

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学 号: 19820060153179

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

Si 基 SiGe、Ge 弛豫衬底生长及其

Ge 光电探测器研制

Epitaxy of Strain-relaxed SiGe, Ge Films and  
Fabrication of Ge Photodetectors on Si Substrates

周志文

指导教师姓名: 余金中 教授  
赖虹凯 副教授

专 业 名 称: 凝 聚 态 物 理

论文提交日期: 2009 年 月

论文答辩时间: 2009 年 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2009 年 6 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（）课题（组）的研究成果，获得（）课题（组）经费或实验室的资助，在（）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于     年    月    日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年    月    日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘要

硅基硅锗材料因其优越的性能，特别是与成熟硅微电子工艺相兼容，在硅基光电子器件如光电探测器、场效应晶体管等方面得到了广泛的应用，硅基硅锗薄膜生长及相关器件的研制引起了人们浓厚的兴趣。然而由于锗与硅的晶格失配度较大，在硅基上生长高质量硅锗和锗薄膜仍然是一个挑战性的课题，需要引入缓冲层技术。本论文采用低温缓冲层技术在 UHV/CVD 系统上生长出高质量硅基硅锗和锗弛豫衬底，并在此基础上研制出硅基长波长锗光电探测器。主要工作和研究成果如下：

为了促进外延层应变弛豫、改善表面形貌，我们提出了低温 Ge 量子点缓冲层制备 SiGe 弛豫衬底的技术。分析了低温 Ge 量子点缓冲层在调节应力、湮灭位错等方面的机理，系统地研究了低温 Ge 量子点缓冲层制备 SiGe 弛豫衬底的生长条件，制备出质量良好的  $\text{Si}_{0.72}\text{Ge}_{0.28}$  弛豫衬底。 $\text{Si}_{0.72}\text{Ge}_{0.28}$  外延层的厚度仅为 380 nm，弛豫度高达 99%，位错密度低于  $10^5 \text{ cm}^{-2}$ ，表面粗糙度小于 2 nm，表面无 Cross-hatch 形貌，具有良好的热稳定性。

系统地研究了低温 Ge 缓冲层的生长温度和厚度对高温 Ge 外延层表面形貌、应变弛豫等的影响和作用机理，探讨了低温 SiGe 和 Ge 双缓冲层对 Ge 外延层晶体质量改善的作用，优化了低温缓冲层生长条件，在 UHV/CVD 系统上生长出高质量 Si 基 Ge 薄膜。在硅衬底上制备的 400 nm-Ge 外延层表面无 Cross-hatch 形貌、表面粗糙度仅为 0.7 nm，X 射线衍射峰的峰形对称且峰值半高宽为 470 arc sec，化学腐蚀位错坑法测试位错密度为  $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 。

研究了高温 Ge 外延层中张应变的产生机理以及对能带结构的影响。张应变主要是由于 Ge 和 Si 热膨胀系数的不同在 Ge 外延层从高温冷却到室温的过程中产生的，实验测量张应变的大小和理论计算值相吻合。定量计算表明张应变每增加 0.1%，直接带隙将减小 14 meV。

设计并制备了正入射 Si 基长波长 Ge PIN 光电探测器。器件在 -1 V 偏压下的暗电流密度为  $20 \text{ mA/cm}^2$ ，在波长  $1.55 \mu\text{m}$  处 -2V 偏压下的响应度高达  $0.23 \text{ A/W}$ 。根据响应度计算 Si 基张应变的 Ge 外延层在  $1.55 \mu\text{m}$  处的吸收系数比体 Ge 材料提高了 3 倍，达到  $3000 \text{ cm}^{-1}$ 。采用 SOI 衬底 Ge 外延层制备的探测器观测到共振

