



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104956496 B

(45)授权公告日 2016.09.21

(21)申请号 201380068374.0

(22)申请日 2013.06.27

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 104956496 A

(43)申请公布日 2015.09.30

(30)优先权数据

10-2013-0003539 2013.01.11 KR

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2015.06.26

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/KR2013/005702 2013.06.27

(87)PCT国际申请的公布数据

W02014/109444 KO 2014.07.17

(73)专利权人 庆熙大学校产学协力团

地址 韩国京畿道

(72)发明人 崔石镐 金成 金昌伍

(74)专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事务
所(普通合伙) 11201

代理人 宋融冰

(51)Int.Cl.

H01L 31/10(2006.01)

(56)对比文件

US 2011/0042650 A1,2011.02.24,

CN 102473844 A,2012.05.23,

US 2012/0190139 A1,2012.07.26,

US 2012/0193610 A1,2012.08.02,

审查员 卢青

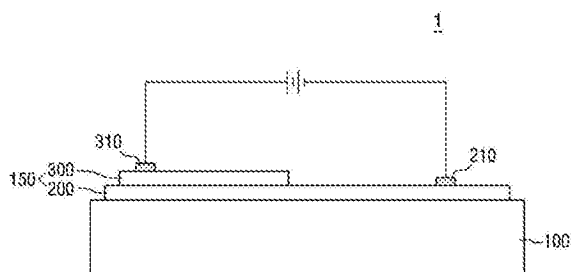
权利要求书1页 说明书9页 附图14页

(54)发明名称

光检测元件

(57)摘要

由于根据掺杂量来评价制造的石墨烯p-n垂直接合的光检测特性,因此提供包含石墨烯p-n均质接合二极管的光检测元件。所述光检测元件包括:基板;光检测层,其作为形成在所述基板上的光检测层,包括p-n垂直均质接合的石墨烯,具有在350nm至1100nm范围内超过10E11(Jones)的检测能;和形成在所述光检测层上的第一电极和第二电极。



1. 一种光检测元件,包括:

基板;

光检测层,其作为形成在所述基板上的光检测层,包括呈现整流特性的p-n垂直均质接合的石墨烯,具有在350nm至1100nm范围内超过 $10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 的检测能;和

形成在所述光检测层上的第一电极和第二电极,

所述光检测层包括依次叠层的第一石墨烯和第二石墨烯,所述第一石墨烯是n型石墨烯,第二石墨烯是p型石墨烯。

2. 如权利要求1所述的光检测元件,其中,所述第一石墨烯和所述第二石墨烯分别是单层的石墨烯。

3. 如权利要求1所述的光检测元件,其中,所述第一石墨烯和所述第二石墨烯接触形成。

4. 如权利要求3所述的光检测元件,其中,所述第一石墨烯,包括形成在所述第一石墨烯和所述第二石墨烯的边界面处的高电阻层。

5. 如权利要求1所述的光检测元件,其中,所述光检测层,进一步包括形成在所述第一石墨烯和第二石墨烯之间的插入层。

6. 如权利要求5所述的光检测元件,其中,所述插入层包括半导体层和绝缘层中的一个。

7. 如权利要求1所述的光检测元件,其中,被施加至所述第一电极和所述第二电极上的电压在2V至5V之间,所述光检测层具有在350nm至1100nm范围内超过 $10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 的检测能。

光检测元件

技术领域

[0001] 本发明涉及一种光检测元件,更具体地,涉及一种使用将p型石墨烯和n型石墨烯垂直均质接合的光检测层的光检测元件。

背景技术

[0002] 近来,检测出光来将其转换为电信号的光检测元件的研究,被不断地报道。已经商业化的Si、Ge和InGaAs光检测元件分别被广泛应用于紫外线、可见光线、红外线区域的光检测。但是,由于Si和Ge可以在室温下运作,但光检测范围有限,而InGaAs只有冷却至4.2K才可以发挥高灵敏度的性能。此外,最近最大限度地提高便携性且透明、可弯曲的元件,一直希望作为下一代光电元件。为了实现这一点,需要使用透明、可弯曲的基板来进行元件工艺,但是这种基板不耐热,要想使用在高温下生长的Si、Ge、InGaAs等材料来制作可弯曲的元件,存在很多困难。即使可以制作,其制作工艺也很复杂,并且随之发生的很多费用也无可避免,要想将其商业化存在很多制约。由此,需要探索出工艺简单、费用较少、不仅可应用于弯曲或透明的基板上、而且还可以检测到较宽区域的光、可发挥高灵敏度、高效率的光检测元件制作中适合的材料和结构。

[0003] 2010年获得诺贝尔物理学奖的石墨烯,作为碳原子形成六角形的蜂窝形状且具有1个原子的厚度的结构,由于其高载流子迁移率、高透明度增加、即便弯曲也不改变的电特性等新特征,到目前为止已被许多研究报道,且被称作是梦想的纳米材料。特别是,由于石墨烯是没有带隙的结构,可以吸收从紫外线到红外线的较宽区域的光来产生电子-空穴对(electron-hole pair),是有希望成为下一代光电子元件的材料,到目前为止已有基于石墨烯的光检测元件的研究报道。

[0004] 但是,到目前为止报道的石墨烯光检测元件结构,以栅极电压来调节电荷种类及浓度,以在栅极附近形成的石墨烯p-n水平结构,或以与PbS或CdSe之类的高效率的光检测能力被证明的材料的复合结构,或以石墨烯-金属接合等制作发明。但是,光检测能力降低或结构上实质上的元件应用中有很多困难。因此,在使用石墨烯的优异性能的同时,开发可以以低费用容易实现的高性能元件,是首要重要的。

发明内容

[0005] 技术问题

[0006] 石墨烯的p-n接合结构,不存在由于克莱恩隧道(Klein tunneling)效果造成的典型的二极管整流特性,由于因其发生高的暗电流(dark current),因此在高效率的光检测元件领域的应用中是很困难的。因此,为进行高效率的石墨烯光检测元件开发,应降低暗电流,并增加光电流。另外,石墨烯或n型石墨烯还必须同时克服一个问题,就是当暴露于大气中时其电特性会变成p型。

[0007] 本发明要解决的课题是,根据掺杂量制造的石墨烯,评价p-n垂直接合的光检测特性,由此来提供包含石墨烯p-n垂直均质接合二极管的光检测元件。

[0008] 通过本发明要解决的课题,不限于上述课题,未提及的其他课题,本领域技术人员可以从下面的说明中清楚地理解。

[0009] 解决问题的方案

[0010] 用于解决上述课题的本发明的光检测元件的一个方面,包括:基板;光检测层,其作为形成在所述基板上的光检测层,包括p-n垂直均质接合的石墨烯,具有在350nm至1100nm范围内超过 $10E11$ (Jones)的检测能;和形成在所述光检测层上的第一电极和第二电极。

[0011] 在本发明的几个实施例中,所述光检测层包括依次叠层的第一石墨烯和第二石墨烯,所述第一石墨烯是n型石墨烯,第二石墨烯是p型石墨烯。

[0012] 在本发明的几个实施例中,所述第一石墨烯和所述第二石墨烯分别是单层的石墨烯。

[0013] 在本发明的几个实施例中,所述第一石墨烯和所述第二石墨烯接触形成。

[0014] 在本发明的几个实施例中,所述第一石墨烯,包括形成在所述第一石墨烯和所述第二石墨烯的边界面处的高电阻层。

[0015] 在本发明的几个实施例中,所述光检测层,进一步包括形成在所述第一石墨烯和第二石墨烯之间的插入层。

[0016] 在本发明的几个实施例中,所述插入层包括半导体层和绝缘层中的一个。

[0017] 在本发明的几个实施例中,被施加至所述第一电极和所述第二电极上的电压在2(V)至5(V)之间,所述光检测层具有在350nm至1100nm范围内超过 $10E11$ (Jones)的检测能。

[0018] 本发明的更具体的细节包括在以下的详细说明及附图中。

[0019] 有益效果

[0020] 可使用掺杂的石墨烯来制作包含石墨烯p-n垂直接合的光检测元件。此外,评价根据包含制作的石墨烯p-n接合的光检测元件的掺杂量的结构、光学、电特性,由此可提供将石墨烯应用至光检测元件的基础。此外,在石墨烯的p-n垂直接合之间可插入不同的半导体层或绝缘层,由此可期待高效率的光检测元件的制作可能性。

附图说明

[0021] 图1是根据本发明的一个实施例的光检测元件的剖面图。

[0022] 图2是根据本发明的另一实施例的光检测元件的剖面图。

[0023] 图3是示出根据本发明的一个实施例的光检测元件的I-V特性的对数方式曲线图。

[0024] 图4和图5是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的光照射的I-V曲线的曲线图。

[0025] 图6和图7是根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的波长的检测能(detectivity)的曲线图。

[0026] 图8和图9是示出根据本发明的一个实施例的根据入射光检测元件的光的强度造成的光电流的变化的曲线图。

[0027] 图10和图11是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的波长的响应性的曲线图。

[0028] 图12和图13是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的波长的量子效

率的曲线图。

[0029] 图14至图17是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的响应速度的曲线图。

[0030] 图18是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的时间的响应性的稳定性的曲线图。

具体实施方式

[0031] 本发明的优点和特征及实现其的方法,参照附图和下面详述的实施例可以清楚理解。但是本发明并不限于以下所示的实施例,而是可以被实现为与其不同的各种形态,这些实施例只是为了使得本发明的公开完整,为向本发明所属技术领域中具有常识的普通技术人员告知发明的完整范围而提供,本发明仅由权利要求项的范围定义。整个说明书中的相同的参考标号表示相同的结构要素。

[0032] 虽然为说明各种元件或构成要素和/或部分而使用了第一、第二等,但是这些元件或构成元素和/或部分当然并不受这些术语的限制。这些术语只不过用来将一个元件、构成要素或部分与另一个元件、构成要素或部分区分开来。由此,下面所提及的第一元件、第一构成要素或第一部分,在本发明的技术思想内当然也可以是第二元件、第二构成要素或第二部分。

