



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109346552 B

(45)授权公告日 2020.06.19

(21)申请号 201811228418.2

H01L 31/0352(2006.01)

(22)申请日 2018.10.22

H01L 31/18(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

(56)对比文件

申请公布号 CN 109346552 A

CN 102412343 A, 2012.04.11, 说明书第29-47段,附图1-11.

(43)申请公布日 2019.02.15

CN 104900748 A, 2015.09.09, 全文.

(73)专利权人 中国科学院半导体研究所

US 2013009265 A1, 2013.01.10, 全文.

地址 100083 北京市海淀区清华东路甲35号

审查员 韩颖姝

专利权人 弦海(上海)量子科技有限公司

(72)发明人 杨晓红 王晖 何婷婷 刘凯宝

(74)专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021

代理人 任岩

(51)Int.Cl.

H01L 31/107(2006.01)

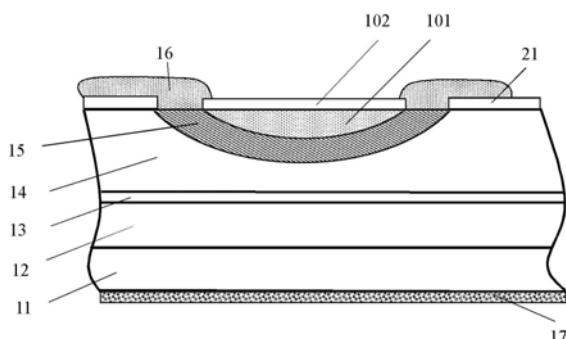
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

基于弧形扩散区的雪崩光电探测器及其制作方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器及其制作方法。其中，雪崩光电探测器包括：一外延结构，该外延结构自下而上包含：N型衬底、吸收层、电荷层、以及本征倍增层；在该本征倍增层中形成有3D碗状开口并在此3D碗状开口下形成有P型高掺杂的弧形扩散区；一钝化层，形成于外延结构之上；一P型电极层，与P型高掺杂的弧形扩散区接触；一N型电极层，与N型衬底接触；以及一增透膜，作为光窗口，设置于该单电子雪崩光电探测器的正面或背面，该增透膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向，且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合。有效提高器件的光子探测效率，减小器件的暗计数，并降低后脉冲几率。



1. 一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器,包括:

一外延结构,该外延结构自下而上包含:N型衬底、吸收层、电荷层、以及本征倍增层;在该本征倍增层中形成有3D碗状开口并在此3D碗状开口下形成有P型高掺杂的弧形扩散区,该3D碗状开口的曲率半径大于 $15\mu\text{m}$ ,中心点切线水平,扩散的深宽比接近1;

一钝化层,形成于外延结构之上;

一P型电极层,与P型高掺杂的弧形扩散区接触;

一N型电极层,与N型衬底接触;以及

一增透膜,作为光窗口,设置于该雪崩光电探测器的正面或背面,该增透膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合。

2. 根据权利要求1所述的雪崩光电探测器,还包括:

一填充层,形成于所述3D碗状开口内。

3. 根据权利要求2所述的雪崩光电探测器,其中,

所述N型衬底的材料为N型高掺杂InP;和/或,

所述吸收层的材料为本征Ga $0.47$ In $0.53$ As;和/或,

所述电荷层的材料为N型掺杂InP;和/或,

所述本征倍增层的材料为本征InP;和/或,

所述填充层的材料为多晶硅;和/或,

所述增透膜的材料为SiNx;和/或,

所述钝化层的材料为SiNx;和/或,

所述P型电极层的材料为TiPtAu;和/或,

所述N型电极层的材料为AuGeNi。

4. 根据权利要求1所述的雪崩光电探测器,其中,所述P型高掺杂的弧形扩散区是在3D碗状开口下方通过P型注入或P型扩散而形成的。

5. 根据权利要求1至4中任一项所述的雪崩光电探测器,其中,所述雪崩光电探测器为如下结构的雪崩光电探测器中的一种:单光子雪崩光电探测器、普通分离吸收电荷倍增结构雪崩光电探测器、分离吸收渐变电荷倍增结构雪崩光电探测器、以及谐振腔增强型结构雪崩光电探测器。

6. 一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器的制作方法,包括:

步骤S31:制作一外延结构,该外延结构自下而上包含:N型衬底、吸收层、电荷层、以及本征倍增层;

步骤S32:采用灰度曝光技术和刻蚀技术在本征倍增层中制作一3D碗状开口,并在该3D碗状开口下方进行P型扩散或P型注入形成一P型高掺杂的弧形扩散区,该3D碗状开口的曲率半径大于 $15\mu\text{m}$ ,中心点切线水平,扩散的深宽比接近1;

步骤S34:在该雪崩光电探测器的正面或背面沉积一增透膜,该增透膜作为光窗口,使该增透膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合;

步骤S35:制作一钝化层于外延结构之上;

步骤S36:制作一P型电极层,该P型电极层与P型高掺杂的弧形扩散区接触;以及

步骤S37:制作一N型电极层,该N型电极层与N型衬底接触。

7.根据权利要求6所述的制作方法,在步骤S32之后还包括:

步骤S33:在3D碗状开口内制作一填充层。

8.根据权利要求7所述的制作方法,其中,

所述步骤S34包括:在该雪崩光电探测器的正面沉积第一增透膜作为光窗口,该第一增透膜覆盖于填充层之上,使得该第一增透膜的中心与P型掺杂的弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合;

所述步骤S35包括:在本征倍增层表面上第一增透膜之外的区域制作钝化层;

