

纳米硅上等离子体激元与光子相互作用 对电子局域态及发光的调控

王 刚¹ 黄伟其¹ 董泰阁¹ 吴学科¹ 秦朝建²

¹贵州大学纳米光子物理研究所, 光电子技术与应用省重点实验室, 贵州 贵阳 550025

²中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550003

摘要 用脉冲激光制备纳米硅的过程中,在Purcell腔中会形成等离子体晶格结构,这是等离子体激元与光子相互作用的结果,其形成的等离子体晶格与Wigner晶体结构很相似。利用光致发光光谱研究局域态发光特征从而去控制纳米硅结构的发光,在氧气或氮气环境下制备纳米硅样品,由于表面键合作用形成电子局域态会产生几个特征发光峰,分别位于560、600和700 nm附近。在氧气环境下用激光照射硅晶片形成硅量子点,可以观察到样品的拉曼光谱随着测量温度的增加而产生频谱移动,这个过程伴随着声子能量的变化。温度较高时,光致发光峰强度下降,同时发射频谱变宽。在77 K时,可以观察到光致发光峰的红移,这表明局域态发光在纳米硅发光的激活起着重要作用。在带隙中产生的局域态取决于表面键合的情况,表面键合可以激活硅量子点而增强发光。在硅薄膜上掺入稀土金属铽会形成电子局域态发光,可将电致发光的波长调控进入光通讯窗口。

关键词 物理光学; 纳米硅; 光致发光; 等离子体激元; 局域态

中图分类号 O472.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1217001

Manipulation of Surface Emission on Nanosilicon and Electronic Localized States Influenced by Interaction between Plasmon and Photon

Wang Gang¹ Huang Weiqi¹ Dong Taige¹ Wu Xueke¹ Qin Chaojian²

¹Institute of Nanophotonic Physics, Key Laboratory of Photoelectron Technology and Application, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

²State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550003, China

Abstract The period pattern emission in the Purcell cavity from plasmonic lattice structure is observed due to interaction between plasmon and photon. It is observed in preparing nanosilicon by pulsed laser, which is similar with the Wigner crystal structure. Manipulation of emission in the Si nanostructures is studied by the photoluminescence spectroscopy. The surface bonding and electronic localized states are characterized by several emission bands, which peak near 560, 600 and 700 nm on samples prepared in oxygen or nitrogen environment. Silicon quantum dots (QDs) is fabricated by laser irradiation in oxygen environment. The peak-shift in Raman spectra can be observed with increasing temperature on samples, which shows the decrease of phonon energy. The peak intensity in photoluminescence (PL) decreases and the emission band becomes broader at higher temperature, meanwhile the red-shift of PL peak is observed at 77 K compared with that at 279 K, which indicates that the localized states emission plays a main role on the nanosilicon activated. The electroluminescence wavelength is measured in the telecom window on silicon film coated by ytterbium.

收稿日期: 2015-06-08; 收到修改稿日期: 2015-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(11264007, 61465003)

作者简介: 王刚(1988—),男,硕士研究生,主要从事纳米硅发光方面的研究。E-mail: 457320602@qq.com

导师简介: 黄伟其(1954—),男,硕士,教授,主要从事纳米光子物理方面的研究。

E-mail: sci.wqhuang@gzu.edu.cn(通信联系人)

Key words physical optics; nanosilicon; photoluminescence; plasmon; density of states

OCIS codes 250.5230; 160.3380; 160.4760

1 引言

目前,传统的半导体激光器及一些气体激光器从设计到工艺上已经很成熟了,并且已经应用到各个领域之中^[1-4]。但是基于化合物材料的半导体激光器在工艺上与标准集成电路工艺不兼容,无法实现单片集成电路,所以只能选择硅作为发光器件的基本材料,即硅发光二极管或者硅基激光器。由于激光器在各方面性能上的优势,使硅基激光器的研究更具有关键性意义。自从1990年Canham在室温下发现多孔硅的光致发光(PL)以来,人们一直致力于对硅基发光材料的研究。但是由于硅是间接带隙结构,发光效率极低,所以最大的挑战仍然是发展一种有效的硅基发光器件。在过去的20年间,纳米硅的光致发光(PL)现象一直被广泛的研究^[5-6]。尽管纳米硅的量子限制(QC)效应已经被证实,但是在尺寸小于3 nm时,就不会完全忠实于QC效应;而在尺寸大于10 nm时,QC效应则会失效^[7-8]。在较小的纳米尺寸上用传统的光电子学方法很难大面积集成量子结构^[9-10],所以应该在纳米尺度上发展新的机制,去控制发光的强度与波长,并与光电设备兼容。目前,除了QC效应,很多其他机制也被提出,来研究在各种波段上高效的硅基发光器件,包括在纳米硅表面掺杂杂质原子导致缺陷发光和有偏振作用的结构缺陷等^[11-16]。

