



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112764080 A

(43) 申请公布日 2021.05.07

(21) 申请号 202011586938.8

(22) 申请日 2020.12.29

(71) 申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园1号

(72) 发明人 唐传祥 杜应超 张鸿泽 黄文会

李任恺 陈怀璧

(74) 专利代理机构 北京德琦知识产权代理有限公司 11018

代理人 孟旻 王丽琴

(51) Int. Cl.

G01T 1/16 (2006.01)

G01N 21/64 (2006.01)

G01V 5/00 (2006.01)

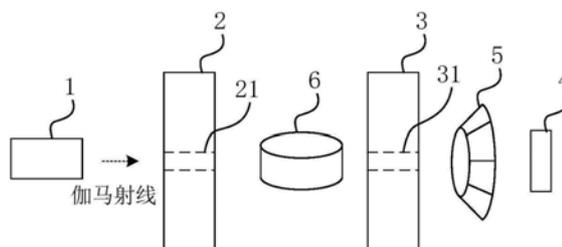
权利要求书2页 说明书9页 附图1页

(54) 发明名称

核素检测装置和核素检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种核素检测装置和核素检测方法,该装置包括:逆康普顿散射伽马射线源,用于产生单色、双色或多色伽马射线;第一屏蔽体,开设有供伽马射线穿过的第一开孔;第二屏蔽体,开设有供伽马射线穿过第二开孔,被检测样品位于第一开孔和第二开孔之间,伽马射线从第一屏蔽体远离被检测样品的一侧沿第一开孔的轴线经由第一开孔照射于被检测样品;检测片,位于第二屏蔽体远离被检测样品的一侧,以接收经过第二开孔的伽马射线;探测器,位于第二屏蔽体和检测片之间,以接收检测片所产生核共振荧光光子。采用本发明技术方案一方面无需直接接触被检测样品,另一方面利用双色或多色伽马射线提升了检测效率,实现了对被测样品的高效间接无损检测。



1. 一种核素检测装置,用于检测被检测样品所含的核素,其特征在于,包括:

逆康普顿散射ICS伽马射线源,所述ICS伽马射线源用于产生伽马射线;

第一屏蔽体,所述第一屏蔽体开设有供所述伽马射线穿过的第一开孔;

第二屏蔽体,所述第二屏蔽体开设有供所述伽马射线穿过的第二开孔,并且,所述第二开孔和所述第一开孔共轴,所述被检测样品位于所述第一屏蔽体和所述第二屏蔽体之间,并且所述第一开孔和所述第二开孔的轴线穿过所述被检测样品,用于执行检测的伽马射线从所述第一屏蔽体远离所述被检测样品的一侧沿所述第一开孔的轴线经由所述第一开孔照射于所述被检测样品;

检测片,所述检测片位于所述第二屏蔽体远离所述被检测样品的一侧,以接收经过所述第二开孔的伽马射线;

探测器,所述探测器位于所述第二屏蔽体和所述检测片之间,以接收所述检测片所产生的核共振荧光光子。

2. 根据权利要求1所述的核素检测装置,其特征在于:

所述探测器的数量为多个,多个所述探测器呈环形分布,所述环形的中心与所述第二开孔共轴,以使得经过所述第二开孔的伽马射线穿过所述环形的中心而直接照射于所述检测片;

所述探测器具有光子采集面,所述光子采集面朝向所述检测片,并且所述光子采集面与所述第二开孔的轴线之间形成 $30^{\circ}$ 到 $90^{\circ}$ 的夹角。

3. 根据权利要求2所述的核素检测装置,其特征在于:

在所述第二开孔的轴线上,所述探测器与所述检测片之间距离至少为所述伽马射线的产生点与所述探测器之间距离的 $1/(\gamma \sin(\alpha))$ ,其中, $\gamma$ 为所述ICS伽马射线源中用于产生所述伽马射线的电子束能量与电子静止能量之比, $\alpha$ 为所述光子采集面与所述第二开孔的轴线之间的夹角。

4. 根据权利要求1所述的核素检测装置,其特征在于:

所述第一屏蔽体和所述第二屏蔽体的材料为高密度衰减材料。

5. 根据权利要求4所述的核素检测装置,其特征在于:

所述第一屏蔽体的厚度为:所述伽马射线在所述第一屏蔽体的厚度方向上穿过所述第一屏蔽体本体后的强度衰减至少99%时的厚度;

所述第二屏蔽体的厚度为:所述伽马射线在所述第二屏蔽体的厚度方向上穿过所述第二屏蔽体本体后的强度衰减至少99%时的厚度。

6. 根据权利要求1所述的核素检测装置,其特征在于:

所述第一开孔和所述第二开孔的半径为所述伽马射线的产生点与所述被检测样品之间距离的 $1/\gamma$ ,其中, $\gamma$ 为所述逆康普顿散射伽马射线源产生的伽马射线的电子束能量与电子静止能量之比。

