

密级:_____



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

低功耗高速光电探测器阵列设计及应用

作者姓名: 姚言

指导教师: 任天令 教授

清华大学 微电子学研究所

学位类别: 理学硕士

学科专业: 凝聚态物理

研究所: 国家纳米科学中心

2015 年 5 月



Design and Application on a Low-power and High Speed
Photodetector Array

By
Yao Yan

A Dissertation/Thesis Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Condensed Matter Physics

National Center for Nanoscience and Technology

May, 2015

摘 要

光电探测器是一种将光信号转换为便于测量的电信号的功能器件,主要工作于可见光和近红外波段,可用于工业自动化控制、射线探测和测量、光度计量等,在军事和国民经济的众多领域已经得到广泛的认可和应用。本文提出了一种新型的光电探测器线性阵列结构,可以应用于降水监测。通过将光电探测器探头安装于气象飞机飞入云层直接对大气中的降水粒子进行测量,记录云层中降水粒子的分布密度,颗粒直径等详细参数,以此作为参考来预测降水的大小。降水监测是气象预报的重要内容,此预测方法准确、直接、高效,对于指导工农业生产,人们的日常出行,尤其是对极端暴雨灾害的预防,保障人们的生命财产安全具有现实的指导意义。

本文主要围绕光电探测器阵列的设计和展开研究。在总结分析了国内外用于降水监测的光电探测器探头的基础上,提出了一种新型的简便、实用、高效的光电探测器阵列结构。先是对双线阵结构、防串扰沟槽、增透膜等进行了设计,在此基础上完成了芯片的流片、封装,最后用水滴代替降水粒子,完成了对水滴直径和间距的模拟测试并对实验结果进行了分析和讨论。论文的主要研究内容包括:

1、提出了光电探测器的阵列结构。光电探测器芯片由 128 个 PIN 光电二极管组成,分为 2 排,每排 64 个,呈线性排列。所有光电二极管制作于一片本征外延片上,单个光电二极管大小为 $80\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$,为 PIN 型结构。顶部 P 区作为阳极为 P 型重掺杂,各二极管阳极互不相连,中间的 I 层很厚,可以保证光的充分吸收,二极管的底部为 N 型重掺杂,充当所有光电二极管的共同阴极。隔离沟槽设计可以有效避免光串扰和电串扰,增透膜设计可以减少对光的反射,提高透射率。

2、对设计好的芯片进行了流片。通过氧化、光刻、刻蚀、离子注入等半导体工艺,完成了对芯片的微加工制作。再将芯片与设计的 PCB 板封装,完成了整个光电探测器的制作。

3、对器件进行了模拟雨滴测试。搭建了一个简易的模拟测试系统,用水滴代替降水粒子,对单个水滴的直径和两滴水间的间距进行了测量,结果显示器件在精确度方面完全满足雨滴测试的要求。

关键词: PIN 光电二极管; 光电探测器线性阵列; 降水监测

ABSTRACT

Photodetector is a kind of device which can easily convert optical signal to electrical signal. It mainly detects electromagnetic wave between the visible and near-infrared wave. Nowadays, the photodetector which can be used in the industrial automation control, radiation detection and photometric measurement has gained wide acceptance and application in the military and national economy fields. In this thesis, we present a novel photodetector with double linear arrays for rainfall prediction. The photodetector installed on the weather aircraft will directly measure the distribution density and diameter of the cloud precipitation particles. The data can be used to predict the amount of rainfall. Rainfall prediction is the important part of weather forecast. This measurement is accuracy, immediate and efficient. It has the guiding significance for industrial and agricultural production, people's daily lives, the extreme rainstorm disaster prevention and the guarantee of people's life and property.

In this thesis, we mainly focus on the design and application of the photodetector. Based on the domestic and overseas preliminary study of photodetector for rainfall prediction, a new-type photodetector with double linear arrays structure is proposed. Some critical structures including double linear arrays, trenches and anti-reflective coating are taken into account. After that, the chip is fabricated and packaged. At last, instead of cloud particles, a water drop is regard as the experimental subject and its diameter and space distance are measured by the photodetector. The results are analyzed and discussed. The detailed work of this dissertation is as following:

1. A linear array design of the photodetector is proposed. The chip has two rows PIN photodiodes and each row has 64 photodiodes. All the photodiodes are fabricated on an intrinsic epitaxial wafer and the single photodiode has a size of $80\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$. In the PIN structure, the p-type region acts as anode and each anode of photodiode is independent. The intrinsic layer is very thick and can absorb the light adequately. The n-type region is heavily doped and all photodiodes share a cathode. The trench can

validly eliminate optical crosstalk and electric crosstalk. Anti-reflective coating can reduce the reflection and improve the transmittance.

2. The chip is fabricated with semiconductor processing including oxidation, photoetching, etching, ion implantation, etc. After that, the chip is packaged on a PCB and the photodetector is completed.

3. The cloud particle test is also performed on a simple simulation test system. Here, cloud particles are replaced by water drops. The diameter of one water drop and the space distance between two water drops are measured. The result is precise and the device can fulfill the demand of rainfall prediction.

Keywords: PIN photodiode; photodetector; double linear arrays; rainfall prediction

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 光电探测器	1
1.1.2 降水监测的重要性	2
1.1.3 云降水物理学的基本知识	2
1.1.4 降水监测方法	3
1.2 研究进程和国内外研究进展	4
1.2.1 碰撞印痕云降水探测	4
1.2.2 光学阵列探头（OAP）云降水探测	4
1.2.3 光电探测芯片云降水探测	5
1.3 本论文的研究内容	7
第二章 PIN 型光电探测器基本原理和性能参数	9
2.1 PIN 型光电探测器基本原理	9
2.1.1 半导体的光电效应	9
2.1.2 半导体的光吸收	9
2.1.3 PIN 光电探测器工作原理	10
2.2 光电探测器的性能参数	12
2.2.1 光电流和暗电流	12
2.2.2 响应度	12
2.2.3 响应速度	13
2.2.4 功耗	13
2.3 本章小结	13
第三章 降水监测的实现方法及光电探测器芯片设计	15

3.1 测量降水粒子的基本原理	15
3.1.1 降水粒子检测的方案制定	15
3.1.2 降水粒子直径的测量方法	15
3.1.3 降水粒子间距的测量方法	16
3.2 光电探测芯片的结构设计	18
3.2.1 光电二极管的阵列结构设计	18
3.2.2 响应速度设计	21
3.2.3 增透膜的设计	22
3.2.4 防串扰隔离沟槽的设计	24
3.3 芯片和 PCB 板的版图设计	27
3.3.1 芯片的版图设计	27
3.3.2 PCB 板的版图设计	30
3.4 本章小结	32
第四章 光电探测芯片制备中的关键工艺	33
4.1 工艺流程设计	33
4.2 关键工艺研究	37
4.2.1 薄膜工艺	37
4.2.2 离子注入工艺	40
4.2.3 刻蚀工艺	41
4.3 本章小结	43
第五章 光电探测器件的封装设计	45
5.1 封装工艺	45
5.1.1 粘片	45
5.1.2 连线压焊	46
5.2 玻璃盖板的封装	47
5.3 PCB 封装板和 PCB 测试板的衔接	48
5.4 本章小结	49
第六章 光电探测器的测试	51
6.1 光电性能测试	51

6.1.1 光电流测试	51
6.1.2 暗电流测试	53
6.1.3 响应度测试	54
6.1.4 功耗测试	55
6.2 降水粒子的模拟测试	55
6.2.1 降水粒子直径的测量	55
6.2.2 降水粒子间距的测量	56
6.3 本章小结	58
第七章 总结与展望	61
7.1 工作总结	61
7.2 工作展望	62
参考文献	63
作者简历、攻读学位期间发表的学术论文及研究成果	67
附录 A Silvaco 离子注入工艺仿真程序	69
致谢	71

第一章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 光电探测器

光电探测器是一种将光信号转换为便于测量的电信号的功能器件，在工业自动化控制、射线探测和测量、光度计量等领域具有重要的应用^[1]。光电探测器种类繁多，包括光电管、光电二极管、光敏电阻、光电倍增管、热释电探测器等。原则上讲，只要在光的照射下，材料的物理特性发生改变，即可用来制作光电探测器。目前最常用的光电探测器是光子探测器，光子探测器根据工作原理不同分为光电探测器和光伏光电探测器^[2]。光电导探测器是利用光电导效应制成，当光照射到半导体材料的表面，如果光子能量比半导体材料的禁带宽度大，价带电子就会被激发而发生跃迁，形成电子-空穴对，当将电压加在半导体材料两端时，受电场的影响，电子-空穴对会参与导电，自由载流子浓度会增加而导致材料的电阻变小，从而将光信号转化为电信号。光伏光电探测器是利用半导体材料的光生伏特效应制成的，内部是一个 PN 结结构。在平衡状态下，在 PN 结的界面处，载流子通过扩散运动形成电场，方向从 N 指向 P，形成势垒结构。当一束光照射到 PN 结表面时，价带电子会被激发而发生跃迁，在 PN 结区产生光生载流子。光生电子和空穴会在结电场的作用下分别被拉向 N 型区和 P 型区，形成光生电流，方向从 N 指向 P，光生电子在 N 型区积累，光生空穴在 P 型区积累，从而在 PN 结两端形成光生电压，方向从 P 指向 N，通过这种光生伏特效应，光电探测器将光信号转换为电信号。

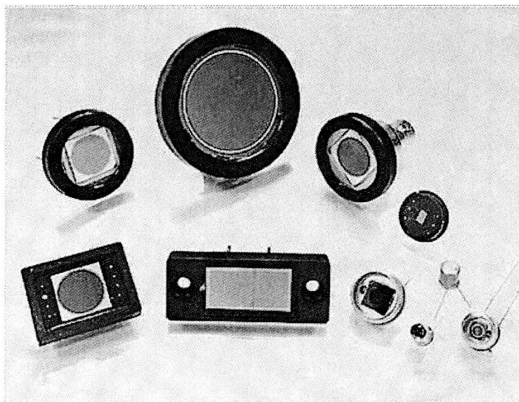


图 1.1 各种类型光电探测器

相比于光电导探测器，光伏光电探测器具有量子效率高、灵敏度高、功耗小等许多优点，因此光伏光电探测器发展迅速，应用广泛，无论是在军事还是日常生活领域，都发挥着不可替代的作用。本文中所介绍的光电探测器就属于光伏光电探测器。

1.1.2 降水监测的重要性

云、雾和降水是在一定的天气条件下产生和发展的，绝大部分重要的天气现象，如雷暴、冰雹、龙卷风以及暴雨、梅雨、台风、连阴雨等，都与云和降水有关^[3]。降水引发的地质灾害，如山洪、滑坡、泥石流、洪水等给人民的生命财产安全造成了难以估计的损失。1998 年夏天，长江流域连日暴雨导致的特大洪水，2010 年 8 月 7 日，甘肃舟曲突降特大暴雨引发的泥石流地质灾害以及 2012 年北京 7.21 特大暴雨造成的严重城市内涝等，都导致了重大的财产损失和人员伤亡。因此，准确的做好降水监测和灾害防治，已显得尤为重要。此外，做好降水监测对我们的农业生产和日常出行也有重要的指导意义。



图 1.2 暴雨引发的城市内涝

1.1.3 云降水物理学的基本知识

云降水物理学属于大气科学的重要分支，主要研究自然界中云、雾和降水的形成、发展和消散过程^[3]。天气预报中对云和降水的预报需要我们对云降水物理有深刻系统的理解，数值天气预报要求提出正确描述云降水过程的计算方案。降水监测则是直接建立在云降水物理学基础上的一门应用科学技术，因此云降水物理学是一门具有现实意义、富有生命力的重要学科。

云是由大气中水汽凝结或凝华形成的足够数量的微小水滴。尺度大一些的大气水凝物粒子,包括雨滴、雪花、霰、冰雹等,称为降水粒子^[4]。液态云降水粒子在尺度较小时形状接近球形,但固态云降水粒子的形状却是不规则的。在非专门讨论云降水粒子形状对理化特性的作用时,为了使问题简化,通常将云降水粒子看作球形。大部分粒子尺度测量仪器都是在球形粒子假设的前提下对粒子的等效尺度进行测量的。实际上,这一假设从统计学的角度看是合理的,即大量不规则粒子表现出来的各种特性的统计平均和整体效果,可近似认为与大量球形粒子的效果等效。微观上通常根据水滴的下落规律,将半径小于 $100\mu\text{m}$ 的水滴叫做云滴,习惯上又将其半径在 $50\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 之间的云滴叫做大云滴,半径大于 $100\mu\text{m}$ 的则称为降水粒子^[5]。在平时生活中,我们看到的到达地面的降水,其直径一般都大于 $1000\mu\text{m}$,而通常的暴雨,其雨滴直径甚至大于 $5000\mu\text{m}$,当雨滴半径超过 $5000\mu\text{m}$ 时,甚至会破碎。

本文所研究的降水粒子都采用云降水物理学中对雨滴的定义标准,即将半径大于 $100\mu\text{m}$ 的水滴称作降水粒子。

1.1.4 降水监测方法

目前降水监测方法主要有三种,一种是根据某地某时期长期的降水记录,绘制降水量随时间的变化曲线,从统计学的角度出发,建立恰当的数学模型来做出预测^[6,7]。这种预测技术属于长期降水监测,预测周期一般几年甚至几十年,因此得到的数据量是相当大的。虽然这种预测方法可以宏观的把握今后数年的天气和气候变化,但由于分析难度高、偶然因素多以及数学模型的局限性,导致对某个短期时间点的降水监测的可靠性大打折扣。第二种降水监测方法就是我们现在每天所关注的天气预报。天气预报属于短期的降水监测,其数据多源于全国各地的气象站以及围绕地球旋转的气象卫星所拍摄的卫星云图。通过两方面数据的综合,分析某地某时间点降水的大小和走势。这种降水监测方法可以做到即时、覆盖面广的对全国各地的降水做预测,但无法直接得到大气环境中的云层信息,云层的不确定因素会影响预测的准确性。第三种降水监测方法是目前一种较先进的降水监测技术。它通过将降水粒子探测器探头安装于气象飞机上,气象飞机飞入云层,直接对云层中的降水粒子直径、密度,云层温度、湿度等参数进行直接测量,然后直接将各项数据返回给地面,分析综合后做出降水监测^[8]。这种降水监测技术能够做到直接、精确、即时,目前已经获得了各国气象预测部门的认可。

气象飞机是很有效的大气探测工具,它既能够进行实时、实地的直接探测,又能在短时间内飞行很大的距离,获取到要素空间结构的资料。因此特别适用于云降水物理探测。在飞机气象探测技术方面,美国已经形成了覆盖高空、地面、海洋的全方位观测系统,是这一领域做的最完善的国家^[9]。随着无人机气象观测技术的不断发展,我国在气象飞机探测领域也取得了长足的进步,由沈阳航天新光集团研制的 TF-1 无人机气象探测系统^[10],已经承载了多项气象探测任务。

1.2 研究进程和国内外研究进展

1.2.1 碰撞印痕云降水探测

碰撞印痕采样测量法是人们最早采用的一种测量降水粒子数浓度和大小的技术。其基本原理是将采样面暴露于云层中的云降水粒子中,因为采样面表面具有一些易于固化或高黏性的流体,或者由一些易于形变的材质,如铝箔、铅箔等制成,所以当粒子碰撞到采样面表面时,采样面表面会产生印痕。然后通过特定的计数方法对产生的印痕进行计数和测量,通过气流速度和采样面积就可以得到采样体积,从而计算出降水粒子的大小和数浓度。

在 20 世纪 60 年代中期,日本曾设计了一种印模采样器,这种采样器由气球携带,之后美国国家大气研究中心(NCAR)将之改进,用于研究卷云。美国芝加哥大学的大气研究者也曾设计了一款连续印模采样器^[11],此采样器由气象飞机携带。这种方法的优点是没有渗透、蒸发和粒子合并,印模可以长期保存,可以使用于飞机的低速飞行状态下。

视频冰粒子采样器(VIPS)使用了一条宽度为 8mm 的透明采样带,表面涂有硅油,降水粒子碰撞到采样带表面,经过透镜放大后,由两台数码摄像机记录数据,并用于分析。美国国家大气研究中心(NCAR)一般使用 VIPS 进行相关研究。而日本气象研究所(MRI)主要使用一种原理和 VIPS 类似的下投式探测设备,此外他们还设计了一种水凝物粒子录像仪^[12](HYVIS),来进行降水粒子探测。

1.2.2 光学阵列探头(OAP)云降水探测

光学阵列探头 OAP (Optical Array Probe) 的云降水探测原理是利用光电成像技术对降水粒子进行探测。美国国家大气研究中心(NCAR)的 Knollenberg 教授首次实现了光学阵列探头 OAP 对云降水粒子的探测^[13]。这种光学阵列探头的核心检测

单元是多根呈阵列排列的光学纤维，每根光学纤维就相当于一个像素点，受限于当时的技术条件，每根光学纤维直径达 $100\mu\text{m}$ ，32 根光学纤维一起组成一个云降水粒子探测阵列。光学纤维的另一端连接光电倍增管、信号放大器以及数据处理电路，整个装置可以实现将光信号转换成电信号。

当没有降水粒子处于测量区域时，整个平行光束会完全投射到光纤阵列上，在另一端的处理电路中会有稳定的电压输出。当平行光束被降水粒子遮挡时，由于折射、反射、衍射、吸收等因素，光照强度会减弱，因此末端的处理电路会发生压降，通过检测哪几路发生压降，就可以推断有哪几根光纤被降水粒子遮挡住了。通过数被遮挡的光纤数目，就可以计算云降水粒子的大小。例如，有 10 根光纤的末端电路发生了压降，考虑到每根光纤直径为 $100\mu\text{m}$ ，则被降水粒子遮挡的阴影大小为 $10 \times 100\mu\text{m}$ ，即降水粒子直径为 1mm 。

后续的一些对降水粒子探测的研究工作都借鉴了 Knollenberg 教授的设计思路，通过光源、探测区域、感光元件和末端处理电路组成一个完整的云降水粒子探测器件，这一设计思路后来扩展为检测更小的降水粒子以及更大的降水雨滴^[14-20]。

1.2.3 光电探测芯片云降水探测

随着云降水探测技术越来越成熟，用于探测云降水粒子的光学阵列探头 OAP 逐渐向轻型化、小型化方向发展，而且探头类型也由原来的以光学纤维做感光元件转变为光电探测芯片。这得益于近几十年来半导体技术的飞速发展，半导体工艺的不断改进，半导体成像技术的不断成熟。而且由于以无人机为主导的气象飞机要求机载云降水粒子探测器必须轻便化、小型化，因此光电探测芯片用于降水监测逐渐成为云降水粒子探测的主流。

目前在以光电探测芯片为核心的光学阵列探头领域，技术最领先的当属一家位于美国科罗拉多州的颗粒物探测公司—PMS(Particle Measuring System, Inc.)。其用于云降水粒子探测的产品如 FSSP-100, 2D-C 等已经在市场上获得了广泛的认可^[21]。其产品图如下图所示：

