



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107037011 B

(45)授权公告日 2019.07.19

(21)申请号 201710027973.8

(51)Int.Cl.

(22)申请日 2017.01.11

G01N 21/63(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

G01M 3/04(2006.01)

申请公布号 CN 107037011 A

(56)对比文件

(43)申请公布日 2017.08.11

US 2011204281 A1,2011.08.25,

(30)优先权数据

US 5176025 A,1993.01.05,

14/995,429 2016.01.14 US

CN 102132137 A,2011.07.20,

(73)专利权人 波音公司

US 2011269243 A1,2011.11.03,

地址 美国伊利诺伊州

US 2007062411 A1,2007.03.22,

(72)发明人 K·D·胡姆费尔德 M·萨法伊

US 2010209632 A1,2010.08.19,

审查员 黄彬

(74)专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司 11245

权利要求书2页 说明书13页 附图2页

(54)发明名称

用于燃料泄漏检测的系统和方法

(57)摘要

本发明涉及用于燃料泄漏检测的系统和方法。在一方面,本文描述了用于检测燃料泄漏的系统。在一些实施中,本文描述的用于检测燃料泄漏的系统包括具有外表面的含有燃料的容器和布置在含有燃料的容器的外表面的至少一部分上的包括光致发光碳纳米管的碳纳米管涂层。该系统进一步包括基本上覆盖碳纳米管涂层的燃料敏感涂层。燃料敏感涂层对由光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或基本上不透明的。

1. 用于检测燃料泄漏的系统,其包括:
具有外表面的含有燃料的容器;
布置在所述含有燃料的容器的所述外表面的至少一部分上的包括光致发光碳纳米管的碳纳米管涂层;和
覆盖所述碳纳米管涂层的燃料敏感涂层,
其中所述燃料敏感涂层对由所述光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的。
2. 根据权利要求1所述的系统,其进一步包括:
激发所述光致发光碳纳米管的光源;和
检测所述光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器。
3. 根据权利要求1所述的系统,其中所述含有燃料的容器是燃料储罐或燃料管线。
4. 根据权利要求1所述的系统,其中所述燃料包括喷气燃料。
5. 根据权利要求1所述的系统,其中所述碳纳米管涂层由碳纳米管组成。
6. 根据权利要求1所述的系统,其中所述碳纳米管涂层包括布置在基体材料中的碳纳米管。
7. 根据权利要求1所述的系统,其中所述碳纳米管涂层包括100个碳纳米管/cm²到1×10⁸个碳纳米管/cm²。
8. 根据权利要求1所述的系统,其中所述碳纳米管涂层具有至多200nm的平均厚度。
9. 根据权利要求1所述的系统,其中所述燃料敏感涂层包括聚氨酯。
10. 根据权利要求1所述的系统,其中所述燃料敏感涂层具有在1和1000μm之间的平均厚度。
11. 根据权利要求1所述的系统,其中所述燃料是喷气燃料,并且其中所述燃料敏感涂层包括聚氨酯和炭黑。
12. 根据权利要求2所述的系统,其中所述光源发射具有700到1100nm的平均波长的光。
13. 用于检测燃料泄漏的方法,其包括:
将包括光致发光碳纳米管的碳纳米管涂层布置在含有燃料的容器的外表面上;和
将燃料敏感涂层布置在所述碳纳米管涂层之上,
其中所述燃料敏感涂层对由所述碳纳米管涂层的所述光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的。
14. 根据权利要求13所述的方法,其进一步包括:
将所述含有燃料的容器的外表面暴露于用于激发所述光致发光碳纳米管的光源;和
检测所述光致发光碳纳米管的光致发光发射。
15. 根据权利要求13所述的方法,其中所述含有燃料的容器是燃料储罐或燃料管线。
16. 根据权利要求13所述的方法,其中所述碳纳米管涂层由碳纳米管组成。
17. 根据权利要求13所述的方法,其中所述碳纳米管涂层包括100个碳纳米管/cm²到1×10⁸个碳纳米管/cm²。
18. 根据权利要求13所述的方法,其中:
所述碳纳米管涂层具有至多50nm的平均厚度,并且
所述燃料敏感涂层具有在10和1000μm之间的平均厚度。

19. 根据权利要求13所述的方法,其中所述燃料是喷气燃料,并且其中所述燃料敏感涂层包括聚氨酯和炭黑。

20. 根据权利要求14所述的方法,其中所述光源发射具有700到1100nm的平均波长的光。

用于燃料泄漏检测的系统和方法

技术领域

[0001] 本公开内容涉及用于检测来自含有燃料的容器的燃料泄漏的系统和方法，并且具体而言，涉及使用光致发光检测喷气燃料的泄漏的系统和方法。

背景技术

[0002] 快速和精确地检测来自含有燃料的容器的燃料泄漏对于许多应用——包括能量、运输和航空航天应用——而言是重要的。不幸地，用于检测燃料泄漏的许多现有系统和方法存在一种或多种限制。例如，一些系统和方法可能不能显示轻微或早期泄漏，而是在相对大量的燃料已经泄漏之后可以仅仅检测和/或定位泄漏。另外，用于检测燃料泄漏的一些现有系统和方法不能容易地检测遥远的、狭窄的或以其它方式难以进入空间中的泄漏。进一步，依靠冷光的一些先前的系统和方法使用荧光团，其在某些操作条件下具有有限的使用寿命和/或失效。在一些情况下，例如，在暴露于氧气、水分、高温（比如高于80°C或高于100°C的温度）或其组合之后，荧光团降解为非冷光成分或以其它方式失去它们的冷光，从而破坏荧光团识别泄漏的能力。延长暴露于燃料（比如暴露持续多于12小时、多于24小时或多于1周）还可以使得一些现有的荧光团失去它们的冷光的一部分或全部。另外，一些荧光有机分子荧光团在它们的荧光或其它检测相关的波长下被着色和/或展示一定量的反射比。这些光学性质可以导致差的成像对比度、降低的信噪比(SNR)或二者。

[0003] 因此，存在对于检测燃料泄漏的系统和方法的需要，该系统和方法可以检测早期和/或轻微泄漏；允许检测遥远的、狭窄的或以其它方式难以进入空间中的泄漏；当暴露于高温、燃料、氧气和/或水分时具有改善的可操作性；和提供改善的成像对比度和/或SNR。

发明内容

[0004] 本文描述了检测一种或多种燃料泄漏的系统和方法，其在一些情况下可以解决上面提及的限制和/或需要中的一种或多种。例如，在一些实施中，本文描述的系统和/或方法可用于检测早期燃料泄漏、轻微燃料泄漏或其组合。在一些情况下，本文描述的系统和/或方法还可以检测遥远的、狭窄的或以其它方式难以进入空间中的泄漏。另外，在一些实施中，本文描述的系统和/或方法可以甚至在苛刻环境条件下检测燃料泄漏。例如，在一些例子中，本文描述的系统和/或方法可以甚至当系统和/或方法的荧光团暴露于高温、氧气、水分和/或燃料时——包括持续延长的时间段——检测燃料泄漏。而且，本文描述的系统和/或方法还可以提供高的成像对比度和/或高的信噪比(SNR)。

