InGaAs热光伏电池器件和系统研究

龙军华^{1,2}, 谭明², 季莲², 肖梦², 吴渊渊², 陆书龙^{1,2*}, 代盼², 李雪飞², 金山^{1,2},
邢志伟^{1,2}, 鲁姣², 杨文献^{1,2}

1. 中国科学技术大学纳米技术与纳米仿生学院, 合肥 230026;

2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 中国科学院纳米器件与应用重点实验室, 苏州 215123

* 联系人, E-mail: sllu2008@sinano.ac.cn

收稿日期: 2018-03-28; 接受日期: 2018-04-25; 网络出版日期: 2018-08-27

国家自然科学基金(编号: 61704186, 61774165, 61534008)、中国科学院重点前沿科学项目(编号: QYZDB-SSW-JSC014)、江苏省重点研发项目(编号: BE2016085)和中国科学院BIC对外合作项目(编号: 121E32KYSB20160071)资助

摘要 InGaAs电池具有吸收带隙低, 效率高, 稳定性好的优点, 广泛应用于热光伏(TPV)器件. 本文从材料生长, 器件制造和系统综合方面研究了InP衬底上0.73 eV $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 晶格匹配和0.6 eV $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 晶格失配热光伏电池. 通过缓冲层厚度计算, 分析了组分波浪上升式InAsP结构的应力弛豫机制, 单层缓冲层厚度150 nm时能够释放84%的失配应力. 晶格匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和晶格失配 $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 室温光致发光波长分别为1.69和2.05 μm . 在AM1.5G标准光谱下, 0.73和0.6 eV InGaAs TPV电池的转换效率分别为12.38%和8.41%. 然而在1323 K辐射温度下, 0.6 eV InGaAs TPV电池的转换效率超过0.7 eV InGaAs TPV电池, 利用黑体辐射公式标定后转换效率分别达到26.9%和25.4%. 搭建了热光伏原理样机系统, 通过InGaAs热光伏电池串并联方式, 实现了1470 K辐射温度下5 W的输出功率, 完成了热辐射能到电能的稳定转换.

关键词 TPV电池, InGaAs, 效率, 系统

PACS: 88.40.hj, 88.40.jm, 68.55.ag, 81.15.Gh

1 引言

热光伏(Thermophotovoltaic-TPV)发电是将高温热发射体发出的红外辐射能通过半导体光伏电池直接转换成电能的技术. 在热光伏系统中, 负责能量传输的主要载体是红外辐射, 因此TPV电池一般都是窄带隙半导体电池. 热光伏电池禁带宽度越小, 吸收截止波长越大, 对辐射体工作温度要求也就越低. 对于工作在

1300–1600 K的热光伏系统来说, TPV电池的带隙宽度处于0.5–0.76 eV之间比较合适^[1,2].

热光伏系统中研究较多的有Si, Ge, Ga(InAs)Sb, InGaAs等电池^[3–5]. Si的带隙较宽, 吸收截止波长为1.1 μm , 这对TPV系统来说效率较低. Ge电池带隙宽度为0.66 eV, 就其吸收带隙来说非常适合于热光伏系统的应用, 但Ge是间接带隙半导体, 光电转化效率比直接带隙半导体低, 且Ge电池的开路电压较低. III-V半

引用格式: 龙军华, 谭明, 季莲, 等. InGaAs热光伏电池器件和系统研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 117301

Long J H, Tan M, Ji L, et al. The study of device fabrication and system integration of InGaAs thermophotovoltaic cells (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 117301, doi: 10.1360/SSPMA2018-00087

导体电池大多是直接带隙结构, 具有效率高, 稳定性好的优点, 广泛应用于半导体材料能源领域. Wang等人^[6]利用MBE方法制备出的InGaAsSb电池, 在2 μm 处的内部量子效率高达95%. 与GaSb材料相比, InP材料具有更高的晶体质量. Fatemi等人^[7-9]利用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法, 在InP衬底上生长一层InAsP材料作为缓冲层, 它可以容许InP衬底与外延层InGaAs之间存在1.1%的晶格失配, 大大降低了InGaAs层失配位错. Murray等人^[10]制备出禁带宽度为0.55 eV的InGaAs材料, 用这种材料制成的热光伏器件在系统效率和输出功率密度上都有所提高, 在1300–1700 nm光谱内, 制备减反射膜前器件的最高外部量子效率就达到了70%. Wilt等人^[11]制备出的0.74 eV InGaAs/InP结构电池, 在600–1500 nm光谱内, 外部量子效率可达90%, 器件的光电转换效率达到了23.9%. 多结InGaAs键合电池聚光下效率高达44.7%^[12], 且经过1 MeV辐照后电流密度仅降低1%^[13]. 因此, 对于采用低温红外发射体的热光伏系统, InGaAs电池的应用前景非常可观^[14]. 本文从热光伏电池材料生长, 器件工艺, 器件测试到系统搭建方面详细地介绍了InGaAs TPV电池的研究.

