

学校编码：10384

分类号_____密级_____

学 号：18120051301649

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

正入射 p 型 SiGe/Si 量子阱红外探测器的研制

Design and fabrication of normal incidence p-type

SiGe/Si quantum well infrared photodetector

邓和清

指导教师姓名：陈松岩 教 授

专 业 名 称：凝聚态物理

论文提交日期：2008 年 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 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

量子阱红外探测器 (QWIP) 在国防、工业、医疗等方面具有广泛的应用前景。受量子力学跃迁选择定则的限制,传统 n 型量子阱红外探测器对正入射光的吸收是禁戒的,需要制作复杂的光栅耦合正入射光。而 p 型 QWIP 具有能对正入射光响应的特点,且具有更低的暗电流,引起人们的广泛关注。其中,p 型 SiGe/Si QWIP 与硅微电子工艺兼容,可直接制作在硅读出电路上,易于实现光电器件的单片集成。因此,p 型 SiGe/Si QWIP 的研究具有诱人的前景。

本论文主要开展了以下几个方面的工作:

(1) 采用 6×6 $k \cdot p$ 方法计算应变 SiGe/Si 量子阱的价带能带结构。分析空穴子带能级随阱宽和 Ge 组分的变化规律,讨论基于束缚态到准束缚态子带跃迁型 (B-QB) 应变 SiGe/Si QWIP 能带结构的优化设计。首次提出一种 p 型张应变 SiGe/Si QWIP 结构,理论计算表明量子阱中引入张应变使轻、重空穴反转,基态为有效质量较小的轻空穴态;与 p 型压应变 QWIP 相比光吸收和载流子输运特性有望获得较好改善。这些研究工作为 p 型 SiGe/Si QWIP 的性能优化和材料生长提供了理论基础。

(2) 利用双生长室超高真空化学气相淀积系统 (DC-UHV/CVD) 研究 SiGe 外延工艺,通过优化生长条件,成功外延了质量较好的 SiGe/Si QWIP 探测器材料。测试并分析样品的低温傅里叶变换红外光谱,在 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 观测到明显的子带跃迁吸收,峰值波长约为 $4 \mu\text{m}$ 是源于重空穴基态到连续态的跃迁吸收。

(3) 详细研究 SiGe/Si QWIP 器件的制作工艺,摸索光刻、干法刻蚀和湿法腐蚀等关键工艺条件,制备出 SiGe/Si QWIP 原型器件。器件室温光电流谱在 $1.08 \mu\text{m}$ 和 $1.51 \mu\text{m}$ 附近测到明显的响应,可能是源于 Si 和应变 SiGe 带间以及高掺杂引起的带尾间跃迁。

关键词: 锗硅量子阱; 正入射红外探测器; DC-UHV/CVD

Abstract

Quantum well infrared photodetectors (QWIPs) offer numerous potential applications in defense, industry and medicine. For conventional n-type QWIPs, special optical couplers such as gratings are always required to detect normal incidence because the transition is forbidden by the quantum mechanical selection rules. Whereas, the p-type QWIPs are sensitive to normally incident radiation and have lower dark current than n-type QWIPs, which makes them attractive for normal incidence detection. Among those, p-type SiGe/Si QWIP is of particular interest, because of its compatibility with the well-established Si microelectronics technology, matching well with Si readout circuitry, including monolithic integration with Si based photoelectric device. All of those make p-type QWIPs based on this material worth pursuing.

The studies on this subject were carried out in the present thesis as follows:

(1) Energy band designs for p-type strain SiGe/Si QWIP are discussed by using the six-band $k \cdot p$ theory, the valence band structure of which were calculated versus different well width or Ge concentrations in the quantum well. Then we discussed the energy designs based on the bound-to-quasibound transitions. Moreover, a novel p-type tensile strained SiGe/Si QWIP is proposed. It shows that the light-hole state with small effective mass becomes the ground state in the tensile strained quantum wells, which is expected to have larger absorption coefficient and better transport characteristics than those of conventional unstrained or compressive strained p-type QWIPs. Those researches provided a theoretical basis for energy band designs of p-type strained SiGe/Si QWIP and the growth of device material.

