

# 纳米硅结构薄膜光致发光的温度依赖特性

丁文革 卢云霞 孙 雪 桑云刚 滕晓云 于 威 傅广生

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

**摘要** 综合考虑纳米硅结构薄膜的特殊性质,如量子限制效应、光学带隙和光跃迁振子强度对纳米硅粒径的依赖特性以及光学带隙和光辐射的温度依赖特性等,给出了一个解析表达式来分析具有一定粒径分布的纳米硅结构薄膜的光致发光(PL)强度分布,其中选取了两种纳米硅的粒径分布,即高斯分布和对数正态分布。结果表明,随着平均粒径和粒径分布偏差的减小,纳米硅薄膜的 PL 谱峰蓝移。随着环境温度的升高,纳米硅结构薄膜的 PL 谱峰红移且相对发光强度减弱。纳米硅结构薄膜光辐射拟合的结果与实验数据的比较分析表明,该模型能够很好地解释纳米硅结构薄膜在不同温度下的 PL 特性。

**关键词** 薄膜;纳米硅;光致发光;温度依赖特性;模型

中图分类号 O484.4<sup>+</sup>1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0831002

## Temperature-Dependent Photoluminescence of Silicon-Nanostructure Thin Film

Ding Wen'ge Lu Yunxia Sun Xue Sang Yungang  
Teng Xiaoyun Yu Wei Fu Guangsheng

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

**Abstract** Considering the quantum confinement effect in silicon nanoparticles, the effect of the mean silicon nanoparticle size on optical band gap, optical transition oscillator strength, and the temperature dependence of the band gap and optical radiation, a model is introduced to analyze the photoluminescence (PL) of silicon-nanostructure thin film with a certain size distribution of silicon nanoparticles. Where Gaussian function as well as log-normal function is considered for size distribution of silicon nanoparticles. The results show that there will be blue shifts of the PL peak energy decreasing with mean size and size dispersion. As the temperature increases, the PL peak exists red shifts accompanied by decreasing of light intensity. The comparative analysis of the simulation results and experimental data of PL implies shows that our model can well explain the PL in silicon nanostructure thin film in different temperatures.

**Key words** thin films; silicon nanoparticle; photoluminescence; temperature dependence; model

**OCIS codes** 160.4236; 310.6860; 300.2140; 120.6780

## 1 引 言

1990 年多孔硅室温可见光致发光的发现<sup>[1]</sup>及其在光电集成方面的潜在应用,引发了人们对低维纳米硅基发光材料的兴趣。大量实验研究表明<sup>[2~5]</sup>,在镶嵌有纳米硅的氧化硅(SiO<sub>x</sub>)或氮化硅(SiN<sub>x</sub>)薄膜中,可见光致发光(PL)能带相对于晶体硅的带隙有较大蓝移,并且通过改变沉积条件可以实现从紫外一直到红外的室温强光发射,从而使纳

米硅结构薄膜成为高效可调谐硅基发光器件的理想候选材料。

虽然纳米硅结构的光辐射得到了广泛的实验研究,但其发光来源尚不是很清晰。一般认为当纳米硅粒子的尺寸小于 5 nm 时,纳米硅中载流子的量子限制效应(QCE)使带隙展宽,并破坏了辐射跃迁的选择定则<sup>[6]</sup>,而且由于各种技术制备的纳米硅薄膜中的纳米硅粒子尺寸不均匀,以及不同镶嵌结构

收稿日期: 2012-03-12; 收到修改稿日期: 2012-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(60940020)和河北省自然科学基金(E2012201059)资助课题。

