

非晶氧化硅薄膜带尾发光特性

于 威 戴万雷 王新占 刘玉梅 郭少刚 郭亚萍 路万兵 傅广生

(河北大学物理科学与技术学院光电信息材料重点实验室, 河北 保定 071002)

摘要 采用等离子体增强化学气相沉积技术,通过改变 CO_2 流量制备了不同氧含量的非晶氧化硅薄膜。利用紫外可见吸收谱、傅里叶红外吸收谱和稳态/瞬态光致发光谱等技术研究了薄膜的微观结构和光学特性。实验结果表明,随着氧含量的增加,薄膜的带隙增大,光致发光强度增加、峰值朝高能方向移动、光谱半峰全宽展宽。时间分辨光谱显示薄膜发光峰值处的衰减时间随氧含量的增加从 6.2 ns 单调增加到 21 ns,而同一样品的发光寿命随发射波长能量增加而减小。综合分析光学吸收、发射及发光衰减特性表明,薄膜的发光机制主要归结为非晶材料带尾态之间的辐射复合。

关键词 光谱学;带尾态发光;光学吸收;时间分辨光谱;非晶氧化硅

中图分类号 O433.4; O751

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0731003

Band Tail Photoluminescence of Amorphous SiO_x Films

Yu Wei Dai Wanlei Wang Xinzhan Liu Yumei Guo Shaogang Guo Yaping
Lu Wanbing Fu Guangsheng

(Key Laboratory of Optic-Electronic Information Materials, College of Physics Science and Technology,
Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract Amorphous silicon oxide (a-SiO_x) films are prepared using plasma enhanced chemical vapor deposition technique. The microstructural and optical characteristics of a-SiO_x films are investigated by Fourier transformed infrared spectra, optical absorption spectra, and steady/time-resolved photoluminescence (PL) spectra. With the CO_2 flow rate increasing, the band gap and PL intensity of the films increase, the PL peak moves toward high energies, and the full width at half maximum of the PL are widened. In addition, the decay time at PL peaks increases from 6.2 ns to 21 ns with oxygen content enhancing. However, linearly decreased decay time with energy increasing is found for one sample. Optical transitions among band tail states of amorphous materials are considered as the main light emission mechanism based on the analysis of optical absorption, emission and decay characteristics.

Key words spectroscopy; band tail luminescence; optical absorption; time-resolved photoluminescence; amorphous silicon oxide

OCIS codes 300.6280; 300.6340; 300.1030; 300.6500

1 引 言

自从 1990 年 Canham^[1]发现氧化多孔硅的室温光致发光(PL)以来,新的硅基发光材料成为研究热点。非晶氧化硅(a-SiO_x)由于其致密的结构、很强的光致发光性能受到越来越多的关注^[2~5],在硅晶体管、光电子器件和 LED 等方面,都有很大的应用潜力^[3~5]。近年来,磁控溅射、热蒸发和等离子体增强化学气相沉积(PECVD)等多种薄膜制备技术

已经应用于非晶氧化硅薄膜的制备,并且已经实现不同波长的光学发射^[6~9]。然而,由于该薄膜材料结构的复杂性,其光发射特性对实验技术和生长条件具有极大的依赖性,研究人员对该材料的发光机制还不是很清楚。马智训等^[10]利用 PECVD 技术制备 a-SiO_x 薄膜,通过增加样品的氧含量实现了光致发光峰值从 1.7 eV 到 2.0 eV 的调节,其发光主要源于镶嵌在 SiO_x 中的非晶硅颗粒的量子限制效

收稿日期: 2012-02-22; 收到修改稿日期: 2012-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(60940020,60878040)资助课题。

作者简介: 于 威(1965—),男,博士,教授,主要从事新型光电功能材料制备及材料特性分析等方面的研究。

E-mail: yuwei@hbu.edu.cn

应。Prokes 等^[11]利用自然氧化和退火两种不同的方法得到 SiO_x 样品在 1.5 eV 的光致发光,并将其归因于样品表面氧空位缺陷。Carius 等^[12]采用辉光放电的方法制备不同氧含量的 a- SiO_x 样品,观察到两个发光带:一个发光峰固定在 1.1 eV,另一个发光峰值从 1.4 eV 移动到 2.3 eV。作者结合吸收和发射之间的关系,认为第一个发光带来源于氧缺陷,而另一个发光带源于带尾态的发光。可以看出,人们对非晶氧化硅材料发光机制的认识仍然存在很大的分歧,造成这种分歧的主要原因是 a- SiO_x 发光来源的多样性和非辐射复合路径的复杂性^[2]。为了深入地理解光生载流子的复合过程,需要结合发光材料的吸收过程进行对比分析,以实现对比 a- SiO_x 薄膜发光机制的深入探索。

