

直接键合的三结太阳能电池研究*

彭红玲¹⁾ 张玮²⁾ 孙利杰²⁾ 马绍栋¹⁾ 石岩¹⁾ 渠红伟¹⁾
张冶金¹⁾ 郑婉华^{1)†}

1(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

2(中国航天科技集团公司上海空间电源研究所, 上海 200245)

(2013年12月26日收到; 2014年5月1日收到修改稿)

本文研制了直接键合的三结 GaInP/GaAs/InGaAsP 太阳电池. 直接键合技术可以减少晶格不匹配的材料在外延生长过程中产生的线位错和面缺陷, 将缺陷限制在界面几十纳米的薄层而不向内扩散, 是未来实现高效多结电池的发展趋势之一. 此类电池国内鲜有报道. 本文键合三结电池的键合界面采用 p^+GaAs/n^+InP 结构, 得到电池开路电压 3.0 V, 在电池结构没有优化的情况下获得效率 24%, 表面未做减反膜. 开路电压表明三结电池实现了串联, 为单片集成的高效多结电池提供了新的途径. 对实验结果进行了分析并给出了改进措施.

关键词: 键合, 多结太阳电池, 晶格失配

PACS: 88.40.jp, 88.40.J-, 88.40.hj

DOI: 10.7498/aps.63.178801

1 引言

随着空间科学和技术的发展, 对空间电源提出了更高的要求. 相比于较早的应用于空间的 Si 电池, GaAs 电池具有更高的转换效率、抗辐照性更强、寿命长、可靠性好、能在较高温度 (100—150 °C) 环境中可靠地工作等优点, 因此被广泛应用在空间电源中. 提高效率是空间电池发展的重中之重, 为实现高效多结电池, 越来越多的研究者将目光转向晶片键合 (wafer-bonding) 和异变外延 (metamorphic) 技术^[1], 两者都是为了克服晶格失配材料外延生长带来的位错缺陷等问题, 而分别采用键合或 metamorphic 技术得到与太阳光谱匹配的多结太阳电池材料, 并且可通过 smartcut 或者 liftoff 技术将衬底进行反复使用, 提高效率、降低电池成本^[2]. 晶片的 metamorphic 生长对外延生长技术有较高的要求, 比较难获得缺陷较小的外延材料; 而键合技术比较简单易行, 将晶格失配的材料以表面原子键连接起来, 缺陷只存在于界面薄层而不会深

入到子电池内部, 可获得与太阳光谱匹配的多结电池而得到极高的电池效率, 电池的节数不受材料晶格失配的限制.

目前各国很多研究单位致力于键合太阳电池方面的研究, 例如 2007 年美国加州 Anox 公司和加州理工大学等将 InGaAs 太阳电池制作在 InP/Si 衬底上, 而 InP/Si 衬底是通过键合技术将 InP 薄层转移到 Si 衬底上制备得到^[3]; 他们将 GaInP/GaAs 双结电池外延生长在 Ge/Si 衬底上, 获得了 15% 的转换效率, 这就使得在 Si 衬底上生长超过 4 节的太阳能电池成为可能^[4]. 德国 Fraunhofer 研究所把键合技术和外延层转移技术应用在 GaAs 与 Si 缓冲衬底上 (GaAs 与 Si 之间为 SiO₂ 键合层), 之后外延生长高效多结太阳电池^[5]. 2009 年美国 Boeing-Spectrolab 研究人员获得了效率较高的 5 结键合电池^[6], 电池效率 (1 sun, AM0) 为 31.7 %, 开路电压 4.7 V, 短路电流密度 11.7 mA/cm², 电池面积 1 cm², 填充因子 (FF 因子) 0.79. 2011 年他们又获得了效率为 33.5% (1 sun, AM0) 的 4 结键合电池^[7]. 2012 年日本的 Katsuaki Tanabe 等报道了键

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: 09JA041001) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: whzheng@semi.ac.cn,

合的Si衬底上的(界面为GaAs与Si直接键合)Al-GaAs 电池^[8]. 2014年Spectrolab实验室获得了效率37.8% (1 sun, AM1.5G)的5结太阳电池, 其在(1 sun, AM0)条件下效率为35.1%^[9].

