

高性能 SOI 基 Ge PIN 波导光电探测器的制备及 特性研究

王尘 许怡红 李成 林海军

Fabrication and characteristics of high performance SOI-based Ge PIN waveguide photodetector

Wang Chen Xu Yi-Hong Li Cheng Lin Hai-Jun

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica, 66, 198502 \(2017\)](#) DOI: 10.7498/aps.66.198502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.198502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

工艺偏差下 PMOS 器件的负偏置温度不稳定效应分布特性

Distribution characteristic of p-channel metal-oxide-semiconductor negative bias temperature instability effect under process variations

物理学报.2016, 65(16): 168502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.168502>

纳米静态随机存储器低能质子单粒子翻转敏感性研究

Single event upsets sensitivity of low energy proton in nanometer static random access memory

物理学报.2016, 65(6): 068501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.068501>

(100)Si 基应变 p 型金属氧化物半导体 [110] 晶向电导率有效质量双椭球模型

Double ellipsoid model for conductivity effective mass along [110] orientation in (100) Si-based strained p-channel metal-oxide-semiconductor

物理学报.2016, 65(1): 018501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.018501>

压应变 $\text{Ge}/(001)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 空穴散射与迁移率模型

Hole scattering and mobility in compressively strained $\text{Ge}/(001)\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

物理学报.2015, 64(3): 038501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.038501>

堆叠栅介质对称双栅单 Halo 应变 Si 金属氧化物半导体场效应管二维模型

Two-dimensional model of symmetrical double-gate strained Si single Halo metal-oxide semiconductor field effect transistor with gate stack dielectric

物理学报.2014, 63(24): 248502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.248502>

高性能SOI基Ge PIN波导光电探测器的制备及特性研究*

王尘^{1)†} 许怡红²⁾ 李成³⁾ 林海军¹⁾

1)(厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建省光电技术与器件重点实验室, 厦门 361024)

2)(厦门工学院电子信息工程系, 厦门 361024)

3)(厦门大学物理系, 半导体光子学研究中心, 厦门 361005)

(2017年4月15日收到; 2017年6月14日收到修改稿)

本文报道了在SOI衬底上外延高质量单晶Ge薄膜并制备高性能不同尺寸Ge PIN波导光电探测器。通过采用原子力显微镜、X射线衍射、拉曼散射光谱表征外延Ge薄膜的表面形貌、晶体质量以及应变参数, 结果显示外延Ge薄膜中存在约0.2%左右的张应变, 且表面平整, 粗糙度为1.12 nm。此外, 通过暗电流、光响应度以及3 dB带宽的测试来研究波导探测器的性能, 结果表明尺寸为4 μm × 20 μm波导探测器在-1 V的反向偏压下暗电流密度低至75 mA/cm², 在1.55 μm波长处的响应度为0.58 A/W, 在-2 V的反向偏压下的3 dB带宽为5.5 GHz。

关键词: 外延, 锗, 波导, 光电探测器

PACS: 85.30.De, 85.60.Gz, 81.15.Gh

DOI: 10.7498/aps.66.198502

1 引言

高响应度、高响应速度、低暗电流, 响应波长在通信波段1.3—1.55 μm的近红外光电探测器是实现光互连芯片的重要组成部分。锗(Ge)由于其禁带宽度为0.66 eV, 在光纤通信波段有较大的吸收系数, 且具有比Si具有更大的电子和空穴迁移率, 相应电子器件的响应速度大, 同时其制备技术和标准的互补金属氧化物半导体工艺兼容等特点, 被视为制备片上光互连所需光电探测器的最好候选材料^[1-3], 在硅基光电集成中有着广泛的应用前景。

传统的垂直入射型Ge光电探测器由于入射光的传播和吸收方向与载流子的输运方向相同, 一方面, 要获得大的响应度就需要增大Ge吸收层的厚度, 另一方面, 响应速度却与吸收层厚度成反比, 两者相互制约使得垂直入射器件结构难以同时满足

