

文章编号 1004-924X(2017)04-0850-07

相变区纳米硅氧薄膜的微观结构及光学特性

李晓苇¹, 李云¹, 郑燕², 高东泽¹, 于威^{1*}

(1. 河北大学物理科学与技术学院, 河北保定 071000; 2. 中国乐凯集团有限公司研究院, 河北保定 071020)

摘要: 为了研究硅异质结太阳能电池中纳米硅氧薄膜的光电特性, 采用甚高频等离子体增强化学气相沉积技术制备了一系列不同晶态比例的 nc-SiO_x: H 薄膜, 利用拉曼散射光谱(Raman)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、紫外可见透射光谱以及稳/瞬态光致发光光谱等检测手段分别对薄膜的微观结构、键合配置、能带特征以及发光特性进行了表征。薄膜结构特征分析显示, 随着氧掺入量的增加, 薄膜由微晶向非晶转化, 光学带隙逐渐增加, 而处在相变区(晶化度约为 10%, nc-Si 尺寸约为 3 nm)的薄膜具有较高的中程有序度、较小的结构因子和较为致密的微观结构。薄膜稳/瞬态光致发光结果显示, 一定量的氧掺入可以钝化缺陷、增强发光, 而相变区薄膜的发光强度最大, 表明较小尺寸的 nc-Si 具有较强的量子限制效应, nc-Si 的量子限制效应发光是主要的载流子复合机制。

关键词: 纳米硅氧薄膜; 相变区; 微观结构; 光致发光; 量子限制效应

中图分类号: TN304.055; O472.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.0850

Microstructure and optical characteristics of nanocrystalline silicon oxide film in phase transformation zone

LI Xiao-wei¹, LI Yun¹, ZHENG Yan², GAO Dong-ze¹, YU Wei^{1*}

(1. College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071000, China;

2. China Lucky Film Corporation Limited Company, Baoding 071020, China)

* Corresponding author, E-mail: yuwei@hbu.edu.cn

Abstract: A series of nc-SiO_x: H films were prepared by Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (VHF-PECVD), for the properties study of nanocrystalline silicon oxide films in silicon heterojunction solar cells. The microstructure, bonding configuration, band characteristics and photoluminescence properties of the films were characterized by Raman scattering spectra (Raman), Fourier transform infrared spectra (FTIR), UV-VIs transmission spectra and steady/transient state photoluminescence spectra (PL), respectively. Raman analysis shows that the film structure changes from microcrystalline to amorphous with the increasing of oxygen content. The films proves to have better ordered and denser structure in the phase transformation zone, where the crystallization degree is about 10% and nc-Si particles is about 3 nm. The steady/transient photoluminescence (PL) analysis shows that certain amount of oxygen could passivate defects, thus enhancing the

收稿日期: 2016-10-13; **修订日期:** 2016-12-03.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61504036); 河北省自然科学基金青年基金资助项目(No. A2016201087); 河北省高等学校科学研究指导项目(No. Z2015121); 河北省科技计划项目(No. 13214315); 教育部博士点基金项目(No. 20131301120003); 河北省高等学校科技研究项目(No. QN20131115)

photoluminescence. The highest luminescence intensity was achieved in the phase transformation zone. It indicated that stronger quantum confinement effect PL induced by the smaller nc-Si particles should be the main carrier recombination mechanism.

Key words: nc-SiO_x film; phase transformation zone; microstructure; photoluminescence(PL); quantum confinement effect

1 引言

纳米硅氧(nc-SiO_x)薄膜是纳米晶粒、晶粒间界、孔洞和非晶相等共存的混合相材料,它具有高透光度、宽带隙、低折射率及高掺杂效率等诸多显著优于其他材料的独特性能。利用纳米硅的量子限制效应可以对薄膜的微结构及费米能级进行调节,从而在优化薄膜光电性能的同时兼顾纳米晶硅薄膜材料的光稳定性。以 nc-SiO_x 代替 a-Si:H 作为发射层材料在硅异质结太阳能电池中有较大的应用潜力^[1]。Rau 等人利用 nc-SiO_x 薄膜作为电池的钝化层和掺杂层制备了双面异质结太阳能电池,通过优化工艺参数使电池的开路电压大幅提高,电池转换效率能够达到 18.5%^[2]。氧的掺入提升了薄膜的光电性能,为异质结电池的研究提供了新的方向。