7. 根据权利要求1所述的核素检测装置,其特征在于:

所述伽马射线为单色伽马射线,所述检测片中至少含有至少一种已知核素。

8. 根据权利要求1所述的核素检测装置,其特征在于:

所述伽马射线为双色伽马射线,所述检测片中至少含有至少一种已知核素;或者,

所述伽马射线为多色伽马射线,所述检测片中至少含有至少一种已知核素。

9. 一种核素检测方法,采用如权利要求1至8任一项所述的核素检测装置,包括:  
将被检测样品置于所述第一屏蔽体和所述第二屏蔽体之间的所述第一开孔和所述第二开孔的轴线上;

将伽马射线从所述第一屏蔽体远离所述被检测样品的一侧经由所述第一开孔照射于所述被检测样品;

利用所述探测器探测所述检测片所产生的核共振荧光光子;

根据所述核共振荧光光子能谱的特征峰强度确定所述被检测样品中所含的核素种类和含量。

10. 根据权利要求9所述的核素检测方法,其特征在于,所述方法还包括:

在利用所述探测器探测所述检测片的核共振荧光光子的过程中,在垂直于所述第一开孔和所述第二开孔的轴线的方向移动所述被检测样品,以在所述被检测样品的不同位置记录所述核共振荧光光子能谱的特征峰强度;

根据所述被检测样品的不同位置记录的所述核共振荧光光子能谱的特征峰强度,确定所述被检测样品中所含有的核素的位置分布。

## 核素检测装置和核素检测方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及物质检测技术领域,特别涉及一种基于伽马射线的核素检测装置和核素检测方法。

### 背景技术

[0002] 对物质的组成和含量的检测是人们认识客观存在的重要并且必不可少的手段,并且广泛地应用于工业和日常生活中。例如,在核能工业中,需要对乏燃料中所含放射性物质进行检测以确保后续对乏燃料的妥善处理;在机场、港口、车站的安检,需要对物品、货物进行必要的检测以确保公共安全等。

[0003] 在工业领域中,核能作为一种不产生碳排放的清洁能源可以替代化石能源满足国家和社会的生产、生活用电需求。然而,核电站所产生的乏燃料的放射性却对自然界产生着巨大的破坏作用,仅在2019年,我国的各类核电站每年产生的乏燃料总量就达到了约1200吨。乏燃料中含有的铀-235和钚-239等放射性元素需要进行妥善处理与监管,否则会对环境和居民生产生活造成严重影响。所以,必须对乏燃料中所含的有害放射性物质进行含量等方面的检测,以确保处理和监管的准确到位。

[0004] 核素是指具有一定数目质子和一定数目中子的一种原子。同一种同位素的核性质不同的原子核,它们的质子数相同而中子数不同,结构方式不同,因而表现出不同的核性质。因此,对于放射性物质而言,进行核素的检测能够绕过同位素的影响,而直接作用在放射性物质本身,得到最为准确的结果。

[0005] 目前乏燃料中核素检测方法主要有两种。第一种是利用放射化学分析法,对乏燃料进行采样并制备溶液,然后对含有乏燃料元素的样品溶液进行化学分析后获得各种核素的含量。这种方法虽然所获得的核素含量精度高,但是由于乏燃料所具有的高放射性,使得取样操作复杂且存在安全问题,并且在乏燃料取样的过程中还会存在样品丢失导致的放射性危害等问题。

[0006] 第二种方法是测量乏燃料的裂变产物中铯、锶等元素衰变伽马谱线来分析乏燃料的放射性核素含量。虽然比第一种方法更加安全,但是精度低且无法给出核素的具体含量。

[0007] 另外,在人们日常生活领域中,海关、机场常用的安检设备通常利用X射线衰减成像原理对货物、密封集装箱等物体进行透射成像。通过透射成像的方法可以获得被探测物的二维影像,安检人员可根据二维影像判断被探测物中是否有走私物品或者爆炸物等违禁物品,但是透射法对密封在铅元素等衰减较强材料中的物体无法进行有效探测。

[0008] 因此,如何无损地实现对被测样品所含物质,特别是所含核素的有效检测,便成为亟待解决的问题。

### 发明内容

[0009] 有鉴于此,本发明提供一种核素检测装置和核素检测方法,以实现对被测样品所含核素的有效无损检测,以确保工业领域、民用领域中,有害物质和被限制运输、使用的

物质能够被准确识别,以保障安全生产和人们的生命财产安全。

[0010] 本发明的技术方案是这样实现的:

[0011] 一种核素检测装置,用于检测被检测样品所含的核素,包括:

[0012] 逆康普顿散射ICS伽马射线源,所述ICS伽马射线源用于产生伽马射线;

[0013] 第一屏蔽体,所述第一屏蔽体开设有供所述伽马射线源所产生的伽马射线穿过的第一开孔;

