文章编号:1007 - 4252(2023)03 - 0003 - 225　　DOI:10.20027/j.gncq.2023.0020

MoS_2/GaAs 异质结光电探测器的制备及性能研究

李　俊,马兴科*
(河南工业大学理学院,450001)

摘要:使用磁控溅射法在 GaAs 衬底上制备 MoS_2 薄膜,形成 GaAs/MoS_2 异质结,通过控制磁控溅射的时间来控制薄膜厚度,并对 GaAs/MoS_2 异质结的光电性能进行了研究。结果表明:在溅射时间为 20min 薄膜厚度为 300nm 时器件的性能最佳,光电探测器的响应度和比探测率分别为 0.107AW^{-1} 和 3.13×10^{11}Jones,器件对 405nm 到 980nm 波长的光都有良好的响应,所制备的器件适合用于近红外光探测。

关键词:MoS_2 薄膜;磁控溅射法;异质结;光电探测器
中图分类号:O475　　**文献标志码**:A

Preparation and properties of MoS_2/GaAs heterojunction photodetectors

LI Jun, MA Xing-ke*
(College of Science, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: MoS_2 thin films were prepared on GaAs substrate by magnetron sputtering method to form GaAs/MoS_2 heterojunction. The thickness of the thin films was controlled by controlling the time of magnetron sputtering. The photoelectric properties of GaAs/MoS_2 heterojunction are also studied. The results show that the performance of the device is the best when the sputtering time is 20min and the film thickness is 300nm, the responsivity and specific detection rate of the photodetector are 0.107AW^{-1} and 3.13×10^{11}Jones. The device has good response to the wavelength of 405nm to 980nm, and the prepared device is suitable for near infrared light detection.

Key words: MoS_2 thin film; Magnetron sputtering; Heterojunction; Photodetector

0　引言

二硫化钼(MoS_2)作为常见过渡金属硫族化合物,其层内通过紧密的化学键结合,层间通过范德华力结合,因此十分容易被剥离成单层或少层[1]。MoS_2具有良好的化学稳定性和润滑性能[2-4],作为窄带系 p 型半导体,其带隙由单层的 1.9eV 过渡到厚层的 1.2eV[5],对应着可见光和近红外光的能量。因此,MoS_2在光电探测器、太阳能电池、场效应晶体管等器件方面有着广阔的应用前景[6-8]。砷化镓(GaAs)作为直接带隙半导体材料,带隙为 1.4eV,相

收稿日期:2023-04-20;　　**修订日期**:2023-06-01
作者简介:李　俊(1996—), 男, 河南工业大学理学院(E-mail:2573378388@qq.com).
通信作者:马兴科(1963—), 男, 博士, 教授, 河南工业大学理学院(E-mail:maxingke@haut.edu.cn).

比与 Si 有更大的电子迁移率,且表面不容易被氧化,因此常用于制备集成电路衬底,光电探测器等器件[9-11]。制备 MoS_2的方法主要有机械剥离法、磁控溅射法、化学气相沉积法、分子束外延法等[12-17]。磁控溅射法相对于其他方法有成膜速率快,薄膜均匀、操作简单等优点。目前,基于 MoS_2的光电探测器已有许多报道,但是关于 MoS_2与 GaAs 异质结光电探测器的研究却很少见,特别是薄膜的厚度对光电探测器的影响需要深入而系统的研究。

本文利用磁控溅射的方法在 GaAs 衬底上制备了 MoS_2薄膜,通过控制溅射时间得到不同厚度的 MoS_2薄膜,研究薄膜厚度对晶体结构和表面形貌的影响。制备成成光电探测器后,探讨了薄膜厚度对光电探测器的影响,测试了器件在不同功率和不同波长下的响应情况,计算了器件在不同光功率下的响应度和比探测率。

1 实验

选用射频磁控溅射作为制备二硫化钼的装置,靶材选纯度为 99.99%的二硫化钼靶材,选用 GaAs 作为衬底原位生长 MoS_2。将 GaAs 衬底放入无水乙醇和去离子水中分别超声 3 次,然后将衬底放入真空室中,将真空室压强抽至 3×10^{-3} Pa,然后升高温度至 300℃,功率设定为 100W,通入氩气的流量为 6sccm,预溅射 5 分钟,然后打开挡板,选择不同的溅射时间(10min、20min、30min、40min、50min)制备出二硫化钼薄膜。

