

位移损伤剂量法评估空间 GaAs/Ge 太阳能电池辐照损伤过程*

吴宜勇^{1)†} 岳龙¹⁾ 胡建民²⁾ 蓝慕杰³⁾ 肖景东¹⁾ 杨德庄¹⁾
何世禹¹⁾ 张忠卫⁴⁾ 王训春⁴⁾ 钱勇⁴⁾ 陈鸣波⁴⁾

1) (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 哈尔滨 150025)

3) (哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

4) (上海空间电源研究所, 上海 200233)

(2010年5月13日收到; 2010年12月27日收到修改稿)

本文针对 GaAs/Ge 太阳能电池, 利用位移损伤剂量法研究了其在轨服役条件下的性能退化行为. 首先在地面模拟辐照环境中, 试验获得了在不同能量的电子和质子辐照下的电池性能随辐照注量的退化行为. 基于上述实验结果以及计算获得的带电粒子在电池中的非电离能量损失 (NIEL) 获得了不同能量电子辐照位移损伤的等效指数 n 为 1.7, 电子损伤剂量转化为质子损伤剂量等效系数为 5.2, 并进一步建立了电池性能随位移损伤剂量的退化方程. 利用该方法对国产 GaAs/Ge 太阳能电池在 500, 22000 和 36000 km 轨道带电粒子辐照条件下电性能退化行为以及不同厚度玻璃盖片对电池损伤的防护效果进行了评价.

关键词: GaAs/Ge 太阳能电池, 辐照损伤, 带电粒子, 位移损伤剂量

PACS: 81.40. Wx, 88.40. hj, 07.89. +b

1. 引言

GaAs 作为直接带隙半导体材料, 室温下禁带宽度为 1.42 eV, 是工作在太阳光谱区光伏器件的理想材料. GaAs 电池与 Si 太阳能电池相比, 具有更高的光电转换效率. 由于其光吸收系数较高, 可以做得很薄, 因而具有更强的抗辐照能力. 由于 GaAs 电池的带隙较宽, 因而在较高的工作温度下具备良好的电学性能^[1]. 所以 GaAs 电池将正逐步取代目前广泛应用的 Si 太阳能电池, 成为新一代高性能、长寿命的航天器主电源.

空间辐照损伤是 GaAs 太阳能电池在轨服役过程中电性能退化以至失效的主要原因. 从上世纪 80 年代 GaAs 太阳能电池开始应用以来, 美欧各国就已经对其进行了较多的研究. 大量的工作是研究空间太阳能电池在带电粒子辐照作用下的带电粒子能量、注量效应和辐照损伤机理^[1-6]. 其中以美国

NASA 的研究最为充分, 在此基础上 Anspaugh^[1] 根据相应的辐照研究成果, 出版了《GaAs 太阳能电池辐照手册》. 国内外的许多研究还对 GaAs 太阳能电池在带电粒子辐照下电性能退化行为和损伤机理进行了深入和细致的研究, 成为空间 GaAs 太阳能电池实际应用的基础^[7-13]. 我单位在近一年与天津 18 所和上海空间电源研究所合作, 深入研究了单结 GaAs/Ge 太阳能电池空间环境效应, 对于不同能量和注量的质子电子损伤效应进行了研究^[14-16], 获得了太阳能电池在低于 170 keV 质子辐照下的非均匀损伤的特点, 并深入研究了其物理机理; 考察了束流密度对辐照损伤的影响, 为模拟空间环境加速试验提供了依据.

由于空间环境十分复杂, 在地面难以模拟实际的空间环境, 而空间搭载试验的成本和难度都较大, 不易实现. 为了确定空间太阳能电池在轨服役过程中性能退化规律, 进一步预测其使用寿命, 必须研究带电粒子(质子、电子)对太阳能电池的辐照损伤

* 国家自然科学基金(批准号:11075043)资助的课题.

† E-mail: wuyiyong2001@yahoo.com.cn

效应的地面等效模拟过程,并建立相应的模型.在长期的研究中已经形成了等效注量法和辐照位移损伤剂量法两种方法.

等效注量法是由美国 NASA 喷气发动实验室 (JPL) 提出的,并于上世纪 80—90 年代获得应用.等效注量法是基于辐照粒子注量对太阳能电池性能的影响规律的类似性提出的,即不同辐照条件导致太阳能电池性能退化的规律类似^[1,17].对 GaAs/Ge 太阳能电池而言,粒子辐照后单结 GaAs/Ge 太阳能电池电性能退化规律与辐照注量间符合对数规律,如下:

$$\frac{p}{p_0} = 1 - C \ln \left(1 + \frac{\Phi}{\Phi_{x0}} \right), \quad (1)$$

其中, p_0 和 p 分别为太阳能电池辐照前、后的电性能值, C, Φ_{x0} 为常数, Φ 为辐照粒子注量.但是该方法是基于带电粒子辐照损伤后太阳能电池电性能退化的唯象学规律,没有涉及电池损伤的物理本质.更重要的是,使用这种方法对于新型太阳能电池的评估时,需要进行大量的试验,且对低能质子辐照损伤评估准确性不够.

位移损伤剂量法的提出较晚(上世纪 90 年代初),目前还处于完善阶段.其基本理论依据是,在带电粒子辐照条件下引起太阳能电池性能退化的主要物理机理为辐照位移损伤效应^[18,19].在辐照条件下,带电粒子碰撞材料的晶格原子,使其产生移位,形成位移损伤缺陷.对半导体而言这种损伤直接影响其电性能.单个粒子在材料中沉积下来用于产生位移缺陷的那部分能量,称为非电离能量损失 (NIEL),非电离能量损失与粒子注量的乘积即可获得产生位移损伤的总能量称为位移损伤剂量 (displacement damage dose),也称为位移吸收剂量^[18,20—22],这个物理参数是评价位移损伤的特征参数.利用位移损伤剂量建立的评价方法的基本思想是通过地面模拟辐照试验确定太阳能电池的电性能

随电池位移损伤剂量的退化规律,通过空间轨道能谱计算确定太阳电池服役过程中产生的位移损伤剂量参数.由于电池的辐照位移损伤剂量参数是唯一的,具有等效性,以此可以确定电池在轨性能退化规律和服役寿命.位移损伤剂量法的优势是将电池电性能的退化归结到其损伤的本质,即辐照位移损伤剂量.直接与太阳电池辐照损伤机理相关联,具有更深刻的物理意义,且更简洁易行.