[0014] 第二屏蔽体,所述第二屏蔽体开设有供所述伽马射线穿过的第二开孔,并且,所述第二开孔和所述第一开孔共轴,所述被检测样品位于所述第一屏蔽体和所述第二屏蔽体之间,并且所述第一开孔和所述第二开孔的轴线穿过所述被检测样品,用于执行检测的伽马射线从所述第一屏蔽体远离所述被检测样品的一侧沿所述第一开孔的轴线经由所述第一开孔照射于所述被检测样品;

[0015] 检测片,所述检测片位于所述第二屏蔽体远离所述被检测样品的一侧,以接收经过所述第二开孔的伽马射线;

[0016] 探测器,所述探测器位于所述第二屏蔽体和所述检测片之间,以接收所述检测片所产生核共振荧光光子。

[0017] 进一步,所述探测器的数量为多个,多个所述探测器呈环形分布,所述环形的中心与所述第二开孔共轴,以使得经过所述第二开孔的伽马射线穿过所述环形的中心而直接照射于所述检测片;

[0018] 所述探测器具有光子采集面,所述光子采集面朝向所述检测片,并且所述光子采集面与所述第二开孔的轴线之间形成 $30^{\circ}$ 到 $90^{\circ}$ 的夹角。

[0019] 进一步,在所述第二开孔的轴线上,所述探测器与所述检测片之间距离至少为所述伽马射线的产生点与所述探测器之间距离的 $1/(\gamma \sin(\alpha))$ ,其中, $\gamma$ 为所述ICS伽马射线源中用于产生所述伽马射线的电子束能量与电子静止能量之比, $\alpha$ 为所述光子采集面与所述第二开孔的轴线之间的夹角。

[0020] 进一步,所述第一屏蔽体和所述第二屏蔽体的材料为高密度衰减材料。

[0021] 进一步,所述第一屏蔽体的厚度为:所述伽马射线在所述第一屏蔽体的厚度方向上穿过所述第一屏蔽体本体后的强度衰减至少99%时的厚度;

[0022] 所述第二屏蔽体的厚度为:所述伽马射线在所述第二屏蔽体的厚度方向上穿过所述第二屏蔽体本体后的强度衰减至少99%时的厚度。

[0023] 进一步,所述第一孔径和所述第二孔径的大小为所述第一孔径到所述伽马射线产生点距离的 $1/\gamma$ ,其中, $\gamma$ 为所述逆康普顿散射伽马射线源的电子束能量与电子静止能量之比。

[0024] 进一步,所述伽马射线为单色伽马射线,所述检测片中含有至少一种已知核素。

[0025] 进一步,所述伽马射线为双色伽马射线,所述检测片中含有至少一种已知核素;或者,

[0026] 所述伽马射线为多色伽马射线,所述检测片中含有至少一种已知核素。

[0027] 一种核素检测方法,采用如上任一项所述的核素检测装置,包括:

[0028] 将被检测样品置于所述第一屏蔽体和所述第二屏蔽体之间的所述第一开孔和所述第二开孔的轴线上;

[0029] 将伽马射线从所述第一屏蔽体远离所述被检测样品的一侧经由所述第一开孔照射于所述被检测样品；

[0030] 利用所述探测器探测所述检测片所产生的核共振荧光光子；

[0031] 根据所述核共振荧光光子能谱的特征峰强度确定所述被检测样品中所含的核素种类和含量。

[0032] 进一步,所述方法还包括:

[0033] 在利用所述探测器探测所述检测片的核共振荧光光子的过程中,在垂直于所述第一开孔和所述第二开孔的轴线的方向移动所述被检测样品,以在所述被检测样品的不同位置记录所述核共振荧光光子能谱的特征峰强度;

[0034] 根据所述被检测样品的不同位置记录的所述核共振荧光光子能谱的特征峰强度,确定所述被检测样品中所含有的核素的位置分布。

[0035] 从上述方案可以看出,采用本发明的核素检测装置和核素检测方法,只需要将被检测样品直接置于第一屏蔽体和第二屏蔽体之间,无需直接接触被检测样品,更不需要对被检测样品进行切割或者化学提炼等操作,不会损坏被检测样品本身,实现了对被测样品的无损检测,对于具有高放射性有害物质而言,降低了直接操作被检测样品对操作员的放射性风险,保障了安全生产和人们的生命财产安全。本发明的核素检测装置和核素检测方法结合逆康普顿散射伽马射线源所产生的窄带宽伽马射线,能够精准识别出被检测样品中核素的种类、含量和空间位置分布,提升了核素识别精度,结合双色或多色伽马射线还能够一次性准确识别出至少两种核素的种类、含量和空间位置分布,提升了核素识别效率。

## 附图说明

[0036] 图1为本发明实施例的核素检测装置的结构示意图;

[0037] 图2为本发明实施例中探测器与第二开孔和检测片的结构剖视图;

[0038] 图3为本发明实施例的核素检测方法的流程示意图。

[0039] 附图中,各标号所代表的部件名称如下:

