

学校编码: 10384

学号: 19820080150508

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

**4H-SiC 吸收层、电荷层和倍增层分离结构紫外雪崩光  
电探测器的模拟和制备**

**Simulation and Fabrication of 4H-SiC Separated Absorption  
Charge and Multiplication Ultraviolet Avalanche Photodiodes**

张明昆

指导教师姓名: 吴正云 教授

专业名称: 凝聚态物理

论文提交日期: 2016 年 11 月

论文答辩时间: 2016 年 12 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2016 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

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## 摘 要

4H-碳化硅 (SiC) 紫外雪崩光电探测器 (APD) 已具备取代紫外光电倍增管和 Si 基紫外光电探测器的可能性, 它在光纤通信、高保密的非视距紫外通信及微弱紫外信号检测等特殊领域有重要的应用, 已日益成为国际上光电探测领域的研究热点。

近年来已报道的高性能 4H-SiC APDs 大多是采用吸收层和倍增层分离结构 (SAM) 进行制备。虽然 SAM 结构具有较高的量子效率, 但是为了实现有效的吸收层和倍增层分离结构, 要求倍增层厚度较薄且掺杂浓度较高, 这将会使得器件的暗电流较大且倍增层电场分布梯度过大, 不利于雪崩机制, 并导致器件雪崩击穿电压过大。为了解决这些问题, 本论文改进传统 4H-SiC SAM ( $p^+nn^-n^+$ ) 结构, 在倍增层和吸收层中间加入一电荷层形成吸收层、电荷层和倍增层分离 (SACM) 结构, 然后对 4H-SiC SACM APDs 进行优化模拟、器件制备和测试分析。主要成果如下:

1. 为获得可行的 SACM 结构, 根据 4H-SiC 材料的性质和高性能 APD 的要求, 对 4H-SiC SACM APD 的各层厚度和掺杂浓度进行设计和分析, 确定了吸收层和倍增层均为低掺杂浓度  $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , 吸收层的厚度为  $2 \mu\text{m}$ , 电荷层的掺杂浓度范围为  $1.0 \times 10^{18} \sim 2.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  和厚度范围为  $50 \sim 110 \text{nm}$ , 以及倍增层的厚度范围为  $0 \sim 600 \text{nm}$ , 这些结构和参数为采用 Silvaco Atlas 软件对器件进行优化模拟提供了依据。

2. 利用 Atlas 半导体模拟软件, 分别改变 SACM 结构的电荷层厚度和掺杂浓度、倍增层厚度, 模拟 4H-SiC APD 的电流-电压特性、电场分布和光谱响应特性, 分析电荷层的电场调节机理、雪崩击穿电压和响应度的变化原因, 最终获得满足低击穿电压、高响应度和高增益 4H-SiC SACM APD 的优化结构参数, 即电荷层厚度和浓度分别为  $100 \text{nm}$  和  $1.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , 倍增层厚度为  $200 \text{nm}$ , 这些为实际器件的制备提供有效的参考。

3. 依据模拟优化得到的结构参数, 同时对 APD 的制备工艺进行改进, 利用光刻和刻蚀技术获得小倾斜角的倾斜台面, 然后通过热氧化和 PECVD 方法生长  $\text{SiO}_2$  作为器件的钝化层, 最后制备出低暗电流、低击穿电压和高增益的 4H-SiC SACM

APD。对制备的 APD 进行电学和光学特性测量,结果表明在低反向偏压( $<26.0\text{V}$ )时,暗电流密度小于  $3\text{nA}/\text{cm}^2$ ;且器件具有较低的雪崩击穿电压  $77.6\text{V}$ ,在临界击穿电压时倍增因子高达  $10^6$ ,满足微弱紫外信号探测的需求。测量了不同偏压下的器件绝对光谱响应,其峰值响应波长为  $270\text{nm}$ ,且在反向偏压为  $40\text{V}$  时光谱响应的最大值和对应的外量子效率分别为  $83\text{mA}/\text{W}$  和  $38.2\%$ ,器件的紫外-可见抑制比 ( $270\text{nm}/380\text{nm}$ ) 约为  $10^3$ 。在零伏偏压下器件的归一化探测率最大值为  $1.23 \times 10^{14}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ,体现出较好的紫外探测能力。此外,器件的暗电流-电压特性、光谱响应特性测试结果与相同结构参数的器件仿真模拟结果有较高的吻合度,总体趋势一致,表明仿真模拟采用的模型基本正确同时也验证了器件制备的成功。