利用 X 射线衍射仪和拉曼光谱仪测定薄膜的晶体结构。利用扫扫描电子显微镜来观察异质结的表面形貌和截面形貌。利用材料和半导体参数分析仪测试所制备器件的光电性能。

2 实验结果与分析

2.1 薄膜的结构与形貌

表 1 溅射时间与薄膜厚度的关系

Tab1 Relation between sputtering time and film thickness

时间(min)	10	20	30	40	50
膜厚(nm)	~ 160	~ 300	~ 430	~ 580	~ 650

图 1(a)为不同厚度 MoS_2薄膜的 XRD 图。可以看出,当溅射时间小于 10min 时。仅出现衬底 GaAs 的衍射峰,无其他明显的衍射峰,这是由于 MoS_2与 GaAs 晶格常数不匹配所造成的,随着溅射时间的增加,在 59.3°出现了明显的衍射峰,对应于 MoS_2的(110)晶面,当薄膜厚度继续增加,在 34.5°出现了衍射峰,对应于 MoS_2的(100)晶面。图 1(b)为不同厚度 MoS_2薄膜的 Raman 图。可以看出所有样品在 385cm^{-1}和 409cm^{-1}附近有两个明显的衍射峰,对应于 MoS_2的面内振动模式 E^1_{2g}和面外振动模式 A_{1g},两个振动模式的峰位差约为 24cm^{-1},随着溅射时间的增加,两个衍射峰有一定程度的蓝移,这是因为薄膜在高温环境中不断的释放应力所导致的。图 1(c)为沉积 20min 所得样品的表面 SEM 图,表面是由大量的纳米针状 MoS_2堆叠而成,表面平整且没有明显的缺陷,说明所制备的薄膜均匀性较好。图 1(d)为所制备的样品的截面 SEM 图,可以看出薄膜与衬底结合良好,且界面清晰,利用扫描电镜测得薄膜的厚度约为 300nm,表 1 为不同溅射时间的薄膜厚度,初始时薄膜的生长速率较快,约为 16nm/min,主要是初始阶段薄膜是以“岛加层”的模式生长,随着溅射时间的增加,薄膜的生长速率减慢约为 14nm/min,这时薄膜主要以层状生长为主。

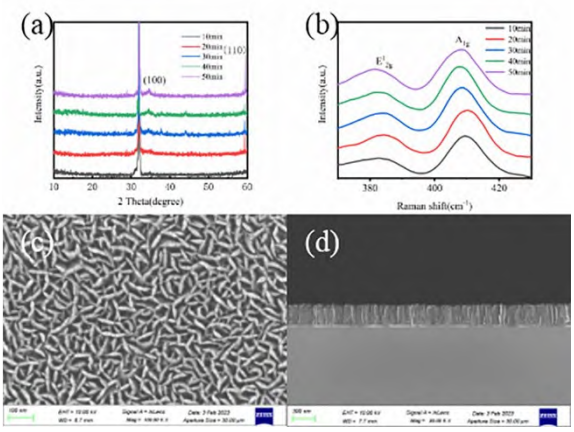

图 1 (a)不同溅射时间下的 XRD 图 (b)不同溅射时间下的 Raman 图 (c)溅射 20min MoS_2表面 SEM 图 (d)溅射 20min MoS_2截面 SEM 图

Fig. 1 (a) XRD pattern at different sputtering times (b) Raman pattern at different sputtering times (c) SEM image of MoS_2 surface after 20 minutes of sputtering (d) SEM image of MoS_2 cross section after 20 minutes of sputtering