所述步骤S36包括:通过对钝化层覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区的区域进行光刻和刻蚀,使得P型高掺杂的弧形扩散区的表面露出,并沉积一环形的P型电极层,使得该P型电极层与P型高掺杂的弧形扩散区的表面露出部分接触,并覆盖部分钝化层,使光窗口位于该P型电极层的中间,且该光窗口的中心与该环形的P型电极层的中心重合。

9.根据权利要求7所述的制作方法,其中,

所述步骤S35包括:在本征倍增层表面上制作钝化层;

所述步骤S36包括:通过对钝化层覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区的区域进行光刻和刻蚀,使得P型高掺杂的弧形扩散区和填充层的表面露出,并沉积P型电极层,使得该P型电极层覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区和填充层之上;

所述步骤S34包括:在N型电极层上进行光刻和刻蚀过程,并在该雪崩光电探测器的背面沉积第二增透膜作为光窗口,使得该第二增透膜的中心与P型掺杂的弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合。

## 基于弧形扩散区的雪崩光电探测器及其制作方法

### 技术领域

[0001] 本公开属于半导体器件技术领域,涉及一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器及其制作方法。

### 背景技术

[0002] 雪崩光电探测器(APD,Avalanche Photo-Detector)已经广泛应用于商业、军事和科学的研究中,如量子信息、生物分子探测、激光雷达成像和天文探测等。通信波段高速、高探测效率、低暗记数的单光子APD在实际的量子密钥分发系统中,发挥了极其重要的作用。单光子雪崩光电探测器(SPAD,Single Photon Avalanche-Detector)由于其特殊的盖革工作方式,雪崩过程和雪崩电流密度对器件的探测效率和暗计数有很大影响,目前单光子雪崩光电探测器件的探测效率较低,高探测效率与高暗计数同时存在,对光子探测性能有很大影响。

[0003] 单光子雪崩光电探测器一般工作在高于击穿电压的偏置状态,在这种高偏置等待状态下,如果有一个光子首先产生了一个自由载流子,那么这个自由载流子就会在高电场作用下产生系列的碰撞电离,输出一个可以测量的脉冲信号,于是就产生一个光子计数;如果器件中缺陷首先释放了一个自由载流子,这个载流子同样可能引发一个可探测的电流脉冲信号,也会产生一个计数,为暗计数。目前单光子雪崩探测器通常采用刻蚀坑和平面结构,采用一次或者二次扩散的方式定义器件工作区域。这种结构的器件均存在一种现象,就是偏置在雪崩电压下,器件的载流子增益首先发生在器件的边沿,且边沿的电场往往比中心大几倍甚至超过一个量级,此时只有器件边沿产生的自由载流子才会大概率引发一次雪崩脉冲。而探测器的光照则大概率集中在器件的中心区域。这种由于光照和发生雪崩的空间区域存在的不一致性会导致单光子探测器在雪崩电压附近探测效率的降低,尤其是当器件的直径增加到30微米以上时。当加大几伏偏置电压后,增益区的电场才逐渐趋于均匀,此时的器件探测效率略有增高但暗计数陡增,器件整体性能下降。因此亟需提出一种方案,解决光入射中心与雪崩倍增区域不重合导致单光子探测效率低、暗计数高的问题。

### 发明内容

[0004] (一)要解决的技术问题

[0005] 本公开提供了一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器及其制作方法,以至少部分解决以上所提出的技术问题。

[0006] (二)技术方案

[0007] 根据本公开的一个方面,提供了一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器,包括:一外延结构,该外延结构自下而上包含:N型衬底、吸收层、电荷层、以及本征倍增层;在该本征倍增层中形成有3D碗状开口并在此3D碗状开口下形成有P型高掺杂的弧形扩散区;一钝化层,形成于外延结构之上;一P型电极层,与P型高掺杂的弧形扩散区接触;一N型电极层,与N型衬底接触;以及一增透膜,作为光窗口,设置于该雪崩光电探测器的正面或背面,该增透

膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合。

[0008] 在本公开的一些实施例中,雪崩光电探测器,还包括:一填充层,形成于所述3D碗状开口内。

[0009] 在本公开的一些实施例中,N型衬底的材料为N型高掺杂InP;和/或,吸收层的材料为本征Ga<sub>0.47</sub>In<sub>0.53</sub>As;和/或,电荷层的材料为N型掺杂InP;和/或,本征倍增层的材料为本征InP;和/或,填充层的材料为多晶硅;和/或,增透膜的材料为SiNx;和/或,钝化层的材料为SiNx;和/或,P型电极层的材料为TiPtAu;和/或,N型电极层的材料为AuGeNi。

[0010] 在本公开的一些实施例中,P型高掺杂的弧形扩散区是在3D碗状开口下方通过P型注入或P型扩散而形成的,该3D碗状开口的曲率半径大于15μm,中心点切线水平,扩散的深宽比接近1。

[0011] 在本公开的一些实施例中,雪崩光电探测器为如下结构的雪崩光电探测器中的一种:单光子雪崩光电探测器、普通分离吸收电荷倍增结构雪崩光电探测器、分离吸收渐变电荷倍增结构雪崩光电探测器、以及谐振腔增强型结构雪崩光电探测器。

[0012] 根据本公开的另一个方面,提供了一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器的制作方法,包括:步骤S31:制作一外延结构,该外延结构自下而上包含:N型衬底、吸收层、电荷层、以及本征倍增层;步骤S32:采用灰度曝光技术和刻蚀技术在本征倍增层中制作一3D碗状开口,并在该3D碗状开口下方进行P型扩散或P型注入形成一P型高掺杂的弧形扩散区;步骤S34:在该雪崩光电探测器的正面或背面沉积一增透膜,该增透膜作为光窗口,使该增透膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合;步骤S35:制作一钝化层于外延结构之上;步骤S36:制作一P型电极层,该P型电极层与P型高掺杂的弧形扩散区接触;以及步骤S37:制作一N型电极层,该N型电极层与N型衬底接触。

