引用格式: ZHI Pengwei, RONG Ping, REN Shuai, et al. Preparation and Performance Study of g-C₃N₄/CdS Heterojunction Ultraviolet-visible Photodetector[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0904001 支鵬伟,容萍,任帅,等.g-C₃N₄/CdS 异质结紫外-可见光电探测器的制备及其性能研究[J].光子学报,2021,50(9):0904001

g-C₃N₄/CdS异质结紫外-可见光电探测器的制备 及其性能研究

支鹏伟¹,容萍²,任帅²,刘祥伟²,高世勇²

(1太原学院材料与化学工程系,太原 030032)(2哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,哈尔滨 150001)

 摘 要:通过热聚法以三聚氰胺为原料制备g-C₃N₄纳米片,然后采用化学水浴法生长CdS纳米颗粒,进 而成功构筑g-C₃N₄/CdS异质结构。采用扫描电子显微镜,X射线衍射仪和X射线光电子能谱仪对样品 的微观形貌、晶体结构和化学成分进行表征。结果表明,CdS纳米颗粒为六方纤锌矿结构,且均匀致密 地附着在g-C₃N₄纳米片表面;g-C₃N₄/CdS探测器能够在零偏压工作条件下对紫外光有较好的光响应, 且光电流值较g-C₃N₄纳米片探测器提高了约8倍。此外,g-C₃N₄/CdS探测器在可见光区也表现出良好 的光响应,对蓝光和绿光多个周期探测的结果也表明其具有稳定性和循环性。
 关键词:异质结;紫外-可见光探测;热聚法;化学水浴法;g-C₃N₄;CdS
 中图分类号:TN36
 文献标识码:A

Preparation and Performance Study of g-C₃N₄/CdS Heterojunction Ultraviolet-visible Photodetector

ZHI Pengwei¹, RONG Ping², REN Shuai², LIU Xiangwei², GAO Shiyong² (1 Department of Materials and Chemical Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China) (2 School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The $g-C_3N_4$ nanosheets are prepared by thermal polymerization method using melamine as the raw material. Then CdS nanoparticles are grew by the chemical bath deposition, which in turn construct the $g-C_3N_4/CdS$ heterostructures successfully. The scanning electron microscope, X-ray diffractometer and X-ray photoelectron spectroscopy are applied to characterize the morphology, crystal structure and chemical composition of samples. It is shown that the CdS nanoparticles with hexagonal wurtzite structure are uniformly attached to the surface of $g-C_3N_4$ nanosheets. The $g-C_3N_4/CdS$ photodetector has a better photoresponse to ultraviolet light at zero bias voltage, and its photocurrent value is about 8 times higher than that of the $g-C_3N_4$ nanosheet photodetector. Moreover, the $g-C_3N_4/CdS$ photodetector also displays well light response in the visible light region, and shows stability and cyclicity of detection to blue and green light.

Key words: Heterostructure; Ultraviolet-visible detection; Thermal polymerization Method; Chemical bath deposition; $g-C_3N_4$; CdS

OCIS Codes: 040.5160; 160.4236; 160.1890

http://www.photon.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(No.2019YFA0705201),黑龙江省自然科学基金(No.LH2020E033)

第一作者:支鹏伟(1980—),男,讲师,硕士,主要研究方向为光电材料制备。Email: zhipengwei@163.com

通讯作者:高世勇(1980—),男,副教授,博士,主要研究方向为宽带隙半导体材料与器件。Email: gaoshiyong@hit.edu.cn 收稿日期:2021-03-23;录用日期:2021-05-17