2 InGaAs热光伏电池材料生长

2.1 InGaAs电池匹配生长

材料匹配生长是指外延层和衬底材料晶格常数一致的共格生长. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料生长常常采用InP衬底, InP晶格常数为0.58687 nm, 匹配生长对应的In组分为53%, 禁带宽度为0.73 eV^[15]. 材料生长设备是Veeco公司Aix200-4型低压MOCVD, 以三甲基镓(TMGa), 三甲基铟(TMIn)和 AsH_3 分别为Ga, In和As源, 生长温度为680°C. 首先在(001) InP衬底上生长约50 nm厚的InP缓冲层; 接下来生长300 nm厚的背场层; 接着生长约3300 nm厚的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 功能层(基区2800 nm, 发射区300 nm), 生长速率为0.49 nm/s; 最后生长50 nm厚的InAsP窗口层和300 nm厚的InGaAs接触层(样品编号A).

2.2 InGaAs电池失配生长

匹配生长能够得到晶体质量良好的外延层, 但是材料能量带隙是固定的, 因此其他带隙材料必须通过失配生长得到. 能量带隙为0.6 eV的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料, In组分为68%, 晶格常数为0.59287 nm, 这与InP衬底存在

1.0%的晶格失配^[16,17], 因此需要增加过渡缓冲层失配生长InGaAs材料. 晶格异变过渡层的生长方法有3种, 分别为: 单一组分过渡层、组分连续变化过渡层和组分步进过渡层. 在InP衬底上生长组分步进弛豫缓冲层, 可以将晶格常数过渡到与 $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 相匹配^[18-21]. 因此我们采用组分波浪上升式 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层生长方式释放晶格失配生长的应力^[22,23], InGaAs热光伏电池结构及缓冲层结构如图1所示. 失配生长和匹配生长类似, 只是在InP缓冲层和InAsP背场层中间加入了 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层. 组分波浪上升式 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 渐变缓冲层结构生长速率约为0.25 nm/s, As的组分为6%–39%.

当外延层厚度超过临界厚度时, 外延材料会通过衬底和外延层界面处形成失配位错网络的方式来释放应力. 由于缓冲层不能完全弛豫, 表面存在一定残余应力 ϵ_s , 其面内晶格常数为

$$a_s = a_1 - \epsilon_s a_0, \quad (1)$$

式中 a_1 为缓冲层最上层材料在完全弛豫状态下的晶格常数, a_0 为衬底的晶格常数. 通常情况下, 缓冲层最上层材料的组分设计为使其晶格常数与所需要的器件的晶格常数相同, 这样由于缓冲层表面存在残余应力 ϵ_s , 使得缓冲层与器件材料间的界面处产生失配位错, 影

图1 $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ TPV电池及组分波浪上升式 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层结构示意图

Figure 1 Structure schemes of $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ TPV cells and compositionally undulating step-graded $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ buffer samples.

响器件的性能. 为了解决这一问题, Tersoff^[24]提出“overshoot”的概念, 将缓冲层最上层材料的组分设计为使其晶格常数为

$$a_1 = a + \varepsilon_r a_0 \quad (2)$$

其中 a 为所需要的器件材料的晶格常数. 也就是说缓冲层最上层的晶格常数超过器件晶格常数 $\varepsilon_r a_0$, 在残余应力的作用下缓冲层与器件材料界面晶格匹配. 本设计中, $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 与 InP 衬底的晶格失配为1.0%, 而顶层 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 与 InP 衬底的晶格失配为1.2%.

