



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

AllnAsSb 雪崩光电二极管噪声特性研究

作者姓名: 张宁涛

指导教师: 陈佰乐 研究员

上海科技大学

学位类别: 工学硕士

学科专业: 微电子学与固体电子学

培养单位: 中国科学院上海微系统与信息技术研究所

2020 年 6 月

Noise study of AlInAsSb avalanche photodetector

A Thesis Submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of [Science in Engineering]
in [Microelectronics and Solid State Electronics]

By
Zhang Ningtao
Thesis Supervisor: Professor Chen Baile

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology,
Chinese Academy of Sciences

June 2020

中国科学院大学

研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：张宁涛
日期：2020/05/19

中国科学院大学

学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。涉密的学位论文在解密后适用本声明。

作者签名：张宁涛	导师签名：陈伯乐
日期：2020/05/19	日期：2020/5/19

摘 要

雪崩光电探测器(APDs)已被广泛应用于商业、航天、军事和一些科学研究领域,如光通信、光成像和单光子探测。雪崩探测器相对于普通 **p-i-n** 光电探测器的主要优势为其内部增益可以给器件提供更高的灵敏度,但随之而来的代价是由于增益而引起的额外噪声,称之为过剩噪声。这种新出现的噪声激发了对低噪声材料以及低噪声器件结构的研究。

本论文针对寻找低过剩噪声材料雪崩探测器的需求进行了一系列的探究,其中包括搭建雪崩探测器过剩噪声测试系统与量子效率测试系统,同时对一种新型的低过剩噪声材料 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 数字合金进行了一系列的器件性能测试并分析。本论文主要研究内容和成果为:

1. 测试不同 Al 成分比例 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 器件($x = 30\%, 40\%, 50\%, 70\%, 80\%$)在常温下的暗电流, Al 成分比例 30%的器件暗电流在微安量级而 Al 成分比例 80%的器件暗电流在纳安量级,通过测试器件暗电流与尺寸的关系可分析出暗电流主要由表面漏电流主导。

2. 使用量子效率测试系统测试了器件在不同波长下的量子效率,响应度以及噪声等效功率(NEP),分析了不同 Al 成分比例器件的截止波长。

3. 测试器件的光电流并计算增益,发现 Al 成分比例 80%和 70%的器件可以测到明显的增益,因此对这两种成分比例的器件进行过剩噪声的测试,分析得到器件的 k 值大概为 0.05,验证了此材料的低过剩噪声性能。

4. 用低频噪声测试系统测试分析了 Al 成分比例 30%, 40%和 50%器件的缺陷情况。其中 Al 成分比例 30%的器件存在 3 个缺陷,它们的活化能分别为 0.11eV, 0.16eV, 0.21eV; Al成分比例 40%的器件存在 1个缺陷,活化能为 0.71eV; Al 成分比例 50%的器件存在 2 个缺陷,其的活化能分别为 0.13eV, 0.21eV。又利用使器件表面氧化后再次测试的技巧分析出了 Al 成分比例 30%器件中缺陷的本质是体缺陷还是表面缺陷。

关键词: 雪崩探测器, AlInAsSb 数字合金, 过剩噪声, 低频噪声, 缺陷能级

ABSTRACT

Avalanche photodetectors (APDs) have been widely used in commercial, aerospace, military and some scientific research fields, such as optical communication, infrared imaging and single-photon detection. The internal gain of APDs can provide a higher signal-to-noise (SNR) ratio than conventional p-i-n photodetectors, which results in enhanced optical sensitivity. However, the impact ionization process responsible for the internal gain in APDs is stochastic in nature, leading to an additional source of shot noise called excess noise. As a result, finding a material with low excess noise has been a critical issue in the APD research community.

In this thesis, a series of research were carried out for finding avalanche photodetectors with low excess noise, includes building an avalanche detector excess noise test system and a quantum efficiency test system. At the same time, a series of device performance tests and analyses of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ digital alloy, a new kind of low excess noise material, were carried out. The main research contents and achievements of this thesis are:

1. The dark current of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ devices with different Al component ratios ($x = 30\%, 40\%, 50\%, 70\%, 80\%$) were tested at room temperature. The dark current of devices with 30% Al component ratio was in the microampere scale, while the dark current of devices with 80% Al component ratio was in the nanoampere scale. The relationship between the dark current and the size of the tested devices could be analyzed to show that the dark current was mainly dominated by surface leakage current.
2. The quantum efficiency, responsivity and noise equivalent power (NEP) of the device at different wavelengths were tested by using the quantum efficiency test system, and the cutoff wavelength of different Al component ratio devices was analyzed.
3. The photocurrent of the device was tested and the gain was calculated. It was found that the obvious gain could be detected in the devices with 80% and 70% Al component ratio. Therefore, excess noise was tested for the devices with the proportion

of these two components. The k value of the device is about 0.05, which verifies the low excess noise performance of the material.

4. Defects of the device with 30%, 40% and 50% Al components were analyzed by low frequency noise testing system. Among them, the devices with 30% Al component have three defects, and their activation energies are 0.11eV, 0.16eV and 0.21eV respectively. The device with 40% Al component have one defect and activation energy of 0.71eV. The device with 50% Al component have two defects, and its activation energies were 0.13eV and 0.21eV, respectively. By using the technique of retesting the device after surface oxidation, can find out the nature of defects in the device with 30% Al component is body defects or surface defects.

Key Words: APD, AlInAsSb digital alloy, excess noise, LFN, defect level

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 文献综述.....	6
1.3 本文的主要内容与结构.....	10
第 2 章 雪崩光电探测器的性能指标与噪声来源.....	11
2.1 雪崩光电探测器的性能指标.....	11
2.1.1 暗电流.....	11
2.1.2 雪崩增益.....	13
2.1.3 过剩噪声.....	15
2.1.4 量子效率与响应度.....	18
2.1.5 带宽.....	20
2.2 雪崩光电探测器的噪声来源.....	21
2.2.1 $1/f$ 噪声.....	21
2.2.2 产生-复合噪声.....	23
2.2.3 热噪声.....	23
2.2.4 散粒噪声.....	24
2.3 低频噪声测试与缺陷分析.....	24
2.4 本章小结.....	25
第 3 章 基于 AlInAsSb 的 APD 器件性能表征.....	27
3.1 器件的生长与工艺.....	27
3.2 器件的暗电流特性.....	28
3.2.1 不同 Al 成分比例器件的暗电流.....	28
3.2.2 器件暗电流与器件尺寸的关系.....	29
3.2.3 器件的变温暗电流情况.....	32
3.3 器件的增益特性.....	35
3.4 器件的量子效率.....	38
3.5 器件的过剩噪声.....	39

3.5.1 Al 成分比例 80%材料器件的过剩噪声	40
3.5.2 Al 成分比例 70%材料器件的过剩噪声	44
3.6 本章小结.....	45
第 4 章 AlInAsSb 器件低频噪声测试与缺陷分析	47
4.1 Al 成分比例 30%材料器件的缺陷	47
4.1.1 器件的暗电流性能.....	47
4.1.2 器件的低频噪声谱分析.....	50
4.2 Al 成分比例 40%材料器件的缺陷	55
4.2.1 器件的暗电流性能.....	55
4.2.2 器件的低频噪声谱分析.....	57
4.3 Al 成分比例 50%材料器件的缺陷	59
4.3.1 器件的暗电流性能.....	59
4.3.2 器件的低频噪声谱分析.....	60
4.4 本章小结.....	63
第 5 章 总结与展望.....	65
参考文献.....	67
致 谢.....	75
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果.....	77

图表目录

图 1.1 解释雪崩探测器电子和空穴电离系数的概念能带图 ^[11]	2
图 1.2 不同 k 值的雪崩探测器和 p-i-n 探测器的理论灵敏度与雪崩增益的关系 ^[13] ...	3
图 1.3 不同 k 值范围材料过剩噪声与增益的关系, 阴影区域表示不同材料对应的 k 值 ^[12]	4
图 1.4 高 k 值(上)和低 k 值(下)材料中碰撞电离事件的概念说明 ^[11]	5
图 1.5 碰撞电离工程雪崩二极管的倍增区 ^[2]	7
图 1.6 $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.15}\text{Al}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 碰撞电离工程雪崩二极管的过剩噪声因子 $F(M)$ 与增益 M 的关系 ^[2]	8
图 2.1 低温探针台	13
图 2.2 雪崩光电探测器增益与电压关系图	14
图 2.3 基于相敏技术增益测试原理图	15
图 2.4 不同 k 值下的过剩噪声因子与增益的关系	16
图 2.5 过剩噪声测试方法原理图	16
图 2.6 过剩噪声测试系统	17
图 2.7 量子效率测试原理图	19
图 2.8 量子效率测试系统	19
图 2.9 典型的光电探测器噪声频谱图	21
图 2.10 有无产生-复合噪声情况下的低频噪声 ^[72]	25
图 3.1 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 雪崩探测器的横截面示意图	28
图 3.2 不同 Al 成分比例器件的暗电流	29
图 3.3 AlInAsSb 器件在显微镜下的尺寸测量图	30
图 3.4 Al 成分比例 80%器件暗电流与尺寸的关系 (其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流)	30
图 3.5 Al 成分比例 50%器件暗电流与尺寸的关系 (其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流)	31

图 3.6 Al 成分比例 40%器件暗电流与尺寸的关系（其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流）	31
图 3.7 Al 成分比例 30%器件暗电流与尺寸的关系（其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流）	32
图 3.8 Al 成分比例 70%，直径 500 μm 器件不同温度下的 I-V 曲线	33
图 3.9 偏压-1V 下暗电流与温度的 Arrhenius 图	33
图 3.10 Al 成分比例 70%，直径 200 μm 器件不同温度下的 I-V 曲线	34
图 3.11 偏压-1V 下暗电流与温度的 Arrhenius 图	34
图 3.12 Al 成分比例 80%器件的暗电流与光电流	35
图 3.13 Al 成分比例 80%器件的增益	35
图 3.14 Al 成分比例 70%器件的暗电流与光电流	36
图 3.15 Al 成分比例 70%器件的增益	36
图 3.16 Al 成分比例 50%器件的暗电流与光电流	37
图 3.17 Al 成分比例 40%器件的暗电流与光电流	37
图 3.18 Al 成分比例 80%，直径 500 μm 器件不同偏压下的量子效率	38
图 3.19 Al 成分比例 80%，直径 150 μm 器件不同偏压下的量子效率	38
图 3.20 不同 Al 成分比例，直径 150 μm 器件的量子效率	39
图 3.21 红光下不同光强光电流与噪声关系图	40
图 3.22 红光下过剩噪声因子与增益关系图	41
图 3.23 橙光下不同光强光电流与噪声关系图	42
图 3.24 橙光下过剩噪声因子与增益关系图	42
图 3.25 绿光下不同光强光电流与噪声关系图	43
图 3.26 绿光下过剩噪声因子与增益关系图	44
图 3.27 绿光下过剩噪声因子与增益关系图	45
图 4.1 不同尺寸 AlInAsSb 器件在-1V, 300K 时暗电流与直径的关系（其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流），(a)所有测试器件 (b)每种尺寸下性能最佳的器件	48

图 4.2	500 μm (a)和 200 μm (b)器件不同温度下的电流-电压特性.....	49
图 4.3	偏压-1V 下的暗电流与温度的 Arrhenius 图.....	50
图 4.4	直径 500 μm 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合	51
图 4.5	直径 200 μm 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合	51
图 4.6	$\ln(\tau_0 i T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图, 红色为 500 μm 器件, 蓝色为 200 μm 器件	52
图 4.7	氧化前后器件在-1V 下暗电流的对比	52
图 4.8	直径 500 μm 器件氧化后不同温度下的噪声谱和洛伦兹拟合	53
图 4.9	直径 200 μm 器件氧化后不同温度下的噪声谱和洛伦兹拟合	54
图 4.10	器件氧化后 $\ln(\tau_0 i T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图, 红色为 500 μm 器件, 蓝色为 200 μm 器件	54
图 4.11	500 μm (a)和 200 μm (b)器件不同温度下的电流-电压特性.....	56
图 4.12	偏压-1V 下的暗电流与温度的 Arrhenius 图.....	57
图 4.13	直径 200 μm 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合	58
图 4.14	直径 200 μm 器件 $\ln(\tau_0 i T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图	58
图 4.15	500 μm (a)和 200 μm (b)器件不同温度下的电流-电压特性.....	59
图 4.16	偏压-1V 下的暗电流与温度的 Arrhenius 图.....	60
图 4.17	直径 500 μm 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合	61
图 4.18	直径 500 μm 器件 $\ln(\tau_0 i T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图	61
图 4.19	直径 200 μm 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合	62
图 4.20	直径 200 μm 器件 $\ln(\tau_0 i T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图	62
表格 4.1	两个器件中的所有缺陷以及其它物理参数的总结.....	55
表格 4.2	两个器件中的缺陷以及其它物理参数的总结.....	57
表格 4.3	两个器件中的缺陷以及其它物理参数的总结.....	60

第1章 绪论

1.1 引言

光电二极管的是利用光电效应把光信号转换成电信号的一种半导体器件。器件内部的工作原理是通过吸收光产生电子-空穴对。光电二极管从军事到商业再到研究上的应用都非常广泛^[1]。雪崩光电探测器(APD)是一种可用于探测和放大微弱光信号的光电探测器,由于其内部增益机制使其在光通信^[2]、成像^[3,4]和单光子探测^[5,6]等领域特别有用。它相对于 p-i-n 探测器的主要优势是雪崩增益提供了更高的灵敏度,即可以探测更加微弱的信号^[7]。

雪崩光电探测的增益来源于一个叫做碰撞电离的过程。当器件内部中载流子在电场作用下加速获得足够大能量时,就有机会产生撞击电离。在这个过程中,载流子一旦和晶格发生碰撞,就将有机会把电子从其束缚态撞出,并将其从价带跃迁到导带。这个过程产生了一个新的电子-空穴对。现在,原始的电子与空穴(称为初级电子-空穴对)和新生成的(次级)电子-空穴对继续在电场作用下加速从而获得能量,并进一步发生碰撞电离事件。所有的碰撞电离事件使得一个载流子(电子或者空穴)可以产生多个载流子,因此就有了“雪崩”光电二极管这个术语^[8]。

碰撞电离是雪崩探测器增益的来源,也是雪崩探测器比普通的 p-i-n 结构探测器具有更高灵敏度的原因,碰撞电离可以使信号放大,但碰撞电离的随机性却带来了一个新的噪声称为过剩噪声^[9]。为了简单阐述先忽略空穴,如果一个电子被注入到雪崩探测器的倍增区并且发生九次碰撞电离,假设没有复合和其它散射发生的情况下,最终会有十个电子被收集到。输入一个电子输出十个,那么其增益就是十。但是,每个注入的电子并不会获得相同的增益,实际上每个载流子的增益都是不同的。雪崩倍增的随机性来源于碰撞电离是个随机过程,这就导致了雪崩探测器具有更高的散粒噪声,这种噪声增加的现象促使了寻找低噪声材料与结构以提高雪崩探测器性能的研究,可以通过材料的选择和设计特殊的能带结构将过剩噪声最小化。

选择材料以降低过剩噪声的方法是通过减少载流子的反馈使得碰撞电离过程的内在随机性减小实现的。在一个半导体器件中，电子与空穴都有机会发生碰撞电离，所以，每个注入到雪崩探测器倍增区的载流子都有可能发生或者不发生碰撞电离，这种随机性使得注入的载流子获得不同的倍增增益。为了理解雪崩探测器增益的差异性以及随之导致的额外过剩噪声，需要先理解碰撞电离系数这个概念。

电子与空穴的电离系数分别被定义成 α 和 β ^[10]，它们的大小和电子，空穴发生碰撞电离的概率有关，它们与材料和能带结构有关系。电子的电离系数 α 描述的是电子在发生一次碰撞电离事件之前所漂移经过平均距离的倒数，空穴的电离系数 β 描述的即是空穴在发生一次碰撞电离事件之前所漂移经过平均距离的倒数。从下图 1-1 中可以直观的理解。

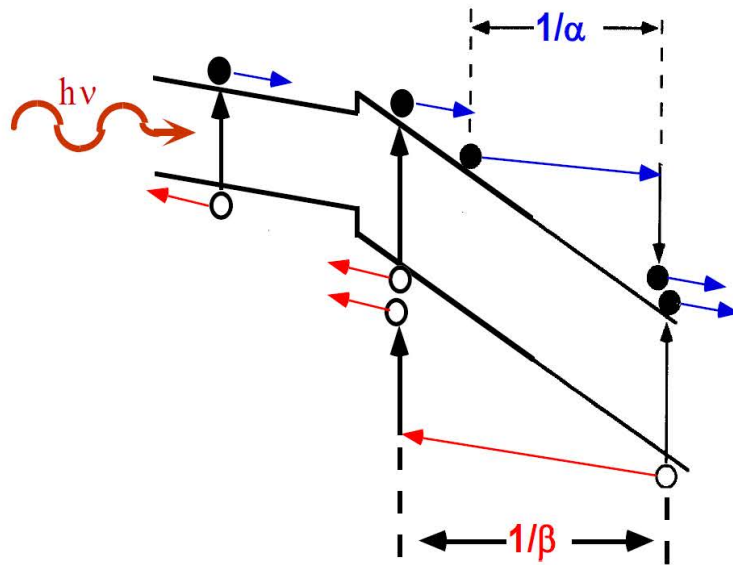


图 1.1 解释雪崩探测器电子和空穴电离系数的概念能带图^[11]

Figure 1.1 Explain the conceptual energy band diagram of electron and hole ionization coefficients of avalanche detectors.

α 和 β 都非常依赖于电场，它们与电场的关系通常都可以用下列公式 1-1，1-2 来表示：

$$\alpha(E) = A_1 \exp\left[-\left(\frac{B_1}{E}\right)^{c_1}\right] \quad (1-1)$$

$$\beta(E) = A_2 \exp\left[-\left(\frac{B_2}{E}\right)^{c_2}\right] \quad (1-2)$$

其中 E 代表电场, $A_i(i = 1,2)$, $B_i(i = 1,2)$ 和 $C_i(i = 1,2)$ 都是常数参数, 它们随着材料的不同而变化。电场越大, 电离系数越大, 这就表示载流子在一个单位距离内可能发生碰撞电离的次数越多。随着电场的持续增大, α 和 β 越来越不受常数参数影响而趋于相同, 换句话说它们的比值越来越接近 1。

这两个系数的比值定义为碰撞电离率, 也叫做 k 因子^[12]。 k 因子的大小可以很好的描述一个雪崩探测器的过剩噪声情况。图 1-2 中展现了五个 k 值范围 0 到 1 的雪崩探测器和一个 $p-i-n$ 探测器的理论灵敏度与雪崩增益的关系^[13]。图 1-3 展示了几种材料的 k 值范围与过剩噪声大小。

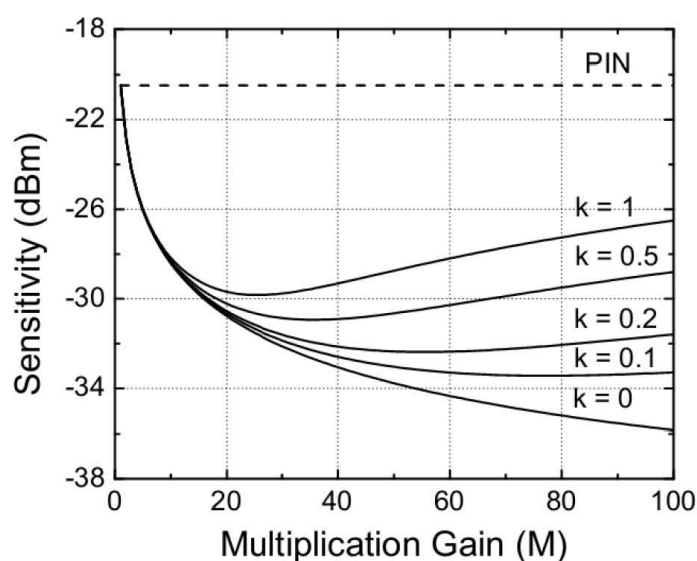


图 1.2 不同 k 值的雪崩探测器和 $p-i-n$ 探测器的理论灵敏度与雪崩增益的关系^[13]

Figure 1.2 The relationship between the theoretical sensitivity and avalanche gain of avalanche detectors and $p-i-n$ detectors with different k values.

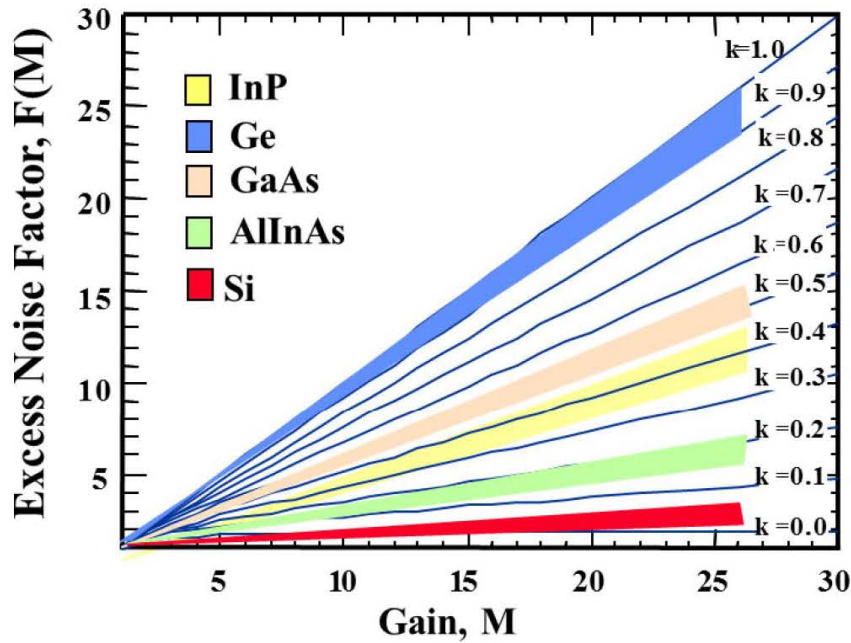


图 1.3 不同 k 值范围材料过剩噪声与增益的关系，阴影区域表示不同材料对应的 k 值^[12]

Figure 1.3 The relation between excess noise and gain of materials with different k value range, and the shaded area represents the corresponding k value of different materials.

在 k 值很大的材料中，电子和空穴可能发生碰撞电离的概率几乎相同。下图 1-4 上方展现了一个 $k = 1$ 的材料制成的 APD 探测器。电子穿过耗尽区时，在电场的作用下加速获得动能，当动能足够大时便有可能发生碰撞电离事件产生新的电子-空穴对，而新生的空穴在电场作用下获得动能，可以产生第二组电子-空穴对，这组电子-空穴里的电子又会产生新的第三组电子-空穴对，如此反复循环。由于其内在的反馈，这个过程既漫长又有很大的随机性。锗材料就是一种 k 值很大的材料，因此它很少被用做雪崩探测器的倍增层。

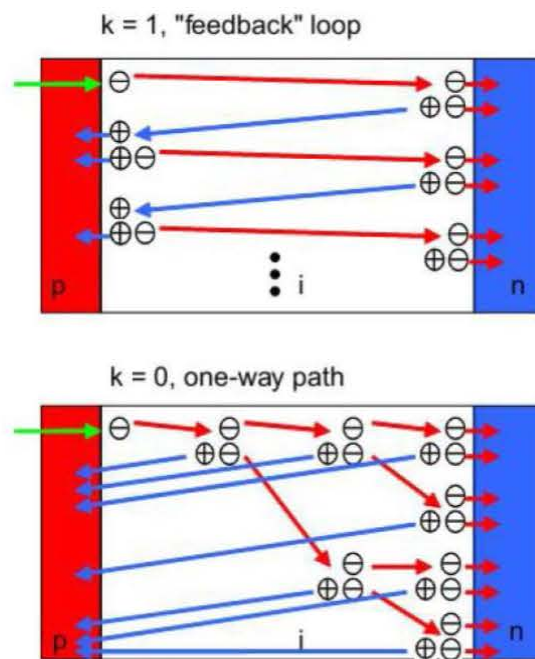


图 1.4 高 k 值(上)和低 k 值(下)材料中碰撞电离事件的概念说明^[11]

Figure 1.4 Conceptual description of impact ionization events in materials with high k values (top) and low k values (bottom).