**关键词:** 4H-SiC, SACM 结构, 雪崩, 紫外光电探测器

## ABSTRACT

High performance 4H-SiC ultraviolet (UV) avalanche photodiodes (APDs), as a potential candidate to replace UV photomultiplier tubes and Si-based UV photodiodes, play an important role in the fields such as optical fiber communication, non-line-of-sight covert communications and low-level UV detection, which have increasingly become an research hotspot in the photoelectric detection field.

Recently, high performance 4H-SiC APDs have been demonstrated, most of these APDs utilizing the separated absorption and multiplication (SAM) structure. The SAM structure has the benefit of high quantum efficiency. However, in order to achieve the absorption and multiplication separated effectively, the multiplication layer should have a relatively thin thickness and a high doping concentration. And, these may result in a high dark current, and a large distribution gradient of electric-field in multiplication layer, which is bad for avalanche mechanism, and thus giving rise to a relatively high breakdown voltage. These problems can be eliminated by the separated absorption, charge, and multiplication (SACM) structure APD, which consists of a thin uniformly doped charge layer inserted between the intrinsic multiplication region and the absorption region. In this dissertation, 4H-SiC SACM APDs had been simulated and optimized by Silvaco Atlas software, and then fabricated and tested. The achieved results are as follows:

1. According to the material properties of 4H-SiC and high performance requirements of APD, the parameters of each layer in SACM structure were designed and analyzed, to determine both the doping concentrations with  $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  of absorption layer and multiplication layer, and the absorption layer thickness of  $2 \mu\text{m}$ . Besides, the doping concentration range ( $1.0 \times 10^{18} \sim 2.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) and thickness range ( $50 \sim 110 \text{nm}$ ) of charge layer, and thickness range ( $0 \sim 600 \text{nm}$ ) of multiplication layer were also obtained. The following simulations by Atlas were based on these data.

2. Utilizing the Atlas software, the performances of 4H-SiC SACM APD were optimized by altering the charge layer thickness, the charge layer doping concentration and the multiplication layer thickness, respectively. The current-voltage characteristic,

electric-field distribution and spectral response for APDs were simulated. Then, by taking into account the factors of electric-field control mechanism by charge layer, also the avalanche breakdown voltage and responsivity, the optimal parameters with charge layer thickness of 100nm, charge layer doping concentration of  $1.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ , and multiplication layer thickness of 200nm were obtained.

3. Based on the structure parameters obtaining from the modeling results, the fabrication process of APD was designed and optimized. A small bevel mesa was achieved based on lithography and ICP etching technique, and then a  $\text{SiO}_2$  passivation layer was deposited by thermal oxidation and PECVD. Finally, low dark current, low breakdown voltage and high gain of 4H-SiC SACM APDs were fabricated. According to the current-voltage measurements, the APDs obtained a low dark current density of  $3 \text{nA/cm}^2$  at low reverse bias ( $< 26.0 \text{V}$ ), a low breakdown voltage of  $77.6 \text{V}$ , and a gain as high as  $10^6$  at near the breakdown voltage, which satisfied the requirements of low-level UV detection. The spectral response of APD was measured at different reverse bias ranging from  $5 \text{V}$  to  $40 \text{V}$ . At  $40 \text{V}$ , the peak responsivity was about  $83 \text{mA/W}$  at  $270 \text{nm}$ , corresponding to a peak external quantum efficiency of  $38.2\%$ . The UV-to-visible rejection ratio ( $270 \text{nm}/380 \text{nm}$ ) approximate three orders of magnitude were also extracted from the spectral response. Besides, specific detectivity ( $D^*$ ) at zero bias was estimated to be as high as  $1.23 \times 10^{14} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$  at  $270 \text{nm}$ , indicating a good UV detection performance. Moreover, the measured I-V and spectral response are in good agreement with the simulation results of the same structure parameters, confirming the validity of simulation results.