[0005] 在一方面，本文描述了用于检测燃料泄漏的方法。在一些实施中，本文描述的检测燃料泄漏的方法包括将碳纳米管涂层布置在含有燃料的容器——比如燃料储罐或燃料管线——的外表面，其中该碳纳米管涂层包含光致发光碳纳米管。该方法进一步包括将燃料敏感涂层布置在碳纳米管涂层之上。燃料敏感涂层可以对由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或基本上不透明的。例如，在一些情况下，燃料敏感涂层是着色层。

[0006] 本文描述的方法可以进一步包括将含有燃料的容器的外表面暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源。如下文进一步描述的,将含有燃料的容器的外表面暴露于这样的光源可以指示燃料泄漏是否已经发生。具体而言,当燃料泄漏发生时,燃料敏感涂层的至少一部分可以溶解、分散、变薄或以其它方式改变,使得燃料敏感涂层变得透明,而不是不透明——特别是关于由下面的碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的光。在这样的例子中,光源可以激发光致发光碳纳米管,光致发光碳纳米管然后可以发射光致发光,并且重要地,发射的碳纳米管的光致发光可以被位于含有燃料的容器外部的光电探测器检测。如下文进一步描述的,发射的碳纳米管的光致发光的检测可以充当燃料泄漏已经发生的正信号。

[0007] 因此,在一些实施中,本文描述的方法进一步包括在将含有燃料的容器暴露于激发光致发光碳纳米管的光源之后检测光致发光碳纳米管的光致发光发射。相反地,本文描述的方法还可以包括将含有燃料的容器的外表面暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源,并且随后从碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管检测不到光致发光。在这样的例子中,检测的光致发光的不存在可以充当燃料泄漏没有发生的负信号。

[0008] 在另一方面,本文描述了用于检测燃料泄漏的系统。在一些实施中,本文描述的系统包括具有外表面的含有燃料的容器和碳纳米管涂层——其包括布置在含有燃料的容器的外表面的至少一部分上的光致发光碳纳米管。该系统还包括基本上覆盖碳纳米管涂层的燃料敏感涂层。而且,燃料敏感涂层可以对由光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或基本上不透明的。此外,在一些情况下,本文描述的系统进一步包括激发光致发光碳纳米管的光源。该系统还可以包括检测来自光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器。

[0009] 这些和其它实施在下面的具体实施方式中更详细地描述。

附图说明

[0010] 图1图解了用于实施根据本文描述的一个实施的方法的系统的一些部件的截面图。

[0011] 图2图解了用于实施根据本文描述的一个实施的方法的系统的一些部件的截面图。

[0012] 图3图解了单壁碳纳米管的光致发光图。

具体实施方式

[0013] 通过参考下面的具体实施方式、实施例和附图,可以更容易地理解本文描述的实施。但是,本文描述的要素、装置和方法不限于具体实施方式、实施例和附图中呈现的具体实施。应当认识到,这些实施仅仅是对本公开内容的原理的说明。许多修改和改编对于本领域技术人员而言是容易地显而易见的,而不背离本公开内容的精神和范围。

[0014] 此外,本文公开的所有范围将被理解为涵盖包含在其中的任何和所有子范围。例如,“1.0到10.0”的陈述的范围应当被视为包括以1.0或更大的最小值开始并以10.0或更小的最大值结束的任何和所有子范围,例如,1.0到5.3、或4.7到10.0、或3.6到7.9。

[0015] 除非另有明确规定,本文公开的所有范围还被视作包括范围的端点。例如,“5

到10之间”的范围或“从5到10”的范围通常应当被视为包括端点5和10。

[0016] 进一步,当短语“至多”与量或数量相连使用时,将理解该量为至少可检测的量或数量。例如,以“至多”指定量的量存在的材料可以以从可检测的量和至多指定的量并包括指定的量存在。

[0017] I. 用于检测燃料泄漏的方法

[0018] 在一方面,本文描述了用于检测燃料泄漏的方法。在一些实施中,本文描述的用于检测燃料泄漏的方法包括将碳纳米管涂层布置在含有燃料的容器的外表面上。碳纳米管涂层包括光致发光碳纳米管。该方法进一步包括将燃料敏感涂层布置在碳纳米管涂层之上。燃料敏感涂层对由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收的波长的光、由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管发射的波长的光、或二者光学地不透明或基本上不透明。本文描述的方法可以进一步包括将含有燃料的容器的外表面暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源。将含有燃料的容器的外表面暴露于这样的光源可以指示燃料泄漏是否已经发生。具体而言,当燃料泄漏发生时,燃料敏感涂层的至少一部分可以溶解、分散、去除、变薄或以其它方式改变,使得燃料敏感涂层变得透明,而不是不透明——特别是关于由下面的碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收的光、由下面的碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管发射的光、或二者。在这样的例子中,光源可以激发光致发光碳纳米管,光致发光碳纳米管然后可以发射光致发光,并且发射的碳纳米管的光致发光可以由光电探测器检测。因此,在一些实施中,本文描述的方法进一步包括在将含有燃料的容器暴露于激发光致发光碳纳米管的光源之后检测光致发光碳纳米管的光致发光发射。检测的光致发光可以因此充当指示燃料泄漏存在的正信号,具体地通过识别含有燃料的容器的外表面的区域,该区域已经足以引起来自在该区域上布置的光致发光碳纳米管的光致发光的检测的方式暴露于燃料。相反地,本文描述的方法可以包括将含有燃料的容器的外表面暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源,并且随后从碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管检测不到光致发光。在这样的例子中,检测的光致发光的不存在可以充当燃料泄漏没有发生的负信号。

[0019] 图1和图2示意性地图解了上述检测过程。参考图1和图2,含有燃料的容器(10)的外表面(11)已经被涂覆有包含光致发光碳纳米管的(未具体示出)碳纳米管涂层(20)。另外,燃料敏感涂层(30)已经被布置在碳纳米管涂层(20)的上部或外表面(21)之上。如图1中所图解,燃料敏感涂层(30)基本上覆盖碳纳米管涂层(20),并且在燃料敏感涂层(30)对碳纳米管涂层(20)的覆盖中不存在显著空隙。进一步,如图1中所描绘的,燃料泄漏还没有发生。因此,当含有燃料的容器(10)的涂覆的外表面(11)被暴露于具有与光致发光碳纳米管的至少一部分的吸收光谱对应的波长的光($h\nu$)或利用其照射时,没有光致发光从光致发光碳纳米管离开由外部检测器(40)检测的涂层(20、30)。完整的燃料敏感涂层(30)反而阻挡(例如,吸收)激发光($h\nu$)或由碳纳米管涂层(20)的光致发光碳纳米管发射的任何光致发光,或者激发光($h\nu$)和由碳纳米管涂层(20)的光致发光碳纳米管发射的任何光致发光二者。

