



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114166803 B

(45) 授权公告日 2024.08.20

(21) 申请号 202111373155.6

(22) 申请日 2021.11.19

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114166803 A

(43) 申请公布日 2022.03.11

(73) 专利权人 南京大学
地址 210093 江苏省南京市鼓楼区汉口路
22号

(72) 发明人 汤琨 赵耕右 朱顺明 叶建东
顾书林

(74) 专利代理机构 合肥昕华汇联专利代理事务
所(普通合伙) 34176
专利代理师 崔雅丽

(51) Int. Cl.

G01N 21/63 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 103383980 A, 2013.11.06

CN 112331724 A, 2021.02.05

审查员 谢筱婷

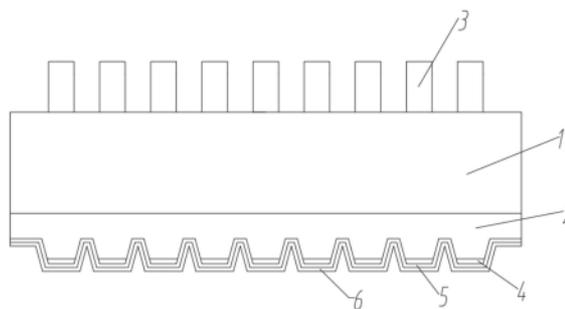
权利要求书1页 说明书6页 附图3页

(54) 发明名称

金刚石氮-空位色心阵列传感器

(57) 摘要

本发明公开了金刚石氮-空位色心阵列传感器,涉及一种金刚石半导体传感器,包括传感器、金刚石衬底、金刚石外延层、NV色心层、纳米柱阵列结构和纳米柱阵列天线,所述传感器底端具有金刚石衬底,在所述金刚石衬底正面上有一层金刚石外延层,所述金刚石外延层是n型半导体,所述金刚石外延层表面存在采用原位MPCVD生长方式得到NV色心层,所述传感器NV色心层中NV色心的取向得到了择优取向,其中NV色心层具有10nm和50nm之间的厚度,所述金刚石外延层即传感接触层结构为纳米柱阵列结构,所述传感接触层纳米柱包括金刚石纳米柱、介质层和金属层,所述介质层淀积在金刚石纳米柱表面,所述金属层淀积在介质层表面。



1. 金刚石氮-空位色心阵列传感器,其特征在于,包括:
传感器;
金刚石衬底,所述传感器底端具有金刚石衬底;
金刚石外延层,在所述金刚石衬底正面上有一层金刚石外延层,所述金刚石外延层是n型半导体;
NV色心层,所述金刚石外延层表面存在采用原位MPCVD生长方式得到NV色心层,所述传感器NV色心层中NV色心的取向得到了择优取向,其中NV色心层具有10nm和50nm之间的厚度;
纳米柱阵列结构,所述金刚石外延层即传感接触层结构为纳米柱阵列结构,所述纳米柱阵列结构包括金刚石纳米柱、介质层和金属层,所述介质层淀积在金刚石纳米柱表面,所述金属层淀积在介质层表面,所述纳米柱阵列结构依靠ICP刻蚀金刚石得到,NV色心层位于纳米柱表面;
纳米柱阵列天线,所述金刚石衬底背面具有增强读出的纳米柱阵列天线。
2. 根据权利要求1所述的金刚石氮-空位色心阵列传感器,其特征在于,所述传感器的金刚石外延层、介质层、金属层和增强读出纳米柱阵列天线均由CVD方式获得。
3. 根据权利要求1至2任一所述的金刚石氮-空位色心阵列传感器,其特征在于,在传感器金属层边缘安置电极,在传感器工作时加入偏置电压,所述传感器的介质层是 Al_2O_3 层、 BaO 层、 BN 层或 SiO_2 层,所述传感器的金属层是 Al 层、 Fe 层、 Ag 层或 Zn 层,所述传感器的纳米柱阵列结构和增强读出纳米柱阵列天线的结构至少具有圆台、圆柱、锥体其中之一的形式,所述传感器的纳米柱阵列结构和增强读出纳米柱阵列天线均齐平的并排布置,且分别具有相同的高度、直径和周期。
4. 根据权利要求1所述的金刚石氮-空位色心阵列传感器,其特征在于,所述传感接触层结构至少具有金刚石纳米柱。
5. 根据权利要求4所述的金刚石氮-空位色心阵列传感器,其特征在于,所述传感器的增强读出纳米柱是 GaN 纳米柱、 ZnO 纳米柱或金刚石纳米柱。
6. 根据权利要求3所述的金刚石氮-空位色心阵列传感器,其特征在于,所述传感器的介质层和金属层具有30nm和100nm之间的厚度。
7. 根据权利要求5所述的金刚石氮-空位色心阵列传感器,增强读出纳米柱表面是暴露的。
8. 根据权利要求3所述的金刚石氮-空位色心阵列传感器,传感器的纳米柱阵列结构和增强读出纳米柱阵列天线具有至少100nm的直径和至少100nm的间隔。

