

## Si 基 Ge 波导光电探测器的制备和特性研究\*

陈荔群<sup>1</sup>\*, 周志文<sup>2</sup>, 李成<sup>2</sup>, 赖虹凯<sup>2</sup>, 陈松岩<sup>2</sup>

(1. 集美大学诚毅学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门大学物理系, 半导体光子学研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:**以外延 Ge 薄膜为吸收区, 在 Si 基上制备了 Ge 波导光电探测器。利用超高真空化学汽相沉积 (UHV/CVD) 设备, 采取低温高温两步法, 在 Si(100) 衬底上外延出厚度约为 500 nm 的高质量纯 Ge 层。探测器采用脊型波导结构, Al 电极分别制作在波导的台面上下形成背对背肖特基结。I-V 特性测试表明, 在 -1 V 偏压下, 暗电流密度为 0.2 mA/cm<sup>2</sup>。由于 Si 与 Ge 热失配引起外延的 Ge 薄膜受到 0.2% 张应变, 减小了 Ge 带隙, 光响应波长范围扩展到 1.60 μm 以上。在 70 mW、1.55 μm 入射光照射下, 测得光电流比暗电流高出近 1 个数量级。

**关键词:** Ge; 波导; 光电探测器**中图分类号:** TN304 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2009)08-1012-04

## Fabrication and characteristics of Si-based Ge waveguide photodetectors

CHEN Li-qun<sup>1</sup>\*, ZHOU Zhi-wen<sup>2</sup>, LI Cheng<sup>2</sup>, LAI Hong-kai<sup>2</sup>, CHEN Song-yan<sup>2</sup>

(1. Cheng yi College Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Semiconductor Photonics Research Center, Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A Si-based Ge waveguide photodetector was fabricated and characterized. High-quality tensile strained Ge layer (about 500nm) was epitaxially grown on a Si(100) substrate by low- and high-temperature two-step growth method in ultrahigh vacuum chemical vapor deposition. Two metal-germanium schottky junctions on and under the waveguide were fabricated to form metal-germanium-metal photodetector and the dark current density of 0.2 mA/cm<sup>2</sup> at the bias of -1 V is obtained. The photocurrent response in the wavelength range expands to 1.6 μm due to the 0.2% tensile strain in the Ge layer and the photocurrent is higher in one order magnitude than the dark current at 1.55 μm.

**Key words:** germanium; waveguide; photodetector

## 1 引言

高速率、高响应度、低漏电流和响应波长在 1.30 ~ 1.55 μm 的近红外光电探测器及其集成化的单片接收机是光通信系统的重要元件之一。SiGe 材料和现有成熟的 Si 工艺完全兼容, 通过优化生长条件, 可以使其带隙扩展到光通讯波段, 特别是纯 Ge 材料在近红外的吸收远大于 SiGe 材料, 禁带宽度可达到 0.66 eV, 响应波长可以延伸到 1.60 μm, 而且 Ge 比 Si 的迁移率大, 相应电子器件的响应速度大, 因此研究 Si 基外延纯 Ge 探测器引起人们的极大关注。

然而, 由于 Si 和 Ge 的晶格失配较大, 直接在 Si 衬底上外延 Ge 会引入大量的失配位错, 并且表面起伏严重, 会严重降低器件的性能, 因此提出在 Si 基上外延缓冲层以获得高质量的 Ge 薄膜。常用的一种方法<sup>[1]</sup>是利用 Ge 组分渐变弛豫缓冲层技术, 但是这种方法的缓冲层的厚度大, 耗时长, 表面粗糙度高, 不能完全满足器件制作。Luo 等<sup>[2]</sup>提出了两层组分跳变的

SiGe 缓冲层的方法, 1 μm 厚的 Ge 外延层位错密度为  $6 \times 10^6$  cm<sup>-2</sup>, 表面粗糙度为 3.2 nm。或采用低温 Ge 做缓冲层, 直接在低温 Ge 上外延高温 Ge, 然后用高低温循环退火的方法得到纯 Ge 层, 该方法将位错压制在低温层内, 使得有源区位错密度降低。Nakatsuru 等人<sup>[3,4]</sup>在超薄 SiGe 缓冲层上采用低温高温两步法生长了高质量的 Ge, 即使没有对样品进行退火处理, 也得到较低的位错密度 ( $6 \times 10^6$  cm<sup>-2</sup>)。

