

100 keV 质子辐照对空间 GaAs/Ge 太阳电池 光电效应的影响^{*}

赵慧杰^{1)†} 何世禹¹⁾ 孙彦铮²⁾ 孙 强²⁾ 肖志斌²⁾

吕 伟²⁾ 黄才勇²⁾ 肖景东¹⁾ 吴宜勇¹⁾

1) (哈尔滨工业大学空间材料与环境工程实验室, 哈尔滨 150001)

2) (中国电子科技集团第 18 研究所, 天津 300381)

(2008 年 6 月 7 日收到, 2008 年 7 月 29 日收到修改稿)

利用空间环境模拟设备, 用固定能量为 100 keV、注量为 $1 \times 10^9 - 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 的质子, 对空间实用 GaAs/Ge 太阳电池进行了辐照试验. 利用伏安 ($I-V$) 特性、光谱响应和光致发光 (PL) 光谱测试, 研究分析了电池的光电效应. 试验表明, 电池的各种电性能参数如短路电流 (I_{sc})、开路电压 (V_{oc})、最大输出功率 (P_m) 和填充因子 (FF) 都因质子辐照注量的增加, 出现不同程度的衰减. 在质子能量相同条件下, 电池电性能衰减均随照射注量增大而增大. 质子辐照对材料的光电性能具有破坏性的影响. 这种破坏性是由于质子辐照引入的大量缺陷, 使晶格空间的完整性受到破坏, 导致少子的扩散长度降低、表面复合速度增加所致.

关键词: GaAs/Ge 太阳电池, 质子辐照, 光电效应

PACC: 6180, 6855, 7240, 7855

1. 引 言

由于 GaAs 半导体材料具有与太阳光谱的匹配性较好, 在太阳光谱中对应的波长范围恰好落在 400—800 nm 的最佳光域, 而且 GaAs 太阳电池在空间应用中比硅太阳电池更有优势, 例如它具有比硅太阳能电池更好的抗辐照性能, 因此最近几年中人们将更多关注投入到了 GaAs 太阳能电池中^[1-8].

为了弄清楚太阳电池在空间应用中影响其光电性能的因素, 需要研究不同能量粒子 (尤其是质子和电子) 辐照对 GaAs/Ge 太阳电池光电性能的影响.

本文的工作是以固定能量为 100 keV、辐照的注量为 $1 \times 10^9 - 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 质子束, 对 GaAs/Ge 太阳电池进行辐照, 通过对辐照前后 GaAs/Ge 太阳电池进行伏安 ($I-V$) 性能、光谱响应和光致发光 (PL) 光谱测试, 研究质子辐照注量变化对 GaAs/Ge 太阳能电池电学和光学性质的影响, 揭示质子辐照 GaAs/Ge 太阳电池的光电性能演化过程, 探讨质子辐照对

GaAs/Ge 太阳电池的损伤机理.

2. 实验内容

2.1. 实验样品

实验样品为空间实用单结 GaAs/Ge 太阳电池. 该电池采用金属有机化学气相沉积法 (MOCVD) 制备, 电池效率可达到 18.5—20.5% (AM0, 25°C), 其 $I-V$ 特性曲线如图 1 所示, 其结构如图 2 所示. 衬底为 n 型 Ge 单晶, 在其上生长 GaAs 膜, 并支撑太阳电池, 增强机械强度. 0.5—1.5 μm 高掺杂 n^+ 缓冲层是后续有效生长的起始层, 在其上生长掺杂 Si 施主浓度为 $(1-2) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚度约为 3 μm 的基区, 再生长 Zn 受主浓度约为 $(2-4) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、厚为 0.5—1 μm 的 p^+ 发射区, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x 为 0.8—0.85) 窗口层起提高光通过窗口的作用, 其厚度为 0.03—0.05 μm , 以满足 1/4 波长的减反射光学设计. 另外, 缓冲层和基区间还制作有一布拉格反射层, 其作用

^{*} 国家重点基础研究发展计划项目 (批准号: G200551343) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: hjzhao@hit.edu.cn

是减小光的透射而增大光的反射,提高光的利用率. 还有电池光照面不到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的抗反射层用于减小光的反射. 上层为栅电极,下层为背电极. 所用电池尺寸大小均为 $40\text{ mm}\times 30\text{ mm}$.