国内很多研究单位对多结电池进行了研究^[10-13], 但基于键合的多结电池很少有报道, 2013年Zhang等人报道了研制的倒装三结电池, 将倒装GaInP/GaAs/In_{0.3}Ga_{0.7}As (1.0 eV)三结太阳电池材料键合在Si衬底上^[14], 其开路电压达到2.97 V, 电池转换效率达到32.64%, 不过这里的键合不是子电池之间的键合, Si衬底并非子电池而起支撑作用. 2013年Sun等人报道了键合的四结电池^[15], 开路电压达到了3.2 V, 没有效率的报道. 本文介绍我们研制的键合三结太阳电池, 在GaAs和InP衬底上分别外延生长GaInP/GaAs双结和InGaAsP单结子电池, 通过键合技术将GaInP/GaAs顶电池薄膜转移到InGaAsP底电池上, 键合界面之间的载流子输运将影响电池特性, 最后获得开路电压3 V, 效率24%的三结电池, 如果优化结构参数和制作工艺(如做上减反射膜), 效率还会有一定的提高. 本文证实了键合是实现晶格失配电池材料的有效途径, 优化子电池结构参数, 我们将可以获得效率更高的多结电池, 并且结合本组在键合上的经验(本课题组成功研制过多种类型的

键合光电器件, 如1310 nm VCSEL, 860—1700 nm InGaAs/Si APD, SOI上的1550 nm激光器), 在不久的将来获得Si上的四结、五结高效电池.

2 键合太阳电池工作原理及实验

为了获得高效太阳电池, 各子电池材料光学带隙需要尽量与太阳光谱相匹配. 本组对与太阳光谱匹配的子电池材料做过模拟分析^[12], 最佳带隙组合可选为2.1/1.43/0.9 eV, 相应各子电池材料可选为GaInP/GaAs/GaInAs, 这样电池对不同波段的太阳光谱充分吸收, 最大效率极限值可达52%. 但是不同光学带隙半导体材料的晶格常数相差比较大, GaInP/GaAs与InGaAs晶格常数失配3.8%左右, 在串联集成时, 界面容易引入大量的缺陷导致器件少子寿命的缩短、开路电压和短路电流下降. 采用外延生长方法获得晶格失配的多结电池, 容易导致失配材料界面出现大量位错和面缺陷, 从而严重影响电池材料质量. 用机械的方法将不同晶格常数的子电池叠在一起, 也可以实现电池串联, 但电学互连复杂, 难以真正大规模的生产和应用. 晶片键合是将两块同质或异质的晶片用物理或化学的方法使之表面原子成键结合, 位错仅局域于界