InP , InAsP 和 InGaAs 都是闪锌矿结构半导体, 主要的失配位错是 $60^\circ a/2 \langle 110 \rangle \{111\}$ 位错, 因此在样品的表面沿着两个互相垂直的 $\langle 110 \rangle$ 方向形成纵横交错的突起与沟壑, 称为cross-hatch形貌^[25,26]. 失配位错引起表面的局部起伏, 使得这些区域的生长速率发生改变, 从而增加表面的粗糙度, 降低外延层晶体质量. $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层中, Burgers矢量 $\mathbf{b}$ 的面内刃型分量对应力弛豫起作用. 当衬底与外延层完全共格生长时, 由Matthews-Blakeslee公式^[27], 外延层零界厚度 h_c 可表示为

$$h_c = \frac{b}{8\pi f \cos \alpha} \left(\frac{1 - \nu \cos^2 \beta}{1 + \nu} \right) \ln \left(\frac{4h_c}{b} \right), \quad (3)$$

其中 f 是外延层自由晶格失配度, α 是混合位错Burgers矢量 $\mathbf{b}$ 与刃位错分量在面内投影的夹角, β 为Burgers矢量 $\mathbf{b}$ 与位错线矢量 $\mathbf{l}$ 的夹角, ν 是半导体材料泊松比. 当外延层厚度大于零界厚度时, 外延膜内的平衡位错密度 ρ_{md} 可表示为

$$\begin{aligned} \rho_{\text{md}} &= \frac{f}{b \cos \alpha} - \frac{b}{8\pi f \cos \alpha} \left(\frac{1 - \nu \cos^2 \beta}{1 + \nu} \right) \ln \left(\frac{4h}{b} \right) \frac{1}{b \cos \alpha} \\ &= \frac{f}{b \cos \alpha} \left(1 - \frac{h_c}{h} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

因此, 部分 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层厚度 h 与 60° 位错密度 ρ_{md} 关系曲线如图2所示. 因为压应变材料的表面向上凸起, 表面粗糙度较大; 张应变材料的表面向下凸起, 表面比较平整. 所以张应变和压应变交替生长的方式能够使每层材料的粗糙度互补, 更好地释放应力. 由图可知, 单层缓冲层厚度在150–200 nm(顶层厚度240–290 nm)时, 平衡位错密度已接近最大值, 应力释放效果最佳. 假设继续增加缓冲层厚度对应力释放贡献微弱, 且大大增加了材料生长成本.

图2 $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ TPV电池 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层厚度 h 与 60° 位错密度 ρ_{md} 关系曲线

Figure 2 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ buffer-layer thickness h and 60° dislocation density ρ_{md} curves of $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ TPV cells.

由于MOCVD采用 AsH_3 , PH_3 作为As源与P源, 而 AsH_3 分解率相对 PH_3 来说较高, 所以As源与P源流量比小. 实验结果表明As源与P源流量比同 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 中As的组分近似成正比关系, 因此在材料生长时只要调控As/P的流量比, 就可以较方便控制 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 中各组分. 为了比较不同缓冲层厚度的应力弛豫情况, 我们生长了两组不同缓冲层厚度的样品, 结构参数如表1所示.

2.3 材料质量分析

我们采用美国Princeton Instruments公司的光致发光(PL)测试仪在室温下测量 InGaAs 热光伏电池材料的PL曲线, 结果如图3所示. 由图可以看出, 晶格匹配生长的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 发光波长为1.69 μm , 能量带隙为0.73 eV(样品A); 晶格失配生长的 $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 发光波长为2.05 μm , 能量带隙为0.6 eV(样品C). 由于匹配生长的 InGaAs 材料位错密度更低, 结晶质量更好, 所以PL强度更大, 波峰更尖锐.

我们接着采用三轴X射线衍射(XRD), 横截面透射电子显微镜(XTEM)分析失配生长的 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层应力弛豫和缺陷性质. 三轴XRD采用的是Bruker公司的D8-Discover系统, $\text{Cu K}\alpha_1$ 射线; XTEM型号是JOE-2000, 工作电压200 kV.

对样品进行XRD二维倒空间衍射图(RSMs)分析, 研究 $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ 组分波浪上升式缓冲层的应力弛豫和残余情况. 在(004)面对称倒空间衍射图像中(图未展示), 各个外延层的倒格点都位于一条过衬底倒格点的垂直线上, 说明外延层与衬底间倾斜度非常小. 样品B和C的(115)面RSMs结果如图4所示. 在样品B中, 只有两个

表 1 InGaAs TPV电池结构参数

Table 1 The detailed structures of InGaAs TPV cells

样品编号	InP缓冲层厚度 (nm)	InAs _y P _{1-y} 缓冲层			In _{0.68} Ga _{0.32} As层厚度 (nm)
		层数	每层的厚度 (nm)	顶层的厚度 (nm)	
B	50	14	100	240	3100
C	50	14	150	240	3100

图 3 InGaAs PL曲线

Figure 3 PL curves of InGaAs.

