

文章编号: 0258-7025(2009)02-0269-07

# 硅发光研究与进展

张荣君 陈一鸣 郑玉祥 陈良尧

(复旦大学信息科学与工程学院先进光子学材料与器件国家重点实验室, 上海 200433)

**摘要** 微电子技术的瓶颈和信息技术发展的需求加速了光电子学在硅基材料上实现光信息处理、光电子集成的研究, 利用硅基材料制造出高质量的发光器件对光电子学以至整个信息技术均具有重要意义。由于受间接带隙能带结构的限制, 天然硅材料具有很低的发光效率, 不利于硅光源的实现。通过采用人工改性的方法提高硅的发光效率, 多孔硅、硅纳米晶体、掺  $\text{Er}^{3+}$  硅纳米晶和硅的受激拉曼散射均是目前可实现硅发光甚至硅激光的可行途径。回顾硅发光研究的历史进程, 归纳总结了近年来可实现硅发光几种方法的原理、特点以及当前的研究进展。相信随着硅发光效率的提高及器件制备工艺的发展, 硅发光研究不久将出现重大突破性成果, 并有可能引起新的信息技术革命。

**关键词** 光电子学; 硅发光; 光子器件; 硅基光源; 硅纳米晶体

**中图分类号** O472 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0269

## Research and Progress of Silicon Luminescence

Zhang Rongjun Chen Yiming Zheng Yuxiang Chen Liangyao

(Key Laboratory of Advanced Photonic Materials and Devices, School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** The bottle-neck of microelectronics and the demand of the development of information technology have accelerated the research on optical information processing and optoelectronic integration on Si-based material. The success of high-quality Si-based light sources will make a great impact on optoelectronic and information industry. Limited by indirect band structure, nature silicon has very low light-emission efficiency, which slows down the application of Si-based light sources. Several approaches have been proposed to obtain silicon luminescence, including porous silicon, silicon nanocrystals,  $\text{Er}^{3+}$ -doped silicon nanocrystals and stimulated Raman scattering. Various approaches of silicon luminescence research in recent years are reviewed and the characteristic and achievement of different approaches are introduced. It is believed that breakthrough in Si-based light sources will be made and new technology revolution will be started in the near future by the development of device manufacture and the improvement of light-emission efficiency of silicon.

**Key words** optoelectronics; silicon luminescence; photonic device; Si-based light source; Si nanocrystals

## 1 引言

硅是最重要的半导体材料之一, 当今微电子工业和信息技术的发展基本建立在硅材料的应用上<sup>[1]</sup>。随着技术需求的增长, 微电子技术瓶颈的出现驱使人们发展性能更优的光电子光互连技术, 产生和控制光的半导体器件将是下一代信息技术基

础。而基于目前整个微电子的技术和设备体系, 硅仍然是最值得考虑的材料<sup>[2]</sup>。多年来, 人们对基于硅的光电子光互连技术的研究和应用所受到最大的限制就是缺少一种可实用的高质量硅基光源与硅激光器<sup>[1]</sup>。若基于硅的高质量实用性发光光源得以研制成功, 无疑将会给通信、计算机和显示等光电子技

收稿日期: 2008-05-16; 收到修改稿日期: 2008-07-01

**基金项目**: 国家自然科学基金重点项目(60638010)、国家自然科学基金面上项目(60327002、60778028)和教育部留学回国人员科研启动基金资助项目。

**作者简介**: 张荣君(1972-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为固体光谱学、先进光子学材料与器件。

E-mail: rjzhang@fudan.edu.cn

术乃至整个信息技术领域带来深远的影响<sup>[3]</sup>。正因为如此,人们一直在硅基发光方面进行了长期不懈的理论和实验研究<sup>[1]</sup>,从研究硅体材料开始,探索了多孔硅、硅纳米晶、掺  $\text{Er}^{3+}$  硅纳米晶等多种硅发光手段,并取得了一些成果,这一领域仍然是世界各国都感兴趣的非常重要的研究热点。本文回顾了硅发光研究的进展,总结归纳了实现硅发光各种方法的特点和重要成果。

## 2 硅体材料发光性质

硅体材料具有很低的发光效率,其主要原因是<sup>[4]</sup>:首先,硅是间接带隙半导体,电子从导带跃迁到价带与空穴复合发光必须吸收或者发射一个声子,这是一个间接跃迁过程,因此具有很低的发生概率;其次,电子的间接跃迁过程还与其他非辐射复合过程竞争,例如俄歇过程、自由载流子吸收等。对于间接跃迁,辐射寿命长达毫秒量级,电子和空穴等待辐射复合的时候,很有可能通过俄歇过程把能量传递给其他粒子,而自由载流子吸收则会造成光学损耗,并且随着载流子浓度的增加而增加<sup>[4]</sup>。以上因素的限制使得在体材料硅上无法获得较高的发光效率,人们不得不采用其他不同的方法来突破硅体材料的限制,包括多孔硅、硅纳米晶体、掺  $\text{Er}^{3+}$  硅纳米晶和硅的受激拉曼散射等,以期获得实用高效的硅基光源甚至硅激光器<sup>[1, 4]</sup>。