[0040] 1、ICS伽马射线源

[0041] 2、第一屏蔽体

[0042] 21、第一开孔

[0043] 3、第二屏蔽体

[0044] 31、第二开孔

[0045] 4、检测片

[0046] 5、探测器

[0047] 51、光子采集面

[0048] 6、被检测样品

## 具体实施方式

[0049] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下参照附图并举实施例,对本发明作进一步详细说明。

[0050] 核共振荧光物理过程是原子核共振吸收一个入射的伽马光子后进入激发态,激发

态的原子核经过不同的核能级路径退激到基态产生一个或多个具有特定能量的出射光子的过程。由于不同原子核的核能级能量不同,所以不同核素在核共振荧光过程中共振吸收与产生的光子能量是不同的,因此核共振荧光光子可以作为原子核的特征信息被识别。因此利用伽马射线照射被检测样品激发其中的核素发生核共振荧光物理过程,再测量核共振荧光物理过程所产生的共振荧光光子的数目便可以分析出被检测样品(如乏燃料、货物等)中核素的具体含量。由于整个测量过程中不存在对被检测样品本身的取样过程,所以相比于现有方法来说,利用核共振荧光物理过程的测量方法更安全可靠。

[0051] 常用于发生核共振荧光物理作用的伽马射线源是韧致辐射源。这种韧致辐射源的特点是产生的光子能量高且能谱范围宽,缺点是亮度低导致在测量核素核共振荧光光子时存在探测时间长、信噪比差等问题。逆康普顿散射源具有亮度高、窄带宽、散角小、高准直、能量高且偏振可控可调等特点。因此可以利用逆康普顿散射源产生的伽马光子照射待测物(被检测样品),并通过测量待测物中核素产生的共振荧光光子来进行核素特征识别。

[0052] 另外,原子核的核能级能量较高,被高能伽马射线激发后退激产生的核共振荧光光子能量也较高。高能光子在材料中的衰减系数通常比低能光子小,所以核共振荧光光子经过铅等密封材料时只会被衰减掉很少一部分。因此可以让处于密封材料中的物品被单能伽马射线源产生的伽马光子辐照,使用探测器记录产生的核共振荧光光子空间分布来分析物品中核素的分布情况,从而解决透射法对密封在铅元素等衰减较强材料中的物体无法进行有效探测的问题。

[0053] 基于上述理论,本发明实施例提供了一种核素检测装置,用于检测被检测样品6所含的核素,如图1所示,该核素监测装置包括ICS(Inverse Compton Scattering,逆康普顿散射)伽马射线源1、第一屏蔽体2、第二屏蔽体3、检测片4和探测器5。其中,ICS伽马射线源1用于产生伽马射线,其中,伽马射线为ICS伽马射线源1产生的单色伽马射线和/或同时产生的双色伽马射线和/或同时产生的多色伽马射线,即ICS伽马射线源1所产生的伽马射线既可以为单色伽马射线,也可以为双色伽马射线,也可以为多色伽马射线,在本发明实施例中,单色伽马射线为准单能的单色伽马射线,双色伽马射线和多色伽马射线分别为中心能量不同的双色伽马射线和多色伽马射线。第一屏蔽体2开设有供伽马射线穿过的第一开孔21。第二屏蔽体3开设有供伽马射线穿过的第二开孔31,并且,第二开孔31和第一开孔21共轴,被检测样品6位于第一屏蔽体2和第二屏蔽体3之间,并且第一开孔21和第二开孔31的轴线穿过被检测样品6,逆康普顿散射伽马射线源产生的用于执行检测的伽马射线(图1中虚线箭头所示)从第一屏蔽体2远离被检测样品6的一侧(位于图1中第一屏蔽体2的左侧)沿第一开孔21的轴线经由第一开孔21照射于被检测样品6(位于图1中第一屏蔽体2的右侧)。检测片4位于第二屏蔽体3远离被检测样品6的一侧(图1中第二屏蔽体3的右侧),以接收经过第二开孔31的伽马射线(图1中的被检测样品6位于第二屏蔽体3的左侧)。探测器5位于第二屏蔽体3和检测片之间,以接收检测片4所产生核共振荧光光子。

[0054] 参见图2并结合图1所示,在可选实施例中,探测器5的数量为多个,多个探测器5呈环形分布,其中,环形的中心与第二开孔31共轴,使得经过第二开孔31的伽马射线穿过环形的中心而直接照射于检测片4。同时,每个探测器5均具有光子采集面51,光子采集面51朝向检测片4,并且,光子采集面51与第二开孔31的轴线之间形成第一夹角 $\theta$ ,在可选实例中,第一夹角 $\theta$ 的角度为 $30^\circ$ 至 $90^\circ$ ,在优选实例中,第一夹角 $\theta$ 的角度为 $60^\circ$ 。

