

氢化硅薄膜光吸收近似特性研究*

郭立强¹⁾ 丁建宁^{1)2)3)†} 杨继昌¹⁾ 王书博²⁾ 叶 枫²⁾ 程广贵¹⁾
凌智勇¹⁾ 范慧娟¹⁾ 袁宁¹⁾²⁾³⁾ 王秀琴²⁾

1)(江苏大学机械工程学院,微纳米研究中心,镇江 212013)

2)(常州大学,低维材料微纳器件与系统研究中心,常州 213164)

3)(常州市新能源重点实验室,常州 213164)

(2009年12月22日收到;2010年3月11日收到修改稿)

利用等离子体化学气相沉积系统在直流电压源和射频源的双重激励下,以康宁 7059 玻璃为衬底制备了氢化硅薄膜.通过测定氢化硅薄膜 Raman 光谱,对薄膜微结构进行了表征;建立氢化硅薄膜的光吸收模型,计算出薄膜的光吸收系数和光学带隙,和实验结果基本一致,说明该模型符合实验结果;并利用该模型计算的光吸收系数和光学带隙,结合 AMPS 软件对设计的太阳能电池结构进行了模拟,给出的 $I-V$ 特性曲线变化趋势与实验结果基本符合,同时对实验结果与模拟结果存在差异的原因进行了分析,并给出合理解释.

关键词: 氢化硅薄膜, 光吸收系数, 光吸收模型

PACC: 7820W, 7865, 0650, 0760H

1. 引 言

自 1954 年,第一块硅太阳能电池问世以来,引起了全球能源开发科研工作者的极大关注.人们把新能源开发与利用的希望重新寄托于硅材料的研究.并在单晶硅的基础上,开发出一系列光学特性较好的硅系列材料,如非晶硅薄膜、多晶硅薄膜、微晶硅薄膜、纳米硅薄膜.但是这些材料,除非晶硅薄膜是单一非晶态相之外,多晶硅薄膜、微晶硅薄膜、纳米硅薄膜都是混合相材料^[1-4],并统称为氢化硅薄膜.对这些材料的微结构,人们往往利用 Raman 光谱仪表征或 X 射线衍射仪表征,利用公式计算平均晶粒大小、晶态比,并作为表征微结构的基本参数;对某一硅基样片,可以采用光谱仪和椭圆偏振仪进行薄膜透射谱和厚度^[5]测试,然后计算吸收系数.但是不同晶态比,不同晶粒大小分布的氢化硅薄膜的吸收系数随波长变化情况是不同的.钟立志等人通过测定纳米硅薄膜的透射谱,建立计算模型得出薄膜的折射率、厚度、吸收系数和光能隙^[6],但是仅给出了波长在 620nm 附近时薄膜的光学特性,未给出晶

粒尺寸、晶态比、波长与光吸收系数的具体表达式. Ali^[7]通过改变沉积温度制备了不同平均晶粒尺寸的纳米硅薄膜,计算出这些薄膜的光学带隙,并总结出平均晶粒尺寸与光学带隙的变化关系,但未探讨平均晶粒尺寸、晶态比与光吸收特性关系.蔺秀川和邵天敏^[8]利用集总参数法测量了材料对激光的吸收率,但不适于研究半导体材料对普通光波的吸收计算.本文利用 PECVD 系统,在玻璃衬底上制备了氢化硅薄膜,测试其光学特性,建立计算氢化硅薄膜光吸收模型,得出硅薄膜光吸收系数和光学带隙,与测试结果进行比较;设计了氢化硅薄膜太阳能电池结构,并利用计算的硅薄膜光吸收系数和光学带隙,结合 AMPS 软件模拟了氢化硅薄膜太阳能电池的整体性能.

2. 实 验

利用射频 (radio frequency, RF, 13.56MHz) 和直流偏压 (DC) 双重激励源,在 PECVD 系统中,以浓度为 5% 的高氢稀释 SiH_4 和 H_2 混合气作反应先驱体,以清洗过的康宁 7059 型玻璃作衬底,为减少氧

* 青蓝工程 (批准号:2008-04),常州市工业科技攻关专项 (批准号:CE2008014),常州市科技平台专项 (批准号:CM2008301) 和江苏省科技支撑计划 (批准号:BE20080030) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: dingjn@ujs.edu.cn

