



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

## 博士学位论文

硅基阻挡杂质带红外探测器优化及其深低温读出电路探究

作者姓名: 王超

指导教师: 戴宁 研究员 上海技术物理研究所

邓惠勇 副研究员 上海技术物理研究所

学位类别: 工学博士

学科专业: 微电子学与固体电子学

培养单位: 中国科学院上海技术物理研究所

2020年6月

# 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：所提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：

日 期：

# 中国科学院大学

## 学位论文授权使用声明

本人完全了解中国科学院大学有关保留，使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存学位论文。

本人同意《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》出版章程的内容，愿意将学位论文提交《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社，编入 CNKI 学位论文全文数据库并充实到“学位论文学术不端行为检测系统”比对资源库，同意按章程规定享受相关权益。

保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

**Optimization of silicon-based blocked impurity band infrared detectors and cryogenic readout circuits exploration**

**A dissertation submitted to**  
**University of Chinese Academy of Sciences**  
**in partial fulfillment of the requirement**  
**for the degree of**  
**Doctor of [Philosophy]**  
**in [Microelectronics and Solid State Electronics]**

**By**

**[Chao Wang]**

**Supervisor:** **Professor Ning Dai**  
**Professor Huiyong Deng**

**Shanghai Institute of Technical Physics ,**  
**Chinese Academy of Sciences**

**June 2020**



## 致 谢

往事历历在目，读博的过程就是一个自我磨砺提升的过程。期间经历了无数彷徨无助、痛苦的时刻，也有取得成就和收获时的兴奋和快乐。读博是人生一段难得的经历，提高了我的学术能力，促进了个人成长。在这即将完成学业从此告别校园之际，我要向所有关心我，支持我，帮助我的人送上我最衷心的感谢。

首先我要感谢戴宁老师、邓惠勇老师、胡古今老师、李宁老师和郝加明老师给我提供的良好的学习环境和优越的科研条件，让我可以全身心的投入到学习中。感谢戴宁老师带领我进入这科研的世界，感谢邓惠勇老师提高了我独立思考和处理事情的耐心，感谢胡古今老师为我指明前进的方向，感谢李宁老师谆谆教导和手把手的指导，感谢郝加明老师科研方向上给我的指导与帮助，让我更加系统感受到了科研的魅力。他们渊博的知识，严谨的科研作风时刻影响着我，让我终生难忘。他们的谆谆教诲让我终生受益。祝愿戴老师、邓惠勇老师、胡古今老师、李宁老师和郝加明老师身体健康，科研顺利，家庭幸福。

其次课题组中每一位老师和同学都给予我莫大的帮助。感谢陈鑫老师在科研工作提出宝贵建议和要求；感谢孙艳老师在日常生活和学业中的关心与帮助，排除了学习和生活中的烦恼，是我倍感温暖；感谢胡淑红和俞国林老师的关心和鼓励；感谢廖开升师兄教我实验技巧以及给予我的帮助；感谢丛蕊师姐在我实验和生活中的帮助；感谢我的好友王洋同学在测试数据上帮忙以及多年的陪伴；感谢殷子薇师妹和李世民、谢经辉、潘昌翊、张祎师弟在实验日常中提供的帮助；感谢姚尧在光学仿真方面的合作与帮助；感谢张云师兄，董文静师姐，魏调兴师兄，张克难师兄，李梦瑶师姐，景友亮师兄，王晗师兄，刘雨从等为我答疑解惑；感谢张天宁师弟，魏威师弟，王书霞师妹，黄田田师弟，俞伟师师弟，潘晓航、徐倩倩师妹等在实验测试中给予的帮助，感谢聂晓飞、陈金、文政绩、赵文超等。

除此之外其他课题组的老师和同学也给予了我莫大的帮助。感谢李志锋老师在 FTIR 测试上的帮助和探测器原理及结构设计上的解惑；感谢黄志明老师在椭偏测试中的帮助；感谢徐刚毅老师和陈熙仁师兄在光谱测试中的帮忙，感谢吴惠桢老师和朱贺在器件机理方面的分析和讨论。

另外还要感谢韩莉老师科研日常中的帮助，感谢研究生部汪骏发老师、李淑

薇老师、朱晓琳老师和黄曦老师在学习与生活中给予的关怀；感谢一路陪伴我走过来的同学和兄弟姐妹王溪、赵真典、朱欢、蒋大钊、温洁、苏晓芳等，感谢班级的每一位同学对我工作的支持与关心；最后我要由衷的感谢我的家人特别是父母给我的陪伴和支持，你们是我温暖的港湾是最坚强的后盾，是我一直以来坚持的最大动力！

最后，感谢各位专家、教授在百忙之中对本论文进行的评审和指正。

没有你们的帮助，就没有我顺利完成学业的今天，谢谢你们！

王 超

2020年6月

中国科学院上海技术物理研究所

## 摘要

深空探测和红外天文技术需要高性能的长波红外探测器,而我国在这方面相对落后。阻挡杂质带 (Blocked Impurity Band, BIB) 探测器具有响应波段宽、响应率高、响应速度快、易于大规模制备及方便读出等优点,成为过去三十年天文探测覆盖中红外和远红外波段的首选红外探测器。硅基BIB探测器具有与CMOS工艺兼容,易于大规模制备和方便与读出电路互连等突出优点,尤其受到重视。目前硅基的BIB探测器国内还处于起步阶段,发展空间很大。

本论文主要围绕硅基 BIB 探测器性能的优化及其深低温读出电路进行了研究和探索。通过实验和理论分析,优化了硅基 BIB 探测器的制造工艺和探测器的物理模型;从模拟和实验两方面对硅基外延 BIB 探测器的光吸收层进行了设计和优化,增强了光吸收;对深低温读出电路的基本结构单元进行了设计并测试。以下是 3 个方面的主要创新成果:

1. 制备了硅掺磷和硅掺砷的离子注入型 BIB 探测器,两者探测率都达到国外同类器件报道的  $10^{13} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$  量级。硅掺磷 BIB 探测器工作温度在 5 K,工作偏压为-2.3 V 时,探测器响应波段 2.5~40  $\mu\text{m}$ ,峰值波长在 27.3  $\mu\text{m}$ ,暗电流为  $1.12\times 10^{-11} \text{ A}$ ,黑体响应率为  $4.59 \text{ A/W}$  (800 K 黑体, 277 Hz),探测率达到  $4.89\times 10^{13} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。硅掺砷 BIB 探测器工作温度在 5 K 时,探测器的峰值波长在 23.8  $\mu\text{m}$ ,黑体响应率为  $3.65 \text{ A/W}$  (800 K 黑体, 277 Hz),探测率达到  $5.22\times 10^{13} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。探测器工艺兼容于集成电路技术,可以用集成电路工艺标准大规模生产降低成本,同时探测器和读出电路集成到一块芯片提高了探测器成像性能。
2. 利用双层超表面结构实现了 BIB 探测器的减反射增吸收。通过定制外延 BIB 结构和外延其他各层陪片,测量了不同外延层的透射和反射,利用 Drude 模型拟合得到了不同掺杂浓度外延层的光学参数。将双层超表面结构与 BIB 器件相结合,加了偏振片的双层超表面结构在外延 Si:P BIB 探测器响应峰值

波段基本无透射，反射率小于 3%。实现了 BIB 探测器减反射增吸收，探测器获得偏振信息符合第四代焦平面的发展趋势。

3. 设计了深低温读出电路并进行了流片。设计了包括运放在内的读出电路基本结构，测试了部分电路的深低温特性。对深低温下读出电路进行了分析，为下一步深低温焦平面读出电路研究打下了基础。

**关键词：**阻挡杂质带，红外探测器，离子注入，减反，深低温读出电路

## Abstract

Deep space exploration and infrared astronomical technology need high-performance long-wave infrared detectors, but China is relatively backward in this respect. With the advantages of wide response band, high response rate, fast response speed, easy to prepare in large scale and easy to be read out, the detector of blocked impurity band (BIB) has become the first choice of infrared detectors in the past 30 years. The silicon-based BIB detector is compatible with CMOS technology, easy to be prepared on a large scale and easy to interconnect with readout circuits. At present, the silicon-based BIB detector is still in its infancy in China and has much room for development and improvement.

In this dissertation, the optimization of the performance of silicon-based BIB detector and its cryogenic readout circuits are studied and explored. Through experiment and theoretical analysis, the manufacturing process and physical model of the silicon-based BIB detector are optimized; the optical absorption layer of the silicon-based epitaxial BIB detector is designed and optimized from simulation and experiment to enhance the optical absorption; the basic structure units of the cryogenic readout circuits are designed and tested. The innovative research results are as follows:

1. Ion-implanted Si:P and Si:As BIB detectors have been fabricated by using integrated circuits compatible process. Both detectors reach the detectivity of  $10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ . At 5 K temperature and a dc bias voltage of -2.3 V, Si:P BIB detector shows peak response at 27.3  $\mu\text{m}$ , detector response band width of 2.5~40  $\mu\text{m}$ , and dark current of  $1.12 \times 10^{-11} \text{ A}$ . The blackbody responsivity of the device is 4.59 A/W (800 K blackbody, 277 Hz), corresponding to a detectivity of  $4.89 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ . Si:As BIB detector presents peak response at 23.8  $\mu\text{m}$ . The blackbody responsivity of Si:As device is 3.65 A/W (800K blackbody, 277Hz) at 5 K, corresponding to a detectivity of  $5.22 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ . The detector fabricating process is compatible with that of integrated circuits and the detectors can be integrated with readout circuits on one chip, resulting in a remarkable reduction in produce cost and a significant improvement of the imaging performance.

2. The bilayer metasurface structure is used to reduce the reflection and increase the absorption of the BIB detector. The transmission and reflection of different epitaxial layers are measured by customizing the epitaxial BIB structure and other epitaxial layers. The optical parameters of different doping concentration epitaxial layers are obtained by using the Drude model. Combining the bilayer metasurface structure with the BIB device, the bilayer metasurface structure with polarizer has no observable transmission in the peak response band of the epitaxial Si: P BIB detector, and the reflectivity is less than 3%. The polarization information obtained by the detector conforms to the development trend of the fourth generation focal plane arrays.
  
3. The cryogenic readout circuits are designed and the chip is made. The basic structure of readout circuits including operational amplifier are fabricated, and the cryogenic temperature characteristics of some circuits are tested and analyzed. The test and analysis lays a foundation for the further investigation into the readout circuits used for focal plane arrays working at cryogenic temperature.

**Key Words:**Blocked impurity band, infrared detector, ion implantation, antireflection, cryogenic readout circuits

## 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 红外辐射的基本理论.....	1
1.2 红外探测器的发展历史.....	3
1.3 红外探测器概述.....	4
1.4 天文用红外探测器.....	5
1.5 BIB 探测器.....	9
1.6 焦平面阵列.....	16
1.6.1 红外焦平面阵列原理.....	16
1.6.2 焦平面阵列单元.....	17
1.6.3 焦平面的发展.....	19
1.7 本论文的研究目的和主要内容.....	19
参考文献.....	21
第二章 深低温半导体性质及 BIB 探测器理论模型.....	27
2.1 浅能级施主态氢原子模型.....	27
2.2 金属-绝缘体过渡.....	30
2.2.1 绝缘区域.....	30
2.2.2 中间区域.....	30
2.2.3 金属导电区域.....	31
2.3 Poole-Frenkel 效应.....	31
2.4 迁移率.....	33
2.5 BIB 探测器电场模型.....	35
2.6 本章小结.....	37
参考文献.....	38
第三章 CMOS 工艺兼容离子注入 BIB 探测器.....	41
3.1 离子注入及其仿真.....	41
3.2 BIB 探测器制备.....	43
3.3 探测器封装和测试设备.....	45
3.4 探测器性能表征.....	47

3.4.1 黑体响应率.....	47
3.4.2 暗电流.....	51
3.4.3 光电流响应谱.....	52
3.5 本章小结.....	61
参考文献.....	62
第四章 BIB 探测器抗反射增吸收研究.....	65
4.1 BIB 外延层结构.....	65
4.2 BIB 外延层光学性质.....	67
4.3 BIB 探测器减反方法.....	69
4.4 BIB 光学参数.....	70
4.5 BIB 减反结果.....	72
4.6 离子注入 BIB 减反增吸收.....	78
4.7 本章小结.....	79
参考文献.....	81
第五章 BIB 探测器深低温读出电路探究.....	83
5.1 CCD 与 CMOS 电路比较.....	84
5.2 CMOS 深低温性质.....	85
5.3 BIB 探测器读出电路实现方案.....	87
5.4 本章小结.....	98
参考文献.....	99
第六章 总结与展望.....	105
6.1 本论文的工作总结.....	105
6.2 不足与展望.....	106
6.2.1 本工作中的不足.....	106
6.2.2 展望.....	107
作者简介及在学期间发表的学术论文及研究成果.....	109
作者简介: .....	109
已发表的学术论文: .....	109

## 第一章 绪论

红外探测技术在卫星遥感、环境监测、卫生医疗及军事领域有着广泛的应用，与国防安全和民生问题息息相关。红外探测技术就是通过红外波段来获取信息的技术，其最核心的部件是红外探测器。本章主要介绍红外辐射以及红外探测的基础，包含电磁（红外）辐射理论、红外探测器的发展历程和天文红外探测器简介等。最后重点介绍可用于天文探测等领域的阻挡杂质带（Blocked Impurity Band, BIB）探测器及与之相应的深低温读出电路技术，这也是本论文的主要研究内容。

### 1.1 红外辐射的基本理论

简单地讲，电磁辐射就是电磁场的能量以电磁波的形式在空间传播<sup>[1]</sup>。根据电磁波波长和波源能够将其分为伽马射线、X射线、紫外、可见光、红外、微波和无线电<sup>[1]</sup>。图 1.1 是电磁波谱，展示了电磁波按波长的分布。可见光是人眼所能观测到的电磁波，其波长范围约为 380~760 nm，占整个电磁波谱很小的一部分。与红外辐射相对应的是红外光谱，波长范围大致为 0.75  $\mu\text{m}$  到 1 mm，位于可见光与微波之间。对于不同的专业和领域，对红外波段的划分情况略有不同。中国科学院上海技术物理研究所从遥感应用、红外探测器和红外材料的角度，提议将红外划分为近红外（NIR）0.76~1.1  $\mu\text{m}$ ，短波红外（SWIR）1.1~3  $\mu\text{m}$ ，中波红外（MWIR）3~6  $\mu\text{m}$ ，长波红外（LWIR）6~25  $\mu\text{m}$ ，远红外（FIR）25~100  $\mu\text{m}$  及甚远红外（XWIR）100~1000  $\mu\text{m}$  等 6 个子波段<sup>[1-4]</sup>。

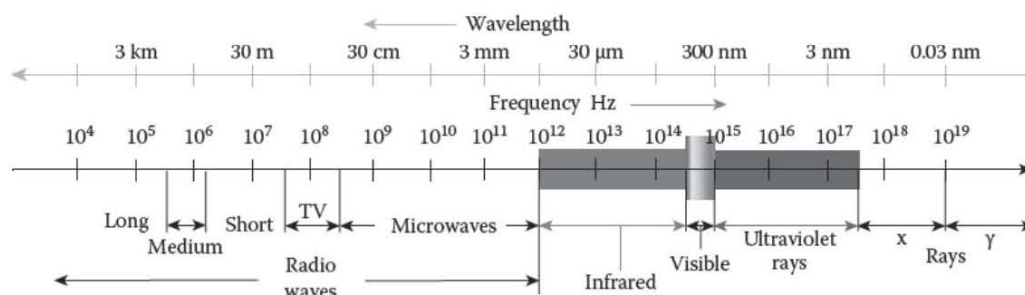


图 1.1 电磁波谱<sup>[1]</sup>

Figure 1.1 Electromagnetic spectrum<sup>[1]</sup>

公元 1800 年，英国的物理学家赫胥尔从热的角度研究光，最先发现了红外辐射这种现象<sup>[1]</sup>。自然界所有温度在绝对零度以上的物体都会向外辐射电磁波，

而辐射的电磁波强度和波长都和物质的温度有关，地球上大部分物质辐射的电磁波峰值波长一般都处于红外波段<sup>[1,3]</sup>。红外热成像是通过获取物体自身辐射的红外光来成像，不需要额外的光源，是一种重要的观测物体的方法<sup>[2]</sup>。与可见光相比，红外光的波长较长，所以其穿透能力较强。由于红外辐射的独特特性和优势，红外探测技术在军事和民用领域有很大的用处。在军事领域，基于红外辐射理论，研制出了简单方便的红外夜视仪，解决了夜视问题，取得了广泛的应用。红外也可以应用于红外侦察与预警、监视、测距、跟踪与制导、光电对抗和通讯等领域<sup>[5]</sup>。传统上，经常将红外技术和控制功能相联系，最常用的家用电器遥控器就是工作在红外波段。随着红外技术的发展，红外技术越来越多地运用在民用领域，如全球环境污染监测、气候变化、农作物产量的长期预测、化学工艺监控、傅里叶变换红外光谱术、汽车驾驶<sup>[6-9]</sup>、红外天文学、空间遥感<sup>[10-12]</sup>和医学诊断等领域<sup>[1]</sup>。图 1.2 形象的展示了红外探测技术在日常生活中的应用。

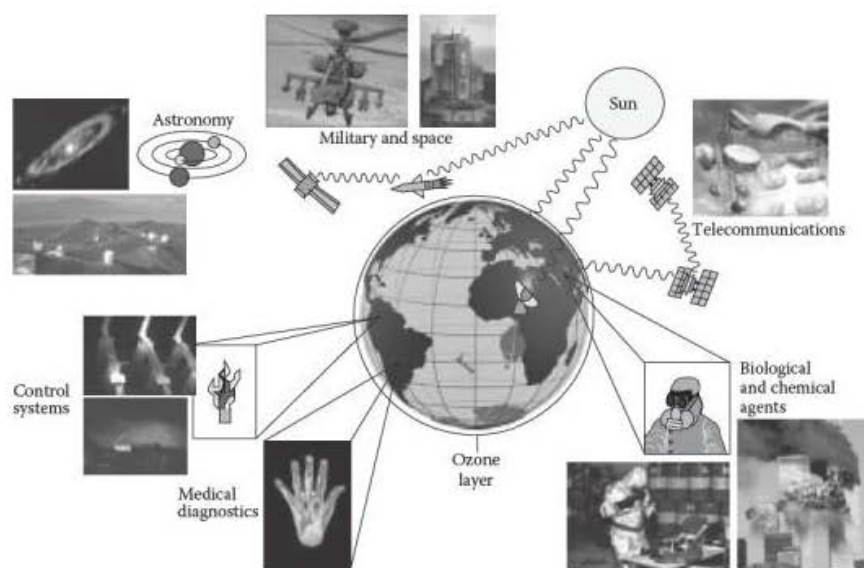


图 1.2 红外探测器的应用领域<sup>[1]</sup>

Figure 1.2 Applications of infrared detectors<sup>[1]</sup>

人体也像其它物体一样，不断向外发射电磁波。室温下，正常人体约  $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，大约  $310\text{ K}$ ，根据红外辐射理论它的峰值波长在  $9\sim 10\text{ }\mu\text{m}$  范围。红外辐射波段在人眼可观测范围之外，但是由于红外热效应的存在，人体的皮肤有时能够感受到红外光。相比于可见光，红外辐射需要特制的仪器进行测量和表征。最早的红外

探测器是根据红外辐射的热效应制造出来的<sup>[13]</sup>。随着材料科技的发展,更高灵敏度和响应速度的光电探测器逐渐登上历史的舞台和发挥越来越重要的作用。

由于大气中水蒸汽和二氧化碳等会吸收红外辐射,导致红外辐射在大气中的传播会受到阻挡,因此有必要了解红外辐射在大气介质中传播的吸收特性。在海拔高度为6000英尺的高空观测到红外辐射光谱在大气介质中透过率曲线如图 1.3 所示。可以看到,透射率比较高的波段分别为 1~3  $\mu\text{m}$  的短波红外波段, 3~5  $\mu\text{m}$  的中波红外波段和 8~14  $\mu\text{m}$  的长波红外波段,这几个透射率比较高的波段被称为大气窗口<sup>[1]</sup>。

