光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20241113002

铟掺杂氧化镓日盲深紫外探测器

李震球[1]，钟皖生[1]，舒林聪[2*]，李　山[2*]，张嘉汉[3]，刘　增[3*]

（1. 杭州萧山技师学院，杭州 311201；2. 南京邮电大学 集成电路科学与工程学院(产教融合学院)，南京 210023；
3. 内蒙古大学 电子信息工程学院，呼和浩特 010021）

摘　要： 文章采用等离子体增强化学气相沉积法制备In掺杂β-Ga_2O_3薄膜，系统研究了In掺杂对β-Ga_2O_3基日盲光电探测器性能的调控机制。该探测器在5 V偏压、254 nm波长光照(275 μW/cm^2)条件下展现出优异性能：最大光响应度达480 mA/W，探测度达6.42×10^{13} Jones，外量子效率为235%，光电导增益为2.15，最大光暗电流比接近1×10^6。高温生长更有利于In的掺入，相对于不掺In情况，相同光照和偏压条件下掺In后β-Ga_2O_3薄膜光电流明显增大。薄膜中的氧空位与晶格缺陷会对光电探测器性能产生关键影响，其中高占比的表面氧空位通过吸附氧分子和形成表面势垒，影响电子积累与输运，从而在254 nm紫外光照射下提高了光电流响应，而光响应参数随光强增加而减小主要由于载流子的散射与复合。该探测器对深紫外低光强的极高灵敏度保证了其在光学传感应用中的巨大潜力，此研究还为高效率In掺杂Ga_2O_3的深紫外光电探测器提供了新的设计思路。

关键词： In掺杂Ga_2O_3；紫外探测；光电探测器；化学气相沉积

中图分类号： TN383.3　**文章编号：** 1001－5868(2025)02－0261－08

In Doping of Gallium Oxide Solar-Blind Deep-Ultraviolet Detector

LI Zhenqiu[1], ZHONG Wansheng[1], SHU Lincong[2], LI Shan[2], ZHANG Jiahan[3], LIU Zeng[3]

(1. Hangzhou Xiaoshan Technician College, Hangzhou 311201, CHN; 2. College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, CHN; 3. School of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, CHN)

Abstract: Doping can significantly affect the optical absorption characteristics and electrical properties of Ga_2O_3 via bandgap modulation, thus improving the performance of photodetectors. This study uses plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) to fabricate In-doped Ga_2O_3 films and investigates the influence mechanism and application potential of In doping on the performance of β-Ga_2O_3-based solar-blind photodetectors. This photodetector demonstrates remarkable deep-ultraviolet (DUV) response properties, reaching a photocurrent level of microamperes under 5 V bias and 275 μW/cm^2 illumination at a wavelength of 254 nm. Additionally, it achieves a maximum responsivity of 480 mA/W, a detectivity of 6.42×10^{13} Jones, an external quantum efficiency of 235%, a photoconductive gain of 2.15, and a maximum photo-to-dark current ratio of approximately 1×10^6, thus demonstrating the extremely high sensitivity of In-doped Ga_2O_3 to low DUV light

收稿日期：2024－11－13.

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB3605404)；国家自然科学基金青年基金项目(62305171)；国家自然科学基金联合基金项目(U23A20349)；江苏省自然科学基金项目(BK20230361)；江苏省双创团队项目(JSSCTD202351)；江苏省研究生创新计划资助课题项目(KYCX24_1235，SJCX23_0300).

*通信作者：舒林聪；李　山；刘　增

intensities and establishing its significant potential in optical sensing applications. High-temperature growth facilitates In doping; therefore, the photocurrent of In-doped β-Ga_2O_3 films is significantly higher than that of their counterparts without In doping under identical illumination and bias conditions. The presence of oxygen vacancies and lattice defects in the films significantly affects the performance of the photodetector, with surface oxygen vacancies affecting electron accumulation and migration through the adsorption of oxygen molecules and the formation of surface barriers. Consequently, the photocurrent response is enhanced under 254 nm ultraviolet light, whereas the optical-response parameters diminish as the light intensity increases, which is primarily due to the scattering and recombination of charge carriers. This study provides a comprehensive discussion on the fabrication methods and photoelectronic characteristics of In-doped Ga_2O_3 films. Our findings offer new insights into the design of high-efficiency In-doped Ga_2O_3 DUV photodetectors and provide new avenues for the application of PECVD technology in semiconductor materials.

