

非晶硅 Pin 二极管的 1MeV 电子辐照效应

李柳青¹, 廖显伯², 游志朴³

(1. 北京印刷学院基础部, 北京 102600; 2. 中科院半导体所, 北京 100083; 3. 四川联合大学物理系, 四川成都 610064)

摘 要: 本文报道 a-Si H 本征膜及 Pin 二极管的 1MeV 1.4×10^{15} , 4.2×10^{15} , $8.4 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 电子辐照实验结果和退火行为. 测量了电子辐照对 a-Si H 光暗电导率和光致发光谱的影响, 以及 a-Si H Pin 二极管光伏特性和光谱响应随电子辐照剂量的变化. 发现电子辐照在 a-Si H 本征膜和二极管中引起严重的损伤, 和二极管光谱响应的峰值“红移”. 但未见饱和现象, 还观测到明显的室温恢复现象; 但高温退火处理后未能完全恢复. 本文对以上实验结果给出了合理的解释.

关键词: a-Si H 本征膜; Pin 二极管; 电子辐照; 室温恢复; 高温退火; 光谱响应的峰值“红移”; 辐射缺陷
中图分类号: TN304.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 08-1076-03

Effects of 1MeV-Electron Irradiation on a-Si H Pin Diodes

LI Liu-qing¹, LIAO Xian-bo², YOU Zi-pu³

(1. Beijing Institute of Printy, Beijing 102600, China;

2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. Dept. of physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract: This Paper reports the effects of 1 MeV-Electron irradiation on intrinsic a-Si H films and pin diodes at various fluences of 1.4×10^{15} , 4.2×10^{15} , $8.4 \times 10^{15} \text{ cm}^2$. The changes in the dark-photo conductivities and Photoluminescence (PL) of a-Si H films with the fluences of electron irradiation were measured. The changes in the illuminated J-V characteristics and the optical spectral response of a-Si H pin diodes with the fluences of electron irradiation were also measured. The electron irradiation could induce significant damage in the films and diodes, and redshifts of the peak value of the optical spectral response in the diodes, but there was no saturation phenomenon observed. The annealing behaviours of the irradiation induced defects were also investigated. It was found that the electron irradiation induced effects could not be completely recovered by high temperature annealing, although a part of the irradiation damage was recovered at room temperature. We discussed these experimental results and gave a reasonable explanation for them.

Key words: intrinsic a-Si H films; pin diodes; electron irradiation; room temperature recovering; high temperature annealing; redshifts of the peak value of the optical spectral response; irradiation induced defects

1 引言

德国的 Schneider 和 Schröder 等人对 a-Si H 本征膜的 KeV 电子辐照进行了较深入的研究, 但对 MeV 电子辐照研究不多^[1]. 国内尚未见有关文献报道. 我们研究 1MeV 电子辐照 (与近地空间辐射环境的地球辐射带粒子中的电子能量范围相近^[2]), 对空间应用具有实际意义. 下面是我们所做的初步研究工作.

2 样品制备及电子辐照

采用 PE-CVD 法制备 a-Si H 本征膜及 Pin 二极管样品. 本征膜样品为玻璃衬底, 膜厚约 1.5 μm . Pin 二极管样品的衬底 SnO₂ 是由美国 Solarex 公司提供的, 结构为 Glass/SnO₂/P a-Si_{1-x}C_x:B:H/i a-Si H/n $\mu\text{c-Si}$:P:H/Al, 各层厚为: P 层 450 \AA , i

层 6000 \AA , n 层 400 \AA . 电子辐照能量为 1MeV, 剂量分别为 1.4×10^{15} , 4.2×10^{15} , $8.4 \times 10^{15}/\text{cm}^2$.

