文章编号：1000-7032(2022)04-0545-07

高厚度 n 型 β-Ga_2O_3薄膜的 MOCVD 制备

李政达，焦　腾，董　鑫*，刁肇悌，陈　威
（吉林大学 电子科学与工程学院，集成光电子学国家重点联合实验室，吉林 长春　130012）

摘要： 高厚度的 Ga_2O_3 薄膜能够提高器件的击穿电压，这种高厚度 Ga_2O_3 薄膜往往是通过 HVPE 法制备的。然而 HVPE 法存在着成本高、设备少等缺点。本文通过金属有机化学气相沉积（MOCVD）工艺，以 SiH_4 为 n 型掺杂源，在 Ga_2O_3 衬底上生长了高厚度的 n 型 β-Ga_2O_3 薄膜，并且研究了 SiH_4 流量对 β-Ga_2O_3 性质的影响。实验中制备的 β-Ga_2O_3 薄膜厚度达到 4.15 μm。薄膜的晶体质量高，表面致密光滑且呈现台阶流生长模式。随着 SiH_4 流量增加，晶体质量逐渐降低，电子浓度显著增加，电子迁移率降低。目前，高厚度 β-Ga_2O_3 薄膜的电子浓度可以在 3.6×10^{16} ~ 5.3×10^{18} cm^{-3}范围内调控；当薄膜电子浓度为 3.6×10^{16} cm^{-3}时，其电子迁移率可达 137 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$。本文论证了 MOCVD 工艺进行高厚度 n 型 β-Ga_2O_3 薄膜生长的可行性，这也为 β-Ga_2O_3 基垂直结构功率器件的制备提供了一种新途径。

关　键　词： 氧化镓；金属有机化学气相沉积（MOCVD）；高厚度薄膜
中图分类号： O482.31　　**文献标识码：** A　　**DOI：** 10.37188/CJL.20210398

Preparation of n-type β-Ga_2O_3 Film with High Thickness by MOCVD

LI Zheng-da, JIAO Teng, DONG Xin*, DIAO Zhao-ti, CHEN Wei
(*State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun* 130012, *China*)
* *Corresponding Author, E-mail: dongx@jlu.edu.cn*

Abstract: High-thickness Ga_2O_3 film could increase the breakdown voltage of the device and it was generally prepared by HVPE. However, this method has some disadvantages such as the high cost and shortage of machines. In this paper, n-type β-Ga_2O_3 film with high thickness was prepared by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) process on the Ga_2O_3 substrate with SiH_4 as the n-type doping source and the influence of SiH_4 flow on the properties of β-Ga_2O_3 was studied. The thickness of the β-Ga_2O_3 film prepared in the experiment reaches 4.15 μm. The crystal quality is high, and the surface of the film is dense and smooth and presents a step flow growth mode. As the flow of SiH_4 increases, both the crystal quality and the electron mobility gradually decreases, while the electron concentration increases significantly. At present, the electron concentration of the high-thickness β-Ga_2O_3 film can be adjusted within the range of 3.6×10^{16} – 5.3×10^{18} cm^{-3}; when the film electron concentration is 3.6×10^{16} cm^{-3}, the electron mobility can reach 137 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$. This article demonstrates the feasibility of growing high-thickness n-type β-Ga_2O_3 films by MOCVD process, which also provides a new way for the preparation of β-Ga_2O_3-based vertical structure power devices.

Key words: gallium oxide; metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD); high-thickness film

收稿日期： 2021-12-18；**修订日期：** 2022-01-09
基金项目： 国家自然科学基金(61774072)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China(61774072)

1 引 言

近年来,随着电力电子器件的飞速发展,人们对半导体材料提出了越来越高的要求。作为一种新型的超宽禁带半导体材料,Ga_2O_3 的禁带宽度更大,达到了 4.9 eV[1-4];拥有 8 MV · cm^{-1}的理论击穿场强和3 444 的巴利伽优值。这些特性使得 Ga_2O_3 基功率器件在更耐高压的同时具有更低的功耗,在大功率器件制备领域有广阔的发展前景[5-10]。此外,Ga_2O_3 在日盲紫外探测器、光探测器等领域同样有广泛的应用价值[11]。