另一方面，如果材料的 k 值很小，表示电子和空穴电离系数差距很大，也就意味着这种材料中只由一种载流子主导发生碰撞电离。 k 值低的材料具有很少的反馈，可以更快产生稳定的增益。图 1-4 下方展现了一个 k 值很小的材料制成的 APD 探测器，可以很明显的看到当注入的电子穿过耗尽区时，会触发一个电子链，从而产生新的电子-空穴对。但是，新生成的空穴并不会发生碰撞电离，这是一个更快、更稳定的过程。这种材料的一个例子是硅，它的 k 值小于 0.1。在硅这种材料中，电子比空穴更容易发生碰撞电离事件。因此，硅光电探测器成为了是一个热门的研究课题。

在倍增层比较薄的雪崩探测器中，为了使载流子获得与较厚倍增层器件相同的增益，需要提供更大的电场，从之前的分析来看，这种情况下期望看到薄倍增层器件的过剩噪声特性与 k 值较大的材料相似。然而，情况恰恰相反，发现倍增区越薄，理论有效 k 值反而变得越小。这个现象已经在众多材料中被证实，包括 $\text{InP}^{[14, 15]}$, $\text{GaAs}^{[16-18]}$, $\text{InAlAs}^{[19]}$, $\text{AlGaAs}^{[15, 20]}$, $\text{SiC}^{[21]}$ ，需要用碰撞电离的非局域性来解释^[18]。“死区” (Dead space)是指一个载流子在电场作用下加速从而获得足够

大能量来发生碰撞电离所必须行进的最小距离^[22-24]。当“死区”宽度与器件倍增区宽度的比值足够大时,单个载流子不太可能产生一个比平均增益大很大的增益,也就说增益的方差变小了,因此产生了更低的过剩噪声^[25]。所以,通过减小器件的倍增层厚度,可以得到更低的理论有效 k 值^[26]。

1.2 文献综述

在使用雪崩光电二极管之前,光电倍增管(PMT)被用于放大光电流。光电倍增管具有极低的噪声,但是由于它体积庞大,价格昂贵,易碎并且需要在很高的电压下工作,因此逐渐被雪崩二极管所取代,而雪崩二极管相对于光电倍增管唯一的劣势在于其过剩噪声的引入。所以降低器件的过剩噪声是研究雪崩二极管的一个重要方向。

雪崩二极管的倍增区对确定器件增益,过剩噪声和增益带宽积起着至关重要的作用,根据局域场的雪崩理论^[12],一个雪崩二极管的雪崩噪声与增益带宽积都是由倍增区材料电子与空穴的碰撞电离系数决定。当其中一个电离系数比另一个大得多时,即比值 k 远小于 1 时,器件的性能会更好。目前主要有两种方法降低雪崩二极管的过剩噪声,一种是通过设计雪崩二极管能带结构的方法降低过剩噪声,称之为“碰撞电离工程”(I²E),另一种是通过寻找低 k 值的材料来实现器件的低过剩噪声。

撞击电离工程通过利用异质结将碰撞电离定位到结构中的不同点以确定载流子碰撞电离点的位置来使得每个载流子的增益更固定,从而减小过剩噪声。碰撞电离工程技术在许多情况下被证明是有效的,一个例子是由 P.Yuan 等人设计的 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 异质结^[27],这种结构利用 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 异质结来提供比在空间均匀结构中更大的碰撞电离定位。通过在高电离阈值区域的旁边放置具有低碰撞电离阈值的薄倍增层,可以增加两种材料连接处碰撞电离的概率,并降低两种材料内部本身的碰撞电离概率。在通信波段工作的 InGaAlAs/InP 材料也已经被报道^[28]。碰撞电离工程的实现如图 1-5 所示,结构上类似于一个被截断的多重量子阱雪崩探测器,但是存在一个本质的区别是碰撞电离工程不会引发异质结能带的不连续。

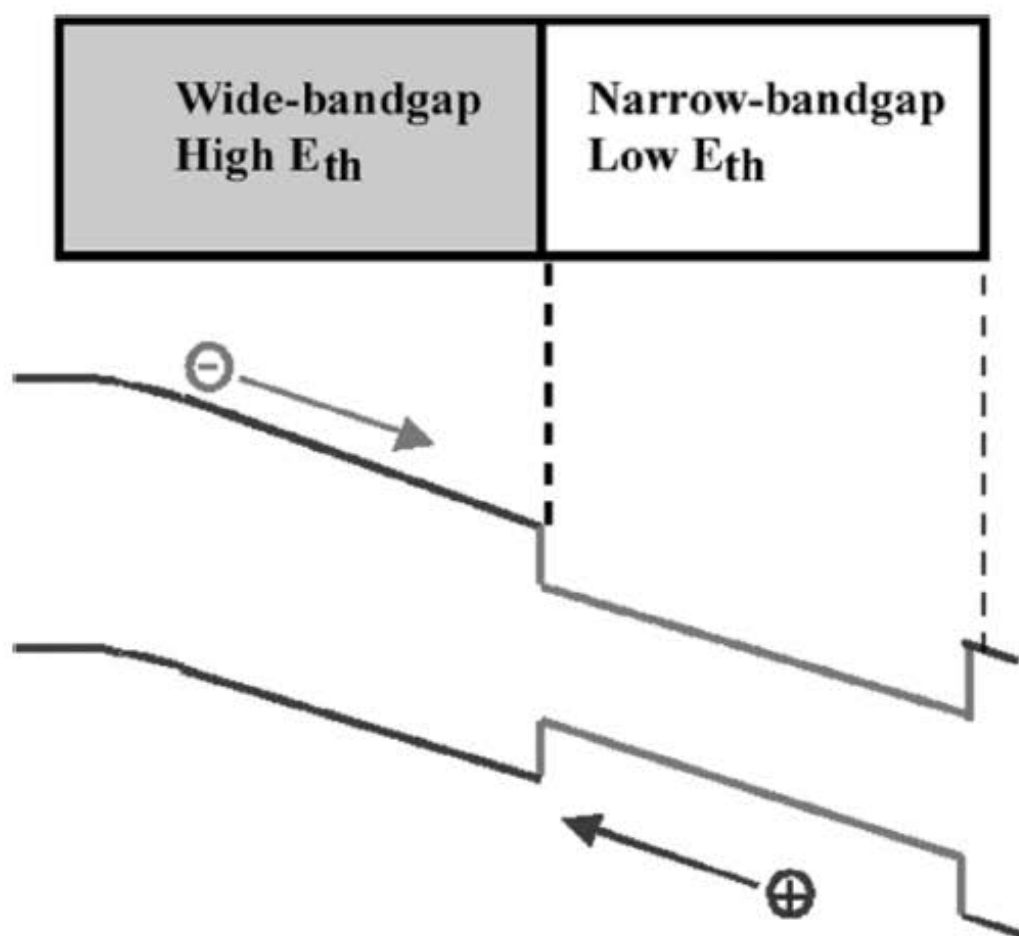


图 1.5 碰撞电离工程雪崩二极管的倍增区^[2]

Figure 1.5 Multiplication region of impact-ionization-engineered APD.

图 1-6 显示了三种通过分子束外延技术生长的晶格匹配与 InP 衬底的 InGaAlAs 碰撞电离工程雪崩二极管的过剩噪声因子 $F(M)$ 与增益 M 的关系^[28]。图中的虚线是局域场模型下 k 从 0 到 0.5 时过剩噪声因子 $F(M)$ 与增益 M 的关系曲线，可以拟合出 k 值大约是 0.12，这是通讯波段雪崩二极管中噪声比较低的结果。

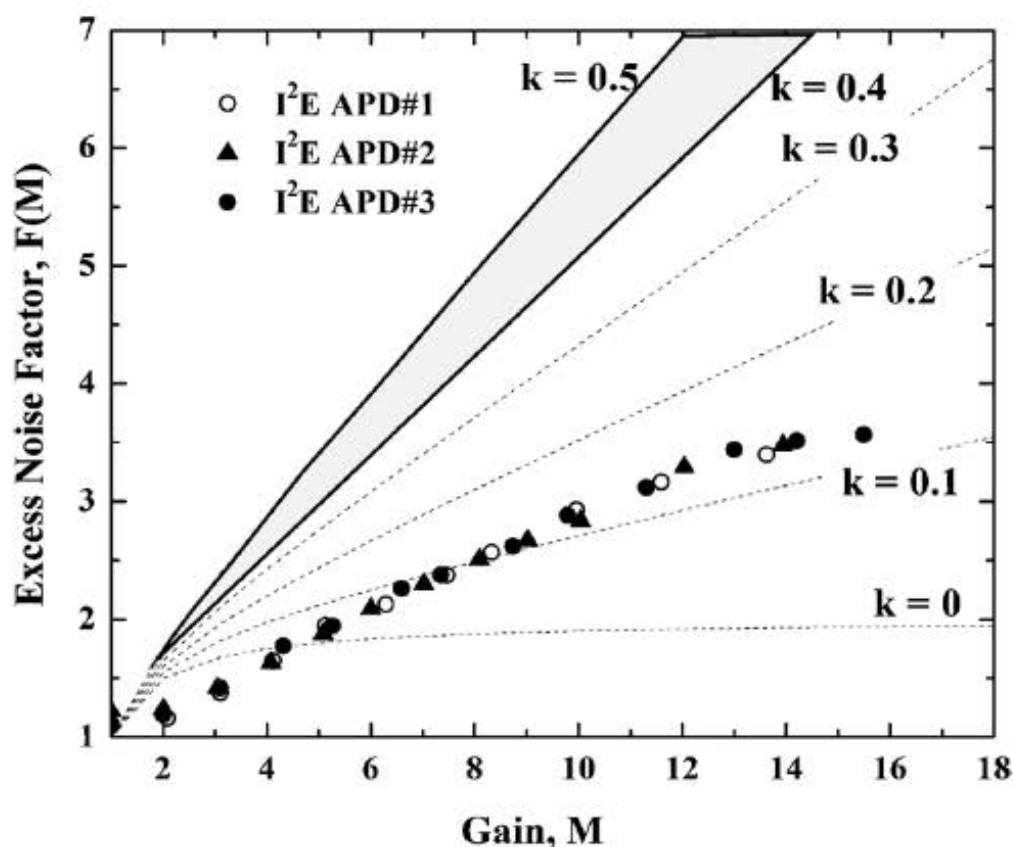


图 1.6 $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.15}\text{Al}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 碰撞电离工程雪崩二极管的过剩噪声因子 $F(M)$ 与增益 M 的关系^[2]

Figure 1.6 Excess noise factor $F(M)$ versus gain M for an $\text{In}_{0.52}\text{Ga}_{0.15}\text{Al}_{0.33}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ I^2E APD.

IV 族元素硅(Si)和锗(Ge)是最早被用来制备半导体器件的材料。Si 材料具有极低的 k 值,但是 Si 的禁带宽度决定了其适合 $1.2\ \mu\text{m}$ 以下波长的探测,而 Ge 则适合 $1.6\ \mu\text{m}$ 以内波段的探测。由于 Si 材料晶格品质好、原材料价格低廉的优势, Si 在电子器件领域得到了广泛的应用,并取得了巨大进步。尽管 Si 材料不适合 $1.2\ \mu\text{m}$ 以上波长的吸收,但是通过将 Ge 外延生长在 Si 衬底上,可以实现 Si 基的 Ge 光电探测器,以满足 $1.3\ \mu\text{m}$ 、 $1.55\ \mu\text{m}$ 通信波段的需求^[29],使得该波段光电探测器与 Si 基电子器件的单片集成成为可能,然而,由于晶格失配, Ge/Si 材料晶格质量不高,使得该类探测器的暗电流较大。

III-V 族材料是由 III 族元素和 V 族元素形成的化合物,包括砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)、砷化铟(InAs)等二元化合物,以及它们形成的多元化合物。借助于三元或四元化合物的多种组合,III-V 族材料能够实现不同的禁带宽度,从

而覆盖不同工作波长。与 InP 衬底晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料截止波长约为 $1.7\ \mu\text{m}$ ，正好适合于 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的光纤通信系统。1978 年，Bell 实验室成功制备了以 InP 衬底上晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 为吸收层的光电探测器^[30, 31]。然而，InP 材料的 k 值约为 0.4，使得此材料过剩噪声很大。InP 衬底上 InGaAs/InAlAs 材料的雪崩探测器也可工作于 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段。并且 InAlAs 材料的 k 值比 InP 材料要小很多，但是相对于 Si 材料而言，InAlAs 材料的 k 值依旧偏大^[2]。为了提高 III-V 族材料器件过剩噪声性能，InAs^[32-35]，AlAsSb^[36-38]和 AlGaAsSb^[39]都被尝试用作雪崩探测器器件的倍增层来获得低噪声的器件。

用于光电探测器的 II-VI 族材料主要为碲镉汞（mercury cadmium telluride, HgCdTe ）材料。 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 是 HgTe 和 CdTe 形成的三元化合物，由于 HgTe 和 CdTe 晶格失配较小， HgCdTe 能够通过组分的调节覆盖 $1\sim 30\ \mu\text{m}$ 的波长范围。同时 HgCdTe 具有吸收系数高、迁移率高、载流子寿命长等优点。最重要的是 HgCdTe 材料的雪崩二极管表现出非常好的过剩噪声特性^[40, 41]。某些组分下的 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 展现出极低的 k 值。Beck 等人^[41]发现 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 雪崩二极管有指数型的增益曲线和非常低的过剩噪声（增益达到 100 时 $F(M)$ 约等于 1），这些现象表明 $k\sim 0$ 。与大多数 III-V 族材料半导体器件不同， $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 材料 Γ 谷的带隙非常小（0.29 eV），而 L 谷和 X 谷带隙非常大（1.5 eV）和（2.5 eV）^[42]。这种带结构表明在 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 雪崩二极管中，电子具有非常小的谷间声子散射率，这是大多数 III-V 族半导体的主要散射机制。此外，电子与空穴有效质量的巨大差异表明 $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$ 中传输的空穴和电子的声子与合金散射率存在较大差异。这一观点通过 HgCdTe 材料中测量到的高电子迁移率（比空穴迁移率高两个数量级）验证^[43]。

一个蒙特卡洛仿真模型被开发用于定量研究 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料器件中载流子的撞击电离。这项研究中， $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的能带结构，包括导带中的 Γ 谷，L 谷和 X 谷，以及价带中重空穴、轻空穴、和 split-off，被纳入模型。使用 Keldysh 公式^[44]进行碰撞电离概率估算，电子和空穴的碰撞电离阈值能量分别为 0.3 和 0.6 eV^[45]，这个模拟假设电子是从器件的 p 区注入，而器件 i 区的电场由泊松方程求解。仿真得到的指数型增益与实测数据相一致，仿真得到的过剩噪声非常低，也与预期

相符。这证明蒙特卡洛模拟是一种有效的研究雪崩二极管的仿真方法。

然而, HgCdTe 材料的雪崩二极管需要在低温下工作, 这增加了探测器的封装体积与复杂性, 而且 HgCdTe 材料与全球倡导淘汰有毒汞材料的政策不相容。

四元材料 AlInAsSb 的数字合金是一种具有极低过剩噪声的材料, 同时, 通过调整 AlInAsSb 中 Al 的成分比例, 可以使这种材料的截止波长从近红外(NIR)调节到中红外(MIR)^[46, 47]。因此对 AlInAsSb 数字合金材料的噪声进行测量和研究是目前很有意义的事。

1.3 本文的主要内容与结构

文章主要研究的是如何搭建雪崩光电探测器过剩噪声测试系统对 AlInAsSb 数字合金材料进行过剩噪声测试, 用低频噪声测试系统测试此材料的噪声谱, 并分析材料的缺陷与暗电流组成机制。此项研究能为以后此材料的生长与工艺制作提供一定的帮助和指导。

第一章为绪论, 主要是介绍的是雪崩二极管的优点, 它增益和过剩噪声的本质来源以及文章的主要内容还有研究意义。

第二章介绍了雪崩光电探测器的一些基本性能指标以及它们的测量方法, 同时详细介绍了探测器中存在的各类噪声和低频噪声测试系统与如何分析低频噪声获得一个器件内部缺陷的情况。

第三章中重点介绍了数字合金生长方式的 AlInAsSb 器件的暗电流, 增益, 过剩噪声, 量子效率等性能。

第四章展示了数字合金生长方式的 AlInAsSb 器件通过低频噪声测试系统分析出的器件内部缺陷。

第五章则是对全文的一个总结和展望, 这章总结了整个文章的研究内容以及研究成果, 并对该研究方向提出建议与展望。

第2章 雪崩光电探测器的性能指标与噪声来源

2.1 雪崩光电探测器的性能指标

雪崩光电探测器本质上是一个工作在反向偏压的二极管，在这个二极管中，电场足够大而可引发碰撞电离过程，这个过程中，加速的载流子通过碰撞产生额外新的电子空穴对，将价带的电子激发到了导带，新生的载流子在电场的作用下加速获得足够的能量，再一次发生碰撞电离产生更多的载流子。雪崩二极管的性能由很多因素来决定，一般可以将其用信噪比来概括，信噪比可以写为方程 2-1 的形式^[1]：

$$SNR = \frac{\frac{1}{2}(q\eta P/h\nu)^2 M^2}{2q(I_{ps} + I_{BG} + I_{DM})F(M)M^2 \Delta f + \frac{4kT\Delta f}{R_{eq}} + N_{circuit}} \quad (2-1)$$

在这个方程中， η 代表外量子效率， P 是输入的光功率， I_{ps} 和 I_{BG} 分别代表光照产生的电流与背景辐射产生的电流， I_{DM} 代表由碰撞电离倍增产生的暗电流分量也被称为暗电流， M 表示器件雪崩产生的增益， $F(M)$ 被称为过剩噪声因子， Δf 是带宽， T 是温度，而 R_{eq} 则是器件的等效电阻， $N_{circuit}$ 表示外电路的噪声。

一个高质量的雪崩探测器需要具有低噪声，这就要求器件降低过剩噪声因子和暗电流。同时，高信噪比则要求高量子效率和高增益。因此，在设计一个高质量的雪崩探测器时，重点在于平衡所有的这些因素。

2.1.1 暗电流

暗电流这个术语描述的是一个光电器件在没有任何光照的情况下所产生的电流，这些电流主要由四个因素引起^[48]：扩散，产生复合，隧穿以及表面漏电流。

扩散电流是由 p 区与 n 区热激发产生的少子发生扩散进入器件耗尽区产生，器件在小反偏电压的情况下，暗电流的主要成分是扩散电流，随着反偏电压的增大，器件中扩散电流会趋于饱和，因为只有 p 区与 n 区中距离耗尽区边界少子扩散长度内的少子才可以通过扩散进入耗尽区产生扩散电流。由扩散而产生的暗电

流可以通过降低器件工作温度来减少, 因为降低器件温度可以减小载流子的浓度, 也可以在适当的情况下使用更宽带隙的材料来减少扩散暗电流。产生-复合电流是耗尽区内的载流子被激发或者发生复合所引发的, 通过改进材料的质量, 可以避免复合的发生, 而宽禁带材料的器件对这种暗电流机制也不是那么敏感。此外, 表面钝化处理可以很好的减小表面漏电流。隧穿电流由两种情况组成: 带间直接隧穿和缺陷辅助隧穿。带间直接隧穿电流是由高电场下耗尽区中电子从价带隧穿到导带形成的, 缺陷辅助隧穿电流是价带的电子先跃迁至缺陷能级, 然后隧穿到导带形成。隧穿机制的暗电流也受到材料质量和掺杂的影响, 在高电场条件下, 隧穿效应明显, 利用较长的耗尽区和较宽的带隙材料可以减小暗电流。对所有的这些参数都进行优化即可设计出暗电流最小的器件。通过使用半导体参数分析仪测量, 可以测试获得器件在无光照条件下电流-电压(I-V)特性。

除了测量单一尺寸器件的暗电流外, 还可以利用测量暗电流与器件尺寸的相关性来确定器件的暗电流是由体积效应还是由表面效应主导。这个研究是通过测量一组不同尺寸的器件, 并在固定的偏压下绘制暗电流与器件尺寸的关系图来完成的。若发现暗电流与器件面积成线性, 即与器件直径成二次关系, 则器件的暗电流是由体暗电流主导。反之, 若暗电流与器件直径成线性, 则器件的暗电流是由表面暗电流主导。

而通过测量不同温度下器件的暗电流则可研究分析其暗电流是产生复合还是扩散主导。这个研究需要用到低温探针台, 下图 2.1 为低温探针台测试系统的照片, 一般使用液氮降温从 77K 变温测试到 300K。在固定的偏压下, 绘制暗电流关于温度的 Arrhenius 图即可拟合出器件的活化能 E_a 。将活化能 E_a 与此器件的带隙 E_g 作比较, 若 E_a 近似等于 E_g , 则表明暗电流由扩散电流主导, 若 E_a 近似等于 E_g 的一半, 则表明暗电流由产生复合主导。而若 E_a 处于二分之一 E_g 和 E_g 之间, 那么说明两种机制暗电流都存在。

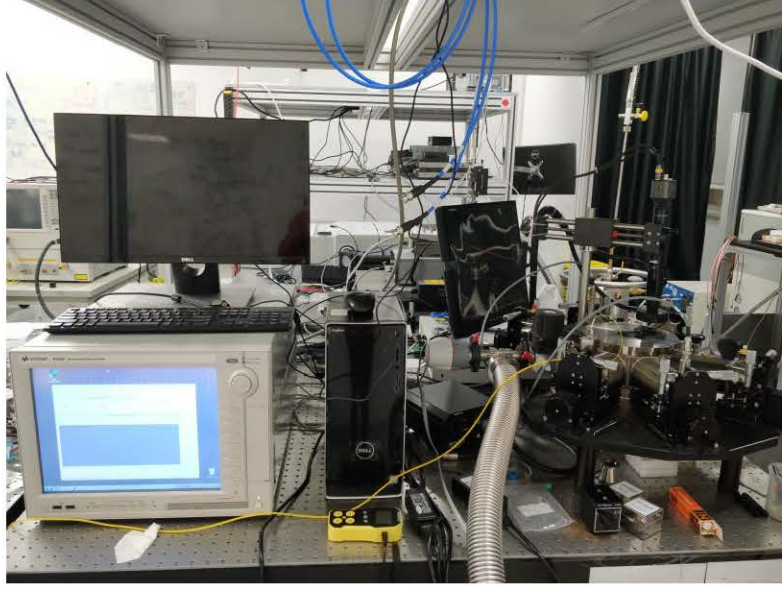


图 2.1 低温探针台

Figure 2.1 Low temperature probe station.

2.1.2 雪崩增益

简单的 $p-i-n$ 结构雪崩二极管的雪崩增益可以通过电流-电压(I-V)曲线来理解, 这条曲线描绘了器件的光电流与反偏电压之间的关系。在图 2.2 当中可以观察到, 在低偏压下, 随着反向偏压的增大, 光电流由于耗尽区变宽而增大。一旦器件完全耗尽, 光电流便逐渐趋于平坦, 此偏压范围被称之为 $p-i-n$ 偏置区域, 可以定义此区域的光电流为初级光电流, 也就是单位增益光电流。在高偏压下, 光电流雪崩击穿区域, 此时器件内部的电场足够大使得载流子能够获得充足的能量发生碰撞电离产生增益。器件在某一个特定偏置电压处的增益定义为该偏压处的光电流与单位增益下光电流的比值, 可由式 2-2 计算, 其中下标“0”表示单位增益点处的电流值。

$$M = \frac{I_{photo}}{I_{photo_0}} = \frac{I_{total} - I_{dark}}{I_{total_0} - I_{dark_0}} \quad (2-2)$$

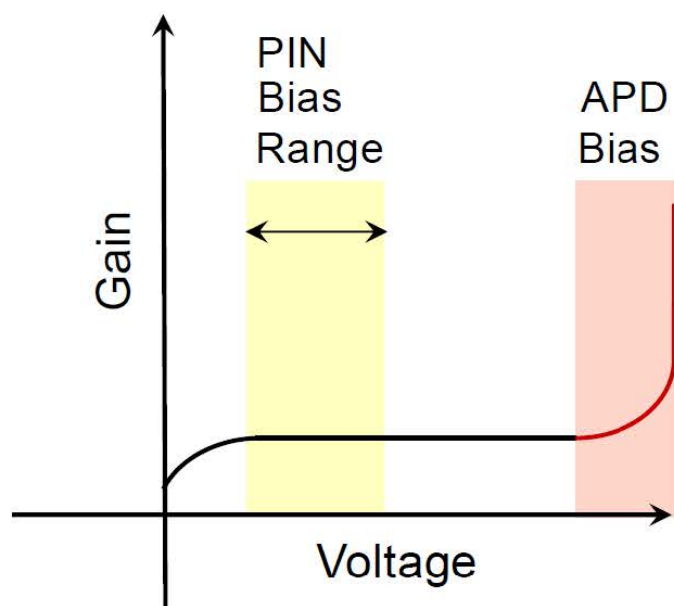


图 2.2 雪崩光电探测器增益与电压关系图

Figure 2.2 Diagram of gain and voltage relationship of avalanche photodetector.