清晰的倒格点, 分别对应InP衬底和In_{0.68}Ga_{0.32}As层, In_{0.68}Ga_{0.32}As层倒格点的半高宽为220 arcsec, 而InAs_yP_{1-y}缓冲层的倒格点无法分辨. 样品C三层结构倒格点清晰, In_{0.68}Ga_{0.32}As层半高宽为160 arcsec, Q_x 与InAs_yP_{1-y}缓冲层最上层材料一致, 说明他们面内晶格常数相同, 界面处晶格匹配. 样品B InAs_yP_{1-y}缓冲层最

上层的面内和面外晶格常数分别为5.9524和5.9272 Å, 弛豫度为84%.

通过透射电子显微镜(TEM), 进一步分析了缓冲层结构特性, 样品B和C的TEM结果如图5所示. 从图中可以清晰看到InAs_yP_{1-y}缓冲层由于张应变和压应变交替生长产生的失配位错线, 这些位错主要存在于失配较大的界面, 同时这些界面也起到了截止向上穿透位错的作用^[28]. 样品B中可以看到位错从缓冲层的底部延伸到InP衬底, 而样品C的InP衬底中没有明显的位错. 在50 μm范围的InAs_yP_{1-y}缓冲层顶层和In_{0.68}Ga_{0.32}As层中, 样品C有较小的穿透位错, 穿透位错密度小于10⁶ cm⁻². 很明显样品C的质量优于样品B. 因此通过组分波浪上升式InAs_yP_{1-y}缓冲层, 张应变和压应变交替生长, 单层厚度150 nm, 可以在InP衬底上生长出晶体质量较好的In_{0.68}Ga_{0.32}As外延层材料.

3 InGaAs热光伏电池器件制备

3.1 InGaAs热光伏电池工艺

InGaAs热光伏电池的器件结构包括: p型InAsP背

图 4 In_{0.68}Ga_{0.32}As (115)面RSM测试结果. (a) 样品B; (b) 样品CFigure 4 Asymmetric (115) RSMs of In_{0.68}Ga_{0.32}As. (a) Sample B; (b) sample C.

图5 $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 截面TEM照片. (a) 样品B; (b) 样品C
Figure 5 TEM photograph of $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$. (a) Sample B; (b) sample C.

场层, P型InGaAs基区层, n型InGaAs发射层, n型InAsP窗口层, n型InGaAs接触层和4层 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 抗反射膜. 有效的背场能够将光生载流子约束在pn结区域内, 同时又能保证多数载流子的输运, 使其能被有效收集. 窗口层能够钝化与发射层相关的表面态, 大大降低表面复合速率.

InGaAs热光伏电池器件工艺主要分为6步. 首先在InGaAs接触层上制备n型欧姆接触电极Ni/AuGe/Ni/Au. 由于金属对光有很强的吸收作用, 为了使尽可能多的光入射到有源区, 电极设计成梳状结构, 指状占空比为90%. 制备完电极之后, 用感应耦合等离子(ICP)刻蚀隔离槽, 并用SiN做钝化处理, 减少电池侧壁载流子复合所引起的漏电. 为了提高电池的散热性能, 在做P型电极之前, 先将衬底减薄到200 μm 以下. P型电极做在电池背面, 采用Pb/Zn/Pt/Au, 在氮气氛围下380°C退火2 min形成欧姆接触. 之后, 用湿法腐蚀的方法去除栅条之间的InGaAs接触层, 从而使光直接照射在InAsP窗口层上. 由于梳状电极的设计, 栅条之间的半导体材料产生的光生载流子要横向扩展到梳状电极处才

能被电极收集, 因此要求InAsP窗口层的掺杂浓度尽可能高, 我们生长的InAsP窗口层的掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 另外为了提高梳状电极的导电性, 降低串联电阻, 在n型欧姆接触电极之上蒸镀Ag/Au厚电极. 最后, 在样品表面蒸镀抗反射膜 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$, 厚度为68/67/180/171 nm, 提高入射光的利用效率.