**Key Words:** 4H-SiC; SACM structure; Avalanche; Ultraviolet Photodetector



## 目录

第一章 绪论 .....	1
1.1 紫外线辐射及其应用 .....	1
1.1.1 紫外线辐射 .....	1
1.1.2 紫外线辐射的应用 .....	1
1.2 宽禁带紫外光电探测器的概述和研究现状 .....	3
1.2.1 紫外光电探测器的概述 .....	3
1.2.2 宽禁带半导体紫外光电探测器的研究现状 .....	6
1.3 4H-SiC 雪崩光电探测器的研究现状和发展前景 .....	10
1.3.1 4H-SiC 雪崩光电探测器的研究现状 .....	11
1.3.2 4H-SiC 雪崩光电探测器的发展前景 .....	12
1.4 论文的研究目的 .....	13
1.5 论文的工作及组织结构 .....	13
参考文献 .....	15
第二章 SiC 半导体材料及其性质 .....	22
2.1 为什么选择 4H-SiC 材料 .....	22
2.2 SiC 的晶体结构 .....	24
2.3 SiC 的电学性质 .....	26
2.3.1 能带结构和响应截止波长 .....	26
2.3.2 本征载流子浓度 .....	27
2.3.3 载流子漂移速度和迁移率 .....	29
2.3.4 临界击穿场强和碰撞电离率 .....	31
2.3.5 载流子寿命 .....	33
2.4 SiC 的光学性质 .....	35
2.4.1 反射率和透射率 .....	35
2.4.2 吸收系数 .....	36
参考文献 .....	39
第三章 4H-SiC SACM APD 的工作原理和结构设计 .....	42
3.1 APD 的工作原理 .....	42
3.1.1 pn 结的击穿 .....	42
3.1.2 APD 的工作原理 .....	44
3.2 APD 的性能参数 .....	45
3.2.1 暗电流 .....	45
3.2.2 响应度和量子效率 .....	48
3.2.3 倍增因子和雪崩击穿电压 .....	50
3.2.4 噪声特性 .....	50
3.2.5 最小可探测功率 .....	51
3.3 4H-SiC SACM APD 的结构和参数设计 .....	53
3.3.1 4H-SiC SACM APD 的结构设计 .....	53
3.3.2 4H-SiC SACM APD 的各层参数设计 .....	57

3.4 本章总结 .....	58
参考文献 .....	59
<b>第四章 4H-SiC SACM APD 的优化模拟和器件制备 .....</b>	<b>61</b>
4.1 Silvaco Atlas 半导体模拟软件介绍 .....	61
4.1.1 Silvaco Atlas 仿真软件的物理模型和方程 .....	62
4.1.2 Silvaco Atlas 仿真软件的数值计算方法 .....	63
4.2 4H-SiC SACM APD 模拟程序的设置 .....	63
4.2.1 器件结构定义 .....	64
4.2.2 材料参数及模型设定 .....	67
4.2.3 数值计算方法的设定 .....	72
4.2.4 特性求解和结果输出 .....	72
4.3 4H-SiC SACM APD 的优化模拟结果和分析 .....	76
4.3.1 不同电荷层厚度的 4H-SiC SACM APD 优化模拟 .....	77
4.3.2 不同电荷层掺杂浓度的 4H-SiC SACM APD 的优化模拟 .....	82
4.3.3 不同倍增层厚度的 4H-SiC SACM APD 的特性分析 .....	84
4.3.4 小结 .....	88
4.4 4H-SiC SACM APD 的制备 .....	89
4.4.1 材料结构参数 .....	89
4.4.2 制备工艺流程和光刻版图设计 .....	89
4.4.3 关键工艺探究 .....	91
4.5 本章总结 .....	99
参考文献 .....	100
<b>第五章 4H-SiC SACM APD 的性能测试和分析 .....</b>	<b>102</b>
5.1 测试系统简介 .....	102
5.1.1 测试仪器设备 .....	103
5.1.2 测试原理和方法 .....	104
5.2 器件性能测试结果与讨论 .....	105
5.2.1 反向电流-电压特性与倍增因子 .....	105
5.2.2 正向电流-电压特性 .....	108
5.2.3 绝对光谱响应和量子效率 .....	109
5.2.4 归一化探测率 .....	112
5.3 本章总结 .....	113
参考文献 .....	115
<b>第六章 工作总结与展望 .....</b>	<b>116</b>
6.1 工作总结 .....	116
6.2 今后的工作展望 .....	117
<b>博士期间的科研成果 .....</b>	<b>119</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>120</b>

## CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Ultraviolet Radiation and its Application.....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Ultraviolet .....	1
1.1.2 Application of Ultraviolet Radiation.....	1
<b>1.2 Overview and Development Prospects of Wide Bandgap PDs .....</b>	<b>3</b>
1.2.1 Overview of Ultraviolet Photodetectors.....	3
1.2.2 Development Prospects of Wide Bandgap Photodetectors .....	6
<b>1.3 Development Prospects of 4H-SiC APDs .....</b>	<b>10</b>
1.3.1 Research Progress of 4H-SiC APDs .....	11
1.3.2 Development Prospects of 4H-SiC APDs .....	12
<b>1.4 Motivation.....</b>	<b>13</b>
<b>1.5 Dissertation Organization .....</b>	<b>13</b>
<b>References .....</b>	<b>15</b>
<b>Chapter 2 4H-SiC Material Properties .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Why 4H-SiC Material.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 Crystal Structure of SiC .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Electrical Properties of 4H-SiC .....</b>	<b>26</b>
2.3.1 Energy Band Structure .....	26
2.3.2 Intrinsic Carrier Concentration .....	27
2.3.3 Drift Velocity and Mobility Carrier.....	29
2.3.4 Critical Field Intensity and Impact Ionization Rate .....	31
2.3.5 Carrier Lifetime.....	33
<b>2.4 Optical Properties of 4H-SiC .....</b>	<b>35</b>
2.4.1 Reflectivity and Transmittivity .....	35
2.4.2 Absorption Coefficient .....	36
<b>References .....</b>	<b>39</b>
<b>Chapter 3 The Fundamental and Structure of SACM APD.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Fundamental of APD .....</b>	<b>42</b>
3.1.1 PN Junction Breakdown.....	42
3.1.2 Fundamental of APD .....	44
<b>3.2 Performance Parameters of APD .....</b>	<b>45</b>
3.2.1 Dark Current.....	45
3.2.2 Responsivity and Quantum Efficiency.....	48
3.2.3 Breakdown Voltage and Gain.....	50
3.2.4 Noise Factor .....	50
3.2.5 The Minimum Detectable Power .....	51
<b>3.3 Structure and Parameters Design of SACM APD .....</b>	<b>53</b>
3.3.1 Structure Design.....	53
3.3.2 Parameters Design.....	56

<b>3.4 Summary</b> .....	<b>58</b>
<b>References</b> .....	<b>59</b>
<b>Chapter 4 Simulation and Fabrication of 4H-SiC APD</b> .....	<b>61</b>
<b>4.1 Introduction of Silvaco Atlas software</b> .....	<b>61</b>
4.1.1 Physical Models .....	62
4.1.2 Numerical Calculation Methods .....	63
<b>4.2 Simulation Program of SACM APD</b> .....	<b>64</b>
<b>4.2.1 Structure Specification</b> .....	65
4.2.2 Material Parameters and Physical Models .....	67
4.2.3 Numerical Methods .....	72
4.2.4 Simulation Results and Output.....	72
<b>4.3 Simulation Results and Analysis of SACM APD</b> .....	<b>76</b>
4.3.1 Different Thickness of Charge Layer .....	77
4.3.2 Different Doping Concentration of Charge Layer .....	82
4.3.3 Different Thickness of Multiplication Layer .....	84
4.3.4 Brief Summary .....	88
<b>4.4 The fabrication of 4H-SiC SACM APD</b> .....	<b>89</b>
4.4.1 Material Structure Parameters.....	89
4.4.2 Process Flow and Mask Design .....	89
4.4.3 Device Fabrication .....	91
<b>4.5 Summary</b> .....	<b>99</b>
<b>References</b> .....	<b>100</b>
<b>Chapter 5 Results and Discussion of 4H-SiC SACM APD</b> .....	<b>102</b>
<b>5.1 Measurement System</b> .....	<b>102</b>
5.1.1 Measurement Instruments .....	103
5.1.2 Measurement Method.....	104
<b>5.2 Results and Discussion</b> .....	<b>105</b>
5.2.1 Reverse Current-Voltage Characteristic and Multiplication Factor.....	105
5.2.2 Forward Current-Voltage.....	108
5.2.3 Spectral Responsivity and Quantum Efficiency .....	109
5.2.4 Specific Detectivity .....	112
<b>5.3 Summary</b> .....	<b>113</b>
<b>References</b> .....	<b>115</b>
<b>Chapter 6 Summary and Future Work</b> .....	<b>116</b>
<b>6.1 Summary</b> .....	<b>116</b>
<b>6.2 Future Work</b> .....	<b>118</b>
<b>Appendix Publications</b> .....	<b>119</b>
<b>Acknowledgements</b> .....	<b>120</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 紫外线辐射及其应用

