

doi:10.13756/j.gtxyj.2015.06.001

硅光子与硅基光电子专题

基于锗量子点的硅基发光器件

夏金松¹, 蒋最敏², 曾 成¹, 张 永¹

(1. 华中科技大学, 武汉 430074; 2. 复旦大学, 上海 200433)

摘要:硅基光源是实现硅基集成光电子芯片的核心器件, 虽然近年来国内外已经取得多项重要成果, 但适合于下一代大规模光电集成芯片的小尺寸、低功耗、工艺兼容的高效硅基发光器件仍然缺乏。文章介绍了基于嵌入光学微腔中的锗量子点实现硅基发光器件方面的研究成果, 通过将分子束外延生长的锗自组装量子点嵌入硅光子晶体微腔中, 实现了室温下处于通信波段的共振发光。通过在图形化衬底上生长实现锗量子点的定位, 并精确嵌入光子晶体微腔中, 实现了基于锗单量子点的硅基发光器件。

关键词:硅基发光器件; 锗量子点; 光学微腔

中图分类号: TN256

文献标志码: A

文章编号: 1005-8788(2015)06-0001-05

Si-based light-emitting devices based on Ge quantum dots

Xia Jinsong¹, Jiang Zuimin², Zeng Cheng¹, Zhang Yong¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Si light source is the core device for making Si-based integrated optoelectronic chips. In recent years, multiple major results have been achieved in this respect at home and abroad, but there is still lack of small-size, low power consuming, process compatible and highly efficient Si-based emitters appropriate for the next generation large-scale optoelectronic integrated chips. In this paper, our research results in making Si-based light emitting devices in Ge quantum dots embedded in Si photonic crystal microcavities are introduced. Among others, we realized resonant light emission in the communication waveband at room-temperature by embedding the Ge self-assembled quantum dots grown by the molecular beam epitaxy method in the Si photonic crystal microcavities and the positioning of Ge quantum dots by their growth on the patterned sapphire substrate, and the Si-based light emitters based single Ge quantum dot by precisely embedding them in the photonic crystal microcavities.

Key words: Si-based light-emitting device; Ge quantum dot; optical microcavity

0 引 言

随着信息社会的高速发展, 人们对信息传输系统和集成电路芯片的带宽、可靠性、保密性和低功耗的要求越来越高。为了适应这一需求, 在过去的四十多年里, 大规模集成电路的性能一直按着摩尔定律快速提升, 硅晶体管的特征尺寸越来越小, 由此带来的量子效应、工艺难度、信号延迟和散热等问题已给传统的集成电路技术带来巨大挑战。作为下一代混合集成电路的方案之一, 光互连具有超大带宽、抗干扰和低功耗等特点, 将光互连引入集成芯片中可大幅度提高带宽, 降低芯片功耗, 因此片上光互连已经成为世界范围内的研究热点, 其难点之一的高性能硅基发光器件更是引起了广泛关注。

然而, 与硅作为电子材料的巨大成功不同, 硅不是一种好的发光材料。硅是间接带隙半导体, 这使得采用常规方法制作硅基高效发光器件几乎不可

能, 因此也阻碍了硅大规模进入光电子领域。为了克服这个困难, 在过去的数十年里科学家们尝试了各种不同的方法, 这些研究与硅基其他无源和有源器件方面的研究统称为硅基光子学。近几年来硅基发光器件的研究有了长足的进步, 比如, 在硅系材料中掺入稀土金属铒离子^[1], 在体硅材料中制作出缺陷网络实现发光^[2], 2006 年 Intel 公司采用 SOI(绝缘体上硅)键合 III-V 族化合物半导体研制出了条形激光器和阵列^[3], 并在此基础上, 于 2010 年研制成功单片集成的 4 通道收发模块, 实现了模块到模块间(光纤连接)50 Gbit/s 的高速传输^[4]。