本文采用甚高频等离子体增强化学气相沉积(Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, VHF-PECVD)技术制备了一系列 nc-SiO_x:H 薄膜,分析了薄膜的微观结构、能带特征及发光特性,重点研究了微晶到非晶相变区域薄膜微观结构和光学性质的变化规律,揭示了氧的掺入对薄膜非晶网络的有序性及纳米粒子边界缺陷的调整作用,进而分析了载流子复合机制,从而为硅异质结太阳能电池的光电特性探究提供了可靠的基础数据。

2 实验条件

2.1 样品制备

实验采用 VHF-PECVD 技术(电源频率为 40 MHz),以 SiH₄、H₂ 和 CO₂ 为反应气体,采用石英片和双面抛光 p 型 c-Si(100)作为衬底。在薄膜沉积过程中,反应压强、衬底温度和馈入功率分别固定为 70 Pa、220 °C 和 10 W(功率密度为 0.065 W/cm²)。实验中固定 SiH₄ 和 H₂ 的流量

分别为 2 和 90 mL/min,通过增加 CO₂ 流量 $F(\text{CO}_2)=0,0.5,2,4,7,10,12,15$ mL/min 逐步提高沉积过程中的氧掺入量制备了一系列薄膜样品,分别定义为 S₁, S₂, S₃, S₄, S₅, S₆, S₇, S₈, 薄膜厚度均控制在 200 nm 左右。

2.2 样品检测

采用拉曼(Raman)散射光谱分析薄膜样品的微观结构,傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared, FTIR)分析薄膜的键合特性,紫外-可见透射反射光谱分析样品的能带特征,稳/瞬态光致发光(Photo Luminescence, PL)谱分析薄膜中载流子的复合机制。

3 结果与讨论

3.1 薄膜样品的 Raman 谱分析

图 1(a)给出了不同 $F(\text{CO}_2)$ 条件下所制备的 nc-SiO_x:H 薄膜的 Raman 光谱。从图中可以明显看出,所有样品都表现出 4 个典型的非晶硅的 Raman 特征峰,即 a-Si 的 4 个典型特征散射峰:150 cm⁻¹附近的类 TA 模、310 cm⁻¹附近的类 LA 模、420 cm⁻¹附近的类 LO 模和 480 cm⁻¹附近的类 TO 模散射^[3],并且 TO 模在 520 cm⁻¹附近出现了对应 nc-Si 的较强散射峰。随着 $F(\text{CO}_2)$ 的增加,位于 520 cm⁻¹附近的 Raman 散射峰强度逐渐降低并出现展宽。在 $F(\text{CO}_2)=15$ mL/min 时,样品中 nc-Si 的 Raman 峰完全消失,只存在 a-Si 的散射峰。

为了进一步分析薄膜的微结构,对不同 $F(\text{CO}_2)$ 条件下样品的 Raman 散射谱进行高斯-洛伦兹拟合^[4],样品 S₆ 的 Raman 拟合谱如图 1(a)插图所示。根据 TO 模的三峰拟合强度,利用式(1)计算得到不同 $F(\text{CO}_2)$ 条件的薄膜晶化度 X_c:

$$X_c = (I_{520} + I_{510}) / (I_{520} + I_{510} + I_{480}), \quad (1)$$

式中: I₄₈₀ 为非晶硅在 480 cm⁻¹附近散射峰的积分强度, I₅₁₀ 为晶界成分 510 cm⁻¹附近散射峰的

积分强度, I_{520} 为晶硅成分在 520 cm^{-1} 附近的散射峰积分强度^[5]。薄膜 X_c 的变化趋势如图 1(b) 所示, 可以看出, 薄膜的 X_c 随着 $F(\text{CO}_2)$ 的增加而逐渐降低; 在 $F(\text{CO}_2) = 12\text{ mL/min}$ 时, X_c 已经小于 10%, 随着 $F(\text{CO}_2)$ 的进一步增大, 样品已表现为完全的非晶状态。以上结果表明, 较高的氧掺入将抑制 nc-Si 粒子的生长, 致使薄膜样品由微晶向非晶过渡, 直至最后薄膜变成完全的非晶态。