为了提高器件的性能, 在器件结构选择上, Huang 等<sup>[5]</sup>采用两层组分跳变 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 缓冲层的方法, 生长 Ge 层厚度为 2.5 μm, 制得的 PIN 结构探测器入射光采用背入射, -2 V 偏压下的暗电流为 12 mA/cm<sup>2</sup>, 1.30 μm 波长的响应度为 0.57 A/W, -10 V 偏压下的 3 dB 宽带达到了 8 GHz。Olufemi 等<sup>[6]</sup>在 SOI 衬底上以低温 Ge 作为缓冲层, 生长了厚为 1.45 μm 的 Ge 高质量层, 制得的 RCE 探测器, 在 1540 nm 波长、-3 V 偏压下, 响应度达到 0.73 A/W, 外量子效率为 59%, 3 dB 带宽最

\* 收稿日期: 2008-12-19 修订日期: 2009-03-30

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60676027); 国家重点基础研究发展计划“973”资助项目 (2007CB613404); 国家自然科学基金委重点基金资助项目 (60837001); 福建省重点科技资助项目 (2006H0036)

\* \* E-mail: clq2113@163.com

大可以达到 12.8 GHz。Rouvière 等<sup>[7]</sup>采取 MSM 结构, - 2 V 偏压下的 3 dB 宽带最高达到 35 GHz; Vivien 等<sup>[8]</sup>在 SOI 脊型波导后嵌入一 Ge MSM 探测器, 在 - 6 V 偏压下, 波长为 1.55 μm 的响应度为 1 A/W, 3 dB 宽带可达到 25 GHz。

虽然在 Si 基 Ge 探测器的研制取得了一定的成功, 但是对 Si/Ge 大失配材料系的外延生长仍然存在着较大的困难。本文在冷壁超高真空化学淀积 (UHV/CVD) 系统上, 采用 SiGe 层和低温 Ge 相结合的薄弛豫缓冲层生长技术, 在 Si 衬底上成功外延出低位错密度 Ge 层。器件采用波导结构, 其 - 1 V 偏压下的暗电流为  $1.1 \times 10^{-7}$  A, 零偏压下的光响应波长范围扩展到 1.60 μm 以上。1.55 μm 入射光照射下的光电流较暗电流高出近 1 个数量级。

## 2 Ge 材料生长和器件制作

采用 UHV/CVD 系统在 Si 基上外延 Ge 薄膜<sup>[9,10]</sup>。生长过程为: 10 mm P 型 Si (100) 衬底 (电阻率为 12 ~ 18 Ω·cm) 经过标准 RCA 清洗后传入生长室, 加热衬底到 850 °C 保持 30 min, 去除衬底 O 等形成清洁的生长表面。脱 O 完成后先在 750 °C 生长 300 nm Si 缓冲层; 再把温度降低到 450 °C 生长 80 min Si<sub>0.9</sub>Ge<sub>0.1</sub> 缓冲层, 然后将温度降低到 350 °C 生长 4 h 低温 Ge 层。生长完低温 Ge 层, 将温度升高到 600 °C, 继续生长 4.5 h 高温 Ge 层。

材料分别采用 X 射线双晶衍射 (XRD) 和原子力显微镜 (AFM) 进行了表征<sup>[9,10]</sup>。在 XRD 曲线上观察到 Si 衬底峰, 低温 SiGe 层和外延 Ge 层的衍射峰, 得出 Ge 层受到 0.2% 张应变, 使 Ge 的直接带隙缩小到 0.78 eV, Ge 的吸收系数在长波段因此得到增强, 光响应波长范围扩展到 1.60 μm 以上。AFM 测试了 Ge 层表面形貌, 不同区域测得的表面粗糙度均为 0.9 nm, 完全满足器件制作的要求。