Key words: In-doping Ga_2O_3; ultraviolet detection; photodetector; PECVD

0 引言

深紫外(DUV)日盲光电探测器广泛应用于导弹预警、平流层臭氧监测、火焰监测和通信等领域。日盲深紫外波段不受太阳光背景噪声的干扰,相关探测器具有更高的灵敏度和更低的误报率,在安全性和环境监测等方面尤为关键[1-5]。合适的半导体材料对高效的日盲紫外光探测至关重要,氧化镓(Ga_2O_3)凭借其宽带隙(4.9 eV)、高击穿电场(8 MV/cm)、高吸收系数和优异的热稳定性,已成为日盲深紫外光电探测器的理想候选材料[6-8]。然而,Ga_2O_3的本征缺陷导致其光响应频率和电学特性在某些应用中仍有提升空间。

为进一步改善Ga_2O_3相关特性,近年来研究者尝试了多种制备方法,包括溅射法[9]、分子束外延法[10-12]、化学气相沉积[13-15]等。其中,等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法因其优异的薄膜均匀性、高效的生长速度,以及低温处理等特点,受到广泛关注。Hu等[16]研究不同晶面取向的蓝宝石衬底对异质外延的β-Ga_2O_3薄膜质量的影响,发现最佳的异质外延衬底取向。随后,Xi等研究不同生长温度[17]及不同退火气氛[18]对c面蓝宝石衬底上异质外延β-Ga_2O_3薄膜质量的影响,最终确定最佳生长温度和退火气氛。尽管近年来掺杂Ga_2O_3的研究取得了一定进展,但通过PECVD法制备掺杂Ga_2O_3的相关研究仍然较为有限。此外,In掺杂对Ga_2O_3深紫外光电探测性能优化的物理机制尚未得到明确的阐释。Xi等[19]在Ga_2O_3中掺杂In实现带隙调制工艺,对光电探测器和探测波段的可调谐性能表现出了显著影响,并通过改变In掺杂含量实现带隙的连续调谐。而Jack等[20]则利用高质量脉冲激光沉积($In_xGa_{1-x})_2O_3$薄膜证明了薄膜具有横向阳离子成分梯度($0.01\leqslant x\leqslant 0.82$)以及三个晶体取相(单斜晶系、六方晶系和双斜晶系)。然而提高In的掺杂效率仍是一个亟待解决的问题。

本文利用PECVD法制备性能优异的高效率In掺杂Ga_2O_3薄膜,探索其在深紫外日盲光电探测器中的应用潜力。通过研究In掺杂对Ga_2O_3薄膜光学和电学特性的影响,以期揭示In掺杂对于增强Ga_2O_3深紫外光电探测的物理机理,并实现高性能深紫外日盲光电探测器的开发。

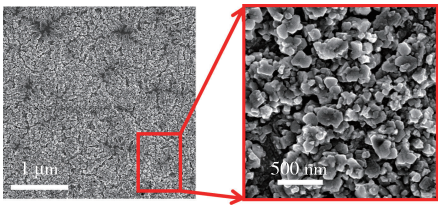
1 实验

首先,采用PECVD法在蓝宝石(0006)上生长In掺杂Ga_2O_3(InGaO)薄膜,前驱体包括金属镓(99.999 99%纯)、金属铟(99.999 95%纯)和O_2(99.999%纯)。在射频(R.F.)源的辅助下,通过电离气体中含有所需薄膜组分的原子或分子以形成等离子体,以增强反应物的化学反应性,使沉积反应顺利进行。薄膜沉积前,系统被抽至真空。铟和镓(质量比,In∶Ga=1∶2)被置于石英舟中,蓝宝石衬底垂直放置在倾斜的衬底架上。系统开始缓慢升温直至到达生长温度970 ℃。此时,氧气(O_2)流速将保持在20 SCCM,将沉积压力调整至约21 Pa,射频功率设定为约250 W,将O_2电离成等离子体。保持生长温度,加热约持续60 min,保持其他参数不变。Ti/Au(20/60 nm)电极用作欧姆接触材料,使用电子束蒸发(Electron Beam Evaporation,

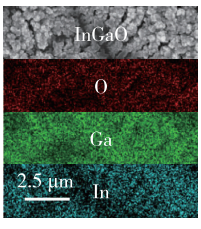
EBE)以 0.01 nm/s 的速度沉积。薄膜的质量将通过 X 射线衍射(X-Ray Diffraction,XRD)、扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope,SEM)、能量色散 X 射线光谱(EDS,Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)、X 射线光电子能谱(X-Ray Photoelectron Spectroscopy,XPS)以及紫外-可见光吸收光谱(UV-Visible Absorbance Spectrum,UV-VIS)等来检验。利用 Keysight B1505A 设备分析仪测量探测器的 *I-V* 特性和 *I-t* 特性,低压灯和氙弧灯作为紫外光源,并通过标准硅光电探测器进行校准。使用 532 nm 激光作为光源的拉曼光谱仪测量 InGaO 薄膜的拉曼光谱。最后,使用由氙灯、单色仪、信号发生器、电源计和皮安表组成的检测系统测试制备的器件的光谱响应。

