



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200410017861.7

[45] 授权公告日 2007 年 12 月 26 日

[11] 授权公告号 CN 100357755C

[22] 申请日 2004.4.22

[21] 申请号 200410017861.7

[73] 专利权人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路 800 号

[72] 发明人 沈文忠 朱建敏

[56] 参考文献

JP8278354A 1996.10.22

CN1331488A 2002.1.16

US4598249A 1986.7.1

CN1204059A 1999.1.6

Ga_{1-x}Al_xAsGaAs 太阳能电池结特性研究.
管丽民, 徐红, 隋兆文, 陈芬扣. 太阳能学报,
第 7 卷第 1 期. 1986

太阳能电池基片扩散长度的自动测量系统.
杨建德, 尚鲜利. 黑龙江自动化技术与应用, 第
14 卷第 1 期. 1995

审查员 李晓惠

[74] 专利代理机构 上海交达专利事务所

代理人 王锡麟 王桂忠

权利要求书 1 页 说明书 4 页

[54] 发明名称

太阳能电池有效扩散长度的测试方法

[57] 摘要

一种太阳能电池有效扩散长度的测试方法, 用于能源技术领域。方法步骤为: 测量太阳能电池基片材料的载流子浓度; 测量太阳能电池的暗伏安特性和负载特性; 采用理论公式拟合太阳能电池暗伏安特性得到饱和电流密度 J_{01} , J_{02} ; 结合基片材料的载流子浓度和负载特性给出的开路电压, 短路电流密度, 用理论公式使求得的与有效扩散长度相关的饱和电流密度同由暗伏安特性给出的饱和电流密度的平方差之和最小, 从而得到太阳能电池的有效扩散长度。本发明可避免吸收和反射系数的详细信息, 利用常用测试方法便可直接得到太阳能电池的有效扩散长度, 还可同时用以指导太阳能电池的结构优化和工艺改进, 具有简单、方便、精确度较高、应用性较强和适用范围广的特点。

1. 一种太阳能电池有效扩散长度的测试方法，其特征在于，包括如下步骤：

- (1) 测量太阳能电池基片材料的载流子浓度；
- (2) 测量太阳能电池的暗伏安特性和负载特性；
- (3) 采用理论公式拟合太阳能电池暗伏安特性得到饱和电流密度 J_{01} , J_{02} ；

(4) 结合基片材料的载流子浓度和负载特性给出的开路电压，短路电流密度，用理论公式使求得的与有效扩散长度相关的饱和电流密度同由暗伏安特性给出的饱和电流密度的平方差之和最小，从而得到太阳能电池的有效扩散长度。

2. 根据权利要求 1 所述的太阳能电池有效扩散长度的测试方法，其特征是，步骤 (2) 中，负载特性的测试条件为：光谱 AM 1.5，光强 100 mW/cm^2 ，测试温度 $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的太阳能电池有效扩散长度的测试方法，其特征是，步骤 (3) 中，先采用单二极管模型拟合暗伏安特性得到太阳能电池的串、并联电阻，然后结合串、并联电阻，采用双二极管模型得到太阳能电池饱和电流密度 J_{01} , J_{02} 。

4. 根据权利要求 1 所述的太阳能电池有效扩散长度的测试方法，其特征是，步骤 (4) 中，太阳能电池的有效扩散长度相关的饱和电流密度 $J_{01}=qD_n n_i^2/N_A/L_{\text{eff}}$ ，由中性区的复合引起，饱和电流密度 $J_{02}=(1-\beta)q\pi D_n n_i V_t/F_{\text{max}}/L_{\text{eff}}^2+2\beta q D_n n_i/L_{\text{eff}}$ ，由空间电荷区的复合和大注入引起的复合决定，其中 β 为由 0 变化到 1 的权重因子，表征为大注入引起的复合饱和电流占 J_{02} 数值大小的比重； q , D_n , n_i , V_t , F_{max} , L_{eff} 分别为单位电荷电量、少数载流子扩散常数、本征载流子浓度、热电压、热力学平衡时空间电荷区最大电场强度和有效扩散长度； $F_{\text{max}}=(2qN_A V_{\text{bi}}/\epsilon_s)^{1/2}$ ， $V_{\text{bi}}=kT\ln(N_D N_A/n_i^2)/q$ ，其中 V_{bi} , ϵ_s , N_D 分别为内建电势差、绝对介电常数和发射区的载流子浓度， k , T 分别表示波尔兹曼常数和绝对温度， $kT/q=V_t$ 即表示热电压， N_A 为基片材料的载流子浓度。