金刚石氮-空位色心阵列传感器

技术领域

[0001] 本发明涉及一种金刚石半导体传感器,具体是金刚石氮-空位色心阵列传感器。

背景技术

[0002] 传感器在生产生活中的地位日趋重要,我们可以通过传感器观测到的物理量来反推出其数值和方向,在微纳尺度下对光、热、电、磁和力等物理量的获取则对传感器的灵敏度和空间分辨率提出了更高的要求。第三代半导体材料例如氮化镓、碳化硅和金刚石等都是国际上研究的热点,但其中金刚石表现出了更优越的性能。金刚石具有高硬度和高导热的特点,同时有5.5eV的超宽禁带以及非常高的电子和空穴迁移率。

[0003] 由于可以较为容易地操控和读出金刚石材料中NV色心的状态,并使其状态保持较长时间,故含有NV色心的金刚石材料可以作为单光子发射源、探测器和基于色心自旋的量子传感器。单个或多个NV色心自旋的尺寸处于纳米量级,且对外界多种物理量之间耦合作用的扰动有明显响应,因此可以利用这种响应机制来实现纳米量级的空间分辨率和极高的灵敏度。

[0004] 金刚石中NV色心的自旋状态可以利用微波信号扫描+光学探测磁共振(ODMR)手段调控和读取,传统ODMR测试为正向激发和正向探测,NV色心位于金刚石与空气的界面处。但在需要接触探测时,待测物无法保证光学透明,同时也在镜头和NV色心之间形成了额外的光学层,使得探测光读出效率更加复杂。这些都导致传统的ODMR测试,即正向激发正向探测的配置具有很大局限性。

[0005] 金刚石纳米阵列结构也是金刚石重要应用的研究方向之一,相关结构有近年来兴起的金刚石纳米锥、纳米线、纳米棒等结构。金刚石的较大折射率抑制了近表面光子发射的有效光输出耦合,将微纳结构技术应用于金刚石表面之后,纳米柱阵列可以作为光子波导,进而显著提高外部接收率。CN 104724664 A公布了这种正向单晶金刚石纳米柱阵列结构的制备方法,所述方法采用了自组装工艺。在《用于金刚石NV中心的高效光学读出和光电子控制的GaN纳米线阵列》(“GaN Nanowire Arrays for Efficient Optical Read-Out and Optoelectronic Control of NV Centers in Diamond”,作者M.Hetzl等,该篇发表于2018年的Nano Letters)文中,介绍了采用氮化镓正向纳米柱阵列结构,NV色心位于金刚石衬底与氮化镓纳米柱之间,但这种结构仅适用于传统ODMR测试,在进行接触探测时同样具有局限性。

[0006] 为此,我们提出了金刚石氮-空位色心阵列传感器。

发明内容

[0007] 1.要解决的问题

[0008] 针对现有技术中存在的问题,本发明的目的在于提供金刚石氮-空位色心阵列传感器,来解决上述背景技术中提到的问题。

[0009] 2.技术方案

[0010] 为实现上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0011] 金刚石氮-空位色心阵列传感器,包括金刚石衬底,所述金刚石衬底为单晶金刚石,并对金刚石衬底表面进行氮掺杂同时控制掺杂层厚度,以形成金刚石外延层和NV色心层。

[0012] 所述金刚石外延层和NV色心层可以通过包括但不限于此两种实施方式实现,包括实施方式一微波等离子化学气相沉淀法(MPCVD)获得掺氮金刚石、实施方式二高温高压退火处理合成氮掺杂金刚石。

[0013] 在第一个实施方式中,使用MPCVD设备,在超高真空度条件下,在 CH_4 和 H_2 混合气体作为前驱物生长金刚石薄膜基础上,充入离化的 N_2 ,通过控制晶体的生长条件,如压强、温度、各种气体分压等相关参数,来得到合适的氮掺杂浓度。进一步通过绿光激发光致发光(PL)表征NV色心的浓度,进一步通过X射线光电子能谱(XPS)和二次离子质谱(SIMS)表征氮的掺杂浓度,这两项测试所得到的数值可以推断出在此生长条件下掺杂氮形成NV色心的比例。此实施方式可以得到高质量的掺杂层,有效地控制掺杂厚度,并可以通过改变生长条件来调整NV色心的取向。