(2) High quality SiGe/Si MQWs for QWIPs is successfully grown by DC-UHV/CVD. The infrared absorption spectra of the SiGe/Si MQWs with broadband absorption between 3-6 μm were measured using LT-FTIR. The

peak at $4\mu\text{m}$ is due to intersubband absorption between the heavy hole ground and continuum states.

(3) The technologies of fabricating SiGe/Si QWIP were investigated, including the conditions related to photolithography, RIE and etching process. Finally, p-type SiGe/Si QWIPs have been successfully fabricated. The photocurrent spectra for normal incidence measured at 300k show two peaks at $1.08\mu\text{m}$ and $1.51\mu\text{m}$, which may be due to the interband transitions of silicon, strained SiGe and the transitions related with band-tail.

Keywords: SiGe quantum well; normal incidence infrared detector; DC-UHV/CVD

目 录

第一章 绪论	1
1.1 QWIP 的工作机理与几种典型跃迁模式	1
1.2 P 型 SiGe/Si QWIP 的优势	3
1.3 P 型 SiGe/Si QWIP 研究进展.....	3
1.4 本文的主要工作.....	5
参考文献	7
第二章 应变 SiGe/Si 量子阱价带能带结构计算与优化设计	9
2.1 应变 SiGe 基本性质	9
2.1.1 应变 SiGe 的带隙和能带结构	9
2.1.2 SiGe/Si 量子阱的能带结构	11
2.1.3 SiGe 合金中载流子的有效质量	12
2.2 K-P 方法计算应变 SiGe 量子阱能带结构	12
2.2.1 能带计算理论	13
2.2.2 有效质量计算理论	17
2.3 应变 SiGe 量子阱价带能带计算与优化.....	18
2.3.1 压应变 SiGe/Si 量子阱价带能级计算与优化	19
2.3.2 张应变 SiGe/Si 量子阱价带能级计算与优化	25
2.4 本章小结.....	29
参考文献	30
第三章 SiGe/Si 多量子阱材料的生长与表征	32
3.1 双生长室 UHV/CVD 设备简介	32
3.1.1 DC-UHV/CVD 系统的结构	32
3.2 SiGe/Si 外延工艺研究.....	34
3.2.1 单层 SiGe 外延生长与表征.....	34
3.2.2 锗硅外延原位硼掺杂.....	37

3.2.3 P 型 掺杂 SiGe/Si 多量子阱生长.....	40
3.2.4 P 型 SiGe/Si QWIP 器件材料生长.....	42
3.3 P 型 SiGe/Si QWIP 器件材料红外吸收谱分析.....	43
3.3.1 P 型 Si 衬底的红外吸收谱	44
3.3.2 P 型 SiGe/Si QWIP 器件材料红外吸收谱分析.....	45
3.4 本章小结.....	48
参考文献	49
第四章 正入射 P 型 SiGe/Si QWIP 制作与测试.....	51
4.1 器件版图设计	51
4.2 器件制备工艺流程.....	53
4.2.1 基片清洗	53
4.2.2 光刻.....	54
4.2.3 等离子化学气相沉积 (PECVD)	56
4.2.4 磁控溅射 Al	57
4.2.5 干法刻蚀	57
4.2.6 湿法化学腐蚀	58
4.2.7 封装.....	60
4.3 器件初测与分析.....	60
4.3.1 I-V 特性测试与分析.....	60
4.3.2 光电流谱测试与分析.....	62
4.4 本章小结.....	62
参考文献	63
第五章 总结与展望	64
硕士期间发表的论文	65
致 谢	66

CONTENT

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Working principle and intersubband transitions of QWIP	1
1.2 Advantages of p-type SiGe/Si QWIP	3
1.3 Development of p-type SiGe/Si QWIP	3
1.4 Main works of the thesis	5
References	7
Chapter 2 Energy band calculations and designs of strained SiGe/Si quantum wells	9
2.1 The property of strained SiGe	9
2.1.1 Band gap and structure of strained SiGe	9
2.1.2 Band structure of the SiGe/Si quantum well	11
2.1.3 Effective mass	12
2.2 Energy band calculation with $k \cdot p$ theory	12
2.2.1 The $k \cdot p$ theory	13
2.2.2 Effective-mass calculation method	17
2.3 Energy band calculations and design for strained SiGe/Si quantum well	18
2.3.1 Calculation and design for compressive strained SiGe/Si	19
2.3.2 Calculation and design for tensile strained SiGe/Si	25
2.4 Summary	29
References	30

