

文章编号: 0253-2239(2005)12-1712-6

多孔硅拉曼光谱随激发功率变化的研究*

白莹¹ 兰燕娜^{1,2} 朱会丽¹ 莫育俊^{1**}

(¹ 河南大学物理与信息光电子学院, 开封 475001)
(² 南通大学理学院, 南通 226007)

摘要: 用阳极氧化法新制备了多孔硅样品,以 457.5 nm 固体激光器为激发光源,在不同激发功率下,获得了拉曼谱图和一些谱峰参量随激光功率的变化关系。解释了 520 cm^{-1} 和 300 cm^{-1} 附近拉曼峰随功率变化的一系列可逆的实验现象:随激光功率升高出现的红移和非对称性展宽,主要是由于样品局域平均粒径变小而受量子限域效应的影响导致的;样品局域平均粒径在表面上的二维减小与随激光功率升高而导致的局域升温并不违背基本的热力学定律;高功率时 520 cm^{-1} 附近双峰的出现是由于多孔硅样品局域平均粒径达到一定阈值而导致的纵模和横模双声子模的分裂。

关键词: 光谱学; 多孔硅; 拉曼光谱; 激光功率; 光学声子

中图分类号: O443 文献标识码: A

Dependence of the Raman Spectrum of Porous Silicon on Laser Power

Bai Ying¹ Lan Yanna^{1,2} Zhu Huili¹ Mo Yujun¹

(¹ School of Physics and Information Photoelectron, Henan University, Kaifeng 475001)
(² Science College of Nantong University, Nantong 226007)

Abstract: Raman spectra of as-prepared porous silicon are obtained using 457.5 nm solid-state laser from which some relations between peak parameters and laser powers are also got. The experimental phenomena of the Raman peaks near 520 cm^{-1} and 300 cm^{-1} are extensively explained. The red-shift and asymmetrically broadening of the Raman peaks near 520 cm^{-1} and 300 cm^{-1} , which are reversible with the increase and decrease of the laser powers, are thought to be derived from quantum confinement effect (QCE) when the mean particle size shrinks as local temperature increases, and this obeys the basic rule of thermodynamics. The appearance of double peaks near 520 cm^{-1} at high powers are thought to be the cleavage of longitudinal optical (LO) and transverse optical (TO) modes when the mean particle size reaches a certain threshold.

Key words: spectroscopy; porous silicon; Raman spectrum; laser power; optical phonon

1 引言

1990 年 Canham^[1]首次报导了阳极氧化法制备的多孔硅(Porous silicon, PS)在室温下有强烈的光致发光(Photoluminescence, PL)的现象。室温下,在可见光区发光效率达到 10^{-2} 数量级。这一特性引起了人们的广泛关注和极大兴趣,掀起了多孔硅的研究热潮。多孔硅是当前半导体材料领域最热门

的研究方向之一,可以用作廉价的发光器件代替昂贵的 III-V 族器件;而且由于仍采用硅衬底,与目前已发展到相当完善的大规模集成电路完全相容。室温下多孔硅的光致发光现象显示了其在光电器件和显示技术上巨大的应用前景。

大量的研究结果表明,多孔硅的发光特性与其微结构密切相关;其发光起源于硅表面颗粒的不断

* 国家自然科学基金(10274019)和河南省自然科学基金(0211010100)资助课题。

作者简介:白莹(1980~),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事拉曼光谱和表面增强拉曼光谱的研究。

** 通信联系人。E-mail: yujunmo@henu.edu.cn

收稿日期:2004-11-19;收到修改稿日期:2005-04-04

细化,产生了具有量子尺寸效应的纳米粒子,从而使硅的禁带宽度增大而获得可见光区的光致发光^[1~5]。

由于微结构和电学性质上的特点,直接观察微结构的手段如原子力显微镜(AFM)、扫描隧道显微镜(STM)、透射电子显微镜(TEM)等在观察多孔硅结构时受到一定限制。多孔硅是半导体,做电镜需要样品导电性良好,否则效果很差;原子力显微镜的电子探针式扫描方式将不可避免地纳米量级的多孔硅之间有相互作用,在样品表面产生损伤;拉曼散射是研究材料微结构的又一有力方法,快捷方便且不损伤样品,对于小尺寸晶粒有较高的灵敏度,样品用量少^[6~8]。在用拉曼光谱进行多孔硅结构表征的基础上,还可以同时检验多孔硅发光机制的各种模型。因此,用拉曼光谱进行多孔硅的结构表征具有很深的理论意义和实用价值。