作者简介: 丁文革(1966—),女,博士,教授,主要从事光与物质相互作用方面的研究。E-mail: dwg@hbu.edu.cn

中纳米硅粒子所处环境介质不同,其光辐射过程变得更加复杂。目前人们已尝试从不同的角度来解释纳米硅结构薄膜的光辐射特性<sup>[7~11]</sup>。Khurgin等<sup>[7]</sup>对镶嵌在SiO<sub>2</sub>中纳米硅粒子光辐射特性的分析认为,薄膜中纳米硅粒子的尺寸分布以及光跃迁振子强度的尺寸依赖性对纳米硅结构的PL起着重要作用;Islam等<sup>[8]</sup>将局域表面态和QCE结合起来,建立了纳米硅镶嵌结构薄膜的室温PL模型,并利用这一模型来解释表面钝化和环境介质对纳米硅光辐射的作用。Bhattacharya等<sup>[10]</sup>基于纳米硅粒径的尺寸分布和光跃迁联合态密度,研究了脉冲激光蒸发方法制备的晶态硅纳米线的PL,结果表明其峰位依赖于纳米线的平均直径及其直径的尺寸分布;Meier等<sup>[11]</sup>利用时间分辨PL测量结果,并结合纳米硅光跃迁振子强度和QCE建立了纳米硅结构体系的发光模型,虽然能够定性地描述PL峰位随纳米硅粒子尺寸的减小而蓝移的现象,但是定量分析仍存在着一定的偏差。综上可见,多种因素制约着纳米硅结构薄膜的光辐射特性,因此需要综合考虑以上诸多因素,进一步探索新的模型,对纳米硅结构体系的光辐射机制做出合理的解释。

由于发光是载流子的辐射复合和非辐射复合相互竞争的结果,而非辐射复合过程显著地依赖于环境温度,因此通过温度的变化来分析纳米硅结构的光辐射机制不失为一条有效的途径,而且对其温度依赖特性的深入研究,在纳米硅结构薄膜应用方面也具有重要意义。但是迄今对纳米硅光辐射的温度依赖特性的实验和理论报道甚少<sup>[12~14]</sup>。本文基于纳米硅薄膜结构的特殊性,结合QCE和温度效应,引入了一个解析表达式来计算具有确定尺寸分布的纳米硅薄膜的PL强度,其中综合考虑了:1)纳米硅粒子与入射光的作用体积;2)量子限制效应引起的带隙展宽;3)光跃迁的振子强度;4)环境温度等因素的影响。前三个因素依赖于纳米硅粒子的尺寸及其分布。选取两种典型的纳米硅粒径分布函数,即高斯尺寸分布和对数正态尺寸分布,主要关注PL谱与温度之间的依赖关系,并将纳米硅结构薄膜PL谱的拟合结果与实验数据进行了比较分析。

## 2 纳米硅结构薄膜PL模型

### 2.1 量子限制效应对纳米硅结构薄膜PL的影响

由于量子限制效应,粒径为 $L$ 的纳米硅粒子的带隙展宽量为<sup>[6]</sup>

$$\Delta E = \frac{C}{L^n}, \quad (1)$$

式中 $C$ 与 $n$ 是与量子限制效应有关的常数,其大小依赖于计算带隙所采用的模型以及纳米硅的镶嵌介质(如SiO<sub>x</sub>或SiN<sub>x</sub>等)<sup>[15]</sup>。一般认为指数 $n$ 可在1.4~2范围内变化,而 $C$ 的取值各不相同。

由于纳米硅粒子的发光由光激发产生的束缚光生载流子的复合决定,即类激子发光,因此考虑到纳米硅粒子中激子束缚能的影响,粒径为 $L$ 的纳米硅来自辐射光子的能量将比其带隙小。设体硅的带隙宽度为 $E_g$ ,激子束缚能为 $E_b$ ,那么粒径为 $L$ 的纳米硅粒子辐射的光子能量为

$$E = E_g + \Delta E - E_b. \quad (2)$$

假设镶嵌在基质中的纳米硅团簇是直径为 $L$ 的球形粒子,则纳米硅粒子与入射光的作用体积 $V(L)$ 与 $L^3$ 成正比。当高能光子激发时,若假设纳米硅粒子中的每一个原子至少贡献一对光生载流子,则在纳米硅粒子中产生的光生载流子数 $N_c$ 正比于入射光的作用体积,即

$$N_c \propto L^3. \quad (3)$$

由于各种技术制备的纳米硅薄膜中纳米硅粒子均存在一定的尺寸分布,因而这里考虑了两种可能的粒径尺寸分布,即高斯分布和对数正态分布

$$P_G(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(L-L_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4a)$$

$$P_L(L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma L} \exp\left(-\frac{(\ln L - \ln L_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4b)$$