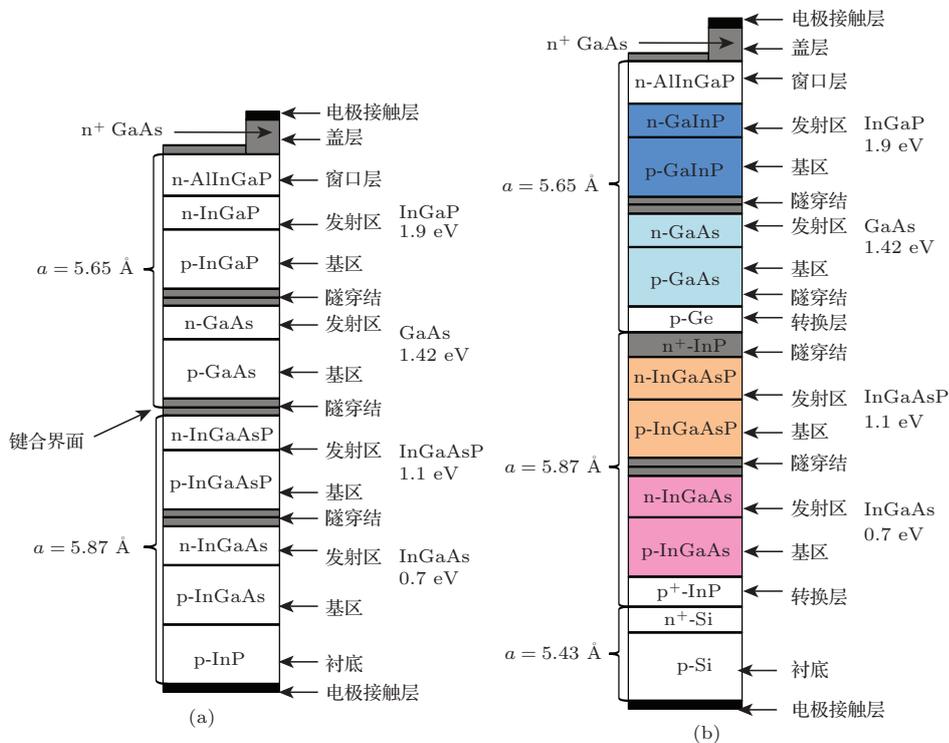


图1 (网刊彩色) (a) InGaP/GaAs/InGaAsP/InGaAs四结电池结构原理图^[16]; (b) 未来多结太阳电池的趋势-键合基础上的薄膜转移技术应用于4结以上电池^[1]

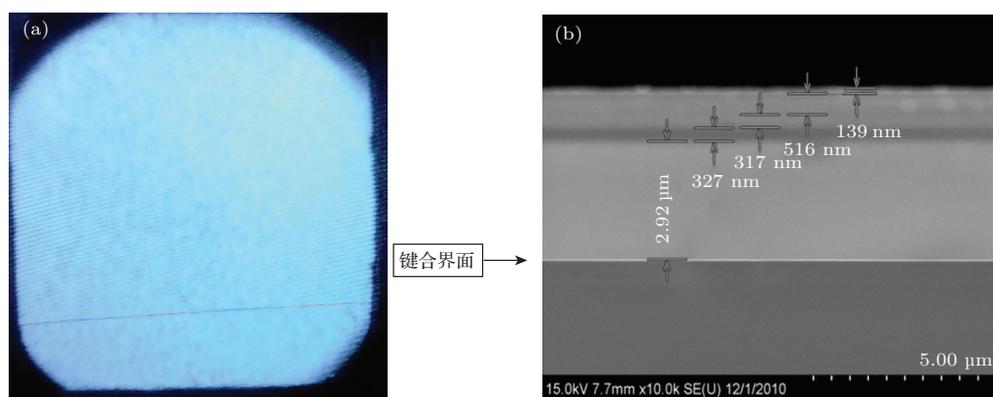


图2 (网刊彩色) GaInP/GaAs/InGaAsP 三结键合电池 (a) 红外透视图; (b) 键合界面 SEM 图

面, 通过优化键合工艺参数直接把晶格失配的子电池串联集成制作高效太阳电池, 可以尽量减少晶格失配缺陷和不同热膨胀系数材料引起的热应力对太阳电池器件性能的影响.

目前采用晶片键合技术将不同晶格常数的子电池材料串联起来的方法越来越受到重视. 如图 1(a) 所示, 优选四结电池的带隙, 使之覆盖整个太阳光谱, 可获得高效四结电池. 图 1(b) 为键合在未来多结太阳电池中进一步的应用, GaInP/GaAs 生长在 GaAs(或 Ge) 衬底上, InGaAsP/InGaAs 生长在 InP 衬底上, 通过两次键合, 将四结电池最终键合在 Si 衬底上, InP 和 GaAs 衬底又可反复利用, 可降低成本, 还可与 Si 基电子器件集成.

本文研制的电池结构为 GaInP (1.8 eV)/GaAs (1.4 eV) 双结子电池键合在 InGaAsP (1.0 eV) 子电池上. 制备电池的工艺过程如下: 先分别生长 GaAs 衬底上的 GaInP/GaAs 电池和 InP 衬底上的 InGaAsP 电池, 清洗晶片表面并贴合, 在真空键合机内施压, 经过一定时间的高温退火之后, 两子电池表面形成原子键结合力, 取出键合晶片, 腐蚀去掉 GaAs 衬底, 则 GaInP/GaAs 子电池转移到了

InGaAsP 子电池上. 然后按照正常的电池工艺, 对晶片制作栅极、背电极等, 最后进行测试. 图 2(a) 为键合晶片的红外透视图, 光亮无黑点、无牛顿环, 可见晶片界面无空洞; 图 2(b) 为键合晶片的 SEM 图, 显示界面清晰完整, 表明键合界面质量良好; 图中有厚度数值标记的为 GaInP/GaAs 两结电池薄膜的厚度, 与设计厚度大致吻合.