锗与硅同属 IV 族半导体材料, 已经广泛应用于电子电路领域, 大尺寸的绝缘层上锗和硅上锗衬底已经接近商业化^[5]。近年来锗材料逐渐在光子学领域得到较多应用, 例如, 便于集成的 31 GHz 波导型锗高速探测器^[6]以及 40 GHz 高速硅调制器^[7]均已实现。除了发光器件, 实现基于锗/硅平台的片上

收稿日期: 2015-09-19

基金项目: 国家“八六三”计划资助项目(2015AA016904); 国家“九七三”计划资助项目(2013CB632104, 2013CB933303); 国家自然科学基金资助项目(61335002, 61177049); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0218)

作者简介: 夏金松(1976—), 男, 湖北黄冈人。教授, 博士, 主要研究方向为硅基集成光子学。

光互连需要的主要光电子器件也已经实现。2010 年,MIT(麻省理工学院)的研究小组实现了基于高掺杂张应变锗材料的激光器^[8],但注入电流密度高达 10^5 A/cm² 量级。2006 年,通过将锗量子点嵌入光学微腔,利用 Purcell 增强效应^[9],我们首次观察到了锗量子点的室温共振发光^[10]。虽然近年来国际国内在硅基发光材料和器件的研究上已经取得了很多成果,但适合于下一代大规模光电集成芯片的小尺寸、低功耗、制作工艺与 CMOS(互补式金属氧化物半导体)工艺兼容的高效硅基发光器件仍然缺乏。因此我们开展了基于锗自组装量子点及将锗量子点嵌入光学微腔中实现硅基发光器件的研究,本文将介绍我们在这方面的研究进展。

1 锗自组装量子点

锗与硅材料一样,也是间接带隙半导体,锗材料的发光能力较差,体锗材料仍然不能作为好的发光材料使用。而在量子结构中的量子限制效应可以有效展宽电子和空穴的波函数,从而增加电子和空穴波函数的交叠,显著增加电子和空穴的复合发光几率。锗自组装量子点可以通过 MBE(分子束外延)技术在硅衬底上生长得到。锗的晶格常数比硅的晶格常数大 4% 左右,在硅表面外延锗时,由于晶格失配,外延层产生应力,应力随着外延层厚度积累变大。在硅衬底上外延生长锗材料,锗原子将选择能量更低的三维岛装生长,从而形成锗自组装量子点,这就是外延生长中的 S-K 模式。图 1 所示为通过 MBE 得到的锗自组装量子点的 AFM(原子力显微镜)照片。

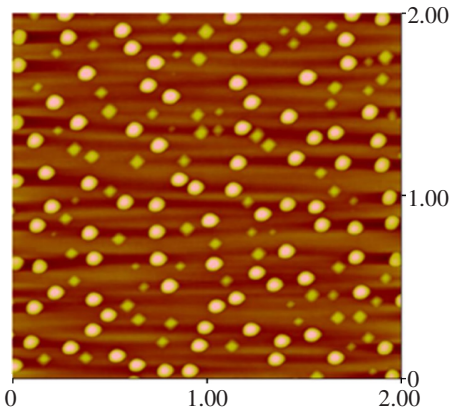


图 1 采用 MBE 生长得到的锗自组装量子点的 AFM 照片

从图中可以看出,MBE 过程中产生了两种大小不同的锗自组装量子点,较大的量子点类似半球形,尺寸在 60~120 nm 之间;较小的点类似金字塔形

貌,尺寸在 30~80 nm 之间,量子点的密度在 10^{10} /cm² 量级。锗量子点锗有着 II 型量子阱能带结构,在锗量子点材料中,电子和空穴被分开限制:空穴限制在锗里面的势阱中,而电子被电子空穴对的库伦引力弱限制在锗量子点周围的硅中。由于量子限制作用,空穴的波函数发生展宽,与电子波函数的交叠增加,提升了电子空穴对复合发光的几率^[11-12]。图 2 所示为锗自组装量子点材料在 40 K 下测量得到的光致荧光谱,可以看到一个较宽的发光峰处在 1.3~1.6 μ m 的波长范围内,这个波段正好是光纤通信系统使用的波段,所以基于锗量子点材料的发光器件有着广泛的应用前景。同时硅材料对上述波段透明,处于此波段的光能在硅波导中长距离传输,为将来基于硅基片上大规模光电混集成提供了可能。