[0014] 在第二个是实施方式中,采用高温高压的方法得到氮掺杂金刚石,上述过程所用到的高温高压设备为六面顶压机。高温高压制氮掺杂金刚石首先可以通过温度梯度法合成氮掺杂金刚石单晶,进一步对金刚石进行高温高压退火处理,上述高温高压退火处理可以将金刚石内部分散状态的氮转化为聚集状态形式,并使得氮与空位结合形成NV色心。进一步可以通过光学显微镜观察金刚石形貌并使用532nm的激发光源对金刚石进行拉曼测试,进一步对金刚石衬底进行傅里叶红外吸收光谱测试来测定氮的存在形式以及不同形式的氮含量,进一步为了解由杂质和空位等引起的金刚石晶格缺陷进行光致发光测试。此实施方式得到的金刚石衬底会产生部分杂质,且不易控制掺杂厚度,对于本发明在对灵敏度没有较高要求时可以采用此方式。

[0015] N在金刚石中通常可能会形成替位(Ns)、NV色心、N-N复合体、N-杂质复合体等,本发明主要基于NV色心的自旋量子传感机理,因此在高温高压退火处理时尽可能使N的掺杂形成NV色心,而抑制其他形态的N形成。

[0016] 上述得到的掺氮金刚石NV色心层需要实现NV色心的择优取向。衬底晶向的限制可以间接影响NV色心的取向,垂直生长面上更容易形成NV色心。在特定的晶向衬底,采用合适的氮掺杂金刚石生长条件得到所需要的NV色心取向,上述生长条件包括温度、压力、气体分压等,生长条件的不同导致面内原子迁移的表现不同,可以直接影响氮原子和空位的表面迁移速率和结合几率。基于不同取向的NV色心对于色心磁量子数 $m_s = +1$ 和 $m_s = -1$ 存在微波频率差的不同,进一步采用ODMR信号来表征NV色心的取向。

[0017] 上述衬底的晶向包括但不限于(100)、(110)、(111)、(113)。

[0018] 所述上述掺氮金刚石外延层中,将NV色心传感层加工成微纳阵列结构有利于探测光的收集。将上述掺氮金刚石NV色心层所在表面旋涂光刻胶,进一步采用电子束光刻在掺氮金刚石外延层表面写入纳米结构阵列,进一步通过电感耦合等离子体(ICP)刻蚀金刚石纳米柱阵列。可以通过研究有纳米柱阵列和无纳米柱阵列样品的背向激发ODMR信号的强弱,来分析纳米柱阵列结构对NV色心发光传播的效果,可以看到此结构有明显的聚光作用。

[0019] 在上述NV色心取向过程中,通过控制氮掺杂金刚石生长条件来尽可能多的得到相对于表面倾斜的NV色心取向。在未采用上述NV色心传感层纳米柱阵列结构情况下,大角度NV色心发光传播的到金刚石衬底表面会发生全反射,导致收光效率大大降低。在采用上述NV色心传感层纳米柱阵列结构情况下,纳米柱可以作为光子波导,大角度NV色心发光会通过纳米柱内反射并沿着纳米柱继续传播,提高收光效率。

[0020] 在该NV色心传感层纳米柱阵列结构一个改进方案中,包括在纳米柱阵列表面镀上反光镜。由于单个NV色心发光可以被认为是偶极子发光,在上述金刚石纳米柱阵列表面镀上参数合适的介质层和金属层,以此来充当反光镜增强光的探测效率。上述镀层,采用合适的镀膜设备(如ALD、PECVD、溅射、电子束蒸发),在刻蚀后的金刚石纳米柱阵列表面淀积介质层和金属层,。进一步可以通过背向激发ODMR测试,NV色心受激发后以偶极子形式发光,向背向传播的光则在金属表面反射改变传播方向,进而可以得到接收到的信号大于无反光镜的单一纳米柱阵列结构。

[0021] 上述介质层所用材料包括常见的如 Al_2O_3 、BaO、BN、 SiO_2 等一系列介电材料。

[0022] 上述金属层所用材料包括常见的如Al、Fe、Ag、Zn等一系列金属。

[0023] 所述金刚石氮-空位色心阵列传感器包括背向的纳米柱天线结构,所述纳米柱天线结构包括但不限于此两种实施方案制备。在实施方案一中,在上述金刚石衬底背面图形化金催化剂纳米阵列,进一步采用bottom-up的方式通过CVD生长获得GaN纳米柱阵列。在实施方案二中,在上述金刚石衬底背面生长GaN薄膜,进一步采用bottom-down的方式光刻出阵列图形并刻蚀得到GaN纳米柱阵列。