高量子效率与高响应速度性能要求^[4,5]。相比之下, 波导型Ge探测器由于入射光的传播和吸收沿着波导方向, 而载流子的输运方向则与之相垂直, 将光电探测器的响应度和响应速度解耦合, 在保持吸收区厚度的前提下, 可以通过增加吸收长度提高器件的响应度, 从而有效提高器件的整体性能。由于以上Ge波导型探测器的优越性, 在实现高性能探测器及光电集成方面具有极其重要的作用, 近年来受到人们的广泛关注, 并取得了一定的成果。如欧洲微电子研究中心^[6]在SOI衬底上制备了160 nm超薄Ge波导探测器, 其在-1 V时带宽为67 GHz, 响应度为0.74 A/W; 新加坡微电子研究所^[7]在-5 V时倏逝耦合Ge波导探测器的带宽达到5.5 GHz, 响应度在0.29 A/W; Vivien等^[8]设计了脊型波导垂直端面耦合Ge光电探测器, 在1.55 μm下获得了42 GHz带宽及1 A/W的响应度。此外, Feng等^[9]设计和制备了脊型波导侧向端面耦合Ge光电探测

* 厦门理工学院2016年上半年校高层次人才科技类项目(批准号: YKJ16012R)资助的课题。

† 通信作者。E-mail: chenwang@xmut.edu.cn

器, 在 -1 V 的反向偏压下, 暗电流低至 $1.3 \mu\text{A}$, 同时该偏压下的带宽超过 32 GHz , 响应度在 1 A/W 以上.

本文在冷壁式超高真空化学淀积 (UHV/CVD) 系统上, 采用低温Ge缓冲层生长技术, 在高浓度n型掺杂的SOI衬底上成功外延出高质量的Ge薄膜, 而后对外延Ge材料进行了 BF_2^+ 离子注入, 形成p型Ge层, 再经过一系列的器件工艺后制备得到SOI基Ge PIN波导型探测器, 结果表明

尺寸为 $4 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 波导探测器在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的响应度为 0.58 A/W , 在 -1 V 的反向偏压下暗电流密度低至 75 mA/cm^2 , 在 -2 V 的反向偏压下的 3 dB 带宽为 5.5 GHz . 将我们小组制备得到的Ge PIN波导光电探测器与文献报道结果进行器件性能对比, 结果如表1所列, 结果表明本文制备的Ge波导型光电探测器的暗电流密度、响应度以及带宽与其他文献报道结果接近, 具有较高的性能.

表1 本文制备的Ge PIN波导光电探测器与文献报道的器件性能对比

Table 1. A comparison of the performance of our Ge PIN waveguide photodetector with those from other groups.

倏逝波耦合	文献[7]	文献[10]	文献[11]	文献[12]	本文
尺寸/ μm^2	4.4×80	4×10	3.5×200	1.6×10	4×20
Ge层厚度/ μm	0.145	0.5	0.92	0.5	0.75
暗电流密度 (-1 V)	125 mA/cm^2	175 mA/cm^2	85 mA/cm^2	415 mA/cm^2	75 mA/cm^2
1.55 μm 处响应度	0.29 A/W	0.84 A/W	0.7 A/W	non	0.58 A/W
3-dB 带宽 (-1 V)	4.4 GHz	4.58 GHz	6 GHz	20 GHz	4.3 GHz

2 实验

本文制备的样品是利用UHV/CVD系统在SOI基上外延Ge薄膜^[13]. 系统的本底真空度可达 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa}$, 配有高能电子衍射仪原位实时观测生长过程, 生长气源为高纯 GeV_4 . 具体的生长流程为: 首先在经过RCA标准清洗后的SOI衬底(衬底顶层Si厚340 nm, BOX埋层为2 μm)上通过固体源将P原子扩散至340 nm的顶层Si中形成约200 nm的n⁺-Si重掺杂层, 而后传入UHV/CVD系统生长室中, 采取低温Ge缓冲层技术(低温330 °C/高温600 °C)外延生长750 nm的本征Ge层, 得到如图1(a)所示结构的外延Ge材料, 并采用原子力显微镜(AFM)对外延Ge薄膜进行了表征, 如图1(b)所示, 为外延Ge材料AFM的表面形貌及3D照片, 扫描范围为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, 材料表面平整, 粗糙度(RMS)仅为1.12 nm, 满足器件制作的需要. 随后, 用X射线双晶衍射(XRD)和拉曼散射谱(Raman)来表征外延Ge层的晶体质量及应变情况, 测试曲线如图1(c)和图1(d)所示. 从XRD曲线得到Ge衍射峰半高宽低至260.64, 峰形对称, 无明显的Si-Ge互扩散, 说明采用低温Ge缓