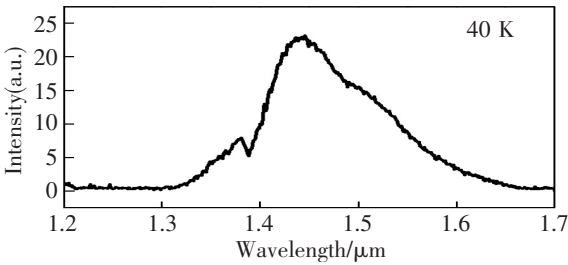


图 2 锗自组装量子点在 40 K 下的光致荧光谱

锗量子点可在硅衬底上外延生长得到,相较于嵌入绝缘体的发光中心,更容易实现低电压电注入发光,这种优势对制备实用化的硅基发光器件非常重要。然而,由于自组装锗量子点的尺寸较大,量子限制效应不明显,锗量子点发光仍存在着发光效率低、发光缺乏方向性以及需要进一步提升锗量子点的发光特性等问题,将锗量子点与光学微腔结合是解决上述问题的途径之一^[13]。

2 光子晶体环形腔中锗量子点共振荧光

光学微腔内的光学共振将导致处在共振波长上的发光得到增强,而处在非共振波长上的发光被抑制。在这些共振波长上,由于 Purcell 效应,电子的自发辐射速率大幅增加,增加的幅度正比于腔模的 Q 值,反比于腔模的模式体积。将锗自组装量子点嵌入高 Q 值光学微腔中,可对锗量子点的发光特性进行调制,实现波长选择、方向调控和效率提升。

多种微腔可用来增强锗量子点的发光,包括微盘、微环和光子晶体微腔等^[10,14]。我们利用光子晶体环形腔来增强腔中锗量子点的发光,在波长 1 500~1 600 nm 内得到了 6 个尖锐的发光峰^[15]。

用 MBE 系统在 160 nm 顶层硅的 SOI 基片上外延生长 4 层镱量子点,再盖上硅帽层,并用电子束曝光和电感耦合等离子体刻蚀在顶层硅镱层上制备光子晶体环形腔结构。图 3(a)所示为制作的环形腔的电镜照片,中心灰色圆圈表示微区光荧光测试系统的泵浦光斑;图 3(b)为环形腔拐角处的放大电镜照片,将拐角处的空气孔的半径减小以增大腔的 Q 值;图 3(c)为器件的结构示意图。

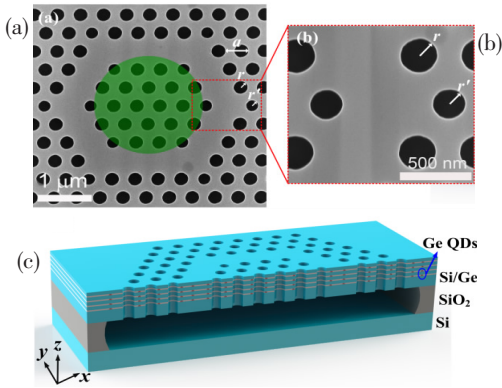


图 3 器件的结构示意图

图 4 所示为所制作器件的室温光荧光谱,泵浦功率为 $16 \mu\text{W}$ 。图中下方较平坦的曲线和上方尖锐的发光峰分别代表平板区域(无结构)和环形腔的光荧光谱。如图所示,在波长 $1500 \sim 1600 \text{ nm}$ 范围内,有 6 个尖锐的发光峰,对应 6 个腔模。图 4 中右图为谐振发光峰 4 的光谱的放大图,可以看出,发光峰的半高宽为 0.5 nm ,对应 Q 值为 3 085。与平板区域相比,环形腔对镱量子点的发光增强超过了 30 倍。通过计算微腔对光的提取效率的提升,可以得出环形腔的 Purcell 因子为 2.1。