如果器件的暗电流性能良好，可以直接使用半导体参数分析仪来测量器件光电流和暗电流的电流-电压特性，然后用这些数据来计算器件增益。而若器件的暗电流比较大，光电流远远小于暗电流的时候则需要使用基于相敏技术的锁相放大器来提取光照下器件总电流中的光电流，下图2.3为这种测试方法的原理图^[10]。激光照射到器件表面之前先通过一个频率为 180Hz 的斩波器，这样光信号就变成了交流信号，器件上的偏压通过电压源表提供，锁相放大器通过读取电路中串联电阻两端的电压来获得器件的光电流信息，读取频率调为与斩波器相同的 180Hz，串联的电阻根据器件的暗电流和锁相放大器的量程确定，在搭建的系统中使用的是 100Ω 的电阻。

理想情况下，雪崩二极管中的雪崩增益是与光功率无关的。但在实际测试中，发现一些器件的增益表现出对光功率的依赖性，通常在高功率情况下测量的增益会变小。这可能是由两个原因造成：第一个原因是撞击电离过程对温度很敏感，而高光功率会产生高光电流，这会时雪崩二极管温度升高，温度升高则会导致载流子发生散射的概率增大，从而减小发生碰撞电离的概率，这就降低了器件在特定偏压下的增益；第二个原因是高光功率注入的大量载流子由于空间电荷效应会引起局部电场的改变降低器件的增益。因此，测试器件在不同的光功率下的增益

是很有必要的。当热效应严重时，应注意使用低的光功率进行测试。

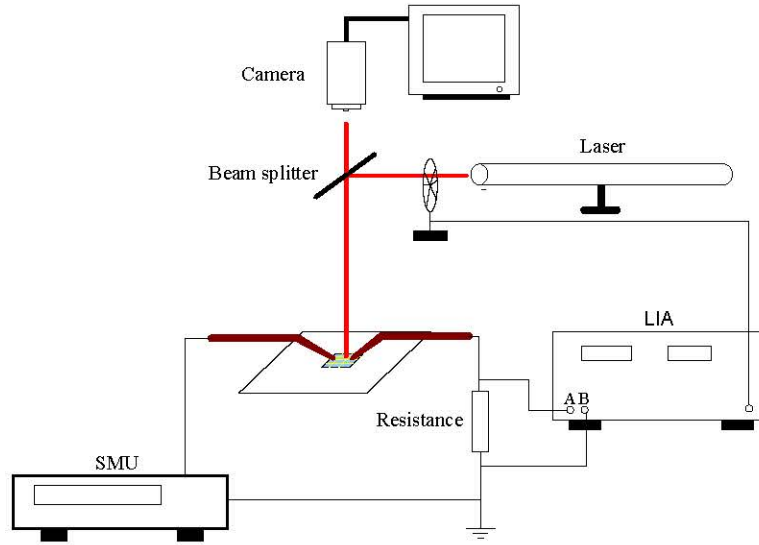


图 2.3 基于相敏技术增益测试原理图

Figure 2.3 Principle diagram of gain test based on phase sensitive technology.

2.1.3 过剩噪声

正如之前提到的，由碰撞电离的随意性产生的噪声称为过剩噪声。过剩噪声因子 $F(M)$ 从某种意义上来说描述的是增益的方差 (σ_M) ，如方程 2-3 所示，是由微观上载流子输运的随机性引起的。利用均匀电场情况下的局域性模型，过剩噪声因子与 k 因子的关系如方程 2-4 所示^[49]。

$$F(M) = \frac{\langle M^2 \rangle}{\langle M \rangle^2} = 1 + \frac{\sigma_M^2}{\langle M \rangle^2} \quad (2-3)$$

$$F(M) = k\langle M \rangle + (1 - k)(2 - \frac{1}{\langle M \rangle}) \quad (2-4)$$

从这些公式中可以看出，在 k 不等于零的时候，过剩噪声随着增益的增大而增大。然而，在没有增益的情况下，过剩噪声降为 1；换句话说，没有额外的过剩噪音。值得注意的是， k 值越高的材料，过剩噪声随着增益的增大会增大得更快。这一点在图 2.3 中可以直观的看到，它展示了不同 k 值情况下过剩噪声因子与增益之间的关系。

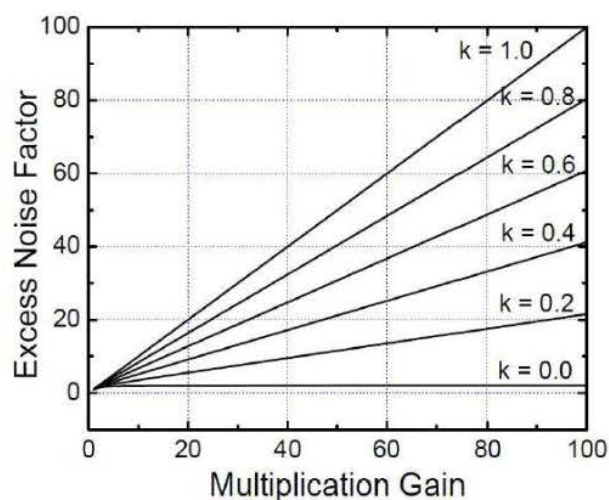


图 2.4 不同 k 值下的过剩噪声因子与增益的关系

Figure 2.4 The relation between excess noise factor and gain under different k values.

过剩噪声是雪崩探测器的一个非常重要的性能指标,搭建可以准确测量过剩噪声的测试系统是非常重要的。图 2.5 为一种过剩噪声测试方法的原理图,搭建这套测试系统使用的激光器是氮氦激光器。电压源通过偏置器(Bias tee)提供器件的偏压同时读取器件的电流,器件中的交流噪声信号通过偏置器输入到噪声分析仪中。图 2.6 为搭建的过剩噪声测试系统照片。

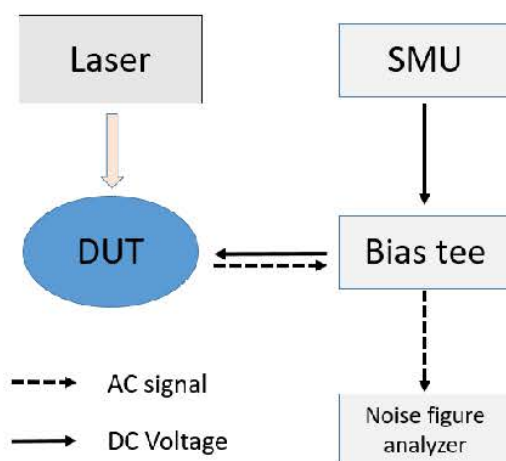


图 2.5 过剩噪声测试方法原理图

Figure 2.5 Schematic diagram of excess noise test method.

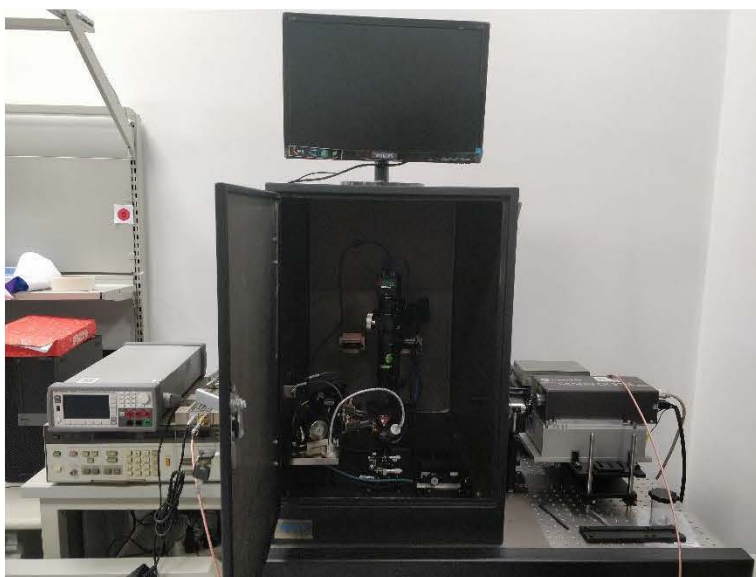


图 2.6 过剩噪声测试系统

Figure 2.6 Excess noise testing system.

均方噪声电流可由公式 2-5 表示

$$S = 2qI_0R(\omega)M^2F(M) \quad (2-5)$$

其中 S 是噪声功率谱密度可以通过噪声分析仪测得, q 是电子的电量, I_0 器件在单位增益下的光电流值, $R(\omega)$ 是一个频率决定的常数, M 是器件在特定偏压下的增益值, $F(M)$ 则是需要测试的过剩噪声因子。整个测试过程主要分为这么几步:

1. 用标准噪声源对噪声分析仪进行校准。
2. 选择噪声分析仪需要读取噪声的频率, 过剩噪声和频率无关的一种白噪声, 因此一般选择一个仪器读数稳定并且底噪较小的频率进行测试。
3. 调节电压源使器件工作在单位增益下, 此时 $M = 1$, $F(M) = 1$ 。改变照射到器件表面的光强, 测试器件在不同光强下所对应光电流值与光噪声值, 绘制出光噪声关于光电流的曲线, 通过线性拟合得到曲线的斜率即为 $2qR(\omega)$ 。
4. 改变器件两端的偏压, 让器件在不同的增益情况下工作, 并读取电流与噪声值, 通过公式 2-5 计算出不同增益下的 $F(M)$, 画出 $F(M)$ 关于增益 M 的曲线便可拟合出此器件的 k 值大小。

2.1.4 量子效率与响应度

外量子效率指的是器件收集到的载流子数与特定光波长下入射光子的比值，实际描述的便是一个光子被器件吸收产生电子-空穴对的概率。光电探测器量子效率是由多个因素来决定的。光子照射到探测器表面的时候可能会发生反射，所以提高量子效率的一个有效方法是在器件表面涂上增透膜。载流子的表面复合是另一个影响器件量子效率的因素，而对器件表面进行钝化可以减少载流子的表面复合现象。量子效率是依赖于入射光波长的，因此对器件量子效率的测量需要在一定的波长范围内进行。

量子效率对光波长的依赖性来源于材料对不同光波长吸收系数的不同。如果光波长较长，那么就会因为光子的能量太小而不能被材料吸收，也就是说当一种波长的光对应的光子能量小于材料的带隙时，此材料对于这个光来说是透明的。另一方面，若光的波长很小，那么大部分光子会在器件表面就被吸收，然后在收集之前就会发生复合现象。这两个边界就决定了一个光电探测器的工作波长范围。所以，器件的量子效率是由其吸收区的材料和其它各个区域的带隙决定的。

方程 2-5 展示了光电探测器的理论量子效率，其中 R_f 代表器件表面对光的反射系数， α 代表吸收系数， d 则是器件吸收区的厚度。

$$\eta = (1 - R_f)(1 - \exp(-\alpha d)) \quad (2-5)$$

光电探测器的响应度与它的量子效率密切相关，该参数将流过器件的电流和照射到器件表面的光强联系起来。响应度与量子效率和入射光的自由空间波长成正比，其单位是 A/W。可以用方程 2-6 与 2-7 来计算。其中 Φ 代表光电探测器电路中电子的通量， q 是元电荷， R 为响应度，而 P 则是入射的光强。

$$I = \eta q \Phi = \frac{\eta q P}{h\nu} = RP \quad (2-6)$$

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda}{1.24} \quad (2-7)$$

下图 2.7 为量子效率测试系统原理图。光源使用的卤素灯产生一个较宽的连续光谱，单色仪有三块光栅可以将宽谱光转换成不同波长的单色光。斩波器配合锁相放大器提取出器件在不同波长光照下产生的微弱光电流。斩波器频率一般设置为 180Hz，锁相放大器读取信号频率与斩波器相同。测试完待测器件的光电流之后，需要在相同条件下测试一个已知不同波长下响应度数据的标准

器件，用标准器件的测试结果将测试中无法准确获得的光强信息进行归一化便能够计算获得待测器件的响应度还有量子效率。图 2.8 为实验室搭建的量子效率测试系统实物照片。

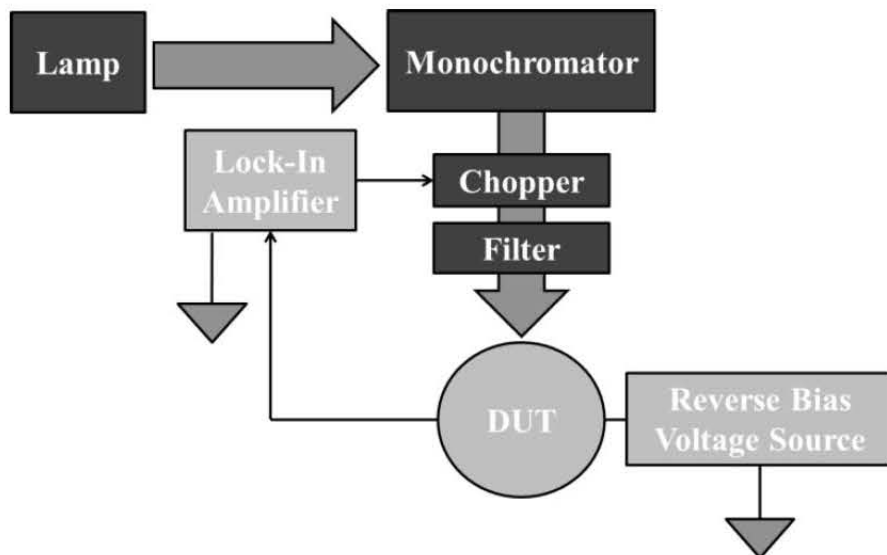


图 2.7 量子效率测试原理图

Figure 2.7 Schematic diagram of Quantum efficiency test.

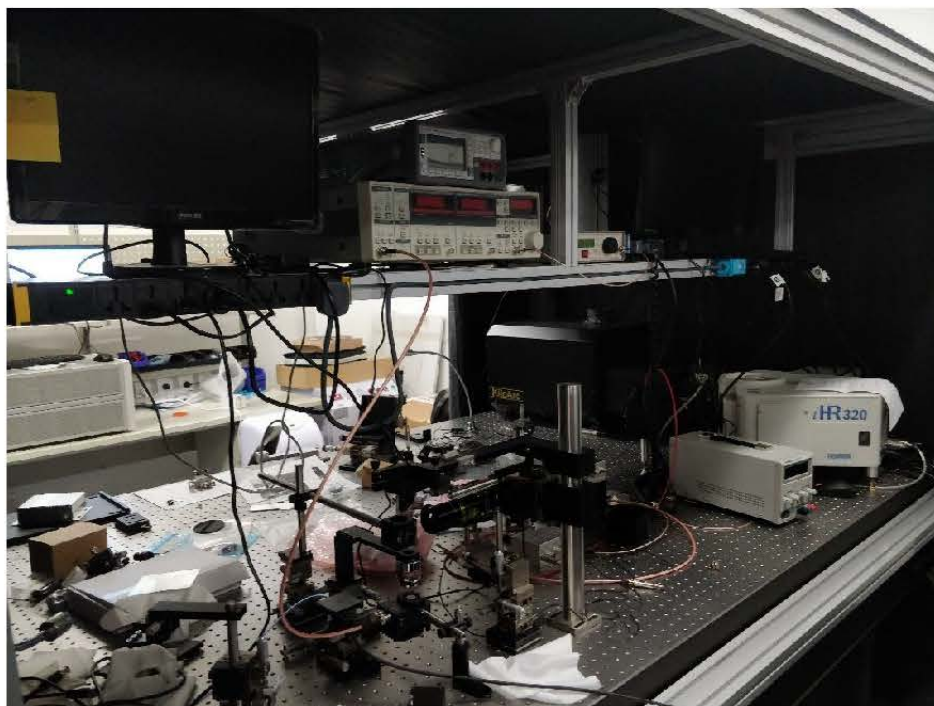


图 2.8 量子效率测试系统

Figure 2.8 Quantum efficiency test system.

2.1.5 带宽

器件的 3dB 带宽描述了输出射频功率相对于其低频值减少 3dB 时的频率，它由两个因素来限制：RC 时间常数和载流子的输运时间^[50]。简单 p-i-n 器件的传输时间限制带宽可以用式子 2-8 来表示，其中 d 表示器件耗尽区的宽度， v_s 表示电子和空穴饱和速度的平均值。p-i-n 器件 RC 限制带宽可以用方程 2-9 来表示，其中 ϵ 表示 i 区的介电常数， C 代表结电容， R_s 表示器件的等效串联电阻， R_L 则是负载电阻（一般为 50 欧姆）， A 表示器件的面积。器件的实际带宽可以通过 RC 和传输时间带宽组合来计算，公式为方程 2-10^[51]。

$$f_{transit} = 0.5 \times \frac{v_s}{d} \quad (2-8)$$

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{d}{2\pi(R_s + R_L)\epsilon A} \quad (2-9)$$

$$f_{3dB} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{RC}^2} + \frac{1}{f_{transit}^2}}} \quad (2-10)$$

上一节中有提到，光电探测器的外量子效率与其耗尽区的宽度成正比。由此可见，器件的量子效率与传输时间带宽之间存在着固有的折衷。在一个同质结的光电探测器中，光的吸收与载流子的倍增都发生在 i 区，足够厚的 i 区能保证器件具有高的量子效率，然而却会增加载流子的输运时间，减小了传输时间带宽。RC 带宽会随之器件 i 区厚度增减而增加，这就使得 RC 带宽与传输时间带宽之间也存在一个折衷。

为了克服器件 RC 带宽的限制，可以设计台面直径更小的器件以减小其电容，可以选择金属来降低接触电阻。只有当肖特基势垒高度小于或等于零时，金属-半导体结触才会变成欧姆接触。因此，在设计雪崩光电探测器的接触电极时，必须选择合适的金属并注意费米钉扎现象，而退火工艺也可以进一步减小电阻率。

在雪崩探测器中，增益和带宽也存在折衷的现象，可以使用增益带宽积 (GBP) 这个新的术语来描述它们。前文中有提到，由 k 值大于零的材料作为倍增层制成的雪崩探测器，电子和空穴都会发生碰撞电离，因此，碰撞电离产生增益的过程在这种器件中会形成一个反馈循环，这就增加了增益获得所需要的时间，称之为雪崩积累时间。由于这个积累时间的存在， k 值越大，也即反馈越严重的器件速度比反馈少的器件慢得多。这就对给定带宽的器件所能获得的增益

有了限制。对于倍增层材料 k 值接近于零的器件来说，带宽相对独立于增益，便可获得很高的增益带宽积(GBP)。而使用 k 值高的材料来做倍增层的器件，在给定的带宽下增益会受到很大的限制，导致器件只能有低的增益带宽积。这种限制也进一步激发了对低 k 值材料的研究。

2.2 雪崩光电探测器的噪声来源

从本质上讲，噪声其实就是某个物理量在它平均值附近的随机涨落水平，它是一个普遍存在的随机量^[52-56]。对于光电探测器来说，噪声能分为四大类： $1/f$ 噪声；产生-复合噪声；热噪声；散粒噪声。而雪崩探测器特有的过剩噪声便属于散粒噪声^[57,58]。噪声功率谱密度用来分析随机信号统计特性的重要参数，所以可以将器件的时域信号通过傅里叶变换到频域上在进行噪声分析。图 2.9 是一个典型的光电探测器频谱图。

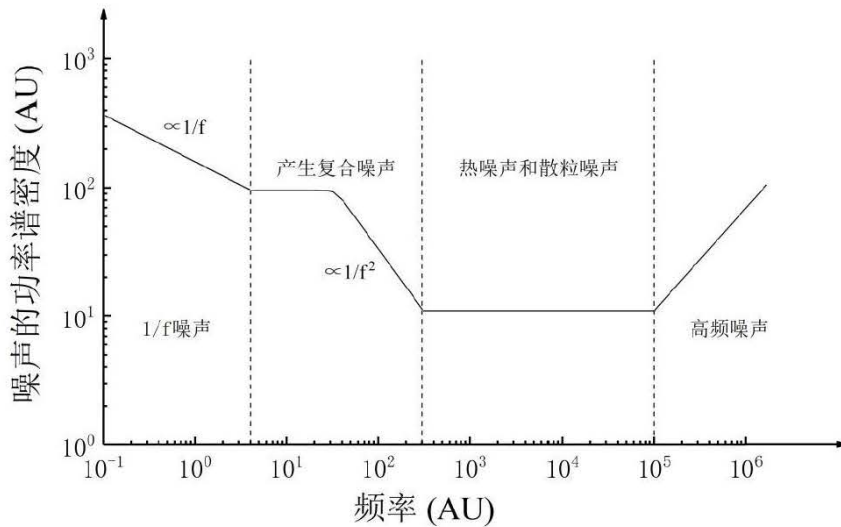


图 2.9 典型的光电探测器噪声频谱图

Figure 2.9 Typical photodetector noise spectrum.

2.2.1 $1/f$ 噪声

$1/f$ 噪声主要了包括两个部分：非基本 $1/f$ 噪声与基本 $1/f$ 噪声^[59-61]。其中非基本 $1/f$ 噪声产生的机理是由于材料生长和器件制造时引入了表面缺陷，而这些缺陷在一定情况下导致器件表面的载流子数发生涨落，这些载流子数的涨落会使得电路中的电流或者电压出现涨落，这就产生了噪声。器件表面载流子数目的涨

落又分为两种情况：一种是半导体器件价带或者导带的载流子通过隧穿效应与器件表面的缺陷发生相互作用所引起的载流子数涨落；另一种则是由于热激发效应使得缺陷载流子的俘获截面发生变化引起的载流子数涨落。非基本 $1/f$ 噪声本质上是可以通过改善器件表面质量减少缺陷来得以减小甚至消除的。而基本 $1/f$ 噪声来源于材料迁移率的涨落，从本质上来说它是不能被消除的。迁移率的涨落是因为器件内部散射机制的存在，所以它是一种体效应。可以引起迁移率涨落的散射分为以下几种：

- (1) 晶格散射，包括声学波散射与光学波散射，这种散射是由于晶体中的晶格发生振动所引起的。
- (2) 电离杂质散射，由于半导体器件中的电离杂质能够形成正，负电中心，而它们会对电子或者空穴产生吸引与排斥作用。电离杂质散射的概率随着温度的升高而降低。
- (3) 电子-声子散射，此散射存在于金属，简并半导体中，窄禁带半导体和强反型 MOSFET 中较为明显，对于掺杂很低的半导体器件而言，电子-声子散射的这种现象往往都可以忽略不计。
- (4) 谷间散射，这种散射主要存在于导带有多谷分布的半导体中，在低掺杂的 n 型硅当中，该散射较为显著。

一个器件中的 $1/f$ 噪声由谁主导取决于器件表面的质量状态^[62, 63]，若器件表面质量较好，则噪声主要由基本 $1/f$ 噪声主导，也即来源于迁移率的涨落；若器件表面质量较差，则噪声主要由非基本 $1/f$ 噪声主导，也即来源于表面载流子数的涨落。然而无论由那种机制主导， $1/f$ 噪声都满足以下的经验公式 2-11：

$$S_V(f)(S_I(f)) = AV(I)^\beta / f^\gamma \quad (2-11)$$

其中的 $S_V(f)$ 和 $S_I(f)$ 分别代表了噪声电压和噪声电流的功率谱密度，A 是与器件材料及结构相关的一个参数，V 和 I 为器件两端所加的偏压与流过器件的电流，f 代表频率，指数因子 β 对于材料均匀的器件来说，取值为 2，而对于结构复杂的器件，取值为 1~2 之间。 γ 为频率指数，取值范围在 0.8~1.2，通常取为 1。 $1/f$ 噪声大小与频率成反比，因而在低频区， $1/f$ 噪声成为器件噪声的主要表现形式。

2.2.2 产生-复合噪声

产生-复合噪声出现的频率区域略高于 $1/f$ 噪声，它的功率谱密度在频域上会出现一个驼峰（洛伦兹峰），产生此类噪声的原因为：半导体材料中存在可以俘获和发射载流子的各种杂质中心，这些杂质中心俘获或发射载流子会使得载流子数出现涨落，从而使得流过器件的电流出现起伏^[63, 64]。产生-复合噪声与材料中载流子浓度，杂质中心的密度以及材料的少子寿命有关系，其功率谱密度呈现洛伦兹普的形式^[65, 66]，满足公式 2-12：

$$S_I(f) = \sum_{i=1}^m \frac{C_i \tau_i}{1 + (2\pi f \tau_i)^2} \quad (2-12)$$

其中 m 为深能级缺陷个数， C_i 为产生-复合噪声分量的幅值， τ_i 为产生-复合噪声的特征时间常数。 τ_i 是与温度有关的，可以由公式 2-13 表示：

$$\frac{1}{\tau_i} = C T^2 e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (2-13)$$

其中 k 表示玻尔兹曼常数， C 代表与温度无关的一个常数， T 代表温度， E_a 则表示深能级杂质缺陷的活化能。从上述产生-复合噪声功率谱密度公式可以看到，产生-复合噪声的大小与频率的二次方成反比。

2.2.3 热噪声

热噪声的来源是元器件内部载流子的随机运动，它广泛的存在于任何具有电阻特性的元器件当中^[67]。器件中载流子在器件温度高于绝对零度时会一直做无规则的热运动，这种随机运动会使得电流在平均值附近涨落。器件中电流的涨落便会导致器件两端电压发生涨落，由此而产生的噪声称之为热噪声。此噪声是由约翰逊在 1928 发现的，所以也被叫做约翰逊噪声，它代表某个阻值器件的最小噪声水平。对于结型半导体器件来说，热噪声的主要来源为接触电阻和体电阻。热噪声电流的大小满足公式 2-14：

$$\langle i_n^2 \rangle = \frac{4kT\Delta f}{R} \quad (2-14)$$

其中 k 表示玻尔兹曼常数， T 表示温度， Δf 为带宽， R 则代表器件的电阻值。热噪声电流的功率谱密度满足公式 2-15：

$$S(f) = \frac{4kT}{R} \quad (2-15)$$

由此可以看出，器件的热噪声与频率和所加偏压无关，只与温度以及器件本

身的电阻值有关。

2.2.4 散粒噪声

产生散粒噪声的主要原因是形成电流的载流子的不连续性^[68]。在非极高频的情况下，散粒噪声呈现出白噪声的特性，即与频率无关，在极高频的情况下，散粒噪声就会变得与频率相关。其在非极高频情况下的功率谱密度满足公式 2-16：

$$S_I(f) = 2qI \quad (2-16)$$

其中 q 表示自由电荷量，而 I 则表示流过器件的电流，在有光照的情况下， I 为器件中加入光电流的总电流。

2.3 低频噪声测试与缺陷分析

器件中噪声是影响器件性能好坏的一个重要参数，通常观察到的噪声功率谱密度(PSD)在低频区域（小于 MHz）表现为与频率相关，然后在更高的频率下变得与频率无关。低频区域底噪之上的额外噪声就被称之为低频噪声(LFN)^[69-71]。

低频噪声主要包括 $1/f$ 噪声，产生-复合噪声。 $1/f$ 噪声它的功率谱密度反比于频率，而产生-复合噪声以洛伦兹叠加形式出现在 $1/f$ 噪声之上。图 2.1 分别展示了有无产生-复合噪声情况下的低频噪声^[72]。 $1/f$ 噪声来源主要是器件载流子迁移率的波动和器件表面载流子数的波动，产生-复合噪声的来源主要为载流子由于器件中缺陷的存在发生产生-复合现象引入的。产生-复合现象分为四种情况：自由电子与自由空穴复合；自由电子与自由空穴产生；电子陷阱捕获或者发射电子；空穴陷阱捕获或者发射空穴。由于这些过程都是离散和随机的，其产生的噪声从物理本质上看是与频率相关的。因为产生的噪声与半导体材料的深能级态特性之间有密切关系，所以低频噪声可以用来表征半导体器件中的深能级缺陷^[73]。

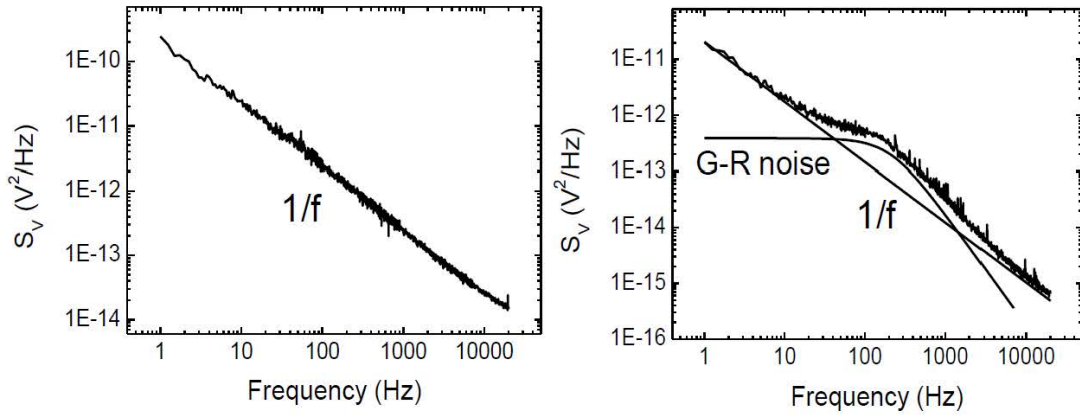
图 2.10 有无产生-复合噪声情况下的低频噪声^[72]

Figure 2.10 Low frequency noise with or without generation-recombination noise.