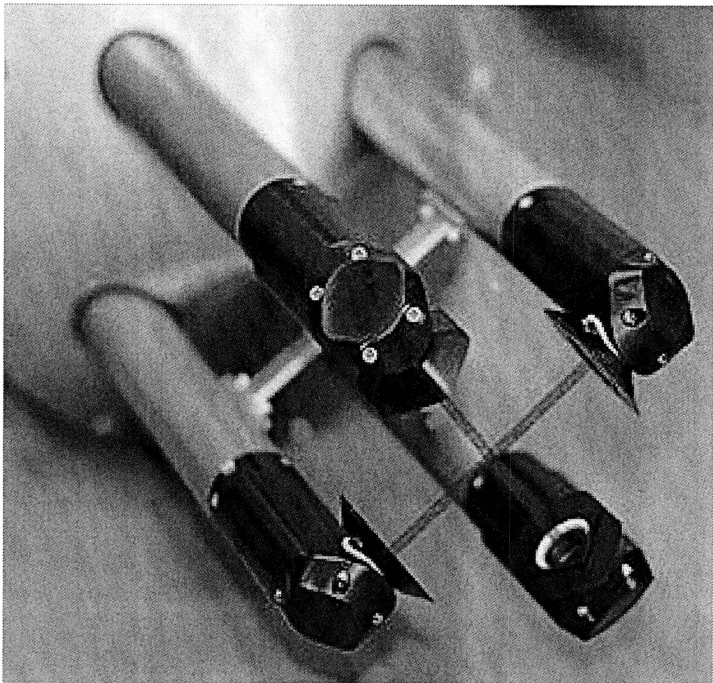


图 1.3 PMS 云降水粒子探测器图片

图中所示的云降水粒子探测器集成了光源系统、光电探测器芯片和后端处理电路。光源发射激光，光电探测器接受激光，后端处理电路将光信号转换为电信号输出。整个探测器集成度高，质量小，可以满足对降水粒子的探测^[21-23]。

光电探测芯片的核心结构是一组呈阵列排列的 PN 结光电二极管。激光束照射到呈直线排列的光电二极管阵列上，二极管阵列检测粒子通过激光束时因遮挡产生的阴影，任一瞬时每个二极管是否被遮蔽的状态由信号处理电路检测，采样频率与粒子通过激光束的速度成正比，由二极管阵列遮挡状态随时间的变化得到粒子与激光束垂直界面的二维图像。

此外，一种利用电荷耦合器件—CCD 图像传感器^[24,25]的粒子探测技术也得到了人们的认可，其与 PN 结光电二极管型光电探测芯片相比有一些不同之处，其对比如下图所示：

表 1.1 CCD 电荷耦合器件和 PN 结光电探测芯片对比

器件	功耗	读出时间	噪声	设计 & 工艺	时序复杂度
PN	低	快	高	工艺较简单	可直接读出阵列内单元的电流信号

CCD	高	慢	低	外围电路复 杂	信号读取需 严格时序控 制
-----	---	---	---	------------	---------------------

考虑到安装于气象飞机上的云降水粒子探测器采样的连续性,显然 PN 结型光电探测芯片更适合于降水粒子探测。因此如 FSSP-100, 2D-C 等 PMS 公司生产的产品都以 PN 结光电探测芯片作为云降水探测器的核心部件,其产品垄断了云降水探测器领域的市场,其他一些公司,如德国的 DMT 公司的产品只占很小份额,中国在这一领域还处于刚起步阶段,市场一片空白,所以针对云降水粒子探测器的研究具有重要的现实意义。

1.3 本论文的研究内容

本论文以云降水监测作为研究背景,针对气象飞机搭载云降水粒子探测器进行降水粒子测量这一先进的降水监测技术,设计制作了一款基于 PIN 结构的光电探测芯片。作为光学阵列探头的核心部件,对其工作原理、测量方案、结构设计、工艺制作等内容都将做详细的阐述介绍,具体研究内容如下:

作为基础,第二章将详细介绍 PIN 型光电探测器的基本原理,包括光电效应的基本概念和 I 型层的特殊作用。另外,还将介绍包括光电流、暗电流、响应率、响应速度等参数在内的指标对光电探测器性能的评价。

第三章将首先介绍光电探测器测量降水粒子的方法,包括对降水粒子直径和分布密度的测量。其次将对芯片的设计部分做了详细阐述,主要包括对 I 型层的考虑,对光电二极管单元间防串扰沟槽的设计以及对感光表面增透膜的设计。最后将对芯片和 PCB 板的版图绘制进行介绍。

第四章将主要介绍光电探测芯片制备中的相关半导体工艺。首先对芯片的整个工艺流程进行介绍,然后针对芯片微加工过程中用到的主要半导体工艺做详细阐述。

第五章将主要介绍芯片的封装设计。包括芯片和 PCB 板的压焊,玻璃盖板的封装和测试板的设计制作。

第六章将主要对光电探测器进行光电性能测试和降水粒子模拟测试,为光电探测器的应用提供有力的实验支撑。

第二章 PIN 型光电探测器基本原理和性能参数

2.1 PIN 型光电探测器基本原理

2.1.1 半导体的光电效应

光电效应分为外光电效应和内光电效应^[26]。外光电效应一般指光照射到金属表面使其发射出电子的物理效应，发射出来的电子称为“光电子”。如果要产生光电效应，光的频率必须大于金属的特征频率^[27,28]。1887 年德国物理学家海因里希·赫兹用紫外线照射金属电极，发现了电火花，从而证实了光电效应^[29]。1905 年阿尔伯特·爱因斯坦发表了《关于光产生和转换的一个启发性观点》一文，对光电效应的实验数据进行了理论解释^[30]。内光电效应包括光电导效应和光生伏特效应，是指一定波长的光照射到半导体材料表面，被半导体吸收，价带电子被激发，跃迁到导带，形成电子-空穴对。这种光生电子-空穴对存在于材料中，会改变半导体材料的导电性能，假如通过某种方法检测出导电性能的变化，即可探测出光信号的变化。

2.1.2 半导体的光吸收

当理想半导体处于绝对零度时，其价带完全被电子占满，因此价带内电子无法被激发到更高能级，当半导体吸收足够能量，光子使电子激发，越过禁带，进入空的导带，而在价带中形成空穴，从而出现电子-空穴对。这种由于电子在带与带之间的跃迁而形成的吸收过程称为本征吸收^[31]。图 2.1 是本征吸收的示意图。

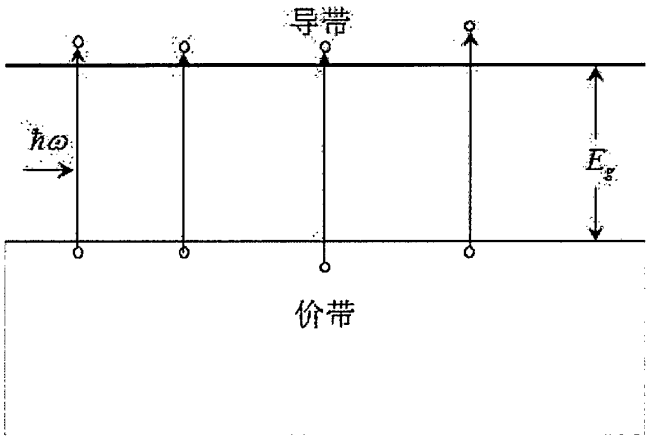


图 2.1 本征吸收示意图

若发生本征吸收, 光子能量必须等于或大于禁带宽度 E_g , 即

$$h\nu \geq h\nu_0 = E_g \quad (2.1)$$

$h\nu_0$ 代表引起本征吸收的最低限度光子能量, 即本征吸收谱。 ν_0 是低频方面的一个频率界限, 当频率低于 ν_0 或波长大于 λ_0 时, 本征吸收不能产生, 吸收系数迅速下降。

利用麦克斯韦方程组可以求解光在介质中传播的衰减规律, 光强度 I 随传播距离 x 的变化关系为^[31]:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2\omega kx}{c}\right) = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (2.2)$$

式中 I_0 为初始光强, I 表示光进入介质深度为 x 处的光强。 α 是和光强度无关的比例系数, 称为媒质的吸收系数。 α 的物理意义是: α 相当于光在媒质中传播 $1/\alpha$ 距离时能量减弱到原来的 $1/e$ 。

因此为了提高光的吸收效率, 应当适当的提高材料的吸收深度。

2.1.3 PIN 光电探测器工作原理

本论文所研究的 PIN 光电探测器的核心部件是光电二极管, 这里提到的光电二极管是根据 PN 结的光生伏特效应制成的。当用适当的波长的光照射 PN 结的表面, PN 结势垒区的较强内电场会将 PN 结两端的光生少数载流子拉向相反方向: N 区的空穴穿过 PN 结进入 P 区, P 区的电子也会进入 N 区, 这样会使得 N 端电势降低而 P 端电势升高, 从而在 PN 结两端形成光生电动势, 这就是 PN 结的光生伏特效应^[31]。由于光照产生的光生载流子各自向相反的方向运动, 在 PN 结内部会形成从 N 区向 P 区的光生电流 I_L , 由于光生电动势的存在, 就相当于在 PN 结两端加了一个正向电压 V , 产生正向电流 I_F 。当 PN 结短路时, 显然 $I_F=0$, 此时短路电流等于光生电流。在 PN 结开路时, 光生电流 I_L 和正向电流 I_F 相等, PN 结两端产生稳定的电势差 V_{oc} 。当 PN 结两端连接一个负载时, 就会有电流源源不断的流过电路, 此时的 PN 结就相当于一个电源, 这就是光电池的工作原理。当 PN 结两端连接一个电源, 并使 PN 结处于反向偏置状态时, 回路中会有稳定的反向截止电流, 如果改变光照条件, 反向截止电流会迅速改变, 这就是光电二极管的工作原理, 利用这一原理可以做成光电探测器。光电二极管的 I-V 曲线如图 2-2 所示:

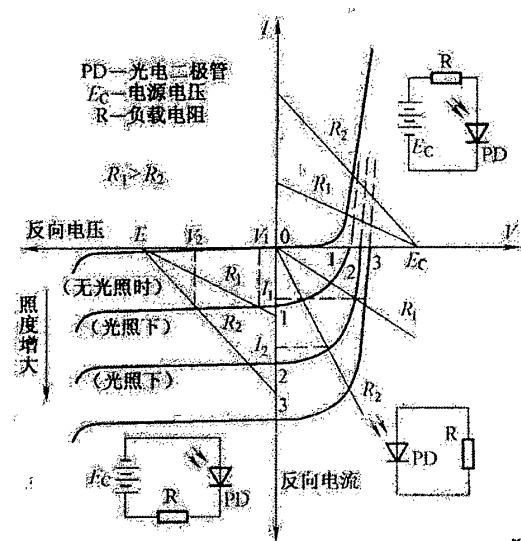


图 2.2 光电二极管的 I-V 曲线

考虑到 PN 结的耗尽区宽度有限，载流子的扩散运动时间较长，而且光在耗尽区内不能被完全吸收，因此为了扩大耗尽区宽度，从而提高对光的吸收效率，缩短载流子的扩散过程，提高响应速度，所以在光电二极管的 PN 结中间掺入了一层浓度很低的 N 型半导体。由于掺入层的掺杂浓度很低，接近本征（intrinsic）半导体，所以称这一掺入层为 I 层，这种结构的光电二极管被称为 PIN 光电二极管^[32]。I 层比较厚，几乎占据了整个耗尽区，入射到 PIN 结中的光绝大部分被吸收，产生光生电子和光生空穴，同时 P+区耗尽层厚度的增加会大大缩短载流子的扩散过程。由于 I 层两侧的 P 层和 N 层很薄，且为高掺杂，其吸收入射光的比例较小，因此光生电流中的漂移分量占据主导地位，其响应速度会大大加快。PIN 光电二极管的结构如图 2-3 所示：

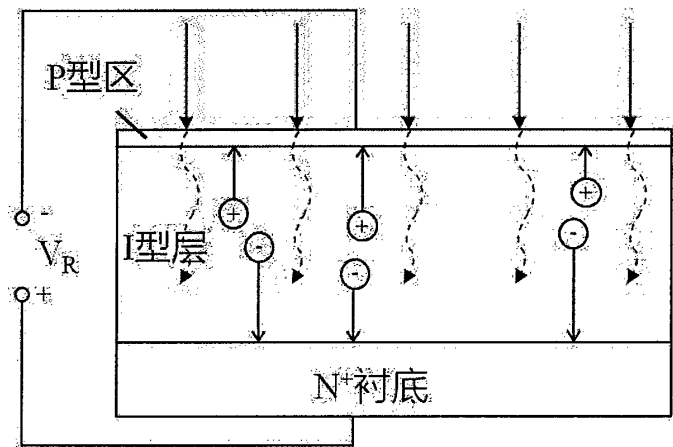


图 2.3 PIN 光电二极管的结构图

因此,就光电探测器而言,PIN 光电二极管可以很好的充当光电探测芯片的核心部件,满足光电探测器的性能要求。

2.2 光电探测器的性能参数

光电探测器的性能参数包括光电流、暗电流、电容、响应率、响应速度等^[33],本节将对这些性能指标做简要介绍。

2.2.1 光电流和暗电流

光电探测器在没有入射光照射的条件下,两端施加反向偏压,光电探测器回路中会产生微弱的电流,此电流称为光电探测器的暗电流。当用适当波长、一定光强度的光束照射光电探测器,回路中的电流会迅速增大,此时测得的电流称为光电流。光电探测器一般工作在反向偏压状态下,因为 PIN 光电二极管处于反向偏置时,工作电流很小,产热少,能够保证光电二极管维持稳定的工作状态。另外反向电流受电压影响较小,其工作电压范围很大。

2.2.2 响应度

硅光电二极管的光谱响应度,是描述光电二极管灵敏度的重要技术参数。响应度的定义为:对于给定波长 λ 的入射光的辐照下,接受单位光功率二极管所产生的光电流。关系式如下所示^[34,35]:

$$R_I(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (2.3)$$

$R_I(\lambda)$ 为入射光波长 λ 的函数, $P(\lambda)$ 是波长为 λ 的入射光的光功率, $I(\lambda)$ 是二极管产生的光电流。光谱的响应度越大,说明硅光电二极管对某一波长入射光的吸收能力越强。

另一种表征光电二极管对光响应的参数是量子效率。量子效率是指光电二极管中产生的电子-空穴对数目和照射到光电二极管表面的光子数目之比,量子效率可用下面的公式表示^[36]:

$$\eta = \frac{I/e}{P/h(c/\lambda)} \quad (2.4)$$

这里提到的量子效率一般指外量子效率，即光照射到光电二极管被反射的光子是不被考虑的。

2.2.3 响应速度

响应速度是用来表征光电二极管对发生快速突变光信号的传输响应^[33]。影响响应速度的因素一般包括以下三个：

1. 光生载流子在耗尽层附近的扩散时间；
2. 光生载流子在耗尽层内的漂移时间；
3. 负载电阻与并联电容所决定的电路时间常数。

光入射到光电二极管表面，光子被吸收，产生一对电子-空穴对。电子-空穴对受到偏压电场的作用，电子和空穴向相反方向运动从而产生光电流。光电流的产生时间会受到光生载流子的渡越时间的限制，器件的响应速度决定了可以接受的光信号的调制频率。

2.2.4 功耗

功耗也是表征光电探测器性能的重要指标之一。单个光电探测器的功耗由多个光电二极管的功耗相累计得到。单个光电二极管功耗是指器件在正常工作模式下，工作电压和光电流的乘积，因此，影响光电二极管功耗的因素有两个：工作电压和光电流。典型的 PIN 型光电二极管在较低的偏压下能够产生稳定较大的光电流，因此，以 PIN 型光电二极管为单元的光电探测器的功耗相较于其它类型的光电传感器是较低的。

2.3 本章小结

本章主要就光电探测器的基本工作原理和性能指标两部分展开讨论。在对光电探测器的基本原理的介绍中，首先对半导体的光电效应、光生伏特效应、本征吸收等几个基本概念做了详细论述。随后针对光电探测器的核心部件 PIN 光电二极管的基本原理做了介绍，详细说明了本征层对增强光吸收的作用以及光照射到光电二极管表面导致电子被激发引起本征吸收产生光电流的过程。

在第二部分对光电探测器性能参数的讨论中，就光电流、暗电流、响应度、响应速度和功耗等参数的概念做了基本论述。论文最后将对光电探测器的这些性能参

数进行一一测量，测量结果将会对这种新型光电探测器应用于降水监测提供有力性能保障。

第三章 降水监测的实现方法及光电探测器芯片设计

3.1 测量降水粒子的基本原理

3.1.1 降水粒子检测的方案制定

大气云层中的云滴都是由水蒸气受冷凝结而成的。这些云滴刚开始直径往往很小，一般都低于 $100\mu\text{m}$ ，随后通过水蒸气的不断附着以及云滴间的不断碰撞，云滴不断变大，凝结成直径大于 $100\mu\text{m}$ 降水粒子。在这一过程中，云层的高度也会逐渐降低，降水粒子会继续变大，当达到空气浮力无法托住时，降水粒子就会下落形成降雨，降水雨滴的直径一般都在 $5000\mu\text{m}$ 以上^[37]。在整个降水过程中，降水粒子直径和分布密度分别决定了降水的时机和快慢，因此要做好降水监测，这两个物理量就是我们要测量的关键数据。在实际测量中，由于降水粒子的分布密度很难测量，一般都用测量大量降水粒子的间距来替代，最后通过统计学再做推算^[38]。

针对需要测量的降水粒子参数，并参考美国国家大气研究中心（NCAR）的 Knollenberg 教授降水粒子测量原理，本文提出了一种新型的光电探测芯片，可满足对降水粒子直径和间距的测量工作。通过搭载在气象飞机上，进入云层中对降水粒子进行测量。光电探测芯片的基本单元—光电二极管的截面积为 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ ，因此 $100\mu\text{m}$ 就是我们所能探测到的最小降水粒子直径。光电二极管的双线阵设计可以测量两滴降水粒子间的间距。

3.1.2 降水粒子直径的测量方法

测量降水粒子的光电探测芯片由两排平行排列的光电二极管阵列组成，每一排的光电二极管单元间距相同，示意图如下：

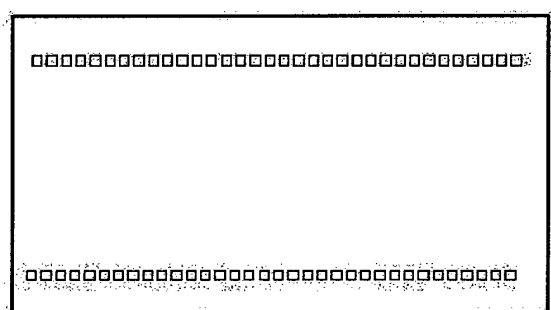


图 3.1 光电探测芯片示意图

上图为俯视图，整个光电探测芯片为小矩形，每个白色方块代表一个光电二极管。当光电探测器搭载在气象飞机上进入云层时，处于探测区域的降水粒子会受到激光器发射的平行光束的照射，降水粒子的影子会垂直投射到光电探测芯片的表面，降水粒子的直径有多大，投射到光电探测芯片表面的阴影直径就会有多大。通过计算被遮挡的光电二极管单元数目，就可以确定阴影的直径，也就测量出了降水粒子的直径。降水粒子直径测量的原理图如下所示：