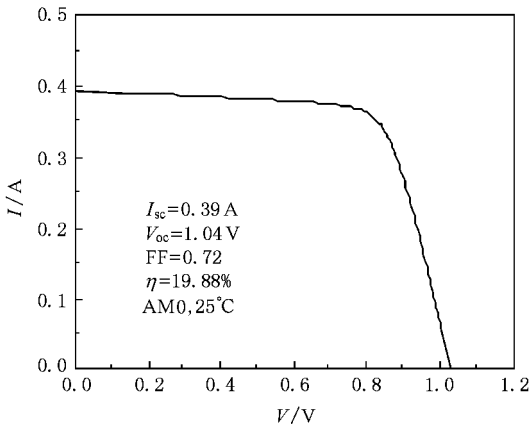


图1 GaAs/Ge 太阳电池(MOCVD) I - V 特性曲线

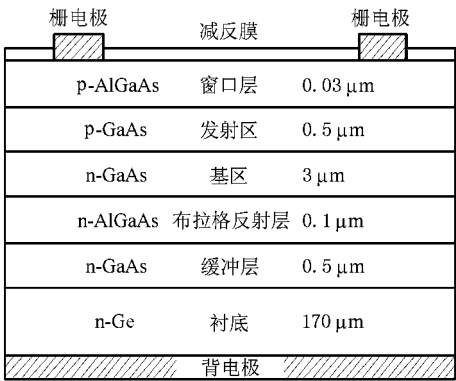


图2 MOCVD GaAs/Ge 太阳电池结构示意图

2.2. 辐照实验

质子辐照试验是利用哈尔滨工业大学离子注入设备(低能量大型空间材料综合辐照模拟系统)在室温、真空($10^{-4}-10^{-5}\text{ Pa}$)条件下进行的. 选实验室加速器提供的质子能量为 100 keV , 辐照注量为 $1\times 10^9-3\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$, 进行太阳电池的辐照. 注量率为 $10^9\text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 质子束扫描均匀度好于 $\pm 4\%$.

2.3. 电性能测试

用太阳模拟器模拟 AM0(大气质量为零时的太阳光谱分布, 能量密度为 135.3 mW/cm^2), 在室温、真空条件下, 原位测试 GaAs/Ge 太阳能电池在该条件下辐照前后的 I - V 特性, 其中测量的电池样品性

能参数包括开路电压(V_{oc}), 短路电流(I_{sc}), 最大输出功率(P_m), 填充因子(FF)和转换效率(η). 并将其与辐照前的值做比较, 进行归一化处理.

2.4. 光谱响应测试

利用中国电子科技集团第 18 研究所的专用光谱响应测试仪, 在太阳模拟器模拟 AM0, 25°C 条件下, 测试 GaAs/Ge 太阳能电池辐照前、辐照后的光谱响应曲线, 并进行比较.

2.5. 光致发光(PL)光谱测试

利用中国电子科技集团第 18 研究所的专用光致发光测试仪, 测试 GaAs/Ge 太阳能电池辐照前、辐照后的 PL 特性曲线, 并将其作比较.

3. 实验结果与讨论

3.1. 电性能测试

图 3 为不同注量 100 keV 质子辐照过程中 GaAs/Ge 太阳电池 I - V 特性曲线随辐照注量的变化. 结果表明, GaAs/Ge 太阳电池具有一定的抗质子辐照能力. 在一定能量下, 当辐照注量达到 $1\times 10^{10}\text{ cm}^{-2}$ 后, 质子辐照能使 GaAs/Ge 太阳电池 I - V 曲线出现不同程度衰减. 随着辐照注量的增加, 电池的 V_{oc} 和 I_{sc} 均下降, 曲线衰减的幅度更为明显, 太阳电池的 FF 下降.