Ga_2O_3 有 6 种同分异构体,包含 5 种稳定相和 1 种瞬态相,在这 6 种形态之中,具有单斜晶体结构的 β-Ga_2O_3 有着良好的热稳定性和化学稳定性,得到了科研人员的广泛关注。目前,常见的制备 β-Ga_2O_3 薄膜的方法主要有磁控溅射法[12-14]、卤化物气相外延法(HVPE)[15-18]和金属有机化学气相沉积(MOCVD)[19-25]等。考虑到高压氧化镓功率器件需要 Ga_2O_3 薄膜的厚度达到数微米,而 HVPE 法具有生长速度快的优点,所以目前制备氧化镓器件所使用的高厚度 Ga_2O_3 薄膜基本是通过 HVPE 制备的。如 Nikolaev 等通过 HVPE 法在 *c* 面蓝宝石上生长了厚度为 11 μm 的 α-Ga_2O_3 薄膜,生长速度在 1 ~2 μm · h^{-1}之间[26];Nadeemullah 等通过 HVPE 法生长了 20 μm 厚的 β-Ga_2O_3 薄膜,并利用15 keV 的 X 射线同步辐射对薄膜的位错和微观结构特性做了详细的分析[27]。但是 HVPE 工艺存在制备薄膜的成本较高、设备普及量低等缺点。相较于 HVPE,MOCVD 具有成本低、膜厚控制精确、实验重复性好等优点[28],是目前工业生产中采用的主要工艺。

本文通过 MOCVD 工艺成功制备出了高厚度 β-Ga_2O_3 薄膜,薄膜厚度达到了 4.15 μm。此外,通过控制工艺条件,研究了 SiH_4 流量对 β-Ga_2O_3 薄膜晶体质量和电学特性的影响,实现了载流子浓度在3.6×10^{16} ~ 5.3×10^{18} cm^{-3}范围内的 n 型稳定可控掺杂,这为我们后续制备氧化镓基器件奠定了基础。

2 实 验

为了尽量减少异质外延带来的晶格失配和位错,本实验在(001)方向的单晶 Ga_2O_3 衬底上,采用 MOCVD 工艺生长了 β-Ga_2O_3 薄膜。实验流程如下:首先是清洗衬底,将 Ga_2O_3 衬底依次用丙酮、乙醇、去离子水超声清洗 5 min,随后取出衬底,用氮气吹干。将清洗后的衬底放入 MOCVD 反应室。实验中采用三甲基镓(TMGa,6N)作为镓源,温度设置为 1 ℃,高纯氧气(5N)做氧源,使用高纯氩气(6N)作为 TMGa 的载气,硅烷(SiH_4,5×10^{-5})和氮气的混合气作为硅掺杂源。薄膜生长过程中,控制氩气流量为 55 mL · min^{-1},氧气流量为 600 mL · min^{-1},反应室内的压强为 4 000 Pa(40 mbar),生长温度为750 ℃,生长时间为5 h。在控制 SiH_4 流量分别为0,4,6,8,10 mL · min^{-1}的条件下(SiH_4 掺杂量依次为 0,0.06,0.09,0.12,0.15 mL),利用 MOCVD 设备(Emcore-D180,美国)制备出 5 组不同 SiH_4 掺杂源浓度的 β-Ga_2O_3 薄膜,以研究 SiH_4 流量对 β-Ga_2O_3 薄膜特性的影响。

我们利用 X 射线衍射仪(XRD,Rigaku TTRI-II,日本)表征薄膜晶体质量;利用扫描电子显微镜(SEM,JEOL,JSM- 6700F,日本)测量薄膜的厚度并观察薄膜的形貌;使用原子力显微镜(AFM,Veeco,Plain-View,NY,美国)观察薄膜表面结构和粗糙度;采用霍尔测试仪(Accent, HL5500PC,Hertfordshire,UK)测定薄膜内载流子浓度和载流子迁移率。