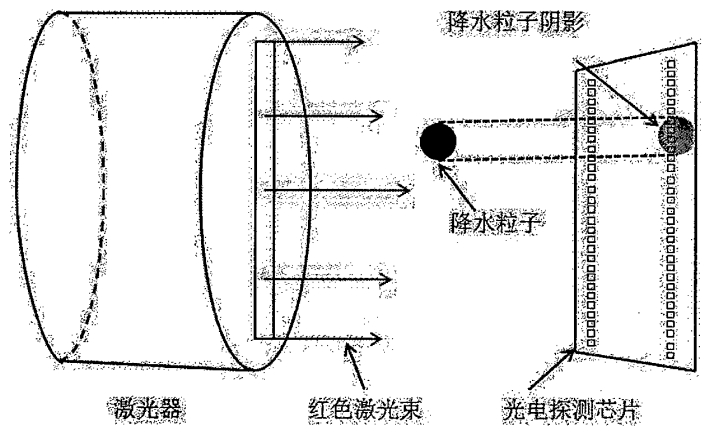


图 3.2 降水粒子直径测试原理图

在测量过程中，激光器一直处于开启状态，光束照射到光电探测器芯片表面，每个光电二极管单元都会输出一个光电流值。降水粒子通过测量区域的过程中，被降水粒子阴影遮挡的光电二极管单元的电流输出由光电流变为暗电流。由于光电二极管的暗电流要明显小于光电流值，所以通过检测电流变化可以很容易的辨别出哪几个光电二极管单元被降水粒子阴影遮挡，整个阴影直径也就一目了然，从而实现对降水粒子直径的测量。

3.1.3 降水粒子间距的测量方法

降水粒子间距的测量是通过双排光电二极管阵列实现的。在整个测量过程中，假设降水粒子是静止不动的，飞机可以看做是做匀速运动，飞行速度记为 v ，降水粒子 A 和 B 之间的间距记为 S ，光电探测器先后探测到降水粒子 A 和 B 的时间差记为 Δt_{AB} 。时间差 Δt_{AB} 由单排光电二极管阵列测量得到，通过检测光电二极管光电流

的变化情况可以很容易的记录这一时间差。两个降水粒子的间距 S 与飞机飞行速度 v 和时间差 Δt_{AB} 的关系式如下：

$$S = v \cdot \Delta t_{AB} \tag{3.1}$$

降水粒子间距测量的示意图如下所示：

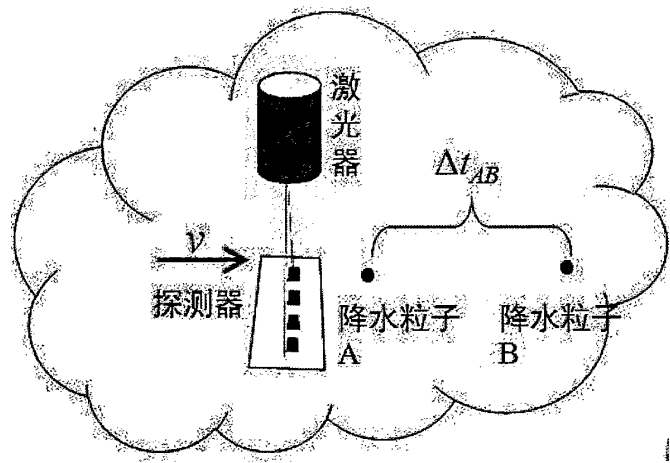


图 3.3 降水粒子间距测量示意图

在公式 3.1 中飞机的飞行速度 v 是未知的，显然求解出飞行速度 v ，两个降水粒子间的间距就很容易的计算得到。一般情况下，飞机的控制系统中有专门记录飞机飞行速度的仪器，但是这个速度仪表的精确度不高，且很难与光电探测器的测量系统兼容，因此利用光电探测芯片直接测量飞机的飞行速度成为完成整个降水粒子间距测量工作的核心所在，而设计的双线阵光电探测芯片恰好能完美的完成飞机的速度测量工作。

飞行速度的测量示意图如下所示：

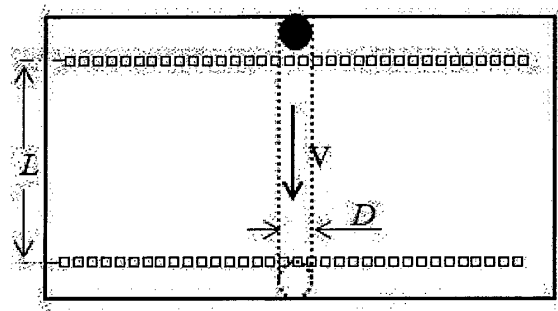


图 3.4 飞机飞行速度测量示意图

L 表示两排光电二极管阵列的间距, 假设降水粒子是静止不动的, 气象飞机相对于降水粒子做匀速运动, 如果以飞机做参考系的话, 则气象飞机静止, 降水粒子相对于飞机做匀速运动, 设降水粒子或者飞机的飞行速度为 v , 降水粒子从开始略过光电探测芯片的上线阵到开始略过光电探测芯片的下线阵的时间差为 Δt , 则对飞机飞行速度 v 的求解可由下式给出:

$$v = \frac{L}{\Delta t} \quad (3.2)$$

这里需要注意的是, 在记录降水粒子通过双线阵的时间差 Δt 时, 选取降水粒子阴影刚遮挡光电二极管单元时开始记录。因为光电二极管单元在开始被阴影遮挡的那一刻, 电流会迅速开始变小, 在后端的电流监测设备上, 电流曲线有一个明显的拐点, 把这个点作为时间记录的起始点, 在测量中比较精确, 也很方便。

另外在测量降水粒子 A 和 B 的间距时, 如果担心前后测量的速度不一致, 可以根据光电探测芯片通过两个降水粒子时的速度的平均值来进行测量, 即公式 3.1 可改写为:

$$S = \frac{v_A + v_B}{2} \cdot \Delta t_{AB} \quad (3.3)$$

至此, 我们已经完成了对两个降水粒子的间距 S 的测量。但是要想准确的测量云层中降水粒子的分布密度, 单单是完成对两个降水粒子的间距测量是完全不够的, 必须对云层中大量相邻降水粒子的间距进行采样, 利用统计学和云物理降水学的相关知识进行计算, 才可以得到真实准确的降水粒子分布密度。

3.2 光电探测芯片的结构设计

本节主要针对光电探测芯片的具体结构展开介绍, 其中也包括了与芯片有关的各项参数的选择依据。主要内容涵盖了光电二极管材料的选择、芯片的整体结构设计、各部分加工工艺的考虑、防串扰隔离沟槽的设计、增透膜的设计等。这些设计要求的出发点都是为了满足光电探测芯片对降水粒子的测量要求。

3.2.1 光电二极管的阵列结构设计

根据目前半导体技术的发展情况, 制作光电二极管的材料主要以硅材料为主。本文所介绍的光电探测芯片就选用了一种本征外延硅片, 外延片的底层是 N 型衬底硅, 随后在衬底上生长一层单晶硅, 这层单晶硅被称为外延层。本文选用的外延片,

其外延层电阻率约为 $70\Omega\cdot\text{cm}$ 。这里需要强调的是虽然高阻的 I 层可以显著提高光生载流子的寿命，低电压下实现全耗尽，从而减小 PIN 结的结电容^[39]，但是高阻的外延层的电阻率均匀性较差，影响了器件性能的稳定性，因此在参考了清华大学微电子所任天令课题组袁立师兄的工作后^[40]，采用了一片外延层电阻率较低的外延片来加工制作光电探测芯片，其核心单元是 PIN 光电二极管，将外延片的 N 型衬底硅和外延层作为 PIN 结的 N 层和 I 层。

整个光电二极管单元的结构如图所示：（注：防串扰隔离沟槽和增透膜等结构会在下文介绍）

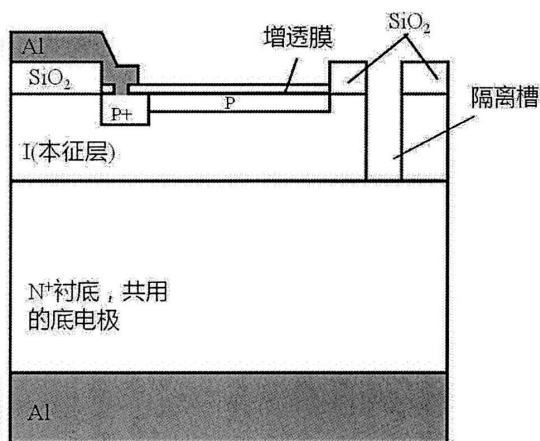


图 3.5 PIN 光电二极管的结构示意图

整个光电二极管分为三部分：P 型区、本征层（I 层）以及 N 型区。N 型衬底重掺杂，掺杂水平可以达到欧姆接触的要求，在 N 型层的背面淀积一层铝，来充当所有 PIN 光电二极管的共同阴极。本征层的电阻率比较高，在不影响器件性能稳定性的前提下提高光生少子的寿命，另外，本征层较厚，可以更充分的吸收光子。P 型层的厚度较薄，轻掺杂，是通过对本征层进行离子注入的方式获得的。在 P 型层的一侧，有一小部分面积进行了重掺杂，目的是便于与阳极淀积的铝引线形成欧姆接触。所有光电二极管单元的阳极保持独立，各自对应一根铝引线，互不交叉。

对于 N 型层的选择，要求衬底掺杂浓度很高，电阻率很低，以便能和背电极形成良好的欧姆接触。这里选择的 N 型衬底杂质浓度约为 $2\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ ，电阻率约为 $0.002\Omega\cdot\text{cm}\sim 0.004\Omega\cdot\text{cm}$ ，厚度为 $450\mu\text{m}$ ，晶向为 $\langle 111 \rangle$ 方向。

P 型层是通过离子注入工艺形成的。P 型层分为两部分，轻掺杂区和重掺杂区。轻掺杂区用来做阳极和光线的入射窗口，其注入参数为^[41]：注入离子为硼，注入量为 $5\times10^{14}\text{ cm}^{-2}$ ，注入功率为 40 keV。重掺杂区用来和铝引线形成欧姆接触，其注入参数为^[41]：注入离子为硼，注入量为 $7\times10^{15}\text{ cm}^{-2}$ ，注入功率为 100keV。

对于外延层厚度的选择，需要考虑两个因素：一是要有一定的厚度，以保证对光子的充分吸收；二是厚度要适度，不能过于厚，以保证载流子能够迅速的移动到两端的 P 型区和 N 型区。光子在硅材料中的吸收深度遵循光在介质中传播时的衰减规律，已知室温下本征硅吸收系数 α 为 $2.81\times10^3\text{ cm}^{-1}$ ，当光在硅中传播的光强度衰减为入射光强的 1%时，根据公式：

$$I(d)=I(0)\text{e x p}(-\alpha d) \tag{3.4}$$

可得吸收深度 d 为 $16.45\text{ }\mu\text{m}$ 。但考虑到 P 型层是通过离子注入工艺得到的，在工艺完成后的退火激活需要在 1000°C 左右的高温条件下进行，因此在本征层两侧的接触区，P 型区和 N 型区的杂质会向本征层扩散，所以初始外延层厚度要大于 $16.45\text{ }\mu\text{m}$ 。

本文利用 Silvaco 软件对离子的扩散深度进行了工艺仿真，外延层厚度设为 $20\mu\text{m}$ ，电阻率设为 $100\Omega\cdot\text{cm}$ ，工艺仿真的截面图如下所示：

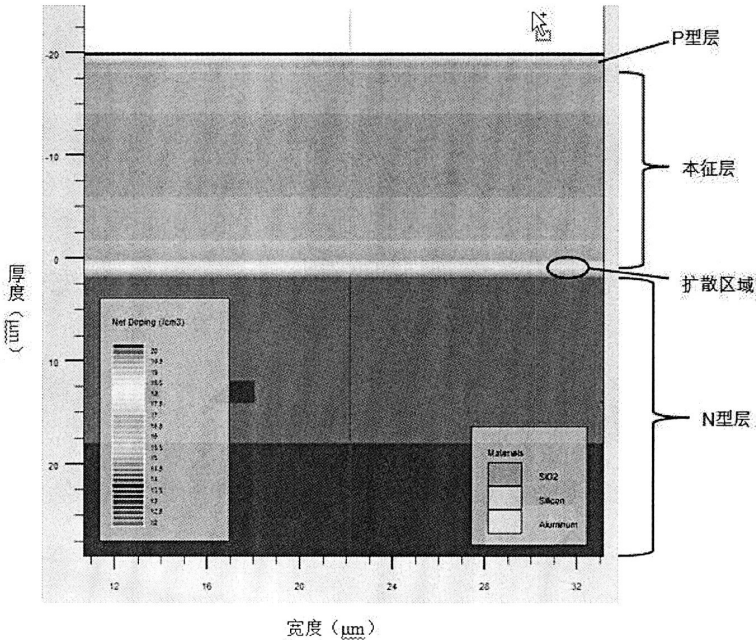


图 3.6 扩散深度仿真截面图

在 Silvaco 软件的 Tonyplot 模块中, 可以查看沿厚度方向的杂质浓度分布, 如下图所示, 沿中心线从 $-20\mu\text{m}$ 到 $+30\mu\text{m}$ 的杂质浓度分布曲线如下图所示:

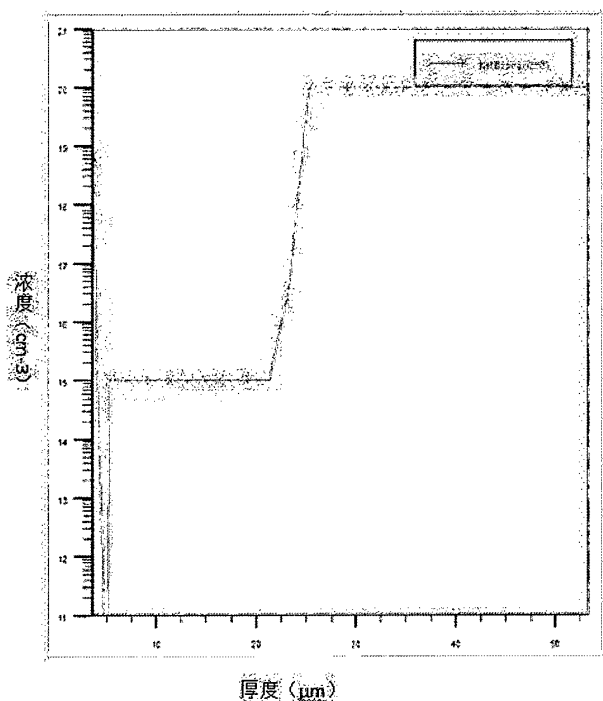


图 3.7 PIN 结厚度方向离子浓度分布

图中本征层的掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 高于本征状态下的离子浓度, 属于低掺杂状态, 由于离子扩散, 最终的本征层厚度略低于 $20\mu\text{m}$, 但高于 $16.45\mu\text{m}$, 所以外延片选取时, 本征层厚度选为 $20\mu\text{m}$ 是合理的。

3.2.2 响应速度设计

本征层的引入, 明显增大了 P+区的耗尽层厚度, 有利于缩短载流子的扩散过程, 光生电流中的漂移分量占支配地位, 结电容明显减小。

$$C_j = \frac{\epsilon S}{4\pi k d} \quad (3.5)$$

$$C_j = \frac{Q}{U} = \frac{I_i}{U} \quad (3.6)$$

由公式 3.5 和 3.6 可知, 响应速度高要求响应时间 t 越小越好, 在工作电压一定的情况下, 光电二极管的工作电流也一定, 所以要使的结电容很小, 应该尽力减小

结电容面积 S ，增大耗尽层厚度 d 。

3.2.3 增透膜的设计

光从一种介质向另一种介质入射时，在两种介质的交界面会发生折射和反射，反射率则定义为反射光强和入射光强的比值^[42]，用 ρ 表示。

$$\rho = \left(\frac{A'}{A} \right)^2 \quad (3.7)$$

A' 表示反射光的振幅， A 表示入射光的振幅。当入射角非常小时，根据折射定律和菲涅耳公式^[43]可知，反射率 ρ 可表示为：

$$\rho = \left(\frac{A'}{A} \right)^2 = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (3.8)$$

n_1 和 n_2 分别代表两种介质的折射率，光线从 n_1 介质射进 n_2 介质。如果 n_1 介质代表空气， n_2 介质代表硅，已知 $n_1=1$ ， $n_2=3.84$ ，则反射率 $\rho=0.344=34.4\%$ 。

增透膜又称为减反膜，是一种可以增加透射光入射，减少反射光的薄膜^[44]。如果在硅表面镀一层透明的介质，空气、介质薄膜、Si 的折射率分别表示为 n_1 、 n_3 、 n_2 ，则空气和介质薄膜间的反射率 ρ_1 可表示为：

$$\rho_1 = \left(\frac{n_3 - n_1}{n_3 + n_1} \right)^2 \quad (3.9)$$

介质薄膜和 Si 之间的反射率 ρ_2 表示为：

$$\rho_1 = \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \right)^2 \quad (3.10)$$

入射光线会在空气和介质薄膜的界面以及介质薄膜和 Si 的界面发生多次折射和反射，其示意图如下所示：

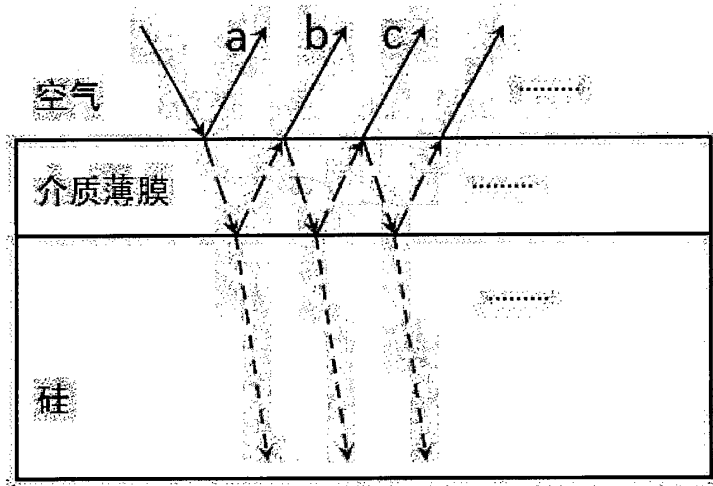


图 3.8 入射光在两个界面处发生多次折射和反射的示意图

现在如果我们将入射光强度设为 1，则光线 a 的强度为 ρ_1 ，光线 b 的强度为 $(1-\rho_1)^2\rho_2$ ，光线 c 的强度为 $(1-\rho_1)^2\rho_1\rho_2^2$ ，等等。实际上从第三次开始，返回到空气中的光强度已经非常小了，因此，我们可以认为反射光强由光线 a 和光线 b 组成。如果要使整体的反射率降到最低，则需要使得介质薄膜上下表面反射的光线，即光线 a 和光线 b 发生相消干涉。发生相消干涉需满足的条件有两个^[45-47]：一是两束光线振幅相等，二是两束光线相位相反。

若光线 a 和光线 b 的振幅相等，即二者光强度相等，则满足关系式 $\rho_1=(1-\rho_1)^2\rho_2$ 。考虑到一般 ρ_1 非常小，所以 $(1-\rho_1)^2$ 接近于 1，因此，若保证两束光线振幅相等，只需满足 $\rho_1=\rho_2$ 即可。

$$\left(\frac{n_3-n_2}{n_3+n_2}\right)^2 = \left(\frac{n_2-n_1}{n_2+n_1}\right)^2 \quad (3.11)$$

化简后得介质薄膜的折射率满足 $n_3 = \sqrt{n_1 n_2}$ 。已知 n_1 介质代表空气， n_2 介质代表 Si， $n_1=1$ ， $n_2=3.84$ ，则 $n_3 = \sqrt{3.84} = 1.96$ 。但实际很难找到折射率刚好等于 1.96 而又满足半导体工艺要求的材料，因此综合考虑，选择了 SiO_2 作为增透膜材料，因为 SiO_2 折射率为 1.54，与所求的介质薄膜的折射率 n_3 比较接近且与现代半导体工艺相兼容。因此，总反射率 $\rho=1-(1-\rho_1) \times (1-\rho_2)=21.97\%$ ，由此可知，在设计了增透膜后，反射率大大降低。