3.2 InGaAs热光伏电池测试

经过完整太阳电池工艺后, 我们得到0.73 eV $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 晶格匹配和0.6 eV $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 晶格失配热光伏电池. 在一个太阳标准光谱(AM1.5G)下, InGaAs热光伏电池电流密度 J_{sc} 和电压关系如图6所示. 0.73 eV $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 晶格匹配TPV电池开路电压 V_{oc} 为0.345 V, 短路电流密度 J_{sc} 为55.88 mA/cm^2 , 填充因子 FF 为64.22%, 转换效率 E_{tr} 达到12.38%. 0.6 eV $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 晶格失配TPV电池开路电压 V_{oc} 为0.23 V, 短路电流密度 J_{sc} 为57.54 mA/cm^2 , 填充因子 FF 为63.56%, 转换效率 E_{tr} 达到8.41%. 比较结果可知, 两者电流密度较接近, 开路电压大的InGaAs电池具有更高的光电转换效率. 在AM1.5G标准光谱下, 开路电压对电池转换效率起到关键作用.

4 InGaAs热光伏电池效率标定

InGaAs热光伏测试系统如图7所示, 该系统包括Instron黑体辐射炉, 功率控制器, 光阑和电流密度测试

图6 AM1.5G标准光谱下InGaAs TPV电池 J - V 特性曲线
Figure 6 J - V characteristics of InGaAs TPV cells under AM1.5G standard solar spectrum.

图 7 InGaAs TPV 电池测试系统示意图
Figure 7 Assembly diagram of TPV cells measurement.

仪^[29]. 其中 d_1 是光阑直径, d_2 是热光伏直径, D 是光阑与热光伏之间的距离. 为了确保实验的准确性, 每次实验都要重新测量 D 的值. 测试时随着电池温度升高, 电池内本征载流子浓度增加, 寿命降低, 这将导致复合速率增加, 电池效率降低^[30]. 因此, 在整个测试过程中通过水冷系统确保电池的温度在 300 K.

热光伏电池效率可以采用下面的公式计算, p_m 是电池吸收的能量, P_{out} 是辐射在电池上的能量:

$$\eta = p_m / P_{out}, \quad (5)$$

p_m 可以直接从 TPV 电池 J - V 特性曲线得出. 由于没有一个理想的功率表, 所以 P_{out} 很难直接测量得到. 我们可以通过普朗克黑体辐射定律间接计算出 P_{out} ^[31,32]. 普朗克辐射定律给出了黑体辐射的能量密度频谱分布

$$M_0(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{hc/\lambda KT} - 1}, \quad (6)$$

M_0 是辐射出射率, λ 是辐射波长, T 是辐射绝对温度, h

是普朗克常量, K 是玻耳兹曼常数, c 是光速常量. 对波长进行积分有

$$M_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_0(\lambda, T) d\lambda, \quad (7)$$

(λ_1, λ_2) 是波长积分区间. 对于带隙为 0.6 eV (波长 2.05 μm) 的晶格失配 $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 热光伏电池, 积分区间为 (0.2 μm , 2.05 μm); 对于带隙为 0.73 eV (波长 1.69 μm) 的晶格匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 热光伏电池, 积分区间为 (0.2 μm , 1.69 μm). 如果 $D > 5d_1$, 黑体可被视为点光源. 因此, TPV 电池表面辐射的功率 p_{out} 可近似为

$$P_{out} = \frac{LA}{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 + D^2} = \pi L \frac{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2}{\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 + D^2} = M_{\lambda_1-\lambda_2} \frac{(d_1)^2}{(d_1)^2 + 4D^2}, \quad (8)$$

L 是电池表面的辐射率, A 是光阑面积.

在 1323 K 辐射温度下, 我们测试了带隙为 0.6 和 0.73 eV InGaAs 热光伏电池的 J - V 特性曲线, 测量的光电转换效率分别为 26.9%, 25.4%, 如图 8(a) 所示. Tuley 和 Nicholas^[33] 利用 InGaAs 材料系统的基本参数建模, 精确计算出了 InGaAs TPV 电池的理论效率, 这与我们实验测量的结果较接近, 如图 8(b) 所示, 实心圆为 TPV 电池测量值, 其余为理论计算值. 辐射温度影响热光伏电池的最佳带隙, 随着温度升高, 最佳带隙往高能量方向移动^[34,35]. 在 1400 K 辐射温度下, 热光伏电

图 8 (a) 1323 K 辐射温度下 InGaAs TPV 电池的 J - V 特性曲线; (b) 不同带隙 TPV 电池效率理论值和实验值
Figure 8 (a) J - V characteristics of InGaAs TPV cells at 1323 K radiation temperature; (b) theoretical and experimental efficiency of different band gap InGaAs TPV cells.

