

中间带对 ZnO/ZnTe 光伏太阳能电池性能的影响

蒋建慧 吴孔平 鲁开林 齐 剑 彭 波 朱艳娜

安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要 中间带光伏太阳能电池是为了充分利用太阳光谱中的红外光子能量而提出的一种高效率新概念太阳电池。II-VI 和 III-V 族高失配合金半导体是新型高效中间带太阳电池的优选材料体系。采用太阳电池电容模拟软件(SCAPS), 模拟出具有中间带的 ZnTe:O 高失配合金作为本征层时的太阳电池的性能参数, 并与 ZnO/ZnTe 及 ZnO/ZnTe/ZnTe 的太阳电池对比分析。结果表明: 本征层的存在及材料结构对太阳电池性能有显著影响, 具有中间带的 ZnTe:O 作为本征层时的电池性能参数明显优于 ZnO/ZnTe 和 ZnO/ZnTe/ZnTe; 不同掺杂类型的 ZnTe:O 本征层通过改变费米能级在中间带的位置影响太阳电池的性能参数。模拟结果显示: n 型 ZnTe:O 作为本征层时短路电流密度 J_{sc} 及电池效率分别为 52.39 mA/cm^2 和 61.58% , 远高于 p 型 ZnTe:O 结构太阳电池。

关键词 材料; 太阳电池; 中间带; 高失配合金; 太阳电池电容模拟软件

中图分类号 O472+.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0916003

Effect of Intermediate-Band on the ZnO/ZnTe Photovoltaic Solar Cell

Jiang Jianhui Wu Kongping Lu Kailin Qi Jian Peng Bo Zhu Yanna

*Institute of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan, Anhui 232001, China*

Abstract In order to fully utilize the infrared photon energy in the solar radiation spectrum, the intermediate band solar cell as a efficient new concept solar cell is proposed. Group II-VI and III-V highly mismatched alloys are promising material systems in the application of high efficiency intermediate-band solar cell. Simulated the performance parameters of ZnTe:O highly mismatched ternary alloys as intrinsic layer by using the solar cell capacitance simulator (SCAPS), and comparison with ZnO/ZnTe and ZnO/ZnTe/ZnTe. The result indicates that the existence of the intrinsic layer and material structure has a significant influence on the solar cell performance. While the ZnTe:O with intermediate-band as the intrinsic layer has better battery performance parameters than ZnO/ZnTe and ZnO/ZnTe/ZnTe. Different types of doping ZnTe:O intrinsic layer by changing the position of Fermi level in the intermediate-band affect the performance of solar cells. The simulation results show that when n-ZnTe:O is used as the intrinsic layer, the battery short circuit current density J_{sc} and efficiency is 52.39 mA/cm^2 and 61.58% , respectively, which are much higher than those of p-ZnTe:O solar cell.

Key words materials; solar cell; intermediate-band; highly mismatched alloys; solar cell capacitance simulator

OCIS code 160.4670; 160.4760; 160.5293; 160.6000

1 引 言

近几年的研究发现中间带太阳电池的转换效率在目前已知太阳能电池中是最高的, 并由于其结构简单、成本低廉等优点成为第三代太阳电池^[1]的代表之一。美国劳伦斯-伯克利国家实验室率先提出将等电子但电负性差异较大的氧和氮分别对 II-VI 和 III-V 族化合物进行“稀释”(如 ZnTe:O 或 GaAs:N), 从而构建具有中间能带的新型高失配合金体系^[2-5]。本文采用氧离子注入 ZnTe 单晶的方式形成 ZnTe:O 高失配合金^[6-7]作为 ZnO/ZnTe 新型太阳电池的本征层。

收稿日期: 2015-03-18; 收到修改稿日期: 2015-05-12

基金项目: 安徽省自然科学基金(1208085QF116)

作者简介: 蒋建慧(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体器件方面的研究。E-mail: jjh0605@126.com

导师简介: 吴孔平(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事 II-VI 族宽禁带半导体材料与光电器件方面的研究。