Chapter 3 SiGe/Si multiple quantum wells deposition and characterization	32
3.1 DC-UHV/CVD	32
3.1.1 Experimental setup.....	32
3.2 Epitaxial technology of SiGe/Si quantum well and characterization	34
3.2.1 Growth of SiGe epilayer	34
3.2.2 Boron doping of Si and SiGe epilayer	37
3.2.3 Growth of δ -doped SiGe/Si multiple quantum wells.....	40
3.2.4 Growth of p-type SiGe/Si MQWs for QWIP.....	42
3.3 Infrared absorption of SiGe quantum wells and analysis	43
3.3.1 Infrared absorption of p-Si substrate	44
3.3.2 Infrared absorption measurement and analysis	45
3.4 Summary	48
References	49
Chapter4 Fabrication technology and measurement of normal incidence p-type SiGe/Si QWIP	51
4.1 Mask design	51
4.2 Fabrication procedure of SiGe/Si QWIP	53
4.2.1 Surface process	53
4.2.2 Photolithography	54
4.2.3 PECVD.....	56
4.2.4 Magnetron sputter	57
4.2.5 Reactive ion etching.....	57
4.2.6 Wet chemical etching technology.....	58
4.2.7 Package	60

4.3 Measurement and analysis	60
4.3.1 I-V characteristics.....	60
4.3.2 Photocurrent spectra	62
4.4 Summary	62
References	63
Chapter5 Conclusion	64
Publications during master degree study	65
Acknowledgement	66

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

中红外波段的光辐射探测器（简称中红外探测器）一直受到国际上的极大关注，它在诸多重要领域具有极其不可替代的应用：例如战场红外成像、导弹跟踪和识别、航天航空红外遥感、环境监测、矿井有害气体探测、生物、医学应用等。我国为适应国际快速变化发展的信息化战争，国防现代化、信息化的步伐加快，中红外探测器无疑是军队信息化的一个重要器件；另一方面，随着我国工业化进程的加快，汽车尾气排放的迅速加剧，环境污染、矿井和化工厂的安全实时监控等均需要具有体积小、功耗小的探测“分子指纹”（Fingerprint）的中红外探测器。

红外探测器可分为热探测器和光子探测器，热探测器是利用材料对温度的敏感性来测量红外辐射能量，一般来说，热探测器可在室温下使用，响应波长范围较宽，但是高频探测率低，响应慢（毫秒量级）。光子探测器通常为半导体材料，利用光子与固体电子的相互作用来探测红外光能量，这种光子探测器响应快，但工作波长范围较窄。HgCdTe 是目前中远红外探测器最重要的半导体材料，它具有高的吸收系数和量子效率（可超过 80%），且响应波段较宽，但是存在的主要问题是材料制备技术还不够成熟，汞相关污染材料的使用限制了该系材料的制造效率和大面积焦平面器件，还有就是制作成本高，需工作在液氮冷却温度下。

近 20 年来各国十分重视并投入大量经费研究半导体量子阱红外探测器（Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP）、量子点中红外探测器（Quantum Dot Infrared Photodetector, QDIP），它们按照导带（或价带）内子带间的电子（或空穴）跃迁原理构造，具有响应速度快、均匀性好、探测率较高和探测波长可调等优点，在国防、工业、医疗等方面具有广泛的应用前景。

1.1 QWIP 的工作机理与几种典型跃迁模式

图 1-1 (a) 为 QWIP 工作原理示意图^[1]：QWIP 利用导带（或价带）内基态载流子吸收红外辐射能量跃迁到激发态，并在外电场作用下输运，量子阱中激发出的电子（或空穴）定向运动产生光电流，从而实现光到可探测的电流信