本文采用 PECVD 技术制备了不同 CO_2/SiH_4 配比的 a- SiO_x 薄膜,在室温下实现了 a- SiO_x 薄膜在红外到可见的可调光致发光。利用紫外可见吸收谱、傅里叶红外吸收谱、稳态和瞬态光致发光谱对不同氧含量样品的吸收和发光特性进行了分析,结果证实样品的主要发光机制为薄膜带尾态之间的辐射复合。

2 实 验

实验采用 PECVD 技术制备了不同氧含量的 a- SiO_x 薄膜。以 SiH_4 、 H_2 和 CO_2 为反应气体,在单晶硅(100)和石英衬底上沉积成膜。实验过程中,射频功率密度为 1 W/cm^2 ,衬底温度为 $400 \text{ }^\circ\text{C}$,气压为 120 Pa。固定 SiH_4 和 H_2 流量分别为 1 sccm 和 100 sccm(sccm 即在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$,1 个标准大气压的标准状态下毫升每分钟),改变 CO_2 的流量得到不同氧含量的 a- SiO_x 样品。 CO_2 流量依次为 3、4、5、6、8、12 sccm,所制备样品分别编号为 C1、C2、C3、C4、C5、C6。

薄膜的光学吸收光谱使用 Zolix300 的紫外可见透射反射分光仪;采用 Bio-Rad 60V 型傅里叶变换红外透射光谱仪测量 Si 衬底上所沉积薄膜的傅里叶变换红外(FTIR)光谱,通过对特征红外吸收谱的拟合分析薄膜的组成和键合结构;样品在室温下的稳态光致发光和瞬态寿命采用的是 FLS920 荧光光谱仪,激发光源为 450 W 的氙灯和 375 nm 皮秒脉冲激光器。

3 实验结果及分析

3.1 薄膜的键合特性

采用 FTIR 吸收谱可以对 a- SiO_x :H 薄膜的键

合结构和元素的相对含量进行分析。图 1 表示不同氧含量的 SiO_x 薄膜的 FTIR 吸收谱。如图 1 所示,a- SiO_x :H 薄膜的 FTIR 吸收谱主要包含以下几个振动吸收区:458 cm^{-1} 附近的 Si-O-Si 摇摆振动吸收区,640 cm^{-1} 附近的 Si-H 键的摇摆振动吸收区,808 cm^{-1} 附近的 Si-O 弯曲振动吸收区,880 cm^{-1} 的 Si-H 弯曲振动吸收区以及 1080 cm^{-1} 左右的 Si-O 伸缩振动吸收区^[13]。随着氧含量的增加,在 640 cm^{-1} 附近的 Si-H 摇摆吸收的峰值朝长波数方向移动,吸收强度逐渐减小;在 880 cm^{-1} 处的 Si-H 摇摆振动吸收也明显减弱;1080 cm^{-1} 附近的 Si-O 伸缩振动吸收峰值从 1026 cm^{-1} 移动到 1055 cm^{-1} ,吸收强度明显增加。

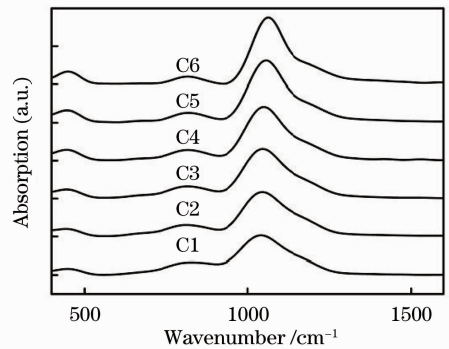


图 1 不同氧含量的 a- SiO_x :H 薄膜的红外吸收谱线
Fig. 1 FTIR absorption spectra of the a- SiO_x :H films with various oxygen compositions