[0055] 在可选实施例中,探测器5与检测片4之间的距离需要根据探测器5的大小,以及从检测片4所能接收到的核共振荧光的强度而定,在一些具体实施例中,在第二开孔31的轴线上,探测器5与检测片4之间距离至少为伽马射线的产生点与探测器之间距离的 $1/(\gamma \sin(\alpha))$ ,其中, $\gamma$ 为ICS伽马射线源中用于产生伽马射线的电子束能量与电子静止能量之比, $\alpha$ 为光子采集面51与第二开孔31的轴线之间的夹角,例如,在一个具体实施例中,在第二开孔31的轴线上,探测器5与检测片4之间距离为20厘米。

[0056] 在本发明实施例中,第一屏蔽体2和第二屏蔽体3的材料为高密度衰减材料,在可选实施例中,第一屏蔽体2和第二屏蔽体3为铅砖,足够厚度的铅砖能够对伽马射线起到很好的阻挡隔离作用,在本发明实施例中,能够使得伽马射线仅能够从第一开孔21和第二开孔31中穿过,保证被检测样品6中的核素的精确检测。

[0057] 其中,第一屏蔽体2和第二屏蔽体3的铅砖厚度需确保伽马射线无法穿过,在可选实施例中,第一屏蔽体2和第二屏蔽体3的厚度根据伽马射线的强度而定。其中,第一屏蔽体2的厚度为:伽马射线在第一屏蔽体2的厚度方向上穿过第一屏蔽体2本体后的强度衰减至少99%时的厚度,即强度为100%伽马射线穿过第一屏蔽体2本体后的强度下降到1%或者1%以下。第二屏蔽体3的厚度为:伽马射线在第二屏蔽体3的厚度方向上穿过第二屏蔽体3本体后的强度衰减至少99%时的厚度,即强度为100%伽马射线穿过第二屏蔽体3本体后的强度下降到1%或者1%以下。在一些具体实施例中,对于能量为2MeV的伽马光子,当采用铅材料时的第一屏蔽体2和第二屏蔽体3厚度至少为11.5厘米。

[0058] 依据物理学中电子和光子的逆康普顿散射原理,穿过第一开孔21和第二开孔31的伽马射线能谱宽度与开孔的孔径大小有关,第一开孔21的孔径越小穿过第一开孔21的伽马射线能谱宽度越窄,第二开孔31的孔径越小穿过第二开孔31的伽马射线能谱宽度越窄,伽马射线能谱宽度越窄,所激发的核素范围更为集中,进而所检测的核素更具有针对性,例如可实现仅针对铀-235和钚-239的核素检测,同时,窄带宽伽马射线还能提升检测精度,避免宽带宽伽马射线同时激发出多种核素所产生的核共振荧光中的各种核素共振荧光光谱之间的相互影响。第一开孔21和第二开孔31的孔径大小与伽马射线的产生点(位于伽马射线源中)和被检测样品6之间的距离相关,在可选实施例中,第一开孔21和第二开孔31的半径为伽马射线的产生点与被检测样品之间距离的 $1/\gamma$ ,其中 $\gamma$ 为逆康普顿散射伽马射线源的电子束能量与电子静止能量之比(即逆康普顿散射伽马射线源的电子束能量与电子静止能量之间的比值)。第二开孔31的孔径与第一孔径大小一致。

[0059] 在可选实施例中,伽马射线源所产生的伽马射线(直接)照射在检测片4上,会在检测片4上产生核共振荧光过程。

[0060] 采用本发明实施例的基于伽马射线的核素检测装置,结合不同形式的伽马射线,可实现多种目的的核素检测。

[0061] 在一个可选实施例中,伽马射线为单色伽马射线时,检测片4中含有至少一种已知核素。

[0062] 在另一个可选实施例中,伽马射线为双色伽马射线,检测片4中含有至少一种已知核素。当伽马射线为双色伽马射线,检测片4中含有一种与双色伽马射线中的某个单色伽马射线相对应的已知核素时,可以实现对该一种已知核素的检测;当伽马射线为双色伽马射线,检测片4中同时含有两种或两种以上已知核素(其中的两种已知核素与双色伽马射线相

对应)时,可以实现对两种已知核素的检测。

[0063] 在又一个可选实施例中,伽马射线为多色伽马射线,检测片4中含有至少一种已知核素。当伽马射线为多色伽马射线,检测片4中含有一种与多色伽马射线中的某个单色伽马射线相对应的已知核素时,可以实现对该一种已知核素的检测;当伽马射线为多色伽马射线,检测片4中同时含有两种已知核素(该两种已知核素与多色伽马射线中的两个单色伽马射线相对应)时,可以实现对两种已知核素的检测;当伽马射线为多色伽马射线,检测片4中同时含有三种或三种以上已知核素(其中的三种已知核素与多色伽马射线中的三个单色伽马射线相对应)时,可以实现对三种已知核素的检测。