[0020] 相比之下,如图2中所描绘的,燃料泄漏已经发生并且燃料敏感涂层(30)不再完全完整。而是,由于其暴露于燃料(未显示),燃料敏感涂层(30)的一部分(31)已经溶解、分散、去除、变薄或以其它方式改变。因此,当含有燃料的容器(10)的涂覆的外表面(11)被暴露于激发光($h\nu$)或者利用激发光($h\nu$)照射时,来自碳纳米管涂层(20)的光致发光碳纳米管的光

致发光(PL)被检测器(40)检测。

[0021] 现转到本文描述的方法的具体步骤,本文描述的方法包括将碳纳米管涂层布置在含有燃料的容器的外表面上,其中碳纳米管涂层包括光致发光碳纳米管。如本领域普通技术人员理解的,单壁碳纳米管的性质强烈地取决于其几何结构。该结构的特征常常在于手性指数(n, m)的鉴定和列举。指数 n 和 m 表示沿着石墨烯的蜂巢晶格中的两个方向的单位向量的数目。这些指数可用于确定纳米管的重要参数,比如纳米管是否是金属的($n=m$)、半金属的($n-m$ 为3的倍数)或半导体的($n-m$ 的其它值)。具有 $m=0$ 的值的纳米管通常被称为锯齿形纳米管,并且具有 $n=m$ 的值的纳米管通常被称为扶手椅形(armchair)纳米管。具有与锯齿形和扶手椅形纳米管不同的 n, m 或二者的值的纳米管通常被称为手性纳米管。一般而言,半导体的单壁碳纳米管是光致发光的。而且,如本领域普通技术人员所理解的,光致发光碳纳米管能够吸收某些波长的光,并且然后发射某些其它波长的光。

[0022] 因而,在本文描述的一些实施中,碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管是半导体碳纳米管。但是,任何光致发光碳纳米管可以用在本文描述的碳纳米管涂层中。而且,在一些情况下,碳纳米管涂层包括具有不同(n, m)值的不同光致发光碳纳米管的混合物。例如,在一些例子中,光致发光碳纳米管具有选自如下的一个或多个(n, m)值:(10, 3)、(9, 4)、(8, 6)、(12, 1)、(11, 3)、(8, 7)、(10, 5)、(9, 7)、(13, 2)、(12, 4)、(11, 4)、(10, 6)、(9, 8)、(11, 6)、(14, 1)、(13, 3)、(12, 5)、(11, 7)、(10, 8)、(15, 1)、(14, 3)、(13, 5)、(10, 9)、(12, 7)、(16, 2)、(15, 4)、(15, 2)、(14, 4)、(13, 6)、(12, 8)、(11, 9)、(14, 6)、(17, 1)、(16, 3)、(15, 5)、(14, 7)、(11, 10)、(13, 8)和(13, 9)。但是,将理解可以使用碳纳米管手性的任何混合物,条件是碳纳米管涂层包括光致发光碳纳米管。另外,碳纳米管涂层的碳纳米管不必需富集任何特定的碳纳米管异构体,或者甚至更通常地光致发光碳纳米管。而是,本文描述的碳纳米管涂层的碳纳米管可以包括光致发光和非光致发光碳纳米管、金属和半金属碳纳米管、或其组合的混合物。碳纳米管的各种商业来源可以因而被用于形成本文描述的碳纳米管涂层,包括包含各种类型的单壁碳纳米管的未纯化的商业来源。但是,如果需要,碳纳米管涂层的碳纳米管可以富集某些手性。具体而言,在一些实施中,碳纳米管富集光致发光碳纳米管,包括具有上面叙述的一个或多个具体(n, m)值的光致发光碳纳米管。更通常地,在一些情况下,光致发光碳纳米管形成基于碳纳米管涂层的碳纳米管的总数目或总重量至多100%、至多90%、至多80%、至多75%、至多70%、至多60%、至多50%、至多40%、至多30%、至多20%或至多10%的碳纳米管涂层的碳纳米管。

[0023] 还将理解,碳纳米管涂层的碳纳米管可以具有与本公开内容的目标一致的任何尺寸。例如,在一些情况下,碳纳米管具有0.7到1.5纳米(nm)或1到4nm的平均直径,和10nm到1000微米(μm)或10nm到10μm的平均长度。

[0024] 如本文所描述的,本文描述的碳纳米管涂层被布置在含有燃料的容器的外表面上。含有燃料的容器通常可以包括用燃料填充的或可操作以用燃料填充的任何容器或贮存器。例如,在一些情况下,含有燃料的容器包括燃料-储存容器,比如罐或圆筒。含有燃料的容器还可以是燃料-运输容器,比如管道或燃料管线。而且,本文描述的含有燃料的容器的尺寸和形状不被具体限制。而是,容器可以具有与本公开内容的目标一致的任何尺寸、形状或其组合。同样,本文描述的含有燃料的容器还可以由与本公开内容的目标一致的任何材料形成或制造。在一些实施中,例如,本文描述的含有燃料的容器可以包括金属、玻璃纤维、

复合材料或其组合,或者由金属、玻璃纤维、复合材料或其组合形成。

[0025] 进一步,含有燃料的容器的外表面可以具有与本公开内容的目标一致的任何尺寸和形状。在一些情况下,例如,外表面是平的或基本上平的。在其它实施中,外表面是弯曲的或具有复杂的形貌(*topography*)。例如,外表面可以是凹面的或凸面的。其它形状也是可能的。

[0026] 另外,在本文描述的含有燃料的容器内包含的燃料可以是静止的或在容器内移动的。进一步,可以使用与本公开内容的目标一致的任何燃料。在一些实施中,例如,燃料包括喷气燃料、生物燃料、煤油、压缩天然气、矿物燃料比如汽油或柴油、或其组合。在一些情况下,喷气燃料包括煤油型喷气燃料比如Jet-A或Jet-A1、石脑油型喷气燃料比如Jet-B、或军事喷气燃料比如JP-8或JP-10。还将理解,在本文描述的容器内包含的燃料可以是液体或气体。