[0033] 元件(elements)或层不同的元件或层的“之上”或“上”,既包括指示的东西直接在其他元件或层之上的情况,也包括中间存在其他层或其他元件夹在其中的情况。相反,元件“直接位于……之上(directly on)”或“正在……之上”指的是中间不存在其他元件或层夹在其中的情况。

[0034] 空间上表示相对的术语“之下(below)”、“下面(beneath)”、“下部(lower)”、“之上(above)”、“上部(upper)”等,如图所示,是为了容易地描述一个元件或构件与其他元件或构件之间的相关关系而使用的。空间上表示相对的术语,应被理解为,以图中所示的方向使用或操作时包括元件的相互不同方向的术语。例如,如果将图中所示的元件反过来,那么被描述为其他元件的“之下(below)”或“下面(beneath)”的元件将被放置在其他元件的“之上(above)”。因此,示例性的术语“下方”可包括上和下两个方向。元件可以以其他方向排向,这种情况下空间上表示相对的术语可因放置方向而不同地解释。

[0035] 本说明书中使用的术语是用来说明实施例的,不是用来限制本发明的。在本说明书中,除非特别说明,单数形式的名词也包含复数形式。说明书中使用的“包含(comprises)”和/或“包括(comprising)”,除了提及的构成要素、步骤、操作和/或元件之外,不排除存在或添加一个以上其他构成要素、步骤、操作和/或元件的情况。

[0036] 除非有其他定义,本说明书中使用的所有术语(包括技术和科学术语),可用为在本发明所属技术领域中具有通常知识的技术人员共同理解的意思。此外,在常用词典中定义的术语,除非有明确的特别定义,不应被异常地或过度地解释。

[0037] 在下文中,将参考图1,对根据本发明的一个实施例的光检测元件进行说明。

[0038] 图1是根据本发明的一个实施例的光检测元件的剖面图。

[0039] 参照图1,光检测元件1包括基板100、光检测层150、第一电极210和第二电极310。

[0040] 基板100,例如,可以是硅基板、SOI(Silicon On Insulator)基板、砷化镓基板、硅

锗基板、陶瓷基板、石英基板或用于显示的玻璃基板等刚性基板,或聚酰亚胺(polyimide)、聚对苯二甲酸乙酯(PET:PolyEthylene Terephthalate)、聚萘二甲酸(PEN:PolyEthylene Naphthalate)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA:Poly Methyl MethAcrylate)、聚碳酸酯(PC:PolyCarbonate)、聚醚砜(PES)、聚酯纤维(Polyester)等柔性塑料基材)。另外,基板,例如,可以是能够透射光的透明基板。

[0041] 光检测层150形成在基板100上。光检测层150可包括第一石墨烯200和第二石墨烯300。具体地,光检测层150的宽度,可基本上等于将第一石墨烯200和第二石墨烯300重叠的区域,即,与第二石墨烯300的区域的宽度实际上相同。光检测层150中包含的第一石墨烯200和第二石墨烯300,可以是垂直均质接合的p-n二极管。光检测层150,例如,350nm至1100nm的范围内,可具有 $10E11\text{ Jones}(\text{cmHz}^{1/2}/\text{W})$ 以上的检测能。对光检测层150的检测能(Detectivity)将参照实验结果具体说明。

[0042] 光检测层150包括在基板100上依次叠层的第一石墨烯200和第二石墨烯300。第一石墨烯200和第二石墨烯300可以各自具有第一导电类型和第二导电类型,第一导电类型和第二导电类型是不同的导电类型。在根据本发明的实施例的光检测元件的说明中,第一石墨烯200是n型石墨烯,第二石墨烯300是p型石墨烯,但并不限于此。即,第一石墨烯200也可以是p型石墨烯,第二石墨烯300可以是n型石墨烯。

[0043] 根据本发明的实施例的光检测元件中,将第一石墨烯200说明为n型的理由如下。没有掺杂杂质的纯净(pristine)石墨烯或n型石墨烯在空气中可具有p型的特征。这是因为石墨烯与空气中的氧气反应,因此具有p型的特征。因此,如果第二石墨烯300的导电型是n型,由于其暴露于空气中,随着时间的推移,其有可能会改变为p型。由于这种现象,p型的第一石墨烯200和边界附近处的第二石墨烯300的n型浓度有可能变化。如果p-n二极管的接合部分上的浓度发生变化,就无法得到可信任的p-n垂直接合二极管的结果。由此原因,在本发明的实施例的说明中,将第一石墨烯200的导电类型描述为n型。

[0044] 第一石墨烯200和第二石墨烯300,例如,可以是单层构成的二维板状,但不限于此。

[0045] 垂直接合于光检测层150的第一石墨烯200和第二石墨烯300可以形成地互相直接接触,但是不限于此。即,在第一石墨烯200和第二石墨烯300之间可以形成插入层,对此将参照图2来进行说明。

[0046] 第一石墨烯200,可包括位于与第二石墨烯300接触的的边界面250处的高电阻层或绝缘层。第一石墨烯200中包含的高电阻层,不是在第一石墨烯200和第二石墨烯300之间插入形成其他材料,而是可以是作为调整第一石墨烯200的掺杂浓度的结果而出现的层。关于第一石墨烯200中包含的高电阻层的内容,将在实验结果的基础上进行说明。

[0047] 第一电极210和第二电极310分别形成在光检测层150上。即,第一电极210和第二电极310被分别形成在p-n垂直均质接合的第一石墨烯200和第二石墨烯300上。在根据本发明的实施例的光检测元件中,第一电极210形成在n型的第一石墨烯200上,第二电极310形成在p型的第二石墨烯300上。第一电极210和第二电极310可包括与石墨烯欧姆接触(Ohmic contact)形成的材料,例如,可包括银(Ag)。第一电极210和第二电极310可以是单层,但是不限于此,也可以各自进一步包括用于减小与石墨烯的接触电阻的插入层(未示出)。

[0048] 在图1中,示出为第一电极210和第二电极310形成在光检测层150的同一面上并且

以横向型(lateral type)排置,但是不限于此。即,第一电极210和第二电极310也可以形成在与光检测层150对应的面上并且以垂直型(vertical type)排置。即,第一电极210排置在基板100和第一石墨烯200之间,第二电极310可以排置在第二石墨烯300上。

[0049] 参照图2,将对根据本发明另一实施例的光检测元件进行说明。由于该实施例和前述实施例基本上相同,只是它进一步在光检测层包括插入层,因此,对于与前述实施例重复的部分,将记载为相同的附图标记,将简化或省略其说明。

[0050] 图2是根据本发明的另一实施例的光检测元件的剖面图。

[0051] 参照图2,光检测元件2包括基板100、光检测层150、第一电极210和第二电极310。光检测层150包括第一石墨烯200和第二石墨烯300,并且在第一石墨烯200和第二石墨烯300之间还包括夹在其中的插入层350。

[0052] 第一石墨烯200和第二石墨烯300,例如,可以是单层构成的二维板状形式。与根据本发明的一个实施例的光检测元件不同,第一石墨烯200和第二石墨烯300之间形成插入层350。插入层350可分别形成地与第一石墨烯200及第二石墨烯300接触。插入层350,例如,可包括半导体层和绝缘层中的一个。用作插入层350的绝缘层,例如,可包括BN、MoS₂、SiO₂、Al₂O₃、HfO₂、ZrO₂和WS₂中的一个,但不限于此。

[0053] 在根据本发明的一个实施例的光检测元件中,第一石墨烯200和第二石墨烯300直接接触,被描述为形成p-n垂直接合二极管。即,在图1中,第一石墨烯200被描述为在与第二石墨烯300接触的边界面250上包括高电阻层或绝缘层。

[0054] 但是,根据本发明的另一实施例的光检测元件2,光检测层150,为形成p-n垂直接合二极管,第一石墨烯200可以在与第二石墨烯300接触的边界面250上不包括高电阻层或绝缘层。即,在根据本发明的一个实施例的光检测元件中,作为第一石墨烯200中包含的高电阻层或绝缘层的替代,可以有插入层350夹在其中。由此,可依次叠层第一石墨烯200、插入层350和第二石墨烯300,来形成p-n垂直接合二极管。

[0055] 在下文中,将参考图1,对制造根据本发明实施例的光检测元件的方法进行说明。

[0056] 制造未掺杂杂质的第一纯净石墨烯并将其排置在基板100上,从而在基板100上形成第一纯净石墨烯。在基板100上形成的第一纯净石墨烯,例如,可以是单层的石墨烯。可在第一纯净石墨烯上掉落第一掺杂溶液。掉落的第一掺杂溶液,可以被吸附在第一纯净石墨烯上。由于第一石墨烯200的导电类型是n型,第一掺杂溶液可以包括第一杂质,例如,第一杂质可以是苯紫精(Benzyl Viologen, BV)。第一纯净石墨烯,可以以被涂敷有第一掺杂溶液的状态持续一定的时间。在涂敷有第一掺杂溶液的时间段内,第一掺杂溶液中的一部分,可以吸附在第一纯净石墨烯上。如果增加第一掺杂溶液被涂敷的时间,那么第一纯净石墨烯上吸附的第一掺杂溶液的量也可增加,通过此吸附的第一杂质的量也可增加。

[0057] 经过一定的时间以后,吸附在第一纯净石墨烯上的第一掺杂溶液被均匀地涂敷在第一纯净石墨烯上。在第一纯净上均匀地涂敷有第一掺杂溶液的同时,可以去除没有被吸附在第一纯净上的第一掺杂溶液。在第一纯净上均匀地涂敷第一掺杂溶液,例如,可使用旋涂器(spin coater)。使用旋涂器的情况,不仅可以在第一纯净石墨烯上均匀地散开地涂敷第一掺杂溶液,而且还可以去除没有吸附的第一掺杂溶液。旋涂器,例如,可以以1000至3000rpm的速度旋转。旋涂器,例如可以将第一纯净石墨烯旋转30秒至2分钟来涂敷第一掺杂溶液。