[0064] 在一些可选实施例中,伽马射线源可以为逆康普顿散射源、韧致辐射源等。当前,用于核共振荧光物理过程的伽马射线源包括逆康普顿散射源和韧致辐射源。其中,逆康普顿散射(ICS)是指高能电子与低能光子相碰撞而使低能光子获得能量的散射过程,逆康普顿效应导致光子获得能量引起波长变短,使低能光子变为高能伽马射线。韧致辐射是指高速电子骤然减速产生的辐射,泛指带电粒子在碰撞(尤指它们之间的库仑散射)过程中发出的辐射。逆康普顿散射源相比于韧致辐射源具有窄带宽、亮度高的优点。由于不同核素的核能级能量差异较大,通常情况下,逆康普顿散射伽马射线源产生的单能伽马射线同一时刻只能激发一种核素的其中一个核能级,然而,通过调整相互作用的电子束或者激光束不同束团的能量能够实现同时产生中心能量不同的双色伽马射线和多色伽马射线,因此,利用产生的双色伽马射线和多色伽马射线能够实现同时激发待测物体中的不同核素,能够提高核素识别与检测的效率。所以,在优选实施例中,伽马射线源为ICS伽马射线源,以实现单色伽马射线、双色伽马射线和多色伽马射线的产生。

[0065] 在上述实施例的核素检测装置的基础上,本发明实施例还提供了一种核素检测方法,如图3所示,主要包括以下步骤:

[0066] 步骤1、将被检测样品置于第一屏蔽体和第二屏蔽体之间的第一开孔和第二开孔的轴线上;

[0067] 步骤2、将伽马射线从第一屏蔽体远离被检测样品的一侧经由第一开孔照射于被检测样品;

[0068] 步骤3、利用探测器探测检测片的核共振荧光光子,其中,在伽马射线照射于被检测样品时,经过第二开孔的伽马射线照射于检测片并作用于检测片中的核素,使得检测片中的核素发生核共振荧光物理过程而产生核共振荧光光子;

[0069] 步骤4、根据核共振荧光光子能谱的特征峰强度确定被检测样品中所含的核素种类和含量。

[0070] 通过上述各个步骤便可以得到被检测样品中所含的核素种类和含量。

[0071] 在一个进一步可选实施例中,上述核素检测方法还包括在步骤4中同时执行的以下过程:

[0072] 在利用探测器探测检测片的核共振荧光光子的过程中,在垂直于第一开孔和第二开孔的轴线的方向移动被检测样品,以在被检测样品的不同位置记录核共振荧光光子能谱的特征峰强度;

[0073] 根据被检测样品的不同位置记录的核共振荧光光子能谱的特征峰强度,确定被检测样品中所含有的核素的位置分布。

[0074] 由于检测样品中核素分布可能存在的不均匀性,当检测样品移动到不同位置时,探测器记录到的检测片产生的核共振荧光光子能谱的特征峰强度会存在不同,根据不同的特征峰强度可以确定被检测样品中所含有的核素的位置分布。

[0075] 采用上述可选实施例,除了能够得到被检测样品中所含的核素种类和含量以外,还能够进一步得到核素在被检测样品中的分布。采用这种方式能够在海关、机场、医院等重要的高安全性场景中,确保危险核素(如各种重金属放射性危险物质)能够及时从各种物品中被及时发现,即使这些危险核素被包覆于铅等屏蔽材料当中,只要检测所使用的伽马射线能够穿透这些屏蔽材料,既可以实现对危险核素的检测,同时利用多色伽马射线,还能够实现同时对至少两种危险核素的检测,提高检测效率。

[0076] 实施例一:单色伽马射线

[0077] 利用紧凑型逆康普顿散射伽马源产生高亮度的伽马射线,伽马射线穿过第一屏蔽体2的第一开孔21照射在被检测样品6上,通过被检测样品6后的伽马射线经过第二屏蔽体3的第二开孔31后照射在检测片4上。探测器5用于探测检测片4所产生的各种信号光子。

[0078] 照射在被检测样品6上的伽马射线能谱宽度与第一开孔21的孔径大小有关,第一开孔21的直径越小则伽马射线能谱宽度越窄,从而实现窄带宽。

[0079] 被检测样品6中核素的能级发生共振吸收后会吸收伽马射线中特定能量范围( $\sim$ eV)内的光子,所以伽马射线经过被检测样品6后特定能量范围内的光子强度会降低,其强度变化的大小与被检测样品6中核素的质量分数为指数衰减关系。