0 引言

随着光电子技术的不断发展,光电探测器受到越来越多的关注,尤其是可广泛应用于生物成像、光谱分析、环境监测和光通信等领域的宽光谱光电探测器成为当前的研究热点^[1]。在各种探测材料中,二维材料具 有优异的电学和光学特性,并可通过控制层数调控光学吸收来实现宽波段范围的探测,已被考虑用于光电 探测器中。其中,石墨相氮化碳(g-C₃N₄)作为一种二维半导体材料,因其不仅具有合适的光学带隙(2.7 eV)、 独特的电子结构、良好的热稳定性和化学稳定性,而且具有暗电流低等优点而被认为是制备光电探测器的 理想材料^[2]。然而,由于其电子-空穴对的快速复合,使得量子效率降低,很大程度上限制了g-C₃N₄在探测 器中的应用。近年来,为了提高g-C₃N₄的探测性能,FANG Huajing等将g-C₃N₄纳米片与碳纳米管复合构建 了基于范德华异质结的光电探测器^[3];REDDEPPA M等报道了一种二维的g-C₃N₄(GaN 纳米棒光电探测 器,其对紫外光显示了优异的光响应^[4]。目前用来提高g-C₃N₄光生载流子分离效率的方法主要包括与其它 半导体材料复合、掺杂以及贵金属修饰等。其中,基于能级匹配原则将g-C₃N₄与不同半导体材料复合(如 Sb₂S₃,GaN,CdS等)构筑成异质结构被认为是一种非常有效的策略。

在这些半导体中,CdS作为 II - II 族化合物半导体,不仅具有合适的光学带隙(2.42 eV)、高的平带电压(0.66 V)、优异的光电导率和良好的化学稳定性,而且在可见光范围内具有良好的光电特性等优点而受到人们的关注^[5-6]。更重要的是,g-C₃N₄与 CdS 之间的能带结构匹配良好,能够形成标准的 II 型能带结构,进而能够有效抑制载流子复合^[7]。最近,LU Zhenzhen 等制备的 g-C₃N₄/CdS 纳米复合材料显示了较高的量子效率,其光催化性能较 g-C₃N₄有所提高^[8]。在 XU Huanyan等的研究中,光生载流子在 CdS 与 g-C₃N₄之间有效界面的转移抑制了 g-C₃N₄/CdS 异质结中电子-空穴对的复合^[9]。VU N N 等制备的 g-C₃N₄/CdS 纳米复合材料与纯 g-C₃N₄相比,更有利于有效的电荷分离和转移^[10]。然而,目前制备的 g-C₃N₄/CdS 异质结构大多应用于光催化降解、产氢或者 CO₂还原中,而关于 g-C₃N₄/CdS 异质结构的紫外-可见光探测器的研究还未见报道。

本文以热聚法制备的g-C₃N₄纳米片为载体,利用化学水浴法在其表面生长了CdS纳米颗粒,成功构筑 了g-C₃N₄/CdS异质结构,并对其形貌、结构、元素组成和化学价态等进行了表征。同时使用g-C₃N₄/CdS材 料制备了光电探测器。以365 nm的紫外光、470 nm的蓝光以及530 nm的绿光作为模拟的紫外-可见光源, 研究了其对紫外和可见光的探测性能,并对相应的探测机理进行了分析。

1 实验方法

1.1 g-C₃N₄纳米片的制备

通过热聚法制备g-C₃N₄^[4],首先以三聚氰胺为原料,将其放入舟形坩埚中,同时将坩埚置于真空管式炉中,并以10°C/min的速率升温至550°C并保温4h。待真空管式炉自然冷却至室温取出所得样品放入研钵进行研磨,将研磨后的粉末状样品放入去离子水中依次超声1h,离心10min后,再用去离子水洗涤并自然晾干,得到分散性较好的g-C₃N₄粉末。

1.2 g-C₃N₄/CdS异质结构的制备

取 0.1 g上述制备好的 g-C₃N₄粉末分散在 20 mL去离子水中得到 g-C₃N₄分散液。然后将其和体积均为 20 mL的硫脲溶液(0.025 mol/L)及乙酸镉溶液(0.025 mol/L)置于螺口瓶,混合均匀后作为反应液。随后将 其放入水浴锅中,在 90 °C 恒温反应 2 h 后冷却至室温。最后取出样品依次进行离心洗涤并在空气中自然 干燥。

