学校编码：10384　　　　　　　　　　分类号______密级______
学号：19820070153901　　　　　　　　　　UDC______

厦门大学

博士学位论文

4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器的制备及其特性研究

Fabrication and Characterization of 4H-SiC p-i-n Photodetectors

蔡加法

指导教师姓名：吴正云　教授
专业名称：微电子与固体电子学
论文提交日期：2014 年 11 月
论文答辩时间：2014 年 12 月
学位授予日期：

答辩委员会主席：__________
评阅人：__________

2014 年 11 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

摘 要

4H-SiC 材料具有优越的电学性能，用于低电平的紫外线检测时，还具有可见光盲、在太阳盲光谱区域量子效率较高、低漏电流、抗辐射和耐高温等优点，本文制备并详细研究了 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器的光电性能，取得了以下重要的结果：

1. 制备出高性能 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器，探测器的光敏面积为 $200\times200\mu m^2$，封装在 TO-2 外壳上，用熔融石英玻璃作为光学窗口；

2. 研究了 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器电容-电压（C-V）特性。结果表明探测器在 0 偏压时的高频（1MHz）结电容约为 3.4pF 并基本不随偏压变化，表明器件在较低偏压时 i 型层已基本处于耗尽状态。变温低频（100kHz）的反向和正向 C-V 测量表明深能级缺陷会导致器件结电容增大并有较强的电压依赖性。紫外线照射也会导致结电容增大，不同波长单色光照射时结电容的增大幅度相差较大，这些结果对于器件实际应用时的电路优化设计具有较大的参考价值；

3. 研究了 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器电流-电压（I-V）特性。测量结果显示室温时光电探测器的暗电流密度在-5V 偏压时约为 $4.5nA\cdot cm^{-2}$，主要来源于表面缺陷和材料位错导致的隧穿电流；击穿电压约 70V，来源于隧穿击穿。暗电流随温度升高而增大，击穿电压则正好相反。缺陷和位错是导致器件暗电流较大、击穿电压较低的主要原因；

4. 研究了 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器的光谱响应特性。室温时探测器的光谱响应度约为 0.13A/W 并且基本不随偏置电压变化，光电流-暗电流比值和紫外可见光抑制比分别大于 4 个和 3 个数量级，表明探测器具有较好的光电性能。变温测量表明响应度随温度升高而增大，但由于暗电流随温度增大的速度更快导致光电流-暗电流比值随温度升高而下降；不同波长的响应度具有不同的温度特性即短波长的温度依赖性更小、长波长则反之；温度较低时，量子效率随温度升高而增大，温度大于 250K 时，250nm 以下波长的量子效率基本不随温度变化，250nm 以上波长量子效率有二次增大现象，但增大的速度有所减缓。

关键词：4H-SiC；p-i-n 紫外光电探测器；光电特性

ABSTRACT

Silicon Carbide (SiC) has excellent physical, chemical and electronic properties. The ultraviolet (UV) photodetectors (PDs) based on 4H-SiC have the advantages of solar blindness to the background light, high quantum efficiency, low dark current, extremely radiation hardness, able to operate at high temperature and so on. In this dissertation, the high performance 4H-SiC p-i-n UV PDs has been fabricated and the electrical and photoelectric properties have been carried out and discussed as following:

1. The 4H-SiC p-i-n UV PDs with photo-sensitive area of 200×200μm^2 have been fabricated. The chip was mounted on TO-2 metallic case and fused quartz glass was used as optical incidence window.

2. The capacitance-voltage properties of the PDs as a function of voltage, frequency, temperature as well as UV illumination have been carried out. The results show that the junction capacitance of the PD under 1MHz measured frequency and zero bias is about 3.4pF and almost independent of reverse bias, which indicated that the i-layer of the PD has been depleted at low reverse bias. Under 100kHz measured frequency, however, the junction capacitance was increased to about 9.6pF and linear decreased with reverse voltage increased. This frequency-dependent of junction capacitance imply that deep-level defect centers are presented within the PD and play a significant role on the junction capacitance and can be confirmed by the observed negative differential capacitance at forward bias condition under 100kHz frequency. The capacitances are increased with increasing reverse bias due to the thermal activation of the carriers captured by the deep-level centers as well as the increasing of the density of the intrinsic carriers. Under UV illumination, the capacitance exhibit wavelength-dependent property. That is, for the wavelengths below 230nm or above 360nm, the capacitances are almost both wavelength- and voltage-independent. As the wavelength above 235nm, the measured capacitance increases abruptly and then keeps nearly as a constant in the wavelength range 260-360nm. Finally the capacitance sharply decreases again. The observed wavelength dependence of the capacitances can be explained by the penetration depth of the illumination light. As the illumination wavelength is below 240nm, the incident photons penetrate within the p+ layer and most of photons are recombined with the existed surface states.

