

学校编码: 10384
学 号: 18120051301642

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

Si 基 Ge MSM 光电探测器的研制

Si-based metal-Germanium-metal photodetector

蔡志猛

指导教师姓名: 李 成 教 授

专 业 名 称: 凝 聚 态 物 理

论文提交日期: 2008 年 6 月

论文答辩时间: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2008 年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密 ()，在 _____ 年解密后适用本授权书。
2. 不保密 ()

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名： _____ 日期： _____ 年 _____ 月 _____ 日

导师签名： _____ 日期： _____ 年 _____ 月 _____ 日

摘 要

制备响应波长在1.3和1.55 μm ，并具有高响应速度、高量子效率和低暗电流的高性能光电探测器，不仅是光通信技术发展的需要，也是实现硅基光电集成的需要。III-V族半导体材料在1.3~1.55 μm 具有较大的吸收系数，是理想的吸收区材料；然而，III-V族半导体材料价格昂贵、导热性能不好，机械性能较差，并且与现有成熟的硅基工艺兼容性差，限制了其在光电集成技术中的应用。而SiGe材料与Si基微电子器件的制作工艺相兼容，应变的外延Ge材料吸收波长扩展到了1.6 μm 以上，因此研究Si基外延纯Ge探测器引起人们极大兴趣。本论文就是围绕Si基外延Ge探测器开展的，研制出了工作于长波长的Si基外延Ge金属-半导体-金属光电探测器和SOI基外延Ge共振腔增强型金属半导体金属光电探测器。

本论文包括材料生长、器件性能模拟以及器件的制备工艺、性能测试等研究工作，主要内容有：

(1) 采用超高真空化学汽相淀积(UHV/CVD)系统，通过优化生长条件，用低温缓冲层技术在Si和SOI(001)衬底上成功生长出厚的纯锗外延层。对材料的表征结果表明，外延锗层具有低的位错密度、好的结晶质量和平整的表面。

(2) 以共振腔增强型探测器(RCE)的理论为基础，详细分析了制约RCE探测器量子效率、波长选择性等的主要参数如前后反射镜的反射率、吸收长度等。利用传输矩阵方法理论模拟了SOI基纯Ge RCE-MSM探测器的性能。

(3) 详细研究了Ge探测器的制作流程和关键工艺技术，在现有的条件下摸索了小尺寸线条的光刻、ICP干法刻蚀等参数对线条、侧壁粗糙度的影响，成功制备出Si基Ge MSM探测器和SOI基Ge RCE-MSM探测器。

(4) 测试并分析了器件的电学特性和光谱响应。结果表明：两种结构的探测器都具有较小的暗电流。在8V偏压下，SOI基纯Ge MSM探测器和Si基纯Ge MSM探测器在1.55 μm 处的响应度分别为1.45mA/W和0.63mA/W。并观察到RCE MSM探测器的共振效果。

关键词： Ge，MSM光电探测器，共振腔结构

Abstract

Development of photodetectors operating at 1.3-1.6 μm wavelength, with high response speed, high quantum efficiency and low dark current, are not only the need for optical communication, but also the need for silicon-based optoelectronic integration. III-V semiconductor materials have larger absorption coefficient in the 1.3~1.55 μm , However, III-V semiconductor materials are too much expensive, and their thermal conductivity properties and mechanical properties are poor. In addition, they are not compatible with the existing mature silicon-based technology, which limits its application in the integrated optoelectronics. SiGe material is compatible with the existing mature silicon technology. Furthermore, the absorption wavelength of strained Ge has expanded to 1.6 μm . In this paper, Si-based metal-semiconductor-metal(MSM) photodetectors and SOI-based Resonant-cavity-enhanced(RCE) MSM photodetectors for 1.3~1.6 μm operation are fabricated.

(1) Tensily strained Ge thin films are successfully grown on Si and SOI substrates with a combination of low temperature SiGe and Ge buffer layers by UHV-CVD. High crystal quality, low dislocation density and low roughness of the Ge layer are characterized.

(2) The influence of parameters on the performance of MSM photodetectors including quantum efficiency, wavelength selectivity is theoretically studied in details. The parameters such as reflectivity of the front and rear mirrors, absorption length are optimized to obtain high quantum efficiency.

(3) The processes and the key technologies for fabricating Ge photodetectors are investigated. The conditions related to photolithography and various parameters of ICP are optimized. MSM Ge photodetector and RCE-MSM Ge photodetector have been successfully fabricated.

(4) Electrical performance and spectral response of the devices are measured. Relatively small dark current has been obtained for both types of the photodetectors.

