

高效插指背接触太阳能电池质子辐照效应研究^①

邱 岚^{②*} 胡 莉^{**}

(* 江西科技学院信息工程学院 南昌 330098)

(** 河北师范大学信息技术学院 石家庄 050024)

摘 要 利用 TCAD 半导体器件仿真软件对低轨道卫星用高效插指背接触(IBC)单晶硅太阳能电池的质子辐照效应进行研究。首先分析了质子辐照剂量和辐照能量对太阳能电池外量子效率、转换效率的影响。然后在不同质子辐照剂量情况下,详细地分析了原材料衬底电阻率和衬底厚度对太阳能电池电学性能的影响。仿真结果表明:存在质子辐照剂量阈值(约为 $1 \times 10^9 \text{ P/cm}^2$),当质子辐照剂量低于该阈值时,电池转换效率及其变化率均较小。当质子辐照剂量一定时,随着衬底厚度的增大,太阳能电池转换效率随之先增大后减小。随着质子辐照剂量的增大,峰值转换效率对应的衬底厚度减小。在较高的质子辐照剂量的情况下,薄衬底不仅有利于提高太阳能电池的转换效率,而且也有利于降低转换效率变化率。当质子辐照剂量较高($1 \times 10^{10} \text{ P/cm}^2$ 和 $1 \times 10^{11} \text{ P/cm}^2$)时,随着衬底电阻率增大,转换效率随之增大。当质子辐照剂量一定时,随着衬底电阻率增大,转换效率变化率的绝对值随之降低。

关键词 太阳能电池, 质子辐照, 量子效率, 转换效率, 衬底结构, 优化

0 引 言

在近地轨道(低于 3.8 倍地球半径的轨道),在轨卫星供电系统中的太阳能电池容易受到质子(被地球所磁场俘获)辐照损伤的影响^[1],将导致太阳能电池的电学性能发生退化。质子辐照损伤的影响程度与辐照能量、辐照剂量等有密切关系。深入研究空间太阳能电池在质子辐照过程中转换效率等电学参数的变化特点和规律,对提高空间供电系统的稳定性及准确评价低轨道星载太阳能电池的抗辐照能力具有重要意义。在实验室中使用的模拟辐照源大多为电离辐照源(X 射线和⁶⁰Co γ 射线)。在低轨道空间辐照环境中造成星载太阳能电池电学性能衰退或失效的辐照粒子主要为质子(有屏蔽材料的保护,电子的

影响可忽略^[2])。由于质子产生辐照损伤的机理与 γ 射线产生辐照损伤的机理不同,因此不能简单地通过实验室中 γ 射线辐照对太阳能电池转换效率等电学参数的作用结果来等价评估空间太阳能电池的抗质子辐照能力。由于高效单晶硅太阳能电池具有体内缺陷密度低(稳定性高)、机械强度高、转换效率高、工艺成熟等特点,因此被广泛用于空间领域执行任务,尤其对于近地轨道卫星(功率需求较低、辐射小)。

截止目前,国内外针对空间粒子辐照对太阳能电池电学性能的影响进行了较多研究^[3,4],但大多是关于砷化镓基多结太阳能电池或采用 γ 射线、X 射线等实验室常用的辐照源进行研究,针对低轨道星载高效单晶硅太阳能电池的质子辐照效应的研究报道较少。在高效单晶硅太阳能电池中,插指背结背接触

① 江西省教育厅科学技术研究项目(No. GJJ151149)资助。
② 女,1984 年生,硕士,高级工程师;研究方向:无线通信,信号处理;联系人,E-mail: jxkqiulan@163.com
(收稿日期:2018-04-07)

(interdigitated back contact, IBC)单晶硅太阳电池具有转换效率高(实验室效率达到 25.6%,产业化转换效率达 22%^[5])、易于组装等显著特点,较适合于空间应用。为了提高高效单晶硅太阳电池的抗质子辐照能力,以更好地满足航天任务需要,本文对高效插指背结背接触(IBC)单晶硅太阳电池的质子辐照效应进行了研究。由于抗质子辐照实验研究周期长、成本高,半导体器件仿真软件有助于直观清晰地分析各个不同时间点、不同剂量及不同剂量率辐照对太阳电池电学性能的影响。鉴于此,本文利用 TCAD 半导体器件仿真软件对低轨道卫星用高效背结背接触(IBC)单晶硅太阳电池的质子辐照效应进行研究。首先详细地分析了质子辐照能量、辐照剂量对 IBC 太阳电池外量子效率、转换效率的影响。然后以改善太阳电池转换效率及转换效率变化率为目标,在不同质子辐照剂量情况下,着重分析了衬底电阻率、衬底厚度对太阳电池电学性能的影响,并给出了质子辐照环境中较适宜的衬底电阻率和衬底厚度。本文研究结果可为空间用高效单晶硅太阳电池的设计和制备提供有意义的参考信息。