增强效应。

关键词：低温缓冲层技术；硅锗弛豫衬底；锗薄膜；光电探测器

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

Si-based SiGe materials have been extensively applied in optoelectronic devices such as photodetectors and high mobility metal-oxide-semiconductor field effect transistors due to their advantageous properties, especially in compatibility with Si microelectronic processing. Si-based SiGe materials and their related devices have attracted great attention. However, it is a great challenge to directly deposit high-quality SiGe, especially Ge films on Si substrates due to the large lattice mismatch between Ge and Si. This thesis focuses on the growth of relaxed-SiGe and Ge virtual substrates (VSs) in ultra-high vacuum chemical vapor deposition (UHV/CVD) system using low temperature buffer technique and the fabrication of Si-based Ge photodetectors. The following are the details:

An approach for the growth of relaxed-SiGe VSs with low temperature Ge (LT-Ge) islands buffer was proposed and intensively studied. The role of LT-Ge islands buffer in the mechanism of strain adjustment and dislocation annihilation was analyzed. High-quality relaxed-Si<sub>0.72</sub>Ge<sub>0.28</sub> films were grown on Si(100) substrates in UHV/CVD system using LT-Ge islands buffers. Si<sub>0.72</sub>Ge<sub>0.28</sub> film with a thickness of only 380 nm has a strain relaxation degree of 99% and a threading dislocation density less than  $10^5 \text{ cm}^{-2}$ . No cross-hatch pattern is observed on the SiGe surface and the surface root-mean-square (rms) roughness is less than 2 nm. Annealing experiment indicated that SiGe films had great thermal stability.

The influence of growth temperature and thickness of LT-Ge buffers on the surface morphology and strain relaxation of epitaxial Ge (epi-Ge) films was systemically investigated, and the role of LT-SiGe and Ge double buffers to improve the quality of epi-Ge films was studied. High quality relaxed-Ge films were grown on Si(100) substrates in UHV/CVD system with optimized buffer layers. X-ray diffraction peak of 400 nm-Ge epitaxially deposited on Si substrate is symmetric with a full width at half maximum (FWHM) of 460 arc sec, the threading dislocation density is measured to be  $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$  using etching pits counting method. There is no

cross-hatch pattern on the Ge surface and the surface rms roughness is only 0.7 nm.

The origin of tensile strain in epi-Ge and its effect on the band structure was investigated. Tensile strain was developed when cooling down due to the difference in thermal expansion coefficients between Ge and Si. The experimental data for tensile strain agrees quite well with the theoretical calculation. Tensile strain leads to the direct band-gap shrinkage of epi-Ge at a rate of 140 meV per percent calculated based on deformation potential theory.

Normal-incident Si-based Ge PIN photodetectors were designed and fabricated. The dark current density is 20 mA/cm<sup>2</sup> at -1 V reverse bias. At wavelength 1.55 μm, the responsivity is 0.23 A/W at -2 V reverse bias. The absorption coefficient of tensile-strained epi-Ge at 1.55 μm is calculated to be 3000 cm<sup>-1</sup>, which is 3 times that of bulk Ge. Response spectrum of epi-Ge photodetector fabricated on Silicon-On-Insulator substrate shows strong resonant enhancement effect.

Keywords: Low temperature buffer technique; Relaxed-SiGe substrates; Ge films; Photodetectors



# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 研究背景和意义</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Si 基弛豫 SiGe 和 Ge 生长的研究进展</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 组份变化缓冲层技术 .....	2
1.2.2 低温缓冲层技术 .....	4
1.2.3 选区外延技术 .....	6
<b>1.3 Si 基 Ge 光电探测器的研究进展</b> .....	<b>7</b>
<b>1.4 本论文主要工作和结构安排</b> .....	<b>9</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>11</b>
<b>第二章 SiGe/Si 材料生长及表征方法</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1 超高真空化学气相沉积系统</b> .....	<b>18</b>
2.1.1 系统简介 .....	18
2.1.2 系统的特点 .....	21
<b>2.2 材料表征方法</b> .....	<b>21</b>
2.2.1 X 射线衍射 .....	21
2.2.2 拉曼散射谱 .....	23
2.2.3 原子力显微镜 .....	24
2.2.4 化学腐蚀位错坑 .....	25
<b>参考文献</b> .....	<b>27</b>
<b>第三章 低温 Ge 量子点缓冲层技术生长 <math>\text{Si}_{0.72}\text{Ge}_{0.28}</math> 弛豫衬底</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 低温 Ge 量子点缓冲层设计思想</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2 低温 Ge 量子点缓冲层技术制备 <math>\text{Si}_{0.72}\text{Ge}_{0.28}</math> 弛豫衬底</b> .....	<b>31</b>
3.2.1 生长与表征 .....	32
3.2.2 结果和讨论 .....	33
3.2.3 Ge 量子点的生长温度对 SiGe 弛豫衬底的影响 .....	38
3.2.4 退火对 SiGe 弛豫衬底的影响 .....	39

