

金属与半导体 Ge 欧姆接触制备、性质及其机理分析*

严光明 李成[†] 汤梦饶 黄诗浩 王尘 卢卫芳 黄巍 赖虹凯 陈松岩

(厦门大学物理学系半导体光子学研究中心, 厦门 361005)

(2013年4月12日收到; 2013年5月3日收到修改稿)

金属与 Ge 材料接触时界面处存在着强烈的费米钉扎效应, 尤其与 n 型 Ge 形成的欧姆接触的比接触电阻率高, 是制约 Si 基 Ge 器件性能的关键因素之一. 本文对比了分别采用金属 Al 和 Ni 与 Si 衬底上外延生长的 p 型 Ge 和 n 型 Ge 材料的接触特性. 发现在相同的较高掺杂条件下, NiGe 与 n 型 Ge 可形成良好的欧姆接触, 其比接触电阻率较 Al 接触降低了一个数量级, 掺 P 浓度为 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 时达到 $1.43 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$. NiGe 与 p 型 Ge 接触和 Al 接触的比接触电阻率相当, 掺 B 浓度为 $4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时达到 $1.68 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$. NiGe 与 n 型 Ge 接触和 Al 电极相比较, 在形成 NiGe 过程中, P 杂质在界面处的偏析是其接触电阻率降低的主要原因. 采用 NiGe 作为 Ge 的接触电极在目前是合适的选择.

关键词: 金属与 Ge 接触性质, NiGe, 比接触电阻率

PACS: 73.40.Cg, 61.82.Bg

DOI: 10.7498/aps.62.167304

1 引言

Ge 具有高的载流子迁移率, 且与 Si 工艺兼容性好, 因此 Si 基 Ge 材料是制备光电子器件和下一代金属氧化物半导体场效应晶体管器件重要的候选材料之一. 但是由于 Ge 材料表面态密度较高, 在与金属接触时存在强烈的费米钉扎效应^[1], 呈现出非欧姆接触特性或者其比接触电阻率过高, 导致金属与 Ge 尤其是 n 型 Ge 的接触有较大的接触电阻, 是影响其器件性能的关键因素之一. 研究减小金属与 n 型 Ge 接触电阻的方法和机理具有重要的意义.

众所周知, 减小金属与 n 型 Ge 接触电阻有两个主要的途径: 一种是提高 n 型 Ge 的掺杂浓度, 另一种是降低金属与 n 型 Ge 接触的势垒高度. 前者受限于掺杂元素 (如 P) 在 Ge 中的固溶度和严重的扩散现象, 在 Ge 中实现高的 n 型掺杂遇到了很大的挑战^[2]. 不论是原位掺杂, 还是通过离子注入的方法都很难得到具有高效掺杂浓度的 n 型 Ge. 第二种途径近年来发展为两种方法: 1) 在金

属和 n 型 Ge 之间插入纳米量级的绝缘层或半导体层 (如 Al_2O_3 ^[3], SiN ^[4], GeO_x ^[5], TiO_2 ^[6], Si ^[7] 等) 以降低势垒高度; 2) 直接用化合物金属 (如 TiN ^[8], TaN ^[9] 等) 与 n 型 Ge 接触以改变其界面钉扎能级位置, 降低其势垒高度. 虽然这两种方法都能形成较好的欧姆接触, 但是介电物质和绝大多数化合物金属的电阻率都比单质金属大一些, 都会引入较大的串联电阻^[10]. 2012 年, 我们提出了利用金属性 TaN 纳米薄膜作为金属与 n-Ge 接触的中间层, 调节 Al/n-Ge 的势垒高度, 获得了较低的接触电阻率^[9]. Gallacher 等^[11] 于 2012 年在掺杂浓度为 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 的 n⁺Ge 上沉积了 100 nm Ni, 再在 340 °C 下退火, 得到的 NiGe/n⁺Ge 接触比接触电阻率为 $2.3 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 是目前报道的最好水平. 然而, 金属与 n-Ge 欧姆接触的制备还没有成熟的方案, 其性质和作用机理仍有待进一步深入研究.

