

深空同位素热光伏系统中锑化镓电池的研制及性能测试

汤亮亮^{1,2}, 李嘉鹏^{1,2}, 刘永辉^{1,2}, 邵剑雄^{1,2}, 田 岱³,
韩承志³, 朱安文³, 邱家稳³

(1. 兰州大学 教育部稀有同位素前沿科学中心, 兰州 730000; 2. 兰州大学 核科学与技术学院, 兰州 730000;
3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100190)

摘要: 针对深空同位素热光伏系统效率提升问题及对国产化红外热光伏换能器件的迫切需求, 对GaSb电池制造工艺开展研究, 通过PC1D仿真计算, 确定电池制备的基本参数, 采用两步扩散法进行电池的制备。搭建了自制电池快速测试系统, 对电池性能进行评估并不断优化相关制备工艺, 探究了GaSb电池在不同辐射温度下性能的变化。掌握了Zn在GaSb中的扩散规律, 研制的GaSb红外电池在同等辐射光谱下输出功率和填充因子均达到较高的水平。该工作可为实现深空热光伏同位素电源系统的效率提升以及工程化应用奠定研究基础。

关键词: 深空同位素热光伏系统; 锑化镓电池模拟; 电池制备; 输出性能

中图分类号: TM918; O457

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)05-0469-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230167

引用格式: 汤亮亮, 李嘉鹏, 刘永辉, 等. 深空同位素热光伏系统中锑化镓电池的研制及性能测试[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(5): 469-477.

Reference format: TANG L L, LI J P, LIU Y H, et al. Fabrication and performance testing of gasb cells in deep space radioisotope thermophotovoltaic systems[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(5): 469-477.

引言

在中国完成探月工程、火星探测之后, 深空探测任务的目标必将向更远的探测目标延伸。未来5~10年内, 中国将陆续启动木星、小行星、行星际穿越探测等更远目标的深空探测项目。在以往的月球探测、火星探测中, 航天器的主能量源为太阳能电源。随着航天器空间位置逐渐远离太阳, 单位面积的阳光强度呈平方衰减, 太阳能供电的能力将急剧下降^[1]。例如, 木星距离太阳平均距离约为5 AU, 太阳平均光照强度不超过46 W/m²^[2], 是地球轨道太阳常数的3.4%。根据美国2011年发射的“朱诺号”(Juno)木星探测器数据, 其太阳能电池板总面积约60 m², 电功率输出420 W(任务末期), 总重达到340 kg, 约占探测器重量的21%^[2]。而对于更远星体的探测, 太阳能电池板的面积还需扩大。显然, 对于太阳系边界探测任务, 太阳能供电将会消耗不可接受的重量资源, 因此有必要考虑空间同位素电源的使用。

已实现工程应用的空间同位素电源是一种通过热电转换技术将核热能(主要为同位素衰变产生的热能)转换为电能供航天器使用的装置, 在国外已经发

射的7次木星以远的深空探测任务中, 全部采用空间同位素电源; 1977年出发的“旅行者1/2号”(Voyager 1/2)探测器, 同位素电源已经工作了近45年^[3]。因此, 同位素电源具有电功率输出稳定、工作周期长等特征; 同时, 电源系统排出的废热, 可用于对航天器其它部件进行保温, 是开展深空探测任务的理想能量源^[4-5]。

目前, 国际上公认的适用于空间同位素电源系统的热电转换技术主要包括^[6]: 温差技术、斯特林技术、热光电技术等。其中, 温差技术已有空间应用经验, 但是其效率只有6.8%^[3](国际上空间应用最高水平), 消耗稀缺放射性同位素原料过多, 难以完美匹配未来任务百瓦级功率需求; 斯特林技术虽然效率可达20%以上^[7](原理样机水平), 但其动态机械系统的免维护长期工作对环境、机械及材料要求极高, 且运动部件带来的可靠性问题导致斯特林系统在长寿命实现方面不可避免地面临更多挑战; 热光伏技术转换效率可达20%^[8](原理样机水平), 该指标可与斯特林发电效率相媲美, 且系统不包括活动部件, 具备静态转换技术的长寿命特征^[9]。其转换效率高、静态工作稳定性好等特点, 可有效降低战略级资源²³⁸Pu的用量, 大幅缓解放射性同位素原料生产压力并显著降低飞行任

收稿日期: 2023-11-11 修回日期: 2024-01-19

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U20B2008); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2023-stlt01)

务成本。因此,热光伏转换技术是同位素电源未来发展的重要方向,具有重要的战略价值、研究意义以及广阔的应用前景。

热光伏(ThermoPhotoVoltaic, TPV)转换是一种利用半导体P-N结直接将高温热辐射体的能量转化为电能的技术,其工作原理类似于太阳能电池,但使用的光源不同。在热光伏效应中,半导体P-N结利用近红外光照射产生光生伏特效应,从而实现能量转化的过程。与太阳光及可见光(400~800 nm)为光源的太阳能电池相比,基于热光伏效应的电池的光源通常为红外辐射或燃烧时发出的近红外光谱,其波长(800~2 000 nm)相比于可见光更长。因此,应用于热光伏效应的半导体材料禁带通常更窄,如铟化镓(GaSb, 0.72 eV)或铟镓砷/铟磷(InGaAs/InP, 0.55 eV)等。此外,考虑到半导体对温度的敏感性较高,热光伏中半导体通常在热辐射环境下工作的特点,因此需要采取相应措施以保证半导体的温度处在一个较低且稳定的区间。