有文献报导多孔硅一阶拉曼谱具有一个位于 510 cm^{-1} 或 520 cm^{-1} 附近的单峰^[8,9],而另一些文献则报导除了低波数一侧非对称的拉曼带以外,在 520 cm^{-1} 附近还有一个拉曼峰^[10~14]。其中, Tsu 等^[10]将多孔硅荧光和拉曼散射联系起来,发现粒子尺寸减小时,拉曼峰位的红移对应于荧光峰位的蓝移,在荧光峰位位于 1.86 eV 时,纵模和横模式的拉曼峰发生分裂,这两种声子发生分裂的平均粒子粒径为 2 nm ; Zhang 等^[11]发现 520 cm^{-1} 处的拉曼峰随激发波长的变短而减弱甚至消失,只剩下 509 cm^{-1} 的拉曼峰,并认为 509 cm^{-1} 的拉曼峰是多孔硅的本征拉曼散射,而 520 cm^{-1} 的拉曼峰则来自基底的晶体硅; Wu 等^[12]发现随着激光照射时间的增加,低波数的拉曼峰逐渐由 500 cm^{-1} 蓝移至 510 cm^{-1} ,而高波数 520 cm^{-1} 处的拉曼峰则基本不变,他们将这两个高、低波数的拉曼峰分别指认为纵、横声子模,并且认为低波数拉曼峰的蓝移是由于小颗粒纳米晶因光照而减少引起的;梁二军等^[13]研究了多孔硅拉曼光谱随着激光功率的变化,发现当功率达到一定阈值时, 520 cm^{-1} 附近的单峰劈裂为双峰,并认为多孔硅拉曼光谱随激光功率的变化是由于激光诱导多孔硅的晶格畸变而导致纵、横模的简并解除引起的; Lee 等^[14]研究了多孔硅从中心到边沿不同位置处的拉曼光谱,发现从中心到边沿 520 cm^{-1} 的拉曼峰变弱,而 510 cm^{-1} 附近的拉曼峰变强,并认为分别来自于非晶相和类晶相的拉曼散射。不同小组

得到的实验结果各异,而且对这两个峰的来源和归属尚无统一的观点,因此还需要作进一步的研究。本文结合实验结果和理论分析对多孔硅的拉曼峰作出具体的分析和指认。

2 实验条件

多孔硅样品由电化学阳极氧化法制得。所用单晶硅为 $(100)\text{p}$ 型硅,电阻率为 $28\sim 53\ \Omega\cdot\text{cm}$,电解液成分是 $v(\text{H}_2\text{F}_5):v(\text{CHOH})=1:2$,电流密度为 40 mA/cm^2 ,通电时间为 30 min ,制出样品在光学显微镜(12×50)下观察均匀性良好。以样品中心附近的一个易辨别点为内标,标记下一个区域(精度 μm)进行拉曼光谱测量。

对新制备的多孔硅样品,保证激光照射在样品的同一标记位置和完全一致的聚焦情况,仅改变激光功率研究多孔硅的拉曼光谱。拉曼光谱的测量在英国 Renishaw 公司的 RM-1000 型显微拉曼光谱仪上进行。激发波长为 457.5 nm ,狭缝宽度 $50\ \mu\text{m}$,采用背散射装置收集散射光。到达样品上 100% 功率为 10 mW 。测量在 296 K 的环境温度下完成的。

3 实验结果及分析解释

如图 1 所示,以瑞利线为中心同时测得了 457.5 nm 波长激发下的多孔硅在 520 cm^{-1} 和 300 cm^{-1} 附近的斯塔克和反斯塔克拉曼谱。其中反斯塔克部分强度值扩大 5 倍。

将 520 cm^{-1} 和 300 cm^{-1} 附近的拉曼峰指认为^[13~15]具有 τ_{25} 对称性的简并的多孔硅的光学模和二级横声子模 $2\text{TA}(X)$ 。其中 TA 为横声学模; X 为倒格矢空间的一个特征点,对 Si,是 (100) 方向四方面的中心,空间坐标 $X:(2\pi/a, 0, 0)$ 。