The responsivity of the Si-based Ge MSM photodetectors and SOI-based RCE-MSM photodetectors are 1.45mA/W and 0.63mA/W at 1.55 μ m for reverse bias of 8V, respectively. The resonant effect can also be observed.

Keywords: Ge, MSM photodetector, resonant cavity

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 Si 基 SiGe 光电探测器的研究进展	1
1.1.1 SiGe/Si 多量子阱材料探测器.....	1
1.1.2 高组分表面起伏的多量子阱和 Ge 量子点材料探测器.....	3
1.2 Si 基纯 Ge 材料外延及其光电探测器发展	4
1.2.1 组份渐变 SiGe 弛豫衬底上生长 Ge 层.....	4
1.2.2 组份跳变 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 缓冲层再外延 Ge 层.....	5
1.2.3 低温生长的柔性衬底上再外延比较厚的 Ge 层.....	6
1.2.4 热应力增强 Ge 吸收.....	7
1.3 器件结构的选择	8
1.4 本论文的主要工作和创新点	10
参考文献	12
第二章 金属-半导体-金属共振腔增强型探测器的基本理论	14
2.1 MSM 探测器的基本理论	14
2.1.1 MSM 探测器的工作原理.....	14
2.1.2 MSM 探测器的电流-电压特性.....	18
2.1.3 MSM 探测器的电容-电压特性.....	19
2.1.4 MSM 探测器的几个主要性能参数.....	20
2.1.4.1 响应度和量子效率.....	20
2.1.4.2 响应时间 τ	20
2.1.4.3 暗电流 I_d	21
2.2 RCE 探测器理论	22
2.2.1 RCE 探测器自恰解析理论.....	22
2.2.2 RCE 探测器传输矩阵模拟.....	23

2.2.3 影响 RCE 探测器量子效率的因素.....	25
2.2.4 RCE 探测器的波长选择特性.....	26
2.2.5 RCE 探测器的驻波效应.....	27
2.3 本章小结.....	27
参考文献.....	28
第三章 Si 基外延纯 Ge 材料的生长及表征	29
3.1 生长及表征设备介绍	29
3.1.1 本实验室材料生长设备介绍.....	29
3.1.2 材料表征设备.....	32
3.1.2.1 双晶 X 射线衍射测试技术 (DCXRD)	32
3.1.2.2 原子力显微镜 (AFM)	33
3.2 Si 基外延 Ge 薄膜生长及表征	33
3.2.1 Si 基外延 Ge 薄膜的生长及表征.....	33
3.2.2 SOI 基外延 Ge 薄膜的生长及表征.....	37
3.3 总结与讨论.....	39
参考文献.....	40
第四章 Si 基 Ge 探测器的制作与性能测试.....	41
4.1 Si 基外延纯 Ge MSM 光电探测器	41
4.1.1 MSM 光电探测器的设计.....	41
4.1.2 Si 基外延纯 Ge MSM 光电探测器的制作工艺.....	43
4.1.3 Si 基外延纯 Ge 光电探测器的性能测试和结果讨论.....	52
4.1.3.1 器件的 I-V 特性	52
4.1.3.2 光响应谱特性.....	53
4.1.3.3 响应度的测试	55
4.2 SOI 基纯 Ge 探测器	57
4.2.1 SOI 基纯 Ge RCE 探测器的结构设计和模拟	57
4.2.1.1 器件结构设计	57
4.2.1.2 布拉格反射镜的设计和综合优化	58

4.2.2 SOI 基纯 Ge 探测器的制备和测试.....	60
4.2.2.1 SOI 基纯 Ge RCE-MSM 探测器的制备.....	60
4.2.2.2 SOI 基 Ge 探测器的性能测试和结果讨论	61
4.2.2.2.1 器件的 I-V 特性.....	61
4.2.2.2.2 光响应谱特性.....	62
4.2.2.2.3 响应度的测试.....	63
4.3 本章小结	65
参考文献.....	66
第五章 结语	67
硕士期间发表的论文.....	68
致谢	69