若保证光线 a 和光线 b 相位相反,则需要合理控制 SiO_2 的厚度。依据光学知识^[48],光由光疏介质进入光密介质时,在界面处反射光会发生半波损失。考虑到空气、 SiO_2 和 Si 的折射率大小关系为 $n_1 < n_3 < n_2$, 因此光经 SiO_2 射向硅时,光在空气和 SiO_2 的界面以及 SiO_2 和 Si 的界面处都会发生半波损失。当光垂直射入 SiO_2 时,光线 a、b 的干涉情况和膜的厚度关系式为:

$$d = \begin{cases} 2k \frac{\lambda_0}{4n_3} & \text{干涉相长} \\ (2k+1) \frac{\lambda_0}{4n_3} & \text{干涉相消} \end{cases} \quad (3.12)$$

其中, d 代表增透膜的厚度, λ_0 代表光在空气中传播的波长, n_3 代表 SiO_2 的折射率, $k=0,1,2,3, \dots$ 。

当 $k=0$ 时, 增透膜的厚度 $d = \lambda_0 / 4n_3$, 将 λ_0 和 n_3 的数值带入公式, 可得 $d=105.52\mu\text{m}$, 光线 a、b 会干涉相消, 增透膜起到了增透的作用。当然若满足此条件, 要求光线垂直入射增透膜的表面, 当入射角很小时, 增透膜的增透作用也存在, 但效果不如垂直入射时。

3.2.4 防串扰隔离沟槽的设计

目前在一些高密度线性阵列光电探测器中的串扰一般分为两种: 光串扰和电串扰, 这些阵列单元间的光串扰和电串扰将直接影响到光电探测器的性能好坏^[49]。在本文中, 我们设计的光电探测芯片就是由两排光电二极管阵列组成。每个芯片大小为 $10\text{mm} \times 8\text{mm}$, 而沿长度方向上的光电二极管个数为 64 个, 单个光电二极管单元大小为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, 因此相邻两个光电二极管单元间的间距是很小的。若在保证每个光电二极管单元独立输出一个电信号, 作为单独像素点, 那么相邻两个光电二极管单元之间必须做一定的隔离措施, 以避免彼此间的相互干扰。本文中所采用的隔离措施是在相邻两个光电二极管单元之间增加一条隔离沟槽, 沟槽深度要稍大于外延层的厚度。这种方法可以有效的避免光串扰和电串扰对器件的影响。

光串扰是指当光线入射到光电二极管单元的表面, 由于入射角度较大, 光在本单元内被完全吸收前以入射、衍射或波导的方式进入相邻的光电二极管单元内被吸

收，产生多余的电信号，从而使得临近光电二极管的电流输出受到影响。光串扰的示意图如图 3.9 所示：

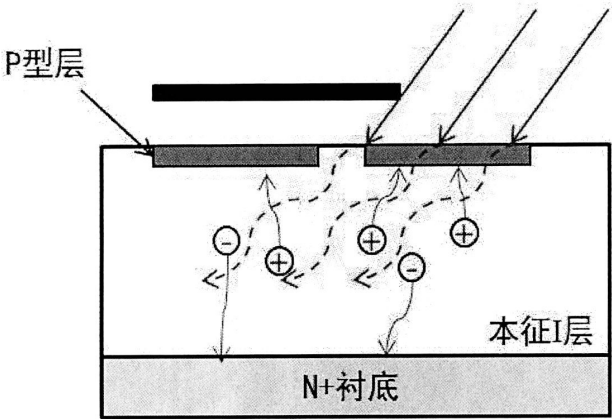


图 3.9 光串扰示意图

解决光串扰的方法有很多，常用的有微透镜法、制作金属遮蔽层结构等^[49]。本研究从工艺加工的难度、成本等角度考虑，舍弃了上述两种方法，采用了在单元间制作隔离沟槽的方法，利用 Si 的折射率相较于空气折射率较大的特点，通过光线在 Si 和空气的界面处发生全反射来避免光线入射到相邻单元，消除光串扰。隔离沟槽消除光串扰的示意图如图 3.10 所示：

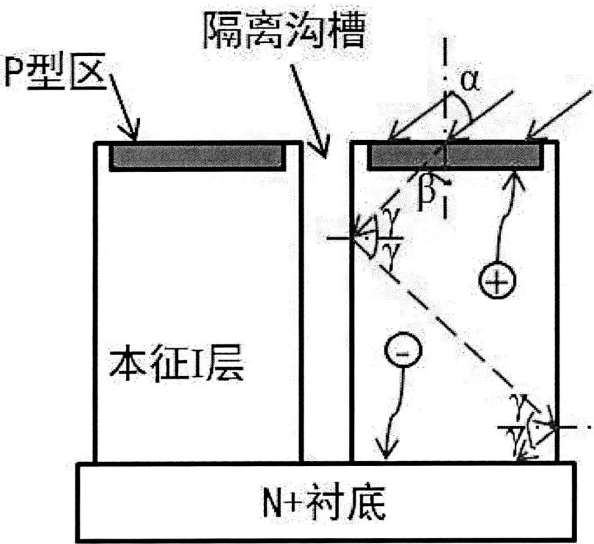


图 3.10 隔离沟槽消除光串扰的示意图

图 3.10 中, 隔离沟槽位于相邻两个光电二极管单元之间, 沟槽深度与本征层等厚, 沟槽内的介质为空气。当光线由光电二极管表面倾斜入射到本征 I 层, 即光子的主要吸收区时, 会入射到 Si 和空气的界面。根据光学相关知识, 光在 Si 和空气的界面处发生全反射的条件是入射角必须大于或等于发生全反射时的临界角。临界角和两种介质折射率的关系如公式 3.13 所示:

$$C = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \quad (3.13)$$

n_1 代表空气的折射率, 约为 1, n_2 代表硅的折射率, $n_2=3.84$ 。很容易求得光从光密介质 Si 入射光疏介质空气, 发生全反射的临界角 C 为 15.05° 。若不考虑 P 型层对光路的影响, 光从空气入射到二极管表面时发生折射, 根据折射定律:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (3.14)$$

入射角 $\alpha \leq 90^\circ$, 则折射角 $\beta \leq 15.05^\circ$, 根据几何知识, 光线在侧壁从 Si 入射到空气中的入射角 $\gamma \geq 74.95^\circ$, 所以无论光线以何种角度入射光电二极管表面, 光线在侧壁上的入射角 γ 始终大于临界角 C 。光线会在 Si 中一直发射全反射, 直到被完全吸收为止。

电串扰是指光线入射到光电二极管的光子吸收区, 产生的非平衡载流子发生横向扩散, 进入相邻的光电二极管单元中, 从而使得临近单元的电流输出受到影响。电串扰的示意图如图 3.11 所示:

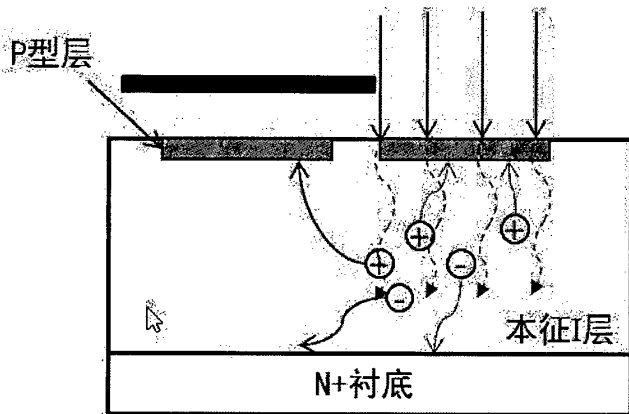


图 3.11 电串扰的示意图

解决电串扰的影响应该从阻止非平衡载流子的横向扩散角度入手，常用的方法有制作保护环结构或者隔离沟槽结构等。本研究采用沟槽隔离的方式从空间上直接阻止临近光电二极管单元间的非平衡载流子横向扩散，避免电串扰的影响。隔离沟槽消除电串扰的示意图如图 3.12 所示：

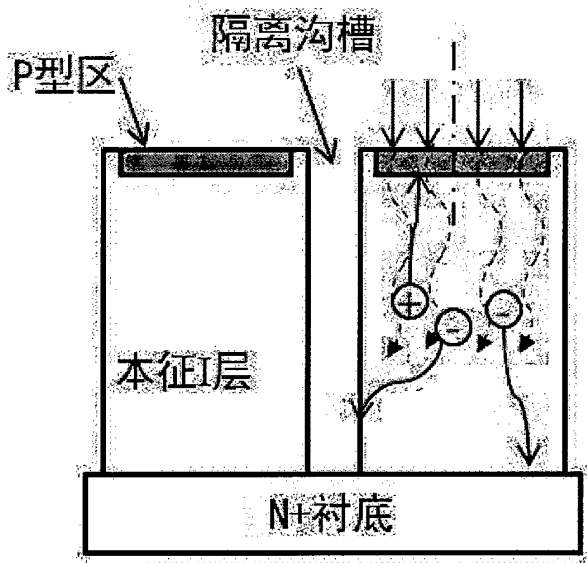


图 3.12 隔离沟槽消除电串扰的示意图

由上图可知，由于隔离沟槽的存在，光在一个光电二极管单元内产生的光生载流子很难再横向扩散到临近光电二极管单元，只能在此光电二极管内纵向扩散，因此隔离沟槽很好的避免了电串扰对器件的影响。

3.3 芯片和 PCB 板的版图设计

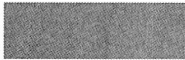
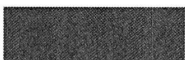
依据对芯片的设计要求，利用集成电路设计软件 Tanner Tools Pro 中的 L-edit 软件包绘制了芯片和 PCB 板的版图,为后续流片工艺中光刻掩膜板的制作提供参考。

3.3.1 芯片的版图设计

整个光电探测芯片的工艺制造过程涵盖了 5 次光刻，每次光刻所使用的光刻掩膜板都不相同，各版图的打印版号、名称、明暗场情况和图例说明见表 3.1。

表 3.1 版图的信息说明

打印版号	版图名称	明、暗场说明	图例
mask1	low	明场	

mask2	high	明场	
mask3	contact	明场	
mask4	aluminum	暗场	
mask5	trench	明场	

一个完整的光电探测芯片的版图如图 3.13 所示：

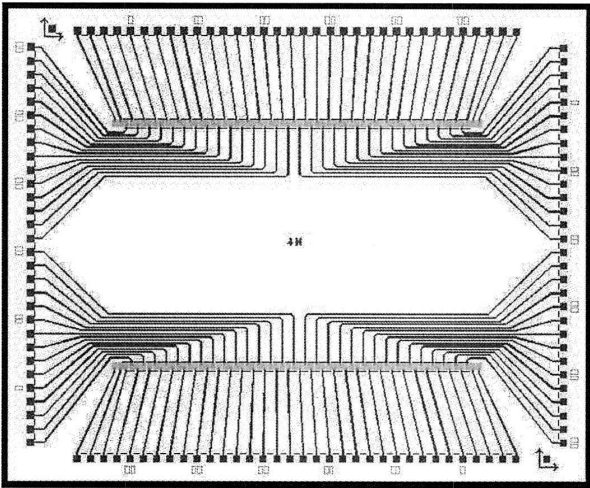


图 3.13 光电探测芯片版图

整个光电探测芯片的尺寸为 10mm×8mm。图中绿色部分代表光电二极管单元阵列，共 2 排，每排 64 个单元，两排阵列的间距为 4.1mm。深红色的外边框代表划片槽，宽度为 200μm，蓝色区域代表铝引线，宽度为 20μm。所有光电二极管单元的阳极相互独立，由一根铝引线连接到周围的铝焊盘上。铝焊盘的分布情况为：左右两侧各有 30 个铝焊盘，上下两侧各有 34 个铝焊盘，总共 128 个，与光电二极管单元的数目相同。所用光电二极管共有一个阴极，阴极位于芯片的背面，即背面铝层。

光电二极管单元阵列的细节版图如图 3.14 所示：

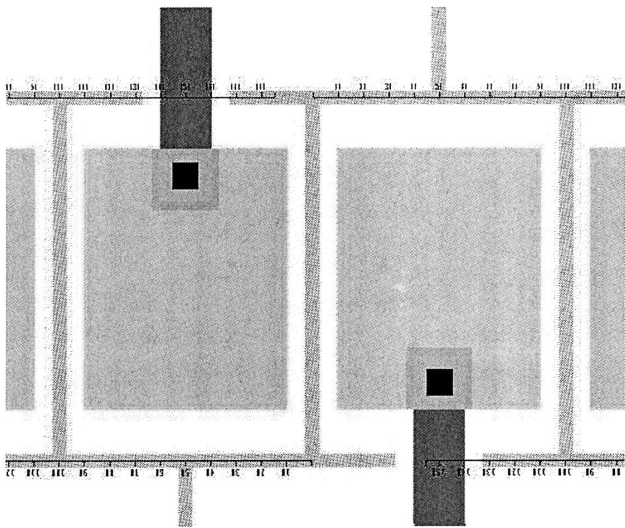


图 3.14 光电二极管阵列细节版图

上图中，绿色部分为光电二极管的感光单元，尺寸为 $100\mu\text{m}\times80\mu\text{m}$ ，相邻两感光单元相距 $20\mu\text{m}$ 。淡粉色线条代表隔离槽，隔离槽为矩形，除铝引线经过区域开口外，包围着感光单元，隔离槽宽度为 $5\mu\text{m}$ 。黑色方形区域为接触孔，尺寸为 $10\mu\text{m}\times10\mu\text{m}$ 。

绘制的总体版图如图 3.15 所示：

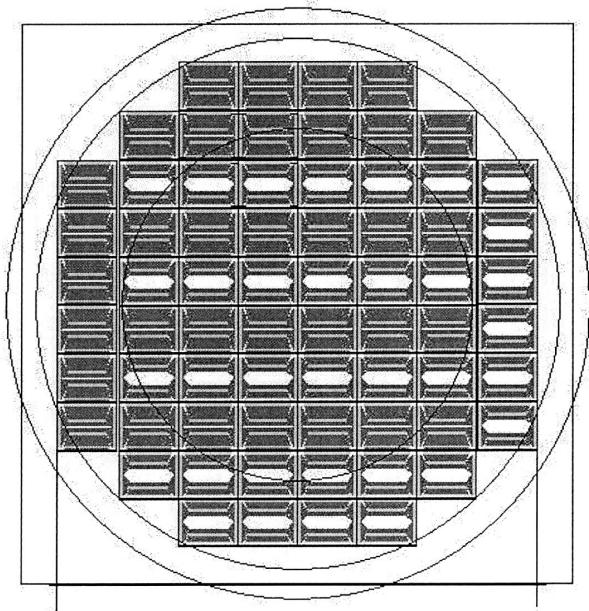


图 3.15 总体版图

如上图所示，总共 68 片光电探测芯片制作在一片 4 英寸的外延片上。图中最外侧的正方形代表光刻掩模板的轮廓。

版图中的对准标记如图 3.16 所示：

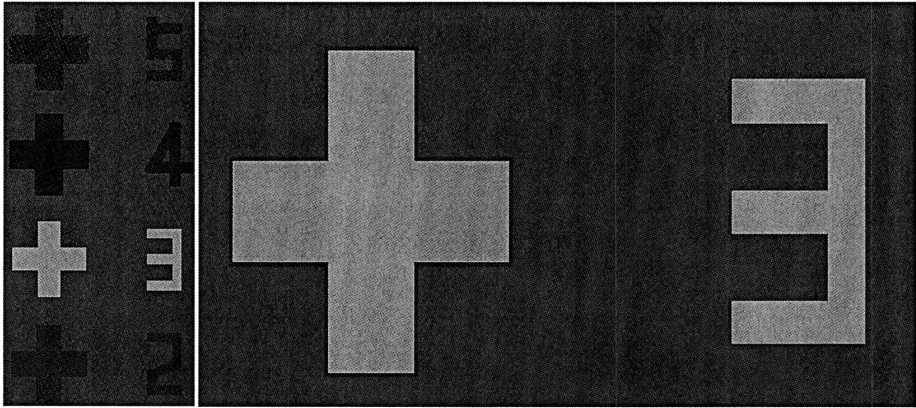


图 3.16 对准标记版图

上图中，右侧图形为左侧图形的局部放大图。在光刻过程中，对准标记用来快速定位并完成精确的套准，即兼具粗对准和精对准的双重功能^[50]。对准的标记常采用“十”字或者“L”字图形，本文中采用的是“十”字图形作为对准标记。在对准过程中，由于套准的前后关系，精对准标记在尺寸上有略微变化，准备套准十字（大十字）比目标十字（小十字）的尺寸大，这由套准精度决定。本文在版图绘制过程中，大十字比小十字宽 $4\mu\text{m}$ ，这样十字条两边空 $2\mu\text{m}$ ，在精度的把握上是可行的。

3.3.2 PCB 板的版图设计

本文设计两块 PCB 板，一块 PCB 板用来封装芯片，另一块用来做转接板，便于对光电探测芯片进行光电测试和降水粒子测量。

PCB 封装板的设计图如图 3.17 所示：

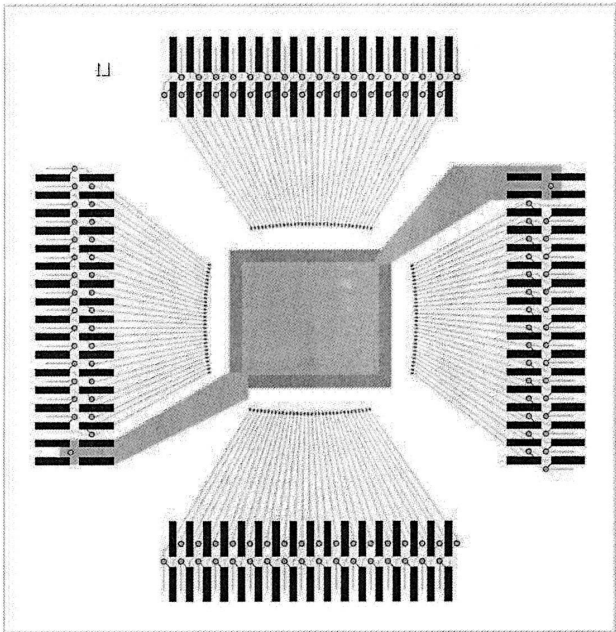


图 3.17 PCB 封装板版图

整个PCB板的总尺寸为45mm×45mm。中心的蓝色区域为裸露的铜焊盘，用来粘接芯片；粉红色点代表bonding焊盘，其中上侧的粉红色焊盘为34个，左右侧的为30个；红色为表贴双排针的焊盘，每侧均为34个，其中8个与中心的大铜焊盘相接，用作阴极的引出管脚，其余128个与粉红色的bonding焊盘相连，作为阳极的引出管脚。