## 3 多孔硅

多孔硅是采用 HF 电解液,以硅单晶为阳极进行电化学腐蚀而制备出来的、具有孔状结构的硅无序固体材料,自从 1990 年 L. T. Canham<sup>[5]</sup>发现室温下多孔硅强光致发光现象后,多孔硅受到了广泛的关注和研究。室温下多孔硅具有宽广的发光波段<sup>[6]</sup>,覆盖了从红外到紫外的范围,其发光峰值随孔隙率的增加而蓝移。多孔硅的发光机制是多年来一直研究的问题,已有多个模型被提出解释多孔硅的发光现象<sup>[6]</sup>,目前已得到广泛认可的有量子限制模型(QC)<sup>[5, 7]</sup>以及结合量子限制模型的量子限制-发光中心模型(QCLC)<sup>[8]</sup>等。多孔硅是由许多纳米量级的硅晶粒组成的无序固体,量子限制模型认为纳米量级的晶体结构使电子和空穴被限制在一个很小的空间范围内,使得本来是间接带隙的硅晶体中电子与空穴直接复合的概率增加,从而提高了发光效率。实验表明发光峰值随着电化学腐蚀时间的增长

而蓝移(如图 1 所示)<sup>[5]</sup>,这是因为多孔硅中硅晶粒的尺寸随腐蚀时间增长而变小,量子限制效应增大了硅晶粒带隙。X. Wang 等<sup>[9]</sup>对多孔硅发射蓝光的条件进行研究后,认为其发光来自于多孔硅的骨架部分,而发光峰值的位置所呈现出的分立现象(pinning characteristic)也认为是量子限制效应的一个例证<sup>[10]</sup>。而 G. Qin 等<sup>[11]</sup>提出的量子限制-发光中心模型则认为多孔硅中电子空穴的复合来自硅纳米晶体内部和包裹硅纳米晶体的氧化表面,电子空穴对被激发后会隧穿到晶体硅与氧化硅的界面,并在界面上的发光中心复合而发光。表面发光中心可视为对量子限制的补充,实验上也证实表面发光中心对发光光谱的影响。M. V. Wolkin 等<sup>[12]</sup>的研究工作表明在尺寸小于 3 nm 的情况下考虑表面 Si=O 键作用的理论模型取得与实验数据相符合的结果。实际上,多孔硅发光特性依赖于制备工艺,易受环境影响,稳定性较差,而且其制造工艺涉及电化学阳极腐蚀或化学腐蚀,不利于与硅平面工艺兼容。作为硅基发光的有效途径,多孔硅已被研究多年,但要制成真正实用的发光器件仍需进一步地努力。

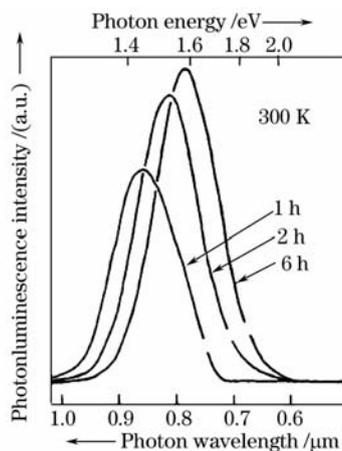


图 1 多孔硅荧光发光光谱峰值随电化学腐蚀的时间增长而蓝移

Fig. 1 Peak value of the photo luminescence (PL) of porous silicon was blue-shifted as electrochemical dissolution processed

## 4 硅纳米晶体

硅纳米晶体是直径在几个纳米范围内的硅晶体颗粒,目前被广泛研究的是嵌埋于  $\text{SiO}_2$  基体里面的硅纳米晶体。制备硅纳米晶体的主要方法有离子注入<sup>[13]</sup>、溅射<sup>[14]</sup>、等离子体激励式化学气相(PECVD)<sup>[15]</sup>和脉冲激光烧蚀<sup>[16]</sup>等,但这些方法制备出来的硅纳米晶体通常具有较宽的尺寸分布,不

利于光学性质的研究和应用。尺寸可控的硅纳米晶体制备方法也被提出<sup>[17]</sup>,例如分离硅烷<sup>[18]</sup>,然后从气相获得硅原子,经重组后获得硅颗粒,或者在 $\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$ 中通过退火使极薄的 $\text{SiO}_x$ 层发生相分离而获得尺寸受到 $\text{SiO}_x$ 薄层厚度限制的硅纳米晶体颗粒<sup>[19]</sup>,以上方法制备的硅纳米晶体其尺寸分布的半峰全宽(FWHM)均可以控制在1 nm左右<sup>[20]</sup>。

硅纳米晶是低维限制材料,其发光机制可用量子限制模型来解释<sup>[21]</sup>。硅纳米晶体直径均为几个纳米,电子和空穴的波函数由于空间分布的限制导致其在动量空间得到延展,增加了两者在布里渊区重叠的机会,电子在带间的跃迁所必需遵循的动量守恒条件得以放宽并被打破<sup>[22]</sup>,从而提高直接辐射复合的概率。J. Heitmann等<sup>[23]</sup>的工作表明随着硅纳米晶体尺寸的减少,电子可以直接跃迁到价带与空穴复合而不需要声子的参与,并在4.5 K的低温条件下测得不需要声子参与的直接跃迁与间接跃迁过程的比率大于1。G. Ledoux等<sup>[24]</sup>采用 $\text{CO}_2$ 激光器高温分解硅烷,通过速度选择在石英衬底上沉积出具有空间尺寸分布的硅纳米晶薄膜,从衬底的一侧到