国内这方面的研究工作才刚刚开始.本文在 GaAs/Ge 电池辐照效应和损伤机理研究基础上利用等效位移损伤剂量法对太阳电池在轨行为进行了评价,建立了相应模型.同时本文将位移损伤剂量法应用到评价玻璃盖片对太阳电池的防护效果,优化现有的玻璃盖片厚度.

2. 试验材料(器件)与试验方法

2.1. GaAs 太阳电池

空间太阳电池阵列的结构复杂,包含的材料很多,如图 1(a) 为太阳电池阵的组成分解图.从上到下,依次包括电池玻璃盖片、盖片胶、含有表面减反射涂层的裸电池、背电池胶粘剂、石墨/铝蜂窝衬底等.其中电池阵顶部的玻璃盖片、盖片胶以及裸电池是最能直接受到轨道空间的环境作用,极易受到损伤的部分.电池阵铝蜂窝以下的刚性基板在设计、选材合理的情况下,不受空间环境影响,空间环境的损伤就主要存在于电池阵的顶层部分,其中太阳电池本身对空间辐照环境最为敏感,因此本研究主要是对单结 GaAs/Ge 太阳电池的辐照效应进行评估.试验样品为单结 GaAs/Ge 太阳电池,面积为 $2 \text{ cm} \times 1.5 \text{ cm}$,其结构参数如图 1(b) 所示.

用标准太阳模拟器在 AMO 的太阳光谱辐照条

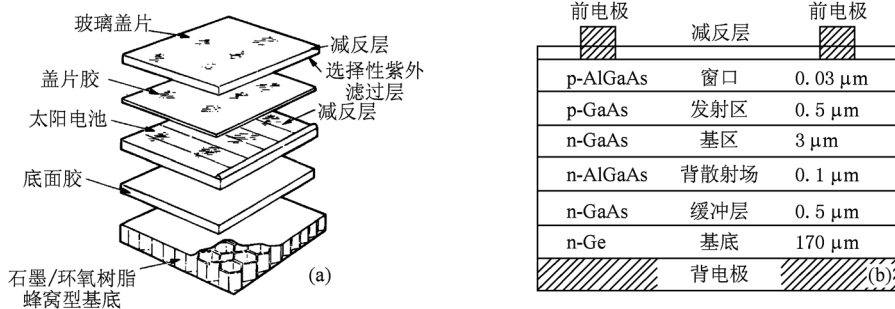


图 1 太阳电池阵及 GaAs/Ge 太阳电池结构图 (a) 太阳电池阵分解图; (b) GaAs/Ge 太阳电池结构图

件下,参照国家标准(PRC national standard, GB/T 6494—1986 [中华人民共和国国家标准, GB/T 6494—1986])对辐照前后电池样品性能参数(如短路电流 I_{sc} , 开路电压 V_{oc})进行测试.

2.2. 空间环境效应试验

低能带电粒子(质子和电子, $E < 200$ keV)辐照试验是在哈尔滨工业大学综合辐照试验设备上进行的. 该设备可以模拟空间高真空、冷黑背景及能量为 30—200 keV 的质子、电子辐照环境. 整套设备包括真空系统、质子/电子源、质子/电子加速器和控制系统四大部分. 试验中质子/电子束的流量通过束流密度控制,束流密度测量单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. 对于约为 $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 质子束流密度,相当于空间质子的流量为 $1.2 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 在试验中,每种辐照能量下,质子/电子辐照注量的变化范围为 1×10^{10} 至 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$.

高能质子(质子能量为 4 MeV 和 10 MeV)辐照试验是在中国原子能研究院串列质子静电加速器上进行. 1—2 MeV 高能电子辐照试验则是在新疆理化所 ELV-8 电子加速器上进行,辐照电子流量控制在 $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

3. 太阳能电池辐照性能退化分析与位移损伤剂量法评估过程

3.1. NIEL 与位移损伤剂量的计算

由于电池的辐照损伤主要是由于位移效应引起的,而不同能量的粒子辐照产生位移效应是可以通过某内在的参数来表达. NIEL 表达了辐照粒子传递给晶格原子并使其产生位移作用的比能量,其单位为能量与质量的比值,与电离吸收系数的单位相一致. 根据这个概念可以利用 Mont-Carlo 方法获得不同材料的 NIEL 值. 如图 2 为利用 SRIM 软件和 MCNP 软件计算得到的 GaAs 电池材料在质子和电子辐照下的 NIEL 值随粒子能量的分布情况.

图 2 的计算结果表明,随着电子能量的增加,其辐照产生的非电离能量损失增加,而质子辐照产生的位移效应随能量的增加而降低. 这一结果与 JPL 等效注量法中,等效损伤系数随粒子能量变化的规律一致(低能质子辐照除外),即增加辐照质子的能量,太阳能电池的电性能衰减小,而电子的作用相

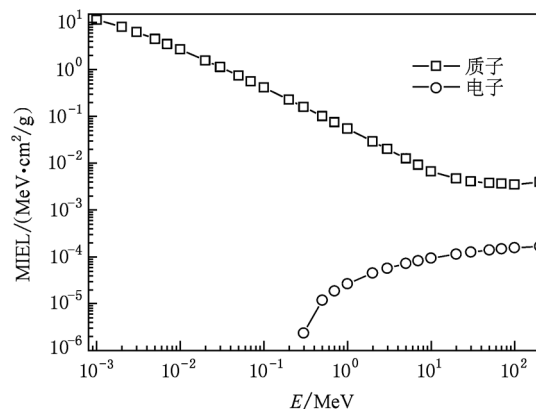


图 2 不同能量下质子和电子辐照 GaAs/Ge 电池时的非电离能量损失(NIEL)

反. 同时,具有非电离能量损伤的最低能量,对质子来说这个阈值很低(在 10^{-4} MeV 量级),而对电子来说约为 10^{-1} MeV 量级,差别大. 这与产生位移效应的最低能量(导致 GaAs 产生位移效应的最低质子阈值能量约为 195 eV,而最低电子的阈值能量约为 245 keV^[17])相一致. 有趣的是, GaAs 太阳电池在质子辐照下的 NIEL 大小随着质子能量的增加而几乎成线性规律下降.