1.3 紫外-可见光电探测器的制备

将制备好的g-C₃N₄/CdS复合材料分散在酒精中,均匀地滴涂在FTO导电玻璃表面,并烘干成膜,随后将其与铂(Pt)对电极通过热封膜热压在一起。将水和甲醇以3:7的体积比混合,在其中溶入硫单质(2 mol/L), 硫化钠(2 mol/L)和氯化钾(0.2 mol/L)后搅拌均匀,得到聚硫电解液。然后将配制好的电解液注入器件中并密封,制成g-C₃N₄/CdS异质结探测器。为了进行比较,使用同样的方法制备了g-C₃N₄纳米片光电探测器。

1.4 样品表征

通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, Hitachi SU-70)和附带的能量色散X射线能 谱(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)对样品的微观形貌和元素组成进行分析。采用X射线衍射仪(X-Ray Diffractometer, XRD, Bruker D8 Advance)和X射线光电子能谱仪(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS, PHI 5700 ESCA System)研究样品的晶体结构和元素价态。光致发光光谱(Photoluminescence Spectroscopy, PL)通过Jobin Yvon HR800型拉曼光谱仪测量获得。将365 nm紫外光、470 nm 蓝光以及530 nm 绿光作为模拟光源,在零偏压下利用数字源表(Keithley 2400)测试器件的紫外-可见光探测性能。

2 结果与讨论

图 1为g-C₃N₄纳米片和g-C₃N₄/CdS异质结构的 SEM 图。从图 1(a)可以看出,g-C₃N₄呈现为不规则的 层状块体,它是由许多纳米片相互堆积而成的。其相应的高倍图(图 1(b))显示g-C₃N₄纳米片表面较为光 滑,且无明显的尖锐状边缘。当在g-C₃N₄表面沉积 CdS 纳米颗粒后,在低倍图(图 1(c))中没有观察到其表 面形貌的明显变化。但从高倍图中能够清晰地看到g-C₃N₄纳米片的表面有许多球形的微小颗粒附着,使得 光滑的片状表面变粗糙,如图 1(d)所示。同时纳米片与片之间的堆积度减小,进而使其整体的层状结构更 加清晰。



(a) Low magnification SEM image of $g-C_3N_4$ nanosheets (b) High magnification SEM image of $g-C_3N_4$ nanosheets



(c) Low magnification SEM image of g-C₁N₄/CdS heterostructures (d) High magnification SEM image of g-C₁N₄/CdS heterostructures

图 1 g-C₃N₄纳米片和 g-C₃N₄/CdS 异质结构的 SEM 图 Fig.1 The SEM images of g-C₃N₄ nanosheets and g-C₃N₄/CdS heterostructures

为了进一步确定制备样品的元素组成,使用能谱仪对g-C₃N₄纳米片与g-C₃N₄/CdS异质结构进行测试, 其相应的EDS能谱如图2所示。在图2(a)中能够观察到C和N这两种元素的特征峰,这归属于g-C₃N₄纳米 片。通过水浴反应沉积CdS纳米颗粒后,从能谱图(图2(b))中不仅观察到了来自g-C₃N₄纳米片的C和N元 素峰,还发现了两种新的元素峰,即组成CdS纳米颗粒的S和Cd元素,表明成功制得了g-C₃N₄/CdS异质结 构。此外,在两种样品中均发现Si元素的存在,这来自于进行测试时用于负载样品的Si片。注意到g-C₃N₄ 纳米片和g-C₃N₄纳米片/CdS纳米颗粒的EDS能谱中均没有其它元素对应的峰出现,说明制备的样品均具 有较高的纯度。