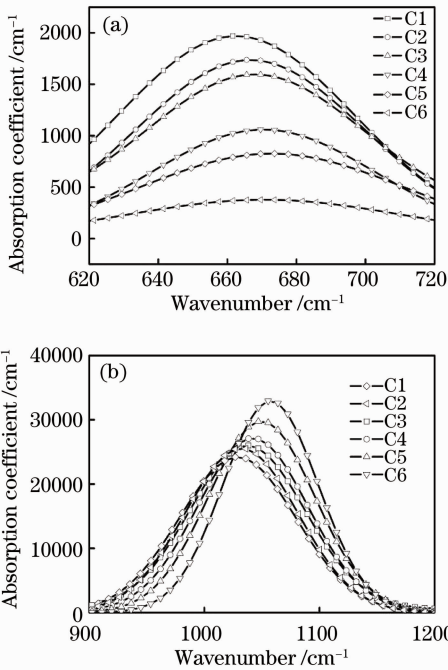
图 2(a)、(b) 分别表示不同氧含量样品在 640 cm^{-1} 处的 Si-H 摇摆振动吸收谱和 1080 cm^{-1} 处得 Si-O 伸缩振动吸收谱。根据 Hasegawa 等^[13,14]的方法,薄膜中对应的氢含量和氧含量可以根据 Si-O 伸缩振动模和 Si-H 摇摆振动模的积分强度确定:

$$C_{\text{H/O}} = \left[\frac{A_\omega}{\rho_{\text{c-si}}} \right] \times \int \frac{\alpha(\omega)}{\omega} d\omega \times 100\%, \quad (1)$$

式中 A_ω , $\alpha(\omega)$, ω 分别为校正因子、吸收系数和波数。Si-O 和 Si-H 的校正因子分别为 $9.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ 和 $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ 。 $\rho_{\text{c-si}}$ 为晶体硅的原子密度,近似为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 。根据(1)式分别得到各样品的氢含量和氧含量,如表 1 所示。从表中可以得出,随着 CO_2/SiH_4 的增加,薄膜中氢含量(原子数分数)从 7.5% 减小到 1%,而薄膜中氧含量从 33.8% 增加到 58.5%,表明随着 CO_2/SiH_4 的比例的增加,薄膜中的氧含量逐渐增加,而氢含量逐渐减小,主要归因于薄膜中 Si-O 键合密度的增加以及 Si-H 键合密度的减小。

表 1 不同氧含量 a-SiO_x 薄膜的光学参数Table 1 Optical parameters of the a-SiO_x thin films prepared under different oxygen content compositions

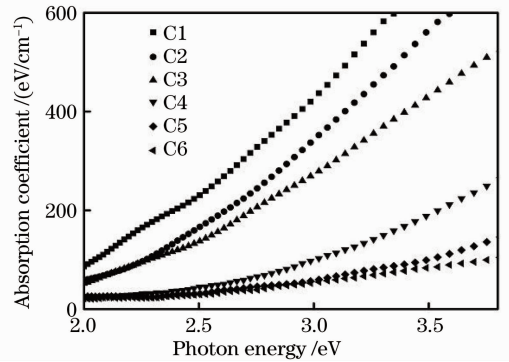
Sample	C _O /%	C _H /%	E ₀₄ /eV	B /meV	E _U /meV	E _{PL} /eV	FWHM /eV	τ _i /ns	R _C /nm
C1	33.8	7.5	2.2	465	198	1.46	0.607	6.2	2.47
C2	38.2	6.5	2.4	425	260	1.60	0.895	7.8	2.13
C3	44.3	6.3	2.82	334	280	1.71	0.908	8.4	1.90
C4	52.8	4	3.46	227	391	1.89	0.933	8.7	1.69
C5	54.9	3.5	4.13	210	500	2.17	0.987	16	1.25
C6	58.5	1	4.46	206	564	2.40	1.2	21	1.11

图 2 不同氧含量样品在 620~720 cm⁻¹和 900~1200 cm⁻¹处的红外吸收谱线Fig. 2 FTIR-absorption bands in the ranges of 620 ~ 720 cm⁻¹ and 900 ~ 1200 cm⁻¹ for samples with various oxygen compositions

