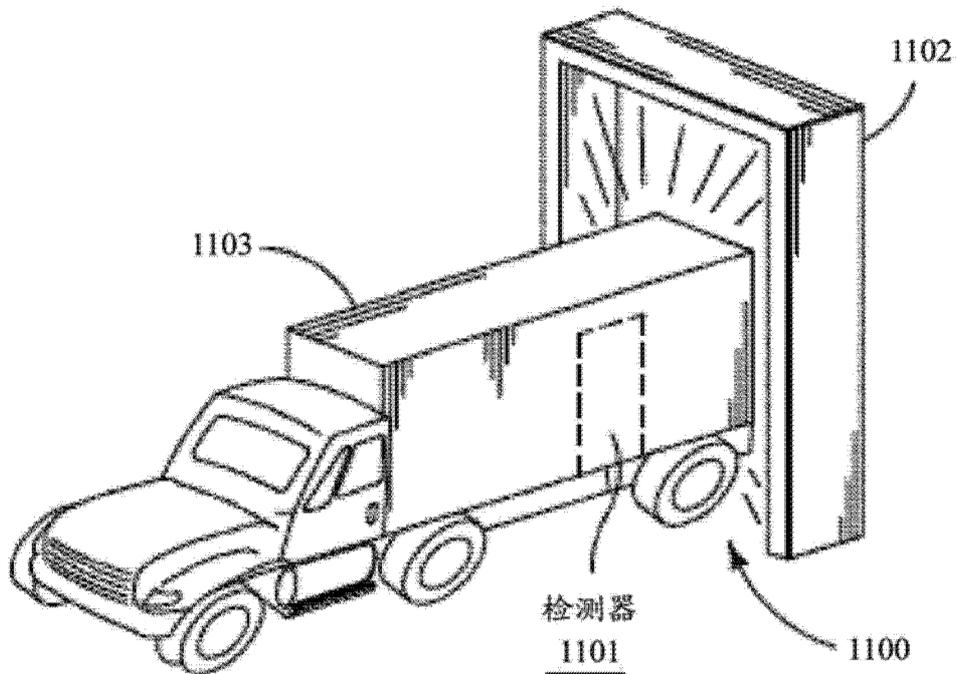


图 11

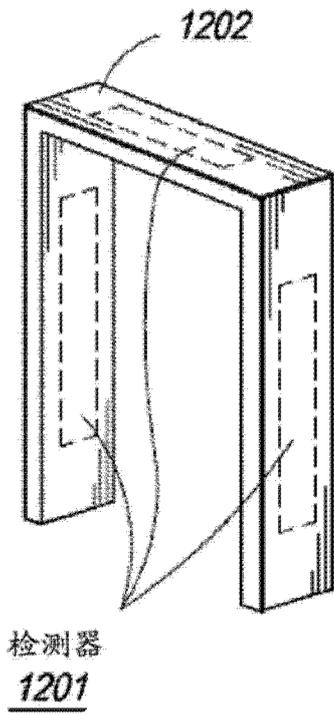


图 12