#### 1.1.1 紫外线辐射

紫外线是指电磁波谱中波长范围从 10 ~ 400nm 辐射的总称<sup>[1]</sup>，自然界的紫外线辐射主要来源于太阳，紫外线辐射量大约占太阳总辐射量的 8%，根据世界卫生组织（WHO）、世界气象组织（WMO）等国际机构联合规定，把紫外线划分成以下三个波段<sup>[2]</sup>：

紫外 A（UVA），波长范围 315 ~ 400nm；

紫外 B（UVB），波长范围 280 ~ 315nm；

紫外 C（UVC），波长范围 100 ~ 280nm。

此外，按生物效应的不同，也可以把紫外线辐射划分成以下四个波段<sup>[3]</sup>：

紫外 A（UVA），又称为长波紫外黑斑效应波段，320 ~ 400nm；

紫外 B（UVB），又称为中波紫外红斑效应波段，275 ~ 320nm；

紫外 C（UVC），又称为短波紫外灭菌波段，200 ~ 275nm；

紫外 D（UVD），又称为真空紫外波段，10 ~ 200nm。

当太阳光通过大气层时，所有的 UVC 波段和接近 90% 的 UVB 都被臭氧层、平流层、及空气中的水蒸汽、氧气和二氧化碳气体等所吸收，而 UVA 几乎不受大气层的影响，所以实际到达地球表面的紫外线辐射主要由 UVA（约占紫外线辐射总量的 98.9%）和少量的 UVB 组成，如图 1-1 所示。UVA 波段对人体产生的伤害比较小，但会产生光化学烟雾。UVB 波段对人体伤害较大，过量的曝晒会引起皮肤癌、白内障及免疫能力下降，而且随着环境的恶劣、臭氧层空洞逐渐变大将会有更多的 UVB 照射到地面，这将严重影响人类的健康生活。UVC 波段的紫外辐射主要是由人工环境及设备所产生的，如氙灯、电磁设备、紫外线激光器等。