图 2 清晰地显示了 520 cm^{-1} 附近拉曼峰以及一些谱峰参量随激光功率的变化:当激光功率较低时,拉曼峰为一锐的尖峰;随着激光功率的升高,峰位逐渐红移,峰形明显展宽且不对称化增加;当功率达到一定阈值时,拉曼峰发生明显劈裂,出现双峰;随着功率进一步升高,双峰继续红移且低频峰红移速度较快。在激光功率从 1% 升高到 100% 和从 100% 降低到 1% 的过程中, 520 cm^{-1} 附近拉曼峰随激光功率呈现可逆的变化。

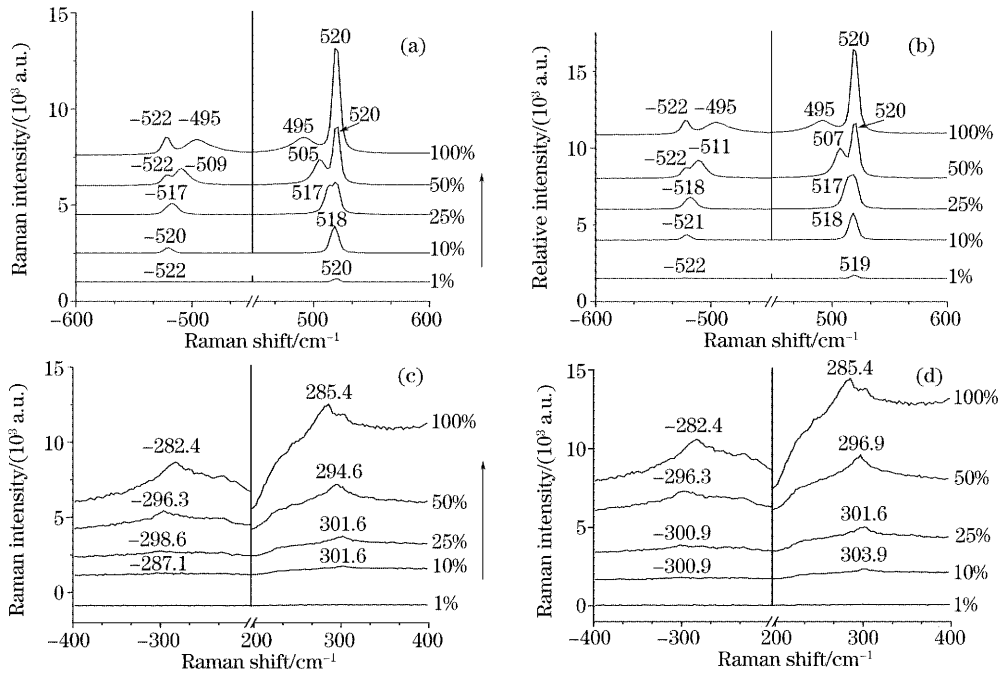


图 1 520 cm⁻¹附近随激光功率增大(a),降低(b)和 300 cm⁻¹附近激光功率增大(c),降低(d)拉曼峰的变化

Fig. 1 Transformation of Raman peak when laser power increases (a), decreases (b) near 520 cm⁻¹ and (c), (d) near 300 cm⁻¹