PCB转接板的设计图如图3.18所示：

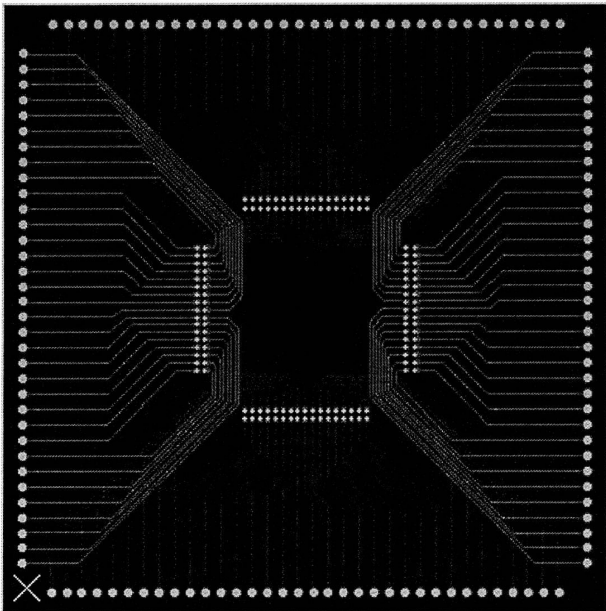


图3.18 PCB转接板版图

为了便于对光电探测芯片进行光电测试和降水粒子测量，设计了PCB转接板。红色和蓝色线条代表引线，绿色的圆点代表管脚插孔。

3.4 本章小结

本章首先介绍了降水粒子测量的基本原理，详细的阐述了降水粒子检测的方案制定过程，降水粒子直径和间距的测量实现方法。针对这两个降水粒子参数的测试原理提出了对光电探测芯片的结构设计要求。

接下来详细介绍了光电探测芯片3部分结构的设计细节，针对光电二极管阵列的结构设计部分，本研究兼顾器件性能和加工工艺难度的考虑，采用低掺杂本征外延片作为PIN光电二极管的加工材料，并对二极管每层结构的参数做了说明。针对增透膜的设计部分，本研究先从理论入手，论证了增透膜的增透原理，随后对增透膜的厚度选取做了详细推导。针对防串扰隔离沟槽设计部分，首先对光串扰和电串扰的产生机理做了分析，随后就如何避免光串扰和电串扰的影响给出了解决办法，即通过刻蚀隔离沟槽来进行光学隔离和物理隔离。

最后介绍了光电探测芯片和PCB板的版图绘制。针对版图中各区域对应的结构以及各结构的设计参数做了说明。

第四章 光电探测芯片制备中的关键工艺

4.1 工艺流程设计

根据中科院半导体研究所半导体集成技术研究中心拥有的芯片制造设备以及所要加工的光电探测芯片的结构性能要求，设计了整个器件的半导体工艺流程。为了提高工艺的可重复性和可行性，进行了多次工艺参数调整，最终制定出成品率较高的工艺流程。工艺流程的详细介绍如下：

（1） 材料准备

在芯片的制造中，所采用的是一块4英寸的外延片。衬底厚度为450 μm ，晶向为<111>方向，掺杂元素为As，电阻率约为0.002 $\Omega\cdot\text{cm}$ ~0.004 $\Omega\cdot\text{cm}$ ，属于N型重掺杂。外延层厚度20 μm ，电阻率设为100 $\Omega\cdot\text{cm}$ ，属于N型低掺杂。工艺流程示意图如下所示：

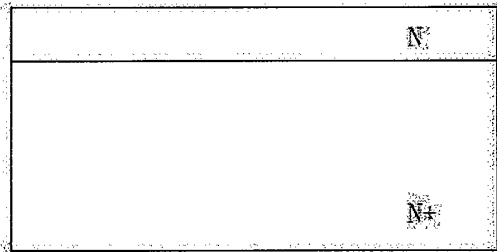


图4.1 外延硅片

（2） 外延层表面制备一层氧化硅

这层氧化硅是通过场氧化工艺制备而成，其作用是作为离子注入的掩膜层。氧化层的厚度约550nm，氧化温度约1000 $^{\circ}\text{C}$ 。工艺流程示意图如下所示：

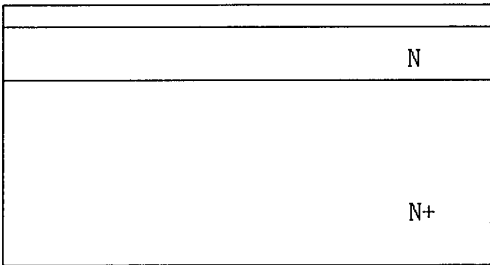


图4.2 制备氧化硅薄膜

（3） 制备P型层

P型层是一层轻掺杂的薄膜，是通过离子注入工艺实现的。在进行离子注入之前需

要刻蚀出P型区窗口。因此,需要经过光刻工艺(mask1)如图4.3a;刻蚀氧化层窗口,如图4.3b;最后进行低掺杂离子注入工艺,如图4.3c。在刻蚀氧化层时所采用的是湿法腐蚀工艺,即用氢氟酸缓冲液(Buffered Oxide Etchant, BOE)刻蚀掉暴露的二氧化硅层。在离子注入工艺中,注入的杂质元素为硼,注入能量为40KeV,注入剂量为 $5E14cm^{-2}$ 。

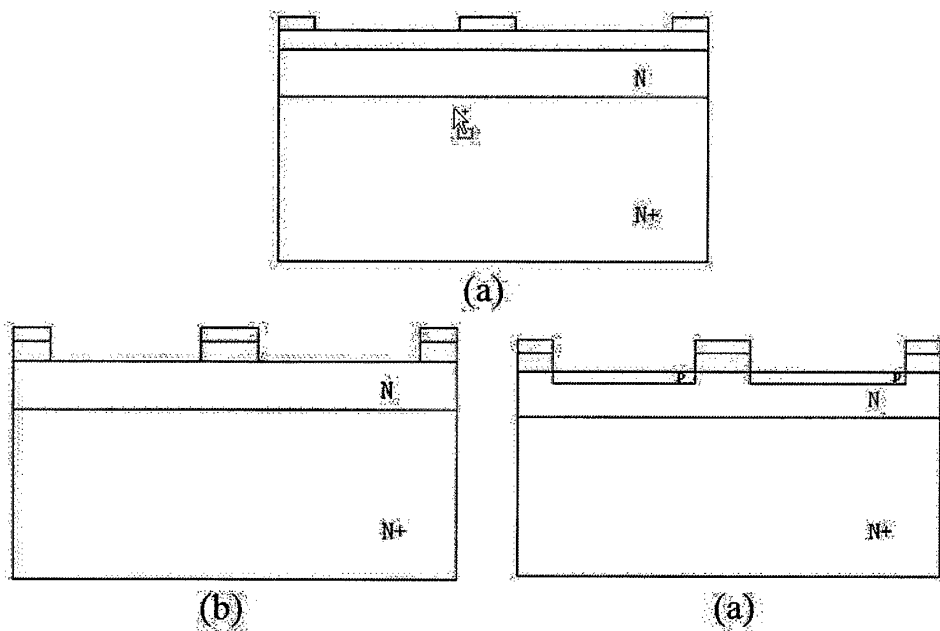


图4.3 制备P型层

(4) 制备重掺杂P型区

重掺杂P型区的作用是为了和铝引线形成良好的欧姆接触,因此,这一步工艺需要进行高掺杂离子注入。在进行离子注入工艺之前,需要去除之前的光刻胶,所使用的设备为微波等离子去胶机Plasma System300,功率800W,时间8分钟。随后清洗硅片,进行第二步光刻(mask2),形成高掺杂离子注入区,利用剩余的光刻胶层做掩膜层进行离子注入。高掺杂离子注入工艺中,注入杂质元素为硼,注入能量100KeV,注入剂量为 $7E15cm^{-2}$ 。工艺图如下所示:

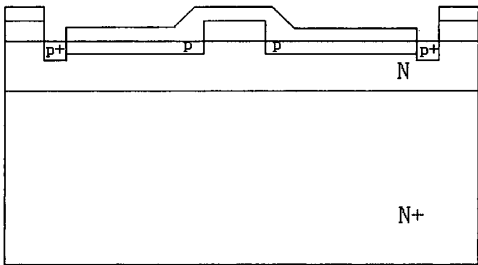


图4.4 制备重掺杂P型区

(5) 制备增透膜

增透膜是一层氧化硅，很薄，约105 μm ，通过热氧化工艺制作。在热氧化之前，需要对外延片进行去胶、清洗（工艺同步步骤4）。工艺图如下所示：

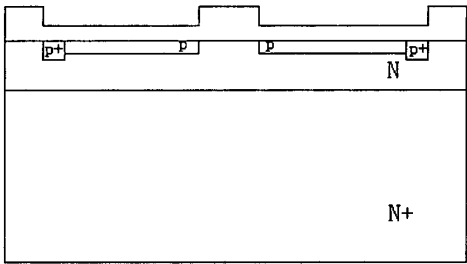


图4.5 制备增透膜

(6) 制备接触孔

制备接触孔是为了将重掺杂P型区与铝引线连在一起。在将P+区顶部的氧化硅去除前，需要进行第三步光刻（mask3），得到接触孔的刻蚀窗口。最后通过诱导耦合等离子体(Inductive Coupled Plasma, ICP)刻蚀氧化层，工艺图如下所示：

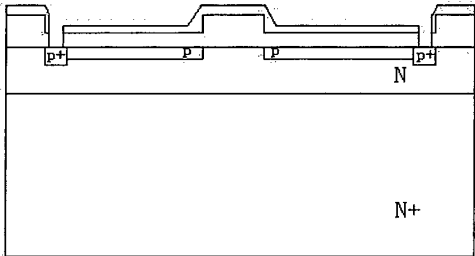


图4.6 制备接触孔

(7) 制备铝电极

铝电极用来作为PIN光电二极管的阳极和阴极，通过溅射工艺制备而成。溅射铝层前需要先进行去胶、清洗（工艺同步步骤4），随后利用磁控溅射设备对外延片的正面和背面分别溅射一层铝，接着对铝层做合金化处理。正面厚度约 $1\mu\text{m}$ ，背面厚度约 $3\mu\text{m}$ ，如图4.7a。利用第四步光刻（mask4）对正面铝层进行图形化，最后利用铝膜湿法刻蚀工艺，即含有磷酸、硝酸、醋酸、水和湿化剂的铝刻蚀液腐蚀铝层，如图4.7b。

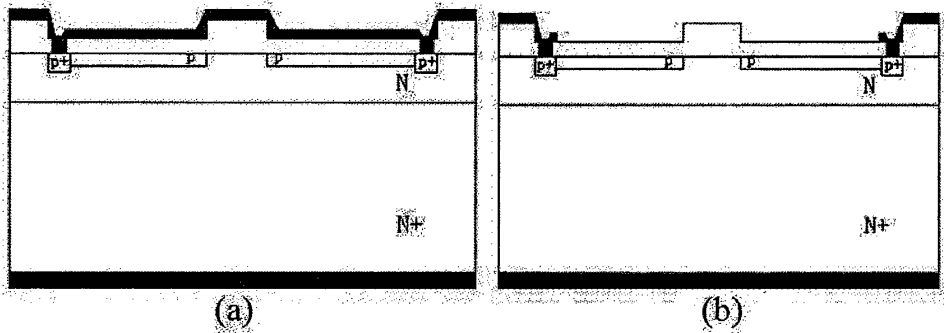


图4.7 制备铝引线

(8) 制备隔离沟槽

隔离沟槽是位于两个相邻PIN光电二极管间的一条深槽，通过ICP(Inductive Coupled Plasma)刻蚀工艺制备而成。在刻蚀前，需要先进行去胶、清洗（工艺同步步骤4），随后利用第五步光刻（mask5）图形化刻蚀窗口。在ICP刻蚀工艺中，首先对氧化硅进行刻蚀，刻蚀深度为 $550\text{nm}+160\text{nm}$ ，如图4.8a；然后对外延层和衬底进行刻蚀，刻蚀深度约 $30\mu\text{m}$ ，如图4.8b。

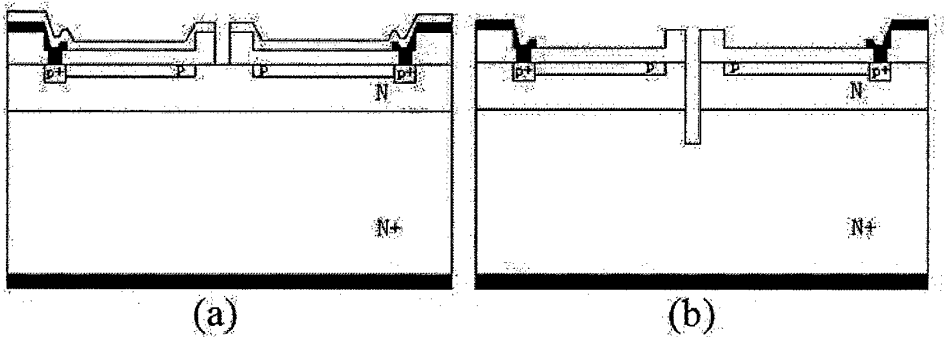


图4.8 制备隔离沟槽

(9) 退火

退火的目的是为了修复晶体损伤和注入杂质的点激活，退火温度低于扩散掺杂时

的温度以防止横向扩散。退火工艺在充满氢气气氛的退火炉中进行，退火温度为 1000°C 。

最后利用划片机对晶圆进行切割，得到最终需要的光电探测芯片，芯片图片如图4.9所示：

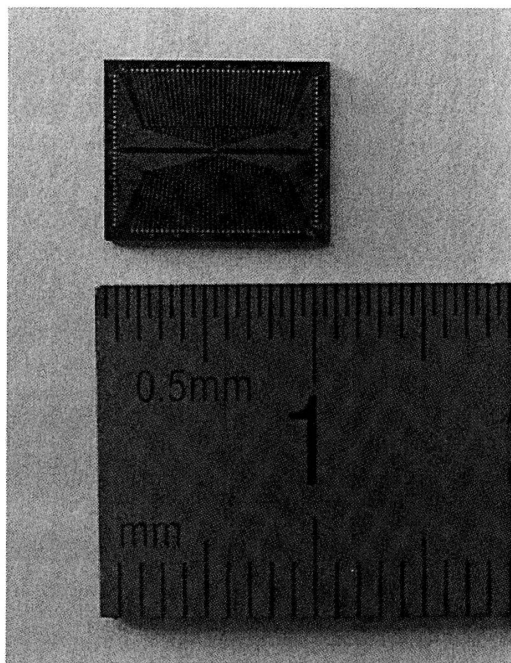


图4.9 单个光电探测芯片图片

4.2 关键工艺研究

4.2.1 薄膜工艺

薄膜工艺是半导体工艺中的重要一步，薄膜的制备是后续刻蚀工艺的加工基础。薄膜从制备原理上可分为物理方法和化学方法，物理方法即常用的物理气相沉积（PVD），如真空蒸发、磁控溅射等，化学方法主要有热氧化、电化学镀膜、化学气相沉积（CVD）。制备的薄膜材料主要包括氧化硅、氮化硅以及Al、Cu、Au等金属薄膜，这里对本研究中所涉及到的薄膜工艺做详细介绍。

1) 热氧化

热氧化生长是非常简单的化学反应，此反应在常温环境下也能发生。但是，在实际应用中，需要用阶梯式升温方法，在合理时间内获得高质量的氧化层，因此，氧化温度一般维持在 900°C 到 1200°C 之间。在此高温下，衬底硅和氧气或水汽等气体进行

化学反应，在硅片的表面形成一层高质量的致密氧化硅薄膜。

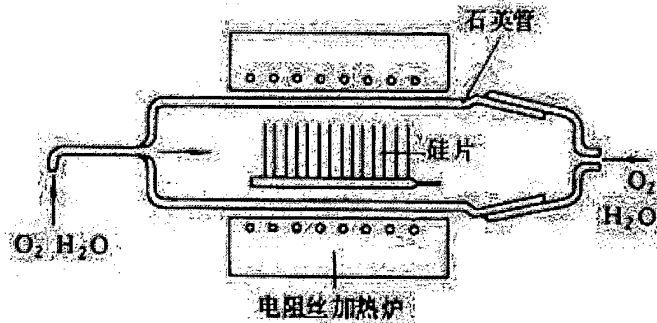


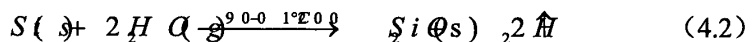
图4.10 热氧化工艺设备示意图

热氧化方法一般分为两种^[51]：干氧化法和湿氧化法。干氧化法是指在高温条件下，硅片直接与氧气反应生成氧化硅薄膜。化学反应方程为：



刚开始时，硅原子和氧原子结合，生成氧化硅，这一阶段的生长是线性的。随着硅表面生长的一层氧化硅层阻挡了硅原子和氧的接触，扩散的氧原子必须移动更多的路程才能到达晶圆，氧化硅膜的生长率会变慢，这一阶段的生长曲线是呈抛物线形的。因此，生长厚氧化膜比生长薄氧化膜需要更多的时间。例如，在1200℃时，生长0.2μm需要6分钟，但厚度增加到0.4μm就需要220分钟。所以干氧化法的最大缺点就是生长速度慢，但这种方法生长的氧化膜致密性良好，均匀性和重复性也很好，并且与光刻胶能够良好的接触粘附。

湿氧化法是指在高温条件下，用水蒸气（H₂O），与硅片反应生成氧化硅薄膜。在气态时，水以H-OH基离子的形式存在，氢氧基离子扩散穿过晶圆氧化层的能力比氧气快，因此湿氧化法是一种比较快的硅氧化方法，化学反应式为：



本研究中用到了两步热氧化工艺，干氧化法和湿氧化法都有涉及。第一步氧化工艺是在外延层表面氧化一层氧化硅薄膜，作为后续工艺中离子注入的掩膜层，膜厚550nm，采用干氧和湿氧结合的场氧化工艺进行。第二步氧化工艺是在P型层表面氧化一层二氧化硅增透膜，膜厚105nm，采用干氧化工艺进行。

2) 真空蒸发

真空蒸发技术常被用在较低集成度电路或分立元件的金属淀积上。真空蒸发工艺

是在真空反应室里进行的，真空反应室是一个不锈钢密封容器或钟形的石英容器。反应室里有一套晶圆夹持装置、金属蒸发装置、遮挡板、加热器、淀积厚度、速度监控器等。在所有的蒸发材料中，铝最为常见，为了得到均匀的淀积层，铝的真空蒸发需在真空度为 5×10^{-5} 至 1×10^{-9} 托的环境下进行，甚至某些真空蒸发系统要在超高的真空度（ 10^{-9} 托以下）下进行。

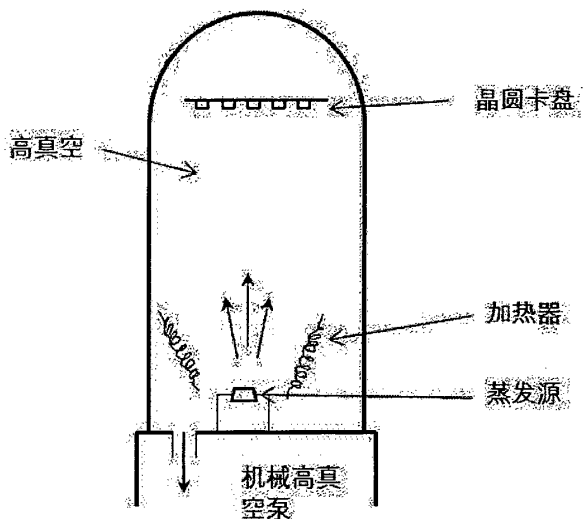


图4.11 真空蒸发器

3) 溅射淀积

溅射淀积和真空蒸发一样，需在真空下进行，溅射属于一种物理工艺。将氩气冲入真空反应室内，氩原子被电离成正电荷，这些带正电的氩离子被接地的靶材吸引，加速冲向靶材。在加速过程中，这些离子由于引力的作用而获得动量，轰击靶材，引起上面的原子分散，靶材上的原子和分子进入反应室，这就是溅射过程。这些被轰击出的原子和分子散布于反应室内，其中的一部分会渐渐的停落在晶圆上，形成薄膜。溅射工艺设备原理图如下所示：

