

文章编号: 1000-7032(2024)04-0630-07

基于石墨电极的硅基金刚石日盲紫外探测器

王增将, 王孝秋, 朱剑锋, 任檬檬, 吴国光*

张宝林*, 邓高强, 董鑫, 张源涛

(吉林大学电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 金刚石优异的材料特性使其在日盲紫外探测领域有很大的应用潜力。本文采用微波等离子体化学气相沉积设备在(111)晶面单晶硅衬底上沉积金刚石薄膜,并基于该薄膜采用光刻胶热解法制备石墨材料平面叉指电极 MSM 结构金刚石日盲紫外探测器,为全碳金刚石探测器的实现提供了新方法。结果表明,该硅基金刚石薄膜为高取向多晶薄膜,(111)晶面的 XRD 2θ 扫描半峰宽为 0.093° ,拉曼光谱金刚石特征峰峰位 1332 cm^{-1} ,半峰宽为 4 cm^{-1} ,薄膜晶体质量较高;石墨电极紫外探测器在 5 V 偏置电压下的暗电流为 $2.07\times 10^{-8}\text{ A}$,光暗电流比为 77,开关特性良好,并且石墨电极探测器具有优异的时间响应,上升时间为 30 ms ,下降时间为 430 ms 。

关键词: 金刚石薄膜; 石墨电极; 日盲紫外探测器

中图分类号: TN36

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230326

Diamond Solar Blind UV Detectors on Si Substrates with Graphite Electrodes

WANG Zengjiang, WANG Xiaoqiu, ZHU Jianfeng, REN Mengmeng, WU Guoguang*

ZHANG Baolin*, DENG Gaoqiang, DONG Xin, ZHANG Yuantao

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,

Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding Authors, E-mail: wugg@jlu.edu.cn; zbl@jlu.edu.cn

Abstract: The excellent properties of diamond make it a great application potential in the field of solar blind ultraviolet detection. In this paper, heteroepitaxial diamond films were grown on (111) monocrystalline Si substrates by microwave plasma chemical vapor deposition (MPCVD) and the metal-semiconductor-metal (MSM) structure diamond solar blind UV detectors with planar interdigital graphite electrode prepared by pyrolytic photoresist method were produced. The results show that the heteroepitaxial diamond film on silicon substrate is the highly oriented polycrystalline film. The X-ray diffraction peak of the (111) diamond is 43.9° , and the full width at half maximum (FWHM) is 0.093° , while the Raman scattering peak of diamond is 1332 cm^{-1} and the FWHM is 4 cm^{-1} , indicating high crystal quality of the heteroepitaxial polycrystalline diamond film. The graphite electrodes were characterized by the optical microscopy and Raman spectroscopy. It shows that compared with the laser ablation method, the pyrolytic photoresist method simplifies the processes and reduces the cost. It is an effective method for preparing graphite electrodes on diamond films. The dark current of the detector with the graphite electrode reaches $2.07\times 10^{-8}\text{ A}$ at 5 V bias, and the light-to-dark current ratio reaches 77 at 5 V bias. The diamond detector with the graphite electrode has excellent time response performance. The rising time is 30 ms and the falling time is 430 ms . Therefore, the diamond solar blind UV detector with the graphite electrode prepared by pyrolytic photoresist has high performance.

Key words: diamond films; graphite electrodes; solar blind ultraviolet detectors

收稿日期: 2023-12-19; 修订日期: 2024-01-10

基金项目: 吉林省科技发展计划(20230201047GX, 20220101119JC)

Supported by The Science and Technology Developing Plan of Jilin Province(20230201047GX, 20220101119JC)

1 引言

金刚石具有5.47 eV的超宽禁带、 $20 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 的高热导率、 $2.7 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的饱和电子速度、超高迁移率($4\,500 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的电子迁移率和 $3\,800 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的空穴迁移率)以及极高的化学惰性等优异的材料特性,并且金刚石基探测器具有耐高温、耐辐射、耐腐蚀等优异性能,可以在太空等恶劣环境下稳定工作。因而,金刚石在日盲紫外光电探测领域具有重要的应用前景^[1-3]。