3 实验及结果

3.1 a-Si H 本征膜 1MeV 电子辐照前后的光荧光实验

用 Ge 探测器, 狭缝宽度 slit: 0.5/0.5mm, 光源功率 LP: 160mW, 低温 77K, 让不同样品在相同的测试条件下进行测量, 测得 a-Si H 本征膜样品在电子辐照前, 以及 1MeV 1.4×10^{15} , 4.2×10^{15} , $8.4 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 电子辐照后 30 天, 140 天的光荧光光谱如图 1、图 2 所示: 观测到 1 MeV 电子辐照后 a-Si H 本征膜的 1.3eV 带边发光强度减小, 并随辐照剂量的增大而减小更多, 图 1 中曲线 , , 不重合, 即未见饱和现象, 1MeV 电子辐照后 140 天的测试结果比 30 天的测试结果有所提高, 说

明存在室温恢复现象。(如图 2 中曲线 ,) .

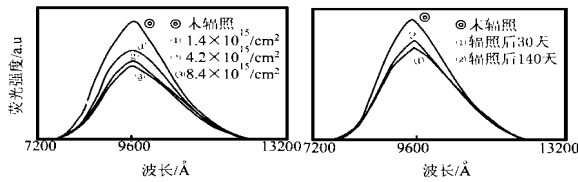


图 1 a-Si H 本征膜光荧光光谱随 1MeV 电子辐照剂量的变化
图 2 a-Si H 本征膜光荧光光谱经 1MeV 1.4 ×10¹⁵/cm² 电子辐照后室温恢复情况

3.2 a-Si H 本征膜 1MeV 电子辐照前后的光暗电导率实验

光态时光照强度为 AM1.5 (100mW/cm²), 暗态时蔽光, 直流电源电压为 10V, 用直流电导法在室温下进行测量. 测得 a-Si H 本征膜样品辐照前及经 1MeV 1.4 ×10¹⁵, 4.2 ×10¹⁵, 8.4 ×10¹⁵/cm² 电子辐照后 135 天, 200 °C, 2 小时高温退火处理后的室温光暗电导率 ρ_{ph} 及 ρ_d 列于表 1. 观测到 1MeV 电子辐照后 a-Si H 本征膜的室温光暗电导率 ρ_{ph} 、 ρ_d 减小, 且随辐照剂量的增加而减小更多. 经 200 °C, 2 小时高温退火处理后, 室温光暗电导率 ρ_{ph} 及 ρ_d 得以恢复, 但未能完全恢复.

表 1 a-Si H 本征膜 1MeV 电子辐照前、辐照后 (135) 天, 200 °C, 2 小时高温退火后的室温光暗电导率

处 理	光暗电导率		$\rho_{ph}(10^{-4} \text{Scm}^{-1})$	$\rho_d(10^{-10} \text{Scm}^{-1})$
	辐照剂量	(10 ¹⁵ cm ⁻²)		
未辐照	0		1.64	9.36
电子辐照后 135 天	1.4		0.402	2.81
	4.2		0.267	2.34
	8.4		0.178	2.11
200 °C, 2 小时高温退火后	1.4		1.47	6.37
	4.2		1.27	5.47
	8.4		1.08	4.99

3.3 Pin 二极管 1MeV 电子辐照前后的光 J-V 特性实验

在光强 AM1.5 (100mW/cm²) 条件下, 用太阳能电池 J-V 测试仪测试 Pin 二极管样品的光 J-V 特性, 测试结果如图 3, 图 4 所示: 观测到 Pin 二极管经 1MeV 1.4 ×10¹⁵, 4.2 ×10¹⁵, 8.4 ×10¹⁵/cm² 电子辐照后 (10 天) 性能显著变差, 且随辐照剂量的增加, 辐照效应更显著, 如图 3 中曲线 , , 不重合, 即未见饱和; 1MeV 1.4 ×10¹⁵/cm² 电子辐照后在室温下保存 10 天、90 天、120 天后, 发现其性能得以明显的恢复, 即存在明显的室温恢复现象, 如图 4 中曲线 , , ; 经 130 °C, 2 小时高温退火处理后, 其性能得以进一步恢复, 但未能完全恢复, 如图 4 中曲线 所示.