基于热光伏电池的特性,相较太阳能电池最主要的优势是其工作时不依赖太阳光,这意味着热光伏电池能够持续提供稳定的电能,而不受昼夜、季节或天气影响。此外,热光伏电池不仅拥有与热机发电类似的高效率,还具有如携带轻便、静音、无机械结构、构造简单以及不易发生故障等优点。同时,热光伏电池在单位体积或单位重量下的发电功率比也较高。这些特性也使得热光伏电池在军事、深空探测等领域拥有很好的应用前景。

最初, GaSb电池的发展旨在提高机械堆栈太阳能电池(GaAs/GaSb)的能量转化效率。随着应用领域的扩展, GaSb电池在TPV系统中得到了越来越广泛的应用。目前国际上在TPV系统和GaSb电池领域的研究主要由德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所(Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE)^[10-15]、美国波音公司(Boeing Company)^[16]以及俄罗斯约飞技术物理研究所(Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences)^[17]等机构开展;在国内,中国科学院上海微系统与信息技术研究所^[18]、大连理工大学^[19]等也进行了前期的相关研究。

美国JX Crystals公司的GaSb电池生产技术最成熟,他们采用双步扩散工艺制备,即栅线部分深扩散,可与GaSb晶片形成良好的欧姆接触,减小接触电阻;电池表面受光区域进行的是浅扩散,增加光生少子的寿命,提高电池的光谱响应度^[20]。德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所通过二次Zn扩散来精准控制扩散曲线,证实了发射极中锌分子的形态对光伏电池的输

出功率有重要影响^[21]。此外,如德国弗劳恩霍夫研究所、俄罗斯约飞物理技术研究所和西班牙的Instituto de Energia Solar等研究所采用有机金属化合物气相外延法(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE)或者有机金属化合物化学气相沉积法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)等外延方法制备了高效的GaSb红外电池。在制备过程中,首先需要在N-GaSb衬底上沉积N型GaSb缓冲层,然后沉积P型GaSb层形成PN结。但通过外延制备GaSb电池的方法成本较高,很难应用于大规模的生产和实际应用。

近几年,兰州大学与航天五院总体部合作,结合空间应用任务需求,研制了热光电空间同位素电源样机系统,采用GaSb光电转换器件,系统效率达到15%。在面向未来的工程化应用中,需要大量高效率GaSb电池及阵列。针对于深空同位素热光伏系统研究对国产化光电转换器件的迫切需求,本文通过模拟计算与工艺相结合,制备出一批GaSb电池,并自主搭建了电学测试平台,研究不同辐射温度下, GaSb电池的输出特性。

1 铟化镓电池的制备

1.1 铟化镓电池的参数

将II族元素Zn作为杂质向以V族元素Te为掺杂的N-GaSb衬底扩散,即可得到作为发射极的P-GaSb,形成P-N结。在各类热光伏电池的制造过程中,形成P-N结是至关重要的步骤。P-N结的存在使得电子和空穴能够有效地分离并产生电流。这种结构的形成能够在光照射下引起光生伏特效应,从而将光能转化为电能。P-N结的建立依赖于材料的掺杂和特定的处理过程,通过控制掺杂浓度和优化工艺条件,可以实现更好的电子-空穴分离效果,进而提高热光伏电池的效率。结合先前的实验,我们确定了一套较为理想的Zn参杂P-GaSb参数^[22],如表1所示。

为了获得优质的P-GaSb发射极材料,目前国际上普遍采用Zn气相扩散法。这种方法能够在GaSb材料表面扩散Zn原子,并形成高浓度的P型掺杂层。Zn气相扩散具有可控性和可重复性的优势,通过调节扩散时间和温度,可以实现对P-GaSb材料的掺杂浓度和分布的精确控制。此外, Zn气相扩散也相对简单且成本较低,可适用于大规模生产。因此,国际上普遍认可Zn气相扩散作为制备高质量P-GaSb发射极的可行方法。

在制备GaSb电池之前,可通过对其结构进行优化设计以对制备工艺做出理论指导。本节讨论了GaSb电池表面扩散浓度、深度、衬底掺杂浓度以及表面复合

速率对电池性能的影响, 通过模拟计算获得适合制备电池所需的最佳参数。表1所示为模拟的P型发射极的GaSb电池的基本参数。

表 1 理想的发射极P-GaSb参数
Table 1 Ideal emitter P-GaSb parameters

基本参数	数值
本征载流子复合速率 n_i (300 K)	$1.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
减反射层: Si_3N_4 层	$0.19 \mu\text{m}$
GaSb电池厚度	$500 \mu\text{m}$
N型基区掺杂: Te掺杂	$2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
P型GaSb禁带收缩系数 (300 K)	$\Delta E_{\text{gap}} = AN^{1/3}$ $A = 1 \times 10^{-8} \text{ eV} \cdot \text{cm}$
GaSb电子迁移率	$\mu_{\text{max}} = 6600 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ $\mu_{\text{min}} = 850 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$
$\mu = \mu_{\text{min}} + \frac{\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}}}{1 + ((N_D + N_A)/N_{\text{ref}})^\alpha}$	$N_{\text{ref}} = 8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $\alpha = 1.8$
GaSb空穴迁移率	$\mu_{\text{max}} = 1250 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ $\mu_{\text{min}} = 85 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$
$\mu = \mu_{\text{min}} + \frac{\mu_{\text{max}} - \mu_{\text{min}}}{1 + ((N_D + N_A)/N_{\text{ref}})^\alpha}$	$N_{\text{ref}} = 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ $\alpha = 4.4$
辐射复合 $R_{\text{Rad}} = \frac{B}{\varphi} (np - n_i^2)$	$B = 8.5 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ $\varphi = 10$
俄歇复合 $R_{\text{Aug}} = (C_n n + C_p p)(np - n_i^2)$	$C_p = C_n = 5 \times 10^{-30} \text{ cm}^6/\text{s}$
间接复合 $R_{\text{SRH}} = \frac{(np - n_i^2)}{\tau_n(p + n_i) + \tau_p(n + n_i)}$	$\tau_n = 10 \text{ ns}$ $\tau_p = 600 \text{ ns}$
表面复合 $R_{\text{Sur}} = \frac{S_n S_p (np - n_i^2)}{S_n(p + n_i) + S_p(n + n_i)}$	$S_n = S_p = 10^6 \text{ cm/s}$