尽管这些方案很有创新性,但目前实现利用硅的局域态子带隙稳定发光仍然是不现实的,因为发光会在常温下迅速猝灭。利用脉冲激光在纳米硅表面作用形成弯曲表面上的键合,可以在带隙形成局域态并且会提供稳定的发光中心、提高发光效率,这是很有希望解决硅发光效率低下的一种方式^[17-18]。文中描述了利用脉冲激光制备纳米硅的过程,在Purcell腔中等离子体会形成类似晶格结构的衍射图案,是表面等离子体激元与光子相互作用的结果,而所形成图案与Wigner晶体结构相似^[19]。在不同的气体氛围下腔内等离子体作用在纳米硅上会形成不同的纳米结构。在氧气或氮气氛围下制备的纳米硅可以发出明亮的可见光,而在掺入稀土元素镱的纳米硅可以将发光波长调控到光通讯波段。在常温下,进行实验样品的电致发光(EL)测试,输入电压为10 V,输入电流为100 mA,这时测量样品的发光强度大于100 mW,由以上数据可以估算:在Purcell腔中常温下发光的外量子效应大于1%;这与QC效应发光机制不同,它起源于在氧气或氮气氛围下用脉冲激光制备的纳米硅的局域态发光,退火后在604 nm处的光致发光会得到光学增益。

2 等离子体振荡实验过程及其结果

用Nd:YAG脉冲激光制备样品,激光波长为1064 nm,脉冲宽度为80 ns,重复频率为1000~4000 Hz。电阻率为 $20 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ 的p型硅作为基底,并在清洁室中清洁15 min以上。激光脉冲作用在硅表面的强度大约为 $5 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,通过控制脉冲激光的强度持续发出等离子体羽辉。等离子体振荡能量由纳秒脉冲激光提供, $\omega^2 = Ne^2/m\epsilon$ ^[20],在腔内会形成谐振的等离子体驻波,表面等离子体激元由 $\omega_q^2 = (2\pi Ne^2/m)q + (3/4)q^2(hk_f/2\pi m)^2$ 表示,式中 k_f 是费米矢量, q 是表面等离子体激元量子数。表面等离子体激元与光子相互作用后,腔内等离子体驻波会被增强,通过泰伯反射可以形成明亮的周期图案,如图1(a)所示。值得注意的是,在Purcell腔中的等离子体驻波振荡形成的表面等离子体激元与光子相互作用而形成的等离子体晶格结构。Purcell腔的尺寸是影响电子态密度 N 和共振的驻波的一个重要参数,而20~60 μm 对于共振是一个较好的尺度范围。

图1(a)是利用Nd:YAG纳秒激光器产生的波长为355 nm的三次谐波光束,由等离子体激元与光子作用形成的周期图案。在腔中的等离子体驻波共振膜利用泰伯反射效应产生的蓝色图像可以用肉眼直接观察到。驻波发出的蓝色周期图像是由等离子体激元在波长为355 nm的光子激发下发出的。腔中驻波周期结构的红外图像是由表面等离子体激元与波长为1064 nm的光子互相作用的结果,如图1(b)。腔内驻波与波长较长的光子相互耦合的图像是无法用肉眼观察到的,只有在红外相机中才能被观察到。

在Purcell腔中弛豫时间可以延长,这可以通过不同脉冲间的干涉测量观察到。通过改变脉冲激光的重复频率或改变测量的距离,都可以形成表面等离子体激元与弛豫脉冲之间相互作用的干涉图案,其原因还在研究中。在不同重复频率的激光激发下形成干涉晶格图案的过程,相应的重复频率越高的时候,其衍射图案就会越明显。当脉冲激光重复频率达到4000 Hz时,因为缩短了等离子体驻波的弛豫时间,空间干涉晶

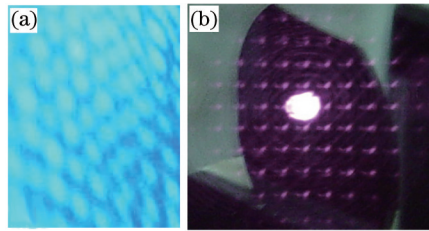


图1 (a) 腔内表面等离子体激元与光子相互耦合形成的等离子体驻波图像; (b) 等离子体羽辉(可看到的光点)和等离子体驻波形成的周期图像

Fig.1 (a) Image of the plasmon standing wave produced by coupling between photon and plasmon in the cavity; (b) visible light spot of plasma plume and period pattern of infrared image of the plasma standing wave

格图案可以十分明显地观察到,并且时间的相干性与空间的相干性是可以对称交换的。由等离子体激元和光子相互作用而形成的等离子体晶格结构与Wigner晶体结构极其相似。

利用纳秒激光器制备的腔体中微纳尺度网孔状结构的光学图像如图2(a)所示,图2(a)右边图像显示了利用355 nm纳秒脉冲激光制备的氧化纳米硅结构的透过电子显微镜(TEM)图像。通过对拉曼光谱峰值测量和计算可知微粒的尺寸在几个纳米的范围,如图2(b)中的拉曼峰C。纳米硅的尺寸可以由 $D^2 = 8.834 \times 10^{-6} \times (\lambda^2 / \Delta\lambda)$ 计算出, D 为纳米硅的直径, λ 为横向声子(TO)拉曼峰的波长, $\Delta\lambda$ 为标准块硅拉曼谱的峰值与纳米硅峰值中心波长的差值^[21]。从波长分布计算纳米硅主要分布尺寸在3 nm左右,而用TEM的图像测量纳米硅的尺寸在1.7~4 nm的范围,这与分析的结果是一致的。