[0058] 然后,热处理涂敷了第一掺杂溶液的第一纯净石墨烯。第一纯净石墨烯的热处理,例如,可使用急速热处理方式(Rapid Thermal Annealing,RTA)。热处理的温度,例如,可以是100摄氏度至300度,热处理的时间,例如,可以是10分钟到30分钟。通过这样的热处理,基板100上可形成n型的第一石墨烯200。

[0059] 第一石墨烯200上,可形成有与第一石墨烯200接触的p型的第二石墨烯300。可因为第二石墨烯300,暴露第一石墨烯200的一部分。

[0060] 第一导电类型的第一石墨烯200上,排置第二纯净石墨烯。第二纯净石墨烯,例如,可以是单层的石墨烯。第二纯净石墨烯上,可吸附有包含第二杂质的第二掺杂溶液。由于第二石墨烯300的导电类型是p型,第二杂质可以是,例如,氯化金(AuCl_3)。可以将吸附有第二掺杂溶液的第二纯净石墨烯维持一定的时间,并调整第二纯净石墨烯上吸附的第二掺杂溶液的量。在经过一定时间以后,例如,可使用旋涂器将吸附的第二掺杂溶液均匀地涂敷在第二纯净石墨烯上。然后,对涂敷有第二掺杂溶液的第二纯净石墨烯进行热处理。于此,通过此,n型的第一石墨烯200上,形成p型的第二石墨烯300形成的光检测层150。旋涂器及热处理方法,与形成第一石墨烯200的方法基本相同,因此省略。

[0061] 然后,在暴露的第一石墨烯200和第二石墨烯300上,即,在光检测层150上,形成第一电极210和第二电极310。

[0062] 对于根据本发明的另一实施例的光检测元件的制造方法,只需要进一步包括在形成n型的第一石墨烯200和形成p型的第二石墨烯300之间形成插入层350的过程。

[0063] 在下文中,将参照图3至图18,对根据本发明的一个实施例的光检测元件的实验结果进行说明。

[0064] 图3是示出根据本发明的一个实施例的光检测元件的I-V特性的对数方式曲线图。图4和图5是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的光照射的I-V曲线的曲线图。图6和图7是根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的波长的检测能(detectivity)的曲线图。图8和图9是示出根据本发明的一个实施例的根据入射光检测元件的光的强度造成的光电流的变化的曲线图。图10和图11是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的波长的响应性的曲线图。图12和图13是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的波长的量子效率的曲线图。图14至图17是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的响应速度的曲线图。图18是示出根据本发明的一个实施例的根据光检测元件的时间的稳定性的曲线图。

[0065] 参照图3,将对本发明的光检测元件的电特性的实验结果进行说明。图3示出,光检测层中p型的第二石墨烯的掺杂时间固定为5分钟,根据n型的第一石墨烯的掺杂时间的变化的光检测元件的I-V特性。在根据本发明的实施例的光检测元件中,n型的第一石墨烯的掺杂浓度通过掺杂时间被改变。

[0066] 对于本发明的光检测元件的实验例整理在表1中。

[0067] [表1]

[0068]

	D0	D1	D2	D3	D4	D5
p型第2石墨烯	纯净	5min	5min	5min	5min	5min
n型第1石墨烯	纯净	0.5min	1min	2min	3min	4min

[0069] 没有掺杂或掺杂时间短从而预计电子的浓度较小的D0至D3的情况,在向光检测元件上照射光之前的电流-电压曲线中不显示整流特性。这可以通过在将图3的放大图中电流-电压曲线为线形来进行确认。即,在n型第一石墨烯的电子浓度较小的D0~D3的情况中,p型第二石墨烯和n型第一石墨烯呈现欧姆特性。n型第一石墨烯的电子浓度较小的情况,由于克莱因隧道(Klein-tunneling)效果,在垂直接合的p型第二石墨烯和n型第一石墨烯之间不会出现整流特性。这使得光检测元件的暗电流非常大。

[0070] 但是,在实验例D4和D5的情况下,在与D0~D3的情况相比,暗电流显著整体减小。此外,实验例D4和D5的情况,电流-电压特性曲线图,可以看到其为非线性。即,n型第一石墨烯的电子浓度大的D4和D5,呈现出整流特性。由此可确认,n型第一石墨烯的电子浓度大的D4和D5,垂直接合的n型第一石墨烯和p型第二石墨烯之间的接合成为了二极管。因为实验例D4和D5的光检测元件,在成为石墨烯p-n垂直接合二极管的同时暗电流大幅度降低,所以可被应用为高性能的光检测元件。

[0071] 即,p型第二石墨烯的掺杂时间为一定,而n型第一石墨烯的掺杂时间增加,由此在包含垂直接合的n型第一石墨烯和p型第二石墨烯的光检测元件中确认到了二极管特性。通过这样,可以推断出在掺杂时间增加的实验例D4和D5的n型第一石墨烯表面上形成了高电阻层或绝缘层。即,n型第一石墨烯,可通过实验结果确认,其包含在第一石墨烯和第二石墨烯的边界面上形成的高电阻层。

[0072] 在下面说明的图4至图17,是对呈现图3的I-V特性曲线中二极管特性的D4和D5的实验结果的说明。

[0073] 图4是示出根据实验例D4的施加电压的电流的变化的曲线图,图5是示出根据实验例D5的施加电压的电流的变化的曲线图。

[0074] 为测量根据光检测元件的波长的电流-电压特性,使用了氙气灯作为光源。将从氙气灯中发生的光照射至单色分光器中,将提取出的单色光照射至图3的实验例D4和D5。

[0075] 参照图4和图5,将单色光照射至光检测元件上时,确认到,对反向电压基本没有电流变化,但对正向电压可以确认到突然增加的电流。

[0076] 在图4和图5中,电流是暗电流和光电流(photo current)的总和,可以知道,对反向电压,即使照射单色光也不产生光电流,但是对正向电压,可以随着单色光的调查产生光电流。

[0077] 另外,在图4中,即使以正向将5V以上的施加电压施加到光检测元件上,也只显示出0.01 μ A程度的低的漏电流。

[0078] 比较图3至图5,可以确认到实验例D5的暗电流比实验例D4的暗电流高。

[0079] 图6是示出根据实验例D4的波长的检测能的曲线图,图7是示出根据实验例D5的波长的检测能的曲线图。

[0080] 参照图6,实验例D4,在从紫外线到近红外线区域施加电压,即在光检测机的驱动电压为2V以上5V以下时,呈现出了超出 10^{12} Jones的检测能。特别是,施加电压为2V时观察到了最好的检测能。

[0081] 此类检测能,与商业化的Si光检测机和InGaAs光检测机的检测能类似,或者超过其的结果。

[0082] 参照图7,实验例D5比实验例D4相对小,但是在从紫外线到近红外线区域施加电压

为2V以上5V以下时,呈现出了超出 10^{11} Jones的检测能。

[0083] 实验例D5的检测能比实验例D4的检测能低,如图4和图5所示,看起来其原因在于实验例D5的暗电流比实验例D4的暗电流高。

[0084] 本发明的光检测元件的检测能的优异能力将在下面进行说明。即,商业化的Si光检测机或InGaAs光检测机的情况,检测光的波长范围是特定的。但是,本发明的光检测元件的情况,在350nm至1100nm的范围内呈现出了超出 10^{11} Jones的检测能。此外,本发明的光检测元件的情况,不使用额外的冷却装置等,在室温下呈现出了超出 10^{11} Jones的检测能。

[0085] 图8是示出根据入射实验例D4的光的强度的光电流的变化的曲线图,图9是示出根据入射实验例D5的光的强度的光电流的变化的曲线图。

[0086] 通过图8和图9,可以计算光检测元件的性能指标中的一个,即线性操作范围(linear dynamic range, LDR)。为此,改变532nm的激光强度,可以测定光电流的变化。

[0087] 参照图8和图9,可以确认到,随着施加电压在2V至5V之间,以及照射光检测元件的光检测层的光的强度在 $10^{-8}(\text{W}/\text{cm}^2)$ 至 $10^{-4}(\text{W}/\text{cm}^2)$ 之间的增加,光检测元件的光电流从 $10^{-8}(\text{A}/\text{cm}^2)$ 增加至 $10^{-4}(\text{A}/\text{cm}^2)$ 。

[0088] 即,在照射的光的强度从 $10^{-8}(\text{W}/\text{cm}^2)$ 变化至 $10^{-4}(\text{W}/\text{cm}^2)$ 的范围内,可确认到光电流的变化具有斜率1变化。照射的光的强度和光电流的变化越接近值1,光检测元件越接近理想的光检测元件。

[0089] 图10是示出根据实验例D4的波长的响应性(responsibility)的曲线图,图11是示出根据实验例D5的波长的响应性的曲线图。另外,在图10和图11的曲线图中示出的数字表示施加到光检测元件上的电压。

[0090] 参照图10,随着施加电压从1V增加到2V,响应性迅速增加。随着光的波长从400nm增加至600nm,光响应性从约0.3A/W迅速增加至约0.6A/W,然后缓缓增加,在900nm呈现出了最大值约0.7A/W。

[0091] 即,在通过图6说明的检测能等之类的响应性中,可以知道,实验例D4在350nm至1100nm的区域,即,在从紫外线到近红外光的较宽的区域中可具有光检测能力。

[0092] 参照图11,随着施加电压从1V增加到2V,响应性并不迅速增加。如在图3中所说明的,看上去这是因为实验例D5比实验例D4暗电流相对较大的原因。

[0093] 随着光的波长从300nm至800nm的增加,可以确定响应性的增加。特别是,光的波长,在300nm至400nm呈现最大0.4A/W,在700nm至1000nm,呈现最大1.0A/W。可以确认到,实验例D5,比实验例D4的情况呈现更高的响应性。即,即,D5的情况,可以应用至比D4的情况需要更高响应性的光检测元件中。