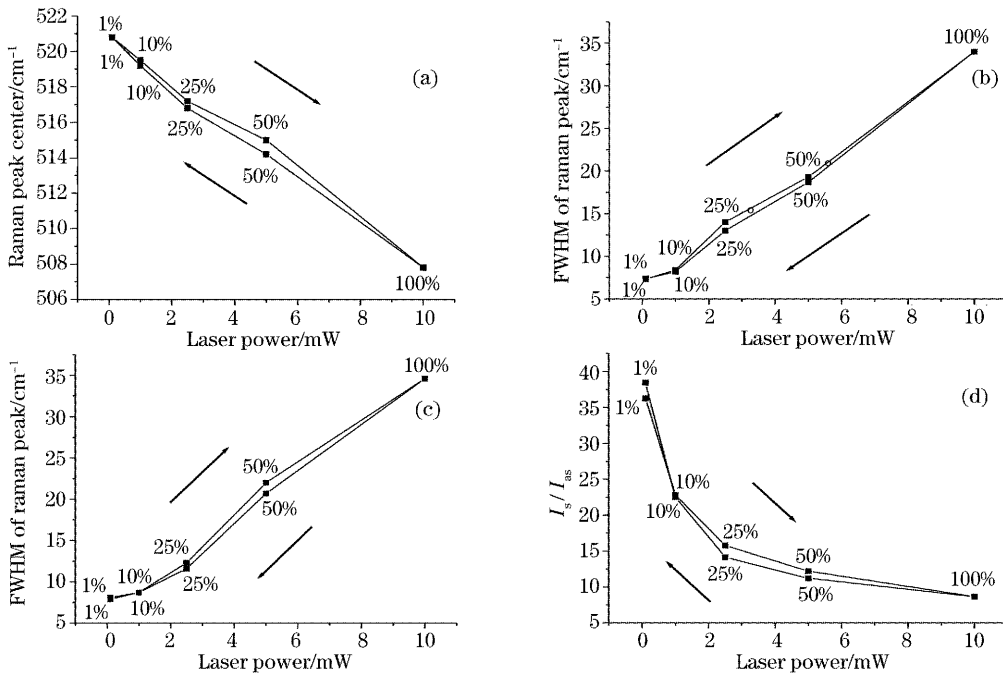


图 2 520 cm⁻¹附近拉曼峰位(a),斯塔克斯拉曼峰半峰全宽(b),反斯塔克斯拉曼峰半峰全宽(c), I_s/I_{as} 随光强的变化

Fig. 2 Transformation of Raman peak center (a), the FWHM of Stokes Raman peak (b), the FWHM of anti-Stokes Raman peak (c), I_s/I_{as} (d) near 520 cm⁻¹ when laser power changes

量子尺寸效应将导致样品的拉曼峰相对于单晶材料发生红移且峰形呈非对称性展宽,晶粒尺寸越小这种效应就越明显^[18]。多孔硅的拉曼光谱可以用量子限域模型来解释^[6~8,17]。多孔硅的拉曼光谱相对于单晶硅的红移和展宽主要是电解过程导致晶

粒变小,使光学声子受到尺寸效应的限制^[8]。有限粒子尺寸 L 决定了晶格波矢 $q=2\pi/L$,而拉曼峰位反映了对应于 q 的散射声子的位置,因此与样品粒径直接相关。在理想完美的固体中 $q=0$,声子的波函数是平面波,即其相关长度不受制约,表现为拉曼

散射中的动量守恒情况。由选择定则规定了只有在布里渊区中心 $\Gamma(q=0)$ 的声子才能参与拉曼散射。硅在 $q=0$ 处,纵、横模是简并的,所以晶体硅只有位于 520 cm^{-1} 的单个拉曼峰。当晶体尺寸变小时,无序或尺寸效应使长程有序遭到了破坏,仅保存有短程序。平移对称性发生了部分或全部松弛。光学声子的空间波函数被局域化,不再是平面波,因而拉曼散射过程不再局限于 $q=0$ 的声子态, $q\neq 0$ 的声子也都不同程度地得到激活,相应的振动模式也变为拉曼活性的,力常数也相应减小,导致了拉曼峰的红移和展宽。据此可以定性判断多孔硅结构中晶粒尺寸随制备条件和测试条件的变化。多孔硅是由纳米尺寸的硅微粒构成,与硅体单晶相比较,其拉曼谱中光学声子的峰位应出现红移。晶粒尺寸越小,红移越大。伴随着谱峰的非对称性展宽,红移与展宽依赖于样品尺寸^[8,10,11,14,19,20]。根据一定的理论模型,还可以获得红移与样品尺寸之间的定量关系^[18~20]。

实验结果同文献[9]的结论有所不同:如果将高频峰指认为单晶硅基底峰,而将高功率时出现的低频峰指认为多孔硅本征拉曼峰来解释双峰现象,将无法说明为何低功率激发时,拉曼谱中在比 520 cm^{-1} 稍低的区域没有任何拉曼信号,只有在高功率时才出现拉曼信号。