2　结果与讨论

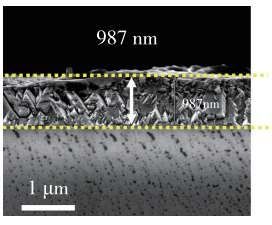
在 *c* 面蓝宝石衬底上异生长 InGaO 薄膜的 SEM 图如图 1(a)所示。薄膜表面均匀较好,从放大图可观察到大量 InGaO 晶粒,其粒径约为 200～300 nm;图 1(b)所示的 EDS 元素分布图进一步验证了所制备薄膜元素 In,Ga 及 O 分布的高度均匀性;而图 1(c)所示为薄膜截面 SEM 图,InGaO 薄膜的厚度约为 987 nm,在本实验中其生长速率约为 16.45 nm/min。通过 PECVD 方法生长的 InGaO 薄膜质量好、生长速率高,为下一步开发高性能 InGaO 日盲光电探测器奠定了基础。



(a) 薄膜表面 SEM 图



(b) EDS 元素分布



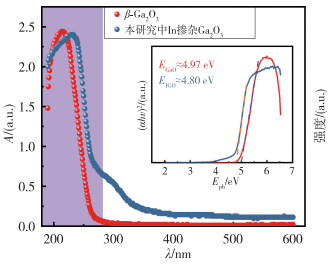
(c) 薄膜截面图

图 1　材料表征结果

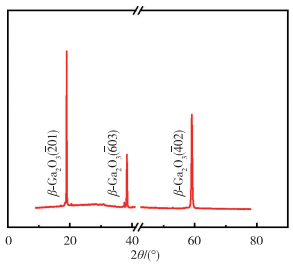
图 2(a)是利用 Tauc 方程通过紫外-可见吸收光谱来线性外推的光学带隙,其一般表达式为[21]:

$$(\alpha h\nu)^2 = C(h\nu - E_{op}) \quad (1)$$

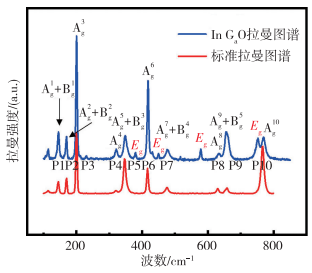
式中,α 是吸收系数,$h\nu$ 是入射光子能量,C 是一个常量,E_{op} 则是光学带隙。通过线性外推的 In 掺杂 Ga_2O_3 光学禁带约是 4.80 eV,相较于纯 β-Ga_2O_3 4.97 eV 的光学带隙则而言,合金化改变了 Ga_2O_3 的带隙。图 2(b)则是 InGaO 薄膜的 XRD 图,从图中可以看到三个平行的晶面,分别对应 β-Ga_2O_3 的 $(\bar{2}01)$面,$(\bar{4}02)$面和$(\bar{6}03)$面,图中在 42°左右被切掉的范围属于蓝宝石衬底(0006)的特征峰。图 2(c)展示了所制备的 InGaO 薄膜与标准 β-Ga_2O_3 单晶的拉曼光谱对比,该光谱中的峰值中心位置与现有文献中的报告结果高度一致[22-24]。此外,观察到的额外 E_g 峰具有蓝宝石衬底的特征[25-26],这进一步验证了本研究中 InGaO 的可靠性。共有十个 Ga_2O_3 的特征性拉曼峰,将其标记为 P1～P10,所有十五个拉曼峰均可被识别。值得注意的是,P1,P2,P5,P7 和 P9 在 A_g 和 B_g 模式下显示出双重简并性。最后,图 2(d)给出了所制备电极的硬掩模实拍图。硬掩模呈方形,边长约为 8 mm,采用 12 插指结构,每个叉指长约为 5 mm,宽为 0.13 mm,可以算出探测器的有效光照面积约是 8 mm^2。