但是,金刚石材料的高额成本和大尺寸单晶的制备困难限制了金刚石光电器件的发展。与同质外延金刚石薄膜相比,异质外延金刚石薄膜可以有效降低金刚石材料成本并更容易实现大尺寸金刚石晶圆的制备;而在异质外延衬底中,与Pt、c-BN以及Ir复合衬底相比,Si衬底具有廉价、大尺寸且易于光电集成的优势,因而硅基金刚石日盲紫外探测器的探究对金刚石光电器件的商业化推广具有重要意义^[4-7]。Wang等2010年在硅基微晶金刚石上研究了陷阱中心对探测器性能的影响^[8],陈子依等在2022年研究了硅基多晶金刚石薄膜上探测器不同电极对器件性能的影响^[9]。近些年,为了提高器件性能,人们开始研究由碳同素异形体组成的金刚石全碳器件。金刚石是由 sp^3 杂化碳原子组成,石墨是由 sp^2 杂化碳原子组成,与超宽禁带的金刚石相比,石墨是一种具有零带隙的良好导电材料,所以对于金刚石日盲紫外探测器来说石墨是一种极具潜力的电极材料^[10-11]。Lin等2018年采用激光烧蚀金刚石制备石墨电极的方法,在单晶金刚石片上制备出石墨电极全碳日盲探测器^[12];Li等在2023年进一步研究了激光烧蚀对金刚石材料与器件的影响^[13]。但是,目前金刚石全碳紫外探测器的实现方法一般为激光烧蚀形成石墨电极,工艺实现要求较高。本文首次在硅基金刚石薄膜上采用光刻胶热解的方法得到石墨材料的平面叉指电极结构并实现了金属-半导体-金属(Metal-semiconductor-metal, MSM)结构

紫外探测器制备。该方法相较于激光烧蚀工艺而言,工艺简单易实现、成本更低,并且不会对金刚石材料本身造成损伤,为金刚石全碳日盲紫外探测器件的实现提供了新方法。

本文采用微波等离子体化学气相沉积(Microwave plasma chemical vapor deposition, MPCVD)技术,在硅衬底上异质外延金刚石薄膜,对外延薄膜质量进行了表征分析。在异质外延多晶金刚石薄膜上制备了石墨电极MSM结构金刚石基日盲紫外探测器并进行了器件性能测试研究。

2 实验

本文采用MPCVD技术在经过抛光处理的p型(111)单晶硅衬底上外延金刚石薄膜,反应气体为甲烷和氢气,气体流量比为1:50,微波功率为5 000 W,生长压强为 $9.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ (70 torr),温度为 $870 \text{ }^\circ\text{C}$,生长时间为9 h,金刚石薄膜厚度为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 。金刚石薄膜抛光清洗后,使用匀胶机将AZ正胶以 $3\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速旋涂至金刚石薄膜表面,经前烘、曝光、后烘、显影以及坚膜等工艺处理后,得到金刚石薄膜表面的光刻胶平面叉指结构。将带有该结构光刻胶的金刚石薄膜送入退火炉中,进行光刻胶热解处理,即在通入固定流量氮气的氛围中对样品进行退火^[14],退火过程分为6个阶段,具体参数如表1所示。采用上述光刻工艺和退火工艺完成器件表面石墨电极的制备,叉指电极指宽和指距为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 。石墨电极探测器制备流程如图1所示。

表1 光刻胶热解处理退火过程

Tab. 1 Photoresist pyrolysis annealing process

顺序	起始温度/ $^\circ\text{C}$	到达温度/ $^\circ\text{C}$	变温速率/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1})$	持续时间/ min
1	20	300	5	60
2	300	300	0	30
3	300	600	5	60
4	600	600	0	30
5	600	900	5	60
6	900	900	0	60

