

二维 GaAs 基光子晶体微腔的制作与光谱特性分析*

彭银生^{1)2)†} 叶小玲¹⁾ 徐波¹⁾ 牛洁斌³⁾ 贾锐³⁾ 王占国¹⁾ 梁松¹⁾ 杨晓红⁴⁾

1)(中国科学院半导体研究所, 半导体材料重点实验室, 北京 100083)

2)(浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310023)

3)(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

4)(中国科学院半导体研究所, 集成光电子国家重点实验室, 北京 100083)

(2009 年 9 月 26 日收到; 2010 年 1 月 26 日收到修改稿)

研究了以 InAs 量子点为有源区的二维 GaAs 基光子晶体微腔的设计与制作, 测试并分析了室温下微腔的光谱特性. 观察到了波长约为 1137 nm, 谱线半高宽度约为 1 nm 的尖锐低阶谐振模式发光峰. 我们比较了不同刻蚀条件下光子晶体微腔的发光谱线, 结果表明空气孔洞截面的垂直度是影响光子晶体微腔发光特性的重要因素之一. 通过调节干法刻蚀工艺, 改变空气孔半径与晶格常数的比率, 可以在较大范围内调节谐振模式发光峰位置, 达到谐振模式与量子点发光峰调谐的目的.

关键词: 光子晶体微腔, GaAs, 量子点, 谐振模式

PACC: 4270Q, 7855, 4280L

1. 引 言

自从 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 在 1987 年分别独立提出光子晶体概念以来, 光子晶体在全球范围内引起了广泛关注. 由于光子晶体材料中存在光子禁带, 使得某些特定频率的光不能通过, 这种特性可以用于实现多种具有优异性能的光电子器件, 例如激光器、波导、光子晶体光纤等^[3-10]. 特别是近年来关于量子点单光子源的研究^[11-13], 越发激起了人们对光子晶体微腔的研究兴趣. 其中, 具有周期排列空气孔结构的二维光子晶体微腔结构备受关注, 因为这种结构容易通过电子束曝光和干法刻蚀工艺在半导体材料上得到. 二维光子晶体微腔结构是指在平面内利用光子晶体带隙特性对光进行控制, 在垂直于平面的方向上利用高折射率波导层, 光在内部发生全反射将光限制在微腔内.

近年来, 由于 InP 材料具有较高的电子迁移率和相对低的表面复合速率^[14,15], 以量子阱作为有源区的 InP 基二维光子晶体得到了广泛研究, 并取得了一定的研究成果^[16,17]. 然而, 无论从技术成熟的

角度还是原材料成本来说, InP 体系的材料都无法与 GaAs 体系相比拟. 另外当用量子阱作为有源区时, 由于量子阱的一维限制, 光激发产生的载流子会沿着量子阱向微腔的孔洞边缘移动, 导致有效载流子非辐射复合增强. 量子点结构在 3 个方向都受到势垒的约束限制, 以此作为微腔的发光源, 载流子扩散将受到 3 个方向限制, 大大减少了载流子的复合速率^[18]. 因而以 InAs/InGaAs 量子点作为有源区的二维 GaAs 基光子晶体微腔成为当前研究热点.

本文以 GaAs 作为半导体材料, 以 InAs 量子点作为有源层, 采用电子束曝光及干法刻蚀方法制作出了二维光子晶体微腔平板结构, 并在室温下观察到微腔谱线位置约为 1137 nm, 谱线半高宽度约为 1 nm 的尖锐低阶谐振模式发光峰. 同时比较了在不同刻蚀条件下光子晶体微腔的发光谱线, 发现光子晶体孔洞的垂直度对微腔发光特性有明显影响. 另外, 通过调节干法刻蚀工艺, 分析了谐振模式随空气孔半径 r 与晶格常数 a 的比率 r/a 的变化. 发现随着 r/a 的增大, 谐振模式波长逐渐减小, 表明通过调整工艺参数可以调节单量子点与谐振模式在谱

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2006CB604904, 2006CB604908)和国家自然科学基金(批准号: 60676029, 60990315, 60625402)资助的课题.