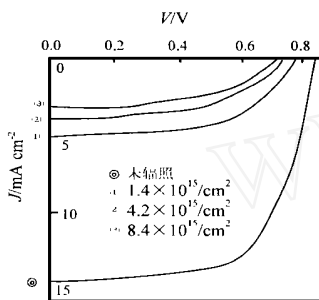


图 3 Pin 二极管 1MeV 电子辐照前后、辐照后 10 天的光 J-V 曲线

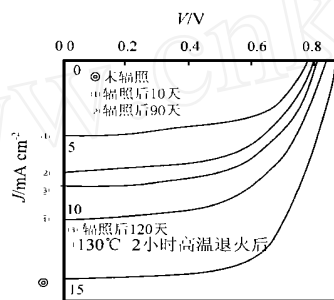


图 4 Pin 二极管 1MeV 1.4 ×10¹⁵cm² 电子辐照前、辐照后室温恢复及高温退火后的光 J-V 曲线

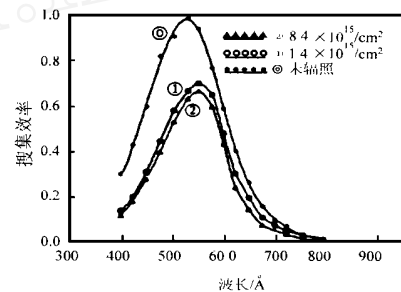


图 5 Pin 二极管未辐照, 及经 1MeV 1.4 ×10¹⁵, 8.4 ×10¹⁵/cm² 电子辐照后 90 天相对收集效率 CE 曲线

3.4 Pin 二极管 1MeV 电子辐照前后的光谱响应实验

在光强 AM1.5 (100mW/cm²) 条件下, 用太阳能电池 J-V 测试仪及美国进口的滤光片测试 Pin 二极管样品的光谱响应 (相对收集效率 CE 曲线), 测试结果如图 5 所示: 观测到 Pin 二极管经 1MeV 1.4 ×10¹⁵, 8.4 ×10¹⁵/cm² 电子辐照前后 (90 天) 的相对收集效率 CE 降低, 且随辐照剂量的增加, CE 下降更低, 曲线 , 不重合, 表明未见饱和; 同时还观测到 1MeV 电子辐照后 CE 峰值向其长波方向移动 (“红移”现象), 即辐照后 Pin 二极管的短波损失更厉害.

4 结论

4.1 定性比较 MeV、Kev 电子辐照及光照 SW 效应

比较 MeV、Kev 电子辐照及光照 SW 效应的异同如表 2: 德国 U. Schneider 和 Schröder 等人做 20Kev 电子辐照实验, 证实 Kev 电子辐射产生缺陷为具亚稳性的 Si 悬键, 与光致退化 (SW 效应) 产生的亚稳缺陷一致. 当 Kev 电子辐照能量剂量 $Q_{el} = n_{el} \cdot E_0 > 60J/cm^2$, 产生的缺陷密度趋于饱和. (饱和值被

认为是 a-Si H 中有限的弱键总数^[31] (其中 n_{el} = 单位 cm² 入射的电子数目, E_0 = 电子的初始能量 = 20Kev); Kev 电子辐照经 200 °C, 2 小时高温退火处理后可完全恢复, 与光照 SW 效应相似, 但产生机制不同, Kev 电子辐照产生缺陷为直接过程, 即电子辐照激活 a-Si H 网络格点, 直接导致 Si-Si 弱键或 Si-H 弱键断裂, 产生亚稳 Si 悬键缺陷态, 产生机制呈简单的指数形式^[41]. 光照 SW 效应亚稳 Si 悬键缺陷态的产生为间接过程 (可能与 H 原子有关), 产生机制呈扩展指数形式^[51].

