

## Si基Ge异质结构发光器件的研究进展

刘智,李传波,薛春来,成步文\*

(中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室,北京100083)

**摘要:**近年来,与Si的CMOS工艺相兼容的Ge/Si异质结构发光器件取得很多重要的进展。本文概述了Si基Ge异质结构发光器件的最新成果,如Ge/Si量子点发光二极管、Si衬底上的Ge发光二极管及激光器和Ge/SiGe多量子阱发光二极管,分别描述了这些器件的特点和增强其发光特性的途径。最后展望了Si基Ge异质结构发光器件的发展趋势,指出尽管Si基Ge异质结构发光器件获得了很大的发展,但是器件的发光效率仍然很低,离实用还有一定距离,还需要在材料和器件的结构方面有更多的创新。

**关键词:**发光器件;发光二极管;Ge;Ge/Si量子点;Ge/SiGe量子阱

**中图分类号:**TN312.8; TN304.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130604.0449

## Progress in Ge/Si heterostructures for light emitters

LIU Zhi, LI Chuan-bo, XUE Chun-lai, CHENG Bu-wen\*

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

\* Corresponding author, E-mail: cbw@red.semi.ac.cn

**Abstract:** Due to the compatibility of Si-based light emitters with Si CMOS processes, Ge/Si heterostructures based light emitters have developed significantly. This paper reviews the most recent progress of this field, including Ge/Si Quantum Dot (QD) Light Emitting Diode (LED), Ge light emitting diode on Si, Ge laser on Si, and Ge/SiGe Multiple Quantum Well (MQW) light emitting diode. It describes the characteristics of these light emitting devices and how to enhance their luminescent properties. Finally, it discusses the challenges and opportunities associated with these approaches and suggests that much innovation should be promoted in material and device structures.

**Key words:** light emitter; light emitting diode; Ge; Ge/Si quantum dot; Ge/SiGe multiple quantum well

收稿日期:2013-04-14;修订日期:2013-06-17

基金项目:国家重大基础研究计划(973计划)资助项目(No. 2013CB632103);国家自然科学基金资助项目(No. 61036003, No. 61176013, No. 61177038)

## 1 引言

Si 是半导体微电子工业中最重要的基础材料。自从 20 世纪 70 年代开始,微电子集成电路的集成密度一直遵循着著名的摩尔定律飞速发展;但随着集成电路特征尺寸的进一步减小, Si 集成电路即将到达物理极限。高集成密度带来的量子效应和高发热问题,以及电互连的损耗和时延问题都限制着集成电路的进一步发展,而使用兼容 CMOS 技术的 Si 基光互连,用光子作为信息载体,是解决这些问题最有潜力的方式之一<sup>[1-2]</sup>。Si 基光互连电路中最重要基础器件有 Si 基光源、波导、调制器和探测器,其中除了 Si 基光源外,其他的器件都有了有效的解决方案,这使得高效的 Si 基光源成为 Si 基光互连中最具挑战的目标<sup>[3]</sup>。

Si 是间接带隙半导体材料,它的光辐射复合需要声子参与,是一个多粒子过程,发光效率非常低。在体 Si 中,非辐射的粒子复合几率远远高于辐射复合,绝大多数的受激电子-空穴对的复合都为非辐射复合,这都限制了 Si 的发光。近几十年, Si 基光源有了许多进展。2001 年, Green 等人利用在太阳能电池研究上的丰富经验,制备了外量子效率为 1% 的室温 Si 发光二极管<sup>[4]</sup>;虽然该 Si 发光二极管外量子效率高,然而工艺复杂,不能与现有的 CMOS 工艺兼容。同年 Ng 等人报道了采用位错环局域化体 Si 中的电子和空穴,从而实现室温电注入发光<sup>[5]</sup>;这种方法实现的器件的重复性和稳定性还不能保证,需要高温退火工艺。2005 年, Intel 公司的 Rong 等人报道的 Si 拉曼激光器实现了光泵浦的 Si 激光器<sup>[6-7]</sup>,但是拉曼激光器只能工作在光泵浦的条件下,极大地限制了 Si 拉曼激光器的应用。另外,在 Si 衬底上键合或在 Ge 衬底上外延的 III-V 族激光器也得到了深入的研究<sup>[8-9]</sup>;但是 III-V 族的工艺无法与 Si 的 CMOS 工艺兼容,这也限制了该激光器在 Si 基光互连领域的应用。因此,更需要一种与现有 Si 工艺兼容的电泵浦运作的 Si 基激光器。