3.2 薄膜的光吸收特性

薄膜的光学特性可用光学带隙 E_{04} 、 B 因子及 E_U 能表征。图 3 表示吸收系数 $\sqrt{ah\nu}$ 和光子能量 $h\nu$ 之间的关系,根据 Urbach 方程和 Tauc 方程^[15],表 1 给出每个样品的 E_{04} 、 B 、 E_U 。光学带隙 E_{04} 的变化表明了氧的掺入使得薄膜能带结构发生了变化。富硅薄膜的带隙主要由非晶硅导带底的 Si-Si sp^3 反键作用和价带顶的 Si-Si sp^3 键决定^[13]。随着氧含量的增加, Si-Si 键逐步被 Si-O-Si 键取代。在较低的能级引入了新的由 O 的 2P 态构成的价带,该价带分裂成两个能级,一个是孤对氧形成的非键合态,另一个是低能的 Si-O 键态^[14]。同样 O 的 2P 态以 Si-O 反键态存在于导带中。通过氧的掺入,导带底和价带顶逐步被 Si-O 反键和 Si-O 键取

代,而在导带底 Si-O 反键作用的能量比 Si-Si 反键的能量高,价带顶的 Si-O 键的能量比 Si-Si 键能量低,最终导致带隙逐渐变大。 B 因子是标志薄膜的整体结构无序程度的一个重要参量,它是带尾无序效应的度量且随着薄膜无序程度增大而减小,而 E_U 能为关联薄膜带尾宽度和网络无序性的参量,其值越大无序度就越大。从表 1 可以看出,随着 CO₂/SiH₄ 的比例增大, SiO_x 的光学带隙从 2.2 eV 增加到 4.46 eV, B 因子从 465 meV 减小到 206 meV, E_U 能从 198 meV 增加到 564 meV,表明氧的掺入使得薄膜的带隙增大,薄膜带尾态的宽度增加,同时薄膜的无序程度也随着氧比例增加而增加。

图 3 不同氧含量样品的 $\sqrt{ah\nu}$ 和 $h\nu$ 之间的关系Fig. 3 $\sqrt{ah\nu}$ versus $h\nu$ for the a-SiO_x:H films with various oxygen compositions

3.3 薄膜的发光特性

图 4 表示的是不同氧含量的 a-SiO_x 的室温光致发光,通过改变薄膜的氧含量,发射峰值从 1.5 eV 移动到 3.4 eV,覆盖全部可见光范围。随着沉积时 CO₂/SiH₄ 比例的增加,发光峰值向高能方向移动,谱线半峰全宽 (FWHM) 逐渐变宽。这些现象和在 a-SiN_x:H^[16] 和 a-SiC_x:H^[17] 所观测的现象相一致,可以解释为电子和空穴在带尾态的局域态发生辐射复合。随着氧含量的增加,禁带宽度变大,使得吸收边蓝移,发光峰移动到一个较高的能量。此外,氧的掺入增加了结构的无序度,导致局域态的

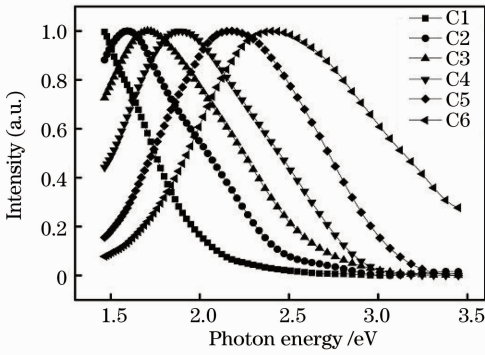


图 4 不同氧含量 a-SiO_x 薄膜归一化的光致发光谱
Fig. 4 Normalized PL spectra of a-SiO_x films with various oxygen compositions

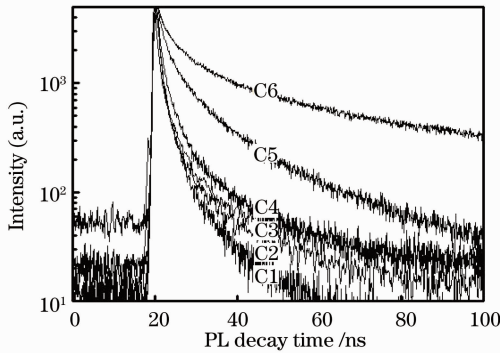


图 5 不同氧含量 a-SiO_x 薄膜的时间分辨光谱
Fig. 5 Time-resolved PL spectra of a-SiO_x:H films with various oxygen compositions

宽度增加,从而增加了发光谱的半峰全宽。图 5 列出所有样品的时间分辨光谱,在 FLS920 系统软件上利用三指数拟合的方法得到衰减速率,而样品的平均衰减寿命可以通过下式得到:

$$\langle \tau \rangle = \frac{B_1 \tau_1^2 + B_2 \tau_2^2 + B_3 \tau_3^2}{B_1 \tau_1 + B_2 \tau_2 + B_3 \tau_3}, \quad (2)$$