池的最佳带隙约0.6 eV; 在1600 K辐射温度下, 热光伏电池的最佳带隙约0.73 eV. 因此, 低辐射温度下采用窄带隙TPV电池, 光电转换效率最佳.

5 InGaAs热光伏电池系统

通过前面的工作, 我们得到了效率较高的InGaAs热光伏电池. 接着我们尝试将这些电池通过串并联的方式连接得到有一定输出功率的电池阵列. 由于在1000–1400 K的黑体辐射温度下, 0.6 eV带隙的热光伏电池具有更高的转换效率, 所以我们在制作电池阵列时优先采用0.6 eV的 $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 热光伏电池. 电池阵列由6组InGaAs TPV电池并联构成, 每组电池由9个单管电池串联组成. 每个电池阵列有54个电池, 每个电池都通过银浆黏贴在陶瓷覆铜板上, 电池阵列实物图如图9(a)所示. 为了测试电池阵列的输出功率, 我们搭建了热光伏原理样机系统, 核心部分如图9(b)所示. 整个系统主要由热光伏电池, 硅碳棒, 六方空心电池腔体, S型热电偶, 水冷系统, 动力柜, 直流电源, 控制箱等组成. 首先, 用高温导热胶将热光伏电池阵列串并联后固定在六方空心电池腔体的侧壁上; 接着, 打开水冷系统, 确保电池阵列与六方空心电池腔体侧壁紧密接触, 且水冷系统中冷却水的温度始终保持在300 K; 最后, 利用动力系统给碳硅棒辐射源加热. 我们测试了2个阵列和4个阵列在不同碳硅棒温度下的系统输出功率, 如图9(c)所示. 结果表明, 随着辐射温度升高, 输出功率增加, 在1470 K辐射温度下, 4个电池阵列输出功率达到5 W.

6 结论

我们研究了0.73 eV $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 晶格匹配和0.6 eV $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ 晶格失配热光伏电池. 材料生长方面, 重点介绍了晶格失配TPV电池的结构设计, 并且通过InAsP缓冲层厚度与位错密度关系的计算, 分析了组分波浪上升式InAsP缓冲层结构应力弛豫机制. 我们得到了晶体质量较好的1.69 μm 晶格匹配和2.05 μm 的晶格失配InGaAs材料. 器件制备方面, 0.73和0.6 eV InGaAs热光伏电池在AM1.5G标准光谱下光电转换效率分别达到了12.38%和8.41%. 我们用普朗克公式来标定窗口处辐射功率, 并对黑体辐射光谱进行积分, 获得TPV电池输入功率, 进而计算出TPV电池效率. 在

图9 (网络版彩图) (a) InGaAs TPV电池阵列实物图; (b) InGaAs TPV设备原理样机系统核心部分实物图; (c) InGaAs TPV电池输出功率与辐射温度关系曲线

Figure 9 (Color online) (a) Demonstrating of InGaAs TPV cells panel; (b) demonstrating of InGaAs TPV device principle prototype system core parts; (c) curves of InGaAs TPV cells output power and radiation temperature.

1323 K黑体辐射温度下, 晶格匹配TPV电池和晶格失配TPV电池的转换效率分别为25.4%和26.9%. 系统综合方面, 我们搭建的TPV原理样机系统, 用4片6×9热光伏电池阵列实现了1470 K辐射温度下5 W的稳定输出功率.

我们通过解决InGaAs热光伏电池材料生长及器

件加工和测试等关键技术问题, 完成了热光伏系统原理样机的研制, 实现了稳定的热辐射能到电能的转换.

致谢 感谢中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所测试分析平台和纳米加工平台的支持和帮助.