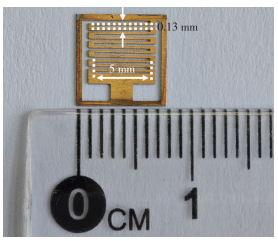
(a) 线性外推的$(\alpha h\nu)^2$和$h\nu$的函数曲线



(b) XRD 图



(c) 室温下的标准拉曼图谱与 InGaO 的拉曼图谱

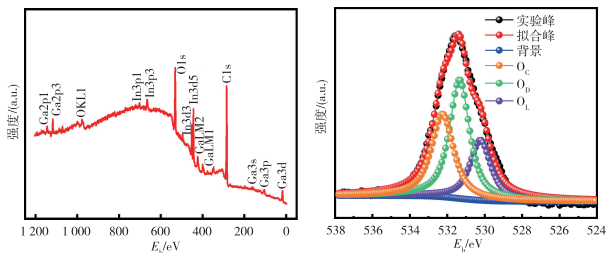


(d) 12 插指电极硬掩模

图 2　器件实物与光谱、晶体衍射结果

如图 3 为制备的 InGaO 薄膜使用 XPS 进行表征,以确定其表面化学状态和化学键。由图 3(a)可见,薄膜中仅存在 O,In 和 Ga 三种元素,随后对这三种元素进行了详细表征。图 3(b)中,O 1s 峰被解卷

积为三个不同的峰，分别位于532.25，531.34和530.22 eV，对应于化学吸附氧（Chemisorbed Oxygen，O_C）、缺陷氧（Defect Oxygen，O_D）和晶格氧（Lattice Oxygen，O_L）[27]。卷积结果表明，氧空位的含量约为43.35%，氧空位可能形成参与电荷载流子捕获和释放过程的能级，从而影响其寿命和迁移率，并进而影响材料的光学吸收、发射及电气性质.并且由于合金中的相分离和晶格失配，晶格缺陷是不可避免的。图3(c)中显示了In 3d峰，分别位于大约451.72和444.11 eV，主要来源于In取代Ga后的In-O化学键。其中，通过软件结合能峰识别与拟合方法，可以有效确定薄膜中In与Ga的相对比例。直接测算显示，铟的原子占比约为16%。本研究的生长温度为970 ℃，更高的生长温度更有利于In的掺入。图3(d)显示，Ga 2p的结合能约为1 144.46和1 117.65 eV，来源于Ga_2O_3中的Ga—O键。



（a）InGaO的XPS全谱　（b）O 1s

（c）In 3d　（d）Ga 2p

图3　X射线光电子能谱

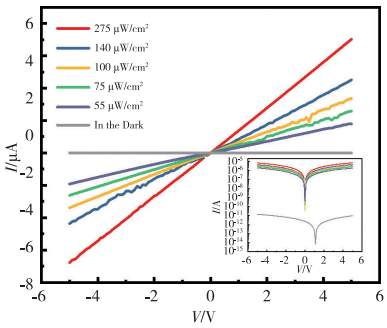
图4(a)所示InGaO光电探测器的线性和对数*I-V*特性曲线，其光电特性类似于一个光敏电阻。InGaO光电探测器的暗电流低至约10 pA，In的掺入使得载流子的浓度以及输运特性得到了改善，其宏观表现为暗态电流的提升。随着光强的增大，光电流也在不断的增加，这可以理解为更高的光强会有更多的光子被薄膜所吸收用于激发光生载流子，然后载流子被电极收集。相对于不掺In情况[17]，相同光照和偏压条件下掺In后β-Ga_2O_3薄膜光电流明显增大，这可能还得益于$(In_xGa_{1-x})_2O_3$的表面氧空位在浅施主能级上起作用，从而进一步提高器件的电流[20]。在275 μW/cm²的光强下，探测器的最大光暗电流比（*PDCR*）接近于1×10^6，即使在低至50 μW/cm²的光强下其光暗电流比仍超过1×10^5，这表明，该探测器对低光强度深紫外光具有极高的敏感性。此外，光电探测器的暗电流对数曲线最低值偏离0 V的原因，主要与接触势垒、界面缺陷以及电场分布有关。首先由于In的掺入，改变了Ga_2O_3的能带结构，使得Ti/Au电极的欧姆接触非理想化；其次，金属-半导体界面缺陷可导致暗电流在0 V时不为零。从图4(b)中的变光强*I-t*测试来看，也有相同的现象，随着入射光强增大，光电流也随之增大，并且其开关特性良好，这也证明了此探测器的连续工作性较好。

