

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2016 年 7 月 21 日 (21.07.2016)



(10) 国际公布号
WO 2016/112773 A1

- (51) 国际专利分类号:
H01L 31/0224 (2006.01) H01L 31/18 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2015/098138
- (22) 国际申请日: 2015 年 12 月 21 日 (21.12.2015)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201510023906.X 2015 年 1 月 17 日 (17.01.2015) CN
- (71) 申请人: 西安交通大学 (XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。
- (72) 发明人: 王宏兴 (WANG, Hongxing); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。刘璋成 (LIU, Zhangcheng); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。王玮 (WANG, Wei); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。李奉南 (LI, Fengnan); 中国陕西省西安市

咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。张景文 (ZHANG, Jingwen); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。卜忍安 (BU, Renan); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。侯洵 (HOU, Xun); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。

(74) 代理人: 西安通大专利代理有限公司 (XI'AN TONG DA PATENT AGENCY CO., LTD.); 中国陕西省西安市咸宁西路 28 号, Shaanxi 710049 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

[见续页]

(54) Title: THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE STRUCTURE OF SEMICONDUCTOR DEVICE, MANUFACTURING METHOD AND APPLICATION THEREOF

(54) 发明名称: 一种半导体器件的三维电极结构及其制备方法和应用

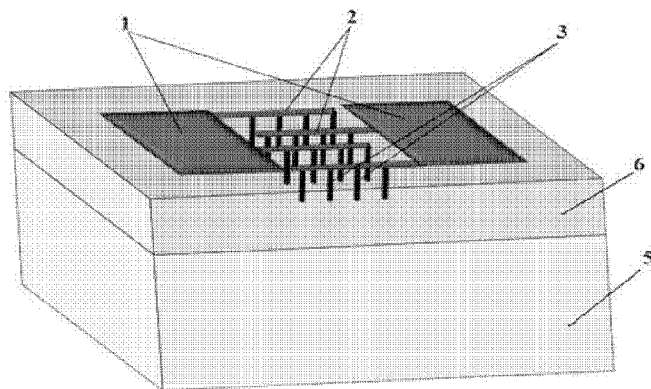


图 1

(57) Abstract: A three-dimensional electrode structure of a semiconductor device, comprising a monocrystalline diamond wafer material. The monocrystalline diamond wafer material is provided with two metal electrode pads (1) respectively used as a positive electrode and a negative electrode. Each metal electrode pad (1) is connected to one or more interdigital electrodes (2) provided at equal intervals; and each interdigital electrode (2) is connected to one or more bar-shaped metal electrodes (3). The one or more bar-shaped metal electrodes (3) are mutually parallel and provided in the monocrystalline diamond wafer material. Also disclosed are a manufacturing method and application of the three-dimensional electrode structure of the semiconductor device. By combining advantages of a flat electrode structure and a vertical electrode structure, a body electrode is introduced into the monocrystalline diamond wafer to collect an electron-hole pair excited by ultraviolet light or a particle beam efficiently and quickly, thus improving a response time and sensitivity of a detector, while avoiding a complex monocrystalline diamond wafer surface, improving a stability of the device, and improving anti-radiation performance of a particle detector.

(57) 摘要:

[见续页]



WO 2016/112773 A1



(84) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则 4.17 的声明:

— 关于申请人有权要求在先申请的优先权(细则 4.17(iii))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种半导体器件的三维电极结构, 包括单晶金刚石晶片材料, 单晶金刚石晶片材料上设置有分别作为正极和负极的两个金属电极 pad (1), 各个金属电极 pad (1) 均连接一个或多个等距间隔设置的叉指电极 (2), 各叉指电极 (2) 上均连接有一个或多个相互平行、且设置在单晶金刚石晶片材料内的柱状金属电极 (3)。还公开了一种半导体器件的三维电极结构的制备方法及其应用, 结合平面电极结构和垂直电极结构的优点, 在单晶金刚石晶片内引入体电极, 实现紫外光或者粒子束激发的电子-空穴对的高效快速收集, 提高探测器的响应时间和灵敏度; 同时可以避开单晶金刚石晶片表面的复杂性, 增加了器件的稳定性; 且提高了粒子探测器的抗辐照性能。

一种半导体器件的三维电极结构及其制备方法和应用

技术领域

- 5 本发明属于光电探测技术领域，涉及一种半导体器件的三维电极结构及其制备方法和应用。

背景技术

- 紫外光电探测技术是一种十分重要的技术，可广泛应用于空间火焰检测、烟雾报警、空间通信等领域。由于工作环境复杂恶劣，因此对探测器的
- 10 材料要求很高。金刚石作为一种宽禁带半导体，截止波长在 225 纳米，具有天然的可见光滤光性，十分适合制备日盲紫外探测器。同时，金刚石具有很多优异的性能，其热导率高，热稳定性好，化学稳定性好，具有良好的抗辐照性能。这些都使得金刚石在紫外探测器领域具有巨大的优势。

- 目前有许多人对金刚石紫外光电探测器做了研究。但是，传统金刚石紫
- 15 外光电探测器电极结构主要是共平面叉指电极结构和垂直三明治结构。对垂直结构来说，电场均匀性好，有利于光生载流子的漂移运动，使得灵敏度和收集效率较高。由于紫外光在金刚石材料中穿透深度有限，于是需要金刚石薄膜做到很薄，并且成核面缺陷密度尽可能少，这样，光生电子-空穴对在电极间的漂移过程中才会尽可能少地复合，从而使得到达电极处的载流子
- 20 多，对电荷收集效率和灵敏度贡献大。但是，对于金刚石外延薄膜和自支撑单晶金刚石膜，整体厚度较厚，对载流子的漂移和收集不利。

共平面叉指电极结构是对垂直三明治结构的改进。由于紫外光在金刚石膜中穿透深度比较小，主要集中于表面，因此在金刚石表面上制备叉指电极，

可以较好地收集表面附近的光生电子-空穴对。由于紫外光在材料中衰减迅速，穿透一定深度后，对电流的贡献很小，因此叉指电极的收集效率也是比较高的。并且叉指电极相互交错，使得探测器有效探测面积增大，对探测器的响应度有很大的贡献。但是，叉指电极的电场均匀性不如垂直结构，在紫外光功率较大时，电场分布的不均匀将会对光生电子-空穴对的收集产生影响。