E-mail: kongpingwu@126.com

ZnO^[8]是一种直接带隙宽禁带半导体材料,在常温下禁带宽度为 3.34 eV,具有纤锌矿结构,本征的 ZnO 薄膜具有很高的电阻率,掺入 III 族杂质(Ga、In、Al)可使 ZnO 转换为导电薄膜。且 ZnO 价格低廉并具有良好的光学性能及化学性能,使其广泛应用于多功能半导体材料领域。通常掺 Al 的 ZnO 薄膜^[9]具有宽带隙、高透明度、高电导率、良好的热稳定性等优点使其成为很好的电池窗口层材料^[10]和异质结半导体材料。

ZnTe 是一种光学性能优异的直接带隙 II-VI 族化合物半导体材料,禁带宽度为 2.20 eV,对可见光的吸收较好,使其可作为太阳能电池的吸收层。一般制得的 ZnTe 为 p 型半导体。由于它的直接带隙,宽能带,可重掺杂等优点使其广泛应用于薄膜太阳电池。

本文利用 Burgelman 等开发的太阳电池电容模拟软件(SCAPS)计算出 ZnO/ZnTe:O/ZnTe 太阳能电池的各性能参数并与 ZnO/ZnTe/ZnTe 及 ZnO/ZnTe 太阳电池对比。

2 中间带太阳电池原理及物理模型

太阳光谱包含光子能量有一定范围。对于给定的半导体材料,其禁带宽度是一个固定值 E_g ,当入射光子能量大于 E_g 时,可将价带中的电子激发到导带形成电子-空穴对,产生光生电流。当光子能量低于 E_g 时,需要其他光子或声子参与才能激发电子-空穴对,这种多子跃迁概率较小,可忽略不计。故半导体材料禁带宽度直接影响电池对太阳光谱的吸收范围,材料无法吸收能量小于 E_g 的光子,这种现象称为红损失。中间带太阳电池的提出正是为了减少红损失,增加对低能光子的吸收。图 1 为光照时 ZnTe 衬底上 ZnTe:O 能带结构及电子跃迁图。

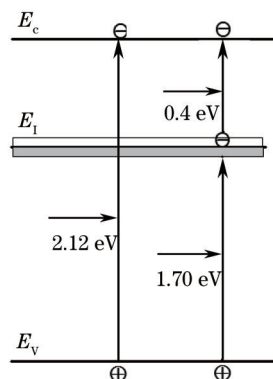


图 1 光照时 ZnTe 衬底上 ZnTe:O 能带结构及电子跃迁图

Fig.1 Energy diagram and electron transitions of ZnTe:O on the ZnTe substrate under solar illumination

文献[5,11-12]利用分子束外延(MBE)和脉冲激光沉积(PLD)方法在 GaAs 衬底上制备出 ZnTe:O 材料,发现中间带位于导带底 0.4~0.5 eV 处。文献[13-16]研究显示 ZnTe:O 带隙中价带上方 1.8 eV 的位置存在带内发光,这是由与氧陷阱相关的束缚激子的发光所致,表明氧离子掺杂在形成中间带的同时也产生缺陷。本文 ZnTe:O 带隙取计算值 2.12 eV,故本研究中带内发光位置为 1.70 eV 处,略小于实验结果。由图 1 可知,在该氧离子掺杂浓度下中间带位于 1.70 eV 处。由于中间带的存在,ZnTe:O 不仅可吸收能量大于 E_g 的光子,对低能光子可通过 E_v-E_i 及 E_i-E_c 的两步跃迁方式,使电子从价带激发至导带,这就大大拓展了电池对红外光谱的吸收,从而增加电流输出。由于输出电压取决于宿主半导体材料的带隙 E_g ,中间带的引入在增加电流的同时并不影响开路电压,从而提高了电池效率。