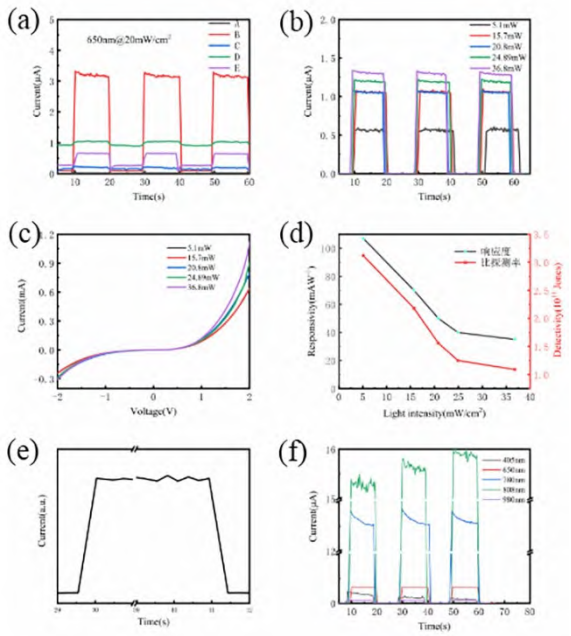

图 2　(a)不同器件的 I-T 图(b)器件在不同功率下的 I-T 图(c)器件在不同功率下的 I-V 图(d)器件在不同功率下的响应度和比探测率(e)器件的响应时间(f)器件在不同光照波长下的 I-T 图

Fig. 2 (a) I-T diagram of different devices (b) I-T diagram of devices at different powers (c) I-V diagram of devices at different powers (d) Responsiveness and specific detectability of devices at different powers (e) Response time of devices (f) I-T diagram of devices at different light wavelengths

2.2　光电探测器性能测试

在 MoS_2表面涂抹银胶作为电极,并在 GaAs 底部涂抹铟镓共晶作为电极,基于此方法,将 5 个不同厚度的样品制备成光电探测器分别记做 A、B、C、D、E。图 2(a)为不同器件在波长为 650nm、功率为 20mw 光照下的 I-T 特性曲线,A 器件有着较低的光电流(2nA)和暗电流(0.8nA)。B 器件在光照下有明显的响应电流,C、D、E 器件的响应电流相对于 B 器件有明显的下降,主要是因为薄膜厚度逐渐增加,耗尽层过宽导致暗电流过大,影响器件的灵敏度[18]。所以我们选用 B 器件进行下一步的测试,首先测试器件在不同功率下的光响应情况,图 2(b)展示了器件在不同光功率下的 I-T 图,器件的暗电流约为 8×10^{-10}A,而光电流可以达到 1.3×10^{-6}A,即使器件在 5.1mW 的低功率下,仍能保持 7.5×10^{2}的光暗电流之比。图 2(c)展示了器件随着光照强度的增加,响应电流也随之增加,这说明器件对信号有着良好的辨识能力。响应度 R 是衡量光电探测器的一个指标,它衡量了器件将光信号转换为电信号的能力。

$$R = \frac{I_P - I_d}{PS}$$

其中 I_P 是光电流,I_d 是暗电流,P 是入射光功率,S 为接受光照的面积,本文中为 0.01cm^2。比探测率表示光电探测器能够探测最小光信号的能力,通常用符号 D^* 表示

$$D^* = \sqrt{\frac{S}{2q\,I_{dark}}}R$$

其中 R 为响应度,q 为单位电荷,S 为器件面积,本文中约为 0.25cm^2,图 2(d)展示了器件在不同光功率下的响应度,在功率为 5.1mW 的光照下,器件的响应度和比探测率分别为 0.107AW^{-1}和3.13×10^{11}Jones(1Jones = $1\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$),随着光照功率的继续增加,响应度和比探测率会随着光照功率的增加而下降,这是因为光照强度增加导致载流子复合剧烈,导致响应度降低。图 2(e)展示了器件的上升时间和下降时间分别为 485ms 和 501ms。图 2(f)展示了器件在 405-980nm 的波长下的光响应情况,在不同波长的光照下,器件都展示出了良好的重复性和稳定性,显示出优异的近红外光探测能力。当入射光的波长小于 880nm 时,器件的光响应由 GaAs 和 MoS_2共同提供,当入射光的波长大于 880nm,此时已经超过了 GaAs 的吸收范围,光响应由 MoS_2提供。器件优秀的能力主要取决于两个原因:1、成功构筑了大面积的垂直异质结,它能有效的缩短载流子的运输路径。2、制备的异质结为Ⅱ型异质结,能够有效的分离载流子,延长非平衡载流子的寿命,能够有效的提升器件的性能。

3　结论与展望

本文利用射频磁控溅射技术在 GaAs 衬底上制备了 MoS_2薄膜,随着薄膜厚度的增加,薄膜的结晶质量逐渐提高,在制备成器件后,对器件的光电性能进行测试,当溅射时间为 20min 薄膜厚度为 300nm 时器件的光响应情况最好,器件的开关比达到了 1.63×10^{3},其响应度和比探测率分别为 0.107AW^{-1}和 3.13×10^{11} Jones,上升时间和下降时间分别为 485ms 和 501ms。同时器件对 405nm-980nm 波长