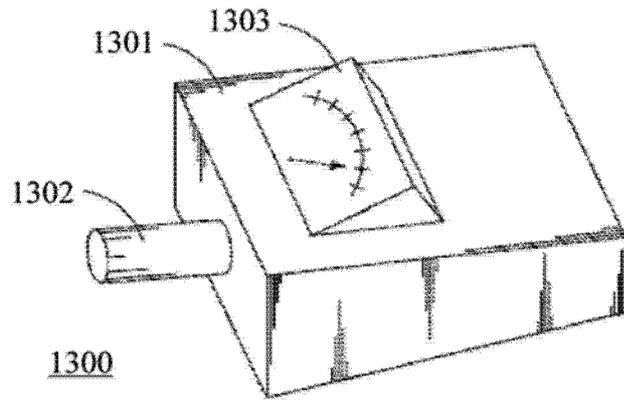


图 13

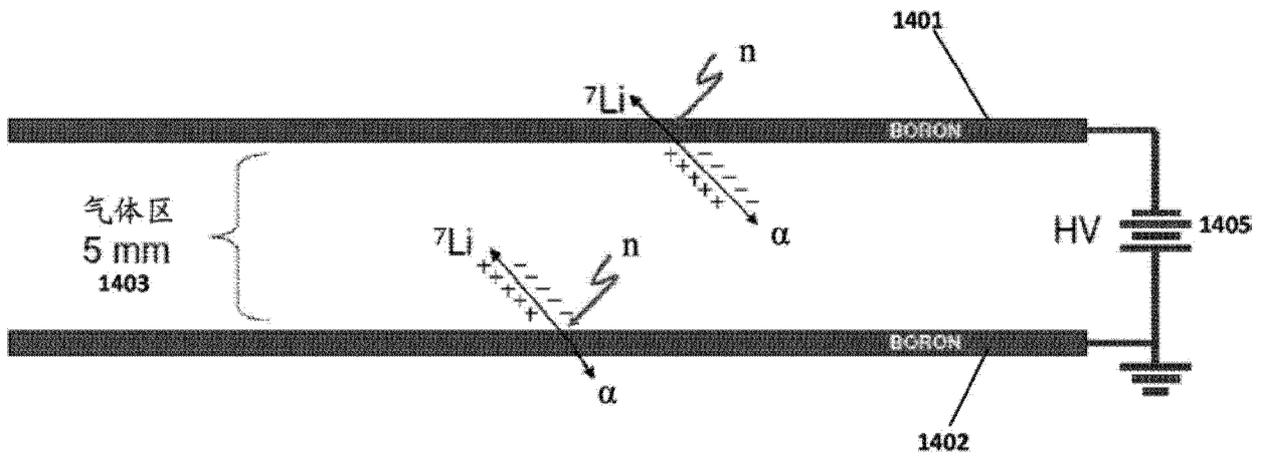
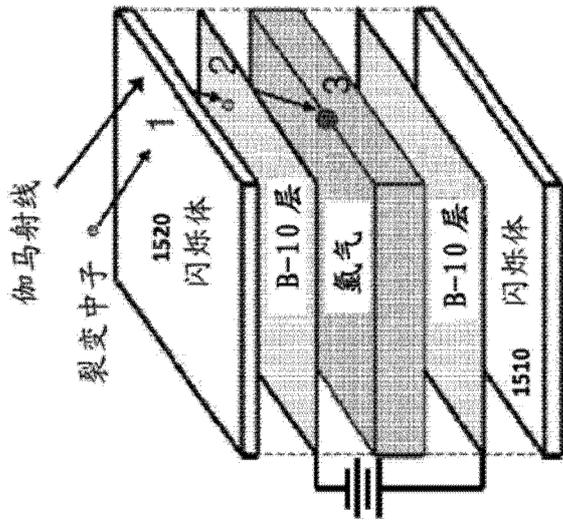