污染实验前将反应室本底真空抽到 2.0×10^{-4} Pa 以上, 然后通反应气体. 极板间距为 30 mm, 衬底温度为 250—280°C, 射频功率 300—330 W, 直流电压 200—220 V, 反应压强 140—260 Pa, 制备氢化硅薄膜样品. 使用 Raman 光谱仪对氢化硅薄膜的微结构特性进行了表征. 根据 Raman 光谱利用公式^[9] $X_c = I_c / (I_c + mI_a)$ 可以计算薄膜晶态成分的百分比 X_c ; 式中 I_c, I_a 分别为晶态和非晶态相拉曼特征峰的相对积分强度; 晶态成份的类 TO 模主峰位于 520 cm^{-1} 附近, 非晶态成份的类 TO 模主峰位于 480 cm^{-1} 附近; m 是拟合系数, 其可表示为 $m = 0.1 + \exp(-d/25)$. 计算结果薄膜晶态比从 43.0%—53.0%. 根据 Raman 光散射谱中氢化硅薄膜晶态峰位与单晶峰位之差, 利用公式^[10] $d = 2\pi \sqrt{\frac{B}{|\Delta\omega|}}$ 计算出氢化硅晶粒的平均尺寸. B 值取常数 $2.21 \text{ nm}^2/\text{cm}$; $\Delta\omega$ 为相对于单晶硅散射带的频移. 利用 Shmadzu UV-2450 型光谱仪, 对薄膜进行了透射谱测试. 根据透射图谱, 结合干涉原理得出薄膜厚度; 根据公式 $\alpha = \ln(1/T)/D$ 计算出薄膜光吸收系数 α . T 为投射率; D 为薄膜厚度.

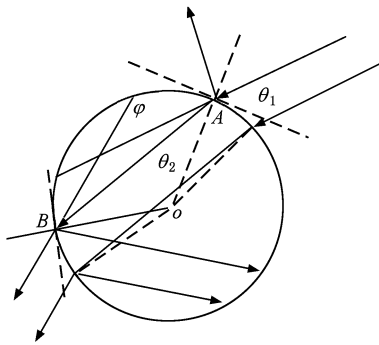


图1 氢化硅薄膜吸光模型

3. 薄膜光吸收系数计算

氢化硅薄膜是由纳米级单晶硅颗粒镶嵌在晶粒间界或者非晶态成分中, 并且呈短程有序长程无序的排列结构, 是非均匀介质, 可按等效的方法研究薄膜的光学特性^[11]. 首先通过 Raman 光谱拟合得到纳米级单晶硅颗粒的平均尺寸 d 和晶态比 X_c ; 将单晶硅颗粒等效为直径是平均尺寸的球体均匀排布在非晶相成分或晶间间界, 由几何光学方法可求出整个薄膜的光吸收系数 α . 如图 1 所示, 当光照

射到球表面上时, 发生折射、反射以及球内的多重反射. 非晶硅薄膜和单晶硅薄膜对光均有吸收特性, 因此在单晶硅颗粒中光的折射角符合复数的菲涅耳定律, 即

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{u \sin \theta_1}{\gamma \cos \sigma}\right), \quad (1)$$

式中

$$u = \frac{n_{\text{Si}} n_{\text{a-Si}} + k_{\text{Si}} k_{\text{a-Si}}}{n_{\text{Si}}^2 + k_{\text{Si}}^2},$$

$$v = \frac{n_{\text{Si}} k_{\text{a-Si}} - k_{\text{Si}} n_{\text{a-Si}}}{n_{\text{Si}}^2 + k_{\text{Si}}^2},$$

$$\gamma^4 = 1 - 2(u^2 - v^2) \sin^2 \theta_1 + (u^2 + v^2)^2 \sin^4 \theta_1,$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \arctan\left[\frac{2uv \sin^2 \theta_1}{1 - (u^2 - v^2) \sin^2 \theta_1}\right],$$

$$k_{\text{Si}} = \frac{\partial_{\text{Si}} \lambda}{4\pi},$$

$$k_{\text{a-Si}} = \frac{\partial_{\text{a-Si}} \lambda}{4\pi},$$

n_{Si} 取常数 4.24, $n_{\text{a-Si}}$ 取常数 3.9 ^[12]; 单晶硅颗粒出射光线相对入射光线偏转

$$\varphi = 2(\theta_1 - \theta_2), \quad (2)$$

由图 1 可见偏转角 $\varphi \leq \frac{\pi}{2}$, 因此根据非均匀介质中吸收面的计算方法, 单晶硅球颗粒的吸收面积可表示为

$$S_\alpha = \frac{\pi d^2}{4} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(T_0 - \frac{T_0^2 T}{1 - (1 - T_0) T}\right) \sin 2\theta_1 d\theta_1, \quad (3)$$