† E-mail: cynthia@semi.ac.cn

线上的一致. 这些研究结果为将来观察腔量子电动力学效应, 实现量子点单光子源奠定了基础.

2. 二维光子晶体微腔的设计与制作

2.1. 微腔的设计

本实验所采用的二维光子晶体的基本参数为: 晶格常数 $a = 300 \text{ nm}$, 空气孔半径 $r = 0.25a$, 光子晶体平板厚度 $t = 200 \text{ nm}$. 光子晶体为六边形结构, 纳米微腔的形成是在光子晶体中央引入一个去除 3 个空气孔的缺陷态, 即 $L3$ 缺陷结构, 并且在缺陷内靠近边沿的两个空气孔向外移动 $s = 0.15 a$ ^[19], 如图 1 (a) 所示, 图 1 (b) 表示了 $L3$ 型光子晶体微腔结构的扫描电镜 (SEM) 图.

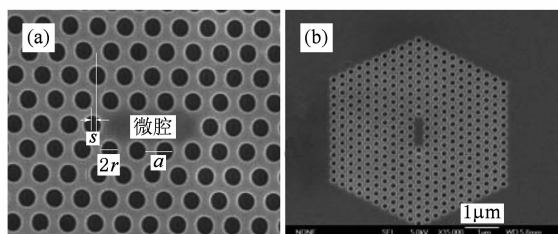


图 1 光子晶体微腔和全貌 SEM 图

2.2. 材料生长及器件制作

样品的生长在 Riber 32P 型分子束外延设备中进行. 样品表面的结构演化通过反射式高能电子衍射仪 (RHEED) 进行原位监测. 生长条件如下: GaAs 衬底在 $580 \text{ }^\circ\text{C}$ 下脱氧, 除气之后, 以 0.2 ML/s (即每秒 0.2 个分子层 (ML)) 的速率在其表面生长 1000 nm 的 $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ 牺牲层; 接着在 $580 \text{ }^\circ\text{C}$ 下生长 100 nm 厚的 GaAs 层, 生长速率为 0.48 ML/s ; 然后, 将温度降至 $510 \text{ }^\circ\text{C}$, 以 0.01 ML/s 的生长速率, 在 GaAs 上沉积 2.1 ML 的 InAs, 获得了密度约为 10^{10} cm^{-2} InAs 量子点; 最后将温度升至 $580 \text{ }^\circ\text{C}$, 同样以 0.48 ML/s 的生长速率生长 100 nm 的 GaAs 层. 整个生长过程中, 为了保持样品表面生长的均匀性, 衬底保持高速旋转.

我们在生长好的样品表面制作光子晶体微腔结构. 制作过程主要包括四步工艺, 分别是电子束曝光、反应离子刻蚀、感应耦合等离子刻蚀以及化学湿法腐蚀. 首先, 用等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 在样品表面淀积一层 150 nm 厚的 SiO_2 薄

膜作为介质硬掩膜层, 然后在 SiO_2 表面旋涂 300 nm 厚的 ZEP 正胶. 采用 ZEP 胶作为掩膜层是由于 ZEP 胶比 PMMA 胶有更强的抗刻蚀能力. 接着我们用 JEOL JBX-5DII(U) 型电子束曝光系统在 ZEP 胶上产生光子晶体图形. 加速电压为 100 keV , 高的加速电压产生了低的电子散射, 使得在电子束胶上获得理想的光子晶体图形. 然后通过反应离子刻蚀系统, 将电子束胶上的图形转移至 SiO_2 掩膜上, 用氧等离子去除 SiO_2 表面残余的电子束胶, 再用感应耦合等离子刻蚀系统将 SiO_2 上的图形转移至 GaAs 上. 最后将刻蚀好光子晶体的样品在室温下浸入 5% 的 HF 溶液中, 去除表面残余的 SiO_2 层和选择性腐蚀光子晶体下方的 AlGaAs 牺牲层, 形成一个悬空的二维光子晶体微腔平板结构.