[0080] 伽马射线源所产生的伽马射线(直接)照射在检测片4上,会在检测片4上产生核共振荧光过程。

[0081] 当检测片4中含有的核素与被检测样品6中的待测核素相同时,经过被检测样品6后的伽马射线照射在检测片4上会发生相同核素的核共振荧光过程,探测器5能够记录到检测片4的核共振荧光所产生的伽马光子信号。伽马射线中的特定能量范围内的光子被被检测样品6吸收后照射在检测片4上的强度减小,探测器5探测到的核共振荧光信号也会相应减小。因此探测器5记录到的核共振荧光信号大小与被检测样品6中核素的质量分数含量相关。逆康普顿散射伽马射线源所产生的伽马射线照射在检测片4上,会在检测片4上产生核共振荧光过程,即逆康普顿散射伽马射线源所产生的伽马射线的能量与检测片4中核素的核共振荧光过程吸收能量相对应,因此,若检测片4中含有的核素与被检测样品6中的待测核素不同时,伽马射线经过被检测样品6时,被检测样品6不会产生核共振荧光过程,伽马射线穿过被检测样品6时不会产生核共振荧光过程,伽马射线中的特定能量范围内的光子不会因为发生核共振荧光过程被被检测样品6吸收,进而照射在检测片4上特定能量范围内的伽马射线强度不变,探测器5探测到的核共振荧光信号并不减小。所以,若在放置被检测样品6后,探测器5探测到的核共振荧光信号并不减小,则表明被检测样品6中并不存在检测片4中的核素。当检测片4和与其相对应的伽马射线用来检测被检测样品6中是否存在某种危险核素时,若探测器5记录到的检测片4产生的核共振荧光光子能谱中特征峰强度不变,那么就表明被检测样品6中并不存在这种核素。

[0082] 第二屏蔽体3可以屏蔽由伽马射线照射在被检测样品6上产生的散射光子,防止被检测样品6所产生的散射光子照射在探测器5上。

[0083] 当探测器5与检测片4的相对位置固定后对检测片4的厚度进行优化。检测片4的厚

度在变化时探测器5记录到的核共振荧光光子数也会变化,检测片4的厚度趋近于无限大时,探测器5记录到的核共振荧光光子数目为理论最大值(该理论最大值可通过计算获得)。取探测器5记录到的核共振荧光光子数是理论上最大值的一定比例所对应的检测片4的厚度D,此时。D的大小通常与检测片4中核素的密度、检测片4到探测器5的距离有关,视具体参数而定。在具体实例中,检测片4的密度为19.5克/厘米<sup>3</sup>、检测片4到探测器5距离为20厘米时,探测器3记录到的核共振荧光光子数目取理论最大值的90%,则D可以取11毫米。

[0084] 上述中,理论最大值是指:当检测片4的厚度趋于无限大时在探测器5上得到的最大核共振荧光光子数目。

[0085] 上述中,探测器4记录到的核共振荧光光子最大值的比例可以根据具体使用情况指定,在本发明优选实施例中,取值为90%。

[0086] 在检测片4的厚度D确定之后,被检测样品6存在最优厚度H可使得探测器5能够记录到最大的核共振荧光信号。

[0087] 实施例二:双色或多色伽马射线

[0088] 逆康普顿散射伽马射线源产生的双色或多色伽马射线照射被检测样品6后分别激发被检测样品6中不同的核素发生核共振荧光物理过程。

[0089] 伽马射线源所产生的双色或多色伽马射线(直接)照射在检测片4上,会在检测片4上产生核共振荧光过程。

[0090] 当被检测样品6中的待测核素与检测片4中含有的核素相同时,双色或多色伽马射线穿过被检测样品6后经过第二屏蔽体3的第二开孔31后照射在检测片4上。此种状况下,被检测样品6中核素核共振吸收了一部分双色或多色伽马射线的特定能量的光子,所以单位时间里检测片4的核共振荧光物理过程产生的核共振荧光光子数目变少导致探测器5记录到的核共振荧光光子数目变少。因此探测器5记录到的核共振荧光信号的大小与被检测样品6中待测核素的含量有关,即被检测样品6中待测核素的含量越高,探测器5记录到的核共振荧光信号越小。窄带宽的双色或多色伽马射线能够同时激发两种或多种不同核素发生核共振荧光过程,从而产生能量不同的核共振荧光光子。如果检测片4中含有的核素与被检测样品6中的待测核素不同,则双色或多色伽马射线经过被检测样品6时,被检测样品6不会产生核共振荧光过程,双色或多色伽马射线将穿过被检测样品6而不产生核共振荧光过程,双色或多色伽马射线中的特定能量范围内的光子不会被被检测样品6吸收,进而照射在检测片4上的双色或多色伽马射线强度不会因为被检测样品6中的核共振荧光过程减弱,探测器5探测到的核共振荧光信号也并不减小。所以,若在放置被检测样品6后,探测器5探测到的核共振荧光信号并不减小,则表明被检测样品6中并不存在检测片4中的核素,如果检测片4和与其相对应的伽马射线用来检测被检测样品6中是否存在某种危险核素时,探测器5记录到的检测片4产生的核共振荧光光子能谱中特征峰强度不变,那么就表明被检测样品6中并不存在这种核素。