将 NIEL 与粒子辐照注量的乘积定义为辐照位移损伤剂量(displacement damage dose),记为 D . 如果是质子辐照,则记为

$$D_p = \Phi_p(E) \times \text{NIEL}(E), \quad (2)$$

其中 Φ 为粒子注量, $\Phi_p(E)$ 表示为能量为 E 的质子的注量. 对于空间连续质子谱,总的等效位移损伤剂量为

$$D_p = \int \frac{d\Phi_p(E)}{dE} \text{NIEL}(E) dE. \quad (3)$$

电子辐照产生的位移损伤剂量的计算有些特殊,这主要是由于电子辐照产生的损伤系数与 NIEL 值不成线性关系^[17],因此利用上述的粒子注量与 NIEL 值的乘积所的结果为自变量,电池辐照性能的变化并不能重合在一条曲线上(即与质子辐照的情况不同). 为了获得损伤系数与 NIEL 值的线性关系,利用等效注量法中的等效损伤系数的概念^[17],对电子辐照的实际损伤剂量进行修正,修正后的电子损伤剂量为等效损伤剂量. 具体的方法如下.

将所有能量电子辐照的位移损伤剂量等效成 1 MeV 电子辐照的等效损伤剂量,即按照方程(4)计算出相应能量的等效位移损伤剂量,利用系数 n 的取值来修正不同能量的电子的损伤剂量对太阳电

池性能影响的差异. 如果是计算空间电子能谱的等效位移损伤剂量则可按方程(5)进行计算.

$$D_{e,eff} = D_e(E) \left[\frac{NIEL(E)}{NIEL(1.0)} \right]^{n-1} = \Phi_e(E) \times NIEL(E) \left[\frac{NIEL(E)}{NIEL(1.0)} \right]^{n-1}, \quad (4)$$

$$D_{e,eff} = \frac{1}{NIEL(1.0)^{n-1}} \int \frac{d\Phi_e(E)}{dE} NIEL(E)^n dE, \quad (5)$$

其中 $\Phi_e(E)$ 表示为能量为 E 的电子的注量, $D_{e,eff}$ 为等效电子位移吸收剂量.

3.2. GaAs 太阳电池电性能退化随位移损伤剂量演化规律

首先通过对 GaAs/Ge 太阳电池进行了不同能量和注量的电子和质子辐照实验以及测量了辐照前后的电池的电学性能的变化, 获得了 GaAs/Ge 太阳电池的性能随粒子辐照注量的退化曲线, 如图 3 (a) — (c) 分别为利用归一化的 (辐照过程中的性能参数与相应的辐照前的初始值的比值) 最大功率 P_{max} (Normalized P_{max})、开路电压 V_{oc} (Normalized V_{oc})、

短路电流 I_{sc} (Normalized I_{sc}) 的演化曲线, 与文献所给出的曲线如图 3 (d) 不同的是, 在本文的试验中对低于 170 keV 的质子辐照进行了考察. 在这些性能退化曲线中, 直接决定太阳电池寿命的性能是最大功率, 因而常用该曲线作为评估太阳电池退化程度的指标.

根据位移损伤剂量的原理, 将各能量下电池性能随注量变化的试验数据转化为位移损伤剂量的变化函数 (如图 4). 如图 4 (a) 可见虽然不同能量的质子辐照下砷化镓太阳电池电性能随辐照注量 (见图 3) 变化曲线完全不重合, 但是将自变量由粒子辐照注量转变为位移损伤剂量 D_d 后, 除低能质子辐照后电池性能退化曲线偏离外, 在其他能量 ($E \leq 170$ keV) 质子辐照下电池性能退化曲线几乎完全重合, 而趋向于一条特征退化曲线 (图 4 (a)). 这说明在实际中可以用某一能量的质子辐照试验来等效空间轨道质子谱的辐照效应.