3 结果与讨论

3.1 X 射线衍射结果分析

图 1 是在不同 SiH_4 流量下所制备 β-Ga_2O_3 薄膜的 XRD 图谱,其中图 1(a)为各样品的 2θ 扫描曲线。如图所示,所有样品均在 $2\theta = 15.5°$和 $2\theta = 31.2°$附近存在尖锐的衍射峰,分别对应于 β-Ga_2O_3 的(001)和(002)晶面,说明通过 MOCVD 工艺制备出的 β-Ga_2O_3 薄膜结晶质量良好。同时,与没有通 SiH_4 的薄膜相比,通入 SiH_4 的薄膜没有出现其他衍射峰,说明掺杂并未使 β-Ga_2O_3 的晶体结构发生变化。图 1(b)为(002)晶面的双晶摇摆曲线,可以发现,随着 SiH_4 流量的增加,衍射峰逐渐向大角度方向偏移。这是因为 Si 的离子半径比 Ga 离子小,在掺杂过程中 Si 离子逐渐取代晶格上的 Ga 离子,使得晶面间距减小导致的。根据布拉格方程:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \tag{1}$$

其中晶面间距 d 变小，衍射波波长 λ 不变，所以 θ 增大，从而导致衍射峰整体向大角度方向偏移[29]。此外，随着掺杂浓度增大，衍射峰半峰宽也不断增大。值得注意的是，当 SiH_4 流量为 10 mL·min^{-1}时，除了上述的衍射峰外，在 15.78°附近还出现了一个较弱较宽的衍射峰。这与掺杂浓度过大导致薄膜质量降低以及掺杂导致的晶格常数减小有着密不可分的关系，同时说明了掺杂浓度的增加不利于薄膜高晶体质量的保持[30]。

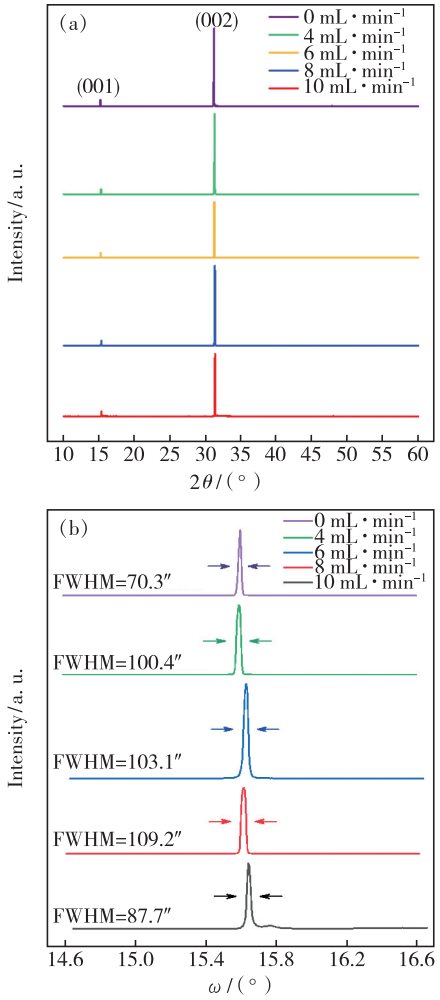

图 1　不同 SiH_4 流量下的 β-Ga_2O_3 薄膜 XRD 扫描图谱。(a)2θ 扫描图谱；(b)(002)晶面双晶摇摆曲线图谱。

Fig. 1　XRD scan pictures of β-Ga_2O_3 films with different SiH_4 flow. (a)2θ scan picture. (b) Double crystal rocking curve atlas of (002) crystal plane.