[0024] 上述背向的纳米柱天线结构外形包括圆台、圆柱、棒状、锥体等一系列结构。

[0025] 在该背向纳米柱天线结构一个改进方案中,包括将纳米柱材料替换成涵盖ZnO在内的氧化物宽禁带半导体材料。GaN硬度很高,能隙很宽,很适合做光电子器件,但折射率2.29(金刚石2.4)与金刚石相差不大进而都与空气折射率相差较大,光在从GaN纳米柱进入空气中时消耗,GaN不易通过CVD生长得到且异质外延缺陷密度教高。ZnO能带隙和激子束缚能较大,有优异的常温发光性能,易通过CVD生长,且ZnO折射率2与空气折射率相差减小,可以提高收光效率。

[0026] 所述金刚石氮-空位色心阵列传感器的主要用途为进行接触探测自旋状态,在探测方式上不采用传统的ODMR测试,即正向激发和正向探测,而是采用背向ODMR测试。所述背向ODMR测试即为背向激发背向测试,这种方式可以增大显微镜镜头与待测物的距离,可以有效地进行接触式探测。所述背向ODMR测试,光要透过较厚的衬底激发并接收,光路所走的距离在金刚石材料中达到宏观尺度,比传统ODMR测试要走的距离多,在测试要调整透镜使用合适的收光角以增大收光效率。

附图说明

[0027] 图1为金刚石氮-空位色心阵列传感器截面示意图;

[0028] 图2为传感接触层微纳结构制备流程图;

[0029] 图3A示出了传感接触层平面结构的光强分布;

[0030] 图3B示出了传感接触层纳米柱阵列结构的光强分布;

[0031] 图4A示出了金刚石衬底平面NV色心大角度发光时的电场强度分布;

- [0032] 图4B示出了背向纳米柱天线结构在NV色心大角度发光时的电场强度分布；
- [0033] 图5A示出了改变纳米柱天线高度的收光效果；
- [0034] 图5B示出了改变纳米柱天线直径的收光效果；
- [0035] 图6是传统ODMR和背向ODMR装置示意图。
- [0036] 图中：1、金刚石衬底；2、金刚石外延层；3、纳米柱阵列天线；4、NV色心层；5、淀积介质层；6、金属层；7、光刻胶；8、金属电极；9、偏置电压；10、传感器；11、样品；12、工作台。

具体实施方式

[0037] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0038] 参照图1,所述金刚石氮-空位色心阵列传感器具有金刚石衬底1,在金刚石衬底1表面外延生长出一层金刚石单晶2,金刚石衬底1以及金刚石外延层2均由MPCVD方法得到。在生长外延层时就要对晶向进行调控,(100)晶面的单晶金刚石出现生长缺陷的可能性较低,穿插孪晶的数量较少,更有利于MPCVD外延生长单晶金刚石。在生长金刚石外延层2时控制 CH_4 浓度在8%,沉积温度控制在 900°C ,此时外延沉积得到的单晶金刚石中无序碳含量最少、单晶纯度最为理想。生长过程中严格控制生长条件如压力、温度、气体分压等,生长条件的细微差别都会直接影响金刚石外延层2的质量,并影响氮掺杂形成的NV色心层4的质量。

[0039] 采用原位MPCVD生长方式来得到NV色心层4,在 CH_4 和 H_2 混合气体作为前驱物生长金刚石薄膜基础上,充入离化的 N_2 ,通过控制晶体的生长条件,如压强、温度、各种气体分压等相关参数,来得到合适的氮掺杂浓度。通过改变衬底温度或通过衬底移进移除生长区的方式获得具有陡峭NV色心掺杂层和非掺杂层界面的金刚石薄膜

[0040] 上述NV色心层4中NV色心的取向对NV色心发光传播方向以及发光效率有决定性影响,故NV色心的择优取向尤为关键。在没有特殊调控的情况下,NV色心的取向将存在四种等概率的取向,即由正四面体中心指向四面体的四个顶角,NV色心的取向取决于生长条件和初始晶面取向,除了控制压强、温度等相关参数外,通过控制氮和硼的掺杂浓度来调控获得更优的NV色心取向。NV色心的取向表征可以通过ODMR信号再结合晶体的结构分析得出,激光照射到NV色心时,NV色心基态上的电子就会吸收能量跃迁到激发态上,但是由于激发态上的电子不稳定,会产生辐射(发光)跃迁到基态上,由于经过亚稳态的跃迁是无辐射跃迁,所以经过亚稳态的跃迁概率越大那么其荧光就会越微弱,故可以通过荧光的强弱来判断NV色心的电子自旋态。

[0041] 上述氮掺杂金刚石薄膜中,控制氮的掺杂浓度,进一步通过控制共掺杂硫元素,可以调控NV色心的浓度,进而调控NV色心的发光。NV色心的发光随着硫掺杂浓度在室温下先增加后减小,在低温下先减小后增加,在硫浓度为0.5%时发光效率比较理想。在不同的实施例中,硫的掺杂浓度能够为0、0.25%、1%、2%。