为了分析纳米硅的量子限制效应, 根据所制备样品类 TO 模晶态成分 Raman 峰相对于晶硅的移动可以估算出所生长晶粒的平均尺寸^[6], 即:

$$\Delta\omega(D) = -A(a/D)^\gamma, \quad (2)$$

其中: $\Delta\omega(D)$ 是直径为 D 的 nc-Si 晶粒的 Raman 位移, a 为 Si 的晶格常数 (0.357 nm), $A = 47.41\text{ cm}^{-1}$ 和 $\gamma = 1.44$ 是描述声子限制的拟合参数。计算得出, 随着 $F(\text{CO}_2)$ 的增加, 薄膜中 nc-Si 粒子的平均晶粒尺寸由 7.9 nm 逐渐减小到 2.5 nm 。这主要是由于随着氧掺入量的增加, 等离子体中活性氢的减少使得薄膜生长表面键合氢的密度降低, 减小了含硅活性粒子的表面迁移率, 同时沉积过程中氧化作用也逐渐增强, 二者均抑制了 nc-Si 的生长。

对薄膜的 Raman 图谱中 TA 模和 TO 模进行拟合计算, 得到表征薄膜中程有序的 $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$ 的变化曲线^[7], 如图 1(b) 插图所示。从图中可以看到, $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$ 随氧含量的增大呈现出先增大后减小再增大的趋势。具体来说, 当 $F(\text{CO}_2)$ 逐渐增加时, $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$ 先增大, 而后在相变区出现一极小值, 表明相变区的薄膜材料的中程有序度在一定程度上有了改善; 当 $F(\text{CO}_2)$ 进一步增大时, $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$ 继续变大, 中程有序度降低, 薄膜继续向着杂乱无序的非晶结构演化^[7]。结合材料的结构特征, 该结

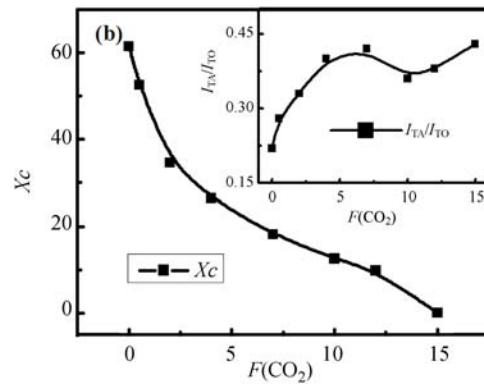
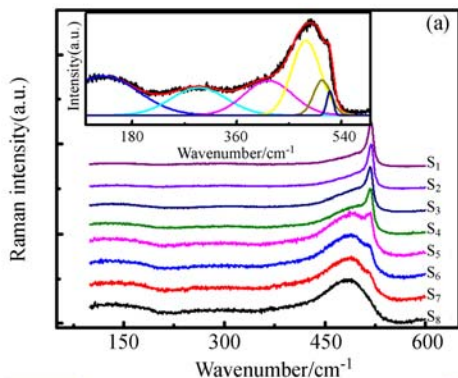


图 1 (a) 薄膜的 Raman 光谱, 插图是样品 S_6 的 Raman 拟合谱; (b) 薄膜晶化度 X_c , 插图为薄膜中程有序度 $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$ 的变化曲线

Fig. 1 (a) Raman spectra of samples, inset is fitting Raman spectrum of S_6 ; (b) Film crystallization degree X_c of samples, inset is $I_{\text{TA}}/I_{\text{TO}}$ change curve