3.2　SEM 扫描结果分析

为了观察薄膜表面形貌，我们对各样品进行了 SEM 测试。图 2(a)～(d)分别是 SiH_4 流量为 0，6，8，10 mL·min^{-1}样品的 SEM 扫描图，从图中可以看出，未掺杂的样品表面非常平整且致密紧凑，基本观察不到明显凸起和台阶。当 SiH_4 流量为 6 mL·min^{-1}时，薄膜表面出现明显台阶，台阶方向一致，间隔大小较为规律，这与 Ga_2O_3 台阶流生长模式一致。随着掺杂浓度进一步增加，台阶变得稀疏粗糙，台阶间隔变大。当 SiH_4 流量为 10 mL·min^{-1}时，台阶进一步退化，薄膜表面逐渐出现杂质点，薄膜质量明显下降。这是因为掺杂的 Si 原子会影响 Ga 原子和 O 原子的迁移速率和不同方向上的能量分布，从而影响薄膜生长取向，降低了结晶质量，这与 XRD 分析结果一致。此外，为了测试薄膜厚度，我们对样品进行了 SEM 截面图的测试。图 3 为未掺杂的 β-Ga_2O_3 薄膜截面 SEM 照片。从图中可以看出，β-Ga_2O_3 薄膜厚度约为 4.15 μm，这一数值已经可以用来制备肖特基势垒二极管等器件[31]。此外，根据薄膜厚度与

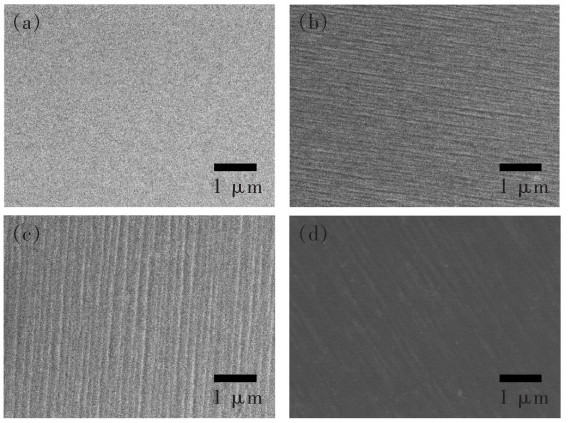

图 2　不同 SiH_4 流量的 β-Ga_2O_3 薄膜 SEM 图片。(a)0 mL·min^{-1}；(b)6 mL·min^{-1}；(c)8 mL·min^{-1}；(d)10 mL·min^{-1}。

Fig. 2　SEM pictures of β-Ga_2O_3 films with different SiH_4 flow. (a)0 mL·min^{-1}. (b)6 mL·min^{-1}. (c)8 mL·min^{-1}. (d)10 mL·min^{-1}.

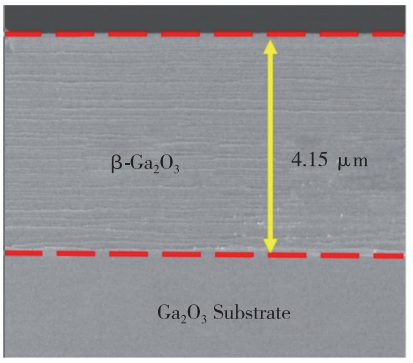

图 3　β-Ga_2O_3 薄膜的横截面 SEM 图片

Fig. 3　SEM picture of the cross-section of β-Ga_2O_3 film

生长时间可知,在该生长条件下,MOCVD 工艺生长薄膜的速率约为 0.8 μm · h^{-1}。

3.3 AFM 结果分析

为了表征样品表面的粗糙程度,我们对样品进行了 AFM 测试,图 4(a) ~ (d)分别是 SiH_4 流量为 0,6,8,10 mL · min^{-1}薄膜的表面 AFM 图。通过分析发现,薄膜表面粗糙度依次为:0.585,3.35,6.21,8.62 nm。图 5 为 AFM 表面沿直线扫描图,扫描方向如图 4 中的标注。结合图 4 可以看出,没有通 SiH_4 的薄膜,其表面的台阶均匀、完整、有序,并且台阶的高度非常低,约为 2 nm。我们推测,过低的台阶高度使得 SEM 在较低的放大倍数下,难以清晰地观察到薄膜表面形貌。通入 SiH_4 后,薄膜表面的台阶明显变高,且随着掺杂浓度的增加,台阶排列周期显著增加,台阶高度不断提高,从而增加了薄膜表面粗糙度。该测试结果与 XRD 和 SEM 分析得到的结果相符,说明 SiH_4 在一定程度上破坏了 Ga_2O_3 薄膜的表面形貌,降低了薄膜结晶质量。