式中 $\sigma$ 为标准方差( $\sigma = xL_0$ ), $x$ 为取0.1~1的变量, $L_0$ 为平均粒径大小。具有尺寸分布 $P(L)$ 的纳米硅薄膜的PL是来自所有不同粒径 $L$ 的纳米硅粒子的总贡献。对于平均粒径为 $L_0$ 的纳米硅粒子,其中产生光生载流子的分布函数 $P(L)$ 应正比于(3)式和(4)式的乘积。若纳米硅的粒径为高斯分布,则

$$P(L) \propto \frac{L^3}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(L-L_0)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (5)$$

利用一个标准交换,将依赖于粒径 $L$ 的函数(5)式变换为依赖于带隙展宽量 $\Delta E$ 的函数,得到

$$P(\Delta E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}n\sigma} C^{4/n} (\Delta E)^{-(4+n)/n} \times \exp\left\{-\frac{L_0^2}{2\sigma^2} \left[\left(\frac{\Delta E_0}{\Delta E}\right)^{1/n} - 1\right]^2\right\}. \quad (6)$$

与体硅相比,在纳米硅粒子中电子的平均自由程受到小粒径的限制,纳米硅粒子光跃迁的振子强度 $f_{osc}$ 发生了很大的变化。粒径为 $L$ 的球形纳米硅

粒子的振子强度可以表述为<sup>[16]</sup>

$$f_{\text{osc}} \propto L^{-\beta} = \left(\frac{C}{\Delta E}\right)^{-\beta/n}, \quad (7)$$

这里, 幂指数  $\beta$  依赖于材料的性质以及纳米粒子的尺寸范围, 取值范围在 0~6 之间。

综上, 假设单个纳米硅粒子为球形粒子, 那么纳米结构薄膜 PL 谱可表示为

$$I(\Delta E) = P(\Delta E) f_{\text{osc}}, \quad (8)$$

即

$$I(\Delta E) \propto \frac{1}{\sqrt{2\pi n\sigma}} C^{(4-\beta)/n} (\Delta E)^{(\beta-4-n)/n} \times \exp\left\{-\frac{L_0^2}{2\sigma^2} \left[\left(\frac{\Delta E_0}{\Delta E}\right)^{1/n} - 1\right]^2\right\}. \quad (9)$$

## 2.2 环境温度对纳米硅结构薄膜的 PL 的影响

理论研究已表明, 在纳米硅结构薄膜中光吸收过程伴有声子的发射或吸收。对于声子参与的间接跃迁, 吸收边与温度密切相关。当温度增大时, 由于晶格膨胀使带隙增大, 而电声子相互作用使带隙减小, 按照 A. Franceschetti<sup>[17]</sup> 采用第一性原理对氢钝化的纳米硅带隙的温度依赖特性的计算可知, 电声子相互作用对带隙的贡献大于晶格膨胀的贡献, 所以带隙改变量的总体变化趋势为随温度的增大而减小, 基本呈线性关系。早期 S. Datta 等<sup>[18]</sup> 在解释多孔硅光吸收随温度的变化时, 也认为多孔硅的带隙改变量与温度之间满足线性关系, 即纳米结构的带隙

$$E_g(T) = E_{g0} - \gamma T, \quad (10)$$

式中  $E_{g0}$  为 0 K 温度时的带隙宽度,  $\gamma$  为温度系数 (即温度升高 1 K 带隙的变化量)。因此考虑到温度效应后, 粒径为  $L$  的纳米硅粒子辐射的光子能量为

$$E = E_g + \Delta E - E_b - \gamma T. \quad (11)$$

由于发光一般包括辐射复合和非辐射复合两种竞争过程, 设辐射复合几率  $\nu_R$  与温度  $T$  无关, 非辐射复合为一温度激活过程, 非辐射复合几率可以表示为<sup>[19]</sup>

$$\nu_{nR} = \nu_0 \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right), \quad (12)$$