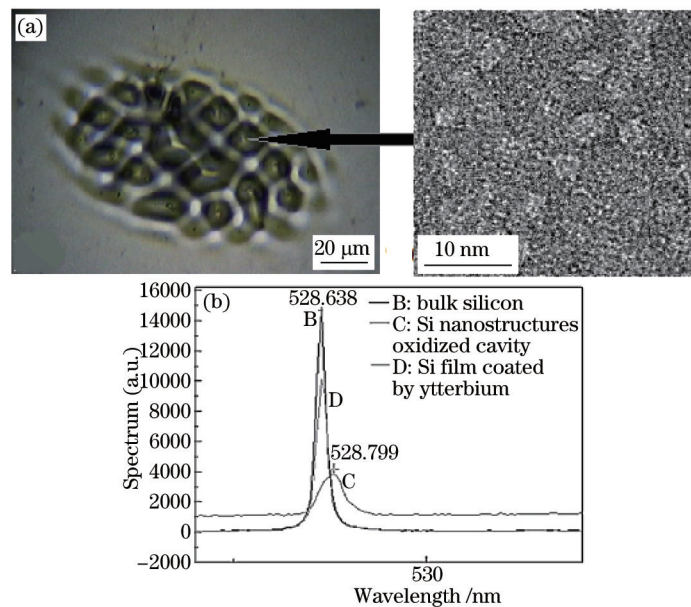


图2 (a) 由波长为355 nm的纳秒脉冲激光作用于腔中形成的等离子体驻波,纳米硅网孔结构和内部TEM图像; (b) 纳米硅的拉曼散射光谱,曲线B为标准块硅的标准拉曼谱线,曲线C为纳米硅的拉曼谱线

Fig.2 (a) Optical image of hole-net structure prepared by the plasma standing wave provided by ns pulsed laser at 355 nm in the cavity, and the inset shows the TEM image of nanostructures of silicon in the hole-net structure; (b) Raman scattering spectra of nanocrystal of Si, and line B is the standard Raman spectrum on bulk silicon, line C is the Si nanostructures Raman spectrum

在氧气环境下,利用1064 nm纳秒脉冲激光制备的纳米硅样品,常温下的Purcell腔中可以发出明亮的可见光。当制备压强为 10^{-1} Pa时,被氙灯照射激发光学图像如图3(a)所示,经过退火处理后测量其PL光谱如图3(b),峰值在604 nm处,其光学增益系数已经大于80。

3 退火温度对PL光谱中发光峰的影响

除了气体氛围,退火温度也可以影响纳米硅的激活。相对较高的温度下PL峰的强度会下降,并且伴随着PL峰值的红移。通过激光照射和退火制备硅量子点,模拟计算后发现硅量子点上的Si=O双键和Si-O-Si

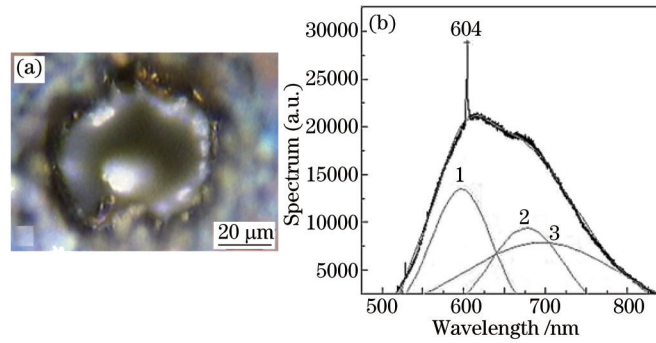


图3 (a) 氧化的纳米硅的腔体被氙灯激发的光学图像; (b) 图3(a)中样品退火后的PL光谱, 在604 nm处存在锐利的峰值

Fig.3 (a) Optical image of the emission of oxidized Si nanostructures excited by xenon lamp in cavity;

(b) a sharp peak at 604 nm in PL spectrum on the sample in Fig.3 (a) after annealing treatment

桥键明显地影响了局域态产生的位置, 而局域态在PL激射中有很重要的作用。硅量子点上的发射强度取决于激光照射及退火过程中氧化作用的控制^[20-22]。

把 $10\sim 20 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ 的(1, 0, 0)晶向的P型硅晶片, 在氧气氛围下利用波长为 1064 nm 的脉冲 YAG 激光器聚焦在硅基样品上。其照射强度同样在 $5 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右, 重复频率为 1000 Hz, 照射在硅基上的激光束斑直径约为 30 μm , 作用时间控制在 1~2 s 范围内, 这样的强度已经足够产生激光等离子体。然后样品被送入 1000 $^{\circ}\text{C}$ 的氧化炉中快速退火, 退火时间控制在 10 min 到 20 min, 硅量子点就被嵌在氧化层中。