同为 IV 族元素的 Ge,完全兼容现有的 Si 工

艺。并且,相比于 Si, Ge 在光电特性方面具有很多的优势。Ge 具有比 Si 更高的电子和空穴迁移率: Ge 电子和空穴的迁移率分别为 3 900 和 1 900  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而 Si 的电子和空穴迁移率分别为 1 417 和 471  $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Ge 与 Si 之间 4.2% 的晶格失配使得人们在 Si 上可以更简单地获得自组装的 Ge 低维纳米结构——Ge 量子点,而低维纳米结构正是提高间接带隙材料发光的一种极为重要的途径<sup>[10]</sup>。另外,尽管 Ge 也是间接带隙的半导体材料,但其直接带隙只比间接带隙大 140 meV ( $E_L = 0.66 \text{ eV}$ )。电子在 Ge 的  $\Gamma$  能谷仍然具有一定的占据几率,并且占据  $\Gamma$  能谷的电子具有极高的光辐射复合几率。通过能带工程,有效提高电子在  $\Gamma$  能谷的占据几率,这使得高效的 Si 基 Ge 直接带隙发光器件成为可能。

本文概述了应用于 Si 基光互连的 Ge/Si 异质结构发光器件的进展,如 Ge/Si 量子点发光二极管、Si 基 Ge 发光二极管及激光器和 Ge/SiGe 量子阱发光二极管。

## 2 Ge/Si 量子点发光二极管

在低维 Ge/Si 量子结构中,由于载流子被高度局域,其动量被拓展分布,易于达到跃迁中动量守恒的要求,从而可以大大提高间接带隙材料的发光特性。近 20 年来, Ge/Si 量子点的发光特性得到了深入的研究,证实了 Ge/Si 量子点的 II 型能带结构<sup>[11]</sup>,即在 Ge/Si 量子点材料中, Ge 量子点只对空穴有很好的限制,而对电子的限制很弱。从 2000 年开始,就有研究人员陆续报道了 Ge/Si 量子点的电致发光<sup>[12-14]</sup>,但 Ge/Si 发光依然很弱,发光谱很宽,很多发光甚至只能在低温时才能被观察到。增强 Ge/Si 量子点的发光,可以从器件结构和材料外延两方面着手。在器件结构方面,基于微腔和光子晶体的 Ge/Si 量子点发光二极管有过报道<sup>[15-16]</sup>,由于微腔和光子晶体对光场的增强和选模作用,在室温下观察到了 Ge/Si 量子点发光二极管较尖锐的发光峰。在材料外延方面, Ge/Si 大部分的研究都集中在减小 Ge 量子点的尺寸、增大 Ge 量子点的面密度、量子点位置和大

小控制方面,以改善其发光特性。小尺寸的量子点具有更好的量子限制效应,可以减弱间接带隙材料辐射复合的选择定则<sup>[17]</sup>。Ge量子点尺寸的不均匀造成了Ge量子点发光峰位的展宽,但使用图形衬底、表面杂质诱导成核等方式可以有效提高Ge量子点尺寸的均匀性<sup>[18-19]</sup>。变温生长方式是一种新的Ge/Si量子点的外延方式,即不改变Ge量子点的外延温度,仅适当提高Si覆盖层的外延温度的外延过程,一般变化温度范围在60℃左右,温度过高则会加强Si和Ge之间的互混。通过变温过程中Ge量子点的Ostwald熟化过程来控制Ge量子点的大小。变温过程又类似于原位退火,可以有效地提高Ge/Si量子点的晶体质量,避免后期高温退火来带的Si-Ge互混,从而提高Ge/Si量子点的发光特性,以及红外吸收特性<sup>[20-21]</sup>。Ge/Si量子点的N型原位掺杂则是另一种提高Ge/Si量子点发光特性的方法<sup>[22]</sup>。在Ge量子点外延生长的同时,通入适量氢气稀释的磷烷,使得Ge量子点及其附近成为N型区域。N