冲层技术外延的Ge薄膜具有良好的晶体质量, 并根据XRD应变计算公式求得外延Ge层张应变大小约0.18%. 此外, 根据拉曼散射光谱, 通过高斯拟合得到Ge-Ge模峰位为299.8, 而拉曼频移与应变的关系为 $\omega (\text{cm}^{-1}) = 300.6 - 400 \cdot \varepsilon_{//}$, 计算得到外延Ge层中的张应变为0.2%, 与XRD测试结果相近. 随后, 对外延Ge薄膜在能量为30 keV、剂量为 $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 下进行 BF_2^+ 离子注入, 再对离子注入样品进行了400 °C-10 min的低温预退火, 拟初步修复离子注入损伤, 减小高温退火过程中的杂质扩散以及杂质损失, 从而提高Ge的掺杂浓度^[13]. 样品经过低温预退火后, 再在600 °C下退火30 s, 进一步修复注入损伤同时激活杂质离子, 最终形成SOI基Ge PIN结构材料.

在SOI衬底上完成材料生长和PIN结构的形成等探测器材料的准备工作后, 通过一系列的器件制备工艺步骤如清洗、光刻、刻蚀、溅射、剥离等工艺流程, 工艺过程中全部采用Al作金属电极, 最终完成SOI基Ge波导探测器的制备, 器件截面示意图以及扫描电子显微镜图(SEM), 如图2所示, 在传输波导中Ge层并未腐蚀掉, 光纤中的光直接对准器件横截面, 耦合进入Si波导和Ge层中.