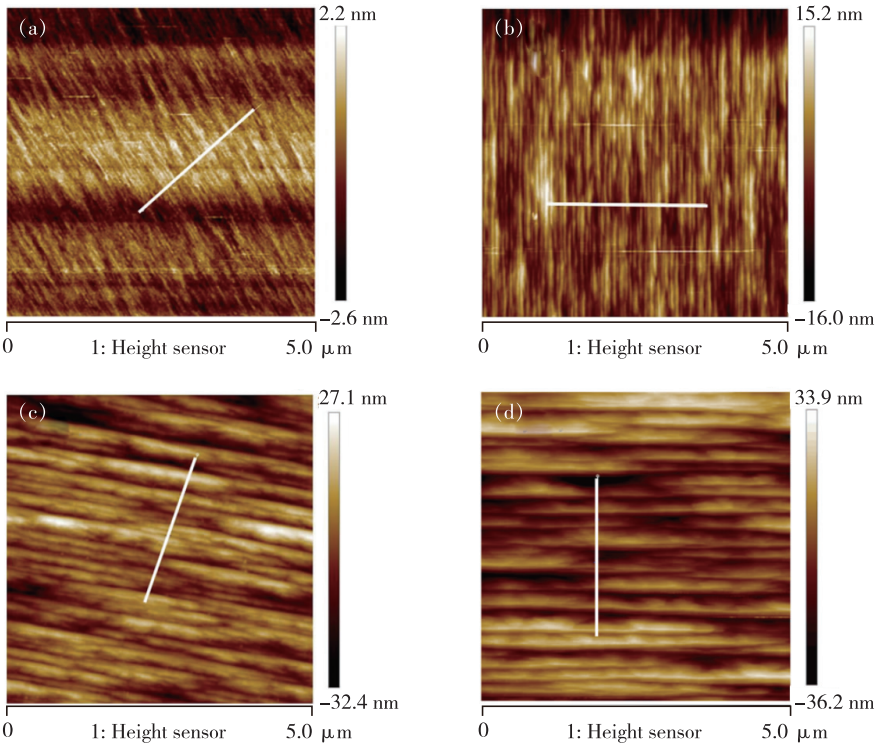

图 4 不同 SiH_4 流量的 β-Ga_2O_3 薄膜 AFM 测试图片。(a)0 mL · min^{-1};(b)6 mL · min^{-1};(c)8 mL · min^{-1};(d)10 mL · min^{-1}。

Fig. 4 AFM test pictures of β-Ga_2O_3 films with different SiH_4 flow. (a)0 mL · min^{-1}. (b)6 mL · min^{-1}. (c)8 mL · min^{-1}. (d)10 mL · min^{-1}.