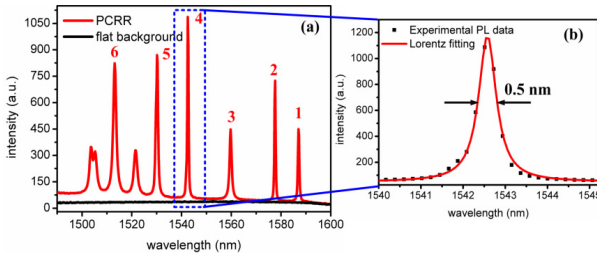


图 4 器件的室温微区光荧光谱

3 硅基镱量子点定位生长

近些年来将图形衬底和自组装生长技术相结合已经成为控制量子点成核位置、提高均一性的重要手段,因此也引起了半导体异质外延领域研究者的极大兴趣。一般来说,生长在图形衬底上的镱量子点比起生长在平衬底上的量子点具有较低的成核势

垒、较小的临界尺寸、较少的失配应力和较大的体积^[16]。定位量子点在基础物理研究和技术应用上有较好的前景,如单个镱量子点可以作为硅基量子光源,双镱量子点有潜力用作单电子晶体管等。

为了研究镱量子点在不同图形衬底上的生长机理,我们利用电子束曝光和干法刻蚀在硅片上制备了不同形状的图形衬底^[17]。定义纳米孔的长宽比为 r ,图 5(a)、(b)分别给出了 $r=1$ 和 $r=3$ 的纳米孔阵列时,两种图形衬底的 AFM 形貌,纳米孔的排列周期为 $3 \mu\text{m}$ 。对于 $r=1$ 的纳米孔阵列,在外延生长的过程中,通过精确控制外延生长,能实现在纳米坑上方成核的单个镱量子点,分别如图 1(c)、(e) 所示。对于长方形纳米孔($r=3$)的图形衬底,我们实现了定位双镱量子点的生长,分别如图 1(d)、(f) 所示,每一个纳米孔内被一大一小两个量子点占据。

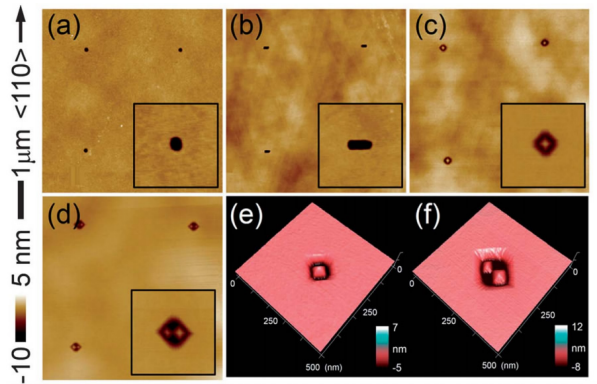


图 5 纳米孔排列周期为 $3 \mu\text{m}$ 时的 AFM 照片

为了能从原理上理解长方形纳米孔中镱量子点的成核机理,我们模拟了生长过程中纳米孔内部的化学势分布,如图 6 所示。化学势沿着 $\text{Si}\langle 110 \rangle$ 方向在纳米坑内有两个极小值,双极小值的位置对应着双量子点的位置,极小值附近的化学势梯度的不对称也同时决定了成核的双点大小不对称。

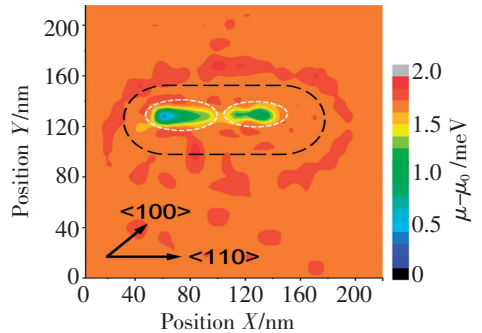


图 6 $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 外延 40 nm 硅缓冲层后的纳米坑内二维表面化学势分布