号之间的转换，即处于光电导（PC）的工作模式，目前大多数 QWIP 均采用这种工作方式。

为了减小器件暗电流，提高探测灵敏度，研究人员先后提出了束缚态到连续态（Bound-to-Continuum, B-C）、束缚态到准束缚态（Bound-to-Quasibound, B-QB）和束缚态到束缚态（Bound-to-Bound, B-B）三种跃迁模式的量子阱红外探测器。图 1-1（b）为量子阱红外探测器载流子的三种跃迁模式示意图^[1]：在光照下，量子阱中子带跃迁吸收发生在束缚态和连续态（B-C）之间，这种工作模式的探测器暗电流大，吸收谱宽；量子阱中激发态位于带边附近，子带跃迁吸收发生在束缚态和准束缚态（B-QB）之间，这种工作模式的探测器暗电流较小，吸收谱较窄；量子阱中载流子从束缚态向高能束缚态跃迁（B-B），偏压下载流子通过微带运输形成光电流，这种工作模式的探测器暗电流最小，吸收谱最窄，但设计较复杂。在量子阱结构设计中，通过调节阱宽、组分等参数，使量子阱子带运输的激发态被设计在阱内（束缚态）、阱外（连续态）或者在势垒的边缘或者稍低于势垒顶（准束缚态），以便满足不同的探测需要，获得最优化的探测灵敏度。因此，量子阱结构设计又称为“能带工程”是 QWIP 最关键的一步。为了方便载流子的运输，获得较小暗电流，通常把激发态优化在带边附近，即工作在 B-QB 模式。

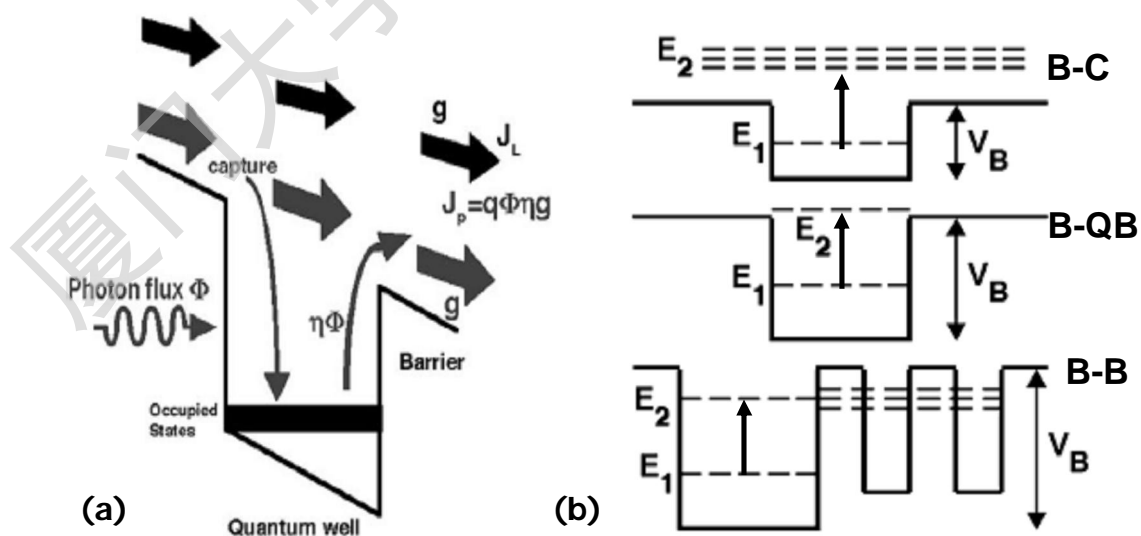


图 1-1 QWIP 工作机理 (a) 与 3 种典型跃迁模式 (b) 示意图^[1]