图 2 $g-C_3N_4$ 纳米片和 $g-C_3N_4$ /CdS 异质结构的 EDS 能谱图 Fig.2 The EDS patterns of $g-C_3N_4$ nanosheets and $g-C_3N_4$ /CdS heterostructures

对 g-C₃N₄/CdS 异质结构和 g-C₃N₄纳米片的晶体结构进行了表征,结果如图 3 所示。在 g-C₃N₄纳米片的 XRD 图谱中,出现了两个较强的衍射峰,分别位于 13.2°和 27.7°处,与 g-C₃N₄的(100)和(002)晶面的标准峰值一致^[11]。g-C₃N₄纳米片/CdS 纳米颗粒的 XRD 图谱中,除了观察到 g-C₃N₄特征峰外,还观测到了 CdS (JCPDS 65-3414)六方纤锌矿结构的三个衍射峰,分别对应于(100)、(110)和(112)晶面^[12]。且与 CdS 纳米颗粒复合后,g-C₃N₄的特征峰强度明显减小,几乎看不到其(100)晶面对应的衍射峰,说明 CdS 纳米颗粒均 匀地沉积在 g-C₃N₄表面^[13-14]。



图 3 $g-C_3N_4$ 纳米片和 $g-C_3N_4/CdS$ 异质结构的 XRD 图谱 Fig.3 The XRD patterns of $g-C_3N_4$ nanosheets and $g-C_3N_4/CdS$ heterostructures

图 4 给出了 g-C₃N₄/CdS 异质结构的 C 1s、N 1s、Cd 3d 和 S 2p 的 XPS 高分辨率图谱。图 4(a)显示了两 个明显的特征峰,分别位于 284.6 eV 和 287.84 eV 处。其中,低结合能处的峰归属于石墨 sp²杂化的 C-C键, 较高结合能处的峰代表 g-C₃N₄中的主要碳物种^[14]。在 N 1s 的高分辨率图谱(图 4(b))中,以 398.83 eV 为中 心的峰值归因于 g-C₃N₄的三嗪环(C=N-C)中 sp²杂化的 N 原子,而位于 405.13 eV 的峰与 C-N(-C)-C 中 N 的 sp²杂化有关^[15]。图 4(c)为 Cd 3d 的 XPS 图谱,Cd 3d_{5/2}和 Cd 3d_{3/2}的特征峰分别位于在 405 eV 和 411.9 eV 处,与 CdS 的结合能相吻合^[16]。S 2p 的 XPS 图谱如图 4(d)所示,在 161.23 eV 处的特征峰与 S 2p_{3/2}对应,表 明 g-C₃N₄/CdS 样品中 S 元素的化学状态为 S^{2-[17]}。上述结果进一步表明制备的复合材料成分为 g-C₃N₄和 CdS。

为了研究所制备探测器对紫外光的探测性能,以365 nm的光作为模拟紫外光源,测试g-C₃N₄纳米片和 g-C₃N₄/CdS异质结探测器在无外加电压条件下的光电流-时间特性曲线。以紫外光照射10 s,关闭10 s为 一个周期,共进行5个周期的开关循环测试,结果如图5所示。从图中可以看到,在没有紫外光照射时,g-C₃N₄纳米片探测器没有电流产生。当打开紫外光后,g-C₃N₄纳米片探测器的光电流迅速上升并趋于稳定, 其最大值约为1.01 μA。随着紫外光的关闭,光电流快速下降,并恢复至初始值。g-C₃N₄纳米片探测器的8 倍,而且关闭紫外光后,器件的光电流也迅速恢复到初始值,这表明复合能够提高g-C₃N₄的紫外探测性能。 此外,g-C₃N₄/CdS器件的光电流在每个周期都表现出一致的变化规律,表明所制备的探测器具有稳定性和 重复性。