1.1.1 表面扩散浓度对电池性能的影响

本节计算Zn表面扩散浓度对GaSb电池性能的影响, 采用 $0.3 \mu\text{m}$ 的扩散深度, 补余误差函数 (ERFC) 类型Zn扩散曲线来模拟计算, 图1展示了表面扩散浓度在 $1 \times 10^{18} \sim 8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 范围内, GaSb电池内量子效率 (IQE) 的变化情况。

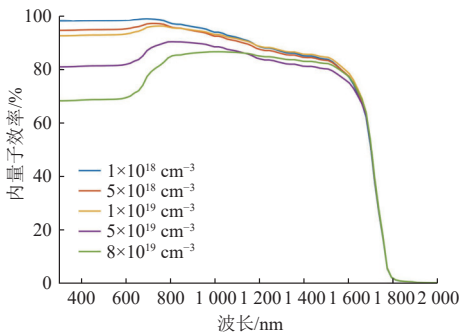


图 1 内量子效率 (IQE) 随表面扩散浓度变化情况

Fig. 1 Variation of internal quantum efficiency (IQE) with surface diffusion concentration

GaSb电池的IQE随表面扩散浓度的增加呈下降趋势。在 $300 \sim 1600 \text{ nm}$ 波长范围内受到的影响比较明显, 而对于 1600 nm 之后影响不大。这说明降低表面

扩散浓度能够提高IQE, 从而提高电池性能。因此, 在Zn扩散过程中, 应选用Zn含量较少的扩散源来降低表面扩散浓度。

1.1.2 扩散深度对电池性能的影响

通过Zn扩散到N型GaSb衬底可形成梯度掺杂的P-N结, 从而制备出GaSb电池。对于GaSb电池性能的优化, Zn扩散深度是尤为重要的参数, 通过模拟在 $0.1 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的扩散深度下IQE的值, 来获取最佳Zn扩散浓度, 来提高电池性能。

从图2可以看出, 扩散深度对于 $300 \sim 1600 \text{ nm}$ 波长范围内电池的IQE影响较大, 当大于 1600 nm 波长之后, 扩散深度对于IQE的影响很小。除了 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 深度的电池在 $1200 \sim 1600 \text{ nm}$ 长波段范围内IQE略有增加之外, 全波段范围内的模拟IQE都随着扩散深度的增加而降低, 在长波段内尤为明显。

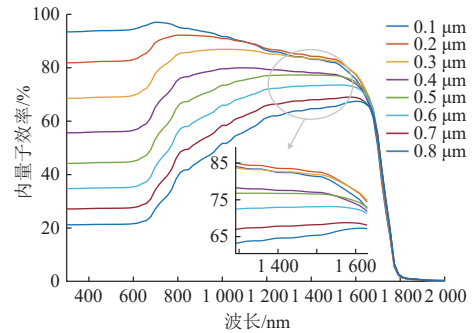


图 2 内量子效率 (IQE) 随扩散深度变化情况

Fig. 2 Variation of internal quantum efficiency (IQE) with diffusion depth

结合在 1500 K 模拟黑体辐射光谱下, 不同扩散深度的GaSb电池的最大输出功率, 如图3所示。

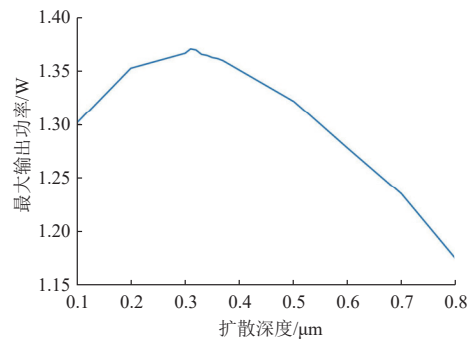


图 3 不同扩散深度下的最大输出功率 P_{max}

Fig. 3 Variation of output power (P_{max}) with diffusion depth

在 1500 K 模拟黑体辐射光谱下, 随着扩散深度的增加, GaSb电池的最大输出功率呈先上升后下降的趋势, 并且在 $0.3 \mu\text{m}$ 左右达到峰值。

综上所述, 可以得出结论: 随着扩散深度加深, GaSb电池的IQE除了 $0.2 \mu\text{m}$ 和 $0.3 \mu\text{m}$ 深度略有增加外,

全波段范围内的模拟IQE都降低,并且在短波段尤为明显。最大输出功率随着扩散深度加深,呈现先增加在减小的趋势,在0.3 μm 达到峰值。因此,GaSb电池更适合浅扩散深度。

1.1.3 基区掺杂对电池性能的影响

本节探究基区掺杂Te的浓度对GaSb电池性能的影响,采用表面Zn浓度为 $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,扩散深度为0.3 μm 的理论曲线进行了数值模拟,该曲线遵循ERFC函数。图4显示了采用不同基区Te掺杂浓度时GaSb电池的IQE。