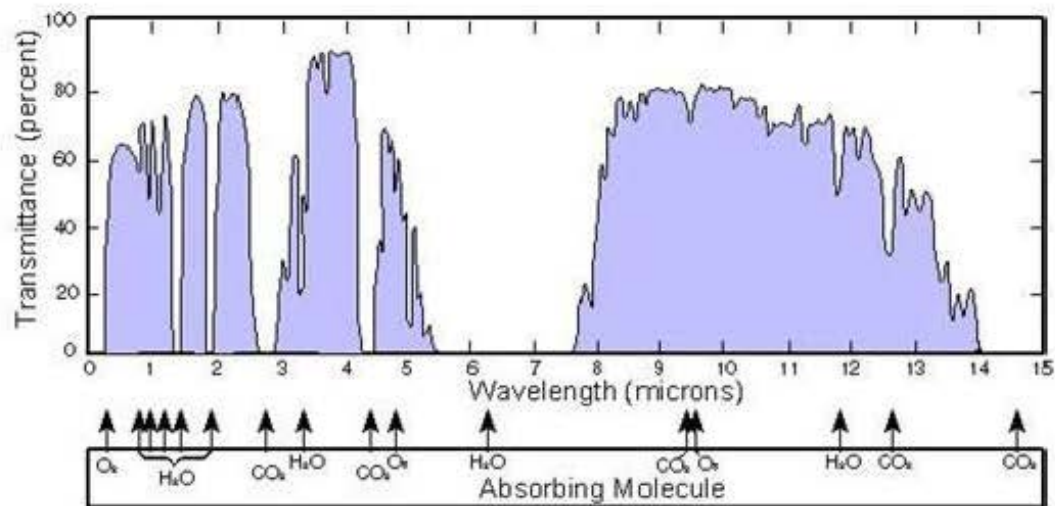


图 1.3 大气透过窗口<sup>[1,4]</sup>

Figure 1.3 Transmission of atmosphere<sup>[1,4]</sup>

## 1.2 红外探测器的发展历史

20 世纪 40 年代后期,为了在灵敏度与响应速度等方面进一步提升红外探测器性能,光子型红外探测器开始出现,并得到了迅速的发展。硫化铅(PbS)薄膜光电导探测器是德国科学家在上世纪三十年代研制出来的第一个具有实用价值的现代红外探测器<sup>[14,15]</sup>。碲化铟(InSb)本征型探测器的响应波长限制在 8  $\mu\text{m}$  以下。为拓展探测器的响应波段范围,Ge:Hg 等非本征型探测器被科学家研制出来<sup>[16,17]</sup>。非本征型探测器响应波长大大延伸,可超过 150  $\mu\text{m}$ 。60 年代末和 70 年代初,Lawson 等人发展了第一代 HgCdTe 光导探测器线性阵列<sup>[18-21]</sup>,在三个大气窗口波段的探测性能都得到了很大提升<sup>[18,22,23]</sup>。60 年代后期,由于硅基的电荷耦合器件的发明<sup>[24-26]</sup>,第二代焦平面阵列研发成功。第三代红外探测技术主要对

探测器提出了高性能和低成本的要求<sup>[1]</sup>。现在, InGaAs 探测器工作在近红外波段, InSb 探测器工作在 3~5 μm 中红外波段, HgCdTe (MCT) 探测器工作在 8~12 μm 远红外波段, 氧化钒和非晶硅非制冷探测器工作在 8~14 μm 波段<sup>[27-29]</sup>。随着材料技术的发展, 量子阱探测器<sup>[30,31]</sup>和第二代超晶格探测器<sup>[32,33]</sup>也获得了长足发展。第四代红外探测器的概念是最近才提出的, 虽然它的定义还没有完全建立起来, 但它将会有更多像素、更高的帧率、更好的热分辨率和多色功能等优点<sup>[34]</sup>。第四代红外探测器还未定型, 被期待能从给定的场景中得到更多的光谱、偏振、相位和更加鲜明的动态范围等信息。图 1.4 列出了四代红外探测器发展历史和标志性探测器。

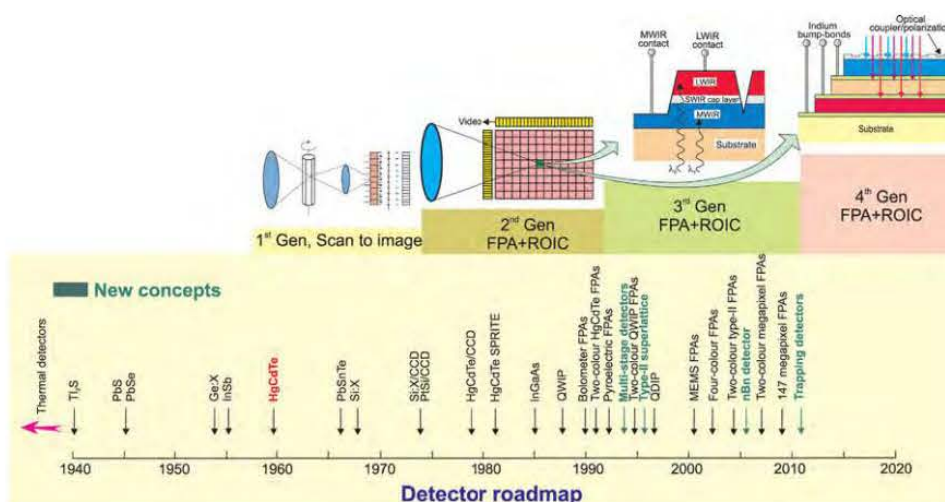


图 1.4 红外探测器技术发展历史和各阶段出现的不同红外探测器的类型<sup>[34]</sup>

Figure 1.4 History of the development of infrared detectors<sup>[34]</sup>

### 1.3 红外探测器概述

红外探测器本质是吸收红外辐射能, 并将其转化成易于测量或者表征的电能、热能或者其他形式能量的转换器<sup>[2]</sup>。按照能量转换形式划分, 能够分成红外热探测器与红外光子探测器这两种类型<sup>[35]</sup>。

热探测器通过将探测器接收的红外辐射能转变为器件温度上的变化, 从而引起探测器有关物理参数或者性能的改变。按照物理参数类型方面可分为热电阻型、热释电型、热电偶型与高莱气动型等<sup>[36]</sup>。由于热探测器的响应时间较长和灵敏度较低等特性, 通常只将热探测器应用于红外辐射改变较慢的场合。

光子探测器利用光电效应原理,使得探测器电学性质发生变化<sup>[23]</sup>。常见的光子探测器一般为内光电效应探测器,根据光电转换原理可分为利用光电导效应的光电导探测器和利用光生伏特效应的光伏探测器。光磁电探测器也属于一种内光电探测器<sup>[1,23]</sup>。表 1.1 对光子探测器和热探测器特性进行了分析和比较。虽然光子探测器需要制冷,成本比较高且不易操作,但是由于光子探测器具有灵敏度高、响应速度快、响应频率高等优异特性,完全可以弥补它的缺点,从而使其成为现代探测器的主流器件<sup>[37]</sup>。

表 1.1 热探测器和光子探测器对比

Table 1.1 Comparison between thermoelectric and photoelectric detectors

	热探测器	光子探测器
工作温度	不需制冷	(大多数)需制冷
工作波长	波长无选择性	波长有选择性
响应灵敏度	响应灵敏度低	响应灵敏度高
响应时间	响应时间长	响应时间短

#### 1.4 天文用红外探测器

早在几千年以前,人类就开始通过肉眼观测太阳、月亮和星星的运动与变化规律,并制定了日历,从而对生产和生活进行指导。宇宙中温度分布差异很大,但是大部分物质的温度分布在几 K 到几千 K 范围内。他们的辐射能量主要位于红外区域,并且红外光较可见光波长更长,可以穿透宇宙尘埃传播到更远的距离<sup>[38-40]</sup>。因此,研究宇宙的形成和演变、寻找外星生物和文明、探索恒星的变化和星系的形成和演变、探测暗物质与暗能量等都和红外探测密切相关<sup>[41-44]</sup>。

由于宇宙探测具有十分重要的意义,科学家一直努力地推动着天文探测和天文红外学的发展。在 1983 年,欧洲一些国家联合美国成功发射了人类历史上第一颗红外天文卫星(IRAS)<sup>[45-50]</sup>。它装备了四个工作波段(12  $\mu\text{m}$ 、25  $\mu\text{m}$ 、60  $\mu\text{m}$  和 100  $\mu\text{m}$ )的长波红外探测器,这些探测器的成功应用,完成了很多突破性的工作<sup>[51]</sup>。因为配备了波长较长的探测器,红外天文卫星发现了很多温度较低的恒星和星云等,使探测到的天文目标增加了很多,大大拓展了人类的视野,具有划

时代的重要意义。

欧美等发达国家在第一颗红外天文卫星的基础上，又于 1989 年发射了宇宙背景探测者（COBE）卫星，对宇宙微波背景辐射进行了测量，为宇宙大爆炸理论提供了现实依据<sup>[52-54]</sup>。1995 年发射的红外线空间天文台（ISO）配备了大口径红外望远镜，利用液氮给探测器提供深低温工作环境<sup>[55]</sup>。2003 年发射斯皮策空间望远镜（SST）取代了 IRAS，配备了很多先进的设备，SST 开启了新世纪天文学发展的大门<sup>[56-58]</sup>。红外天文卫星的发展，帮助获得了一系列有重大研究意义的数据和观测结果，大大促进了天文学的发展，增加了人类对外太空的认识。

图 1.5 是离地球大约 1200 万光年的大熊星座中 M81 星系的全红外图像。它是由斯皮策空间望远镜不断收集和完美数据所得到的。在斯皮策发射 16 周年之际，依然不断地扩大着人类的视野，使人类进一步加深了对宇宙的认识和理解。



图 1.5 M81 星系的全红外图像

Figure 1.5 Full infrared image of galaxy M81

红外天文观测的核心器件是天文红外探测器，图 1.6 列出了常见红外探测器的探测波长和工作温度。

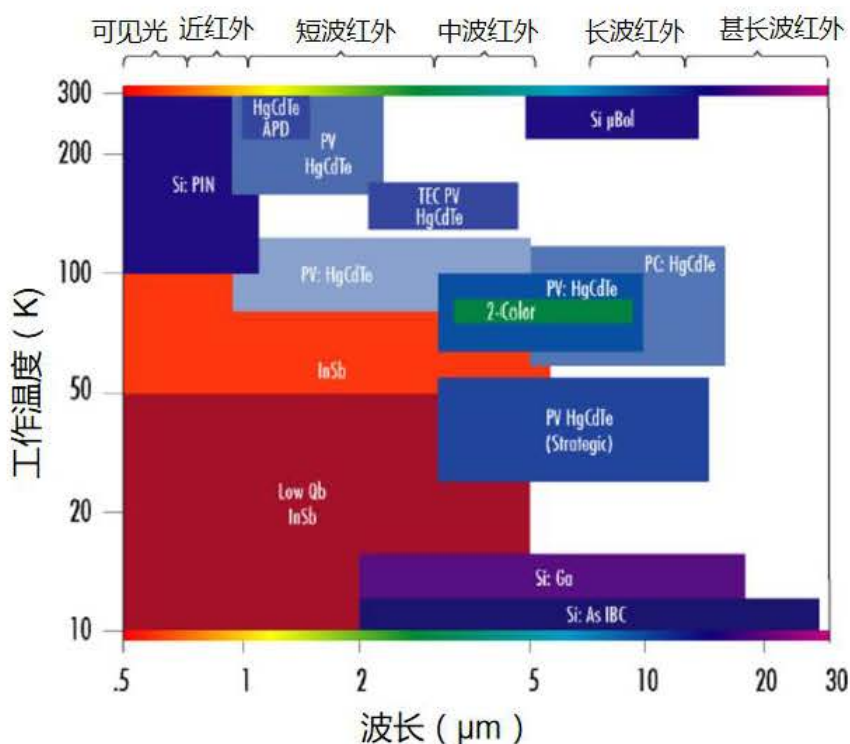


图 1.6 天文用红外材料及其覆盖范围<sup>[59]</sup>

Figure 1.6 Infrared materials cover a large range of wavelengths for astronomy<sup>[59]</sup>

由图 1.6 可以看出：天文应用探测器在  $5\ \mu\text{m}$  以下波段使用最多的是碲镉汞（HgCdTe）和锑化铟（InSb）探测器，在  $5\ \mu\text{m}$  以上波段使用最多的是杂质带导电（IBC）探测器或者说阻挡杂质带（BIB）探测器<sup>[59]</sup>。表 1.2 列举了几种典型天文红外探测器以及它们的性能参数。

表 1.2 可见光到长波红外探测器性能<sup>[59]</sup>  
Table 1.2 Visible to long wave infrared detector performance<sup>[59]</sup>

参数	Si:PIN	HgCdTe	InSb	IBC
典型暗电流	< 1000 e-/s at 300K	< 1 e-/s	< 1 e-/s	< 1 e-/s
量子效率	60 to 80%	90 to 95%	70 to 95%	35 to 60%
光谱响应	0.4 to 1.1 $\mu\text{m}$	0.8 to 2.5 $\mu\text{m}$ or custom 0.4 to 15 $\mu\text{m}$	0.4 to 5.0 $\mu\text{m}$	1 to 28 $\mu\text{m}$
工作温度	220 to 300 K	77 K	30 K	4 to 10 K

下面将介绍两种常用的天文红外探测器：

### 碲镉汞（HgCdTe）红外探测器

基于碲镉汞（HgCdTe）材料的红外探测器是目前几个最重要和典型的光子型红外探测器之一<sup>[18]</sup>。Lawson课题组于1959年首次研制出了HgCdTe合金，碲镉

汞红外探测器的发明促进了红外探测器的设计和发展,它是红外技术史上的一次重要进展<sup>[60]</sup>。HgCdTe属于闪锌矿晶体结构的三元合金半导体,由半金属化合物HgTe ( $E_g=-0.3$  eV)和半导体化合物CdTe ( $E_g=1.6$  eV)混合而成,HgTe和CdTe都是闪锌矿结构,而且晶格常数方面的差别很小,使HgTe能和CdTe以任意比例形成固溶体,即 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料<sup>[18,19,61]</sup>。HgCdTe作为直接带隙半导体和GaAs、InP等材料一样,电子和空穴相遇就会复合,发光效率高,光吸收和量子效率也都比较高;电子空穴直接复合不需要声子接受或提供能量,这种复合机制可促使它能够工作在较高的温度<sup>[62]</sup>。HgCdTe的光电导结构探测器工作于8~14  $\mu\text{m}$ 的波段,通过工艺优化比如异质结钝化,能够使它在室温下工作;HgCdTe光伏型结构探测器相比于光导型探测器内在电阻更大,更容易实现多路传输和制备超大面阵焦平面器件<sup>[63,64]</sup>。

上述介绍了碲镉汞探测器的多种优点,但它也存在着内在不足的地方:随着探测器焦平面阵列的增大,对探测器材料HgCdTe均匀性方面要求比较高。HgCdTe材料的不稳定使得大面阵芯片盲元率不易提升,成本也会增加等<sup>[61,62]</sup>。

早期碲镉汞材料的红外焦平面探测器的研究主要由欧美等几个发达国家主导。美国Rockwell公司甚至制备出了4096×4096规模的红外焦平面器件,探测波段为1~2.5  $\mu\text{m}$ <sup>[65]</sup>。国内HgCdTe探测器方面的研究有几十年的时间了,中国科学院上海技术物理所在国内最早开展相关方面的研究工作,目前部分器件性能已经达到世界顶尖水平,2048×2048的HgCdTe红外焦平面关键技术也已经基本掌握<sup>[66]</sup>,但是也有很多问题亟须解决。

### 锑化铟(InSb)红外探测器

锑化铟(InSb)是由铟元素和锑元素组成的重要的III-V族化合物半导体材料。因为其熔点低和在熔点时的离解压小等优点,早在上世纪50年代就已制备出单晶体<sup>[67]</sup>;InSb的研究工作比较早和深入,InSb是闪锌矿结构,晶体呈现银色和质脆特性,晶格常数为6.48 Å,和HgCdTe一样也是一种直接带隙材料。77 K时,InSb的带隙 $E_g$ 为0.227 eV,自由载流子的浓度小于 $10^{14}$   $\text{cm}^{-3}$ ,载流子(空穴)迁移率为7000  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,使其成为一种应用于大气透射窗口3~5  $\mu\text{m}$ 波段的成像器件的理想材料<sup>[68]</sup>。上世纪80年代中期,研制的红外焦平面阵列像元可达58×62;到80年代后期,InSb探测器阵列的暗电流从大约10 e/s降低到了0.004 e/s<sup>[1]</sup>。InSb

光伏探测器在 3~5  $\mu\text{m}$  波段作为敏感元件组成的混合焦平面阵列也得到较大的发展，并已制作为元数较多的二维阵列。InSb 材料的研究比 HgCdTe 要更为成熟，新一代詹姆斯韦伯太空望远镜上装备了猎户座 (ORION) 系列阵列大小为 2K $\times$ 2K 的 InSb 探测器<sup>[69]</sup>。

## 1.5 BIB 探测器

阻挡杂质带 (Blocked Impurity Band, BIB) 探测器属于非本征光电导探测器，是杂质带电导 (Impurity Band Conductor, IBC) 探测器中的一员<sup>[70]</sup>。介绍 BIB 探测器之前，先来了解一下非本征探测器。

非本征探测是指利用半导体中杂质能级跃迁吸收光子而进行探测的方法。非本征探测器的光子吸收效率一般受材料、掺杂种类和浓度、探测波长以及探测器的吸收层厚度等影响<sup>[1]</sup>。

锗基非本征光电导探测器是第一个实验上研制成功的非本征光电探测器<sup>[71]</sup>。后来由于硅技术的发展成熟，硅器件更有可能成功应用于制造热成像领域的大面积焦平面阵列 (FPA)。由于 CMOS 和电荷耦合器件 CCD 技术的发展，硅基非本征探测器相比锗基探测器能与读出电路更好的集成，从而促进了硅基非本征探测器的快速发展。

非本征光电探测器最早的研发和制造主要在美国，在美国的红外天文卫星中获得了巨大的成功<sup>[50-56]</sup>。美国的雷神视觉系统公司、诊断检测系统公司和泰莱达因图像传感器公司在这方面在这方面做了很多工作<sup>[72]</sup>。

非本征的杂质带光电导红外探测器在远红外长波波段探测性能良好，却也展现了很多不足的地方。要提高红外探测器性能如提高对光子的吸收效率，就需要增加杂质的掺杂浓度。但是杂质浓度提高的同时，暗电流也会提高；特别是掺杂浓度提高到一定时，杂质能级就会形成杂质带，电子可以通过杂质带传导形成电流；器件的暗电流会上升到一个非常高的水平<sup>[73]</sup>。器件的暗电流和吸收效率之间需要相互协调。

为抑制杂质带电导，同时提高探测器的抗辐射性能与降低探测器阵列之间相邻像素的光学串扰，最初由美国 Petroff 和 Stapebroek 等人在 1979 年提出了阻挡杂质带探测器理论<sup>[70]</sup>，并且从实验上成功制作了 Si:As BIB 探测器。在此基础上他们还建立了 BIB 探测器光电响应和噪声的分析方法与理论模型。在杂质带探

测器中引入一个本征杂质浓度非常低的高阻层，以抑制器件的暗电流，吸收层可以增加掺杂浓度提高吸收，显著提高了探测器的光电探测性能<sup>[73]</sup>。

非本征杂质带探测器经过优化后，增加了一层低掺杂的阻挡层。增加的阻挡层大大抑制了器件暗电流，并且吸收层的掺杂浓度能够进一步提高百倍甚至千倍，以增加吸收效率<sup>[74]</sup>。吸收效率得到明显提升后，BIB 探测器吸收层厚度可以做的更薄，探测器体积更小，增加了其抗辐射性能。由于这些性能方面的提升，BIB 探测器更加适用于空间天文探测<sup>[75]</sup>。

探测器的光谱响应，取决于探测器中具体的杂质态能级与态密度<sup>[1]</sup>。下图列出了常见的非本征硅基探测器的光谱响应图。由图可见，硅基的探测器可以覆盖到 30  $\mu\text{m}$  波段。Si:As BIB 探测器与 Si:As 非本征器件相比出现了明显的红移，这说明阻挡杂质带探测器掺杂浓度更大，形成了杂质带，从而对更长波长形成了响应。

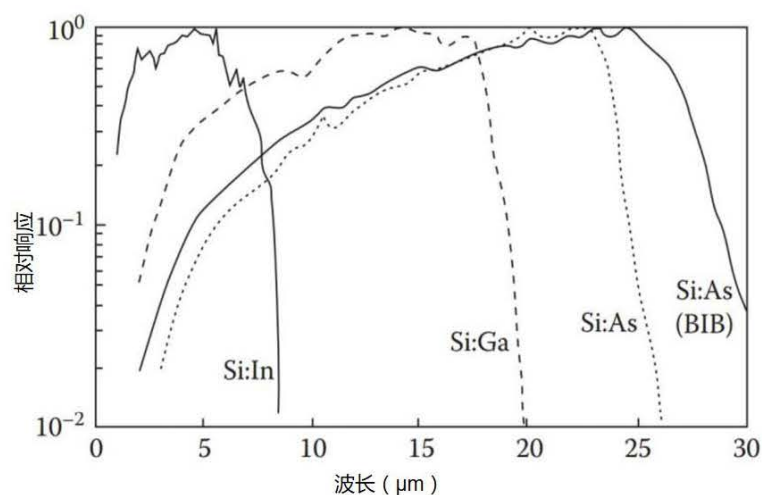


图 1.7 非本征探测器光谱响应图<sup>[76]</sup>

Figure 1.7 Spectral response diagram of extrinsic silicon detector<sup>[76]</sup>