[0027] 本文描述的碳纳米管涂层可以与本公开内容的目标一致的任何方式被布置或者放置在本文描述的含有燃料的容器的外表面上。例如,在一些情况下,碳纳米管涂层被喷涂、辊涂(roll)或刷涂(paint)在容器的外表面上。而且,可以使用“湿法”或“干法”技术将碳纳米管涂层布置在含有燃料的容器的外表面上。例如,在一些实施中,将碳纳米管涂层布置在外表面上包括首先将碳纳米管分散、溶解或悬浮在溶剂中以提供混合物,然后将混合物喷涂、辊涂或刷涂在外表面上。可以使用与本公开内容的目标一致的任何溶剂。例如,可以使用有机溶剂,比如烷烃类、卤代烷烃类、醚类、酯类和醇类。在一些情况下,溶剂包括乙醇、己烷或二氯甲烷。另外,碳纳米管可以与本公开内容的目标一致的任何量分散、溶解或悬浮在溶剂中。例如,在一些情况下,碳纳米管基于混合物的总重量以大约0.01到1重量百分比、0.05到0.5重量百分比或0.1到0.2重量百分比的量存在于混合物中。在将碳纳米管-溶剂混合物放置在外表面上之后,溶剂可以被蒸发或者使溶剂蒸发,从而留下“净(neat)”碳纳米管层。如本领域普通技术人员所理解的,“净”碳纳米管层可以由碳纳米管组成或基本上由碳纳米管组成,与还包括另外的材料相反。因此,在一些实施中,本文描述的碳纳米管涂层包括碳纳米管、由碳纳米管组成、或基本上由碳纳米管组成。

[0028] 可选地,在其它情况下,本文描述的碳纳米管涂层包括除了碳纳米管之外的一种或多种材料。例如,在一些例子中,碳纳米管涂层通过将碳纳米管分散、溶解或悬浮在基体材料——包括非挥发性基体材料,比如聚合物基体材料——中形成。因此,在一些实施中,将碳纳米管涂层布置在含有燃料的容器的外表面上包括将碳纳米管分散、溶解或悬浮在基体材料中以提供复合混合物,并且随后将复合混合物喷涂、辊涂、刷涂或以其它方式布置在容器的外表面上。

[0029] 可以使用与本公开内容的目标一致的任何基体材料。在一些情况下,基体材料包括聚合物或低聚物材料,包含或不包含另外的溶剂比如有机溶剂或水。另外,基体材料可以是有机的或无机的。适合的基体材料的实例包括但不限于有机聚合物材料比如环氧树脂、乙烯树脂和酚醛树脂聚合物,和无机材料比如氧化硅、氧化钛、石膏、压力喷浆和galvanite。

[0030] 而且,还将理解,在一些这样的实施中,基体材料是燃料不敏感的。本文出于参考目的,当在燃料泄漏期间暴露于燃料时,“燃料不敏感的”基体材料可以保持完整或基本上完整——与被燃料溶解或降解的基体材料相反,其使得碳纳米管涂层与含有燃料的容器的

外表面分离或者以其它方式从含有燃料的容器的外表面失去。

[0031] 另外,碳纳米管可以以与本公开内容的目标一致的任何量分散、溶解或悬浮在基体材料中。例如,在一些情况下,碳纳米管基于复合混合物的总重量以大约0.01到1重量百分比、0.05到0.5重量百分比或0.1到0.2重量百分比的量存在于复合混合物中。

[0032] 本文描述的碳纳米管涂层可以存在于与本公开内容的目标一致的含有燃料的容器的任何量的外表面上或被布置在其之上。在一些情况下,例如,碳纳米管涂层覆盖基于外表面的总表面积或基于含有燃料的容器的外部的总表面积至少50%、至少70%、至少80%、至少90%或至少95%的外表面。在一些例子中,碳纳米管涂层覆盖30-100%、30-99%、30-90%、50-100%、50-99%、50-95%、50-90%、60-100%、60-99%、70-100%、70-99%、70-95%、80-100%、80-99%、80-95%、90-100%、90-99%、95-100%或95-99%的外表面。进一步,在一些情况下,碳纳米管涂层被布置在含有燃料的容器的接缝、接头、和/或其它部分——其比容器的其它部分更可能失效或遭受燃料泄漏——上或之上。在一些这样的情况下,碳纳米管涂层仅被布置在含有燃料的容器的这样的部分上或之上。

[0033] 而且,在一些实施中,本文描述的碳纳米管涂层具有至多大约10nm、至多大约20nm、至多大约50nm、至多大约100nm、至多大约200nm或至多大约500nm的平均厚度。在一些情况下,本文描述的碳纳米管涂层具有大约10-500nm、10-300nm、10-200nm、10-100nm、20-500nm、20-200nm、50-500nm、50-300nm、50-200nm或50-100nm的平均厚度。其它厚度也是可能的。进一步,在一些情况下,碳纳米管涂层的厚度基于下面的一种或多种选择:碳纳米管涂层中光致发光碳纳米管的面密度;将从碳纳米管涂层获得的期望的光致发光信号强度;和碳纳米管涂层中光致发光碳纳米管的相对量。例如,在一些实施中,碳纳米管涂层可以基本上由光致发光碳纳米管组成。在这样的例子中,可以使用相对薄的碳纳米管涂层,比如具有至多10nm的平均厚度或1到10nm的平均厚度的层。在其它情况下,碳纳米管涂层可以包括在基体材料内分散的碳纳米管,并且碳纳米管涂层的平均厚度可以是相对厚的,比如至多200nm或50-200nm。另外,本文描述的碳纳米管涂层的平均厚度还可以被选择以避免层从含有燃料的容器的外表面剥离。

[0034] 一般而言,本文描述的碳纳米管涂层的碳纳米管可以以与本公开内容的目标一致的任何面密度存在于含有燃料的容器的外表面上。在一些情况下,例如,碳纳米管涂层包括基于碳纳米管涂层的上表面或外表面(例如,更远离含有燃料的容器的外表面并且更靠近燃料敏感涂层的表面)的总面积100个碳纳米管/平方厘米(cm^2)到 1×10^8 个碳纳米管/ cm^2 、100个碳纳米管/ cm^2 到 1×10^7 个碳纳米管/ cm^2 、1000个碳纳米管/ cm^2 到 1×10^6 个碳纳米管/ cm^2 、 1×10^6 个碳纳米管/ cm^2 到 1×10^8 个碳纳米管/ cm^2 或10,000个碳纳米管/ cm^2 到 1×10^8 个碳纳米管/ cm^2 。

[0035] 本文描述的方法还包括将燃料敏感涂层布置在本文描述的碳纳米管涂层之上。如本文所描述,燃料敏感涂层可以是这样的涂层:其通过与含有燃料的容器的燃料接触至少部分地被溶解、分散和/或降解,和/或这样的涂层:其被以其它方式化学地或物理地改变以变得对与碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管的激发和/或发射光谱对应的波长的光充分地光学透明。另外,在一些例子中,本文描述的燃料敏感涂层对除了含有燃料的容器的燃料之外的一种或多种环境因素不敏感。例如,在一些实施中,由于与氧气、水分接触,燃料敏感涂层的熔点以下的操作温度、或其组合,燃料敏感涂层不以本文描述的方式溶解、分散、降解