[0094] 此外,可以知道,即使在通过图7说明的检测能等响应性中,实验例D5也在350nm至1100nm的区域内,即从紫外线到近红外线的较宽区域中具有光检测能力。

[0095] 图12是示出根据实验例D4的波长的量子效率(quantum efficiency)的曲线图,图13是示出根据实验例D5的波长的量子效率的曲线图。

[0096] 参考图12和图13,随着施加电压增加,实验例D4和D5光检测元件量子效率增加。在施加电压为4V以上时,两个光检测元件的量子效率都超过100%。其原因是,一个光子入射光检测元件的光检测层,呈现产生多个电子和空穴的载波放大现象(carrier multiplication,因电子和空穴的多重电离过程造成的)。

[0097] 图14至图17是示出将周期性的光施加至光检测元件上时,光电流的响应速度。图14和图15是使用具有20ps、20Hz的532nm脉冲激光作为光源测定的。图16是示出光检测元件对施加的光产生响应使光电流增加的时间的曲线图,图17是示出发生的光电流消失的衰减时间的曲线图。

[0098] 脉冲激光的一个脉冲照射时,观察光电流的变化,可以进行光检测元件的电荷传输动力学。对光的响应时间,可以分为上升时间(rising time)和衰减时间(decay time)。

[0099] 参照图14和图15,相当于实验例D4和D5的光检测元件,与电压变化无关,在反复的脉冲光源的照射下也可以安全运作。即,每次施加脉冲,都会产生光电流,且该光电流的大小基本恒定。

[0100] 参考图16和图17,衰减时间(τ_{decay})比上升时间(τ_{rising})相对较短。即,光检测元件的光响应时间,由光检测元件的衰减时间来决定。总体而言,实验例D4的光检测元件的响应速度,比对应于实验例D5的光检测元件的响应时间快。

[0101] 对应于实验例D4的光检测元件的上升时间,随着从1.5V到5V的增加,逐渐从62ns增加至139ns。光检测元件的衰减时间,随着施加电压的增加,从0.9 μ s增加至21 μ s。即,光检测元件的光响应时间,由光检测元件的衰减时间来决定,光检测元件在几十微秒内运作。

[0102] 对应于实验例D5的光检测元件的上升时间,随着从1.5V到5V的增加,逐渐从41ns增加至110ns。光检测元件的衰减时间,随着施加电压的增加,从2 μ s增加至5221 μ s。

[0103] 图18,根据实验例D4的时间测量响应性,由此示出了光检测元件的稳定性。图18是示出照射光检测元件的光的波长是600nm的情况下的曲线图。

[0104] 参照图18,实验例D4的光检测元件,在待机时暴露6个月,但是光检测元件的响应性没有变化。即,将p-n垂直接合的石墨烯用作光检测层的光检测元件,在待机过程中显示出非常稳定的特性。

[0105] 以上虽参照附图对本发明的实施例进行了描述,但是本发明所属技术领域中具有常识的技术人员可以理解,在不改变本发明的技术思想或必须特征的前提下可将其实施为其他具体形态。因此,应该理解,上述实施例在所有方面都是示例性的和非限制性的。