范围的光都有良好的响应。用本文的方法所制备的光电探测器具有良好的响应度和探测率,可用于制备高性能的近红外光探测器。

针对目前的研究现状,提升光电探测器的性能可以从以下几个方面进行:1、继续对制备 MoS_2 薄膜的方法进行优化。2、在异质结界面增加绝缘层或钝化层以降低暗电流。3、采用性能更优异的电极材料以降低材料的阻值。

参考文献:

[1] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene[J]. Nature, 2005.

[2] Bodik M, Sojkova M, Hulman M, et al. Friction control by engineering the crystallographic orientation of the lubricating few-layer MoS_2 films[J]. Applied Surface Science: A Journal Devoted to the Properties of Interfaces in Relation to the Synthesis and Behaviour of Materials, 2021(Feb.28 Pt.1): 540.

[3] Hasz K R, Vazirisereshk M R, Martini A, et al. Bifurcation of nanoscale thermolubric friction behavior for sliding on MoS_2[J]. American Physical Society (APS), 2021(8).

[4] Freedy, Keren M.Zhang, HuairuoLitwin, Peter M.Bendersky, Leonid A. Davydov, Albert, VMcDonnell, Stephen. Thermal Stability of Titanium Contacts to MoS_2[J]. ACS applied materials & interfaces, 2019, 11(38).

[5] Xiao, Peng, Kim, et al. Simple Fabrication of Highly Sensitive Photodetectors Using MoS_2 Nanoparticles and Ag Nanowires[J]. Science of Advanced Materials, 2017.

[6] Zou W M. Few-Layered MoS_2 Field-Effect Transistors with a Vertical Channel of Sub-10 nm[J]. ACS applied materials & interfaces, 2020, 12(29).

[7] Lei Y, Yang X, Feng W. Synthesis of vertically-aligned large-area MoS_2 nanofilm and its application in MoS_2/Si heterostructure photodetector[J]. Nanotechnology, 2022, 33(10):105709-.

[8] M. Zumuukhoro, Z. Khurelbaatar. Broadband photodetector based on MoS_2/Ge heterojunction for optoelectronic applications[J]. Vacuum, 2023, 209:111746-.

[9] Huang Y C, Parimi V, Chang W C, et al. Silicon-Based Photodetector for Infrared Telecommunication Applications [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, (99):1-1.

[10] Wu, JianghongQiu, CaiyuFeng, SiruiYao, TianyiYan, YanfeiLin, Shisheng. A synergetic enhancement of localized surface plasmon resonance and photo-induced effect for graphene/GaAs photodetector[J]. Nanotechnology, 2020, 31(10).

[11] Baruah S, Bora J, Maity S. Optical modeling of high-performance GaAs based photodetector with periodic right triangular texturization on nanopillar arrays structure[J]. Semiconductor Science and Technology, 2021, 36(4).

[12] A I Belikov, A Dolomanzhi, V N Kalinin. Initial growth state MoS_2 thin film by magnetron sputtering[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1410(1):012005 (4pp).

[13] Wei Z, Deng S, Kai W, et al. Feasible Route for a Large Area Few-Layer MoS_2 with Magnetron Sputtering[J]. Nanomaterials, 2018, 8(8):590.

[14] Shan J, Sun J, Liu Z. Chemical Vapor Deposition Synthesis of Graphene over Sapphire Substrates[J]. ChemNanoMat.

[15] Saeed M, Alshammari Y, Majeed S A, et al. Chemical Vapour Deposition of Graphene—Synthesis, Characterisation, and Applications: A Review[J]. Molecules, 2020, 25((17)):3856.

[16] Li W, Zhang Y, Long X, et al. Gas Sensors Based on Mechanically Exfoliated MoS_2 Nanosheets for Room-Temperature NO_2 Detection[J]. Sensors, 2019, 19(9):2123.

[17] Mb M. Mechanical exfoliation and layer number identification of MoS_2 revisited[J]. 2D Materials, 2017, 4 (45013).

[18] 李秀华,张敏,杨佳等. 薄膜厚度对射频磁控溅射 β-Ga_2O_3 薄膜光电性能的影响[J].物理学报,2022,71(04):286-297.