相应的, 不同能量的电子辐照条件下太阳电池的性能退化, 必须按照方程 (4) 给出的方法进行等效, 对本文所研究的 GaAs/Ge 太阳电池而言, 经过

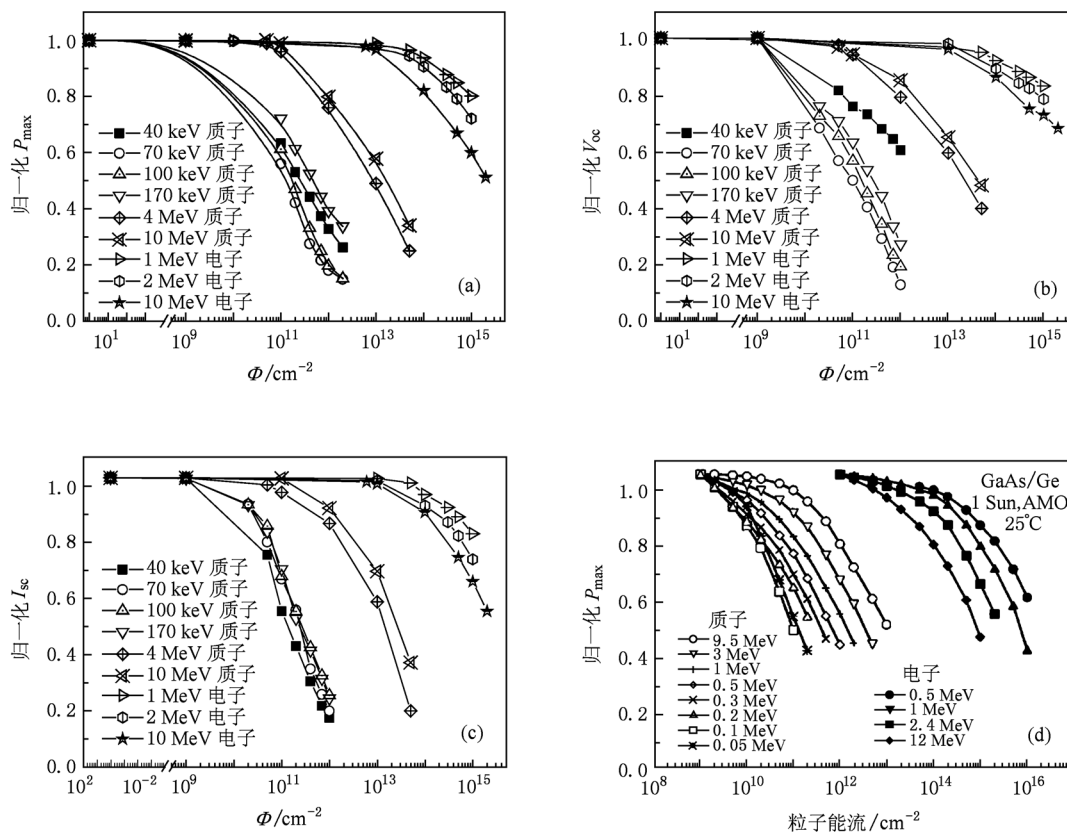


图 3 质子和电子在不同的能量条件下辐照电池电性能随辐照注量变化曲线 (a), (b) 和 (c) 分别表示本研究中电池的 P_{max} , V_{oc} 和 I_{sc} 试验结果; (d) 美国 NASA 报告及相关文献^[17]

计算得到修正指数因子 $n = 1.7$, 然后将经过计算后的等效损伤剂量作为自变量, 就会发现不同能量电子辐照后太阳电池的电性能退化曲线就重合成一条特征曲线, 如图 4(b) 所示.

为了将位移损伤剂量作为地面试验与空间能谱间的等效参量, 除了将不同能量的质子辐照损伤剂量以及不同能量的电子辐照损伤剂量进行等效 (这一点可以从图 4(a) 及(b) 的重合特征曲线上看出等效性) 外, 还必须保证将电子和质子两种不同种类粒子辐照产生的位移损伤剂量具有完全的等

效性. 也就是说, 如果将图 4(a) 和(b) 的相关数据置于同一个坐标下, 电子辐照和质子辐照导致性能的退化曲线应完全重合. 实际上, 上述曲线不能完全重合. 但是在电子辐照位移损伤剂量上除以一个系数可使二者重合, 该系数记为 R_{ep} . 也就是说对电子辐照而言, 将其位移效应与质子辐照相等效是将方程(4) 进行修正:

$$D_{e/p, \text{eff}} = \frac{1}{R_{ep}} D_e(E) \left[\frac{\text{NIEL}(E)}{\text{NIEL}(1.0)} \right]^{n-1}. \quad (6)$$

对国产 GaAs 而言, 经过计算可获得 $R_{ep} = 5.2$.

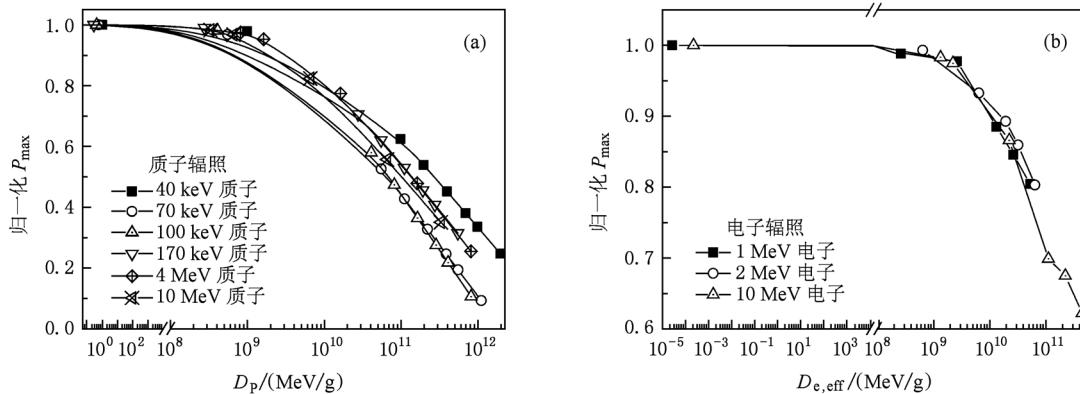


图 4 GaAs 太阳电池最大输出功率随带电粒子辐照的损伤剂量的变化曲线 (a) 质子辐照; (b) 电子辐照

于是, 以位移损伤剂量作为辐照参量时, 图 3(a) — (c) 中的众多电性能退化曲线 (以带电粒子注量为自变量) 重合, 而趋向于一条特征退化曲线 (见图 5), 它与粒子的种类、能量无关, 这是等效模拟中至关重要的基础. 根据太阳电池光电转化的基本原理及辐照位移损伤导致的载流子寿命 (自由程) 变化规律并参考方程(1), 可以给出太阳电池电性能退化随位移损伤剂量变化应遵从对数规律:

$$\frac{P_{\max}(D_d)}{P_0} = 1 - C \cdot \log \left[1 + \frac{D_d}{D_x} \right], \quad (7)$$