本文研究对比了分别采用金属 Al 和 Ni 与在超高真空化学气相沉积系统 (UHV/CVD) 中外延生长的 p 型 Ge 和 n 型 Ge 材料制作的接触电极的性能. 为提高 n 型 Ge 掺杂浓度, 部分样品在原位掺杂

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB933503, 2013CB632103)、国家自然科学基金 (批准号: 61036003, 61176092) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 2010121056) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: lich@xmu.edu.cn

的基础上注入 P 离子形成高掺杂样品. 分析对比了 Al, NiGe 分别与 n 和 p 型 Ge 接触的性质及比接触电阻率与掺杂浓度的关系.

2 实验

样品结构如图 1 所示. 在 UHV/CVD 中采用低温 Ge 缓冲技术在 Si 衬底上首先在 340 °C 下外延生长了 90 nm 的低温 Ge 缓冲层, 然后将温度提高到 600 °C, 生长约 300 nm 的本征 Ge 层, 进一步降低 Ge 外延层位错密度, 最后分别在 600 °C 下采用 B₂H₆ 进行 p 型掺杂 (B₂H₆ 流量分别为 0.5, 1.0, 1.5 sccm (1 sccm = 1 mL/min), 得到厚约 100 nm, 掺杂浓度依次为 1.2 × 10¹⁸, 3 × 10¹⁸, 4.2 × 10¹⁸ cm⁻³ 的 p 型 Ge 层; 在 500 °C 下采用 PH₃ 进行 n 型掺杂 (PH₃ 流量为 2.5 sccm), 得到厚约为 300 nm, 掺杂浓度为 2 × 10¹⁸ cm⁻³ 的 n 型 Ge 外延层. 为了进一步提高掺杂浓度, 一部分 n 型原位掺杂样品继续进行了剂量为 2 × 10¹⁵ cm⁻², 能量为 25 keV 的 P 离子注入, 得到高掺的 n 型 Ge 层. 对得到的不同浓度的 p 型 Ge, 在一组样品表面通过磁控溅射沉积 100 nm 的金属 Al; 另一组样品表面通过磁控溅射沉积 15 nm 的金属 Ni, 之后进行 400 °C, 1 min 的快速热退火; 对离子注入后的 n⁺Ge, 先用等离子体化学气相沉积 100 nm SiO₂, 之后进行 650 °C, 8 s 的快速热退火, 激活注入的杂质, 之后腐蚀 SiO₂, 以防止 P 向外扩散损失. 清洗表面后与原位生长的 n 型 Ge 样品一起先通过磁控溅射沉积 15 nm 的金属 Ni, 再进行 400 °C, 1 min 的快速热退火形成 NiGe 接触; 另外, 我们还制备了 Al/n-Ge, Al/n⁺Ge 的接触进行对比. 之所以选择金属 Ni, 是因为 Ni 在较低温度下 (< 400 °C) 就能与 Ge 反应形成热稳定性较好、电阻率极低的 NiGe 合金 (14—24 μΩ·cm), 具有良好的电学性能 [11].

为了准确地得到上述样品的比接触电阻率, 我们采用了圆点传输线模型 [12], 利用剥离工艺得到了如图 2 所示的电极结构, 圆环部分表示 Ge 材料, 白色部分表示金属. 采用了 Keithley 4200-CSC 半导体特征分析系统测试了各样品的 I-V 特性曲线, 从而获得不同半径圆环相应的总电阻 R_{tot}. 采用 (1) 式计算得到比接触电阻率, 式中, r₀, r_n 分别表示内圆和外圆半径, L_T 为传输线长度. 由于 r_n - r₀ 很小, 可近似认为 r_n = r₀, 因此理论上 R_{tot} - ln(r_n/r₀) 曲