式中  $\nu_0$  为晶格振动频率, 数值为  $\sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$ ,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $E_b$  为激子束缚能。设每个纳米硅粒子产生的激子数为  $N_c$ , 单位时间内每个纳米硅粒子产生的激子数为  $g$ 。在稳态条件下, 有

$$\nu_R N_c + \nu_{nR} N_c = g, \quad (13)$$

式中  $\nu_R$  为辐射复合几率。单位时间内参与辐射复合的激子数  $N \propto \nu_R N_c$ , 结合(12)式和(13)式可得

$$N \propto \frac{\nu_R}{\nu_R + \nu_{nR}} g. \quad (14)$$

由于不同粒径的纳米硅粒子与入射光的作用体积不同, 其产生的激子数应正比于纳米硅粒子的体积, 即  $g \propto L^3$ , 则(14)式变为

$$N \propto \frac{\nu_R}{\nu_R + \nu_0 \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right)} L^3. \quad (15)$$

综上, 考虑到温度效应, 利用(15)式取代(3)式后, 得到纳米硅结构薄膜的 PL 强度为

$$I(\Delta E, T) \propto P(\Delta E) \left[ \frac{\nu_R}{\nu_R + \nu_0 \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right)} \right], \quad (16)$$

式中  $P(\Delta E)$  的表达式取决于纳米硅粒子的尺寸分布函数。当纳米硅粒子的尺寸分布为高斯分布时,

$$P(\Delta E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n\sigma}} C^{(4-\beta)/n} \Delta E^{(\beta-4-n)/n} \times \exp\left\{-\frac{L_0^2}{2\sigma^2} \left[\left(\frac{\Delta E_0}{\Delta E}\right)^{1/n} - 1\right]^2\right\}, \quad (17)$$

当纳米硅粒子的尺寸分布为对数正态分布时,

$$P(\Delta E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n\sigma}} C^{(3-\beta)/n} \Delta E^{(\beta-3-n)/n} \times \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \left[\ln\left(\frac{\Delta E_0}{\Delta E}\right)\right]^2\right\}. \quad (18)$$

## 3 结果与分析

为获得不同条件下纳米硅结构薄膜光辐射的变化情况, 基于(16)式, 利用两种粒径分布函数分别进行了模拟计算。结果表明, 在相同参数下, 采用两种分布函数计算得到的 PL 谱随平均粒径  $L_0$ 、粒径分布  $\sigma$  和温度等的变化趋势相同。因此下面在模拟不同条件下纳米硅结构薄膜的光辐射时, 只给出了采用高斯分布函数得出的结果。关于模拟时各参数的选择, 做了如下考虑: 按照纳米硅结构薄膜的实验研究结果<sup>[8,20]</sup>, 激子束缚能  $E_b$  取 0.09 eV, 这对于粒径在 2.5~5 nm 范围的纳米硅粒子是一个合适的量值。体硅的带隙  $E_g$  选取了体晶态硅的带隙 1.17 eV, 反映纳米硅光跃迁振子强度的指数  $\beta$  取 3, 辐射复合几率  $\nu_R$  取为  $10^9/\text{s}$ 。与量子限制相关的常数  $C$  和  $n$ , 选取文献<sup>[8]</sup>中采用的 Proot 等的计算结果:  $n=1.39$ ,  $C=4.122 \text{ eV}(L \text{ 取纳米单位})$ 。按照 A. Franceschetti<sup>[17]</sup> 采用第一性原理对氢钝化的纳米硅带隙的温度依赖特性的计算, 当纳米硅粒径为 1.1 nm 时, 带隙的温度系数  $\gamma$  在 0.5 meV/K 左右, 当纳米硅的粒径增加时,  $\gamma$  减小。对于体晶态硅,  $\gamma$  约为 0.153 meV/K, 因此