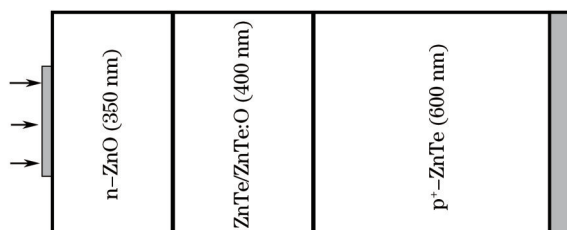


图 2 ZnO/i(n-ZnTe:O)/ZnTe 太阳电池结构示意图

Fig.2 Schematics of structure of ZnO/i(n-ZnTe:O)/ZnTe solar cell

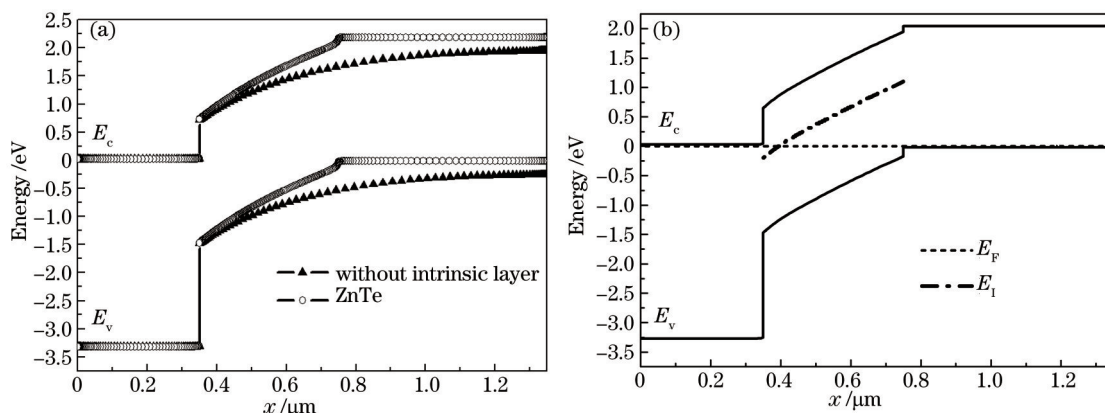


图3 (a) 无本征层时的能带图; (b) p-ZnTe:O本征层时的能带图(E_F 、 E_i 分别为费米能级和中间能级位置)
Fig.3 (a) Calculated band diagram without intrinsic layer; (b) calculated band diagram with intrinsic layer of p-ZnTe:O
(E_F is the Fermi levels. E_i is the intermediate band levels)

本文模拟太阳能电池结构为n-ZnO/i/p-ZnTe,其中本征层分别采用ZnTe和ZnTe:O,电池结构如图2所示。太阳光从透光率较好的n-ZnO侧入射,这样可使太阳光尽可能被吸收。本模拟过程中,采用的是标准太阳光谱AM1.5(100 mW/cm²)照射,电子和空穴在前、背电极表面处的复合速率取软件默认值。各层材料的具体参数设置见表1^[17-19]。在上述条件下计算所得能带图如图3所示。图3(b)中显示ZnTe:O中间带穿过费米能级,表明中间带处于部分填充^[20],这样可使中间带有效地接收价带的电子,并能向导带提供足够数量的电子。

表1 模拟中所用参数

Table 1 Parameters used in simulation

	n-ZnO	i			p ⁺ -ZnTe
		n-ZnTe:O	p-ZnTe	p-ZnTe:O	
Thickness d/nm	350	400	400	400	600
Bandgap E/eV (calculated value)	3.30	2.12	2.06	2.12	2.06
Electron affinity χ/eV	4.30	3.70	3.61	3.70	3.61
Dielectric relative ϵ/eV	8.65	7.51	7.40	7.51	7.40
CB effective density of states N_c/cm^{-3}	3.6×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}
VB effective density of states N_v/cm^{-3}	1.1×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}
Electron mobility $\mu_n/cm^2 \cdot v^{-1} \cdot s^{-1}$	10	20	20	20	20
Hole mobility $\mu_p/cm^2 \cdot v^{-1} \cdot s^{-1}$	2.5	5	5	5	5
Acceptor doping concentration N_a/cm^{-3}	0	0	1.0×10^{15}	1.0×10^{15}	1.0×10^{19}
Donor doping concentration N_d/cm^{-3}	1.0×10^{18}	1.0×10^{14}	0	0	0

3 模拟结果及讨论

3.1 中间带对光谱吸收的影响

目前,太阳能电池研究主要围绕两大方向:1)是降低成本;2)是提高效率。本文研究中间带层对太阳能电池效率的影响。与ZnTe相比,ZnTe:O由于中间带的存在显著提高了对低能光子的吸收。图4所示为第一性原理方法得到的各层材料的光吸收系数及在250~1000 nm范围内ZnTe和ZnTe:O对光的吸收放大图^[21]。