多孔硅拉曼峰随激光功率的增大而红移的现象表明了晶粒尺寸随激光功率增大而减小,这与硅晶格的格波谱^[21]可相互印证。由硅的格波谱可以看到: Γ 点附近光学声子的振动频率 ω 随波矢 q 值的增大而减小。所以随着激光功率的增大,由于共聚焦显微拉曼光谱仪共聚焦系统照射在样品上的激光功率密度很大(1%时功率密度即可达到约 $1.6 \times 10^6\text{ mW/cm}^2$),而引起局域温度升高,使局部粒径变小, q 值增大;随着 q 值的增大,拉曼峰红移增大,谱线增宽且不对称性增加。当激光功率达到一定值时,可观察到单峰变为双峰,这是由于随着 q 远离布里渊区中心。在粒径达到一定阈值处光学声子的简并状态发生分裂,即纵、横模分离开来,同一 q 值的对应不同的声子能量。

局域温度随激光功率的升高反而使局部粒径减小。由于晶格常数依赖于温度变化^[22],认为是样品局域温度的升高导致样品局域晶格常数 c 减小、 a 增大。使用的是(100)晶面的单晶硅, bc 面平行与样品表面,单胞在表面二维空间是随着功率的升高而减小的,在无团聚的情况下引起样品局域粒径的

变小,而面间距 a 随激光功率的升高而增大保证了单胞体积随温度升高而膨胀。

50%功率激发时, 520 cm^{-1} 附近拉曼峰的劈裂表明,开始出现能级分裂。这时纵、横模对应的频移相近。纵、横模刚分裂时,纵模声子能量稍大于横模的声子能量且降低缓慢,故两峰距离很近,纵模的频移稍大于横模的频移,纵模频移变化相对缓慢。当功率从50%增大到100%时,横模较之纵模频移减小得快,对应于纵与横模分裂初期,横模的声子能量较纵模减小得快。这些实验结果都可以从单晶硅的格波谱中得到解释。进一步预计,若继续提高照射在多孔硅样品上的激光功率,由于粒径继续变小,声子波矢继续变大,纵模声子的能量降低会加快,横模声子的能量降低会变慢。在到达另一阈值处,会发生再度简并的情况,继而马上再度劈裂。此后应有纵模的拉曼频移低于横模的拉曼频移。

多孔硅的格波谱与单晶硅的格波谱必定会有些差别,但各支声子色散曲线变化的趋势应该一致。可将 520 cm^{-1} 附近激光高功率辐照时出现的双拉曼峰归因于纵、横模的分裂^[10,13,19]。

Zi Jian 等给出了拉曼位移与材料尺寸的函数关系^[19]:

$$\Delta\omega = \omega(L) - \omega_0 = -A(a/L)^\gamma$$

式中 $\omega(L)$ 为尺寸为 L 的纳米晶的拉曼声子频率, ω_0 是布里渊区中心光学声子的频率, a 为硅晶体的晶格常数(0.54 nm)。采用此种方法和条件制备的多孔硅为柱状结构。将 $A = 20.92\text{ cm}^{-1}$, $\gamma = 1.08$ 代入计算不同功率时多孔硅样品的平均粒径。计算结果与 Tsu 的实验结果^[10]完全相符(这两种声子发生分裂时,多孔硅样品的平均粒径为 2 nm);25%功率照射时,平均粒径为 2.4 nm,仅有单峰出现;50%照射时,平均粒径为 1.78 nm,简并消除,出现了纵、横模双峰。当平均粒径达到一定阈值时,假设激光线宽锐于纵、横模的间隔,就有可能同时被观察到。对多孔硅的一阶拉曼峰仅有单峰^[8,9]是由于样品粒径大于 2 nm(纵、横模分离的平均粒径),文献[7,8]计算出来的粒径分别为 2.9 nm 和 3.1 nm,与本文的结论相符。

拉曼峰位的红移还可能源于应变^[15,23~25]、多孔硅色散关系^[24],影响较小可忽略^[13,23]。

共聚焦系统照射在样品上的激光功率密度很大(1%时功率密度即可达到约 $1.6 \times 10^6\text{ mW/cm}^2$),必定引起局域温度升高。由于 I_s/I_{as} 的比值与样品温度直接相关,由图 2(b)可以看到:低功率时,