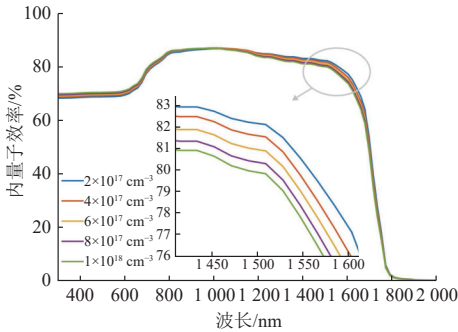


图4 内量子效率(IQE)随基区掺杂浓度变化情况

Fig. 4 Variation of Internal Quantum Efficiency (IQE) with doping concentration in base region

从图4中可以看出,在300~900 nm范围的短波段,GaSb电池的IQE随基区Te掺杂浓度的增加而增加;900~1700 nm范围的长波段,IQE随基区Te掺杂的增加而减少;到了1700 nm以上的波段基区掺杂浓度对IQE影响非常小,可以忽略。由于TPV系统主要考虑的是长波段,因此减小基区Te掺杂浓度能够提高GaSb电池的IQE,从而提高电池性能。

表2展示了1500 K假想黑体辐射下,不同基区掺杂浓度下的 $I-V$ 数据。可以看出,开路电压 V_{oc} 虽然随基区掺杂浓度的增加呈下降趋势,但是变化非常小,可以忽略。因此可知扩散深度对开路电压 V_{oc} 的影响非常小。而随着基区掺杂浓度的增加,短路电流 I_{sc} 和最大输出功率 P_{max} 都呈下降趋势,短路电流 I_{sc} 从4.227 A/cm^2 下降到了3.880 A/cm^2 ,最大输出功率 P_{max} 从1.405 W/cm^2 下降到了1.240 W/cm^2 。

表2 不同基区掺杂下的 $I-V$ 数据

Table 2 $I-V$ data with different base region doping

Te掺杂浓度	$I_{sc}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	V_{oc}/V	$P_{max}/(\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$	填充因子
$4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	4.227	0.441 5	1.405	0.75
$6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	4.163	0.439 3	1.377	0.75
$8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	4.114	0.437 0	1.353	0.75
$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	4.006	0.434 9	1.330	0.76
$2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	3.880	0.426 4	1.240	0.75

综上所述,使用轻Te掺杂的GaSb衬底,不仅能提高IQE,还能增加短路电流 I_{sc} 和最大输出功率 P_{max} 。因为衬底掺杂产生的自由载流子吸收可以抑制任何背反射,因此选择低Te浓度的n-GaSb能够减少自由载流子吸收,这对提高电池的性能是非常有利的。

1.1.4 表面复合速率对电池性能影响

表面复合速率反映了表面光生少数复合损失速率的快慢,其会影响光生少数载流子的收集。表面复合速率是电池制备中需要考虑的重要参数,因此应对其影响进行评估。采用表面浓度为 $8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的0.3 μm -ERFC-Zn扩散曲线进行了模拟。

图5给出的是不同表面复合速率下,对GaSb电池的内量子效率的影响。从图5中可以看出,表面复合速率在300~800 nm范围的短波段影响最大,对800~1600 nm范围的波长也有一定影响,而到了大于1600 nm的长波段几乎没有影响,可以忽略不计。内量子效率随着表面复合速率的增大呈下降趋势。

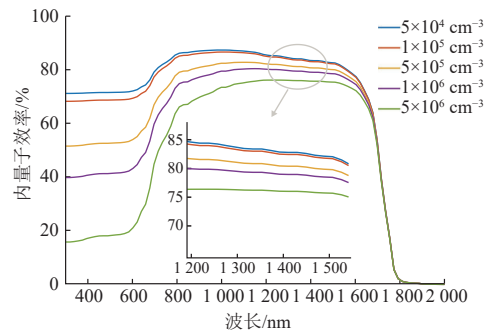


图5 内量子效率(IQE)随表面复合速率变化情况

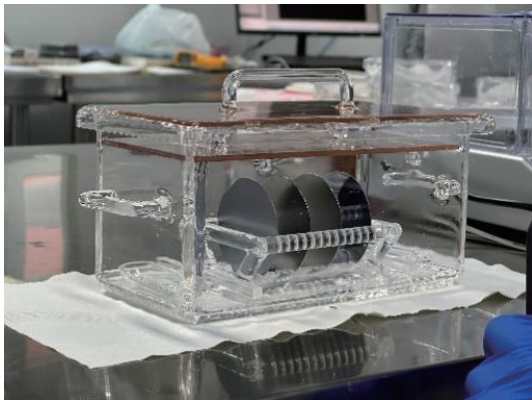
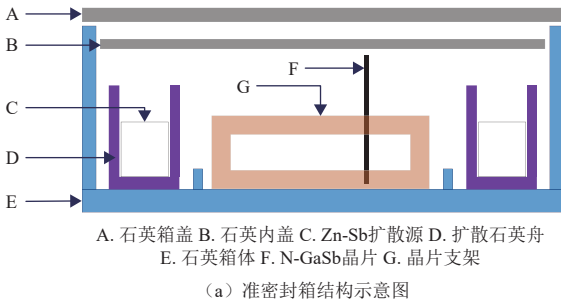
Fig. 5 Variation of Internal Quantum Efficiency (IQE) with

综上所述,减小表面复合速率 S 能够提高GaSb电池的内量子效率IQE,为提高GaSb电池的性能,应尽量降低表面复合速率的大小,在实际制备过程中可通过对电池表面进行钝化处理,以清除电池表面杂质所形成的复合源,或者增加窗口层,从而降低表面复合。

1.2 电池制备装置

Zn的气相扩散过程在一个“准密封箱”内进行,如图6所示。该箱体由石英玻璃制成,一次性可最多盛放15片2英寸GaSb标准片,并通过箱盖与箱体接触面的磨砂以达到较为理想的准密封状态。