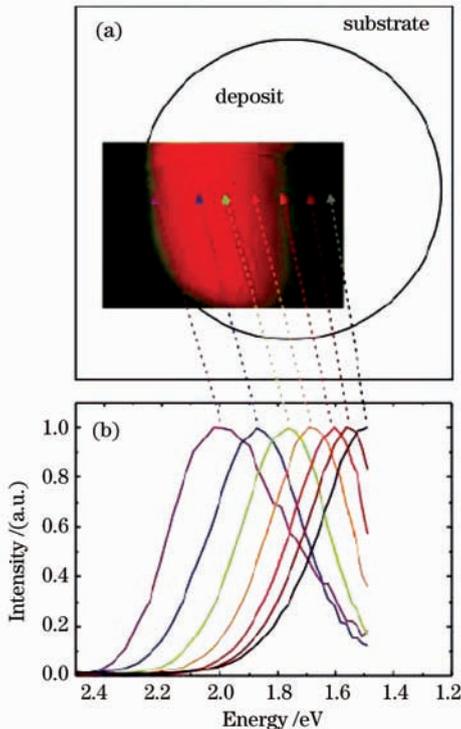


图2 从衬底右侧到左侧硅纳米晶体的平均直径逐渐减少,相应的发光光谱随之蓝移

Fig. 2 From right hand-side of the substrate to the left the average size of the silicon nanocrystals decreases, and accordingly the peak of PL band shifts towards the blue

另一侧,硅纳米晶的平均直径逐渐减少,而对应的发光光谱随之蓝移(如图2所示),实验中获得的发光峰值与硅纳米晶体平均直径的关系与理论计算获得的结果相符,有力地证明了量子限制模型的正确性。

在量子限制模型被广泛应用于解释硅纳米晶体发光的同时,硅纳米晶体的表面性质也被认为对发光具有重要的影响。M. V. Wolkin等<sup>[12]</sup>的工作表明氧化处理后发光峰会红移,并且证明在硅纳米晶体直径小于3 nm的情况下表面钝化的影响变大, $\text{Si}=\text{O}$ 键是可能的载流子捕获中心,在考虑 $\text{Si}=\text{O}$ 键作用后,理论计算获得的纳米晶体平均直径与发光峰值的关系取得与实验数据一致的结果,可以视为在晶体直径小于3 nm的情况下对量子限制模型的修正。而G. G. Qin等<sup>[25]</sup>则认为在硅纳米晶体中量子限制和量子限制-发光中心是两个相互竞争的发光过程。对于确定的发光中心类型,可以定义一个纳米颗粒的临界尺寸,与Wolkin等的结论相反的是,当硅纳米晶体的尺寸大于临界尺寸时QCLC过程将主导发光,反之则由量子限制效应主导发光。以上两个研究组得出的结论虽然相悖,但可以表明在研究硅纳米晶体发光机制的问题上,表面性质是一个应当考虑的因素。此外,J. B. Xia等<sup>[26]</sup>的理论工作则给出了一个可以统合量子限制模型和表面局域态模型的结果,为硅纳米晶体发光机制的研究提供了一个可能的研究方向。

除了对硅纳米晶体发光机制和发光性质的研究之外,在硅纳米晶体上采用VSL(即variable stripe length)<sup>[27]</sup>和Pump-Probe方法还观察到光学增益<sup>[28]</sup>,为实现基于硅纳米晶体的激光光源提供了可能。L. Pavesi的小组<sup>[27]</sup>采用VSL方法测得放大自

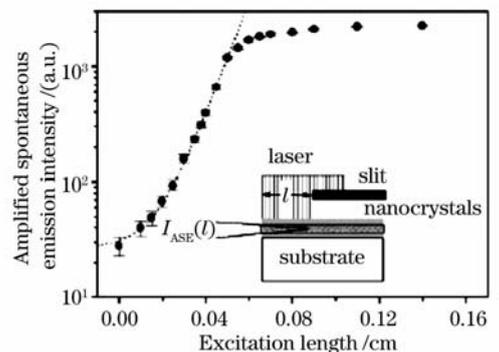


图3 通过VSL方法获得的激励长度与放大自发辐射的关系,插图为VSL方法的装置示意图

Fig. 3 ASE intensity versus the excitation length of Si nanocrystals embedded in a quartz matrix obtained by VSL. The inset shows the VSL method

发辐射(ASE)光强随激励长度的增加而超线性地增长如图3所示。通过改变狭缝的位置而改变激励长度, ASE光强也随之改变, 在研究中 L. Pavesi 等<sup>[27]</sup>提出了一个三能级模型用于解释光学增益的现象。此外, L. Pavesi 小组采用一束波长为 390 nm 的激光作为抽运光激励样品, 波长为 800 nm 的微弱信号光穿过样品有源层后被清晰地放大, 首次在硅基结构上获得单程光学增益<sup>[27]</sup>。另一方面, R. G. Elliman 等<sup>[29]</sup>采用相同的 Pump-Probe 方法验证光学增益的时候却得到信号光被吸收而不是放大的结果, 并认为光激发载流子吸收可能是光吸收的原因。以上研究表明光学增益的结果具有争议性, 仍然需要进一步的研究和确认。