3.3 本章小结 .....	43
参考文献 .....	45
<b>第四章 低温 Ge 缓冲层技术生长 Si 基 Ge 薄膜.....</b>	<b>47</b>
4.1 低温 Ge 缓冲层技术.....	47
4.2 Ge/Si 生长及表征 .....	48
4.3 结果和讨论 .....	50
4.3.1 低温 Ge 缓冲层生长温度的优化.....	50
4.3.2 低温 Ge 缓冲层厚度对 Ge 外延层的影响 .....	57
4.3.3 低温 SiGe 层对 Ge 外延层的影响.....	59
4.4 Ge 外延层中的张应变.....	63
4.5 本章小结 .....	67
参考文献 .....	69
<b>第五章 Si 基 Ge 光电探测器研制.....</b>	<b>71</b>
5.1 光电探测器的基本理论 .....	71
5.1.1 光电探测器的工作原理.....	71
5.1.2 量子效率和响应度.....	73
5.1.3 响应时间和频率.....	74
5.1.4 暗电流和噪声.....	75
5.2 Si 基长波长光电探测器的优化设计 .....	76
5.2.1 吸收区材料选择.....	76
5.2.2 器件结构选择.....	78
5.2.3 量子效率优化设计.....	80
5.2.4 带宽优化设计.....	82
5.3 Si 基 Ge 光电探测器的制作 .....	83
5.3.1 Si 基 Ge 探测器材料外延.....	83
5.3.2 Si 基 Ge 探测器制作工艺.....	85
5.4 Si 基 Ge 光电探测器的测试结果与讨论 .....	88
5.4.1 测试设备.....	88
5.4.2 I-V 特性 .....	89

5.4.3 响应度和相对响应光谱.....	95
5.5 SOI 基 Ge 光电探测器.....	97
5.6 本章小结 .....	100
参考文献 .....	102
第六章 总结与展望 .....	104
附录 博士期间科研成果 .....	106
致 谢 .....	108

厦门大学博硕士论文摘要库

# Table of Contents

<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Motivation.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Review of progress in the epitaxy of relaxed-SiGe and Ge on Si.....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Compositionally graded SiGe buffers.....	2
1.2.2 Low temperature buffers.....	4
1.2.3 Growth on patterned substrates.....	4
<b>1.3 Review of progress in Si-based Ge photodetectors .....</b>	<b>7</b>
<b>1.4 Outline of the dissertation .....</b>	<b>9</b>
<b>References .....</b>	<b>11</b>
<b>Chapter 2 Growth and characterization of SiGe/Si .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Ultra-high vacuum chemical vapor deposition .....</b>	<b>18</b>
2.1.1 Introduction to UHV/CVD .....	18
2.1.2 Features of UHV/CVD .....	20
<b>2.2 Characterization .....</b>	<b>21</b>
2.2.1 X-ray diffraction .....	21
2.2.2 Raman scattering.....	23
2.2.3 Atomic force microscopy.....	24
2.2.4 Etching pits density counting.....	25
<b>References .....</b>	<b>27</b>
<b>Chapter 3 Growth of relaxed-Si<sub>0.72</sub>Ge<sub>0.28</sub> substrates with low temperature Ge islands buffers .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 Low temperature Ge islands buffer technique.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2 Growth of relaxed-Si<sub>0.72</sub>Ge<sub>0.28</sub> with low temperature Ge islands buffers.....</b>	<b>31</b>
3.2.1 Experimental procedure .....	32
3.2.2 Results and discussion .....	33
3.2.3 Effect of growth temperature of Ge islands on relaxed-SiGe.....	38