D_d 为总位移损伤剂量, D_x 为特征位移损伤剂量, P_0 为辐照前太阳电池最大功率. 如果将图 5 中的特征曲线拟合, 便可以得到单结 GaAs 太阳电池的性能退化规律如下:

$$P_{\max}/P_0 = 1 - 0.135 \ln \left(1 + \frac{D_d}{3.52 \times 10^9} \right). \quad (8)$$

由此可见评价一种新型太阳电池退化、预测其寿命, 利用位移损伤剂量法只需要很少的实验就可以进行. 对于质子辐照, 若质子的射程穿透电池结区而产生均匀损伤, 只需要考察一个能量下

的电性能随位移损伤剂量的退化曲线, 就可以完全预测其他能量质子辐照后的电池的电性能退化行为; 而对于电子辐照由于存在等效指数 n , 则需要两个能量下性能退化曲线来获得 n 值并预测其他能量电子辐照的电池的行为. 地面试验中只需给出一个能量质子和二个能量的电子辐照下太阳电池性能退化曲线, 并运用 NIEL 数据求出其他能量和注量下电池辐照后的电性能退化规律, 既简单, 又方便. 从而利用轨道空间带电离子辐射谱计算出相应时间内的辐照位移损伤剂量, 并利用上述方程(6) 的拟合结果, 求得性能退化特征曲线 (见方程(7)), 进一步预测电池电性能变化的规律及使用寿命.

由图 5 还可以看到, 对于高能质子和高能电子而言, 将辐照注量变为辐照位移损伤剂量后, 所得的数据点完全落在拟合曲线上, 但是对低能质子而言并不完全重合. 这说明利用位移损伤剂量法对在轨服役太阳电池的辐照损伤进行等效评估时, 低能质子的影响必须充分考虑. 上述曲线中的偏差表明, 当质子能量较低 ($< 70 \text{ keV}$) 时太阳电

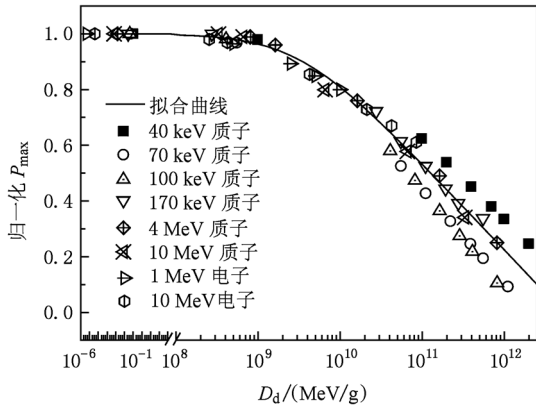


图5 不同能量粒子(质子和电子)辐照下太阳能电池输出功率随位移损伤剂量衰减曲线

池的最大输出功率退化较慢,而当质子能量约为70—170 keV时,太阳电池的性能退化更严重.当质子能量在170 keV以上时,电池的辐照损伤过程符合高能带电粒子的损伤特征,得到的电性能随位移剂量退化数据完全重合于一条曲线之上.上述现象的产生是不同能量的质子辐照会导致电池不同功能区的损伤的结果.图6给出了通过SRIM程序计算的低能质子辐照产生的缺陷分布特征,可见40 keV质子辐照在单结电池中的射程在电池的发射区内,当质子能量为70 keV和100 keV时,质子射程在GaAs太阳电池的结区,结区损伤最大,此时太阳电池的损伤最大,以致电池电性能退化最为显著.当质子的能量大于170 keV时,射程达到太阳电池基区底部或者穿过了整个电池,因此在电池中产生了均匀的辐照损伤.对电子辐照而言,电池电性能随辐照位移损伤剂量曲线完全重合,不随着电子能量而产生偏差.这主要是由于只有在电子的能量大于245 keV时才能在GaAs中产生位移损伤效应,而此时电子的射程已远远超过单结GaAs/Ge太阳电池的基区底部,产生的都是均匀损伤.由此可见,当带电粒子辐照射程远超过电池的结区时,辐照在电池中产生均匀损伤,此时电池的电性能退化随着相应的位移损伤剂量的规律是完全一致的,不随带电粒子的能量和种类而变化.但是对低能质子而言,由于在电池中造成了不均匀损伤,太阳电池电性能退化规律会随电池损伤区域的不同而与均匀辐照损伤规律产生偏差,需要进一步的研究分析.

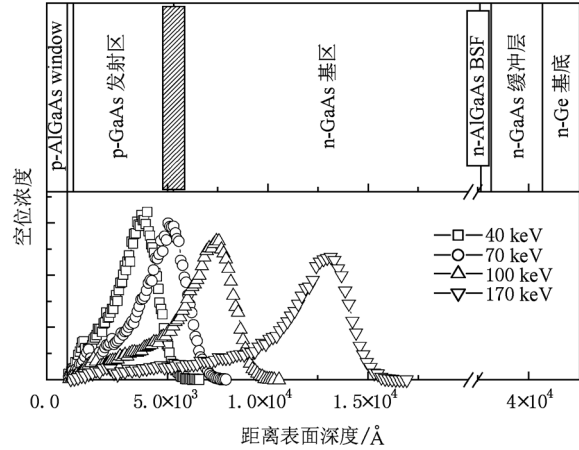


图6 SRIM计算低能质子辐照在GaAs/Ge电池中的射程及产生空位浓度与电池的结构参数对比示意图

4. 利用位移损伤剂量法评估盖片对GaAs/Ge太阳电池的防护效果

通常对于太阳电池盖片防护效果的评价采用不同玻璃盖片防护后的等效损伤系数与相应的人射粒子能谱乘积并进行积分获得了玻璃盖片防护后太阳电池受到的等效注量.利用此评价方法来评价一种新型太阳电池就需要对加盖不同厚度的太阳电池进行实验、获得相应的等效损伤系数.后来研究者的目光转到了相对简便的位移损伤剂量法上,Summer^[23,24]计算了1000 km,2000 km,5000 km轨道上根据AP8MAX质子能谱模型,利用Monte-Carlo方法获得了透过不同厚度SiO₂盖片后的能谱,计算了相应的位移损伤剂量评价了盖片厚度对质子损伤的影响.而对典型轨道上的主要的带电粒子环境,如辐射带电子/质子,太阳质子,银河宇宙射线质子等全面的研究还未见报道.因此本文将此项工作进一步发展,以500 km太阳同步轨道为例考察了玻璃盖片对主要带电粒子环境损伤防护的效果.最后列出了其他两个典型轨道22000 km,36000 km的计算结果.