线是一条直线. 由实验数据可通过直线拟合得到 R_s 和 L_T, 从而求得求得比接触电阻率 ρ_c:

$$R_{\text{tot}} = \frac{R_s}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{r_n}{r_0} \right) + L_T \left(\frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_0} \right) \right], \quad (1a)$$

$$\rho_c = R_s \cdot L_T^2. \quad (1b)$$

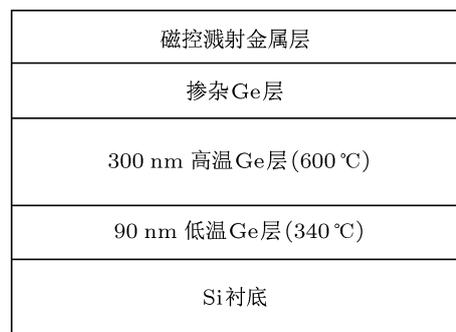


图 1 Si 衬底上外延掺杂 Ge 样品结构示意图

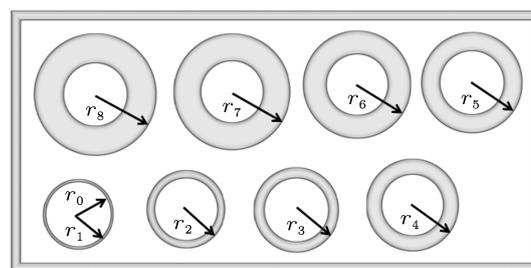


图 2 用于提取比接触电阻率的圆点传输线模型

对所有的样品进行了 I-V 特性测试. 对原位生长的 n-Ge 外延层, 其掺杂浓度约为 2 × 10¹⁸ cm⁻³, 不管是与金属 Al, 还是与 NiGe 接触, 都呈现出明显的肖特基结的特性, 说明 2 × 10¹⁸ cm⁻³ 的掺杂浓度不足以形成良好的欧姆接触, 达不到器件电极制作的要求. 我们选择了进一步通过离子注入提高 n 型 Ge 掺杂浓度 (注入条件: 剂量 2 × 10¹⁵ cm⁻², 能量 25 keV), 分别制备了 Al/n⁺Ge 和 NiGe/n⁺Ge 接触. 而对原位掺杂的 p 型 Ge 外延层, 分别制备了 Al/p-Ge 和 NiGe/p-Ge 接触. 图 3 给出了 NiGe/p-Ge (4.2 × 10¹⁸ cm⁻³) 和 NiGe/n⁺Ge (2 × 10¹⁹ cm⁻³) 两个样品典型的 I-V 特性, 均呈现出低阻的欧姆接触特性 (n⁺Ge 参与导电的掺杂层厚度较大, 因而相同电压下电流较大).

我们对所有样品测试得到的 R_{tot} 与 ln(r_n/r₀) 进行了线性拟合, 提取了其比接触电阻率. 图 4 和图 5 分别给出了图 3 中两组样品的 R_{tot} 与 ln(r_n/r₀) 线性拟合结果和计算得到的比接触电阻率. 从图

中可以看出, 实验数据能很好地进行线性拟合, NiGe/p-Ge 和 NiGe/n⁺Ge 的比接触电阻率分别能达到 $1.68 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $1.43 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$.

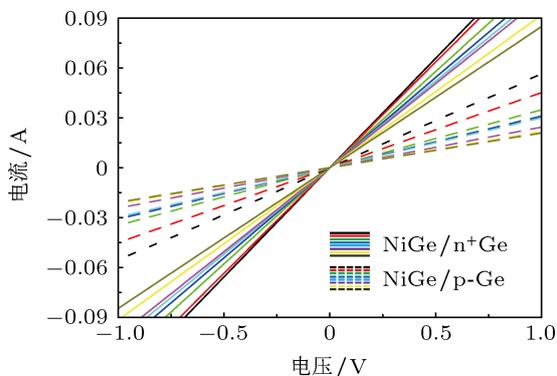


图3 NiGe/n⁺Ge, NiGe/p-Ge ($4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 接触电流电压特性