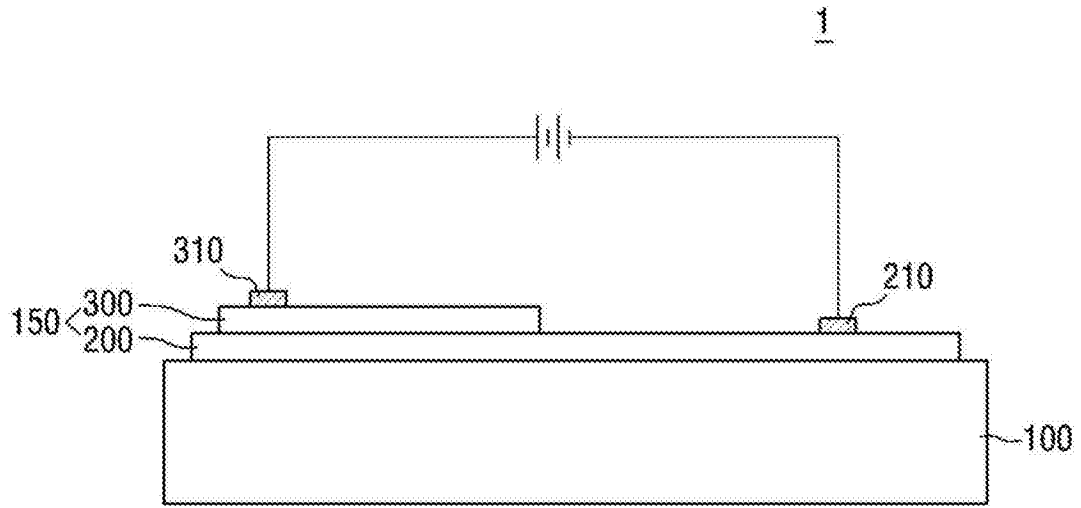


图1

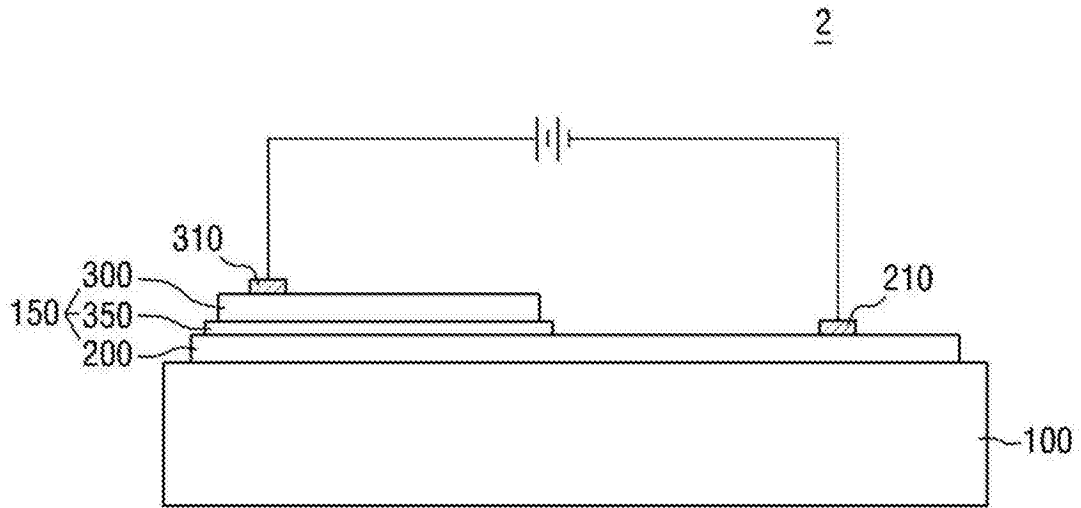


图2

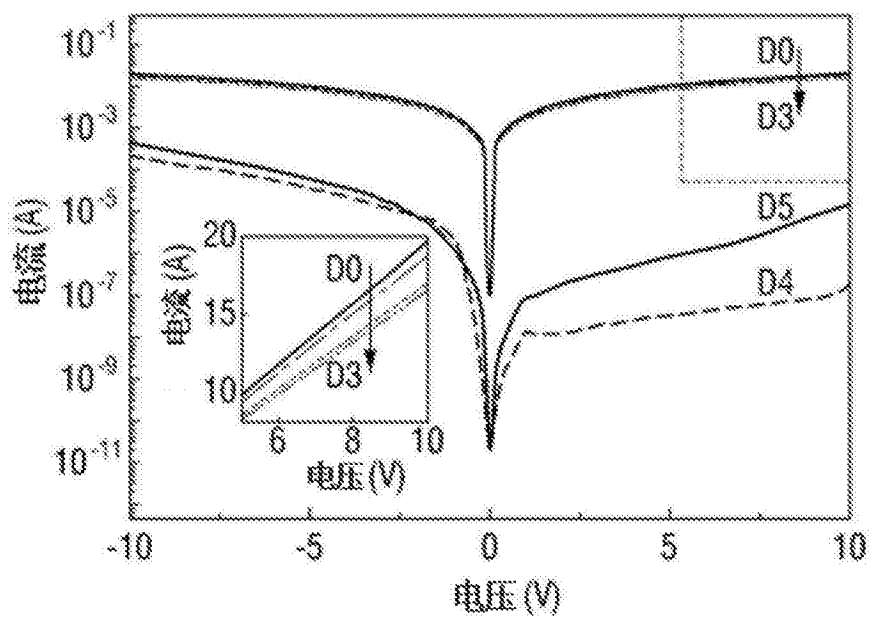


图3

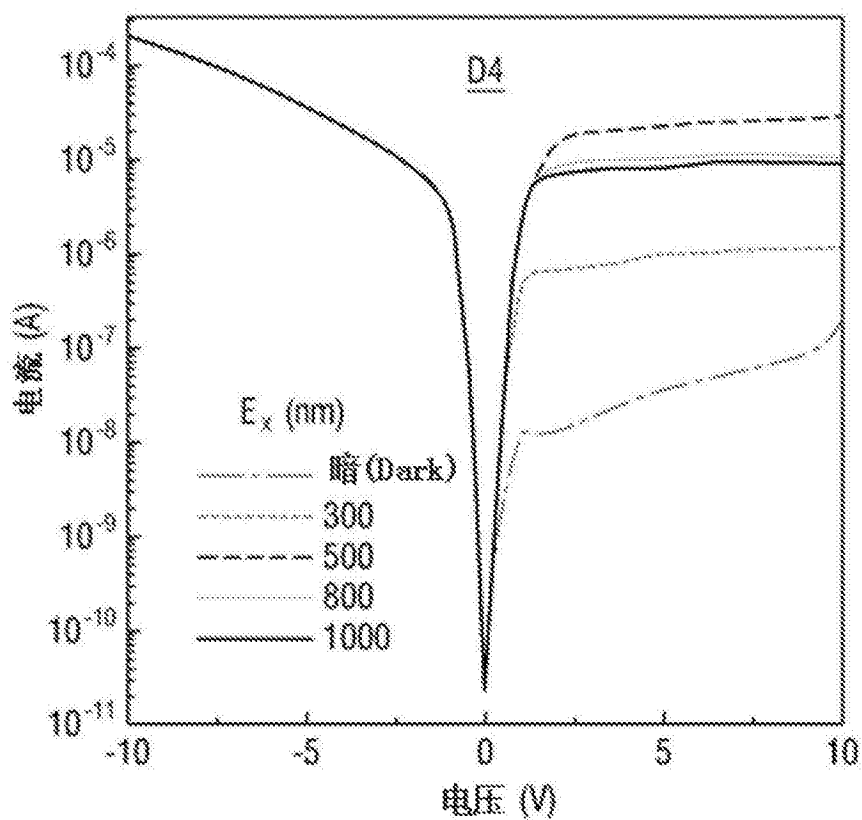


图4

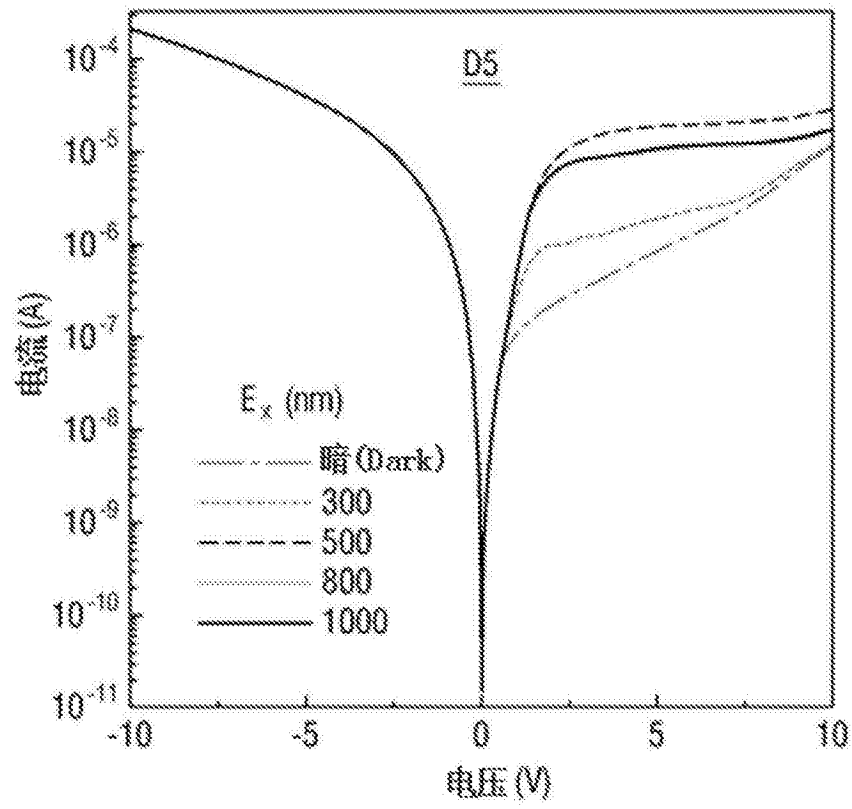