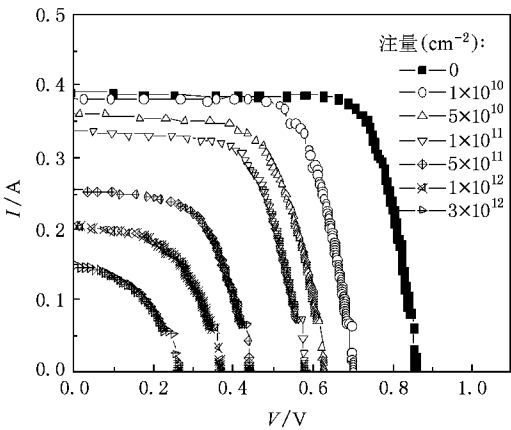


图3 质子辐照后 GaAs/Ge 太阳电池 I - V 曲线随辐照注量的变化(AM0, 室温, 真空)

作为空间飞行器能源的太阳电池在太空环境运行时会受到各种能量的质子、电子等粒子的辐照. 半

导体受粒子(电子、质子、中子、射线等)照射时,高能粒子将会把半导体中的一些原子电离或者从晶格里的正常位置移出,而形成一个空位和一个间隙原子.接着这空位和间隙原子又很快地和存在于半导体中的杂质(如氧等)形成更复杂的晶格缺陷.或者 Ga 原子的正常位置被 As 原子占有,或者 As 原子的正常位置被 Ga 原子占有,形成反晶格缺陷^[9].这些缺陷在禁带中引进了能够起受主、施主或复合中心作用的各种能级.这些缺陷起着载流子复合中心的作用,导致了载流子寿命缩短,有效掺杂度和折射率也会因此发生变化.其结果是使电池电学性能退化.这些统称为辐照损伤.设 φ 表示辐照通量,辐照缺陷形成的复合中心数 N_T 与辐照通量 φ 成正比^[9],即

$$N_T = K_0 \varphi, \quad (1)$$

式中 K_0 为每一个粒子在单位长度上产生的复合中心数.由于辐照后产生了新的复合中心,因而少数载流子寿命 τ 变短.根据下式,少数载流子扩散长度 L 则下降. D 为扩散系数^[9]:

$$L = \sqrt{D\tau}. \quad (2)$$

少数载流子的寿命变化与辐照粒子的类型、能量、注量及入射方式密切相关.

宇宙环境中的质子,其能量范围为 0.4—40 MeV.对于能量较低的质子,入射至太阳电池后,其射程与电池厚度可以相互比较,沿路径缺陷的分布不均匀.如果只考虑一种复合中心,且处于能隙中心,则少数载流子寿命(τ)与入射注量 φ 的关系为^[9]

$$1/\tau = 1/\tau_0 + K_p \xi \varphi v_{th}, \quad (3)$$

式中, ξ 为瞬时能量为 E 的质子在单位路程上引起的原子总位移; v_{th} 是载流子的热运动速度; K_p 是载流子寿命的损伤系数,其值可以从实验求得; τ_0 是辐照前载流子的寿命.

由质子辐照引起的少数载流子扩散长度 L 的变化与质子注量 φ 满足^[9]

$$1/L^2 - 1/L_0^2 = K_L \varphi, \quad (4)$$

式中 L 和 L_0 分别是辐照后和辐照前少数载流子的扩散长度, K_L 是质子辐照的扩散长度的损伤系数,其值依赖于入射质子的能量和注量.

载流子迁移率(μ)与杂质浓度有关,质子辐照对它的影响不大^[9].