果可以解释为: 随着 $F(\text{CO}_2)$ 的逐渐增加, 反应气体中的含氧粒子增加, 导致晶硅有序的晶格结构因氧的键合作用被破坏, 薄膜的中程有序度降低; 而当 $F(\text{CO}_2)$ 增加到 10 mL/min 时, 中程有序度有所提高, 说明适量氧的掺入可以钝化悬键缺陷, 使得薄膜结构更加有序; 随着 $F(\text{CO}_2)$ 的继续增大, 薄膜转化为非晶状态, 无序成分增加, 导致薄膜的中程有序度下降。

3.2 样品的 FTIR 谱分析

为了分析更多的薄膜微结构信息, 图 2 给出了不同 nc-SiO_x:H 薄膜的 FTIR 光谱。可以看到, 薄膜的红外吸收主要包括 3 个区域: $750 \sim 1\,300\text{ cm}^{-1}$ 的 Si-O 吸收区域, $620 \sim 750\text{ cm}^{-1}$ 的 Si-H 摇摆振动模式和 $1\,900 \sim 2\,300\text{ cm}^{-1}$ 的 Si-H 伸缩振动模式吸收^[9]。其中, $750 \sim 900\text{ cm}^{-1}$ 的吸收对应 Si-O 的弯曲振动模式, $900 \sim 1\,300\text{ cm}^{-1}$ 的吸收对应 Si-O 的非对称伸缩振动模式^[8]。对 Si-H 键的摇摆振动模式区域进行多峰高斯拟合, 可定量计算得到薄膜整体的氢含量 C_H 为:

$$C_H (\text{at. \%}) = (A_H/N_{\text{Si}}) \int [\alpha(\omega)/\omega] d\omega, \quad (3)$$

其中: $\alpha(\omega)$ 是材料在波数为 ω 时的吸收系数; $N_{\text{Si}} = 5 \times 10^{22}\text{ cm}^{-3}$, 为晶体硅的原子键密度; $A_H = 1.6 \times 10^{19}\text{ cm}^{-2}$, 为一比例常数^[9]。与氢含量的计算方法一致, C_O 可由式 (3) 对 $900 \sim 1\,300\text{ cm}^{-1}$ 的 Si-O 伸缩模式拟合得到, 其中, $A_O = 9.5 \times 10^{18}\text{ cm}^{-2}$ ^[8]。

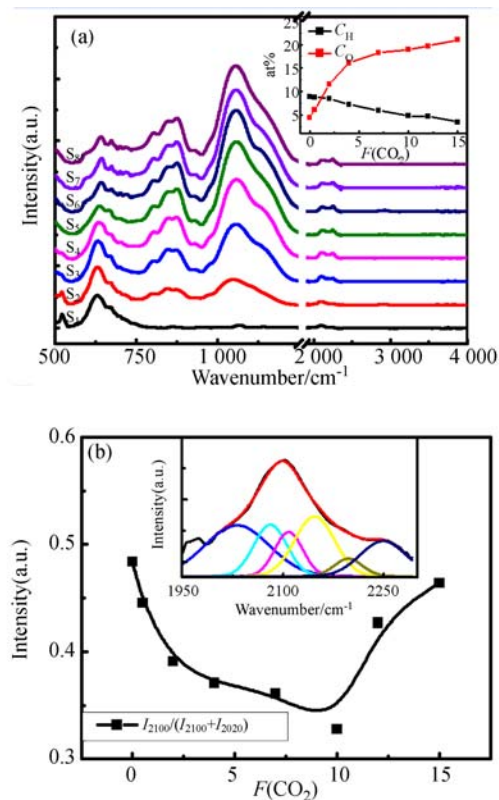


图2 (a)薄膜样品的FTIR谱,插图为 C_H 和 C_O 的变化曲线;(b)结构因子 R 的变化趋势

Fig. 2 (a) FTIR spectra of samples, inset is change curves of C_H and C_O ; (b) Structure factor R versus $F(CO_2)$