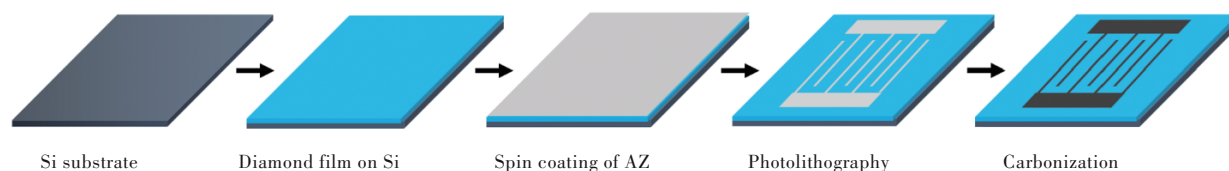


图1 石墨材料平面叉指电极金刚石探测器器件制备流程

Fig.1 Preparation process of diamond detector devices with graphite planar interdigital electrodes

外延薄膜质量表征由 Linkam Scientific 公司 labram hr evolution 型号的共聚焦显微拉曼光谱仪、日本理学公司 TTR 型号的 X 射线衍射仪和 Olympus 公司 OLS-4100 型号的超景深三维显微观测系统完成,器件制备工艺主要由 ABM 公司 6-350 型号的光刻机和合肥科晶管式炉实现,器件测试系统主要由 222 nm 深紫外准分子灯、Keithley 2612b 源表、创谱仪器的探针台和 Thorlabs 光功率计等组成。

3 结果与讨论

3.1 薄膜质量表征

我们对 (111) 晶面硅衬底上异质外延的金刚石薄膜进行质量表征与分析。如图 2(a) 所示,对外延薄膜进行 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 表征测试,通过不同的特征峰的峰位可以对照标准卡片得到材料的晶体结构等特性。从图 2(a) 中可以看出,存在 28.9° 、 43.9° 、 75.2° 、 91.6° 和 140° 等特征峰,分别对应硅衬底 (111) 晶面、金

石 (111) 晶面、金刚石 (220) 晶面、金刚石 (311) 晶面和金刚石 (331) 晶面衍射。单晶硅衬底上外延生长得到不同晶面的多晶金刚石薄膜是由于硅与金刚石之间存在较大的晶格失配和热失配。其中硅单晶的晶格常数为 0.356 nm ,金刚石的晶格常数为 0.356 nm ,失配达到 34%;硅和金刚石的热膨胀系数分别为 $2.4 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 和 $3.7 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,失配达到 54%。由于在 (111) 晶面硅衬底上异质外延形核过程中,金刚石晶核中 (111) 晶面生长速度最慢^[15],本研究通过不断优化外延工艺,得到了金刚石 (111) 晶面的高取向多晶薄膜,如图 2(a) 所示。金刚石 (111) 晶面特征峰峰强最高,且约为金刚石 (220) 晶面的 7 倍,并且如图 2(a) 插图所示,金刚石 (111) 晶面 2θ 扫描特征峰的半峰宽 (Full width at half maximum, FWHM) 约为 0.093° ,薄膜晶体质量较高。高取向的金刚石薄膜相较于一般多晶薄膜而言晶界的性质更均一,因而薄膜的整体性质更均匀,体缺陷密度更低,有利于金刚石基器件的制备和性能的提升。