根据幂律定理[28]：

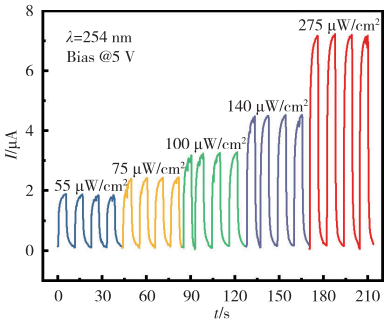
$$I_{photo}\sim P_{light}^{\theta} \tag{2}$$

计算出此工作的θ约为0.75，说明光电流与入射光强之间的线性度较好，（θ为1时，是标准线性关系），θ一般小于1，这主要归结于在大光强照射下，高氧空位带来的载流子散射效应以及光生载流子的复合效应，并且器件表面总是会存在反射损耗。图4(d)展示了上升和衰减时间的拟合结果，其特征为具有时间常数参数的单指数衰减函数：

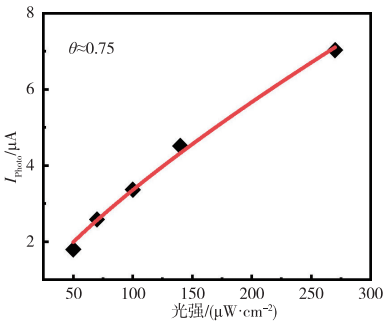
$$I=I_0+Ae^{t/\tau} \tag{3}$$



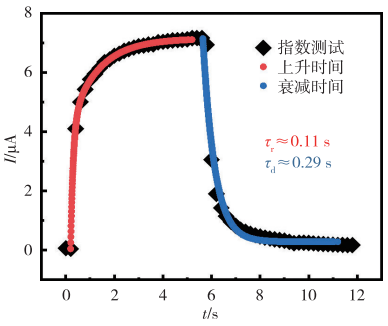
（a）光电探测器的暗电流与光电流



（b）5 V偏置电压下变光强*I-t*测试曲线



（c）光强-光电流的线性度拟合

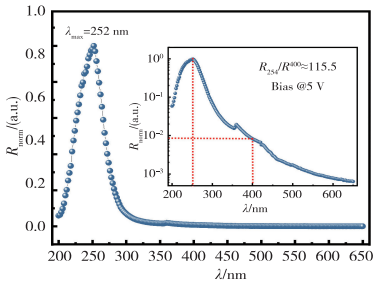


（d）上升时间与衰减时间的拟合

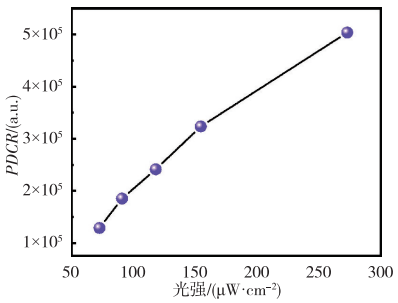
图 4　光电响应结果

式中，I_0表示稳态光电流，A 为常数，t代表时间，τ为弛豫时间。拟合结果显示，其上升时间和衰减时间约为 0.11 和 0.29 s，较快的响应时间说明 InGaO 光电探测器对 254 nm 的深紫外光极其敏感，而较长的衰减时间应该归结于光电导型探测器内的持续光电导（Persistent Photo-Conductivity，PPC）效应[29]。

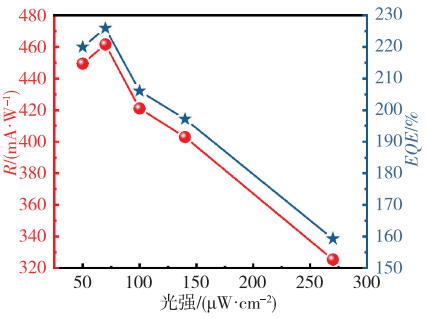
光谱响应反映了光电探测器对不同波长光的响应效率，体现了探测器对不同波长光的灵敏度，虽与吸收光谱紧密相关，但其重点在于探测器的输出信号强度。如图 5（a）所示为探测器的归一化光谱响应，探测器对整个日盲波段均有响应，而其响应度峰值在 252 nm 处，由于 In 的掺入可以调整材料的能带结构，使得探测器的响应峰值正好对应在所使用紫外光源的波长，这是 In 掺杂提高紫外探测性能的关键优势之一。而紫外/可见抑制比定义为：R_{254}/R_{400}，从插图的对数坐标可以轻易计算出探测器的紫外/可见抑制比超过 1×10^2，实现了较好的日盲波段探测性能。而图中在 360～420 nm 处存在波动，使得曲线并不平滑的主要原因是测试系统在转换紫外/可见光栅时的光强骤然变化导致。图 5（b）显示了 *PDCR* 随光强的变化趋势，在 50～275 μW/cm² 的光强变化下，*PDCR* 超过 1×10^5，最大 *PDCR* 接近于 1×10^6，表明该探测器对 DUV 低光强的极高灵敏度，表明其在光学传感应用中的巨大潜力。