3. 结果与讨论

本实验采用微区光致发光 (PL) 光谱测试系统在室温下对样品进行测试, 激光器是激发波长为 514 nm 的 Ar^+ 激光器. 测试时, 激发光透过直径为 0.5 的显微镜物镜, 将光束聚焦在光子晶体微腔内, 量子点被激发, 发射光通过同一物镜被收集, 并将光传入焦距为 0.5 m 的单色仪, 用液氮致冷的 InGaAs 二极管阵列探测器探测光谱. 我们分别测试了非图形区域与微腔内的发光谱线. 图 2 表示的是非图形区域在室温下量子点的发光谱线, 对应的基态与第一激发态的发光峰值分别约为 1260 和 1211 nm .

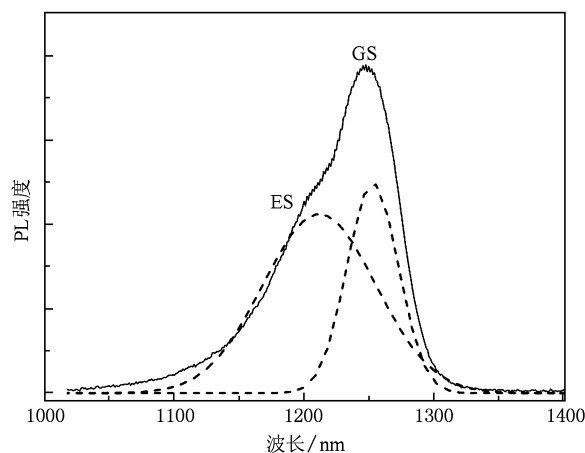


图 2 室温下非图形区域 InAs 量子点 PL 谱 (GS 表示基态, ES 表示激发态)

接着测试了不同刻蚀条件下光子晶体微腔的

光谱. 图 3(a), (b) 和 (c) 分别表示不同刻蚀条件下光子晶体的 SEM 截面图. 从 SEM 图可以看出, 3 种刻蚀条件下, 光子晶体孔洞截面迥然不同. 图 3(a)

对应的孔洞截面几乎呈现 90° 的垂直度, 图 3(b) 对应的孔洞截面呈倒梯形, 图 3(c) 对应的孔洞截面呈鼓状.

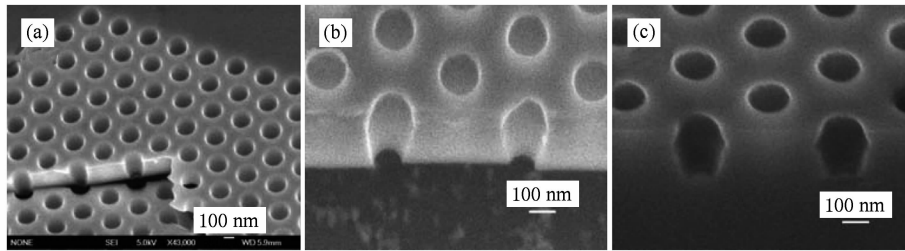


图 3 不同刻蚀条件下光子晶体 SEM 截面图

在相同的测试条件下, 我们首先测试了对应图 3(a) 的光子晶体微腔, 获得谱线如图 4(a) 所示. 观察到一波长约为 1137 nm, 谱线半高宽度约为 1 nm 的尖锐发光峰, 对应的是低阶谐振模式. 此外, 还观察到谱线中存在一些发光强度较弱、谱线宽度较宽的高阶谐振模式, 其峰值位置分别约为 1122, 1115 和 1101 nm. 另一波长约为 1190 nm 的发光峰是微腔介质带边发光峰^[20]. 为了进一步确信我们观察到的发光峰来源于微腔, 我们测量了同一样品上, 相同制作条件下的另一光子晶体微腔发光谱线, 如图 4(b) 所示. 很明显, 观察到了与图 4(a) 相同数量的发光峰, 发光峰的位置与图 4(a) 几乎一致. 说明这些峰值都来源于光子晶体微腔, 这一观察结果与文献[21]的理论计算一致. 需要说明的是, 两光子晶体微腔对应的谐振模式波长、发光强度以及谱线宽度存在微小差异, 这主要是由光子晶体的制作工艺过程所致. 与非图形区域量子点谱线相比, 微腔对量子点发光具有明显的调控作用, 在微腔内量子点发光强度明显减弱, 而微腔模式具有尖锐的发光峰. 并且从图 4 看, 高阶谐振模式发光强度受工艺影响较大, 而低阶模式相对而言, 受影响较小. 另外, 图 4(a) 在 1260 nm 处有一较宽的发光峰, 对应的是量子点发光峰, 而图 4(b) 量子点发光峰基本不可见. 这可能是由于在测试过程中, 有少量激发光照射至非图形区域而产生的量子点发光谱.