由图2(a)看出,随着 $F(CO_2)$ 的增加, C_H 迅速减小;而 C_O 则持续增加,至到相变区时增加速率放缓。这是由于随着氧掺入的增加,沉积空间内氢浓度相对减少,降低了氢在生长表面的键合,同时表面O的解吸附反应几率增加,两者的共同作用使薄膜中H含量下降;而随着 $F(CO_2)$ 的增大,等离子体中积累的含氧粒子数目逐渐增加,有效促进了O在薄膜中的键合,因此薄膜中的O含量不断增加。

对 $1950\sim 2300\text{ cm}^{-1}$ 内Si-H的伸展振动模式进行多峰高斯拟合(图2(b)插图)。其中位于 2020 cm^{-1} 和 2100 cm^{-1} 左右的吸收峰分别对应非晶硅区域内Si-H和Si-H₂的振动吸收^[10]。定义 $R=I_{2100}/(I_{2020}+I_{2100})$ 为薄膜的微结构因子,一般用来表征薄膜的致密性^[11],其值越小反映薄膜所含的孔洞及硅悬键越少,微观结构的质量越好。图2(b)给出了不同样品微结构因子 R 随 $F(CO_2)$ 的变化关系。可以看出,随着 $F(CO_2)$ 的

不断增加,薄膜的微结构因子 R 先减小后增加。沉积过程中形成的a-SiO_x可以有效地填补nc-Si表面的缺陷态,降低了SiH₂在薄膜中所占的比例,改善了薄膜的致密性;而当 $F(CO_2)$ 继续增大时,随着薄膜中的nc-Si粒子数量和粒径逐渐减小,薄膜逐渐转化为无序度较高的非晶硅薄膜,使存在于晶粒边界区的Si-H₂键团簇不断增加,薄膜致密性下降。

3.3 样品的光吸收特性分析

薄膜的光学吸收特性与其微结构和键合特性紧密相关,为了研究不同氧掺入量对薄膜能带特性以及带尾无序度等参量的影响,针对不同 $F(CO_2)$ 条件下样品的UV-Vis透射反射光谱,采用 $T/(1-R)$ 消干涉法计算得到薄膜的吸收曲线,如图3(a)所示。在吸收谱的基本吸收区,利用Tauc方程^[12]即可计算得到样品的光学带隙 E_g , E_g 与入射光子 $h\nu$ 满足以下关系:

$$\sqrt{\alpha h\nu} = B(h\nu - E_g), \quad (4)$$

其中: α 为吸收系数, $h\nu$ 为光子能量, E_g 为Tauc光学带隙, B 为表征薄膜整体有序度的参量。图3(b)给出了不同 $F(CO_2)$ 条件下 E_g 的变化趋势,可见随着氧掺入量的增加, E_g 持续增大。该结果可归因于:一方面,氧的键合作用使得薄膜的导带发生化学位移,使带尾向更高的能量状态移动,造成薄膜带隙展宽;另一方面,氧的持续掺入对nc-Si的有序生长产生消极影响,使得薄膜中的nc-Si晶粒径逐渐减小,由于量子限制效应的影响,也会使得薄膜样品的光学带隙变宽。

一般利用Urbach能 E_u 来衡量薄膜光学指数吸收边的静态无序度,其值越大表示薄膜有序度越低。 E_u 与入射光子 $h\nu$ 之间存在指数关系:

$$\alpha(h\nu) = \alpha_0 \exp[(h\nu - E_0)/E_u]. \quad (5)$$

薄膜 E_u 能随 $F(CO_2)$ 增加的变化关系如图3(b)所示。可以看出,随着 $F(CO_2)$ 的增加,薄膜 E_u 先减小后增加,在相变区出现极小值。结合薄膜的微观结构分析结果可知,较低的氧掺入可钝化硅悬键,进而降低了带尾态密度,使得 E_u 能减小;当进一步增加氧的掺入量时,薄膜中nc-Si粒径减小,比表面积迅速增加,增强的表面应变效应使得nc-Si粒子表面微结构更加无序,从而带尾附近出现了更多的局域态,同时薄膜材料中非晶成分逐渐增多,结构致密度下降,在二者的共同作用下 E_u 能变大。