在实验中我们发现通过合理控制外延生长的生长条件,可以实现 0.6 、 1 、 3 、 5 、 10 和 15 m 的大周期

锗量子点的有序生长^[18],如图 7 所示。我们认为在锗沉积的最开始锗量子点就已经在纳米孔中成核了,而纳米坑中锗量子点成核是由表面化学势最小值所决定的。继而可以推论锗量子点的定位与图形衬底的排列周期无关,通过优化生长条件可以实现无限大周期的锗量子点的有序生长。

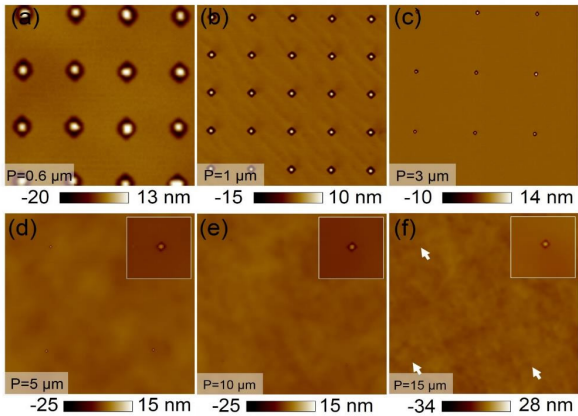


图 7 图形衬底上外延生长的周期排列锗量子点的表面形貌

对于周期排列的纳米圆台衬底,通过控制外延过程中的锗沉积量和生长温度,我们实现了在圆台的边缘生长出锗硅的量子点、纳米线和纳米环^[19],图 8 所示为在周期为 600 nm 的纳米圆台上沉积 10 ML 的锗后样品的表面形貌。生长温度分别为 (a) 500 ℃、(b) 540 ℃ 和 (c) 580 ℃。图 (a) 中箭头所指为一个量子点。

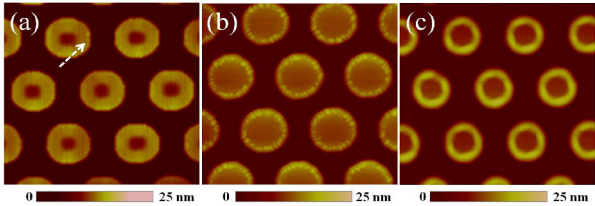


图 8 在周期 600 nm 的纳米圆台上沉积 10 ML 的锗后样品的表面形貌

4 与光子晶体微腔耦合的锗硅单量子点发光器件

在三维限制的自组装半导体量子点中,激子能级会变为类原子的分立能级结构;利用单个量子点中激子在分立能级之间的跃迁即可产生单光子。国际上多采用单个镉硒量子点与微腔耦合来实现片上集成的单光子源^[20-21],能与硅基光互连兼容的硅基单光子源仍未见报道;锗硅量子点具有制作容易、发光波段在通信波长内以及 CMOS 工艺兼容等优点,因此与硅衬底兼容的单个锗硅量子点被认为是

实现硅基单光子源的可能方案之一^[22]。

为了提高锗单量子点的发光效率,我们可以将锗硅单量子点嵌入到光子晶体微腔的中心,利用微腔中的 Purcell 效应来增强锗硅单量子点的自发辐射,如图 9(a)所示。我们在硅基图形衬底上外延生长自组装锗硅量子点,得到了周期性排列的锗硅单量子点阵列,如图 9(b)所示,排列周期为 1 600 nm。在先进的微纳加工工艺的帮助下,我们首次实现了锗硅单量子点与光子晶体微腔的精确耦合和可控制备,如图 9(c)所示。L3 型光子晶体的周期为 $a = 398\text{ nm}$,微腔两侧临近的三个孔分别被移动 $A = 0.2a, B = 0.025a, C = 0.2a$ 。微腔中心位置可以看到一个白色斑点,表明下面埋着一颗锗硅单量子点,白色虚线表明了单量子点中心位置。图 9(d)展示了单量子点和微腔中心对准误差的统计分布,利用高斯拟合得出平均误差为 22 nm。