[0042] 由于金刚石具有超宽禁带,n型掺杂非常困难。通过固定硼的浓度,改变氮浓度,可以对B-N复合体不同形态进行调控,即可以从 B_2N 到 BN_2 的转变,进而对氮进行调控,同时也

可以对NV色心进行调控。在改变硫的掺杂浓度时,固定硼的掺杂浓度,可以实现高硼浓度、高空穴迁移率、较好表面形貌和较快生长速度,尤其在硼的浓度在 $1.2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 时可以获得 $853 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 的室温空穴迁移率。

[0043] 在不同的实施例中,NV色心层4能够具有最大大约50nm的层厚度、例如最大大约40nm的层厚度、例如最大大约30nm的层厚度、例如最大大约20nm的层厚度、例如最大大约10nm的层厚度。

[0044] 图2示出了传感接触层微纳结构制备流程。在图2A中,首先在金刚石NV色心层4表面上旋涂光刻胶7,光刻胶种类采用电子束胶。进一步采用电子束光刻在金刚石NV色心层4表面写入纳米结构阵列,考虑到后期电学调控NV色心的电荷状态以及微纳加工的可行性,纳米结构尺寸和结构间隔不能小于一百纳米。进一步通过ICP刻蚀金刚石,获得金刚石纳米柱阵列,如图2B所示出。ICP刻蚀过程中要在高真空度下进行,并充入He、 H_2 等附加气体来改善等离子体的稳定性,要精准控制工作温度、工作压力、RF功率以及ICP功率,以保证刻蚀后有较高的图形保真度和较高表面平整程度。在不同实施例中,纳米柱的形貌能够为圆台、圆柱、锥体。进一步在图2C所示出的,洗掉金刚石NV色心层4表面上残余的光刻胶。

[0045] 在不同实施例中,纳米柱的结构尺寸和结构间隔能够具有最大大约500nm的直径和间隔、例如最大大约400nm的直径和间隔、例如最大大约300nm的直径和间隔、例如最大大约200nm的直径和间隔、例如最大大约150nm的直径和间隔。

[0046] 在图2D和图2E示出的,在ICP刻蚀后的NV色心层4和金刚石外延层2表面采用合适的镀膜设备(如ALD、PECVD、溅射、电子束蒸发等等),在图2C的器件基础上先后淀积介质层5和金属层6。在淀积介质层5和金属层6的过程中,同样要严格控制气体压力、温度等相关参数,精确调控薄膜的厚度以及表面光滑度,而薄膜的厚度和表面平整度将直接影响NV色心发光传播至介质层和金属层时的反光效果以及光的损耗,影响传感器最后整体效果。

[0047] 在不同的实施例中,介质层5的材料包括 Al_2O_3 、 BaO 、 BN 、 SiO_2 等一系列常见介电材料,金属层的材料包括 Al 、 Fe 、 Ag 、 Zn 等一系列常见金属。在不同的实施例中介质层和金属层能够具有最大大约100nm的层厚度、例如最大大约80nm的层厚度、例如最大大约50nm的层厚度、例如最大大约30nm的层厚度。

[0048] 图3示出了传感接触层平面结构和纳米柱阵列结构的光强分布情况。NV色心可以等效为一个偶极子,在其发光时光在光源处就向空间中发散传播。当传感接触层为平面结构时,表面只能将一部分光反射使其向透镜方向传播,但无法改善其发散的状况;当传感接触层为纳米柱阵列结构时,光线在纳米柱内反射使其沿着纳米柱径向传播,光在射出纳米柱时得到明显的汇聚,而显微镜镜头与待测物的距离较大,对于采用较小NA的物镜来收集发光时,这种汇聚后的光可以显著提高探测灵敏度,在镀上介质层和金属层后会减少从纳米柱底部和侧壁透射的光,提高汇聚后光的总能量,使探测灵敏度进一步增强。

[0049] 进一步制备增强读出纳米柱阵列天线3,通过以下两种方式进行制备,第一种是,采用纳米压印技术,在金刚石衬底1背面图形化金催化剂纳米阵列,并通过CVD直接生长得到纳米柱阵列的bottom-up方式;第二种是在金刚石衬底1背面通过CVD生长出薄膜,并通过Top-down的方式,光刻出阵列图形并刻蚀获得纳米柱阵列。

[0050] 在不同实施例中,增强读出纳米柱阵列天线的材料包括 GaN 、 ZnO 、金刚石。

[0051] 金刚石和空气的折射率差使得大角度光无法出射,在金刚石衬底背面为平面时无

法被收集到,通过天线的引入,能够缓冲金刚石和空气间的折射率差,并对光起到一定的引导作用,出光强度大幅提升。图4示出了在刚石衬底背面制备了增强读出纳米柱阵列天线3之后与平面结构在NV色心大角度发光时的电场分布,表明加装了纳米柱阵列天线可以对出光收集效率有较大提升。