低频噪声的电流谱密度可以用方程 2-17 表示^[74]:

$$S_I = \sum \frac{A_i \tau_{oi}}{1 + (2\pi f \tau_{oi})^2} + \frac{B}{f} + C \quad (2-17)$$

这三项分别代表产生-复合噪声, 1/f 噪声和热噪声, 产生-复合电流噪声这一项中包含了一系列的洛伦兹峰。方程 2-27 中 S_I 表示电流谱密度, τ_{oi} 是各个产生-复合中心的时间常数, f 是频率, B 为 1/f 噪声的幅度大小。为了能在测量得到的低频噪声谱中更好的观察到洛伦兹峰特征, 将公式 2-17 乘上 f 以抑制 1/f 背景噪声得到公式 2-18^[75]:

$$f S_I = \sum \frac{f A_i \tau_{oi}}{1 + (2\pi f \tau_{oi})^2} + B + f C \quad (2-18)$$

为了能从测试数据中提取缺陷的活化能和俘获截面等参数的信息, 测量了不同温度和不同偏压的低频噪声谱数据, 选取众多的噪声谱数据中可以明显看到洛伦兹峰随着温度发生变化的数据来分析得到缺陷的活化能。具体来说, 用公式 2-18 来拟合不同温度下的噪声谱数据, 便可得到每个缺陷能级的寿命 τ_{oi} , 然后, 画出 $\ln(\tau_{oi} T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图, 再通过线性拟合得到曲线的斜率与截距, 这两个信息可以计算出缺陷的活化能与俘获截面。

2.4 本章小结

本章首先介绍了雪崩光电探测器的一些基本性能指标, 其中包括暗电流, 雪

崩增益，过剩噪声，量子效率及响应度，带宽以及雪崩探测器中的增益带宽积。这些性能指标都是研究一个雪崩探测器所必需的，同时也介绍了如何对这些性能指标进行测量和分析。包括暗电流的测试，暗电流与器件尺寸的分析，变温暗电流的测试与活化能的分析，雪崩增益的测试与如何计算，也讲解了器件暗电流比较大的情况下如何准确的进行增益的测试，以及过剩噪声测试系统和量子效率测试系统的搭建与如何应用。之后又介绍了雪崩探测器中各类噪声的来源，分别对每一种噪声产生机制进行讲解。最后，介绍了低频噪声测试系统以及如何通过分析测试所得的低频噪声谱来获得一个器件中缺陷能级的数据信息。

第3章 基于 AlInAsSb 的 APD 器件性能表征

3.1 器件的生长与工艺

$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 数字合金材料器件具有非常低的过剩噪声因子, 还可以通过调节材料的 Al 成分比例将器件的截至波长从近红外(NIR)改变到中红外(MWIR)^[46, 47, 76-78]。 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 雪崩探测器展现了低暗电流特性和高温稳定性, 这表明数字合金材料是近红外(NIR)和中红外(MWIR)波段高性能雪崩探测器的一个有前途的备选材料^[79]。在使用数字合金这种生长方式之前, 晶格匹配生长 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 材料一直被限制在 Al 成分比例小于 30%的情况, 而使用数字合金生长方式可以生长出 Al 成分比例高达 80%的材料^[80, 81]。采用固体源分子束外延在 n 型 Te 掺杂的 GaSb(001)的基底上生长外延层, 每一层都以二元单分子层数字合金方式生长, 数字合金周期是 3nm, 快门序列为: AlSb, AlAs, AlSb, InSb, InAs, Sb^[47]。不同 Al 成分比例的器件带隙不同, 大概从 1.13eV ($x = 70\%$) 变化到 0.58eV ($x = 30\%$)^[82]。

图 3.1 展示的是 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 雪崩探测器的横截面示意图^[77]。其基本结构是一个具有 p 型顶部接触层的 AlInAsSb/GaSb p-i-n。不掺杂的高电场倍增区大约为 890nm, 圆形台面使用标准光刻法标定, 刻蚀采用湿法刻蚀, 溶液是 HCl:H₂O₂:H₂O, 并用溴甲醇做表面光滑处理停止腐蚀。为了提高钝化效果从而减少器件表面漏电流, 在刻蚀结束后立即在器件表面涂上 SU-8 2000.5。钛/金接触电极使用电子束蒸发来沉积在基底与台面上。

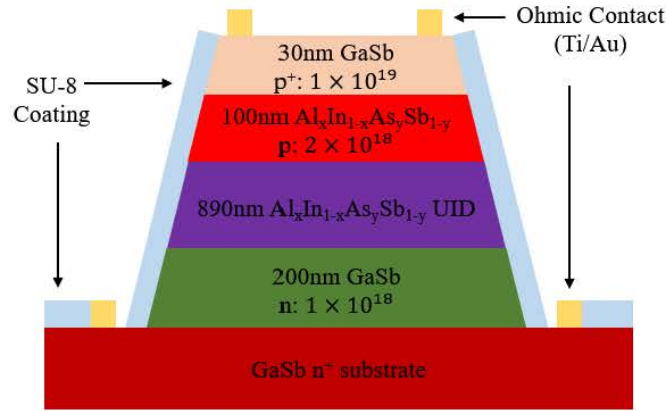


图 3.1 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 雪崩探测器的横截面示意图

Figure 3.1 The cross section Schematic of an $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ avalanche detector.

3.2 器件的暗电流特性

3.2.1 不同 Al 成分比例器件的暗电流

用分子束外延技术生长了一批 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 数字合金材料的器件, Al 的成分比例分别为 $x = 30\%$, 40% , 50% , 70% , 80% 。在常温 300K 下, 对这批器件进行暗电流测试, 得到不同 Al 成分比例的器件暗电流情况如下图 3.2 所示, 器件尺寸都选择直径 $200\mu\text{m}$ 。可以看到, 随着材料中 Al 成分比例的减少, 器件的暗电流随之增加, 这是因为 Al 成分的下降会使得材料的带隙变小。Al 成分比例 80% 的器件常温下暗电流在纳安量级, 而 30% 成分比例的器件暗电流接近微安量级。

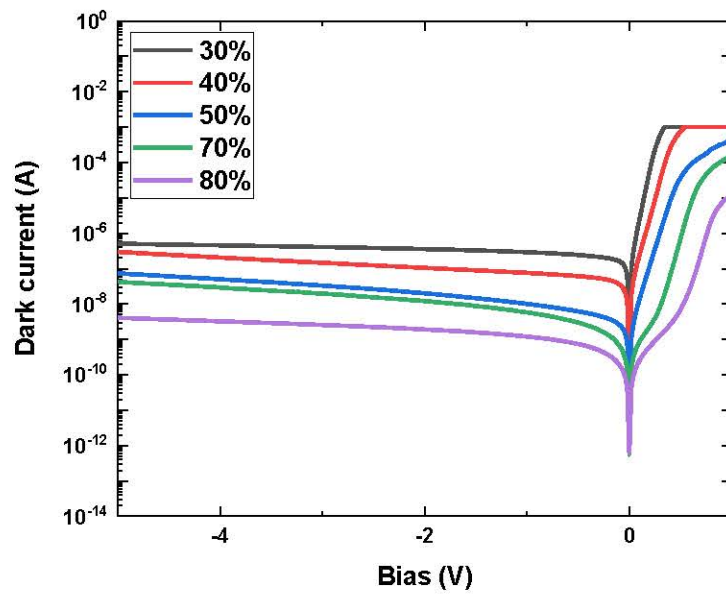


图 3.2 不同 Al 成分比例器件的暗电流

Figure 3.2 Dark current of devices with different Al component ratios.

3.2.2 器件暗电流与器件尺寸的关系

通过测量不同尺寸器件的暗电流大小并分析其与器件尺寸的关系可以推断出这些器件的暗电流是由表面暗电流还是体暗电流主导。若发现暗电流与器件面积成线性,即与器件直径成二次关系,则器件的暗电流是由体暗电流主导。反之,若暗电流与器件直径成线性,则器件的暗电流是由表面暗电流主导。这批 AlInAsSb 数字合金材料的器件主要有 7 个直径尺寸大小 $70\ \mu\text{m}$, $100\ \mu\text{m}$, $150\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$, $250\ \mu\text{m}$, $350\ \mu\text{m}$ 和 $500\ \mu\text{m}$ 。下图 3.3 为成品器件在显微镜下的尺寸测量图。

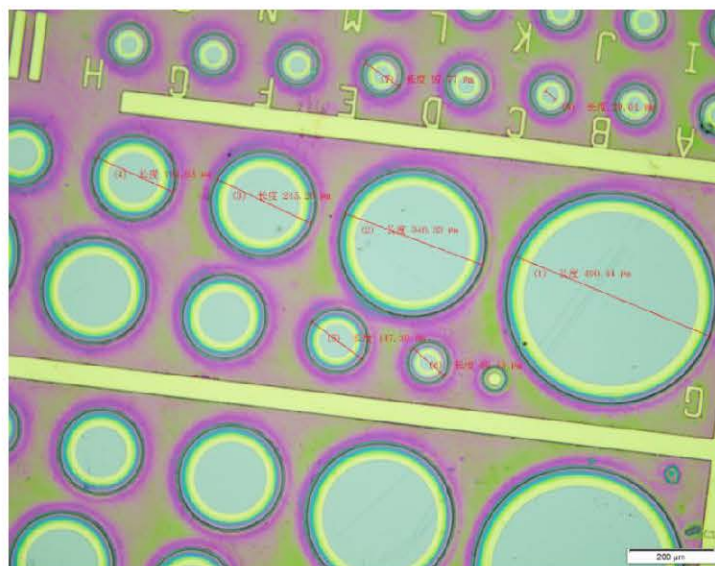


图 3.3 AlInAsSb 器件在显微镜下的尺寸测量图

Figure 3.3 The size measurement of the AlInAsSb device under the microscope.

考虑到工艺的误差与测量误差，器件的尺寸很好的满足了设计的需求。在常温 300K 下测试不同尺寸器件的暗电流，每个尺寸都测试多个器件，去除暗电流偏离平均值较多的器件。下图 3.4-3.7 分别是 Al 成分比例 80%，50%，40%，30% 材料器件在 -1V 偏压下的暗电流与器件尺寸的关系图。

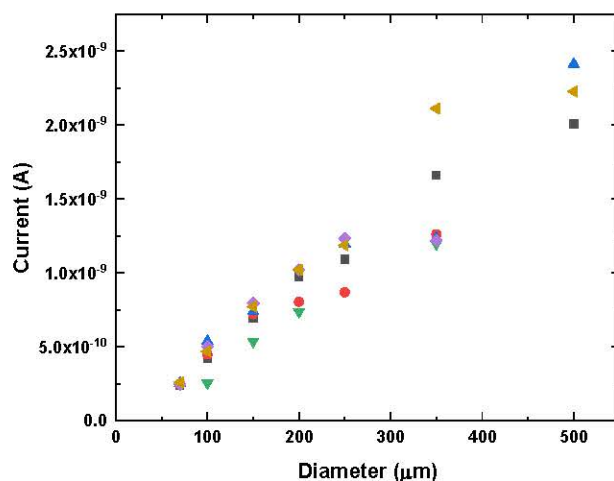


图 3.4 Al 成分比例 80%器件暗电流与尺寸的关系（其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流）

Figure 3.4 The relationship between dark current and size of 80% Al components (Among them, different symbols represent the dark current of devices with different sizes corresponding to different columns on the wafer).

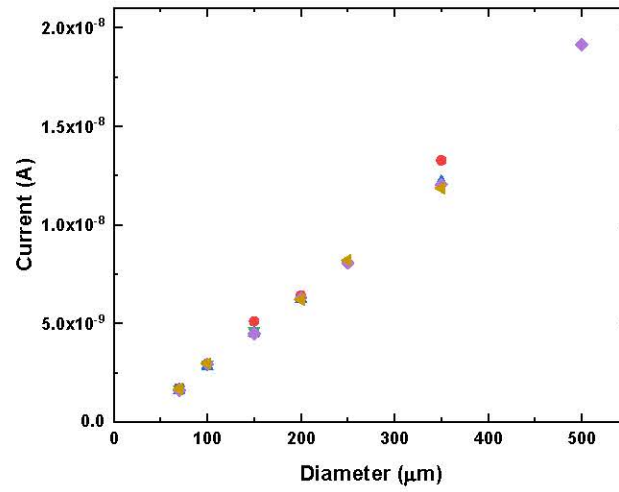


图 3.5 Al 成分比例 50%器件暗电流与尺寸的关系（其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流）

Figure 3.5 The relationship between dark current and size of 50% Al components (Among them, different symbols represent the dark current of devices with different sizes corresponding to different columns on the wafer).

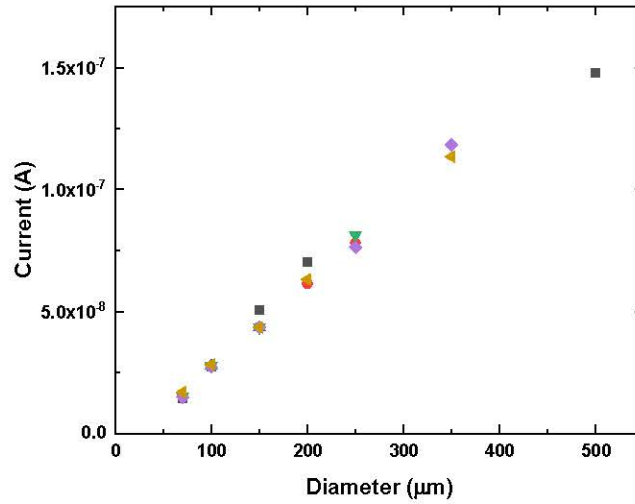


图 3.6 Al 成分比例 40%器件暗电流与尺寸的关系（其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流）

Figure 3.6 The relationship between dark current and size of 40% Al components (Among them, different symbols represent the dark current of devices with different sizes corresponding to different columns on the wafer).

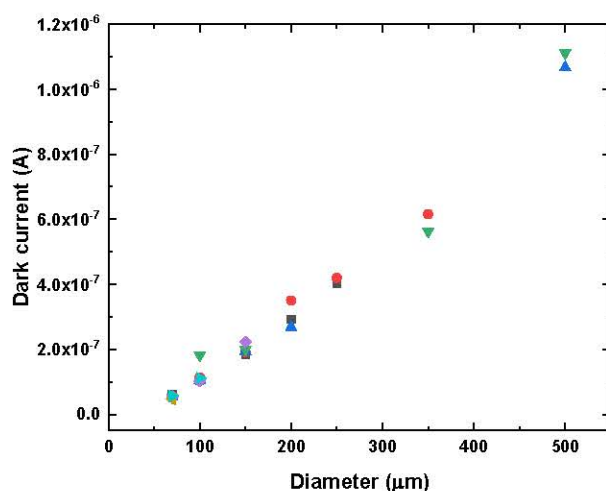


图 3.7 Al 成分比例 30%器件暗电流与尺寸的关系（其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流）

Figure 3.7 The relationship between dark current and size of 30% Al components (Among them, different symbols represent the dark current of devices with different sizes corresponding to different columns on the wafer).

上述图中可以看到，四种不同 Al 成分比例材料的器件暗电流都与器件直径成正比，也就意味着它们的暗电流都是由器件表面漏电流所主导的。这个信息告诉研究者在器件工艺制作时需要额外的处理器件表面以降低器件的暗电流。

3.2.3 器件的变温暗电流情况

器件的变温暗电流是用低温探针台测试系统来进行测试的，用液氮进行降温，配合低温恒温器控制温度。测试器件的变温暗电流可以拟合出器件的活化能 E_a ，将活化能与材料带隙进行比较便能判断器件暗电流的主要组成机制。本小结中主要展示 Al 成分比例 70%材料器件变温暗电流情况，Al 成分比例 50%，40%，30%的变温暗电流情况将在下一章器件缺陷的测试分析时详细展示，而 Al 成分比例 80%材料的器件由于其低温下暗电流小于半导体参数分析仪的灵敏度，故没有对其进行测试分析。下图 3.8 为 Al 成分比例 70%材料器件在不同温度下的电流-电压特性，器件的直径为 500 μm。从图上可以观察到，在 160K 和其以下的温度器件暗电流都小于半导体参数分析仪的灵敏度，所以 160K，130K，100K 这三条温度的 I-V 曲线都不是器件真实的暗电流值，而只是仪器的本底噪声。取偏压-1V 下不同温度的暗电流值作 Arrhenius 图如图 3.9 所示，通过线性拟合便可得到器

件的活化能 $E_a = 0.39\text{eV}$ 。而这种材料的带隙 $E_g = 1.13\text{eV}$ ，由此可分析出器件的暗电流组成机制主要是产生-复合。

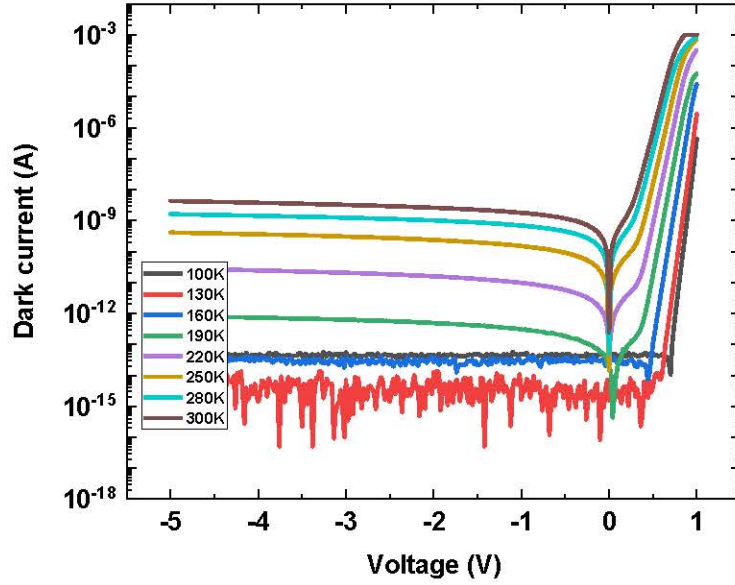


图 3.8 Al 成分比例 70%，直径 $500\text{ }\mu\text{m}$ 器件不同温度下的 I-V 曲线

Figure 3.8 I-V curve under different temperature of the device with 70% Al composition, diameter of $500\text{ }\mu\text{m}$.

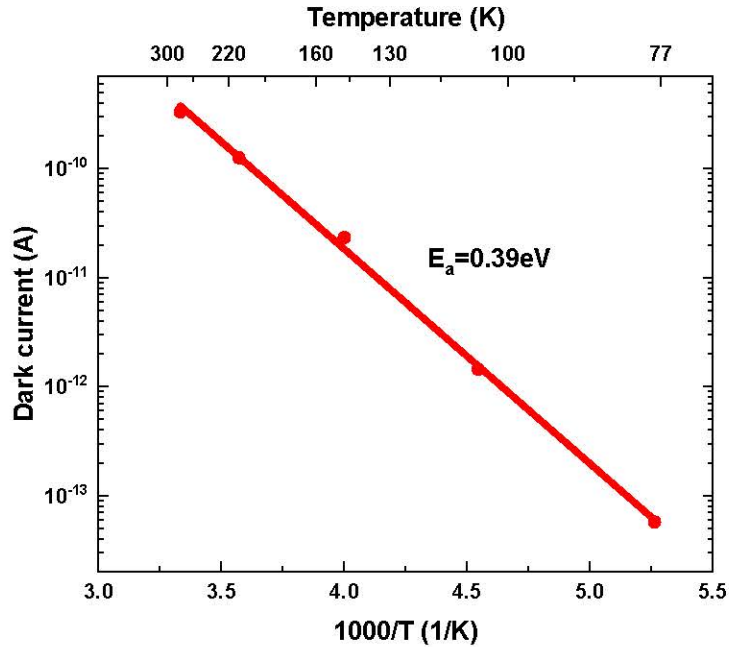


图 3.9 偏压-1V 下暗电流与温度的 Arrhenius 图

Figure 3.9 Arrhenius plot of temperature-dependent dark current at -1V.

图 3.10 为相同 Al 成分比例，直径 $200\ \mu\text{m}$ 的器件在不同温度下电流-电压特性曲线。同样可以看只有温度大于 160K 的暗电流数据才是可靠的，也取偏压为 -1V 下的暗电流作关于温度的 Arrhenius 图如图 3.11 所示，拟合出直径 $200\ \mu\text{m}$ 器件的活化能 $E_a = 0.40\text{eV}$ ，与直径 $500\ \mu\text{m}$ 器件的几乎相同。

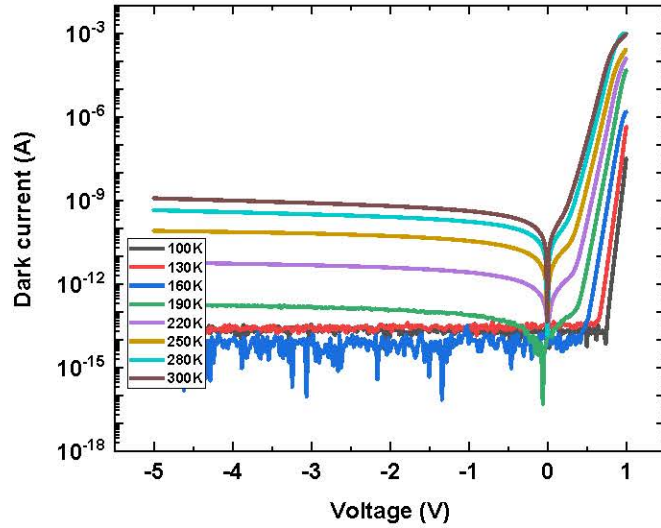


图 3.10 Al 成分比例 70%，直径 $200\ \mu\text{m}$ 器件不同温度下的 I-V 曲线

Figure 3.10 I-V curve under different temperature of the device with 70% Al composition, diameter of $200\ \mu\text{m}$.