图 4 g-C₃N₄/CdS 异质结构的 XPS 图谱 Fig.4 The XPS spectra of g-C₃N₄/CdS heterostructures



图5 g-C₃N₄纳米片和g-C₃N₄/CdS异质结探测器在开/关紫外光下的响应特性曲线

 $\label{eq:Fig.5} Fig.5 \quad \mbox{Time dependent current response curves of g-C_3N_4$ nanosheets and g-C_3N_4$/CdS heterojunction detector under on/off UV illumination}$

为了研究所制备的器件在可见光下的工作性能,在470 nm 蓝光照射下对 g-C₃N₄纳米片和 g-C₃N₄/CdS 异质结探测器进行光探测性能测试,结果如图 6 所示。从图中可以清楚地看到,当蓝光照射时,g-C₃N₄/CdS 异质结探测器立即产生光电流并迅速上升到 1.42 μA, 而关闭蓝光后,光电流快速减小至初始状态。经过多 次循环测试,其光电流表现出相同的变化规律,表明该探测器能稳定持续地对蓝光进行探测。注意到尽管 g-C₃N₄纳米片探测器对蓝光也有响应,但最大光电流值大幅降低,仅为 g-C₃N₄/CdS 异质结探测器的 0.73%。



图6 g-C₃N₄纳米片和g-C₃N₄/CdS异质结探测器在开/关蓝光下的响应特性曲线

Fig.6 Time dependent current response curves of $g-C_3N_4$ nanosheets and $g-C_3N_4/CdS$ heterojunction detector under on/off blue light illumination

此外,在530 nm绿光照射下对g-C₃N₄纳米片和g-C₃N₄/CdS异质结构的探测性能也进行了研究。从图 7可以看出,g-C₃N₄纳米片探测器在绿光照射时,几乎没有响应,其光电流值接近于零。相比之下,g-C₃N₄/ CdS异质结探测器对绿光表现出了较高的灵敏性,当绿光照射后,光电流快速上升至1.12 μA,而关闭绿光 后,光电流迅速衰减至初始值,循环测试5个周期后,光电流的变化趋势基本一致,表明其具有一定的稳定 性。结果表明CdS修饰g-C₃N₄纳米片后,不仅能够显著提高g-C₃N₄纳米片探测器对紫外光的探测性能,同 时也能有效拓宽其光谱探测范围。



图7 g-C₃N₄纳米片和g-C₃N₄/CdS异质结探测器在开/关绿光下的响应特性曲线

Fig.7 Time dependent current response curves of $g-C_3N_4$ nanosheets and $g-C_3N_4/CdS$ heterojunction detector under on/off green light illumination

为了研究 g-C₃N₄纳米片在 CdS 修饰前后的光生电子空穴的分离情况,对 g-C₃N₄纳米片和 g-C₃N₄/CdS 异质结构的 PL 光谱进行了研究,结果如图 8 所示。从 g-C₃N₄纳米片的 PL 光谱观察到只有一个较强且宽的 荧光发射峰出现,峰值约在 460 nm 处。生长 CdS 后该复合材料在 520 nm 处出现了新的发光峰,对应于 CdS 的表面态发射峰^[18]。同时还发现 g-C₃N₄/CdS 异质结构在 460 nm 处发射峰的强度较 g-C₃N₄纳米片明显降低。一般来说,PL 发射峰的强度越高,意味着电子空穴的复合速率越高^[3]。因此表明 g-C₃N₄/CdS 异质结能够有效抑制光生电子-空穴对的复合,这可能与 g-C₃N₄ 与 CdS 形成的 II 型异质结构有关^[19]。