对于一定波长的入射光,太阳电池的 I_{sc} 与少子扩散长度 L 成正比^[9],即

$$I_{sc} \propto L \propto \tau^{1/2} \propto \varphi^{-1/2}, \quad (5)$$

而反向饱和电流 I_0 、开路电压 V_{oc} 、最大输出功率 P_m 与少子寿命 τ 的关系式为^[9]

$$I_0 = qN_i^2 \left[\frac{1}{N_A} \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{1/2} + \frac{1}{N_D} \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{1/2} \right] \propto \tau^{-1/2} \propto \varphi^{1/2}, \quad (6)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \propto \ln \tau \propto \ln \varphi^{-1}, \quad (7)$$

$$P_m \propto I_{sc} V_{oc} \propto \Phi^{-1/2} \ln \varphi^{-1}, \quad (8)$$

式中 q 为电子电荷 1.602×10^{10} ; k 为波尔兹曼常数; N_i 为材料本征载流子浓度; φ 为辐照通量; T 为开氏温度; N_A 为基区掺杂浓度; N_D 为发射区掺杂浓度; τ_n 为基区电子寿命; τ_p 为发射区空穴寿命; D_n 为基区电子扩散常数; D_p 为发射区空穴扩散常数.

可见,随着辐照通量的增加,光电池的输出功率降低,从而光电转换效率也降低.辐照损伤对材料最重要的影响是减少了少子寿命,辐照过程中少子扩散长度 L 的变化可以说是光电器件参数衰减的主要原因.辐照对砷化镓太阳电池来说,主要是基区寿命下降^[9].砷化镓太阳电池经质子辐照后,电池性能的衰减就是输出功率的衰减.

3.2. GaAs/Ge 太阳电池光谱响应的测试

光电池的光谱响应是指光电流与入射光波长的关系,它可反映电池性能的优劣和特性,电池的光谱响应的改变就是电池性能的改变.图 4 为 100 keV 质子辐照 GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应随辐照注量的变化曲线.

光谱响应测试结果表明,100 keV 低能质子辐照后, GaAs/Ge 太阳电池在短波和长波部分均有衰减,尤以短波部分产生较大衰减.随着注量的增加,其量子率也有不同程度的降低.100 keV 质子照射 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 在波长 500 nm 处的响应分别衰减 26%, 51% 和 82%, 在 800 nm 处的响应分别衰减 7%, 29% 和 38%. 即相同能量下,质子注量愈大, GaAs/Ge 太阳电池的性能衰减愈大,对电池结构的破坏愈严重.

由于电流密度 J_{sc} ^[10],

$$J_{sc}(\lambda) = J_n(\lambda) + J_p(\lambda) + J_{dr}(\lambda), \quad (9)$$

故有光谱响应 SR ^[10]

$$SR(\lambda) = SR_n(\lambda) + SR_p(\lambda) + SR_{dr}(\lambda). \quad (10)$$

这三项分别是 p 型层(包括 p-AlGaAs 和 p-GaAs), n 型层和耗尽层对 SR 的贡献.

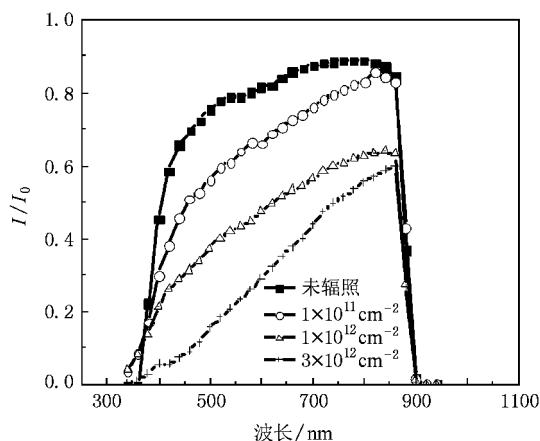


图4 不同注量的 100 keV 质子辐照 GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应

在本征半导体中,能量小于禁带宽度的光子不能激发电子-空穴对.可见,能量不同的光子具有不同的激发电子-空穴对的转换能力.通常用光谱响应表示不同波长的光子产生电子-空穴对的能力.

定量而言,太阳电池的光谱响应是某一波长的光照在 p-n 结上时,每一光子能收集到的平均载流子数.在光电流中,光谱响应系指“内光谱响应”,即短路情况下,电池两端收集到的载流子数与入射材料的光子数之比.所以,光谱响应也叫做收集效率 $\eta_{\text{coll}}(\lambda)$,它是太阳电池的总收集效率,小于 1.一般而言,太阳电池能收集最大可利用电流的 60%—90%^[10].