BIB 探测器的暗电流低、光电导增益高、响应速度快、抗辐照性能强和波长响应广等特性，使其逐步取代 IBC 探测器成为天文红外探测器主流器件<sup>[74]</sup>。接下来介绍 BIB 探测器的结构原理以及发展现状等。

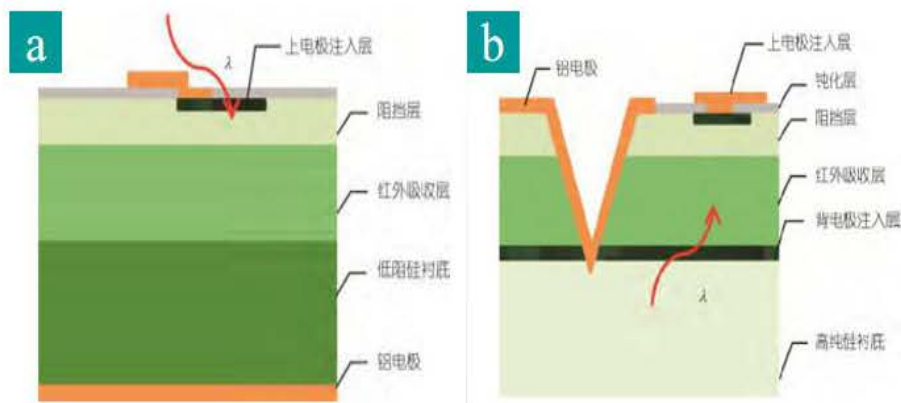


图 1.8 (a) 前照式和 (b) 背照式 BIB 探测器结构图<sup>[77]</sup>

Figure 1.8 Device structure of (a)front-illuminated and (b)back-illuminated BIB detector<sup>[77]</sup>

BIB 探测器按工艺分为外延 BIB 和离子注入 BIB。按照光入射的方式，传统的外延 BIB 又分为前照和背照式两种<sup>[77]</sup>，如图 1.8 所示。

用硅基 BIB 来举例说明。前照式结构的工艺比较简单，在低阻硅上外延生长吸收层和阻挡层，然后在上下两面长好电极即可。外延的方法通常有化学气相沉积工艺（CVD）、分子束外延（MBE）和液相外延法（LPE）<sup>[77]</sup>。背照式衬底通常选择高阻的，然后分别在上面生长电极层、吸收层和阻挡层形成外延多层硅；V 型槽一般通过湿法刻蚀加工形成，上电极层需要通过离子注入形成欧姆接触，电子束沉积上电极层金属。加工完毕后还需要通过减薄工艺，减少器件的厚度；最后通过钢柱和探测器读出电路进行互连。背照式结构比较复杂，但也最符合集成焦平面需求，能和集成电路集成在一起。

硅基 BIB 器件中吸收层中少数载流子数量直接影响器件的性能，要求少数载流子数目少于  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ，因此外延 BIB 器件对外延质量有着较高的要求<sup>[74]</sup>。这限制了外延器件的发展和研究。Beeman 等人 2007 年最先提出了新型横向的阻挡杂质带探测器器件结构<sup>[78]</sup>，并完成了离子注入 Ge:B 远红外 BIB 探测器的制作和测试，在温度为 1.3 K 环境下，器件的黑体响应率为 0.12 A/W 和等效噪声功率为  $5.23 \times 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 。中科院上海技术物理研究所的廖开升博士在此基础上，针对硅基 BIB 探测器，做了离子注入型 Si:P BIB 探测器研究，在温度 5.5 K 环境下，器件的黑体响应率 41.2 mA/W，黑体探测率为  $7.6 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ <sup>[79]</sup>。

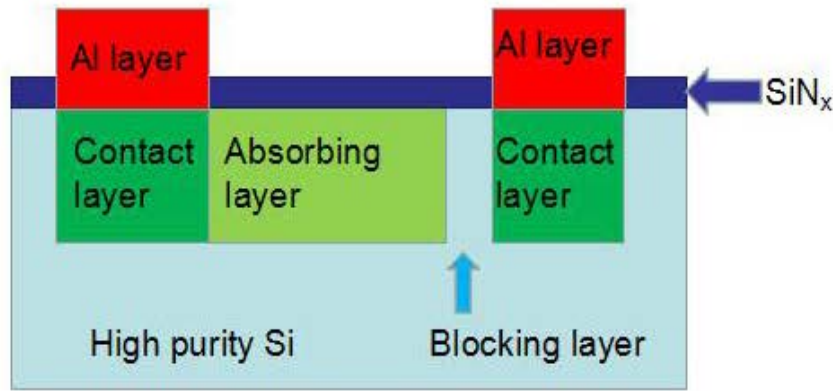


图 1.9 离子注入 BIB 结构示意图

Figure 1.9 The schematic of BIB detector

离子注入硅基 BIB 结构如图 1.9 所示，探测器由高阻硅衬底离子注入形成的吸收区和电极区以及未注入区域的阻挡区构成，再通过电子束沉积金属层构成电极，生长  $\text{SiN}_x$  作为钝化层。离子注入 BIB 探测器要求材料中少数载流子含量较少，高纯度的单晶硅是制作硅基 BIB 探测器的理想材料。然而通过离子注入获得的吸收层比较薄，且会形成晶格损伤，造成吸收不充分。总体来说，离子注入型器件可以对阻挡层厚度、吸收层厚度和掺杂浓度、吸收层面积等进行精确调节，工艺相对简单。另外离子注入 BIB 探测器工艺可以与 CMOS 工艺兼容，对大面积流片制备和读出电路的后续配置提供了便利的条件，性能可以通过多种方式进一步提升。

$\text{Si:As}$  BIB 探测器是最早研发出来应用的的 BIB 探测器<sup>[80-83]</sup>，其响应波段覆盖  $2\sim 30\ \mu\text{m}$ ，广泛应用在各种天文望远镜和天文卫星上，如上述的宇宙背景探测器卫星、红外线天文台和斯皮策空间望远镜中。P 和 Sb 元素也被用于制备 BIB 探测器，P 和 Sb 在 Si 中的杂质能级较 As 浅， $\text{Si:P}$  和  $\text{Si:Sb}$  BIB 探测器的截止波长可以分别达到约  $35\ \mu\text{m}$  和  $40\ \mu\text{m}$ <sup>[84,85]</sup>。

表 1.3 高性能  $\text{Si:As}$  BIB 红外焦平面阵列主要性能指标

Table 1.3 Main performance indexes of high performance  $\text{Si:As}$  BIB infrared focal plane array

探测器	像元数	探测波长 ( $\mu\text{m}$ )	像元尺寸 ( $\mu\text{m}$ )	工作温度	暗电流	读出噪声	满阱	量子效率
$\text{Si:As}$ (DRS Technologies, WISE)	1024x1024	5-25	18	7.8 K	$<5e^-$	42 e <sup>-</sup> RMS	$>10^6e^-$	$>70\%$
$\text{Si:As}$ (Raytheon, JWST)	1024x1024	5-25	25	6.7 K	1 e <sup>-</sup>	10 e <sup>-</sup> RMS	$2\times 10^5e^-$	$>70\%$

最为成熟的硅基 BIB 焦平面器件是 Si:As BIB 探测器，表 1.3 列出了 Si:As BIB 红外焦平面阵列的像元数、探测波长、像元尺寸、工作温度、暗电流、读出噪声、满阱和量子效率等性能指标<sup>[80]</sup>。美国宇航局的斯皮策太空望远镜中装备了 128×128 像元的 Si:As BIB 焦平面，而詹姆斯韦伯系统中更是装备了阵列规模达到 1024×1024 像元的 Si:As BIB 焦平面<sup>[86]</sup>。表 1.4 列举了几个天文卫星发射时间及其硅基 BIB 种类和阵列大小，随着技术的发展，几代硅基 BIB 探测器性能发展越来越好，新一代詹姆斯韦伯太空望远镜装备了更加先进的红外探测器，也将在不久的将来发射到太空中。

表 1.4 天文卫星发射时间及硅基 BIB 性能<sup>[87]</sup>

Table 1.4 Launch time of astronomical satellite and silicon-based BIB properties<sup>[87]</sup>

Satellite	Launch Date	Silicon Detectors
Infrared Astronomical Satellite (IRAS)	1983	PC Si:As
Cosmic Background Explorer (COBE)	1989	BIB Si:Ga
Infrared Space Observatory (ISO)	1995	CAM: PC Si:Ga (32x32) PHT: PC Si:Ga (1x64) SWS: PC Si:Ga Si:Sb BIB Si:As
Space Infrared Telescope Facility (SIRTF)	2003	IRAC: BIB Si:As (256x256) IRS: BIB Si:As (128x128) BIB Si:Sb (128x128) MIPS: BIB Si:As (128x128)

1988 年，Watson 等提出使用锗来扩展探测波长<sup>[88]</sup>。锗基 BIB 红外焦平面的制备目前也取得了一些进展，如斯皮策太空望远镜系统中装备的 32×32 像元的 Ge 掺杂 Ga 无压力阵列器件，响应波长范围 40~120 μm，2×20 的 Ge 掺杂 Ga 有压力阵列响应波长可达 150 μm。表 1.5 列举了斯皮策空间望远镜中锗基探测器的一些性能。

表 1.5 背景限斯皮策空间望远镜 (SST) 中典型的探测器性能<sup>[1]</sup>Table 1.5 Typical detector properties in the background limit spitzer space telescope (SST)<sup>[1]</sup>

Detector Material	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	FOV ( $^{\circ}$ )	R (A/W)	QE (%)	$I_{\text{dark}}$ (e/s)	BG Read Noise (e)
Ge:Be	40	16	3.9	0.5	7	40	30
Ge:Ga	60	24	5.8	6	10	40	60
Ge:Ga	100	40	9.7	9	20	80	60
Stressed Ge:Ga	150	60	14.6	12	10	100	80

砷化镓基 BIB 探测器理论响应波长更长<sup>[89,90]</sup>, 未掺杂的 GaAs 作为阻挡层, 其中非有意掺杂的杂质浓度要求达到  $10^{13}\text{cm}^{-3}$  甚至更低。目前已经验证掺杂浓度低于  $10^{12}\text{cm}^{-3}$  的砷化镓液相外延层可以重复生长<sup>[91]</sup>。GaAs 基 BIB 探测器目前报道的还比较少, 其中的工艺、机理和性能等有待进一步探索。斯皮策太空望远镜红外光谱仪中也安装了很多不同类型的 Ge/GaAs 基 BIB 探测器, 掺杂元素包括 Ga、B、Sb、和 Te 等<sup>[87,88]</sup>, 其中 GaAs 掺杂 Te 的 BIB 探测器可达  $300\mu\text{m}$  的响应波长。

总体来说, 硅基 BIB 探测覆盖  $5\sim 40\mu\text{m}$  波长范围<sup>[1,77]</sup>, 锗基 BIB 覆盖  $40\sim 200\mu\text{m}$  波长范围<sup>[92,93]</sup>, 砷化镓基 BIB 探测器的响应波长达  $300\mu\text{m}$ <sup>[89,90]</sup>。

## BIB 模型简介

由图 1.8 和 1.9 所示的 BIB 器件结构可知, BIB 探测器由吸收层、阻挡层以及电极层排列构成。以硅基 N 型掺杂的 BIB 探测器为例来说明 BIB 探测器的工作原理, 如图 1.10 所示。

由图 1.10(a)可以看到探测器主要由上透明电极层 (top transparent layer)、阻挡层 (Blocking layer)、吸收层 (IR-active region) 和背电极层 (back contact) 构成。吸收层中杂质浓度比较高, 即使在深低温下杂质能级也会拓宽成连续的杂质带<sup>[2]</sup>。阻挡层是本征的硅, 要求尽量不掺杂。阻挡层一端偏压为正时, 探测器内部就会形成一个电场, 场强分布如图 1.10(b)所示; 当有红外光子进入吸收层, 能量大于杂质带跃迁到导带所需要的能量时, 就会激发杂质原子电子到导带上从而形成光电流。由电场分布可以看出, 只有施加电场的部分才会对光电流有贡献,

这部分区域被称为耗尽区。图 1.10(c)可以看到, 由于吸收层的杂质带在阻挡层不连续, 阻挡层很好阻挡了探测器的暗电流<sup>[74]</sup>。

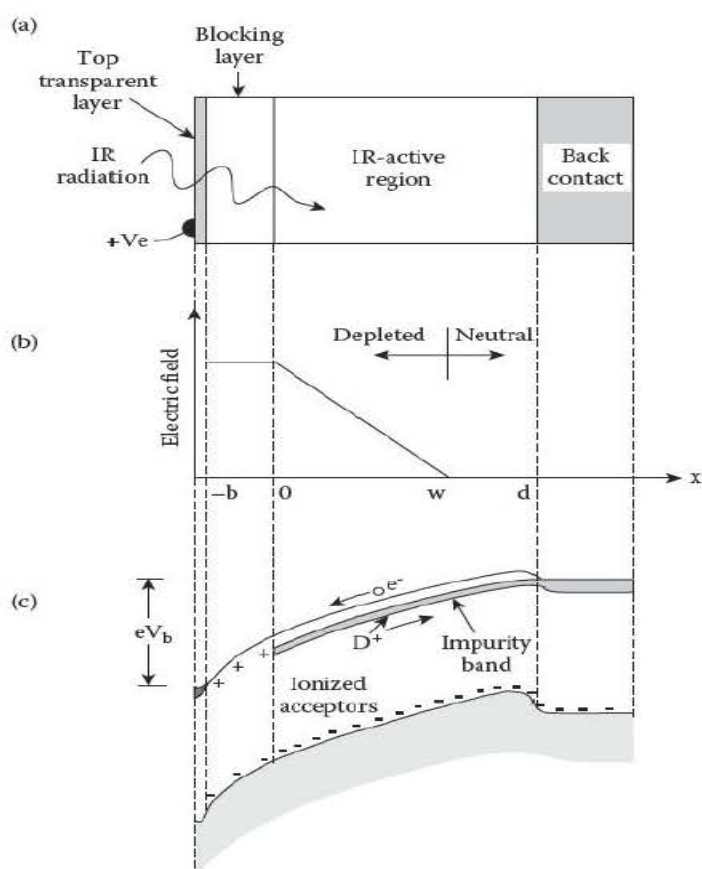


图 1.10 BIB 探测器(a)器件截面图 (b) 正偏压下电场分布图 (c)正偏压小能带图<sup>[1]</sup>

Figure 1.10 BIB detector (a)cross section,(b)electric field, and (c)energy-band diagram of a positively biased detector<sup>[1]</sup>

但是实际测试发现, Si:P BIB 探测器不只有一个响应峰。廖开升等通过理论分析和实验验证, 针对界面势垒效应提出了 BIB 探测器的双激发模型<sup>[96]</sup>:

由固体物理可知, 材料中杂质原子数量越多, 杂质间距越小, 杂质间发生相互作用形成了杂质带。杂质带会和导带相互作用, 导带发生下移。BIB 探测器中吸收层与阻挡层掺杂浓度不一样, 在两者界面处会形成界面势垒 (Interfacial Barrier)。

因为界面势垒的存在, 吸收层吸收的光子成为光电流可通过两种模式跃迁。第一种基本模式: 杂质带中的电子吸收光子能量跃迁到连续带, 在电场作用下形成光电流<sup>[85]</sup>。第二种拓展模式: 杂质带中电子吸收能量跃迁到导带, 在热弛豫作用下到导带底, 电场作用下运动到界面势垒附近, 利用隧穿或热离化作用形成光

电流<sup>[96]</sup>。两种跃迁模式的示意图如图 1.12(a)所示。基本模式 (Basic Mode) 响应光谱如图 1.12(b)中红色曲线所示, 拓展模式 (Extended Model) 响应光谱为蓝色曲线所示。两种模式共同作用, 形成了实际测量的光电流谱。还可以借助拓展模式, 使硅基 BIB 探测器应用到太赫兹领域<sup>[96]</sup>。

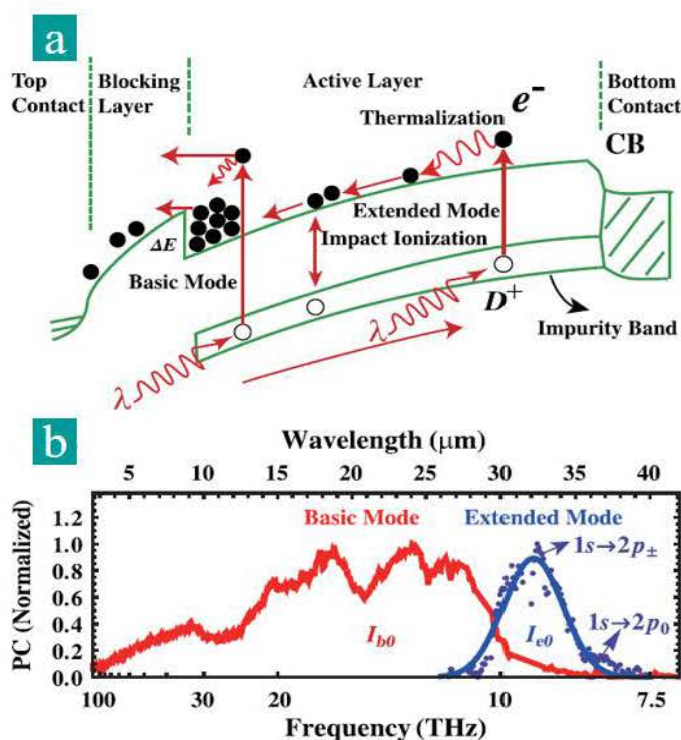


图 1.11 (a)基于界面势垒效应的双激发模型示意图 (b)基本模式和拓展模式的光电流谱<sup>[96]</sup>

Figure 1.11 (a)Band diagram at positive bias illustrating the photodetection processes with consideration of the effects of the interfacial barrier. (b)Normalized photocurrent spectra arise from the basic mode and extended mode.<sup>[96]</sup>

## 1.6 焦平面阵列

焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)是指成像系统焦平面单个探测器图像元 (“像素”) 的集合<sup>[11]</sup>, 包括探测器和读出电路。焦平面阵列包含一维线列和二维阵列。

### 1.6.1 红外焦平面阵列原理

图 1.12 是典型的背光源探测器和集成硅基读出电路的红外焦平面阵列示意图, 探测器阵列通过环孔工艺处理与通过如图 1.12(a)所示的钢柱倒焊工艺与读出

电路相连接,形成的单个探测器和读出电路通过钢柱互连如图 1.12(c)所示。当光入射到探测器上时,探测器会产生光电流信号,光电流信号通过读出电路上的时序控制,实现信号的读出和放大,再通过后续的信号处理,把光电流信号变成图像信息。