利用 EPMA-1600 型扫描电子显微镜(SEM)去观察样品上通过脉冲激光刻蚀、氧化而形成的网状结构, 如图 4(a)所示。透射电子显微镜(TEM, JEM-2000FX 型)图像如图 4(b)所示, 量子点镶嵌在氧化层中, 量子点的直径在 2~3 nm 范围, 量子点的数密度为 10^{11} cm^{-2} 。

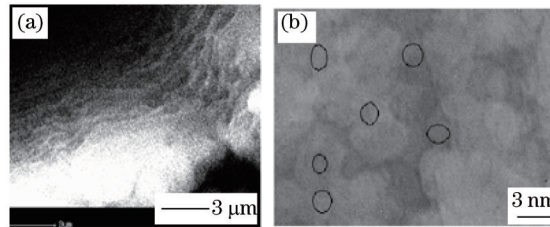


图4 (a) 脉冲激光下制备的网孔硅的SEM图像; (b) 脉冲激光下制备的氧化硅量子点的TEM图像

Fig.4 (a) SEM image of hole-net silicon prepared by pulsed laser; (b) TEM image of oxidized Si QDs prepared by pulsed laser

用 RENISHAW 显微拉曼系统测量波长为 514 nm 的激发光下不同温度的硅基样品的拉曼谱和 PL 光谱。观察到温度分别在 279 K、379 K、579 K 和 779 K 下样品的拉曼光谱会随着温度的增加而产生峰值蓝移, 线宽也随之加宽, 由于温度变化, 分子内部的应力也随之发生改变, 其拉曼峰故随之移动。在图 5 中可以观察到 C 峰的线宽较窄, 随着温度的升高, 其拉曼峰宽逐渐变宽。

在低温情况下, 其 PL 光谱峰值会发生红移, 并且强度也有所增加, 如图 6(a)所示, 分别在液氮氛围下(77 K)

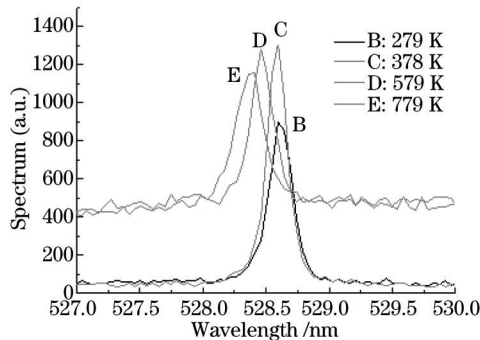


图5 在波长为 514 nm 的激发光下不同温度的样品的拉曼光谱

Fig.5 Raman spectra on the samples at different temperature under the 514nm excitation

和常温下(297 K)测量样品的 PL 光谱。在常温时的 PL 光谱峰值会明显地下降,当温度再升高时,发光甚至会发生猝灭,如图 6(b) 中显示 3 个不同温度下的 PL 光谱,在 579 K 时其 PL 光谱发光峰基本消失。

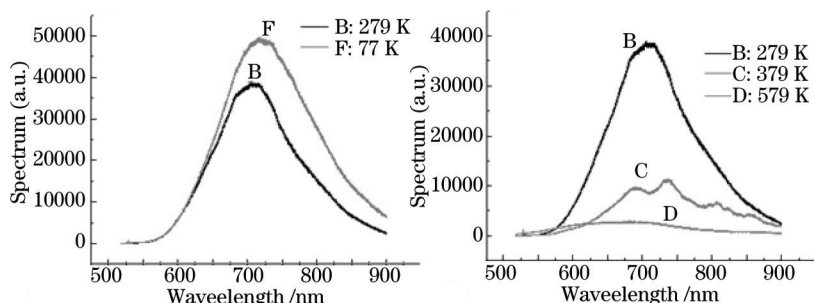


图 6 (a) 77 K 和 297 K 时样品的 PL 光谱; (b) 从 279 K 到 579 K 3 个不同温度下的 PL 光谱

Fig.6 (a) PL spectra measured at 77 K and 297 K respectively; (b) PL spectra at different temperatures from 279 K to 579 K

温度升高和光致发光强度改变的关系以及拟合曲线如图 7(a)所示,可以看到随着温度的升高,其发光强度也随其呈现倒数型减弱,究其原因当温度升高时,声子的能量也随之增大,声子能量足够大时可以使在带隙中局域态的电子被激发到导带,这时局域态发光就会随之变弱。温度升高时导致 PL 谱峰的蓝移的关系如图 7(b)所示,这表明由于声子的激发,越来越多的电子从局域态跃迁到导带,使电子跃迁的能带宽度变大,波长变短,但是其跃迁几率也会随之变低,并且必须要有声子的协助。