Consequently, the effective carrier concentrations and the capacitance do not increase much. As the excitation wavelengths above 240nm, the photo-generated carriers can be attracted into the space charge region and contribute to the capacitance.

3. The reverse- and forward-bias current-voltage (I-V) properties of the PDs as a function of temperature have been achieved. The room temperature dark current density of the PD is about 4.5 nA·cm^{-2} at 5V reverse-bias and originated from the surface defect and deep-level defect assistant tunneling current. The break voltage is about 70V due to the tunneling breakdown. The dark current is increased and the break voltage is decreased with increasing temperature. These results indicated the surface defects and deep-level defects play a primary role on the performance degradation of the PDs.

4. The responsivities have been obtained with wavelength from 200 to 400nm and temperature from 20-460K. The peak responsivity at room temperature is about 0.13A/W at 266nm and independent of bias voltage less than 20V. The ratio of photo- to dark-current and the rejection ratio (PDCR) of visible-to UV are high than 3 and 4 orders of magnitude, respectively. These results indicate that the fabricated PDs have excellent photoelectric properties. Moreover, the responsivity is increased but the PDCR is decreased with elevated temperature due to high the increasing rate of the dark current by comparing with that of photon current. The responsivitis at long wavelength region (>260nm) exhibit strong temperature-dependence behaviors, whereas the short wavelength region (<250nm) do not. The quantum efficiency (QE) of the PD increases with temperature within 20-250K temperature range. As temperature further increasing, the QEs of the wavelength within 200-250nm show a saturation behavior and are independent of temperature. The QEs of the wavelength larger than 250nm still increase with temperature but the rate of increasing is slow down.