3 结果与讨论

3.1 实验和测试

电池的 I - V 特性是采用中科院半导体研究所集成中心的 Newport-Oriel A 级 (94041A) 太阳模拟器测试系统获得, 结果如下图 3(a) 所示. 各结子电池量子效率采用俄罗斯 Ioffe 技术物理实验室生产的 SM-Installation No.7 太阳能电池量子效率光谱仪测试, 测试结果如图 3(b). 表 1 为各结子电池的光电流密度, 由表可知各结电流并没有达到最佳匹配, 可通过优化各结电池结构参数(各层材料的厚度和掺杂浓度等), 达到最佳电流匹配, 以提高电池转换效率和填充因子.

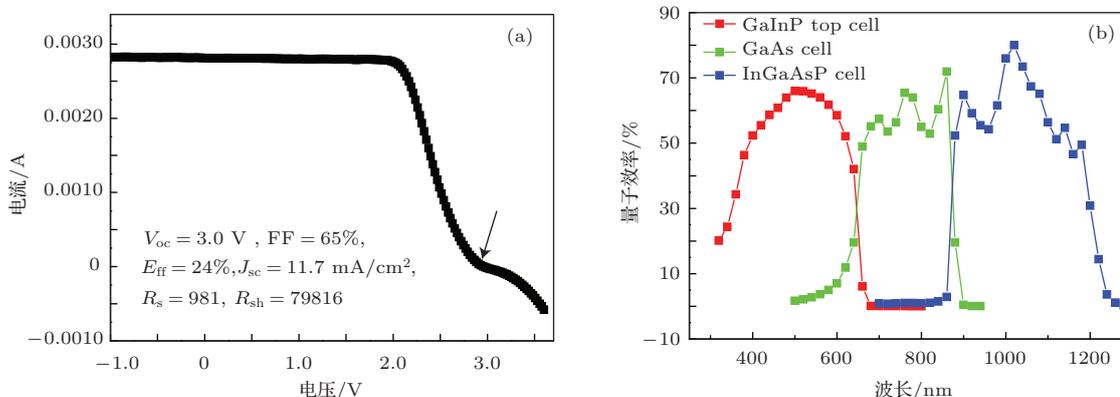


图3 (网刊彩色) GaInP/GaAs/InGaAsP 键合三结电池 (a) I - V 曲线; (b) 子电池量子效率

表1 光电流密度 (mA/cm²)

	顶电池 (320—740 nm)	中间电池 (500—940 nm)	底电池 (700—1300 nm)
AM0/(1366.1 W/m ²)	17.42	14.59	38.64
AM1.5G/(1000 W/m ²)	13.71	13.12	28.66
AM1.5D LOAD/(1000 W/m ²)	13.15	13.31	30.45

3.2 结果讨论分析

从图3可以看出,制备的三结电池开路电压为3.0 V,证实了三结子电池实现了串联.效率24%,填充因子(FF因子)为0.65,下文中我们将就测试结果进行研究分析.

1) 键合界面对电池性能的影响分析:

对于键合的太阳电池,键合界面质量直接影响电池的电连接和光吸收.如果键合界面缺陷过多,不仅会形成很多的复合中心,影响FF因子,而且会增大电阻,减小电流.如果界面存在气泡,那么界面电阻增加、光通过界面时会有一定损失,对后续的工艺、器件的稳定性造成极大影响.本文键合的太阳电池器件没有气泡,键合成功率较高,保证了工艺的稳定性.从图2键合红外透视图和界面的SEM图可知,键合界面清晰,红外透视图没有黑影、牛顿环,表明界面没有未键合上的区域,无空洞,键合界面质量良好.对键合晶片进行衬底减薄、腐蚀去衬底、有机溶剂高温清洗晶片表面、电极制备等工艺,没有出现晶片裂开现象,表明键合的机械强度达到要求.对键合晶片进行拉力测试,晶片被轴向力拉开,裂开的表面不仅包含界面,也包含体材料,说明部分区域是从体材料处裂开,键合的强度与体材料相当,机械强度达到要求.测试结果表明,1 cm²面积的GaAs/InP键合强度超过1 MPa.