式中 T_0 为单晶硅的透射率, 并且有 $T_0 = 1 - R$, R 为单晶硅的反射率, 根据菲涅耳定律可表示为^[13]

$$R = \frac{G_1 \cos \theta_2 - G_2 \cos \theta_1}{G_1 \cos \theta_2 + G_2 \cos \theta_1}, \quad (4)$$

式中 $G_i = \sqrt{2\pi w_x \cos^2 \theta_i + 2\pi w_y \sin^2 \theta_i}$.

光线在球内穿过 $d \cos \theta_2$ 距离, 发生光衰减, 因而透射率 T 为

$$T = \exp(-4\pi d k_{\text{Si}} \cos \theta_2 / \lambda), \quad (5)$$

考虑非晶硅薄膜对光的吸收, 则氢化硅薄膜的吸收系数 α 为

$$\alpha = \sqrt{3} N S_a + 8\pi(1 - X_c) k_{\text{a-Si}} / \lambda, \quad (6)$$

式中, N 为单位体积中单晶硅晶粒的个数, 可表示为

$$N = \frac{6X_c}{\pi d^3}, \quad (7)$$

将(3), (4), (5), (6)式联立得到

$$\alpha(d, X_c, \lambda) = \left\{ \frac{3\sqrt{3}}{2d} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{T_0 \times [\exp(4\pi d k_{\text{Si}} \cos \theta_2) - 1]}{\exp(4\pi d k_{\text{Si}} \cos \theta_2) - R} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} & \times \sin 2\theta_1 d\theta_1 - \frac{8\pi k_{\theta-Si}}{\lambda} \} \\ & \times X_c + \frac{8\pi k_{\theta-Si}}{\lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

4. 分析与讨论

在玻璃衬底上制备的氢化硅薄膜的 X 射线衍射图谱如图 2 所示. 由图 2 可见薄膜中大量非晶无序成分和有序成分晶粒共存, 薄膜内部有序程度较高, 其内部包含大量的纳米级硅晶粒. (111), (220) 和 (311) 是三个不同的晶面族产生的衍射峰, 分别位于 $2\theta = 28.4^\circ, 47.4^\circ$ 和 56.1° 的衍射角位置; 晶粒中各晶面的排列由不规则到规则, 由 (111) 衍射峰半高宽, 利用 Scherrer 公式 $d = k\lambda/B\cos\theta$ 可算出晶粒的平均尺寸为 22.1\AA ; 式中系数 $k = 1$, θ 为衍射角, B 为衍射峰半高宽, $\lambda = 0.15\text{ nm}$ 为 X 射线 ($\text{CuK}\alpha$) 波长. 在 (111) 峰附近呈现一系列小峰, 这表明某些细微晶粒形成尚不够完整. 图 3 为氢化硅薄膜的拉曼图谱, 根据公式计算得出薄膜晶态比 X_c 为 53.3%, 晶粒平均尺寸 d 为 22.5\AA , 这与由 X 射线衍射图谱计算的晶粒大小结果相近; 将晶态比和平均尺寸带入模型, 通过 Matlab 编程计算出吸收系数 α , 计算结果见图 4.

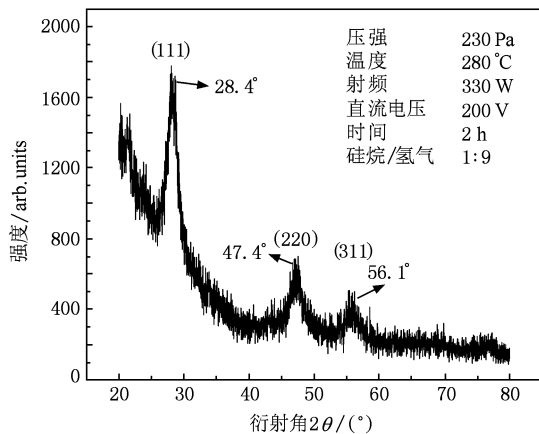


图 2 氢化硅薄膜 XRD 图谱

由图 4 可见, 在光子能量大于 1.69 eV 时比单晶硅的光吸收系数大, 尤其是当光子能量大于 2.0 eV 时, 两者之间的差值接近一个数量级. 从图 4 也可看出氢化硅薄膜和非晶硅薄膜的光吸收系数曲线变化趋势相类似, 这是因为氢化硅薄膜是非晶硅和纳米晶硅的复合体^[14], 因此其吸收可以看成是复