粒子探测技术在核技术领域也是非常重要的技术。金刚石具有良好的抗辐照性能，在辐照下仍能保持器件的正常运行。金刚石 also 具有很高的热导率，将高能粒子实验中的热量及时有效地传到出去。同时，金刚石的介电系数小，在辐照下，器件的噪声电流不会变化，从而使得器件具有很高的分辨力，而这正是粒子探测器所需要的。

由于粒子的能量很高，与金刚石的相互作用要比紫外光的作用强烈，所以金刚石粒子探测器的结构是垂直电极结构，也就是三明治结构。早期的金刚石粒子探测器是以多晶金刚石薄膜为材料，属于硅上的异质外延，金刚石与硅的分离十分简单，采用三明治结构基本是在均匀的金金刚石薄膜中。尽管如此，受到多晶金刚石晶界、缺陷等的影响，该结构存在着载流子的收集时间长和收集效率低等问题。

随着 CVD 单晶金刚石外延生长技术的突破，对金刚石粒子探测器的研究转向了单晶金刚石膜上，既有应用于包含单晶金刚石衬底的单晶金刚石外延生长层，也有应用于自支撑单晶金刚石膜。此时，存在着和金刚石紫外光电探测器相同的问题。金刚石粒子探测器采用三明治结构时，存在有效探测面积少、载流子漂移路径长和收集效率低等问题。采用共平面结构时，由于高能粒子的能量高，穿透深度大，电场的均匀分布对器件性能影响也大。

发明内容

本发明的目的是提供一种半导体器件的三维电极结构，以解决采用垂直三明治电极结构时有效探测面积小、载流子收集时间长和收集效率低，采用共平面叉指电极结构时电场均匀性不佳的问题。

5 本发明半导体器件的三维电极结构，包括单晶金刚石晶片材料，单晶金刚石晶片材料上设置有分别作为正极和负极的两个金属电极 pad，各个金属电极 pad 均连接一个或多个等距间隔设置的叉指电极，各叉指电极上均连接有一个或多个相互平行、且设置在单晶金刚石晶片材料内的柱状金属电极。

进一步的，柱状金属电极贯穿单晶金刚石晶片材料设置、或仅延伸一定
10 深度设置。

进一步的，柱状金属电极为竖直设置或者倾斜设置。

进一步的，各叉指电极为平行电极或环形电极，且各叉指电极位于单晶金刚石晶片材料的表面或者内部。

进一步的，金属电极 pad 和叉指电极之间为桥接方式或者直接覆盖式连
15 接。

进一步的，金属电极 pad、叉指电极和柱状金属电极的材质相同或不同，但均要求为能与金刚石形成欧姆接触的金属或者能与金刚石形成导电碳化物的金属。

进一步的，单晶金刚石晶片材料为自支撑单晶金刚石膜，或者包含单晶
20 金刚石衬底的单晶金刚石外延层。

进一步的，单晶金刚石晶片材料的形状为矩形、圆形、椭圆形或者其他形状，两个金属电极 pad 设置在单晶金刚石晶片材料的侧面、顶面或底面、且两个金属电极 pad 之间为共面或异面设置。

进一步的，各柱状金属电极与单晶金刚石晶片材料之间通过退火形成欧姆接触。

本发明上述半导体器件的三维电极结构适用于金刚石紫外光电探测器或者粒子探测器。

- 5 本发明上述半导体器件的三维电极结构的制备方法，包括以下步骤：
- 步骤 1、采用金刚石刻蚀技术在单晶金刚石晶片材料上刻蚀三维孔阵列；
- 步骤 2、用金属填充各个三维孔形成柱状金属电极，进行退火处理；
- 步骤 3、再将对应的三维孔通过叉指电极与金属电极 pad 连接。

- 本发明的有益效果是，结合平面电极结构和垂直电极结构的优点，在自
- 10 支撑单晶金刚石膜，或者包含单晶金刚石晶片衬底的单晶金刚石外延层内引入体电极，实现紫外光或者粒子束激发的电子-空穴对的高效、快速收集，从而提高探测器的响应时间和灵敏度。同时，采用体电极结构，可以避开单晶金刚石晶片表面的复杂性，可以增加器件的稳定性。并且，对粒子探测器来说，还能够提高抗辐照性能。

15 附图说明

图 1 是本发明一种半导体器件的三维电极结构材料为单晶金刚石衬底与其外延生长薄膜的结构示意图；

图 2 是本发明一种半导体器件的三维电极结构衬底为自支撑式单晶金刚石膜的结构示意图；

- 20 图 3 是图 1 中金属电极 pad 为异面设置的结构示意图；
- 图 4 是图 2 中金属电极 pad 为异面设置的结构示意图；
- 图 5 是图 2 中金属电极 pad 设置在侧面的结构示意图；
- 图 6 是图 1 中柱状金属电极倾斜设置的结构示意图；

图 7 是本发明叉指电极环形的结构示意图；

图 8(a) 和图 8(b) 是本发明一种半导体器件的三维电极结构制备方法中三维孔阵列方法的示意图；

图 9(a) 至图 9(d) 是本发明一种半导体器件的三维电极结构制备方法中三种
5 三维孔穿入深度的示意图；

图 10(a) 至图 10(c) 是本发明一种半导体器件的三维电极结构制备方法中蒸发镀膜金属填充与表面电极形成的示意图；

图 11(a) 至图 11(d) 是本发明一种半导体器件的三维电极结构制备方法中熔融金属流填充与表面电极形成的示意图。

10 图中，1.金属电极 pad，2.叉指电极，3.柱状金属电极，4.自支撑式单晶金刚石膜，5.单晶金刚石衬底，6.单晶金刚石外延生长薄膜，7.填充金属，8.熔融金属流，9.氧等离子体，10.掩膜。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。