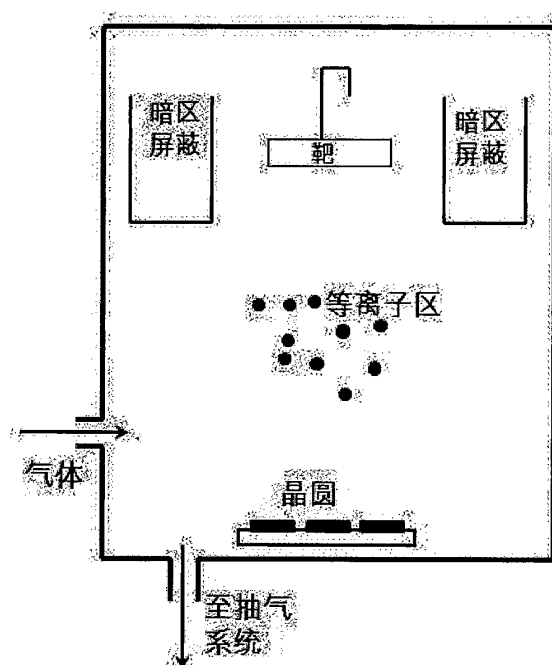


图4.12 典型溅射工艺设备

溅射所形成的薄膜的黏附性比蒸发工艺好很多。轰击出的原子能量很高，反应室内的等离子环境具有清洁晶圆表面的作用，这些因素增强了溅射所形成的薄膜的黏附性。

本实验中，铝层就是采用溅射工艺形成的，正面铝层厚度约 $1\mu\text{m}$ ，背面铝层厚度约 $3\mu\text{m}$ 。

4.2.2 离子注入工艺

一般在半导体晶圆的表面形成结的方法有两种：热扩散和离子注入。热扩散是一个化学过程，掺杂原子被引入到晶圆的表面，借助浓度梯度和系统内部的足够能量扩散到晶圆的内部。离子注入是一个物理过程，掺杂的原子被离化、分离、加速，形成离子束流，离子束对晶圆表面进行物理轰击，然后在表面以下停止，如图4.11所示。离子注入相较于热扩散拥有自己独特的优势，首先，离子注入过程没有侧向扩散，且工艺在接近室温下进行。另外，离子注入使得较宽范围浓度的掺杂成为可能，可以对掺杂的数量和位置进行精确的控制。

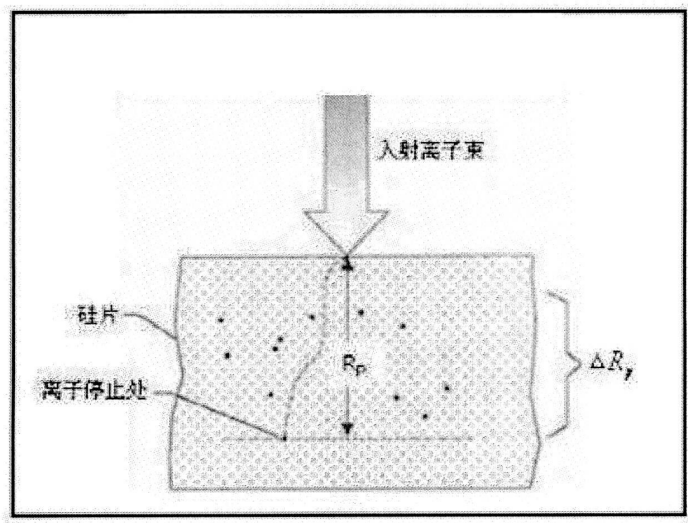


图4.13 离子注入硅片内部示意图

一台离子注入机由多个复杂精密的子系统集成，包括离子注入源、离子反应室、质谱分析仪、加速管、束流聚焦、束流扫描、终端和靶室等。

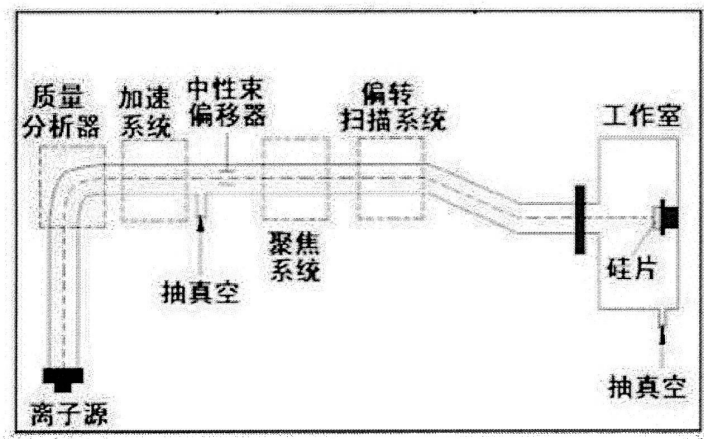


图4.14 离子注入系统示意图

本研究中用到了两次掺杂，一次低掺杂和一次高掺杂，两次掺杂都是利用离子注入工艺实现的。在离子注入完成以后，晶圆表面会出现一些缺陷损伤，为了修复损伤和电激活注入的杂质，一般都需要对晶圆进行退火热处理。

4.2.3 刻蚀工艺

刻蚀工艺主要分为干法刻蚀和湿法刻蚀两大类，两种刻蚀方法的目的都是将光刻掩膜板上的图形精确无误的转移到晶圆的表面，有选择性的将光刻胶暴露区域的晶圆

表面去除掉。刻蚀工艺中有化学的、物理的或者两种反应相结合的方法，不同的刻蚀原理对应着不同的刻蚀方法。

湿法刻蚀是将经过光刻显影后保留有特定图案的晶圆放入装有刻蚀剂的容器中一段时间，随后传送到冲洗设备中将残留的酸去除，再送到最终冲洗台，冲洗甩干。一般用于湿法刻蚀的产品，其特征图形尺寸都大于 $3\mu\text{m}$ ，低于 $3\mu\text{m}$ 时，考虑到精度和控制的需要必须采用干法刻蚀。

干法刻蚀(dry etching)只是一个通称术语，指的是以气体为主要媒体的刻蚀技术，晶圆在刻蚀过程中不需要液体化学品或者清洗，整个晶圆在干燥的状态下进出系统。干法刻蚀技术主要分为三种：等离子体刻蚀、离子铣刻蚀和反应离子刻蚀。等离子体刻蚀是一种化学工艺，而离子束刻蚀是一个物理过程，反应离子刻蚀结合了等离子体刻蚀和离子束刻蚀的原理，系统具有离子铣的功能，但在结构上又与等离子体刻蚀相似。

本研究中对二氧化硅层的刻蚀采用的是湿法腐蚀工艺，刻蚀剂是氢氟酸(HF)和氟化铵(NH_4F)的混合液，这种刻蚀溶液通常称为缓冲氧化物刻蚀(buffered oxide etch)或者BOE。其中，氢氟酸是基本的刻蚀剂，氟化铵可以控制溶液的酸碱度，并且可以补充氟离子的缺失，维持稳定的腐蚀效果。一般BOE中氢氟酸和氟化铵的配比按1: 6混合。

对于铝层的刻蚀采用的是湿法刻蚀工艺，选择的刻蚀液主要以磷酸为主。因为铝和磷酸反应会生成氢气，这些气泡附着在晶圆表面会阻碍刻蚀反应，导致相邻铝引线短路，并形成铝点。为了缓和这个问题，铝刻蚀液中除磷酸外，又添加了硝酸、醋酸、水，其配比为16: 1: 1: 2。除此之外，在刻蚀过程中，还会通过搅拌或上下移动晶圆舟等方式去除气泡。

对隔离沟槽的刻蚀采用的是感应耦合等离子体刻蚀(Inductively Coupled Plasma, ICP)的方法进行。ICP刻蚀属于干法刻蚀的一种，其工作原理是通过高密度等离子体引起的化学反应和反应气体离子轰击所产生的物理作用进行刻蚀，具有刻蚀速率高、各向异性好、选择比高、大面积均匀性好的优点，可进行精细的线条刻蚀，并获得较好的刻蚀面形貌。本实验主要采用北方微电子DSE 200等离子刻蚀机对隔离沟槽进行刻蚀。用正胶作为硅刻蚀掩膜刻蚀N型<111>单晶硅，采用 SF_6 作为硅的刻蚀气体， C_4F_8 作为钝化气体进行刻蚀，通过调整工作电压、射频功率以及气体流量等工艺参数来确

定均匀性、选择比和刻蚀速率。实验中所采用的最佳刻蚀效果的工艺参数如表4.1所示：

表4.1 ICP刻蚀硅的工艺参数

气体	腔室压强	射频功率	下极板功率	温度	时间
C ₄ F ₈	50mT	1800W	0	10℃	1.5s
SF ₆	50mT	2000W	30W	10℃	1.8s

射频频率为1000Hz，占空比为30%，整个刻蚀过程和钝化过程循环周期为100次。

因为隔离沟槽宽度为5μm，刻蚀深度约30μm，即刻蚀的深宽比约为6：1，所以刻蚀的工艺难度是比较大的。在刻蚀完成后，利用中科院半导体所集成技术中心的NanoSEM650扫描电子显微镜对隔离沟槽的刻蚀结果进行观察和测量，结果显示隔离沟槽的刻蚀深度为27μm，小于之前所要求达到的30μm的刻蚀深度，尽管如此，但基本满足了防串扰隔离的深度要求。显微镜测试结果如图4.14所示：



(a) 侧视图 (b) 俯视图

图4.15 SEM显微镜对隔离沟槽的拍摄图片

4.3 本章小结

本章首先介绍了光电探测芯片的加工工艺流程设计，其中，几乎涵盖了所有的半导体工艺步骤。包括氧化、光刻、刻蚀、离子注入、薄膜淀积、金属化等工艺都有涉及。本章对每一步半导体工艺都做了简要描述，并借助半导体制造工艺图来做了详细说明。

然后针对其中所涉及的关键工艺又做了详细研究，包括薄膜工艺、离子注入工艺和刻蚀工艺，对每一步工艺的概念、加工原理和工艺参数都进行了详细阐述和说明，

对部分加工结果进行了校对和验证。

第五章 光电探测器件的封装设计

当晶圆表面上的芯片已完成晶圆电测及确定了电路功能运行正常后，芯片将会被封装到一个单独的保护性封装体中，与其他的器件以混合形式安装在一起或直接与印制电路板连接。本章将描述用于保护芯片和将芯片进行电连接的封装及其工艺。

5.1 封装工艺

5.1.1 粘片

粘片的目的是在芯片和封装体之间形成牢固的物理性连接，在芯片和封装体之间形成传导性和绝缘性连接，作为介质将芯片上产生的热量传导到封装体中。

本实验中采用的是环氧树脂粘贴法，使用粘稠的液体—环氧树脂黏合剂，将光电探测芯片粘贴到PCB封装板上，这种粘合剂中掺入了银粉，是电和热的良好导体。粘贴好的芯片如图5.1所示：

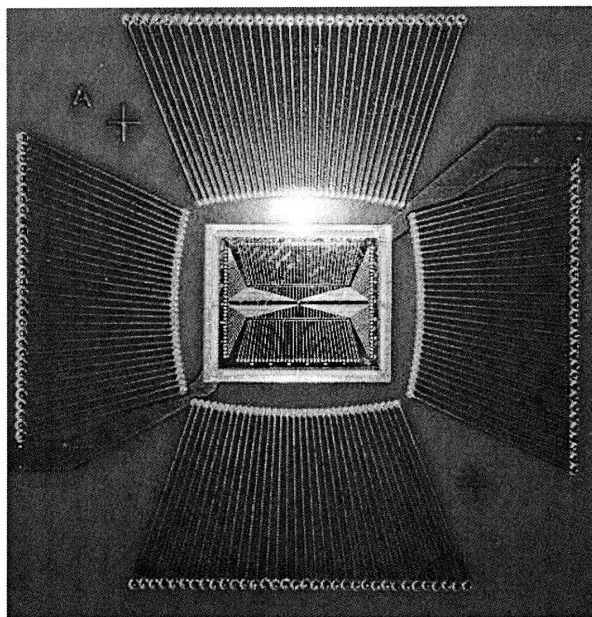


图5.1 粘贴好的芯片照片

首先用针形点浆器在粘片区沉积一层环氧树脂黏合剂，用真空细吸笔将芯片吸起放入粘片区的中心；然后向下挤压芯片使下面的环氧树脂形成一层平整的薄膜；最后将器件放入烤炉内，升至特定温度使环氧树脂固化。

5.1.2 连线压焊

芯片和封装体的粘片完成后，下一步就是连线压焊工艺。在连线压焊中，一条直径为0.7~1.0mil的细线首先被焊到芯片的压焊点上，然后再延伸到封装体的内部引脚上，最后线被剪断，在下一个压焊点重复整个过程。总共有上百条线要被精确的压焊在压焊点和封装体的内部引脚上。整体图如图5.2所示：

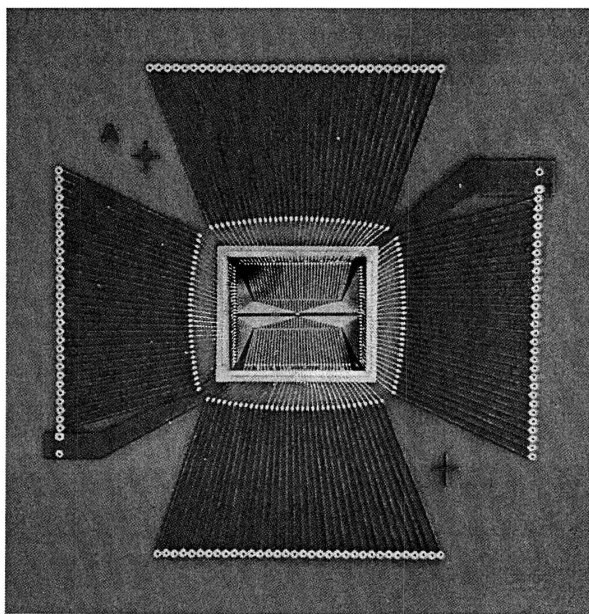


图5.2 连线压焊整体图

连线压焊通常使用金线或铝线，两种材料的导电性和延展性都很强，在满足电学要求的情况下能够经得住压焊过程中产生的变形且保持牢固可靠。本实验中采用的是铝线压焊，超声波加热法。铝线尽管在传导性和耐腐蚀性方面不如金线，但铝线成本低，且与铝材料的压焊点同属一种金属，不易受腐蚀影响。另外铝的压焊温度比金低，这使得和环氧树脂黏合剂粘片的工艺更兼容。显微镜下的压焊照片如图5.3所示：

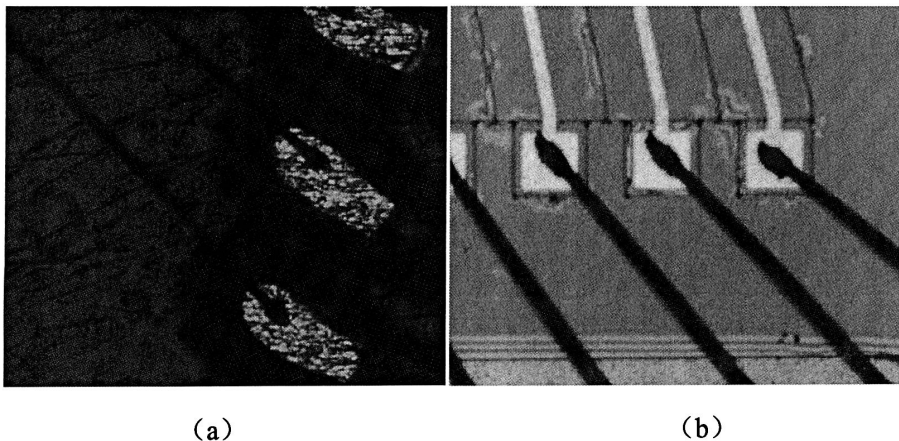


图5.3 PCB板和芯片上压焊点的显微镜照片

图（a）表示的是PCB板上压焊点图，放大倍数100倍；图（b）表示芯片上的压焊点图，放大倍数为100倍。

5.2 玻璃盖板的封装

为了保护压焊线以及芯片，需要用玻璃盖板将整个芯片密封起来。在粘贴玻璃盖板前需要将一黑色方形塑料垫圈粘贴到PCB板上，其作用是避免玻璃盖板接触到压焊线。方形塑料垫圈的对角必须与PCB板上的两个十字完全重合，整个粘贴过程是在光学显微镜下进行的。粘贴好的塑料垫圈图片如图5.4所示：

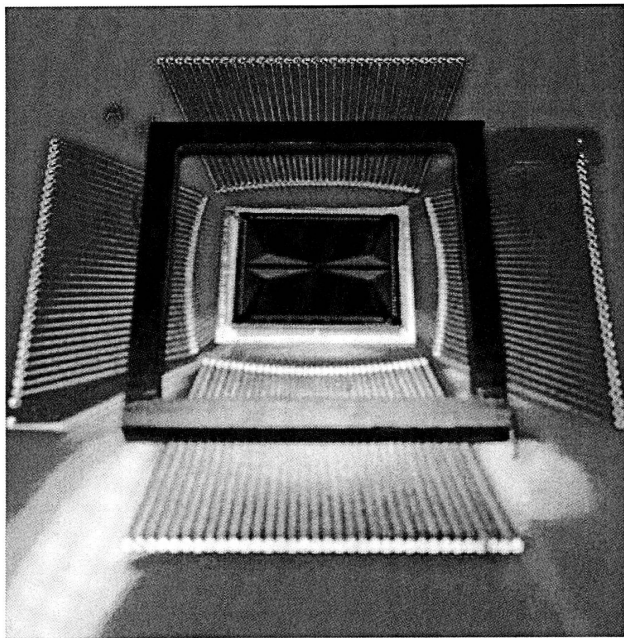


图5.4 粘贴好的塑料垫圈图片

玻璃盖板是一块镀铬的石英玻璃板，方形，中间有两条狭缝，将玻璃盖板粘贴到塑料垫圈上，保证两条狭缝与芯片中两排光电二极管重合，最终粘贴好的玻璃盖板如图5.5所示：

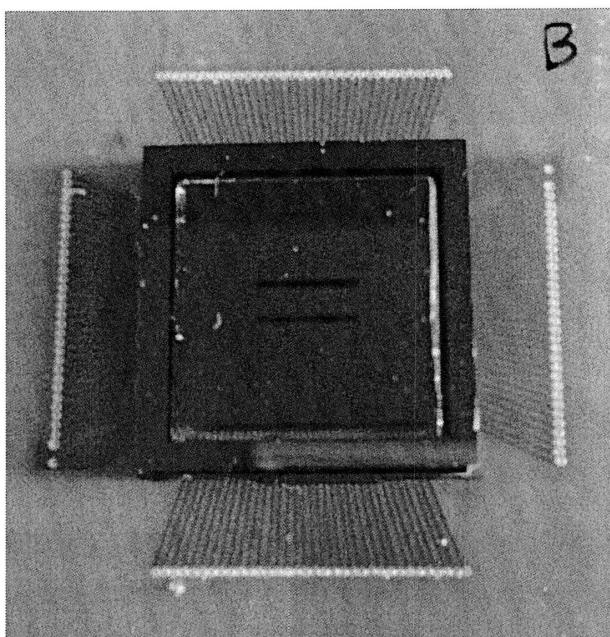


图5.5 玻璃盖板粘贴照片

5.3 PCB 封装板和 PCB 测试板的衔接

因为PCB封装板上相邻引脚的间距很小，为了便于测试，需要将PCB封装板连接到一块拥有标准引脚间距的PCB测试板上。PCB测试板的照片如下图所示：

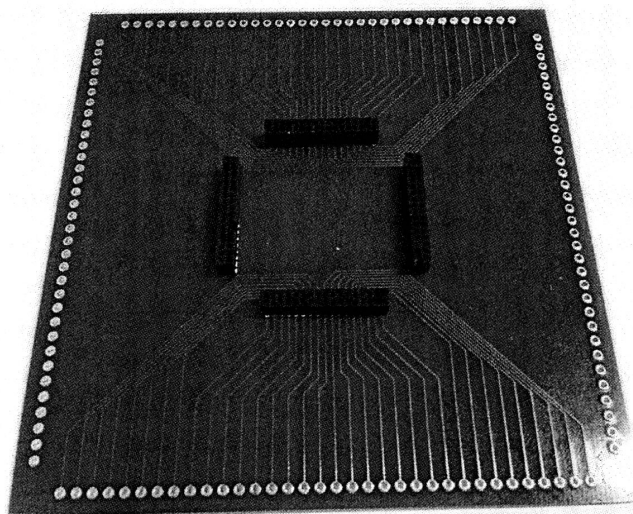
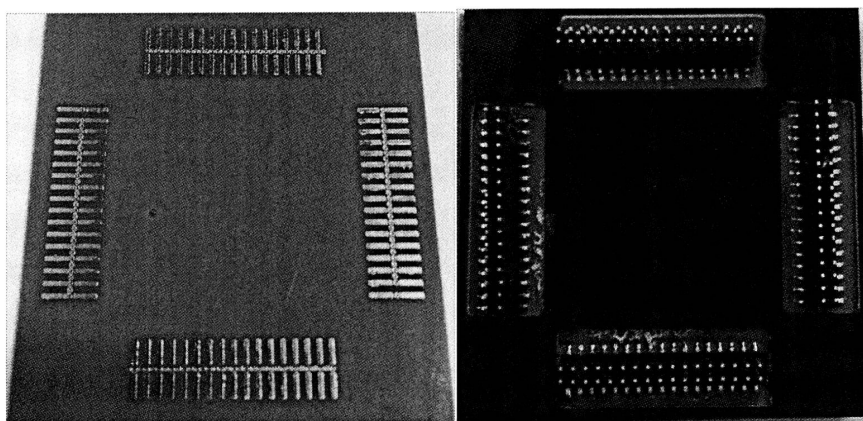