[0013] 在本公开的一些实施例中,在步骤S32之后还包括:步骤S33:在3D碗状开口内制作一填充层。

[0014] 在本公开的一些实施例中,3D碗状开口的曲率半径大于15μm,中心点切线水平,P型扩散或P型注入的深宽比接近1。

[0015] 在本公开的一些实施例中,步骤S34包括:在该雪崩光电探测器的正面沉积第一增透膜作为光窗口,该第一增透膜覆盖于填充层之上,使得该第一增透膜的中心与P型掺杂的弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合;步骤S35包括:在本征倍增层表面上第一增透膜之外的区域制作钝化层;步骤S36包括:通过对钝化层覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区的区域进行光刻和刻蚀,使得P型高掺杂的弧形扩散区的表面露出,并沉积一环形的P型电极层,使得该P型电极层与P型高掺杂的弧形扩散区的表面露出部分接触,并覆盖部分钝化层,使光窗口位于该P型电极层的中间,且该光窗口的中心与该环形的P型电极层的中心重合。

[0016] 在本公开的一些实施例中,步骤S35包括:在本征倍增层表面上制作钝化层;步骤S36包括:通过对钝化层覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区的区域进行光刻和刻蚀,使得P型高掺杂的弧形扩散区和填充层的表面露出,并沉积P型电极层,使得该P型电极层覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区和填充层之上;步骤S34包括:在N型电极层上进行光刻和刻蚀过程,并在

该雪崩光电探测器的背面沉积第二增透膜作为光窗口,使得该第二增透膜的中心与P型掺杂的弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合。

[0017] (三) 有益效果

[0018] 从上述技术方案可以看出,本公开提供的基于弧形扩散区的雪崩光电探测器及其制作方法,具有以下有益效果:

[0019] 通过在本征倍增层中形成3D碗状开口并在此碗状开口进行P型高掺杂,使得中心部分未扩散的倍增层厚度最小,边沿厚度最大,以形成P型高掺杂的弧形扩散区,使得雪崩探测器倍增区的光场中心部分增益最强,倍增区的碰撞电离在横向更加均匀,减小边沿电场及因此产生的边沿击穿,使得器件在外加偏置逐渐增加时首先发生碰撞电离增益的区域处于器件中心,并向外逐渐扩展,保证器件中心光场与最强电场在空间上的重合。当雪崩光电探测器偏置在邻近雪崩击穿器的工作状态时,这种重合一方面可以大几率提高器件的光子探测效率,减小器件的暗计数,另一方面还可以策略性降低偏置电压,减小每次雪崩脉冲包含的载流子数目,降低后脉冲几率。

#### 附图说明

[0020] 图1为根据本公开第一实施例所示的正面入射的基于弧形扩散区的单电子雪崩光电探测器的侧向剖面结构示意图。

[0021] 图2A为根据本公开第一实施例所示的基于弧形扩散区的单电子雪崩光电探测器在额外雪崩电压为2V时的电场分布图。

[0022] 图2B为根据本公开第一实施例所示的基于弧形扩散区的单电子雪崩光电探测器在额外雪崩电压为2V时的电流分布图。

[0023] 图3为根据本公开第二实施例所示的背面入射的基于弧形扩散区的单电子雪崩光电探测器的侧向剖面结构示意图。

[0024] 图4为根据本公开第三实施例所示的基于弧形扩散区的雪崩光电探测器的制作方法流程图。

[0025] 【符号说明】

- |                        |            |
|------------------------|------------|
| [0026] 11-N型衬底;        | 12-吸收层;    |
| [0027] 13-电荷层;         | 14-本征倍增层;  |
| [0028] 15-P型高掺杂的弧形扩散区; | 16-P型电极层;  |
| [0029] 17-N型电极层;       | 101-填充层;   |
| [0030] 102-第一增透膜;      | 103-第二增透膜; |
| [0031] 21-钝化层。         |            |

#### 具体实施方式

[0032] 本公开提供了一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器及其制作方法,通过在本征倍增层中形成3D碗状开口并在此碗状开口中进行P型高掺杂,使得窗口中心部分未扩散的倍增层厚度最小,边沿厚度最大,以形成P型高掺杂的弧形扩散区,使得雪崩探测器倍增区的光场中心部分增益最强,倍增区的碰撞电离在横向更加均匀,减小边沿电场及因此产生

的边沿击穿,保证器件中心光场与最强电场在空间上的重合,能有效提高器件的光子探测效率,减小器件的暗计数,并降低后脉冲几率。

[0033] 为使本公开的目的、技术方案和优点更加清楚明白,以下结合具体实施例,并参照附图,对本公开进一步详细说明。本公开中,器件的结构中“一层位于另一层之上”的含义为一层位于另一层的空间上方,可以接触或者不接触,在两个层之间还可以存在其他过渡层或缓冲层。“倍增区”在文中对应的结构为“倍增层”,“吸收区”在本公开中对应的结构为“吸收层”,“电荷区”在文中对应的结构为“电荷层”。本说明书中实施例中提到的厚度、掺杂浓度等数值仅作为示例进行说明,并不用于限制本公开的器件结构,本领域技术人员可根据实际的器件需求进行厚度、掺杂浓度的相应设计。术语“平行于外延方向”指的是与外延方向平行,外延方向为材料进行外延的方向,该外延方向垂直于外延片。