对于波长小于 300 nm 的光波,光子几乎全部被电池前面的 p 区吸收.波长在 400—900 nm 之间,体寿命 τ_n 和结深 X_j 起主要作用.超过 900 nm,光子在 GaAs 中有较长的穿透深度,这时起主要作用的是电池的厚度及表面处的复合速率 S_n .

由图 4 中,辐照 GaAs/Ge 太阳电池的光谱响应 $SR(\lambda)$ 的短波部分明显下降,而 $SR(\lambda)$ 的主要贡献就在短波部分,说明低能质子辐照对 p 型区的影响较大.这是因为 GaAs 是直带能隙材料,入射光子通过 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层进入 p-GaAs 层后,绝大部分在该层被吸收而产生光生载流子.这些载流子能否扩散到达结区附近而被 p-n 结静电场分离,越过 p-n 结产生光生电流,是决定电池效率的最主要因素,若 p-GaAs 区少子扩散长度 L_n 小于结深 X_j ,光生载流子很难扩散到达结区.同样,若界面复合速度 S_n 很大,大量光生载流子在界面复合,则会影响电池的效率^[8].电池辐照后,在表面上产生许多通常起复合中

心作用的缺陷,降低了少子的扩散长度,增加了表面复合速度,因此短路电流降低. L_n 与辐照注量 φ 的关系为^[7]

$$\frac{1}{L_n^2} = \frac{1}{L_{n_0}^2} + K_{L_n} \varphi, \quad (11)$$

式中, L_{n_0} 和 L_n 分别为辐照前后的 p-GaAs 的少子扩散长度, φ 为辐照注量, K_{L_n} 称为少子扩散长度损伤常数.从上式可知,随着辐照注量的增大, L_n 变小.对一定的注量, K_{L_n} 越小,辐照后少子扩散长度的衰减越小,即抗辐照性能越好.

利用 SRIM 程序计算了质子在电池中的射程及分布情况. 100 keV 质子在 GaAs 中的射程为 0.75 μm .其射程末端在电池的结区附近.而质子辐照的缺陷主要集中在射程末端,因而 100 keV 低能质子对太阳电池光电性能影响较大. 100 keV 质子辐照时,入射粒子在 GaAs/Ge 电池发射区、窗口层及其界面产生的辐照损伤增大了光生载流子的表面复合速度,影响 p-n 结的特性,使光生载流子寿命减少,从而使电池光谱响应衰减,产生短波效应.

3.3. GaAs/Ge 太阳电池光致发光光谱 (PL 光谱) 的测试

PL 光谱是目前研究超晶格、量子阱导带与价带子带间跃迁及激子效应的光学方法之一. GaAs 量子阱能够产生明显的光荧光效应,利用光致发光现象可以研究单晶或外延半导体材料中材料晶格结构的完整性,研究半导体材料和器件的辐照损伤效应.

GaAs 体材料能够产生明显的光荧光效应,对于高质量的 GaAs 太阳电池,在室温条件下即可观察到自由激子支配的荧光发射,纯 GaAs 的激光波长为 840 nm^[10]. PL 相对发光强度和半峰宽是表征外延材料质量好坏的重要参数.发光强度越强,表明材料内非辐照复合中心越少,激子数目越多,发光效率越高.半峰宽越小,表明材料的平整度越好.

PL 荧光测量系统用短波长激光激发半导体材料产生荧光,通过对辐照前后 GaAs/Ge 太阳电池进行光致发光测试,分析 GaAs 材料的光学特性,研究质子辐照能量及注量变化对 GaAs/Ge 太阳能电池光学性质的影响.将不同注量的质子辐照后 GaAs/Ge 太阳能电池的光致发光效应谱与辐照前进行对比,结果如图 5 所示.从图 5 中可以看出,辐照前的光致发光光谱在波长为 881 nm 处 ($E = 1.405 \text{ eV}$) 有一个

很强的锐峰.经辐照后,光致发光峰强度明显减弱,都已减至很小,说明低能质子辐照对所试验的 GaAs/Ge 太阳能电池光学性能具有破坏性影响.