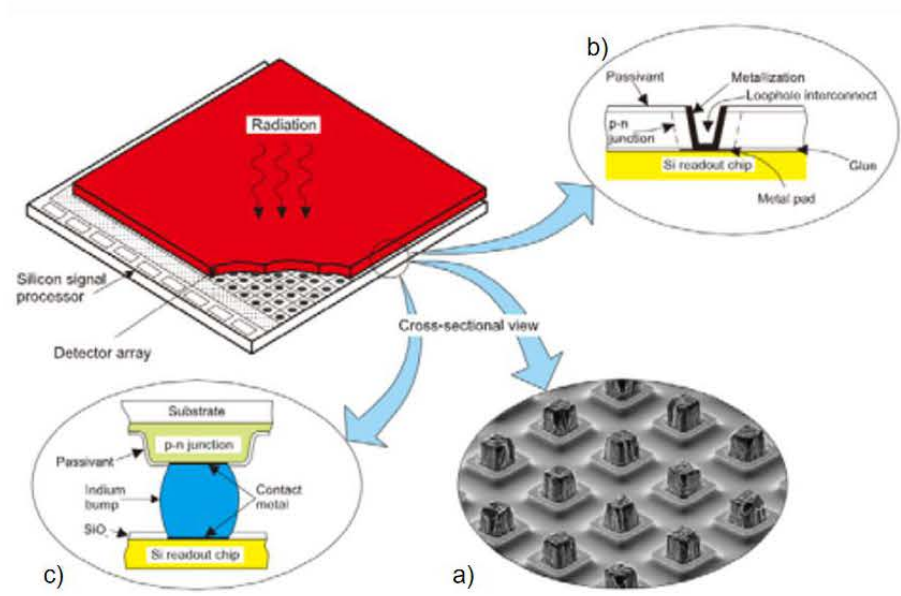


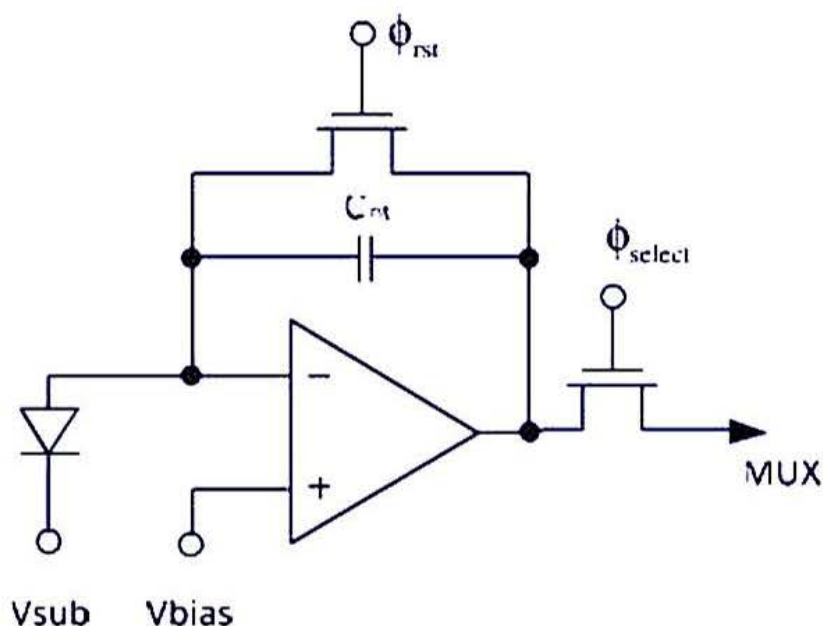
图 1.12 典型背光源探测和集成硅基读出电路的红外焦平面阵列<sup>[97]</sup>

a)钢柱倒焊 b)环孔工艺 c)探测器和电路通过钢柱互连

**Figure 1.12** A typical infrared focal plane array with backlight detection and integrated silicon based readout circuit<sup>[97]</sup> a)indium bump technique, b) loop-hole technique, c) detectors and the circuit are connected via indium

### 1.6.2 焦平面阵列单元

读出电路常用的输入结构有:自积分输入结构(SI)、源跟随器输入结构(SFD)、电容反馈跨阻抗放大器(CTIA)、直接注入输入结构(DI)、反馈增强输入结构(FEDI)、电流镜像输入结构(CM)、电阻负载输入结构(RL)和电阻反馈跨阻放大器(RTIA)等<sup>[1]</sup>。

图 1.13 探测器和 CTIA 结构电路<sup>[98]</sup>Figure 1.13 Detector and CTIA circuits<sup>[98]</sup>

焦平面的一个单元包含一个探测器和相应的读出电路，以 CTIA 读出结构为例对其工作原理进行简要介绍。图 1.13 是探测器与 CTIA 结构电路连接的示意图。电容反馈跨阻放大器（CTIA）模式读出电路读取信号原理：探测器两端加上偏压( $V_{bias}$ )后，光照条件下产生光电流，光电流在电容上累计电荷形成电势差，受时序电路控制的开关加上偏压后，运算放大器将信号放大后输出，重置开关打开将电容两端导通清除电荷，形成一个周期循环，不断读出探测器信号<sup>[98]</sup>。

CTIA 电路在高增益运算放大器的反相端引入了一个反馈电容，使探测器产生的电荷在反馈电容上积分，而不在探测器两端的电容上积分，这样能使探测器两端偏置电压更加稳定，从而能够得到线性更好的信号传递函数<sup>[99]</sup>，因为电路增益是通过反馈电容而不是探测器两端的杂散电容来实现的，CTIA 能够在多路传输前进行信号放大。这种电路的缺点就是 CTIA 电路比 SI 和 SFD 电路所占的面积大。

读出集成电路（Readout integrated circuits, ROIC）是把焦平面的各种功能集成在单一的半导体芯片中的高集成度电路<sup>[100]</sup>。读出集成电路单元由探测器、放大器和多路开关等构成。读出集成电路一般用硅集成电路工艺制造，CMOS 工艺就是最常用的工艺。读出集成电路与探测器阵列连接后可形成传感器芯片组，能够使探测器达到较高的灵敏度与分辨率<sup>[100]</sup>。

### 1.6.3 焦平面的发展

由图1.4可以看出，红外焦平面经历了三代的发展，第四代红外焦平面的概念还在不断完善过程中。

第一代红外焦平面采用的是线列结构，红外探测器系统不包含读出电路，通过引线接到室温放大器进行放大读出，这种结构限制了红外探测器单元的数目。

第二代红外焦平面采用了信号积分的概念。先通过多路选通器控制电路的积分时间，再通过增加积分时间，提升了探测器信号的信噪比。降低了读出电路设计的复杂程度，并且读出电路能够通过钢柱和探测器阵列互连，增强了读出电路抗干扰能力。

相关双采样技术(CDS)诞生使CMOS电路逐渐取代CCD电路，低温下CMOS电路不仅性能更好，而且能够与多功能的模数转换器和数字信号处理器集成，促进了红外焦平面的进一步发展。读出电路的性能逐渐成为影响红外焦平面器件发展的主要因素，读出电路也成为红外焦平面器件研究的重点。

第三代红外探测器出现在20世纪90年代，出现了探测器研发热潮。第三代红外系统能够提供大量像素、较高帧速率、较好热分辨率、多色功能及片上信号处理功能等各种更强的功能。

## 1.7 本论文的研究目的和主要内容

BIB探测器经过几十年的发展，以美国为首的发达国家已经从单元器件发展到 $1024 \times 1024$ ，甚至 $4K \times 4K$ 的红外焦平面阵列器件。然而，我国在BIB红外焦平面方面还处于起步阶段<sup>[77,101]</sup>。近些年来随着我国刚空航天事业发展迅速，对于高性能光子探测器的追求越来越迫切。由于BIB探测器应用的领域比较特殊，为打破发达国家长期对我国长波红外探测器关键核心技术的封锁，满足国家天文物理、生命科学、航空航天和国防等领域对长波红外探测器的迫切需求，促进我国科学技术的发展。在现有工作的基础上，进一步优化BIB探测器性能及研究其深低温读出电路的性质，促进BIB探测器及其深低温读出电路技术的发展。

本论文各章节的主要内容如下：第一章：绪论。主要介绍了BIB探测器背景知识。第二章：深低温半导体性质及BIB探测器理论模型。主要介绍了掺杂半导体在深低温下的性质变化，分析了BIB探测器的基本模型。第三章：CMOS工艺兼容离子注入BIB探测器。主要优化了离子注入型Si:P和Si:As BIB探测器。第四

章：BIB探测器抗反射增强吸收研究。主要介绍了对外延型BIB探测器减反方面的研究成果。第五章：BIB探测器深低温读出电路探究。介绍了CMOS读出电路深低温性质及实现方案。第六章：总结与展望。对本论文的研究进行了总结，列出了成果和不足，并指出下一步研究工作的方向。最后列出了博士期间主要研究成果和论文发表情况。

## 参考文献

- [1] Rogalski A. Infrared detectors[M]. CRC press, 2010.
- [2] 汤定元、糜正瑜等. 光电器件概论, 上海科学技术文献出版社, 上海, (1989).
- [3] Andrews C L. Optics of the electromagnetic spectrum[M]. Prentice-Hall, 1960.
- [4] Hudson R D. Infrared system engineering[M]. Chapter 4, New York, John Wiley & Sons, (1969).
- [5] 李晓峰. 第三代像增强器研究[J]. 2001.
- [6] Bandara S V, Gunapala S D, Liu J K, et al. 10–16  $\mu\text{m}$  Broadband quantum well infrared photodetector[J]. Applied physics letters, 1998, 72(19): 2427-2429.
- [7] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. Infrared Physics & Technology, 2011, 54(3): 136-154.
- [8] Sarusi G, Levine B F, Pearton S J, et al. Improved performance of quantum well infrared photodetectors using random scattering optical coupling[J]. Applied physics letters, 1994, 64(8): 960-962.
- [9] Accetta J S, Shumaker D L, Zissis G J, et al. The infrared and electro-optical systems handbook[M]. Infrared Information Analysis Center, 1993.
- [10] Jankowski J, El-Ahmar S, Oszwaldowski M. Hall sensors for extreme temperatures[J]. Sensors, 2011, 11(1): 876-885.
- [11] 孙志君. 21 世纪的红外焦平面阵列技术军用前景[J]. 现代防御技术, 2003, 31(3):48-54.
- [12] Rogalski A. History of infrared detectors[J]. Opto-Electronics Review, 2012, 20(3): 279-308.
- [13] 朱惜辰. 红外探测器的进展[J]. 红外技术, 1999, 21(6): 12-15.
- [14] J. R. Barrett Proceedings of SPIE, **409**, 76, (1983).
- [15] T. H. Johnson Proceedings of SPIE, **443**, 60, (1983).
- [16] E. H. Puttley “Semiconductors and Semimetals”, Academic Press, New York, (1970).
- [17] N. Sclar IR Physics, **16**, 435 (1976).
- [18] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术[M]. 国防工业出版社, 2012.
- [19] 王忆锋, 刘黎明, 余连杰,等. 碲镉汞材料非本征掺杂研究的发展[J]. 红外, 2012, 33(1):1-16.
- [20] Lawson W D, Nielsen S, Putley E H, et al. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1959, 9(3-4): 325-329.
- [21] M. B. Reine Proceedings of SPIE, **443**, 2, (1983).
- [22] 汤定元. 红外探测器的发展现状[J]. 激光与红外, 1991(1):5-11.
- [23] 沈学础. 半导体光谱和光学性质. 北京: 科学出版社, 2002
- [24] Boyle W S, Smith G E. Charge coupled semiconductor devices[J]. Bell System Technical Journal, 1970, 49(4): 587-593.
- [25] Baker W D. Charge-coupled devices[M]. Berlin: Springer, 1980.

- [26] Janesick J R, Klaasen K P, Elliott T. Charge-coupled-device charge-collection efficiency and the photon-transfer technique[J]. *Optical engineering*, 1987, 26(10): 261072.
- [27] A.Rogalski “New material systems for third generation infrared detectors,”*Proc. of SPIE*, **7388**,1-12 (2009).
- [28] W. Cabanski. “3rdGen focal plane array IR detection modules and applications,”*Proc. of SPIE*, **5406**, 184-192 (2004)
- [29] Gabby Sarusi, QWIP or other alternative for third generation infrared systems[J]. *Infrared Physics and Technology*, **44**, 439-444 (2003).
- [30] Schneider H, Walther M, Schönbein C, et al. QWIP FPAs for high-performance thermal imaging[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2000, 7(1-2): 101-107.
- [31] Tidrow M Z, Beck W A, Clark III W W, et al. Device physics and focal plane array applications of QWIP and MCT[C]//*Photodetectors: Materials and Devices IV*. International Society for Optics and Photonics, 1999, 3629: 100-113.
- [32] InAs/GaSb 超晶格光伏型红外探测器研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.
- [33] 史衍丽, 何雯瑾, 张卫锋,等. 新型 Sb 基二类超晶格红外探测器[C]// 全国光电技术学术交流大会. 2012.
- [34] Martyniuk P, Antoszewski J, Martyniuk M, et al. New concepts in infrared photodetector designs[J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(4): 041102.
- [35] R.J.凯斯. 光探测器与红外探测器[M]. 1984.
- [36] 袁继俊. 红外探测器发展述评[J]. *激光与红外*, 2006, 36(12): 1099-1102.
- [37] 曾戈虹. 红外光子探测器与热探测器性能分析[J]. *红外技术*, 2011, 33(9): 497-500.
- [38] Pannekoek A. A history of astronomy[M]. Courier Corporation, 1989.
- [39] Hoskin M. The Cambridge illustrated history of astronomy[M]. 1996.
- [40] Rieke G H. Infrared detector arrays for astronomy[J]. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 2007, 45: 77-115.
- [41] *Astrotomography: indirect imaging methods in observational astronomy*[M]. Springer Science & Business Media, 2001.
- [42] Trumper R. University students' conceptions of basic astronomy concepts[J]. *Physics Education*, 2000, 35(1): 9.
- [43] Robitaille T P, Tollerud E J, Greenfield P, et al. Astropy: A community Python package for astronomy[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2013, 558: A33.
- [44] Bertone G, Merritt D. Dark matter dynamics and indirect detection[J]. *Modern Physics Letters A*, 2005, 20(14): 1021-1036.
- [45] Neugebauer G, Habing H J, van Duinen R J, et al. The infrared astronomical satellite (IRAS) mission[J]. *Astrophysical Journal*, 1984, 278: L1.
- [46] Neugebauer G, Miley G K, Soifer B T, et al. Quasars measured by the Infrared Astronomical Satellite[J]. *Astrophysical Journal*, 1986, 308: 815.

- [47] Beichman C A, Neugebauer G, Habing H J, et al. Infrared Astronomical Satellite (IRAS)[J]. Catalog and Atlases. NASA, Washington, 1988.
- [48] Clegg P E. The Infrared Astronomical Satellite-IRAS[J]. 1980.
- [49] Nakagawa T. SPICA mission for mid-and far-infrared astronomy[C]//Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter. International Society for Optics and Photonics, 2008, 7010: 70100H.
- [50] Harned N, Harned R, Melugin R. Alignment and Evaluation of the Cryogenic Corrected Infrared Astronomical Satellite (IRAS) Telescope[C]//Optical Alignment I. International Society for Optics and Photonics, 1980, 251: 163-170.
- [51] Low F J, Beichman C A, Gillett F C, et al. Cryogenic telescope on the infrared astronomical satellite (IRAS)[J]. *Optical Engineering*, 1984, 23(2): 232122.
- [52] Mather J C. The cosmic background explorer (COBE)[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(4): 214769.
- [53] Mather J, Kelsall T. The cosmic background explorer satellite[J]. *Physica Scripta*, 1980, 21(5): 671.
- [54] Efstathiou G, Bond J R, White S D M. COBE background radiation anisotropies and large-scale structure in the universe[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1992, 258(1): 1P-6P.
- [55] Kessler M F, Steinz J A, Anderegg M E, et al. The Infrared Space Observatory (ISO) mission[J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, 315: L27-L31.
- [56] Werner M W, Roellig T L, Low F J, et al. The Spitzer space telescope mission[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004, 154(1): 1.
- [57] Houck J R, Roellig T L, Van Cleve J, et al. The Infrared Spectrograph\*(IRS) on the Spitzer Space Telescope[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004, 154(1): 18.
- [58] Gehrz R D, Roellig T L, Werner M W, et al. The NASA Spitzer space telescope[J]. *Review of scientific instruments*, 2007, 78(1): 011302.
- [59] Mills R, Edwards J, Beuville E, et al. High-performance large format impurity band conductor focal plane arrays for astronomy applications[C]//Detectors and Imaging Devices: Infrared, Focal Plane, Single Photon. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7780: 778003.
- [60] W. D. Lawson, S. Nielson, E. H. Putley, and A. S. Young, "Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe," *J. Phys. Chem. Solids* **9**, 325-329 (1959).
- [61] Norton P. HgCdTe infrared detectors[J]. *Optoelectronics review*, 2002 (3): 159-174.
- [62] A. Rogalski, "HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook," *Rep. Prog. Phys.* **68**, 2267-2336 (2005).
- [63] Beletic J W, Blank R, Gulbransen D, et al. Teledyne Imaging Sensors: infrared imaging technologies for astronomy and civil space[C]//SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2008: 70210H.

- [64] Gravrand O, Mollard L, Boulade O, et al. Ultralow dark current CdHgTe FPAs in the SWIR range at CEA and Sofradir[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012: 83530C.
- [65] Zandian M, Garnett J D, Dewames R E, et al. Mid-wavelength infrared p-on-n Hg  $1-x$  Cd  $x$  Te heterostructure detectors: 30–120 kelvin state-of-the-Art performance[J]. Journal of electronic materials, 2003, 32(7): 803-809.
- [66] Wang Z , Tziamtzis A , Wang X . NEAR-INFRARED IMAGING OF WHITE DWARFS WITH CANDIDATE DEBRIS DISKS[J]. The Astrophysical Journal, 2014, 782(1):20.
- [67] 冯端. 固体物理学大辞典[M]. 高等教育出版社, 1995.
- [68] H. C. Liu, Opto-electronics Review **11**, 1-5 (2003).
- [69] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. The james webb space telescope[J]. Space Science Reviews, 2006, 123(4): 485-606.
- [70] Petroff MD, StapelbroekM G. BLOCKED IMPURITY BAND DETECTORS, US Patent 4568960 Feb.4, 1986.
- [71] Watson D M, Huffman J E. Germanium blocked - impurity - band far - infrared detectors[J]. Applied physics letters, 1988, 52(19): 1602-1604.
- [72] Hoffman A W, Love P J, Rosbeck J P. Megapixel detector arrays: visible to 28  $\mu\text{m}$ [C]//Focal Plane Arrays for Space Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5167: 194-203.
- [73] Petroff MD, StapelbroekM G. Responsivity and noise models of blocked impurity band detectors,[J]. Proceedings of the IRIS Specialty Group on IR Detectors, Seattle, WA, 1984.
- [74] Szmulowicz F, Madarasz F L. Blocked impurity band detectors—an analytical model: figures of merit[J]. Journal of applied physics, 1987, 62(6): 2533-2540.
- [75] Sclar N. Properties of doped silicon and germanium infrared detectors[J]. Progress in Quantum Electronics, 1984, 9(3): 149-257.
- [76] Norton P R. Infrared image sensors[J]. Optical Engineering, 1991, 30(11): 1649-1664.
- [77] 廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等.天文用阻挡杂质带红外探测器. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(4): 360-367.
- [78] Beeman J W, Goyal S, Reichertz L A, et al. Ion-implanted Ge:B far-infrared blocked-impurity-band detectors[J]. Infrared Physics and Technology, 2007, 51(1):60-65.
- [79] Liao Kai-Sheng, Li Ning, Liu Xi-Hui, et al. Ion-implanted Si:P blocked-impurity-band photodetectors for far-infrared and terahertz radiation detection[C]// ISPDI 2013 - Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [80] Stetson SB, Reynolds D B, Stapelbroek M G, et al. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1985, 686:48-65.

- [81] Tezcan D S , Putzeys J , Munck K D , et al. Development of a Si:As blocked impurity band detector for far IR detection[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, 6660:66600R-66600R-12.
- [82] Stapelbroek M G, Hogue H H, Atkins E W, et al. Silicon for visible-to-VLWIR photon detection[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 5074(2):188-197.
- [83] Rogalski A. Semiconductor detectors and focal plane arrays for far-infrared imaging [J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(4): 406-426.
- [84] Huffman J E, Crouse A G, Halleck B L, et al. Si: Sb blocked impurity band detectors for infrared astronomy[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(1): 273-275.
- [85] Liao Kai-Sheng, Li Zhi-Feng, Wang Chao, et al. Si:P blocked impurity band detectors for far infrared detection[J]. J. Infrared Millim. Waves, (廖开升, 李志锋, 王超, 等. 用于远红外探测的 Si : P 阻挡杂质带红外探测器研制. 红外与毫米波学), 2016, 35(1):37-41.
- [86] Rauscher B J, Alexander D, Brambora C K, et al. Detector arrays for the James Webb Space Telescope near-infrared spectrograph[C]//Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2007: 66900M.
- [87] Haegel N M. BIB detector development for the far Infrared: from Ge to GaAs[C]//Quantum Sensing: Evolution and Revolution from Past to Future. International Society for Optics and Photonics, 2003, 4999: 182-194.
- [88] Watson D M, Huffman J E. Germanium blocked - impurity - band far - infrared detectors[J]. Applied physics letters, 1988, 52(19): 1602-1604.
- [89] Reichertz L A, Beeman J W, Cardozo B L, et al. GaAs BIB photodetector development for far-infrared astronomy[C]//Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting. International Society for Optics and Photonics, 2004: 231-238.
- [90] Cardozo B L, Reichertz L A, Beeman J W, et al. Characterization of liquid phase epitaxial GaAs for blocked-impurity-band far-infrared detectors[J]. Infrared physics & technology, 2005, 46(5): 400-407.
- [91] Haller E E, Beeman J W. Far infrared photoconductors: recent advances and future prospects[C]//Proc. Far-IR, Sub-mm, & Millimeter Detector Technology Workshop, J. Wolf, J. Farhoomand, and CR McCreight (eds.), NASA CP-211408. 2002: 2-06.
- [92] 何力, 杨定江, 倪国强. 先进焦平面技术导论[M]. 国防工业出版社, 2011.
- [93] Breniere X, Manissadjian A, Vuillermet M, et al. Reliability optimization for IR detectors with compact cryo-coolers[C]//Defense and Security. International Society for Optics and Photonics, 2005: 187-198.
- [94] 黄昆. 固体物理学:重排本[M]. 北京大学出版社, 2014.
- [95] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学.第4版[M]. 国防工业出版社, 2010.
- [96] Liao Kai-Sheng, Li Ning, Wang Chao, et al. Extended mode in blocked impurity band detectors for terahertz radiation detection [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(14):

- [97] Rogalski A. Third-generation infrared photon detectors[J]. *Optical engineering*, 2003, 42(12): 3498-3517.
- [98] 毕查德·拉扎维 Behzad Razavi. 模拟 CMOS 集成电路设计[M]. 西安交通大学出版社, 2003.
- [99] 沈科, 王红培, 胡滨. CTIA 型红外读出电路的数字控制电路结构研究[J]. *实验科学与技术*, 2006, 4(S1):29-30.
- [100] 刘莉萍. 红外焦平面读出电路技术及发展趋势[J]. *激光与红外*, 2007, 37(7).
- [101] Wang B, Wang X, Chen Y, et al. Optimization of fabrication processes of the mesa-type GaAs:Te blocked-impurity-band detector[C]// 2017 2nd IEEE International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM). IEEE, 2017.