基于以上结果对 g-C₃N₄/CdS 异质结构的可能探测机理进行了分析,结果如图9所示。在光照射下,当 g-C₃N₄和 CdS 吸收大于其禁带宽度的光子后,就会产生光生电子和空穴。由于 CdS 导带(CB)和价带(VB) 的电位均高于 g-C₃N₄,因此 CdS 和 g-C₃N₄之间能够形成 II 型能带结构。g-C₃N₄的电子可以自发迁移到 CdS 的 CB上,同时,CdS上产生的空穴很容易向 g-C₃N₄的 VB 转移,有效促进光生电子-空穴对的分离,从而使光电流得到了显著增强。此外,g-C₃N₄/CdS 点异质结构中紧密接触的界面也为光生载流子的迁移提供了必要 的平台^[8]。随后,迁移到 CdS 的电子通过外电路转移到 Pt 电极,与电解液质的 S_n²⁻反应生成 S²⁻。而迁移到 g-C₃N₄表面的空穴被 S²⁻捕获形成 S 单质,S 单质与 S_{n-1}²⁻反应再次生成 S_n^{2-[20]}。由于 S²⁻和 S_n²⁻的连续循环,因此 g-C₃N₄/CdS 异质结紫外探测器可以对紫外光和可见光实现持续稳定的探测。



图 8 $g-C_3N_4$ 纳米片和 $g-C_3N_4/CdS$ 异质结构的 PL 图谱 Fig.8 The PL spectra of $g-C_3N_4$ nanosheets and $g-C_3N_4/CdS$ heterostructures



图 9 g-C₃N₄/CdS 异质结构在紫外光和可见光下的探测机理 Fig.9 The schematic illustration of g-C₃N₄/CdS detector under UV and visible light

3 结论

本文采用简单的化学水浴法成功合成了g-C₃N₄/CdS异质结构。对其形貌、结构和成分的分析结果表明CdS均匀致密地附着在g-C₃N₄纳米片上,并且该复合材料具有较好的结晶质量。光致发光结果表明CdS与g-C₃N₄复合后可以有效抑制光生电子-空穴对的复合。在紫外光照射下,g-C₃N₄/CdS异质结探测器的探测性能测试结果显示其光电流最高值达到了7.61 μA,相比g-C₃N₄纳米片探测器提高约8倍。此外,g-C₃N₄/CdS异质结探测器不仅在紫外光,也在蓝光和绿光照射下表现出了快速的光响应以及可循环性和稳定性。

参考文献

- [1] YANG Wei, HU Kai, TENG Feng, et al. High-performance silicon-compatible large-area UV-to-visible broadband photodetector based on integrated lattice-matched type II Se/n-Si heterojunctions[J]. Nano Letters, 2018, 18(8): 4697-4703.
- [2] DHINESH B V, MD A H, MANAS R P, et al. 2D Organic-inorganic hybrid thin films for flexible UV-visible photodetectors[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(15):1605554.
- [3] FANG Huajing, MA Hailong, ZHENG Cheng, et al. A high-performance transparent photodetector via building hierarchical g-C₃N₄ nanosheets/ CNTs van der Waals heterojunctions by a facile and scalable approach[J]. Applied Surface Science, 2020, 529:147122.
- [4] REDDEPPA M, KIMPHUNG N T, MURALI G, et al. Interaction activated interfacial charge transfer in 2D g-C₃N₄/ GaN nanorods heterostructure for self-powered UV photodetector and room temperature NO₂gas sensor at ppb Level[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2020, 329:129175.
- [5] SHEN Qingming, ZHAO Xiaomei, ZHOU Shiwei, et al. ZnO/CdS hierarchical nanospheres for photoelectrochemical sensing of Cu²⁺[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2011, 115:17958–17964.
- [6] XING Zhengwei, SHEN Honglie, LI Jinze, et al. Photoluminescence properties of freestanding porous silicon filled with

CdS nanoparticles [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(9): 0916001.

邢正伟, 沈鸿烈, 李金泽, 等. CdS纳米颗粒填充的自支撑多孔硅光致发光特性[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0916001.