#### 1.1.2 紫外线辐射的应用

紫外线辐射的研究早在 19 世纪后半期就开始了，当人们在可见光谱的紫光边

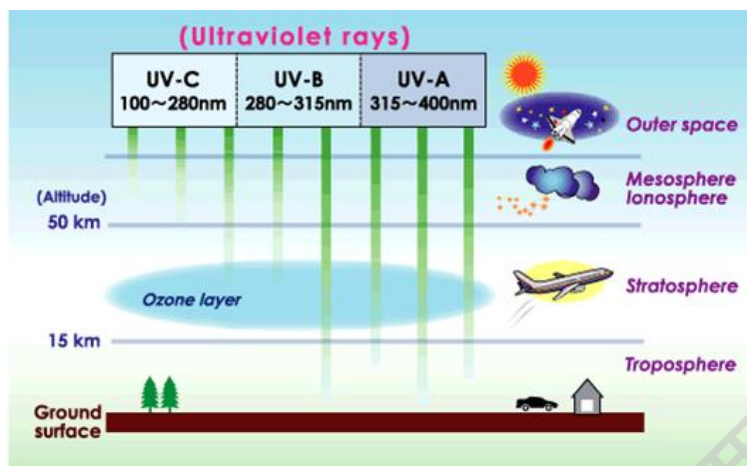


图 1-1 紫外线辐射

发现一种看不见的辐射时，就开始对紫外线辐射给予极大的关注。紫外线辐射的探测在生物技术、材料化学、生态学、天文宇航及紫外辐射测量等领域都有广泛的应用<sup>[4]</sup>。在紫外线辐射的研究中，“日盲型”紫外探测是最具吸收力的热点之一。太阳是地球周围最强的辐射源，图 1-2 显示大气层上方和海平面上的平均太阳辐射<sup>[5]</sup>，照射到海平面上的太阳紫外辐射截止波长约为 280nm，其太阳辐照度小于  $10 \sim 20 \text{ mW}/(\text{m}^2 \text{ nm})$ ，光子到达率相当于  $6.1 \times 10^{-5} \text{ ph}/(\text{s nm m}^2)$ 。由图 1-2 可看出，臭氧层和平流层对紫外线波段 200 ~ 280nm 有强烈的吸收，只有波长大于 280nm 紫外线辐射才到达地球表面。此外，空气中氧分子对于紫外线波段从 110 ~ 250nm 的远紫外线有很强的吸收能力，且此波段的紫外线只能在空气中传播很短的距离；

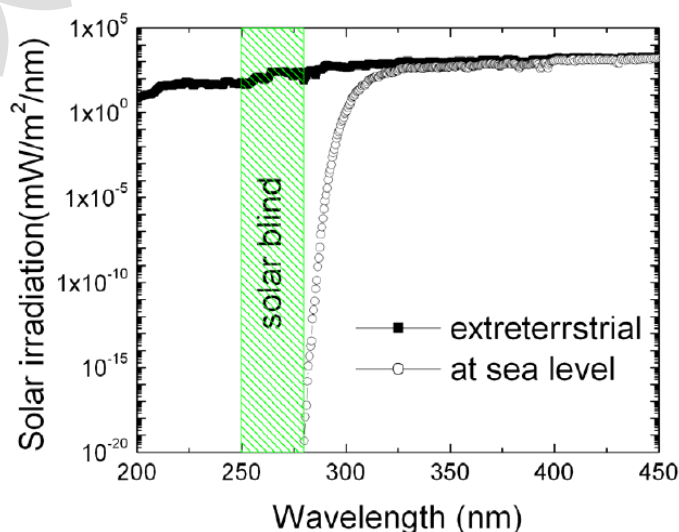


图 1-2 大气层上方和海平面上的平均太阳辐射量

而对于波长更短（小于 110nm）的紫外线，更容易被空气中的原子或分子气体所吸收。如果是探测波长在 250 ~ 280nm 的紫外线辐射，则几乎不受太阳光辐射的干扰，因此，把波长范围 250 ~ 280nm 的紫外线波段称为“日盲”窗口。制备具有高性能的“日盲”型紫外光电探测器，在许多特殊领域有重大价值，如导弹尾气检测、火焰传感器、非视距紫外通信等<sup>[6,7]</sup>。波长小于 250 nm 的深紫外探测在荧光拉曼光谱检测的应用也很重要<sup>[8]</sup>；而从 300 nm 到 400nm 的近紫外波段的探测也非常广泛，特别是在医学成像和核能探测方面<sup>[9,10]</sup>，探测微弱紫外信号的紫外探测器已成为近年来国际上光电探测领域的研究热点。

## 1.2 宽禁带紫外光电探测器的概述和研究现状

### 1.2.1 紫外光电探测器的概述

紫外光电探测器是利用光电效应，将紫外光信号转化成电学信号的器件。相比可见和红外光电探测器，紫外光电探测器具有几下主要特点：（1）对红外和可见波段是“可见光盲”或者“日盲型”，可以在红外和可见光背景下工作；（2）可在室温下工作，无需像红外光电探测器需工作在液氮环境下；（3）结构相对简单、可靠性好、体积小等优点。