[0034] 本公开提供了一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器,该基于弧形扩散区的雪崩光电探测器,包括:一外延结构,该外延结构自下而上包含:N型衬底11、吸收层12、电荷层13、以及本征倍增层14;在该本征倍增层中形成有3D碗状开口并在此碗状开口下形成有P型高掺杂的弧形扩散区15;一钝化层21,形成于外延结构之上;一P型电极层16,与P型高掺杂的弧形扩散区15接触;一N型电极层17,与N型衬底11接触;以及一增透膜,作为光窗口,设置于该单电子雪崩光电探测器的正面或背面,该增透膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合。

[0035] 在本公开的优选实施例中,为了使光斑较为集中,在该雪崩光电探测器还包括:一填充层101,形成于碗状开口内。需要说明的是,在雪崩光电探测器中,没有填充层也可以正常工作,只是光斑会略微散开。

[0036] 本公开的基于弧形扩散区的雪崩光电探测器可应用于单光子PAD,以解决光入射中心与雪崩倍增区域不重合导致单光子探测效率低、暗计数高的问题。

[0037] 本公开的基于弧形扩散区的雪崩光电探测器还可以是普通分离吸收电荷倍增(SACM)结构APD、分离吸收渐变电荷倍增(SAGCM)结构APD、以及谐振腔增强型(RCE-SAGCM)结构APD,能够提高器件的光子探测效率,减小器件的暗计数,并且策略性降低偏置电压,减小每次雪崩脉冲包含的载流子数目,降低后脉冲几率。

[0038] 本公开还提供了一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器的制作方法,该制作方法包括:制作一外延结构,该外延结构自下而上包含:N型衬底11、吸收层12、电荷层13、以及本征倍增层14;采用灰度曝光技术和刻蚀技术在本征倍增层14中制作一3D碗状开口,并在碗状开口下方进行P型扩散或P型注入形成一P型高掺杂的弧形扩散区15;制作一P型电极层16,该P型电极层16与P型高掺杂的弧形扩散区15接触;制作一N型电极层17,该N型电极层17与N型衬底11接触;制作一钝化层21于外延结构之上;以及制作光窗口,在该雪崩光电探测器的正面或背面沉积一增透膜,使该增透膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合。

[0039] 其中,3D碗状开口的曲率半径设计为大于15 $\mu\text{m}$ 的数值,中心点的切线水平。

[0040] 优选的,进行P型扩散或P型注入的深宽比接近1。

[0041] 下面以正面入射和背面入射的基于弧形扩散区的单光子雪崩光电探测器以及一单光子雪崩光电探测器的制作方法作为示例进行说明。

[0042] 在本公开的第一实施例中,提供了一种基于弧形扩散区的单光子雪崩光电探测

器。

[0043] 图1为根据本公开第一实施例所示的正面入射的基于弧形扩散区的单电子雪崩光电探测器的侧向剖面结构示意图。

[0044] 参照图1所示,本实施例的正面入射的基于弧形扩散区的单光子雪崩光电探测器,包括:一外延结构,该外延结构自下而上包含:N型衬底11、吸收层12、电荷层13、以及本征倍增层14;在该本征倍增层中形成有3D碗状开口并在此碗状开口下形成有P型高掺杂的弧形扩散区15;一填充层101,形成于碗状开口内;一钝化层21,形成于外延结构之上;P型电极层16,与P型高掺杂的弧形扩散区15表面露出部分接触,并覆盖部分钝化层21;一N型电极层17,形成于N型衬底11之下,与N型衬底11接触;以及一光学增透膜,作为光窗口,形成于P型电极层16的中间,位于填充层101之上,四周由钝化层21包围。参照图1所示,光从器件正面入射,作为增透膜的光窗口开在器件正面,该增透膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合,本实施例中,光窗口位于填充层101之上,P型电极层16为环形电极,形成P+-i-P-i-N+的分离吸收渐变倍增结构。

[0045] 本实施例中,N型衬底11的材料为N型高掺InP。

[0046] 本实施例中,吸收层12的材料为本征 $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ ,吸收层12的厚度为 $2\mu m$ 。

[0047] 本实施例中,电荷层13的材料为N型掺杂InP,用于调节吸收层、倍增层电场分布,电荷层13的厚度为400nm。

[0048] 本实施例中,本征倍增层14的材料为本征InP,P型高掺杂的弧形扩散区15是在碗状开口下方进行P型扩散或P型注入而形成的,碗状开口的曲率半径大于 $15\mu m$ ,中心点切线水平,P型扩散或P型注入的深宽比接近1,该弧形扩散区的掺杂浓度为 $4e16cm^{-3}$ ,厚度为 $3.5\mu m$ 。

[0049] 本实施例中,填充层101的材料为多晶硅。

[0050] 本实施例中,第一增透膜102和钝化层21的材料均为SiNx。

[0051] 本实施例中,P型电极层16的材料为TiPtAu。

[0052] 本实施例中,N型电极层17的材料为AuGeNi。

[0053] 本实施例中,本征倍增层14中形成有3D碗状开口并在此碗状开口下形成有P型高掺杂的弧形扩散区15,其中,3D碗状开口采用灰度曝光技术和刻蚀技术制作,然后在3D碗状开口中进行P型扩散或P型注入比如Zn扩散、Zn注入制得P型高掺杂的弧形扩散区15。具体形成过程举例如下:利用灰度曝光技术完成窗口扩散区域的3D掩膜图形制作,形成中间薄、外围厚的光刻胶图形,根据所采用光刻胶的特性,通过掩膜图形中每一像素的灰度设计,可以以一原点为中心,向外圆形区域曝光量逐渐减小,形成中间低四周高的光刻图形,然后采用干法刻蚀技术制作出具有一定曲率半径的碗状刻蚀开口,该碗状刻蚀开口的中心深度例如为 $1\mu m$ ,曲率半径设计为大于 $15\mu m$ 的数值,刻蚀坑中心点的切线水平。随后进行Zn扩散,扩散的深宽比接近1,例如扩散深度为 $1.5\mu m$ ,扩散完成后在本征InP层之内生成一层P型InP高掺层,对应中心部分未扩散倍增层厚度最小,边沿厚度最大,形成一个3D碗状高掺InP结构,即在本征倍增层14中形成P型高掺杂的弧形扩散区15。