式中 B_i 为振幅因子, τ_i 为衰减时间, $\langle \tau \rangle$ 为平均衰减时间。结果显示,室温条件下, a-SiO_x 薄膜的发光寿命都在纳秒量级。不同 x 的衰减时间如表 1 所示,随着氧含量的增加,衰减速率逐渐变慢,发光寿命变长。

3.4 分析

薄膜样品的发光和吸收特性存在紧密的关联。图 6 表示的是 E_U 与吸收和发射的差值 ($E_{O4} - E_{PL}$) 的关系。可以看出,随着 E_U 能的增加, $E_{O4} - E_{PL}$ 线性增大。根据 Bouilitrop 等^[18~20]提出的带尾态发光模型,电子和空穴在带边经历一个快速的热弛豫之后,还要在带尾经历一个缓慢的热弛豫过程,当载流子到达辐射复合和非辐射复合的几率相等的半径为 R_C 的球内时发生辐射复合。光致发光峰值对于光学带隙的移

动可以表示为

$$E_{O4} - E_{PL} = E_U \ln \left(\frac{4}{3} \pi R_C N_0 E_U \right), \quad (3)$$

式中 N_0 表示非晶氧化硅带边的电子态密度, $N_0 = 5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{eV}^{-1}$ ^[19,21], 分别代入样品的 E_{O4} , E_{PL} 和 E_U 值,可以求出所有样品的 R_C ,如表 1 所示。随着氧含量增加, R_C 在逐渐减小,而 E_U 增大, $\ln \left(\frac{4}{3} \pi R_C N_0 E_U \right)$ 近似为一定值,这与图 6 给出的拟合结果 $\frac{E_{O4} - E_{PL}}{E_U} = 1.92$ 完全一致,充分表明样品的光学发射符合 Dustain 等提出的带尾态发光模型。

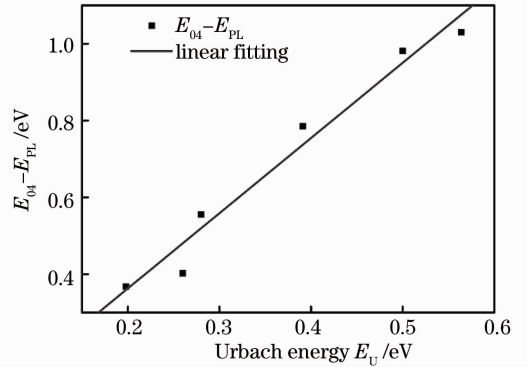


图 6 $E_{O4} - E_{PL}$ 和 E_U 能的关系(图中直线是最佳拟合曲线,斜率为 1.92)

Fig. 6 $E_{O4} - E_{PL}$ versus Urbach energy E_U (straight line shows the best linear fitting with slope of 1.92)

在非晶材料中的带尾宽度可以解释为空间带隙的波动,也可以由光致发光的半峰全宽表示。光致发光的峰值 E_{PL} 和 FWHM 与光学带隙之间的关系分别如图 7 所示。从图中可以看出,光致发光峰值和 FWHM 随着带隙增加线性增加。这是由于氧含量的增加使得结构无序度和成分波动增加,在同一个样品中成分的多样性导致空间带隙波动,带尾态宽度变宽,最终使得光致发光谱变宽^[16,18]。

图 8 表示的是激发能量 E_{ex} 和光学带隙的差值以及光致发光的强度与薄膜氧含量的关系。从图中可以看出随着氧含量的增加, $E_{ex} - E_{O4}$ 逐渐减小,光致发光强度明显增强, C6 光致发光的强度比 C1 大一个数量级。这是由于氧含量较低时,样品的带隙远小于激发能量,属于超带隙激发,超带隙激发时,光子全部被吸收后,光生载流子首先通过热辐射弛豫到导带的带尾,然后发生辐射复合,此时非辐射复合比较强,辐射复合相对较弱,光致发光强度较弱。随着氧含量的增加,带隙逐渐变大,样品的超带隙吸收逐步转化为带隙吸收,此时激发的载流子可以不