由图4可知,ZnO主要吸收低波段紫外光,且光谱吸收范围较窄,这是由其较大的带隙值决定的。由于ZnO这种特殊的光吸收性质,大部分可见光及红外光可直接透过,故其很适合作为太阳能电池的窗口层。与ZnO相比,ZnTe和ZnTe:O具有很好的光谱的吸收能力,可作为很好的光吸收层。

由于中间带的存在主要增加材料对低能光子的吸收,故图4中低波段时ZnTe:O对光的吸收略大于ZnTe,随着波长的增大,光吸收曲线发生突变,图中给出了突变附近的光吸收曲线放大图。由250~1000 nm范围的光吸收曲线可知,ZnTe与ZnTe:O的交点位于420 nm处,对应2.95 eV光子能量且大于ZnTe:O的带隙值。对上述现象结合图1中电子跃迁原理做如下解释:当波长小于420 nm时,电子跃迁主要为 E_c-E_v ,但由于

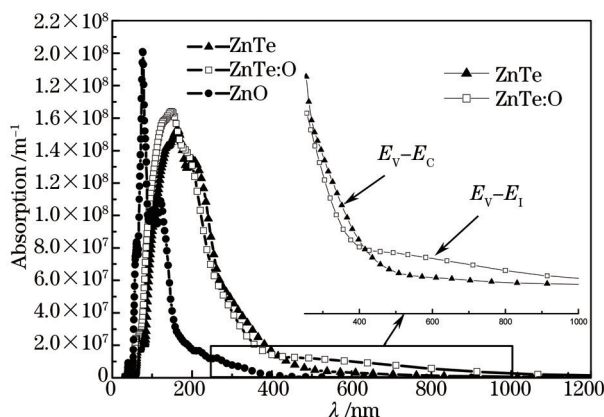


图4 各层材料的光吸收系数及ZnTe与ZnTe:O在250~1000 nm范围的放大对比图

Fig.4 Optical absorption coefficient of every layer materials and amplification comparison figure between ZnTe and ZnTe:O in the range of 250~1000 nm

ZnTe:O中1.72 eV处氧陷阱的存在,部分光子不足以克服陷阱时,电子无法完成 E_v-E_c 的跃迁而只能跃迁到 E_1 处,表现为在小于420 nm的一定范围ZnTe的吸收系数略大于ZnTe:O;当波长大于420 nm时,由于中间带的存在,ZnTe:O可通过 E_v-E_1 及 E_1-E_c 的两步跃迁的方式对低能光子吸收。故在该范围ZnTe:O的吸收系数明显大于ZnTe。

3.2 中间带本征层对电池性能的影响

ZnO具有较宽的带隙和较好的透光性,使其很适合作为太阳能电池的窗口层,由于ZnTe的优异的光学性能使其可作为光吸收层。在无本征层时重掺杂的p型ZnTe是主要的光吸收层,此时的光生载流子需要扩散到p-n结处的空间电荷区,具有较长的扩散长度,使太阳能电池效率降低。当在p与n型材料之间加入本征层时,一方面ZnTe和ZnTe:O本征层具有很好的光学吸收性能,可以作为吸收层,另一方面本征层产生的电子-空穴对在本征层电场的作用下分离,缩短了光生载流子的输运路径,因此本征层的结构和性能参数是决定太阳电池性能的关键因素。如图5所示为无本征层和不同材料本征层的量子效率(QE)曲线。