对于 2~4 nm 的典型纳米硅粒子尺寸,  $\gamma$  的值取为 0.3 meV/K, 应该是一个比较合理的数值。采用相关参数模拟的室温下不同平均粒径  $L_0$  和标准偏差  $\sigma$  的纳米硅结构薄膜的 PL 谱如图 1 所示。图 1 中各曲线所取参数分别为:  $L_0 = 4$  nm,  $\sigma = 0.15 L_0$  (曲线 a)、 $L_0 = 3$  nm,  $\sigma = 0.15 L_0$  (曲线 b) 和  $L_0 = 3$  nm,  $\sigma = 0.25 L_0$  (曲线 c)。由图 1 中  $\sigma$  固定而  $L_0$  不同时的 PL 谱线(曲线 a 和 b) 的比较可见, 平均粒径  $L_0$  对 PL 峰能有很大影响。随着粒子平均尺寸的减小, PL 谱明显蓝移, 这是量子限制效应(QCE)作用的结果。可见在制备纳米硅薄膜时, 如果能够很好地控制纳米硅的粒径, 就能够实现可见光范围内波长可调的 PL。另一方面, 由图 1 中  $L_0$  固定而  $\sigma$  不同

时的 PL 谱线(曲线 b 和 c) 的比较可见, 在纳米硅平均粒径  $L_0$  一定时, 随着尺寸偏差的减小, PL 谱变窄、谱峰蓝移, 且相对 PL 强度增加, 这表明尺寸偏差  $\sigma$  既影响纳米硅薄膜 PL 的峰能也影响其谱宽。因此在制备的纳米硅薄膜中, 纳米硅的粒径越均匀, 其光辐射的单色性越好, 发光强度越高。

为分析纳米硅光辐射对温度的依赖特性, 模拟计算了纳米硅结构薄膜的 PL 谱峰和相对发光强度分别随温度变化的曲线, 如图 2(a)、(b) 所示, 其中图 2(b) 的横坐标为温度的倒数。模拟计算时, 除温度  $T$  从 77 K 升至 300 K 外, 其它参量的取值均与图 1 中曲线 a 相同。由图 2(a) 可见, 当温度从 77 K 升至 300 K 时, PL 谱峰红移了约 67 meV, 这是温度升高时, 纳米硅薄膜带隙减小导致的结果。从图 2(b) 中可以看出, 温度升高造成相对发光强度减小, 具体而言, 在较低温度范围 ( $T < 100$  K) 内, 呈现出很强的发光, 且随温度升高强度缓慢下降; 但是在较高温度范围 ( $T > 100$  K) 内, 随温度升高, 发光强度呈指数式下降。这是因为非辐射复合为一温度激活过程, 在温度较低时, 热激活能量很小, 非辐射复合过程被抑制, 光激发产生的束缚态光生载流子(类激子)几乎全部通过辐射复合过程而复复合掉, 从而源于辐射复合的 PL 强度变化不大, 但是随温度升高, 非辐射复合过程越来越强, 即越来越多的电子热激活到导带, 类激子解离, 发光被猝灭, 从而 PL 强度显著下降。

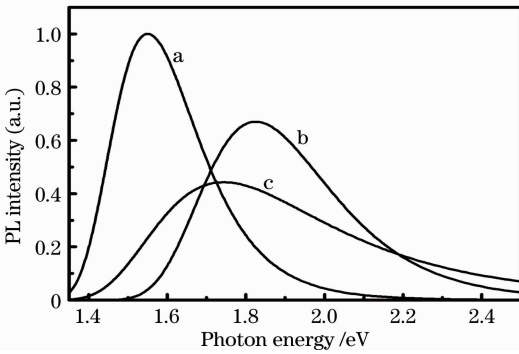


图 1 不同平均粒径  $L_0$  和标准偏差  $\sigma$  的纳米硅结构薄膜的 PL 谱

Fig. 1 PL spectra with different average size and standard deviations for silicon nanostructure thin film

