文章编号:1004-0609(2010)04-0724-06

脉冲激光烧蚀制备窄发光带的分散 Si 纳米颗粒

王 磊¹, 屠海令², 朱世伟¹, 陈 兴¹, 杜 军¹

北京有色金属研究总院 先进电子材料研究所,北京 100088;
 北京有色金属研究总院 粉体国家工程中心,北京 100088)

摘 要:采用 KrF 脉冲准分子激光器烧蚀高阻多晶 Si 靶,分别在液氮冷却至 200 K 的高定向石墨(HOPG)和单晶 Si(100)衬底上制备分散单晶 Si 纳米颗粒。采用拉曼谱(Raman)和高分辨透射电镜(HRTEM)分析证实 Si 纳米晶粒的 形成。结果表明:所形成的纳米 Si 颗粒具有均匀分散性 相应的光致发光峰位出现在 585 nm 峰值半高宽为 70 nm; 与相同参数下常温衬底的结果相比,所形成的纳米 Si 颗粒具有较窄的光致发光谱,并显示出谱峰蓝移现象;Si 纳米颗粒尺寸的均匀分布是窄发光带的主要原因。

关键词:纳米 Si 颗粒; 窄发光带; 脉冲激光烧蚀; 尺寸分布; 光致发光 中图分类号: O 484.4; TB 383 文献标志码: A

Dispersed Si nanoparticles with narrow photoluminescence peak prepared by laser ablated deposition

WANG Lei¹, TU Hai-ling², ZHU Shi-wei¹, CHEN Xin¹, DU Jun¹

(1. Institute of Advanced Electronic Materials, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China;
 2. National Engineering Research Center for Powder, General Research Institute for Nonferrous Metals, Beijing 100088, China)

Abstract: The dispersed single crystalline Si nanoparticles were synthesized by KrF excimer laser ablation on HOPG and single crystalline Si(100) substrate cooled by liquid nitrogen to 200 K, respectively. The Raman and HRTEM analysis of the nanoparticles deposited on the HOPG substrate indicate that the Si nanoparticles are crystalline. The results show that the nanoparticles on the Si substrate have a mosaic structure with uniform size. The corresponding photoluminescence (PL) peak wavelength is 589 nm with full width at half maximum of 70 nm, which is blue-shifted and narrower than that obtained at room temperature substrates. The narrow PL spectrum result is attributed to the uniform size of Si nanoparticles.

Key words: Si nanoparticles; narrow photoluminescence peak; pulsed laser ablation; size distribution; photoluminescence (PL)

自从 20 世纪 90 年代首次发现纳米硅具有室温光 致发光特征以来^[1-2],关于 Si 基纳米发光材料的制备 方法、结构特征、发光特性以及光电子器件的研究, 已经取得令世人瞩目的重要进展。众多的研究表明, Si 纳米颗粒具有明显的量子发光特征,这些颗粒光致 发光(PL)谱峰的位置和宽度受晶粒的形态与尺寸分布 的影响^[3-5]。另外,从器件的实用性考虑,无论在光电 转化器件还是在微型存储器件领域, Si 纳米颗粒的尺 寸均匀性都是需要优先考虑的因素^[6]。因此,实现颗 粒的可控性和一致性是制备大规模光电集成的重要因 素,而尺寸均匀、具有相对较窄的光致发光(PL)谱峰 的纳米 Si 晶粒是实现纳米 Si 在 Si 激光器和非易失性 存储器件应用的关键。

在诸多制备纳米 Si 颗粒的方法^[5,6-9]中,由于脉冲 激光烧蚀(PLA)属于"干法"制备技术,具有玷污小 和生长速率快、最可能与现有硅工艺兼容等优点,因

基金项目:国家自然基金青年科学基金资助项目(50902010);北京有色金属研究总院创新基金资助项目(200952701)