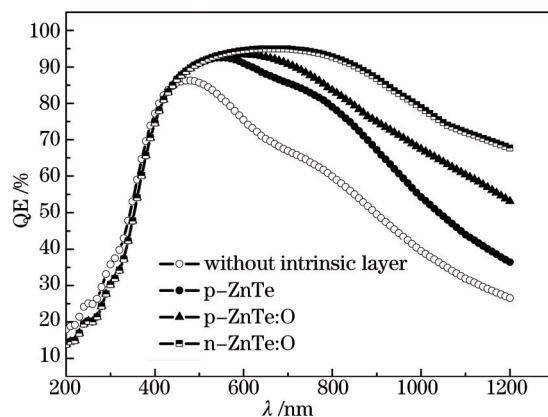


图5 不同本征层时的QE曲线

Fig.5 QE curve with different intrinsic layers

由图5可知,在小于400 nm的短波段,ZnO/ZnTe的光谱响应比ZnO/ZnTe/ZnTe和ZnO/ZnTe:O/ZnTe的光谱响应要大,而ZnO/ZnTe/ZnTe和ZnO/ZnTe:O/ZnTe在此波段的光谱响应无明显差别,这是因为短波光主要在作为窗口层的n型ZnO中被吸收,在窗口层形成的电子-空穴对在内建电场的作用下使少子电子向p型ZnTe中做漂移运动,当无本征层时电子直接进入重掺杂的p⁺-ZnTe中,与本征层相比,重掺杂的ZnTe对电子的复合几率较小,使光生载流子的扩散长度和寿命都较长,因而光生载流子被有效收集的几率比有本征层时更大,表现为无本征层时的QE比有本征层时更大。

当波长大于500 nm时,有本征层的光谱响应剧烈增大,且存在中间带的ZnTe:O本征层比ZnTe本征层的QE明显增大。这是因为ZnO/ZnTe的ZnTe吸收层主要吸收中波长段的太阳光谱,当有本征层时,光生载流子和空穴主要在本征层产生并在内建电场的帮助下被分离,与无本征层相比,大大缩短了光生载流子的输

运路径,增加载流子的扩散长度和寿命,进而大幅度提高了载流子的收集效率,表现为有本征层时的光谱响应剧烈增大。当本征层为 ZnTe:O 时的光谱响应比本征层为 ZnTe 时更大,这是由本征层的材料特性决定的,结合图 4,在 ZnTe:O 本征层中,由于中间带的存在,对波长大于 420 nm 的光谱吸收比 ZnTe 强,故中间带太阳能电池可大大提高 QE。

太阳能电池的研究目标是在成本尽可能低的情况下获得尽可能好的电池性能。图 6 给出了不同本征层时的 $J-V$ 特性曲线,表 2 中给出了几种情况下相应电池的各特征参量。

由图 6 及表 2 可知,无本征层时短路电流密度 J_{sc} 最小但开路电压 V_{oc} 最大, F_f 为填充因子本征层为 ZnTe 时开路电压 V_{oc} 和电池效率 η 都最小,本征层为 ZnTe:O 时短路电流密度 J_{sc} 和电池效率 η 得到显著提升,且 n 型掺杂的 ZnTe:O 具有更好的性能参数。

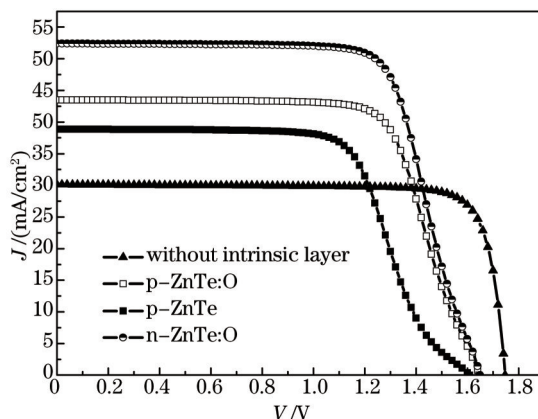


图 6 不同本征层时的 $J-V$ 特性曲线

Fig.6 $J-V$ characteristics with different intrinsic layers

表 2 不同本征层时太阳能电池参数

Table 2 Parameters of solar cell with different intrinsic layers

	V_{oc}/V	$J_{sc}/(mA/cm^2)$	$F_f/\%$	$\eta/\%$
Without intrinsic layer	1.75	30.11	83.32	43.83
p-ZnTe	1.61	38.88	65.04	40.66
p-ZnTe:O	1.65	43.50	71.67	51.32
n-ZnTe:O	1.65	52.39	71.40	61.58