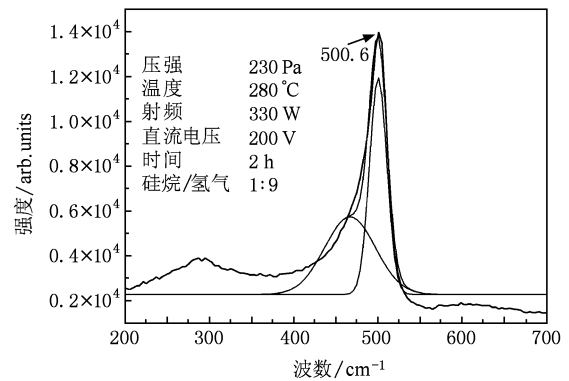


图 3 氢化硅薄膜 Raman 图谱

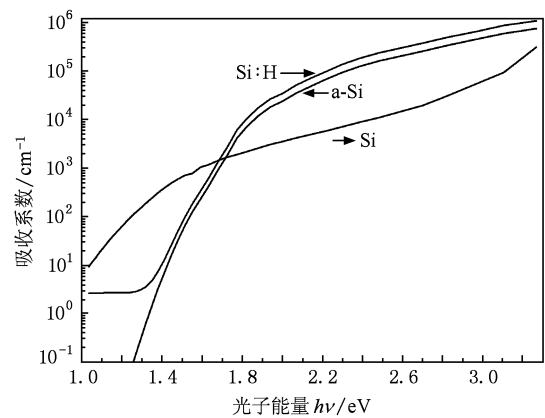


图 4 氢化硅薄膜的光吸收系数

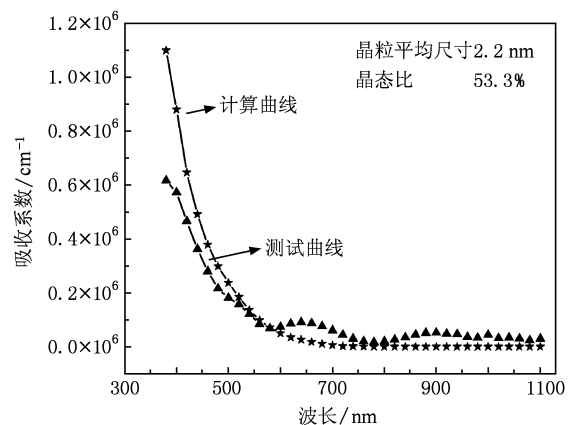


图 5 吸收系数计算结果与测试结果比较

合体的吸收谱. 而非晶硅是单一相材料, 故其结构的差异决定了其吸收谱与氢化硅的不同. Li 等人采用 Tauc-Lorentz 模型拟合得到薄膜的结构参数表明非晶硅薄膜的致密度和有序度低, 而多晶硅和微晶硅薄膜的有序度、致密度相近, 且明显高于非晶

硅^[15]. 实际上由纳米尺度的硅晶粒和作为晶粒间界的非晶硅组成的材料, 又称双相结构, 本质上属于非晶/微晶相变过渡区材料, 由于量子尺寸效应, 这种材料的有效带隙接近甚至高于非晶硅的光学带隙^[16]. 图 5 给出通过测试透射谱计算得到的吸收系数和程序计算结果比较. 由图 5 可见, 随波长增加, 吸收系数均呈下降趋势; 在波长 400 nm 附近计算结果与测试结果偏离较大; 当波长大于 450 nm 时, 两曲线及变化趋势基本相同, 这说明计算结果可在一定程度上反映实际值, 具有可行性. 利用 Tauc 公式 $(\alpha hv)^{1/2} = B(hv - E_g^{opt})$, 我们做出 $(\alpha hv)^{1/2}$ 与 E_g^{opt} 的关系曲线, 图 6 所示, 在吸收边附近做线性拟合, 得到拟合曲线切线在横坐标上的截距, 即氢化硅薄膜光学带隙 E_g^{opt} 为 1.67 eV, 这与实验测出透射谱再计算得出的光学带隙 1.64 eV 相差不大, 如表 1 示出了不同平均晶粒尺寸、晶态比薄膜的光学带隙实验结果和计算结果比较, 故这一模型计算结果是基本正确的.