在以上硅纳米晶体发光性质研究成果的基础上, 基于硅纳米晶的发光器件的研究也得到人们的关注并取得了一定的成果。如 F. Iacona 等<sup>[30]</sup>制备出以硅纳米晶体为有源层的光学微腔结构, 在室温下其荧光光谱的半峰全宽最小可达 1.5 nm; G. Franzò 等<sup>[31]</sup>制备出含有硅纳米晶体的金属氧化物半导体(MOS)结构发光器件, 并指出增加 SiO<sub>x</sub> 层硅的含量能够降低 MOS 器件的工作电压, 提高发光效率; R. J. Walters 等<sup>[32]</sup>的基于硅纳米晶体的场效应发光器件(FELEDs); 有关纳米晶硅 MOSLED 中界面纳米微金字塔硅产生的增强电致发光研究<sup>[33]</sup>; 有关硅基微共振器的研究也逐渐成为热点<sup>[34]</sup>, 刘英明等<sup>[35]</sup>提出了基于斐索(Fizeau)干涉仪、可用于硅微共振器的光激发与探测方案, R. J.

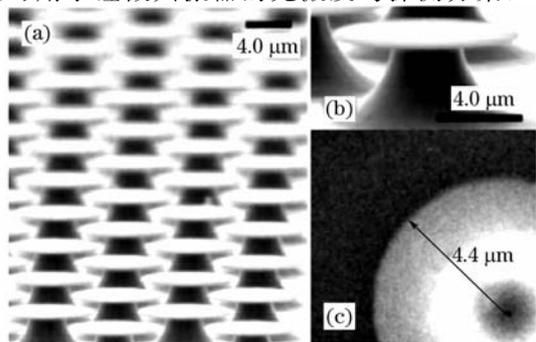


图4 (a)微盘阵列的SEM图像;(b)单个微盘侧视图,由硅衬底与支柱以及含有硅纳米晶体/二氧化硅超晶格(Si-NCs/SiO<sub>2</sub> SL)的二氧化硅薄层组成;(c)单个微盘的俯视图

Fig. 4 (a) SEM images of the microdisk array; (b) Side view of a single microdisk resonator consisting of the thin silica layer with the embedded Si-NCs/SiO<sub>2</sub> SL upon a Si post and the Si substrate; (c)

Top view of single microdisk

Zhang 等<sup>[36]</sup>研制出富含硅纳米晶体的微盘共振器阵列(如图4所示), 并观测到硅纳米晶体在微盘中的回廊耳语模式光发射。这些结果表明, 硅纳米晶体将有希望用于实现硅发光光源, 而且具有小尺寸和高密度的有序分布的硅纳米晶量子点是最有希望的有源区材料。因而, 这也是硅发光研究领域最有潜力、最重要的一个研究方向。

## 5 掺 Er<sup>3+</sup> 硅纳米晶

Er<sup>3+</sup> 离子从 I<sub>13/2</sub> 能级到 I<sub>15/2</sub> 能级的辐射跃迁能够发出波长为 1.54 μm 的光, 对光通信具有重要的意义, 掺 Er 光纤放大器(EDFA)作为一种全光的光放大器也得以商业化并得到广泛的应用, 引起光通信技术的重大革命, 因此掺 Er 的硅发光光源也得到重视和研究。限制掺 Er 晶体硅在室温下发光效率的可能因素是能量的反向传递(energy backtransfer)<sup>[37]</sup>, Er<sup>3+</sup> 离子的 I<sub>13/2</sub> 能级与晶体硅带隙中 Er 的共振能级耦合, 能量通过这一途径从 Er<sup>3+</sup> 离子传输回晶体硅, 此过程与 Er<sup>3+</sup> 离子的被激发过程相反, 并且在温度高于 130 K 的环境下成为导致发光淬灭的主要原因。减少能量反向传输提高室温下发光效率的途径是增大晶体硅的带隙, 从而使 Er<sup>3+</sup> 离子激发能级与晶体硅中的杂质能级退耦合, 硅纳米晶体因此成为 Er<sup>3+</sup> 离子理想的宿主材料, 常用的是散布在 SiO<sub>2</sub> 中的硅纳米晶体。当含有硅纳米晶体的 SiO<sub>2</sub> 薄膜掺 Er 后, 硅纳米晶被激发后的能量就传输到 Er<sup>3+</sup> 离子上, 继而发出 1.54 μm 的光, 随着 Er 的掺杂浓度增加, 属于硅纳米晶的发光峰渐渐减弱, 同时 Er<sup>3+</sup> 离子的 1.54 μm 特征峰逐渐增强, 有力地证明了硅纳米晶体与 Er<sup>3+</sup> 离子的能量传递(如图5所示)<sup>[38]</sup>。G. Franzò 等<sup>[39]</sup>分别在晶体硅, SiO<sub>2</sub> 和硅纳米晶体中掺入 Er, 通过比较三者的发光谱证实掺 Er 的硅纳米晶体具有最高的发光效率。