通过对图 5 的分析可知无本征层时太阳能电池对光谱的总吸收最低,本征层为 ZnTe:O 时对光谱的总吸收最高,由此可知三种太阳能电池的光生载流子的产生率从高到低依次为 i-ZnTe:O>i-ZnTe>无本征层。本征层的存在使光生载流子的复合率降低,故无本征层时的短路电流密度最小。由图 3(b)可知, p 型掺杂的 ZnTe:O 费米能级位于中间带能级靠下位置,这表明中间带的电子填充较小,光照时中间带不足以提供足够的电子跃迁至导带,进而影响电池性能;当 ZnTe:O 为 n 型轻掺杂时,可改变费米能级位置接近中间带中央,这样既可为导带提供足够的跃迁电子,又有足够的空位接收价带电子的跃迁,故 n 型 ZnTe:O 与 p 型掺杂相比短路电流密度 J_{sc} 更大,且开路电压保持不变。

根据太阳能电池的理想二极管模型^[22],开路电压 V_{oc} 和反向饱和电流密度 J_0 之间的关系满足:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} [\ln(J_{sc}/J_0) + 1]. \quad (1)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, q 为电荷量。由(1)式知,开路电压 V_{oc} 与反向饱和电流密度 J_0 呈反比关系。而反向饱和电流密度 J_0 可由肖克莱公式定量描述:

$$J_0 = \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} + \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D}, \quad (2)$$

式中 L_n 、 L_p 分别为电子和空穴的扩散长度, D_n 、 D_p 为电子和空穴的扩散系数。

由(2)式可知,影响反向饱和电流密度的主要因素是扩散长度和施主、受主掺杂浓度,当无本征层时虽然

扩散长度较小,但施主掺杂浓度较大,足以弥补扩散长度对反向饱和电流的影响,使无本征层时的反向饱和电流密度更小,即开路电压更大。当采用不同材料本征层时,本征层掺杂浓度相同,但由于 ZnTe 与 ZnO 带隙差值更大,在 p-n 结处的势垒更大,不利于载流子的漂移,使其扩散长度更小,则此时的反向饱和电流密度更大,即开路电压与 ZnTe:O 本征层相比更小。理想情况下, F_F 仅由开路电压 V_{oc} 决定,故其与 V_{oc} 的变化保持一致。

太阳电池转换效率 η 为太阳电池在最佳工作状态下输出的电功率与投射到太阳电池上总的光功率之比,即

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times F_F}{P_{in}}, \quad (3)$$

由(3)式可知,太阳电池的短路电流密度 J_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、填充因子 F_F 三者共同决定了电池的转换效率。当采用 n 型 ZnTe:O 为本征层时,电池效率 η 达到最大值 61.58%。

4 结 论

利用 SCAPS 软件,通过合理设置各项参数,模拟出具有中间带的 ZnTe:O 本征层对 ZnO/ZnTe 太阳能电池各性能参数的影响,并得出如下结论:

1) 本征层的存在及材料结构对太阳能电池性能有显著影响,具有中间带的 ZnTe:O 作为本征层时的电池性能参数明显优于 ZnO/ZnTe 和 ZnO/ZnTe/ZnTe;

2) 不同掺杂类型的 ZnTe:O 本征层通过改变费米能级在中间带的位置影响太阳能电池的性能参数,模拟计算结果显示, n 型 ZnTe:O 作为本征层时短路电流密度 J_{sc} 及电池效率分别为 52.39 mA/cm² 和 61.58%, 远高于 p 型 ZnTe:O 结构太阳能电池。

由模拟可知,虽然高失配合金结构的中间带太阳能电池具有很高的理论效率,但由于生产工艺等原因,实验结果一直不容乐观。如何生产高效且成本低廉的高失配合金,还需要进行大量研究。