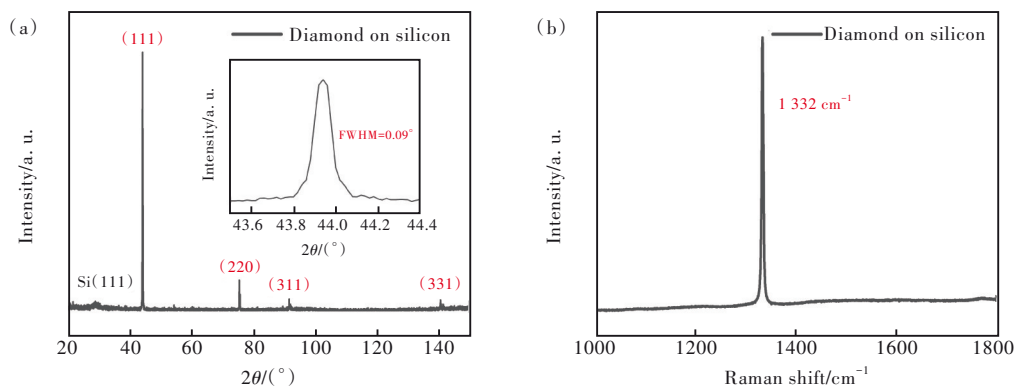


图 2 (a) Si 衬底上金刚石薄膜的 XRD 衍射谱, 插图为金刚石 (111) 特征峰; (b) Si 衬底上金刚石薄膜的拉曼光谱
Fig.2 (a) XRD patterns of diamond films on Si substrates, and the inset shows the peak of diamond (111). (b) Raman spectrum of diamond films on Si substrates

MPCVD 生长金刚石薄膜过程中, 氢气刻蚀 sp^2 杂化键的速度大于 sp^3 杂化键, 也就是刻蚀石墨相的速度大于金刚石相, 因而会在衬底上外延得到金刚石薄膜。拉曼光谱可用来表征外延薄膜中碳相关的物相组成。如图 2(b) 所示, 对照标准卡片, 外延薄膜的拉曼光谱中在 $1000\sim 1800\text{ cm}^{-1}$ 波数范围内仅可观察到 1332 cm^{-1} 的金刚石相特征峰, 无石墨相等非金刚石相的特征峰, 可见外延薄膜纯度很高无杂相; 同时 1332 cm^{-1} 特征峰的 FWHM 约为 4 cm^{-1} , 可见薄膜缺陷密度较低, 薄膜质量较高。

3.2 电极结构分析

基于上述高质量多晶金刚石薄膜, 我们采用光刻胶热解法制备了具有平面叉指碳电极结构的多晶金刚石日盲紫外光电探测器。对电极部分进行拉曼光谱表征, 如图 3(a) 所示。电极材料的拉曼光谱中存在 1362 cm^{-1} 和 1603 cm^{-1} 两个特征峰, 对照标准卡片可知分别代表石墨的 D 峰和 G 峰, 表明本文通过光刻胶图形化和热解的方法成功地在金刚石薄膜上实现了石墨材料的叉指电极结构。这是由于常见 g 线 (436 nm) 和 i 线 (365 nm) 的光刻胶主要由酚醛树脂等大分子有机物等组成, 包括 C、H、O 等元素。通过无氧氛围中缓

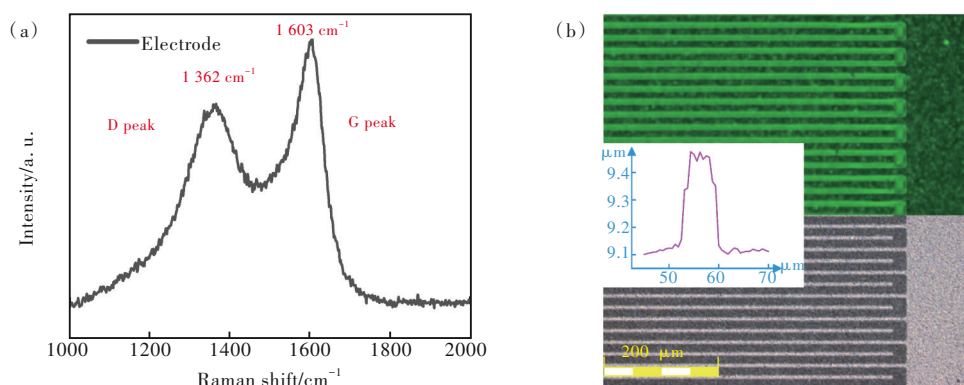


图3 (a)石墨电极拉曼光谱;(b)上半图为光学显微镜下的热解前光刻胶图形,下半图为石墨叉指电极显微镜形貌,内嵌插图为叉指电极单个指的高度与宽度,由超景深三维显微镜系统测得

Fig.3 (a) Raman spectrum of the graphite electrode. (b) The upper half image shows the morphology of the unbaked photoresist, the bottom half image shows the morphology of the interdigital graphite electrodes, both observed by optical microscope. The inset shows the height and width of a single finger of the interdigital electrode, as measured by the ultra-depth of field three-dimensional microscope system