参考文献

- Ghanekar A, Lin L, Zheng Y. Novel and efficient mie-metamaterial thermal emitter for thermophotovoltaic systems. *Opt Express*, 2016, 24: A868
- Garín M, Hernández D, Trifonov T, et al. Three-dimensional metallo-dielectric selective thermal emitters with high-temperature stability for thermophotovoltaic applications. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2015, 134: 22–28
- Inoue T, Watanabe K, Asano T, et al. Near-field thermophotovoltaic energy conversion using an intermediate transparent substrate. *Opt Express*, 2018, 26: A192
- Khvostikov V P, Khvostikova O A, Gazaryan P Y, et al. Photovoltaic cells based on GaSb and Ge for solar and thermophotovoltaic applications. *J Sol Energy Eng*, 2007, 129: 291–297
- Lim M, Jin S, Lee S S, et al. Graphene-assisted Si-InSb thermophotovoltaic system for low temperature applications. *Opt Express*, 2015, 23: A240
- Wang C A, Choi H K, Turner G W, et al. Lattice-matched epitaxial GaInAsSb/GaSb thermophotovoltaic devices. *AIP Conf Proc*, 1997, 401: 75–87
- Fatemi N S, Wilt D M, Hoffman R W, et al. High-performance, lattice-mismatched InGaAs/InP monolithic interconnected modules (MIMs). *AIP Conf Proc*, 1999, 460: 121–131
- Hudait M K, Lin Y, Wilt D M, et al. High-quality InAs_yP_{1-y} step-graded buffer by molecular-beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 3212–3214
- Hudait M K, Lin Y, Ringel S A. Strain relaxation properties of InAs_yP_{1-y} metamorphic materials grown on InP substrates. *J Appl Phys*, 2009, 105: 061643
- Murray C S, Fatemi N S, Stan M A, et al. Growth processing and characterization of 0.55 eV n/p/n monolithic interconnected modules. In: *Proceedings of Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Anchorage: IEEE, 2000. 1238–1241
- Wilt D M, Fatemi N S, Jenkins P P, et al. Electrical and optical performance characteristics of 0.74 eV p/n InGaAs monolithic interconnected modules. *AIP Conf Proc*, 1997, 401: 237–247
- Dimroth F, Grave M, Beutel P, et al. Wafer bonded four-junction GaInP/GaAs//GaInAsP/GaInAs concentrator solar cells with 44.7% efficiency. *Prog Photovolt-Res Appl*, 2014, 22: 277–282
- Dai P, Ji L, Tan M, et al. Electron irradiation study of room-temperature wafer-bonded four-junction solar cell grown by MBE. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2017, 171: 118–122
- Datas A, Martí A. Thermophotovoltaic energy in space applications: Review and future potential. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2017, 161: 285–296
- Emziane M, Nicholas R J. Optimization of InGaAs(P) photovoltaic cells lattice matched to InP. *J Appl Phys*, 2007, 101: 054503
- Ji L, Lu S L, Jiang D S, et al. 0.6-eV bandgap In_{0.69}Ga_{0.31}As thermophotovoltaic devices with compositionally undulating step-graded InAs_yP_{1-y} buffers. *Chin Phys B*, 2013, 22: 026802
- Dashiell M W, Ehsani H, Sander P C, et al. Triple-axis X-ray reciprocal space mapping of In_yGa_{1-y}As thermophotovoltaic diodes grown on (100) InP substrates. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2008, 92: 1003–1010
- Martinelli R U, Zamerowski T J, Longeway P A. InGaAs/InAsP lasers with output wavelengths of 1.58–2.45 μm. *Appl Phys Lett*, 1989, 54: 277–279
- Wanlass M W, Ward J S, Emery K A, et al. Ga_xIn_{1-x}As thermophotovoltaic converters. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 1996, 41–42: 405–417
- Kirch J, Garrod T, Kim S, et al. InAs_yP_{1-y} metamorphic buffer layers on InP substrates for mid-IR diode lasers. *J Cryst Growth*, 2010, 312: 1165–1169
- Jandl A, Bulsara M T, Fitzgerald E A. Materials properties and dislocation dynamics in InAsP compositionally graded buffers on InP substrates. *J*