型掺杂可以为Ge量子点提供额外的电子,有效提高Ge量子点的光致发光和电致发光特性。图1和图2分别给出了外延的Ge/Si量子点多层结构的STEM图和发光二极管的器件结构图。Ge/Si量子点多层结构具有很好的晶体质量和Ge量子点纵向耦合。另外由于Ge量子点多层结构一般不能承受高于外延温度的后期退火,所以选用N<sup>+</sup>的Si衬底和原位B掺杂形成的P<sup>+</sup>区。

图3和图4分别给出了N型掺杂引起的Ge/Si量子点室温光致发光和电致发光谱。相比不掺杂的样品,N掺杂的Ge/Si量子点室温光致发光和电致发光都有了显著的提高。即使在

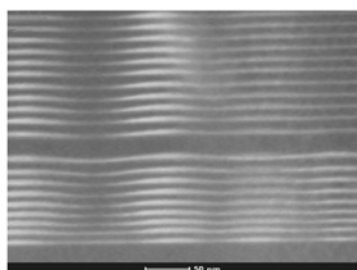


图1 Ge/Si多层量子点结构的STEM图  
Fig. 1 STEM image of multilayer Ge/Si QDs

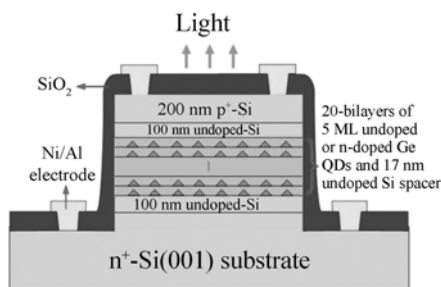


图2 Ge/Si量子点发光二极管器件结构图  
Fig. 2 Cross-sectional view of Ge/Si QD LED

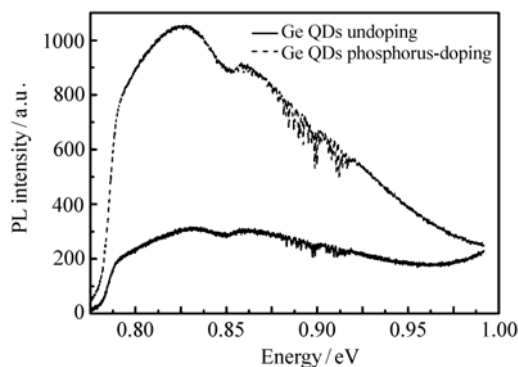


图3 非掺杂和N型掺杂的Ge/Si多层量子点结构的光致发光谱

Fig. 3 Photoluminescence spectra of undoped and phosphorus-doped multilayer Ge/Si QDs