图 6 是在 100 keV 质子辐照条件下不同注量辐照后 GaAs/Ge 太阳能电池的光致发光光谱.从图中可以看出,辐照后 GaAs 材料光致发光特征峰强度随低能质子的辐照注量增加而减弱,注量较小情况下, GaAs 材料特征峰的峰位变化非常小,没有出现明显的小的发光峰.随注量继续增加,则 GaAs 材料特征峰峰位右移、峰高减低和半峰宽变宽.

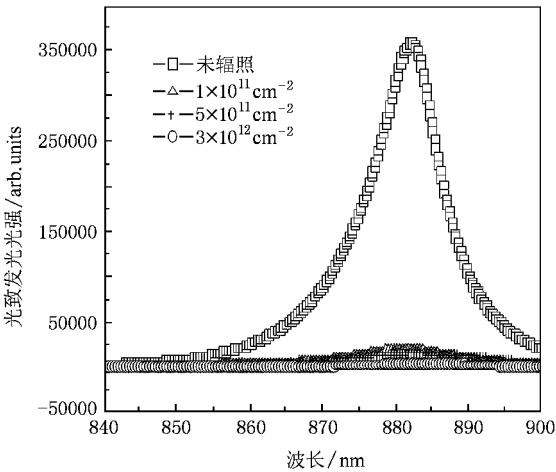


图 5 100 keV 质子辐照前后 GaAs/Ge 太阳能电池的室温光致发光光谱

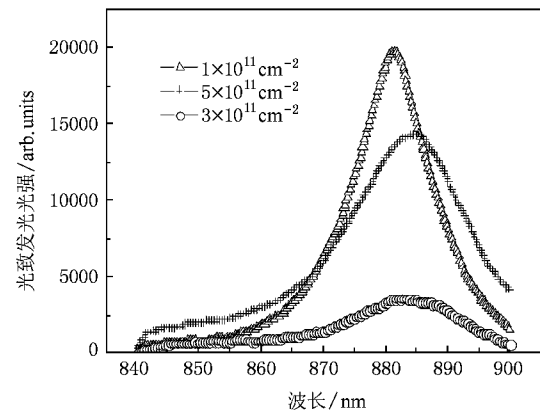


图 6 不同注量质子辐照前后 GaAs/Ge 太阳能电池的室温光致发光光谱(能量 100 keV)

为了分析质子辐照对 GaAs/Ge 太阳能电池的室温光致发光光谱产生的这种破坏性影响的机理,我们首先研究 GaAs 电池的发光过程.电池中的激子由于受势垒的限制作用,只在平行与界面的平面内可自由运动,而在电池生长方向上(假设为 z 方向)运动

受到限制,是准二维的.由文献[10]可知,在二维情况下,激子的结合能 E_n^{2D} 为

$$E_n^{2D} = - \frac{R_y^*}{\left(n - \frac{1}{2}\right)^2}, \tag{12}$$

式中 R_y^* 为有效里德伯常数.可以看出,二维激子基态($n = 1$)的结合能达十几毫电子伏,不容易离解,因而激子效应很明显,在室温下也能观察到激子效应.

在准二维体系中, GaAs 直接带系的光跃迁过程,常常是自由激子起主要作用的本征过程.当一定波长的激发光照射 GaAs 太阳电池时,电子吸收光子能量 $h\nu$ 以后,从价带跃迁到导带,在价带中产生空穴,它和导带电子之间由库仑引力可能形成电子和空穴束缚状态的激子,激子中的电子不能稳定地存在,它通过从导带跃迁回价带和空穴复合而放出能量,并发射光子.

在二维情况下,激子的波函数 φ_{1S}^{2D} 为^[10]

$$\varphi_{1S}^{2D} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{2}{a_B^*} e^{-\frac{2r}{a_B^*}}, \tag{13}$$

其中, a_B^* 为激子的有效玻尔半径^[10],为

$$a_B^* = \frac{E_0 \hbar^2}{\mu e^2}, \tag{14}$$

式中 μ 为折合质量; E_0 为介电常数; $\hbar$ 为普朗克常数.经计算得到在 GaAs 中激子的玻尔半径约为 10 nm,因此在这样大范围内晶体完整性的破坏必将对激子效应产生影响,从而影响激子的产生和存在.