Tanabe等分析过键合的GaAs/InGaAs双结电池界面的电特性,键合过程中退火温度越高,界面电导率越高^[17].前期我们对双结键合电池进行了研究,确定的优化退火温度为350—400°C,键合界面的隧穿结将电池串接起来,实现欧姆接触.但是对于三结的键合电池,由于设计和实际生长有一定的误差,实际的键合电池界面没有实现隧穿,分析如下图4.在GaInP/GaAs双结电池与InGaAsP电池的键合界面采用的接触层为p⁺GaAs/n⁺InP,当这两层掺杂足够高时将成为隧穿结实现极性反转,其能带图如图4(a)所示,图中 E_c , E_v , E_{fn} , E_{fp}

分别为导带、价带、电子费米能级和空穴准费米能级.由图4(a)可见界面处GaAs载流子隧穿,界面电导率较高;但实际使用的子电池材料在生长时,隧穿结厚度达到0.5 μm (p⁺⁺GaAs层),掺杂浓度也低于设计浓度,如图4(b)所示,界面没有实现隧穿,使得界面的电导率降低,总串联电阻增大,导致电池的FF因子不高.

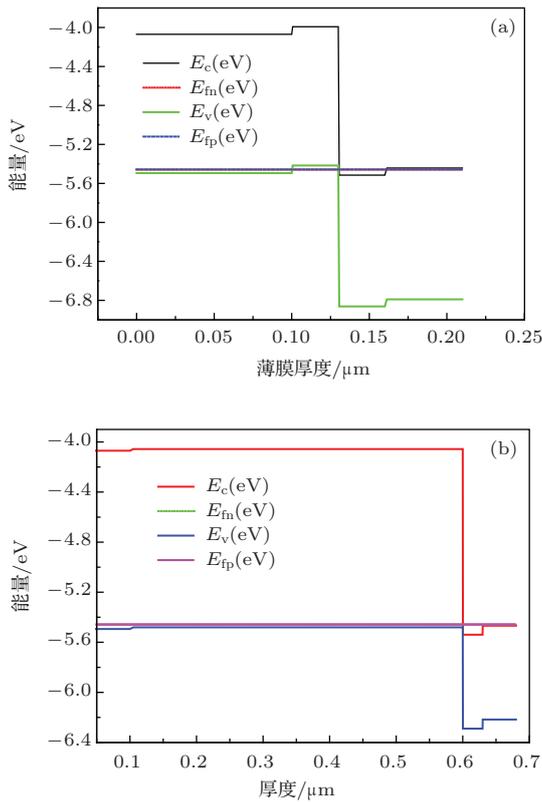
2) 三结电池 I-V 特性出现弯折分析:

如图3(a)中的箭头所示,在I-V曲线中有一弯折,分析这可能归结于两方面的原因:一是键合界面没有形成欧姆接触,因为接触层掺杂没有达到 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (p⁺⁺GaAs层),且其实际生长厚度达到0.5 μm,大于形成隧穿结所需厚度要求.二是背面电极金属与p型InP衬底之间没有实现欧姆接触,导致在金属与半导体之间形成一个肖特基势垒,阻碍了载流子的输运,载流子需要越过半导体-金属势垒才能被收集,电池总的串联电阻增大,导致最后I-V曲线出现弯折现象.

对p-InP衬底的电极欧姆实验也证实:如果p-InP衬底掺杂不高,则很难和电极形成欧姆接触,如图5(a)所示,p-InP衬底双面都溅射TiAu,在不同温度下快速退火,从所测得的I-V曲线可见p-InP衬底与金属之间并没有实现欧姆接触.由于商用的p-InP衬底掺杂一般在 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,与一般的电极金属很难形成欧姆接触,需要采用特殊的Au/Zn/Au或者其他技术获得欧姆接触.而正是由于p-InP衬底掺杂不高,我们做过的InGaAsP子电池性能也出现如图5(b)所示的弯折,分析认为其p型InP衬底和金属电极(TiAu)之间没有形成欧姆接触是导致此弯折的原因.