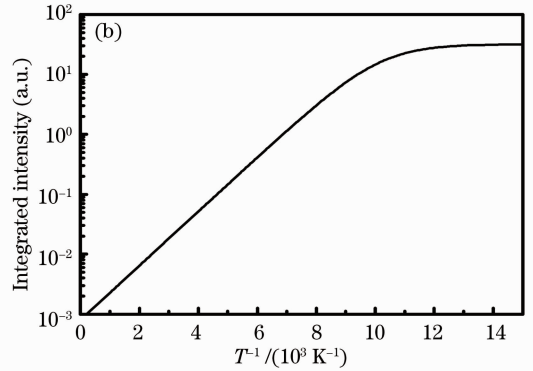
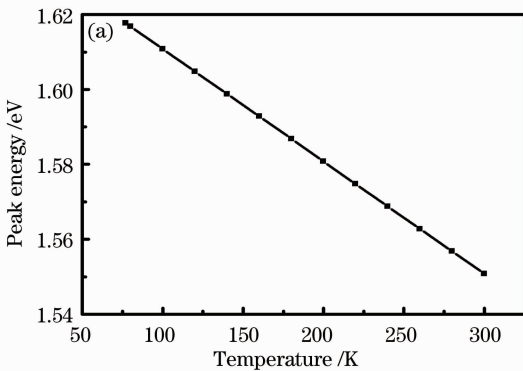


图 2 PL 谱随温度的变化。(a) 谱峰随温度的变化; (b) 积分强度随温度的变化

Fig. 2 Temperature dependence of PL spectrum. (a) Temperature dependence of the peak position; (b) temperature dependence of the integrated intensity

为了说明所建立模型的合理性, 基于(14)式, 对已报道的纳米硅 PL 谱的实验数据进行了拟合。Wang 等<sup>[21]</sup> 采用等离子体增强化学气相沉积技术生长, 然后在 300 °C 退火 2 min 制备了镶嵌在氮化硅中的纳米硅薄膜样品。从中选取了原子比  $\chi =$

$[N]/[Si]$  为 0.65、0.8、1.05 的三个样品的室温 PL 谱进行了模拟分析, 如图 3 所示。为了便于比较, 实验测量的 PL 谱数据用  $\square$ 、 $\circ$ 、 $\triangle$  符号表示, 利用模型拟合的 PL 结果用实线表示, 拟合参量如表 1 所示。由图 3 可见, 不同样品的 PL 谱能够很好地与

实验数据符合,而且拟合得到的纳米硅粒径(见表1),也与文章中采用透射电子显微镜(TEM)观测的所有样品纳米硅粒径均小于3 nm的结果具有很好的 consistency。

表1 室温下不同样品 PL 谱的拟合参数

Table 1 Fitting parameters of PL spectra samples at different room temperatures

$\chi$	$L_0/\text{nm}$	$\sigma/\text{nm}$	$\gamma/(\text{meV}/\text{K})$	Size distribution
0.65	2.70	0.35	0.3	Gaussian
0.80	2.35	0.30	0.3	Gaussian
1.05	1.98	0.31	0.3	Gaussian

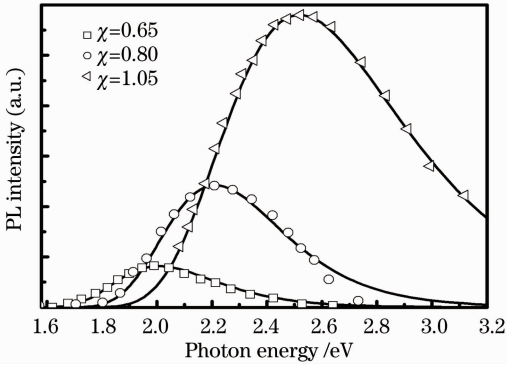


图3 PL 谱实验数据与模拟结果的对比

Fig. 3 Comparison between simulation results and experimental data of PL spectrum