Si 基 Ge 波导探测器的截面示意图和芯片实物顶视图如图 1 所示, 其结构包括在 Si 衬底上制作以 Ge 材料作为吸收区的脊型波导, 波导长度为 170 μm, Al 电极分别制作在波导的台面上, 上下形成背对背肖特基结。主要工艺过程包括: 1) 光刻有源区台面, 刻蚀台面; 2) 淀积 SiO<sub>2</sub> 作为绝缘层; 3) 光刻并腐蚀引线孔, 用磁控溅射机淀积 Al 层, 光刻并腐蚀 Al 形成电极。

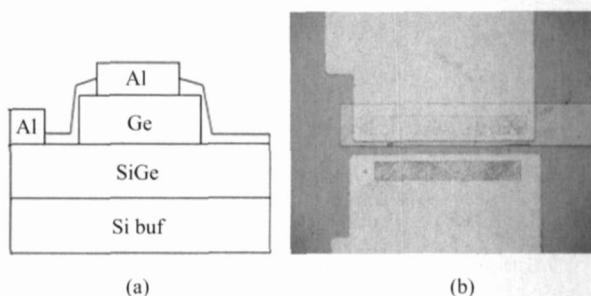


图 1 (a) 光电探测器截面图;

(b) Si 基 Ge 波导探测器实物芯片顶视图

Fig. 1 (a) Schematic cross section of the waveguide photodetector;

(b) Photograph of fabricated waveguide photodetector

## 3 暗电流测试

对波导探测器的  $I-V$  特性进行了分析, 器件的暗电流如图

2 所示。- 1 V 偏压下的暗电流为  $1.1 \times 10^{-7}$  A, 台面尺寸为 150 μm × 400 μm, 暗电流密度为 0.2 mA/cm<sup>2</sup>, 比已报道用其他外延方法制备的 Si 基 Ge 探测器的最小暗电流密度 1.5 ~ 2.0 mA/cm<sup>2</sup> 要小, 表明外延的 Ge 材料质量较好, 但与 III-V 族材料制作的 μA 量级的探测器相比, 暗电流还是偏大。

分析暗电流较大的主要原因主要有: 1) 生长的 Ge 材料的禁带宽度仅为 0.78 eV, 同 Al 形成的金属半导体接触的肖特基势垒较低, 加上外延的 Ge 材料为 P 型, 其费米能级更低, 导致功函数变大因此接触势垒更小, 使得热激发载流子越过势垒相对较多形成较大暗电流。为了减少暗电流, 在生长 Ge 最外层最好覆盖薄的 Si 层, 且为了与 Ge 有良好的接触, 需要应用合适的电极; 2) Ge 探测器没有好的氧化保护层, 导致器件的漏电流较大, 影响制备高性能探测器的要求; 3) 器件的暗电流的大小还和本征区的掺杂浓度、本征区的厚度尤其是吸收区的厚度、材料的质量相关, 材料的缺陷越少, 暗电流也越小, 还和表面的漏电流相关。

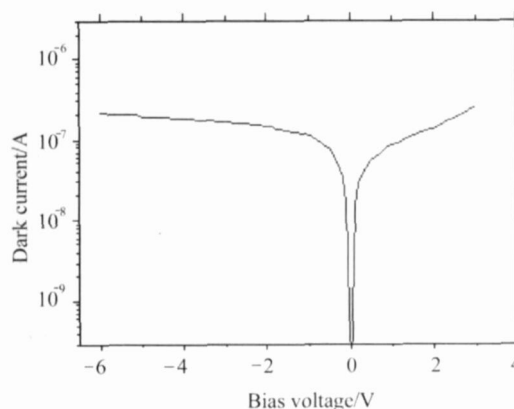


图 2 Ge 探测器的  $I-V$  曲线图

Fig. 2 Current-voltage characteristics of Ge photodetector

## 4 探测器光电响应的测试

探测器的光电响应谱是采用溴钨灯光源系统。从溴钨灯光源发出的光入射到单色仪, 经过单色仪的分光作用, 输出波长可调的单色光入射到斩波器形成调制光, 然后入射到透镜组合系统, 最后到待测器件。信号经过锁相放大器后由 NCL 数据采集系统采集, 并在计算机上记录下数据。由于实验中锁相放大器采集光电流时噪声很大, 因此改用采集光电压法, 即在器件的旁边串联一电阻, 阻值为 100 kΩ。