1.2 P 型 SiGe/Si QWIP 的优势

目前,国内外在量子阱红外探测器方面的工作大多基于 III-V 族材料。早在 1987 年 Bell 实验室的 B.F.Levine 等人^[2]用 GaAs/AlGaAs 量子阱作为有源区制成基于导带电子子带跃迁的 QWIP。由于半导体中的电子有效质量比空穴有效质量小,以电子作为载流子具有较好的红外吸收和输运特性,目前常用的 QWIP 器件通常采用 n 型材料,基于 n 型 QWIP 焦平面阵列制成的成像系统,已应用于国防、工业、医疗等方面,并不断向大面阵、高温、双色或多色方向发展。但 n 型 QWIP 暗电流偏大,而且根据量子力学跃迁选择定则,它对垂直入射光的吸收是很弱或禁戒的。这样在量子阱焦平面探测器制备中,需要采用复杂的光栅结构来耦合入射光,增加了制备的难度和成本。而 p 型 QWIP 由于在价带中轻、重空穴的相互作用,具有能对正入射光响应的特点,B.F.Levine 等^[3]在 1991 作出 p 型 GaAs/AlGaAs QWIP,其工作波长在 $7.9\mu\text{m}$,在 77k 探测灵敏度为 $3.1\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$,响应度为几十 mA/W 。从此,p 型量子阱红外探测器的研究引起人们广泛的重视。

GaAs/AlGaAs 量子阱带阶主要落在导带,价带带阶较小,不是 p 型 QWIP 最理想材料;并且 III-V 族化合物制作的光电器件与已经广泛应用的硅微电子工艺不兼容,不能同硅读出电路实现单片集成。而在 Si(100)上生长的 SiGe 量子阱中的势阱主要落在价带上($\Delta E_v \approx 0.78x$, x 为合金中 Ge 组分)^[4],SiGe 层容易形成空穴势阱,垂直方向的空穴子带间吸收也已经在 p 型 Si/SiGe 量子阱的价带中观察到^[5,6];SiGe/Si 是非极性材料,没有 - 材料系的极性光学声子散射,允许在较高温度下工作;并且 SiGe/Si 材料体系与成熟的硅工艺兼容、成本低,这类探测器可直接集成 Si-CCD 读出电路上,实现光电器件的单片集成。随着硅基锗硅合金材料生长和器件应用的研究,p 型 SiGe/Si QWIP 将展示出更加诱人的前景。

1.3 P 型 SiGe/Si QWIP 研究进展

关于 p 型 SiGe/Si 多量子阱的子带间跃迁特性已有许多研究,美国加州大学、Bell 实验室等早在 90 年代就开始 SiGe/Si 量子阱红外探测器的研究。1990

年加州大学 R.P.G.Karunasiri 等人^[7]首先报道 p 型 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱中空穴的子带间吸收。样品生长在 Si (001) 衬底上, 阱宽为 4.0nm, 垒宽为 30nm, 共 10 个周期。在势阱中间 3.0nm 区域内, 掺 B 浓度为 10^{19}cm^{-3} 。并利用 45° 波导结构研究了子带吸收的偏振特性, 在室温下探测到一个吸收峰, 位于 $8.1\mu\text{m}$ 处, 吸收峰对应于空穴子带 HH1-HH2 的跃迁。

1991 年 J.S.Park 等^[8]生长了 50 个周期的 p- $\text{Si}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}/\text{Si}$ 多量子阱结构, 阱宽为 3nm, 垒宽为 50nm, 阱中掺杂浓度为 10^{19}cm^{-3} 。制成器件后光谱响应峰值在 $8\mu\text{m}$ 附近, 器件可工作在 77k, 在 $8\mu\text{m}$ 处响应度峰值达到 0.6A/W 。1992 年 R.People 和 J.C.Bean 等人^[9]采用了 10 个周期的 $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}/\text{Si}$ 构成的多量子阱材料。在测试材料吸收谱时采用了 45° 波导结构, 在垂直光照条件下, 室温下观察到了两个吸收峰, 峰值波长分别为 $10.9\mu\text{m}$ 和 $8.3\mu\text{m}$, 分别对应于 HH1-HH2 和 HH1-SO1 的跃迁。制作的器件工作在 77k, 偏压-2.4V 时 $10.9\mu\text{m}$ 处的探测率 $D^* = 3.3 \times 10^9 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。1992 年 Park 等人^[10]报道了 SiGe/Si 多量子阱不同价带的子带间的跃迁, 由于价带和导带存在较强的耦合, 量子阱可以吸收垂直入射光。1995 年 R.T.Carline 和 D.J.Robbins 等人^[11]在 BESOI 上生长 SiGe/Si 多量子阱材料, 在 Si/SiO₂ 和 Si/air 间形成共振, 制作的器件在 $7.2\mu\text{m}$ 处的峰值响应提高了 5 倍。