## 第二章 深低温半导体性质及 BIB 探测器理论模型

远红外波段能量小，为了提高硅基 BIB 探测器信噪比，需要抑制暗电流和噪声，BIB 探测器要工作在深低温下。为了加深对 BIB 探测器工作原理的认识，需要理解低温条件下掺杂半导体的物理性质。这里仅限于浅能级施主态杂质，主要讨论浅能级施主杂质的电势分布以及不同掺杂浓度下非本征半导体的电学特性。在此基础上介绍 BIB 探测器的物理模型，以及对模型的一些补充。

### 2.1 浅能级施主态氢原子模型

半导体材料的电阻率介于金属与绝缘体之间，在室温下其电阻率在  $10^{-2} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  范围<sup>[1,2]</sup>。半导体材料的电导率可以通过掺杂少量杂质进行调节。掺入到半导体材料中的杂质原子分为两类，一种杂质的价电子比半导体的价电子本身多，称为施主杂质，另一种杂质的价电子比半导体的价电子本身少，称为受主杂质。例如，在硅中加入磷（P）、砷（As）或锑（Sb）等 V 族元素比被取代的硅原子多一个价电子，可以提供自由运动的电子，从而使电阻率降低。图 2.1 为磷原子嵌入硅晶格后的示意图。

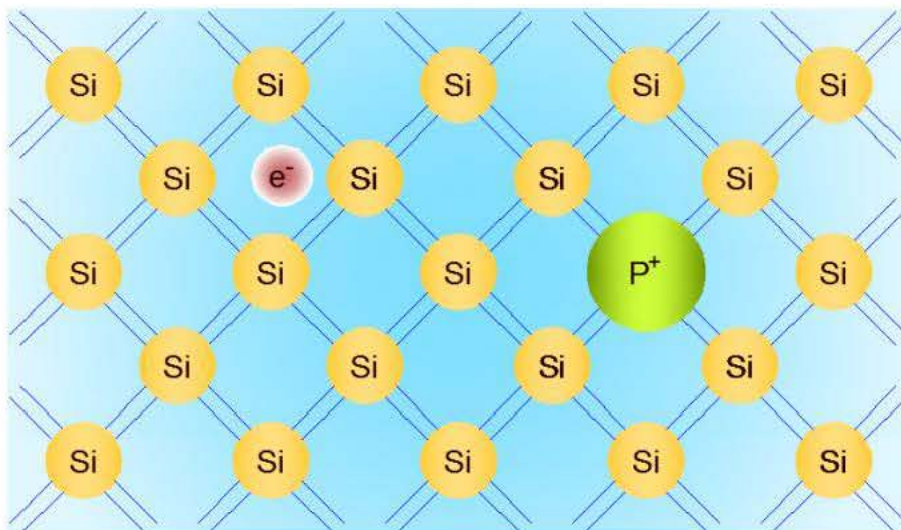


图 2.1 硅原子被磷原子取代时的效果示意图

Figure 2.1 Schematic of the effect, when a silicon atom is substituted by a phosphorous atom

磷原子最外层轨道上存在 5 个价电子，而硅原子只有 4 个，当磷原子在硅晶格上占据一个取代位，多余的价电子就作为电子供体<sup>[3]</sup>。剩余的杂质电子虽然不

能参与硅原子间的成键过程，但它仍然与硅晶格有库仑场的相互作用。硅晶体中的电子-质子库仑相互作用可以用氢原子模型来模拟。硼原子等受主杂质比硅原子少一个价电子，取代硅原子后形成一个带正电的空穴作为电荷载体，从而也能降低电阻率。

在晶体中，施主杂质态的波函数具备布洛赫函数的形式，该波函数在晶体中的缺陷中心被类氢包络函数调节。因此，这样的杂质通常被称为类氢或浅能级杂质。在氢原子中，电子与质子相互作用形成的能级为<sup>[4,5]</sup>：

$$E_n = \frac{m_0 q^4}{8n^2 \epsilon_0 h} \quad (2.1)$$

式中  $q$  为电子电量， $\epsilon_0$  为真空介电常数。 $n$  为主量子数，用以代表能级。 $m_0$  为电子在真空中的质量，当电子不是在真空中运动，而是在半导体中运动时，电子的质量应该用有效质量  $m^*$  替代：

$$m^* = \hbar^2 \left[ \frac{d^2 E}{dk^2} \right]^{-1} \quad (2.2)$$

其中  $E$  是导带边缘处的能量。当导带下边缘区域的能量可以近似为抛物线函数时， $m^*$  是关于波矢量  $k$  的常数。在半导体硅中，导带处电子有效质量表达式为  $m^* = 0.26 \cdot m_0$ ，其中  $m_0$  表示电子在真空中惯性质量。半导体硅中电子-质子相互作用可以用硅的静态介电常数来解释，相对静态介电常数是关于晶胞中位置的复杂函数，受杂质中心形成的受主态空穴和弱束缚的施主电子的影响。然而，如果假设电子概率密度广泛地分布在数千个晶格点上，则可以用平均介电常数  $\epsilon_{Si}$  来近似表示。施主杂质的能级可以表示为：

$$E_n = \frac{m^* q^4}{8n^2 \epsilon_0 \epsilon_{Si} h} \quad (2.3)$$

其中  $\epsilon_{Si}$  为硅的相对介电常数。施主杂质能级对应的半径可以用氢原子的波尔轨道半径  $a_0$  表示为：

$$a_1 = \frac{m_0}{m^*} \epsilon_{Si} a_0 \quad (2.4)$$

其中  $a_0$  等于 0.53 nm，为第一波尔轨道半径。在硅中，施主态半径大约为 30 nm，覆盖几个晶格常数的范围。所以，使用平均静态介电常数来计算是比较合理的。

氢原子模型是解释固体能带理论中的电子能量分布的一种简单有效方法。在简单的氢原子模型中，电子绕原子核转动，有各自的轨道半径，电子被限制在了

分立能级之上，除非原子被激发，否则电子将占据较低的能级<sup>[2]</sup>。固体原子之间都离的很近，因为量子力学作用的效果，单个原子形成的分立能级会拓展成为近乎连续的能带，能带与能带之间会被电子所形成的禁带隔离，最低的能带会被完全填满，称之为价带，下一个较高的能带，不管电子是否占据，都称之为导带<sup>[1]</sup>。只有存在于导带中的电子才能对材料的电导率做出贡献。

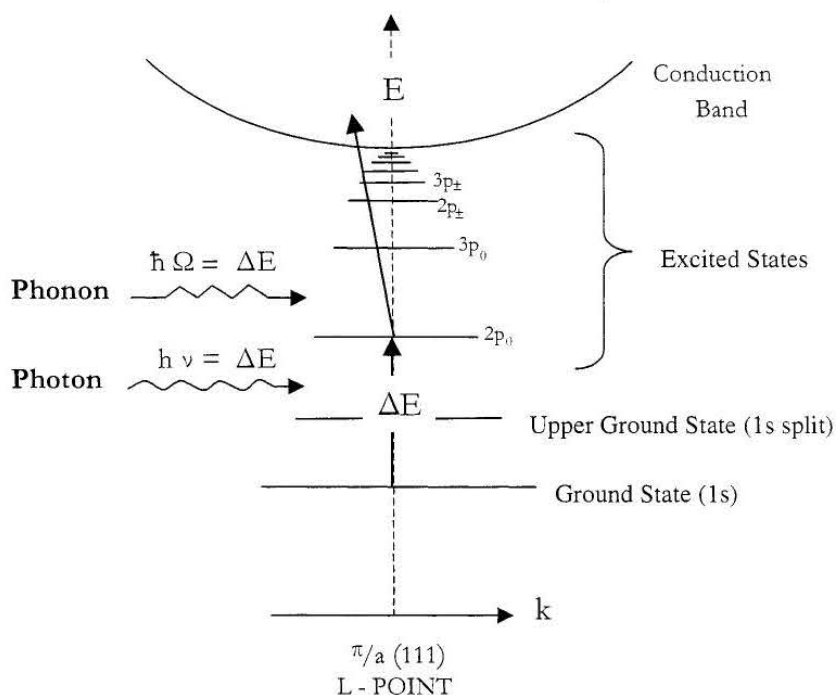


图 2.2 受激跃迁过程示意图<sup>[4]</sup>

Figure 2.2 Schematic of stimulated transition process<sup>[4]</sup>

图 2.2 是电子受激跃迁的过程示意图。由前面简单的氢原子模型可知，分布在不同能级上的电子能量不同。当有特定能量光子入射到半导体上时，半导体中的电子就会吸收能量  $\Delta E$  跃迁到更高的能级上，从而完成光子的吸收，这就是探测器光吸收的基本原理<sup>[6-8]</sup>。

当半导体中掺入杂质时，必然会引入杂质能级。当半导体中杂质浓度到达一定浓度时，杂质能级就会由于耦合作用从而形成杂质带<sup>[9]</sup>。半导体中由于掺杂引入的杂质能级通常比禁带宽度小很多。由于杂质带能级小，可以吸收能量更小也就是波长更长的光子形成跃迁，从而完成对长波波段的探测，BIB 探测器就是利用杂质带跃迁原理制成的<sup>[10-12]</sup>。通过研究不同半导体掺杂不同种类元素杂质，可以形成对不同波长吸收的 BIB 探测器<sup>[13-18]</sup>。基态氢原子模型的固体能带理论有助于对 BIB 探测器内部产生的光电效应的进一步理解。

## 2.2 金属-绝缘体过渡

在固体能带理论中，绝缘体、半导体与导体有着不同的能带结构；导体的显著标志是导带没有被电子完全占据；而绝缘体则与之相反，电子在其中刚好占满了价带中的所有能级，导带却空着，禁带比较宽，价电子通常很难得到足够的能量上升到导带中去<sup>[1,2]</sup>。

从电特性看，半导体的导电率在绝缘体与金属之间。纯净的本征半导体的禁带相对窄一些，仅有零点几电子伏特，而绝缘体禁带则相对较大，约为3电子伏特或更大<sup>[19]</sup>。在室温下，半导体中一些价带上的电子也能获取足够多能量，跃过禁带而到导带。原本被电子占据的位置失去电子称之为空穴。当施加电场或磁场时，空穴和电子都会流经材料，但是两者之间流动的方向却是相反的<sup>[20]</sup>。

氢原子模型并不适用于所有情况，而是只有在杂质基态半径比杂质之间距离大时才有效。当掺杂浓度不断增加时，杂质之间的距离将不断减小，当杂质之间距离下降到单个杂质原子直径尺寸时，不同杂质的能态之间将产生相互作用。本节主要讨论硅中施主杂质的能态特性及其对低温电导率的影响。根据导电性能，将其划分为三个区域：绝缘区域、金属导电区域和介于两者之间的中间区域<sup>[21]</sup>。

### 2.2.1 绝缘区域

当硅中掺杂的杂质浓度  $N_D$  小于  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时，将这个掺杂区域称为绝缘区域。在低掺杂浓度的限制下，由氢原子模型可以得到半导体中孤立杂质的能级。这些能级通常位于禁带中，接近导带或者价带的边缘。掺杂半导体的低温电学特性不仅依靠掺杂的多数杂质，而且也受补偿掺杂的杂质影响。如果只存在施主杂质，而没有补偿掺杂的受主杂质，那么电导率受掺杂杂质的电离能  $E_D$  和温度  $T$  影响，与  $E_D/k_B T$  成正比。杂质束缚态能级上的电子通过吸收声学声子，使束缚态电子通过热激发进入导带。在极低温环境下，杂质不能得到足够的热激发能量，所有杂质都没有发生电离，没有可以自由移动的电子，电阻率很高。然而可以通过光激发产生自由移动的电子，使材料电阻率降低，本征光电导探测器就是基于这一原理<sup>[6]</sup>。

### 2.2.2 中间区域

当硅中掺杂的杂质浓度  $N_D$  处于  $10^{17} \text{ cm}^{-3} \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  之间时，称为中间掺杂区域，在这个掺杂浓度下，硅中分散的杂质能级将拓宽为杂质能带。当存在补偿

掺杂杂质时，将存在两种导电机制，一种是上面所说的吸收热声子，跃迁至导带进行传导，还有一种是直接通过杂质能带传导。即使在低温环境下，补偿的受主杂质也会被施主杂质的电子所占据，使得一部分的施主杂质和受主杂质处于电离状态。在电场环境下，未电离施主杂质多余的电子，可以通过吸收和发射声子的形式在杂质能级上运动，这个过程可以等效看成是电离的施主杂质沿着相反方向运动。这种导电机制被称为杂质带电导，电导率可以表示为：

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_A/k_B T) \quad (2.5)$$

其中  $E_A$  是未电离杂质多余的电子运动到电离杂质的空位所需要的激活能。施主杂质在导带下形成了一个杂质电导能带，即使在深低温下导带也能形成。研究的 BIB 探测器中的吸收层需要的掺杂浓度就在这个区域。

### 2.2.3 金属导电区域

随着掺杂浓度的进一步增加，当掺杂浓度超越某个临界值时，半导体就会呈现出与金属一样的导电特性。这个临界值与半导体材料和杂质种类有关。当硅中施主杂质浓度  $N_D$  高于  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时，称之为金属导电区域。在这种掺杂浓度下，不再存在孤立的杂质态。杂质带中的电子可以有自旋向上和自旋向下两种不同的状态。杂质掺杂浓度越高，杂质能带向上拓展越宽，最终与导带底合并。在绝对零度下，电子所具有的最高能量就是半导体的费米能级。这种高掺杂浓度的半导体可以用来制作欧姆接触。通过离子注入技术，使用 50 keV 的注入能量，向硅中注入  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  剂量的杂质，可以在硅中形成大约 100 nm 厚的重掺杂区域，峰值掺杂浓度可达  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ <sup>[22]</sup>。

低温下半导体掺杂的三个区域正好可以分别成为 BIB 探测器的阻挡层、吸收层、和电极层，通过对三种掺杂浓度性质的研究可以指导 BIB 探测器的理论和工艺。

## 2.3 Poole-Frenkel 效应

在这一节中，主要讨论浅能级施主在电场中的电势分布特性。如前面所述，施主态的势可用氢原子模型描述，由硅原子的介电常数修正为<sup>[23]</sup>：

$$\varphi(r) = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_{Si}r} \quad (2.6)$$

当施主杂质处于电场中时，电势分布为：

$$\varphi(r) = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon_S r} - |E|r \quad (2.7)$$

受电场影响的电势分布不再是简单的  $1/r$  特性。在图 2.3 中，给出了  $E=0$  kV/cm 和  $E=10$  kV/cm 时浅能级施主杂质的电势分布。

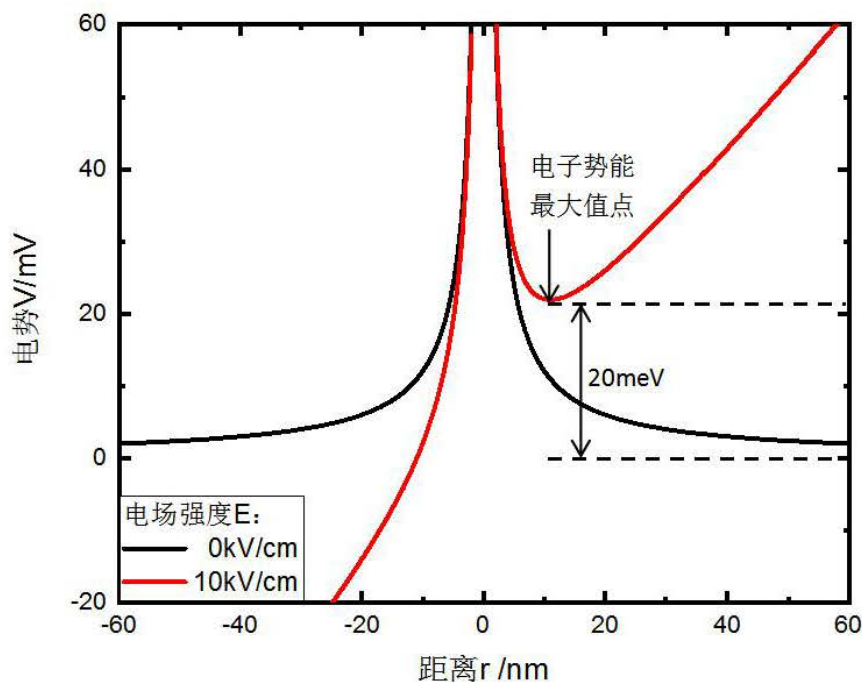


图 2.3 硅晶体中电势分布

Figure 2.3 Potential distribution in silicon crystal

外加电场导致局部势能最大值的出现，形成势垒<sup>[24]</sup>：

$$E_{PF} = q\sqrt{q|E|/\epsilon} \quad (2.8)$$

其中  $E$  为电场强度， $\epsilon$  为材料介电常数。施主杂质磷在硅中的电离能为 45.7 meV，当存在 10 kV/cm 大小的电场时，势垒会降低 20 meV，这种现象就是 Poole-Frenkel 效应。

当温度从 5 K 变化为 40 K 时，热力学能量  $k_B T$  从 0.4 meV 变化到 3.2 meV。在这个温度下，热力学能量远小于杂质电离能，所以电子占据基态。由于 Poole-Frenkel 效应的存在，将影响电子通过热激发进入导带。这一特性可以在后面讨论的 BIB 结构工作机制时研究。此外，除了热激发，在足够高的电场下，电子能够通过隧穿效应进入导带<sup>[25]</sup>。

浅能级施主杂质与电场的相互作用是研究 BIB 结构探测器在低温下探测器物理特性的基础。讨论探测器各种物理机制时，都将联系到这个基本特性，例如

场致发射机制和电离杂质复合机制。

## 2.4 迁移率

这一节将讨论硅中电子在电场驱动下在导带中的传导特性。可以用迁移率来描述这种特性：

$$\mu = \frac{v}{|E|} \quad (2.9)$$

其中  $v$  是电子运动速度， $E$  为半导体中的电场大小。迁移率与电场强度、温度以及掺杂浓度有关。由波尔兹曼传输方程可以详细地讨论迁移率，但是在这里只定性地讨论温度对迁移率的影响。在 **Drude** 模型中，半导体中的电子在被晶格原子和声子散射之前，在电场作用下将不停做加速运动。电子在散射过程中不断减速，散射完成后电子在电场作用下持续做加速运动。在很短的时间内，电子重复以上的加速、散射减速和再加速的过程。电子的运动速度可以用一个宏观的速度表示，电子的迁移率与散射时间成正比关系：

$$\mu = \frac{e \tau_s}{m^*} \quad (2.10)$$

其中  $\tau_s$  是两次散射之间的平均时间间隔。

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{\langle v \rangle \tau} \propto S \quad (2.11)$$

其中  $l$  为电子的平均自由程， $S$  是电子散射截面， $v$  是导带和价带中所有电子的平均运动速度。由波尔兹曼分布函数可得：

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m^* \langle v \rangle^2 &= \frac{3}{2} k_B T \\ \Rightarrow \langle v \rangle &\propto \sqrt{T} \end{aligned} \quad (2.12)$$

关于声学声子散射，其散射截面为：

$$S_{ph} \propto T \quad (2.13)$$

联合以上公式，可以得到：

$$\mu_{ph} \propto T^{-3/2} \quad (2.14)$$

借助卢瑟福散射模型，可以研究半导体中电离的施主杂质和受主杂质等缺陷对电子运动的散射作用：

$$S_{def} \propto \langle v \rangle^4 \propto T^{-2} \quad (2.15)$$

其中  $v$  是热平均速度，与  $\sqrt{T}$  成正比，由公式 2.11、2.12 与公式 2.13 可得：

$$\mu_{\text{def}} \propto T^{3/2} \tag{2.16}$$

由 Matthiessen-rule 可以得到最终的迁移率：

$$\mu = \frac{\mu_{\text{ph}} \mu_{\text{def}}}{\mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{def}}} \tag{2.17}$$