1 太阳电池结构及模型选择

图 1 为低轨道星载高效 IBC 单晶硅太阳电池的单元结构剖面图。在仿真过程中,参考低成本(采用热扩散、丝网印刷、激光刻蚀等低成本工艺)产业化 IBC 单晶硅太阳电池结构参数^[6-8]。选择的电池基本结构参数为:单元电池宽度(电池背面相邻的阳极与阴极中点间的距离 W)为 $1000\mu\text{m}$,N 型单晶硅衬底厚度(T)为 $180\mu\text{m}$,晶向为 $\langle 100 \rangle$,衬底掺杂浓度均匀,单晶硅电阻率为 $2\Omega \cdot \text{cm}$,衬底少子寿命为 1ms 。阴极、阳极引线孔半宽度为 $100\mu\text{m}$,背表面非电极接触区域采用氮化硅钝化,阴极、阳极铝电极均位于太阳电池背面,阴极、阳极厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 。阴极-阳极间距 $50\mu\text{m}$ 。 P^+ 发射区表面浓度为 $5 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$,发射结结深为 $1\mu\text{m}$,杂质浓度分布为高斯分布,发射区半宽度(W_3)为 $800\mu\text{m}$ 。 N^+ 背表面场表面浓度为 $5 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$,扩散深度为 $1\mu\text{m}$,杂质浓度分布为高斯分布,背表面场半宽度(W_1)为

$150\mu\text{m}$,发射区与背表面场间距(W_2)为 $50\mu\text{m}$ 。N 型前表面场为均匀掺杂,掺杂浓度为 $5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$,前表面场厚度为 $0.2\mu\text{m}$ 。前表面减反射膜-硅界面复合速率为 100cm/s ,电池背面非电极接触区域界面复合速率为 50cm/s ,电极-硅界面复合速率为 $1 \times 10^7\text{cm/s}$ 。为降低太阳电池前表面入射光的反射损耗,太阳电池前表面采用 Si_3N_4 - SiO_2 双层减反射膜, Si_3N_4 减反射膜折射率实部为 2.05,厚度为 69nm , SiO_2 减反射膜折射率实部为 1.46,厚度为 94nm 。假设各层减反射膜均为无耗介质(即忽略各层减反射膜的介电常数虚部)。金字塔高度(T_1)为 $3\mu\text{m}$,侧壁与水平方向夹角为 54.7° 。

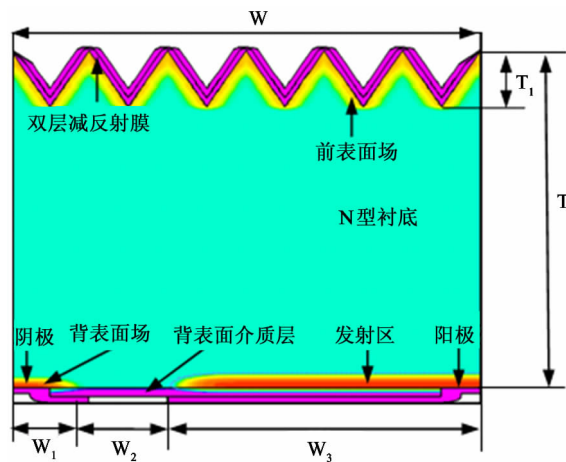


图 1 IBC 单晶硅太阳电池单元结构

质子辐照过程将在太阳电池单晶硅材料中产生光生载流子的陷阱和复合中心(两者同时存在,假设两者在单晶硅材料中均匀分布)。陷阱和复合中心将加剧光生载流子的复合损耗,从而影响太阳电池的电学性能。少子寿命是太阳电池内杂质和缺陷的综合反映,质子辐照后太阳电池电学性能的变化主要由质子辐照后产生的陷阱和复合中心对电池内少子寿命的影响决定。质子辐照后太阳电池内少子寿命可表示为^[9]

$$\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_T} \quad (1)$$

$$\tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_T} \quad (2)$$

其中, τ_p 和 τ_n 分别为质子辐照环境中,在陷阱和复合中心的影响下,单晶硅材料中空穴和电子寿命;

N_T 为质子辐照在太阳电池内产生的陷阱和复合中心密度; v_{th} 为载流子热运动速度($2.3 \times 10^7 \text{ cm/s}$); σ_p 和 σ_n 为分别为空穴和电子的俘获界面。陷阱和复合中心在硅材料禁带中能级所起的作用取决于该能级对电子和空穴的俘获截面。在仿真过程中,硅材料内受主陷阱电子俘获截面为 $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$,受主陷阱空穴俘获截面为 $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$,施主陷阱电子俘获截面为 $1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$,施主陷阱空穴俘获截面为 $1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 。