图5

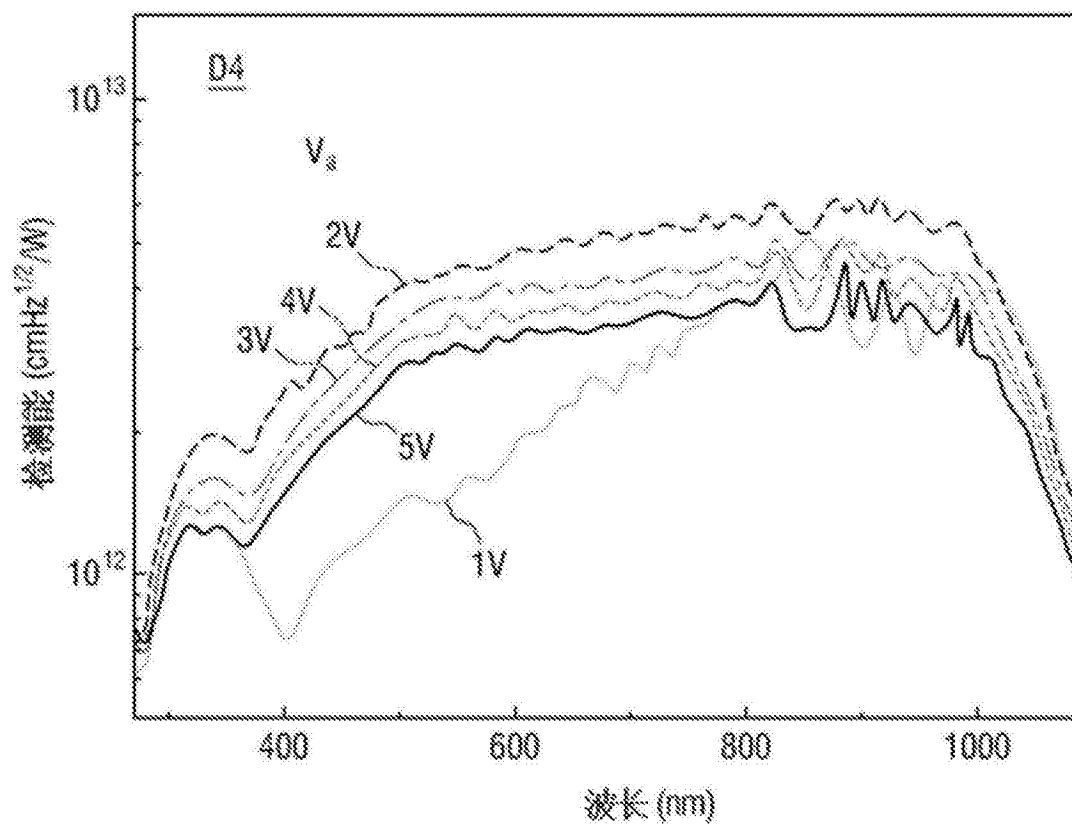


图6

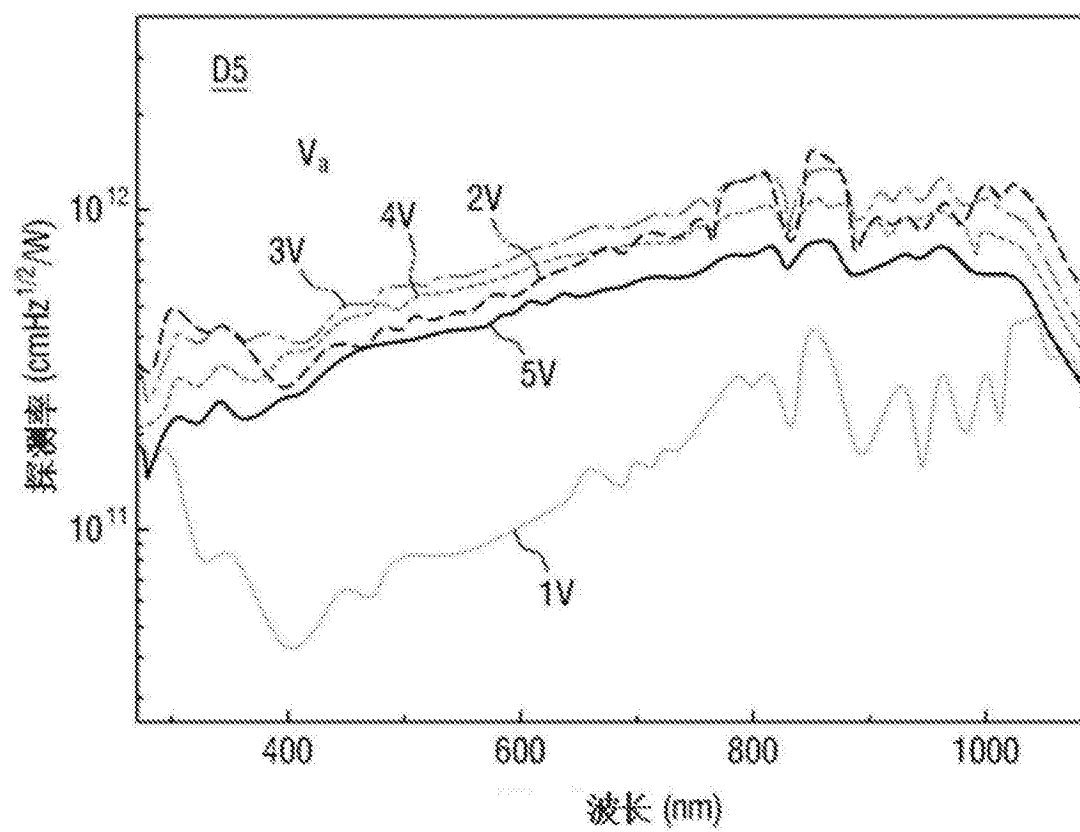


图7

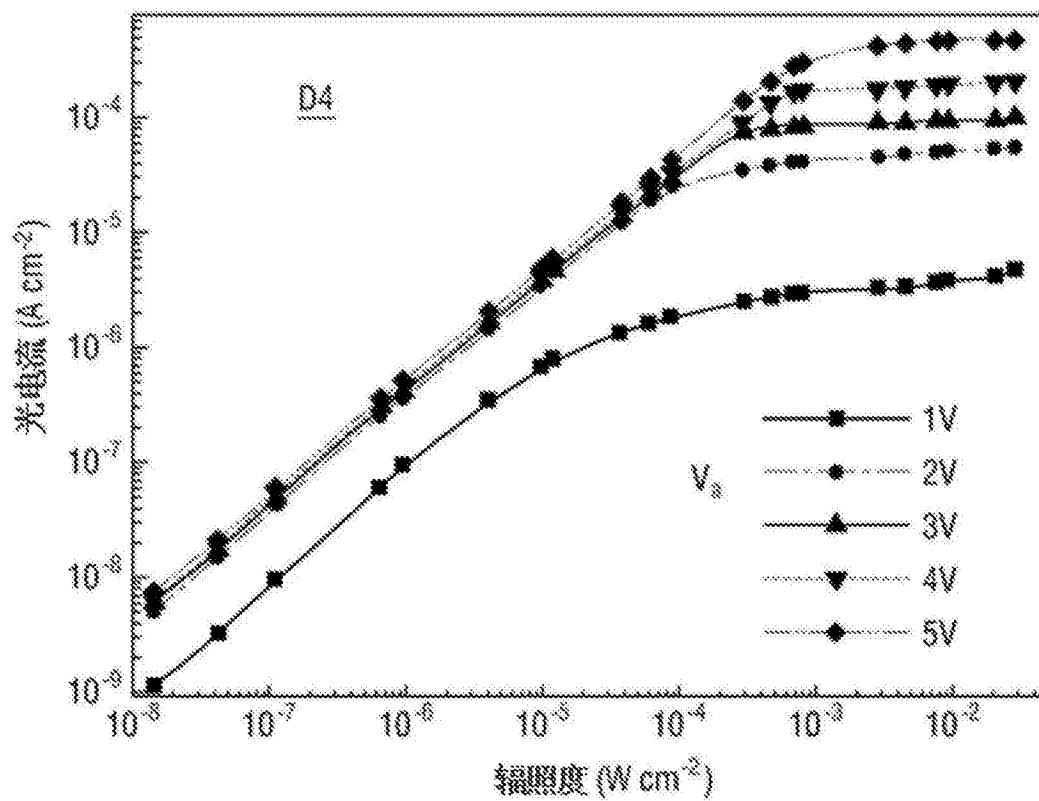


图8

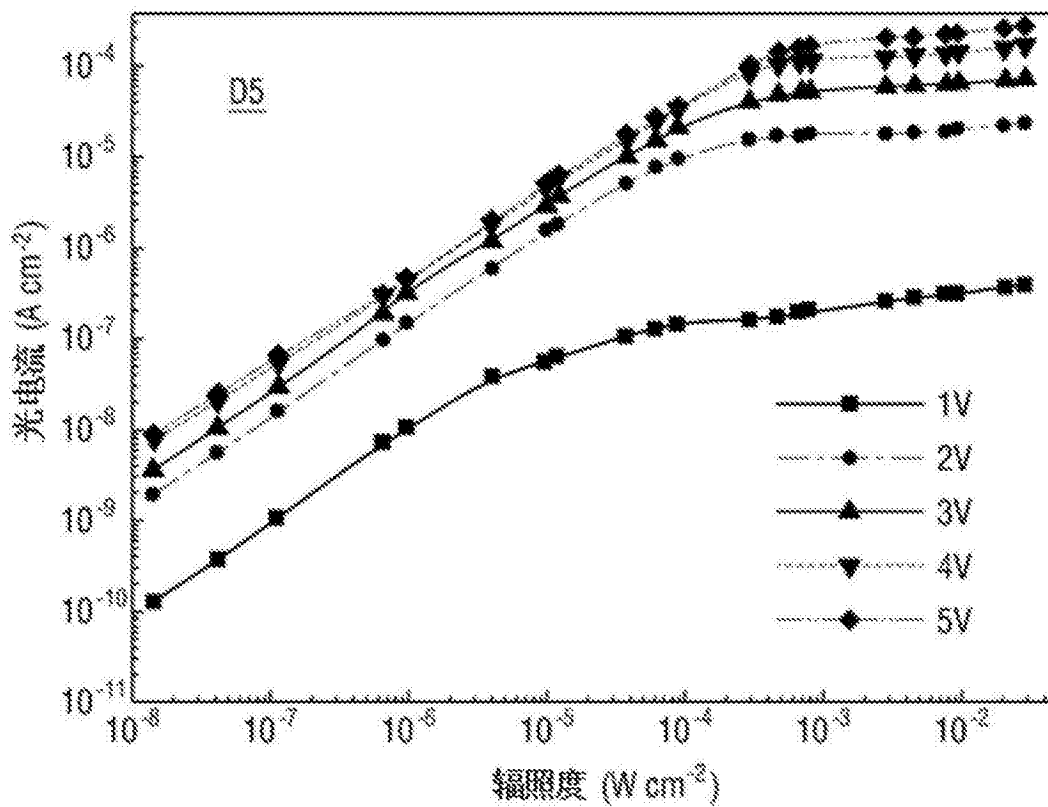


图9