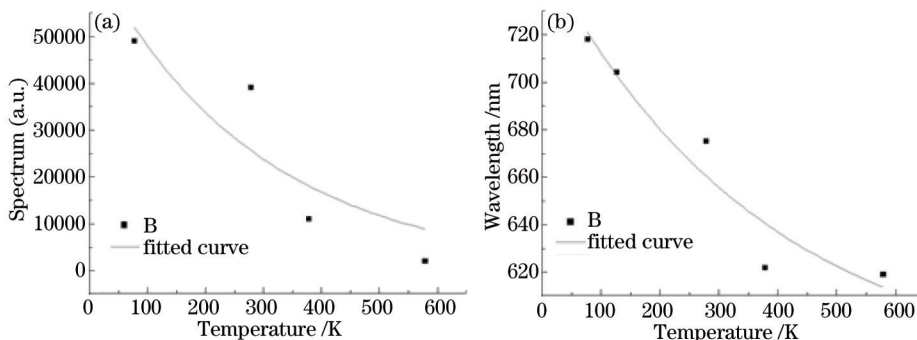


图 7 (a) 光致发光强度随温度的变化图; (b) PL 峰值位置随温度的增加而移动

Fig.7 (a) Potential change of the PL intensity with temperature; (b) PL peak-shift with temperature increase

由于硅量子点是由激光照射和退火形成的,所以要选择相应的模型去仿真模拟 Si-H 键对表面的钝化和量子点的氧化过程。如图 8 所示,数值模拟过程中设置不同的纳米团簇模型^[23]。表面的悬挂键被氢原子和氧原子占据而饱和,而氧原子的占据比例不同,目的是为了模拟样品不同的氧化程度。基于超晶胞的硅量子点模型既简便又强调了量子限制(QC)效应和结构变化的重要性^[24-25],所以利用这种模型去模拟量子点的氧化过程,并且通过基于非相对论的量子力学从头算法去研究电子的行为。利用 Material Studio(MS)软件 CASTEP 模块,采用局域态密度近似(LDA)和广义梯度近似(GGA)算法来进行密度泛函理论计算(DFT)自洽的总能量。一般来说 LDA 算法和 GGA 算法在计算半导体和绝缘体的带隙时都会低于真实值。

硅量子点表面最初是由氢原子饱和的[在图 8(a)中白色小球],在氧化过程中部分氢原子由氧原子取代[在图 8(b)中红色小球]。最初由氢原子饱和硅量子点表面时所形成的是一个宽带隙结构,当硅量子点被氧化时,在表面的 Si-H 键就会发生形变而产生较大的应力甚至断裂,从而形成 Si-O-Si 桥键。这样造成的对称性破缺就会产生一些局域态,有些局域态甚至会钻进禁带之中。随着氧化过程的进行, Si=O 双键就会更多的形成使表面趋于稳定,因为这个过程既不需要更大的形变能也不需要额外的元素,如在图 8(b)中显示的在带隙中所产生的局域态。考虑 LDA 和 GGA 算法会低估带隙值后,在硅量子点表面的 Si=O 双键在带隙中引入的局域态大约在 1.7~1.8 eV 左右,所以局域态发光的波长在 700 nm 左右。

在较低温度时,硅量子点在导带的电子被捕获到带隙中的局域态上,接近导带的局域态上的电子和接近价带的局域态上的空穴形成粒子的反转状态,这样导致了光致发光增强,甚至产生受激辐射。但是在较高温度下,越来越多的声子使电子从局域态激发到导带上。激发的电子与在价带上的空穴相结合形成了 PL

光谱微弱的蓝移。因此,这可能是在较高温度时局域态发光受到破坏的主要原因。

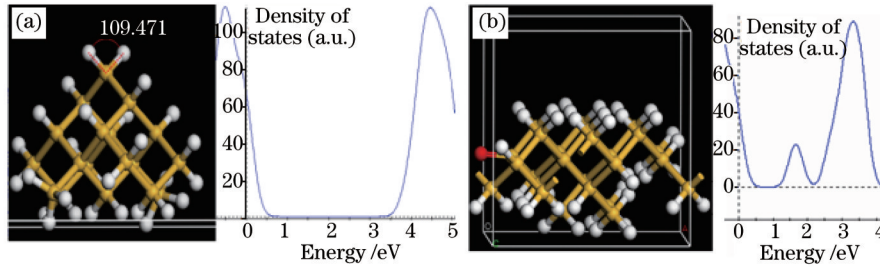


图8 (a) 用氢原子饱和表面的硅量子点,及其带隙结构,态密度;(b) 带有 Si=O 双键的硅量子点和态密度图,局域态在带隙中形成
Fig.8 (a) Si QDs structure saturated by hydrogen atoms, its band structure and density of states; (b) Si QDs structure with Si=O bond and its density of states, in which the localized states are formed in gap

4 数据拟合分析

研究发现 PL 光谱有几个特征发射谱带,尤其是两个峰值在 600 nm 和 700 nm 附近的发光谱带,其样品是在氧气氛围下制备的。实验结果表明发射谱带峰值在 600 nm 附近的峰值是在较低氧压(低于 10^{-1} Pa)条件下制备,如图 9(a);发射谱带峰值在 700 nm 附近的是较高氧压(高于 100 Pa)条件下制备,如图 9(b)。计算结果表明在氧压较低时很容易形成 Si-O-Si 桥键,模拟发现其在带隙中的局域态能级位置比 Si=O 双键离导带要近。因此推断在 600 nm 附近的发射峰与 Si-O-Si 桥键形成有关,如图 3(b)、图 9(a)和图 9(c)中的拟合峰 1;在 700 nm 附近发光峰与硅表面的 Si=O 双键形成有关,如图 3(b)和图 9(b)中的拟合峰 2。