慢加热可以使光刻胶热解, H、O 等非 C 元素随温度升高不断以水或其他分子的形式逸散出去, 并且由于升温缓慢能够有效地避免光刻胶内气泡等的产生, 保持光刻胶的致密及形状, 最后得到以石墨为主的平面叉指碳电极结构^[16-17]。图 3(b) 上半图为光刻胶热解前的叉指电极图形, 下半图为器件表面的显微镜照片, 插图 of 超景深三维显微测试系统得到的器件表面叉指电极单个指的绝对高度和宽度曲线, 可以得到电极厚度约为 400 nm。从图中可以看出, 光刻胶热解前指宽略大于指距, 而热解后的器件表面电极指宽约为 7 μm, 指距约为 13 μm。这是由于光刻胶在热解过程中会释放水汽和有机气体, 所以相较于光刻工艺后的光刻胶的指宽, 热解后形成的碳电极会有一定程度的缩小, 即指宽减小, 指距增大。指距的增大使得器件表面光照面积增加, 有利于器件探测率和响应度的提高。

3.3 探测器器件性能分析

器件制备完成后对石墨电极金刚石日盲紫外探测器进行光电流和暗电流 $I-V$ 特性测试。经计算, 金刚石的本征吸收限约为 226 nm, 所以我们选择 222 nm 准分子灯光源作为光源, 测试时功率固定为 600 μW。首先对石墨电极金刚石探测器的暗电流与光电流特性进行测试。如图 4(a) 所示, 随着偏置电压增大, 探测器的光电流和暗电流均不断增大, 光暗电流比随着偏置电压的增大有逐渐增大趋于稳定的趋势。器件偏置电压为 5 V 时, 石墨电极器件的暗电流为 2.07×10^{-8} A, 光电

流为 1.61×10^{-6} A, 光暗电流比约为 77, 探测器具有较好的开关特性。根据器件的 $I-V$ 特性, 可以计算得出石墨电极器件的光响应度 (Responsivity, R) 和外量子效率 (External quantum efficiency, EQE)。

光响应度用来衡量光电探测器的灵敏性, 定义为:

$$R = \frac{I_{\text{light}}}{P_{\lambda} S}, \quad (1)$$

其中 I_{light} 是光电流, P_{λ} 是光功率密度, S 是有效光照面积。本实验中入射波长为 222 nm, $S=0.5 \text{ mm}^2$ 。外量子效率 η_{EQE} 是衡量每个入射光子产生电子空穴对数量的量度, 定义为:

$$\eta_{\text{EQE}} = \frac{hcR}{q\lambda}, \quad (2)$$

其中, h 为普朗克常数, c 为光速, q 为 1.6×10^{-19} C, λ 为入射光波长, 即 222 nm。

图 4(b) 下轴为石墨电极探测器的光响应度和外量子效率随器件偏置电压的变化。随着偏置电压的增加, 探测器光响应度随着光电流的增大而增大, 器件偏置电压为 5 V 时, 石墨电极探测器的光响应度约为 2.7 mA/W。EQE 随偏置电压的增加也不断增大, 器件偏置电压为 5 V 时, 石墨电极探测器的 EQE 约为 1.47%。上述结果表明, 石墨电极探测器具有良好的探测灵敏度和光电转换能力。图 4(b) 上轴为石墨电极探测器的光响应度随入射光波长的变化, 器件偏置电压为 5 V。器件在日盲紫外波段 (200~280 nm) 的响应度远高于其在非日盲紫外波段的响应度, 紫外可见抑