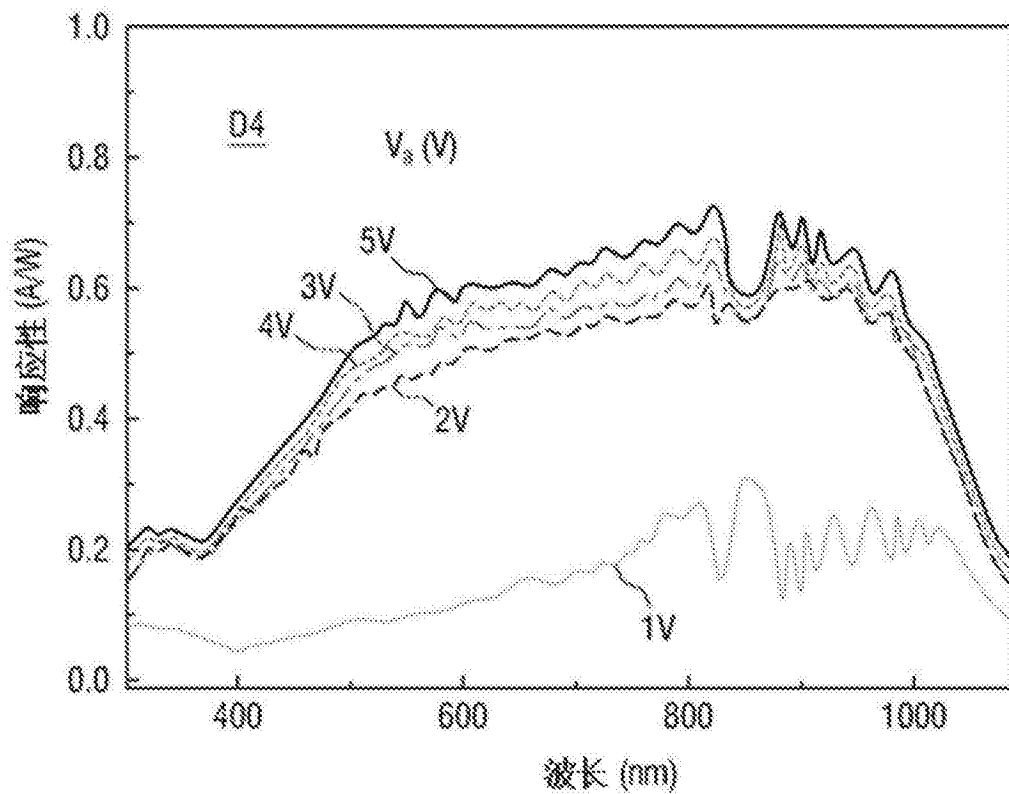


图10

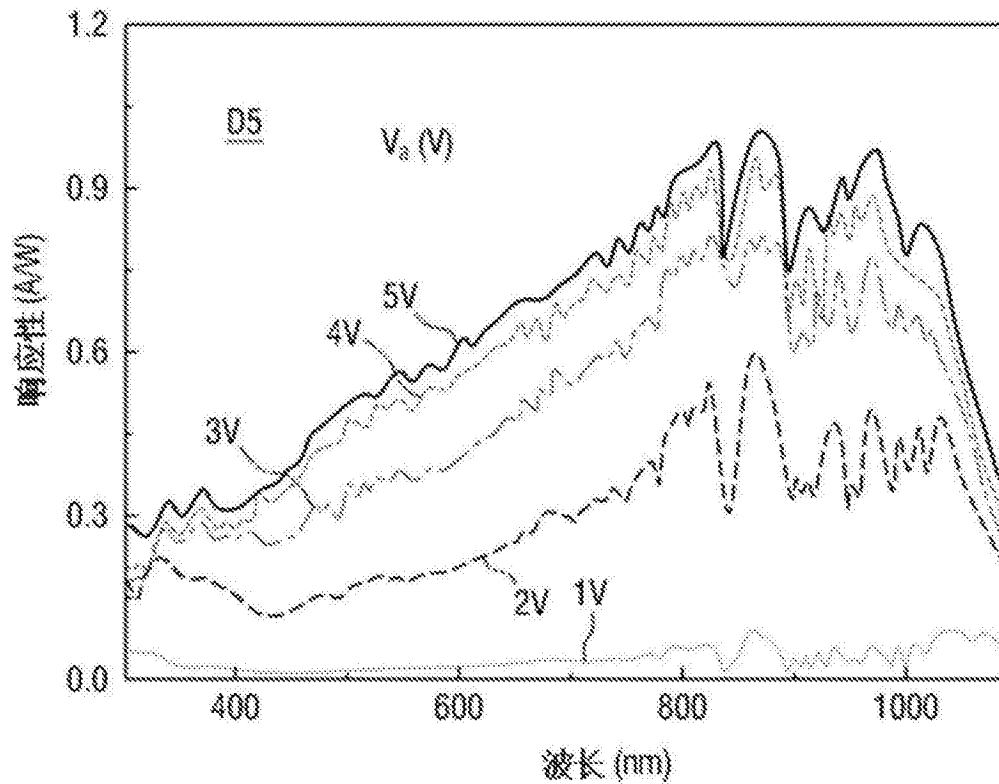


图11

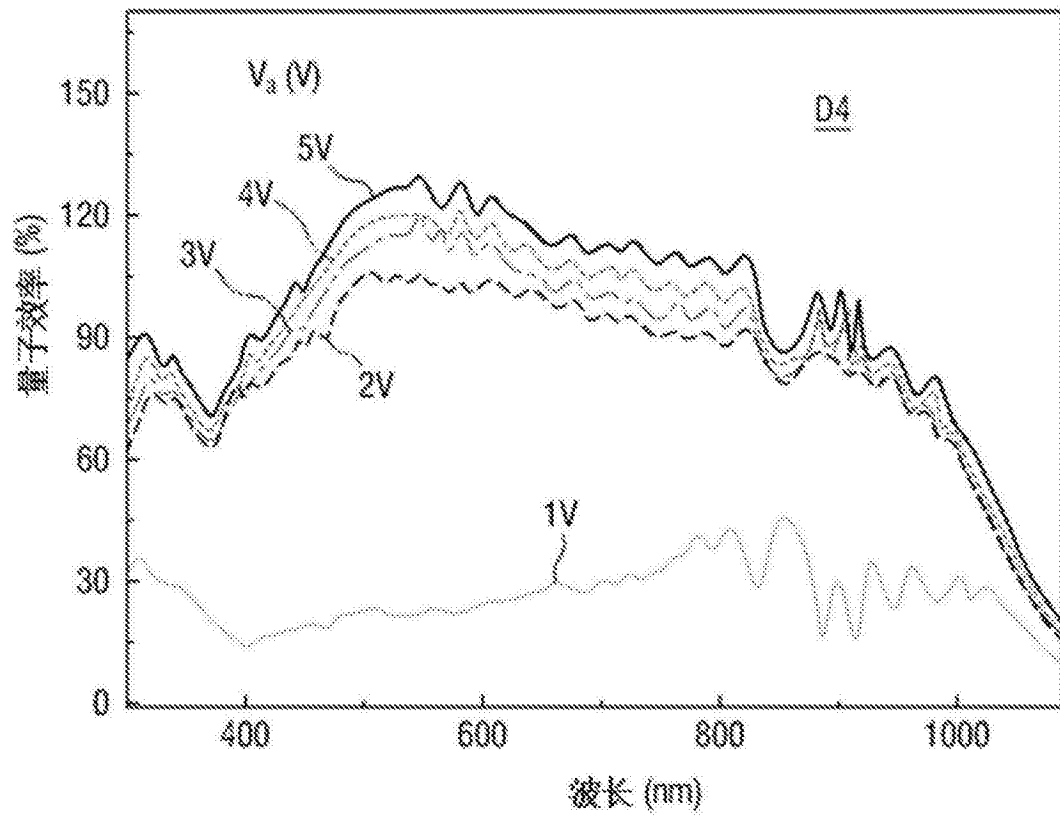


图12

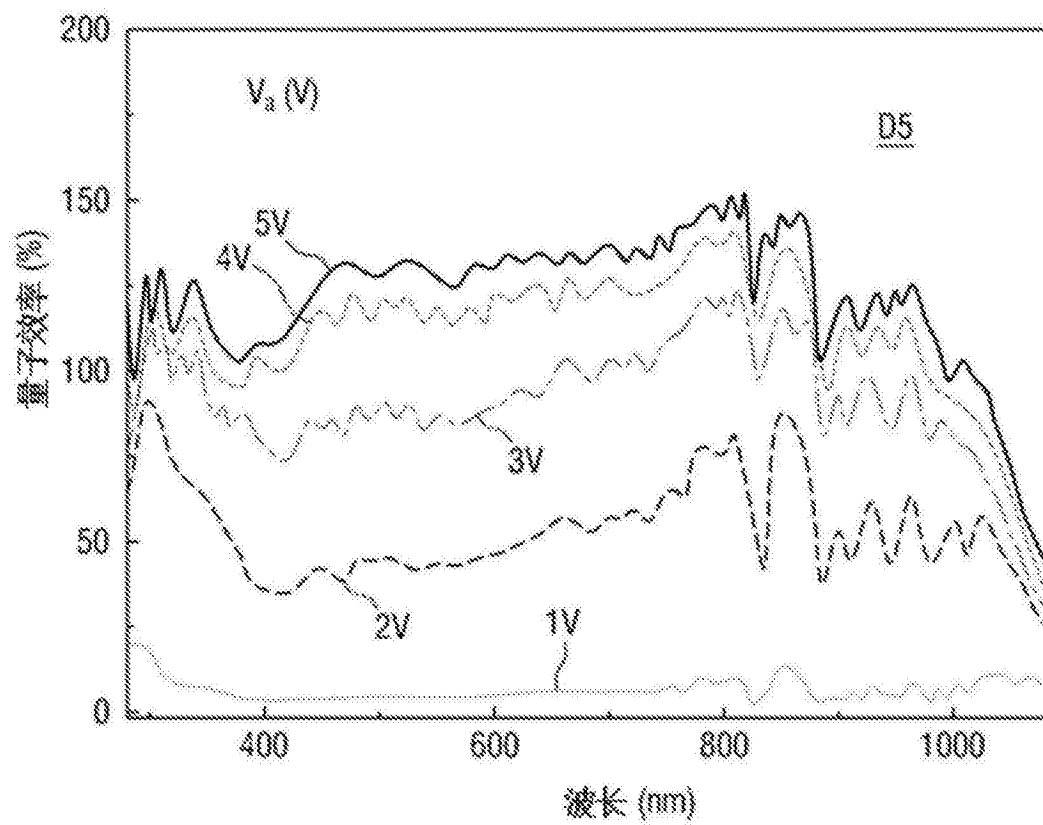


图13

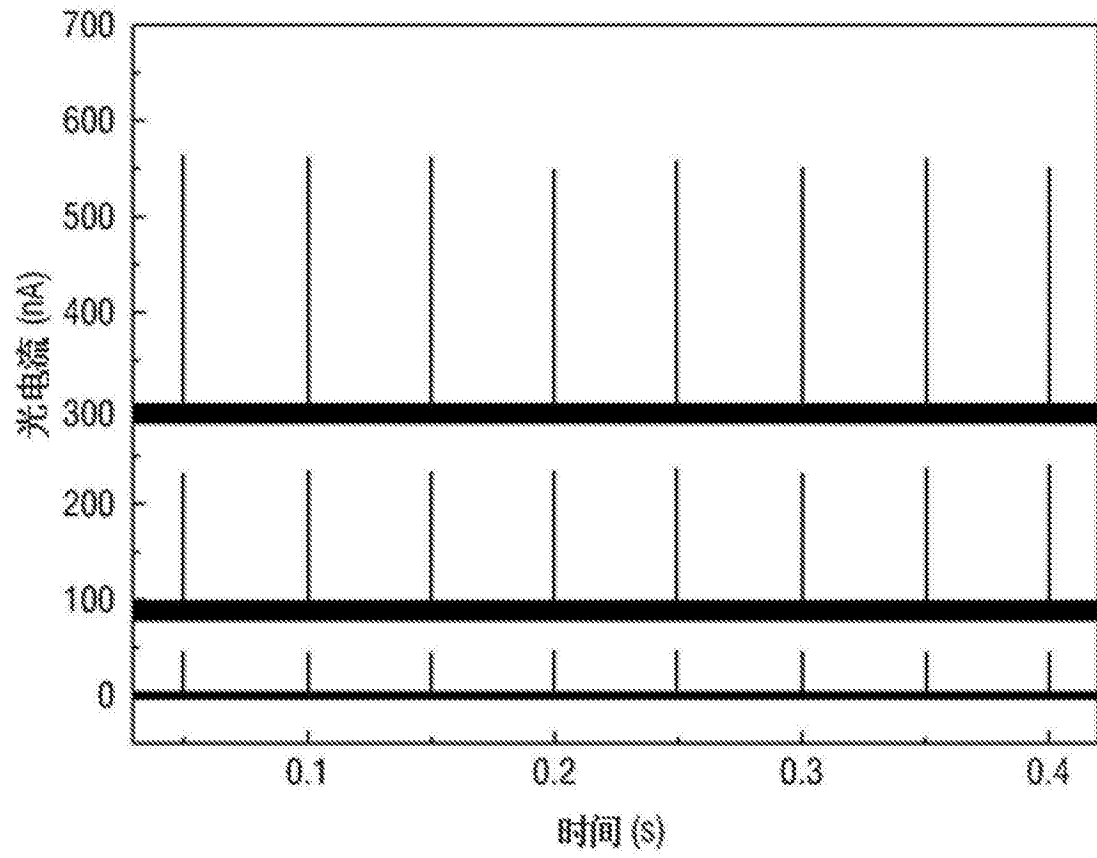