这些实验结果表明,以上所述的两方面原因与电池I-V曲线出现弯折有很大关系.可以采用更高掺杂的p-InP衬底,或者提高键合界面接触层材料的掺杂浓度,从而改善电池I-V曲线,增大FF因子,减小电阻损耗,提高效率.

3) 串并联电阻对开路电压(V_{oc})和FF因子的影响:



材料	厚度	掺杂
p-GaAs	100 nm	3×10^{18}
p ⁺⁺ -GaAs	30 nm	6×10^{19}
n ⁺⁺ -InP	30 nm	5×10^{18}
n-InP	50 nm	3×10^{17}

材料	厚度	掺杂
p-GaAs	100 nm	3×10^{18}
p ⁺⁺ -GaAs	30 nm	$\sim 8 \times 10^{18}$
n ⁺⁺ -InP	30 nm	5×10^{18}
n-InP	50 nm	3×10^{17}

图4 (网刊色彩) (a) 设计的 GaInP/GaAs/InGaAsP 电池键合界面的结构参数及其对应的能带图; (b) 实际生长的电池键合界面的几层结构参数及其对应的能带图

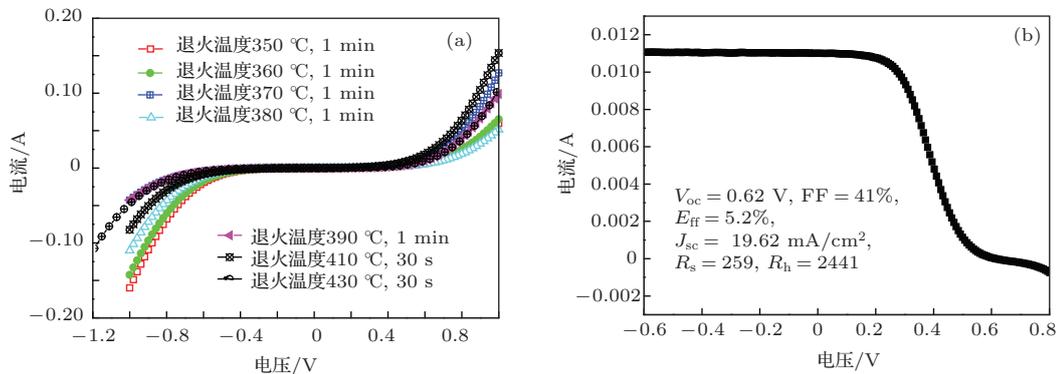


图5 (网刊色彩) (a) p-InP 电极 I-V 特性测试结果; (b) InGaAsP 单结子电池的 I-V 曲线

键合太阳电池的串联电阻 R_S 由金属栅线的体电阻、金属与半导体的接触电阻、外延层的薄层电阻、键合界面的电阻、衬底的体电阻、衬底与背面电极的接触电阻及背面电极的体电阻等组成。旁路电阻 R_{sh} 是由于 p-n 结漏电流引起的, 其中包括绕过电池边缘的漏电及由于结区存在晶体缺陷和外来杂质的沉淀物所引起的内部漏电。

弱光下太阳电池开路电压与并联电阻、光生电流和饱和暗电流有关, 要提高开路电压应尽量提高光生电流和并联电阻 R_{sh} , 降低饱和暗电流, 而其中最重要的是要提高太阳电池的并联电阻, 如下式

所示, V_{OC} 随着 R_{sh} 增加而增加。

$$V_{oc} = R_{sh} \{ I_{ph} - I_0 [\exp(qV_{oc}/A_0kT) - 1] \}. \quad (1)$$

根据测试结果开路电压 3.0 V, 与三结串联电池开路电压基本符合, 表明本实验中键合电池的并联电阻达到设计要求, 工艺过程完成比较好, 没有太大的增加漏电流, 测试得到的 $R_{sh} = 79816 \Omega$ 。

影响 FF 的因素主要有 p-n 结的正向特性 (电池结构、电阻率、少子寿命等)、电极接触、串联电阻、并联电阻等. FF 因子表达式如下:

$$FF = FF_0(1 - r_s) \left\{ 1 - \frac{v_{oc} + 0.7 FF_0}{v_{oc}} \frac{1}{r_{sh}} \right\}, \quad (2)$$

$$R_{ch} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}; r_s = \frac{R_s}{R_{ch}};$$