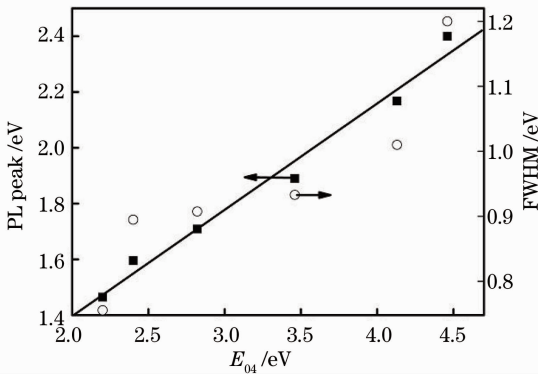


图7 E_{PL} 和 FWHM 与光学带隙 E_{04} 之间的关系
Fig. 7 E_{PL} and FWHM versus optical band gap E_{04}

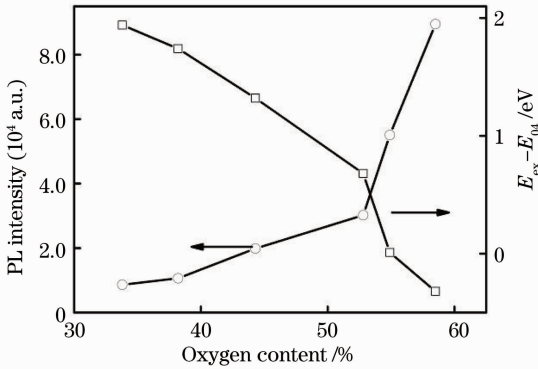


图8 光致发光的峰值强度和 $E_{ex} - E_{04}$ 分别与氧含量之间的关系

Fig. 8 PL peak intensity and $E_{ex} - E_{04}$ versus oxygen content, respectively

经过热辐射,直接在导带和价带的带尾发生辐射复合,所以发光强度明显增强^[20]。

图9表示的是样品C3和C4不同发射波长的瞬态光谱。从图中可以明显看出,随着发射能量减小,发光寿命线性增加。相反的关系表明 $a\text{-SiO}_x$ 的复合过程归因于带尾态^[18,19]。在带边比较快的热辐射过程之后,光生载流子和空穴在带尾态开始一个比较慢的热辐射过程。当载流子到达一个更低的能态时发生辐射复合,态越低则电子和空穴复合的时间越长,这是由于光致发光发生在导带和价带的带尾,复合穿越的态越深,低能量的光子发光寿命就越长。

4 结 论

采用 PECVD 技术制备了室温光致发光峰值从 1.5 eV 到 3.4 eV 可调的 $a\text{-SiO}_x$ 薄膜。结果表明,随着氧含量的增加,光致发光强度变强, $a\text{-SiO}_x$ 的带隙增大,光致发光的峰值朝高能方向移动,同时光致发光的半峰全宽变宽。吸收和发射数据之间关系的

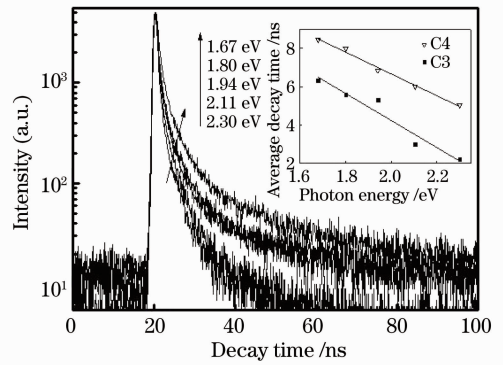


图9 样品 C4 在 5 个不同发射能量下的时间分辨光谱,插图为样品 C3, C4 不同发射能量下的寿命(数据点为原始数据,实线为拟合结果)

Fig. 9 Time-resolved PL spectra of sample C4 refer to five different emission energies. The inset shows the variation of lifetime versus emission energy of sample C3 and C4 (the dots are raw data, the solid line is fitted result)

分析表明 $a\text{-SiO}_x$ 的发光符合 Dustain 和 Boulitrop 对于非晶材料提出的带尾态发光模型。改变发射波长能量,发光寿命反而减小,充分说明发光过程遵循带尾态发光模型。综合分析表明, $a\text{-SiO}_x$ 的室温发光由带尾态发光产生。