波导探测器的光响应谱如图 3 所示, 可以看出, 由于 Ge 材料存在 0.2% 的张应力, 光响应波长范围扩展到 1.60 μm 以上。这是因为 Ge 的热膨胀系数比 Si 大, 从生长时的高温冷却到室温, 在 Ge 层中产生了张应力, 当张应力  $\epsilon = 0.2\%$  时, Ge 的直接带隙将从 0.8 eV 缩小到 0.77 eV<sup>[11]</sup>。应力会引起能带结构发生变化, 使直接带隙变小, 截止波长向长波长延伸。从图还可以看出, 在波长大于 1.55 μm 即能量小于直接带隙能量  $E_g^0 = 0.802$  eV 时, 曲线迅速下滑, 说明在波长大于 1.55 μm 波段, Ge 材料的吸收很小。

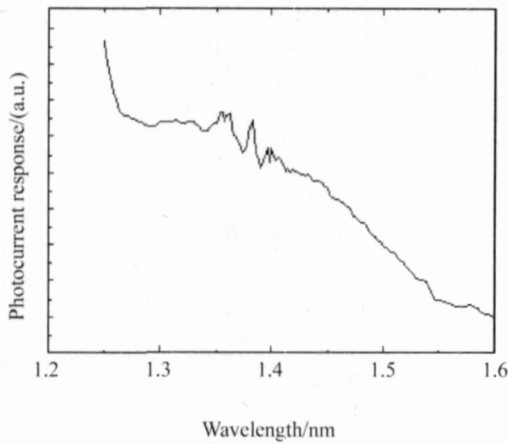


图3 0偏压下 Ge 波导探测器的光电响应谱  
Fig.3 The photocurrent response of photodetector under reverse bias of 0 V

为了测量绝对光响应度,采用波长为 1.55 μm 激光器作为光源,最大功率可达到 250 mW。激光经过多模光纤从器件侧面入射,通过测量光电压的方法间接测量光电流,所加电阻 R 的阻值为 100 k。测试的方法为:在激光特定光功率下,测试光照和未光照时在不同电压下电阻两端的电压 V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>,则光电流  $I = (V_2 - V_1) / R$ 。

图4为波导探测器在 1.55 μm 波长处光电流和输入功率间的关系,随着外加偏压的增大,入射功率越大产生的光电流也越大。从图还可以看出,随着电压的变大,曲线的斜率也越大,说明最大不饱和光功率越大。

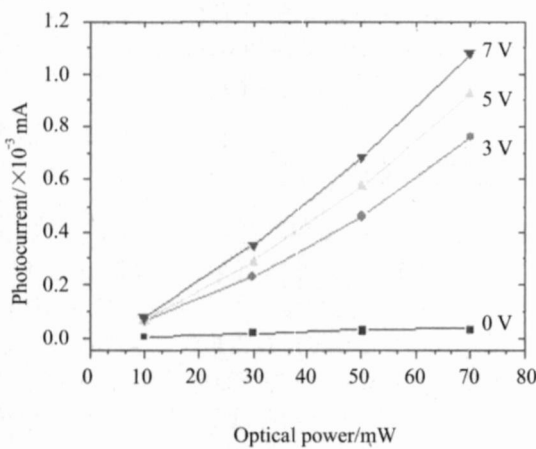


图4 1.55 μm 的不同偏压下,波导探测器的光电流与输入功率间的关系  
Fig.4 Photocurrent vs the input power of 1.55 μm at various reverse bias

图5为光电流与暗电流的比较图,从图可以看出,光电流的数值比暗电流的数值大,说明器件在波长为 1.55 μm 范围的光是有响应的,在入射光功率为 70 mW 时,光电流较暗电流高

出近一个数量级。由于在波导和光纤的直接耦合中,波导探测器的进光面积较小,只有 30 μm × 0.5 μm,而光纤的纤芯约为 100 μm,面积失配较大,即使光照射在最佳位置时耦合效率也非常低,导致测得的器件的光响应度偏小。下一步工作需改进波导耦合结构和测试条件,以获得理想的外量子效率。