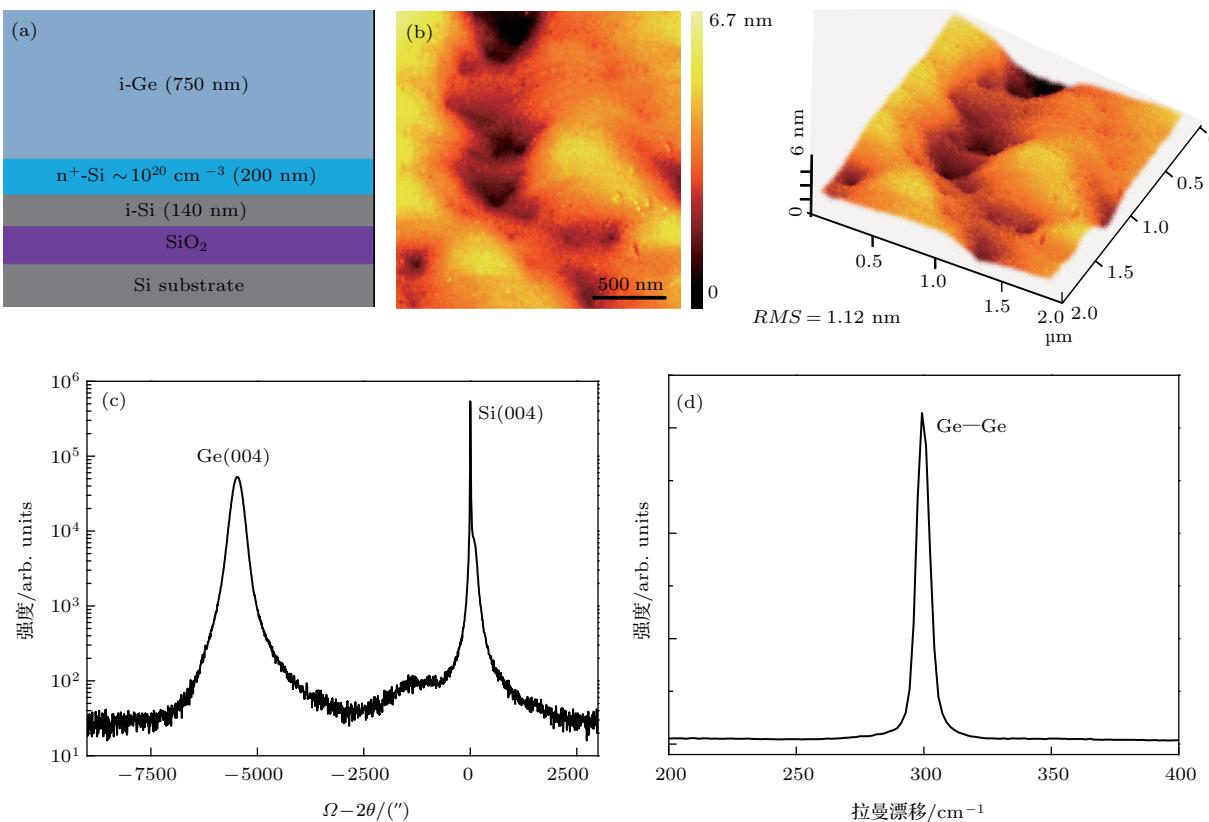


图1 (网刊彩色) SOI基Ge外延薄膜 (a) 横截面示意图; (b) AFM 表面形貌图及3D图; (c) XRD 摆摆曲线; (d) 拉曼散射光谱曲线

Fig. 1. (color online) SOI based epitaxial Ge film: (a) A schematic diagram; (b) AFM surface and 3D images; (c) XRD pattern; (d) Raman scattering spectra.

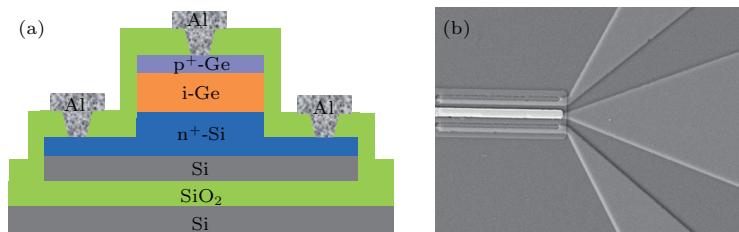


图2 (网刊彩色) SOI基Ge PIN波导光电探测器 (a) 横截面示意图; (b) SEM扫描图

Fig. 2. (color online) SOI based Ge PIN waveguide photodetector (WG-PD): (a) A schematic diagram of the device structure; (b) the SEM image of the WG-PD.

3 结果与讨论

用 keithley 4200 半导体参数测试系统对不同尺寸大小的 SOI 基 Ge 波导探测器进行 $I-V$ 特性曲线的测试, 结果如图 3 所示, 探测器有源区台面宽度为 $4 \mu\text{m}$, 长度分别为 $20, 50, 80$ 和 $100 \mu\text{m}$. 从图 3 看到, 尺寸为 $4 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 器件的暗电流最小, 低至 $6 \times 10^{-8} \text{ A}$, 对应暗电流密度为 75 mA/cm^2 . 探测器暗电流随台面长度的增大而增大, 且暗电流还随着反向电压的增大而持续增加, 不易饱和, 这

是因为 Ge 探测器 PIN 结构中包含了位错密度高的低温 Ge 缓冲层, 且材料表面进行了离子注入后产生晶格损伤和缺陷经过退火激活杂质离子后并没有得到完全修复, 这些位错和缺陷提供载流子的复合中心, 导致器件暗电流随反向偏压的增加而持续增大. 另外, 通过 $I-V$ 特性曲线, 计算得到波导探测器的 PN 结的理想因子在 $1.4-1.6$ 之间, 说明暗电流中复合电流占的比重较大^[10,14,15], 进一步说明了器件有源区中存在着较多的复合中心, 为了降低暗电流大小, 提高 Ge 有源层的晶体质量, 可通过采用其他先进的生长技术以及退火技术来实现^[16].

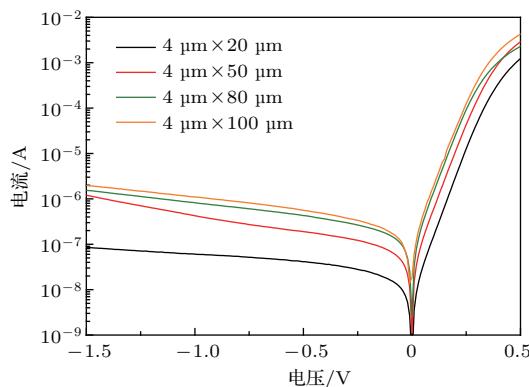


图3 (网刊彩色) 不同尺寸SOI基Ge波导光电探测器的暗电流电压特性曲线

Fig. 3. (color online) The dark-current-voltage characteristics of SOI based Ge PIN waveguide photodetectors with different sizes.