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Progress of SiGe Materials and photodetectors	1
1.1.1 SiGe/Si MQW materials	1
1.1.2 Undulating SiGe/Si MQW and Ge islands.....	3
1.2 Progress of Si-based Ge epitaxial material and photodetectors	4
1.2.1 Ge epitaxial layer on a graded relaxed SiGe buffer.....	4
1.2.2 Ge epitaxial layer on Si substrate using ultra thin Si _{10.5} Ge _{0.5} buffer	5
1.2.3 Ge epitaxial layer on Si substrate with low temperature buffer.....	6
1.2.4 Strain-induced enhancement of absorption in Ge epitaxial layers grown on Si substrate.....	7
1.3 Structures of devices	8
1.4 Main work and innovation of the thesis	10
References	12
Chapter 2 Principle of RCE-MSM photodetectors	14
2.1 Principle of MSM photodetectors	14
2.1.1 Principle of MSM photodetectors.....	14
2.1.2 I-V characteristics	18
2.1.3 C-V characteristics.....	19
2.1.4 Other parameters	20
2.1.4.1 Responsivity and quantum efficiency	20
2.1.4.2 Response time τ	20
2.1.4.3 Dark current I_D	21
2.2 Concept of RCE photodetectors	22
2.2.1 Theoretical analysis of RCE photodetectors.....	22
2.2.2 Scattering transmission matrix of RCE-MSM photodetector	23
2.2.3 Quantum efficiency of RCE photodetector.....	25
2.2.4 Wavelength selectivity	26

2.2.5 Standing wave effect.....	27
2.3 Summary	27
References	28
Chapter 3 Si-based Ge expitaxial material growth and characterization.....	29
3.1 Equipments of growth and characterization.....	29
3.1.1 UHV/CVD	29
3.1.2 Introduction of Materials Characterization.....	32
3.1.2.1 DCXRD	32
3.1.2.2 AFM	33
3.2 Si-based epitaxial growth of Ge films and characterization.....	33
3.2.1 Si-based epitaxial growth of Ge and characterization	33
3.2.2 SOI-based epitaxial grwth of Ge and characterization	37
3.3 Summary	39
References	40
Chapter 4 Device design, fabrication and Measurements.....	41
4.1 Si-based Ge MSM photodetectors.....	41
4.1.1 Design of MSM photodetectors.....	41
4.1.2 Device processes.....	43
4.1.3 Measurement and analysis	52
4.1.3.1 I-V characteristics.....	52
4.1.3.2 Photocurrent spectrum.....	53
4.1.3.3 Responsivity	55
4.2 SOI-based Ge Photodetectors.....	57
4.2.1 Structures design and simulation.....	57
4.2.1.1 Structures design	57
4.2.1.2 Design and Optimization of Bragg mirrors.....	58
4.2.2 Fabrication and characterization of SOI based Ge photodetectors.....	60

4.2.2.1 Fabrication processes	60
4.2.2.2 Measurements and analysis	61
4.2.2.2.1 I-V characteristics.....	61
4.2.2.2.2 Photocurrent spectrum	62
4.2.2.2.3 Responsivity	63
4.3 Summary	65
References	66
Chapter 5 Conclusion.....	67
Publication during master degree study	68
Acknowledgement.....	69

厦门大学博士论文摘要库

第一章 绪论

21世纪,随着科学技术的高速发展,数据的保存、信息的传输也将逐渐步入光子时代。Si是信息领域中最重要半导体材料,在微电子领域已获得了巨大的发展,然而由于它的间接带隙特性限制了它在光电子领域的应用,如何实现其与光电子器件的集成,即实现光电集成接收机芯片一直是人们追求的目标。

早在1995年,Ejeckam^[1]利用键合技术将InGaAs/InP材料键合在Si衬底上制备了响应波长在1.55微米、外量子效率为80%的PIN结构的光电探测器。虽然III-V材料在这方面的工艺已经比较成熟并已进入产业化阶段,但由于它比Si贵十倍的价格、比较差热学机械性能和晶体质量、同时不能与现有的成熟的Si工艺兼容等缺点限制了它在Si基集成器件方面的应用。

SiGe材料可与现有的成熟的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在1.3~1.55 μm 波段具有较强的吸收,适合于硅基长波长光电探测器,这引起了人们很大的兴趣,通过近年来的努力,硅基长波长探测器性能在不断地提高。

下面我们将简单介绍一下SiGe材料在材料生长及探测器研制方面的主要进展。

1.1 Si基SiGe光电探测器的研究进展

由于SiGe合金是间接带隙材料,在近红外波段,吸收系数较直接带隙材料的小(小于 $1 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$),制作成的探测器响应速率和量子效率非常低,因此在光通信领域的应用有很大的局限性。然而随着材料科学的发展和生长设备的提高,通过物性改造如能带工程、纳米工程、Si的化合物等方法,改变了硅基材料在光电子领域的被动局面,因此探索可与硅基微电子电路实现单片集成的硅基光电子器件再次成为近年来的研究热点。