图4中给出了刘明等<sup>[13]</sup>利用等离子体增强化学汽相沉积法制备的纳米硅薄膜(样品1)在不同温度下 PL 谱的实验数据(分别用 $\Delta$ 、 $\circ$ 符号表示)以及利用模型计算的结果(用实线表示),拟合参量如表2所示。由图可见,在70 K与130 K温度下模型拟合的 PL 结果与样品在该温度下测量的 PL 谱符合地很好,而且拟合时给出的纳米硅粒径4.3 nm(见表2),与文章中通过拉曼谱分析给出的晶粒尺

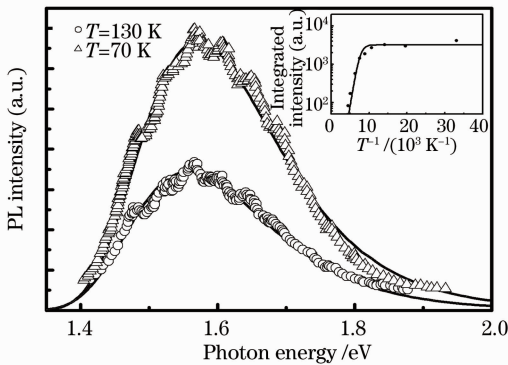


图4 PL 谱实验数据与模拟结果的对比

Fig. 4 Comparison between simulation results and experimental data of PL spectrum

寸4.4 nm符合的相当好。进一步对文章中给出的样品的 PL 积分强度随温度变化的实验数据进行了模拟。由图4插图可见,模拟结果与实验数据具有很好的 consistency。以上结果很好地说明了所建模型的可靠性。同时发现基于粒径的高斯尺寸分布可以很好地描述上述实验数据,而基于对数正态分布的拟合结果与实验数据偏差较大,这表明所选取的样品中纳米硅粒径具有高斯尺寸分布的特点。

表2 不同温度下样品 PL 谱的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of PL spectra at different temperatures

T /K	$L_0/\text{nm}$	$\sigma/\text{nm}$	$\gamma/(\text{meV}/\text{K})$	Size distribution
70	4.3	0.58	0.225	Gaussian
130	4.3	0.58	0.225	Gaussian

当然,对于不同制备方法、不同条件下沉积的纳米硅镶嵌结构薄膜,利用该模型进行拟合时,要选用合适的粒径尺寸分布函数,拟合结果才能与实验数据有较好的一致性,从而正确反映出样品中纳米硅的粒径尺寸分布情况。另外,由于在该模型建立过程中,尚未考虑薄膜中缺陷发光中心的贡献,因此在将模型与实验对比时,主要选择了那些不存在缺陷发光中心的纳米硅样品进行比较分析。

## 4 结 论

纳米硅结构薄膜的光辐射不仅受 QCE 影响,还与环境温度有关,综合考虑了纳米硅粒子与入射光的作用体积、QCE 引起的带隙展宽和光跃迁的振子强度对尺寸的依赖特性,并结合环境温度等因素的影响,建立了一个模型来分析纳米硅结构薄膜的 PL 特性。结果表明,随着平均粒径减小和粒径分布偏差的减小,纳米硅薄膜的 PL 谱峰蓝移。随着温度增加,纳米硅结构薄膜的 PL 谱峰红移且相对发光强度减弱。纳米硅结构薄膜光辐射的拟合结果与实验数据的比较分析表明,该模型能够很好地解释纳米硅结构薄膜在不同温度下的 PL 特性。

## 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 L. H. Lin, X. Z. Sun, R. Tao *et al.*. Photoluminescence origins of the porous silicon nanowire arrays[J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **110**(7): 073109
- 3 O. Jambois, H. Rinnert, X. Devaux *et al.*. Photoluminescence and electroluminescence of size-controlled silicon nanocrystallites embedded in SiO<sub>2</sub> thin films[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(4): 046105