图14

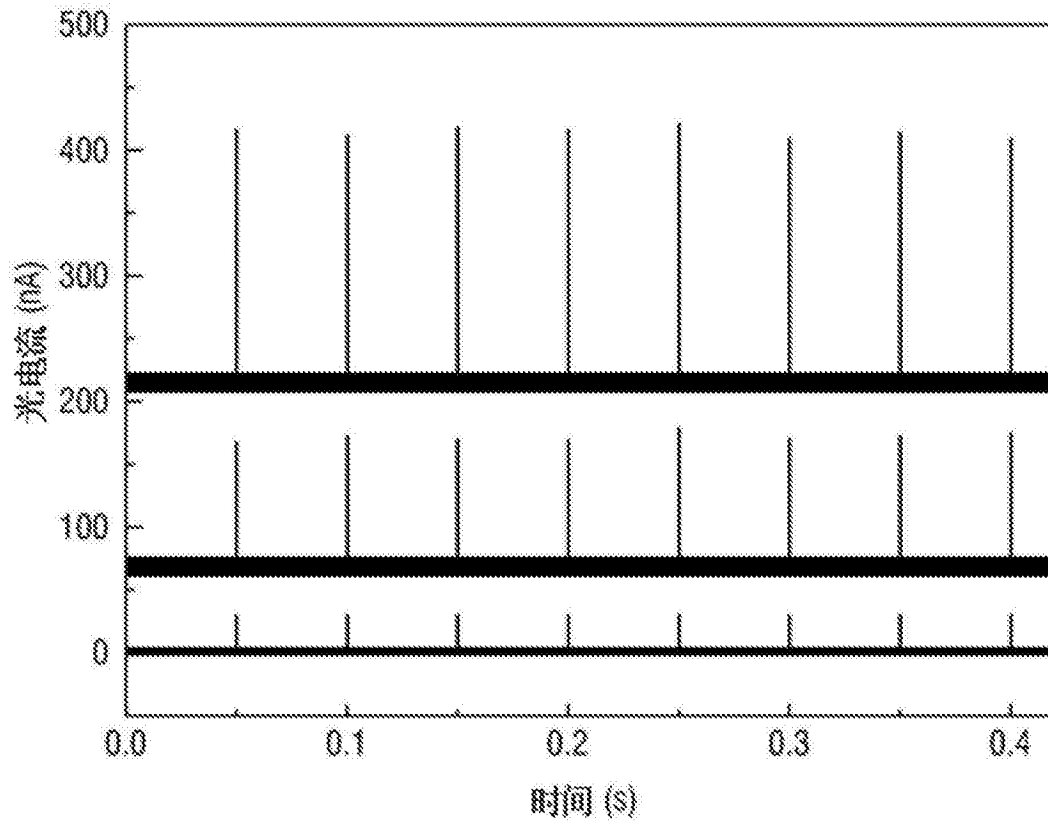


图15

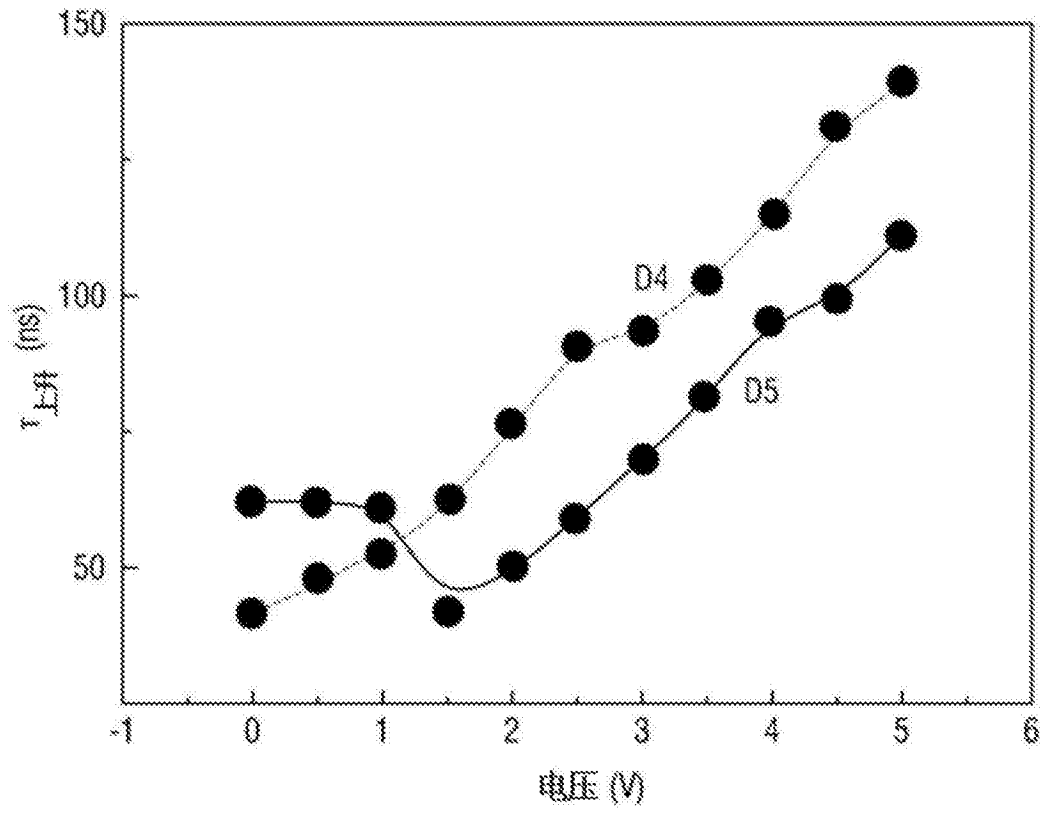


图16

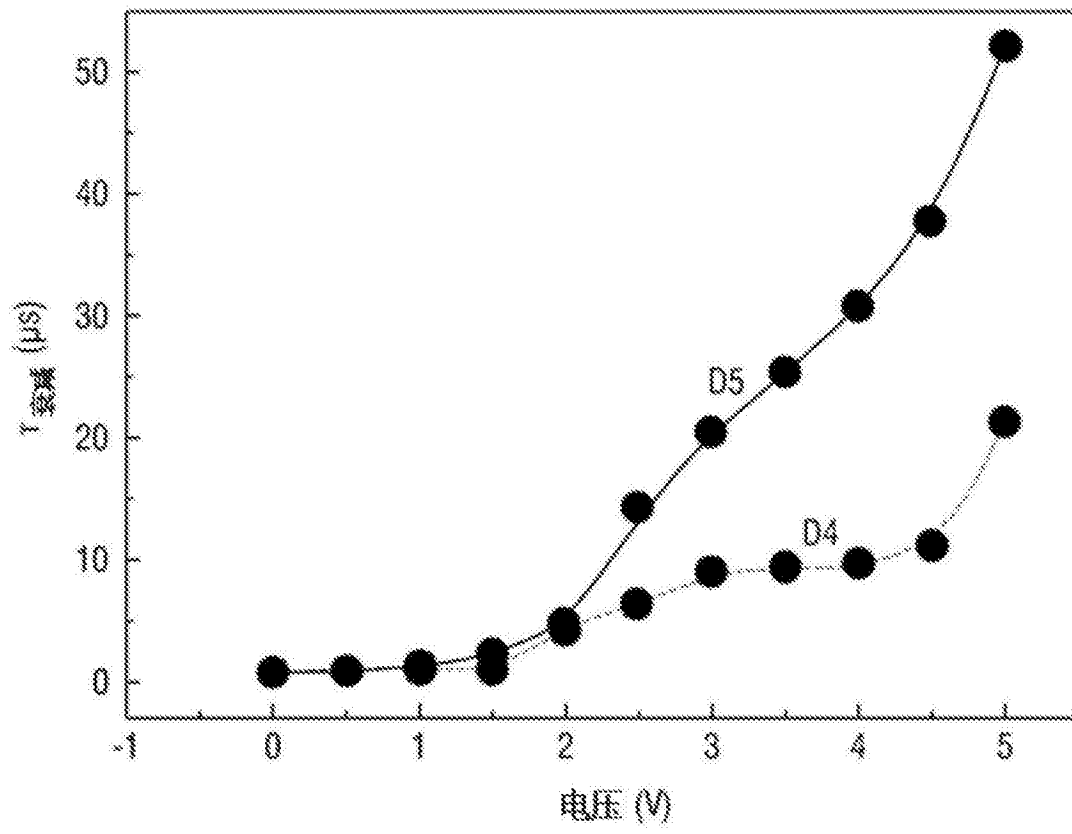


图17

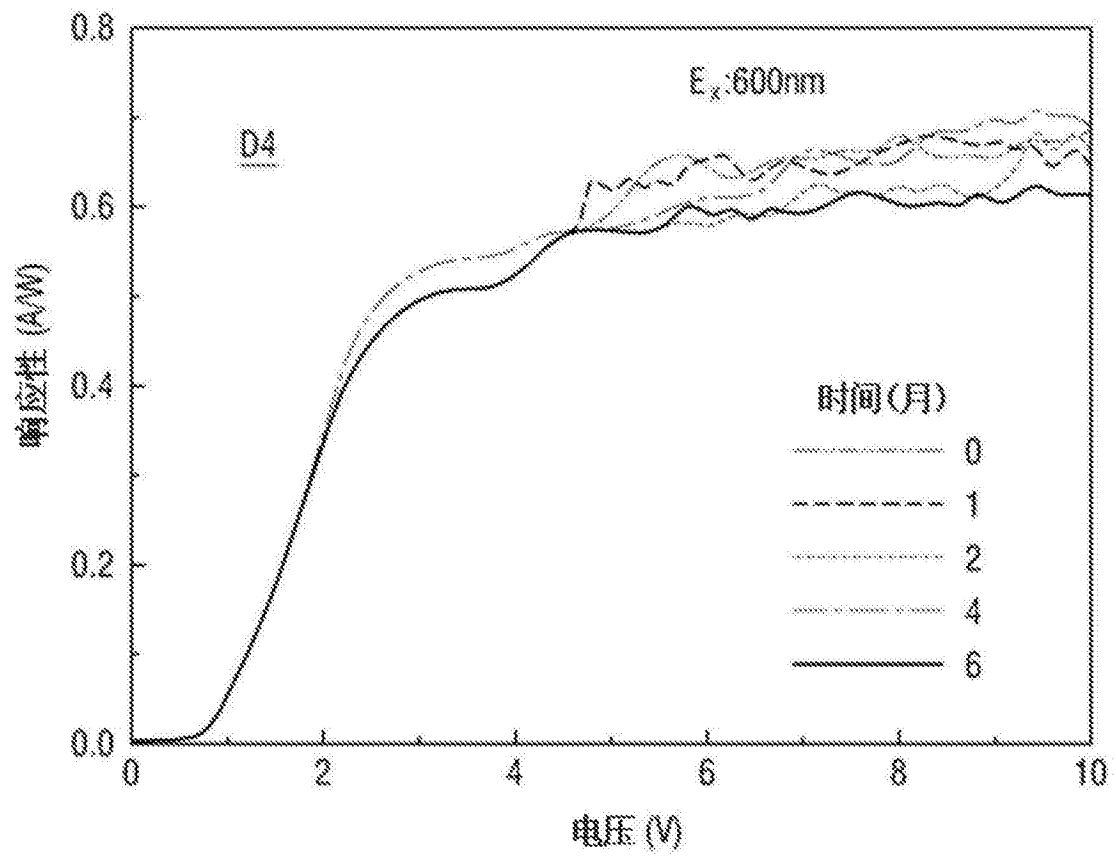


图18