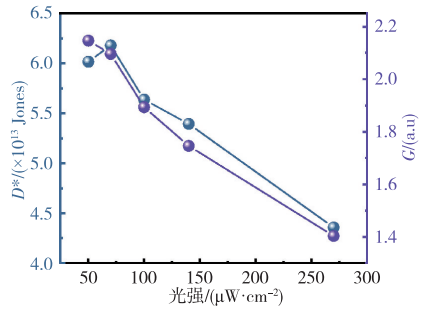
（a）归一化光谱响应



（b）*PDCR*



（c）*R* 和 *EQE* 随光强的变化



（d）D^*和 *G* 随光强的变化

图 5　性能综合分析

通常利用光响应参数 R，D^*，*EQE* 和增益（Gain，G）来描述探测器的性能，定义如下[30-31]：

$$R=(I_{photo}-I_{dark})/(P_{light}\cdot S) \tag{4}$$

$$D^*=R/\sqrt{2q\cdot I_{dark}/S} \tag{5}$$

$$EQE=\frac{hcR}{q\lambda}\times 100\% \tag{6}$$

$$G=\frac{(I_{\text{photo}}-I_{\text{dark}})/q}{P_{\text{light}}\cdot S/(h\nu)} \tag{7}$$

式中，P_{light}是入射光的光强，S为探测器的有效光照射面积，h为普朗克常量，c为光速，q为电子电荷，λ为入射光波长。可得，R的最大值为480 mA/W，说明探测器对254 nm的紫外光具有较高的灵敏度。比探测率D^*为6.42×10^{13} Jones，表明该探测器具备探测超低光强深紫外信号的能力。外量子效率EQE为235%，在施加偏置电压的情况下，EQE超过100%是正常现象。增益G的物理含义为[30]：假设所有入射光子均被探测器表面完全吸收（即内量子效率为100%），每个具有$h\nu$光子能量的光子入射到器件表面后，所激发出的光生载流子被探测器电极收集的数量。强调的是由于光激发生成的电子-空穴对中，通过探测器中电极与半导体接触部分收集的载流子数量。这表明在该探测器中，每一个入射光子都能够有效地激发出电子-空穴对，即波长为254 nm的紫外光与InGaO进行了有效的耦合作用。在这项工作中，最大G值为2.15，引起G与EQE超过1的主要原因同样是PPC效应，这种现象虽然使得探测器的G与EQE值很高，但同时也会引起探测器的持续光电导效应，从而严重影响探测器的响应速度。因此，在高光响应（响应度与增益）和快速响应之间找到折衷的优化方法，仍然是亟待解决的问题。

从XPS结果中可以明确观察到，薄膜中存在较高比例的氧空位，由于合金中相分离和晶格失配的影响，晶格缺陷的形成是不可避免的。在氧化物基光电探测器中氧空位是影响其性能的重要因素。表面氧空位的存在导致大量氧分子在空气中被吸附至材料表面，并进一步捕获表面的自由电子，形成O^{2-}，这引发了表面电子的积累，导致能带的弯曲，从而形成表面势垒。此外，从薄膜表面SEM图可以观察到，薄膜的表面粗糙度较大，这进一步增加了氧分子在其表面的吸附量。在254 nm紫外光的照射下，光生空穴迁移至材料表面，与积累的电子发生复合，释放被吸附的氧分子，导致表面势垒降低。同时，部分表面电子被注入材料内部，从而显著提高光电探测器的导电性。当空穴在表面被捕获时，光生电子的复合速率减少，这直接导致光电探测器光电流的增加。在$(In_xGa_{1-x})_2O_3$薄膜中，表面氧空位作用于浅施主能级，进一步增强了氧化镓基光电探测器的电流。理论上，具有较高铟含量的光电探测器能够表现出更显著的光电流响应[19]。这些发现进一步凸显了氧空位在光电探测器性能中的关键作用，为该领域的深入研究提供支持。

研究结果表明，光响应参数R，D^*与光强变化之间存在相似规律。总体而言，随着光强的增加，这些参数逐渐减小[32-34]，尽管可能会出现个别偏差点，但主要原因在于：在较高光强下，虽然生成了大量的光生载流子，但载流子的散射和复合现象也更为显著，从而影响了参数的变化。并且考虑到Ga_2O_3材料的低载流子寿命和迁移率，载流子生成减少对复合过程的影响尤为明显。尽管光电导增益机制在高光强度下可提升性能，但在低强度下难以有效克服复合损失。