对于掺 Er<sup>3+</sup> 硅纳米晶的发光现象, G. Franzò 等<sup>[39]</sup>提出 Er<sup>3+</sup> 离子不同能级与硅纳米晶之间的能量传输机制。为研究 Er<sup>3+</sup> 离子与硅纳米晶之间的能量转移过程, M. Falconieri 等<sup>[40,41]</sup>采用先后两个光脉冲激发掺 Er<sup>3+</sup> 硅纳米晶, 并测量发光幅值随先后两个脉冲之间不同时间间隔的变化关系, 定义信号函数

$$S(t) = \frac{I_{\text{both}}(t) - I_1}{I_2}$$

式中 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub> 与 I<sub>both</sub>(t) 分别是采用单个脉冲激发和采用时间间隔为 t 的双脉冲激发所获得的发光幅

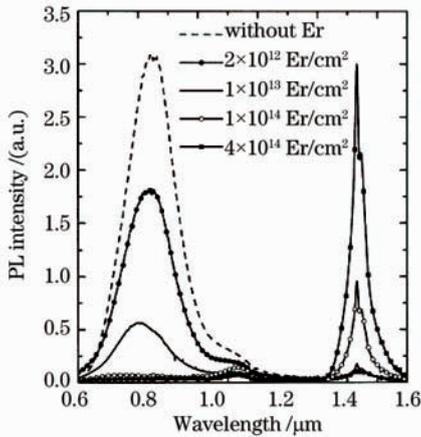


图 5 与硅纳米晶体有关的发光峰(约  $0.85 \mu\text{m}$ )和  $\text{Er}^{3+}$  离子特征发光峰( $1.54 \mu\text{m}$ )的发光强度随 Er 掺杂浓度不同的演变,证实了硅纳米晶与  $\text{Er}^{3+}$  离子之间的能量传递

Fig. 5 Room temperature PL spectra of Er-implanted Si nanocrystals at different Er doses. The evolution of PL intensity confirms the energy transfer between  $\text{Er}^{3+}$  and Si nanocrystals

值。若第二脉冲对发光不产生影响,信号函数值为 0,若第二脉冲产生独立于第一脉冲的激发作用,则此时信号函数值为 1。图 6<sup>[40]</sup>为分别采用 PECVD 与共溅射制备的掺  $\text{Er}^{3+}$  硅纳米晶信号函数随延迟时间的变化曲线。从图中可以看出,较大的  $\text{Er}^{3+}$  离子含量和尺度较大的硅纳米晶(PECVD 制备)对应着约为几百纳秒的快速能量传递过程,而尺度较小的硅纳米晶(共溅射)则对应着较缓慢的、约为毫秒量级的能量传递过程。有关  $\text{Er}^{3+}$  离子与硅纳米晶之间能量传递的动力学过程仍需要进一步的研究。实验表明硅纳米晶之间能量传递的激发截面与硅纳

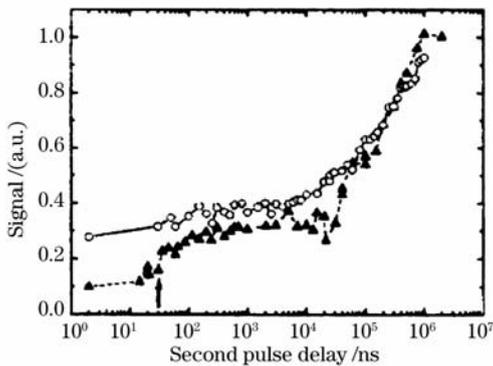


图 6 采用 PECVD(○)与共溅射(▲)制备的掺 Er 硅纳米晶,其信号函数与脉冲延迟时间的变化曲线

Fig. 6 Experimental double-pulse signal measured on the Er-implanted PECVD sample (triangles) and on the co-sputtered sample (dots)

米晶与  $\text{Er}^{3+}$  离子之间的激发截面几乎一致<sup>[42]</sup>,可见硅纳米晶与  $\text{Er}^{3+}$  离子之间能量的传递具有非常高的效率。目前在掺 Er 硅纳米晶/簇结构上已证实可以获得光学增益<sup>[43]</sup>,掺 Er 硅纳米簇的 MOS 结构发光器件<sup>[44]</sup>,具有窄线宽的光学微腔结构<sup>[30]</sup>,以及低阈值的环形微激光器(toroidal microlaser)均得到实验验证<sup>[45]</sup>,掺 Er 硅纳米晶作为实现具有光通信意义的硅基发光器件具有巨大的潜力。