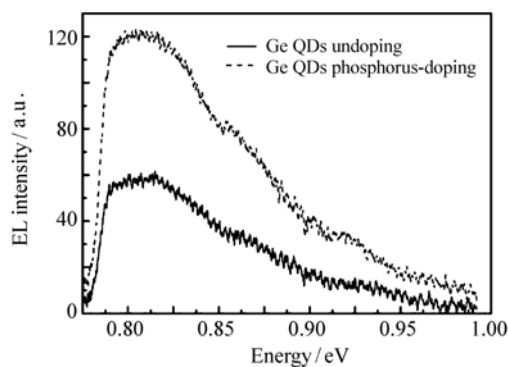


图4 非掺杂和N型掺杂的Ge/Si量子点发光二极管的电致发光谱

Fig. 4 Electroluminescence spectra of undoped and phosphorus-doped Ge/Si QD LEDs

40 A/cm<sup>2</sup>的小注入电流下,也能在室温下观察到 Ge/Si 量子点的电致发光。发光谱较宽,发光峰位在 1 500 nm 左右。

### 3 Si 基 Ge 发光二极管及激光器

随着高质量的 Ge 薄膜可以成功外延在 Si 衬底上<sup>[23]</sup>,Ge 薄膜在 Si 基发光领域获得了前所未有的发展。2007 年,Liu 等人理论计算得出,通过对 Ge 进行 N 型掺杂和引入张应变,可以有效提高 Ge 的发光效率,在 1 550 nm 附近甚至可以获得光增益<sup>[24]</sup>。根据形变势理论,在 Ge 中引入张应变时,Ge 直接带隙比间接带隙缩小得更快,这就进一步缩小了 Ge 直接和间接带的差距,使得电子在  $\Gamma$  能谷的占据几率更大。理论计算表明:在 Ge 中引入 2% 的张应变时,Ge 将转变为直接带隙材料<sup>[25]</sup>。最常见在 Ge 中引入张应变的方法是利用 Si 与 Ge 之间的热失配——在 Si 衬底上高温外延弛豫的 Ge 薄膜,由于 Ge 的热膨胀系数 > Si,降低至室温时,在 Ge 中便引入了张应变。Si 与 Ge 热胀系数差引起的 Ge 张应变一般不超过 0.26%<sup>[25]</sup>。Cheng 等人也在实验中观察到<sup>[26]</sup>了这种张应变增强的 Ge 直接带隙光致发光效应。通过微机械的方法,可以在 Ge 中引入更大的张应变。Lim 等人和 Jain 等人通过微机械方式在 Ge 中引入机械应变,研究了在机械应变的影响下,Ge 光学性能的变化<sup>[27-28]</sup>。研究证实了双轴张应变可以减小 Ge 直接带隙宽度,进一步增强直接带隙光发射几率和光增益:在 2% 的张应变下可以达到 1 077 cm<sup>-1</sup>的光增益。

对 Ge 进行高浓度的 N 型掺杂,增加电子在导带的填充,可以有效地提高电子的费米能级,以提高电子在  $\Gamma$  能谷的占据几率,从而提高直接带隙的光辐射复合几率,降低达到粒子数反转所需要的注入电流。Sun 等人观察到了这种 N 型掺杂引起的  $\Gamma$  能谷的填充效应以增强直接带隙发光的实验现象<sup>[29]</sup>。

2009 年,3 个研究小组同时独立研制出 Ge 发光二极管<sup>[30-33]</sup>。斯坦福大学小组使用 N<sup>+</sup>/P 结构,利用 Si-Ge 之间的热失配,并引入了 0.2% 的张应变。在注入电流 > 160 A/cm<sup>2</sup> 时,器件在

1.6  $\mu\text{m}$ 波段的电致发光迅速增强。而且不同于一般发光器件的温度特性,Ge 的电致发光随着温度的升高而增强,这与 Ge 间接带隙的特性有关。图 5 显示了本研究小组的 Ge 发光二极管的电致发光光谱,所使用的是 PIN 结构,在 1.1 ~ 2.5 V 的正向偏置下,观察到了在 1 565 nm 附近 Ge 的直接带发光,发光峰半宽为 90 meV。MIT 研究小组使用的也是 PIN 结构,他们在 Ge 中引入了 0.2% ~ 0.25% 的张应变,使 Ge 发光二极管的发射波长在 1.6  $\mu\text{m}$  波段。同年,Liu 等人在有 SiO<sub>2</sub> 窗口的 Si 衬底上选择性外延面积为 500  $\mu\text{m}^2$ ,N 型掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  的 Ge 圆台,并引入了 0.24% 的热失配张应变。使用 100 mW 的 1 480 nm 连续激光器泵浦圆台,利用可调谐激光器输出信号光。圆台后的探测器测量不同波长信号光透射过 Ge 圆台后的光强变化,观察到了在 1 600 ~ 1 608 nm 的光增益<sup>[34]</sup>,在 1 605 nm 获得的最大光增益系数为  $56 \pm 25 \text{cm}^{-1}$ 。