为了准确地仿真质子辐照效应对高效硅太阳电池电学性能的影响,选择精确的载流子迁移率模型和复合模型。迁移率模型选择与掺杂浓度、晶格温度、电场强度相关的迁移率模型。复合模型选择了与温度相关的俄歇(AUGER)复合模型以及与掺杂浓度相关的SRH复合模型。

与晶格温度相关的俄歇复合模型表示为^[10]

$$\begin{aligned} R_{\text{Auger}} = & 1.83 \times 10^{-31} \left(\frac{T_L}{300} \right)^{1.18} (pn^2 - nn_i^2) \\ & + 2.78 \times 10^{-31} \left(\frac{T_L}{300} \right)^{0.72} (np^2 - pn_i^2) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, n 为电子浓度, p 为空穴浓度, n_i 为本征载流子浓度, T_L 为晶格温度。

与掺杂浓度和晶格温度相关的SRH复合模型表示为^[11,12]

$$TAUNO^{-1} = \left(\frac{1}{2.5 \times 10^{-3}} + 3.0 \times 10^{-13} \times N \right) \left(\frac{300}{T_L} \right)^{1.77} \quad (4)$$

$$TAUPO^{-1} = \left(\frac{1}{2.5 \times 10^{-3}} + 11.76 \times 10^{-13} \times N \right) \left(\frac{300}{T_L} \right)^{0.57} \quad (5)$$

其中, N 为半导体材料掺杂浓度, T_L 为晶格温度。

载流子迁移率与平行电场之间的关系可表示为^[13,14]

$$\mu_{n2} = 1000 \left(\frac{T_L}{300} \right)^{-1.5} \left[1/1 + \left(\frac{1000 \left(\frac{T_L}{300} \right)^{-1.5} \cdot E}{1.03 \times 10^7} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\mu_{p2} = 500 \left(\frac{T_L}{300} \right)^{-1.5} \left[1/1 + \left(\frac{500 \left(\frac{T_L}{300} \right)^{-1.5} \cdot E}{1.03 \times 10^7} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中, μ_{n2} 和 μ_{p2} 分别为考虑平行电场情况下的电子和空穴迁移率, E 为硅材料中的电场强度, T_L 是晶格温度。另外还考虑了重掺杂引起的禁带变窄效应和能带简并效应。模拟测试条件选择为空间用太阳电池标准测试方法,即:25℃,AM0 光谱,入射光垂直电池上表面入射,光强为 0.0925 W/cm^2 。

2 仿真结果及分析

图2为仿真得到的质子辐照剂量对空间用高效硅太阳电池外量子效率和转换效率的影响。在仿真过程中,质子辐照能量为1.8MeV,衬底电阻率为 $2 \Omega \cdot \text{cm}$,衬底厚度为 $180 \mu\text{m}$ 。由图2可见,存在质子辐照剂量阈值(约为 $1 \times 10^9 \text{ P/cm}^2$),当质子辐照剂量为该阈值时,太阳电池转换效率为22.07%。当质子辐照剂量大于该阈值时,随着质子辐照剂量的增大,太阳电池不同波段外量子效率及光电转换效率迅速降低。当质子辐照剂量达到 $1 \times 10^{12} \text{ P/cm}^2$ 时,太阳电池光电转换能力几乎丧失,该质子辐照剂量情况下换效率为0.08%。另外,由图2(a)外量子效率曲线可见,当质子辐照剂量大于阈值时,短波段外量子效率减小尤为显著。当质子辐照剂量为 $1 \times 10^{11} \text{ P/cm}^2$ 时,300nm波段的外量子效率几乎为0。原因为质子在太阳电池内产生损伤的机理主要为辐射粒子的“位移损伤效应”。本文所研究的IBC太阳电池中采用二氧化硅介质层,二氧化硅介质层可以起到降低前表面入射光反射损耗,并降低二氧化硅-硅界面光生载流子复合损耗的作用。虽然该介质层直接参与器件工作,但该介质层与场控器件及常规前结太阳电池中的氧化层不同。由于IBC太阳电池阴极和阳极均位于电池的背表面,因此在IBC太阳电池中的二氧化硅层上没有电压存在。在辐照电离过程中产生的电离载流子在二氧化硅层中不会发生迁移。电离的电子和空穴直接复合,从而不会发生空穴载流子被深能级陷阱俘获,成为固定正电荷的现象。因此,质子在IBC太阳电池内产生损伤的机理主要为位移损伤效应。“位移损伤效应”在半导体禁带中引入缺陷能级,可成为少子陷阱和复合中心,从而降低电池内少子寿命和少子扩