15 本发明提供了一种半导体器件的三维电极结构，包括单晶金刚石晶片材料，单晶金刚石晶片材料上设置有分别作为正极和负极的两个金属电极 pad1，各个金属电极 pad1 均连接一个或多个等距间隔设置的叉指电极 2，各叉指电极 2 上均连接有一个或多个相互平行、且设置在单晶金刚石晶片材料内的柱状金属电极 3，各柱状金属电极 3 与单晶金刚石晶片材料之间通过退
20 火形成欧姆接触。

本发明在单晶金刚石晶片材料上，通过等离子体刻蚀技术，加工出三维平行孔阵列，然后利用金属填充孔阵列，形成三维体电极。在单晶金刚石晶片表面或者体内，用叉指电极将这些三维体电极相互连接，构成一种半导体

器件的三维电极结构。

单晶金刚石晶片材料为自支撑单晶金刚石膜，或者包含单晶金刚石衬底的单晶金刚石外延薄膜。单晶金刚石晶片材料的形状为矩形、圆形、椭圆形或者其他形状。

- 5 其中，柱状金属电极 3 贯穿单晶金刚石晶片材料设置、或仅延伸一定深度设置。柱状金属电极 3 的位置，可以仅在外延层内，或延伸到衬底中，还可以贯穿衬底。同样的，也可以在自支撑金刚石膜内，也可以贯穿自支撑金刚石膜。

- 10 柱状金属电极 3 为竖直设置或者倾斜设置，柱状金属电极 3 不仅限于垂直单晶金刚石晶片材料表面，也可以是与单晶金刚石晶片材料表面形成一定的角度倾斜设置，但要满足柱状金属电极 3 之间相互平行。柱状金属电极 3 的形状可以是圆柱、方柱等任意形状。

- 15 叉指电极 2 为平行电极或者环形电极；并且各叉指电极 2 位于单晶金刚石晶片材料的表面或者内部。即叉指电极 2 还可以做到衬底体内，叉指电极 2 可以在外延单晶金刚石层内实现，也能应用于多种晶片形状、多种金属电极 pad 方式。只需保证叉指电极 2 的正负极之间不接触，且叉指电极 2 之间必须等间距设置，以保证电场的均匀性。叉指电极 2 之间可以不在同一个平面内。

- 20 叉指电极 2 与柱状金属电极 3 是一一对应的关系，一排柱状金属电极 3 或者一组环形排列的柱状金属电极阵列，必须用一条叉指电极 2 连接。柱状金属电极 3 阵列是正负相互间隔的复式阵列，数量至少为两个平行或者两个同心圆环阵列，以形成正负极。

金属电极 pad1、叉指电极 2 和柱状金属电极 3 的材质相同或不同，但均

要求为能与金刚石形成欧姆接触的金属或者能与金刚石形成导电碳化物的金属。具体的，该金属材质必须满足以下两个条之一：1、能与金刚石形成欧姆接触，如 Pd，Au；2、能与金刚石形成导电碳化物，如 Ti，W。一般来说，Pd 与金刚石黏附性好，Ti 与金刚石易形成良好导电能力的钛化碳，

5 为比较常用的金属。

两个金属电极 pad1 可以设置在单晶金刚石晶片材料的侧面、顶面或底面、且两个金属电极 pad1 之间可以为共面或异面设置。具体的，金属电极 pad1 可以位于单晶金刚石晶片材料的任何位置，在侧面、底面或者结合上表面和下表面布置等，金属电极 pad1 的位置并不仅限于此，可以根据具体情况选择需要的设置位置，只要能够保证将金属电极 pad1 与叉指电极 2 连接在一起就行。金属电极 pad1 是为了将同属于正极或者负极的叉指电极 2 连接，一般有两个即可，分正、负极，但是其形状、位置无固定，可以有多种形式，例如圆形、矩形、多边形等，可以在上下表面，也可以在侧面，还可以上下表面与侧面结合。

15 金属电极 pad1 与叉指电极 2 的连接可以是同属于正极或者负极的叉指电极 2 的一端直接覆盖连接在一起，也可以是桥接，即同属正极或者负极的相邻两指电极之间采用桥接方式，跨过不同极的叉指电极条，需要保证正负极之间不接通。

实施例 1

20 如图 1，一种半导体器件的三维电极结构，以矩形生长有单晶金刚石外延生长薄膜 6 的单晶金刚石衬底 5 为材料，在该外延薄膜表面上设置正极和负极的两个金属电极 pad1，两个金属电极 pad1 均连接两个等距间隔竖直设置的叉指电极 2，各叉指电极 2 上均连接有多个相互平行、且设置在单晶金

金刚石晶片内的柱状金属电极 3。叉指电极 2 为直条形状平行电极，柱状金属电极 3 为竖直设置。

实施例 2

如图 2，一种半导体器件的三维电极结构，以矩形自支撑单晶金刚石膜 4 为单晶金刚石晶片材料，在该自支撑单晶金刚石膜 4 同一表面上设置分别作为正极和负极的两个金属电极 pad1，两个金属电极 pad1 均连接多个等距间隔设置的叉指电极 2，各叉指电极 2 上均连接有多个相互平行、且设置在单晶金刚石晶片内的柱状金属电极 3。叉指电极 2 为直条形状平行电极，柱状金属电极 3 为竖直设置。

10 实施例 3

如图 3，一种半导体器件的三维电极结构，以生长有单晶金刚石外延生长薄膜 6 的单晶金刚石衬底 5 为材料，在该外延薄膜上表面和下表面异面设置正极和负极金属电极 pad1，两个金属电极 pad1 均连接两个等距间隔设置的叉指电极 2，各叉指电极 2 上均连接有多个相互平行、且设置在单晶金刚石晶片内的柱状金属电极 3。

实施例 4

如图 4，一种半导体器件的三维电极结构，以自支撑单晶金刚石膜 4 为材料，在该材料上表面和下表面异面设置正极和负极金属电极 pad1，两个金属电极 pad1 均连接两个等距间隔设置的叉指电极 2，各叉指电极 2 上均连接多个相互平行、且设置在单晶金刚石晶片内的柱状金属电极 3。