I_s/I_{as} 随激光功率的变化很快,说明温升很快,促使样品粒径变小达到阈值粒径,产生双峰;在双峰出现后,拉曼峰特别是横模红移加快。温度变化趋于缓慢,说明在达到阈值粒径后,温度的变化以及由此引起的粒径变化都会受到量子限域效应的影响,从而对拉曼频移作出较大的贡献。从图 1(a)、图 1(b)中也可以看到,当功率从 25% 增大到 50% 时, 520 cm^{-1} 附近拉曼峰劈裂且红移突然加快,预示着量子尺寸效应开始明显地表现出来并对红移产生强烈的影响。在功率较低时,位移较小,粒径变化还未到达阈值,受量子限域效应的影响较小;达到阈值双峰出现后,将强烈的感受到量子限域效应对小粒径样品的影响。

拉曼峰的非对称性展宽,还有以下可能的原因:首先,多孔硅样品的构成并非只有一种量子尺寸,而是具有一定的尺寸分布,平均粒径只是一种统计分布方法的加权平均结果。所以必须考虑尺寸分布导致的谱峰展宽效应^[23];其次,当晶粒尺寸减小或晶体中存在某种缺陷(例如位错、卷曲等畸变)时,由于光学声子的局域化而导致的动量弛豫将使布里渊区中心附近的声子参与散射过程,这也会导致谱线展宽并红移^[15,23]。

300 cm^{-1} 处多孔硅的二级横声子模(2TA)模也有类似于 520 cm^{-1} 附近光学模的规律:随着激光功率的增大,二级横声子模模逐渐红移且具有可逆性。当功率从 25% 增大到 50% 时,二级横声子模模红移突然加快,说明粒径的进一步变小使尺寸效应明显表现出来并对红移产生主要的影响。随激光功率的变化,多孔硅的二级横声子模模的变化规律与 520 cm^{-1} 附近拉曼峰的变化规律一致。

4 结 论

多孔硅材料由纳米尺寸的硅微粒构成,与硅体单晶相比较,拉曼谱中光学声子的峰位出现红移。由量子限域效应可知,晶粒尺寸越小,拉曼红移越大,同时伴随着谱线的非对称性展宽。当粒径达到一定值时,这两种模式将同时被观察到。在粒径变大并达到一定阈值时,两种模式再度简并。 300 cm^{-1} 处的二级横声子模的拉曼峰也随着激光功率的变化出现类似的可逆变化。粒径的大小的变化主要受样品温度的影响。

致谢 郑州大学梁二军教授提供了参考样品。

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 Hongjian Li, Baiyun Huang, Danqing Yi *et al.*. Visible electroluminescence from p-n junction porous Si diode with a polyaniline film contact[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11): 677~679
- 3 Hongjian Li, Baiyun Huang, Danqing Yi *et al.*. Efficient visible electroluminescence from porous silicon diodes with low driven voltage[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(3): 171~173
- 4 B. Ren, F. M. Liu, J. Xie *et al.*. In situ monitoring of Raman scattering and photoluminescence from silicon surfaces in HF aqueous solutions[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(8): 933~935
- 5 Lan Yanna, Du Yinxiao, Zhu Huili *et al.*. Study on the temperature dependence of photoluminescence peaks of porous silicon from 30 to 180 °C[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1461~1464 (in Chinese)
兰燕娜,杜根霄,朱会丽等. 多孔硅在 30~180 °C 温区光致发光谱的研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(12): 1461~1464
- 6 X. L. Wu, G. G. Siu, S. Tong *et al.*. Raman scattering of alternating nanocrystalline silicon/amorphous silicon multilayers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(4): 523~525
- 7 Wang Linjun, Xia Yiben, Ju Jianhua *et al.*. Characterization of CVD diamond film/porous silicon composite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 753~756 (in Chinese)
王林军,夏义本,居建华等. 金刚石膜/多孔硅复合材料的性能表征[J]. 光学学报, 2001, **21**(6): 753~756
- 8 Zhifeng Sui, Partric P. Leong, Irving P. Herman *et al.*. Raman analysis of light-emitting porous silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(17): 2086~2088
- 9 Walter Jaimes Salcedo, Francisco J. Fenandez, Jeol C. Rubim. Polarized effects on the Raman and photoluminescence spectra of porous silicon layers[J]. *J. Raman Spectrosc.*, 1999, **30**(1): 29~36
- 10 R. Tsu, H. Shen, M. Dutta. Correlation of Raman and photoluminescence spectra of porous silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(1): 112~114
- 11 Shulin Zhang, Yongtian Hou, Kuoksan Ho *et al.*. Raman investigation with excitation of various wavelength lasers on porous silicon[J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **72**(9): 4469~4471
- 12 Xinglong Wu, Feng Yan, Mingsheng Zhang *et al.*. Influence of illumination of Raman spectra of porous silicon[J]. *Phys. Lett. (A)*, 1995, **205**(4): 117~120
- 13 Liang Erjun, Chao Mingju. Laser-induced lattice deformation of porous silicon revealed by Raman and photoluminescence spectroscopies[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(11): 2241~2246 (in Chinese)
梁二军,晁明举. 激光诱导多孔硅晶格畸变的拉曼光谱和光致发光谱研究[J]. 物理学报, 2001, **50**(11): 2241~2246
- 14 H. J. Lee, Y. H. Seo, D. H. Oh *et al.*. Correlation of optical and structural properties of light emitting porous silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(8): 855~857
- 15 Rongping Wang, Guangwen Zhou, Yulong Liu *et al.*. Raman spectral study of silicon nanowires: high-order scattering and phonon confinement effects[J]. *Phys. Rev. (B)*, 2000, **61**(24): 16827~16832
- 16 Wang Xin, He Guoshan, Zhang Shulin *et al.*. Raman spectra and structure characteristics of P-porous silicon [J]. *Chin. J. Semiconductors*, 1994, **15**(4): 248~254 (in Chinese)
王 昕,何国山,张树霖等. P-型多孔硅的拉曼光谱与结构特征 [J]. 半导体学报, 1994, **15**(4): 248~254
- 17 Cheng Guangxi, Liu Fengqi, Hong Jianming *et al.*. Raman