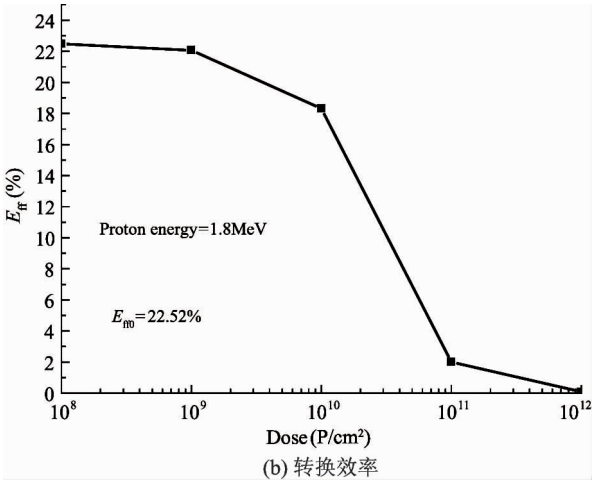
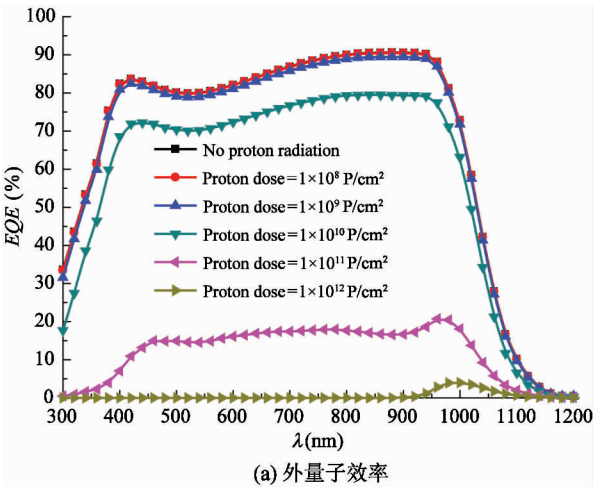


图2 质子辐照剂量对太阳电池输出特性的影响

散长度,增大光生载流子的复合损耗,从而对太阳电池电学性能产生显著影响。对于硅材料,所引入的能级较为对称地分布在禁带的上下两部分,因此,无论是N型衬底太阳电池还是P型衬底太阳电池,质子辐照都将使载流子浓度降低。随着质子辐照剂量的增大,载流子浓度向本征值漂移。图3为不同辐照能量的质子在硅材料中的注入深度和线性能量传递(linear energy transfer, LET)值^[2]。由图3可知,质子入射能量越高,入射深度越深,线性能量转移值(LET)越小,质子辐照能量越高,对太阳电池的影响越小。当低能质子的入射能量为1.8 MeV,在硅材料中的入射深度为25~42 μm。可在硅太阳电池中激发产生光生载流子的入射光波段范围为300~1200 nm,其中对于λ<900 nm范围内的入射光波段,