实施例 5

如图 5，一种半导体器件的三维电极结构，以自支撑单晶金刚石膜 4 为材料，在该材料的相对两个侧面上异面设置正极和负极金属电极 pad1，两

个金属电极 pad1 均连接两个等距间隔设置的叉指电极 2, 叉指电极 2 位于自支撑单晶金刚石膜 4 的另外两个相对表面上, 各叉指电极 2 上均连接有多个相互平行、且设置在单晶金刚石晶片内的柱状金属电极 3。

实施例 6

5 如图 6, 一种半导体器件的三维电极结构, 以生长有单晶金刚石外延生长薄膜 6 的单晶金刚石材料 5 为材料, 在该单晶金刚石外延生长薄膜 6 表面上设置正极和负极的两个金属电极 pad1, 两个金属电极 pad1 均连接两个等距间隔设置的叉指电极 2, 各叉指电极 2 上均连接有多个倾斜设置、相互平行、且设置在单晶金刚石晶片内的柱状金属电极 3。

10 实施例 7

如图 7, 一种半导体器件的三维电极结构, 以单晶金刚石衬底的单晶金刚石外延薄膜 6 为材料, 在该晶片表面上设置正极和负极的两个金属电极 pad1, 两个金属电极 pad1 均连接多个等距间隔设置的环形叉指电极 2, 各叉指电极 2 上均连接有多个相互平行、且设置在单晶金刚石晶片内的柱状金属
15 电极 3。

本发明上述半导体器件的三维电极结构应用于以单晶金刚石晶片为材料的紫外光电探测器和粒子探测器上。其中, 单晶金刚石晶片为材料包括包含单晶金刚石衬底的单晶金刚石外延层和自支撑单晶金刚石膜。外延层为利用微波等离子体化学气相沉积 MPCVD 同质外延单晶金刚石薄膜, 衬底是单
20 晶金刚石的 Ib 或者 IIa 类型, Ib 和 IIa 是单晶金刚石的类型标记, 取决于晶体内杂质含量。

本发明还提供了上述半导体器件的三维电极结构的制备方法, 包括以下步骤:

步骤 1、采用金刚石刻蚀技术在单晶金刚石晶片材料上刻蚀三维孔阵列；

步骤 2、用金属填充各个三维孔形成柱状金属电极 3，进行退火处理；

步骤 3、再将对应的三维孔通过叉指电极 2 与金属电极 pad 连接。

在单晶金刚石晶片即包含单晶金刚石衬底的单晶金刚石外延层或者自
5 支撑金刚石膜上，通过氧等离子体刻蚀出三维微通道阵列结构，然后采用电阻蒸发镀膜技术、磁控溅射镀膜技术或者电子束蒸发镀膜技术、熔融金属流
回填技术、以及纳米金属粉末填充后的熔融填充技术等，将金属填满小孔，
并形成柱状金属电极 3。然后通过退火工艺，改善金属与金刚石界面性能，
形成良好的欧姆接触。采用标准光刻工艺，加工出叉指电极 2 和金属电极
10 pad1，将柱状金属电极 3 连接，形成一种半导体器件的三维电极结构。

一、制备单晶金刚石晶片材料

制备外延单晶金刚石晶片的具体方法为，单晶金刚石外延层是通过
MPCVD 技术，在单晶金刚石 I b 和 II a 衬底上生长得到的。对于紫外光电探
测器，厚度可以做到很薄，约几百纳米。对于粒子探测器，外延层的厚度需
15 要几十微米，甚至几百微米。由于初生长好的外延金刚石层表面是氢终端，
不适合制备探测器，因此需要对金刚石样品进行处理，采用典型的浓酸处理
或者紫外光结合臭氧的处理方法都能去除掉表面的氢终端。

制备自支撑单晶金刚石膜晶片的具体方法为，通过 MPCVD 技术，先在
单晶金刚石 I b 和 II a 衬底上生长一层单晶金刚石厚膜，厚度为数百微米，
20 然后采用离子注入或者飞秒激光加上电化学腐蚀方法剥离下来，形成自支撑
单晶金刚石膜。经过研磨，使该自支撑单晶金刚石膜表面平整。并且也通过
浓酸处理，去除氢终端和非金刚石相。

二、三维孔阵列的形成

三维孔阵列的加工需要用到金刚石的刻蚀技术。金刚石的刻蚀一般是在氧等离子体中刻蚀,并可以在气氛中添入四氟化碳,提高刻蚀速率和光滑度。关于该刻蚀技术,有 RIE 刻蚀技术, ICP 刻蚀技术等。这里以氧等离子体为例。在单晶金刚石晶片上,利用光刻技术形成圆形阵列图案,掩膜为光刻胶,然后用 RIE 技术,在氧等离子体环境下刻蚀出三维通道阵列,刻蚀功率为 100W-300W,氧气流量 30-60sccm,压强为 4-10Pa。通过控制刻蚀时间,可以刻蚀出不同深度的小孔。仅对单晶金刚石外延层来说,小孔的穿入深度可以是在外延层中、穿透外延层到衬底中和贯穿衬底三种。对于自支撑单晶金刚石膜,则包含自支撑金刚石膜内和贯穿自支撑金刚石膜两种。

加工示意图如图 8 所示,小孔在外延层中穿入深度如图 9 所示。图 8 中,图 8(a) 和图 8(b) 是三维孔阵列方法的示意图。图 9 中,图 9(a) 是位于外延层内的小孔,图 9(b) 是穿透到衬底内的小孔,图 9(c) 是通孔,图 9(d) 是小孔阵列的俯视图。