在质子辐照实验中,质子质量较大,经质子辐照后会使得 GaAs 材料的晶格空间的完整性受到破坏,导致激子的有效玻尔半径增大,使激子的波函数减小,致使产生的激子数量减少,从而使光跃迁强度减弱,因而电池的光致发光峰强度变弱.当辐照注量增大,晶格空间完整性的破坏进一步增大,产生的激子数进一步减少,相应的电池的光致发光峰强度变弱.

从图 5 和图 6 中我们还看到,低能质子辐照后电池的光致发光峰的峰强在变弱的同时,峰位也发生了明显变化,出现许多小的发光峰.这是由于在半导体晶体中,常规情况下原子按一定规则整齐地排列在晶格上,处于最低能态,系统最稳定.当粒子辐照时,辐照粒子会通过碰撞,使晶格原子位移.初级位移原子又可引发次级位移,形成许多空位-间隙对(Frenkel 缺陷)^[9].辐照产生的空位和间隙原子扰乱了晶格的完整性,使系统处于激发状态.而质子辐照

的缺陷主要集中在射程末端^[9]. 而质子辐照除产生单空位缺陷外, 还能形成多空位等复杂缺陷, 于是在 GaAs 内部产生大量的晶格原子位移效应^[9]. 质子轰击对电池产生损伤在材料的禁带中引入了新的深能级中心, 即引入了新的陷阱, 使一部分激子通过这些陷阱发光, 致使光致发光强度大大减弱的同时, 会出现新的发光峰. 深能级瞬态谱 (DLTS) 可以测试出粒子辐照在 GaAs 材料中产生的深能级陷阱级别、浓度和俘获截面^[11]. Sheng^[12], González^[13] 和黄万霞^[14] 等人通过 DLTS 测试结果证实, 不同能量和注量的质子辐照, 均能在 GaAs 材料中产生新的陷阱; 质子能量不同、辐照注量不同、电池结构不同, 在 GaAs 电池中产生的深能级也不同. 我们通过 DLTS 测试, 测得在所试验的 GaAs/Ge 太阳电池中主要产生了 $E_c - 0.24$ eV, $E_c - 0.33$ eV, $E_c - 0.38$ eV, $E_c - 0.52$ eV, $E_c - 0.72$ eV 等深能级; 且这些能级的浓度及俘获截面也不同. 因此, GaAs/Ge 电池中产生的深能级陷阱致使光致发光强度大大减弱的同时, 出现许多新的小发光峰.

综上所述, 质子辐照对材料光电性能的破坏, 是由于质子轰击引入新的深能级陷阱, 使一部分激子通过这些深能级中心复合发光, 使材料晶格空间的完整性受到破坏, 致使产生的激子数目减少, 导致少子的扩散长度降低、表面复合速度增加、光跃迁强度

减小, 从而导致光电性能变弱.

4. 结 论

1. 在 100 keV 辐照质子能量下, 随着辐照注量的增加, GaAs/Ge 太阳电池的开路电压、短路电流、最大功率和填充因子均下降.

2. 光谱响应测试结果表明: 100 keV 低能质子辐照后, GaAs/Ge 太阳电池在短波和长波部分均有衰减, 尤以短波部分产生较大衰减. 随着注量的不断增加, 其量子率不断降低.

3. 光致发光光谱测试结果表明: 经一定注量的 100 keV 质子辐照射后, GaAs/Ge 太阳能电池的 GaAs 材料光致发光特征峰强度明显减弱. 特征峰强度随质子的辐照注量增加而减弱. 注量较小情况下, 特征峰的峰位变化非常小, 不出现明显的小的发光峰. 随注量继续增加, 则峰位、峰高和半峰宽都发生了变化, 出现小的发光峰.