[0091] 不同能量的核共振荧光光子被探测器5探测,通过分析探测器5记录到的光子能谱中特征峰可以推测出被检测样品6中核素的具体种类,从而实现利用逆康普顿散射伽马射线源产生的双色或多色伽马射线测量待测物中核素种类(通过能谱的特征峰确定)、含量(通过能谱的特征峰强度大小确定)与空间位置分布(通过在垂直于第一开孔21和第二开孔31的轴线的方向移动被检测样品6而得到不同位置的核素分布得到)。

[0092] 采用本发明实施例的核素检测装置和核素检测方法,只需要将被检测样品直接置于第一屏蔽体和第二屏蔽体之间,无需直接接触被检测样品,更不需要对被检测样品进行切割或者化学提炼等操作,不会损坏被检测样品本身,实现了对被测样品的无损检测,对于具有高放射性有害物质而言,降低了直接操作被检测样品对操作员的放射性风险,保障了安全生产和人们的生命财产安全。本发明实施例的核素检测装置和核素检测方法,结合逆康普顿散射伽马射线源所产生的窄带宽伽马射线,能够精准识别出被检测样品中核素的种类、含量和空间位置分布,提升了核素识别精度,结合双色或多色伽马射线还能够一次性准确识别出至少两种核素的种类、含量和空间位置分布,提升了核素识别效率。

[0093] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明保护的范围之内。

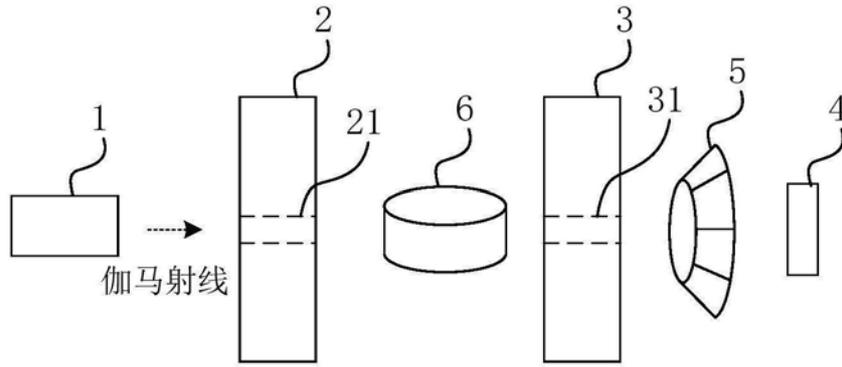


图1

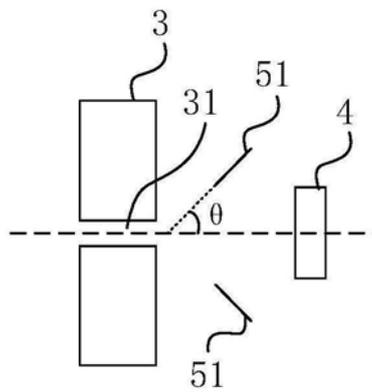


图2

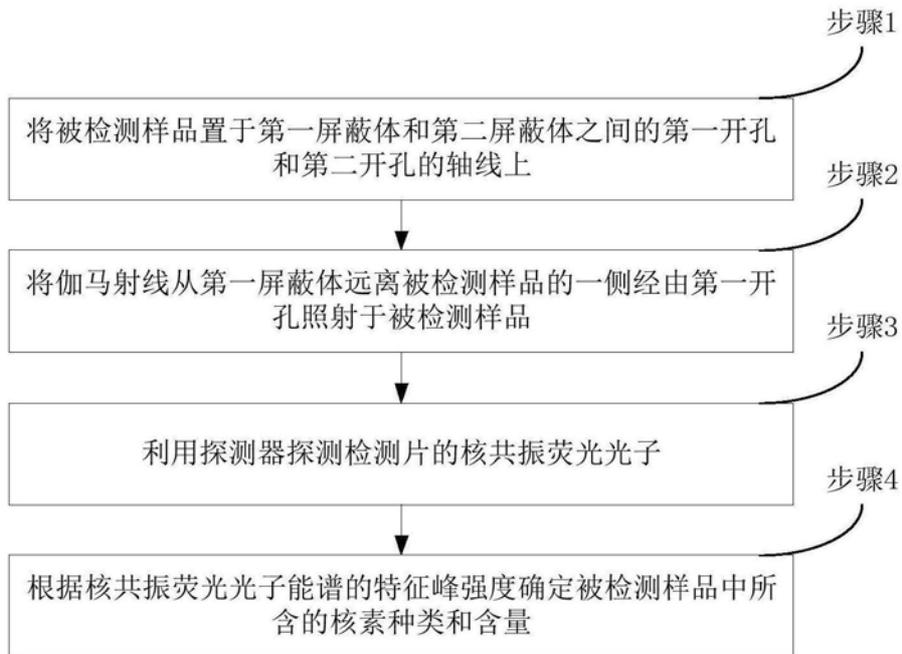


图3