三、金属填充和电极连接

金属填充可以直接采用蒸发镀膜的方式或者溅射镀膜的方式,或者利用熔融金属流填充以及粉末填充后的熔融填充方法。

利用蒸发镀膜的方式,是同时完成金属填充和电极连接的方式。在刻蚀出小孔阵列后,去掉光刻胶,然后通过套刻,形成连接小孔的叉指电极图案。接着蒸镀上金属,既能填充小孔,又能完成叉指连接电极的制备。图 10 展示了蒸发镀膜的电极填充和连接过程。图 10 中,图 10(a) 是金属薄膜淀积示意图,图 10(b) 是去除光刻胶示意图,图 10(c) 是表面电极连接示意图。

利用熔融金属流填充以及粉末填充后的熔融填充法则是将金属填充和叉指连接电极分开制作。对于熔融金属流来说,在刻蚀出小孔阵列后,放在

真空环境中，直接将熔融金属流敷于整个金刚石表面，实现小孔的填充。对于粉末填充后熔融填充法，则是先将纳米金属颗粒填充到小孔中，然后加热，使金属颗粒熔化，形成熔融金属流，实现填充。填充结束之后，金属柱状电极的顶端与金刚石表面是处于同一个平面的，相互之间独立，这就需要再制备叉指电极将其连接。叉指电极的制备就与蒸发镀膜方式中类似，光刻出图形，蒸发上金属，再去掉光刻胶，电极就制备完成。图 11 展示了熔融金属回填法的电极填充和连接过程。当小孔贯穿金刚石衬底时，电极的连接还可以采用异面叉指电极来连接。图 11 中，图 11(a)是熔融金属流填充示意图，图 11(b) 是去掉掩膜并平坦化处理的示意图，图 11(c) 是表面金属薄膜制备示意图，图 11(d) 是去掉掩膜电极成型的示意图。

四、金属—金刚石界面退火

对于金刚石紫外光电探测器和粒子探测器来说，金属与金刚石接触一般采用的是欧姆接触。为了形成良好的欧姆接触，有两种方法。

第一种是选择功函数与金刚石差距较小的金属，比如 Au 和 Pd，完成金属的填充后，对器件进行退火处理，改善金属与金刚石的接触性能。

第二种是利用金属与 C 形成碳化物，如 Ti。在熔融金属流和粉末填充后的熔融填充法中，金属为纳米金属颗粒，包含纳米铜、纳米锡和纳米碳等。完成金属填充后，仍是对器件进行退火处理，使得 Ti 与 C 界面形成碳化钛，从而实现欧姆接触。

20 实施例 8

将一种半导体器件的三维电极结构应用在探测器中：

衬底选用高温高压法制成的 Ib 单晶金刚石，尺寸为 $3\times 3\times 0.3\text{mm}$ 。通过 MPCVD 法，在衬底上外延生长一层厚度为 $1\mu\text{m}$ 的单晶金刚石薄膜。对外延

层进行 CL、拉曼测试和光学显微镜表面观察，CL 谱显示在 235 纳米附近有明显峰值且无其他杂散峰，拉曼半高宽为 2 cm^{-1} 左右，表面平整，表示单晶金刚石薄膜质量高。

在外延层生长结束后，通过光刻技术，在金刚石表面形成圆孔阵列，掩膜直接利用光刻胶，不再额外的用金属做掩膜。圆孔宽直径为 $10\mu\text{m}$ ，孔中心间距为 $40\mu\text{m}$ 。将光刻好的金刚石样品置于反应离子刻蚀机中，利用氧等离子体刻蚀。氧气流量为 40 sccm ，刻蚀功率为 200 W ，刻蚀时间为 3 min 。刻蚀结束后，去掉光刻胶。对小孔的深度测试为 120 nm 。

接下来，去掉光刻胶，再次利用光刻技术，重新在金刚石表面形成叉指电极图案。叉指电极指宽为 $20\mu\text{m}$ ，指间距为 $20\mu\text{m}$ ，指长为 $600\mu\text{m}$ ，叉指电极条覆盖所有的小孔。采用电子束蒸发的方式镀金属，分别为 $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$ ，各层厚度分别为 20 nm 、 160 nm 、 120 nm 、 120 nm 。蒸镀结束后，去除光刻胶，表面电极结构完整。

最后，对样品进行退火以形成欧姆接触。在 Ar 气气氛、 600°C 条件下退火 30 min 。自然冷却后，对样品进行电压-电流特性测试，所得特性为欧姆接触特性。

采用三维柱状体电极结构可以结合共平面叉指电极结构灵敏度高和垂直电极结构电场均匀性好的优点。在单晶金刚石膜体内引入电场，可以将原本不均匀的表面电场向体内均匀推进，实现载流子的侧向收集。此时，可以将电极间距做得比较小，从而类似于垂直结构。紫外光入射到金刚石的路径中，光生电子-空穴对可以迅速被体内电极收集，并且收集到的电子-空穴对较多，可以提高探测器的响应度和响应时间。利用等离子体刻蚀技术刻蚀出三维孔阵列，再利用金属回填，并采用叉指电极相互连接，可以制备出比较

好的三维柱状金属电极结构。

辐射阻抗是粒子探测器的一个重要参数。金刚石虽然有优异的抗辐照性能，但是应用于粒子探测器时，随着时间的延长，由于辐照损伤和极化等现象的存在，还是会使得收集效率也会下降。因此，可以采用三维电极结构，

- 5 缩短载流子收集路径，增大电场对器件的控制能力，从而改善器件的性能。

对于柱状金属电极的制作，可以有粒子束注入、激光加工等方式。粒子束注入方式是在电极部分掺杂，实现导电能力，但是金刚石很难实现高掺杂，并且成本很高，加之掺杂原子也会破坏金刚石晶格，在粒子探测器中，其电极会受到影响。对于激光加工来说，是将电极部分变成石墨后，石墨与

- 10 金刚石的晶格常数相差较大，在两者的界面处会产生应力，这对器件性能也会有影响。因此，采用等离子选择性刻蚀出小孔，并利用金属回填，形成金属柱状电极，然后退火改善金属与金刚石的接触特性，是一种比较好的电极制作方式。