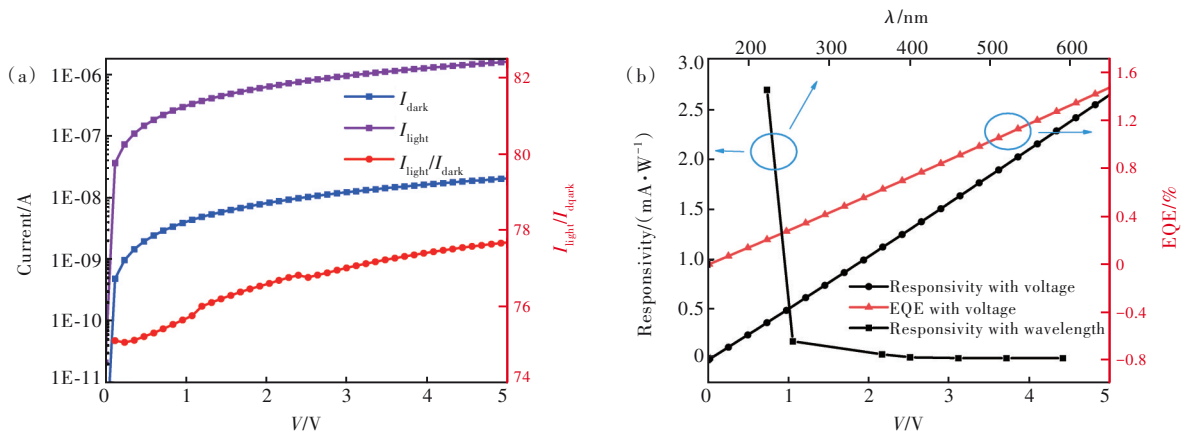


图 4 (a)金刚石探测器的光电流、暗电流和光暗电流比随偏置电压的变化曲线;(b)探测器的响应度和外量子效率随偏置电压的变化曲线(下轴),5 V 偏压下探测器的响应度随入射光源波长的变化(上轴)

Fig.4 (a)The curve of the photocurrent, dark current and light-dark current ratio of the diamond detector with the bias voltage. (b)The curve of the diamond detector responsivity and external quantum efficiency with the bias voltage (for the lower axis). The curve of the diamond detector responsivity with the wavelength of light source at bias of 5 V (for the upper axis)

制比 $R_{222\text{nm}}/R_{400\text{nm}}$ 达到 90, 所以该器件对日盲紫外区的光信号具有良好的探测能力。

图 5 为器件在光源通断时的时间响应曲线。器件固定偏置电压为 5 V, 设置光源开关周期为 5 s。由单指数弛豫方程拟合曲线可得到上升时间和下降时间, 拟合方程为:

$$I = I_0 + Ae^{-t/\tau}, \quad (3)$$

其中 I_0 为稳态电流, A 为常数, t 为时间, τ 为弛豫时间常数。如图 5 所示, 光源打开时, 器件的电流明显增加, 响应速度较快, 上升时间 τ_r 为 30 ms; 光源关闭时, 器件的电流下降, 下降时间 τ_d 为 430 ms。探测器时间响应性能相较于报道的硅基多晶金刚石探测器有明显提高^[18,18], 达到了单晶金刚石探测器的水平^[19-22]。器件下降时间约为上升时间的 14 倍, 表明探测器存在持续光电导现象^[23], 即撤销光照之后器件光电流在

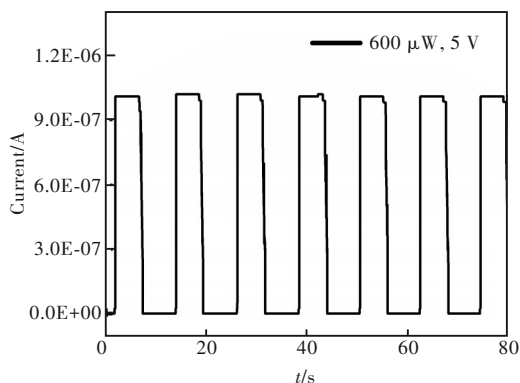


图 5 石墨电极探测器在 5 V 偏压下的 $I-t$ 特性

Fig.5 Time-dependent current response of the graphite electrode diamond detector at 5 V bias voltage