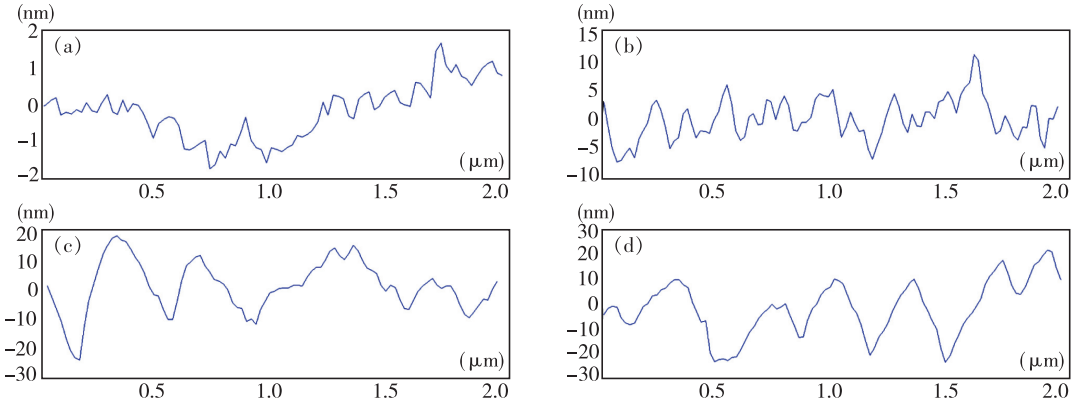

图 5 薄膜的横向扫描图

Fig. 5 Horizontal scan picture of the films

3.4　Hall 测试分析

表 1 和图 6 为薄膜霍尔测试的结果。从中可以看出，未掺杂薄膜的电子浓度非常低，这说明未掺杂 β-Ga_2O_3 薄膜内本征缺陷较低，晶体质量较高。对于 n 型掺杂的 β-Ga_2O_3 薄膜，随着 SiH_4 流量的增加，薄膜内电子浓度逐渐增大，载流子迁移率逐渐下降。其原因是薄膜掺杂后，Si 原子有效替代了 Ga 原子从而电离出导电电子。而掺杂的增加不仅增加了薄膜电子浓度，也会增加薄膜内缺陷密度，从而增强了载流子散射效应，使得电子迁移率降低。通过实验测得制备的掺杂 β-Ga_2O_3 薄膜电子浓度可以控制在 3.6×10^{16} ~ 5.3×10^{18} cm^{-3} 范围内，在电子浓度低至 3.6×10^{16} cm^{-3} 的条件下，电子迁移率达 137 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$，这与通过其他工艺制备的 β-$Ga_2O_3$ 薄膜电学性质基本一致。

表 1　霍尔测试结果

Tab. 1　Test result of Hall measurement

SiH_4 流量/($mL\cdot min^{-1}$)	电子浓度/cm^{-3}	载流子迁移率/($cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$)
0	3.5×10^{15}	N/A
4	3.6×10^{16}	137
6	4.6×10^{17}	106
8	1.3×10^{18}	96
10	5.2×10^{18}	84

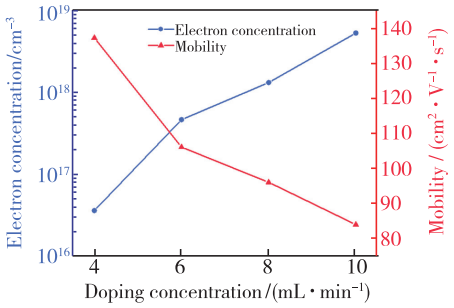

图 6　掺杂薄膜的霍尔测试图

Fig. 6　Hall measurement picture of the doped films

4　结　　论

我们以 SiH_4 为 n 型掺杂源，利用 MOCVD 技术在(001)方向的 Ga_2O_3 衬底上生长出了高厚度的 n 型 β-Ga_2O_3 薄膜，并且研究了 SiH_4 流量对薄膜晶体质量和电学特性的影响。研究发现，掺杂会在一定程度上降低薄膜晶体质量，这是由于 Si 原子替代 Ga 原子从而导致晶格变化引起的。此外，制备的 β-Ga_2O_3 薄膜厚度达到了 4.15 μm，从而计算出薄膜生长速率约为 0.8 $\mu m\cdot h^{-1}$。薄膜电子浓度可以在 3.6×10^{16} ~ 5.3×10^{18} cm^{-3} 范围内稳定控制；在电子浓度为 3.6×10^{16} cm^{-3} 的条件下测得电子迁移率达 137 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$。我们通过本实验验证了 MOCVD 工艺生长高厚度 Ga_2O_3 薄膜的可行性，这有利于氧化镓基功率器件的制备。但 MOCVD 工艺的生长速率相较于 HVPE 和 mist-CVD 仍存在差距，所以提高其生长速度将是我们下一步实验的研究重点。

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.20210398.

参　考　文　献：

[1] BLEVINS J, YANG G. On optical properties and scintillation performance of emerging Ga_2O_3: crystal growth, emission mechanisms and doping strategies [J]. *J. Mater. Res. Bull.*, 2021, 144: 111494.

[2] JUBU P R, YAM F K, KYESMEN P I. Structural, optical and electrochemical transient photoresponse properties of ZnO/Ga_2O_3 nanocomposites prepared by two-step CVD method [J]. *Int. J. Hyd. Energy*, 2021, 46(66): 33087-33097.