探测器光响应度的测试设备包括半导体参数分析器、探测台以及1550 nm波长激光器。1550 nm的单色激光通过单模光纤直接耦合到Ge波导中，被Ge层吸收，产生光电流。测试用的激光功率为24.7 μW，如图4(a)所示为有源区尺寸分别为4 μm × 20 μm和4 μm × 50 μm的Ge波导探测器光照前后I-V特性曲线，可以看到两个探测器的光电流在0 V时都已经达到饱和，说明在内建电场的作用下，光生载流子完全被收集，进一步加大反向电压光电流并不会随之增大。不考虑入射光反射及耦合的损耗，它们的光电流分别为14.3 μA和18.8 μA，对应计算得到的光响应度R大小为0.58 A/W和0.76 A/W，探测器波导长度越长，对光的吸收越充分，光响应度越高。此外，量子效率 η 与光响应度密切相关，它是表征二极管将入射光信号转化成电信号的能力的物理量，可由公式 $R = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda(\mu\text{m})}{1.24}$ A/W求得，式中R为光响应度，q为电子电量，h为普朗克常数， I_{ph} 为光电流， P_{opt} 为入射光功率，最终计算得到两种尺寸对应的量子效率 η 分别为46.4%和60.8%。随后，对有源区尺寸为4 μm × 20 μm的Ge波导探测器在1.55 μm波长光照下的频率响应进行了测试，如图4(b)所示。当探测器加-1 V的反向偏压时，器件的3 dB带宽为4.3 GHz，继续加大电压至-2 V，带宽升至5.5 GHz。说明在-1 V的反向偏压下，不足以使光生载流子达到它的饱和漂移速率，随着反向偏压的增大，光生载流子漂移速率逐渐增大至饱和漂移速率，载流子漂移渡越时间减小，由漂移时

间决定的器件频率增大，器件的总3 dB带宽增大。然而，通过理论计算^[10,17,18]可得4 μm × 20 μm的Ge波导探测器的3-dB带宽能达到40 GHz，实际测试得到的值远低于理论值。其原因主要归结为以下两方面：一方面，制备器件材料中包含了高位错密度的低温Ge缓冲层以及未修复的注入缺陷，这些位错及缺陷对光生载流子有俘获释放的过程，增加了载流子漂移至电极的时间；另一方面，Al和n⁺-Si以及p⁺-Ge欧姆接触的比接触电阻率较大，而电极接触面积较小，导致接触电阻较大，RC延时严重。对比其他文献报道结果^[7,10–12,19]，综合考虑器件各方面性能，我们制备得到的Ge PIN波导探测器的性能较高，可同时获得较低的暗电流、较高的响应度和带宽。此外，通过提高Ge薄膜的晶体质量、降低欧姆接触的比接触电阻率以及优化器件结构等，可进一步提高波导探测器的性能^[20]。