在图 3(b)、图 9(a)和图 9(c)中拟合峰 3 的波段是很宽的,从 550 nm 到 830 nm,这与纳米晶体的尺寸范围(1.7~4 nm)有关,这里宽波段主要是 QC 效应的作用^[22,26]。峰 3 可以很好地利用高斯曲线拟合,由于纳米晶体尺寸是自由分布的,并且由于是自发辐射,其强度也是较弱的^[22]。而峰 1 和峰 2 用洛伦兹曲线拟合的很好,由于它们属于局域态发光。表面键合形成的局域态可以建立相应的四能级系统去激活纳米硅的发光^[27]。

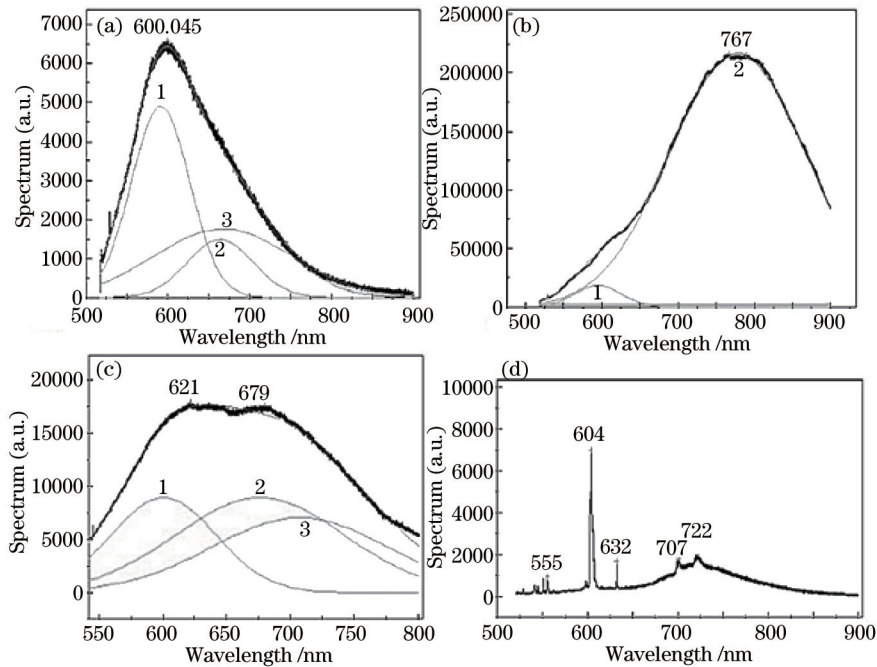


图 9 (a) 在较低氧压(低于 10^{-1} Pa)下制备的样品的 PL 光谱;(b) 在较高氧压(高于 100 Pa)下制备的样品的 PL 光谱;
(c) 在氧气和氮气氛围下的制备的样品的 PL 光谱;(d) 在较低氧压(低于 10^{-1} Pa)下制备的样品退火 20 min 的 PL 光谱
Fig.9 (a) PL spectra on sample prepared in smaller oxygen pressure (below 10^{-1} Pa); (b) PL spectra on sample prepared in larger oxygen pressure (over 100 Pa); (c) PL spectra on sample prepared in oxygen and nitrogen environment; (d) PL spectra on sample prepared in oxygen pressure (below 10^{-1} Pa) after annealing for 20 min and quenching treatment

在图 3(b)、图 9(a)和图 9(c)中拟合峰 1 和拟合峰 2 的中心波长几乎是不变的,这显示了局域态发光波长稳定的特点。但是拟合峰 3 出现了明显的移动,这是由于纳米硅尺寸分布的改变所引起,这显示了 QC 效应的作用。

在四能级系统中拟合峰 3 从 660 nm 移动到了 700 nm,如图 9(c),这是由于纳米硅上高能级的电子跃迁到低能级上有近 1.78 eV 的能量,尤其是样品在高氧压情况下形成 Si = O 双键,由于几乎所有的自由电子都从高能级跃迁到低能级上,所以拟合峰 3 消失,如图 9(b)所示。

图 9(c)的实验结果显示当氮气被掺入空气时,拟合峰 2 会变宽,同时发光峰也会发生移动,可知通过控制氧气与氮气成分比例是一种很好的方式来控制所形成局域态的位置,从而达到对发光波长的控制。在高温处理 20 min 后进行淬火处理,局域态发光会起主要作用,另外在 Purcell 腔中的共振膜会形成多个峰值,如图 9(d)所示。形成的宽带发光消失是由于 QC 效应失效,几个可见光峰值的产生是纳米硅表面键合形成的局域态的原因,其中 560 nm 的黄光对于硅基 LED 设备的研发有很大的帮助。