[0054] 在一实例中,对该实施例所示的基于弧形扩散区的单光子雪崩光电探测器(SPAD)进行了电场分布与电流分布模拟。图2A为根据本公开第一实施例所示的基于弧形扩散区的

单电子雪崩光电探测器在额外雪崩电压为2V时的电场分布图,其中,纵坐标Z轴是电场强度,单位V/m;横向两个坐标y,x分别是从器件中心开始沿SPAD器件的垂直外延方向和平行外延方向的空间尺寸,其中y坐标从原点方向开始为吸收区、电荷区和倍增区,根据电场分布结果可知:倍增区的电场远高于吸收区的电场,且电场的中心部分强度高,向边沿越来越小,没有明显的边沿高电场;图2B为根据本公开第一实施例所示的基于弧形扩散区的单电子雪崩光电探测器在额外雪崩电压为2V时的电流分布图,纵坐标为垂直外延方向,横坐标为平行外延方向,原点为器件圆形光敏面的中心,单位为微米,根据电流分布结果可知:器件中心部分的电流线均匀,没有边沿集中的现象。因此本器件结构可以有效减小边沿电场增强和边沿击穿现象,保证器件中心光场与最强电场在空间上的重合,因而可以在雪崩电压下提高探测效率和减小暗计数,提高单光子探测的探测性能。

[0055] 在本公开的第二实施例中,提供了一种基于弧形扩散区的单光子雪崩光电探测器。该实施例中的单光子雪崩光电探测器与第一实施例中的结构类似,不同之处在于光窗口设置于器件的背面,在第二实施例中,SPAD背面入光,器件进行双面光刻,在背面的N型电极层17中形成通光孔并沉积第二增透膜103,器件正面的P型电极层16覆盖P型高掺杂的弧形扩散区15和填充层101;其他结构均与第一实施例相同。

[0056] 在本公开的第三实施例中,提供了一种第一实施例所示的基于弧形扩散区的单光子雪崩光电探测器的制作方法。

[0057] 图4为根据本公开第三实施例所示的基于弧形扩散区的雪崩光电探测器的制作方法流程图。

[0058] 参照图4所示,本实施例的基于弧形扩散区的雪崩光电探测器的制作方法,包括:

[0059] 步骤S31:制作一外延结构,该外延结构自下而上包含:N型衬底、吸收层、电荷层、以及本征倍增层;

[0060] 本实施例中,采用MOCVD技术或分子束外延技术在N型衬底上11制作吸收层12、电荷层13、以及本征倍增层14。

[0061] 本实施例中,N型衬底11的材料为N型高掺InP。

[0062] 本实施例中,吸收层12的材料为本征 $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ ,吸收层12的厚度为 $2\mu m$ 。

[0063] 本实施例中,电荷层13的材料为N型掺杂InP,用于调节吸收层、倍增层电场分布,电荷层13的厚度为400nm。

[0064] 本实施例中,本征倍增层14的材料为本征InP。

[0065] 步骤S32:采用灰度曝光技术和刻蚀技术在本征倍增层中制作一3D碗状开口,并在该3D碗状开口下方进行P型扩散或P型注入形成一P型高掺杂的弧形扩散区;

[0066] 本实施例中,本征倍增层14的材料为本征InP,P型高掺杂的弧形扩散区15是在碗状开口下方进行P型扩散而形成的,碗状开口的曲率半径大于 $15\mu m$ ,中心点切线水平,P型扩散的深宽比接近1,该弧形扩散区的掺杂浓度为 $4e16cm^{-3}$ ,厚度为 $3.5\mu m$ 。

[0067] 本实施例中,利用灰度曝光技术完成窗口扩散区域的3D掩膜图形制作,形成中间薄、外围厚的光刻胶图形,根据所采用光刻胶的特性,通过掩膜图形中每一像素的灰度设计,以一原点为中心,向外圆形区域曝光量逐渐减小,形成中间低四周高的光刻图形,然后采用干法刻蚀技术制作出具有一定曲率半径的碗状刻蚀开口,开口的曲率半径设计为大于 $15\mu m$ 的数值,中心点的切线水平。随后进行Zn扩散,扩散的深宽比接近1,弧形扩散区的掺杂

浓度为 $4e16\text{cm}^{-3}$ ,厚度为 $3.5\mu\text{m}$ 。扩散完成后在本征InP层之内生成一层P型InP高掺杂的弧形扩散区15,窗口中心部分未扩散倍增层厚度最小,边沿厚度最大,形成一个3D碗状高掺InP结构。