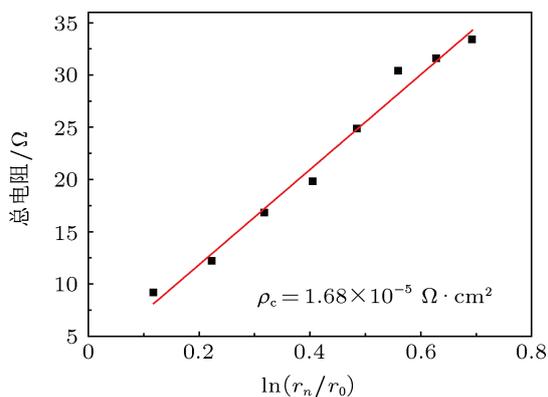


图4 NiGe/p-Ge ($4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 比接触电阻率拟合曲线

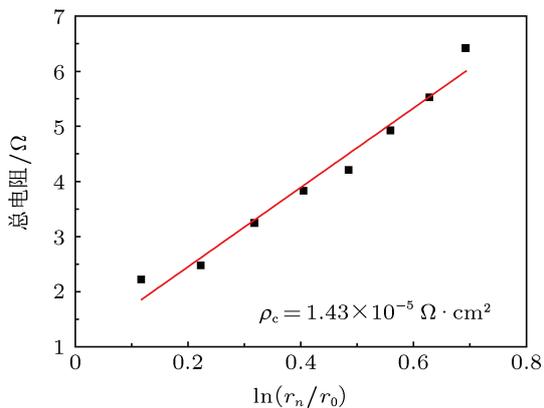


图5 NiGe/n⁺Ge 比接触电阻率拟合曲线

图6给出了所有样品测试并计算得到的比接触电阻率. 可以看出, Al, NiGe 与 p-Ge 接触比接触电阻率均随掺杂浓度的增加而降低, 相同掺杂浓度下, NiGe 与 p-Ge 接触和 Al 与 p-Ge 接触相比并没

有明显的优势. 而对 Al, NiGe 与 n-Ge 的接触比较, NiGe 与 n-Ge 接触的比接触电阻率更低.

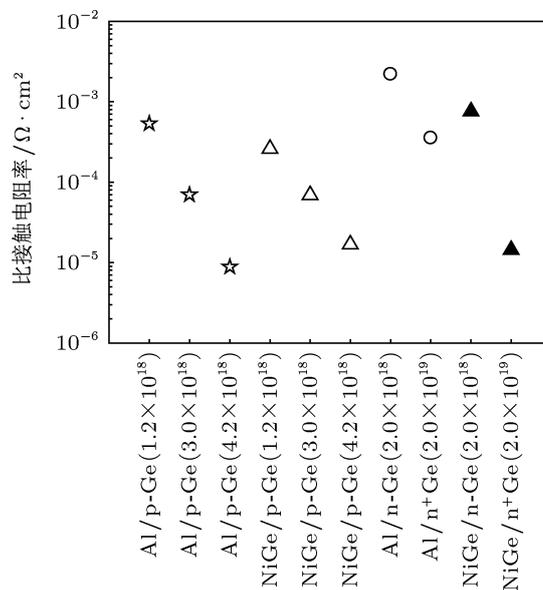


图6 不同金属与半导体接触比接触电阻率汇总

3 实验结果分析

对比各组样品的测试结果, 不管是 n 型还是 p 型 Ge, 与金属接触的比接触电阻率都会随着掺杂浓度的提高而降低. 图7给出了金属分别与掺杂前、后的 Ge 接触能带图及其可能的载流子输运过程. 随着半导体 Ge 掺杂浓度的提高, 肖特基势垒的宽度会相应减小, 电流输运的主要方式由热发射方式变为热场发射方式和场发射方式, 电子(空穴)隧穿势垒的概率提高, 从而改善了金属, 半导体接触.