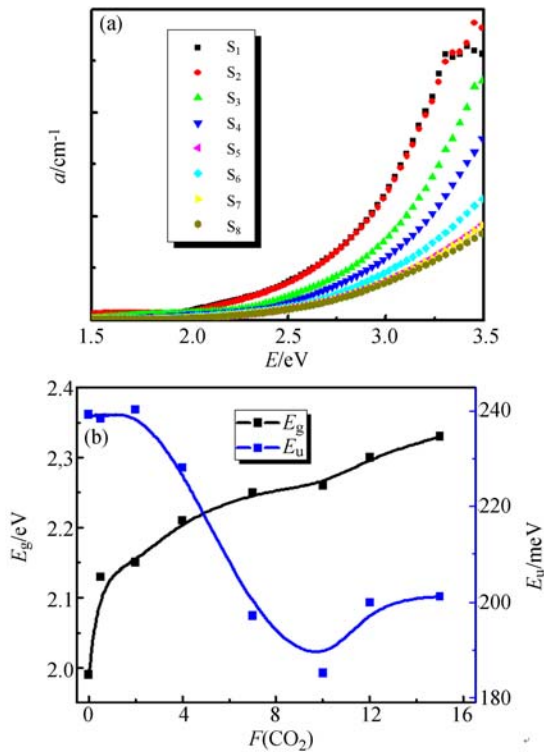


图 3 (a) 薄膜样品的 α - $h\nu$ 曲线; (b) 薄膜光学带隙 E_g 和 E_u 能的变化曲线

Fig. 3 (a) α - $h\nu$ curve (b) optical band gap E_g and E_u change curves of films

3.4 样品的光致发光特性分析

以 350 nm 作为激发波长, 测量了 c-Si 衬底上样品 S_4 - S_7 的室温光致发光谱, 如图 4(a) 所示。4 个样品的发光谱基本在近红外波段, 其发光强度随氧掺入量的增加呈现先增加后减小的趋势, 其中样品 S_6 的发光强度最大。结合前面的微结构分析可知, 样品 S_6 的发光最强可能与其结构有序度较好有关。从图中还可以观察到, 随 $F(\text{CO}_2)$ 的增加, 4 个样品的主发光峰位发生蓝移, 半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)单调增加, 且在 1.19 eV 处存在一个并不遵从量子限制效应的固定伴峰。考虑到所沉积薄膜的结构特性, 该固定伴峰与薄膜的缺陷中心有关。主峰有如上的变化趋势是因为所沉积的薄膜具有一定的尺寸分布, 基于 nc-Si 的量子限制效应, 其光学带隙随着尺寸的减小而增加, 导致发光峰位发生蓝移, 同时由于 nc-Si 粒子尺寸分布变宽, 使得 FWHM 也随之增加。