特制的电池支撑架位于密封箱的正中心,将GaSb基片垂直支撑起来,防止气相Zn在冷却过程中沉积到基片的表面。此外,这种垂直布置的设计确保了扩散源的均匀分布,能够实现扩散过程中的均匀性,有效提高了制备过程的可控性和稳定性。



(b) 准密封箱实物图

图6 准密封箱结构示意图和实物图

Fig. 6 Schematic diagram and Physical diagram of quasi-sealing box

当N-GaSb表面的Zn浓度触及其满载程度, 可以依靠操作扩散的时长与温度来改变P型层的厚度。Sb的运用主要在于防止因解吸附现象所引起的Sb从GaSb表面逸出, 对此环节的控制尤为关键。因为Zn的扩散速率与III族元素的空位有直接关系, 如果发生Sb的逸出, 这将会引发随机空位的生成, 进一步导致复现扩散线形图的过程变得困难。

图7为Zn扩散系统使用的装置示意图^[23]。该设备包含一个电阻丝热炉, 其最大热值可达1 300 °C。“半封闭箱”被放置于石英热管的中部, 结合石英管内部两侧的石英塞进行保温, 这个加热点拥有整个石英管内最高且均匀稳定的温度。石英加热管的一侧连接机械

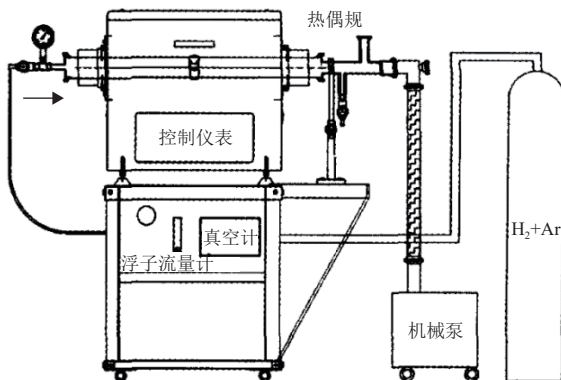


图7 Zn扩散系统示意图

Fig. 7 Diagram of Zn-diffusion system

泵, 另一侧则与装载了含3%氢气的氩气高压罐连接。机械泵可供应5~10 Pa的真空度; 热电偶用于得知石英管内部的绝对压力; 流量计则被用于对含有3%氢气的氩气量进行控制。

通过改变Zn含量、扩散的时间和扩散温度, 控制表面扩散浓度和扩散深度, 以达到模拟最优点。

1.3 铟化镓电池的制备

N-GaSb晶片在扩散之前的表面处理对Zn掺杂曲线的可重复性有着重要影响, 即使微小的表面处理差异也会对扩散曲线产生显著影响。经过实验验证, 表面氧化物对Zn扩散曲线具有强烈的影响^[24]。不同的清洗流程会导致晶片表面自然氧化层的厚度不同, 这些氧化物会改变Zn在GaSb内的溶解度, 从而影响Zn在N-GaSb内的扩散机制。即使在相同的扩散温度和时间下, 不同的清洗过程也会导致获得不同的Zn扩散曲线。因此, 通过精确控制表面处理工艺, 可以实现几乎一致的扩散结果, 从而确保获得可重复的Zn扩散曲线。综合各种因素的考量, 在N-GaSb衬底的清洗过程中, 按照以下步骤进行操作: 首先, 使用二甲苯、丙酮或无水乙醇溶液依次清洗晶片表面的油污。这些溶剂能够有效去除表面的污垢, 确保净化效果。接下来, 使用酸性腐蚀液以有效去除表面的氧化物, 并将处理好的晶片保护在异丙醇中防止进一步氧化。

制备GaSb电池将采用两步Zn扩散法。该工艺所需的制备设备与微纳加工工艺类设备相似, 具有较高的精密性, 与普通太阳能硅电池制备设备相比存在一定差异。其中, 铟化镓电池的PN结制备采用选择性扩散工艺, 即电池边缘不进行扩散, 受光区域进行浅层扩散, 而电极区域则进行深层扩散。这种选择性扩散工艺可以有效地提高GaSb电池的光生少数收集效率。制备工艺的简要流程如图8所示。在双步Zn扩散法中, 第一步Zn扩散工艺主要用于在电池的受光区域形成PN结。第一步Zn扩散工艺完成后, 通过氮化硅层保护电池的受光区域。随后, 采用光刻-刻蚀工艺将需要蒸镀电极的区域暴露出来, 并进行第二次Zn扩散工艺。第二次扩散主要目的是确保上电极栅线与GaSb衬底有良好的欧姆接触。电池的电极是通过光刻-剥离法制备的, 栅线的宽度约为10 μm, 远高于太阳能电池制备过程中所使用的丝网印刷工艺的精密性。

通过Zn扩散法制备GaSb电池的流程可表述为:

- 1) 对N-GaSb晶片进行清洗, 然后在其表面沉积一层Si₃N₄薄膜;
- 2) 采用光刻工艺打开扩散窗口;