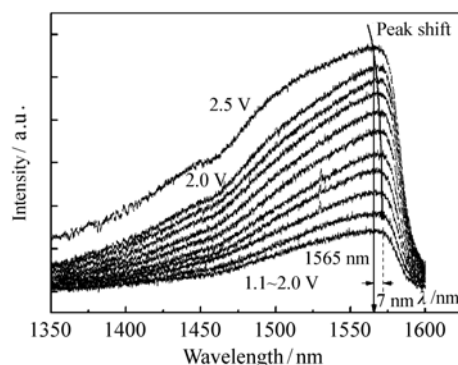


图 5 Ge on Si 发光二极管的电致发光光谱

Fig. 5 Electroluminescence spectra of Ge on Si LED

2010 年,第一个 Si 基 Ge 室温光泵脉冲激光器被成功实现<sup>[35]</sup>。Liu 等人在 Si 上选择性外延生长了 1.6  $\mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m} \times 4.8 \text{mm}$  的 Ge 波导结构,其中掺杂浓度为  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。激光器有源区的 Ge 薄膜受到来自 Ge-Si 热失配带来的 0.24% 张应变。泵浦光为 1 064 nm 的脉冲激光器,脉冲周期为 1.5 ns,对 Ge 有源区的瞬间激发功率密度是 300 kW/cm<sup>2</sup>。在脉冲功率为 1.5  $\mu\text{J}$  的泵浦下,观测到了峰值波长分别在 1 599、1 606 和 1 612 nm 的光致发光,其发光强度具有较明显的

激光阈值。

2012年,MIT研究小组成功实现了Si基Ge脉冲电注入的激光器<sup>[36]</sup>。该小组在Si上选择性外延生长了Ge波导结构,使用delta掺杂和退火的方法将Ge中的N型掺杂浓度提高到了 $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[37]</sup>。然后对Ge波导结构进行了电化学抛光,将Ge波导的厚度减薄抛光至100~300 nm。在波导上沉积了P<sup>+</sup>多晶硅,最后蒸镀了Ti/Al电极。器件泵浦所用的脉冲电源脉冲宽度为20  $\mu\text{s}$ ~100 ms,占空比为4%。器件的温度被温控系统控制在15  $^{\circ}\text{C}$ 。当注入电流密度 $> 280 \text{ kA/cm}^2$ 时,观察到了Ge的电致激射,激发波长在1600 nm附近,随Ge波导厚度的不同而变化。该Ge激光器可获得的最大光功率在1 mW左右。

#### 4 Ge/SiGe 量子阱发光二极管

量子阱结构对载流子有着良好的限制能力,是制作高效光源的常见结构。2005年,Kuo等人在Ge/SiGe量子阱结构中观察到了很强的量子限制Stark效应,并以此设计了Si基的高速电吸收调制器,证实了Ge/SiGe量子阱的I型能带结构对载流子具有很好的限制能力<sup>[38]</sup>。2009年,Chen等人观察到了利用Si基Ge虚衬底,外延了张应变的Ge/SiGe量子阱,并观察到了量子阱的直接带隙室温光致发光<sup>[39]</sup>。2011年,Chaisakul等人对Ge/SiGe波导调制器施加了正向电压,在大注入的情况下( $> 2.3 \text{ kA/cm}^2$ ),观察到了Ge/SiGe量子阱直接带隙的电注入发光<sup>[40]</sup>,发光峰位在0.87 eV,且具有TE偏振。发光强度随着注入电流的增大而增强,发光峰位则随之红移,该红移是由于温度升高引起的带隙缩小。同时观察到了Ge/SiGe量子阱的发光随着温度的升高而增大的现象。2012年,Wu等人研究了Ge/SiGe量子阱在300~440 K时直接带隙和间接带隙的光致发光的变化<sup>[41]</sup>。直接带隙发光强度与间接带隙发光强度之比随着温度的增加而增大。同年,本课题组对Ge/Si量子阱进行N型掺杂,通过掺杂为Ge/SiGe量子阱提供额外的复合电子。Ge/SiGe