在纳米硅中掺入稀土元素也有很好的效果。将脉冲 Nd:YAG 激光三次谐波光束(波长为 355 nm,脉冲宽度为 100 ns,重复频率为 1000 Hz)作为脉冲激光沉积(PLD)激光光束轰击靶在硅薄膜上沉积,由于硅与镱的晶格常数不匹配,应力作用导致了在硅薄膜表面形成突触结构,并且 Si-Yb 键由于弯曲表面效应会在带隙中形成更深层的局域态结构^[28]。图 10 显示了 Si-Yb 键形成的局域态在 1600 nm 附近的增强 EL 光谱,其峰值落在通讯窗口波段。其中主要结构是在增益层中突触上的 Si-Yb 键键合形成的局域态发光。其增强 EL 光谱落在第三通讯窗口,这样会易于将通讯窗口的电致发光设备整合到硅基芯片上。

形成的四能级系统与激光的四能级系统相似,如果在脉冲激光的作用下源于表面键合的局域态的弛豫时间足够长,就可以实现能级上的粒子数反转。图 11 显示了四能级系统的设计,其局域态由纳米硅上的键合得到,如 Si-O-Si 桥键形成的 D1 局域态或 Si = O 双键形成的 D2 局域态,并且可以发出可见光波段,而发出通讯窗口波段的局域态结构可以通过在硅薄膜上掺杂稀土元素,如镱、铒等获得。完美的周期结构会形成正常的禁带结构,但是在纳米硅弯曲表面上的一些键合或者由表面等离子体振荡在硅薄膜表面形成的突触会打破系统的对称性,导致局域态钻入带隙。由于带隙位置接近费米能级,所以会有较长的弛豫时间^[17,29]。仿真与实验结果相比较,由于弯曲表面纳米硅上的键合或硅薄膜表面的突触导致对称性破缺,能带系统中的局域态会建立起发光中心。系统的能量增加也包括了来自光子与等离子体激元相互作用形成的局域态。

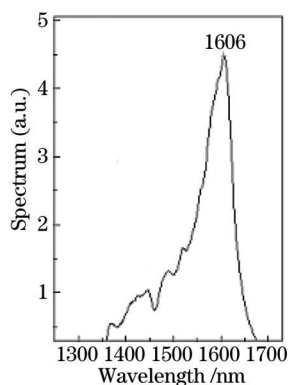


图 10 硅薄膜表面被镱覆盖时的 EL 光谱

Fig.10 EL spectrum on the emitter device of Si film coated by Yb

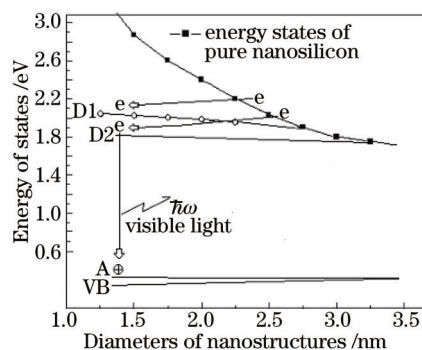


图 11 四能级系统的设计

Fig.11 Scheme of the four-level system

5 结 论

结果表明通过使用纳秒激光器作用在 Purcell 腔中的等离子体激元与光子相互作用与耦合在腔内会产生等离子体驻波的发光,这可以用眼睛直接观察到或用红外相机拍摄出来。不同温度、不同气体氛围以及不同浓度下对 PL 光谱和 EL 光谱造成影响,在氧气或氮气氛围下腔中的等离子体驻波可以制备各种纳米结构来发出可见光,而在硅薄膜中掺入稀土元素后会发射出通讯波段的发光峰。在氧气或氮气环境下制备的纳米硅的 PL 光谱和被镱覆盖的硅薄膜的 EL 光谱给出了一个操控波长很好的方式。在物理过程中,也有新

的现象被观察到,如驻波结构上的等离子体激元发光是由腔中等离子体激元与受激发光子耦合产生的,它们的轨迹产生了周期的网状结构,这与 Wigner 晶体结构很类似。而且以上工作也为制备硅基上的光子材料的复杂过程提供了研究发展空间。