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{nkT/q}; r_{sh} = \frac{R_{sh}}{R_{ch}}, \quad (3)$$

$$FF_0 = \frac{V_{oc} - (kT/q) \ln(qV_{oc}/kT + 0.72)}{V_{oc} + kT/q}. \quad (4)$$

(2) 式右式第二项是串联电阻的影响, 第三项是旁路电阻的影响, FF_0 是理想情况下的 FF 式. (3) 式是为了简化 (2) 式表达式而定义的一些中间变量, R_{ch} 为开路电压与短路电流比值, r_s 和 r_{sh} 分别为串联电阻和并联电阻相对于 R_{ch} 的归一化值, v_{oc} 是开路电压 V_{oc} 的归一化值. 由 (2) 式知, 要获得较高的填充因子 FF, 串联电阻 R_s 必需较低, 而并联电阻 R_{sh} 必须较高. 本实验中 FF 因子只有 0.65 这和电路的串联电阻较大有很大关系, 测试得到的串联电阻 $R_s = 981 \Omega$. 根据图 5 (a) 对电池下电极的实验结果可知, 衬底与背面电极之间没有形成欧姆接触, 电阻率较大, 对电池的 FF 因子和效率有影响.

4) 电池表面未做减反射膜, 反射损失导致短路电流减小, 光电转换效率降低. 如果在太阳电池表面覆盖各种减反射膜, 或做一些陷光结构, 减小光反射, 那么短路光电流将得到提高, 最终效率也将有提高.

4 结 论

通过键合技术将晶格失配的 GaInP/GaAs 子电池和 InGaAsP 子电池串接, 实现了开路电压 3.0 V, 效率 24% 的三结电池. 优化的清洗和键合条件保证了良好的键合界面质量, 实现了三结电池的串联, 证明了键合是实现晶格失配的高效多结电池的有效途径.

对实验结果的分析可知, 进一步优化三结电池的结构参数, 使其达到良好电流匹配, 有望较大提高效率. 提高键合质量, 减小键合界面对电池特性的影响, 表面生长减反射膜, 都能提高电池性能. 串并联电阻对电池性能影响很大, 为减小串联电阻, 需要采取措施解决 p 型 InP 材料的欧姆接触问题, 如提高 p-InP 衬底的掺杂浓度; 或者更改 p-InP 的电极材料; 电极加厚到几微米; 更改键合电池的结构, 采用 n-InP 衬底和 p-GaAs 衬底分别生长各结子电池等等. 良好的电池工艺过程可减少电池漏电, 提高并联电阻. 本实验的栅极图形有较大的优化空间, 优化栅极后可减小遮光面积, 提高效

率. 下一步工作就是优化各子电池结构参数以获得最佳的电流匹配, 优化电池器件制备工艺减少漏电流, 制备减反射膜, 使电极和半导体之间实现欧姆接触, 优化键合工艺, 获得更高效率的键合多结电池.

感谢上海空间电源研究所张玮博士和孙利杰博士提供太阳电池样品及进行的有益讨论.