在低温下，迁移率 $\mu$ 按  $T^{3/2}$  变化，随着温度的逐渐升高，迁移率变大逐渐取得最大值，如果温度继续升高，迁移率将按  $T^{-3/2}$  降低。

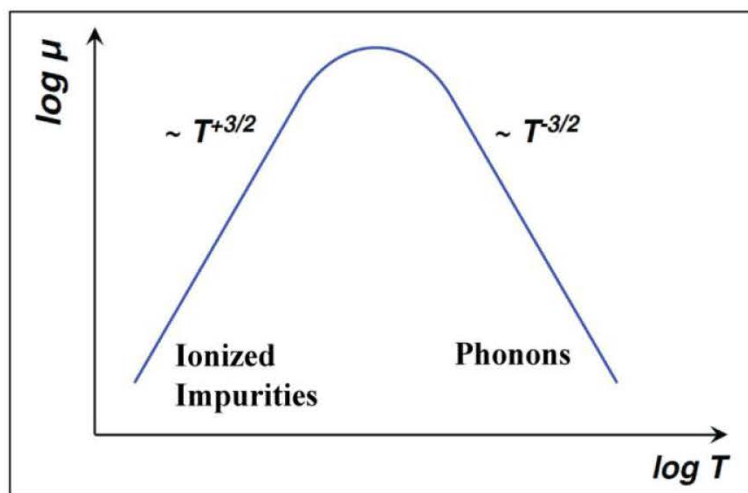


图 2.4 载流子迁移率和温度之间关系的定性图<sup>[21]</sup>

Figure 2.4 Qualitative diagram of the relationship between carrier mobility and temperature<sup>[21]</sup>

图 2.4 显示了载流子迁移率和温度之间的关系定性图，考虑了光学声子和杂质散射的影响。

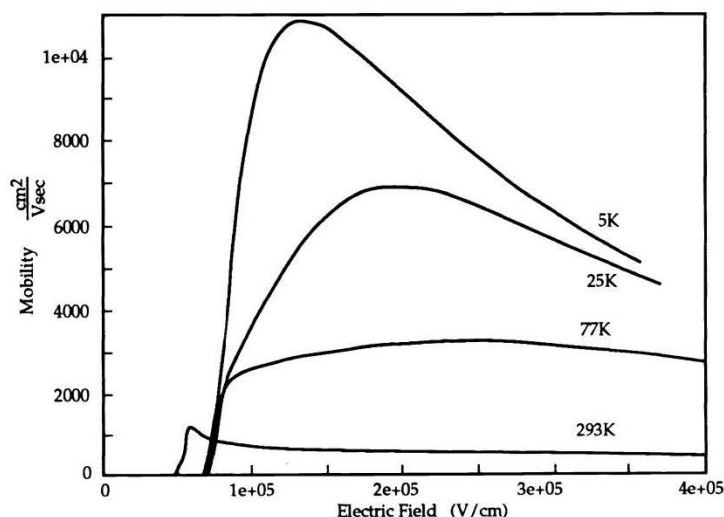


图 2.5 不同温度下载流子迁移率与场强关系<sup>[26]</sup>

Figure 2.5 The relationship between carrier mobility and field strength at different temperatures<sup>[26]</sup>

图 2.5 是 CMOS 器件在不同温度下分别测得的载流子迁移率与电场强度之间的关系图。由图可以看到常温 (293 K) 下, 载流子迁移率很小, 数值低于  $2000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , 液氮温度 (77 K) 时, 载流子迁移率可达  $3000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , 5 K 时, 迁移率能够达到  $10000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。可以看出随着温度的降低, 相同电场强度下载流子迁移率速度出现了提高。迁移率也和电场强度有很大的联系, 如在 BIB 探测器工作温度 5 K 时, 载流子迁移率从很小逐渐提高, 到  $150 \text{ KV/cm}$  时迁移率达到最大值, 后面又随着场强增大而慢慢减小。

载流子迁移率是 BIB 探测器和 CMOS 电路中的重要参数, 研究载流子迁移率低温性质变化有助于对探测器原理和性能分析。

## 2.5 BIB 探测器电场模型

为了更好地理解 BIB 探测器的工作原理以及进一步优化探测器结构参数, 首先需要研究 BIB 探测器中的电场分布情况<sup>[11,16,27-30]</sup>, 以常见的硅掺磷或砷的 N 型 BIB 探测器举例说明。硅基 BIB 探测器主要由高掺杂的电极层、轻掺杂的吸收层和未掺杂的阻挡层组成。吸收层中除了引进的多数施主杂质以外, 还会出现少许其它的补偿掺杂受主杂质。即使在低温下, 补偿的受主杂质也可以从施主杂质获得电子而电离。同时, 同样多的施主杂质也将电离。在没有外加电场的情况下, 这些电离杂质均匀分布在吸收层中。给探测器两端加上电压, 电离的施主杂质将通过杂质能带向负电极端移动, 电离的受主杂质仍然均匀分布在吸收层中。这样的结果就是导致在吸收层与阻挡边界处, 将形成一个由电离杂质主导的空间电荷区, 在 BIB 探测器结构中被称为耗尽层。

如果给阻挡层一端接正电极, 则空间电荷区的电荷为电离的受主杂质, 电荷密度就是受主杂质浓度; 如果给阻挡层一端接负电极, 则空间电荷区的电荷为电离的施主杂质, 电荷密度就是施主杂质浓度。空间电荷区将对 BIB 探测器内的电场分布产生很大影响, 从而影响探测器光电性能。下面以阻挡层一端接正电极 (正向偏压模式) 为例, 求解得到 BIB 探测器中电场按以下规律分布:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0} = \begin{cases} -\frac{eN_A}{\epsilon\epsilon_0} & 0 < x < w \\ 0 & -b < x < 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

其中  $\epsilon$  为硅材料的相对介电常数,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\rho$  为空间电荷区电荷密度,  $e$  为电子电量,  $N_A$  代表补偿掺杂的受主杂质浓度。假设阻挡层足够纯净,

没有净电荷存在,则电场在阻挡层内将保持不变,记为  $E_{\max}$ 。图 2.6 为 N 型 BIB 探测器,阻挡层接正电极时,探测器结构和电场分布示意图。

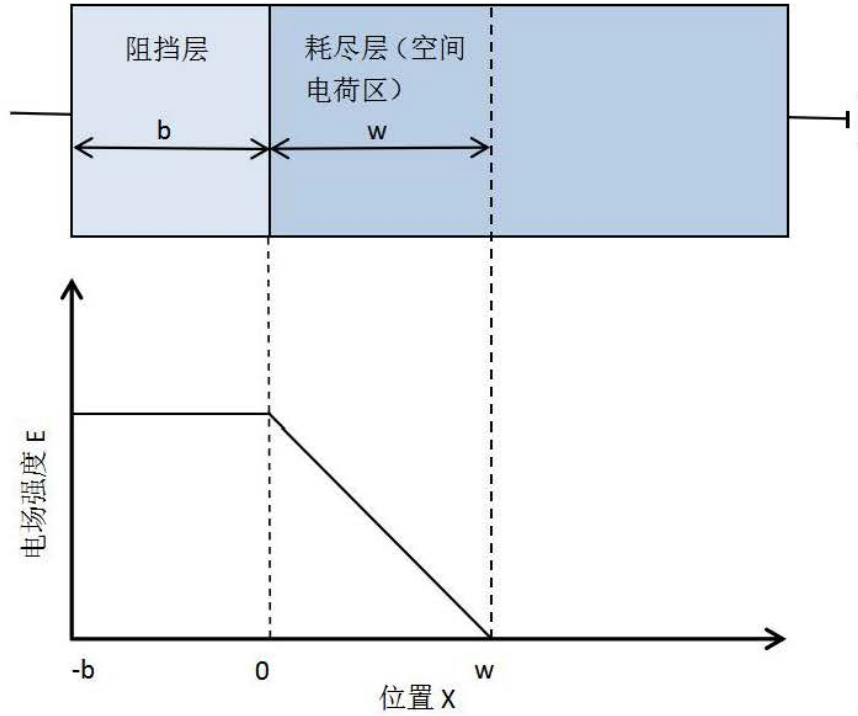


图 2.6 BIB 探测器结构电场分布示意图

Figure 2.6 Schematic diagram of electric field distribution in BIB detector structure

探测器两端的电压  $V$  主要由阻挡层和耗尽层承担:

$$V = \int_0^w E(x) dx + E_{\max} * b \quad (2.19)$$

其中  $w$  表示耗尽层的宽度,  $b$  表示阻挡层的宽度。

解以上方程组可得:

$$E(x) = \begin{cases} -\frac{qN_a}{\epsilon\epsilon_0}(x-w) & 0 < x < w \\ -\frac{qN_a w}{\epsilon\epsilon_0} & -b < x < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

$$w = \sqrt{\frac{2eV}{qN_a} + b^2} - b \quad (2.21)$$

由以上公式可以看出,探测器的电场分布主要由补偿掺杂的杂质浓度和耗尽层宽度决定,而耗尽层宽度又由添加的偏压、补偿掺杂的杂质浓度和阻挡层宽度决定。在阻挡层以外的吸收层内,电场强度非常小,所以在这些区域内光激发的载流子对光电导贡献较小。而在耗尽层内电场较大,光激发的载流子将在电场驱动下快速移动至电极两端,贡献于探测器光电导。此外,在耗尽层内,施主杂质

都没有电离，不会复合光激发的电子，使光激发电子寿命更长，更有助于提高光电流。为了提高探测器的性能，应该使耗尽层宽度尽可能大。增加电压、减小阻挡层宽度和减小补偿掺杂浓度，都可以使耗尽层变宽。但是当偏压增加到一定程度时，电场将足够大，以至于探测器暗电流将非常大，探测器崩溃。当阻挡层宽度减小到一定程度时，阻挡层减小杂质带暗电流的作用也将失效。所以，为了获得更宽的耗尽层，往往是通过尽可能降低补偿掺杂的杂质浓度。

当阻挡层一端接负电极时，称为负偏压模式，用同样的方法可以求得：

$$E(x) = \begin{cases} -\frac{qN_d}{\epsilon\epsilon_0}(x-w) & 0 < x < w \\ -\frac{qN_d w}{\epsilon\epsilon_0} & -b < x < 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$w = \sqrt{\frac{2eV}{qN_d} + b^2} - b \quad (2.20)$$

由上式可以计算，当  $N_a=10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ，阻挡层厚度  $b=5 \mu\text{m}$  时，加偏压为 1.5 V， $w$  约等于  $40 \mu\text{m}$ ， $0 < x < w$  区域， $E(x)=0.6 \text{ kV/cm}$ ， $-b < x < 0$  区域， $E(x)=0.6(1-x/40) \text{ kV/cm}$ 。根据上述公式，可以算出场强、耗尽区厚度等信息，为硅基 BIB 探测器性能分析和减反提供了依据。

由于 N 型的 BIB 探测器中  $N_d$  比  $N_a$  大好几个数量级，所以在这种偏压模式下，探测器的耗尽层宽度将比另一种偏压模式小很多，以至于探测器性能将大大降低。所以 N 型掺杂的 BIB 探测器通常选择在正向偏压下工作<sup>[10,31]</sup>。

但是实际测量发现，探测器加反偏时也能工作。在阻挡层一侧加正偏压称为正常工作模式，反之称为反偏模式。通过文献和实验，发现小偏压反偏模式性能更好。分析了载流子和电场在 BIB 探测器不同区域的分布，说明了为什么偏压较小情况反偏模式能够得到较高的响应率和较宽的响应波段。经过理论分析 BIB 探测器反偏模式出现暗电流的原因，证明硅基 BIB 探测器可以很好的工作在反偏工作模式下，结果发表于 T-ED<sup>[32]</sup>。

## 2.6 本章小结

本章就深低温下掺杂半导体性质做了理论分析，通过分析深低温掺杂半导体性质和参数变化为探测器低温模型建立打下基础。简要分析了 BIB 探测器电场模型和电场分布，说明了 BIB 探测器工作原理。分析反偏模式工作原因，深化了对 BIB 探测器模型的认识。

## 参考文献

- [1] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学(第7版)[M]. 电子工业出版社, 2008.
- [2] 黄昆. 固体物理学:重排本[M]. 北京大学出版社, 2014.
- [3] S.M.Sze,Kwok K.Ng.Physics of Semiconductor Devices[M].Hoboken:John Wiley & Sons,2007:16-17.
- [4] Mermin Ashcroft.Solid state physics[M].Harcourt:Harcourt College Publishers,1976.
- [5] Haller E E, Hansen W L, Goulding F S. Physics of ultra-pure germanium[J]. Advances in Physics, 1981, 30(1): 93-138.
- [6] Rogalski A. Infrared detectors[M]. CRC press, 2010.
- [7] 汤定元、糜正瑜等. 光电器件概论. 上海科学技术文献出版社, 上海, (1989).
- [8] 沈学础. 半导体光谱和光学性质. 北京: 科学出版社, 2002
- [9] 汤定元. 红外探测器的发展现状[J]. 激光与红外, 1991(1):5-11.
- [10] Petroff MD, StapelbroekM G. BLOCKED IMPURITY BAND DETECTORS, US Patent 4568960 Feb.4, 1986.
- [11] Petroff MD, StapelbroekM G. Responsivity and noise models of blocked impurity band detectors, [J]. Proceedings of the IRIS Specialty Group on IR Detectors, Seattle, WA, 1984.
- [12] Liao Kai-Sheng, Liu Xi-Hui, Huang Liang, et al. Blocked impurity band infrared detectors for astronomy [J]. Sci. Sin-Phys. Mech. Astron, (廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等.天文用阻挡杂质带红外探测器. 中国科学: 物理学 力学 天文学), 2014, 44(4): 360-367.
- [13] Burstein E. Optical and photoconductive properties of silicon and germanium[C]//Photoconductivity Conference. John Wiley & Sons, 1956: 353-413.
- [14] Sclar N. Properties of doped silicon and germanium infrared detectors[J]. Progress in Quantum Electronics, 1984, 9(3): 149-257.
- [15] Bratt P R. Impurity germanium and silicon infrared detectors[M]//Semiconductors and Semimetals. Elsevier, 1977, 12: 39-142.
- [16] Szmulowicz F, Madarasz F L. Blocked impurity band detectors—an analytical model: figures of merit[J]. Journal of applied physics, 1987, 62(6): 2533-2540.Sclar N.
- [17] Development status of silicon extrinsic IR detectors, II[C]//Infrared detectors. International Society for Optics and Photonics, 1983, 443: 11-41.
- [18] Huffman J E, Crouse A G, Halleck B L, et al. Si: Sb blocked impurity band detectors for infrared astronomy[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(1): 273-275.
- [19] Bhattacharya P, Pang L Y. Semiconductor optoelectronic devices[M]. Upper Saddle River, NJ: prentice hall, 1997.
- [20] Akimoto K. Semiconductor device including zinc oxide containing semiconductor film: U.S. Patent 8,134,156[P]. 2012-3-13.

- [21] Valentin Fedl. Development of infrared silicon BIB detectors with integrated linear amplification[D]. Siegen: Siegen University, 2011.
- [22] 赵鹤鸣, 钱敏, 黄秋萍译. 半导体器件物理与工艺(第二版)/(美)施敏著[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2010.
- [23] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [24] J. Frenkel. On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semiconductors[J]. Phys. Rev., 1938, 54(647).
- [25] 丁士连, 周全华. 隧道二极管的导电机理[J]. 天津师大学报, 1992(2).
- [26] Glidden R M, Lizotte S C, Cable J S, et al. Optimization of cryogenic CMOS processes for sub-10-kelvin applications[C]//Infrared Readout Electronics. International Society for Optics and Photonics, 1992, 1684: 2-39.
- [27] Haegel N M, Jacobs J E, White A M. Modeling of steady-state field distributions in blocked impurity band detectors[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(26): 4389-4391.
- [28] Haegel N M, Samperi S A, White A M. Electric field and responsivity modeling for far-infrared blocked impurity band detectors[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(2): 1305-1310.
- [29] Stetson S B, Reynolds D B, Stapelbroek M G, et al. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays[C]//Infrared Detectors, Sensors, and Focal Plane Arrays. International Society for Optics and Photonics, 1986, 686: 48-65.
- [30] Szmulowicz F, Madarasz F L, Diller J. Temperature dependence of the figures of merit for blocked impurity band detectors[J]. Journal of applied physics, 1988, 63(11): 5583-5588.
- [31] Woods S I, Kaplan S G, Jung T M, et al. Characterization of the optical properties of an infrared blocked impurity band detector[J]. Applied optics, 2011, 50(24): 4824-4833.
- [32] Zhu H, Wang C, Wang P, et al. Optimized Si-Based Blocked Impurity Band Detector Under Alternative Operational Mode[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(9): 3891-3895.



### 第三章 CMOS 工艺兼容离子注入 BIB 探测器

阻挡杂质带 (BIB) 探测器主要有外延和离子注入两种。外延型 BIB 探测器发展的比较成熟, 高性能的焦平面探测器应用于空间望远镜<sup>[1-4]</sup>。但是采用外延生长方法制作 BIB 探测器对硅片外延质量有较高的要求, 特别是少数载流子浓度必须控制得很低<sup>[5-7]</sup>。随着现代集成电路技术的飞快发展, 离子注入技术也随之变得越来越成熟。离子注入剂量精确可控, 是实现杂质局部掺杂的很好选择。因此应用离子注入技术制备硅基 BIB 探测器是一个很好选择。

本章将围绕离子注入型 BIB 探测器, 从离子注入仿真到 BIB 探测器的制备工艺、测试方法等逐一展开。在离子注入 BIB 探测器工艺的基础上, 不断优化探测器制备工艺, 制备了性能更加优异的器件, 而且这些工艺与 CMOS 工艺兼容。利用 CMOS 工艺制备这些探测器可以使得探测器批量化生产更加简单, 降低探测器加工成本。将 BIB 探测器与 CMOS 读出电路集成在同一芯片上可以减少读出噪声, 从而进一步提高探测器性能。

#### 3.1 离子注入及其仿真

离子注入: 在真空环境下, 通过加速离子使得离子获得动能, 离子束射入靶体材料以后, 由于受到碰撞减速, 最后离子进入靶体材料中的这一现象被称为离子注入<sup>[8,9]</sup>。与离子注入工艺相似的还有溅射和散射。

离子注入靶材以后, 注入的离子束会在靶材表面和内部的分子或原子发生一些物理或者化学反应, 从而使得材料表面或整体性能发生改变, 获得一些性能提升或者新的特性。

在半导体器件中, 器件的导电性能是一项重要参数。早期的半导体器件通过扩散等实现半导体的掺杂改变导电特性。随着 CMOS 工艺的发展, 器件尺寸变得越来越小, 离子注入工艺由于注入区域分布和浓度精确可控, 在新的微纳器件加工中发挥的作用越来越重要。当然, 离子注入也有着一些自身的缺点比如会给衬底材料带来缺陷和晶格损伤, 这些损伤和缺陷很难通过退火等工艺彻底消除。