[0052] 上述增强读出纳米柱阵列天线3的纳米柱高度和直径的不同会对出光收集效率产生影响,图5示出了改变纳米柱高度和直径的收光效果。在相同周期下,改变纳米柱的高度,随着纳米柱高度的增加,出光的强度显现出先增加后减小的趋势;在相同周期下,改变纳米柱的直径,随着纳米柱直径的增加,出光的强度同样显现出先增加后减小的趋势。该探测器优选至少300nm高度的增强读出纳米柱,优选在350nm(含350nm)至700nm(含700nm)之间高度的增强读出纳米柱,特别优选在500nm(含500nm)至600nm(含600nm)之间。该探测器优选至少200nm直径的增强读出纳米柱,优选在200nm(含200nm)至370nm(含370nm)之间直径的增强读出纳米柱,特别优选在290nm(含290nm)至320nm(含320nm)之间。

[0053] 所述金刚石氮-空位色心阵列传感器的主要用途为进行接触探测自旋状态,在探测方式上传统的ODMR测试不适用于接触式探测,即正向激发和正向探测,而是采用背向ODMR测试。图6示出了传统ODMR(图6A)和背向ODMR(图6B)装置的示意图,传统ODMR测试时是把衬底1放置在工作台12上,将所测样品11靠近显微镜,这种方式致使样品与镜头太近,样品的厚度和表面平整度直接影响到测量精度。而背向ODMR测试直接将待测物倒置,将所测样品11接触工作台,使样品与镜头的距离拉大,减小样品的厚度和表面平整度对测量精度的影响。

[0054] 如图2F所示出的,在纳米柱阵列外侧,利用掩膜和电子束蒸发在金刚石表面制备金属电极8,通过合适的手段,将电极引出并加入偏置电压9,将探测器加偏置观察ODMR信号大小。在探测器加上偏压后,金刚石衬底以及金刚石外延层会出现额外的载流子,这些载流子会影响NV色心的出光强度,提高探测器的整体灵敏度。

[0055] 本发明中的实施例仅以示例的方式给出,且不具有任何限制性意义,本发明所包括的每个创新特征以及这些特征的任意组合,这尤其包括在权利要求中特征的任意组合,即使这些特征本身在权利要求或实施例中沒有明确说明。