- [0068] 步骤S33:在3D碗状开口内制作一填充层;
- [0069] 本实施例中,在碗状InP之内用多晶硅填平抛光,形成填充层101。
- [0070] 步骤S34:在该雪崩光电探测器的正面或背面沉积一增透膜,该增透膜作为光窗口,使该增透膜的中心与弧形扩散区的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合;
- [0071] 本实施例中,在该雪崩光电探测器的正面沉积第一增透膜102,该第一增透膜102覆盖于填充层101之上,使得该第一增透膜102的中心与P型掺杂的弧形扩散区15的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合。
- [0072] 本实施例中,第一增透膜102的材料为SiNx。
- [0073] 步骤S35:制作一钝化层于外延结构之上;
- [0074] 本实施例中,钝化层21制作在本征倍增层14表面上第一增透膜102之外的区域。
- [0075] 本实施例中,钝化层21的材料为SiNx。
- [0076] 步骤S36:制作一P型电极层,该P型电极层与P型高掺杂的弧形扩散区接触;
- [0077] 本实施例中,通过对钝化层覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区的区域进行光刻和刻蚀,使得P型高掺杂的弧形扩散区15的表面露出,并沉积一环形的P型电极层16,使得该P型电极层16与P型高掺杂的弧形扩散区15表面露出部分接触,并覆盖部分钝化层21,光窗口位于该P型电极层16的中间,与该环形电极的中心重合,参照图1中结构图示意。
- [0078] 本实施例中,P型电极层16的材料为TiPtAu。
- [0079] 步骤S37:制作一N型电极层,该N型电极层与N型衬底接触;
- [0080] 本实施例中,在N型衬底11的背面沉积一N型电极层17。
- [0081] 本实施例中,N型电极层17的材料为AuGeNi。
- [0082] 需要说明的是,步骤S34、S35、S36的顺序是固定的,是先后执行步骤S34、S35和S36,本公开中,先后执行步骤S34、S35、S36的含义表示步骤S35在步骤S34之后执行,步骤S36在步骤S35之后执行,不一定非要挨着按顺序执行,在步骤S34和步骤S35、步骤S35和步骤S36之间可以存在其他步骤,比如,步骤S37在步骤S35之后执行,然后执行步骤S36;而步骤S37与步骤S34、S35、S36的执行顺序不进行限定,该步骤S37不是必须在步骤S36之后执行,比如,可以在步骤S33之后执行。在实际的制作过程中,本领域技术人员可以根据需要进行实际步骤的顺序设置。
- [0083] 在本公开的第四实施例中,提供了一种第二实施例所示的基于弧形扩散区的单光子雪崩光电探测器的制作方法。
- [0084] 在第四实施例中,步骤S31、S32、S33与第三实施例的相同,区别在于:步骤S34、S35、S36、S37整体的执行顺序不同,且步骤S34、S35、S36的内容不同,本实施例中,步骤S35、S36的顺序是固定的,是先后执行步骤S35、S36,步骤S34、S37的顺序是固定的,是先后执行步骤S37、S34,而步骤S35、S36和步骤S34、S37之间的具体执行顺序没有要求,例如,可以在步骤S35之后执行步骤S37,然后依次执行步骤S36、S34或者步骤S34、S36。这里的“先后执行”的含义与第三实施例相同,不再赘述。

[0085] 本实施例中,具体步骤对应的过程如下:

[0086] 步骤S34为:在N型电极层17上进行光刻和刻蚀过程,并在该雪崩光电探测器的背面沉积第二增透膜103,使得该第二增透膜103的中心与P型掺杂的弧形扩散区15的曲率中心的连线平行于外延方向,且该光窗口的光场中心区域与高场区在空间上重合;

[0087] 步骤S35为:在本征倍增层14表面上制作钝化层21;

[0088] 步骤S36为:通过对钝化层21覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区15的区域进行光刻和刻蚀,使得P型高掺杂的弧形扩散区15和填充层101的表面露出,并沉积P型电极层16,使得该P型电极层16覆盖于P型高掺杂的弧形扩散区15和填充层101之上。

[0089] 综上所述,本公开提供了一种基于弧形扩散区的雪崩光电探测器及其制作方法,通过在本征倍增层中形成3D碗状开口并在此碗状开口进行P型高掺杂,使得中心部分未扩散的倍增层厚度最小,边沿厚度最大,以形成P型高掺杂的弧形扩散区,使得雪崩探测器倍增区的光场中心部分增益最强,倍增区的碰撞电离在横向更加均匀,减小边沿电场及因此产生的边沿击穿,保证器件中心光场与最强电场在空间上的重合,使得器件在外加偏置逐渐增加时首先发生碰撞电离增益的区域处于器件中心,并向外逐渐扩展;当雪崩光电探测器偏置在邻近雪崩击穿器的工作状态时,器件的高场区和雪崩区均在器件的光窗口中心区域,与光场中心区域重合,这种重合一方面可以大几率提高器件的光子探测效率,减小器件的暗计数,另一方面还可以策略性降低偏置电压,减小每次雪崩脉冲包含的载流子数目,降低后脉冲几率。

[0090] 需要说明的是,实施例中提到的方向用语,例如“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”等,仅是参考附图的方向,并非用来限制本公开的保护范围。贯穿附图,相同的元素由相同或相近的附图标记来表示。在可能导致对本公开的理解造成混淆时,将省略常规结构或构造。并且图中各部件的形状和尺寸不反映真实大小和比例,而仅示意本公开实施例的内容。另外,在权利要求中,不应将位于括号之间的任何参考符号构造成对权利要求的限制。

[0091] 除非有所知名为相反之意,本说明书及所附权利要求中的数值参数是近似值,能够根据通过本公开的内容所得的所需特性改变。具体而言,所有使用于说明书及权利要求中表示组成的含量、反应条件等等的数字,应理解为在所有情况中是受到“约”的用语所修饰。一般情况下,其表达的含义是指包含由特定数量在一些实施例中 $\pm 10\%$ 的变化、在一些实施例中 $\pm 5\%$ 的变化、在一些实施例中 $\pm 1\%$ 的变化、在一些实施例中 $\pm 0.5\%$ 的变化。