Key Words：4H-SiC；p-i-n UV photodetecor；Photoelectric

目录

第 1 章　绪论 1

§1.1　紫外线简介 1

§1.1.1　紫外线的分类 1

§1.1.2　紫外线的基本性质 1

§1.1.3　紫外线的效应 2

§1.1.4　紫外线的来源 3

§1.2　4H-SiC 基紫外光电探测器研究进展[] 4

§1.2.1 概述 4

§1.2.2　MSM 结构 7

§1.2.3　4H-SiC 肖特基势垒光电探测器 8

§1.2.4　pn 和 p-i-n 结构 8

§1.2.5　APD 结构 10

§1.3　4H-SiC 基紫外光电探测器的发展前景 11

§1.4　论文工作及结构组织 12

参考文献 14

第 2 章　4H-SiC 材料特性 19

§2.1　SiC 材料基本特性 19

§2.2　SiC 材料的多型体 20

§2.3　4H-SiC 材料的电学性质 22

§2.3.1　能带图和禁带宽度 22

§2.3.2　本征载流子浓度和内建电势 23

§2.3.3　载流子迁移率和漂移速度 24

§2.3.4　载流子寿命 27

§2.3.5 碰撞离化系数和击穿电压 28

§2.3.6　掺杂和杂质能级 29

§2.3.7　其它重要电学参数 30

§2.4　光学性质 31

§2.4.1　吸收系数与穿透深度 31

§2.4.2　折射率 36

§2.5　抗辐射能力 37

参考文献 39

第 3 章　p-i-n 紫外光电探测器的工作原理 43

§3.1　p-i-n 紫外光电探测器的基本工作原理 43

§3.1.1　半导体的光伏效应和 PN 结光电探测器 43

§3.1.2　p-i-n 光电探测器 45

§3.2　p-i-n 紫外光电探测器的主要性能参数 47

§3.2.1 光谱响应 47

§3.2.2 量子效率 η 和响应度 R 49

§3.2.3 噪声与探测率 50

§3.2.4 线性度 54

§3.2.4 响应速度 55

§3.3 光电探测器的工作模式 57

§3.3.1 光电导模式 58

§3.3.2 光伏模式 58

§3.3.3 开路模式 59

参考文献 **61**

第 4 章 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器的制备 62

§4.1 版图设计 62

§4.2 器件制备工艺 63

§4.2.1 表面清洗 63

§4.2.2 光刻 65

§4.2.3 刻蚀 66

§4.2.4 热氧化 68

§4.2.5 电极制备 69

§4.2.6 封装 70

参考文献 **72**

第 5 章 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器 C-V 特性 73

§5.1 p-i-n 二极管静电特性 73

§5.1.1 概述 73

§5.1.2 pn 二极管静电特性 74

§5.1.3 p-i-n 二极管静电特性 76

§5.1.3 p-i-n 结反向偏置电容 80

§5.1.4 p-i-n 结扩散电容 81

§5.1.5 深能级缺陷和 p-i-n 光电探测器的等效电容模型 83

§5.2 测试仪器与系统 85

§5.2.1 C-V 测试仪基本工作原理 85

§5.2.1 加热台与样品室 86

§5.2.3 C-V 测量原理框图 88

§5.3 结果与分析 90

§5.3.1 反向偏置 C-V 特性 90

§5.3.2 正向偏置 C-V 特性 94

§5.3.3 光照 C-V 特性 98

参考文献 **103**

第 6 章 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器 I-V 特性 107

§6.1 概述 107

§6.1.1 势垒区产生-复合电流 107

§6.1.2 扩散电流 108

§6.1.3 表面漏电流 109

§6.1.4 隧穿电流 109

§6.2 测量系统 110

§6.3 测量结果与分析 111
§6.3.1 反向 I-V 特性 111
§6.3.2 正向 I-V 特性 119
参考文献 122
第 7 章 4H-SiC p-i-n 紫外光电探测器的光谱响应特性 125
§7.1 概述 125
§7.2 光谱响应度测量方法 126
§7.3 4H-SiC 紫外光电探测器光谱响应特性的模拟计算 131
§7.3.1 耗尽区光生电流 131
§7.3.2 p^+区光生电流 132
§7.3.3 n^+区光生电流 133
§7.3.3 计算结果与分析 135
§7.4 4H-SiC 紫外光电探测器光谱响应温度特性研究 139
§7.4.1 光电流随偏置电压和温度的变化特性研究 139
§7.4.2 光谱响应的温度特性研究 142
§7.4.3 量子效率的温度特性研究 151
§7.4.4 紫外-可见抑制比的温度特性 153
参考文献 155
第 8 章 总结与展望 159
§8.1 总结 159
§8.1 工作展望 161
博士期间的科研成果 162
致 谢 164