- spectra of silicon cluster embedded in porous silicon[J]. *Chin. J. Light Scattering*, 1997, **9**(2~3): 161~162 (in Chinese)
程光照,刘峰奇,洪建明等. 嵌埋多孔硅中硅团簇的拉曼谱[J]. *光散射学报*, 1997, **9**(2~3): 161~162
- 18 I. H. Campbell, P. M. Fauchet. The effects of microcrystal size and shape on the one phonon Raman spectra of crystalline semiconductors[J]. *Solid State Communications*, 1986, **58**(10): 739~741
- 19 Jian Zi, H. Buscher, C. Falter *et al.*. Raman shift in Si nanocrystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(2): 200~202
- 20 Wang Yinyue, Zheng Shukai, Yang Yinghu *et al.*. Estimation of crystal-size of nc-Ge by Raman scattering spectra[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1265~1268 (in Chinese)
王印月,郑树凯,杨映虎等. 用拉曼散射光谱估算纳米 Ge 晶粒平均尺寸[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1265~1268
- 21 Huang Kun, Adapted by Han Ruqi. *Solid State Physics* [M]. Beijing: High Education Press, 1988. 102 (in Chinese)
黄 昆. 固体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988. 102
- 22 Y. H. Zhao, K. Lu. Grain-size dependence of thermal properties of nanocrystalline elemental selenium studied by X-ray diffraction [J]. *Phys. Rev. (B)*, 1997, **56**(22): 14330~14337
- 23 Wang Xiaoping, Zhao Textiu, Liu Cihui *et al.*. Effect of dispersion relation of optical phonon on Raman spectra from porous silicon[J]. *Chin. J. Luminescence*, 1995, **16**(2): 113~118 (in Chinese)
王晓平,赵特秀,刘磁辉等. 光学声子色散关系对多孔硅喇曼谱的影响[J]. *发光学报*, 1995, **16**(2): 113~118
- 24 Yang Min, Huang Daming, Hao Pinghai *et al.*. Effect of phonon confinement and strain on Raman spectra from light emitting porous silicon[J]. *Acta Physica Sinica*, 1994, **43**(3): 494~498 (in Chinese)
杨 敏,黄大明,郝平海等. 空间限制与应变对发光多孔硅喇曼光谱的影响[J]. *发光学报*, 1994, **43**(3): 494~498
- 25 Jia Lin, Wang Xin, Zhang Shulin *et al.*. Study on Raman and photoluminescence-spectra of porous silicon formed on different Si substrates[J]. *Chin. J. Semiconductos*, 1995, **16**(4): 258~262 (in Chinese)
贾 霖,王 昕,张树霖等. 不同单晶衬底的多孔硅的拉曼和光致发光谱研究[J]. *半导体学报*, 1995, **16**(4): 258~262