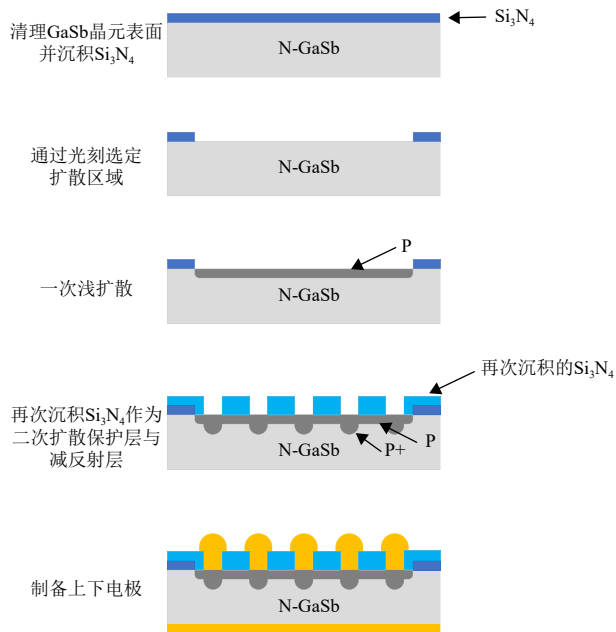


图8 Zn扩散法制备GaSb电池流程图

Fig. 8 Flow chart of GaSb cell prepared by Zn-diffusion

3) 使用准密封式Zn扩散法进行扩散, 制备一层深度大致为 $0.1\ \mu\text{m}$ 的浅结层;

4) 在GaSb晶片上表面蒸镀一层厚度为 $0.15\ \mu\text{m}$ 的 Si_3N_4 薄膜, 以作为二次扩散时的保护层, 同时也具备降低光谱反射的功能, 这样电极一旦制备完成, 就不需要再进行减反射层的蒸镀;

5) 通过光刻工艺露出需要蒸镀上电极的区域, 并在准密封箱内对晶片进行二次深层扩散, 使需要蒸镀电极的区域的结层深度约为 $0.5\ \mu\text{m}$;

6) 最后, 通过电子束制备上下电极。

影响电池性能的步骤主要是扩散工艺, 不同的GaSb基片, 其表面粗糙程度不同, 可能会造成相同的扩散工况下, 掺杂浓度和深度出现差异, 从而导致制备出的电池性能参差不齐。为了提高制备电池性能的统一性, 在每个GaSb基片进行扩散之前, 使用半导体晶元研磨机进行表面处理, 使每块基片的表面粗糙度达到一致, 让后续掺杂的浓度和深度在相同的扩散工况下基本稳定。表3为不同基片在进行研磨处理后, 相同工况下, 制备出的电池性能的对比。

表3 不同批次制备的GaSb电池电学输出
Table 3 Performance of GaSb cells prepared from different batches

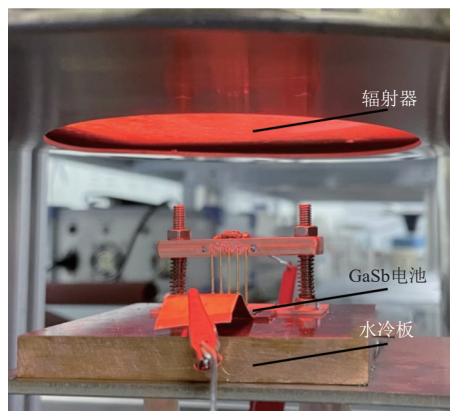
电池编号	I_{sc}/mA	V_{oc}/V	P_{max}/mW	填充因子
1号	475	382	123.7	0.685
2号	495	374	125.8	0.687
3号	475	378	122.5	0.688
4号	498	382	128.5	0.679

对比不同批次制备出的电池的短路电流(I_{sc})、开路电压(V_{oc})、填充因子和最大输出功率(P_{max}), 可以看出制备工艺能够复现, 制备出的电池性能也稳定性良好。

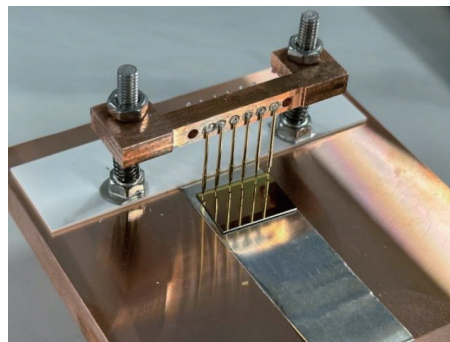
2 铟化镓电池的性能

2.1 测试装置简介

图9(a)为GaSb电池电学性能测试装置, 通过电加热钨辐射器, 辐射出光谱照射在下端的GaSb电池上, 电池背面紧靠水冷板(图9(b)), 降低电池的工作温度, 避免因温度过高造成的电池性能下降。



(a) 自制电池快速测试系统



(b) 自制电池快速测试系统细节部分

图9 自制电池快速测试系统及细节部分

Fig. 9 Self-made battery rapid test system and details

图10给出了钨发射器在该工况下的发射率随波长变化的曲线, 其中红线为GaSb的截止波长。对于GaSb来说, 只有波长小于截止波长的光子才能被吸收并转化为电能。从图中可以清楚地看出, 在GaSb有效吸收波段内, 钨发射器的发射率一直保持在较高水平。通常, 作为能量源的核源会放置在辐射屏蔽层的容器中, 而高温辐射将通过容器表面具有高发射率的材料向外辐射, 以确保电池能够获得足够的能量。因此, 该测试方法也能够更好地适应未来实际使用时的工况。

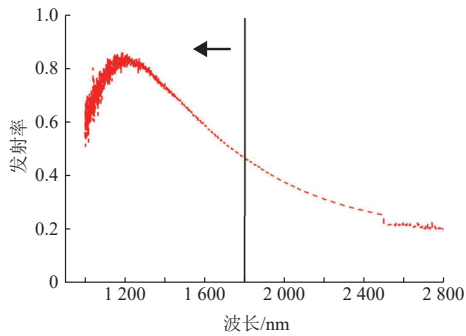


图 10 钨发射器的发射率分布

Fig. 10 Emissivity distribution of tungsten emitter

为了验证测试系统的精确度, 下面进行了3次加热实验, 分别记录了输入电功率与辐射器辐射温度之间的关系曲线, 如图11所示, 在辐射器温度加热到为1 200 °C时, 所需要的输入电功率最大偏差仅有6.8%。