收稿日期:2009-04-16;修订日期:2009-07-25

通信作者:杜 军,教授,博士;电话:010-82241247; E-mail: dujun@griaem.com

此得到长足的发展^[10]。在传统的 PLA 制备 Si 纳米颗 粒过程中, Ar 是一种普遍采用的缓冲气体^[5-6, 11-12], WERWA 等^[11]利用PLA方法在Ar缓冲气氛中得到最 小尺寸为 2 nm 左右的纳米 Si 晶粒,其 PL 谱的半高 宽大于 200 nm, 这在很大程度上是由于 Si 纳米晶粒 的尺寸分布较大所致。另外,在研究 PLA 制备 Si 纳 米颗粒的形成机制方面,工作多集中在 PLA 过程纳米 Si 晶粒的形成和传输动力学过程的研究^[13-14]。Chen 等^[15]采用 Ar 作为缓冲气体,在 0.13~133 Pa 的条件下 制备具有纳米晶的 Si 薄膜,研究纳米 Si 薄膜的发光 特性,发现 PL 峰位在 590~689 nm 间的发光由晶粒的 量子限制效应支配,而峰位固定在 480 nm 的发光与 SiO,/Si 界面态相关,所沉积薄膜由量子限制效应导致 的发光峰宽度约为 200 nm。根据本文作者前期的研究 结果,在合适的靶间距范围内,降低缓冲气体 Ar 的 压力有利于形成小尺寸的 Si 纳米颗粒,促进颗粒分 散,获得不同半高宽的 PL 谱^[16]。另外,改变衬底温 度也是一种有效控制颗粒沉积动力学的方法。CHEN 等^[17]在液氮冷却 Si 单晶衬底上获得尺寸为 10 nm 左右 的 Si 纳米晶粒,在 532 nm 处获得清晰的 PL 谱,证明 低温衬底利于降低 Si 纳米颗粒尺寸,提高晶化程度。

为了得到尺寸分布较均匀、PL 峰较窄的 Si 纳米 晶粒,本研究选取合适的靶与衬底间的距离及沉积时 间,采用 15 Pa 的缓冲气压 Ar,在液氮冷却衬底上制 备纳米 Si 晶粒,对其晶态成分、微结构以及 PL 特性 进行系统研究,并与相同参数下室温衬底上获得的结 果进行比较,分析 Si 颗粒尺寸均匀性对 PL 性能的影 响。

1 实验

1.1 样品制备

实验采用德国 Complex-pro-205F 型 KrF 准分子脉 冲激光器,其激光波长为 248 nm,输出脉冲宽度为 10 ns,脉冲重复频率为 1 Hz,激光能量密度为 10 J/cm²。当真空反应室的真空度抽至 5×10^{-5} Pa 后, 充入所需的惰性气体 Ar 至 15 Pa,Ar 缓冲气体纯度为 99.5%。在尺寸为 5 mm × 5 mm 见方的高定向石墨 (HOPG)、单晶 Si (100) 和 C 膜衬底上沉积纳米 Si 颗 粒,分别用于形貌观察和显微结构分析。激光烧蚀靶 材为电阻率 3 kΩ·cm 的高纯多晶 Si 靶,衬底与靶之间 的距离保持为 5 cm。沉积过程衬底采用液氮冷却,通 过质量流量计控制液氮流量,调节衬底温度至 200 K。 沉积时间为 5 min 以获得分散的纳米颗粒。其他制备 参数不变的情况下,在室温 HOPG 和单晶 Si (100)制备 Si 纳米颗粒以比较低温衬底对 Si 颗粒尺寸的影响。

1.2 显微结构及微观形貌表征

使用 MKI-2000 型 Raman 谱仪和 JOEL 2010(工作 电压为 200 kV)透射电镜(TEM)研究颗粒的尺寸与显 微结构。所采用试样为不同衬底温度下 HOPG 衬底上 制备的试样。为了比较 Si 纳米颗粒的 Raman 位移, 在相同设备上测试 Si 单晶片的 Raman 谱。根据声子 模型计算 Raman 谱中的 Si 纳米颗粒的尺寸。为避免 样品污染和便于 TEM 观察, TEM 观察用样品为直接 沉积 Si 纳米颗粒的 Cu 网支持非晶 C 膜, C 膜厚度约 10nm。采用 Hitachi-S4800 型冷场发射枪扫描电子显 微镜(SEM)对单晶 Si(100)衬底上制备的样品进行观 察,结合 Image-pro-plus 粒度统计软件分析 Si 纳米颗 粒的尺寸分布。

1.3 光致发光性能的测试

采用 Fluorolog-Tau-3 型光谱仪测量硅纳米颗粒 的室温光致发光谱。激发光源为波长 325 nm 的 He-Cd 激光器。测试样品分别为 Si(100)单晶片和沉积在 HOPG 上的 Si 纳米颗粒。