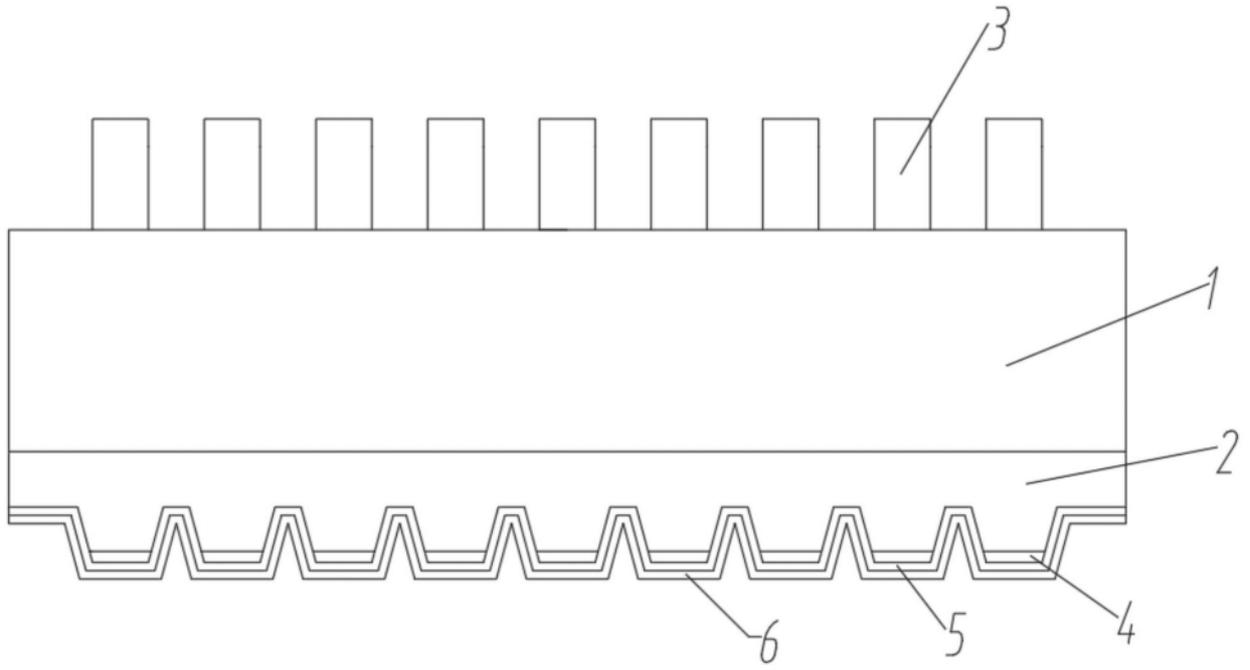


图1

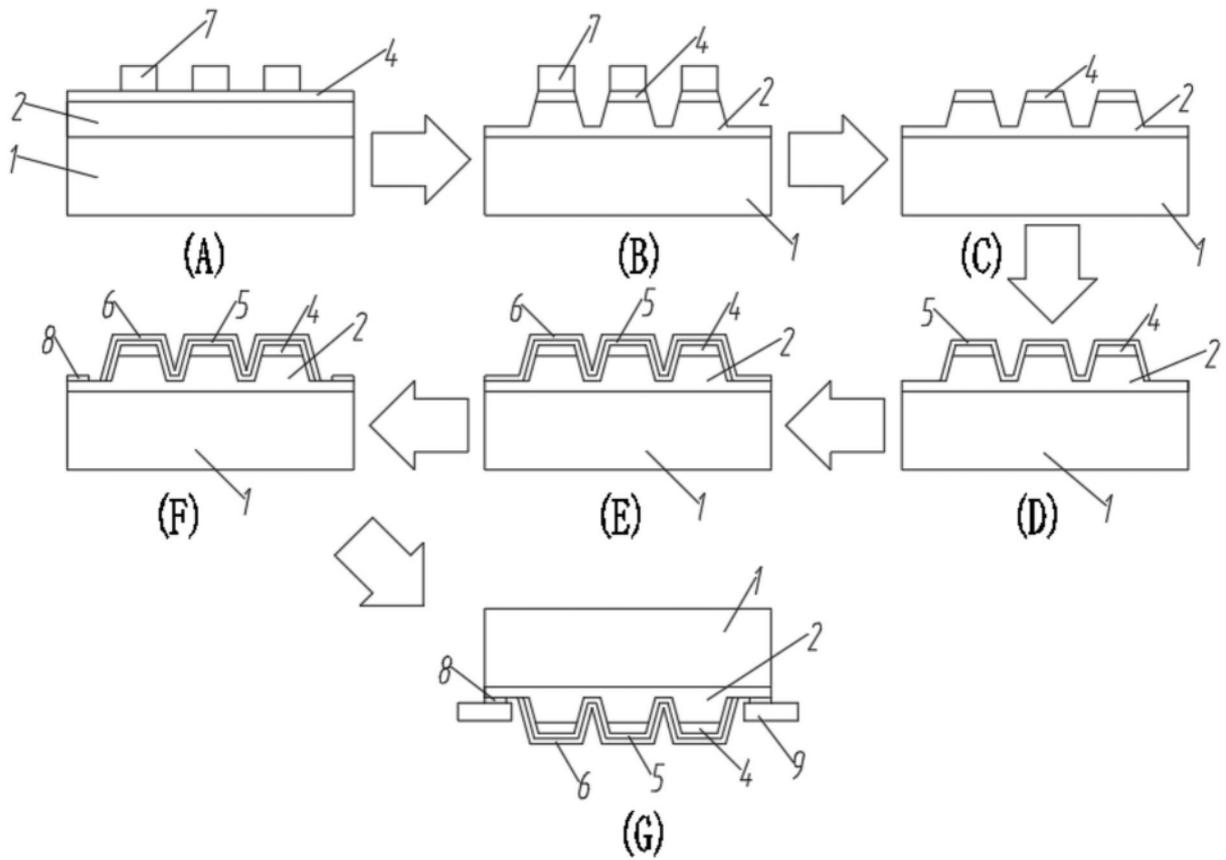
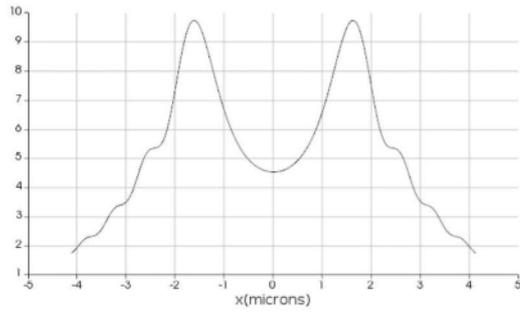
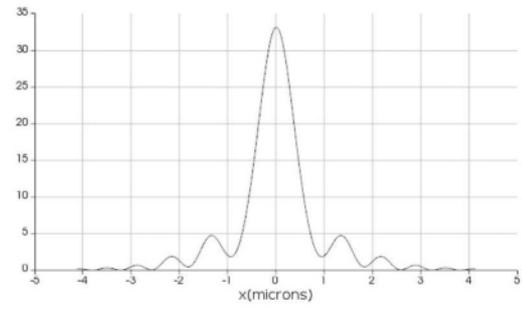