图5.6 PCB测试板照片

PCB测试板上的四排黑色插孔用来和PCB封装板对接。利用表面贴装技术，即SMT(Surface Mounted Technology)在PCB封装板的背面焊盘表面焊接上双排针，焊接前后的图片如下所示：



(a) 焊接前

(b) 焊接后

图5.7 双排针焊接图

5.4 本章小结

本章主要探究了光电探测芯片的封装设计。芯片在加工完成后需要封装到一个PCB测试板上进行性能和应用测试，本章首先介绍了用到的两步重要封装工艺：粘片和连线压焊。在完成压焊后，需要用玻璃盖板将整个芯片密封起来。因为粘片和连线压焊是很成熟的封装工艺，所以易于操作，封装的难点在于玻璃盖板的粘接，此工艺

需要在光学显微镜下手工粘接。操作过程中需要保证垫圈与PCB板上的双十字吻合,玻璃盖板与垫圈完全重合,以此保证激光能正好透过双缝照射到芯片上的两排光电二极管上。最后将PCB封装板安插到PCB测试板上进行光电流测试和雨滴模拟测试。

第六章 光电探测器的测试

6.1 光电性能测试

在使用光电探测器进行雨滴模拟测试之前,需先对光电探测器进行光电性能测试,以确保器件能正常工作。光电探测器的性能测试包括光电流测试、暗电流测试和响应度的测试。

6.1.1 光电流测试

光电流测试采用吉时利(KEITHLEY)仪器公司生产的4200-SCS半导体特征分析系统进行测试。这款产品实现I-V测试功能的核心单元是SMU(源测量单元),它集电压源、电压表、电流源和电流表于一体,可以向器件提供驱动电压同时测量电流,也可以向器件提供电流并测量电压。图形化的KITE软件可以轻松的设定测试参数,SMU的数量与被测器件的端口有关,原则上有几个端口,就要配几个SMU。

光电流测试照片如图所示:

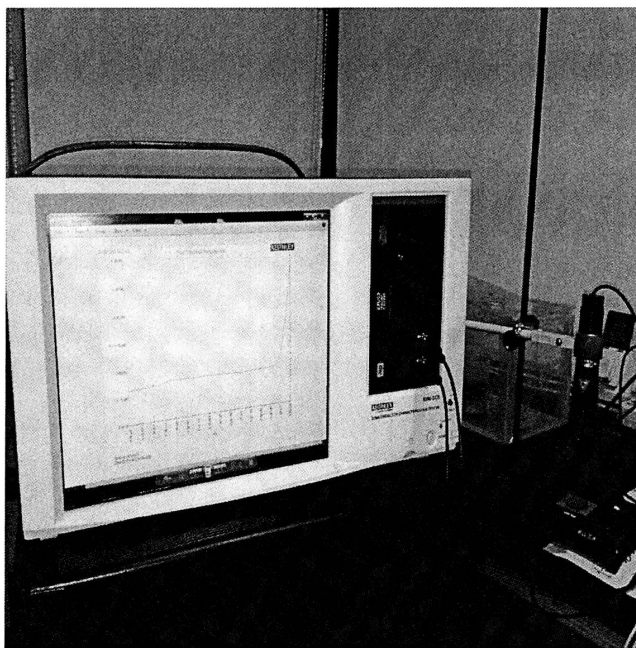


图6.1 半导体特征分析系统照片

测试时,两个探针A和B分别扎在某个光电二极管对应的阳极引线管脚和公共阴极对应的引线管脚上,每个探针对应一个SMU单元。测试方法采用Sweep模式,探针A

起始电位和终止电位分别设为-15V和0V，扫描步长设为-0.5V，探针B电位始终设为0V。测试结果如下图所示：

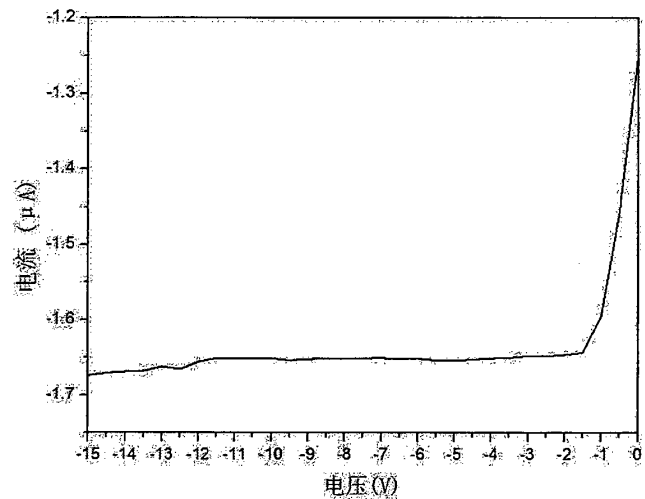


图6.2 单个光电二极管的光电流测试结果

由上图可知，光电二极管两端所加偏压在-15V~-2V之间时，电流比较稳定，光电大小约为1.65μA。

为了检测光电探测芯片上的光电二极管单元光电流的稳定性，需要对芯片上的多个单元进行光电流测试，因此，我们对单排64个光电二极管进行光电流测试的结果，测试电压为-8V，所使用的仪器是吉时利(KEITHLEY)仪器公司生产的2400通用性源表。

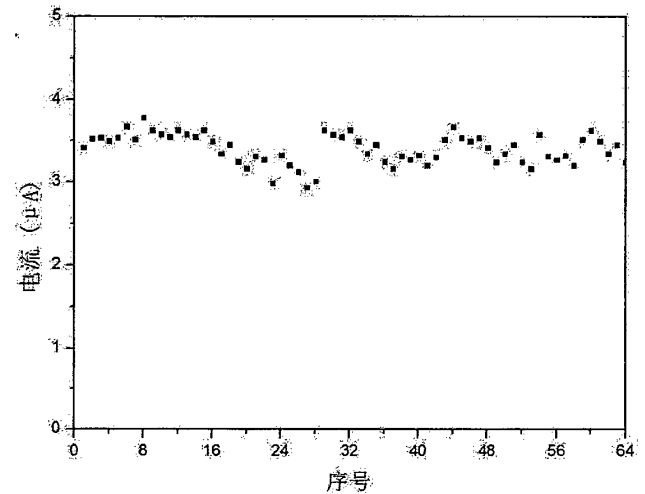


图6.3 单排阵列光电二极管光电流测试结果

由上图可以看出，这一排光电二极管的光电流基本维持在 $3.5\mu\text{A}$ 左右，且上下波动幅度很小，处于可以接受的范围。

6.1.2 暗电流测试

单个光电二极管的暗电流测试同样使用的是吉时利(KEITHLEY)仪器公司生产的4200-SCS半导体特征分析系统。测试时将光电探测器用暗箱遮住，其它测试条件同光电流测试相同。测试结果如下图所示：

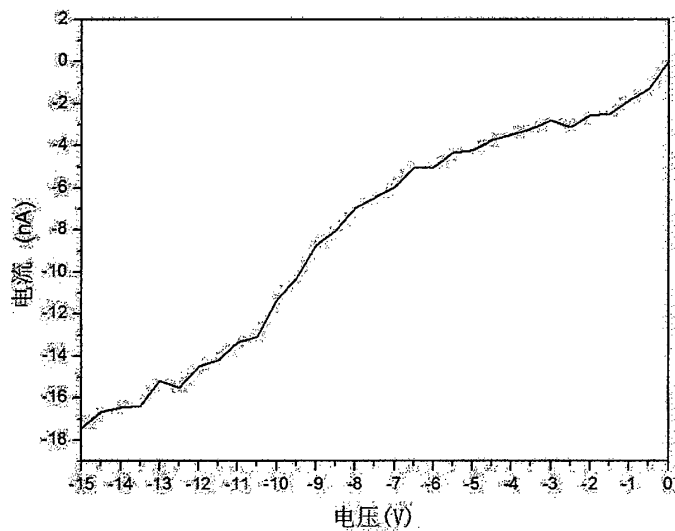


图6.4 单个光电二极管的暗电流测试结果

由上图可知，光电二极管的暗电流随所加偏压的增大而逐渐增大，但暗电流很小，不超过 20nA 。

同样，我们对单排64个光电二极管的暗电流进行了测试，测试电压为 -8V ，所使用的仪器是吉时利(KEITHLEY)仪器公司生产的2400通用性源表。测试结果如下所示：

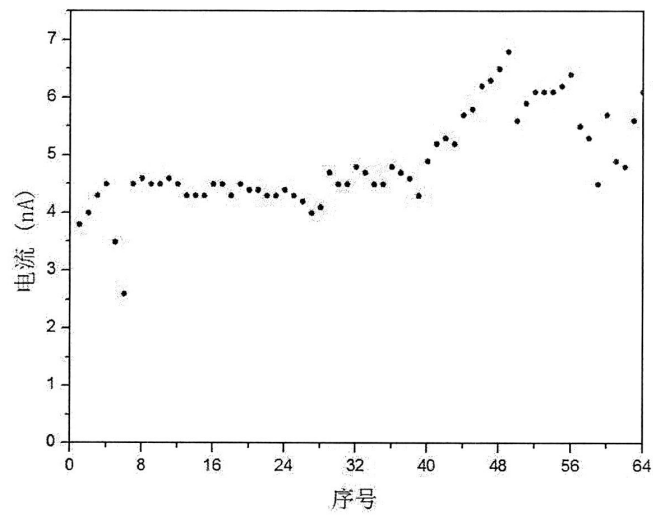


图6.5单排阵列光电二极管暗电流测试结果

光电二极管的暗电流在-8V偏压下，均小于10nA，虽然不同二极管暗电流差别较大，但与光电流相差近三个数量级，对照明显。对比图如下所示：

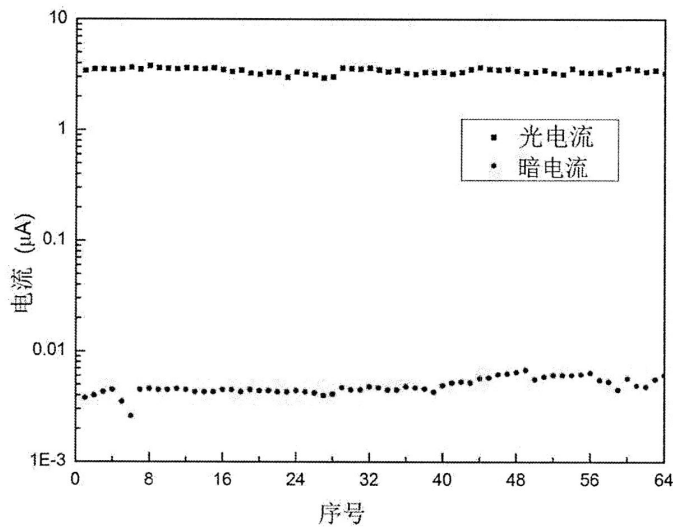


图6.6 单排阵列光电二极管明暗电流对比

6.1.3 响应度测试

实验中，激光器发出的红光波长约为650nm，辐照度为100mW/cm²。由6.1.1可知，光电二极管在-8V的偏压下，所产生的光电流的平均值约为3.5μA。根据公式2.3，光电二极管的光谱响应度为：

$$R = \frac{I}{P} = \frac{3.5\mu A}{100mW/cm^2 \times (100\mu m \times 80\mu m)} = 0.437A/W \quad (6.1)$$

光电二极管的量子效率也可以计算出来, 根据公式2.4, 光电二极管的量子效率为:

$$\eta = \frac{I/e}{P/(h c/\lambda)} \approx 84.2 \quad (6.2)$$

其中电荷常数 $e=1.6 \times 10^{-19}C$, 光速 $c=3 \times 10^8 m/s$, 普朗克常数 $h=6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$, 激光波长 $\lambda=650nm$ 。

6.1.4 功耗测试

光电探测器的工作电压设为8V, 由单电源提供, 单个光电二极管的光电流大小由6.1.1可知, 平均约为 $3.5\mu A$, 因此, 单个光电二极管的功耗大小约为 $28\mu W$ 。考虑到一个光电探测器件上集成了128个光电二极管单元, 所以整个光电探测器的功耗约为 $3.584mW$ 。而传统CCD探测器件的像素由MOS电容构成, 在读取电荷时, 需要使用电压相当大(至少12V)的二相或三相甚至四相时序脉冲信号, 才能有效的传输电荷。因此CCD的探测系统除了需要多个电源外, 其外设电路同时也会消耗很大的功率。有的CCD探测系统需要消耗2~5W的功率, 因此, 相较于传统的CCD探测器件, 基于PIN光电二极管的光电探测器功耗要低的多。

6.2 云降水粒子的模拟测试

在完成光电探测器的光电性能的测试后, 针对光电探测器的应用, 进行了云降水粒子的模拟测试。考虑到实验室条件不具备直接测量云层中的降水粒子, 在这里用水滴代替降水粒子来完成降水粒子直径和间距的测量, 再根据云物理降水学的相关理论, 预测降水发生的可能性和级别。

6.2.1 降水粒子直径的测量

用注射器的针头制作一滴大水滴(水中加了墨汁, 以降低水滴的透光度), 水滴滴在针尖处而不至于落下, 将水滴移至激光的光路中, 水滴中心与光电探测器玻璃盖板上的一条透光狭缝中线保持水平, 水滴正好能最大限度遮挡激光对这一排部分光电二极管单元的照射。随后, 利用KEITHLEY 2400源表对这一排光电二极管进行电流测试, 源表输出电压设为-8V。测量结果如下图所示:

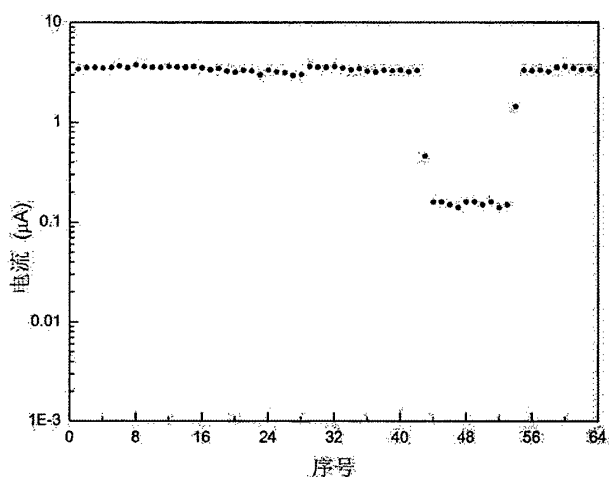


图6.7 水滴直径测量

由上图可知，一排64个光电二极管单元中，有12个光电二极管的电流低于正常的光电流值。其中，中间10个光电二极管完全被水滴遮挡，电流约为 $0.15\mu\text{A}$ ，两边两个光电二极管电流略大，但低于正常光电流数值，分别为 $0.46\mu\text{A}$ 和 $1.44\mu\text{A}$ ，推断此处两个光电二极管被雨滴部分遮挡。

因为光电二极管光电流的大小与感光单元接受激光照射的面积成正比，每个光电二极管单元的尺寸为 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ ，感光单元部分尺寸为 $80\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ ，所以两个光电二极管被遮挡部分面积分别为 $72.6\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ 和 $49.2\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ 。由此可计算出水滴的直径约为 $1121.8\mu\text{m}$ 。

6.2.2 降水粒子间距的测量

降水粒子间距是推测云层中降水粒子密度的重要参数。本实验中测量降水粒子间距是通过测量注射器中前后掉落的两滴水滴的间距来实现的。由公式3.1可知， $S=v\cdot\Delta t_{AB}$ ， v 是水滴通过光电探测器探测区时的速度（水滴A和B通过光电探测器探测区时的速度相同）， Δt_{AB} 可看作水滴A和水滴B先后通过光电探测器的时间差， Δt_{AB} 可由仪器直接测量得到。实验中电压源由RIGOL DP832 可编程线性直流电源提供，输出电压为 -8V ，时间差由美国力科公司生产的示波器 WaveRunner 640Zi直接监测。测量电路图如下所示：

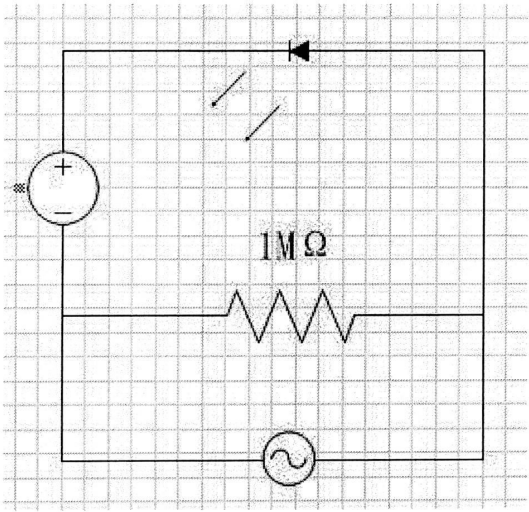


图6.8 雨滴间距测量电路图

示波器显示的时间差测量结果如下图所示：

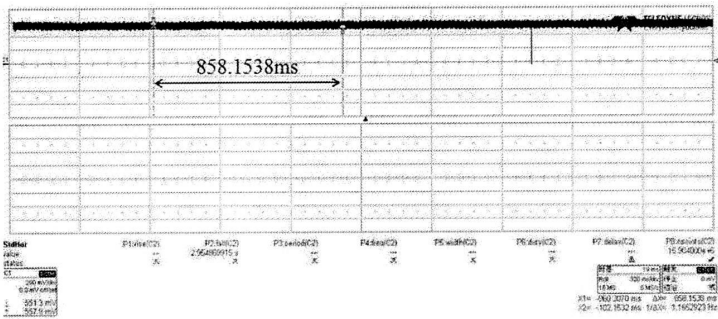


图6.9 两水滴通过光电探测器的时间差测量结果

由上图可知，水滴A和B先后通过光电探测器探测区的时间差 Δt_{AB} 为858.1538ms。

水滴速度 v 可由公式3.2求得，其中， L 代表两排光电二极管阵列的间距，大小为4100 μm ， Δt 代表水滴通过两排光电二极管阵列间距的时间， Δt 可以由示波器直接测量得到。搭建的测试系统照片如下所示：