2 结果及讨论

2.1 形貌与显微结构分析

为了更好地表征激光烧蚀制备 Si 纳米颗粒的形 貌和显微结构,分别在 Si(100)单晶片和 HOPG 衬底上 沉积 Si 纳米颗粒。通过液氮冷却控制衬底温度,研究 低温衬底上沉积 Si 纳米颗粒的尺寸与形貌。图 1 所 示为低温单晶 Si(100)衬底上沉积 Si 纳米颗粒的 SEM 像与粒度颁布率。从图 1 可以看出,获得的 Si 纳米颗 粒分布均匀。对图像中超过 100 个颗粒进行统计分析 表明,Si 纳米颗粒分布在 1~15 nm 尺寸范围内,其中 大部分集中在小尺寸范围内。根据最终统计结果,纳 米颗粒的尺寸分布符合正态分布,平均尺寸约为 (4.5±0.5) nm,没有出现烧蚀过程产生的大尺寸液滴。 由于形成的 Si 纳米颗粒较小,难以在 SEM 像中观察 到 Si 颗粒的形状,因此需要通过其他的表征手段验证 SEM 统计结果。

对石墨衬底上沉积的纳米 Si 颗粒进行 Raman 谱和 TEM 测量,其结果分别如图 2 和 3 所示。由图 2 可见,石墨上沉积的纳米 Si 颗粒的 Raman 谱峰位于 513.1 cm⁻¹ 附近。为了比较纳米结构 Si 材料的 Raman



图 1 低温单晶 Si(100)衬底上沉积 Si 纳米颗粒的 SEM 像与 粒度分布率

 $\label{eq:Fig.1} {\mbox{ Fig.1 SEM image and grain size distribution rate of Si} nanoparticles formed on Si(100) substrate cooled by liquid N_2 trap$



图 2 沉积在石墨衬底上的单晶 Si 片和 Si 纳米颗粒的 Ramam 谱

Fig.2 Normalized Raman spectra of bulk single crystal Si and Si nanoparticles deposited on graphite substrate

偏移,同时对单晶 Si 片做了 Raman 扫描,发现纳米 Si 颗粒的 Raman 峰偏离了单晶 Si 峰(521.2 cm⁻¹)。与 相应单晶 Si 峰相比,存在谱峰展宽现象,由于单晶 Si 的光学声子模位于 520 cm⁻¹左右,非晶体 Si 的光学 声子特征峰是在 480 cm⁻¹附近的宽峰,因此,图 2 拉 曼谱的显著频移表明石墨衬底上已经形成了纳米 Si 晶粒。另外,在图 2 的 Raman 谱中,Si 颗粒样品在 450~500 cm⁻¹附近出现一个明显非晶 Si 的类 TO 模, 它与钝化 Si 晶粒表面的氧原子有关。根据声子限制模 型^[18],

 $\Delta \omega(D) = -A(\alpha/D)^{\gamma}$

式中: α 是 Si 的晶格常数, 0.543 nm; Δω 是晶化峰位

相对单晶 Si 的 Raman 位移, nm; γ =1.44; *A*=47.41 cm^{-1[19]}。由此可以估算出纳米颗粒的平均尺寸 *D* 约 4.5 nm。这一结果与 SEM 统计结果较为接近。

图 3 所示为沉积在石墨衬底上 Si 纳米颗粒的 TEM 像。在图 3(a)中发现 Si 颗粒呈球状,且尺寸均 匀,约为 5nm 左右,与 Raman 测量结果非常接近。 为了进一步分析 PLA 制备 Si 纳米颗粒的显微结构, 对分散的单个 Si 纳米颗粒的进行晶体结构表征。图 3(b)的 HRTEM 结果表明沉积的 Si 纳米颗粒是单晶结 构。由于衬底为非晶 C 膜,所以只观察到单晶态的 Si 纳米颗粒,而晶态颗粒表面的非晶层并不明显。结合 晶面间距的测量和 FFT(图 3(c))结果,验证该单晶 Si 纳米颗粒为具有(111)取向的单晶晶粒。



图 3 沉积在石墨衬底上的 Si 纳米颗粒的 TEM 像 Fig.3 TEM images of Si nanoparticles prepared on carbon thin film: (a) TEM image; (b) HRTEM image of single Si nanoparticle; (c) Corresponding FFT for Fig.(b)