其在硅材料中的吸收深度为在该辐照能量下的质子入射深度范围内^[15,16],因此该波段入射光激发产生的光生载流子复合损耗较大,该波段外量子效率较低。

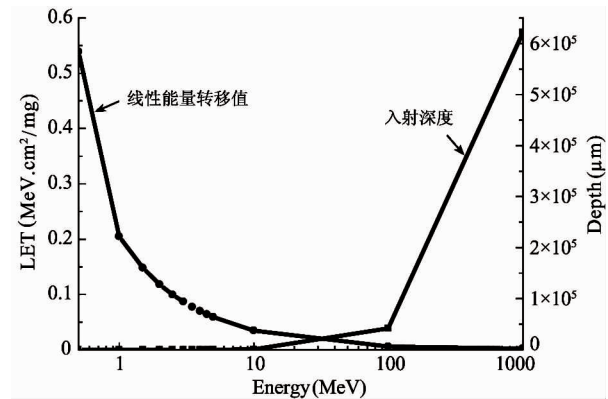


图3 不同入射能量的质子在硅材料中的入射深度和线性能量转移值

图4为仿真得到的在不同质子辐照剂量情况下,质子辐照能量对空间用高效硅太阳电池外量子效率和转换效率的影响。其中,图4(a)为质子辐照剂量为 $1 \times 10^{10} \text{ P/cm}^2$ 时的外量子效率曲线;图4(b)为质子辐照剂量为 $1 \times 10^{11} \text{ P/cm}^2$ 时的外量子效率曲线;图4(c)为两种不同辐照剂量情况下的转换效率曲线。由图4(a)可见:当质子辐照剂量为 $1 \times 10^{10} \text{ P/cm}^2$ 时,低能($E = 1.8 \text{ MeV}$)质子辐照对300~1200 nm波段的外量子效率影响较显著。而在质子辐照能量较高($E \geq 15 \text{ MeV}$)的情况下,质子辐照对300~1200 nm波段的外量子效率影响较小。由图4(b)可见:当质子辐照剂量为 $1 \times 10^{11} \text{ P/cm}^2$ 时,与图4(a)外量子效率曲线的变化特点类似。相比于图4(a),随着质子辐照剂量的增大,不同辐照能量情况下的外量子效率均随之降低,质子辐照能量越低,外量子效率降低的幅度越大。由图4(c)可见:当质子辐照剂量高达 $1 \times 10^{11} \text{ P/cm}^2$,辐照能量为1.8 MeV时,太阳电池转换效率降低至约2%。原因为低能质子的入射深度在入射光较宽波段的吸收范围内,在近地轨道,低能质子辐照的位移损伤效应对太阳电池电学性能的影响较显著。

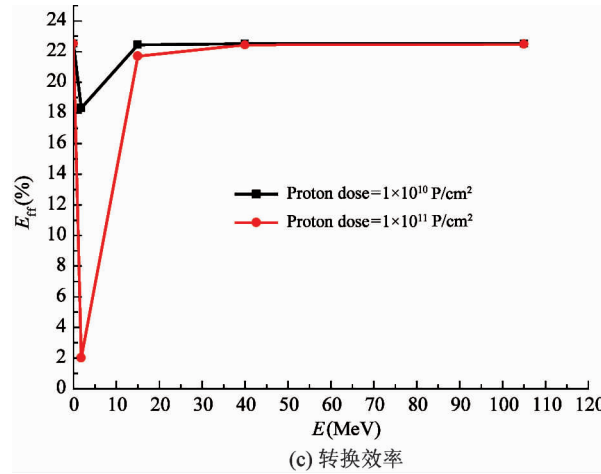
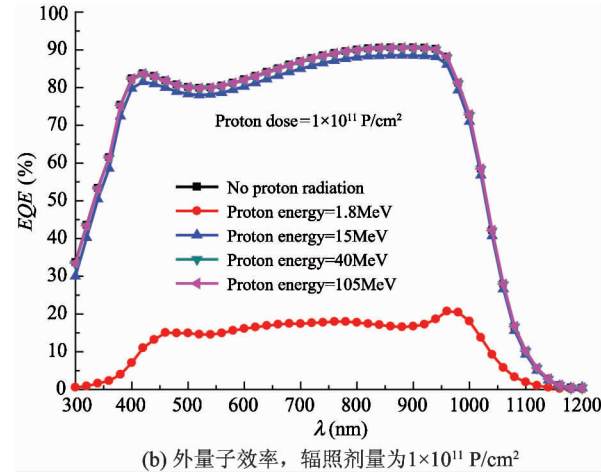
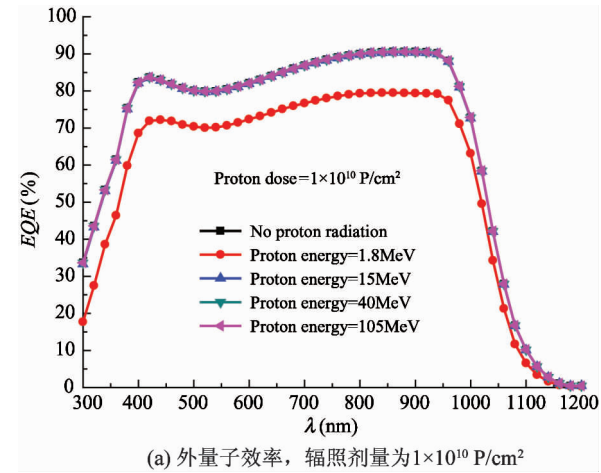


图 4 质子辐照能量对太阳能电池输出特性的影响

为进一步提高提高硅太阳能电池在质子辐照环境中电学性能的稳定性,需要对硅太阳能电池原材料及电池结构进行优化。图 5(a) 为仿真得到的衬底厚度对硅太阳能电池转换效率的影响。在仿真过程中,