或以其它方式变得光学透明。

[0036] 本文描述的燃料敏感涂层可以包括与本公开内容的目标一致的任何材料,由其组成,基本上由其组成,或由其形成。在一些情况下,本文描述的燃料敏感涂层包括聚合物材料,比如有机聚合物材料,由其组成,基本上由其组成,或由其形成。在一些实施中,燃料敏感涂层包括聚氨酯或由其形成。一般而言,用于形成燃料敏感涂层的一种或多种材料可以基于下面的一种或多种选择:含有燃料的容器包含的燃料的类型;一种或多种材料的机械性质;和一种或多种材料的光学性质。在一些情况下,例如,当含有燃料的容器包含喷气燃料时,燃料敏感涂层由聚氨酯形成。

[0037] 另外,在一些情况下,燃料敏感涂层可以进一步包括遍及燃料敏感涂层分散的染料或颜料。在一些例子中,这种染料或颜料的使用可以对燃料敏感涂层提供期望的光学不透明度,使得当以足够厚度存在时,燃料敏感涂层对由下面的碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收、发射、或吸收和发射的波长的光是光学不透明的。适合于在本文描述的燃料敏感涂层中使用的颜料或染料的一个非限制性实例是炭黑。也可以使用其它染料或颜料。颜料或染料比如炭黑的使用在这样实施中可能是特别有用的:在该实施中,用于形成燃料敏感涂层的主要材料(例如,聚氨酯)对由光致发光碳纳米管吸收的、由光致发光碳纳米管发射的、或由下面的碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和发射的波长的光是光学透明的。一般而言,燃料敏感涂层可以对由光致发光碳纳米管吸收、发射、或吸收和发射的波长的光是光学不透明的或基本上光学不透明的。本文出于参考目的,“基本上”不透明的层可以阻挡或吸收至少75%、至少80%、至少85%、至少90%、至少95%或至少99%的入射光,该入射光具有与光致发光碳纳米管的激发波长和/或碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管的发射波长对应的波长。例如,在一些例子中,本文描述的燃料敏感涂层可以阻挡或吸收75-100%、80-100%、85-100%、90-100%、95-100%或99-100%的入射光,该入射光具有与光致发光碳纳米管的激发波长、碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管的发射波长、或二者对应的波长。如本领域普通技术人员所理解的,层的不透明度可以与本公开内容的目标一致的任何方式测量或测定。例如,层的不透明度可以光谱地(spectroscopically)测定,比如通过使用分光光度计。

[0038] 而且,本文描述的燃料敏感涂层可以具有与本公开内容的目标一致的任何厚度。例如,在一些实施中,燃料敏感涂层具有在10和1000μm之间、50和1000μm之间、10和500μm之间、或50和500μm之间的任何厚度。其它厚度也是可能的。另外,在一些情况下,本文描述的燃料敏感涂层的厚度可以基于下面的一种或多种选择:用于形成燃料敏感涂层的一种或多种材料的光学吸收分布;燃料敏感涂层的期望的光学不透明度;和燃料敏感涂层对包含在含有燃料的容器中的燃料的敏感程度。例如,在一些情况下,燃料敏感涂层的厚度被选择以具有上文描述的不透明度,同时还对燃料足够敏感以允许以本文描述的方式检测轻微和/或早期燃料泄漏。

[0039] 进一步,本文描述的燃料敏感涂层可以覆盖与本公开内容的目标一致的碳纳米管涂层的任何部分。在一些实施中,燃料敏感涂层覆盖至少80%、至少85%、至少95%或至少99%的碳纳米管涂层,百分比基于碳纳米管涂层的上表面或外表面的总表面积。在一些例子中,燃料敏感涂层覆盖基于碳纳米管涂层的上表面的总表面积80-100%、80-99%、80-90%、85-100%、85-99%、85-95%、90-100%、90-95%、90-99%或95-99%的碳纳米管涂

层。

[0040] 本文描述的燃料敏感涂层可以与本公开内容的目标一致的任何方式被布置或放置在碳纳米管涂层上或之上。例如,在一些情况下,燃料敏感涂层被喷涂、刷涂、辊涂或浇铸在碳纳米管涂层之上。燃料敏感涂层还可以通过已知的聚合物、溶胶凝胶或其它涂层沉积方法被布置或沉积在碳纳米管涂层之上。

[0041] 在一些实施中,本文描述的方法进一步包括将含有燃料的容器的外表面暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源,并且随后检测光致发光碳纳米管的光致发光发射。将理解,“将含有燃料的容器的外表面暴露”于光源可以包括除了在暴露或照射发生时暴露保持布置在容器表面的任何一种或多种涂层之外,暴露容器自身的表面。而且,含有燃料的容器的外表面可以与本公开内容的目标一致的任何方式暴露于光源。例如,光源可以是布置在容器的外表面之上或者远离容器的外表面的外部光源。此外,可以使用与本公开内容的目标一致的任何光源。例如,在一些例子中,光源是宽带光源,比如荧光灯。在其它实施中,光源是窄带光源,比如激光。进一步,在一些情况下,光源连接至光纤、管道镜、或光递送的其它装置。在一些实施中,这样的光源的使用可以允许光源照射位于遥远的、狭窄的或以其它方式难以进入空间中的含有燃料的容器的外表面。

[0042] 而且,本文描述的光源可以产生或发射具有与光致发光碳纳米管的至少一部分的吸收或激发光谱对应的波长的光,如上文所描述的。例如,在一些例子中,光源产生或发射具有电磁光谱的紫外(UV)部分的平均波长的光,比如从100到400nm、100到280nm、280到315nm或315到400nm。在其它例子中,光源产生或发射具有电磁光谱的可见或红外(IR)部分的平均波长的光,比如700和1100nm之间、750和1000nm之间、或800和1000nm之间的波长。

[0043] 类似地,检测来自光致发光碳纳米管的光致发光发射可以与本公开内容的目标一致的任何方式实施。在一些情况下,例如,检测器被布置在容器的外表面之上或远离容器的外表面。而且,可以使用与本公开内容的目标一致的任何检测器。例如,在一些例子中,可以使用光电倍增管(PMT)检测器。在其它实施中,检测器包括二维检测器,比如电荷耦合器件(CCD)图像传感器或照相机。进一步,本文描述的检测器可以连接至光纤、管道镜或上文描述的光递送的其它装置。检测器还可以连接至方法中使用的光源,使得单个仪器可以执行激发和检测功能二者。

[0044] 而且,检测器可以是可操作的以检测与碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管的至少一部分的发射光谱对应的波长的光。例如,在一些情况下,检测器是可操作的以检测具有电磁光谱的IR或近IR(NIR)部分的平均波长的光。在一些实施中,检测器是可操作的以检测具有1150到1850nm或1600到1800nm的平均波长的光。

[0045] 另外,在一些实施中,用于检测光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器和/或用于激发光致发光碳纳米管的光源基于光致发光碳纳米管的光致发光图选择。图3图解了可以适合于在本文描述的方法的一些实施中使用的一个这样的图的实例。在一些实施中,与本公开内容一致的光致发光图可以与Iakoubovskii等,“IR-extended photoluminescence mapping of single-wall and double-wall carbon nanotubess,”Journal of Physical Chemistry B 110(2006),17420-17424中讨论的一致的方法制备或建立。在与上述一致的光致发光图中,提供了数据点,其对应于具有给定手性的碳纳米管的最大吸收的激发波长对纳米管的光致发光波长的图。在图3中,与特定光致发光发射频率和