图 14



RPM 直接替换

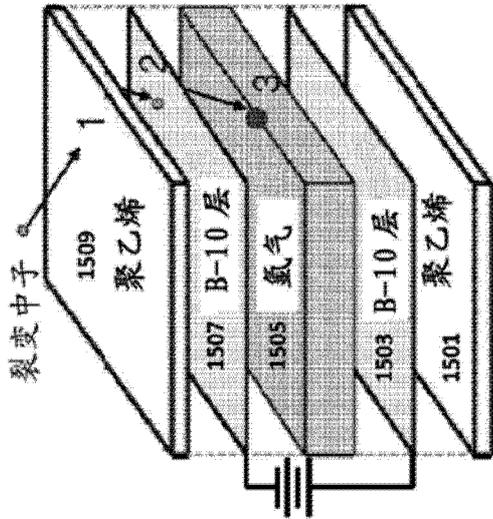


图 15A

图 15B

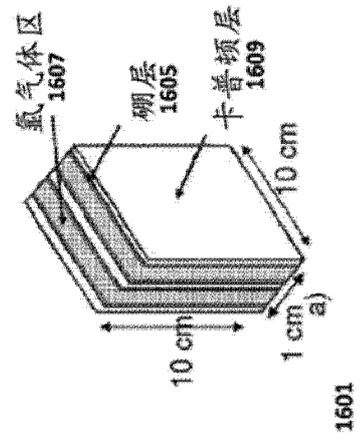


图 16A

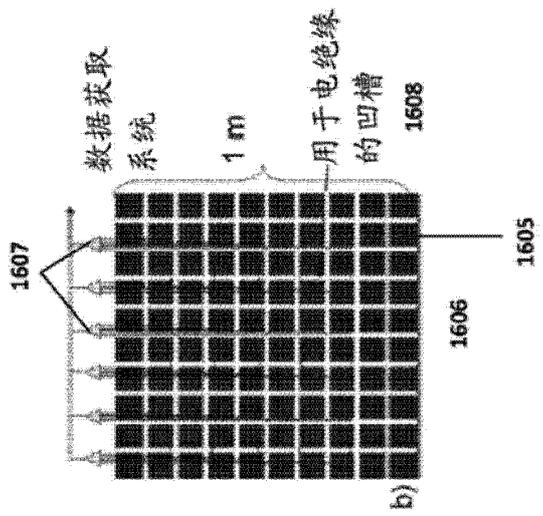


图 16B

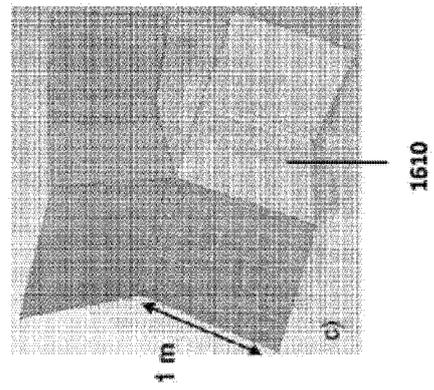