衬底电阻率为 $2\Omega \cdot \text{cm}$ 。由图 5(a) 可见,当质子辐照剂量一定时,随着衬底厚度的增大,太阳能电池转换效率均呈现先增大后减小的变化特点,即存在最优的衬底厚度使得电池转换效率最高。随着质子辐照剂量的增大,峰值转换效率对应的最优衬底厚度减小,且峰值转换效率降低。当无质子辐照时,峰值转换效率(22.36%)对应的最优衬底厚度为 $130\mu\text{m}$;当质子辐照剂量为 $1 \times 10^{10} \text{ P/cm}^2$ 时,峰值转换效率(20.24%)对应的最优衬底厚度为 $70\mu\text{m}$;当质子辐照剂量为 $1 \times 10^{11} \text{ P/cm}^2$ 时,峰值转换效率对应的衬底厚度小于 $50\mu\text{m}$;当衬底厚度为 $50\mu\text{m}$ 时,对应的转换效率为 13.29%。对于衬底厚度未经优化的产业化太阳能电池(衬底厚度为 $180 \sim 200\mu\text{m}$),当质子辐照剂量为 $1 \times 10^{11} \text{ P/cm}^2$ 时,转换效率低至 5% 以下。原因在于随着质子辐照剂量的增大,光生载流

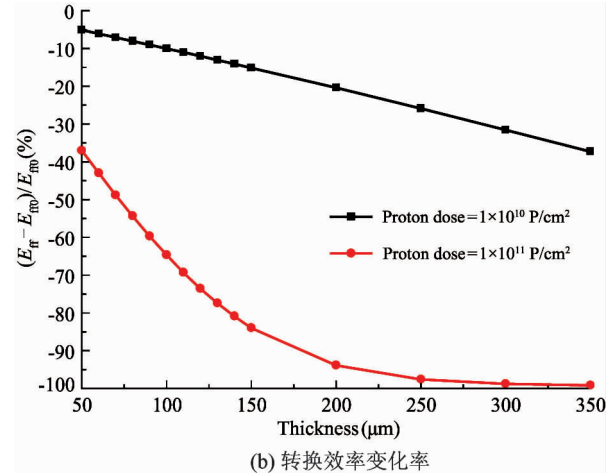
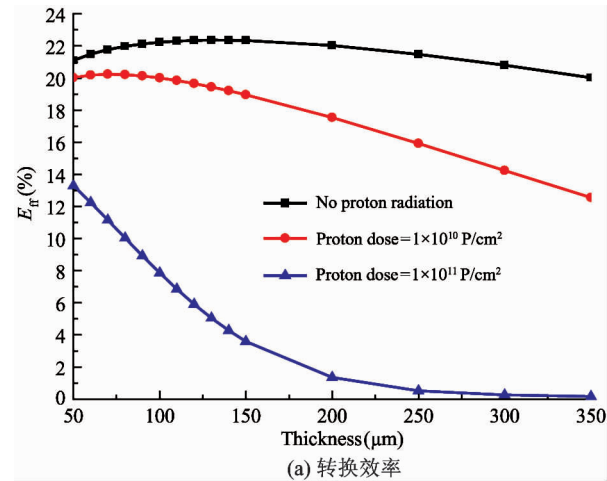


图 5 衬底厚度对转换效率及转换效率变化率的影响

子陷阱和复合中心密度增大,光生载流子扩散长度减小,从而导致光生载流子在输运过程中的复合损耗增大。衬底厚度越厚,光生载流子在输运至电池背面发射结空间电荷区边缘的过程中复合损耗越大。因此,质子辐照剂量越大,对应的最优的衬底厚度越薄。

为了保证太阳能电池电源对电路系统供电的稳定性,不仅需要考虑到在辐照情况下太阳能电池转换效率的大小,还要考虑太阳能电池在辐照情况下转换效率变化率的大小。即在保证较高的转换效率情况下,还需要尽可能地降低转换效率变化率。相对于无质子辐照情况,衬底厚度对太阳能电池转换效率变化率的影响如图 5(b) 所示。由图 5(b) 可见,当质子辐照剂量一定时,随着衬底厚度的增大,高效硅太阳能电池转换效率变化率的绝对值增大。当衬底厚度一定时,质子辐照剂量越大,转换效率变化率的绝对值越大。因此,在较高的质子辐照剂量的情况下,选择厚度较薄的衬底不仅有利于提高太阳能电池的转换效率,而且也有利于降低太阳能电池转换效率的变化率,但同时需要兼顾薄太阳能电池片的加工成本、制备难度及卫星发射时较强的机械应力的影响。