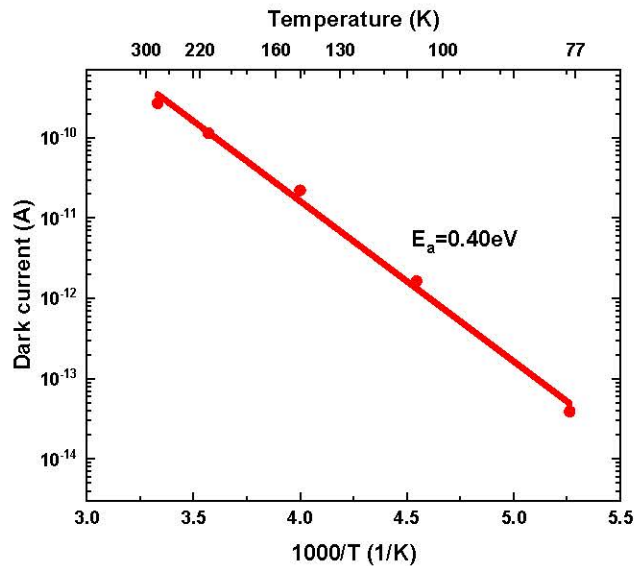


图 3.11 偏压 -1V 下暗电流与温度的 Arrhenius 图

Figure 3.11 Arrhenius plot of temperature-dependent dark current at -1V.

3.3 器件的增益特性

为了得到器件的增益特性，需要测试了器件在有光照情况下的光电流，图 3.12 展示 Al 成分比例为 80%器件的光电流情况。使用增益计算公式获得器件的不同偏置电压下的增益用图 3.13 来表示。

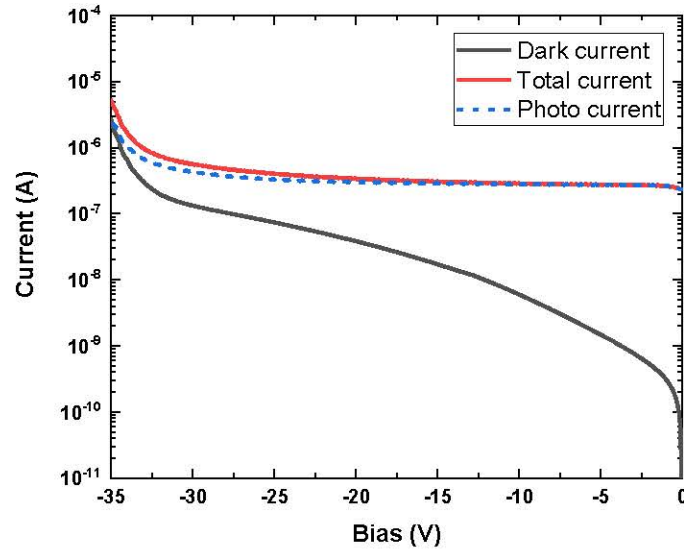


图 3.12 Al 成分比例 80%器件的暗电流与光电流

Figure 3.12 Dark current and photo current of the device with 80% Al components.

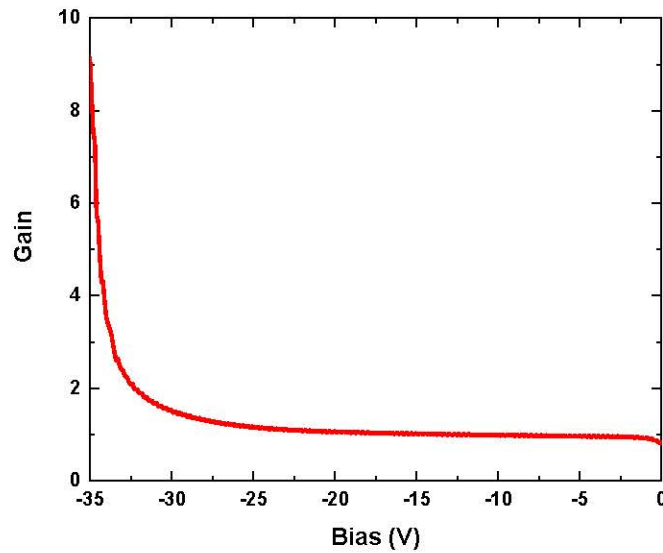


图 3.13 Al 成分比例 80%器件的增益

Figure 3.13 Gain of the device with 80% Al component.

可以看到由于材料带隙很宽，器件需要在比较大的偏压下才能发生碰撞电离产生增益，而随着 Al 成分比例的降低，器件发生碰撞电离所需的偏压也相应减小。下图 3.14-3.15 是 Al 成分比例 70% 材料器件对应的光电流和增益情况。

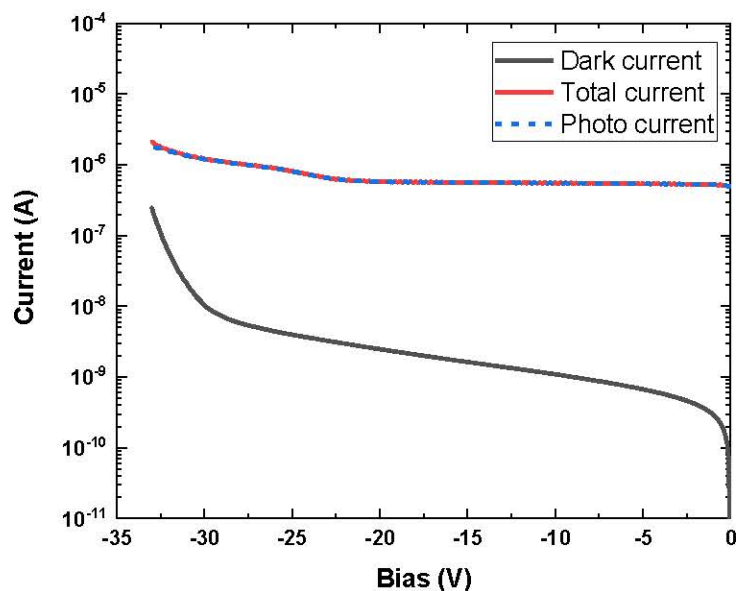


图 3.14 Al 成分比例 70% 器件的暗电流与光电流

Figure 3.14 Dark current and photo current of the device with 70% Al components.

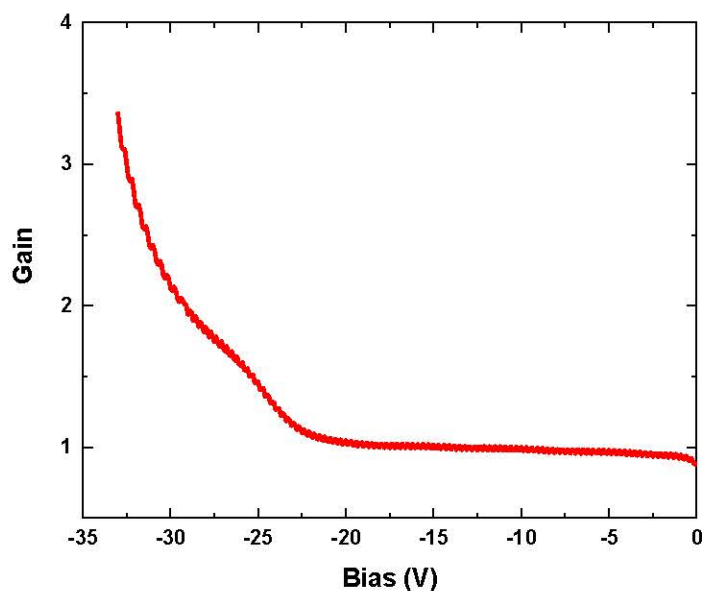


图 3.15 Al 成分比例 70% 器件的增益

Figure 3.15 Gain of the device with 70% Al component.

对 Al 成分比例为 50%，40%材料的器件进行增益计算，发现即使在比较大的偏压下，照光得到的总电流有明显增大的时候，器件依旧没有出现增益，这种现象出现的原因有可能是此结构的器件中载流子在获得足够发生碰撞电离能量之前就发生了隧穿现象。下图 3.16-3.17 分别是 Al 成分比例为 50%，40%材料器件的光电流测试情况。而 Al 成分比例 30%材料的器件由于暗电流就已经到微安级别，所以常温下无法测得准确的光电流信号。

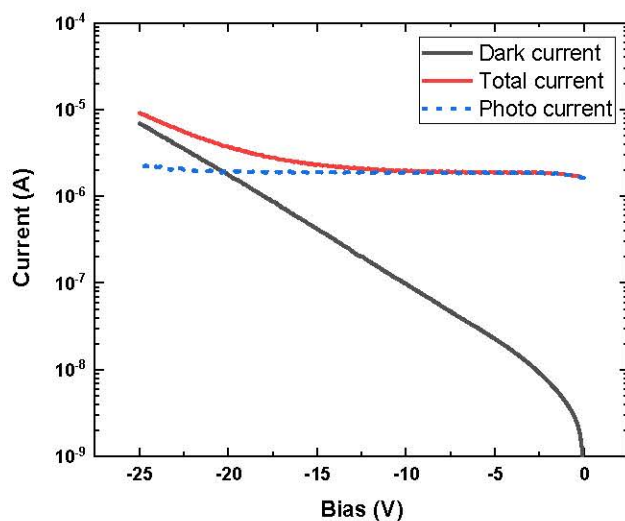


图 3.16 Al 成分比例 50%器件的暗电流与光电流

Figure 3.16 Dark current and photo current of the device with 50% Al components.

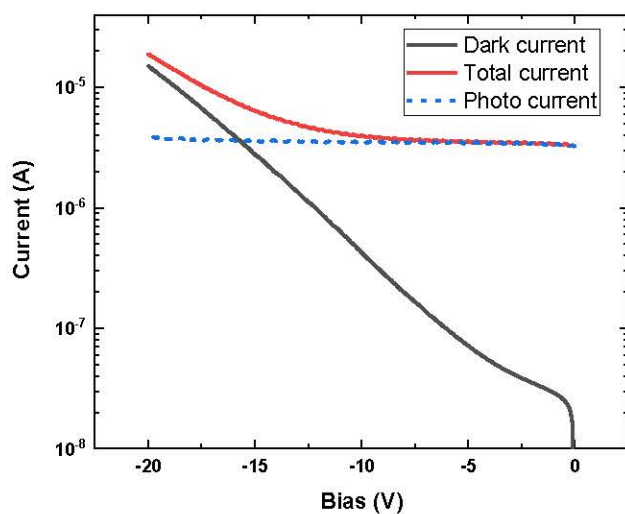


图 3.17 Al 成分比例 40%器件的暗电流与光电流

Figure 3.17 Dark current and photo current of the device with 80% Al components.

3.4 器件的量子效率

量子效率这个参数是衡量器件将光信号转换成电信号能力的物理参数。使用第二章中介绍的量子效率测试系统测量不同 Al 成分比例材料的器件，下图 3.18-3.19 分别展示了直径 $500\mu\text{m}$ 和直径 $150\mu\text{m}$ 器件在不同偏置电压情况下量子效率和光波长之间的关系。

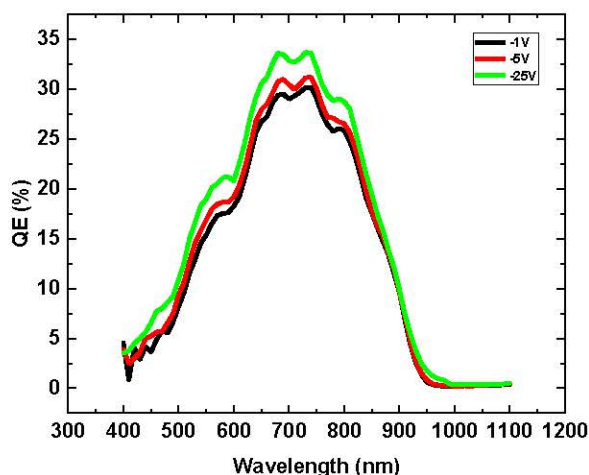


图 3.18 Al 成分比例 80%，直径 $500\mu\text{m}$ 器件不同偏压下的量子效率

Figure 3.18 Quantum efficiency at different bias of the device with 80% Al components, diameter of $500\mu\text{m}$.

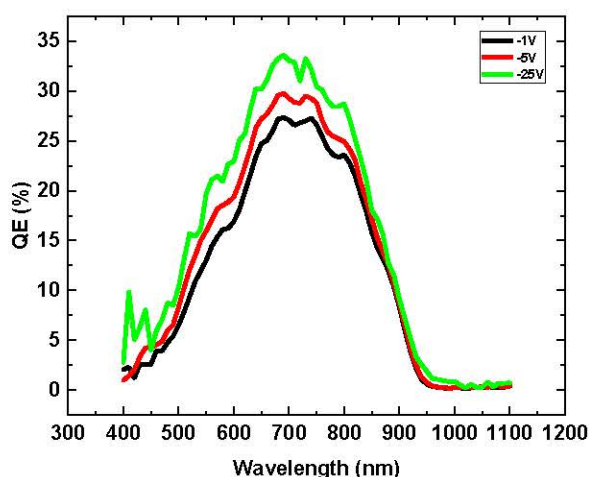


图 3.19 Al 成分比例 80%，直径 $150\mu\text{m}$ 器件不同偏压下的量子效率

Figure 3.19 Quantum efficiency at different bias of the device with 80% Al components, diameter of $150\mu\text{m}$.

可以观察到, 尺寸不同的器件量子效率是一样的, 它的峰值在 750nm 左右大概是 30%, 而截至波长为 950nm, 这与之前报道过的文章中对此 Al 成分比例材料器件的理论带隙计算结果相吻合^[82]。随着器件两端所加偏压的增大, 器件的量子效率也会随之变大, 在小偏压的情况下, 量子效率随着偏压的增大不明显, 因为此时器件光电流的增大来源于加大偏压导致耗尽层的变宽。而在偏压比较大的情况下, 器件内部载流子发生碰撞电离使得光电流发生倍增, 也就会使算得的量子效率有一个明显增大。在这个 Al 成分比例对应的波长测试区间下, 使用的标准片为硅片。当 Al 成分比例减小时, 器件截至波长会变大, 这时候就需要硅和锗两个标准片来计算器件的量子效率。下图 3.20 展示了不同 Al 成分比例材料器件的量子效率与波长关系图, 器件直径都为 $150\mu\text{m}$ 。值得注意的是, 在 1100nm 处两个标准片计算的量子效率结果近似相同, 所以认为这两个标准片的测试与对应计算数据都是可靠的。这个测试结果与之前报道的数据相吻合^[82]。

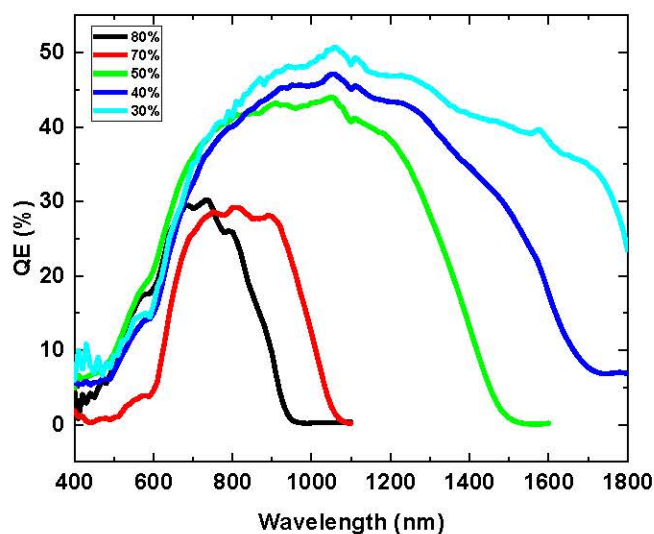


图 3.20 不同 Al 成分比例, 直径 $150\mu\text{m}$ 器件的量子效率

Figure 3.20 Quantum efficiency at different bias of the device with different Al components, diameter of $150\mu\text{m}$.

3.5 器件的过剩噪声

雪崩光电探测器的过剩噪声是一个非常重要的性能指标, 在这一小节中, 将详细展示 Al 成分比例为 80%, 70%材料器件的过剩噪声测试结果。测试系统采

用第二章中介绍的用噪声分析仪搭建的系统，而 Al 成分比例 50%，40%，30% 材料的器件由于增益都不明显，便不再对其进行过剩噪声的测试。

3.5.1 Al 成分比例 80%材料器件的过剩噪声

根据过剩噪声的公式 3-1

$$S = 2qI_0R(\omega)M^2F(M) \quad (3-1)$$

其中 S 是噪声分析仪测得的数值， q 是电子的电量， I_0 是单位增益下的光电流， M 是器件的增益， $F(M)$ 是需要测试的过剩噪声因子，于是便可发现这个方程中只剩下 $R(\omega)$ 一个未知量。为了确定 R 的具体数值，先在单位增益的偏压下测试出一组不同光强下的光电流与噪声值。下图 3.21 为器件在固定偏压-10V 下改变光强测得的光电流与噪声的关系图，此时噪声分析仪读取噪声的频率是 20MHz，而氦氖激光器输出波长为 633nm 的红光。从图上可以看到噪声与光电流有很好的线性关系，而此偏压下 M 和 $F(M)$ 都等于 1，于是噪声公式便简化成 $S = 2qI_0R(\omega)$ ，通过线性拟合光电流与噪声的曲线得到的斜率就是 $2qR(\omega)$ ，在同一个频率下，它是不随偏压和光强改变的常数。成功拟合得到这个常数之后，再通过改变器件两端的偏压来测试不同增益下器件的噪声，然后便可用噪声公式 3-1 计算得到不同增益情况下的过剩噪声因子 $F(M)$ 。图 3.22 展示了器件过剩噪声因子与增益之间的关系。

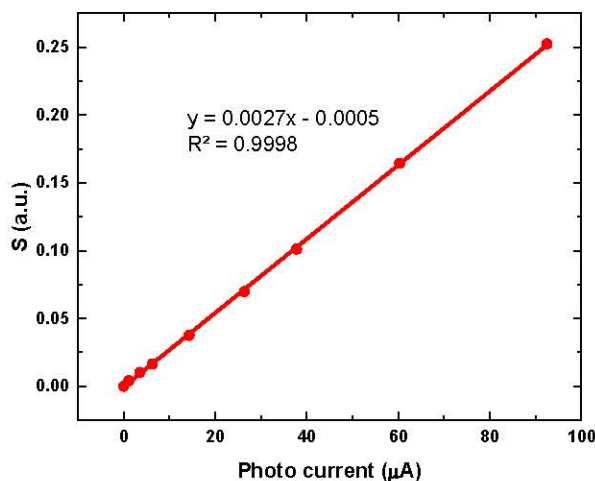


图 3.21 红光下不同光强光电流与噪声关系图

Figure 3.21 The relationship between current and noise of different light intensity under red light.

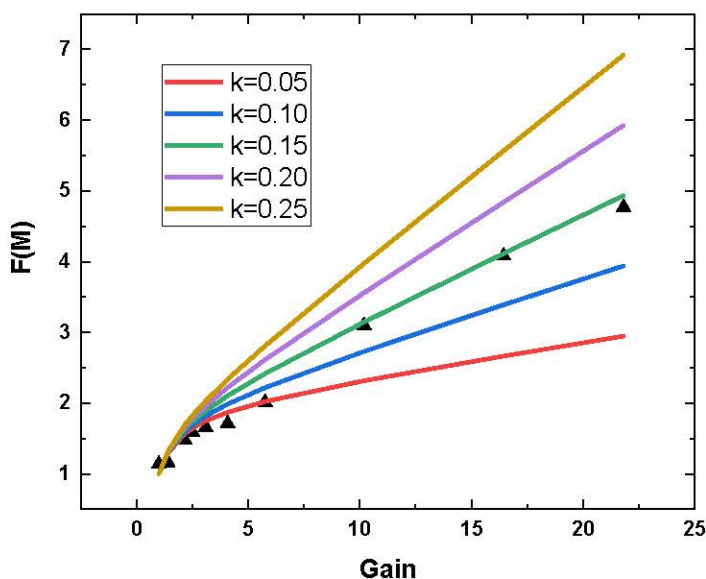


图 3.22 红光下过剩噪声因子与增益关系图

Figure 3.22 The relationship between excess noise factor and gain with red light.

不同 k 值器件的增益与过剩噪声关系曲线由第二章中介绍的公式 2-4 决定，通过对比不同 k 值的增益过剩噪声曲线可以推断出测试器件的 k 值大约为 0.15。这比以前报道的文章中测得的 k 值要大得多^[82]，根据之前搭建雪崩光电探测器过剩噪声测试系统时测试硅雪崩探测器所获得经验，猜测这是由于 633nm 的激光没有在器件的 p 区完全被吸收导致的。若光都在器件 p 区吸收，则发生碰撞电离的载流子为 p 区进入的电子，而如果光在 i 区吸收，那么就会在 i 区产生电子-空穴对，那么产生的电子和空穴都会发生碰撞电流，而由此计算得到的 k 值也就比材料实际 k 值大得多。

为了验证这个猜想，将氦氖激光器的输出光波长调成 594nm 的橙光模式对同一个器件再进行一次测试，噪声分析仪读取噪声的频率依旧为 20MHz。下图 3.23 为器件在橙光下测得的光电流与噪声的关系图，测试时发现即使将控制光强的衰减片调到衰减最小，光电流也只有三十多微安，比红光时测得的最大光电流接近一百微安小很多，这使得拟合的常数 R 没有红光时精确。造成光电流减小的原因是更多的光在器件表面和 p 区被吸收，产生的载流子在进入 i 区或被收集之前发生了复合效应。图 3.24 为橙光测试所得的过剩噪声因子与增益之间的关系图。

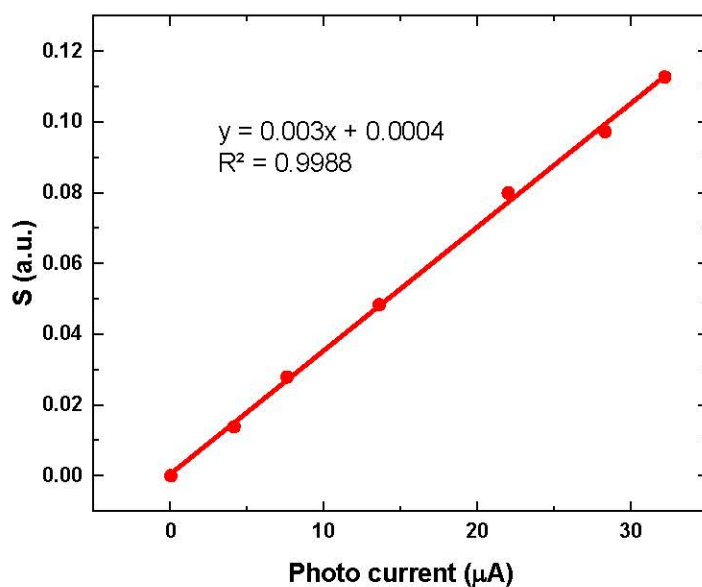


图 3.23 橙光下不同光强光电流与噪声关系图

Figure 3.23 The relationship between current and noise of different light intensity under orange light.

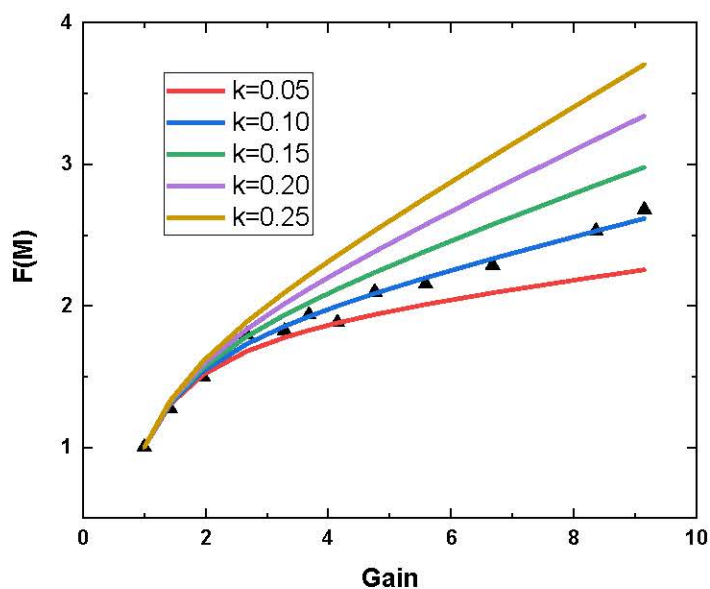


图 3.24 橙光下过剩噪声因子与增益关系图

Figure 3.24 The relationship between excess noise factor and gain with orange light.