参考文献

- [1] Law D C, King R R, Yoon H, Archer M J, Boca A, Fetzer C M, Mesropian S, Isshiki T, Haddad M, Edmondson K M, Bhusari D, Yena J, Sherif R A, Atwater H A, Karam N H 2010 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **94** 1314
- [2] Tatavarti R, Wibowo A, Martin G, Tuminello F, Youtsey C, Hillier G, Pan N, Wanlass M W, Romero M 2010 *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 35th IEEE Honolulu Hawaii, USA, June 20–25, 2010*, p002125
- [3] Zahler J M, Tanabe K, Ladous C, Pinnington T, Newman F D, Atwater H A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 012108
- [4] Archer M J, Law D C, Mesropian S, Haddad M, Fetzer C M, Ackerman A C, Ladous C, King R R, Atwater H A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 103503
- [5] Schone J, Dimroth F, Bett A W, Tauzin A, Jaussaud C, Roussin J C 2006 *Photovoltaic Energy Conversion Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference IEEE Waikoloa, USA, May 7–12, 2006* p776
- [6] Law D C, Bhusari D M, Mesropian S, Boisvert J C, Hong W D, Boca A, Larrabee D C, Fetzer C M, King R R, Karam N H 2009 *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 34th IEEE Philadelphia, Pennsylvania USA, June 7–12, 2009* p002237
- [7] Bhusari D, Law D, Woo R, Boisvert J, Mesropian S, Larrabee D, Hong W, Karam N 2011 *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 37th IEEE Seattle, Washington USA, June 19–24, 2011* p001937
- [8] Tanabe K, Watanabe K, Arakawa Y 2012 www.nature.com/scientificreports/srep00349 1
- [9] Chiu P T, Law D C, Woo R L, Singer S B, Bhusari D, Hong W D, Zakaria A, Boisvert J, Mesropian S, King R R, Karam N H 2014 *IEEE Journal of Photovoltaics* **4** 493
- [10] Chen M B, Cui R Q, Wang L X, Zhang Z W, Lu J F, Chi W Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3632 (in Chinese) [陈鸣波, 崔容强, 王亮兴, 张忠卫, 陆剑峰, 池卫英 2004 物理学报 **53** 3632]
- [11] Tu J L, Zhang W, Zhao H L, Li Y, Fu R, Zhao P K 2011 *Journal of Yunnan Normal University* **31** 9 (in Chinese) [涂洁磊, 张玮, 赵恒利, 李烨, 付蕊, 赵沛坤 2011 云南师范大学学报 **31** 9]
- [12] Ma Shao dong, Peng Hongling, Chen Wei, Jiang Bin, Zheng Wanhua 2011 *Materials for Renewable Energy* **9**

- Environment* (ICMREE) International Conference 2011 Shanghai, China, May 20-22, 2011 p234
- [13] Wang J Z, Ye J S, Huang Q L, Xu X, Li D M, Meng Q B, Yang G Zh 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044211
- [14] Zhang Y, Shan Z F, Cai J J, Wu H Q, Li J C, Chen K X, Lin Z W, Wang X W 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 158802 (in Chinese) [张永, 单智发, 蔡建九, 吴洪清, 李俊承, 陈凯轩, 林志伟, 王向武 2013 物理学报 **62** 158802]
- [15] Sun L J, Zhang M Y, Fang X, Chen K J, Zhang W, Chen M J, Lu J F 2013 *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* 39th IEEE Tampa, Florida, USA, June 16-21, 2013 p2832
- [16] Tanabe K, Aiken D J, Wanlass M W, Morral A F, Atwater H A 2006 *Photovoltaic Energy Conversion Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference: IEEE Waikoloa*, USA, May 7-12, 2006 p768
- [17] Tanabe K, Morral A F, Atwater H A, Aiken D J, Wanlass M W 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 102106

Research on three-junction bonding solar cell*

Peng Hong-Ling¹⁾ Zhang Wei²⁾ Sun Li-Jie²⁾ Ma Shao-Dong¹⁾ Shi Yan¹⁾
 Qu Hong-Wei¹⁾ Zhang Ye-Jin¹⁾ Zheng Wan-Hua^{1)†}

1) (State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

2) (Shanghai Institute of Space Power Sources, CASC, Shanghai, 200245, China)

(Received 26 December 2013; revised manuscript received 1 May 2014)

Abstract

The multi-junction bonding GaInP/GaAs/InGaAsP solar cell was developed. Bonding technology can reduce dislocations and defects produced in the epitaxial growth process of the lattice mismatch materials, and the defects are restricted within dozens of nanometer layers at the interface without spreading into the inner layers. Bonding solar cell is one of the efficient developing trends in the future. The solar cell interface uses $p^+ \text{GaAs}/n^+ \text{InP}$ tunneling junction, and the open circuit voltage is greater than 3.0V. The efficiency is 24% when the structural parameter is not optimized and the anti-reflective film is not prepared. Open circuit voltage shows that the two solar sub cells are connected in series. Results are analyzed and the improvement measures are given. This bonding technology provides a new way for monolithic integration high efficient multi-junction cells.

Keywords: bonding, multi-junction solar cell, lattice mismatch

PACS: 88.40.jp, 88.40.J-, 88.40.hj

DOI: 10.7498/aps.63.178801

* Project supported the by Important Direction Item of the Knowledge innovation Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 09JA041001).

† Corresponding author. E-mail: whzheng@semi.ac.cn,