1.1.1 SiGe/Si多量子阱材料探测器

高性能的探测器应具备在响应波段有高量子效率、低暗电流以及高带宽的特点。吸收区应选用吸收系数大的材料，并且材料的缺陷要少。由于 SiGe 应变的存在，使得 SiGe 的禁带宽度变小，当 Ge 组分达到 0.6 以上时，SiGe 的禁带宽度甚至比 Ge 的禁带宽度还要小^[2]，这就为利用 SiGe 应变材料制作探测波长为 1.3~1.55 μm 的探测器提供了可能。SiGe/Si 应变超晶格材料中，应变使带隙变小，平均组份使临界厚度增加，增加了有效吸收，并且减少了位错。于是人们采用 SiGe/Si 应变超晶格作为吸收区。1986 年 AT&T Bell 实验室的 Temkin 首先提出了 SiGe/Si 多量子阱波导型 PIN 光电探测器的结构^[3]，器件结构如图 1.1 所示，在 1.3 μm 处量子效率达到 10%，漏电流为 0.4 μA 。1.5 μm 处量子效率只有 2%，暗电流密度为 7 mA/cm^2 。Huang^[4]报道了 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}/\text{Si}$ 超晶格垂直入射探测器，材料结构如图 1.2，在 1.3 μm 处量子效率为 1%，暗电流密度为 60 mA/cm^2 。

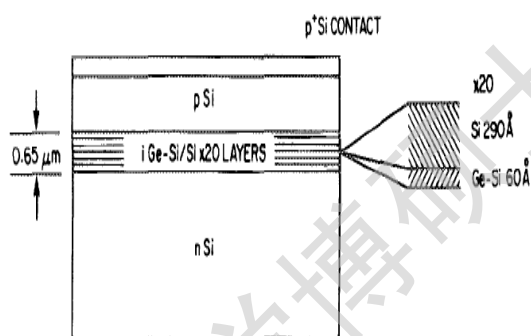


图 1.1 SiGe/Si 多量子阱波导型 PIN 光电探测器

Ge fraction x	Doping ($1/\text{cm}^3$)	Thickness
n+ Si cap	($5 \times 10^{18} - 1 \times 10^{19}$)	$\sim 200 \text{ \AA}$
n - Si	($1 \times 10^{18} - 5 \times 10^{18}$)	$\sim 2,000 \text{ \AA}$
i - SiGe (x=0.50)	(0)	100 \AA
i - Si	(0)	400 \AA
p+ - Si buffer	(5×10^{18})	$\sim 3,000 \text{ \AA}$

图 1.2 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}/\text{Si}$ 超晶格垂直入射探测器

SiGe/Si 应变超晶格探测器的缺点是吸收系数小，量子效率低。要提高吸收系数就要提高 Ge 组份，而这样又会降低吸收区厚度，增加位错。于是人们就提出了另一种思路——从器件结构设计上增加光的有效吸收长度来弥补吸收系数太小的缺点于是便有了共振腔增强型(RCE)探测器。中科院半导体所李成等^[5]^{6]}以 SOI 为衬底，其上外延生长了 SiGe/Si 多量子阱吸收区，淀积多对 Si/SiO₂ 形成另一上反射镜，与 SOI 衬底形成共振腔，分别制作了 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}/\text{Si}$ 多量子阱正入射和背入射 RCE p-i-n 探测器。器件正入射结构如图 1.3 所示。正入射时，在谐振波长 1.285 μm 处响应度为 6.5 mA/W ，量子效率达到 3.5%；背入射时，在

谐振波长 $1.305\mu\text{m}$ 处响应度达 31mA/W 解决了正入射中底反射镜反射率难于提高的难题，分别比 Huang^[4]采用 Ge 组份 0.5 制作的探测器的量子效率提高了 4 和 15 倍。

然而，由于应变 SiGe 仍是间接带隙材料，吸收系数限制了它对 $1.3\mu\text{m}$ 以上波长光的有效吸收，Ge 组分应在 0.5 以上才能有更大的吸收系数，此时临界厚度将成为限制量子效率的主要因素。