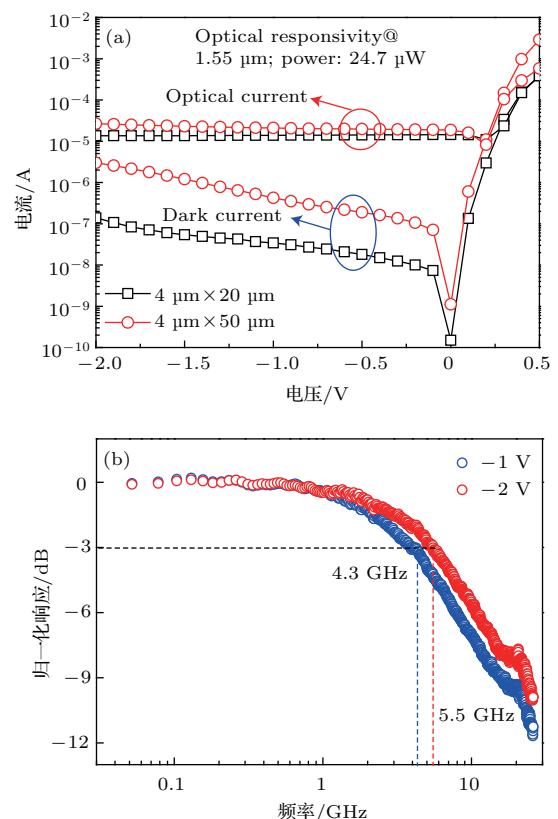


图4 (网刊彩色) 1.55 μm波长下(a)两种尺寸波导探测器的光电流响应；(b)尺寸为4 μm × 20 μm探测器的归一化频率响应

Fig. 4. (color online) (a) The current-voltage characteristics of the devices without illumination and with laser radiation; (b) normalized frequency responses at the wavelength 1.55 μm for the detector with a size of 4 μm × 20 μm.

4 结 论

本文利用UHV/CVD, 基于低温Ge缓冲层技术, 在n型掺杂的SOI衬底上外延生长了表面平整($RMS = 1.12$ nm)、具有0.2%的张应变Ge薄膜, 随后通过 BF_2^+ 离子注入及退火工艺形成PIN结构, 在此基础上经过一系列的器件工艺, 制备得到不同尺寸高性能SOI基Ge PIN波导光电探测器。波导探测器的性能通过测试暗电流、光电流响应度以及3 dB带宽来表征, 结果表明尺寸为 $4\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$ 波导探测器在-1 V的反向偏压下暗电流密度低至 75 mA/cm^2 , 在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波长处的响应度为 0.58 A/W , 在-2 V的反向偏压下的3 dB带宽为5.5 GHz。

参考文献

- [1] Jutzi M, Berroth M, Wöhl G, Oehme M, Kasper E 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1510
- [2] Dehlinger G, Koester S J, Schaub J D, Chu J O, Ouyang Q C, Grill A 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2547
- [3] Liu J, Cannon D D, Wada K, Ishikawa Y, Jongthammanurak S, Danielson D, Michel J, Kimerling L C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 011110
- [4] Wu Z, Wang C, Yan G M, Liu G Z, Li C, Huang W, Lai H K, Chen S Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 186105 (in Chinese) [吴政, 王尘, 严光明, 刘冠州, 李成, 黄巍, 赖虹凯, 陈松岩 2012 物理学报 **61** 186105]
- [5] Xue H Y, Xue C L, Cheng B W, Yu Y D, Wang Q M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1674
- [6] Chen H, Verheyen P, de Heyn P, Lepage G, de Coster J, Balakrishnan S, Absil P, Yao W, Shen L, Roelkens G, van Campenhout J 2016 *Opt. Express* **24** 4622
- [7] Wang J, Loh W Y, Chua K T, Zang H, Xiong Y Z, Loh T H, Yu M B, Lee S J, Lo G Q, Kwong D L 2008 *IEEE Electron Dev. Lett.* **29** 445
- [8] Vivien L, Osmond J, Fédié J M, Marras Morini D, Crozat P, Damilencourt J F, Cassan E, Lecunff Y, Laval S 2009 *Opt. Express* **17** 6252
- [9] Feng D, Liao S, Dong P, Feng N N, Liang H, Zheng D, Kung C C, Fong J, Shafihah R, Cunningham J, Krishnamoorthy A V, Asghari M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 261105
- [10] Li C, Xue C L, Li Y M, Li C B, Cheng B W, Wang Q M 2015 *Chin. Phys. B* **24** 038502
- [11] Feng N N, Dong P, Zheng D, Liao S, Liang H, Shafihah R, Feng D, Li G L, Cunningham J E, Krishnamoorthy A V, Asghari M 2010 *Opt. Express* **18** 96
- [12] Tu Z, Liu K, Yi H, Zhou R, Wang X, Zhou Z, Chen Z 2012 *Proc. SPIE* **8564** 85646
- [13] Chen C Z, Zheng Y Y, Huang S H, Li C, Lai H K, Chen S Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 078104 (in Chinese) [陈城钊, 郑元宇, 黄诗浩, 李成, 赖虹凯, 陈松岩 2012 物理学报 **61** 078104]
- [14] Wang C, Li C, Lin G Y, Lu W F, Wei J B, Huang W, Lai H K, Chen S Y, Di Z F, Zhang M 2014 *IEEE Trans. Electron Dev.* **61** 3060
- [15] Murakami Y, Shingyouji T 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 3548
- [16] Giovane L M, Luan H C, Agarwal A M, Kimerling L C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 541
- [17] Liu Z, Cheng B, Li Y M, Li C B, Xue C L, Wang Q M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 116804
- [18] Mitsuru T, Kiyohito M, Masakazu S, Yoshiaki N, Shinichi T 2012 *Opt. Express* **20** 8718
- [19] Feng N N, Liao S, Dong P, Zheng D, Liang H, Kung C C, Shafihah R, Feng D, Li G L, Cunningham John E, Krishnamoorthy A V, Asghari M 2010 *Proc. SPIE* **7607** 760704
- [20] Going R, Kim M, Wu M C 2013 *Opt. Express* **21** 22429