为了进一步确认 nc-SiO_x 薄膜 PL 的发光机制, 图 4(b) 给出了不同 $F(\text{CO}_2)$ 条件下样品 S_4 ~

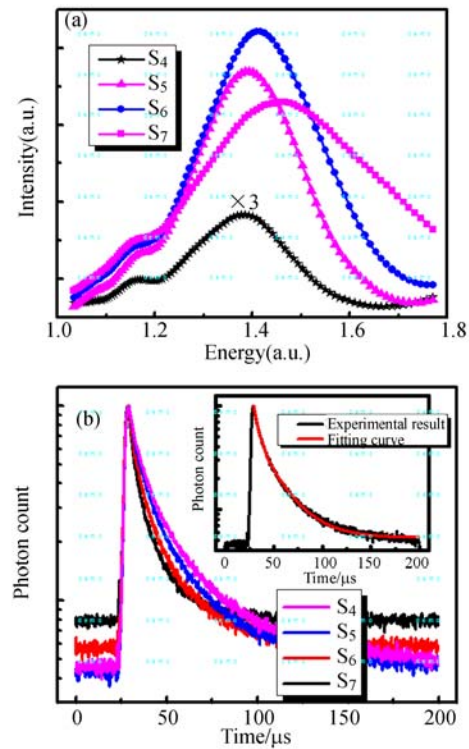


图 4 (a) nc-SiO_x:H 薄膜样品的室温 PL 谱; (b) 时间分辨光谱, 插图扩展指数拟合结果

Fig. 4 (a) PL spectra of film samples at room temperature; (b) Time-resolved PL spectra, inset is fitting curve.

S_7 在 850 nm 处的室温时间分辨光谱, 由样品的时间分辨曲线可以看出, 薄膜的衰减行为并非单指数行为。扣除仪器响应, 对其时间分辨曲线初步采用扩展指数模型进行拟合, 可以得出不同薄膜的平均发光寿命 τ , 即有:

$$I(t) = I_0 e^{-(t/\tau)^\beta}, \quad (6)$$

其中: I_0 是光激发后起始的发光强度, β 为衰减因子, 其值在 0~1 之间^[13]。表 1 给出了薄膜的平均发光寿命及衰减因子的拟合结果。结果显示, 在室温条件下, 不同氧掺入量薄膜的发光寿命均在微秒量级, 且随着 $F(\text{CO}_2)$ 的增加发光寿命变短, 而 β 因子则呈现出先减小后增加的变化趋势。通常情况下, $\beta < 1$ 表示存在着一个比较宽的寿命分布, 这个寿命分布同时描述了样品的辐射和非辐射复合过程。按照 Pavesi 等人的研究结果, β 表示孤立量子点的离散度, $\beta = 1$ 表示完全离散的 Si-QDs^[14]。样品 S_6 存在较小的 β 值, 这表示薄膜载流子复合过程存在大的离散度。从宏观角度, β 因子还可以表征薄膜的有序程度, β 因子随

着氧掺入量的增加先减小后增加,说明样品的有序度先增加后减小,这与 UV-Vis 透射反射光谱的分析结果一致^[15]。由于 nc-Si 的量子限制效应破坏了声子辅助跃迁的选择定则,快的辐射复合过程一般产生于粒径较小的 nc-Si 粒子中^[16]。此外,作为镶嵌结构,表面态对较小的 nc-Si 结构中的载流子复合过程至关重要^[17]。表面态密度的增加使得载流子通过表面态复合的几率显著升高,从而导致发光寿命变短。

表1 不同 F(CO₂)条件下 nc-SiO_x:H 薄膜的发光寿命和 β 因子

Tab.1 PL life and beta factor of nc-SiO_x:H thin films with different F(CO₂)

Sample	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇
τ/μs	15.6	12.3	11.5	9.8
β	0.662	0.647	0.635	0.656

参考文献:

- [1] NASUNO Y, KONDO M, Matsuda A. Microcrystalline silicon thin-film solar cells prepared at low temperature using PECVD[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2002, 74(1-4):497-503.
- [2] DING K N, AEBERHARD U, FINGER F, et al. Silicon heterojunction solar cell with amorphous silicon oxide buffer and microcrystalline silicon oxide contact layers[J]. *Physica Status Solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, 2012, 6(5):193-195.
- [3] 张世斌,廖彦伯,安龙,等.非晶/微晶过渡区域硅薄膜的微区喇曼散射研究[J]. *物理学报*, 2002, 51(8): 1811-1815.
ZHANG SH B, LIAO X B, AN L, et al. Micro-Raman study on hydrogenated protocrystalline silicon films [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(8): 1811-1815. (in Chinese)
- [4] VIERA G, HUET S, BOUFENDI L. Crystal size and temperature measurements in nanostructured silicon using Raman spectroscopy[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 90(8): 4175-4183.
- [5] YUE G Z, LORENTZEN J D, LIN J, et al. Photoluminescence and Raman studies in thin-film materials; Transition from amorphous to microcrystalline silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(4): 492-494.