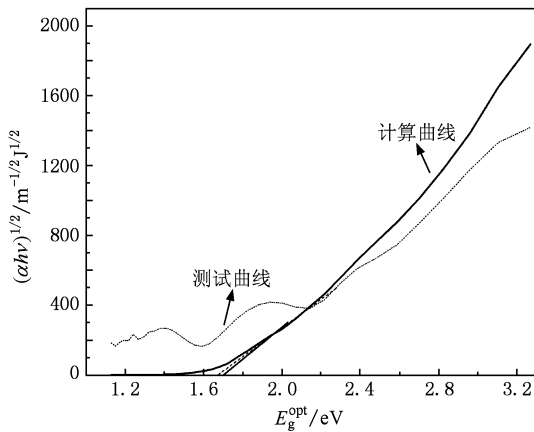


图 6 氢化硅薄膜光学带隙计算

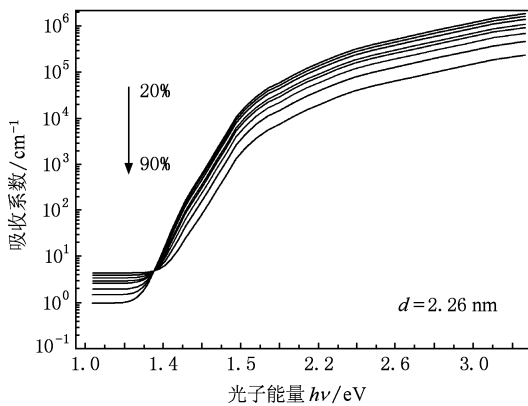


图 7 不同晶态比的光吸收系数

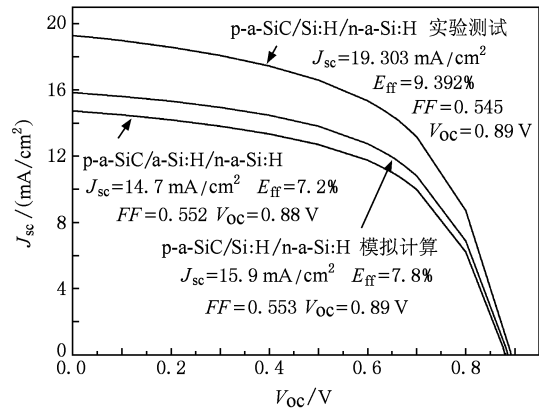


图 8 氢化硅太阳能电池 J-V 特性曲线

表 1 不同平均晶粒尺寸、晶态比薄膜的光学带隙比较

样品	晶粒大小/nm	晶态比/%	光学带隙/eV	
			实验结果	计算结果
1	2.23	53.3	1.64	1.67
2	3.79	52.8	1.84	1.88
3	1.43	59.8	1.66	1.76
4	2.12	48.8	1.81	1.83

通过固定平均晶粒大小, 改变晶态比深入研究了不同晶态比对薄膜吸收系数的影响, 如图 7 所示, 当晶态比在大于 70% 时, 光吸收系数介于非晶硅薄膜与单晶硅光吸收系数之间; 而在小于 60% 时, 氢化硅薄膜的光吸收系数比非晶硅薄膜光吸收系数大; 这是因为硅薄膜材料之间存在一定的过渡区所致^[17], 根据晶态成分所占体积百分比^[18] 可将氢化硅薄膜依次划分微晶硅、纳米硅和多晶硅薄膜, 见表 2; 其中微晶硅和纳米硅非常相似, 两者统称为氢化硅薄膜; 两者在结构上的根本区别在于: 微晶硅中晶粒和晶粒之间非晶态层较厚^[19], 而纳米硅中晶粒和晶粒之间的区域只有几个原子层的硅无序排列. 前人实验证明微晶硅薄膜和纳米硅薄膜的光吸收系数比非晶硅薄膜的光吸收系数^[20] 大, 多晶硅薄膜光吸收系数介于单晶硅与非晶硅薄膜光吸收系数之间, 我们计算过程中考虑到了晶粒平均尺寸和晶态比的双重影响, 并将两者的作用融合成一定比例关系, 因此计算结果正好和实验结论相符.