图 16C

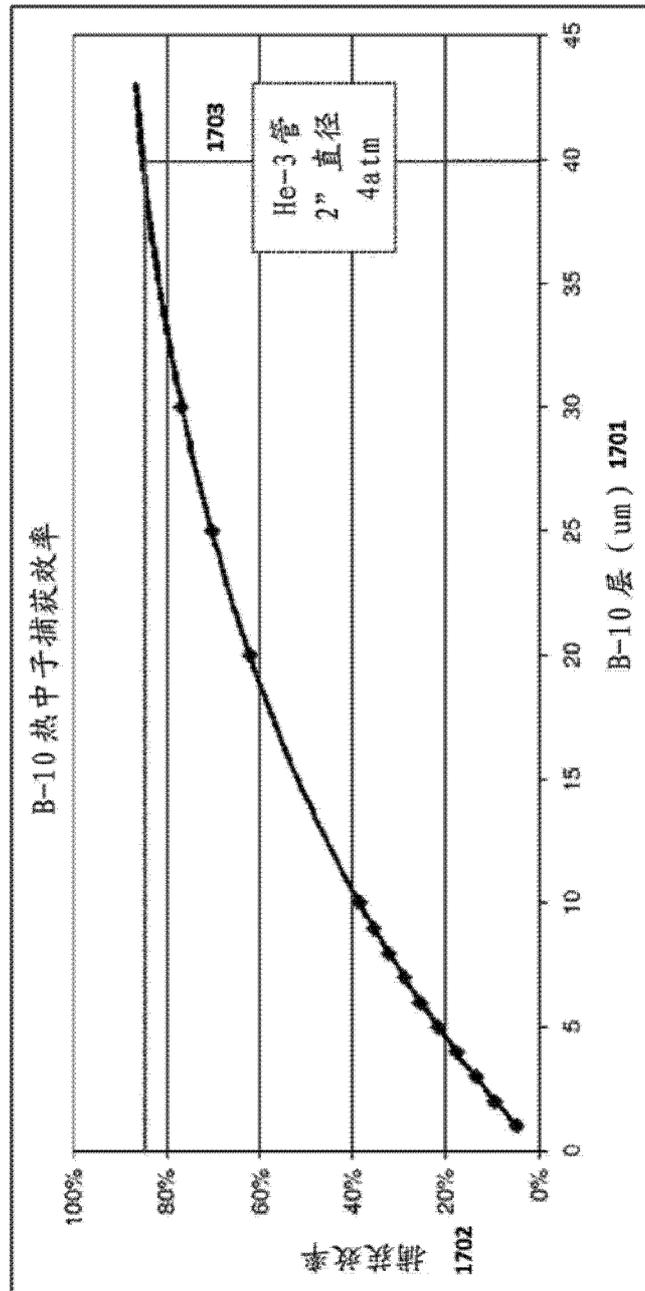


图 17

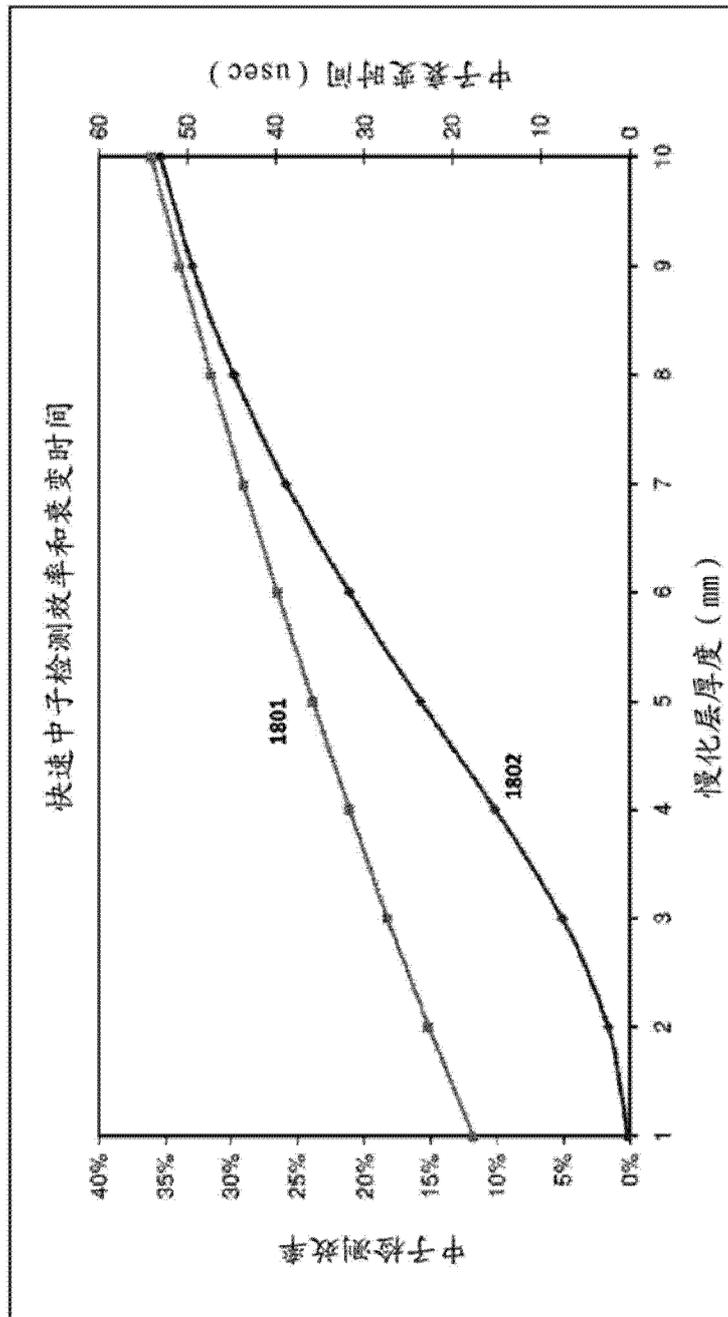


图 18

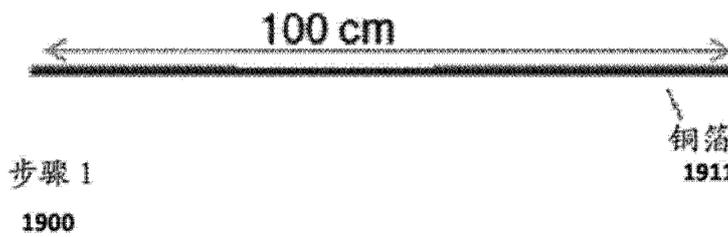


图 19A

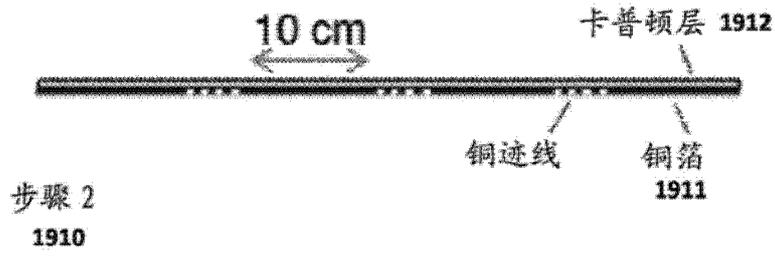