- [7] CUI Yanjuan. In-situ synthesis of C₃N₄/CdS composites with enhanced photocatalytic properties [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2015, 36: 372-379.
- [8] LU Zhenzhen, ZHANG Qi, LI Siqi, Preparation and photocatalytic performance of CdS-graphite phase carbon nitride composite photocatalyst[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(3):662-673.
 鲁 浈 浈, 张琪, 栗思琪, CdS-石墨相氮化碳复合光催化剂的制备及其光催化性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(3): 662-673.
- [9] XU Huanyan, WU Licheng, JIN Liguo, et al. Combination mechanism and enhanced visible-light photocatalytic activity and stability of CdS/g-C₃N₄ heterojunctions[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(1):30-38.
- [10] VU N N, KALIAGUINE S, DO T O. Synthesis of g-C₃N₄/CdS nanocomposite with chemically bonded interface for enhanced sunlight-driven CO₂ photoreduction[J]. ACS Applied Energy Materials, 2020, 3 (7):6422-6433.
- [11] LIU Qingying, QI Yiling, ZHENG Yifan, et al. Synthesis and enhanced photocatalytic activity of g-C₃N₄ hybridized CdS nanoparticles[J]. Bulletin of Materials Science, 2017, 40(7):1329–1333.
- [12] JIAO Jing, SHEN Honglie, ZHANG Sanyang, et al. Influence of pH valve on photo-current response property of CdS film prepared by chemical bath deposition [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8):0831003.
 焦静, 沈鸿烈,张三洋,等. 溶液的 pH 值对化学浴法制备 CdS 薄膜光电流响应性能的影响[J]. 光子学报, 2015, 44 (8):0831003.
- [13] FU Jie, CHANG Binbin, TIAN Yanlong, et al. Novel C₃N₄-CdS composite photocatalysts with organic-inorganic heterojunctions: in situ synthesis, exceptional activity, high stability and photocatalytic mechanism [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2013, 1:3083-3090.
- [14] YE Xiangju, DAI Xia, MENG Sugang, et al. A novel CdS/g-C₃N₄ composite photocatalyst: preparation, characterization and photocatalytic performance with different reaction solvents under visible light irradiation [J]. Chinese Journal of Chemistry, 2017, 35(2):217-225.
- [15] ZHANG Jie, TIAN Jingzhi, HAO Xin, et al. Synergistic effect of CDs/ZnO/g-C₃N₄ ternary component for photocatalytic degradation of dyes [J]. Fine Chemicals, 2019, 36(7):1439-1445.
 张洁,田景芝,郝欣,等.CDs/ZnO/g-C₃N₄三元组分协同作用促进光催化降解染料[J]. 精细化工, 2019, 36(7): 1439-1445.
- [16] LU Meiliang, PEI Zengxia, WENG Sunxian, et al. Constructing atomic layer g⁻C₃N₄-CdS nanoheterojunctions with efficiently enhanced visible light photocatalytic activity [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16:21280-21288.
- [17] XU Yong, FU Zicheng, CAO Shuang, et al. Highly selective oxidation of sulfides on a CdS/C₃N₄ catalyst with dioxygen under visible-light irradiation [J]. Catalysis Science & Technology, 2017, 7:587-595.
- [18] TANG Aimin, QIAN Rongjing. Preparation and characterization of cellulose/CdS nanocomposite [J]. Jorunal of Functional Materials, 2010, 41(11):2034-2037.

唐爱民, 钱荣敬. 原位复合制备纤维素基CdS纳米复合材料及其表征[J]. 功能材料, 2010, 41(11):2034-2037.

- [19] JIAN Qiyan, JIN Zhiliang, WANG Haiyu, et al. Photoelectron directional transfer over a g-C₃N₄/CdS heterojunction modulated with WP for efficient photocatalytic hydrogen evolution[J]. Dalton Transactions, 2019, 48: 4341-4352.
- [20] LI Xiang, GAO Shiyong, WANG Guangning, et al. A self-powered ultraviolet photodetector based on TiO₂/Ag/ZnS nanotubes with high stability and fast response[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2020, 8: 1353–1358.

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFA0705201), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No.LH2020E033)