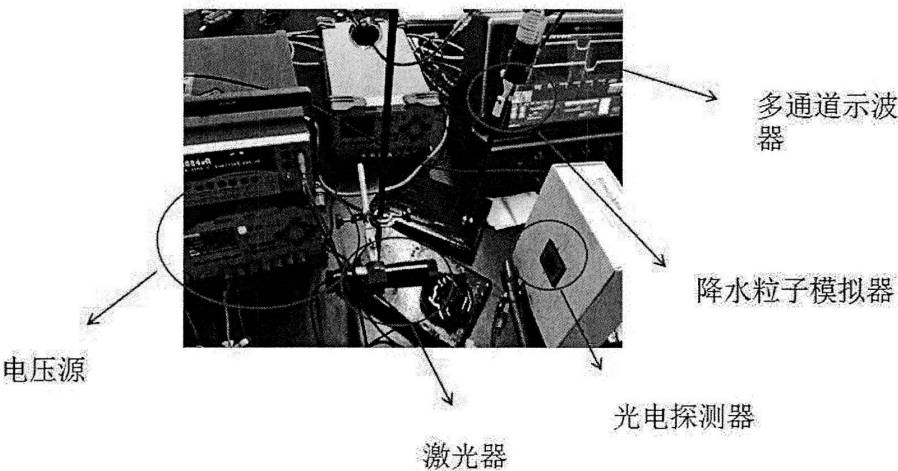


图6.10 测试系统照片

测量结果如下图所示：

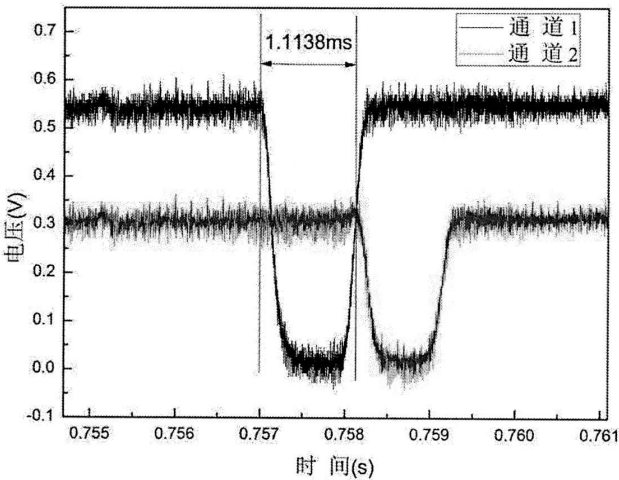


图6.11 水滴通过两排光电二极管阵列间距的时间测量结果

如上图所示， Δt 约为1.1138ms，由于两排光电二极管阵列的间距很小，水滴通过时间 Δt 很短，所以这一时间段的水滴运动可看作匀速运动，由公式3.2可计算出 v 约等于3.681m/s。再参考公式3.1可求得两水滴A和B的间距 S 为3.159m。

6.3 本章小结

本章主要介绍了对光电探测器的性能测试。在光电性能测试部分，分别对光电二极管的光电流、暗电流和响应度进行了测量。在光电流和暗电流的测量中，主要考察

单个光电二极管的反向I-V特性以及整列光电二极管电流的一致性。结果显示器件无论在光照下还是暗室环境下，都达到了预料的实验结果。

在云降水粒子的模拟测试部分，分别针对降水粒子的直径和间距进行了测量。虽然实验过程中，降水粒子使用水滴代替的，但这并不影响所得到的测量数据的参考价值。实验的难点在于测试系统的搭建以及对示波器的使用。最终我们得到了理想的测量结果。

第七章 总结与展望

7.1 工作总结

本论文设计了一种应用于降水监测的低功耗高速光电探测芯片,全文从原理、设计、制造和应用测试四方面对这种新型光电探测器进行了介绍。

在原理方面,分别就PIN型光电二极管的工作原理以及光电探测器测量降水粒子直径和间距的原理进行了介绍,利用PIN型光电二极管的光电转换特性、低功耗和高响应速度的特点,可以很好的满足对降水粒子的测量要求。

在设计方面,芯片采用了双线阵的PIN型光电二极管阵列设计,I层的电阻率比较高,在不影响器件性能稳定性的前提下提高光生少子的寿命,另外,I层较厚,可以更充分的吸收光子。为了降低光的反射率,在感光单元表面设计了一层增透膜,文中对增透膜材料和厚度如何选择做了详细的理论分析,综合各方面考虑增透膜材料选为二氧化硅,厚度约为 $105.52\mu\text{m}$ 。为了防止光串扰和电串扰对器件性能的不利影响,设计了隔离沟槽,沟槽深度约为 $30\mu\text{m}$,文中对两种串扰的产生机理和防止机理都做了详细论述。在完成芯片的各部分功能性结构设计后,进行了芯片和PCB封装板和测试板的版图绘制工作,这些工艺版图为后面的工艺加工提供详细的尺寸参考。

在制造部分,设计了针对此芯片的完整半导体工艺流程,文中对每一步工艺的加工方法和参数要求也都做了具体说明。在得到加工的芯片后,对部分参数进行了测量验证,如隔离沟槽刻蚀深度约为 $27.66\mu\text{m}$,虽然略低于初始设计的 $30\mu\text{m}$,但工艺吻合度基本符合要求。

在应用测试部分,本文先对光电二极管的几个主要的性能指标做了测试,包括光电流、暗电流、响应度和功耗,测试结果反映所设计的芯片光电特性良好,能满足对降水粒子直径和间距的测量要求。单个光电二极管的功耗约为 $28\mu\text{W}$,单个光电探测器的功耗约为 3.584mW ,这一功耗大小相较于传统的CCD图像传感器件的功耗要低的多。针对如何测量降水粒子直径和间距,本文设计了简单有效的测量方法,利用水滴代替降水粒子完成了对直径和间距的测量工作,所测得的水滴直径约为 $1121.8\mu\text{m}$,两水滴间的间距约为 3.158m 。

7.2 工作展望

虽然本文完成了对光电探测器的设计、制造和水滴测试工作，但对于如何将光电探测器搭载在气象飞机上对云层中的降水粒子进行测量以及如何将降水粒子间距转换为降水粒子密度并根据降水粒子直径大小和密度来做降水监测方面，并没有做详细的解释。因此，未来主要集中在以下几个方面进行深入的探索和研究：

1. 对芯片后端的测试系统进行开发，包括信号处理电路、一些具体算法以及真实的云降水粒子环境，设计一套完整的用于降水监测的光学阵列探头OAP，实现产业化。
2. 优化芯片制造工艺和封装工艺，提高良品率，降低器件加工成本。
3. 因为器件要安装于气象飞机的外部，所以需对器件在极端环境下的可靠性和稳定性进行探究，以期能适应云层中的极端物理环境。

参考文献

- [1]雷肇棣. 光电探测器原理及应用. 物理, 1994, 23(4): 226
- [2]马丽芹. 半导体光电探测器中载流子输运过程研究[博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005. 7
- [3]杨军. 云降水物理学. 北京: 气象出版社, 2011. 3
- [4]黄美元, 徐华英. 云和降水物理. 北京: 科学出版社, 1999. 7
- [5] Wallace J M, Hobbs P V. Atmospheric Science: an Introductory Survey. Academic press, 2006. 221-224.
- [6]Stockdale T N, Anderson D L T, Alves J O S, et al. Global seasonal rainfall forecasts using a coupled ocean-atmosphere model. Nature, 1998, 392(6674): 370-373
- [7]Stone R C, Hammer G L, Marcussen T. Prediction of Global Rainfall Probabilities Using Phases of the Southern Oscillation Index. 1996, 384(21): 252-255
- [8] Sand W R, Schleusener R A. Development of an Armored-Aircraft for Probing Hailstorms. Bulletin of the American Meteorological Society, 1974, 55(9): 1115-1122
- [9]马舒庆, 官福顺, 马瑞升, 等. 气象飞机探测体系. 中国气象学会 2006 年年会“提高大气监测自动化水平, 为业务技术体制改革作贡献”分会场论文集. 北京: 气象出版社, 2006. 4
- [10]沈怀荣. 无人机气象探测技术. 北京: 清华大学出版社, 2010:1-5
- [11]Spyers-Duran P A, Braham Jr R R. An Airborne Continuous Cloud Particle Replicator. Journal of Applied Meteorology, 1967, 6(6): 1108-1113
- [12]Murakami M, Matsuo T. Development of the Hydrometeor Videosonde. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(5): 613-620
- [13]Knollenberg R G. The Optical Array: An Alternative to Scattering or Extinction for Airborne Particle Size Determination. Journal of Applied Meteorology, 1970, 9(1): 86-103
- [14]Schönhuber M, Urban H, Baptista J P V P, et al. Measurements of Precipitation Characteristics by a New Distrometer. In: Proceedings of Atmospheric Physics and Dynamics in the Analysis and Prognosis of Precipitation Fields. 1994. 15-18

- [15]Kuhn T, Grishin I, Sloan J J. Improved Imaging and Image Analysis System for Application to Measurement of Small Ice Crystals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(12): 1811-1824
- [16]Hasse L, Grossklaus M, Uhlig K, et al. A Ship Rain Gauge for Use in High Wind Speeds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(2): 380-386
- [17]Grossklaus M, Uhlig K, Hasse L. An Optical Disdrometer for Use in High Wind Speeds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(4): 1051-1059
- [18]Hauser D, Amayenc P, Nutten B, et al. A New Optical Instrument for Simultaneous Measurement of Raindrop Diameter and Fall Speed Distributions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1984, 1(3): 256-269
- [19]Heymsfield A J, Knollenberg R G. Properties of Cirrus Generating Cells. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, 29(7): 1358-1366
- [20] Houze Jr R A, Hobbs P V, Herzegh P H, et al. Size Distributions of Precipitation Particles in Frontal Clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1979, 36(1): 156-162
- [21] 刘卫国, 苏正军, 王广河, 等.. *应用气象学报*, 2003, 14(b03): 11-18
- [22]李念童. PMS 粒子测量系统工作原理及飞行采样方案设计. *河南气象*, 1997, (03):31-32
- [23]张瑜, 银燕, 石立新, 段英, 吴志会. 河北地区秋季气溶胶飞机探测资料分析. *气象科学*, 2011,(06):755-762
- [24] Kuhn T, Grishin I, Sloan J J. Improved Imaging and Image Analysis System for Application to Measurement of Small Ice Crystals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(12): 1811-1824
- [25]王文瀚, 凌进中, 王力田, 等. 光学雨滴谱测量仪. *光学技术*, 2013, 39(3): 237-240
- [26]叶良修. *半导体物理学*. 北京: 高等教育出版社, 1983. 545
- [27]Halliday, David, Resnick, Robert, Walker. *Fundamental of Physics*, USA: John Wiley and Sons, Inc., 2005. 7
- [28]Serway, Raymond. Jewett, John. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Cengage Learning. 2013. 9

- [29]Hertz H. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die electrische Entladung. *Annalen der Physik*, 1887, 267(8): 983-1000
- [30]Einstein A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 1905, 322(6): 132-148
- [31]刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学. 西安: 西安交通大学出版社, 1998. 317
- [32]Watanabe Y, Nishizawa J. Semiconductor Devices Including High Resistive Layer. Japanese Patent, 205: 68, 1950
- [33]王子孟. PIN 硅光电二极管的原理和应用. *光学仪器*, 1984, (04): 1-9
- [34]崔亦飞, 王洪涛, 张雷. 硅光电二极管光谱响应率的测量. *大学物理实验*, 2005, (03): 61-63
- [35]张学骛, 吴昊, 张海良, 等. 硅光电二极管光谱响应度的分析. *大学物理实验*, 2011, 24(2): 25-27
- [36]Li Y, Can W, Zhao-Hua Z, et al. A Silicon-Based Positive-Intrinsic-Negative Photodetector Double Linear Array on a Thick Intrinsic Epitaxial Layer. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(5): 058502
- [37]Holton J R, Hakim G J. An Introduction to Dynamic Meteorology. Pittsburgh: Academic press, 2013.
- [38]Lawson R P, Blyth A M. A Comparison of Optical Measurements of Liquid Water Content and Drop Size Distribution in Adiabatic Regions of Florida Cumuli. *Atmospheric research*, 1998, 47: 671-690
- [39]贺成群. 光电探测器关键性能参数测试研究[硕士学位论文]. 辽宁: 大连理工大学, 2009. 5
- [40]袁立. 用于降水监测的新型光电二极管阵列研究[硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2013. 17-18
- [41]Guckel H, McNamara S P. Photodiode arrays having minimized cross-talk between diodes. USA Pat: 6133615, 2000-10-17
- [42]王秀英. 增透膜的原理及几个问题的解答. *物理教师*, 2004, 25(11): 27-28
- [43]马科斯·波恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理. 北京: 电子工业出版社, 2009. 34

- [44]牛晓飞, 彭振生. 浅谈增透膜的原理及其应用. 宿州学院学报, 2006 (6): 91-92
- [45]邢秀文. 基础物理学. 北京: 科学出版社, 2012. 249
- [46]陈宜生. 物理学. 天津: 天津大学出版社, 2005. 415
- [47]母国光. 战元龄. 光学. 北京: 高等教育出版社, 1978. 145
- [48]郑玉祥. 陈良尧. 近代光学. 北京: 电子工业出版社, 2011. 67
- [49]王巍, 武透, 白晨旭, 等. 硅 PIN 光电探测器阵列的串扰分析. 半导体光电, 2013, 34(1): 12-15
- [50]Zant P V, 桑特, 树武, 等. 芯片制造: 半导体工艺制程实用教程. 北京: 电子工业出版社, 2004. 144
- [51]安韦华. 硅基 SiO_2 薄膜材料的制备与物理特性研究[博士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2008. 28

作者简历、攻读学位期间发表的学术论文及研究成果

作者简历

1988 年 2 月 22 日出生于河北省保定市。

2008 年 9 月考入河北工业大学材料学院攻读材料物理专业，2012 年 6 月本科毕业获得理学学士学位。

2012 年 9 月考入中国科学院国家纳米科学中心攻读凝聚态物理专业至今。

攻读学位期间发表的学术论文及研究成果

A) 期刊论文

1. **Yao Y**, Liu X, Yuan L, et al. A Novel PIN Photodetector with Double Linear Arrays for Rainfall Prediction[J]. Journal of Semiconductors, 2015.04.08 (EI 已录用)
2. Fan F R, Tang W, **Yao Y**, et al. Complementary Power Output Characteristics of Electromagnetic Generators and Triboelectric Generators[J]. Nanotechnology, 2014, 25(13): 135402. (SCI 收录)
3. Liu X, **Yao Y**, Ma J H, et al. Micro Packaged MEMS Pressure Sensor for Intracranial Pressure Measurement[J]. Journal of Semiconductors, 2015.01 (EI 已录用)

B) 申请专利

1. 姚言, 张兆华, 任天令. 自驱动的车辆胎压测试系统. 中国专利: ZL201420176373.X. 2014-09-24

附录 A Silvaco 离子注入工艺仿真程序

```
go athena
#定义栅格 X 轴及 Y 轴
line x loc=0.00 spac=1
line x loc=50.00 spac=1
line y loc=0.00 spac=2
line y loc=300.00 spac=2

#定义衬底材料 类型 晶向等
init silicon c.phosphor=1e20 orientation=100
#外延
epitaxy time=30 temp=1000 thickness=10.0 c.phosphor=1e15
#场氧
diffus time=83 temp=980 weto2
extract name="1oxide" thickness material="oxide" mat.ocno=1 region="oxide"
#淀积光刻胶
deposit photoresist thick=3 divisions=10
#曝光
etch photoresist right p1.x=10 thick=3
#刻二氧化硅
etch oxide right p1.x=10 thick=0.5
#注硼
implant boron dose=5e14 energy=40
#去胶
etch photoresist all
#退火
#diffuse time=30 temperature=1000
#淀积光刻胶
deposit photoresist thick=3 divisions=10
#曝光
etch photoresist right p1.x=47.5 thick=3
#注硼
implant boron dose=2e15 energy=150
#去胶
etch photoresist all
#场氧 增透膜
diffus time=20 temp=980 weto2
#淀积光刻胶
deposit photoresist thick=1.5 divisions=10
#曝光
etch photoresist right p1.x=48 thick=1.5
```

```
#刻二氧化硅
etch oxide right p1.x=48 thick=0.165
#去胶
etch photoresist all
#淀积铝
deposit aluminum thick=2.0 divisions=16
#刻蚀铝
etch aluminum left p1.x=48 thick=2.0
extract name="xj" xj material="silicon" mat.occno=1 x.val=25
extract name="concentration" surf.conc impurity="Boron" material="Silicon" \
mat.occno=1 x.val=25
extract start material="Silicon" mat.occno=1 bias=0.0 bias.step=0.25 \
bias.stop=5.0 x.val=49
extract done name="cjcurve" curve(bias,1djunc.cap material="silicon" mat.occno=1 region.occno=1
junc.occno=2)outfile="cj.dat"
#镜像结构
struct mirror right
#定义电极
electrode name=anode x=50.00 y=-10.
electrode name=cathode backside
#
tonyplot
struct outfile=diode.str
```

致谢

值此论文完成之际，我衷心的感谢那些给予我帮助的老师 and 同学们。

首先，我要由衷的感谢授业导师任天令教授对我学术上的悉心指导。任老师虽然每天事务繁忙，但总是会定期抽出时间与学生们深入探讨课题进展，悉心的指导我们开展工作。任老师在平时总是激励我们不要畏惧科研中的困难，要扎实学习，循序渐进。任老师渊博的学术功底、严谨的治学态度、踏实的工作作风以及敏锐的科研洞察力将使我受益终身。

感谢课题组张兆华老师在这两年来对论文工作的悉心指导以及日常生活的关怀帮助。张老师和蔼可亲，在实验中不厌其烦、倾其所有的指导我的论文工作，两年多的相处，他对我无微不至的关怀将使我一生铭记。

另外，我还要感谢王中林课题组的范凤茹老师对我前期论文工作的指导，中科院半导体所集成技术中心的白云霞老师和张明亮老师在芯片制造过程中的悉心指导，中科院大气物理所的陈家田老师在器件测试方面的多次指导，特别要感谢清华大学微电子学研究所袁立师兄对我整个论文工作的帮助。

感谢同课题组的刘雄、马嘉豪、罗立川师弟、余武其师弟对我实验中的协助，感谢所里那些为我提供帮助的老师和同学们。

最后，我要衷心感谢我的父母，是您二位把我带到人世，不仅给了我生命，还数十年如一日，含辛茹苦的把我抚养长大。如今，我马上就要离开学校，步入社会，我将用我余下的一生来报答您二位对我的栽培养育之恩。