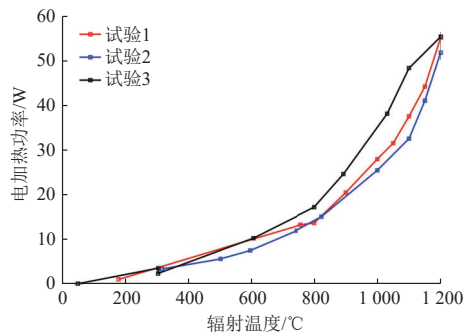


图 11 辐射器温度随电加热功率变化曲线

Fig. 11 Radiator temperature variation curves with electric heating power

为了验证可靠性, 选取同一片GaSb电池, 分别记录了这3次实验, 1 200 °C的辐射温度下, 输出性能, 输出曲线如图12所示。

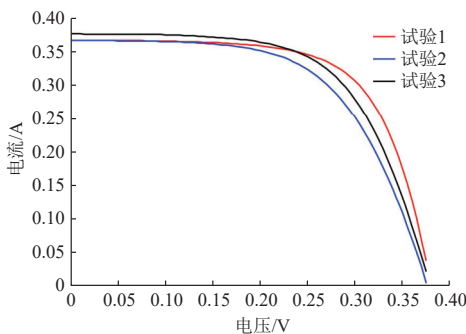
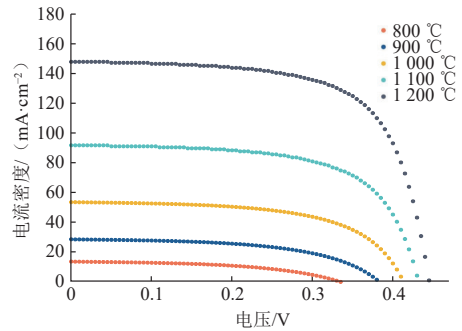


图 12 同片GaSb电池多次测试I-V曲线

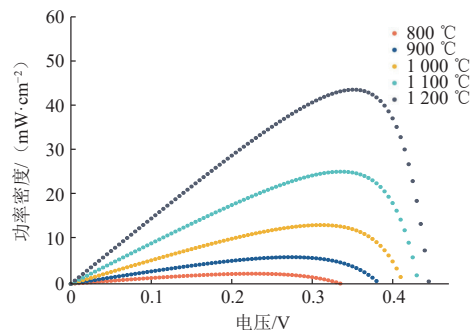
Fig. 12 I-V curves for multiple tests of the same GaSb cell

2.2 铽化镓电池性能分析

改变辐射器温度, 测试了800~1 200 °C下, GaSb电池的电学输出性能。图13为800、900、1 000、1 100、1 200 °C下GaSb电池的J-I和P-I曲线图。



(a) 不同辐射温度下GaSb电池I-V曲线



(b) 不同辐射温度下GaSb电池P-I曲线

图 13 不同辐射温度下GaSb电池I-V曲线和P-I曲线

Fig. 13 I-V and P-I curves of GaSb cells at different radiation temperatures

从图13可以看出, 随着辐射温度的升高, GaSb电池开路电压、短路电流密度以及输出功率密度都有所升高。

表4为不同辐射温度下GaSb电池具体的电学性能参数。当辐射温度从800 °C升高到1 200 °C时, 短路电流密度从13.85 mA/cm²升高到147.97 mA/cm², 开路电压从0.335 V升高到0.445 V, 最大功率密度从2.28 mW/cm²升高到43.66 mW/cm², 填充因子也从0.49提升到了0.66, 这说明GaSb电池辐射温度在1 200 °C以上时, 能表现出更高的输出性能。

表 4 不同辐射温度下GaSb电池电学输出
Table 4 Performance of GaSb cell under different radiation temperatures

辐射温度/°C	$I_{sc}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$	V_{oc}/V	$P_{max}/(\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2})$	填充因子
800	13.85	0.335	2.28	0.49
900	28.78	0.380	5.99	0.55
1 000	53.72	0.410	13.22	0.60
1 100	91.89	0.430	25.22	0.64
1 200	147.97	0.445	43.66	0.66

3 总结及展望

针对高效率、长寿命同位素电池在深空探测中的应用需求, 本文对决定深空同位素热光电电源系统效率的核心器件GaSb电池发展现状进行简要介绍, 重点对课题组所用GaSb制备方法、基本参数、流程、所用

设备及成品电池性能测试进行分析介绍。经过多个阶段的优化,最终实现同等辐射下国产电池输出功率和填充因子均达到较高的水平。未来应以空间应用需求为牵引,建立严密完整的研究体系,将工程和科研结合,重点进行以下几方面的研究:①批量化生产一致性较好的GaSb电池;②进行GaSb电池组阵研究;③开展GaSb电池长周期性能演化研究,可为未来工程化应用奠定基础。