5. 根据权利要求 4 所述的太阳能电池有效扩散长度的测试方法，其特征是， L_{eff} 由上述 J_{01} , J_{02} 表达式并结合负载特性推导得出，计算有效扩散长度时，通过选取 β 使求得的与有效扩散长度相关的饱和电流密度同由暗伏安特性给出的饱和电流密度的平方差之和达到最小。

太阳能电池有效扩散长度的测试方法

技术领域

本发明涉及的是一种太阳能电池有效扩散长度的测试方法，具体是一种基于太阳能电池基片材料霍尔特性、暗伏安特性和负载特性的测试方法，用于能源技术领域。

背景技术

目前，大规模开发和利用光伏太阳能发电的核心所在仍然是降低太阳能电池的生产成本和提高电池的光电转换效率。有效扩散长度是太阳能电池的一个极其重要的参数，能够直接预测太阳能电池的转换效率。单晶硅太阳能电池的有效扩散长度与体扩散长度、基片材料的厚度、少子扩散常数以及表面复合速度有关；多晶硅太阳能电池的有效扩散长度与晶粒的有效扩散长度、晶界复合速度、晶粒的大小及扮演复合中心的位错等有关。因而有效扩散长度的获取对于宏观上太阳能电池结构设计和微观理论上的研究都有重要的指导作用。

一般地，用来确定太阳能电池有效扩散长度的方法有内部量子效率测试法和开路电压衰减法。内部量子效率方法通过以有效扩散长度、复合速度等为参数拟合测试所得内部量子效率从而得到太阳能电池的有效扩散长度。由于该方法需要明确知道太阳能电池的吸收和反射系数，而每块太阳能电池的吸收和反射系数往往不同，再加上吸收和反射系数对于厚度较小的太阳能电池很难来判定，因而大大降低了内部量子效率测试方法应用的广泛性；开路电压衰减法是一种应用较广的方法，它采用外界激光或频闪灯引起的太阳能电池开路电压衰减并结合相关理论获取太阳能电池的有效扩散长度。但是在其理论计算过程中，该方法忽略了空间电荷区的复合，使得实验获得的有效扩散长度往往有较大的误差。

经文献检索发现，Taretto 等人在《美国应用物理杂志》(Journal of Applied Physics) 2003 年，93 卷，5447 页上提出一种基于基区材料载流子浓度、太阳能电池开路电压和短路电流密度计算太阳能有效扩散长度的方法，该方法简单易行，精确度较高。然而，在其推导和计算过程中，忽略了太阳能电池的串、并联电阻以及

大注入条件引起的饱和电流密度，因而得到的太阳能电池有效扩散长度与实际相比仍有一定的偏差；且由有效扩散长度求得的饱和电流密度与暗伏安特性给出的在数值上有较大不同。

发明内容

本发明的目的在于克服现有测试方法的不足，提供一种太阳能电池有效扩散长度的测试方法，使其具有简单易行、准确度高、提供的信息更全面可靠等特点，从而解决了背景技术中存在的缺陷。

本发明是通过以下技术方案实现的，本发明的测试方法包括如下步骤：

- (1) 测量太阳能电池基片材料的载流子浓度；
- (2) 测量太阳能电池的暗伏安特性和负载特性；
- (3) 采用相关理论拟合太阳能电池暗伏安特性得到饱和电流密度 J_{01} ， J_{02} ；
- (4) 结合基片材料的载流子浓度和负载特性给出的开路电压，短路电流密度，用相关理论使求得的与有效扩散长度相关的饱和电流密度同由暗伏安特性给出的饱和电流密度的平方差之和最小，从而得到太阳能电池的有效扩散长度。

步骤(1)采用常温下的霍尔实验进行测量。

步骤(2)中负载特性的测量条件为：室温 $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ，光谱 AM 1.5，光强 100 mW/cm^2 。