我们所做 1MeV 1.4 ×10¹⁵, 4.2 ×10¹⁵, 8.4 ×10¹⁵cm² 电子辐照实验, 能量剂量 Q_{el} 为 224, 672, 1312J/cm², 均大于 60J/cm², 但实验结果未见饱和现象; 1MeV 电子辐照 Pin 二极管经 130 °C, 2 小时高温退火处理后, 或 1MeV 电子辐照 a-Si H 本征膜经 200 °C, 2 小时高温退火处理后均未能完全恢复. 这与 Schneider 和 Schröder 等人所做的 Kev 电子辐照及光照结果不同; 1MeV 电子辐照存在明显的室温恢复现象, 这亦与光照 SW 效应不同. 这些不同之处均说明 1MeV 电子辐照不仅产生与 Kev 电子辐照及光照相同的缺陷态 (Si 悬键), 而且可能产生

其它类型的缺陷态. 由于 1MeV 电子辐照能量足够强, 不仅可使 Si-Si 弱键或 Si-H 弱键断裂, 产生与 Kev 电子辐照、光照 SW 一致的亚稳 Si 悬键缺陷态, 而且足以使正常 Si-Si 强键断裂, 产生与空位相关的其它类型的缺陷态. 这种缺陷态可能是无

自旋的, 或与杂质相关的, 或两者^[6]. 其中部分缺陷可能是稳定的, 另一部分缺陷可能是亚稳的. 有待于进一步的实验研究.

表 2 MeV、Kev 电子辐照与光照的比较

	MeV 电子辐照	Kev 电子辐照	光照
饱和现象	未见饱和	饱和	饱和
室温恢复	明显	明显	不明显
高温退火	不能完全恢复	可完全恢复	可完全恢复
缺陷产生机制	直接过程(简单指数形式)	直接过程(简单指数形式)	间接过程(护展指数形式)
缺陷种类	2 种 亚稳的 Si 悬键缺陷 与空位相关的缺陷(稳定的、亚稳的)	1 种 亚稳的 Si 悬键缺陷	1 种 亚稳的 Si 悬键缺陷

4.2 解释 a-Si:H/Pin 二极管经 1MeV 电子辐照后光谱响应的峰值“红移”现象

由于 1MeV 电子辐照在 a-Si:H 中的穿透深度为 10mm^[6], 远大于 a-Si:H/Pin 二极管的厚度(约 1μm), 因而电子穿透整个 Pin 二极管时仅损失很小部分能量, 即在 Pin 二极管的不同深度层中入射的电子数目和能量几乎相同, 将在整个 Pin 二极管中均匀地产生辐照缺陷. 短波光子在靠近 P 区的本征层中被吸收, 光生空穴到达 P 边被收集, 光生电子必须穿过较厚的本征层(i 层)到达 n 边才能被收集. 由于本征层较厚(6000Å), 电子辐照在 i 层中产生的缺陷总数较多, 复合损失较大, 因而 Pin 二极管的光谱响应在短波段的损失较厉害. 相比之下, 其长波光子在 i 层中比较均匀地被吸收, 光生载流子遍布于整个 i 层中, 此时光生电子到达 n 区边界的平均路程将有所减小, 所遭受的复合损失相应减少. 所以光谱响应在短波段的损失比长波段的损失更厉害, 即图 5 所示 Pin 二极管的相对收集效率 CE 的峰值发生“红移”现象.

参考文献:

- [1] U Schneider, B Schröder, Peter Jecher, J Non-Cryst. Solid [J]. 115, 1989:63.

- [2] 朱文明. 第四届全国抗辐射电子学学术会议论文集[C]. 1991: 1.
- [3] U Schneider, B Schröder. Amorphous silicon and related materials[J]. 1988:700.
- [4] U Schneider, B Schröder, Friedhelm FINGER. Non-Cryst. Solid [J]. 114, 1989:633.
- [5] R S Crandall. Phy. Rev. [J]. B43, 1991:4057.
- [6] U Schneider, B Schröder. Amorphous silicon and related materials[J]. 1988:703 - 709

作者简介:



李柳青 女. 1965 年生于重庆酉阳, 土家族. 1987 年毕业于四川大学物理系, 1991 年 5 月至 1992 年 6 月在中科院半导体所作硕士论文, 现为北京印刷学院讲师.