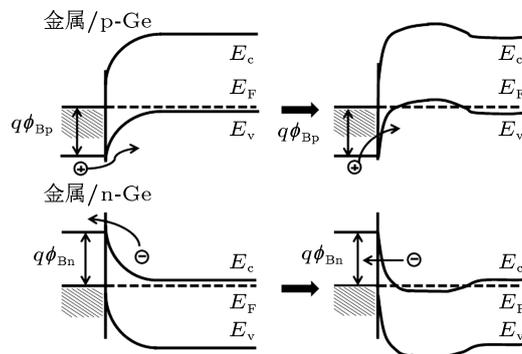


图7 金属与不同掺杂浓度的 p 型和 n 型 Ge 接触能带结构示意图

金属与 Ge 接触的肖特基势垒高度和金属功函数的关系可由(2)式表示^[13](以 n 型 Ge 为例):

$$\Phi_{Bn} = S(\Phi_m - \Phi_{CNL}) + (\Phi_{CNL} - \chi_s), \quad (2)$$

其中, Φ_{Bn} 表示肖特基势垒高度, S 表示费米钉扎因子, Φ_{m} 表示金属功函数, Φ_{CNL} 为半导体的电中性能级, χ_{s} 表示半导体的亲和能. 金属与 n-Ge 接触的费米钉扎因子为 0.05^[14], 接近 0, 因此金属与 n-Ge 接触的费米钉扎效应非常强烈, Al 和 NiGe 与 n-Ge 接触的电子势垒高度约为 0.6—0.62 eV^[9,15].

对 p-Ge 接触的样品, NiGe 与 p-Ge 接触和 Al 与 p-Ge 接触都容易实现低比接触电阻率, 掺杂浓度相同的情况下, 比接触电阻率相差不大. 这是因为: 对应于金属与 Ge 接触的费米钉扎效应, Al/p-Ge 的空穴势垒高度和 NiGe/p-Ge 的空穴势垒高度较低且相差不大, 约在 0.07—0.1 eV 之间^[15].

对 n-Ge 接触的样品, 我们测试了 NiGe/n⁺Ge 样品的二次离子质谱 (SIMS), 获得杂质 P 的浓度分布. 如图 8 所示, 由于 Ni, Ge 反应形成 NiGe 合金层, 接近样品表面的 P 原子浓度在形成 NiGe 合金后大大降低, 而在 NiGe 与 Ge 界面处 (约 40 nm 处) 有所提升, 说明 P 原子在 NiGe 形成的过程中向 Ge 一侧发生了偏析, 使局部 P 原子浓度提高, 增大了半导体中电子隧穿势垒的概率. 同时, 样品表面离子注入损伤最严重的 Ge 层也通过与 Ni 反应形成了 NiGe 合金, 减少了表面态, 其整体的效果就是降低了 NiGe/n⁺Ge 接触的比接触电阻率.

综上所述, 金属与 p-Ge 接触, 由于 NiGe 和 Al 与 p-Ge 接触具有低的空穴势垒高度, 可得到较低的比接触电阻率. NiGe 与 n⁺Ge 接触, 在形成 NiGe

过程中, 由于 P 在 NiGe 中溶解度低, P 原子在界面处发生局部偏析, 获得了较好的欧姆接触. 这些结果表明: 为了满足器件制备的需要, 提出有效的 Ge 表面钝化方法, 减轻费米钉扎效应, 降低金属与 Ge 接触的势垒高度是必经之路.

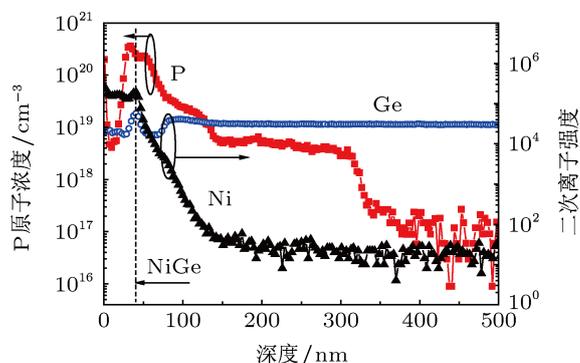


图 8 NiGe/n⁺Ge 样品中 Ni, Ge SIMS 和杂质 P 浓度分布

4 结论

本文对比了 Al, NiGe 与 n 和 p 型 Ge 的接触性质, 发现 Al, NiGe 与 p-Ge 接触容易实现欧姆接触; 在相同的掺杂条件下, NiGe 与 n⁺Ge 具有较低的比接触电阻率. 制备的 NiGe/p-Ge, Ni/n⁺Ge 接触比接触电阻率分别达到 1.68×10^{-5} 和 $1.43 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 为高性能 Si 基 Ge 器件制作过程中金属与半导体欧姆接触的制备提供了一个可行的方案.