最大吸收相关联的n和m值在该手性的相应数据点之下指示。因此,在一些情况下,用于激发光致发光碳纳米管的光源被选择以提供具有700到1100nm的平均波长的光,并且用于检测来自光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器是可操作的以检测具有1150到1850nm的平均波长的光。

[0046] 还将理解,在一些实施中,用于检测光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器、或用于激发光致发光碳纳米管的光源、或二者被选择以对应于通常不存在于环境条件中的波长的光,或者对应于在环境条件中以相对低的量或低强度存在的波长的光。例如,在一些情况下,可以使用UV激发源和IR检测器。这样的波长的使用可以提高本文描述的方法的信噪比(SNR)。

[0047] 上文描述的方法涉及检测来自含有燃料的容器的燃料泄漏。但是,在一些情况下,本文描述的方法还可用于检测容器或其它物品至可能已经从别处泄漏的燃料的暴露,与从容器或物品自身泄漏相反。而且,容器或其它物品可以具有易受燃料影响的外表面。例如,这样的“易受燃料影响的”外表面可以通过暴露于燃料或者通过直接与燃料接触而受损。这样的易受燃料影响的表面的非限制性实例可以包括电子器件的表面、涂漆面、和包含被燃料降解或腐蚀的材料的表面或由被燃料降解或腐蚀的材料形成的表面。因而可以期望的是使用本文描述的方法来检测易受燃料影响的表面是否已经暴露于燃料或者正在暴露于燃料。因此,这样的方法可以包括将碳纳米管涂层布置在易受燃料影响的外表面上,其中碳纳米管涂层包含光致发光碳纳米管。该方法进一步包括将燃料敏感涂层布置在碳纳米管涂层之上。燃料敏感涂层对可能暴露于易受燃料影响的表面或者被放置与易受燃料影响的表面直接接触的燃料是敏感的。另外,燃料敏感涂层对由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或者基本上不透明的。而且,本文描述的方法可以进一步包括将易受燃料影响的外表面暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源。将易受燃料影响的表面暴露于这样的光源可以指示易受燃料影响的表面是否已经被暴露于燃料或者已经被放置于与燃料直接接触,如上面对于来自含有燃料的容器的燃料泄漏描述的。特别地,当燃料暴露发生时,燃料敏感涂层的至少一部分可以溶解、分散、去除、变薄或以其他方式改变,使得燃料敏感涂层变得透明而非不透明——特别是关于由下面的碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的光。在这样的例子中,光源可以激发光致发光碳纳米管,光致发光碳纳米管然后可以发射光致发光,并且发射的碳纳米管的光致发光可以被光电探测器检测。因此,在一些实施中,本文描述的方法进一步包括在将易受燃料影响的外表面暴露于激发光致发光碳纳米管的光源之后,检测光致发光碳纳米管的光致发光发射。检测的光致发光因而可以充当指示燃料暴露存在的正信号,具体地通过识别易受燃料影响的外表面的区域,其已经被以足以引起来自在该区域上布置的光致发光碳纳米管的光致发光的检测的方式暴露于燃料。相反,本文描述的方法可以包括将易受燃料影响的外表面暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源,并且随后从碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管检测不到光致发光。在这样的例子中,检测的光致发光的不存在可以充当指示燃料暴露没有发生的负信号。还将理解,上面对于来自含有燃料的容器的燃料泄漏检测描述的各个步骤和部件对于检测易受燃料影响的表面的燃料的暴露可以以类似的方式使用,易受燃料影响的表面可以与不一定包含燃料的容器或其它物品相关联。

[0048] 上文描述的方法涉及检测燃料泄漏。但是,将理解,本文描述的方法还可用于检测

来自容器或来自另一个位置的其它流体的释放。因此,在另一方面,本文描述了检测流体的更通用的方法。在这样的实施中,方法包括将碳纳米管涂层布置在含有流体的容器的外表面上(或者可选地,在不一定包含流体的容器或其它物品的易受流体影响的外表面上,如上面描述的)。如在本文描述的其它实施中,碳纳米管涂层包括光致发光碳纳米管,并且方法进一步包括将流体敏感的涂层布置在碳纳米管涂层之上。以上面对于燃料敏感涂层描述的方式,流体敏感的涂层对含有流体的容器中包含的流体敏感(或者可选地,对于可以暴露于易受流体影响的外表面上的流体敏感)。另外,流体敏感的涂层对于由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或基本上不透明的。而且,本文描述的方法可以进一步包括将含有流体的容器的外表面(或者可选地,易受流体影响的外表面)暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源。将含有流体的容器的外表面(或者可选地,易受流体影响的外表面)暴露于这样的光源可以指示流体泄漏或流体的其它释放(或者可选地,流体暴露)是否已经发生,如上面对于燃料泄漏更具体地描述的。特别地,当流体泄漏或释放发生时,流体敏感的涂层的至少一部分可以溶解、分散、去除、变薄或以其它方式改变,使得流体敏感的涂层变得透明而非不透明——特别是关于由下面的碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的光。在这样的例子中,光源可以激发光致发光碳纳米管,光致发光碳纳米管然后可以发射光致发光,并且发射的碳纳米管的光致发光可以由光电探测器检测。因而,在一些实施中,本文描述的方法进一步包括在将含有流体的容器(或者可选地,易受流体影响的外表面)暴露于激发光致发光碳纳米管的光源之后,检测光致发光碳纳米管的光致发光发射。检测的光致发光因而可以充当指示燃料泄漏或释放(或者可选地,流体暴露)存在的正信号,具体地通过识别含有流体的容器外表面的区域(或者可选地,易受流体影响的外表面的区域),其已经被以足以引起来自在该区域上布置的光致发光碳纳米管的光致发光的检测的方式暴露于流体。相反,本文描述的方法可以包括将含有流体的容器的外表面(或者可选地,易受流体影响的外表面)暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源,和随后从碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管检测不到光致发光。在这样的例子中,检测的光致发光的不存在可以充当指示流体泄漏或释放(或者可选地,流体暴露)没有发生的负信号。还将理解,上面对于燃料泄漏检测描述的各个步骤和部件对于除了燃料之外的流体的泄漏或释放(或者可选地,暴露)的检测可以以类似的方式使用。

[0049] II. 用于检测燃料泄漏的系统

[0050] 在另一方面,本文描述了用于检测燃料泄漏的系统。在一些实施中,这样的系统包括具有外表面的含有燃料的容器、在含有燃料的容器的外表面的至少一部分上布置的碳纳米管涂层,和基本上覆盖碳纳米管涂层的燃料敏感涂层。碳纳米管涂层包括光致发光碳纳米管。另外,燃料敏感涂层对由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或基本上光学不透明的。在一些情况下,该系统进一步包括激发光致发光碳纳米管的光源和/或检测光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器。