图 6(a) 为仿真得到的衬底电阻率对硅太阳能电池转换效率的影响,在仿真过程中,衬底厚度为 $100\mu\text{m}$ 。由图 6(a) 可见,在无质子辐照的情况下,随着衬底电阻率增大,硅太阳能电池转换效率随之先增大后减小,即存在转换效率峰值,峰值转换效率 (22.33%) 对应的衬底电阻率为 $4\Omega\cdot\text{cm}$ 。当质子辐照剂量较高 ($1\times 10^{10}\text{P}/\text{cm}^2$ 和 $1\times 10^{11}\text{P}/\text{cm}^2$) 时,随着衬底电阻率增大,转换效率随之增大,是因为影响太阳能电池转换效率的主要因素为光生载流子的复合损耗和电池等效串联电阻的功率损耗。在无质子辐照情况下,随着衬底电阻率增大,SRH 复合损耗降低,转换效率随之增大。但随着衬底电阻率增大,太阳能电池内等效串联电阻增大,由此产生的串联电阻功率损耗增大。因此,在无质子辐照情况下,随着衬底电阻率增大,太阳能电池转换效率存在峰值。在质子辐照环境中,随着质子辐照剂量增大,由位移损伤效应导致太阳能电池内的光生载流子复合损耗显著增大。在较高的质子辐照剂量情况下,虽然衬底电阻

率的增大导致电池等效串联电阻增大,但由于光生载流子复合损耗使得电池输出光电流较小,从而使得电池串联电阻功率损耗不大。此时,随着衬底电阻率增大,SRH 复合损耗降低,并成为影响太阳能电池转换效率的主要因素。因此,在较高剂量的质子辐照情况下,随着衬底电阻率增大,电池转换效率随之增大。

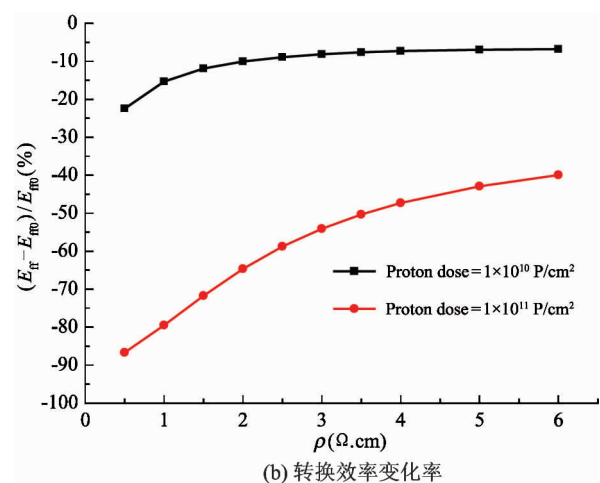
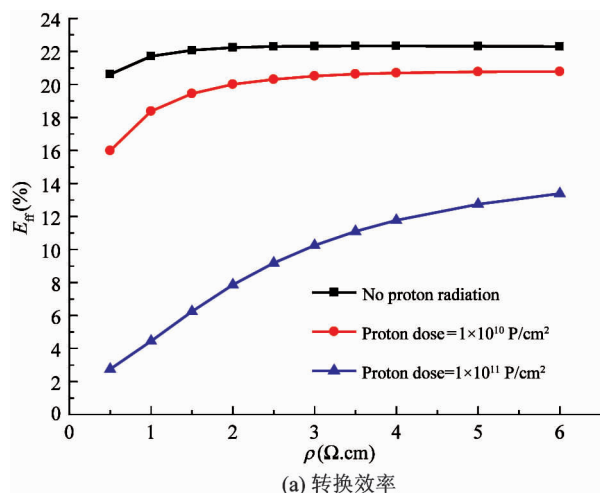


图 6 衬底电阻率对转换效率及转换效率变化率的影响

相对于无质子辐照情况,衬底电阻率对太阳能电池转换效率变化率的影响如图 6(b) 所示。由图 6(b) 可见,当质子辐照剂量一定时,随着衬底电阻率增大,电池转换效率变化率的绝对值随之降低。考虑空间高剂量质子辐照对硅太阳能电池转换效率和转换效率变化率的影响,相比于地面应用,需要适当提高单晶硅衬底的电阻率。另外,对于大功率卫星,

由于其太阳能电池帆板面积很大,太阳能电池阵表面极易俘获大量低能带电粒子,使太阳能电池阵表面产生高达几千伏的静电电压。一旦该静电场放电,就有可能造成太阳能电池击穿,也可能干扰星上的遥测系统。因此,为防止电池在反偏压下发生二次击穿,提高太阳能电池的可靠性,需要适当提高电池衬底电阻率。

3 结 论

本文对低轨道星载高效 IBC 单晶硅太阳能电池的质子辐照效应进行了仿真研究。首先详细地分析了质子辐照剂量和辐照能量对 IBC 太阳能电池外量子效率、转换效率的影响。得到存在质子辐照剂量阈值的结论。当质子辐照剂量低于阈值时,电池转换效率及转换效率变化率较小。然后以改善太阳能电池转换效率及转换效率变化率为目标,在不同质子辐照剂量情况下,详细地分析了衬底电阻率、衬底厚度对太阳能电池电学性能的影响。给出了不同辐照剂量下,硅太阳能电池转换效率随衬底厚度和衬底电阻率的变化特点和规律。在较高的质子辐照剂量的情况下,相比于地面应用的太阳电池,采用厚度较薄、电阻率较高的衬底材料,不仅有利于提高太阳能电池的光电转换效率,而且也有利于降低太阳能电池转换效率的变化率。本文的仿真结果可为空间用高效单晶硅太阳能电池的设计和制备提供有意义的参考信息。