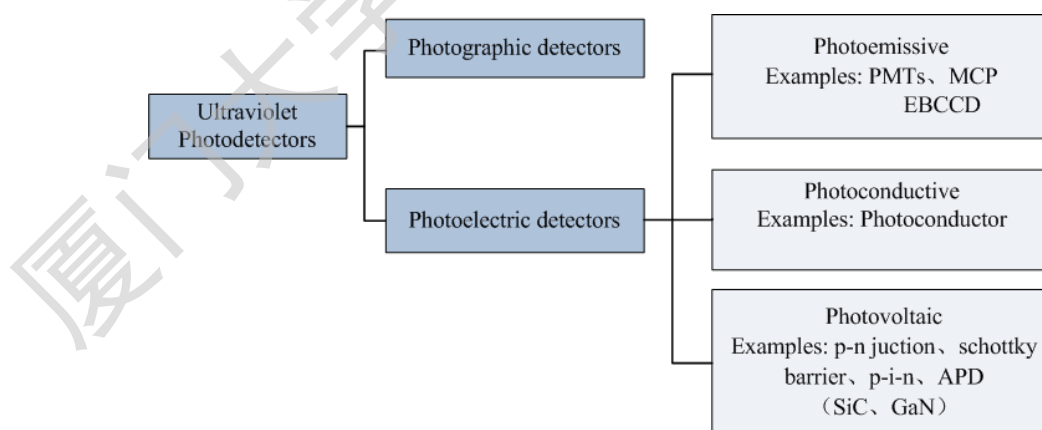


图 1-3 紫外光电探测器的分类

紫外光电探测器按其作用机理，如图 1-3 所示<sup>[11]</sup>，主要有三种类型：（1）光电真空探测器，如光电倍增管（PMT）、像增强探测器等；（2）紫外光电导探测器，

如 AlGa<sub>N</sub> 基和 ZnO 光电导探测器等；(3) 光伏探测器，如 Si, SiC、GaN 光伏探测器等。此外，紫外光电探测器按其制备结构分类，主要有四种：金属-半导体-金属结构 (MSM)、肖特基势垒型 (Schottky Barrier)、p-i-n 结构和雪崩结构光电探测器(Avalanche Photodetector, APD)，四种结构的光电探测器性能对比如表 1-1 所示。APD 兼具有探测和放大功能，其探测灵敏度高、增益大和响应速度快，被广泛应用于微弱紫外信号的探测。

表 1-1 四种结构的紫外光电探测器性能对比

探测器结构	MSM	Schottky barrier	p-i-n	APD
制备工艺	平面结构，工艺简单	结构较简单、适合制备大光敏面积的器件	工艺较复杂	工艺复杂
工作偏压	低	低	低	高
响应度	高	低	高	高
倍增噪声	无	无	无	有
灵敏度	低	低	高	很高
内部增益	无（易产生光电导增益）	无	无	有

目前，紫外 PMT 具有内部增益高、灵敏度高等优点，用于检测微弱紫外信号有悠久的历史，但是紫外 PMT 体积大、易碎、对磁场较敏感、量子效率低（小于 40%）<sup>[12]</sup>且需要高压工作（通常 300~900 V）。受益于 Si 材料工艺技术的成熟和完善，Si 基紫外光电探测器在一些传统领域上仍有很好的应用，然而 Si 基器件需要加装滤波片才能探测紫外波段，且当工作在较高温度下（远大于室温），Si 基器件必须被冷却以降低器件漏电流和系统噪声<sup>[13]</sup>，这种冷却装置不仅增加质量、系统的功耗和成本，也降低了冷却装置的探测能力。此外，当工作在可见光和红外背景下，辐射能量大于 Si 半导体的带隙能量时，容易导致器件老化；且由于这些光子被检测到，就会增加噪声<sup>[14]</sup>，降低检测的灵敏度。因此，随着许多新兴产业的兴起，要求器件尺寸越来越小、性能越来越高，而且紫外光电探测器往往需要工作在恶劣条件，如高温、高压和强辐射等环境，传统的紫外 PMT 和 Si 基探测器等



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts 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.