4 结 论

本文采用 VHF-PECVD 技术通过控制 CO₂ 流量制备了一系列不同晶态比的 nc-SiO_x:H 薄膜,利用 Raman、FTIR、紫外可见透射反射谱以及稳态/瞬态的 PL 谱等检测技术对薄膜的微观结构、能带特征以及发光特性进行了分析。微结构分析结果表明,随着氧掺入量的增加,薄膜晶化度下降,光学带隙增加,相变区薄膜结构的有序度最好。由此可知,较低的氧掺入量可以有效终止 nc-Si 表面的硅悬键,提高薄膜中非晶成分的有序度。稳/瞬态光致发光结果显示,相变区薄膜中 nc-Si 发光是主要的载流子复合机制,尺寸较小的 nc-Si 呈现出较强的量子限制效应,从而使发光中心蓝移,发光强度最大。

- [6] ZI J, BÜSCHER H, FALTER C, et al. Raman shifts in Si Nanocrystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(2):200-202.
- [7] JR SMITH J E, BRODSKY M H, CROWDER B L, et al. Raman spectra of amorphous Si and related tetrahedrally bonded semiconductors [J]. *Physical Review Letters*, 1971, 26(11): 642-646.
- [8] HE L, INOKUMA T, KURATA Y, et al. Vibrational properties of SiO and SiH in amorphous SiO_x:H films (0 ≤ x ≤ 2.0) prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, 185(3): 249-261.
- [9] LUCOVSKY G, NEMANICH R J, KNIGHTS J C. Structural interpretation of the vibrational spectra of a-Si:H alloys [J]. *Physical Review B*, 1979, 19(4): 2064-2073.
- [10] LTOH T, YAMAMOTO K, USHIKOSHI K, et al. Characterization and role of hydrogen in nc-Si:H [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 266-269:201-205.
- [11] OUWENS J D, SCHROPP R E I. Hydrogen microstructure in hydrogenated amorphous silicon [J]. *Physical Review B*, 1996, 54(24): 17759-17762.
- [12] LI T, KANICKI J, KONG W, et al. Interference fringe-free transmission spectroscopy of amorphous thin films[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, 88(10): 5764-5771.

- [13] JAYATILLEKA H, DIAMARE D, WOJDAK M, *et al.*. Probing energy transfer in an ensemble of silicon nanocrystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, 110(3): 033522.
- [14] PAVESI L, CESCHINI M. Stretched-exponential decay of the luminescence in porous silicon[J]. *Phys. Rev. B*, 1993, 48(23):17625-17628.
- [15] CULLIS A G, CANHAM L T, CALCOTT P D J. The structural and luminescence properties of porous silicon[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, 82(3):909-965.
- [16] VAN D L, WEN X M, DO M T T, *et al.*. Time-resolved and time-integrated photoluminescence analysis of state filling and quantum confinement of silicon quantum dots[J]. *J. Appl. Phys.*, 2016, 97(1): 013501.
- [17] GODEFROO S, HAYNE M, JIVANESCU M, *et al.*. Classification and control of the origin of photoluminescence from Si nanocrystals[J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3(3): 174-178.

作者简介:



李晓莉(1955—),男,河北保定人,教授,河北大学光学与材料物理研究所所长,新能源光电器件国家地方联合工程实验室副主任,河北省光电信息材料重点实验室副主任,主要从事影像科学与光伏器件,光学信息诊断方面的研究。E-mail:18617636694@163.com



李云(1986—),女,河北石家庄人,博士研究生,2014年于河北大学获得硕士学位,主要从事光电功能材料与器件方面的研究。E-mail:yunli_0317@163.com

通讯作者:



于威(1965—),男,河北保定人,教授,博士生导师,1992年、2002年于河北大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光电功能材料与器件的研究。E-mail:yuwei@hbu.edu.cn