图 3.1 展示了离子注入机的主要设备和机构。

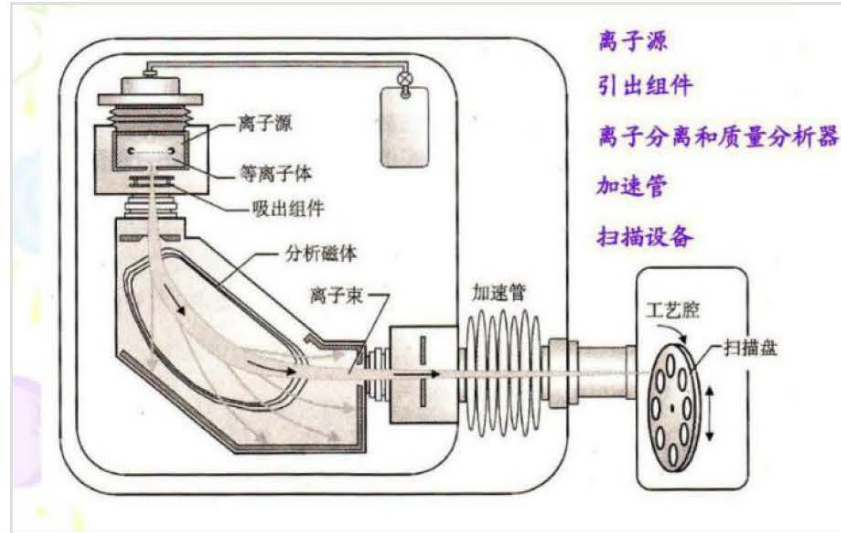


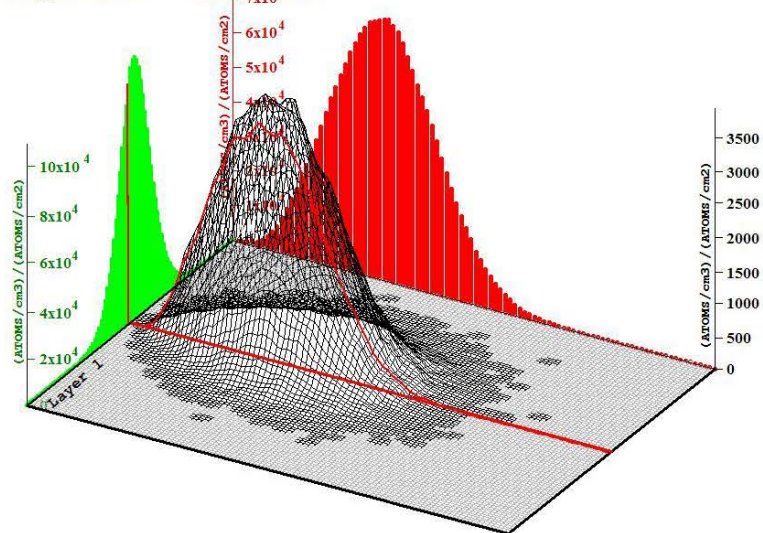
图 3.1 离子注入机主要设备和结构

Figure 3.1 Main equipment and structure of the ion implanter

由于离子注入机理论上可以对多种元素，以不同能量进行离子注入，实现不同元素不同剂量的掺杂，是现代半导体工艺的基础和重要方法。离子注入仿真软件常用的有 SRIM 和 Silvaco。SRIM 仿真功能比较强大，可以得到不同离子的各种能量注入，在半导体中的分布和缺陷等信息。图 3.2 是 SRIM 进行砷元素注入硅仿真得到的杂质分布示意图。

### Ion Distribution

Ion Range = 1579 Å    Skewness = 0.176  
 Straggle = 515 Å    Kurtosis = 2.764



Plot Window goes from 0 Å to 5000 Å; cell width = 50 Å.  
 Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

**Ion = As (240. keV)**

图 3.2 砷离子注入的 SRIM 仿真

Figure 3.2 SRIM simulation of arsenic implantation

Silvaco 仿真软件功能比较多和系统，可以实现离子注入工艺的仿真，也可以实现扩散、刻蚀、氧化、外延、抛光和光刻等半导体工艺仿真，非常适用于半导体器件的工艺仿真和器件性能模拟。这里主要用 Silvaco 软件的 Person 离子注入模型进行多种杂质元素注入到高纯硅衬底的仿真。P 和 As 原子是硅中常见的 N 型掺杂，其注入技术在半导体工艺中比较成熟，也是硅基 BIB 探测器常用的掺杂杂质。图 3.3 为利用 Silvaco 仿真软件以磷元素离子注入到硅中的仿真，注入深度、掺杂浓度和注入条件之间的关系如下图所示。

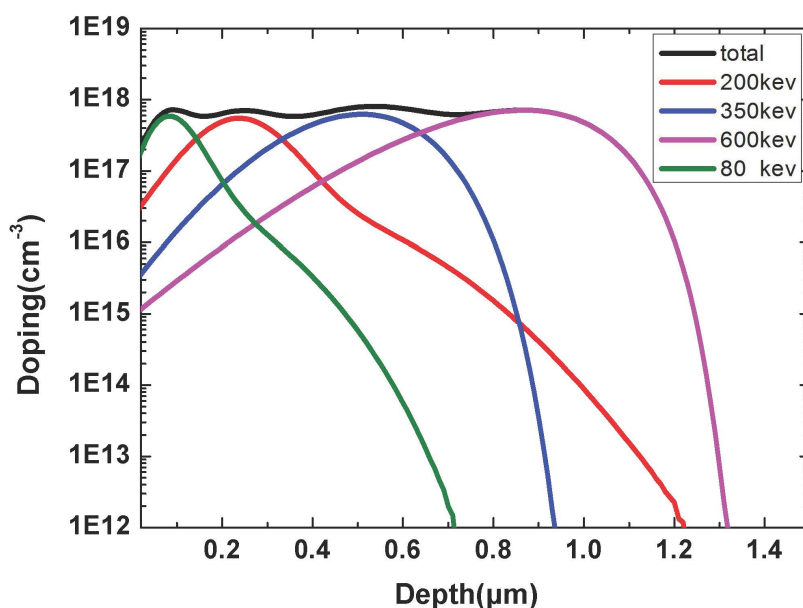


图 3.3 四次不同能量离子注入分布

Figure 3.3 Doping profile of P concentration by four-different-energy ion-implanted scheme

根据软件模拟，确定了多次离子注入方案如下，硅片倾斜角度为 7 度。

注入能量 (keV)	600	350	200	80
注入剂量 ( $\times 10^{13}/\text{cm}^2$ )	3.0	2.0	1.2	0.7

### 3.2 BIB 探测器制备

由前面的理论分析可知，BIB 探测器吸收区少数载流子浓度对探测器性能影响较大，所以选择了区熔法生长的电阻率大于  $10000 \Omega \cdot \text{cm}$ ，晶向为 (100) 的单晶硅<sup>[10-13]</sup>。下面以硅掺磷 BIB 探测器制备工艺为例，简要说明 BIB 探测器的制备流程，图 3.4 展示了 BIB 探测器的工艺流程简图：

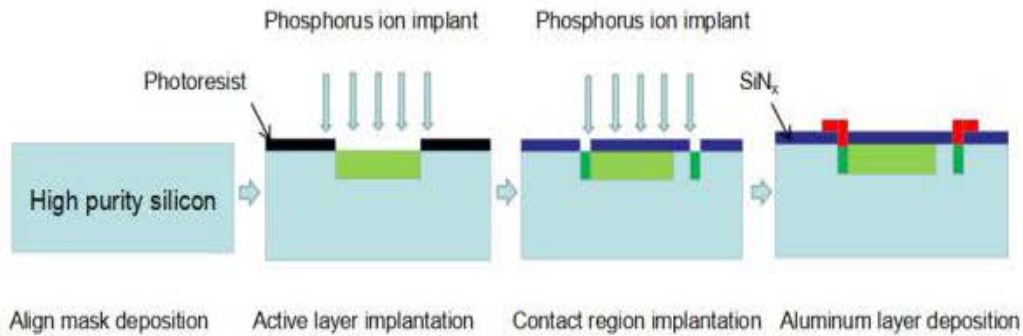


图 3.4 离子注入 BIB 探测器工艺流程简图

Figure 3.4 Process flow diagram of ion implantation BIB detector

商业获得的标准高阻硅片生产加工时进行了完善的清洗，所以进行有机清洗即可。以下所有工艺都在苏州纳米所的超净间完成：

第一步：清洗。进行标准的有机清洗：首先用丙酮和异丙醇分别进行超声清洗 5 分钟，标准流程进行两遍。然后再用去离子水清洗有机清洗过的硅片，放置在烘箱内 70 摄氏度 10 分钟进行烘干。最后对烘干的硅片放置于显微镜下进行镜检，确保表面干净、无划伤等。

第二步：光刻、刻蚀做标记。硅片匀胶完后进行第一步光刻标记。光刻、显影、坚膜后进行镜检，确保图案完整清晰。利用反应离子束刻蚀（RIE）对光刻后的硅片进行刻蚀，刻蚀深度大于  $1\ \mu\text{m}$ ，作为后续光刻工艺的对准标记。

第三步：吸收区离子注入。采用较低匀胶转速涂抹光刻胶获得较厚的光刻胶层，应用厚的光刻胶层作为离子注入的掩膜。放进离子注入机进行多次离子注入，形成杂质均匀分布的离子注入吸收区。离子注入后进行去胶、清洗。高能量大剂量的离子注入，很容易导致光刻胶碳化，使得去除光刻胶变得尤为困难。这里可以考虑使用 3:1 混合的  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$  的混合溶液去除碳化的光刻残胶。镜检，确保无光刻胶残留。

第四步：电极区离子注入。重复第三步的步骤，进行电极区的离子注入，使其形成简并掺杂层，减小金属电极与半导体衬底之间形成的接触势垒，增加导电性能。离子注入完成后需要进行高温退火工艺，修复离子注入工艺带来的晶格损伤同时激活注入离子。样品在氮气环境下，进行了 950 摄氏度 90 秒的快速退火。

第五步：沉积钝化层及电极层。在硅片表面利用 LPCVD 沉积一层 100~200 nm 厚的氮化硅薄膜充当探测器的钝化层。进行电极接触区光刻，利用干法刻蚀

刻蚀掉电极图形区域的氮化硅，再利用电子束蒸发生长 600 nm 的金属铝。在 450 °C 氮气氛围中退火 40 分钟，使电极合金化形成欧姆接触，最后得到完整探测器。经过切割划片可得单块芯片。

离子注入 BIB 探测器工艺中将以前用的湿法刻蚀工艺改为干法刻蚀。因为湿法刻蚀氮化硅无方向选择性，不适宜 3  $\mu\text{m}$  以下器件尺寸的加工。离子注入工艺前，要用去胶机去除表面残留的光刻胶，这样会优化离子注入效果。离子注入工艺粘片要均匀涂好石蜡，做好热传导工作，这样会大大减少因为大剂量、高能量的离子注入所引起的光刻胶碳化现象。最后一步长金属电极工艺的光刻胶厚度也和金属电极厚度相关，不能太薄，太薄将不利于电极剥离。

### 3.3 探测器封装和测试设备

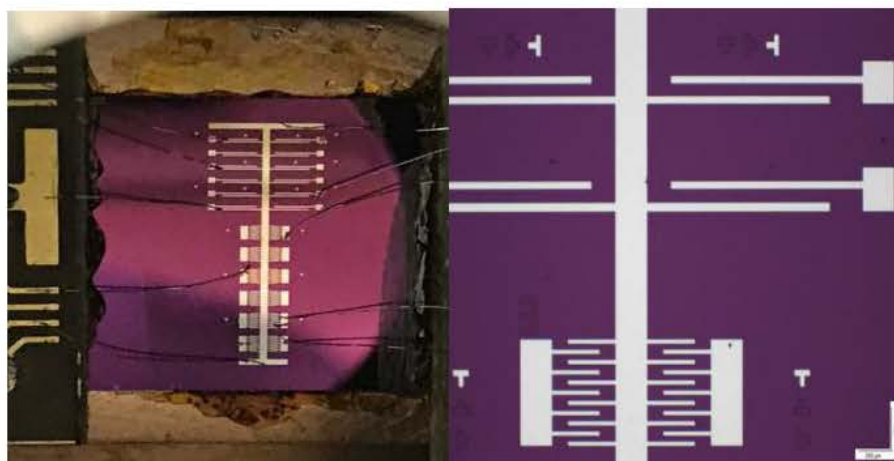


图 3.5 BIB 探测器封装及其局部放大图

Figure 3.5 BIB detector package and its partial enlarged view

图 3.5 是探测器封装效果图和探测器局部放大图，从探测器局部放大图可以看到探测器的结构，上面部分是直线型的探测器，下面部分是叉指型的探测器。设计了直线型和叉指型结构以及相应不同阻挡层厚度的探测器进行对比实验。白色部分是铝电极，两个毗连电极之间的部分是探测器的吸收层与阻挡层，表面覆盖了一层 200 nm 的氮化硅作为钝化层以抑制表面暗电流。探测器的响应波长可以扩展到 30  $\mu\text{m}$ ，需要在深低温环境下进行测试，要将探测器通过低温胶粘贴到冷指上，再通过点焊方式将导线引出接到 PCB 板上。通过图 3.5 所示的封装，接下来就可以进行探测器的低温光学和电学性能测试。

BIB 探测器需要在深低温下才能很好的工作，一般是在液氦温度。液氦闭循

环制冷机利用压缩氦气汽化吸热以及热传导的方式使探测器降温，使用温控仪进行加热升温，方便而且温度精确控制，操作使用方便。使用的液氦闭循环压缩制冷机和低温杜瓦图片如图 3.6 所示。



图 3.6 杜瓦和液氦闭循环压缩机

Figure 3.6 Dewar and liquid helium closed-cycle compressor

对于长波长辐射，需要使用特定材质的窗口。KRS-5 窗片透射率如图 3.7 所示。由图可知在 0.6 到 30  $\mu\text{m}$  之间，KRS-5 窗片的透射率稳定在 70%左右，即使到 40  $\mu\text{m}$  透射率也可达到 60%，和硅基 BIB 探测器响应波段吻合，满足测试需求。

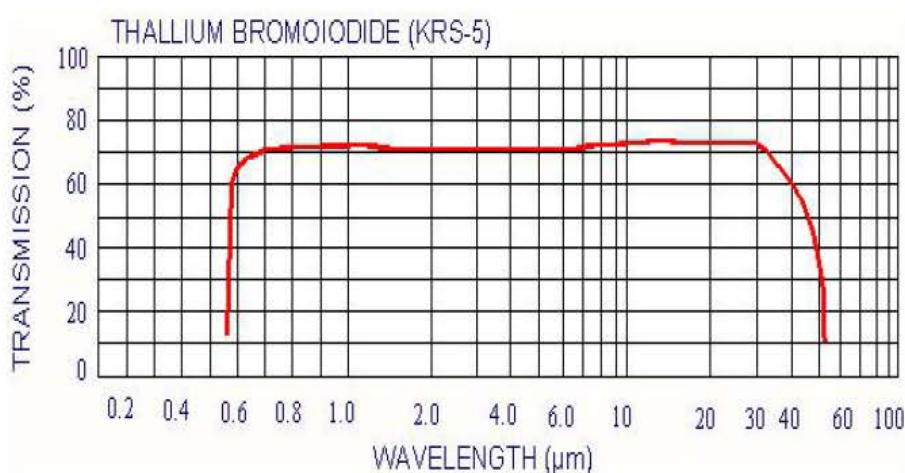


图 3.7 KRS-5 窗片透射率

Figure 3.7 KRS-5 window transmittance

### 3.4 探测器性能表征

#### 3.4.1 黑体响应率

自然界中一切物体都是由振动的原子所形成的，物质的温度越高能量越大，物体内部原子振动频率也就越大，因此向外辐射能量也就越高<sup>[14]</sup>。理想黑体的辐射系数为 1，即吸收全部的电磁波，没有反射和透射的情况。根据基尔霍夫在 1859 年提出的传热定律，它能用来描述物体发射率和吸收比之间的关系。物体辐射系数一般与波长和温度等参数相关。通常用普朗克定律、维恩定律和斯忒藩-玻耳兹曼定律这三个定律来描述黑体辐射相关知识<sup>[15]</sup>。

普朗克定律向我们展示了一个理想黑体，其辐射度可用温度、辐射光波长和黑体发射率等参数关系式来表达。黑体的辐射和光谱波长之间在一定温度下的关系为<sup>[16]</sup>：

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (\exp\{hc / \lambda kT\} - 1)} \quad (3.1)$$

式中的 T 表示热力学温度，c 表示真空中的光速， $\lambda$  表示辐射波长，h 表示普朗克常数，k 表示波尔兹曼常数。图 3.8 显示了 500 K 和 800 K 黑体温度下的普朗克黑体辐射曲线，可以看到黑体温度升高，黑体辐射波长的峰值波长变短。

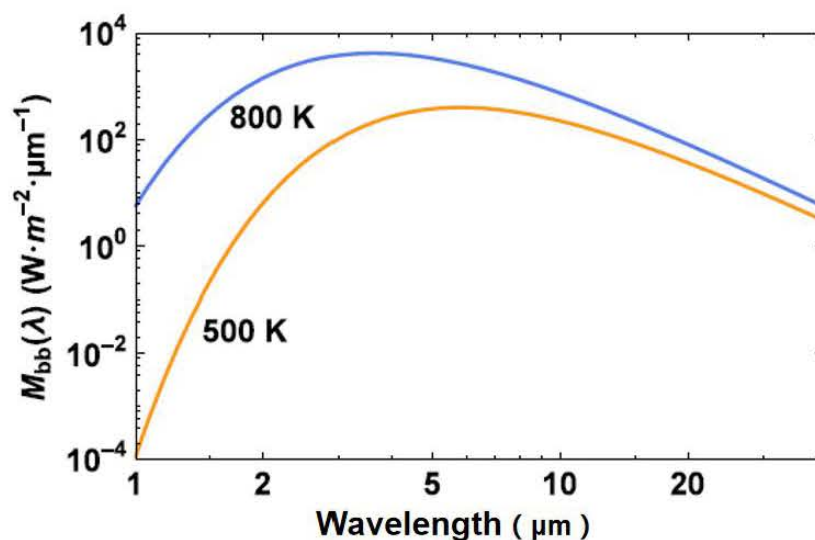


图 3.8 500 K 和 800 K 黑体的辐射曲线

Figure 3.8 Radiation curves of 500 K and 800 K blackbody

相同道理，辐射光子的数目也能用黑体辐射定律表达式来描述，国际单位是  $\text{photo s}^{-1}\text{cm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ 。公式为<sup>[16]</sup>：

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc}{\lambda^4 (\exp\{hc / \lambda kT\} - 1)} \quad (3.2)$$

维恩定律描绘了的温度  $T$  和黑体辐射峰值波长  $\lambda_{\text{max}}$  之间的关系，公式可以表示为：

$$\lambda_{\text{maxw}} = \frac{2898 \mu\text{mK}}{T} \quad (3.3)$$

$$\lambda_{\text{maxph}} = \frac{3670 \mu\text{mK}}{T} \quad (3.4)$$

斯特藩-玻耳兹曼定律表示温度  $T$  情况，所有的辐射功率在单位面积对黑体辐射的所有波长积分的总和，它的表达式如下<sup>[17]</sup>：

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT} - 1\right) \right]} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (3.5)$$

其中， $\sigma$  表示斯特藩-玻耳兹曼常数，约等于  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ 。

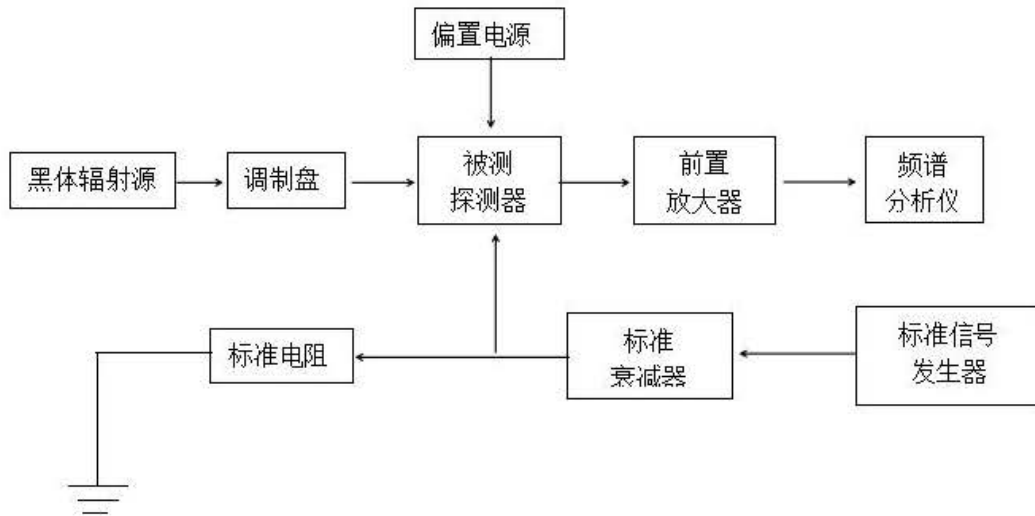


图 3.9 黑体响应率测试方框图<sup>[18]</sup>

Figure 3.9 Block diagram of blackbody response test<sup>[18]</sup>

图 3.9 是黑体响应率测试方框图，黑体响应测试过程如下：前置电流放大器（型号 SR570）加偏压使探测器工作，黑体辐射源设定到特定温度发射出长波辐射，经过斩波器（型号 SR540）调制成特定频率，探测器吸收红外光，生成了和斩波器频率一样的光电信号。红外光在探测器中形成的信号比较微弱，需要经过电流前置放大器运算放大。其中很大一部分系统噪声也被放大，由于噪声是杂乱无章的，没有特定频率规律，而光电信号具有特定的频率，所以可以使用锁相放

大器（型号 SR830）将光电信号提取出来。

黑体辐照度公式

$$E = \alpha \frac{\varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) A}{\pi L^2} \quad (3.6)$$