[0051] 现在转到本文描述的系统的具体部件,本文描述的系统包括含有燃料的容器。可以使用与本公开内容的目标一致的任何含有燃料的容器。在一些实施中,含有燃料的容器包括在上文部分I中描述的含有燃料的容器。例如,在一些情况下,含有燃料的容器是燃料储罐或燃料管线。同样,含有燃料的容器可以包含与本公开内容的目标一致的任何燃料,包括在上文部分I中描述的燃料,比如喷气燃料。

[0052] 本文描述的系统还包括布置在含有燃料的容器的外表面的至少一部分上的碳纳米管涂层。碳纳米管涂层可以具有与本公开内容的目标一致的任何组成、形态或其组合。在一些情况下,碳纳米管涂层具有上文部分I中对于碳纳米管涂层描述的组成、形态和/或其它特征。例如,在一些例子中,碳纳米管涂层基本上由碳纳米管组成。在其它情况下,碳纳米管涂层包括在基体材料中布置的碳纳米管。类似地,碳纳米管涂层可以以在以上文部分I中描述的任何方式在含有燃料的容器的表面上形成或布置。

[0053] 另外,本文描述的系统进一步包括在碳纳米管涂层上或之上布置的燃料敏感涂层。燃料敏感涂层可以具有与本公开内容的目标一致的任何组成、形态、光学性质和/或其它性质。在一些情况下,燃料敏感涂层具有上文部分I中对于燃料敏感涂层描述的组成、形态、光学性质、其它特征或其组合。例如,在一些实施中,燃料敏感涂层包括聚氨酯和颜料比如炭黑或由其形成。

[0054] 在一些情况下,本文描述的系统进一步包括激发光致发光碳纳米管的光源和/或检测光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器。可以使用与本公开内容的目标一致的任何光源、检测器或其组合。在一些实施中,光源和/或检测器包括上文部分I中描述的光源和/或检测器。

[0055] 上文描述的系统涉及用于检测来自含有燃料的容器的燃料泄漏的系统。如上文部分I中描述的,但是,还可能的是使用本文描述的系统来检测不包含燃料或不一定包含燃料的容器或其它物品的燃料泄漏。在一些这样的实施中,系统包括易受燃料影响的外表面、布置在易受燃料影响的外表面的至少一部分上的碳纳米管涂层,和基本上覆盖碳纳米管涂层的燃料敏感涂层。碳纳米管涂层包括光致发光碳纳米管。另外,燃料敏感涂层对由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或基本上光学不透明的。在一些情况下,该系统进一步包括激发光致发光碳纳米管的光源、检测光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器、或二者。还将理解,上面对于来自含有燃料的容器的燃料泄漏检测描述的各个部件对于易受燃料影响的外表面的燃料的暴露的检测可以以类似的方式使用。

[0056] 上文描述的系统涉及用于检测燃料泄漏的系统。但是,将理解,本文描述的系统还可以被用于检测来自容器的其它流体的释放(或者可选地,检测外表面暴露于除了燃料之外的流体)。因而,在另一方面,本文描述了检测流体的更通用的系统。在一些这样的实施中,系统包括具有外表面的含有流体的容器(或者可选地,具有易受流体影响的外表面的容器或其它物品,其中容器或其它物品不一定包含流体,该外表面易受流体影响)、布置在外表面的至少一部分上的碳纳米管涂层,和基本上覆盖碳纳米管涂层的流体敏感的涂层。碳纳米管涂层包括光致发光碳纳米管。另外,流体敏感的涂层对由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或者基本上光学不透明的。在一些情况下,系统进一步包括激发光致发光碳纳米管的光源和/或检测光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器。还将理解,上面对于燃料泄漏检测描述的各个部件对于除了燃料之外的流体的泄漏或释放的检测可以以类似的方式使用。

[0057] 条款1. 用于检测燃料泄漏的系统,其包括:

[0058] 具有易受燃料影响的外表面的物品;布置在物品的易受燃料影响的外表面的至少一部分上的包括光致发光碳纳米管的碳纳米管涂层;和基本上覆盖碳纳米管涂层的燃料敏

感涂层,其中燃料敏感涂层对由光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或基本上光学不透明的。

[0059] 条款2.条款1的系统,其进一步包括:

[0060] 激发光致发光碳纳米管的光源;和检测光致发光碳纳米管的光致发光发射的检测器。

[0061] 条款3.前述条款中任一项的系统,其中易受燃料影响的外表面是电子器件的表面、涂漆面和/或包括被燃料降解或腐蚀的材料的表面或由被燃料降解或腐蚀的材料形成的表面。

[0062] 条款4.前述条款中任一项的系统,其中燃料包括喷气燃料。

[0063] 条款5.前述条款中任一项的系统,其中碳纳米管涂层基本上由碳纳米管组成。

[0064] 条款6.前述条款中任一项的系统,其中碳纳米管涂层包括布置在基体材料中的碳纳米管。

[0065] 条款7.前述条款中任一项的系统,其中碳纳米管涂层包括100个碳纳米管/cm²到1×10⁸个碳纳米管/cm²。

[0066] 条款8.前述条款中任一项的系统,其中碳纳米管涂层具有至多200nm的平均厚度。

[0067] 条款9.前述条款中任一项的系统,其中燃料敏感涂层包括聚氨酯。

[0068] 条款10.前述条款中任一项的系统,其中燃料敏感涂层具有在1和1000μm之间的平均厚度。

[0069] 条款11.前述条款中任一项的系统,其中燃料是喷气燃料,并且其中燃料敏感涂层包括聚氨酯和炭黑。

[0070] 条款12.条款2的系统,其中光源发射具有700到1100nm的平均波长的光。

[0071] 条款13.用于检测燃料泄漏的方法,其包括:

[0072] 将包括光致发光碳纳米管的碳纳米管涂层布置在物品的易受燃料影响的外表面上;和

[0073] 将燃料敏感涂层布置在碳纳米管涂层之上,

[0074] 其中燃料敏感涂层对由碳纳米管涂层的光致发光碳纳米管吸收和/或发射的波长的光是光学不透明的或基本上不透明的。

[0075] 条款14.条款13的方法,其进一步包括:

[0076] 将易受燃料影响的外表面暴露于用于激发光致发光碳纳米管的光源;和

[0077] 检测光致发光碳纳米管的光致发光发射。

[0078] 条款15.条款13或14的方法,其中易受燃料影响的外表面是电子器件的表面、涂漆面和/或包括被燃料降解或腐蚀的材料的表面或由被燃料降解或腐蚀的材料形成的表面。