CONTENTS

Chapter 1 Introduction……………………………………………………1

§1.1 Introduction of Ultraviolet………………………..…………………………1

§1.1.1 Classification of Ultraviolet….…………………………..………………1

§1.1.2 Properties of Ultraviolet ……………………..……………..……………1

§1.1.3 Effect of Ultraviolet……………………..……………………………..…2

§1.1.4 Origin of Ultraviolet…….……………………………………………….3

§1.2 Overview of 4H-SiC-based Photodetectors……………………..…………4

§1.2.1 Introduction……………………………………………………..…….……4

§1.2.2 Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Diode …………………….…………7

§1.2.3 Schottky Barrier Diode………………………………………..….……….8

§1.2.4 pn and p-i-n Diode………………………………………………..…………8

§1.2.5 Avalanche Photodetector (APD)……………………………….………..10

§1.3 Development Prospects of 4H-SiC-based Photodetectors……..………11

§1.4 Motivation and Dissertation Organization………………..…….…………12

References ……………………………………………….……..…………14

Chapter 2 4H-SiCMaterial Properties…………………..……….19

§2.1 Basic Properties of SiC material……………………………….……….19

§2.2 Polytypes of SiC Material……………………………………..………….20

§2.3 Electrical Properties of 4H-SiC…………………………………..……….22

§2.3.1 Energy Band Structure and Energy Gap…………………….……..……….22

§2.3.2 Intrinsic Carrier Concentration and Built-in Potential……………..……….23

§2.3.3 Mobility and Drift Velocity of Carrier……………………...……..…….24

§2.3.4 Carrier Lifetime……………………………………………..……...27

§2.3.5 Impact Ionization Coefficient and Breakdown Voltage……………..……..28

§2.3.6 Doping and Impurity Level……………………………………...…….29

§2.3.7 Other Electrical Parameters………………………………….…..……30

§2.4 Optical Properties……………………………………………...……31

§2.4.1 Absorption Coefficient and Penetration Depth…………………….……...31

§2.4.2 Refractive Index ……………………………………………………36

§2.5 Radiation Hardness……………………………………………………37

References…………………………………………………………………...39

Chapter 3 Fundamentals of p-i-n UV Photodetectors….…………43

§3.1 Operation Principle of p-i-n UV Photodetectors…………………………..43

§3.1.1 Photovoltaic Effect and PN Junction Photodetectors………………………43

§3.1.2 p-i-n Junction Photodetectors……………………………………………45

§3.2 Performance Parameters of p-i-n UV Photodetectors……………………47

§3.2.1 Spectral Response……………………………………..………………47

§3.2.2 Quantum Efficiency and Responsivity……………………………………..49

§3.2.3 Noise and Detectivity……………………………………………………....50

§3.2.4 Linearity…………………………………………………...…………54

§3.2.4 Response Speed…………………………………………………………55

§3.3 Operational Modes of Photodetectors……………………...………………57

§3.3.1 Photoconduction Mode……………………………………………...…...58

§3.3.2 Photovoltaic Mode……………………………………...……………....58

§3.3.3 Open Circuit Mode………………………………...…………………....59

References……………………………………………...……………………61

Chapter 4 Fabrication of 4H-SiC p-i-n UV Photodetectors...…….62

§4.1 Design and Process of Masks..………………………………………………62

§4.2 Fabrication Processes…………………………………………………...62

§4.2.1 Clean………………………………………………………………...…63

§4.2.2 Photolithography and Lift-off………………………...………….……65

§4.2.3 Etching…………………………………...……………………….…...66

§4.2.4 Thermal Oxidation………………………...………………….…….…68

§4.2.5 Electrodes Fabrication…………………………………………………69

§4.2.6 Package………………………………………………………………...70

References…………………………………………………………….…….72

Chapter 5 Capacitance-Voltage Properties of 4H-SiC p-i-n Photodetectors……………………………..…………………..73

§5.1 Static Electricity Properties of p-i-n Junction Diode……..………………73

§5.1.1 Introduction…………………………………………………..……………73

§5.1.2 Static Electricity Properties of pn Junction Diode…………..……………..74

§5.1.3 Static Electricity Properties of p-i-n Junction Diode…………..…………...76

§5.1.3 Reverse Bias Capacitance of p-i-n Junction Diode………..………………….80

§5.1.4 Diffuse Capacitance of p-i-n Junction Diode………………..………………..81

§5.1.5 Deep-Level-Defect and Equivalent Capacitance Mode of p-i-n Junction Diode…………………………………………………...…………….……..83

§5.2 Measurement Instruments and Systems…………………...……………85

§5.2.1 Principle of C-V Analyzer……………………………..……………………...85

§5.2.1 Heating Stage and Sample Chamber…………………………………..………86

§5.2.3 Schematic Diagram of C-V Measurements…………………………………88

§5.3 Results and Discusses ……………………………………………………90

§5.3.1 Reverse Bias C-V Properties……………………….………………………90

§5.3.2 Forward Bias C-V Properties…………………………………………….....94

§5.3.3 C-V Properties Under UV Illumination……………………………………98

References…………………………………………………………..…………...103

Chapter 6 Current-Voltage Properties of 4H-SiC p-i-n UV Photodetectors……………………………..………..…107

§6.1 Introduction…………………………………………...……………107

§6.1.1 Generation-Recombination Current………………………...……………107

§6.1.2 Diffuse Current……………………………………...………………108

§6.1.3 Surface Leakage Current………………………………...………………109

§6.1.4 Tunneling Current……………………………………..………………109

§6.2 Measurement Instruments………………………………………………110

§6.3 Results and Discusses…………………………………...………………111

§6.3.1 Reverse Bias I-V Properties……………………………………………….111

§6.3.2 Forward Bias I-V Properties……………………………………………119

References…………………………………………………………………….122

Chapter 7 Spectral Response of 4H-SiC p-i-n UV Photodetectors……………………………….…………………..………..125

§7.1 Intrduction……………………………………………………………….125

§7.2 The Methods of Spectral Response Measurements…………………….126

§7.3 Theoretical Calculation of Spectral Response of 4H-SiC p-i-n UV Photodetectors. …………………………..……………………….….131

§7.3.1 Photocurrent from Depletion Region………….…………………….....131

§7.3.2 Photocurrent from p^+ Region…………………….…………….…...132

§7.3.3 Photocurrent from n+ Region…………………………………….…..133

§7.3.3 Results and Discusses…………………………………………..……..135

§7.4 Temperature-Dependent of Spectral Response of 4H-SiC p-i-n UV Photodetector……………………………………………………….…...139