为了比较低温衬底对于 Si 纳米颗粒尺寸的影响, 实验中在其他实验参数不变的情况下,将衬底温度升 至室温制备纳米 Si 颗粒,对所得颗粒进行 SEM 和 Raman 谱表征。图 4 所示为室温 Si(100)衬底上沉积 Si 纳米颗粒的 SEM 像和粒度分布。由图 4 可看出, 由于衬底温度升高,Si 纳米颗粒的形貌与图 1 差异较 大,Si 纳米颗粒的面密度、尺寸明显增大。在 Si 衬底 上出现一些大尺寸的颗粒,这些颗粒很可能是激光熔 蚀产生的 Si 液滴聚集长大的结果。对颗粒尺寸进行粒 度统计计算,尺寸分布在 9 和 30 nm 两个较大的范围 内,拟合曲线为马鞍形。尽管如此,由于缓冲压力和 靶与衬底距离的设定 ,Si 纳米颗粒没有出现明显团聚。 与此同时,如图 5 所示,Raman 结果也证明室温下制 备的 Si 纳米颗粒的 Raman 谱峰位于 519.3 cm⁻¹ 处,比 液氮冷却衬底情况下相应数值要大,说明常温衬底上 制备的纳米 Si 晶粒平均尺寸大。



图 4 室温单晶 Si(100)衬底上沉积 Si 纳米颗粒的 SEM 像和 粒度分布率

Fig.4 SEM image and grain size distribution rate of Si nanoparticles deposited on Si (100) substrate at room temperature



图 5 室温时沉积在衬底上 Si 纳米颗粒的 Raman 谱 Fig.5 Raman spectrum of Si nanoparticles deposited on graphite substrate at room temperature

关于衬底温度对 Si 颗粒尺寸的影响,可以通过 PLA 制备 Si 纳米颗粒的过程动力学解释。根据粘滞力 模型, Si 纳米颗粒的大小和尺寸分布完全由缓冲气压 和 气体 种 类 控 制^[20]。 然 而, NARAYANAN 和 THAREJ^[21]以及 BAILINI 和 OSSI^[22]认为谐振波模型 或混合模型更能反映 Si 纳米颗粒的形成过程。事实 上,不同的解释主要源于实验中关注的参数不同。粘 滞力模型只关注气压参数,而谐振波模型只关注靶与 衬底之间的距离。这两种模型的共同认识在于,脉冲 激光烧蚀材料表面,在激光烧蚀处产生熔池,等离子 化的粒子向外喷射,在粒子能量衰减至一定程度,颗 粒的长大终止。如果 Si 等离子体在靶与衬底之间谐振 的次数越大,那么 Si 颗粒长大的几率就越大。因此, 快速衰减等离子体的能量是获得小尺寸颗粒的途径之 一。此外,能量的快速降低也会减少衬底上颗粒的二 次长大几率,有利于形成尺寸均匀的纳米颗粒。鉴于 以上分析,本研究采用液氮冷却衬底是形成小尺寸纳 米颗粒的主要原因。

2.2 室温 PL 性能分析

在不同衬底温度下制备的 Si 纳米颗粒的室温 PL 测试条件相同。以波长为 325 nm 的激光做激发光源, 测得室温制备样品的归一化 PL 谱如图 6 所示。从图 6 可以看出,发光峰位于585 nm,其半高宽为70 nm, 属晶粒的量子限制效应发光范畴。根据量子限制效应 (QCE), Si 晶粒尺寸小于波尔半径(2 nm)时, Si 纳米材 料才会出现带隙展宽,产生光致发光现象。从图2的 Raman 结果可知, Si 纳米颗粒表面应该存在一定厚度 的非晶氧化层。众多纳米 Si 发光机制的本质都与纳米 Si 晶粒尺寸大小有关。单一尺寸 Si 纳米颗粒的发光机 制可以归结为 OCE 效应或发光中心效应 随着尺寸分 布增加,很难将发光现象归结为一种或几种机制。与 此同时,纳米 Si 颗粒对应的 PL 谱由于颗粒尺寸差异 和表面形态差异出现展宽,不同形态 Si 颗粒比例导致 对应的 PL 峰强度不同,这些 PL 峰拟合后成为展宽的 连续 PL 谱。在本研究中,低温衬底上制备的 Si 纳米 颗粒的尺寸分布较窄,对应 PL 谱的半高宽只有 70 nm,这与颗粒的分散均匀和形态单一相对应。