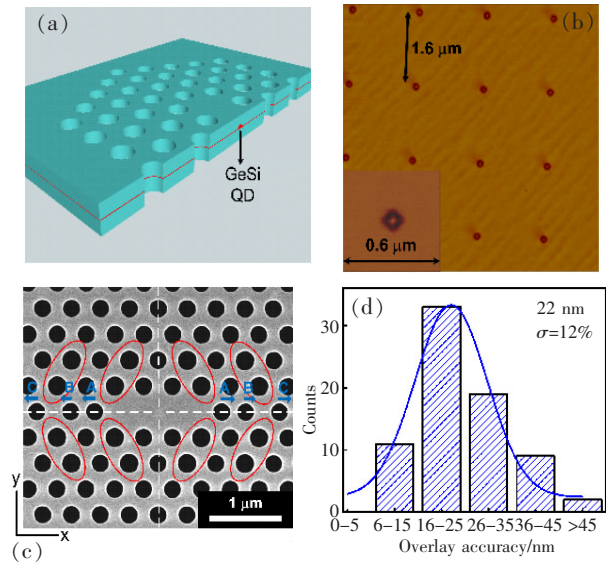


图 9 (a) 嵌入单个量子点的光子晶体微腔系统示意图; (b) 生长在图形衬底上的锗硅单量子点的 AFM 照片; (c) 增强垂直出射的 L3 型光子晶体微腔的扫描电镜照片; (d) 单量子点和微腔中心位置对准误差的统计分布

通过室温光致荧光光谱测试,在激发波长为 532 nm、片上激发功率为 230 μW 时,我们观察到了微腔增强的锗硅量子点荧光光谱^[23],如图 10 所示。图 10(a)是微腔增强的锗硅单量子点的荧光光谱,图中,曲线①为微腔增强的锗硅单量子点的 PL 谱线,曲线②为无增强的锗硅单量子点的 PL 谱线。在波长 1 300 ~ 1 600 nm 之间有多个尖锐的谐振发光峰,这些发光峰分别对应于光子晶体微腔的腔模。

在 1537 nm,与普通锗硅单量子点相比,微腔中单量子点发光增强达到了 1 240 倍,由此估算微腔的 Purcell 因子约为 77.5。图 10(b)是微腔增强的锗硅密集量子点的荧光光谱,图中,曲线①为微腔增强的锗硅密集量子点的 PL 谱线,曲线②为无增强的锗硅密集量子点的 PL 谱线。由于微腔的作用,在波长 1 300 ~1 600 nm 之间也有多个尖锐的谐振发光峰。在 1 524 nm,微腔中多量子点发光增强达到了 160 倍,由此估算微腔的 Purcell 因子为 10.1。单量子点微腔中如此高的 Purcell 因子主要来源于锗硅单量子点与微腔相对位置得到了精确控制。