表 2 硅薄膜晶态比、平均晶粒尺寸对比

特征	非晶硅	微晶硅	纳米硅	多晶硅	单晶硅
平均晶粒大小/nm	0	3—10	2—10	>20	∞
X_c / %	0	<45	53 ± 5	>70	100

薄膜的光吸收系数随波长增加而减小,光吸收系数亦是一个关于波长的函数.在(8)式中,我们也给出了这一关系.将光吸收系数 α 带入电子空穴对产生率公式 $G(x) = \alpha N_0 \exp(-\alpha x)$,式中 N_0 为标准光谱条件下光子数密度分布,单位为 $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \lambda^{-1}$; x 载流子收集效率.再由公式 $\chi = \int_0^D G(x) R(x) dx / \int_0^D G(x) dx$ 计算载流子收集效率, D 为薄膜厚度, R 为复合率(包括间接复合和直接复合).最后由 $J_{sc} = \chi \int A_i(\lambda) F(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda$ 计算电池的短路电流, $A_i(\lambda)$ 为整个本征层的吸收率, $F(\lambda)$ 为太阳光通量密度 AM1.5;进而计算出电池的其他性能参数. AMPS 软件是宾西法尼亚大学发展的用于计算固态器件的一维模拟软件^[21].通过在给定边界条件下求解泊松方程和两个载流子连续方程得到太阳电池的开路电压、短路电流、填充因子、转换效率.本文将吸收系数、光学带隙和其他电学参数(见表3)输入 AMPS 软件.将晶粒平均尺寸 d 为 22.3 \AA ,晶态比 X_c 为 53.3% 时,计算出氢化硅的光吸收系数,并将计算数据和实验结果输入 AMPS 软件,采用设计的 p-a-SiC/Si: H/n-a-Si: H 的 pin 电池结

构,进行了模拟,得到氢化硅薄膜电池的 I - V 曲线如图 8 所示. p-a-SiC/Si: H/n-a-Si: H 电池的转换效率 E_{ff} 达到 7.8% ,短路电流 J_{sc} 为 15.9 mA/cm^{-1} ,开路电压 V_{oc} 为 0.89 V ,填充因子 FF 为 0.553 .相对 p-a-SiC/a-Si: H/n-a-Si: H 的 pin 结构,转换效率 ΔE_{ff} 提高了 0.6% ,短路电流 ΔJ_{sc} 提高 1.2 mA/cm^{-1} ,开路电压 V_{oc} 和填充因子 FF 几乎不变.这也说明在硅薄膜 pin 电池结构中, i 层的吸收特性是直接影响电池效率和短路电流的原因,而开路电压和填充因子受 i 层的影响不大.图 8 也表示了利用透射谱计算得出的吸收系数后,模拟电池的 I - V 曲线.从图 8 中发现,本文理论模型与实验测试结果存在一定的偏差.这是因为:1)在氢化硅薄膜中,单晶硅晶粒尺寸小到一定程度时,晶粒的位置 x 与动量 p 不能同时确定,并且晶粒质量很小、晶粒分布密度很大,所以表现出量子效应.2)氢化硅薄膜具有短程有序长程无序的特点,纳米级单晶硅晶粒在薄膜中呈现出非均匀的不规则排列.尤其在单晶硅晶粒成分占薄膜体积 50% 左右,晶粒尺寸小于 10 nm 时,氢化硅薄膜成为纳米硅薄膜^[22],这种薄膜晶粒及其界面对入射光子具有很强的散射作用,散射光子在薄膜内部

表3 模拟计算中所用参数

参数	p 层	i 层		n 层
		非晶硅	氢化硅	
厚度/nm	8	500	500	15
光学带隙/eV	1.90	1.72	1.64/1.67	1.72
电子亲合势 χ /eV	3.92	4.0	4.0	4.0
掺杂浓度/ cm^{-3}	$N_A = 3 \times 10^{19}$	0	0	$N_D = 3 \times 10^{19}$
导带有效态密度/ cm^{-3}	2.5×10^{20}	2.5×10^{20}	2.0×10^{20}	2.5×10^{20}
价带有效态密度	2.5×10^{20}	2.5×10^{20}	2.0×10^{20}	2.5×10^{20}
迁移率边禁带宽度 E_μ /eV	1.96	1.8	1.75	1.8
空穴迁移率 $\mu_p/\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	5	10	20	10
电子迁移率 $\mu_n/\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	0.5	1	2	1
带尾态密度/ $\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$	10^{21}	10^{21}	10^{21}	10^{21}
带尾特征能量/eV	0.2/0.07	0.05/0.03	0.05/0.03	0.05/0.03
施主俘获截面/ cm^{-2}	10^{-15}	10^{-15}	10^{-15}	10^{-15}
受主俘获截面/ cm^{-2}	10^{-17}	10^{-17}	10^{-17}	10^{-17}
高斯态密度/ $\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$	3×10^{18}	5×10^{16}	5×10^{16}	9.5×10^{18}
施主高斯峰值能量/eV	1.12	1.12	1.12	1.12
受主高斯峰值能量/eV	1.02	1.02	1.02	1.02
施主俘获截面/ cm^{-2}	10^{-14}	10^{-14}	10^{-14}	10^{-14}
受主俘获截面/ cm^{-2}	10^{-15}	10^{-15}	10^{-15}	10^{-15}