1.一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,包括单晶金刚石晶片材料,所述单晶金刚石晶片材料上设置有分别作为正极和负极的两个金属电极 pad (1),所述的各个金属电极 pad (1) 均连接一个或多个等距间隔设置的
5 叉指电极 (2),所述各叉指电极 (2) 上均连接有一个或多个相互平行、且设置在所述单晶金刚石晶片材料内的柱状金属电极 (3)。

2.如权利要求 1 所述的一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,所述柱状金属电极 (3) 贯穿所述单晶金刚石晶片材料设置、或仅延伸一定深度设置。

10 3. 如权利要求 1 或 2 所述的一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,所述柱状金属电极 (3) 为竖直设置或者倾斜设置。

4.如权利要求 1 或 2 所述的一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,所述各叉指电极 (2) 为平行电极或环形电极,且所述各叉指电极 (2) 位于所述单晶金刚石晶片材料的表面或者内部。

15 5. 如权利要求 4 所述的一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,所述金属电极 pad (1) 和叉指电极 (2) 之间为桥接方式或者直接覆盖式连接。

6. 如权利要求 1 或 2 所述的一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,所述金属电极 pad (1)、叉指电极 (2) 和柱状金属电极 (3) 的材质相同或不同,但均要求为能与金刚石形成欧姆接触的金属或者能与金刚石形成
20 导电碳化物的金属。

7. 如权利要求 1 或 2 所述的一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,所述单晶金刚石晶片材料为自支撑单晶金刚石膜,或者包含单晶金刚石

晶片衬底的单晶金刚石外延层。

8. 如权利要求 1 或 2 所述的一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,所述单晶金刚石晶片材料的横截面为矩形、圆形、椭圆形或者其他形状,所述两个金属电极 pad (1) 设置在所述单晶金刚石晶片材料的侧面、顶面或
- 5 底面、且两个金属电极 pad (1) 之间为共面或异面设置。

9. 如权利要求 1 或 2 所述的一种半导体器件的三维电极结构,其特征在于,所述各柱状金属电极 (3) 与单晶金刚石晶片材料之间通过退火形成欧姆接触。

10. 如权利要求 1 至 9 中任意一项所述的一种半导体器件的三维电极结构, 其特征在于, 适用于金刚石紫外光电探测器或者粒子探测器。

11.如权利要求 1 至 10 中任意一项所述的一种半导体器件的三维电极结构的制备方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

步骤 1、采用金刚石刻蚀技术在单晶金刚石晶片材料上刻蚀三维孔阵列;

- 步骤 2、用金属填充所述各个三维孔形成柱状金属电极 (3), 进行退火
- 15 处理;