图2

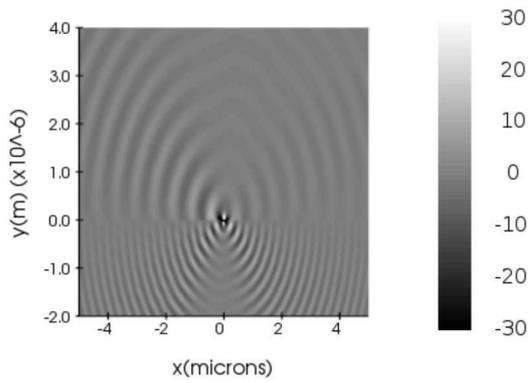


(A)

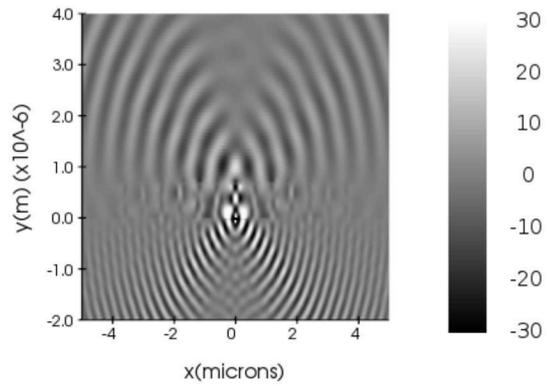


(B)

图3

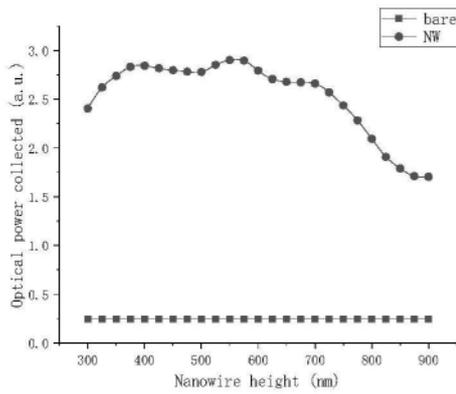


(A)

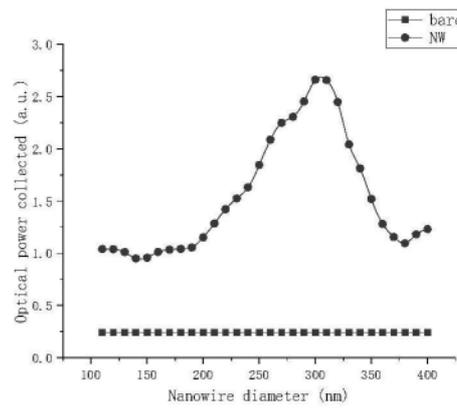


(B)

图4



(A)



(B)

图5

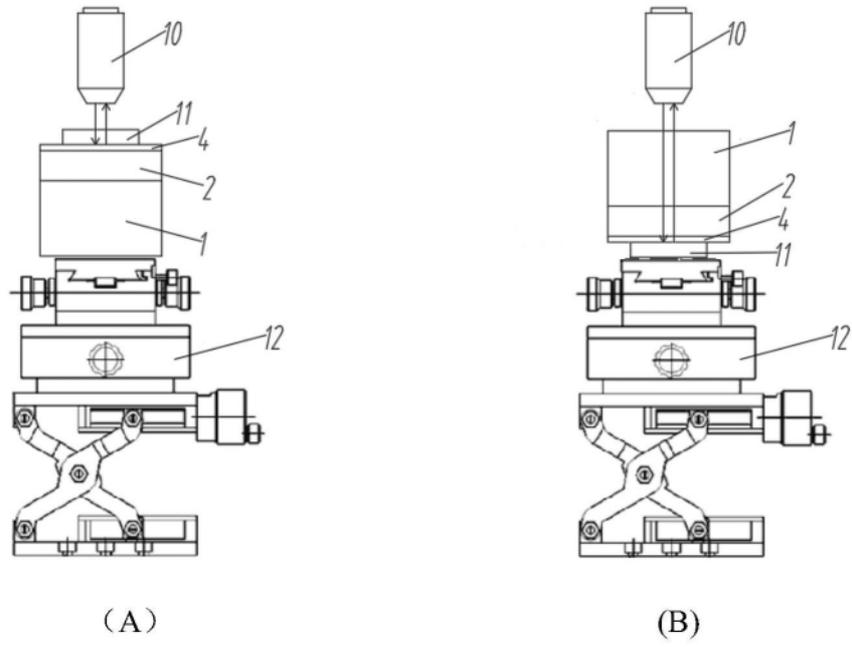


图6