对室温衬底制备的 Si 纳米颗粒进行 PL 分析,其 结果如图 7 所示。由图 7 可看出, Si 纳米颗粒的发光



图 6 室温时衬底沉积 Si 纳米颗粒的 PL 谱



峰位于 623 nm,半高宽为 97 nm。另外,在波长 596 nm 附近存在一个"肩峰"。 Si 纳米材料 PL 发光谱中的 双峰通常来源于纳米晶粒表面氧化物引起的二次复合 作用^[16]。关于 PL 双峰的起因,FANG 等^[23]和 RIABININA 等^[24]有着截然不同的解释。FANG 等^[23] 认为双峰来源于纳米颗粒表面氧化层之间的复合作 用,本质上更趋于是氧化物表面缺陷作用,而与纳米 材料的尺寸没有关系。RIABININA 等^[24]对于双峰的 解释更接近于纳米颗粒的尺寸效应,认为量子限制效 应是产生 PL 峰的主要原因,而颗粒尺寸分布较大导 致 PL 峰的展宽,双峰的出现缘于尺寸分布趋于两个 较为明显的极端。



图 7 室温时衬底上沉积 Si 纳米颗粒的 PL 谱

Fig.7 Photoluminescence spectrum of Si nanoparticles deposited on Si (100) wafer at room temperature

在本研究中,由于纳米 Si 晶粒尺寸影响其光致发 光的波长^[25],所以本文作者认为"肩峰"的出现可能 是因为纳米 Si 晶粒尺寸集中分布在两个范围所致。另 外,与相同参数下在室温衬底上制备样品的 PL 谱峰 位和半高宽相比,在低温衬底上制备的样品 PL 谱峰 位发生蓝移,且谱峰宽度变窄。这进一步证实 SEM 的 分析结果,即在低温衬底下制备的晶粒尺寸分布更均 匀、平均晶粒尺寸更小。上述结果对 Si 激光器件的研 制具有重要意义。

3 结论

1) 在 15 Pa 的 Ar 气氛中,采用 PLA 沉积技术在 液氮冷却衬底上制备了尺寸分布为 1~10 nm 分散 Si 颗粒, SEM 统计、Raman 计算和 TEM 表征表明晶态 Si 纳米颗粒的平均尺寸约(4.5 ± 0.5) nm。

2) 相同 PLA 参数下,升高衬底温度至室温,获

得的 Si 纳米颗粒尺寸增大,主要粒度范围从 4.5 nm 增至 9~30 nm,这是由于沉积过程,激光烧蚀产生的 粒子能量衰减过慢所致。

3) 液氮冷却衬底上制备的纳米 Si 颗粒具有更窄的 PL 发光谱, PL 峰位于 589 nm, 半高宽约 70 nm。 而常温衬底获得的纳米颗粒 PL 结果呈现, 主峰位于 623 nm, 双峰现象与颗粒的尺寸分布有关。

致谢:此项研究得到了美国 Dow-Corning 公司的 资助,在此致以诚挚的感谢。

REFERENCES

- CANHAM L T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers[J]. Appl Phys Lett, 1990, 57: 1046–1048.
- [2] IYER S S, XIE Y H. Light emission from silicon[J]. Science, 1993, 269: 40–46.
- [3] SERAPHIN A A, WERWA E and KOLENBRANDER K D. Influence of nanostructure size on the luminescence behavior of silicon nanoparticle thin films[J]. J Mater Res, 1997, 12: 3386–3392.
- [4] MAKINO T, SUZUKI N, YAMADA Y, YOSHIDA T, UMEZU I, SUGIMURA A. Mechanisms of visible photoluminescence from size-controlled silicon nanoparticles[J]. Mat Res Soc Symp Proc, 2003, 737: F1.5.1–F1.5.6.
- [5] SUZUKI N, MAKINO T, YAMADA Y, YOSHIDA T. Structures and optical properties of silicon nanocrystallites prepared by pulsed-laser ablation in inert background gas[J]. Appl Phys Lett, 2000, 76(11): 1389–1391.
- [6] YOSHIDA T, TAKEYAMA S, YAMADA Y. Nanometer-sized silicon crystallites prepared by excimer laser ablation in constant pressure inert gas[J]. Appl Phys Lett, 1996, 68(13): 1772–1774.
- SCRIBA M R, ARENDSE C, HARTING M, BRITTON D T. Hot-wire synthesis of Si nanoparticles[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(5): 844–846.
- [8] WANG L, TU H L, ZHU S W, DU J. Formation and optical properties of well-separated Si nanoparticles by utilizing a nanocluster source[J]. J Phys D: Appl Phys, 2008, 41: 045302–045305.
- [9] SANKARAN R M, HOLUNGA D, FLAGAN R C, GIAPIS K P. Synthesis of blue-luminescent silicon nanoparticles using atmospheric pressure microdischarges[J]. Nano Lett, 2005, 5(3): 537–541.
- [10] YU W, WANG B Z, LU W B, YANG Y B, HAN L, FU G S. Growth of nanocrystalline silicon films by helicon wave plasma chemical vapour deposition[J]. Chin Phys Lett, 2004, 21: 1320–1322.
- [11] WERWA E, SERAPHIN A A, CHIU L A, ZHOU C,