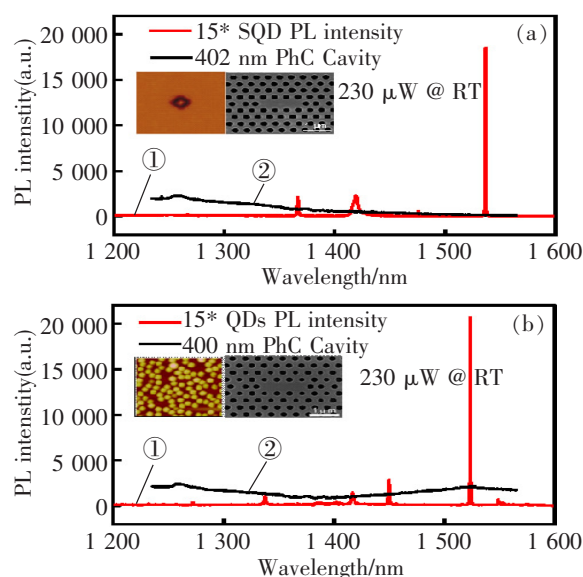


图 10 微腔增强的锗硅量子点在室温下的微区光致荧光谱线

5 结束语

采用外延方法制备硅基发光器件和硅基激光器有工艺兼容性好、可大规模制备等优势,具有令人期待的应用潜力。其中,基于硅基镉量子点的硅基发光器件具有尺寸小、CMOS 工艺兼容和易于集成等优点,是实现片上集成的硅基光源的可能途径之一。我们在研究中已经实现了在室温下观察到光学微腔中镉量子点的尖锐共振发光,也实现了单个镉量子点与光学微腔精确耦合并观察到镉单量子点的共振荧光。相信这些研究结果将推动实现实用化的硅基光源,期待着研究人员能在不久的将来实现实用化高性能硅基光源器件,推动“硅”这一传统半导体材料从“硅的电时代”进入一个全新的时代——“硅的光时代”!

参考文献:

- [1] Franzò G, Priolo F, Coffa S, et al. Room-temperature electroluminescence from Er-doped crystalline Si [J]. Appl Phys Lett, 1994, 64(17):2235—2237.
- [2] Bao J, Tabbal M, Kim T, et al. Point defect engineered Si sub-bandgap light-emitting diode [J]. Optics Express, 2007, 15(11): 6727—6733.
- [3] Fang A W, Park H, Cohen O, et al. Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser [J]. Optics Express, 2006, 14(20): 9203—9210.
- [4] Intel Website. Press Kit - Silicon Photonics 50 G Link Announcement [EB/OL]. (2010-07-27) [2015-09-19]. <http://newsroom.intel.com/docs/DOC-1131>.
- [5] EET Asia website. Applied Materials, Soitec develop GeOI substrates for 45 nm [EB/OL]. (2004-03-17) [2015-09-19]. http://www.eetasia.com/ART_8800332249_480200_NT_06dae13c.HTM.
- [6] Yin T, Cohen R, Morse M, et al. 31 GHz Ge n-i-p waveguide photodetectors on Silicon-on-Insulator substrate [J]. Optics Express, 2007, 15(21): 13965—13971.
- [7] Liao L, Liu A, Rubin D, et al. 40 Gbit/s silicon optical modulator for highspeed applications [J]. Electronics Letters, 2007, 43(22):1196—1197.
- [8] Liu Jifeng, Sun Xiaochen, Rodolfo Camacho-Aguilera, et al. Ge-on-Si laser operating at room temperature [J]. Optics Letters, 2010, 35(5):679—681.
- [9] Purcell E M. Spontaneous emission Probabilities at Radio Frequencies [J]. Phys Rev, 1949, 69(11):681.
- [10] Xia J S, Ikegami Y, Shiraki Y, et al. Strong resonant luminescence from Ge quantum dots in photonic crystal microcavity at room temperature [J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(20):201102-1—201102-3.
- [11] Fukatsu S, Sunamuru H, Shiraki Y, et al. Phononless radiative recombination of indirect excitons in a Si/Ge type-II quantum dot [J]. Appl Phys Lett, 1997, 71(2):258—260.
- [12] Kawaguchi K, Morooka M, Konishi K, et al. Optical properties of strain-balanced SiGe planar microcavities with Ge dots on Si substrates [J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(5):817—819.
- [13] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20):2059—2063.
- [14] Xu X, Narusawa S, Chiba T, et al. Silicon-Based Light-Emitting Devices Based on Ge Self-Assembled Quantum Dots Embedded in Optical Cavities [J].

(下转第 29 页)