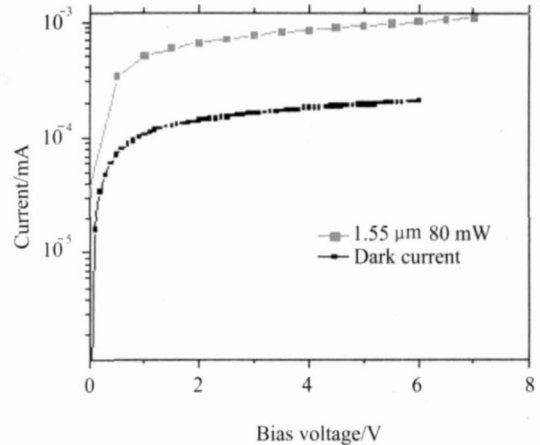


图5 在入射光波长 1.55 μm 时,光电流的响应  
Fig.5 Photocurrent of the photodetector at 1.55 μm The dark current is also plotted for comparison

## 5 结论

报道了基于 UHV/CVD 设备生长的 Si 基外延 Ge 材料制作的 Ge 波导探测器, - 1 V 偏压下的暗电流密度达到 0.2 mA/cm<sup>2</sup>。由于在外延 Ge 材料引入 0.2% 的张应力,使得零偏压下的光响应波长范围扩展到 1.60 μm 以上。在 70 mW、1.55 μm 入射光照射下,光电流较暗电流高出近 1 个数量级。

## 参考文献:

- [1] Oh J, Campbell J C, Thomas S G, et al. Interdigitated Ge p-i-n photodetectors fabricated on a Si substrate using graded SiGe buffer layers [J]. IEEE Quantum Electron, 2002, 38(9): 1238-1241.
- [2] Luo G, Yang T H, Chang E Y, et al. Growth of high quality Ge epitaxial layers on Si (100) [J]. Jpn J Appl Phys Part 1, 2003, 42: 517-519.
- [3] Nakatsuru J, Date H, Mashiro S, et al. Growth of high quality Ge epitaxial layer on Si(100) substrate using ultra thin Si<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub> buffer [J]. Mater Res Soc Symp Proc, 2006, 891: EB07-24. 1-24. 6.
- [4] Loh T H, Nguyen H S, Ting C H, et al. Ultrathin low temperature SiGe buffer for the growth of high quality Ge epilayer on Si(100) by ultra-high vacuum chemical vapor deposition [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(9): 092108-1-3.
- [5] Huang Z H, Oh J, Campbell J C. Back-side-illuminated high speed Ge photodetector fabricated on Si substrate using thin SiGe buffer layers [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(15): 3286-3288.
- [6] Dosunmu O I, Cannon D D, Emsley M K, et al. High speed resonant

- cavity enhanced Ge photodetectors on reflecting Si substrates for 1550-nm operation[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2005, **17**(1):175-177.
- [7] Rouvière M, Vivien L, Roux XL, et al. Ultrahigh speed germanium-on-silicon photodetectors for 1.31 and 1.55  $\mu\text{m}$  operation [J]. Appl Phys Lett, 2005, **87**(23):231109-3.
- [8] Vivien L, Rouvière M, Fauchard J M, et al. High speed and high responsivity germanium photodetector integrated in a silicon-on-insulator microwaveguide[J]. Opt Express, 2007, **15**(15):9843-9848.
- [9] Zhou Z W, Li C, Lai H K, et al. The influence of low-temperature Ge seed layer on growth of high-quality Ge epilayer on Si(100) by ultrahigh vacuum chemical vapor deposition[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, **310**:2508-2513.
- [10] CAI Zhi-meng, ZHOU Zhi-wen, LI Cheng, et al. Characteristics of Si-based metal-germanium-metal photodetectors[J]. Journal of Optoelectronics · Laser(光电子 · 激光), 2008, **19**(5):587-590. (in Chinese)
- [11] Ishikawa Y, Wada K, Liu J F, et al. Strain-induced enhancement of near-infrared absorption in Ge epitaxial layers grown on Si substrate [J]. Journal of Applied Physics, 2005, **98**(1):013501-1-9.

作者简介:

陈荔群 (1981 - ), 女, 硕士, 助教, 主要从事新型 Si 基外延材料的生长和光电子器件的研制.