## 6 硅拉曼激光器

近年来,平面硅波导结构中的受激拉曼散射被证实为可以实现光学增益的机制。2005 年 Intel 公司的 H. Rong 小组<sup>[46]</sup>制造出连续工作的硅拉曼激光器,通过在波导上掺杂形成 p-i-n 结并加以反向偏置电压,双光子吸收产生的载流子被电场从硅波导中移除,从而有效地降低载流子吸收带来的损耗<sup>[47]</sup>,实现光学增益。2007 年, H. Rong 小组<sup>[48]</sup>采用环形谐振腔代替原来的 S 形弯曲波导,获得了阈值更低的、连续工作的硅拉曼激光器。在偏置电压为 25 V 的条件下,激光器的抽运功率阈值为 20 mW,可获得的最大输出功率为 50 mW(如图 7<sup>[48]</sup>),并且谱线宽度小于 100 kHz,边模压制大于 80 dB,具有很高的谱线纯度(如图 8<sup>[48]</sup>)。加反向偏置电压的 p-i-n 结有效地移除了光生载流子,在 25 V 的偏置电压下测得载流子寿命为 0.32 ns,是首次获得小于 1ns 的载流子寿命。从图 7 可以看出,在不加偏置电压的情况下,硅拉曼激光器仍然可以连续工作,其阈值为 26 mW,输出功率的饱和值约为 10 mW。这是首次在不加偏置电压的条件下获得可连续工作

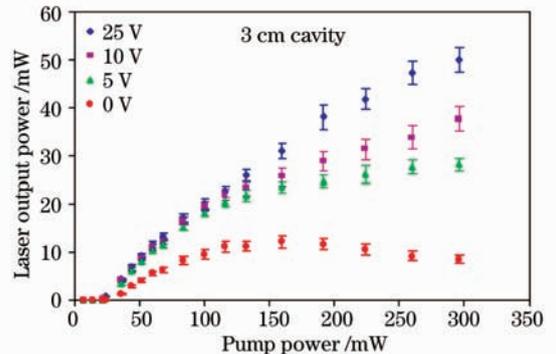


图 7 不同偏置电压下抽运功率与激光输出功率之间的关系。当偏置电压为 0 时,激光器仍然能连续工作

Fig. 7 Laser output power against coupled input pump power at different reverse biases. The silicon Raman laser can still be operated in continuous-wavemode when the bias voltage is 0

的硅拉曼激光器,意味着此时硅拉曼激光器不需要外部电力的供应,而是独立的全光激光器,是硅基激光器研究的一个里程碑。所以说,低阈值、高输出功率的全光硅拉曼激光器,将会是实现高质量硅光源的一个非常有潜力的方案。

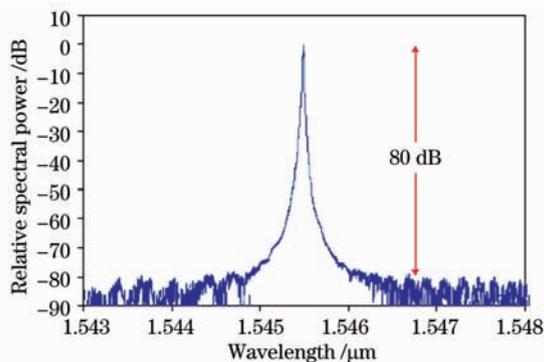


图 8 硅拉曼激光器输出的光谱谱线,

图中显示其边模压制大于 80dB

Fig. 8 Raman silicon laser spectrum, showing single-mode lasing with side-mode suppression over 80 dB

## 7 硅纳米晶体的物理特性研究

除了对硅纳米晶体的发光特性开展研究外,硅纳米晶体的物理特性研究,包括它的电学特性、光学特性等,对其在光子器件中的应用有着重要的意义,这方面已有很多研究结果<sup>[1, 49, 50]</sup>。我们在这一方面也开展了一些工作,比如采用椭圆偏振光谱技术研究了富含硅纳米晶体复合薄膜的复介电函数谱<sup>[51]</sup>,图 9 为研究得到的平均尺寸分别约为 3 nm 和 5 nm 的硅纳米晶体在可见光区的复介电函数虚部图。可以看到硅纳米晶体与体材料晶体硅的复介

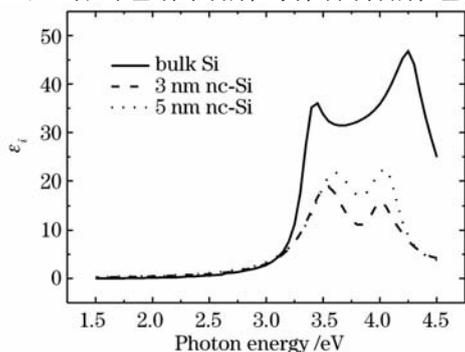


图 9 平均尺寸分别为 3 nm 和 5 nm 的硅纳米晶体复介电函数虚部

Fig. 9 Imaginary( $\epsilon_i$ ) part of dielectric functions of silicon nanocrystals(nc-Si) with average size of 3nm and 5nm. The imaginary part of dielectric functions of bulk crystalline silicon is included for comparison

电函数虚部具有相似的谱线形状,但其具体数值以及峰位都有明显的不同,而且显然与硅纳米晶体的尺寸也有关,正在做进一步深入研究。

## 8 结 论

近 20 年来,人们尝试采用多种不同的途径以获得高质量的硅基光源,对各种不同的发光机制及其性质,以及相应的发光器件均进行了深入的研究,可以说硅发光研究在材料和器件等方面已经取得了许多可喜进展。我国科研工作者虽受到各种条件的限制,仍在相关的领域中做出了非常出色的工作,获得许多国际前沿的成果。尽管当前的研究成果与实际应用硅基光源,特别是硅激光器,尚有一定距离,很多问题仍需要深入的研究,但相信随着硅材料发光效率的提高,器件研制技术的提高和相关光电子集成技术的进步,硅发光研究不久将出现重大突破性成果,并有可能引起新的信息技术革命。