步骤 3、再将对应的三维孔通过叉指电极 (2) 与金属电极 pad (1) 连接。

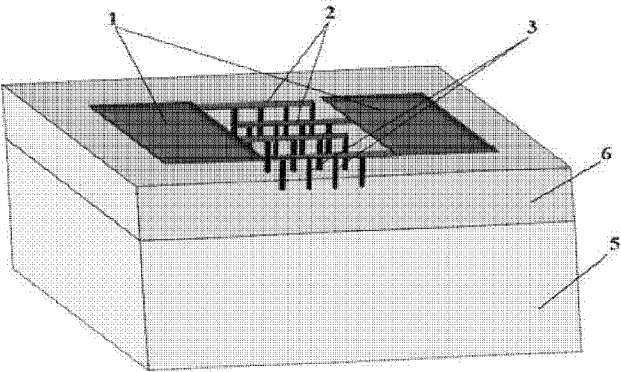


图 1

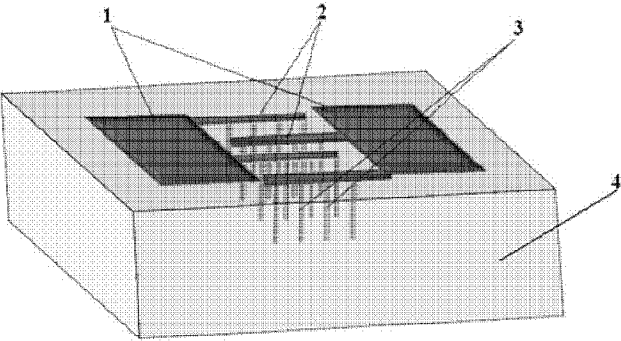


图 2

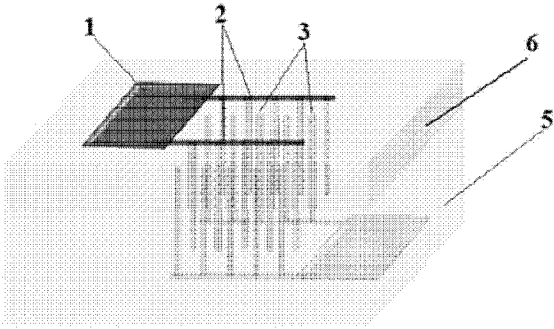


图 3

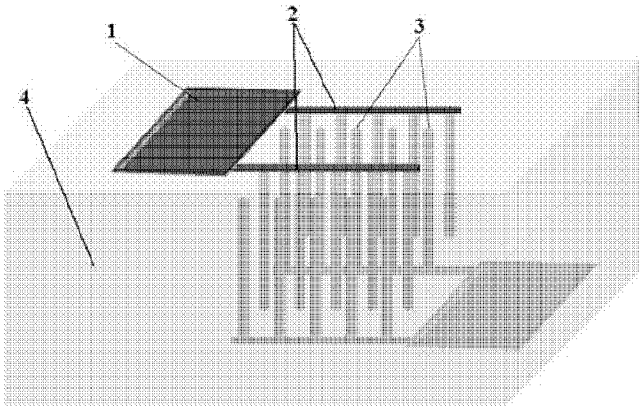


图 4

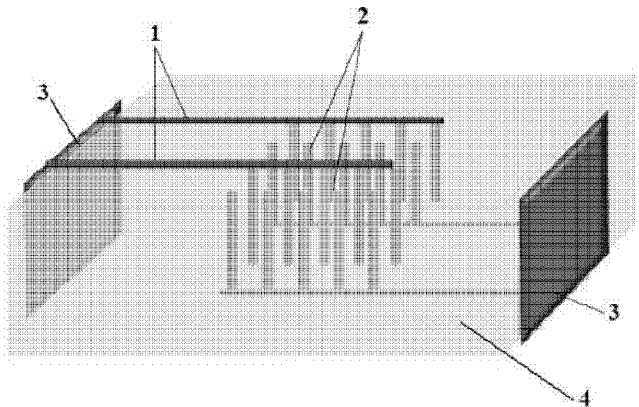


图 5

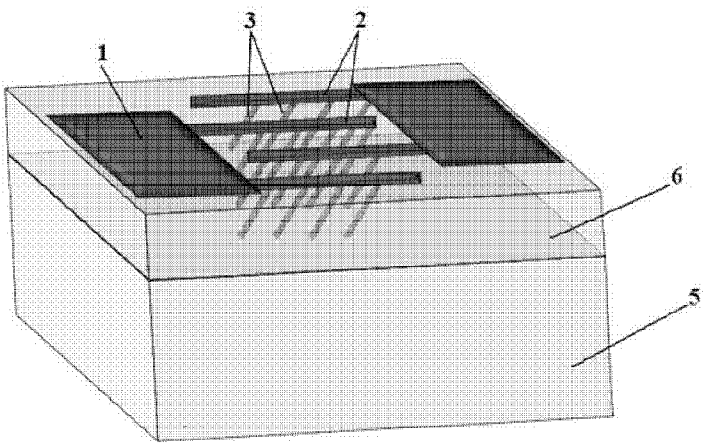


图 6

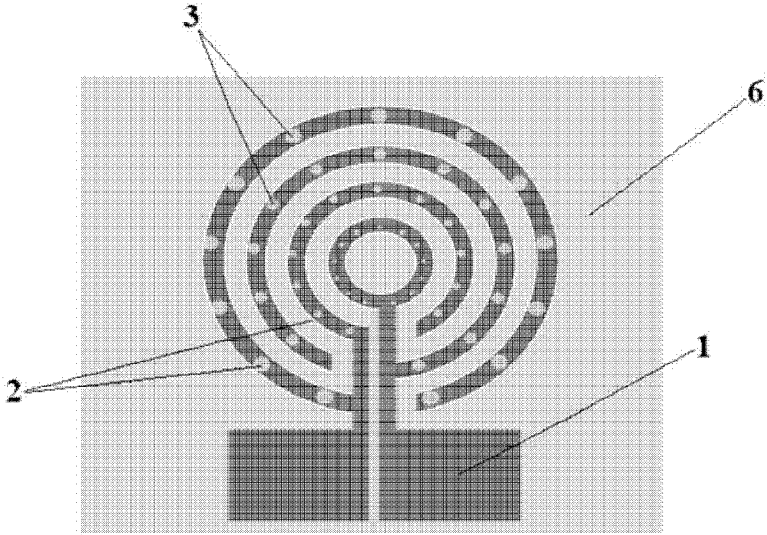


图 7

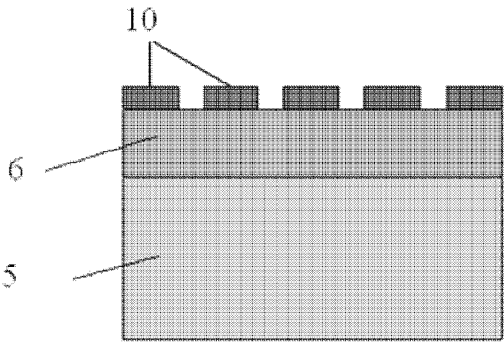


图 8(a)

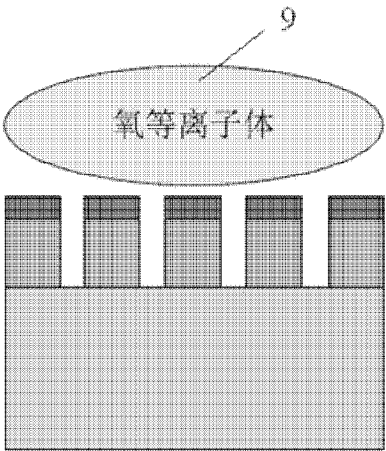


图 8(b)

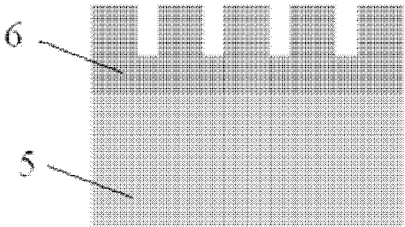


图 9(a)

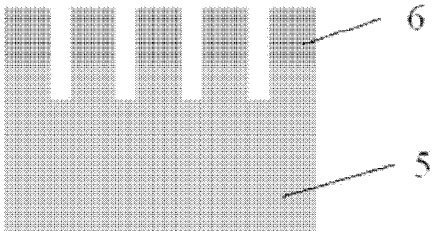


图 9(b)

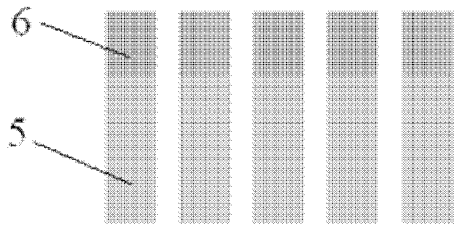


图 9(c)

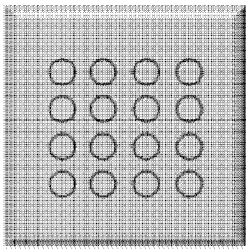


图 9(d)

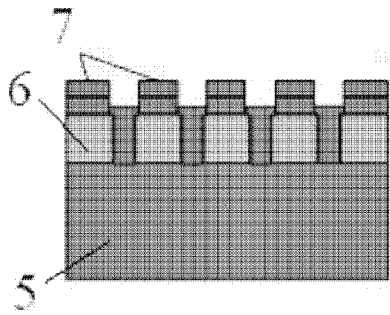


图 10(a)