[0079] 条款16.条款13-15中任一项的方法,其中碳纳米管涂层基本上由碳纳米管组成。

[0080] 条款17.条款13-16中任一项的方法,其中碳纳米管涂层包括100个碳纳米管/cm²到1×10⁸个碳纳米管/cm²。

[0081] 条款18.条款13-17中任一项的方法,其中:

[0082] 碳纳米管涂层具有至多50nm的平均厚度,并且

[0083] 燃料敏感涂层具有在10和1000μm之间的平均厚度。

[0084] 条款19.条款13-18中任一项的方法,其中燃料是喷气燃料,并且其中燃料敏感涂

层包括聚氨酯和炭黑。

[0085] 条款20.条款14的方法,其中光源发射具有700到1100nm的平均波长的光。

[0086] 本公开内容的各个实施已经在实现本公开内容的各个目标中描述。应当认识到,这些实施仅仅是对本公开内容的原理的说明。其众多修改和改编对于本领域技术人员而言将是容易地显而易见的,而不背离被公开内容的精神和范围。

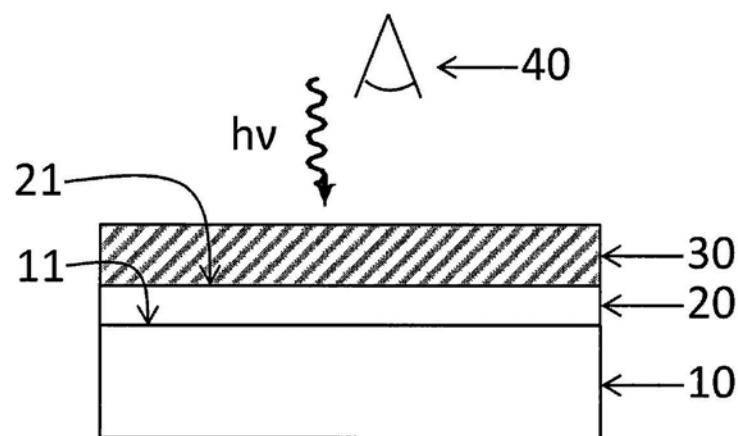


图1

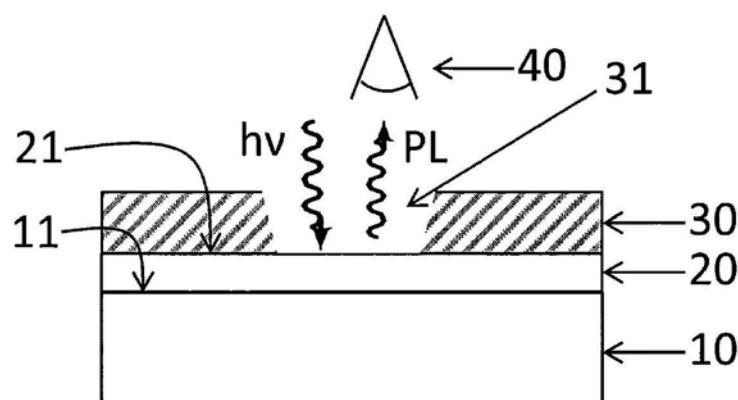


图2

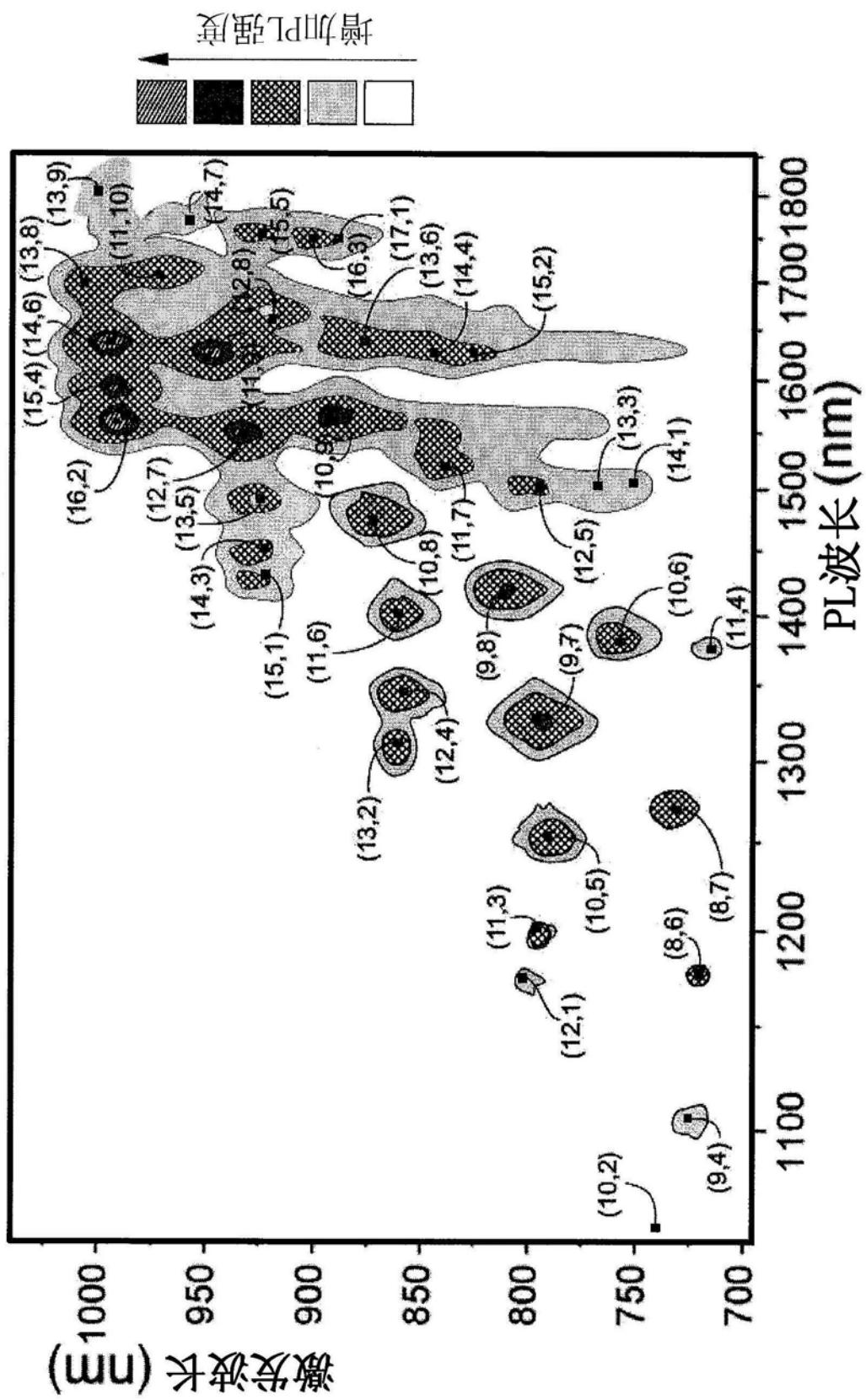


图3