## 参 考 文 献

- 1 S. Ossicini, L. Pavesi, F. Priolo. Light Emitting Silicon for Microphotonics[M]. Heidelberg: Springer Press, 2003
- 2 P. Ball. Let there be light[J]. *Nature*, 2001, **409**:974 ~ 976
- 3 Xia Jianbai. Silicon luminescence research [J]. *Chinese J. Semiconductor*, 1998, **19**(5):321~326  
夏建白. 硅发光研究[J]. *半导体学报*, 1998, **19**(5):321 ~ 326
- 4 L. Pavesi. Routes toward silicon-based lasers[J]. *Mat. Today*, 2005, **8**:18 ~ 25
- 5 L. T. Canham. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **57**:1046 ~ 1048
- 6 A. G. Cullis, L. T. Canham, P. D. J. Calcott. The structural and luminescence properties of porous silicon[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(3): 909 ~ 965
- 7 A. G. Cullis, L. T. Canham. Visible light emission due to quantum size effects in highly porous crystalline silicon[J]. *Nature*, 1991, **353**: 335 ~ 338
- 8 G. G. Qin, Y. Q. Jia. Mechanism of the visible luminescence in porous silicon[J]. *Solid State Commun.*, 1993, **86**:559 ~ 563
- 9 X. Wang, G. Shi, F. L. Zhang *et al.*. Critical conditions for achieving blue light emission from porous silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**: 2363 ~ 2365
- 10 X. Wang, D. M. Huang, L. Ye *et al.*. Pinning of photoluminescence peak positions for light-emitting porous silicon: an evidence of quantum size effect[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**:1265 ~ 1267
- 11 G. Qin, G. G. Qin. Theory on the quantum confinement-luminescence center model for nanocrystalline and porous Si[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(5):2572 ~ 2579
- 12 M. V. Wolkin, J. Jorne, P. M. Fauchet *et al.*. Electronic states and luminescence in porous silicon quantum dots: The role of oxygen[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(1):197 ~ 200
- 13 T. Shimizu-Iwayama, K. Fujita, S. Nakao *et al.*. Visible photoluminescence in Si<sup>+</sup>-implanted silica glass[J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(12):7779 ~ 7783