参 考 文 献

- [1] LANDIS G A, FINCANNON J. Study of power options for Jupiter and outer planet missions[C]//Proceedings of 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). [S. l.]: IEEE, 2015.
- [2] NASA. Jupiter orbit insertion press kit[EB/OL]. (2016)[2023-11-11]. https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/juno/jupiter/.
- [3] 孙佳慧. 同位素核能源的空间应用前景分析[J]. *电源技术*, 2014, 38(2): 401-404.
SUN J H. Analysis of the space application prospects of isotope nuclear energy[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2014, 38(2): 401-404.
- [4] FRAAS L, MINKIN L. Burner, emitter, and recuperator development for lightweight thermophotovoltaic power supply[C]//Proceedings of 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). [S. l.]: IEEE: 2015.
- [5] ZHOU Y, ZHANG S, LI G. A review of radioisotope batteries[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(17): 1831-1845.
- [6] DATAS A, MARTÍ A. Thermophotovoltaic energy in space applications: Review and future potential[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 161: 285-296.
- [7] MASON L S. Realistic specific power expectations for advanced radioisotope power systems[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(5): 1075-1079.
- [8] WILT D, CHUBB D, WOLFORD D, et al. Thermophotovoltaics for space power applications[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 890(1): 335-345.
- [9] SCHOCK A. Design and integration of small RTPV generators with new millennium spacecraft for outer solar system[J]. *Acta Astronautica*, 1997, 41(12): 801-816.
- [10] SCHLEGL T, SULIMA O V, BETT A W. The influence of surface preparation on Zn-diffusion processes in GaSb[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 738(1): 396-403.
- [11] BETT A W, DIMROTH F, STOLLWERCK G, et al. III-V compounds for solar cell applications[J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1999, 69(2): 119-129.
- [12] BETT A W, KESER S, SULIMA O V. Study of Zn diffusion into GaSb from the vapour and liquid phase[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1997, 181(1): 9-16.
- [13] BETT A W, KESER S, STOLLWERCK G, et al. Large-area GaSb photovoltaic cells[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 401(1): 41-53.
- [14] SULIMA O V, BETT A W. Fabrication and simulation of GaSb thermophotovoltaic cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 66(1): 533-540.
- [15] BETT A W, SULIMA O V. GaSb photovoltaic cells for applications in TPV generators[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2003, 18(5): S184.
- [16] SUNDARAM V S, GRUENBAUM P E. Zinc diffusion in GaSb[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(8): 3787-3789.
- [17] KHVOSTIKOV V P, RASTEGAEVA M G, KHVOSTIKOVA O A, et al. High-efficiency (49%) and high-power photovoltaic cells based on gallium antimonide[J]. *Semiconductors*, 2006, 40(10): 1242-1246.
- [18] 刘延祥, 夏冠群, 唐绍裘, 等. GaInAsSb/GaSb红外探测器抗反膜的研究[J]. *功能材料与器件学报*, 2005(3): 327-332.
LIU Y X, XIA G Q, TANG S Q, et al. Antireflection coating for GaInAsSb/GaSb PIN infrared photodetectors[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2005(3): 327-332.
- [19] 方思麟, 于书文, 刘维峰, 等. 基于III-V族半导体材料的热光伏电池研究进展[J]. *半导体技术*, 2008(8): 649-653.
FANG S L, YU S W, LIU W F, et al. Recent development of TPV cells based on III-V group semiconductor materials[J]. *Semiconductor Technology*, 2008(8): 649-653.
- [20] FRAAS L M, SUNDARAM V S, AVERY J E, et al. III_V_solar_cells_and_doping_processes: US5217539A[P]. 1993-06-08.
- [21] SULIMA O V, BETT A W. Fabrication and simulation of GaSb thermophotovoltaic cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021, 66(1-4): 533-540.
- [22] TANG L L, XU C, LIU Z M, et al. Suppression of the surface “dead region” for fabrication of GaInAsSb thermophotovoltaic cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 163: 263-269.
- [23] 郑青贺, 叶宏, 汤亮亮. Zn在N-GaSb晶片中扩散机理的实验[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(1): 35-40.
ZHENG Q H, YE H, TANG L L. Experimental investigation on the mechanism of zinc diffusion in tellurium doped gallium antimonide[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, 32(1): 35-40.
- [24] WANG C A, SHIAU D A, LIN A. Preparation of GaSb substrates for GaSb and GaInAsSb growth by organometallic vapor phase epitaxy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 261: 385-392.

作者简介:

汤亮亮(1985-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: GaSb、GaInAsSb、InGaAs及InAs等三五族近红外光电转换器件及相关测试技术。

通信地址: 甘肃省兰州市天水南路222号(730000)

E-mail: ttl@lzu.edu.cn

邵剑雄(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 核技术在航天领域中的应用。**本文通信作者**。

通信地址: 甘肃省兰州市天水南路222号(730000)

E-mail: shaojx@lzu.edu.cn

Fabrication and Performance Testing of GaSb Cells in Deep Space Radioisotope Thermophotovoltaic Systems

TANG Liangliang^{1,2}, LI Jiapeng^{1,2}, LIU Yonghui^{1,2}, SHAO Jianxiong^{1,2}, TIAN Dai³, HAN Chengzhi³,
ZHU Anwen³, QIU Jiawen³

(1. MOE Frontiers Science Center for Rare Isotopes, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou 730000, China;

3. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: For improving the efficiency of the deep space radioisotope thermophotovoltaic system and the urgent need for domestically produced infrared thermal photovoltaic energy conversion devices, this study conducted research on the manufacturing process of GaSb cells and established fundamental parameters for cell preparation through PC1D simulation calculations. The double diffusion method was employed for cell fabrication while simultaneously a self-made rapid testing system was established to evaluate their performance and continuously optimize related preparation processes. Furthermore, variations in GaSb cell performance under different radiation temperatures were explored. The diffusion law of Zn in GaSb was mastered, and the developed GaSb cells achieved high output power and filling factor under the same radiation spectrum. This work lays a solid research foundation for enhancing efficiency and engineering applications of deep space thermophotovoltaic isotope power systems.

Keywords: RTPV; simulation of gallium antimonide cells; cell fabrication; output performance analysis

Highlights:

- The high efficiency GaSb thermophotovoltaic cells were prepared using the double diffusion process.
- A self-made cell rapid testing system was built.
- The output performance of GaSb cells was tested under varying radiation temperatures.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]