§7.4.1 Voltage- and Temperature-Dependent of Photocurrent………….……..139

§7.4.2 Temperature-Dependent of Spectral Response…………...……….……142

§7.4.3 Temperature-Dependent of Quantum Efficiency……………..…………..151

§7.4.4 Temperature-Dependent of Visible-UV Rejection Ratio…………………..153

Reference……………………………………………………………..………..155

Chapter 8 Summary and Future Work…………..………………159

§8.1 Summary……………………………………………………………….159

§8.1 Future Work……………………………………………………………..161

Publications………………………………...………….……...162

Acknowledges…..………………………..……………………164

第 1 章　绪论

§1.1　紫外线简介

§1.1.1　紫外线的分类

紫外线由德国物理学家里特（J. W. Ritte）于 1801 年发现[1]。紫外线辐射是太阳电磁辐射谱的一部分，其波长范围为 10-400nm。1932 年召开的第二届国际光学会议[2]把紫外线分为以下三种：UVA，波长范围 315-400nm；UVB，280-315nm；UVC，100-280nm。另外，还可以根据紫外线波长与可见光波长的差值把紫外线分类为[3]：近紫外(Near Ultraviolet, NUV)，波长范围 300-400nm；中紫外(Mid Ultraviolet, MUV)，200-300nm；远紫外(Far Ultraviolet, FUV) 100-200nm；极远紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)，10-100nm。

§1.1.2　紫外线的基本性质

从物理光学的观点看，紫外线与可见光、红外线都是电磁波，都具有波动性和粒子性，遵守光的反射、折射和透射定律，这是它们的共性。但是由于紫外线的波长更短、能量更大，又独具特色，如紫外线的荧光效应、生物效应和光化学效应等。

许多对可见光透明度很好的材料对紫外线的透过率很低，即它们对紫外线是“不透明的”。例如，普通窗户玻璃，对可见光透过率大于 80%，但对于 350nm 以下波长的紫外线，则几乎是不透明的。在实际应用中，可以利用材料的这一种特性来防止短波紫外线对人体的危害。

紫外线的波长较短，它照射到物体表面时，更容易被物质吸收，变成物质的内能，所以紫外线的穿透能力很弱，它只作用在物体很薄的表面层。

当紫外线波长小于 200nm 时，它会被空气中的氧气强烈吸收，因此波长小于 200nm 的紫外线只能在真空中而不能在空气中传播，通常称为真空紫外线。

表 1-1　某些透明物质对紫外线的透过率[1]

透过率 光波长(nm) 材料	光透过率(%)						
	400	350	320	310	300	290	200
普通玻璃(1.5mm 厚）	91	8	0	0	0	0	0
有机玻璃(2mm 厚)	94	93	92	90	50	5	0
一般石英玻璃(2mm 厚)	86	86	85	84	83	83	30
聚氯乙烯(0.1mm 厚)	94	85	81	78	63	0.4	0
聚氟亚乙烯树脂(0.1mm 厚)	80	80	72.5	70	67	65	4
乙烯共聚脂膜(0.1mm 厚)	84	73	5.76	53	50	44	0

§1.1.3　紫外线的效应

一、紫外线的荧光效应

紫外线的荧光效应是指紫外线照射到某些物质表面时会辐射出紫外线或可见光荧光的现象。

二、紫外线的生物效应

紫外线的生物效应是指当紫外线照射到人体或生物体后使其发生生理变化的现象。紫外线照射人体皮肤会使皮肤黑色素沉着，使皮肤变黑老化，催生皱纹，同时还会增加患上皮肤癌和白内障的机率。世界卫生组织（WHO）指出，有两成白内障病例可能与过度曝晒于紫外线下有关[4]。

紫外线对人体也有保健作用，例如人体经过特定的紫外线照射后能提高免疫力、皮肤再生能力以及毛发生长速度等。细菌体受紫外线照射之后会死亡，这就是紫外线消毒的工作原理。

不同波长紫外线具有不同的生理作用。图 1-1 为不同波长紫外线的相对杀菌率曲线，可以看到 254-257nm 紫外线的灭菌能力最强[5]。在非洲和印度等欠发达地区，用紫外线对受污染的河水灭菌是解决当地饮用水缺乏问题的既经济又行之有效的方法；空气中的氧分子吸收波长小于 200nm 的紫外线后，氧分子间的化学键被打断分解为氧原子，氧原子吸收紫外线后又与空气中的其它氧分子化合形成臭氧，臭氧有强烈的氧化和灭菌作用。

三、紫外线的光化学效应

紫外线照射某些物质时会引起这些物质产生光化学反应，如胶卷的感光、植物的光合作用、有机物的合成和分解、半导体器件工艺过程中的光刻曝光等。