[0092] 再者,单词“包含”或“包括”不排除存在未列在权利要求中的元件或步骤。位于元件之前的单词“一”或“一个”不排除存在多个这样的元件。

[0093] 说明书与权利要求中所使用的序数例如“第一”、“第二”、“第三”等的用词,以修饰相应的元件,其本身并不意味着该元件有任何的序数,也不代表某一元件与另一元件的顺序、或是制造方法上的顺序,该些序数的使用仅用来使具有某命名的一元件得以和另一具有相同命名的元件能做出清楚区分。

[0094] 此外,除非特别描述或必须依序发生的步骤,上述步骤的顺序并无限制于以上所列,且可根据所需设计而变化或重新安排。并且上述实施例可基于设计及可靠度的考虑,彼此混合搭配使用或与其他实施例混合搭配使用,即不同实施例中的技术特征可以自由组合形成更多的实施例。

[0095] 以上所述的具体实施例,对本公开的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详

细说明,所应理解的是,以上所述仅为本公开的具体实施例而已,并不用于限制本公开,凡在本公开的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本公开的保护范围之内。

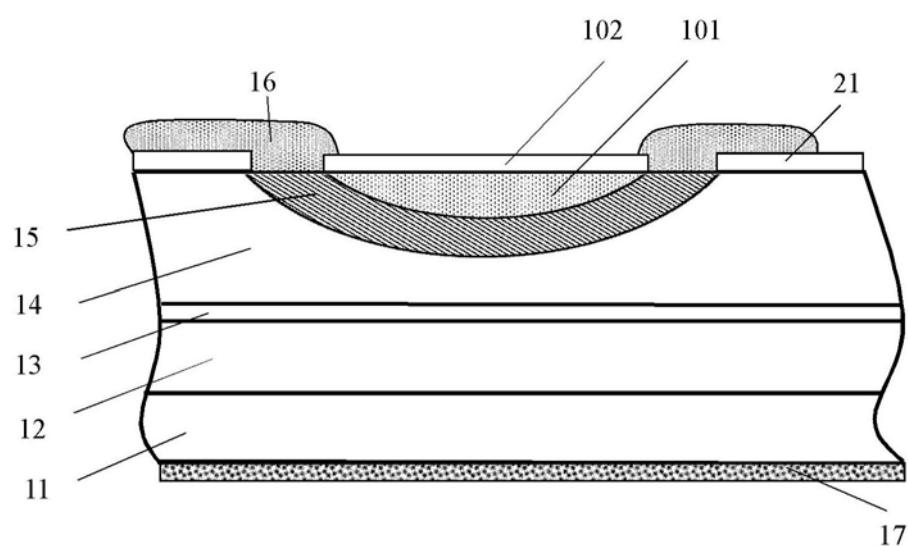


图1

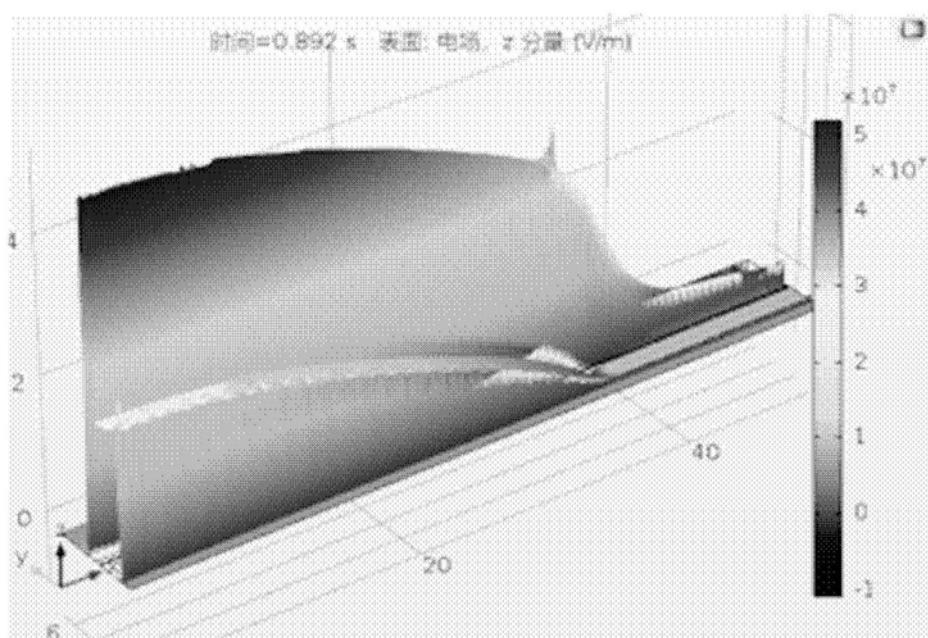


图2A

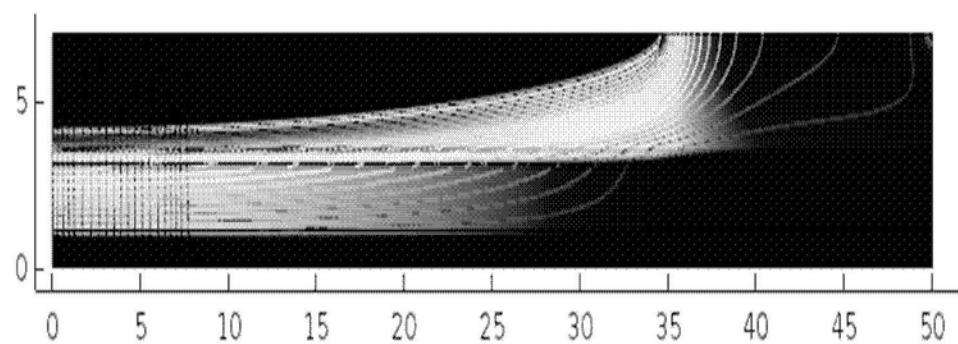


图2B

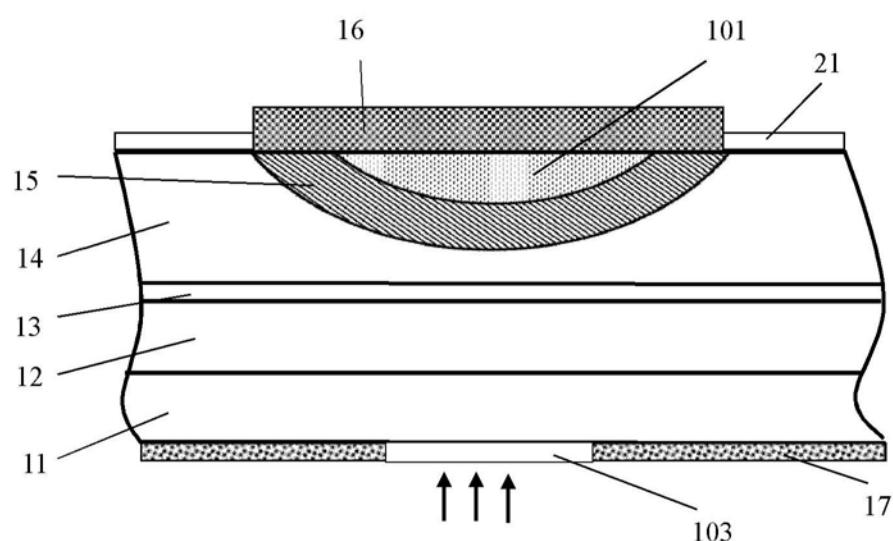


图3

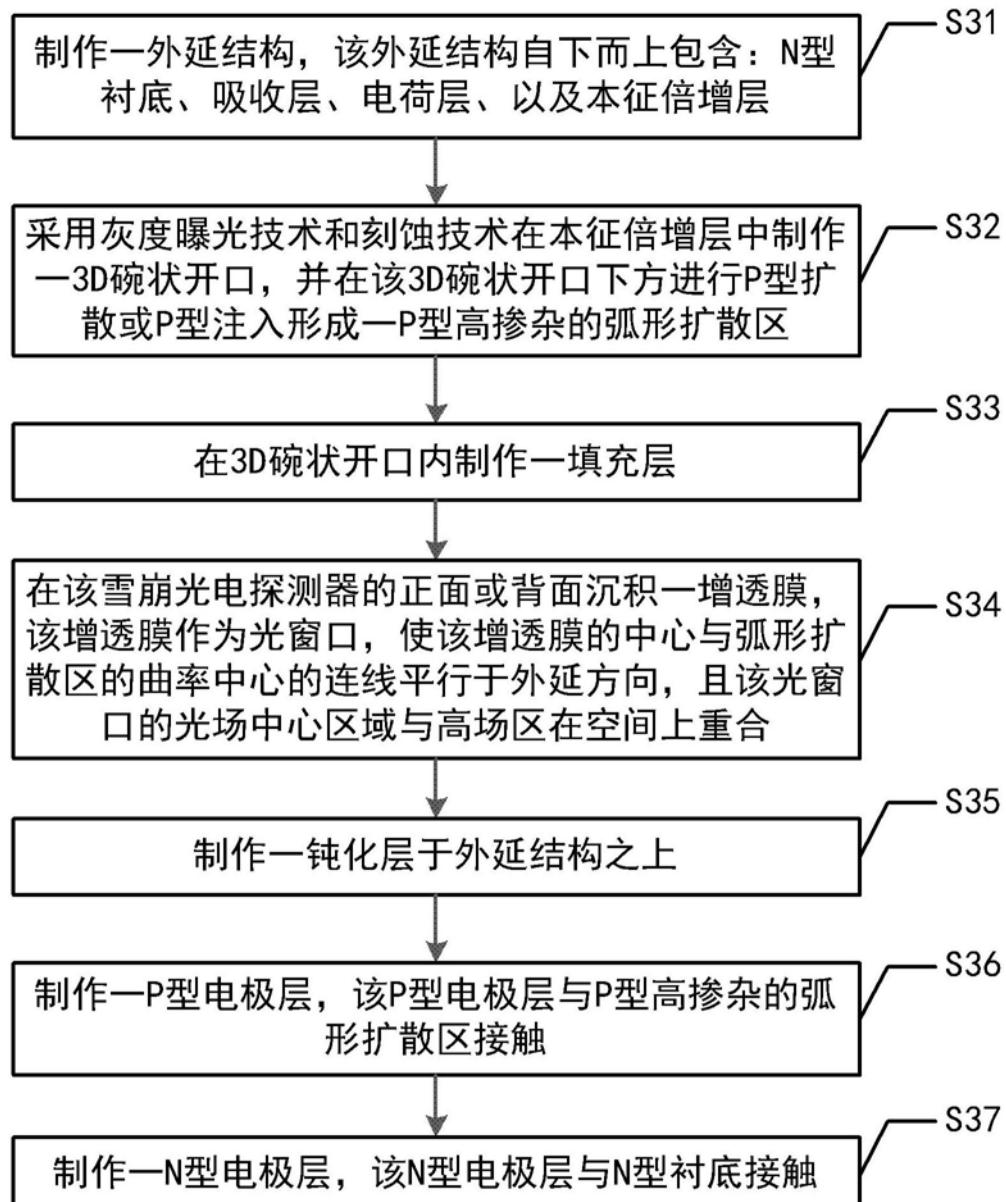


图4