4. 100 keV 质子辐照对 GaAs/Ge 太阳电池的光电性能具有破坏性影响. 这种破坏性是由于质子辐照引入大量深能级缺陷使晶格空间的完整性受到一定程度的破坏, 致使产生的激子数目减少, 导致少子的扩散长度降低、表面复合速度增加、光跃迁强度减小, 从而导致光电性能变弱.

-
- [1] Scholz S, Bauer J 2006 *Cryst.* **41** 111
 - [2] Zhang X H 2004 *Chinese Journal of Power Sources* **1** 17 (in Chinese) [张新辉 2004 *电源技术* **1** 17]
 - [3] Messenger S R, Burke E A 2003 *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* **5** 11
 - [4] Sharps P R, Aiken D J 2002 *17th Space Photovoltaic Research and Technology Conference* **10** 55
 - [5] Zhang T Q, Liu C Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆、刘传洋 2001 *物理学报* **50** 2434]
 - [6] Chen X Y, Ding X M, Zhang S K, et al 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 612 (in Chinese) [陈溪滢、丁训民、张胜坤等 1997 *物理学报* **46** 612]
 - [7] Xiang X B, Du W H 2001 *Energy Material and Solar Cells* **68** 97
 - [8] Zhu W Z, Shen K H 1996 *Acta Phys. Sin.* **45** 258 (in Chinese) [朱文章、沈凯华 1996 *物理学报* **45** 258]
 - [9] Cao J Z 1993 *Radiation Domino Effect of Semiconductor Material* (Beijing: Sciencep) p145 (in Chinese) [曹建中 1993 *半导体材料的辐射效应* (北京出版社) p145]
 - [10] Sen X C 1992 *Optics Property of Semiconductor* (Beijing: sciencep) p633 (in Chinese) [沈学础 1992 *半导体光学性质* (北京出版社) p633]
 - [11] Lu F 1994 *Acta Phys. Sin.* **43** 1129 (in Chinese) [陆 1994 *物理学报* **43** 1129]
 - [12] Sheng S L, Loo R Y 1991 *Solar Cells* **31** 349
 - [13] González M, Andre C L 2006 *Journal of Applied Physics* **100** 034503
 - [14] Huang W X 1999 *Chinese Journal of Semiconductors* **20** 957 (in Chinese) [黄万霞 1999 *半导体学报* **20** 957]

Effect of 100 keV proton irradiation on photoemission of GaAs/Ge space solar cells^{*}

Zhao Hui-Jie^{1)†} He Shi-Yu¹⁾ Sun Yan-Zheng²⁾ Sun Qiang²⁾ Xiao Zhi-Bin²⁾
Lü Wei²⁾ Huang Cai-Yong²⁾ Xiao Jing-Dong¹⁾ Wu Yi-Yong¹⁾

1) (*Space Materials and Environment Engineering Laboratory, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

2) (*China Electron Science and Technology Group Eighteenth Graduate School, Tianjin 300381, China*)

(Received 7 June 2008 ; revised manuscript received 29 July 2008)

Abstract

The experiment of GaAs/Ge solar cells co-irradiated by proton and electron was done in space environment simulation equipment. The materials of GaAs/Ge solar cell are irradiated by proton beam with fixed energy of 100 keV and dose from 1×10^9 to $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. The I - V characteristic, spectral response and photoluminescence (PL) spectra were measured before and after irradiation in order to study the cell's performance degradation induced by irradiation. The result indicated that the parameters such as short circuit current (I_{sc}), open circuit voltage (V_{oc}), maximum output power (P_{max}) and fill factor (FF) all suffer degradation at different degrees as the irradiation fluence increases. The results show that proton irradiation induces a great damage in optical characteristics of the solar cell, resulting from the large quantity of irradiation defects that would destroy crystal lattice integrity and reduce the diffusion distance of minority carrier, and thus increase the surface recombination velocity. The damage extent of GaAs/Ge solar cell increases with proton dose in the ranges under investigation.

Keywords : GaAs/Ge solar cell, proton irradiation, photoemission

PACC : 6180, 6855, 7240, 7855

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. G200551343).

[†] Corresponding author. E-mail : hjzhao@hit.edu.cn