- 14 S. Charvet, R. Madelon, F. Gourbilleau *et al.*. Ellipsometric spectroscopy study of photoluminescent Si/SiO<sub>2</sub> systems obtained by magnetron co-sputtering [J]. *J. Luminescence*, 1999, **80**:257 ~ 261
- 15 V. Vinciguerra, G. Franzò, F. Priolo *et al.*. Quantum confinement and recombination dynamics in silicon nanocrystals embedded in Si/SiO<sub>2</sub> superlattices[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **87**(11):8165 ~ 8173
- 16 Fu Guangsheng, Chu Lizhi, Zhou Yang *et al.*. Influence of pulse repetition rate on morphology of nanocrystalline silicon film prepared by pulsed laser deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1254~1257  
傅广生, 褚立志, 周阳等. 激光脉冲频率对纳米 Si 晶薄膜形貌的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1254~1257
- 17 Z. H. Lu, D. J. Lockwood, J. M. Baribeau. Quantum confinement and light emission in SiO<sub>2</sub>/Si superlattices [J]. *Nature*, 1995, **378**:258 ~ 260
- 18 T. Orii, M. Hirasawa, T. Seto. Tunable narrow-band light emission from size-selected Si nanoparticles produced by pulsed-laser ablation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(16):3395 ~ 3397
- 19 M. Zacharias, J. Heitmann, R. Scholz *et al.*. Size-controlled highly luminescent silicon nanocrystals: A SiO/SiO<sub>2</sub> superlattice approach[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**:661 ~ 663
- 20 J. Heitmann, F. Mueller, M. Zacharias *et al.*. Silicon nanocrystals: size matters[J]. *Adv. Mat.*, 2005, **17**(7):795 ~ 803
- 21 C. Delerue, G. Allan, M. Lannoo. Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon[J]. *Phys. Rev. B*, 1993, **48**:11024 ~ 11036
- 22 D. Kovalev, H. Heckler, M. Ben-Chorin *et al.*. Breakdown of the k-conservation rule in Si nanocrystals[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(13):2803 ~ 2806
- 23 J. Heitmann, F. Müller, L. Yi *et al.*. Excitons in Si nanocrystals: Confinement and migration effects [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, **69**:195309
- 24 G. Ledoux, J. Gong, F. Huisken *et al.*. Photoluminescence of size-separated silicon nanocrystals: Confirmation of quantum confinement[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80**:4834 ~ 4836
- 25 G. G. Qin, Y. J. Li. Photoluminescence mechanism model for oxidized porous silicon and nanoscale-silicon-particle-embedded silicon oxide[J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **68**:085309
- 26 J. B. Xia, K. W. Cheah. Effects of surface-bond saturation on the luminescence of silicon nanocrystals[J]. *Phys. Rev. B*, 1999, **59**:14876 ~ 14879
- 27 L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni *et al.*. Optical gain in silicon nanocrystals[J]. *Nature*, 2000, **408**:440 ~ 444
- 28 L. Dal Negro, M. Cazzanelli, B. Danese *et al.*. Light amplification in silicon nanocrystals by pump and probe transmission measurements [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(10):5747 ~ 5755
- 29 R. G. Elliman, M. J. Lederer, N. Smith *et al.*. The fabrication and properties of silicon-nanocrystal-based devices and structures produced by ion implantation the search for gain [J]. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*, 2003, **206**:427 ~ 431
- 30 F. Iacona, G. Franzò, E. C. Moreira *et al.*. Silicon nanocrystals and Er<sup>3+</sup> ions in an optical microcavity[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(12):8354 ~ 8356
- 31 G. Franzò, A. Irrera, E. C. Moreira *et al.*. Electroluminescence of silicon nanocrystals in MOS structures[J]. *Appl. Phys. A*, 2002, **74**(1):1 ~ 5
- 32 R. J. Walters, G. I. Bourianoff, H. A. Atwater. Field-effect electroluminescence in silicon nanocrystals[J]. *Nature. Mat.*, 2005, **4**:143 ~ 146
- 33 Gongru Lin. Enhanced electroluminescence from nanocrystallite Si based MOSLED by interfacial Si nanopramids[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11):671~673
- 34 Wei Wei, Xiaowei Wu, Shaojun Fu *et al.*. Fabrication of SiO<sub>2</sub> microdisk optical resonator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(12):703~705
- 35 Yingming Liu, Xiangzhao Wang, Xuefeng Wang. Study on silicon micro-resonators by using a novel optical excitation and detection apparatus[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5):309 ~ 310
- 36 R. J. Zhang, S. Y. Seo, A. P. Milenin *et al.*. Visible range whispering-gallery mode in microdisk array based on size-controlled Si nanocrystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**:153120
- 37 F. Priolo, G. Franzò, S. Coffa, *et al.*. Excitation and nonradiative deexcitation processes of Er<sup>3+</sup> in crystalline Si[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **57**(8):4443 ~ 4445
- 38 F. Priolo, G. Franzò, F. Iacona *et al.*. Excitation and non-radiative de-excitation processes in Er-doped Si nanocrystals[J]. *Mat. Sci. and Eng. B*, 2001, **81**:9 ~ 15
- 39 G. Franzò, D. Pacifici, V. Vinciguerra *et al.*. Er<sup>3+</sup> ions - Si nanocrystals interactions and their effects on the luminescence properties[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(16):2167 ~ 2169
- 40 M. Falconieri, E. Borsella, L. De Dominicis *et al.*. Probe of the Si nanoclusters to Er<sup>3+</sup> energy transfer dynamics by double-pulse excitation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**:061109
- 41 E. Borsella, M. Falconieri, F. Gourbilleau *et al.*. On the photoluminescence from Si nanocrystals in Er-doped silica by a double-pulse technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**:041120
- 42 F. Priolo, G. Franzò, D. Pacifici *et al.*. Role of the energy transfer in the optical properties of undoped and Er-doped interacting Si nanocrystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(1):264 ~ 272
- 43 H. S. Han, S. Y. Seo, J. H. Shin. Coefficient determination related to optical gain in erbium-doped silicon-rich silicon oxide waveguide amplifier[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(20):3720 ~ 3722
- 44 F. Iacona, D. Pacifici, A. Irrera *et al.*. Electroluminescence at 1.54 μm in Er-doped Si nanocluster-based devices[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(17):3242 ~ 3244
- 45 A. Polman, B. Min, J. Kalkman *et al.*. Ultralow-threshold erbium-implanted toroidal microlaser on silicon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(7):1037 ~ 1039
- 46 H. Rong, A. Liu, R. Jones *et al.*. An all-silicon Raman laser [J]. *Nature*, 2005, **433**:292 ~ 294
- 47 T. K. Lianga, H. K. Tsang. Role of free carriers from two-photon absorption in Raman amplification in silicon-on-insulator waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(15):2745 ~ 2747
- 48 H. Rong, S. Xu, Y. H. Kuo *et al.*. Low-threshold continuous-wave Raman silicon laser [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**:232 ~ 237
- 49 L. Ding, T. P. Chen, Y. Liu *et al.*. Optical properties of silicon nanocrystals embedded in a SiO<sub>2</sub> matrix[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **72**:125419
- 50 H. -Ch. Weissker, J. Furthmüller, F. Bechstedt. Optical properties of Ge and Si nanocrystals from ab initio calculations. I. Embedded nanocrystallites [J]. *Phys. Rev. B*, 2002, **65**:155327
- 51 S. Z. Feng, R. J. Zhang, Y. X. Zheng *et al.*. Spectroscopic ellipsometric study of size-controlled silicon nano-crystal in SiO<sub>2</sub> composite film[J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2007, **51**(4):1593 ~ 1597