2000 年 D.Krapf 和 K.L.Wang 等人^[12]采用优化的量子阱结构, 以 SiGe 层作为发射极, 获得更好的暗电流特性。2005 年 T.Fromherz 等^[13,14]在 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 弛豫衬底上生长了一掺杂 $\text{Si}_{0.2}\text{Ge}_{0.8}/\text{Si}$ 多量子阱, 从理论和实验上研究了其红外吸收特性。在 14K 温度下观测到 HH1-HH2 吸收谱, 并且采用六带 $k \cdot p$ 方法对该结构进行能带计算, 与实验结果符合很好。

国内在这方面的研究较少, 上海技术物理所、复旦大学等^[15,16]单位率先研究了 p 型 SiGe/Si 多量子阱的红外吸收谱, 制作了探测器, 在正入射情况下的光电流谱中观测到明显的响应峰。

综上所述, 国际上 p 型 SiGe/Si QWIP 的研究起步早, 并且取得了很好的进展, 而国内在这方面的研究则较少; 子带跃迁理论上还存在一些争议, 如何提高量子效率和工作温度等关键问题尚待解决, 还远不能满足商业应用所需。此外, 我们注意到已有对 p 型 SiGe/Si 量子阱红外探测器的研究局限于压应变

SiGe 量子阱，其量子阱价带的基态一般为重空穴能级，以重空穴作为载流子可以有效减小暗电流，但载流子有效质量大导致较小的吸收系数，这直接影响了红外探测器的响应度。为解决这一矛盾，本文提出一种 p 型张应变 SiGe/Si 量子阱红外探测器结构^[17]。

1.4 本文的主要工作

本论文的主要工作是：理论上，应用六带 $k \cdot p$ 方法系统地计算了压应变、张应变 SiGe/Si 量子阱价带空穴子带能级及其有效质量，在此基础上进行 SiGe/Si 量子阱结构的优化设计；提出采用 p 型张应变 SiGe/Si 量子阱结构，并从理论上论证其优越性。实验上，利用双生长室超高真空化学气相淀积系统（DC-UHV/CVD）研究 SiGe 外延工艺，优化工艺条件，成功外延出高质量 p 型掺杂 SiGe/Si 多量子阱结构；按理论设计生长了具有器件结构的 SiGe/Si 多量子阱，并进行红外光谱测试分析。探讨了制作 SiGe/Si QWIP 的工艺流程，制备出 SiGe/Si QWIP 原型器件，并进行电学、光学特性表征。

全文共分为五章，各章主要内容分别为：

第一章，介绍了量子阱红外探测器的研究背景、工作原理和几种常见跃迁模式。阐述了 p 型 SiGe/Si QWIP 的优势、研究进展和存在的问题。

第二章，概述应变对 SiGe/Si 能带结构的影响以及能带计算的 $k \cdot p$ 理论，并用六带的 $k \cdot p$ 方法定量计算应变 SiGe/Si 量子阱的价带能带结构和空穴有效质量。分析空穴子带能级随阱宽和 Ge 组分的变化规律，在此基础上讨论了束缚态到准束缚态子带跃迁型(B-QB)应变 SiGe/Si QWIP 能带结构的优化设计。归纳出几种对应不同探测波长红外探测器的结构，为 SiGe/Si QWIP 器件的材料生长提供理论依据。

第三章，采用双生长室超高真空化学气相淀积系统（DC-UHV/CVD）研究 SiGe 外延工艺，生长出高质量具有器件结构的 SiGe/Si 多量子阱材料，并结合能带计算的结果分析 SiGe/Si QWIP 器件材料红外吸收谱。

第四章，根据 QWIP 器件结构设计出光刻版图，进行 SiGe/Si 量子阱红外探测器的工艺研究。对器件制作的关键工艺进行研究，摸索出合适的光刻条件，

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