3 结论

本研究采用PECVD法制备In掺杂Ga_2O_3薄膜，旨在探讨In掺杂对Ga_2O_3在深紫外日盲光电探测器中的光电探测性能的增强机制及其潜在应用价值。高温生长工艺提高了In的掺入效率，这不仅改善了薄膜的光吸收特性，而且载流子输运特性也得到了优化。总体而言，探测器最大光响应度可达480 mA/W，探测度达到6.42×10^{13} Jones，同时还具有235%的外量子效率，光电导增益达到2.15，并且该探测器的光谱响应峰值几乎完全对应测试所用的254 nm波长光源。该探测器对光强为50 μW/cm的254 nm波长的紫外光的最大光暗电流比超过1×10^5，展现了In掺杂Ga_2O_3对DUV弱光强极高的灵敏度，确立了其在光学传感应用中的巨大潜力。表面氧空位通过吸附氧分子和形成表面势垒，影响电子积累与迁移，从而在254 nm紫外光照射下提高了光电流响应，而光响应参数随光强增加而减小主要由于载流子的散射与复合。本研究详细探讨了In掺杂Ga_2O_3薄膜的制备方法及其光电特性。该研究不仅为高效In掺杂Ga_2O_3深紫外光电探测器的设计提供了新的方法，还为PECVD技术在半导体材料中的应用开辟了新的方向。

参考文献：

[1] Li Y, Zheng W, Huang F. All-silicon photovoltaic detectors with deep ultraviolet selectivity [J]. PhotoniX, 2020, 1 (1): 15.

[2] He F, Qin Y, Wang Y, et al. Aqueous solution derived amorphous indium doped gallium oxide thin-film transistors[J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2021, 9: 373-377.

[3] Ramesh A M, Gangadhar A, Chikkamadaiah M, et al. Hydrothermal synthesis of Ga_2O_3/TiO_2 nanocomposites with highly enhanced solar photocatalysis and their biological interest [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology, 2021, 6: 100020.

[4] Xie C, Lu X, Liang Y, et al. Patterned growth of β-Ga_2O_3 thin films for solar-blind deep-ultraviolet photodetectors array and optical imaging application [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 72: 189-196.

[5] Meixner H, Gerblinger J, Fleischer M. Sensors for monitoring environmental pollution [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1993, 15(1/3): 45-54.

[6] Kim J, Pearton S J, Fares C, et al. Radiation damage effects in Ga_2O_3 materials and devices [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(1): 10-24.

[7] Zhao C, Jiao T, Chen W, et al. Preparation of high-thickness n^--Ga_2O_3 film by MOCVD[J]. Coatings, 2022, 12(5): 645.

[8] Liu Z, Tang W. A review of Ga_2O_3 deep-ultraviolet metal-semiconductor Schottky photodiodes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(9): 093002.

[9] Patil V, Lee B T, Jeong S H. Optical and structural characterization of high crystalline β-Ga_2O_3 films prepared using an RF magnetron sputtering [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 894: 162551.

[10] Nepal N, Katzer D S, Downey B P, et al. Heteroepitaxial growth of β-Ga_2O_3 films on SiC via molecular beam epitaxy [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2020, 38(6): 063406.

[11] Vogt P, Bierwagen O. Reaction kinetics and growth window for plasma-assisted molecular beam epitaxy of Ga_2O_3: Incorporation of Ga vs. Ga_2O desorption[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(7): 072101.

[12] Mauze A, Zhang Y, Itoh T, et al. Metal oxide catalyzed epitaxy (MOCATAXY) of β-Ga_2O_3 films in various orientations grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy [J]. APL Materials, 2020, 8(2): 021104.

[13] Rafique S, Han L, Tadjer M J, et al. Homoepitaxial growth of β-Ga_2O_3 thin films by low pressure chemical vapor deposition [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(18): 182105.

[14] Feng Z, Karim M R, Zhao H. Low pressure chemical vapor deposition of β-Ga_2O_3 thin films: Dependence on growth parameters[J]. APL Materials, 2019, 7(2): 022514.

[15] Yao S, Liu Z, Zhang M, et al. Photogain-enhanced signal-to-noise performance of a polycrystalline Sn:Ga_2O_3 UV detector via impurity-level transition and multiple carrier transport[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2023, 5(12): 7061-7069.