接着我们继续测试了对应图 3(b) 和 (c) 光子晶体微腔的光谱曲线, 如图 5 所示, 图 5(a) 和 (b) 分别对应图 3(b) 和 (c) 光子晶体微腔光谱线. 从光谱图可以看出, 尽管光子晶体孔洞截面在垂直度上并不理想, 但我们仍然观察到了与图 4 相似的发光峰, 各发光峰的位置与图 4 基本一致. 然而, 理论上具有

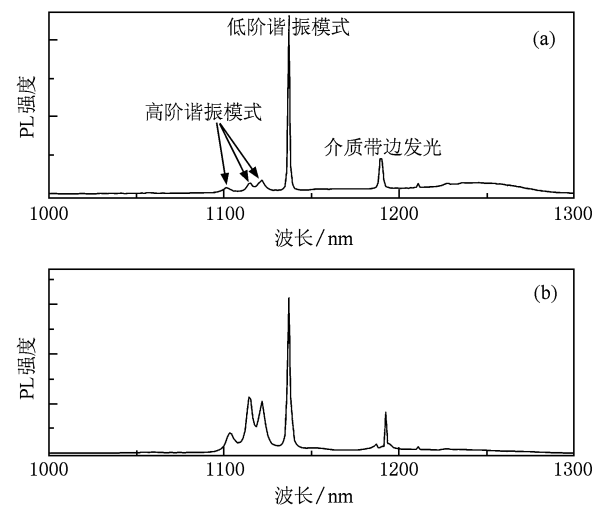


图 4 同一样品上不同光子晶体微腔的光谱线

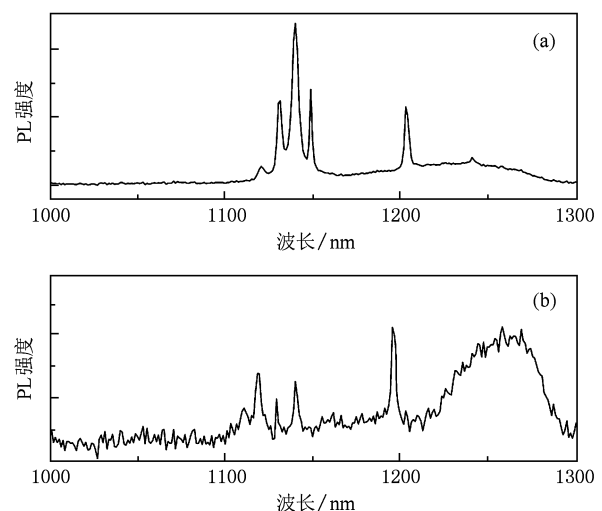


图 5 不同刻蚀条件下光子晶体微腔的光谱线

较高品质因子的低阶谐振模式的谱线半高宽度明显变宽, 发光强度明显减弱, 说明品质因子有所减

少. 随着光子晶体刻蚀特性变差, 谐振模式峰的半高宽度由图 5(a) 的约 4—5 nm 增加至图 5(b) 的约 7—8 nm. 而且对应量子点的发光峰随着光子晶体微腔的刻蚀特性变差也清晰可见, 说明较差刻蚀特性的光子晶体微腔对量子点的调控作用较弱. 尽管有很多因素(例如表面光滑等)影响光子晶体微腔的发光特性^[22], 但是从我们的 SEM 图及对应的光谱曲线比较来看, 光子晶体孔洞截面垂直度是影响光子晶体发光特性的一个重要因素. 因此, 要获得良好的发光特性, 需要在工艺上制作出空气孔洞侧壁尽量垂直光滑的光子晶体结构.