量子阱结构也将进一步加大Ge/SiGe量子阱中的电子浓度,从而提高Ge/Si量子阱的发光特性<sup>[42]</sup>。

图6和图7分别给出了结构的STEM图和器件结构示意图。Ge/SiGe量子阱的界面清晰,只

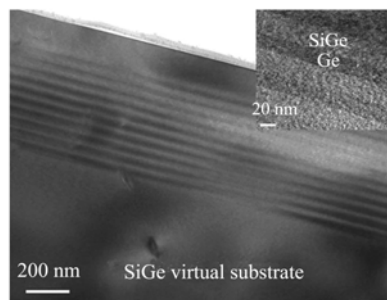


图6 Ge/SiGe多量子阱结构的STEM图

Fig. 6 STEM image of Ge/SiGe MQWs

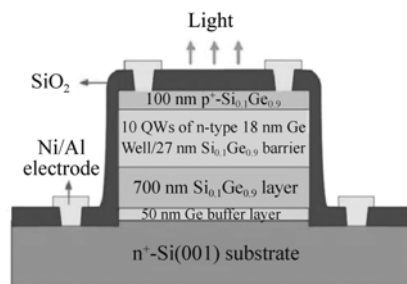


图7 Ge/SiGe多量子阱发光二极管器件结构图

Fig. 7 Cross-sectional view of Ge/SiGe MQW LED

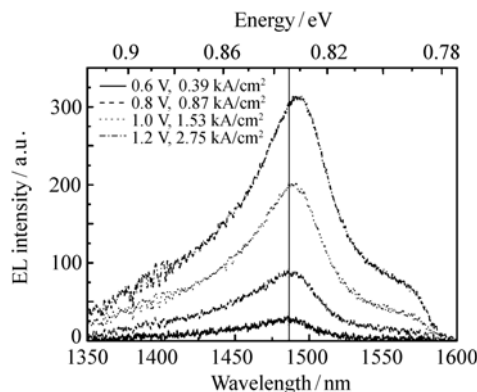


图8 Ge/SiGe多量子阱发光二极管的电致发光谱

Fig. 8 Electroluminescence spectra of Ge/SiGe MQW LED

观察到少量穿透位错,量子阱拥有很好的晶体质量。图8显示了 Ge/SiGe 量子阱的电致发光的光谱图。器件在大于 0.6 V 的正向偏压下,对应注入电流仅为  $390 \text{ A/cm}^2$  时,即观察到了 Ge/SiGe 量子阱狭窄的室温直接带隙发光。发光峰位在 0.835 eV,发光半宽为 28 meV。当注入电流密度变大时,发光强度增大,发光峰位红移。

## 5 结束语

尽管 Si 基 Ge 异质结构发光器件获得了前所

未有的发展,但是器件的发光效率仍然很低,离实用还有一定的距离。Ge/Si 量子点的发光是间接带隙发光,存在载流子俘获和量子限制效应,晶体质量和 Si 与 Ge 互混之间存在一些矛盾关系,需要进一步解决这些问题。对于 Si 基 Ge 和 Ge/SiGe 量子阱发光器件,发光对应的是直接带隙。直接带隙发光效率很高,但是载流子占据几率很小,需要更高的晶体质量。对于张应变和 N 型掺杂的 Ge 薄膜,还需要在材料和器件的结构方面有更多的创新。