[16] Hu H, Wu C, Zhao N, et al. Epitaxial growth and solar-blind photoelectric characteristic of Ga_2O_3 film on various oriented sapphire substrates by plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. Physica Status Solidi (A), 2021, 218(11): 2100076.

[17] Xi Z, Yang L, Liu Z, et al. Study on PECVD-hetero-grown β-Ga_2O_3 thin film and temperature-modulated solar-blind UV photodetection[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2024, 57(8): 085101.

[18] Xi Z, Yan S, Liu Z, et al. Tunable Ga_2O_3 solar-blind photosensing performance via thermal reorder engineering and energy-band modulation[J]. Nanotechnology, 2024, 35(9): 095204.

[19] Xi Z, Liu Z, Yan S, et al. Continuous tunable energy band tailoring boosts extending the sensing of the waveband based on $(In_xGa_{1-x})_2O_3$ solar-blind photodetectors[J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2024, 15(18): 4906-4912.

[20] Swallow J E N, Palgrave R G, Murgatroyd P A E, et al. Indium gallium oxide alloys: Electronic structure, optical gap, surface space charge, and chemical trends within common-cation semiconductors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(2): 2807-2819.

[21] 周树仁, 张　红, 莫慧兰, 等. N掺杂对β-Ga_2O_3薄膜日盲紫外探测器性能的影响[J]. 物理学报, 2021, 70(17): 319-327.
Zhou Shuren, Zhang Hong, Mo Huilan, et al. Effect of N-doping on performance of β-Ga_2O_3 thin film solar-blind ultraviolet detector[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(17): 319-327.

[22] Zhang K, Xu Z, Zhang S, et al. Raman and photoluminescence properties of un-/ion-doped β-Ga_2O_3 single-crystals prepared by edge-defined film-fed growth method [J]. Physica B: Condensed Matter, 2021, 600: 412624.

[23] Onuma T, Fujioka S, Yamaguchi T, et al. Polarized Raman spectra in β-Ga_2O_3 single crystals [J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 401: 330-333.

[24] Yan S, Liu Z, Tan C K, et al. An harmonic phonon scattering study in wide bandgap semiconductor β-Ga_2O_3 by Raman spectroscopy[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(14): 142202.

[25] Kadleíková M, Breza J, Veselý M. Raman spectra of synthetic sapphire [J]. Microelectronics Journal, 2001, 32(12): 955-958.

[26] Thapa J, Liu B, Woodruff S D, et al. Raman scattering in single-crystal sapphire at elevated temperatures[J]. Applied Optics, 2017, 56(31): 8598-8606.

[27] Liu X, Sun X, Duan X, et al. Core-shell Ag@In_2O_3 hollow hetero-nanostructures for selective ethanol detection in air[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 305: 127450.

[28] Li S, Guo D, Li P, et al. Ultrasensitive, superhigh signal-to-

noise ratio, self-powered solar-blind photodetector based on *n*-Ga_2O_3/*p*-CuSCN core-shell microwire heterojunction [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(38): 35105-35114.

[29] Qiao B, Zhang Z, Xie X, et al. Quenching of persistent photocurrent in an oxide UV photodetector [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(11): 4039-4045.

[30] Liu Z, Li L, Zhi Y S, et al. Gallium oxide thin film-based deep ultraviolet photodetector array with large photoconductive gain [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(20): 208501.

[31] Ouyang X P, Wang L, Fang R Y, et al. Preparation of diamond-film based radiation detector [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(5): 2170.

[32] Shen G H, Liu Z, Zhang M L, et al. 16×16 solar-blind UV detector based on β-Ga_2O_3 sensors[J]. IEEE Electron Device Letters, 2023, 44(7): 1140-1143.

[33] Li S, Yue J, Lu C, et al. Oxygen vacancies modulating self-powered photoresponse in PEDOT: PSS/ε -Ga_2O_3 heterojunction by trapping effect [J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(3): 704-712.

[34] Yan Z, Li S, Yue J, et al. A spiro-MeOTAD/Ga_2O_3/Si p-i-n junction featuring enhanced self-powered solar-blind sensing via balancing absorption of photons and separation of photogenerated carriers [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(48): 57619-57628.

作者简介：

李震球(1976—),男,浙江省杭州市人,高级讲师,主要研究方向为智能装备与器件;

舒林聪(1998—),男,贵州省遵义市人,主要从事表面等离激元增强紫外探测研究;

李　山(1989—),男,湖北省云梦县人,博士,副教授,主要研究方向为氧化镓紫外光电探测器;

刘　增(1990—),男,辽宁省沈阳市人,博士,研究员,主要研究方向为宽禁带半导体光电集成与应用。