[3] YAKIMOV E B, POLYAKOV A Y, SHCHEMEROV I V, *et al.* On the nature of photosensitivity gain in Ga_2O_3 Schottky diode detectors: effects of hole trapping by deep acceptors [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 879: 160394.

[4] HU H D, LIU Y C, HAN G Q, *et al.* Effects of post annealing on electrical performance of polycrystalline Ga_2O_3 photodetector on sapphire [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2020, 15(1): 100-1-8.

[5] 郭道友，李培刚，陈政委，等. 超宽禁带半导体 β-Ga_2O_3 及深紫外透明电极、日盲探测器的研究进展 [J]. 物理学报, 2019, 68(7): 078501-1-36.
GUO D Y, LI P G, CHEN Z W, *et al.* Ultra-wide bandgap semiconductor of β-Ga_2O_3 and its research progress of deep ultraviolet transparent electrode and solar-blind photodetector [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2019, 68(7): 078501-1-36.

(in Chinese)

[6] ZHANG K, XU Z W, ZHAO J L, *et al.* Temperature-dependent Raman and photoluminescence of β-Ga_2O_3 doped with shallow donors and deep acceptors impurities [J]. *J. Alloys Compd.*, 2021, 881: 160665.

[7] ZHU N X, XUE X Y, SU J. Microstructures and electronic characters of β-Ga_2O_3 on different substrates: exploring the role of surface chemistry and structures [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2021, 23(38): 21874-21882.

[8] VENKATA KRISHNA RAO R, RANADE A K, DESAI P, *et al.* Temperature-dependent device properties of γ-CuI and β-Ga_2O_3 heterojunctions [J]. *SN Appl. Sci.*, 2021, 3(10): 796-1-9.

[9] SERYOGIN G, ALEMA F, VALENTE N, *et al.* MOCVD growth of high purity Ga_2O_3 epitaxial films using trimethylgallium precursor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 117(26): 262101-1-6.

[10] WANG Y H, LI H R, CAO J, *et al.* Ultrahigh gain solar blind avalanche photodetector using an amorphous Ga_2O_3-based heterojunction [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(10): 16654-16663.

[11] ZHANG T, LI Y F, CHENG Q, *et al.* Research on the crystal phase and orientation of Ga_2O_3 hetero-epitaxial film [J]. *Superlattices Microstruct.*, 2021, 159: 107053.

[12] 李如永. 射频磁控溅射法制备 Mg 掺杂 Ga_2O_3 薄膜的研究 [D]. 北京:北京工业大学, 2019.
LI R Y. *Study on Mg Doped Ga_2O_3 Thin Films Preparared by RF Magnetron Sputtering* [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019. (in Chinese)

[13] MENG Y J, GAO Y Q, CHEN K Y, *et al.* Annealing induced phase transition and optical properties of Ga_2O_3 thin films synthesized by sputtering technique [J]. *Optik*, 2021, 244: 167515.

[14] 张晓霞, 邓金祥, 孔乐, 等. 不同浓度的 Si 掺杂 β-Ga_2O_3 薄膜的制备及研究 [J]. 真空, 2021, 58(5): 57-61.
ZHANG X X, DENG J X, KONG L, *et al.* Preparation and study of Si-doped β-Ga_2O_3 thin films with different content [J]. *Vacuum*, 2021, 58(5): 57-61. (in Chinese)

[15] XU W L, SHI J C, LI Y W, *et al.* Study of β-Ga_2O_3 films hetero-epitaxially grown on off-angled sapphire substrates by halide vapor phase epitaxy [J]. *Mater. Lett.*, 2021, 289: 129411-1-4.

[16] TAYLOR N R, JI M, PAN L, *et al.* Large area vertical Ga_2O_3 Schottky diodes for X-ray detection [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect.* A, 2021, 1013: 165664.

[17] YAO Y, OKUR S, LYLE L A M, *et al.* Growth and characterization of α-, β-, and ε-phases of Ga_2O_3 using MOCVD and HVPE techniques [J]. *Mater. Res. Lett.*, 2018, 6(5): 268-275.