接下来讨论通过调节刻蚀参数来获得谐振模式移动的情况. 理想状态下, 要使单量子点与谐振模式发生强耦合, 应使量子点处于谐振模式的极大场强处, 并且量子点的发光波长要与谐振模式波长相一致. 但是材料一旦生长完成, 量子点发光波长一般不会发生改变. 这里主要讨论通过调节刻蚀工艺实现谐振模式与量子点在发光谱线上对准. 由 Maxwell 方程可知, 通过改变光子晶体的尺寸可以调节谐振模式的大小. 一般可调 3 个参数, 分别是 r/a 、晶格常数 a 以及平板波导层的厚度 t . 这里主要讨论通过改变 r/a 的大小来调节谐振模式的波长. 在我们的实验中, 通过调整反应离子刻蚀 SiO₂ 掩膜层和感应耦合等离子刻蚀 GaAs 层的工艺参数, 改变 r/a 的比率, 达到调节谐振模式波长的目的. 图 6 显示了我们通过改变刻蚀参数后获得的低阶谐振模式波长随 r/a 的变化图. r/a 约为 0.25, 0.22 和 0.2, 对应的低阶谐振模式波长分别约为 1137, 1149 和 1176 nm. 这是由于模式的有效折射率增加导致了模式波长随着 r/a 的减小而增大. 这说明通过改变 r/a 的比率, 可以调节谐振模式的移动, 达到与固定量子点发光谱线上的对准.

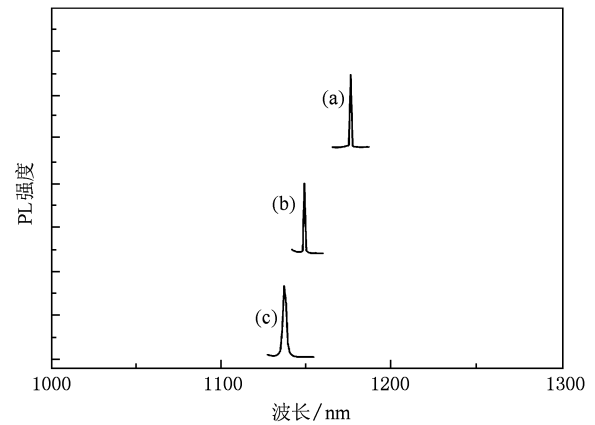


图 6 低阶谐振模式随 r/a 比率变化关系图 (a) $r/a = 0.2$, (b) $r/a = 0.22$, (c) $r/a = 0.25$ (对应的谐振模式波长分别为 1176, 1149 和 1137 nm)

4. 结 论

研究了以 InAs 量子点作为有源区的二维 GaAs 基光子晶体微腔的设计与制作, 并在室温下测试和分析了微腔的光谱特性, 观察到了波长约为 1137 nm、谱线半高宽度约为 1 nm 的尖锐低阶谐振模式发光峰. 另外比较了不同刻蚀结果下光子晶体微腔的发光谱线, 结果发现, 空气孔洞截面的垂直度是影响光子晶体微腔发光特性的重要因素之一. 通过调节干法刻蚀工艺, 改变 r/a 的比率大小来调节谐振模式波长, 从而实现谐振模式与量子点的发光谱线耦合. 研究表明, 谐振模式波长随着 r/a 增大而减小, 获得了预期的实验结果. 这为下一步实现量子点单光子源奠定了技术基础.

感谢梁平、中国科学院半导体研究所樊中朝和物理研究所李俊杰在实验过程中所提出的有益建议和技术帮助.