### 参考文献:

- [1] PANICCIA M. Integrating silicon photonics[J]. *Nature Photonics*,2010,4:498-499.
- [2] REED G T. Device physics:the optical age of silicon[J]. *Nature*,2004,427(6975):595-596.
- [3] IYER S S,XIE Y H. Light emission from silicon[J]. *Science*,1993,260(5104):40-46.
- [4] GREEN M A,ZHAO J,WANG A,*et al.*. Efficient silicon light-emitting diodes[J]. *Nature*,2001,412:805-808.
- [5] NG W L,LOURENCO M A,GWILLIAM R M,*et al.*. An efficient room-temperature silicon-based light-emitting diode [J]. *Nature*,2001,410:192-195.
- [6] RONG H,JONES R,LIU A,*et al.*. A continuous-wave Raman silicon laser[J]. *Nature*,2005,433:725-728.
- [7] RONG H,LIU A,JONES R,*et al.*. An all-silicon Raman laser[J]. *Nature*,2005,433:292-294.
- [8] JONES R,PARK H D,FANG A W,*et al.*. Hybrid silicon integration[J]. *J. Materials Science: Materials in Electronics*,2009,20(1):3-9.
- [9] LIU H,WANG T,JIANG Q,*et al.*, Long-wavelength InAs/GaAs quantum-dot laser diode monolithically grown on Ge substrate[J]. *Nature Photonics*,2011,5(7):416-419.
- [10] CULLIS A G,CANHAM L T. Visible light emission due to quantum size effects in highly porous crystalline silicon[J]. *Nature*,1991,353(6342):335-338.
- [11] THEWALT M L W,HARRISON D A,REINHART C F,*et al.*. Type II band alignment in  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}(001)$  quantum wells:the ubiquitous type I luminescence results from band bending[J]. *Physical Review Lett.*,1997,79(2):269-272.
- [12] BRUNHES T,BOUCAUD P,SAUVAGE S,*et al.*. Electroluminescence of Ge/Si self-assembled quantum dots grown by chemical vapor deposition[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2000,77(12):1822-1824.
- [13] CHANG W H,CHOU A T,CHEN W Y,*et al.*. Room-temperature electroluminescence at 1.3 and 1.5  $\mu\text{m}$  from Ge/Si self-assembled quantum dots[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2003,83(14):2958-2960.
- [14] STOFFEL M,DENKER U,SCHMIDT O G. Electroluminescence of self-assembled Ge hut clusters[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2003,82(19):3236-3238.
- [15] JINSONG X,TAKEDA Y,USAMI N,*et al.*. Room-temperature electroluminescence from Si microdisks with Ge quantum dots[J]. *Optics Express*,2010,18(13):13945-13950.
- [16] XU X,TSUBOI T,CHIBA T,*et al.*. Silicon-based current-injected light emitting diodes with Ge self-assembled quantum dots embedded in photonic crystal nanocavities[J]. *Optics Express*,2012,20(13):14714-14721.
- [17] SCHMIDT O G,LANGE C,EBERL K. Photoluminescence study of the initial stages of island formation for Ge pyramids/domes and hut clusters on Si(001)[J]. *Appl. Phys. Lett.*,1999,75(13):1905-1907.
- [18] DAS S,DAS K,SINGHA R,*et al.*. Improved infrared photoluminescence characteristics from circularly ordered self-assembled Ge islands[J]. *Nanoscale Research Lett.*,2011,6(1):416.