参 考 文 献

- 1 Brown G F, Wu J. Third generation photovoltaics[J]. *Laser & Photo Rev*, 2009, 3(4): 394-405.
- 2 Antonio L, Antonio M. Photovoltaics: Towards the intermediate band[J]. *Nat Photon*, 2011, 5(3): 137-138.
- 3 Walukiewicz W, Shan W, Yu K M, *et al.*. Interaction of localized electronic states with the conduction band: Band anticrossing in II-VI semiconductor ternaries[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85(7): 1552-1555.
- 4 Wu J, Walukiewicz W, Yu K M, *et al.*. Band anticrossing in GaP_{1-x}N_x alloys[J]. *Phys Rev B*, 2001, 65(24): 241303.
- 5 Yu K M, Walukiewicz W, Wu J, *et al.*. Diluted II-VI oxide semiconductors with multiple band gaps[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(24): 246403.
- 6 Merz J L. Photoluminescence of ion-implanted oxygen in ZnTe[J]. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(6): 2463-2471.
- 7 Yu K M, Walukiewicz W, Wu J, *et al.*. Band anticrossing in group II-O_x-VI_{1-x} highly mismatched alloys: Cd_{1-x}Mn_xO₂Te_{1-x} quaternaries synthesized by O ion implantation[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(9): 1571-1573.
- 8 Zhang Fuchun, Deng Zhouhu, Yan Junfeng, *et al.*. First principles calculation of electronic structure and optical properties of ZnO[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8): 1203-1209.
张富春, 邓周虎, 阎军锋, 等. ZnO 电子结构与光学性质的第一性原理计算[J]. *光学学报*, 2006, 26(8): 1203-1209.
- 9 Zhang Fuchun, Zhang Zhiyong, Zhang Weihu, *et al.*. First-principles calculation of electronic structure and optical properties of AZO (ZnO:Al)[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 1025-1031.
张富春, 张志勇, 张威虎, 等. AZO(ZnO:Al) 电子结构与光学性质的第一性原理计算[J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 1025-1031.
- 10 He Xiaoxiao, Wang Wenjun, Li Shuhong, *et al.*. Design and properties analogy of ZnO-based multilayer transparent conducting film[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0607001.
和晓晓, 王文军, 李淑红, 等. ZnO 基透明导电薄膜的制备与特性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0607001.
- 11 Liu Y X, Wang M W, Mccaldin J O, *et al.*. Schottky barrier induced injecting contact on wide band gap semiconductors[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1992, 10(4): 2072-2076.
- 12 Wu K P, Gu S L, Ye J D, *et al.*. Theoretical optoelectronic analysis of intermediate-band photovoltaic material based on ZnY_{1-x}O_x (Y=

- S, Se, Te) semiconductors by first-principles calculations[J]. *Chin Phys B*, 2013, 22(10): 107103.
- 13 Seong M J, Miotkowski I, Ramdas A K. Oxygen isoelectronic impurities in ZnTe:Photoluminescence and absorption spectroscopy[J]. *Phys Rev B*, 1998, 58(12): 7734–7739.
- 14 Hopfield J J, Thomas D G, Lynch R T. Isoelectronic donors and acceptors[J]. *Phys Rev Lett*, 1966, 17(6): 312–315.
- 15 Marco F, Antonio P, Mario C, *et al.*. Passivation of an isoelectronic impurity by atomic hydrogen: The case of ZnTe:O[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(10): 101910.
- 16 Moon S R, Jung H K, Yong K. ZnTe Nanowires with oxygen intermediate band grown by bismuth-catalyzed physical vapor transport[J]. *J Phys Chem C*, 2012, 116(18): 10368–10374.
- 17 Wang W M. Intermediate Band Solar Cells Based on ZnTeO[D]. Michigan: University of Michigan, 2010.
- 18 Lin Jiahui, Peng Qicai. Simulation of n-ZnO/i-ZnO/p-nc-Si thin film solar cell[J]. *Electronic Components and Materials*, 2012, 31(5): 27–30.
林家辉, 彭启才. n-ZnO/i-ZnO/p-nc-Si结构薄膜太阳能电池的模拟研究[J]. *电子元件与材料*, 2012, 31(5): 27–30.
- 19 Bowen W E, Wang W, Phillips J D. Complementary thin film electronic based on ZnO/ZnO/ZnTe[C]. 2009 Device Research Conference, 2009: 183–184.
- 20 Qu Xiaosheng, Zhang Sisi, Xiong Liling, *et al.*. Research progress of quantum-dot intermediate band solar cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 020008.
屈晓声, 张思思, 熊丽玲, 等. 量子点中间带太阳能电池的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 020008.
- 21 Wang W, Lin A, Phillips J D. Intermediate-band photovoltaic solar cell based on ZnTe:O[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(1): 011103.
- 22 Shen Wenzhong. *Solar Photovoltaic Technologies and Applications*[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013: 67–82.
沈文忠. *太阳能光伏技术与应用*[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013: 67–82.

栏目编辑: 张浩佳