[1] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
 [2] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
 [3] Sugimoto Y, Tanaka Y, Ikeda N, Nakamura Y, Asakawa K, Inoue K 2004 *Opt. Express* **12** 1090
 [4] Lin S Y, Chow E, Bur J, Johnson S G, Joannopoulos J D 2002 *Opt. Lett.* **27** 1400
 [5] Noda S, Chutnan A, Imada M 2000 *Nature* **407** 608
 [6] Painter O, Lee R K, Scherer A, Yariv A, O'Brien J D, Dapkus P D, Kim I 1999 *Science* **284** 1819
 [7] Nomura M, Iwamoto S, Watanabe K, Kumagai N, Nakata Y,

Ishida S, Arakawa Y 2006 *Opt. Express* **14** 6308
 [8] Asano T, Kunishi W, Song B S, Noda S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 151102
 [9] Ji L L, Chen W, Cao Y C, Yang Z Y, Lu P X 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5462 (in Chinese) [季玲玲、陈伟、曹迎春、杨振宇、陆培祥 2009 物理学报 **58** 5462]
 [10] Liu H Y, Meng Z M, Dai Q F, Wu L J, Lan S, Liu S H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4702 (in Chinese) [刘海英、蒙自明、戴峭峰、吴立军、兰胜、刘颂豪 2009 物理学报 **58** 4702]
 [11] Santori C, Fattal D, Vuckovic J, Solomon G S, Yamamoto Y

- 2004 *New J. Phys.* **6** 89
- [12] Chang W H, Chen W Y, Chang W Y, Hsieh H S, Chyi J I, Hsu T M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 117401
- [13] Kiraz A, Atature M, Imamoglu I 2004 *Phys. Rev. A* **69** 032305
- [14] Baba T 1997 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **3** 808
- [15] Coldren L A, Corzine S W 1995 *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (New York: Wiley) p88
- [16] Baba T, Matsuzaki T 1996 *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** 1348
- [17] Zou Y, Osinski J S, Grodzinski P, Dapkus P D, Rideout W, Sharfim W F, Crawford F D 1992 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **4** 1315
- [18] Arakawa Y, Sakaki H 1982 *Appl. Phys. Lett.* **40** 939
- [19] Englund D, Fattal D, Waks E, Solomon G S, Zhang B, Nakaoka T, Arakawa Y, Yamamoto Y, Vučković J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 013904
- [20] Nomura M, Lwamoto S, Yang T, Lshida S, Arakawa Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 241124
- [21] Chalcraft A R A, Lam S, O'Brien D, Krauss T F, Sahin M, Szymanski D, Sanvitto D, Oulton R, Skolnick M S, Fox A M, Whittaker D M, Liu H Y, Hopkinson M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 241117
- [22] Asano T, Song B S, Noda S 2006 *Opt. Express* **14** 1996

Fabrication and luminescence characterization of two-dimensional GaAs-based photonic crystal nanocavities *

Peng Yin-Sheng^{1)2)†} Ye Xiao-Ling¹⁾ Xu Bo¹⁾ Niu Jie-Bin³⁾ Jia Rui³⁾

Wang Zhan-Guo¹⁾ Liang Song¹⁾ Yang Xiao-Hong⁴⁾

1) (Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

2) (College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

3) (Institute of Micro-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

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

(Received 26 September 2009; revised manuscript received 26 January 2010)

Abstract

This paper describes the design and fabrication process of a two-dimensional GaAs-based photonic crystal nanocavity with InAs quantum dots (QDs) emitters and analyzes the optical characteristics of cavity modes at room temperature. The micro-luminescence spectrum recorded from the nanocavities exhibits a narrow optical transition at the lowest order resonance wavelength of about 1137 nm with about 1 nm emission linewidth. In addition, the spectra of photonic crystal nanocavities processed under different etching conditions show that the verticality of air hole sidewall is an important factor determining the luminescence characteristics of photonic crystal nanocavities. Finally, the variance of resonant modes is also discussed as a function of r/a ratio and will be used in techniques aimed at improving the probability of achieving spectral coupling of a single QD to a cavity mode.

Keywords: photonic crystal nanocavity, GaAs, quantum dot, resonant cavity modes

PACC: 4270Q, 7855, 4280L

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2006CB604904, 2006CB604908) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60676029, 60990315, 60625402).

† E-mail: cynthia@semi.ac.cn