500 km轨道带电粒子环境可以通过相关轨道模型计算获得相应的轨道能谱,选取AP-8^[25]模拟辐射带质子、AE-8^[26]模拟辐射带电子、JPL-91^[27]模拟太阳宇宙射线质子,以及CR₈₀ME-86^[28]模拟银河宇宙射线质子.利用Monte-Carlo程序Geant4计算了各粒子能谱通过不同厚度的玻璃盖片后的能谱,然后再根据上述的位移损伤剂量的计算方法获得相应

的位移损伤剂量. 结果如图 7 所示, 由图中可见对于质子而言, 低于 10 MeV 的质子的位移损伤剂量发生了变化; 电子的变化不明显. 这与玻璃的屏蔽效果有

关, 过去的研究结果表明了^[23,24] 玻璃对带电粒子的屏蔽只对一定较低能量范围内的粒子有明显的效果. 并且随能量的升高, 屏蔽效果逐渐降低.

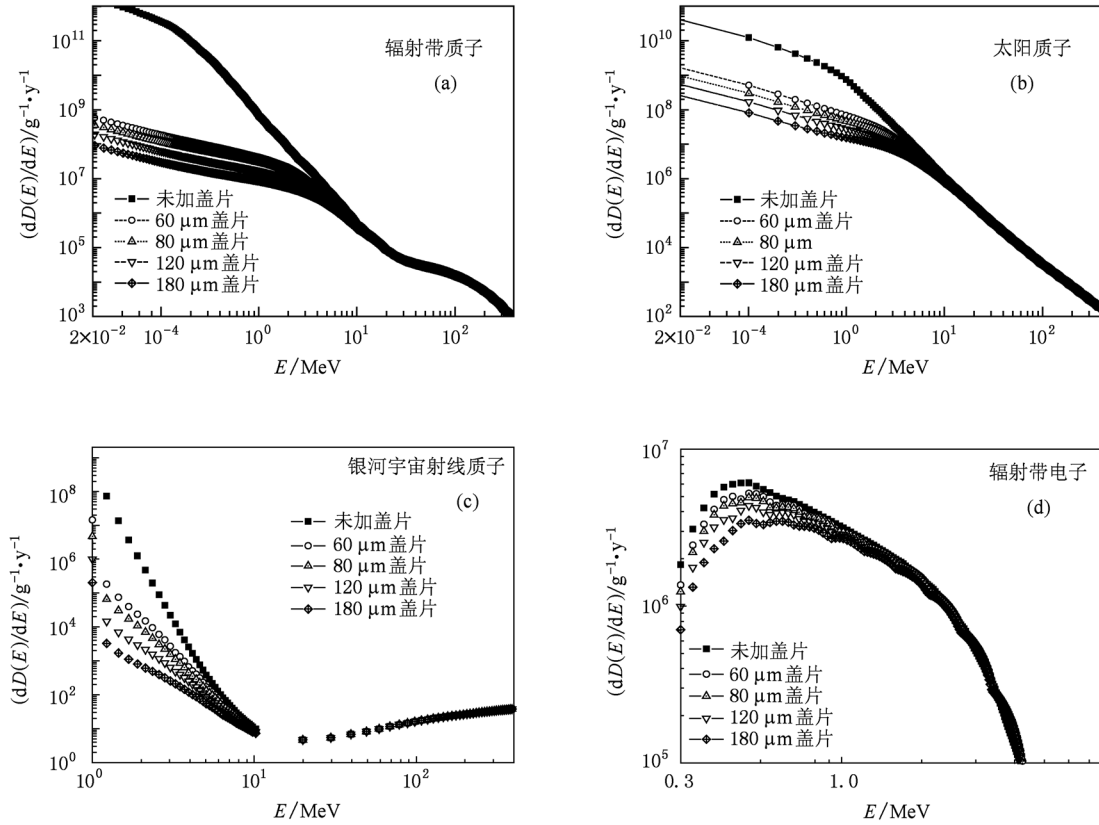


图 7 500 km 带电粒子受玻璃屏蔽后能谱及位移损伤剂量微分能谱 ($dD(E)/dE$) (E_p 为质子能量, E_e 为电子能量) (a) 辐射带质子情况; (b) 太阳质子情况; (c) 银河宇宙射线质子情况; (d) 辐射带电子情况

对能谱进行积分得到如图 8 所示的结果, 从质子的防护结果来看, 加盖 60 μm 玻璃片后, 质子的位移损伤剂量的改变最大, 其中辐射带质子产生的位移损伤剂量下降了 3 个量级, 银河质子下降了 3 个量级, 太阳质子下降了 1 个量级. 随玻璃盖片的厚度的增加, 位移损伤剂量下降程度减缓, 甚至到 180 μm 时, 剂量变化都在同一个量级. 同时值得注意的是, 由于辐射带质子的位移损伤剂量本身就高于其他粒子, 而它的变化程度又是最大的, 因此辐射带质子的位移损伤降低的绝对值要远远大于其他粒子. 因而从总的位移损伤剂量的衰降曲线来看, 最开始当辐射带质子下降的时候, 总的位移损伤剂量下降程度较大, 然后辐射带质子的位移损伤剂量下降到太阳质子的位移损伤剂量以下, 此时太阳质子的衰降曲线“牵制”住了总剂量曲线的衰降. 从上述结果可以发现当玻璃盖片增加到一定厚度时, 玻璃