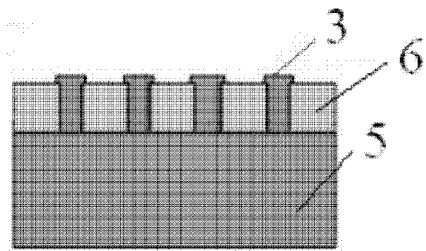


图 10(b)

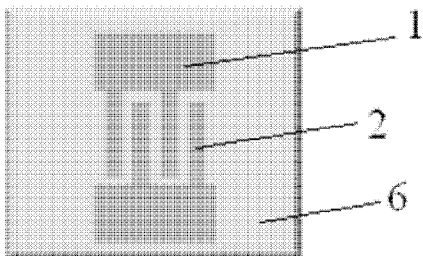


图 10(c)

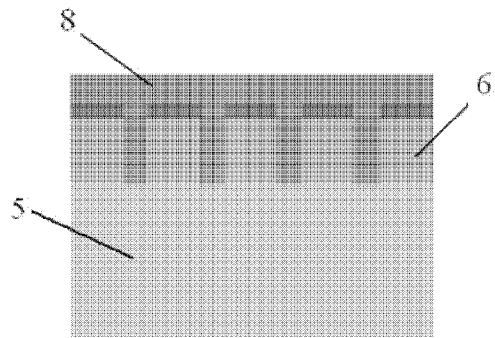


图 11(a)

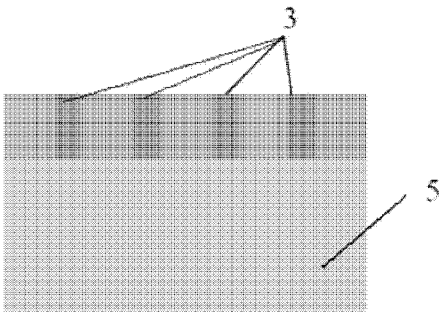


图 11(b)

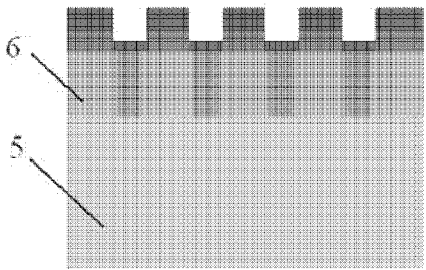


图 11(c)

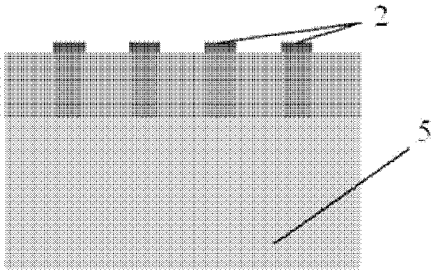


图 11(d)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2015/098138

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L 31/0224 (2006.01) i; H01L 31/18 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L; G01T

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CPRSABS; CNABS; CNTXT; VEN; USTXT: UV, ultraviolet, radiation, detect, sense, diamond, electrode

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 104752532 A (WANG, Hongxing), 01 July 2015 (01.07.2015), description, paragraphs [0036]-[0089], figures 1-11(d), and claims 1-11	1-11
PX	CN 204424268 U (WANG, Hongxing), 24 June 2015 (24.06.2015), description, paragraphs [0031]-[0084], figures 1-11(d), and claims 1-9	1-11
X	US 2010155615 A1 (DIAMOND DETECTORS LTD.), 24 June 2010 (24.06.2010), description, paragraphs [0052]-[0107], and figures 1-8	1-11
A	US 6204087 B1 (UNIV HAWAI I), 20 March 2001 (20.03.2001), the whole document	1-11

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 20 March 2016 (20.03.2016)	Date of mailing of the international search report 31 March 2016 (31.03.2016)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer WANG, Xiaofeng Telephone No.: (86-10) 62089918

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2015/098138

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104752532 A	01 July 2015	None	
CN 204424268 U	24 June 2015	None	
US 2010155615 A1	24 June 2010	EP 2087377 A2	12 August 2009
		WO 2008059428 A3	18 December 2008
		WO 2008059428 A2	22 May 2008
		JP 2010509766 A	25 March 2010
		US 8242455 B2	14 August 2012
US 6204087 B1	20 March 2001	US 5889313 A	30 March 1999

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2015/098138

A. 主题的分类

H01L 31/0224(2006.01)i; H01L 31/18(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H01L; G01T

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CPRSABS; CNABS; CNTXT; VEN; USTXT: 紫外, 辐射, 探测, 检测, 传感, 金刚石, 电极; UV, ultraviolet, radiation, detect, sense, diamond, electrode

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 104752532 A (王宏兴) 2015年 7月 1日 (2015 - 07 - 01) 说明书第[0036]-[0089]段, 附图1-11(d), 权利要求第1-11项	1-11
PX	CN 204424268 U (王宏兴) 2015年 6月 24日 (2015 - 06 - 24) 说明书第[0031]-[0084]段, 附图1-11(d), 权利要求第1-9项	1-11
X	US 2010155615 A1 (DIAMOND DETECTORS LTD) 2010年 6月 24日 (2010 - 06 - 24) 说明书第[0052]-[0107]段, 附图1-8	1-11
A	US 6204087 B1 (UNIV HAWAI I) 2001年 3月 20日 (2001 - 03 - 20) 全文	1-11

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2016年 3月 20日

国际检索报告邮寄日期

2016年 3月 31日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

王晓峰

电话号码 (86-10)62089918

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2015/098138

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	104752532	A	2015年 7月 1日	无	
CN	204424268	U	2015年 6月 24日	无	
US	2010155615	A1	2010年 6月 24日	EP	2087377 A2 2009年 8月 12日
				WO	2008059428 A3 2008年 12月 18日
				WO	2008059428 A2 2008年 5月 22日
				JP	2010509766 A 2010年 3月 25日
				US	8242455 B2 2012年 8月 14日
US	6204087	B1	2001年 3月 20日	US	5889313 A 1999年 3月 30日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)