骤降后缓慢下降至接近暗电流值。持续光电导现象是由于陷阱中心捕获单一类型载流子导致的。在撤销光照后, 被陷阱中心捕获的少数需通过热激发或隧道效应从陷阱中心脱出, 与多子复合, 这是一个缓慢的过程, 从而产生持续光电导现象。而外延薄膜中存在的晶界、位错等缺陷, 以及薄膜中一定含量的氮杂质产生的空位等缺陷均可能在禁带中引入陷阱中心^[8], 使得石墨电极探测器存在持续光电导现象。

4 结 论

本文使用 MPCVD 技术在 (111) 晶面单晶硅衬底上异质外延高取向多晶金刚石薄膜, 并基于该薄膜制备了石墨电极 MSM 结构金刚石日盲紫外探测器。石墨电极由光刻工艺结合光刻胶热解法制备得到, 该方法成本低, 工艺简单, 实现的电极接触效果良好。通过对石墨电极探测器性能进行测试发现, 石墨电极探测器在 5 V 偏置电压下的暗电流达到 2.07×10^{-8} A, 光电流为 1.61×10^{-6} A, 光暗电流比在 5 V 偏置电压下达到 77, 具有良好的开关特性。在 5 V 偏置电压下, 石墨电极探测器的光响应度约为 $2.7 \text{ mA} \cdot \text{W}^{-1}$, EQE 约为 1.47%, 表明石墨电极探测器具有良好的探测灵敏度和良好的光电转换能力。探测器的紫外可见抑制比 $R_{222\text{nm}}/R_{400\text{nm}}$ 在 5 V 偏置下达到 90, 说明器件对日盲紫外波段的光信号具有良好的探测能力。同时, 石墨电极探测器具有优异的时间响应, 上升时间为 30 ms, 下降时间为 430 ms。因此, 基

于异质外延多晶金刚石薄膜通过光刻胶热解法制备的石墨电极金刚石日盲紫外探测器具有良好的器件性能。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230326>.

参 考 文 献:

- [1] 何嘉玉, 陈克强, 冀婷, 等. 基于二维材料的快速响应金属-半导体-金属结构光电探测器研究进展 [J]. 发光学报, 2022, 43(5): 745-762.
HE J Y, CHEN K Q, JI T, *et al.* Research progress of fast response 2D material photodetectors with metal-semiconductor-metal structure [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(5): 745-762. (in Chinese)
- [2] WANG L J, XIA Y B, SHEN H J, *et al.* Infrared optical properties of diamond films and electrical properties of CVD diamond detectors [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, 36(20): 2548-2552.
- [3] 黄健, 王林军, 唐可, 等. 氧化锌/金刚石薄膜异质结紫外光探测器 [J]. 发光学报, 2011, 32(3): 272-276.
HUANG J, WANG L J, TANG K, *et al.* Ultraviolet detector based on ZnO/diamond film heterojunction diode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(3): 272-276. (in Chinese)
- [4] 赵海峰, 宋航, 元光, 等. 硅基籽晶上化学气相沉积金刚石薄膜及其场发射特性 [J]. 发光学报, 2003, 24(3): 313-317.
ZHAO H F, SONG H, YUAN G, *et al.* Field emission properties of diamond film on silicon substrate with seed crystal by chemical vapor deposition [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2003, 24(3): 313-317. (in Chinese)
- [5] LIANG X B, WANG L, MA X Y, *et al.* Enhanced red electroluminescence from a polycrystalline diamond film/Si heterojunction structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(16): 161123.
- [6] AIDA H, IKEJIRI K, KIM S W, *et al.* Overgrowth of diamond layers on diamond microneedles: new concept for free-standing diamond substrate by heteroepitaxy [J]. *Diamond Relat. Mater.*, 2016, 66: 77-82.
- [7] ZHANG Z F, LIN C N, YANG X, *et al.* Solar-blind imaging based on 2-inch polycrystalline diamond photodetector linear array [J]. *Carbon*, 2021, 173: 427-432.
- [8] WANG L X, CHEN X K, WU G, *et al.* Study on trapping center and trapping effect in MSM ultraviolet photo-detector on microcrystalline diamond film [J]. *Phys. Status Solidi A*, 2010, 207(2): 468-473.
- [9] 陈子依, 张伟亮, 荣曦明, 等. 多晶金刚石薄膜日盲紫外探测器件的电极制备 [J]. 发光学报, 2022, 43(12): 1974-1982.
CHEN Z Y, ZHANG W L, RONG X M, *et al.* Electrode preparation of solar blind UV detector based on polycrystalline diamond films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(12): 1974-1982. (in Chinese)
- [10] OH A, CAYLAR B, POMORSKI M, *et al.* A novel detector with graphitic electrodes in CVD diamond [J]. *Diamond Relat. Mater.*, 2013, 38: 9-13.
- [11] KONONENKO T, RALCHENKO V, BOLSHAKOV A, *et al.* All-carbon detector with buried graphite pillars in CVD diamond [J]. *Appl. Phys. A*, 2014, 114(2): 297-300.
- [12] LIN C N, LU Y J, YANG X, *et al.* Diamond-based all-carbon photodetectors for solar-blind imaging [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(15): 1800068.
- [13] LI F N, BAO H W, LI Y, *et al.* Laser induced diamond/graphite structure for all-carbon deep-ultraviolet photodetector [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2023, 636: 157818.
- [14] LEE J A, HWANG S, KWAK J, *et al.* An electrochemical impedance biosensor with aptamer-modified pyrolyzed carbon electrode for label-free protein detection [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2008, 129(1): 372-379.
- [15] LIU J J, CHIU D Y T, MORTON D C, *et al.* Band gap structure and electron emission property of chemical-vapor-deposited diamond films [J]. *Solid-State Electron.*, 2001, 45(6): 915-919.
- [16] KOSTECKI R, SCHNYDER B, ALLIATA D, *et al.* Surface studies of carbon films from pyrolyzed photoresist [J]. *Thin Solid Films*, 2001, 396(1-2): 36-43.
- [17] PARK B Y, TAHERABADI L, WANG C L, *et al.* Electrical properties and shrinkage of carbonized photoresist films and the implications for carbon microelectromechanical systems devices in conductive media [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2005, 152(12): J136-J143.