- [Appl Phys](#), 2014, 115: 153503
- 22 France R M, Geisz J F, Garcia I, et al. Design flexibility of ultrahigh efficiency four-junction inverted metamorphic solar cells. [IEEE J Photovoltaics](#), 2016, 6: 578–583
- 23 Ji L, Lu S L, Zhao Y M, et al. Compositionally undulating step-graded $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ buffer layer growth by metal-organic chemical vapor deposition. [J Cryst Growth](#), 2013, 363: 44–48
- 24 Tersoff J. Dislocations and strain relief in compositionally graded layers. [Appl Phys Lett](#), 1993, 62: 693–695
- 25 Ahrenkiel S P, Wanlass M W, Carapella J J, et al. Optimization of buffer layers for lattice-mismatched epitaxy of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ double-heterostructures on InP. [Sol Energy Mater Sol Cells](#), 2007, 91: 908–918
- 26 Matthews J W, Blakeslee A E. Defects in epitaxial multilayers: I. Misfit dislocations. [J Cryst Growth](#), 1974, 27: 118–125
- 27 Matthews J W, Blakeslee A E. Defects in epitaxial multilayers: II. Dislocation pile-ups, threading dislocations, slip lines and cracks. [J Cryst Growth](#), 1975, 29: 273–280
- 28 Tan M, Lu S, Ji L, et al. Optimization of $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ thermophotovoltaic device grown on compositionally nonmonotonically graded InAsP buffer by metal-organic chemical vapor deposition. [Jpn J Appl Phys](#), 2013, 52: 116504
- 29 Tan M, Ji L, Wu Y, et al. Investigation of InGaAs thermophotovoltaic cells under blackbody radiation. [Appl Phys Express](#), 2014, 7: 096601
- 30 Lau J Z J, Wong B T. Thermal energy conversion using near-field thermophotovoltaic device composed of a thin-film tungsten radiator and a thin-film silicon cell. [J Appl Phys](#), 2017, 122: 084302
- 31 Emery K. Characterizing thermophotovoltaic cells. [Semicond Sci Technol](#), 2003, 18: S228–S231
- 32 Fraas L M, Avery J E, Huang H X, et al. Thermophotovoltaic system configurations and spectral control. [Semicond Sci Technol](#), 2003, 18: S165–S173
- 33 Tuley R S, Nicholas R J. Band gap dependent thermophotovoltaic device performance using the InGaAs and InGaAsP material system. [J Appl Phys](#), 2010, 108: 084516
- 34 Su N, Fay P, Sinharoy S, et al. Characterization and modeling of InGaAs/InAsP thermophotovoltaic converters under high illumination intensities. [J Appl Phys](#), 2007, 101: 064511
- 35 Wanlass M W, Carapella J J, Duda A, et al. High-performance, 0.6-eV, $\text{Ga}_{0.32}\text{In}_{0.68}\text{As}/\text{InAs}_{0.32}\text{P}_{0.68}$ thermophotovoltaic converters and monolithically interconnected modules. [AIP Conf Proc](#), 1999, 460: 132–141

The study of device fabrication and system integration of InGaAs thermophotovoltaic cells

LONG JunHua^{1,2}, TAN Ming², JI Lian², XIAO Meng², WU YuanYuan², LU ShuLong^{1,2*},
DAI Pan², LI XueFei², JIN Shan^{1,2}, XING ZhiWei^{1,2}, LU Jiao² & YANG WenXian^{1,2}

¹ School of Nano Technology and Nano Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

² Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China

InGaAs cells have the advantages of low absorption bandgap, high efficiency and great stability, which are widely used in thermophotovoltaic (TPV) devices. In this paper, the material growth, device fabrication and system integration of 0.73 eV $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (lattice matched to InP substrate) and 0.6 eV $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ (lattice mismatched to InP substrate) thermophotovoltaic cells are studied, respectively. Based on the calculation of buffer layer thickness, the strain relaxation mechanism of the compositionally undulating step-graded InAsP buffer is analyzed. The buffer layer can release 84% of the mismatch strain at a single-layer thickness of 150 nm. The room temperature photoluminescence wavelengths of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ and $\text{In}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{As}$ are 1.69 μm and 2.05 μm , respectively. The conversion efficiencies of the 0.73 eV and 0.6 eV InGaAs TPV cells are 12.38% and 8.41%, respectively, at the AM1.5G standard spectrum. However, at 1323 K radiation temperature, the conversion efficiencies of the 0.6 eV InGaAs TPV cells outperform that of the 0.73 eV InGaAs TPV cells, which are 26.9% and 25.4% respectively after being calibrated with the blackbody radiation formula. A prototype system of thermophotovoltaic is set up by series-parallel connection of InGaAs TPV cells. It achieves output power about 5 W at a radiation temperature of 1470 K and completes a stable conversion of thermal radiation energy to electrical energy.

TPV cell, InGaAs, efficiency, system

PACS: 88.40.hj, 88.40.jm, 68.55.ag, 81.15.Gh

doi: [10.1360/SSPMA2018-00087](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00087)