又被反复吸收. 3) 光子在薄膜中发生反射、折射、吸收、多重反射、多重折射、多重吸收比较复杂, 并且有一部分光在晶粒中还将发生色散损失. 综上所述本文提出模型在方法上是正确的, 并简易实用; 但仍需对模型计算公式进行进一步修正与改进.

5. 结 论

本文用等效方法建立了氢化硅薄膜的光吸收模型, 对薄膜的吸收系数和光学带隙进行了计算,

计算结果与实验结果基本一致. 等效理论应用于氢化硅薄膜光吸收特性的计算具有明显的理论指导意义, 因为它可以区分不同微结构的硅薄膜平均晶粒尺寸、晶态比和入射光波长对光吸收系数的影响程度, 并可计算结果输入到 AMPS 软件来预测硅薄膜太阳能电池的整体性能, 但是由于氢化硅薄膜中单晶硅晶粒尺寸在几 Å 至几十 Å 之间, 具有量子尺寸效应、不规则排列等特点, 因此在计算过程当中需进行进一步的修正与改进, 这也将是下一步我们工作重点要解决的问题.

- [1] Huang R, Lin X Y, Yu Y P, Lin K X, Yao R H, Huang W Y, Wei J H, Wang Z K, Yu C Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3950 (in Chinese) [黄 锐、林璇英、余云鹏、林揆训、姚若河、黄文勇、魏俊红、王照奎、余楚迎 2004 物理学报 **53** 3950]
- [2] Han X Y, Hou G F, Wei C C, Zhang X D, Dai Z H, Li G J, Sun J, Chen X L, Zhang D K, Xue J M, Zhao Y, Geng X H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4254 (in Chinese) [韩晓艳、侯国付、魏长春、张晓丹、戴志华、李贵君、孙 建、陈新亮、张德坤、薛俊明、赵 颖、耿新华 2009 物理学报 **58** 4254]
- [3] Wei W S 2007 *Vacuum* **81** 857
- [4] Ledinsky M, Fekete L, Stuchlik J, Mates T, Fejfar A, Kocka J 2006 *Journal of Non-Crystalline Solids* **352** 1209
- [5] Liao N M, Li W, Jiang Y D, Kuang Y J, Qi K C, Li S B, Wu Z M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1542 (in Chinese) [廖乃镬、李伟、蒋亚东、匡跃军、祁康成、李世彬、吴志明 2008 物理学报 **57** 1542]
- [6] Zhong L Z, Zhang W J, Cui M, Wu X W, Li G H, Ding H 2005. *Semiconductor Optoelectronics.* **26** 327 (in Chinese) [钟立志、张维佳、崔 敏、吴小文、李国华、丁 琨 2005 半导体光电 **26** 327]
- [7] Atif M A 2007 *Opt. Mater.* **10** 1016
- [8] Lin X R, Shao T M 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 856 (in Chinese) [蔺秀川、邵天敏 2001 物理学报 **50** 856]
- [9] Kim W, Lee J, Lee J, Ko E K, Lyou J H 2004 *Appl. Phys. A* **79** 1813
- [10] Funde A M, Bakr N A, Kamble D K, Hawaldar R R, Jadkar S R 2008 *Solar Energy Materials and Solar Cells* **92** 1217
- [11] Xu W L, Zhu J L 1994 *J. Infrared Millim. Waves* **13** 391 (in Chinese) [徐文兰、诸君浩 1994 红外与毫米波学报 **13** 391]
- [12] Hao J B, Xia D L, Jiang H, Zhao X J 2007 *Journal of Wuhan University of Technology* **29** 55 (in Chinese) [郝江波、夏冬林、姜 宏、赵修建 2007 武汉理工大学学报 **29** 55]
- [13] Ge D B, Yan Y B 2002 *Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves* (Xi'an: Xi dian University Press) p73 (in Chinese) [葛德彪、阎玉波 2002 电磁波时域有限差分方法 (西安: 西安电子科技大学出版社) 第 73 页]
- [14] Chen C Z, Qiu S H, Liu C Q, Wu Y D, Li P, Yu C Y, Lin X Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2565 (in Chinese) [陈城钊、邱胜桦、刘翠青、吴燕丹、李 平、余楚迎、林璇英 2009 物理学报 **58** 2565]
- [15] Li S B, Wu Z M, Li W, Yu J S, Jiang Y D, Liao N M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7114 (in Chinese) [李世彬、吴志明、李伟、于军胜、蒋亚东、廖乃镬 2008 物理学报 **57** 7114]
- [16] Hu Z H, Liao X B, Zeng X B, Xu Y Y, Zhang S B, Diao H W, Kong G L 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 218 (in Chinese) [胡志华、廖显波、曾湘波、徐艳月、张世斌、刁宏伟、孔光临 2003 物理学报 **52** 218]
- [17] Wang Y, Han X Y, Ren H Z, Hou G F, Guo Q C, Zhu F, Zhang D K, Sun J, Xue J M, Zhao Y, Geng X H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 947 (in Chinese) [王 岩、韩晓艳、任慧志、侯国付、郭群超、朱 锋、张德坤、孙 建、薛俊明、赵 颖、耿新华 2006 物理学报 **55** 947]
- [18] Wang Q 2007 *Ph. D. Dissertation* (Zhenjiang: Jiangsu University) (in Chinese) [王 权 2007 博士学位论文 (镇江: 江苏大学)]
- [19] Peng W B, Liu S Y, Xiao H B, Zhang C S, Shi M J, Zeng X B, Xu Y Y, Kong G L, Yu Y D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5716 (in Chinese) [彭文博、刘石勇、肖海波、张长沙、石明吉、曾湘波、徐艳月、孔光临、俞育德 2009 物理学报 **58** 5716]
- [20] Zhu X H, Chen G H, Zhang W L, Ding Y, Ma Z J, Hu Y H, He B, Rong Y D 2005 *Chin. Phys.* **14** 1009
- [21] Hu Z H, Liao X B, Diao H W, Xia C F, Xu L, Zeng X B, Hao H Y, Kong G L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2302 (in Chinese) [胡志华、廖显波、刁宏伟、夏朝凤、许 玲、曾湘波、郝会颖、孔光临 2005 物理学报 **54** 2302]
- [22] Shim J H, Im S, Cho N H 2004 *Appl. Surf. Sci.* **234** 268