同样通过对比不同 k 值的增益过剩噪声曲线来近似得到测试器件的 k 值大约为 0.1，这小于红光时计算的到的 k 值，证明对测试得到的 k 值偏大原因的猜

想是有道理的。然而此时的 k 值依旧大于之前报道的文献，于是又使用波长为 543nm 的绿光进行了一次测试。这个波长所能取得的最大光电流变得更小，通过改变光强拟合的常数 R 也更加不精确。不过幸运的是，拟合结果与之前两次的结果都很接近，所以认为它是可靠的数据。图 3.25 为器件在绿光下测得的光电流与噪声的关系图。图 3.26 为过剩噪声因子与增益在绿光下的测试结果。此时推断出的 k 值大约为 0.05，这便和之前报道的文献中此材料器件的 k 值情况相吻合 [82]。

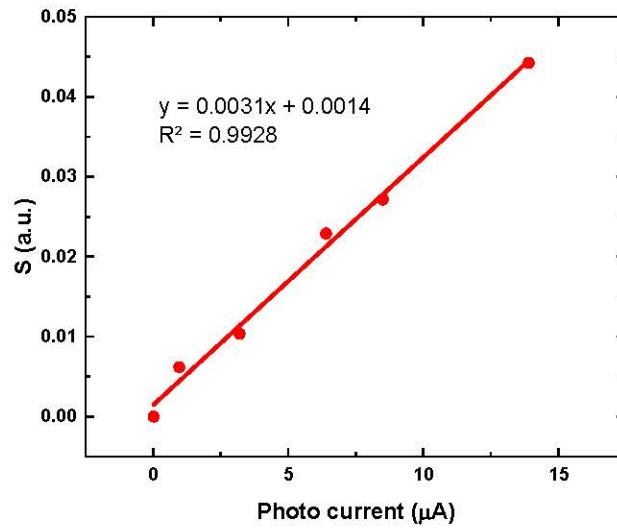


图 3.25 绿光下不同光强光电流与噪声关系图

Figure 3.25 The relationship between current and noise of different light intensity under green light.

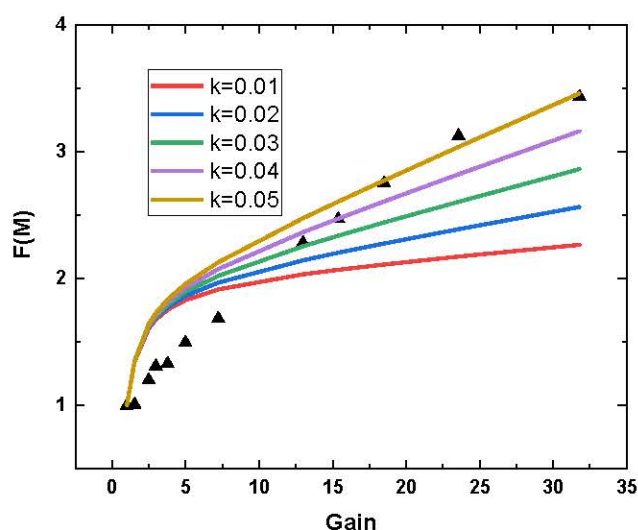


图 3.26 绿光下过剩噪声因子与增益关系图

Figure 3.26 The relationship between excess noise factor and gain with green light.

3.5.2 Al 成分比例 70%材料器件的过剩噪声

根据上一节中不同 Al 成分比例材料器件的量子效率测试结果来看, 70%Al 成分比例的器件对 543nm 的绿光响应度比 80%Al 成分比例的器件更低。不出所料, 在尝试通过改变光强测试光电流与噪声然后线性拟合常数 R 的过程中, 发现可调节的光电流区间太小无法得到可靠的线性。这个时候只能使用另一种计算方法得到 $F(M)$, 设器件在单位增益下的噪声为 $S_0 = 2qI_0$, 而在某个增益下的噪声为 $S_1 = 2qI_0M_1^2F(M_1)$, 则此时的 $F(M_1) = S_1/(S_0 \cdot M_1^2)$ 。这种计算方法一般情况下不被推荐, 因为它计算的 $F(M)$ 值完全依赖于单位增益下的噪声 S_0 , 而这个噪声 S_0 是一个接近噪声参数分析仪本底噪声的量, 从测试经验来看, 它的读数经常是不稳定的, S_0 的细微变化却可以使大增益下计算得到的 $F(M)$ 天差地别, 这又会使得 k 值得推断产生错误。在有 80%Al 成分比例的器件测试结果作指导的情况下尝试用这种计算方法进行实验, 下图 3.27 为 Al 成分比例 70%材料器件在绿光下过剩噪声因子与增益的关系图, 可以推断出器件的 k 值大概是 0.04。

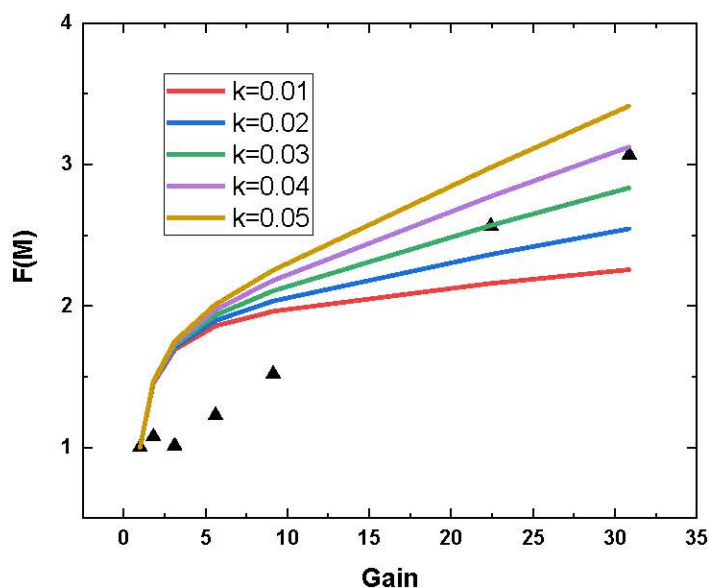


图 3.27 绿光下过剩噪声因子与增益关系图

Figure 3.27 The relationship between excess noise factor and gain with green light.

3.6 本章小结

本章中主要介绍了一批不同 Al 成分比例的 AlInAsSb 数字合金器件的性能测试结果。先简单介绍了这批器件的基本结构以及材料生长与工艺制作情况，然后展示了器件的暗电流情况。其中包括相同尺寸不同 Al 成分比例器件常温下暗电流对比的情况，各个 Al 成分比例材料器件的暗电流与其尺寸的关系，分析了器件暗电流主要是由表面漏电流主导。又通过变温暗电流测试拟合了 Al 成分比例 80% 和 70% 器件的活化能 E_a 。接着又介绍了使用量子效率测试系统测得各个器件的量子效率大小，其峰值大概在 50%。又对器件进行光电流测试，计算出了不同 Al 成分比例器件的雪崩增益数据。最后根据器件增益的测试结果选择 Al 成分比例 80%，70% 材料的器件测试了过剩噪声，并分析计算得出与此材料 k 值大概为 0.05，验证了材料的低过剩噪声性能。

第 4 章 AlInAsSb 器件低频噪声测试与缺陷分析

由于 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 数字合金材料的生长和器件工艺制造都还处在初期研究的阶段, 所以目前测试器件的性能还需通过分析标定和消除缺陷来加以提高。为了使得器件可以工作在盖革模式下做单光子探测, 详细了解器件中的缺陷是极为重要的。单光子雪崩光电探测器倍增层中的缺陷不仅会增加器件的暗计数, 还会影响器件的寄生脉冲概率, 这两个参数都是单光子探测应用中非常重要的性能指标^[83-86]。本章节将详细介绍如何通过低频噪声测试系统测试分析器件内部的缺陷, 以及如何判断缺陷为器件表面缺陷还是深能级缺陷。

4.1 Al 成分比例 30%材料器件的缺陷

4.1.1 器件的暗电流性能

图 4.1 展示了在常温下测得的一系列不同尺寸器件的暗电流, 偏压取-1V。由图 4.1(a)可以观察到, 大尺寸的器件暗电流差别很大, 一个芯片上的器件暗电流不统一的原因可能是材料的不均匀导致的。图 4.1(b)展示了每个尺寸去除偏离暗电流平均值较大的器件之后暗点电流与器件尺寸的关系。这些暗电流数据与之前报道的 AlInAsSb 雪崩探测器测试结果近似, 同时可推断出器件的暗电流与器件直径成正比, 也就意味暗电流是由器件表面漏电流所主导。器件的响应度通过量子效率测试系统测量计算, 在-1V 的偏压下, 直径为 $150\mu\text{m}$ 的器件, 对 1550nm 波长光的响应度是 0.425A/W , 对应的噪声等效功率为 $6.15 \times 10^{-14}\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

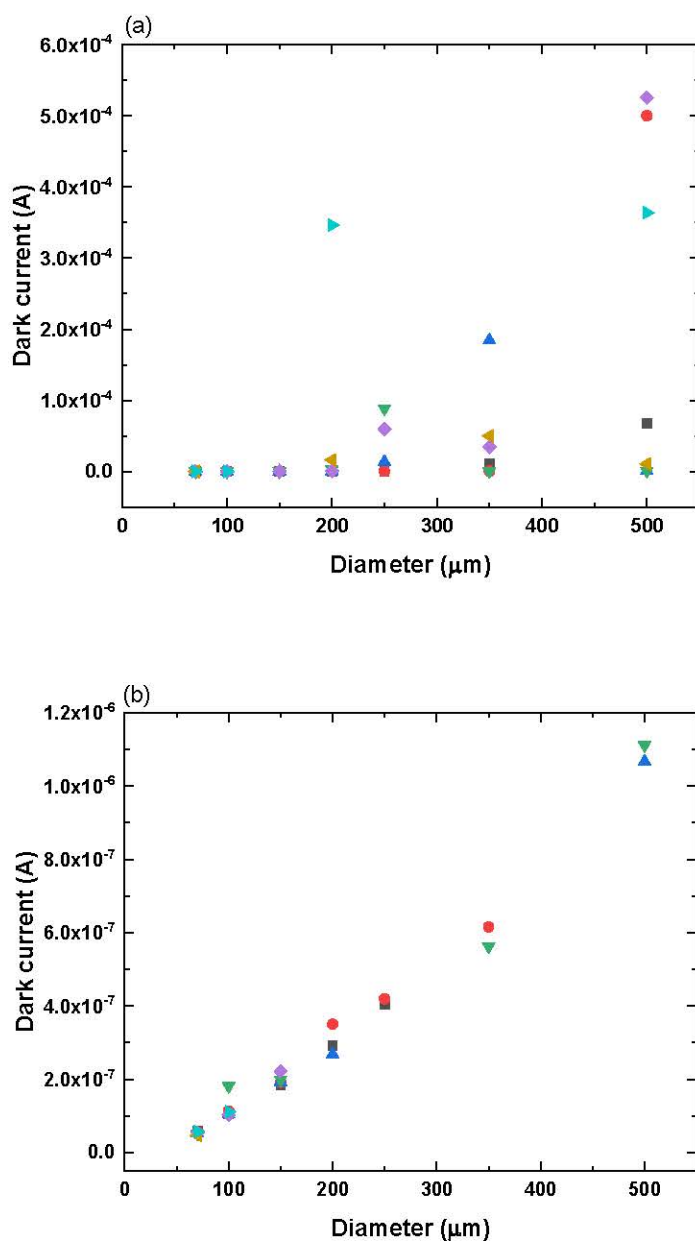


图 4.1 不同尺寸 AlInAsSb 器件在 -1V, 300K 时暗电流与直径的关系 (其中不同的符号表示 wafer 上不同列对应的不同尺寸器件的暗电流), (a) 所有测试器件 (b) 每种尺寸下性能最佳的器件

Figure 4.1 The dark current versus diameter at -1V at 300K of the AlInAsSb (Among them, different symbols represent the dark current of devices with different sizes corresponding to different columns on the wafer) (a) all the devices tested (b) devices with best performance at each size.

为了研究 AlInAsSb 雪崩探测器中的缺陷, 选择两个直径分别为 $500\mu\text{m}$ 和

200 μm 暗电流相对较高的器件进行变温的暗电流性能测量以及低频噪声的测量。图 4.2 为这两个器件从 77K 到 300K 的暗电流数据，图 4.3 为 -1V 下的暗电流与温度的 Arrhenius 图。由此可以拟合出该材料器件的活化能 $E_a = 0.14\text{eV}$ ，这之前报道的 AlInAsSb 雪崩探测器测试结果近似。

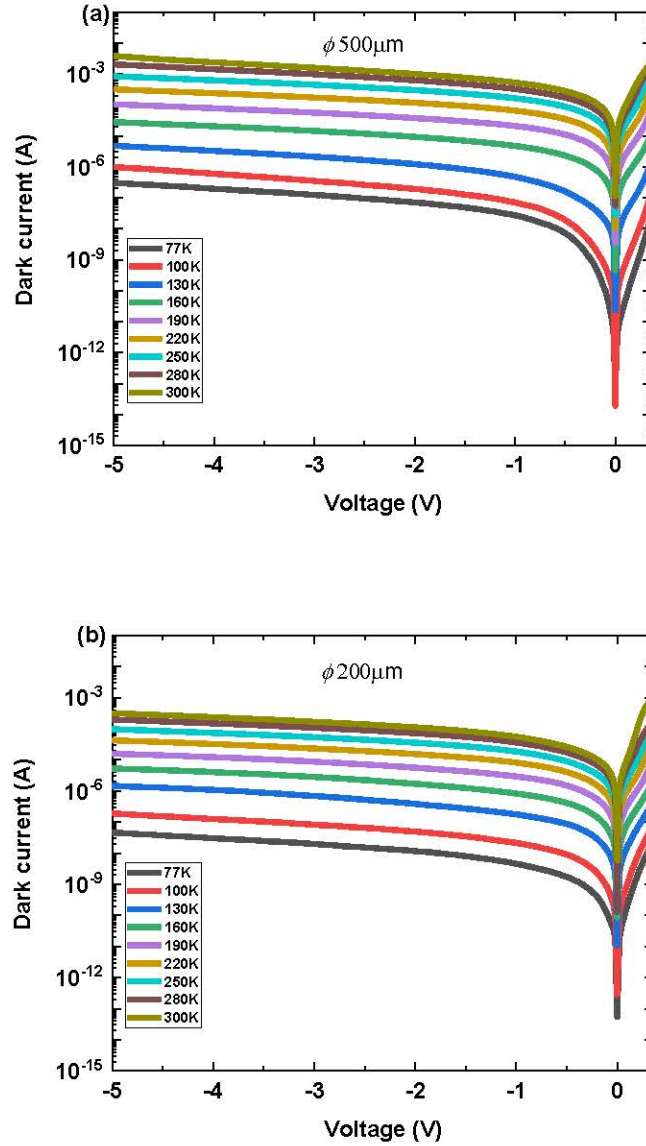


图 4.2 500 μm (a)和 200 μm (b)器件不同温度下的电流-电压特性

Figure 4.2 I-V curves of a 500 μm device (a) and 200 μm diameter device (b) as a function of temperature.

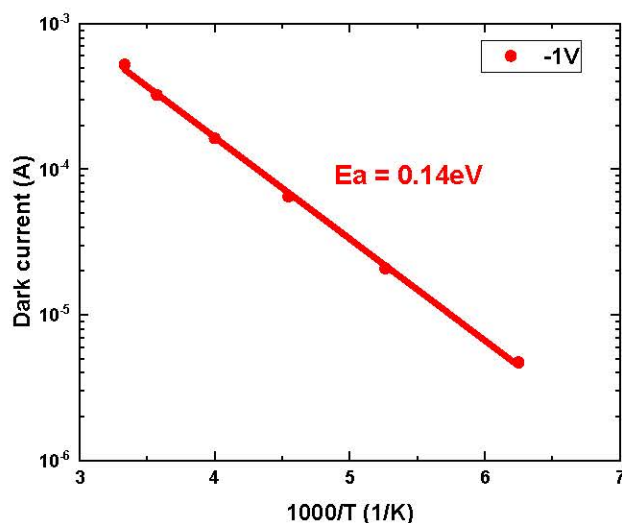


图 4.3 偏压-1V 下的暗电流与温度的 Arrhenius 图

Figure 4.3 Arrhenius plot of temperature-dependent dark current at -1V.

4.1.2 器件的低频噪声谱分析

测试完器件的暗电流之后,再用低频噪声测试系统对器件的低频噪声进行测量,来研究分析它的缺陷情况。对直径 $500\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m}$ 的器件从 77K 一直到 300K 间隔为 5K 或者 6K 的温度进行了低频噪声谱的测试,下图 4.4 和图 4.5 分别是直径 $500\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m}$ 的器件中产生-复合噪声可以看到明显洛伦兹峰所对应温度区间的噪声谱数据。通过洛伦兹拟合来拟合不同温度下的噪声谱可以得到每个温度与载流子寿命相关的时间常数 τ_i ,画出 $\ln(\tau_{oi}T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图如图 4.6 所示。通过线性拟合可以计算出直径 $500\mu\text{m}$ 的器件中存在两个缺陷,其活化能分别是 0.11eV 和 0.16eV,而直径 $200\mu\text{m}$ 的器件中的两个缺陷活化能为 0.11eV 和 0.21eV。在这两个器件中都发现了活化能为 0.11eV 的缺陷,表明这可能是材料生长引起的体缺陷,其它的两个缺陷(0.16 eV 和 0.21 eV)则可能是器件工艺制造时所引入的表面缺陷,因为工艺制造的不均匀性可能会导致不同器件表面缺陷活化能的不同。

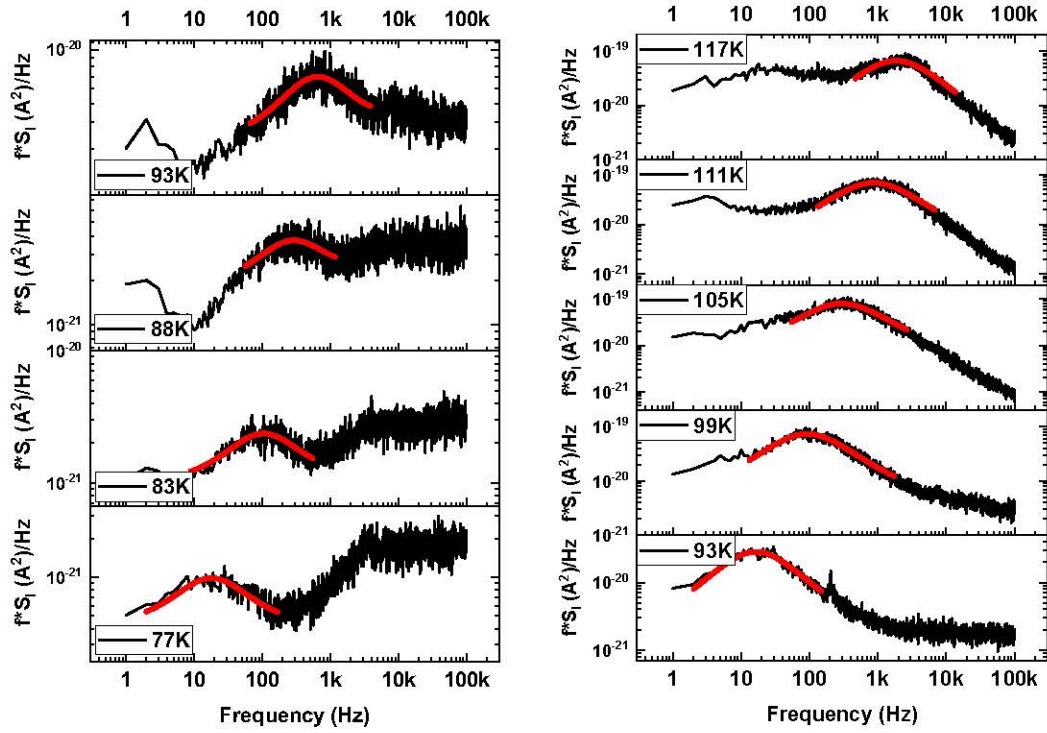
图 4.4 直径 500 μm 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合

Figure 4.4 The measured noise spectrum of a 500 μm diameter device at different temperatures, shown with Lorentzian fitting.

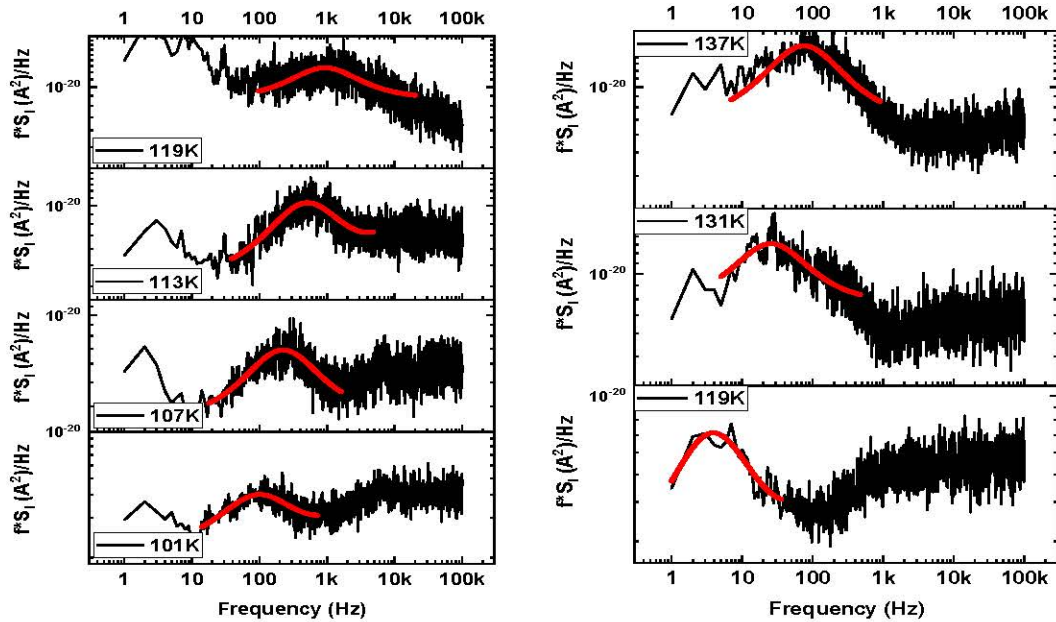
图 4.5 直径 200 μm 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合

Figure 4.5 The measured noise spectrum of a 200 μm diameter device at different temperatures, shown with Lorentzian fitting.

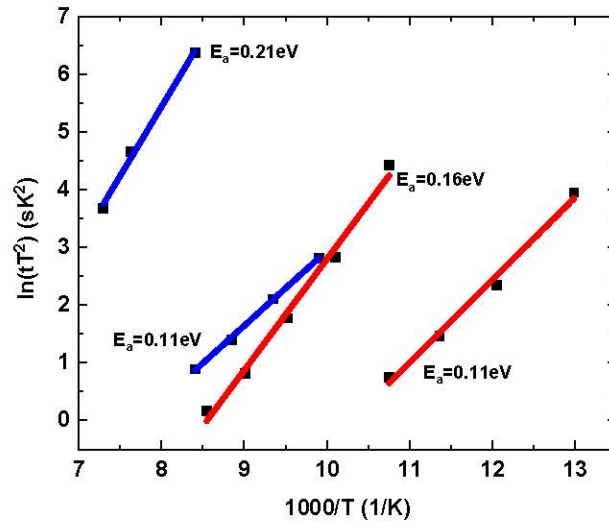


图 4.6 $\ln(\tau_{oi} T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图，红色为 $500\mu\text{m}$ 器件，蓝色为 $200\mu\text{m}$ 器件

Figure 4.6 Arrhenius plot of the defects in $500\mu\text{m}$ diameter (red) and $200\mu\text{m}$ diameter (blue) APDs.

为了进一步探究器件中缺陷的本质，在第一次测试过两个月之后又对相同的器件进行了一次测试。结果发现两个月之后器件的暗电流比第一次测试要增大很多，这说明器件的表面发生了氧化使得表面漏电流更多。下图 4.7 为两个器件在 -1V 的偏压下两次测试的暗电流对比图。

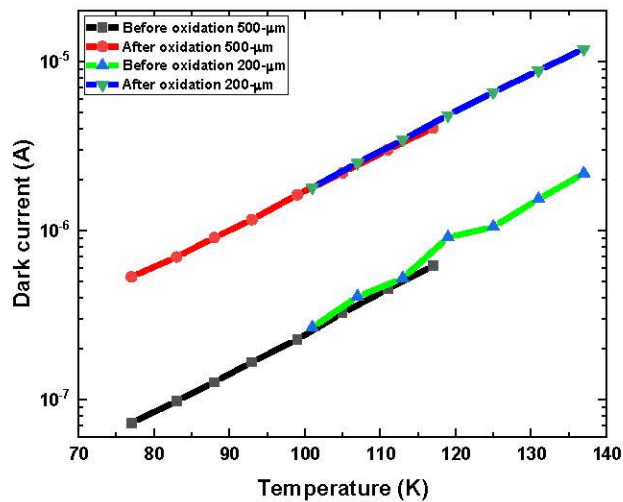


图 4.7 氧化前后器件在 -1V 下暗电流的对比

Figure 4.7 Dark current versus temperature at -1V before and after oxidation.