KOLENBRANDER K D. Synthesis and processing of silicon nanocrystallites using a pulsed laser ablation supersonic expansion method[J]. Appl Phys Lett, 1994, 64: 1821–1823.

- [12] WANG Y L, XU W, ZHOU Y, CHU L Z. Influence of pulse repetition rate on the average size of silicon nanoparticles deposited by laser ablation[J]. Laser and Particle Beams, 2007, 25(1): 9–13.
- [13] FU G S, WANG YL, CHU L Z, ZHOU Y, YU W, HAN L, PENG Y C. The size distribution of Si nanoparticles prepared by pulsed-laser ablation in pure He, Ar or Ne gas[J]. Europhys Lett, 2005, 69: 758–762.
- [14] 褚立志,卢丽芳,王英龙,傅广生.脉冲激光烧蚀制备纳米 Si 晶粒成核区位置的确定[J].物理学报,2007,56(6):3374-3378.
 CHU Li-zhi, LU Li-fang, WANG Ying-long, FU Guang-sheng.
 Determination of the region where Si nanoparticles form during pulsed laser ablation[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56 (6): 3374-3378.
- [15] CHEN X Y, LU Y F, WU Y H, CHO B J, LIU M H, DAI D Y, SONG W D. The mechanisms of photoluminescence from silicon nanocrystals formed by pulsed-laser deposition in argon and oxygen ambient[J]. J Appl Phys, 2003, 93(10): 6311–6319.
- [16] DU J, TU H L, WANG L. Non-agglomerated silicon nanoparticles on (001) silicon substrate formed by PLA and their photoluminescence properties[J]. Mater Sci Eng B, 2009, 159/160: 61–65.
- [17] CHEN H S, CHIU J J, PERNG T P. On The Photoluminescence

of Si Nanoparticles[J]. Mater Phys Mech, 2001, 4: 62-66.

- [18] JIAN Z, BUSCHER H, FALTER C. Raman shifts in Si nanocrystals[J]. Appl Phys Lett, 1996, 69: 200–202.
- [19] DELERUE C, ALLAN G, LANNOO M. Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon[J]. Phys Rev B, 1993, 48: 11024–11037.
- [20] GARRELIE F, CHAMPEAUX C, CATTARINOT A. Expansion dynamics of the plasma plume created by laser ablation in a background gas[J] Applied Physics A, 1999, 69(7): S55–S58.
- [21] NARAYANAN V, THAREJ R K. Emission spectroscopy of laser-ablated Si plasma related to nanoparticle formation[J]. Applied Surface Science, 2004, 222(1/4): 382–393.
- [22] BAILINI A, OSSI P M. Expansion of an ablation plume in a buffer gas and cluster growth[J]. Europhysics Letters, 2007, 79: 35002-P1-P6.
- [23] FANG X H, LIAO M X, GU Y, WU X L. Double-peakstructured photoluminescence mechanisms of porous silicon[J]. Phys Stat Sol A, 2005, 202: 1818–1824.
- [24] RIABININA D, DURAND C, ROSEI F, CHAKER M. Luminescent silicon nanostructures synthesized by laser ablation[J]. Phys Stat Sol A, 2007, 204: 1623–1638.
- [25] TAKAGI H, OGAWA H, YAMAZAKI Y, ISHIZAKI A, NAKAGIRI T. Quantum size effects on photoluminescence in untrafine Si particles[J]. Appl. Phys Lett, 1990, 56(24): 2379–2381.

(编辑 李艳红)