Fabrication and characteristics of high performance SOI-based Ge PIN waveguide photodetector*

Wang Chen^{1)†} Xu Yi-Hong²⁾ Li Cheng³⁾ Lin Hai-Jun¹⁾

1) (Fujian Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Devices, School of Opto-electronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

2) (Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361024, China)

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

(Received 15 April 2017; revised manuscript received 14 June 2017)

Abstract

Silicon-based photonics has aroused an increasing interest in the recent year, mainly for optical telecommunications or optical interconnects in microelectronic circuits. The waveguide photodetector is one of the building blocks needed for the implementation of fast silicon photonics integrated circuits. The main considerations for designing such a device are the bandwidth, the power consumption and the responsivity. Germanium is now considered as an ideal candidate for fully integrated receivers based on silicon-on-insulator (SOI) substrates and complementary metal oxide semiconductor (CMOS)-like process because of its large optical absorption coefficient at the wavelength for optical communication. Therefore, the study of high speed and high responsivity Ge waveguide photodetectors is necessary. In this paper, high concentration phosphor doped SOI substrate is achieved by using solid-state source diffusion at first. Secondly, the high quality epitaxial germanium (Ge) is grown on phosphor doped SOI substrate by using low temperature Ge buffer layer technique based on the UHV/CVD system. The surface profile, crystal quality and strain of epitaxial Ge film are characterized by using atomic force microscopy, X-ray diffraction (XRD), and Raman scattering spectrum. The results show that the Ge film has a smooth surface of 1.12 nm roughness and about 0.2% tensile strain, which is verified by XRD characterization result. Thirdly, ptype Ge region is formed by BF_2^+ implantation, and rapid thermal annealing to repair the implantation damages and activate impurity. Finally, the highperformance Ge PIN waveguide photodetectors with different sizes are fabricated by standard COMS technology. Moreover, the device performances, in terms of dark current versus voltage characteristics, photocurrent responsivity and 3 dB bandwidth, are well studied. The results show that the detector with a size of $4 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ demonstrates a dark current density of 75 mA/cm^2 at -1 V and a photocurrent responsivity of 0.58 A/W for $1.55 \mu\text{m}$ optical wavelength. In addition, an optical band width of 5.3 GHz at -2 V for $1.55 \mu\text{m}$ is also demonstrated, which is far below theoretical value of about 40 GHz . This can mainly be attributed to two aspects. On the one hand, Ge PIN structure contains low temperature Ge buffer layer, which has highdensity dislocation because of large lattice mismatch between Si and Ge. Those dislocations or defects can trap and release the photo-generated carrier, which increases the transit time. On the other hand, the contact characteristics of Al with n^+ -Si and p^+ -Ge are not very good, leading to a large contact resistance and RC delay. Through improving the above two aspects, the performance of Ge PIN waveguide photodetector will be further enhanced.

Keywords: epitaxy, germanium, waveguide, photodetector

PACS: 85.30.De, 85.60.Gz, 81.15.Gh

DOI: 10.7498/aps.66.198502

* Project supported by the High Level Talent Project of Xiamen University of Technology, China (Grant No. YKJ16012R).

† Corresponding author. E-mail: chenwang@xmut.edu.cn