参考文献

- 1 Dai Shutao, Li Jinhui, Shi Fei, *et al.*. High repetition rate high pulse energy single longitudinal mode master oscillator laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202001.
戴殊韬, 李锦辉, 史斐, 等. 高重复频率大能量单纵模主振荡激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202001.
- 2 Pan Biwei, Yu Liqiang, Lu Dan, *et al.*. 20 kHz narrow linewidth fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502007.
潘碧玮, 余力强, 陆丹, 等. 20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502007.
- 3 Lin Huaqin, Guo Chunyu, Ruan Shuangchen, *et al.*. High-power all-fiber Yb-doped picosecond fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702013.
林怀钦, 郭春雨, 阮双琛, 等. 高功率全光纤掺镱皮秒光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702013.
- 4 Liu Yi, Tong Xiaogang, Yu Jinlong, *et al.*. All-optical switching in silicon-on-insulator serially coupled double-ring resonator based on thermal nonlinear effect[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205006.
刘毅, 仝晓刚, 于晋龙, 等. 基于热非线性效应的硅基串联双微环谐振腔全光开关[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205006.
- 5 Liang D, Bowers J E. Recent progress in lasers on silicon[J]. Nature Photonics, 2010, 4: 511-517.
- 6 Zhang Rongjun, Chen Yiming, Zheng Yuxiang, *et al.*. Research and progress of silicon luminescence[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(2): 269-275.
张荣君, 陈一鸣, 郑玉祥, 等. 硅发光研究与进展[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 269-275.
- 7 Brongersma M L, Polman A, Min K S, *et al.*. Tuning the emission wavelength of Si nanocrystals in SiO₂ by oxidation[J]. Appl Phys Lett, 1998, 72(20): 2577-2579.
- 8 Walavalkar S S, Carrie E, Hofmann, *et al.*. Tunable visible and near-IR emission from sub-10 nm etched single-crystal Si nanopillars [J]. Nano Lett, 2010, 10(11): 4423-4428.
- 9 Park N M, Kim T S, Park S J. Band gap engineering of amorphous silicon quantum dots for light-emitting diodes[J]. Appl Phys Lett, 2001, 78(17): 2575-2577.
- 10 Walters R J, Bourianoff G I, Atwater H A. Field-effect electroluminescence in silicon nanocrystals[J]. Nature Mater, 2005, 4: 143-146.
- 11 Negro L D, Cazzanellia M, Daldosoa N, *et al.*. Stimulated emission in plasma-enhanced chemical vapour deposited silicon nanocrystals [J]. Physica E: Low-dimensional and Nanostructures, 2003, 16(3): 297-308.
- 12 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征[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 882-886.
- 13 Xu Wei, Yan Minyi, Xu Jie, *et al.*. Electroluminescence from amorphous SiN/Si quantum dots/amorphous SiN sandwiched structures[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0706003.
徐伟, 严敏逸, 许杰, 等. 纳米硅量子点/氮化硅三明治结构的电致发光[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0706003.
- 14 Ruan J, Fauchet P M, Negro L D, *et al.*. Stimulated emission in nanocrystalline silicon superlattices[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(26): 5479-5481.
- 15 Savio R L, Portalupi S L, Gerace D, *et al.*. Room-temperature emission at telecom wavelengths from silicon photonic crystal nanocavities [J]. Appl Phys Lett, 2011, 98(20): 201106.
- 16 Schmidt P, Berndt R, Vexler M I. Ultraviolet light emission from Si in a scanning tunneling microscope[J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(24): 246103.
- 17 Huang Weiqi, Huang Zhongmei, Chen Hanqiong, *et al.*. Electronic states and curved surface effect of silicon quantum dots[J]. Appl Phys Lett, 2012, 101(17): 171601.
- 18 Dana A, Yevgeni E, Daniel H R, *et al.*. The structural and optical properties of super continuum emitting Si nanocrystals prepared by laser ablation in water[J]. J Appl Lett, 2012, 112(11): 114312.
- 19 Khurana A. Highest T_c continues to increase among organic superconductors[J]. Physics Today, 1990, 43(9): 17-19.
- 20 Huang Weiqi, Xu Li, Wu Keye, *et al.*. Enhancement of photoluminescence emission in low-dimension structures formed by irradiation

- of laser[J]. J Appl Phys, 2007, 102(5): 053517 .
- 21 Wolkin M V, Jorne J, Fauchet P M, *et al.*. Electronic states and luminescence in porous silicon quantum dots: the role of oxygen[J]. Phys Rev Lett, 1999, 82(1): 197–200.
- 22 Huang Weiqi, Jin Feng, Wang Haixu, *et al.*. Stimulated emission from trap electronic states in oxide of nanocrystal Si[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(22): 221910.
- 23 Cruz M, Wang C, Beltran M R, *et al.*. Morphological effects on the electronic band structure of porous silicon[J]. Phys Rev B, 1996, 53 (7): 3827–3832.
- 24 Payne M C, Teter M P, Allan D C, *et al.*. Iterative minimization techniques for ab initio total–energy calculations: molecular dynamics and conjugate gradients[J]. Rev Mod Phys, 1992, 64(4): 1045–1079.
- 25 Bonder Y, Wang C. A first–principles model of birefringent porous silicon[J]. J Appl Phys, 2006, 100(4): 044319.
- 26 Barbagiovanni E G, Lockwood D J, Simpson P J, *et al.*. Quantum confinement in Si and Ge nanostructures[J]. J Appl Phys, 2012, 1(1): 011302.
- 27 Huang W Q, Zhang R T, Wang H X, *et al.*. Laser on porous silicon after oxidation by irradiation and annealing[J]. Opt Comm, 2008, 281 (20): 5229–5233.
- 28 Huang Z M, Huang W Q, Miao X J, *et al.*. CS effect and characteristic emission on silicon nanostructures prepared in various atmospheres [J]. Opt Commun, 2013, 309(15): 127–133.
- 29 Seguini G, Castro C, Schammchardon S, *et al.*. Scaling size of the interplay between quantum confinement and surface related effects in nanostructured silicon[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(2): 023103.

栏目编辑: 刘丰瑞