- [19] SHI W H, LI C B, LUO L P, *et al.*. Growth of Ge quantum dot mediated by boron on Ge wetting layer[J]. *J. Crystal Growth*, 2005, 279(3-4): 329-334.
- [20] LIU Z, CHENG B, HU W, *et al.*. Enhanced photoluminescence of multilayer Ge quantum dots on Si(001) substrates by increased overgrowth temperature[J]. *Nanoscale Research Lett.*, 2012, 7(1): 383.
- [21] YAKIMOV A I, BLOSHKIN A A, TIMOFEEV V A, *et al.*. Effect of overgrowth temperature on the mid-infrared response of Ge/Si(001) quantum dots[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(5): 053507.
- [22] LIU Z, HU W, SU S, *et al.*. Enhanced photoluminescence and electroluminescence of multilayer GeSi islands on Si(001) substrates by phosphorus-doping[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22327-22333.
- [23] LUAN H C, LIM D R, LEE K K, *et al.*. High-quality Ge epilayers on Si with low threading-dislocation densities[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 75(19): 2909-2911.
- [24] LIU J, SUN X, PAN D, *et al.*. Tensile-strained, n-type Ge as a gain medium for monolithic laser integration on Si[J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11272-11277.
- [25] LIU J F, CANNON D D, WADA K, *et al.*. Deformation potential constants of biaxially tensile stressed Ge epitaxial films on Si(100)[J]. *Physical Review B*, 2004, 70(15): 155309.
- [26] CHENG T H, PENG K L, KO C Y, *et al.*. Strain-enhanced photoluminescence from Ge direct transition[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96(21): 429085.
- [27] JAIN J R, HRYCIW A, BAER T M, *et al.*. A micromachining-based technology for enhancing germanium light emission via tensile strain[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(6): 398-405.
- [28] LIM P H, PARK S, ISHIKAWA Y, *et al.*. Enhanced direct bandgap emission in germanium by micromechanical strain engineering[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 16358-16365.
- [29] XIAOCHEN S, JIFENG L, KIMERLING L C, *et al.*. Direct gap photoluminescence of n-type tensile-strained Ge-on-Si[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(1): 011911.
- [30] CHENG S-L, LU J, SHAMBAT G, *et al.*. Room temperature 1.6 microm electroluminescence from Ge light emitting diode on Si substrate[J]. *Optics Express*, 2009, 17(12): 10019-10024.
- [31] HU W, CHENG B, XUE C, *et al.*. Electroluminescence from Ge on Si substrate at room temperature[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(9): 092102.
- [32] SÜESS M J, CARROLL L, SIGG H, *et al.*. Tensile strained Ge quantum wells on Si substrate: Post-growth annealing versus low temperature re-growth[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2012, 177(10): 696-699.
- [33] SUN X C, LIU J F, KIMERLING L C, *et al.*. Room-temperature direct bandgap electroluminescence from Ge-on-Si light-emitting diodes[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1198-1200.
- [34] LIU J F, SUN X C, KIMERLING L C, *et al.*. Direct-gap optical gain of Ge on Si at room temperature[J]. *Optics Lett.*, 2009, 34(11): 1738-1740.
- [35] LIU J, SUN X, CAMACHO-AGUILERA R, *et al.*. Ge-on-Si laser operating at room temperature[J]. *Optics Lett.*, 2010, 35(5): 679-681.
- [36] CAMACHO-AGUILERA R E, CAI Y, PATEL N, *et al.*. An electrically pumped germanium laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11316-11320.
- [37] CAMACHO-AGUILERA R E, CAI Y, BESSETTE J T, *et al.*. High active carrier concentration in n-type, thin film Ge using delta-doping[J]. *Optics Materials Express*, 2012, 2(11): 1462-1469.
- [38] KUO Y-H, LEE Y K, GE Y, *et al.*. Strong quantum-confined Stark effect in germanium quantum-well structures on silicon[J]. *Nature*, 2005, 437(7063): 1334-1336.
- [39] CHEN Y H, LI C, ZHOU Z W, *et al.*. Room temperature photoluminescence of tensile-strained Ge/Si<sub>0.13</sub>Ge<sub>0.87</sub> quantum wells grown on silicon-based germanium virtual substrate[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 94(14): 141902.
- [40] CHAISAKUL P, MARRIS-MORINI D, ISELLA G, *et al.*. Room temperature direct gap electroluminescence from Ge/Si<sub>0.15</sub>Ge<sub>0.85</sub> multiple quantum well waveguide[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(14): 141106.

- [41] WU P H, DUMCENCO D, HUANG Y S, *et al.*. Above-room-temperature photoluminescence from a strain-compensated Ge/Si<sub>0.15</sub>Ge<sub>0.85</sub> multiple-quantum-well structure[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(14):141905.
- [42] LIU Z, HU W, LI C, *et al.*. Room temperature direct-bandgap electroluminescence from n-type strain-compensated Ge/SiGe multiple quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101(23):231108.

作者简介:



刘智(1987—),男,浙江建德人,博士研究生,2005年于太原理工大学获得学士学位,主要从事硅基异质结构材料生长及发光器件的研究工作。E-mail: zhi-liu@semi.ac.cn



薛春来(1979—),男,河南孟州人,博士,副研究员。2002年于吉林大学获得学士学位,2007年于中科院半导体研究所获得博士学位,主要从事硅基异质材料及相关光电子器件等方面的研究。E-mail: clxue@semi.ac.cn



李传波(1976—),男,山东泰安人,博士,研究员,2005年于中科院半导体研究所获得博士学位,2005年4月起,先后在爱尔兰国立科克大学、东京工业大学、日本国家材料研究所、伦敦帝国理工等机构从事硅基纳米材料在光电子器件及清洁能源器件等方面的研究。E-mail: cbli@semi.ac.cn



成步文(1967—),男,湖南娄底人,博士,研究员,博士生导师,1989年、1992年于北京师范大学分别获得学士、硕士学位,2006年于中科院半导体研究所获得博士学位,主要从事硅基光电子学材料和器件的研究工作。E-mail: cbw@red.semi.ac.cn