测量过暗电流之后,重新用低频噪声测试系统对这两个器件进行低频噪声谱的测试。图 4.8 是直径为 $500\mu\text{m}$ 的器件不同温度下的噪声谱测试数据以及洛伦兹拟合曲线。图 4.9 则是直径为 $200\mu\text{m}$ 的器件不同温度下的噪声谱测试数据以及洛伦兹拟合曲线。同样通过洛伦兹拟合来拟合出不同温度下的噪声谱的时间常数 τ_i ,再画出 $\ln(\tau_{oi}T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图如图 4.10 所示。然而这次的测试结果发现两个器件都只有一个缺陷,直径 $500\mu\text{m}$ 的器件存在的缺陷活化能为 0.16eV ,直径 $200\mu\text{m}$ 的器件存在的缺陷活化能为 0.21eV 。这与器件氧化之前测得的认为是表面缺陷的活化能相同。而氧化之前测得的认为是体缺陷的那个缺陷能级在器件氧化之后没有再被发现,所以认为是由于氧化导致器件表面漏电流太大掩盖了体缺陷的产生复合噪声。而这也验证了之前对这些噪声缺陷本质的猜测,表 4.1 总结了这两个器件中的所有缺陷与其它一些物理参数的情况。

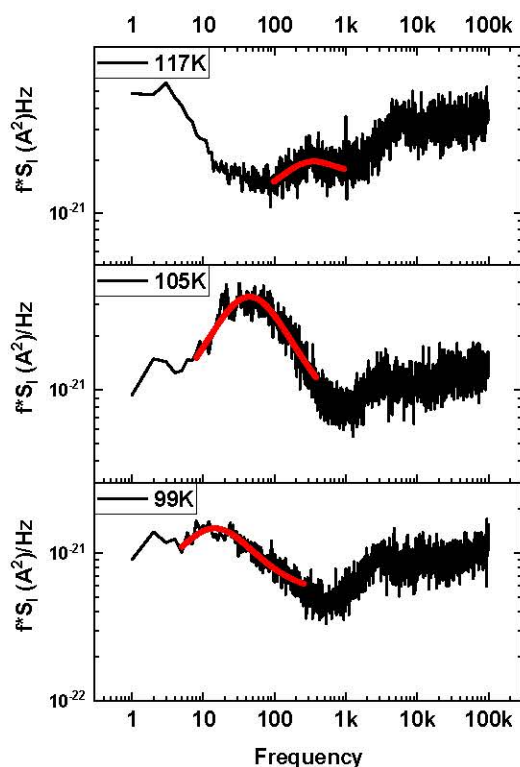


图 4.8 直径 $500\mu\text{m}$ 器件氧化后不同温度下的噪声谱和洛伦兹拟合

Figure 4.8 The measured noise spectrum of the $500\mu\text{m}$ diameter device at different temperatures after surface oxidation, shown with Lorentzian fitting.

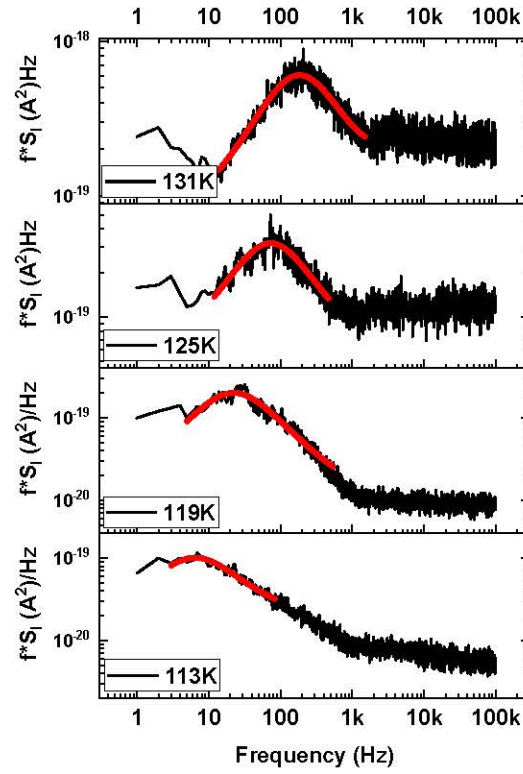


图 4.9 直径 $200\mu\text{m}$ 器件氧化后不同温度下的噪声谱和洛伦兹拟合

Figure 4.9 The measured noise spectrum of the $200\mu\text{m}$ diameter device at different temperatures after surface oxidation, shown with Lorentzian fitting.

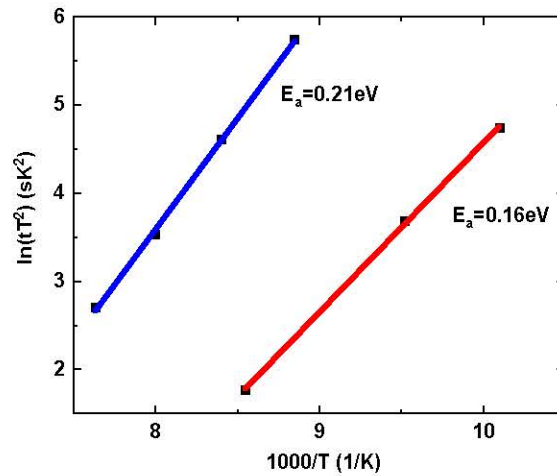


图 4.10 器件氧化后 $\ln(\tau_{oi} T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图，红色为 $500\mu\text{m}$ 器件，蓝色为 $200\mu\text{m}$ 器件

Figure 4.10 Arrhenius plot of the defects in $500\mu\text{m}$ diameter (red) and $200\mu\text{m}$ diameter (blue) APDs after surface oxidation.

表格 4.1 两个器件中的所有缺陷以及其它物理参数的总结

Table 4.1 Summary of all defects and other physical parameters in the two devices.

Device	Bias(V)	Temperature Range T(K)	Activation Energy Ea(eV)	Cross Section $\sigma_n(\text{cm}^2)$	Nature of defect
500 μm device	0.2	77~93	0.11	1.4×10^{-16}	Bulk
	0.15	93~117	0.16	3.9×10^{-14}	Surface
Oxidized 500 μm device	0.012	99~117	0.16	1.2×10^{-14}	
200 μm device	0.1	101~119	0.11	1.3×10^{-16}	Bulk
	0.05	119~137	0.21	1.1×10^{-14}	Surface
Oxidized 200 μm device	0.1	113~131	0.21	8.3×10^{-14}	

总的来说, Al 成分比例 30%材料的器件中一共发现了三个缺陷, 它们的活化能分别是 0.11eV, 0.16eV, 0.21eV。其中活化能为 0.11eV 的缺陷被认为是材料生长过程中引入的体缺陷, 而活化能为 0.16eV 和 0.21eV 这两个缺陷被认为是器件工艺制造是带来的器件表面缺陷。这些器件缺陷的表征有助于进一步优化和改进 AlInAsSb 材料的生长和工艺的制造, 也可能使该材料体系的雪崩探测器具有更高性能去应用的单光子探测领域。

4.2 Al 成分比例 40%材料器件的缺陷

4.2.1 器件的暗电流性能

对 Al 成分比例 40%材料的器件也同样选择直径 500 μm 和 200 μm 的两个器件进行测试分析。图 4.11 为这两个器件从 77K 到 300K 的暗电流数据, 其中 4.11(a) 是直径为 500 μm 器件的暗电流, 而 4.11(b)是直径为 200 μm 器件的暗电流。图 4.12 为-1V 下器件的暗电流与温度的 Arrhenius 图。由此可以拟合出该材料器件的活化能 $E_a = 0.25\text{eV}$ 。

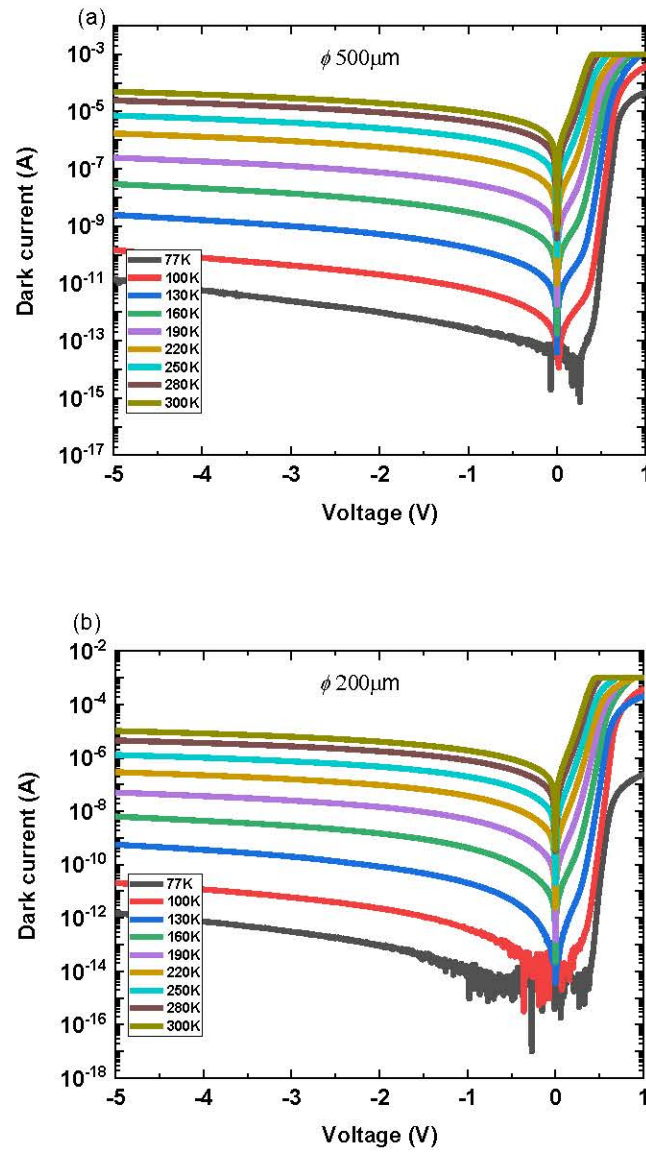


图 4.11 500 μm (a)和 200 μm (b)器件不同温度下的电流-电压特性

Figure 4.11 I-V curves of a 500 μm device (a) and 200 μm diameter device (b) as a function of temperature.

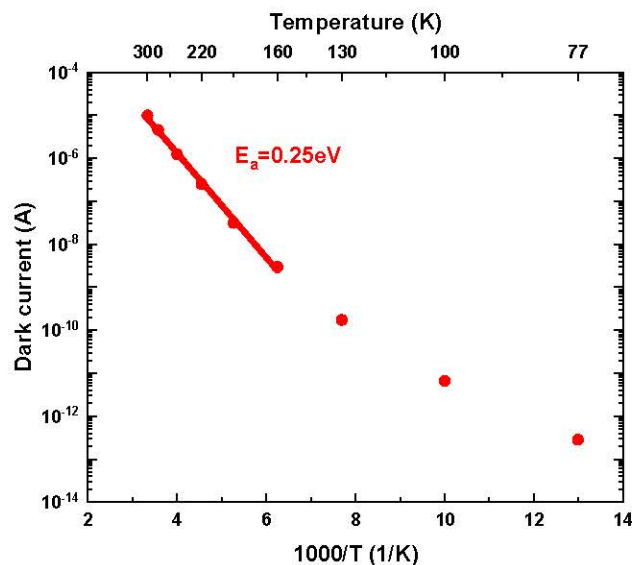


图 4.12 偏压-1V 下的暗电流与温度的 Arrhenius 图

Figure 4.12 Arrhenius plot of temperature-dependent dark current at -1V.

4.2.2 器件的低频噪声谱分析

测试完器件的暗电流之后,再用低频噪声测试系统对器件的低频噪声进行测量,以便分析它的缺陷情况。图 4.13 为直径 $200\mu\text{m}$ 的器件中产生-复合噪声存在明显洛伦兹峰的噪声谱数据,而在直径 $500\mu\text{m}$ 的器件中没有找到产生-复合噪声出现明显洛伦兹峰的噪声谱。通过洛伦兹拟合来拟合 $200\mu\text{m}$ 的器件不同温度下时间常数 τ_i ,画出 $\ln(\tau_{oi}T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图如下图 4.14 所示,利用线性拟合得到 $200\mu\text{m}$ 的器件中存在一个活化能为 0.71eV 的缺陷。表 4.2 总结了 Al 成分比例 40% 器件中的缺陷与其它一些物理参数的情况。

表格 4.2 两个器件中的缺陷以及其它物理参数的总结

Table 4.2 Summary of all defects and other physical parameters in the two devices.

Device	Bias(V)	Temperature Range T(K)	Activation Energy Ea(eV)	Cross Section $\sigma_n(\text{cm}^2)$
$500\mu\text{m}$ device	No defects were detected			
$200\mu\text{m}$ device	0.1	227~245	0.71	1.6×10^{-8}

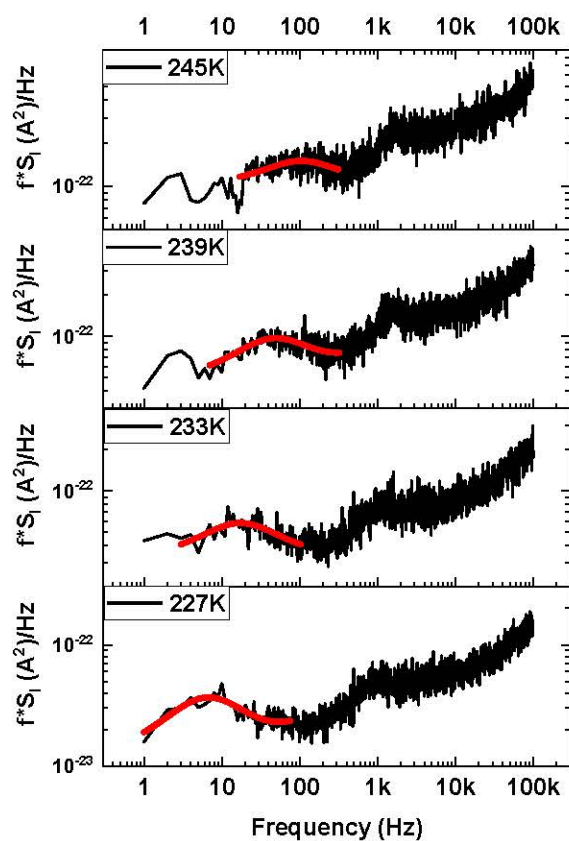


图 4.13 直径 $200\mu\text{m}$ 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合

Figure 4.13 The measured noise spectrum of a $200\mu\text{m}$ diameter device at different temperatures, shown with Lorentzian fitting.

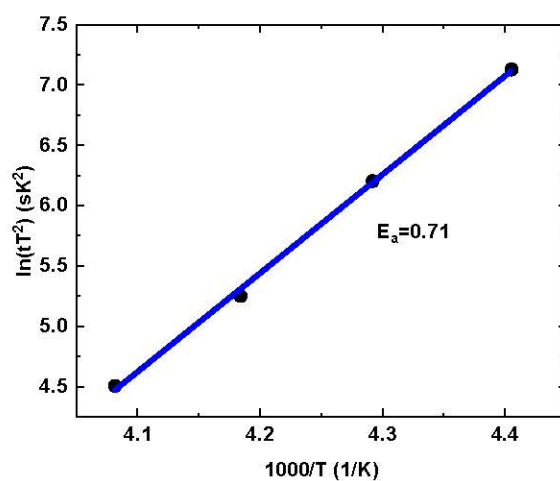


图 4.14 直径 $200\mu\text{m}$ 器件 $\ln(\tau_{oi} T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图

Figure 4.14 Arrhenius plot of the defects in $200\mu\text{m}$ diameter APDs.

4.3 Al 成分比例 50%材料器件的缺陷

4.3.1 器件的暗电流性能

对 Al 成分比例 50%材料的器件也是选择直径 $500\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m}$ 的两个器件进行测试分析。图 4.15 为这两个器件不同温度下的暗电流数据。图 4.16 为 -1V 偏压下器件的暗电流与温度的 Arrhenius 图。由此可以拟合出该 Al 成分比例材料器件的活化能 $E_a = 0.39\text{eV}$ 。

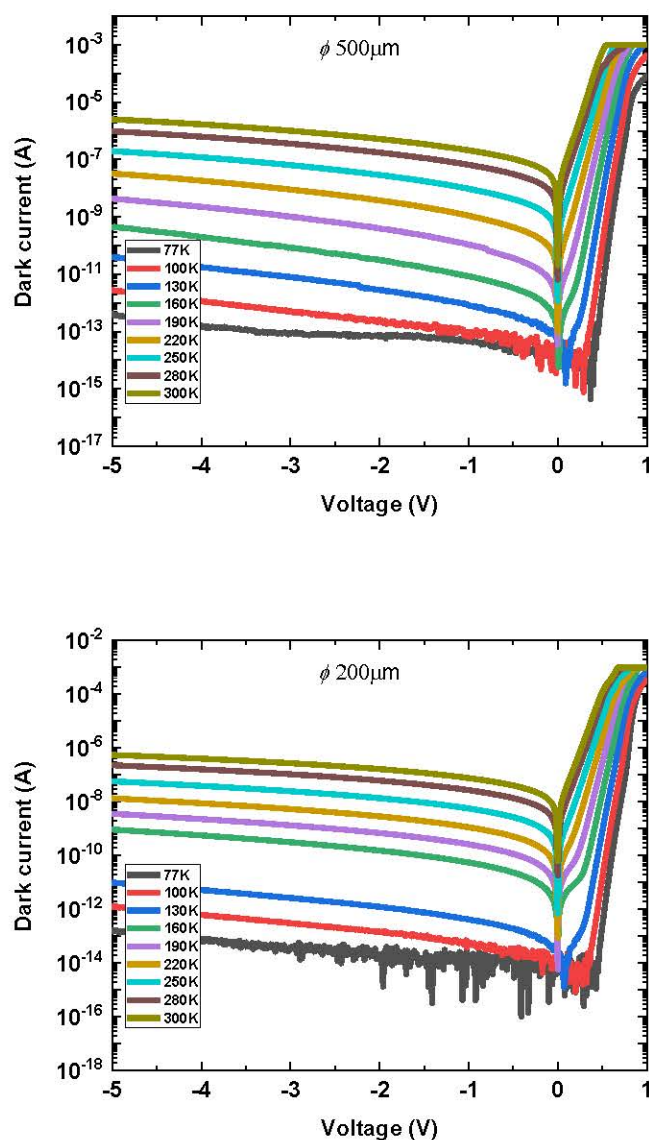


图 4.15 $500\mu\text{m}$ (a)和 $200\mu\text{m}$ (b)器件不同温度下的电流-电压特性

Figure 4.15 I-V curves of a $500\mu\text{m}$ device (a) and $200\mu\text{m}$ diameter device (b) as a function of temperature.

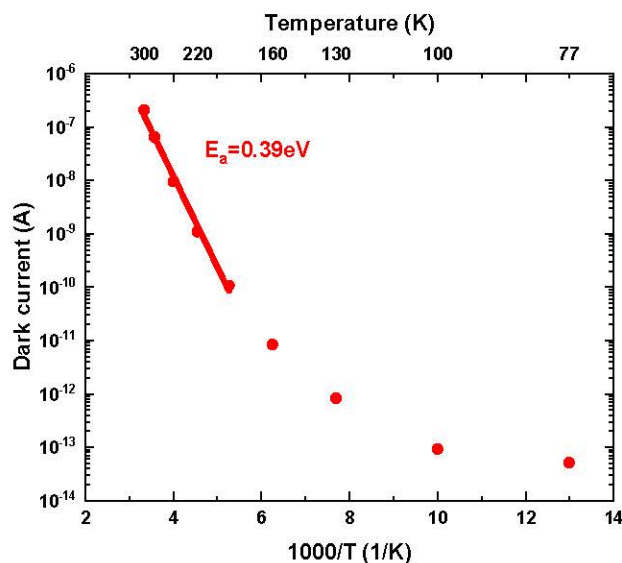


图 4.16 偏压-1V 下的暗电流与温度的 Arrhenius 图

Figure 4.16 Arrhenius plot of temperature-dependent dark current at -1V.

4.3.2 器件的低频噪声谱分析

分析完暗电流数据之后再用低频噪声测试系统对器件的低频噪声进行测量, 来研究分析它的缺陷情况。下图 4.17 为直径 $500\mu\text{m}$ 的器件中产生-复合噪声存在明显洛伦兹峰的噪声谱数据。图 4.18 为此器件中 $\ln(\tau_{oi}T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图。通过线性拟合得到 $500\mu\text{m}$ 的器件中存在一个活化能为 0.21eV 的缺陷。图 4.19 为直径 $200\mu\text{m}$ 的器件中产生-复合噪声存在明显洛伦兹峰的噪声谱数据。图 4.20 为此器件中 $\ln(\tau_{oi}T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图。通过线性拟合得到 $200\mu\text{m}$ 的器件中存在一个活化能为 0.13eV 的缺陷。表 4.3 总结了 Al 成分比例 50% 器件中的缺陷与其它一些物理参数的情况。

表格 4.3 两个器件中的缺陷以及其它物理参数的总结

Table 4.3 Summary of all defects and other physical parameters in the two devices.

Device	Bias(V)	Temperature Range T(K)	Activation Energy $E_a(\text{eV})$	Cross Section $\sigma_n(\text{cm}^2)$
$500\mu\text{m}$ device	0.6	119~137	0.21	9.0×10^{-15}
$200\mu\text{m}$ device	0.6	113~131	0.13	6.3×10^{-17}

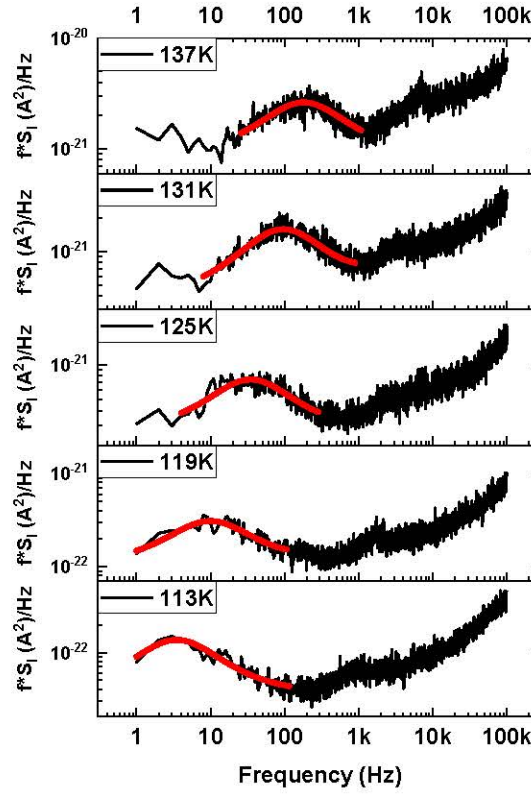


图 4.17 直径 $500\mu\text{m}$ 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合

Figure 4.17 The measured noise spectrum of a $500\mu\text{m}$ diameter device at different temperatures, shown with Lorentzian fitting.

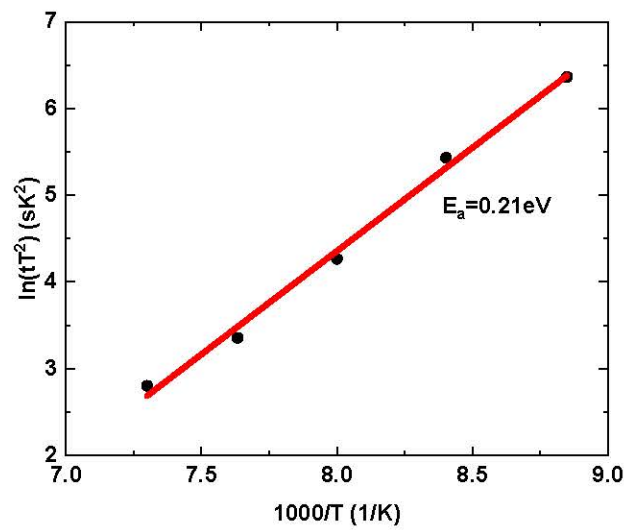


图 4.18 直径 $500\mu\text{m}$ 器件 $\ln(\tau_{oi}T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图

Figure 4.18 Arrhenius plot of the defects in $500\mu\text{m}$ diameter APDs.