步骤(3)首先使用单二极管模型对太阳能电池的暗伏安特性进行计算机拟合，得到包括串、并联电阻，理想因子在内的一系列参数，然后将串、并联电阻代入双二极管模型重新拟合太阳能电池的暗伏安特性，得到饱和电流密度 J_{01} ， J_{02} 。

步骤(4)中，太阳能电池的饱和电流密度 $J_{01} = qD_n n_i^2 / N_A / L_{\text{eff}}$ ，由中性区的复合引起；饱和电流密度 $J_{02} = (1 - \beta) q \pi D_n n_i V_i / F_{\text{max}} / L_{\text{eff}}^2 + 2\beta q D_n n_i / L_{\text{eff}}$ 由空间电荷区的复合 (J_{02} 表达式中右式第一项) 和大注入引起的复合 (J_{02} 表达式中右式第二项) 决定，其中 β 为由 0 变化到 1 的权重因子，表征为大注入引起的复合饱和电流占 J_{02} 大小的比重， q ， D_n ， n_i ， V_i ， F_{max} ， L_{eff} 分别为单位电荷电量、少数载流子扩散常数、本征载流子浓度、热电压 (kT/q ， k ， T 分别表示波尔兹曼常数和绝对温度)、热力学平衡时空间电荷区最大电场强度 ($F_{\text{max}} = (2qN_A V_{\text{bi}} / \epsilon_s)^{1/2}$ ， $V_{\text{bi}} = kT \ln(N_D N_A / n_i^2) / q$ ，其中 V_{bi} ， ϵ_s ， N_D 分别为内建电势差、绝对介电常数和发射区的载流子浓度) 和有效扩散长度。

步骤(4)中，太阳能电池有效扩散长度表达式可结合 J_{01} 、 J_{02} 的表达式和太阳

能电池负载特性推导得出。计算有效扩散长度时，通过选取适当的 β 使求得的与有效扩散长度相关的饱和电流密度同由暗伏安特性给出的饱和电流密度的平方差之和达到最小。

本发明具有显著优点和进步，本发明考虑到了太阳能电池的串、并联电阻和各种复合机制（包括中性区的复合，空间电荷区的复合，大注入条件下的复合等）引起的饱和电流密度，并可以在避免详细的吸收和反射系数的情况下利用常用的测试方法便可直接得到太阳能电池的有效扩散长度，还可以同时研究硅太阳能电池的微观参数对转换效率的影响用以指导太阳能电池的结构优化和工艺改进，具有简单、方便、精确度较高、应用性较强和适用范围广的特点。

具体实施方式

结合本发明方法的内容提供以下实施例：

美国 Keithley 公司 2182 纳伏电压表、220 高精度电流源表、7065 霍尔效应开关卡和磁体系统联用对太阳能电池的基片材料进行霍尔测试。测试用三块不同产地和不同方法制备的 p 型硅片采用相同工艺制成的太阳能电池样品：单晶硅样品 S1，多晶硅样品 S2，均采用铸定法制备；多晶硅样品 S3，采用定向凝固法制备。采用了如下工艺将硅片制成太阳能电池：先用酸溶液腐蚀和织构硅片表面，再经 POCl_3 扩散后用丝网印刷技术制作电极，最后为了钝化表面和体内以及减小入射光在多晶硅太阳能电池表面的反射，用离子束增强化学气相沉积法（PECVD）在其表面沉积 SiN_x 减反膜。暗伏安特性测试中，将太阳能电池放置在暗室里，用计算机控制下的 Keithley 2400 电源表对电池进行测量。负载特性的测试在如下条件下进行：光源为美国光谱实验室 X-25 太阳模拟器，光谱 AM 1.5，光强 100 mW/cm^2 ；测试温度 $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ；标准电池采用全国太阳能电池联合标定片编号：新一-25，短路电流 108 mA 。