Photo-absorption coefficient approximation of hydrogenated silicon films *

Guo Li-Qiang¹⁾ Ding Jian-Ning^{1)2)3)†} Yang Ji-Chang¹⁾ Wang Shu-Bo²⁾ Ye Feng²⁾
Cheng Guang-Gui¹⁾ Ling Zhi-Yong¹⁾ Fan Hui-Juan¹⁾ Yuan Ning-Yi²⁾³⁾ Wang Xiu-Qin²⁾

1) (*Micro/Nano Science and Technology Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*Low-dimension Material Micro/Nano Device and System Center, Changzhou University, Changzhou 213164, China*)

3) (*Key Laboratory of New Energy Engineering, Changzhou 213164, China*)

(Received 22 December 2009; revised manuscript received 11 March 2010)

Abstract

Hydrogenated silicon films are prepared on Corning 7059 glass by the plasma enhanced chemical vapour deposition technique with radio frequency (RF), power, (13.56 MHz) and DC bias. The microstructures of hydrogenated silicon films investigated by Raman spectra. The photo-absorption coefficient is calculated by utilizing an established photo-absorption model. The I - V characteristics of hydrogenated silicon film solar cells are simulated by using software AMPS. The results show that photo-absorption coefficient curves and I - V curves are both consistent well with experimental data. At the same time, the difference between experimental results are calculated results were analyzed.

Keywords: hydrogenated silicon films, photo-absorption coefficients, photo-absorption model

PACC: 7820W, 7865, 0650, 0760H

* Project supported by the Qing Lan Project, China (Grant No. 2008-04), the Changzhou Industrial Science and Technology Tackling Special Projects, China (Grant No. CE2008014), the Changzhou Science and Technology Platform Special Project, China (Grant No. CM2008301), the Jiangsu Science and Technology Support Project, China (Grant No. BE20080030).

† Corresponding author; Email: dingjn@ujs.edu.cn