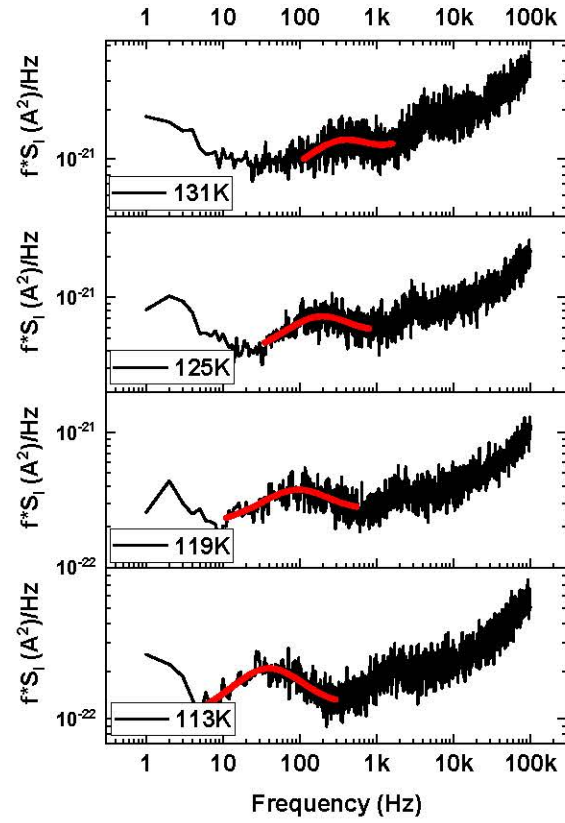


图 4.19 直径 $200\mu\text{m}$ 器件不同温度下噪声谱和洛伦兹拟合

Figure 4.19 The measured noise spectrum of a $200\mu\text{m}$ diameter device at different temperatures, shown with Lorentzian fitting.

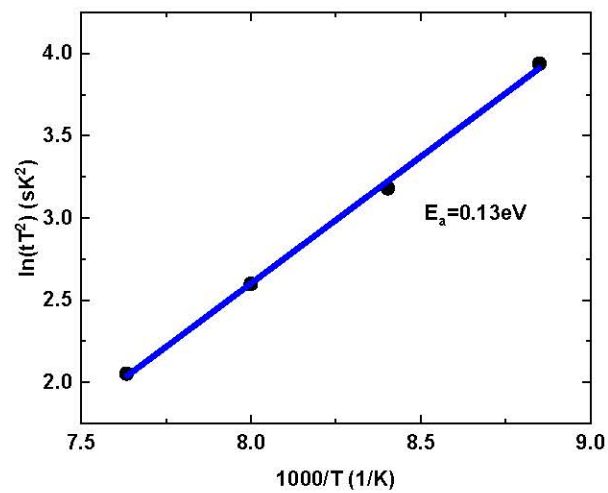


图 4.20 直径 $200\mu\text{m}$ 器件 $\ln(\tau_{oi}T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图

Figure 4.20 Arrhenius plot of the defects in $200\mu\text{m}$ diameter APDs.

4.4 本章小结

本章中主要介绍了 Al 成分比例 30%，40%和 50%材料器件的低频噪声测试结果，通过拟合器件低频噪声谱中出现的洛伦兹峰计算出每个产生-复合中心的时间常数 τ_{oi} ，并通过绘制 $\ln(\tau_{oi}T^2)$ 关于 $1000/T$ 的 Arrhenius 图拟合出缺陷的活化能以及俘获截面。Al 成分比例 30%的器件中找到三个缺陷能级，活化能分别为 0.11eV，0.16eV，0.21eV，通过使得器件表面氧化之后再次测试的方法分析出其中一个缺陷属于体缺陷(0.11eV)，而另外两个缺陷都是器件表面缺陷(0.16eV，0.21eV)。Al 成分比例 40%的器件中测得一个缺陷，其活化能为 0.71eV，而 Al 成分比例 50%的器件中测得了两个缺陷活化能分别为 0.13eV 和 0.21eV。这些测试结果可对后期此材料器件的生长与工艺提供指导和帮助。

第5章 总结与展望

本论文主要研究了如何测量和分析 AlInAsSb 雪崩探测器的各类噪声性能。器件的生长采用了数字合金的生长方式,这种生长方式比随机情况生长得到的材料具有更低的过剩噪声性能,基于对器件噪声的测试与分析可以为后续研究此材料生长的优化提供指导和帮助。在测试器件噪声之前,先通过测试一些雪崩探测器的基本性能指标来判断这批器件的生长工艺是否成功,同时根据不同器件的测试结果挑选出可以进行噪声测试的器件。一个雪崩探测器的基本性能指标有截止波长,暗电流,量子效率,增益。其中,截止波长是光电探测器能探测的最大波长,暗电流决定了光电探测器对小信号的分辨能力,量子效率是指探测器将光转化为电流的能力。

论文的第二章详细介绍了雪崩探测器性能指标以及它们的测试系统如何搭建,其中包括量子效率测试系统以及过剩噪声测试系统。也介绍了低频噪声测试系统的基本原理和如何进行测试数据的分析。

第三章则展示了这批器件暗电流,量子效率,增益的测试结果,并结合测试数据详细分析了各个器件的实际性能。通过暗电流的测试分析器件暗电流的组成机制,由于器件常温下暗电流与器件直径成正比,所以其暗电流主要是表面漏电流主导。通过量子效率的测试分析器件的响应性能以及截止波长,通过光电流的测试计算器件可以达到的增益。这些测试结果与参考文献中的结果也基本相吻合。完成这一系列测试分析之后再对器件进行过剩噪声与低频噪声的测试,过剩噪声是雪崩探测器特有的噪声,它是由器件增益引起的,所以选择了这些器件中增益比较明显的器件进行测试,测试得到 Al 成分比例 80%和 70%的器件 k 值大概在 0.05 左右,测试结果验证这种生长方式的 AlInAsSb 材料具有很低的过剩噪声因子,这也与之前报道过的结果吻合。

低频噪声的测试主要是为了分析器件中由生长和工艺带入的缺陷。而利用与器件氧化后再次测试的结果作对比的方法分析出器件中存在的缺陷本质是表面缺陷还是体缺陷。Al 成分比例 30%的器件中找到三个缺陷能级,其中一个缺陷属于体缺陷(0.11eV),而另外两个缺陷都是器件表面缺陷(0.16eV, 0.21eV)。Al 成

分比例 40%的器件中测得一个缺陷，其活化能为 0.71eV，而 Al 成分比例 50%的器件中测得了两个缺陷活化能分别为 0.13eV 和 0.21eV。这些测试结果可对后期此材料器件的生长与工艺提供指导和帮助。

整个论文的研究工作表明 AlInAsSb 数字合金材料是一种很有发展前途的新一代红外雪崩探测器，而文中介绍的雪崩探测器各类性能指标测试系统的成功搭建也是研究这类器件所必不可少。后期需要进一步开展研究的工作包括：

- (1) 搭建一套利用锁相放大器相敏技术的过剩噪声测试系统，以便测量光电流远小于暗电流的器件过剩噪声情况。
- (2) 根据低频噪声的测试结果，发现 SU8 钝化并不能完全阻止器件表面氧化，这表明了未来需要开发新的钝化方法。此外，为了更好地理解氧化发生的机理，可以让刚经过刻蚀的器件直接暴露在氧气流中，诱导表面氧化。
- (3) 通过本文中的低频噪声测试结果以及缺陷的分析对器件的工艺和材料的生长进行改善，在制作一批新的器件测试其性能是否有所提高。

参考文献

- [1] BELING A, CAMPBELL J C. Advances in photodetectors and optical receivers [J]. Optical Fiber Telecommunications Volume VIA: Components and Subsystems, 2013, 99.
- [2] CAMPBELL J C, DEMIGUEL S, MA F, et al. Recent advances in avalanche photodiodes [J]. IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 2004, 10(4): 777-87.
- [3] BERTONE N, CLARK W. Avalanche photodiode arrays provide versatility in ultrasensitive applications [J]. Laser Focus World, 2007, 43(9):
- [4] MITRA P, BECK J D, SKOKAN M R, et al. Adaptive focal plane array (AFPA) technologies for integrated infrared microsystems, F, 2006 [C]. International Society for Optics and Photonics.
- [5] TOSIA, CALANDRI N, SANZARO M, et al. Low-noise, low-jitter, high detection efficiency InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 2014, 20(6): 192-7.
- [6] JIANG X, ITZLER M, O'DONNELL K, et al. InP-based single-photon detectors and geiger-mode APD arrays for quantum communications applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 21(3): 5-16.
- [7] OTHMAN MA, TAIB S N, HUSAIN M N, et al. Reviews on avalanche photodiode for optical communication technology [J]. APRN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2014, 9(1): 2.
- [8] CAPASSO F, TSANG W T, HUTCHINSON A L, et al. Enhancement of electron impact ionization in a superlattice: A new avalanche photodiode with a large ionization rate ratio [J]. Appl Phys Lett, 1982, 40(1): 38-40.
- [9] TEICH M, MATSUO K, SALEH B. Excess noise factors for conventional and superlattice avalanche photodiodes and photomultiplier tubes [J]. IEEE J Quantum Electron, 1986, 22(8): 1184-93.
- [10] XIE J. Characterisation of low noise InGaAs/AlAsSb avalanche photodiodes [D]; University of Sheffield, 2013.
- [11] WOODSON M E, REN M, MADDOX S J, et al. Low-noise AlInAsSb avalanche photodiode [J]. Appl Phys Lett, 2016, 108(8): 081102.

- [12] MCINTYRE R J. Multiplication noise in uniform avalanche diodes [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1966, 1): 164-8.
- [13] EMMONS R B. Avalanche - photodiode frequency response [J]. J Appl Phys, 1967, 38(9): 3705-14.
- [14] LI K F, PLIMMER S A, DAVID J P R, et al. Low avalanche noise characteristics in thin InP $p^{+}/i/n^{+}$ diodes with electron initiated multiplication [J]. IEEE Photonics Technol Lett, 1999, 11(3): 364-6.
- [15] YUAN P, HANSING C C, ANSELM K A, et al. Impact ionization characteristics of III-V semiconductors for a wide range of multiplication region thicknesses [J]. IEEE J Quantum Electron, 2000, 36(2): 198-204.
- [16] LI K F, ONG D S, DAVID J P R, et al. Avalanche multiplication noise characteristics in thin GaAs $p^{+}/i/n^{+}$ diodes [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45(10): 2102-7.
- [17] HU C, ANSELM K A, STREETMAN B G, et al. Noise characteristics of thin multiplication region GaAs avalanche photodiodes [J]. Appl Phys Lett, 1996, 69(24): 3734-6.
- [18] ONG D S, LI K F, REES G J, et al. A Monte Carlo investigation of multiplication noise in thin $p^{+}/i/n^{+}$ /GaAs avalanche photodiodes [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1998, 45(8): 1804-10.
- [19] LENOX C, YUAN P, NIE H, et al. Thin multiplication region InAlAs homojunction avalanche photodiodes [J]. Appl Phys Lett, 1998, 73(6): 783-4.
- [20] SALEH MA, HAYAT M M, SOTIRELIS P P, et al. Impact-ionization and noise characteristics of thin III-V avalanche photodiodes [J]. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(12): 2722-31.
- [21] NG B K, DAVID J P R, TOZER R C, et al. Nonlocal effects in thin 4H-SiC UV avalanche photodiodes [J]. IEEE Trans Electron Devices, 2003, 50(8): 1724-32.
- [22] ONG D S, LI K F, REES G J, et al. A simple model to determine multiplication and noise in avalanche photodiodes [J]. J Appl Phys, 1998, 83(6): 3426-8.
- [23] PAUCHARD A R, BESSE P A, POPOVIC R S. Dead space effect on the wavelength dependence of gain and noise in avalanche photodiodes [J]. IEEE Trans Electron Devices, 2000, 47(9): 1685-93.
- [24] SALEH B E A, HAYAT M M, TEICH M C. Effect of dead space on the excess noise factor and time response of avalanche photodiodes [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1990, 37(9): 1976-

84.

- [25] NG J S, TAN C H, REES G J, et al. Effects of dead space on breakdown probability in Geiger mode avalanche photodiode [J]. *Journal of Modern Optics*, 2007, 54(2-3): 353-60.
- [26] SALEH M A, HAYAT M M, SALEH B E A, et al. Dead-space-based theory correctly predicts excess noise factor for thin GaAs and AlGaAs avalanche photodiodes [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2000, 47(3): 625-33.
- [27] YUAN P, WANG S, SUN X, et al. Avalanche photodiodes with an impact-ionization-engineered multiplication region [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2000, 12(10): 1370-2.
- [28] WANG S, HURST J, MA F, et al. Low-noise impact-ionization-engineered avalanche photodiodes grown on InP substrates [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2002, 14(12): 1722-4.
- [29] MASINI C, CALACE L, ASSANTO G, et al. High-performance pin Ge on Si photodetectors for the near infrared: from model to demonstration [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2001, 48(6): 1092-6.
- [30] BACHMANN K, SHAY J. An InGaAs detector for the $1.0 - 1.7 - \mu\text{m}$ wavelength range [J]. *Appl Phys Lett*, 1978, 32(7): 446-8.
- [31] WASHINGTON M, NAHORY R, POLLACK M, et al. High - efficiency $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ photodetectors with selective wavelength response between 0.9 and $1.7 \mu\text{m}$ [J]. *Appl Phys Lett*, 1978, 33(10): 854-6.
- [32] MARSHALL A R, KER P J, KRYSA A, et al. High speed InAs electron avalanche photodiodes overcome the conventional gain-bandwidth product limit [J]. *Opt Express*, 2011, 19(23): 23341-9.
- [33] SUN W, LU Z, ZHENG X, et al. High-gain InAs avalanche photodiodes [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, 49(2): 154-61.
- [34] MARSHALL A R, DAVID J P, TAN C H. Impact ionization in InAs electron avalanche photodiodes [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2010, 57(10): 2631-8.
- [35] MARSHALL A R, TAN C H, STEER M J, et al. Extremely low excess noise in InAs electron avalanche photodiodes [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2009, 21(13): 866-8.
- [36] YI X, XIE S, LIANG B, et al. Extremely low excess noise and high sensitivity AlAs 0.56 Sb 0.44 avalanche photodiodes [J]. *Nat Photonics*, 2019, 13(10): 683-6.
- [37] YI X, XIE S, LIANG B, et al. Demonstration of large ionization coefficient ratio in AlAs 0.56 Sb 0.44 lattice matched to InP [J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 1-6.

- [38] XIE J, XIE S, TOZER R, et al. Excess noise characteristics of thin AlAsSb APDs [J]. IEEE Trans Electron Devices, 2012, 59(5): 1475-9.
- [39] XIE S, ZHOU X, ZHANG S, et al. InGaAs/AlGaAsSb avalanche photodiode with high gain-bandwidth product [J]. Opt Express, 2016, 24(21): 24242-7.
- [40] KINCH M, BECK J, WAN C-F, et al. HgCdTe electron avalanche photodiodes [J]. Journal of electronic materials, 2004, 33(6): 630-9.
- [41] BECK J D, WAN C-F, KINCH M A, et al. MWIR HgCdTe avalanche photodiodes; proceedings of the Materials for Infrared Detectors, F, 2001 [C]. International Society for Optics and Photonics.
- [42] CHEN A B, SHER A. CPA band calculation for (Hg, Cd) Te [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1982, 21(1): 138-41.
- [43] BRICE J, CAPPER P. Properties of mercury cadmium telluride [M]. SI, 1987.
- [44] KELDYSH L. Kinetic theory of impact ionization in semiconductors [J]. Sov Phys JETP, 1960, 37(10): 509-18.
- [45] ANDERSON C, CROWELL C. Threshold energies for electron-hole pair production by impact ionization in semiconductors [J]. Phys Rev B: Condens Matter, 1972, 5(6): 2267.
- [46] BANK S R, CAMPBELL J C, MADDUX S J, et al. Avalanche photodiodes based on the AlInAsSb materials system [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 24(2): 1-7.
- [47] MADDUX S J, MARCH S D, BANK S R. Broadly tunable AlInAsSb digital alloys grown on GaSb [J]. Crystal Growth & Design, 2016, 16(7): 3582-6.
- [48] YANG Q K, FUCHS F, SCHMITZ J, et al. Investigation of trap-assisted tunneling current in InAs/(GaIn) Sb superlattice long-wavelength photodiodes [J]. Appl Phys Lett, 2002, 81(25): 4757-9.
- [49] MAF. Monte Carlo simulation of gain, noise, and speed of low-noise and high-speed avalanche photodiodes [M]. 2003.
- [50] CHEN Y, CHAI X, XIE Z, et al. High-Speed Mid-Infrared Interband Cascade Photodetector Based on InAs/GaAsSb Type-II Superlattice [J]. J Lightwave Technol, 2019.
- [51] VENGHAUS H, GROTE N. Fibre optic communication: key devices [M]. Springer, 2017.
- [52] 庄奕琪, 孙青. 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术 [M]. 北京: 国防工业出版社. 1993.

- [53] HAARTMAN M, ÖSTLING M. Low-frequency noise in advanced MOS devices [M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [54] JEVTIC M. Low-frequency noise diagnostic of microelectronic devices, F, 1995 [C]. IEEE.
- [55] WONG H. Low-frequency noise study in electron devices: review and update [J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(4): 585-99.
- [56] 庄奕琪, 孙青. 电子器件可靠性的噪声表征方法 [D], 1996.
- [57] FLEETWOOD D M. $1/f$ noise and defects in microelectronic materials and devices [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2015, 62(4): 1462-86.
- [58] BEYNE S, CROES K, DE WOLF I, et al. $1/f$ noise measurements for faster evaluation of electromigration in advanced microelectronics interconnections [J]. J Appl Phys, 2016, 119(18): 184302.
- [59] HOOGE F N. $1/f$ noise sources [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1994, 41(11): 1926-35.
- [60] HOOGE F N. $1/f$ noise [J]. Physica B+ C, 1976, 83(1): 14-23.
- [61] KESHNER M S. $1/f$ noise [J]. Proc IEEE, 1982, 70(3): 212-8.
- [62] MCWHORTER A L. $1/f$ noise and related surface effects in germanium [J]. 1955,
- [63] YAU L D, SAH C-T. Theory and experiments of low-frequency generation-recombination noise in MOS transistors [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1969, 16(2): 170-7.
- [64] RUMYANTSEV S L, PALA N, SHUR M S, et al. Generation-recombination noise in GaN/AlGaN heterostructure field effect transistors [J]. IEEE Trans Electron Devices, 2001, 48(3): 530-4.
- [65] VAN RHEENEN A D, BOSMAN G, VAN VLIET C M. Decomposition of generation-recombination noise spectra in separate Lorentzians [J]. Solid State Electron, 1985, 28(5): 457-63.
- [66] HOOGE F N, REN L. On generation-recombination noise [J]. Physica B, 1993, 191(3-4): 220-6.
- [67] KLAASSEN F M, PRINS J. Thermal noise of MOS transistors [J]. Philips Res Rep, 1967, 22(505-14).
- [68] DE JONG M J M, BEENAKKER C W J. Semiclassical theory of shot noise in mesoscopic conductors [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1996, 230(1-2): 219-48.
- [69] JONES B K. Low-frequency noise spectroscopy [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1994, 41(11): 2188-97.

- [70] CHEN W, CHEN B, YUAN J, et al. Bulk and interfacial deep levels observed in $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{GaAs}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ multiple quantum well photodiode [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(5): 052107.
- [71] CHEN W, CHEN B, HOLMES A, et al. Investigation of traps in strained-well $\text{InGaAs}/\text{GaAsSb}$ quantum well photodiodes [J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(18): 1439-40.
- [72] CHEN W. Defects in emerging III-V materials for electronic and optoelectronic applications [M]. University of Notre Dame, 2014.
- [73] 殷雪松. 红外探测器低频噪声测量及应用研究 [D]; 西安: 西安电子科技大学硕士学位论文, 2011.
- [74] HUANG J, WAN Y, JUNG D, et al. Defect characterization of $\text{InAs}/\text{InGaAs}$ quantum dot pin photodetector grown on $\text{GaAs-on-V-grooved-Si}$ substrate [J]. *ACS Photonics*, 2019.
- [75] ZHU L, HUANG J, XIE Z, et al. Low-Frequency Noise Spectroscopy Characterization of HgCdTe Infrared Detectors [J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 2020, 67(2): 547-51.
- [76] REN M, MADDOX S, WOODSON M, et al. Low excess noise $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($x: 0.3 \sim 0.7$) avalanche photodiodes; proceedings of the 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), F, 2016 [C]. IEEE.
- [77] REN M, MADDOX S, CHAN Y, et al. Low excess noise AlInAsSb staircase avalanche photodiode; proceedings of the 2015 73rd Annual Device Research Conference (DRC), F, 2015 [C]. IEEE.
- [78] REN M, MADDOX S, CHEN Y, et al. $\text{AlInAsSb}/\text{GaSb}$ staircase avalanche photodiode [J]. *Appl Phys Lett*, 2016, 108(8): 081101.
- [79] ZHANG N, JONES A H, DENG Z, et al. Defect characterization of AlInAsSb digital alloy avalanche photodetectors with low frequency noise spectroscopy [J]. *Opt Express*, 2020, 28(8): 11682-91.
- [80] LYU Y, HAN X, SUN Y, et al. Digitally grown AlInAsSb for high gain separate absorption, grading, charge, and multiplication avalanche photodiodes [J]. *J Cryst Growth*, 2018, 482(70-4).
- [81] YUAN Y, ZHENG J, ROCKWELL A K, et al. AlInAsSb impact ionization coefficients [J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2019, 31(4): 315-8.
- [82] REN M, MADDOX S J, WOODSON M E, et al. Characteristics of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($x: 0.3 \sim 0.7$) Avalanche Photodiodes [J]. *J Lightwave Technol*, 2017, 35(12): 2380-4.

- [83] SCARCELLA C, BOSO G, RUGGERI A, et al. InGaAs/InP single-photon detector gated at 1.3 GHz with 1.5% afterpulsing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 21(3): 17-22.
- [84] TOSI A, ACERBI F, ANTI M, et al. InGaAs/InP single-photon avalanche diode with reduced afterpulsing and sharp timing response with 30 ps tail [J]. IEEE J Quantum Electron, 2012, 48(9): 1227-32.
- [85] HU C. Advanced Devices and Circuits for Single Photon Avalanche Diodes [D]; University of Virginia, 2009.
- [86] TOSI A, MORA A D, ZAPPA F, et al. Single-photon avalanche diodes for the near-infrared range: detector and circuit issues [J]. Journal of Modern Optics, 2009, 56(2-3): 299-308.

致 谢

本论文得以顺利撰写首先要感谢我的导师陈伯乐老师，正是由于他的指导和督促使得我顺利完成硕士学业。陈老师具有高尚的道德品质，渊博的学识与广阔的视野，他一直严于律己，刻苦钻研，为我们提供很好的科研环境与学习氛围。从研究课题的选取到最后论文撰写的完成，陈老师一直都给予我很大的建议和帮助，从实验设备的搭建到测试数据的分析，陈老师都能给出专业性的指导。每次实验的失败或者工作的错误，陈老师都会悉心安慰和鼓励。可以说没有陈老师对我的教导，我就无法顺利毕业。所以在此毕业之际，谨向我的导师陈伯乐致以崇高的敬意与由衷的感谢。

我还要感谢我们课题组的博士后邓卓，他待人亲切，工作认真。虽然他的研究方向与我不尽相同，但是他还是会经常向我传授一些科研经验，也感谢他孜孜不倦的帮我修改学术论文，

同时我也要感谢课题组的其他同学，陈垚江师兄和陈伟师兄在我刚接触光电器件科研领域时解答了我很多的疑惑。在与黄建和谢治阳同学的相互学习探讨中，我获益匪浅。感谢我的师弟朱立祁，谢宗恒，周之期，是他们不辞辛苦的和我一起熬夜做实验。

最后我想感谢我的父母和我的女朋友，你们为我提供了经济上的支持和生活上的关怀照顾，也永远是我坚强的后盾与温暖的港湾。

2020 年 6 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

1994 年 09 月 29 日出生于浙江嘉兴。

2013 年 09 月——2017 年 06 月, 在山西大学大学物理电子工程学院获得学士学位。

2017 年 09 月——2020 年 06 月, 在中国科学院上海微系统与信息技术研究所攻读硕士学位。

获奖情况: 无

工作经历: 无

已发表(或正式接受)的学术论文:

期刊论文

J1. ZHANG N, JONES A H, DENG Z, et al. Defect characterization of AlInAsSb digital alloy avalanche photodetectors with low frequency noise spectroscopy [J]. Opt Express, 2020, 28(8): 11682-91.

J2. CHEN B, WAN Y, XIE Z, et al. Low dark current high gain InAs quantum dot avalanche photodetectors monolithically grown on Si [J]. ACS Photonics, 2020, 7(2): 528-533.

J3. CHEN Y, CHAI X, XIE Z, et al. High-Speed Mid-Infrared Interband Cascade Photodetector Based on InAs/GaAsSb Type-II Superlattice [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(4): 939-945.

J4. XIE Z, CHEN Y, ZHANG N, et al. InGaAsP/InP Uni-Traveling-Carrier Photodiode at 1064-nm Wavelength [J]. IEEE Photonics Technol Lett, 2019, 31(16): 1331-4.

会议论文

C1. CHEN Y, CHAI X, XIE Z, et al. Two-Stage Interband Cascade Infrared Photodetector based on InAs/GaSb Type-II Superlattice for High Speed Mid-Wave Infrared Applications, F, 2019 [C]. Optical Society of America.

参加的研究项目及获奖情况: 无