参 考 文 献

- 1 L. T. Canham. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**(10): 1046~1048
- 2 H. Watanabe, K. Haga, T. Lohner. A structural interpretation of Si-O-Si vibrational absorption of high-photoconductive amorphous $a\text{-SiO}_x$: H films [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1993, **164-166**: 1085~1088
- 3 M. Bhat, L. K. Han, D. Wristers *et al.*. Effects of chemical composition on the electrical properties of NO-nitrided SiO_2 [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(10): 1225~1227
- 4 R. Janssena, U. Karrera, D. Dimova-Malinovska *et al.*. Amorphous silicon suboxide light-emitting diodes [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1998, **227-230**: 1151~1155
- 5 Yonghua Xu, Takahiro Fujino, Seiji Watase *et al.*. Enhanced ultraviolet emission in polysilane light-emitting diodes by inserting a SiO_x thin layer [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(4B): 2609~2612
- 6 L. F. Bian, C. G. Zhang, W. D. Chen *et al.*. Interface effect on emission properties of Er-doped Si nanoclusters embedded in SiO_2 prepared by magnetron sputtering [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **99**(9): 094302
- 7 H. Rinnert, M. Vergnat, G. Marchal. Structure and optical properties of amorphous SiO_x thin films prepared by co-evaporation of Si and SiO [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2000, **69-70**: 484~488
- 8 F. Hiromitsu Kato, Akira Masuzawa, Takashi Noma *et al.*. Thermally induced photoluminescence quenching centre in hydrogenated amorphous silicon oxynitride [J]. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2001, **13**(30): 6541~6549
- 9 Jiang Dong, Hu Xiaoyun, Miao Zhonghai *et al.*. Luminescent

- properties of Eu^{3+} in nano-matrix of SiO_2 [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 449~452
- 江 东, 胡晓云, 苗仲海 等. 纳米 SiO_2 基质中 Eu^{3+} 的发光特性 [J]. 中国激光, 2009, **36**(2): 449~452
- 10 Ma Zhixun, Liao Xianbo, He Jie *et al.*. Origins of strong visible photoluminescence from $\alpha\text{-SiO}_x : \text{H}$ [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 1999, **20**(2): 162~167
- 马智训, 廖显伯, 何 杰 等. 氢化非晶氧化硅薄膜光致发光起源的探讨[J]. 半导体学报, 1999, **20**(2): 162~167
- 11 S. M. Prokes, W. E. Carlos, S. Veprek *et al.*. Defect studies in as-deposited and processed nanocrystalline Si/SiO₂ structures [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(23): 15632~15635
- 12 R. Carius, R. Fischer, J. Stuke *et al.*. Photoluminescence in the amorphous system SiO_x [J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(6): 239~244
- 13 S. Hasegawa, L. He, T. Inokuma *et al.*. Analysis of photo emission in amorphous SiO_x and SiN_x alloys in terms of a charge-transfer model [J]. *Phys. Rev. B*, 1992, **46**(19): 12478~12484
- 14 Sumita Mukhopadhyay, Swati Ray. Silicon rich silicon oxide films deposited by radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition method; optical and structural properties [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, **257**(23): 9717~9723
- 15 Ding Wenge, Yuan Jing, Li Wenbo *et al.*. Temperature dependent optical absorption of silicon nanostructure thin film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0531002
- 丁文革, 苑 静, 李文博 等. 纳米硅结构薄膜光吸收的温度依赖特性[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0531002
- 16 M. Wang, M. Xie, L. Ferraioli *et al.*. Light emission properties and mechanism of low-temperature prepared amorphous SiN_x films. I. Room-temperature band tail states photoluminescence [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104**(8): 083504
- 17 R. A. Street. Luminescence and recombination in hydrogenated amorphous silicon [J]. *Adv. Phys.*, 1982, **30**(5): 593~676
- 18 F. Boulitrop, D. J. Dunstan. Phonon interactions in the tail states of $\alpha\text{-Si:H}$ [J]. *Phys. Rev. B*, 1983, **28**(10): 5923~5929
- 19 F. Giorgis, P. Mandracci, L. Dal Negro *et al.*. Optical absorption and luminescence properties of wide-band gap amorphous silicon based alloys [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2000, **266-269**: 588~592
- 20 J. Kister, X. Chen, Y. Weng *et al.*. Photoluminescence from silicon nitride—no quantum effect[J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **110**(2): 023520
- 21 L. Ley, T. Searle. Properties of Amorphous Silicon and its Alloys[M]. London: INSPEC, 1998. 113

栏目编辑: 韩 峰