3.2.4 Effect of annealing on relaxed-SiGe .....	39
<b>3.3 Conclusions .....</b>	<b>43</b>
<b>References .....</b>	<b>45</b>
<b>Chapter 4 Growth of high quality relaxed-Ge films with low temperature Ge buffers .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 Low temperature Ge buffer technique.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2 Experimental procedure.....</b>	<b>48</b>
<b>4.3 Results and discussion .....</b>	<b>50</b>
4.3.1 Optimazing of growth temperature of Ge buffers .....	50
4.3.2 Effect of thickness of LT-Ge buffer on Ge epilayers .....	57
4.3.3 Effect of LT-SiGe buffer on Ge epilayers .....	59
<b>4.4 Tensile strain in Ge epilayers .....</b>	<b>63</b>
<b>4.5 Conclusions.....</b>	<b>67</b>
<b>References .....</b>	<b>69</b>
<b>Chapter 5 Si-based Ge photodetectors .....</b>	<b>71</b>
<b>5.1 Photodetector background .....</b>	<b>71</b>
5.1.1 Principles of photodetector .....	71
5.1.2 Quantum efficiency and responsivity .....	73
5.1.3 Response time and frequency .....	74
5.1.4 Dark current and noise .....	75
<b>5.2 Design and simulation of Si-based Ge photodetecor .....</b>	<b>76</b>
5.2.1 Material selection.....	76
5.2.2 Structure selection.....	78
5.2.3 Simulation of quantum efficiency.....	80
5.2.4 Simulation of bandwidth.....	82
<b>5.3 Fabrication of Si-based Ge photodetector .....</b>	<b>83</b>
5.3.1 Material growth of Si-based Ge photodetector.....	83
5.3.2 Fabrication process of Si-based Ge photodetector.....	85
<b>5.4 Results and discussion of Si-based Ge photodetector .....</b>	<b>88</b>

5.4.1 Measurement equipments .....	88
5.4.2 I-V characterization.....	89
5.4.3 Responsivity and spectral response .....	95
<b>5.5 SOI-based Ge photodetectors .....</b>	<b>97</b>
<b>5.6 Conclusions.....</b>	<b>100</b>
<b>References.....</b>	<b>102</b>
<b>Chapter 6 Summary and future work .....</b>	<b>104</b>
<b>Appendix Awards and publication list.....</b>	<b>106</b>
<b>Acknowledgments .....</b>	<b>108</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景和意义

众所周知,硅微电子技术的发展是 20 世纪最引人注目的高新技术成就之一,已经引起人们日常生活乃至整个社会的巨大变革,并且在可以预见的将来,仍将产生深远的影响。硅微电子器件性能的不断提高依赖于按比例不断减小器件的尺寸。现在以 45 nm 为特征线宽的深亚微米集成电路工艺已经进入了工业化阶段,硅微电子技术越来越接近物理尺寸的量子极限;此外,铜导线互联引起的信号延迟、器件的功耗和散热也成为了制约尺寸缩小的难题。另一方面,计算机和通信网络的发展,希望微电子器件具有更快的响应速度、更大的数据存储量和更高的传输速度。硅基光电子学有望打破微电子学的诸多局限并扩展其性能,成为在世界范围内特别受关注的重大研究课题。