[18] SHAPENKOV S, VYVENKO O, NIKOLAEV V, *et al.* Polymorphism and faceting in Ga_2O_3 layers grown by HVPE at various gallium-to-oxygen ratios [J]. *Phys. Status Solidi* B, 2021, 259: 2100331.

[19] JIAO T, LI Z M, LI W C, *et al.* Stable low electron concentration β-Ga_2O_3 films grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, 2020, 9(5): 055013-1-5.

[20] 焦腾, 李赜明, 王谦, 等. Ga_2O_3/GaN/蓝宝石模板上 β-Ga_2O_3 薄膜的生长 [J]. 发光学报, 2020, 41(3): 281-287.
JIAO T, LI Z M, WANG Q, *et al.* Growth of β-Ga_2O_3 thin films on Ga_2O_3/GaN/sapphire template [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2020, 41(3): 281-287. (in Chinese)

[21] LIU Z, ZHI Y S, LI S, *et al.* Comparison of optoelectrical characteristics between Schottky and Ohmic contacts to β-Ga_2O_3 thin film [J]. *J. Phys.* D *Appl. Phys.*, 2020, 53(8): 085105-1-8.

[22] ZHI Y S, JIANG W Y, LIU Z, *et al.* High-responsivity solar-blind photodetector based on MOCVD-grown Si-doped β-Ga_2O_3 thin film [J]. *Chin. Phys.* B, 2021, 30(5): 057301-1-8.

[23] XING Y H, ZHANG Y, HAN J, *et al.* Research of nanopore structure of Ga_2O_3 film in MOCVD for improving the performance of UV photoresponse [J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(9): 095301-1-8.

[24] ALEMA F, SERYOGIN G, OSINSKY A, *et al.* Ge doping of β-Ga_2O_3 by MOCVD[J]. *APL Mater.*, 2021, 9(9): 091102-1-11.

[25] 马征征, 董鑫, 庄仕伟, 等. 退火对 Ga_2O_3 薄膜特性的影响 [J]. 发光学报, 2017, 38(5): 606-610.
MA Z Z, DONG X, ZHUANG S W, *et al.* Effect of annealing on Ga_2O_3 film [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(5): 606-610. (in Chinese)

[26] NIKOLAEV V I, PECHNIKOV A I, NIKOLAEV V V, *et al.* HVPE growth of α- and ε-Ga_2O_3 on patterned sapphire substrates [J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2019, 1400(5): 055049-1-7.

[27] MAHADIK N A, TADJER M J, BONANNO P L, *et al.* High-resolution dislocation imaging and micro-structural analysis of HVPE-βGa_2O_3 films using monochromatic synchrotron topography [J]. *APL Mater.*, 2019, 7(2): 022513-1-6.

[28] HERNANDEZ A, ISLAM M, SADDATKIA P, *et al.* MOCVD growth and characterization of conductive homoepitaxial Si-doped Ga_2O_3 [J]. *Results Phys.*, 2021, 25: 104167-1-8.

[29] KONG L Y, MA J, LUAN C N, *et al.* Structural and optical properties of Ga_2O_3: in films deposited on MgO (1 0 0) substrates by MOCVD [J]. *J. Solid State Chem.*, 2011, 184(8): 1946-1950.

[30] 代波. β-Ga_2O_3 薄膜制备与表征 [D]. 西安：西安电子科技大学, 2015.
DAI B. *Preparation and Characterization of β-Ga_2O_3 Thin Films* [D]. Xi'an: Xidian University, 2015. (in Chinese)

[31] HE Q M, MU W X, FU B, *et al.* Schottky barrier rectifier based on (100) β-Ga_2O_3 and its DC and AC characteristics [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2018, 39(4): 556-559.

李政达(1997 -), 男, 吉林吉林人, 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材料的研究。
E-mail: lizd20@mails.jlu.edu.cn

董鑫(1980 -), 男, 吉林桦甸人, 博士, 教授, 2008 年于大连理工大学获得博士学位, 主要从事宽禁带半导体材料及器件的研究。
E-mail: dongx@jlu.edu.cn