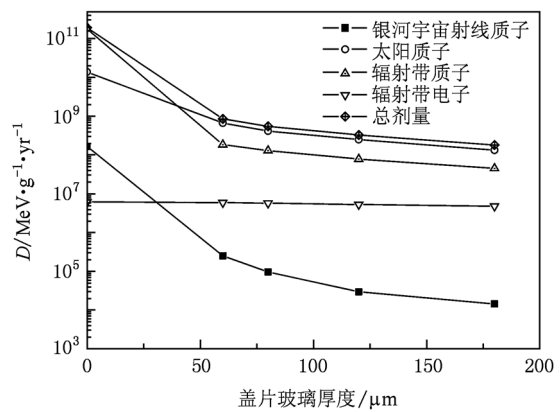


图 8 500 km 带电粒子受盖片屏蔽后太阳能电池积分位移损伤剂量

的防护效果不再增加, 达到一种“饱和”状态, 这提供了优化玻璃厚度的一个证据, 从总剂量衰降来看 60 μm 左右的厚度是衰降速度变化的重要转折点,

此后防护效果随厚度变化很小,因此可以断定这个厚度的盖片应是最佳的厚度.

利用与 500 km 轨道相同的方法,对 22000 km 地球轨道和 36000 km 地球同步轨道的情况进行了研究. 相应结果如图 9 给出,可见玻璃盖片对于太阳

电池防护的效果与 500 km 轨道时相近. 特殊的是在 36000 km 轨道辐射带质子部分由于其能量很低(小于 3 MeV),该能量范围恰恰是能够玻璃盖片全部屏蔽的能量范围内^[23,29],因此最终的总的位移损伤剂量中,辐射带质子没有贡献.

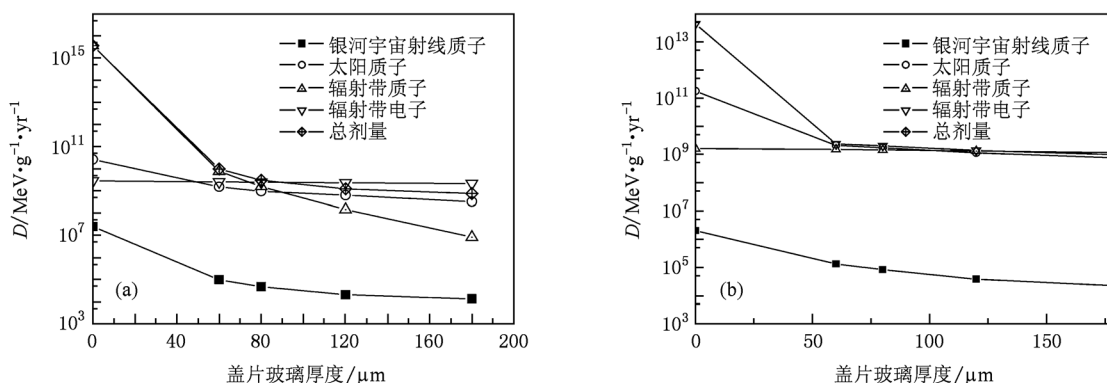


图 9 22000,36000 km 带电粒子受盖片屏蔽后太阳电池积分位移损伤剂量 (a)22000 km; (b)36000 km

5. 结 论

1. 本文通过研究国产单结 GaAs/Ge 太阳电池在不同能量电子和质子辐照后电性能退化过程,利用非电离能量损失(NIEL)和位移损伤剂量的概念,确定了单结 GaAs 太阳电池的电性能随辐照位移损伤剂量的变化规律,退化方程为

$$P_{max}/P_0 = 1 - 0.135 \ln \left(1 + \frac{D_d}{3.52 \times 10^9} \right).$$

当带电粒子在 GaAs/Ge 电池中的射程到达基区底部时,其在电池中产生了均匀损伤,此时上述方程与辐照粒子的种类(质子、电子)和能量无关.

2. 质子能量大于 170 keV 时对单结 GaAs 太阳电池的辐照损伤是均匀的. 当质子能量约为 70—

100 keV 时,质子射程在电池的结区,对太阳电池的辐照损伤最大.

3. 对于国产单结 GaAs/Ge 太阳电池,使用位移损伤剂量对电子辐照效应进行评估时,须按照下属方程计算相应的位移损伤剂量:

$$D_{e/p,eff} = \frac{1}{R_{ep}} D_e(E) \left[\frac{NIEL(E)}{NIEL(1.0)} \right]^{n-1},$$

其中 $n = 1.7, R_{ep} = 5.2$.

4. 利用位移损伤剂量研究 500 km 轨道带电粒子受到盖片屏蔽的结果显示,60 μm 的玻璃盖片是一个较优化的厚度,大于这个厚度屏蔽效果增加不明显.

5. 22000 km, 36000 km 情况与 500 km 相同,玻璃盖片在 60 μm 的厚已经能够达到最佳的屏蔽效果.