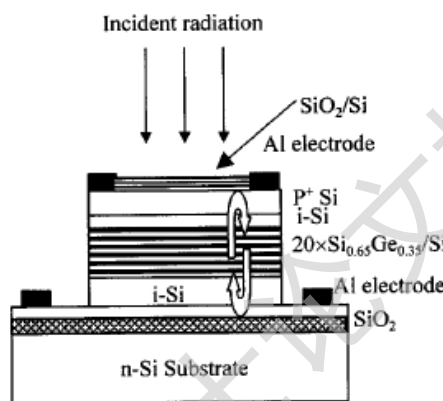


图 1.3 $\text{Si}_{0.65}\text{Ge}_{0.35}/\text{Si}$ 正入射探测器结构示意图

1.1.2 高分组表面起伏的多量子阱和 Ge 量子点材料探测器

对于 SiGe 失配引起的应力释放方式有两种：产生位错和形成表面起伏。对于高分组 SiGe 层，其厚度超过临界厚度时，应力以表面起伏形式释放；而生长低组分 SiGe 层时，应力将以产生位错的形式释放^[7]。IBM 的 Tromp^[8]指出：Ge 组分小于 0.2 不会形成表面起伏，即不生成三维岛，材料以平坦的形态生长直至产生位错释放应力；Ge 组分大于 0.6 时则遵循类似生长纯 Ge 时的 SK 模式三维生长；Ge 组分介于 0.2~0.6 之间生成 SiGe 合金，将会导致台阶形成，诱导生成均匀的三维岛，这是由生长时的不稳定性引起，而非传统的成核过程。

对于 GeSi/Si 多量子阱，是通过 Ge 组分的加入，实现在 $1.3\mu\text{m}$ 波长有明显的响应^[8-9]。但要实现 $1.55\mu\text{m}$ 的响应，必须提高 SiGe 中 Ge 的组分，并且增加 SiGe 层的厚度以尽量减少量子限制效应，由于 Ge 和 Si 之间存在着严重的晶格失配，且 Ge 的表面能比 Si 小，在 Si 上外延高分组的 SiGe 合金，厚度超过临界厚度时，应力以表面起伏形式释放，图 1.4 给出了 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 合金多量子阱，

周期为 10 的 TEM 图象，从中可以看出量子阱材料发生了明显的起伏，没有位错产生，表面起伏的 SiGe/Si 多量子阱材料响应波长可以延伸到 $1.6 \mu\text{m}$ ，可以实现 $1.55 \mu\text{m}$ 的光响应^[9]。Dan-Xia Xu 小组利用 UHV-CVD 方法在 525°C 生长了表面起伏的 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 多量子阱材料，做成 MSM 结构的光电探测器，器件在 $1.52 \mu\text{m}$ 的光响应度为 0.12 A/W ^[10]。另一种方法：生长高组分的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 遵循典型的 SK 模式：超过临界厚度后，将发生三维生长，出现 Ge 纳米岛以释放应力能，中科院半导体所的李传波^[11]利用 Ge 纳米岛制作成的垂直腔 RCE 探测器结构如图 1.5，器件 $1.544 \mu\text{m}$ 处响应度为 0.028 mA/W ， -5 V 偏压下暗电流密度为 $5.1 \times 10^{-7} \mu\text{A}/\mu\text{m}^2$ 。

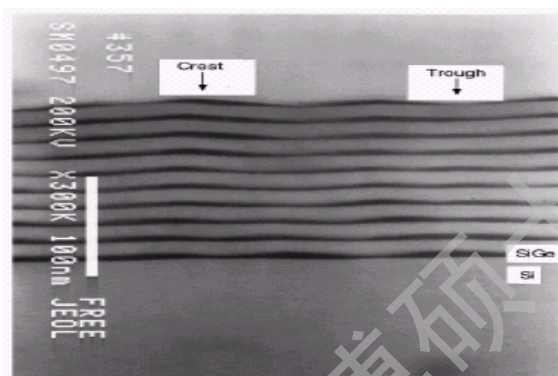


图 1.4 表面起伏的 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 多量子阱 TEM 照

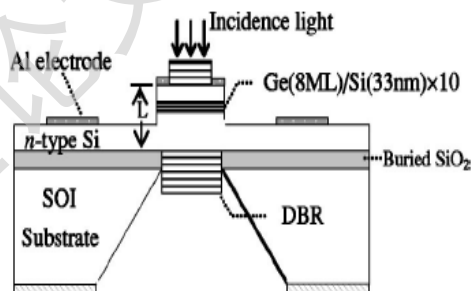


图 1.5 Ge 纳米岛制作成的垂直腔 RCE 探测器

1.2 Si 基纯 Ge 材料外延及其光电探测器发展

相对于 SiGe 材料来说 Ge 材料具有带隙小、吸收系数大、迁移率高等优点加上其与 Si 工艺兼容，被广泛的应用到 Si 基探测器的研制中。然而 Ge 与 Si 晶格失配达 4.2%，Ge 的临界厚度只有几个原子层，Ge 材料的生长困难成为了 Ge 探测器发展的瓶颈。虽然采用 Ge 量子点作吸收区的探测器也被广泛研制，但是有效吸收长度太小，量子效率很低。近年来，材料生长技术的进步和设备的改进，已经能够在 Si 基上生长出高质量 Ge 层，Si 基 Ge 探测器得以飞速发展。

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 for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库