- 4 Tae-Youb Kim, Nae-Man Park, Kyung-Hyun Kim *et al.*. Quantum confinement effect of silicon nanocrystals in situ grown in silicon nitride films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(22): 5355~5357
- 5 Fu Guangsheng, Zhang Jiangyong, Ding Wenge *et al.*. Analysis of interface luminescence in nano-sized amorphous silicon[J]. *Chinese J. Semiconductors.*, 2007, **28**: 123~126  
傅广生, 张江勇, 丁文革等. 纳米非晶硅薄膜的界面发光特性分析[J]. *半导体学报*, 2007, **28**: 123~126
- 6 J. P. Proot, C. Delerue, G. Allan. Electronic structure and optical properties of silicon crystallites; application to porous silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(16): 1948~1950
- 7 J. B. Khurgin, G. S. Tompa, E. W. Forsythe *et al.*. Influence of the size dispersion on the emission spectra of the Si nanostructures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(9): 1241~1243
- 8 M. N. Islam, Satyendra Kumar. Influence of surface states on the photoluminescence from silicon nanostructures[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(3): 1753~1759
- 9 Zhu Shiwei, Wang Lei, Chen Xing *et al.*. Synthesis and photoluminescence of silicon nanoparticles fabricated by pulse laser ablation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 882~886  
朱世伟, 王磊, 陈兴等. 脉冲激光烧蚀法制备硅纳米颗粒及其光致发光特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 882~886
- 10 S. Bhattacharya, D. Banerjee, K. W. Adu *et al.*. Confinement in silicon nanowires; optical properties[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(11): 2008~2009
- 11 C. Meier, A. Gondorf, S. Luttjohann *et al.*. Silicon nanoparticules; absorption, emission, and the nature of the nature of the electronic bandgap[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(10): 103112
- 12 Liu Xiaobing, Xiong Zhuhong, Yuan Shuai *et al.*. Studies on temperature dependence of photoluminescence in porous silicon [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(8): 1391~1396  
刘小兵, 熊祖洪, 袁帅等. 多孔硅光致发光的温度效应研究[J]. *物理学报*, 1998, **47**(8): 1391~1396
- 13 Liu Ming, He Yuliang, Jiang Xingliu *et al.*. Photoluminescence study on hydrogenated nano-crystalline silicon film [J]. *Acta Physica Sinica*, 1998, **47**(5): 864~870  
刘明, 何宇亮, 江兴流等. 纳米硅薄膜的光致发光特性[J]. *物理学报*, 1998, **47**(5): 864~870
- 14 M. Ray, N. R. Bandyopadhyay, U. Ghanta *et al.*. Temperature dependent photoluminescence from porous silicon nanostructures; quantum confinement and oxide related transitions[J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **110**(9): 094309
- 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性[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0531002
- 16 V. Ranjan, V. A. Singh, G. C. John. Effective exponent for the size dependence of luminescence in semiconductor nanocrystallites[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(3): 1158~1161
- 17 A. Franceschetti. First-principles calculations of the temperature dependence of the band gap of Si nanocrystals[J]. *Phys. Rev. B*, 2007, **76**(16): 161301
- 18 S. Datta, K. L. Narasimhan. Model for optical absorption in porous silicon[J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **60**(11): 8246~8252
- 19 Fang Rongchuan. Solid State Spectroscopy[M]. Anhui: Press of University of Science and Technology of China, 2001. 197~198  
方容川. 固体光谱学[M]. 安徽: 中国科技大学出版社, 2001. 197~198
- 20 G. R. Lin, Y. H. Pai, C. T. Lin *et al.*. Comparison on the electroluminescence of Si-rich SiN<sub>x</sub> and SiO<sub>x</sub> based light-emitting diodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(26): 263514
- 21 Y. Q. Wang, W. D. Chen, X. B. Liao *et al.*. Amorphous silicon nanoparticles in compound film grown on cold substrates for high-efficiency photoluminescence [J]. *Nanotechnology*, 2003, **14**(12): 1235~1238

栏目编辑: 韩峰