[1] Anspaugh B E 1996 *GaAs Solar Cell Radiation Handbook* (Pasadena:JPL Publication) p 1—2
 [2] de Angelis N, Bourgoin J C, Takamoto T, Khan A, Yamaguchi M 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **66** 495
 [3] Haapamaa J, Pessa M, Roche G La 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **66** 573
 [4] Li B, Xiang X B, You Z P, Xu Y, Fei X Y, Liao X B 1996 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **44** 63
 [5] Bourgoin J C, de Angelis N 2001 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **66** 467

[6] Zhang Z W, Lu J F, Chi W Y, Wang L X, Cheng M B 2003 *Aerospace Shanghai* **3** 33 (in Chinese) [张忠卫、陆剑锋、池卫英、王亮兴、陈鸣波 2003 上海航天 **3** 33]
 [7] Chen T J 1997 *Semicond. Optoelectronics* **18** 56 (in Chinese) [陈庭金 1997 半导体光电 **18** 56]
 [8] Shi X Z, Li S Q, Yan H P, Ding D H 1995 *Semicond. Optoelectronics* **16** 313 (in Chinese) [施小忠、李世清、鄢和平、丁隽华 1995 半导体光电 **16** 313]
 [9] Wang R, Zhang X H, Guo Z L 2003 *Nucl. Techni.* **26**(6) 1 (in Chinese) [王 荣、张新辉、郭增良 2003 核技术 **26**(6) 1]

- [10] Sheila G, Bailey, Dennis J, Flood 1998 *Progr. Photovoltaics Res. Applicat* **6** 1
- [11] Robert Y, Loo G, Sanjiv K, Sheng S L 1990 *IEEE Trans. Electr. Dev.* **37** 485
- [12] Ewan J, Kamath G S, Knechtli R C 1975 *Proceedings of the 11th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* New York May 6—8 p509
- [13] Michel R, Philippe A 1985 *J. Appl. Phys.* **57** 5192
- [14] Hu J M, Wu Y Y, Zhang Z W, Yang D Z, He S Y 2008 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **266** 267
- [15] Hu J M, Wu Y Y, Yang D Z, He S Y 2008 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **266** 3577
- [16] Zhao H J, He S Y, Sun Y Z, Sun Q, Xiao Z B, Lv W, Huang C Y, Xiao J D, Wu Y Y 2009 *Acta. Phys. Sin.* **58** 404 (in Chinese)[赵慧杰、何世禹、孙彦铮、孙强、肖志斌、吕伟、黄才勇、肖景东、吴宜勇 2009 物理学报 **58** 404]
- [17] Summers G P, Messenger S A, Walters R J, Burke E A 2001 *Progr. Photovoltaics Res. Applicat.* **9** 103
- [18] Chen P X 2005 *Radiation effects on semiconductor devices and integrated circuits* (Beijing: National Defence Industry Press) p28—37 (in Chinese)[陈盘训 2005 半导体器件和集成电路的辐射效应(北京:国防工业出版社)第28—37页]
- [19] Cao J Z 1993 *Radiation effects in material of semiconductor* (Beijing: Science Press) p 25—43 (in Chinese)[曹建中 1993 半导体材料的辐照效应(北京:科学出版社)第25—43页]
- [20] Messenger S R, Burke E A, Morton T L, Summers G P, Walters R J, Warner J H 2003 *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* Osaka, Japan May 11—18, 2003 p716—719
- [21] Morton T L, Chock R, Long K J, Bailey S, Messenger S R, Walters R J, Summers G P 1999 *Progr. Photovoltaics Res. Applicat.* **7** 228
- [22] Anspaugh B E 1991 *Proceedings of the 22nd IEEE Photovoltaic Specialist Conference* Las Vegas, 1991 p1593—1598
- [23] Summers G P, Messenger S R, Burke E A, Xapsos M A, Walters R J 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 832
- [24] Summers G P, Messenger S R, Burke E A, Xapsos M A, Walters R J 1997 *Progr. Photovoltaics Res. Applicat.* **5** 407
- [25] Sawyer D M, Vette J I 1976 *NSSDC/WDC-A-R&S* 76-06
- [26] Vette J I 1991 *NSSDC/WDC-A-R&S* 91-24
- [27] Feynman J, Spitale G, Wang J, Gabriel S 1993 *J. Geophys. Res.* **98** 281
- [28] Mayer P, Ramaty R, Webber W R 1974 *Phys. Today* **27** 23
- [29] Takamoto T, Okazaki H, Takamura H, Ohmori M, Ura M, Yamaguchi M 1990 *Indium Phosphide and Related Materials*, 1990. *Second International Conference* Denver Apr 23—25 1990 p62—65

Radiation damage of space GaAs/Ge solar cells evaluated by displacement damage dose*

Wu Yi-Yong^{1)†} Yue Long¹⁾ Hu Jian-Min²⁾ Lan Mu-Jie³⁾ Xiao Jing-Dong¹⁾
Yang De-Zhuang¹⁾ He Shi-Yu¹⁾ Zhang Zhong-Wei⁴⁾ Wang Xun-Chun⁴⁾
Qian Yong⁴⁾ Chen Ming-Bo⁴⁾

1) (*Harbin Institute of Technology, School of Material Science and Engineering, Harbin 150001, China*)

2) (*Harbin Normal University, School of Physics and Electronic Engineering, Harbin 150001, China*)

3) (*Harbin Institute of Technology, School of Astronautics, Harbin 150001, China*)

4) (*Shanghai Institute of Space Power-sources, Shanghai 200233, China*)

(Received 13 May 2010; revised manuscript received 27 December 2010)

Abstract

In this paper, the degradation of irradiated GaAs/Ge single junction (SJ) solar cells is evaluated under the orbital environments using the displacement damage dose method. Firstly the electric-property changes of the SJ solar cells are experimentally obtained with the fluencies of electrons and protons of various energies under ground-based irradiation simulators. Based on the experimental results and the calculated non-ionization energy losses (NIELs) of the electrons and protons in GaAs, the equivalent exponent n is obtained to be 1.7 for various electron energies, while the equivalent coefficient R_{ep} for electron displacement damage converted into that of protons is 5.2. Furthermore, a degradation formula of the electrical property of the domestic SJ solar cell is established as a function of displacement damage dose during the particle irradiation. Using the displacement damage technique, the orbital evolution of the electric property degradation of the domestic SJ cell is predicted in this paper. In the meantime, the shielding effects of the cover glass with different thicknesses are also evaluated.

Keywords: GaAs/Ge solar cells, radiation damage, charged particles, displacement damage dose

PACS: 81.40.Wx, 88.40.hj, 07.89.+6

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11075043).

† E-mail: wuyiyong2001@yahoo.com.cn