图 19B

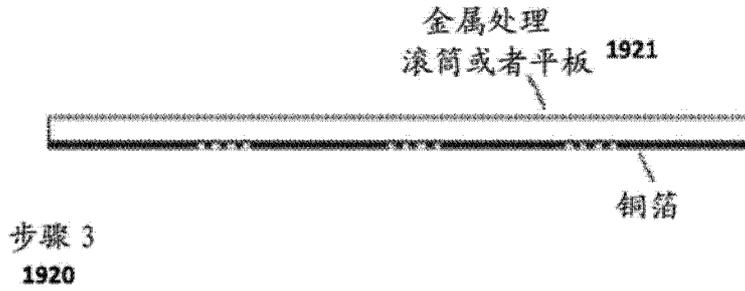


图 19C

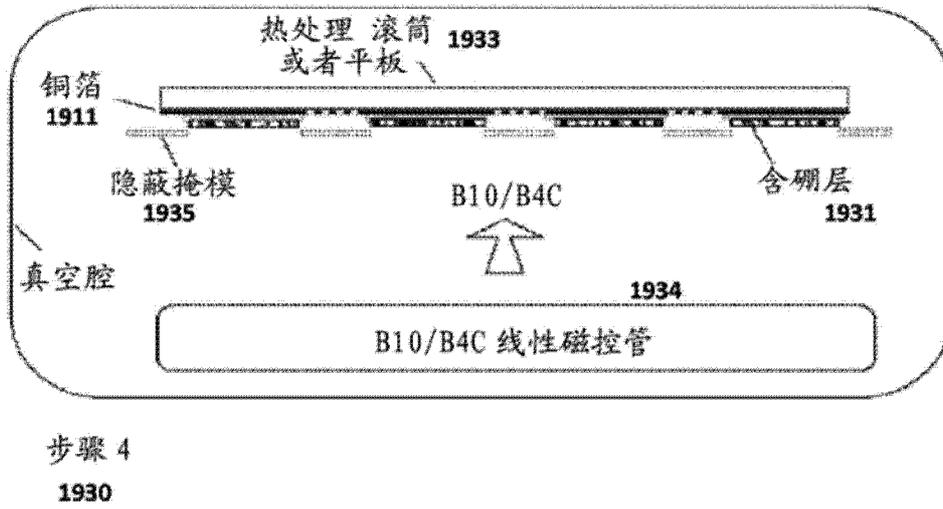


图 19D

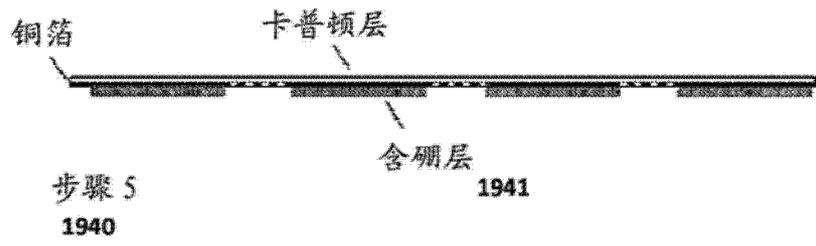


图 19E

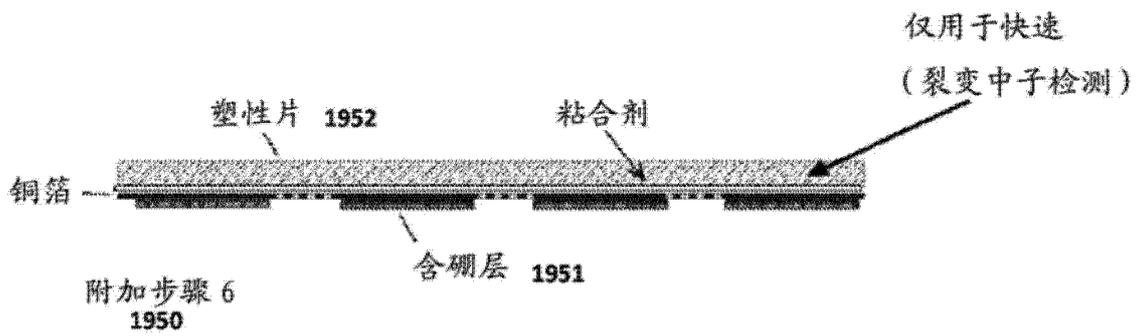


图 19F