- [18] LIN C R, WEI D H, BENDAO M K, *et al.* Development of high-performance UV detector using nanocrystalline diamond thin film [J]. *Int. J. Photoenergy*, 2014, 2014: 492152.
- [19] LIU Z C, ZHAO D, AO J P, *et al.* Enhanced ultraviolet photoresponse of diamond photodetector using patterned diamond film and two-step growth process [J]. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 2019, 89: 110-115.
- [20] LIU Z C, ZHAO D, MIN T, *et al.* Photovoltaic three-dimensional diamond UV photodetector with low dark current and fast response speed fabricated by bottom-up method [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2019, 40(7): 1186-1189.
- [21] LIU Z C, AO J P, LI F N, *et al.* Fabrication of three dimensional diamond ultraviolet photodetector through down-top method [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(15): 153507.
- [22] LI F N, LI Y, FAN D Y, *et al.* Self-powered diamond ultraviolet photodetector with a transparent Ag nanowire electrode [J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(32): 325204.
- [23] 王丽嫣, 刘可为, 陈星, 等. 基于 Ag 微孔阵列结构电极的 MgZnO 紫外探测器制备和特性 [J]. *发光学报*, 2021, 42(2): 201-207.
- WANG L Y, LIU K W, CHEN X, *et al.* Fabrication and characteristics of MgZnO ultraviolet detector based on Ag micro-porous array structure electrode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(2): 201-207. (in Chinese)



王增将(1997-),男,山东枣庄人,硕士研究生,2020年于吉林大学获得学士学位,主要从事宽禁带半导体光电器件相关的研究。

E-mail: 1293316575@qq.com



张宝林(1964-),男,吉林通化人,博士,教授,1999年于中国科学院长春物理研究所获得博士学位,主要从事宽禁带半导体材料及器件的研究。

E-mail: zbl@jlu.edu.cn



吴国光(1981-),男,黑龙江大庆人,博士,副教授,2012年于吉林大学获得博士学位,主要从事金刚石/氮化物半导体材料及器件的研究。

E-mail: wugg@jlu.edu.cn