参考文献

[1] 姜柯. 典型运放、比较器的电离与位移损伤效应[D]. 北京:中国科学院大学, 2015

[2] 朱恒静. 宇航大规模集成电路保证技术[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2016

[3] Song M H, Wang D X, Bi J F, et al. Inverted metamorphic triple-junction solar cell and its radiation hardness for space applications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66 (18): 188801

[4] Chang X Y, Yao S, Zhang Q L, et al. Anti-radiation of space triple-junction solar cell based on distributed Bragg reflector structure[J]. *Acta Physica Sinica-Chinese Edition*, 2016, 65 (10): 108801

[5] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, et al. Solar cell efficiency tables (version 44) [J]. *Progress in Photovolta-*

ics Research & Applications, 2014, 22 (7): 701-710

[6] Renshaw J, Rohatgi A. Device optimization for screen printed interdigitated back contact solar cells [C]. In: *Proceedings of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, USA, 2011. 2924-2927

[7] Padilla M, Hoffler H, Reichel C, et al. Surface recombination parameters of interdigitated-back-contact silicon solar cells obtained by modeling luminescence images [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2014, 120 (1): 363-375

[8] Franklin E, Fong K, McIntosh K, et al. Design, fabrication and characterisation of a 24.4% efficient interdigitated back contact solar cell [C]. In: *Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Amsterdam, Netherlands, 2014. 2556-2572

[9] Arita M, Torigoe K, Yamauchi T, et al. Surface band-bending and Fermi-level pinning in doped Si observed by Kelvin force microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 30 (2): 185-191

[10] Dziewior J, Schmid W. Auger coefficients for highly doped and highly excited silicon [J]. *Applied Physics Letters*, 1977, 31 (5): 346-348

[11] Li X, Liu C, Yang J. Synergistic effect of ionization and displacement damage in NPN transistors caused by protons with various energies [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62 (3): 1375-1382

[12] Saha S K, Ferdaus S I, Reba S I, et al. Effect of field dependent mobility and simultaneous consideration of both SRH and auger recombination on the analytical modeling of internal quantum efficiency of a si-solar cell [C]. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics*, Bali, Indonesia, 2012. 662-666

[13] Caughey D M, Thomas R E. Carrier mobilities in silicon empirically related to doping and field [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 55 (12): 2192-2193

[14] Selberherr S. Process and device modeling for VLSI [J]. *Microelectronics Reliability*, 1984, 24 (2): 225-257

[15] 熊绍珍, 朱美芳. 太阳能电池基础与应用 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 2009. 97-98

[16] 周涛, 陆晓东, 李媛, 等. 晶硅太阳能电池上表面增透膜研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014 (10): 223-228

Proton irradiation effect of high-efficiency interdigitated back contact solar cells

Qiu Lan^{*}, Hu Li^{**}

(^{*} Department of Information Engineering, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098)

(^{**} Department of Information Technology, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024)

Abstract

The proton irradiation effect of high efficiency interdigitated back contact crystalline silicon solar cell used in low orbit satellite is studied by using TCAD semiconductor device simulation software. Firstly, the effects of proton irradiation dose and irradiation energy on the quantum efficiency and conversion efficiency of IBC solar cells are analyzed. Then, the effect of substrate resistivity and substrate thickness on the electrical properties of solar cells is analyzed in detail under different proton radiation doses. The simulation results show that there is a proton irradiation dose threshold (about $1 \times 10^9 \text{ P/cm}^2$). When the proton radiation dose is lower than the threshold, the conversion efficiency and its rate of change are both small. When the proton irradiation dose is certain, the conversion efficiency of solar cells increases first and then decreases with the increase of substrate thickness. With the increase of proton radiation dose, the substrate thickness corresponding to the peak conversion efficiency decreases. In the case of high proton irradiation dose, the thin substrate not only improves the photoelectric conversion efficiency of solar cells, but also helps to reduce the rate of conversion efficiency change. When the proton irradiation dose is higher ($1 \times 10^{10} \text{ P/cm}^2$ and $1 \times 10^{11} \text{ P/cm}^2$), the conversion efficiency increases with the increase of substrate resistivity. When the proton irradiation dose is certain, the absolute value of the conversion rate decreases with the increase of substrate resistivity.

Key words: solar cells, proton irradiation, quantum efficiency, conversion efficiency, substrate structure, optimize