SiGe 材料是近年兴起的新型半导体材料,其性能的优越性,特别是与成熟硅微电子工艺的兼容性,使 SiGe 材料在硅基光电子器件如发光器件<sup>[1-3]</sup>、光电探测器<sup>[4-7]</sup>、光调制器<sup>[8-10]</sup>以及高迁移率场效应晶体管<sup>[11]</sup>等方面得到了广泛的研究与应用。此外,Ge 和 GaAs 的晶格失配度低,仅 0.07%,Ge 成为在 Si 衬底上生长 GaAs,进而实现 III-V 族光电子材料和器件与 Si 基集成的理想弛豫衬底<sup>[12]</sup>。开展 Si 基 SiGe 材料生长与相关器件研究工作具有重要现实意义。

Si 基光电子器件研制的基础是高质量 Si 基 SiGe 薄膜的生长。然而在硅衬底上外延 SiGe 薄膜的最大挑战是由晶格失配和热膨胀失配引起的高表面粗糙度和高位错密度<sup>[13,14]</sup>。粗糙的表面将增加器件的制作工艺难度;穿透位错将降低器件的性能。降低表面粗糙度和减少穿透位错密度成为高质量 Si 基 SiGe 薄膜生长的关键。通过 SiGe 缓冲层技术的引入,将 SiGe/Si 的失配应变能在缓冲层内逐步释放,不仅降低 SiGe 层的表面粗糙度,而且降低其位错密度,大大提高了 SiGe 外延层的晶体质量。高质量 SiGe 弛豫缓冲层(弛豫衬底)是 Si 基光电子器件集成化的理想平台。

Si 基 SiGe 材料的应用之一是克服硅吸收边波长短的限制,制备长波长光电

探测器。光电探测器是未来光通信和光电集成的关键器件。室温下 Si 的禁带宽度为 1.12 eV，截止波长为 1.1  $\mu\text{m}$ ，尽管 Si 材料成功地应用在 0.85  $\mu\text{m}$  短波段探测上<sup>[15]</sup>，却无法应用于长波长（1.3~1.55  $\mu\text{m}$ ）光电探测器。与 Si 同族的元素半导体 Ge 材料室温下禁带宽度为 0.67 eV，吸收系数相对较大，而且与 Si 工艺完全兼容，便于实现光电互连和光电集成，降低成本，因此硅基外延 Ge 薄膜成为 Si 基长波长光电探测器的最理想材料。

本文开展了 Si 基 SiGe 光电子材料和器件的研究工作，采用低温缓冲层技术在超高真空化学气相沉积系统上生长了高质量 SiGe 和 Ge 弛豫衬底，并在此基础上研制了 Si 基长波长 Ge 光电探测器，为 Si 基光电子材料与器件的研究打下一定基础。

## 1.2 Si 基弛豫 SiGe 和 Ge 生长的研究进展

高质量 SiGe 弛豫衬底的基本性能要求为：弛豫度高、位错密度低和表面粗糙度小，另外为满足后续工艺过程的需要，要求热稳定性好、缓冲层厚度薄（减少材料损耗、缩短生长周期、利于集成等）。人们提出了多种缓冲层技术来制备各组份 SiGe 弛豫衬底，主要有三类：组份变化缓冲层技术（改变 SiGe 层组份）、低温技术（改变生长温度）、选区外延技术（改变衬底形貌）。

### 1.2.1 组份变化缓冲层技术

根据 SiGe 缓冲层中 Ge 组份变化的情况，组份变化缓冲层技术可以分为三类：组份线性增加、组份阶梯增加和组份线性降低。

传统的使用最广泛的方法是组份线性增加法<sup>[16]</sup>。SiGe 缓冲层的组份线性增加，直到所需要的组份，最后生长组份恒定的盖帽层。随着生长的进行，外延层厚度的增加，积累的应变能通过产生失配位错被逐步释放，位错分布在整個组份线性缓冲层内，各界面处的位错密度降低，位错的钉扎几率减小，利于已有位错半环的扩展运动，限制了新的位错产生，降低了线位错密度，位错在 SiGe 缓冲层内的分布如图 1-1(a)所示。Ge 组份的变化率一般控制为 10%/ $\mu\text{m}$ 。Bogumilowicz



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库