- [1] Dimoulas A, Tsipas P, Sotiropoulos A, Evangelou E K 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 252110
- [2] Camacho-Aguilera R E, Cai Y, Bessette J T, Kimerling L C, Michel J 2012 *Opt. Mater. Express* **2** 1462
- [3] Zhou Y, Ogawa M, Han X H, Wang K L 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 202105
- [4] Kobayashi M, Kinoshita A, Saraswat K, Wong H S P, Nishi Y 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 023702
- [5] Nishimura T, Kita K, Toriumi A 2008 *Appl. Phys. Express* **1** 051406
- [6] Jason Lin J Y, Roy A M, Nainani A, Sun Y, Saraswat K C 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 092113
- [7] Martens K, Rooyackers R, Firrincieli A, Vincent B, Loo R, De Jaeger 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 013504
- [8] Iyota M, Yamamoto K, Wang D, Yang H G, Nakashima H 2011 *Appl.*

Phys. Lett. **98** 192108

- [9] Wu Z, Huang W, Li C, Lai H K, Chen S Y 2012 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **59** 1328
- [10] Roy A M, Jason Lin J Y, Saraswat K C 2010 *IEEE Electron Dev. Lett.* **31** 10
- [11] Gallacher K, Velha P, Paul D, MacLaren I, Myronov M, Leadley D R 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 022113
- [12] Li H J, Shi Y 2008 *Semicond. Technol.* **33** 155 (in Chinese) [李鸿渐, 石瑛 2008 半导体技术 **33** 155]
- [13] Cowley A, Sze S 1965 *J. Appl. Phys.* **36** 3212
- [14] Dimoulas A, Tsipas P, Sotiropoulos A, Evangelou E 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 252110
- [15] Zang H, Lee S, Loh W, Wang J, Chua K, Yu M, Cho B, Lo G, Kwong D L 2008 *IEEE Electron Dev. Lett.* **29** 161

Properties and mechanism analysis of metal/Ge ohmic contact*

Yan Guang-Ming Li Cheng[†] Tang Meng-Rao Huang Shi-Hao Wang Chen
Lu Wei-Fang Huang Wei Lai Hong-Kai Chen Song-Yan

(Semiconductor Photonics Reseach Center, Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

(Received 12 April 2013; revised manuscript received 3 May 2013)

Abstract

Large contact resistance due to Fermi level pinning effect at the interface between metal and n-type Ge strongly restricts the performance of Ge device on Si substrate. In this paper, the contacts of metal Al and Ni with n-type Ge and p-type Ge epitaxial layers grown by UHV/CVD are comparatively studied. It is found that the contact of NiGe/n-Ge is better than that of Al/n-Ge at the same dopant concentration. When the concentration of P is $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, the ohmic contact of NiGe/n-Ge with ρ_c down to $1.43 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ is demomstrated, which is about one order of magnitude lower than that of Al/n-Ge contact. The specific contact resistance of NiGe/p-Ge is $1.68 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ when the B concentration is $4.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, corresponding to that of Al/p-Ge. Compared with Al/n-Ge contact, P segregation at the interface between NiGe and Ge, rather than lowering Schottky barrier height, is the main reseason for achieving the low specific contact resistance. NiGe/Ge contact should be a good choice for contact electrode for Ge devices at present.

Keywords: metal/Ge contact, NiGe, specific contact resistance

PACS: 73.40.Cg, 61.82.Bg

DOI: 10.7498/aps.62.167304

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2012CB933503, 2013CB632103), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61036003, 61176092), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. 2010121056).

[†] Corresponding author. E-mail: lich@xmu.edu.cn