本发明的测试方法具体包括如下步骤：

1. 室温下，对三块太阳能电池的基片材料进行霍尔测试。得到三块基片材料的载流子浓度 N_A ($1.40 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $2.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $3.27 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)。
2. 室温下，对三块基片材料经过相同工艺制成的太阳能电池样品（S1、S2、S3）进行暗伏安特性和负载特性的测量，其中，负载特性给出三块样品的开路电压 ($V_{oc}=0.618 \text{ V}$, 0.572 V 和 0.530 V)、短路电流密度 ($J_{sc}=36.68 \text{ mA/cm}^2$, 33.76 mA/cm^2 , 25.12 mA/cm^2)。
3. 基于单二极管模型对三块样品的暗伏安特性进行拟合得到三块样品的串联

电阻 (0.56Ω , 0.56Ω , 0.58Ω) 和并联电阻 (24.14Ω , 9.55Ω , 3.53Ω); 采用双二极管模型对三块样品的暗伏安特性重新拟合得到三块样品的饱和电流密度 J_{01} ($1.86 \times 10^{-12} A/cm^2$, $6.88 \times 10^{-12} A/cm^2$, $9.64 \times 10^{-12} A/cm^2$) 和 J_{02} ($1.09 \times 10^{-7} A/cm^2$, $2.97 \times 10^{-7} A/cm^2$, $7.89 \times 10^{-7} A/cm^2$)。

4. 饱和电流密度 $J_{01}=qD_n n_i^2/N_A/L_{eff}$, 由中性区的复合引起; 考虑大注入复合电流将 J_{02} 修正为: $J_{02}=(1-\beta)q\pi D_n n_i V_t/F_{max}/L_{eff}^2+2\beta q D_n n_i/L_{eff}$, 由空间电荷区的复合(J_{02} 表达式中右式第一项)和大注入引起的复合(J_{02} 表达式中右式第二项)决定, 其中 β 为由 0 变化到 1 的权重因子, 表征为大注入引起的复合饱和电流占 J_{02} 大小的比重, q , D_n , n_i , V_t , F_{max} , L_{eff} 分别为单位电荷电量、少数载流子扩散常数、本征载流子浓度、热电压 (kT/q , k , T 分别表示波尔兹曼常数和绝对温度)、热力学平衡时空间电荷区最大电场强度 ($F_{max}=(2qN_A V_{bi}/\epsilon_s)^{1/2}$, $V_{bi}=kT \ln(N_D N_A/n_i^2)/q$, 其中 V_{bi} , ϵ_s , N_D 分别为内建电势差、绝对介电常数和发射区的载流子浓度)和有效扩散长度。结合太阳能电池负载特性, 可推导出太阳能电池有效扩散长度的表达式:

$$L_{eff} = (B_1 + \sqrt{B_1^2 + 4A_1 C_1}) / (2A_1)$$

其中 $A_1 = F_{max} N_A \{J_{sc} + J_{sc} R_s / R_{sh} - V_{oc} / (A R_{sh})\}$,

$$B_1 = q D_n n_i^2 F_{max} \{ \exp(V_{oc} / V_t) - \exp(J_{sc} R_s A / V_t) \} + 2q D_n n_i N_A F_{max} \beta \{ \exp(V_{oc} / 2V_t) - \exp(J_{sc} R_s A / 2V_t) \}$$

$$C_1 = (1 - \beta) q D_n \pi n_i V_t N_A \{ \exp(V_{oc} / 2V_t) - \exp(J_{sc} R_s A / 2V_t) \}.$$

J_{sc} , A , R_s , R_{sh} 分别为太阳能电池的短路电流密度、面积、串联电阻和并联电阻。

每块太阳能电池的面积 A 为 $25 cm^2$, 一般地, 取 $\epsilon_s=10^{-12} F/cm$, $n_i=10^{10} cm^{-3}$, $D_n=20 cm^2/s$ 和 $N_D=1.0 \times 10^{20} cm^{-3}$, 选择合适的 β , 使通过计算得到的 J_{01} 和 J_{02} 与暗伏安特性给出的 J_{01} 和 J_{02} 平方差之和达到最小从而给出三块样品的有效扩散长度: $224.4 \mu m$, $27.5 \mu m$ 和 $18.2 \mu m$ 。与由少数载流子寿命并结合其它物理参数求得的三块样品的有效扩散长度: $204.0 \mu m$, $22.2 \mu m$ 和 $7.1 \mu m$ 很接近, 说明了本发明的可靠性。