式中  $E$  为黑体辐照度，单位  $\text{W}/\text{cm}^2$ ；入射到探测器的发射功率为  $P$ ， $P = A_n E$ ， $A_n$  为探测器的标称面积，单位  $\text{cm}^2$ 。黑体响应率  $R_{\text{bb}}$  按照  $R_{\text{bb}} = V_s / P$ 。黑体响应率  $R_{\text{bb}}$ ，单位  $\text{V}/\text{W}$ ；信号电压  $V_s$ ，单位  $\text{V}$ 。

黑体探测率测量，室温条件下，探测器封装进杜瓦降温到特定温度，等到稳定后再测。标准的黑体辐射源温度应该标为 500 K，也可以设为 800 K 或其他温度进行测试。黑体入射到探测器的功率可以通过调节孔径以及黑体到探测器之间的距离而改变，斩波器的频率不能和交流电频率相同或者为它的倍数以免受到电信号干扰，一般可以设为 77、177、277 Hz 等。

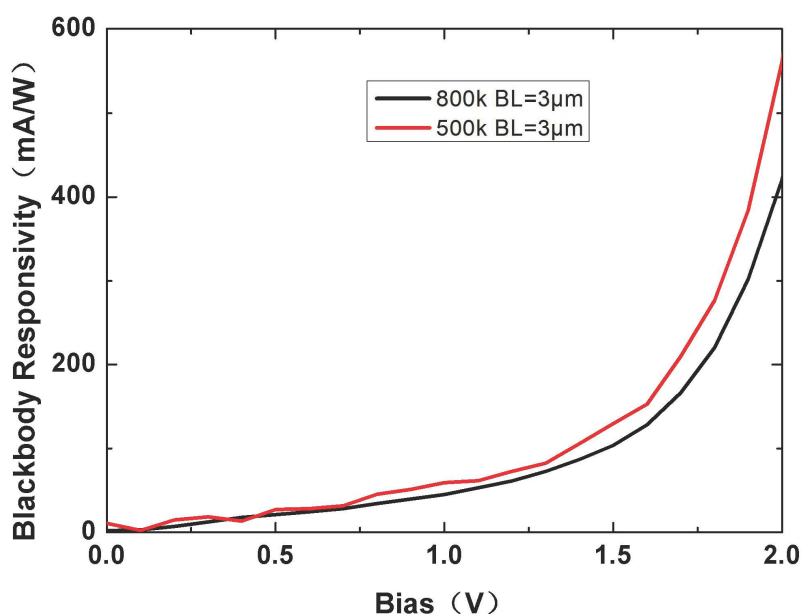


图 3.10 Si:P BIB 探测器小偏压下 500 K 和 800 K 黑体响应率曲线

Figure 3.10 Si:P BIB detector blackbody response curves of 500 K and 800 K under small bias

图 3.10 是阻挡层 (Blocking Layer, BL) 厚度为  $3 \mu\text{m}$ ，探测器在 5 K 温度下，斩波器频率为 277 Hz 时黑体温度为 500 K 和 800 K 的黑体响应率曲线。从图中可以看到探测器 500 K 黑体的响应率要稍微高于 800 K 黑体的响应率，由前面的分析可知，黑体温度 500 K 相比于 800 K 在长波波段的能量分布比例更大。BIB 探测器为红外探测器，在长波波段响应更好。

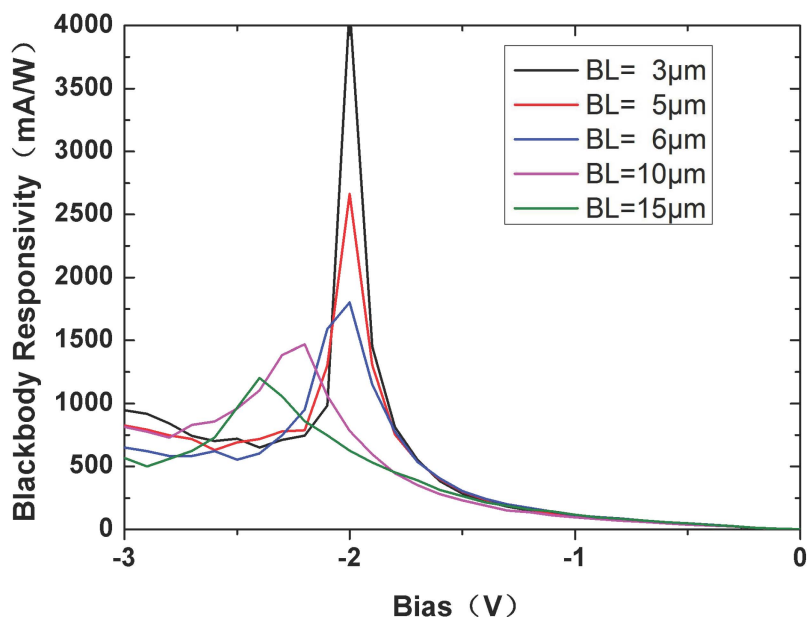


图 3.11 Si:P BIB 探测器变阻挡层厚度的黑体响应率曲线

Figure 3.11 Si:P BIB detector blackbody response curves of variable blocking layer thickness

图 3.11 展示了编号 1P3 探测器直线型探测器在 5 K 温度下不同阻挡层厚度的 800 K 黑体 277 Hz 的下响应率曲线，由图可知当加反向偏压时响应率逐渐变大，电压加大到一定范围内黑体响应率急剧上升，一方面是由于探测器热效应引起的，另一方面电场增强，碰撞产生更多的载流子。而且阻挡层厚度越小探测器的黑体响应率峰值越大，达到峰值响应率的偏压越小。

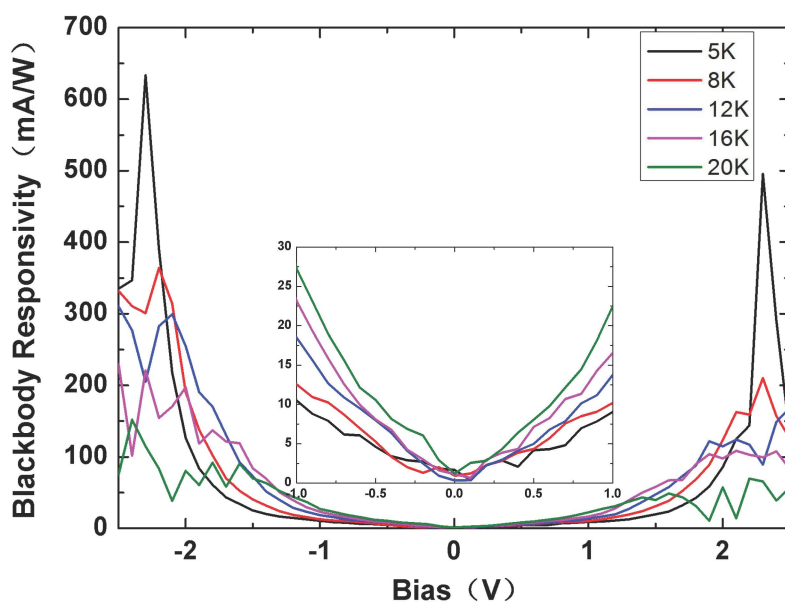


图 3.12 Si:P BIB 探测器变温黑体响应曲线

Figure 3.12 Si:P BIB detector blackbody response curve of variable temperature

图 3.12 展示了编号 1P4 探测器阻挡侧厚度为  $10\ \mu\text{m}$  时不同温度下的黑体响应率曲线，内部是探测器小偏压下黑体响应曲线的放大图。由图可知同一探测器温度越低探测器达到峰值响应率的偏压越大，所能达到的黑体响应率越高；小偏压下偏压相同时，温度越高探测器黑体响应率越高。

### 3.4.2 暗电流

探测器暗电流指探测器在接入电路状态下，在没有任何外来光照射情况，因为场致发射、热电子发射或者半导体中晶格热振动而产生的载流子，由上述载流子产生的电流被称为暗电流<sup>[18]</sup>。

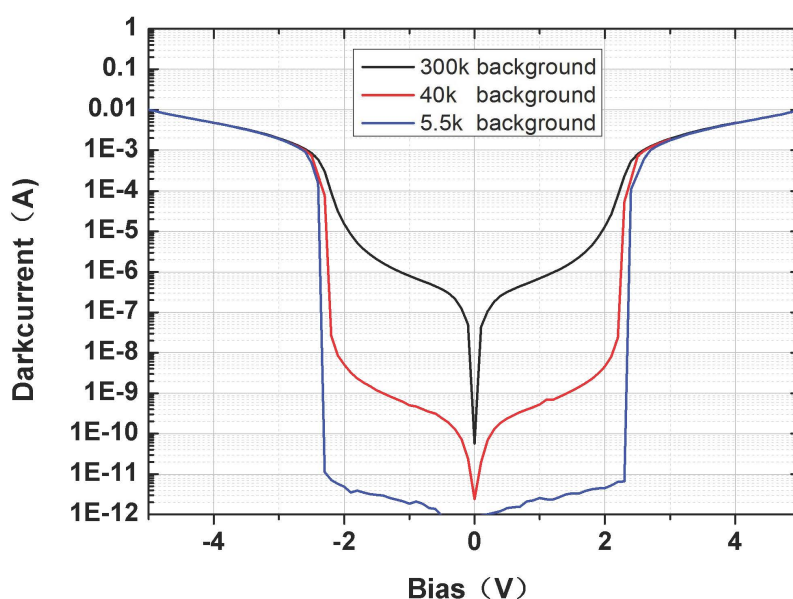


图 3.13 Si:P BIB 探测器不同背景温度 5 K 伏安特性曲线

Figure 3.13 Si:P BIB detector I-V characteristics at 5 K of different background temperatures

为了探究背景辐射对 BIB 探测器产生的影响，测试了不同背景温度下 BIB 探测器的暗电流。图 3.13 展示了不同背景温度离子注入硅掺磷 BIB 探测器在 5 K 时的伏安特性曲线。BIB 探测器是杂质带光导探测器，对背景辐射很敏感。300 K 背景对应的是外屏温度，40 K 背景对应的是内屏温度，5.5 K 背景对应的是冷指温度。由图可知，40 K 背景和 5.5 K 背景暗电流相差百倍甚至上千倍，所以测量暗电流时应该使背景辐射降到最低，要加定制冷屏到冷指上，以减少背景辐射对探测器暗电流产生的影响。

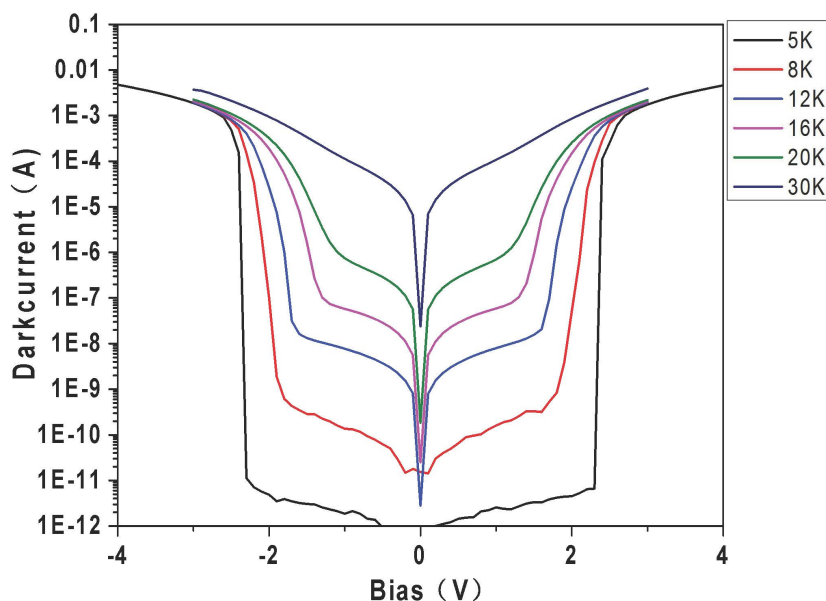


图 3.14 Si:P BIB 探测器探测器不同温度暗电流

Figure 3.14 Dark currents of Si:P BIB detector at different temperatures

图 3.14 展示了测量编号为 1P4 的离子注入 BIB 探测器阻挡层厚度为  $3\ \mu\text{m}$  器件在不同温度下的暗电流特性。可以看到低温下，探测器暗电流并不对称，这是由于 BIB 探测器结构不对称所导致的。从图 3.14 可以看出，温度对于 BIB 探测器影响十分巨大，如加 1 V 时，探测器暗电流 5 K 下为  $2.58 \times 10^{-12}\ \text{A}$ ，8 K 时暗电流变为  $1.60 \times 10^{-10}\ \text{A}$ ，12 K 暗电流为  $7.97 \times 10^{-9}\ \text{A}$ ，16 K 暗电流为  $5.92 \times 10^{-8}\ \text{A}$ ，20 K 暗电流为  $7.05 \times 10^{-7}\ \text{A}$ ，30 K 时暗电流为  $1.07 \times 10^{-4}\ \text{A}$ ，温度从 5 K 到 30 K，暗电流差别非常大。所以，BIB 探测器拥有良好的性能必须工作在深低温下。

### 3.4.3 光电流响应谱

探测器的光谱响应范围可通过探测器光电流响应谱得到。通常有两种光谱测试方法，一种是采用分光光谱仪方法测试光谱响应；另外一种是采用傅立叶红外光谱仪方法测试<sup>[18]</sup>。根据实验条件选择了后者进行测试。

迈克耳逊干涉仪是傅立叶红外光谱仪中的核心部件<sup>[19]</sup>。图 3.15 是迈克耳逊干涉仪的光路图。如图所示，一束入射光通过分光镜  $G_1$  被分为两束后被平面镜动镜  $M_1$  和固定平面镜  $M_2$  反射，由于分开的两束光具有相同的频率和振动方向，并且两者相位差恒定，具备干涉条件，因而可以产生干涉。干涉中可以调节动镜  $M_1$  改变干涉臂长度或改变介质折射率两种方法改变干涉图样。移动动镜改变光程差是常用的一种方法，因此形成不同的干涉光谱<sup>[20]</sup>。

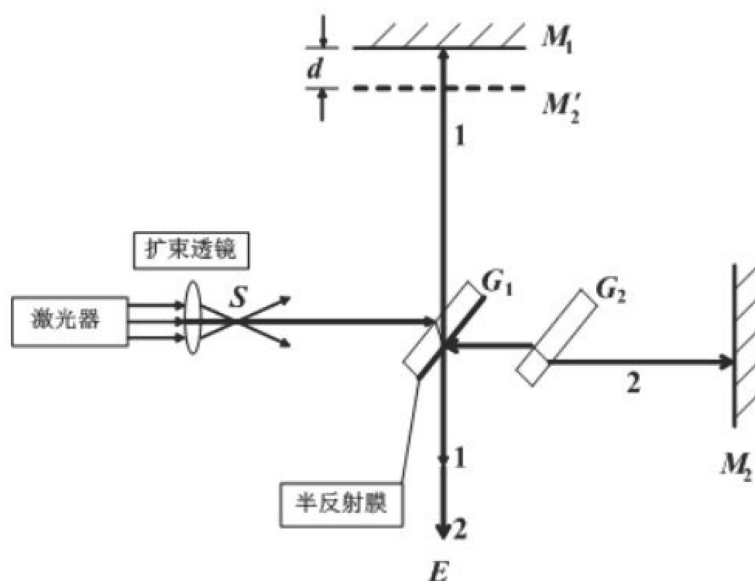


图 3.15 迈克尔逊干涉仪光路图

Figure 3.15 Michelson interferometer optical path diagram

傅里叶红外光谱仪将红外光源辐射光先通过一个光圈，然后再通过滤光片进入干涉仪到达样品，通过透射或者反射获得信号，最后聚焦到检测器上。每一个检测器包含前置放大器，前置放大器的作用是将输出的信号（干涉图）发送到主放大器，信号在这里被放大和过滤，并被转为数字化信号以进行下一步的处理，干涉图转换成单通道光谱图。

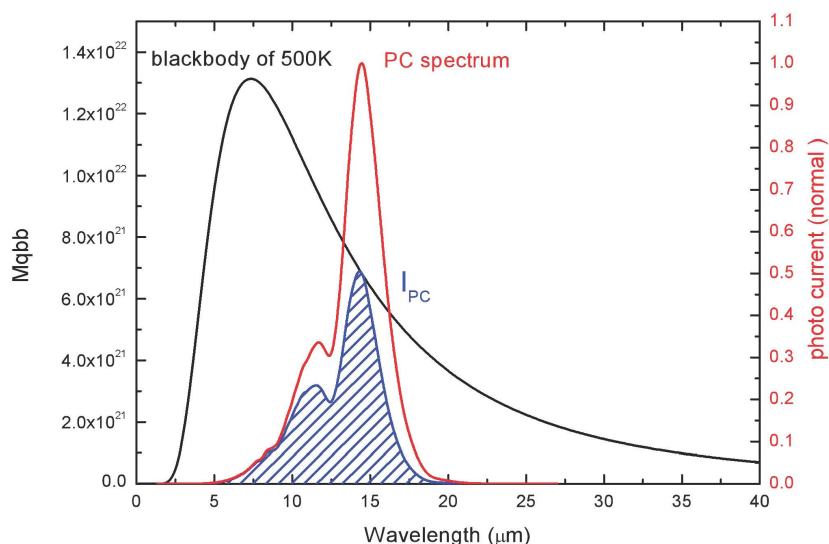


图 3.16 探测器的响应光谱

Figure 3.16 Detector response spectrum

图 3.16 中左侧黑色曲线为一定温度下黑体出射光子数随波长的变化关系

$M_{qbb}(\lambda)$ ，右侧红色曲线为归一化的探测器响应光谱  $PC(\lambda)$ ，最下面的蓝色曲线给出了探测器输出的光电流  $I_{pc}(\lambda)$  与波长  $\lambda$  之间关系：

$$I_{pc}(\lambda) = M_{q\lambda bb}(\lambda) \times PC(\lambda) \quad (3.6)$$

这表明光电流  $I_{pc}(\lambda)$  上每一点的纵坐标值都等于其它两条曲线在相同波长  $\lambda$  处的纵坐标之积。而光电流曲线下面斜线部分的面积，就是测到的黑体响应光电流，表达式为：

$$I_{pc}(blackbody) = \int_0^{\infty} M_{q\lambda bb}(\lambda) \times PC(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{q\lambda bb}(\lambda) \times PC(\lambda) d\lambda \quad (3.7)$$

对于傅里叶红外光谱仪来说，中波红外和长波红外所需要的滤波片、窗片和探测器都不一样，所以为了测得探测器  $2\sim 40\ \mu\text{m}$  的波段响应，需要将探测器测得的中波红外波段和长波红外波段响应光谱进行拼接。

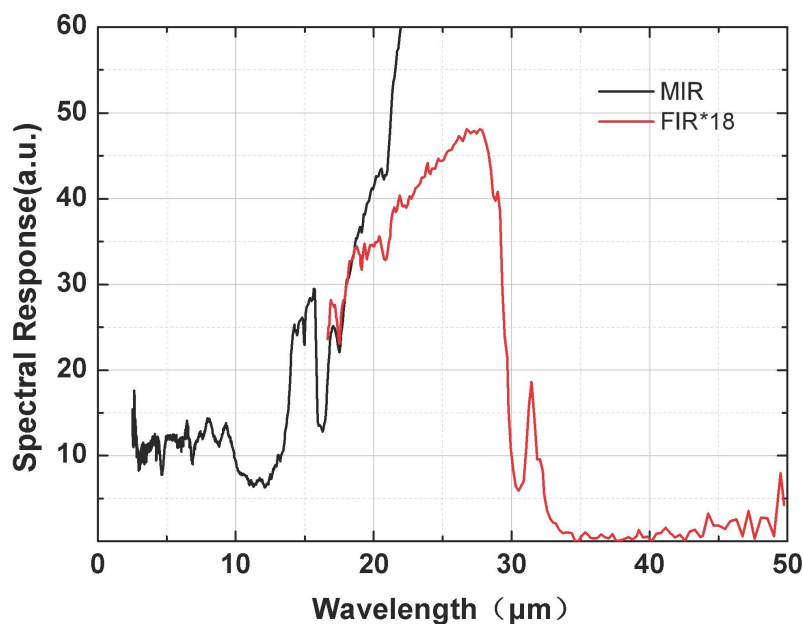


图 3.17 Si:P BIB 探测器光电流谱拼接

Figure 3.17 Photocurrent spectrum splicing of Si:P BIB detector

由图 3.17 可以看出，中波红外和长波红外光电流谱数据差异比较大，这是由于中波红外（MIR）和长波红外（FIR）波段对应的滤波片和探测器都不同，探测器在超出阈值范围测得不准确，MIR 波段超过  $20\ \mu\text{m}$  信号测量数据不准确，需要去除。图 3.17 是 FIR 波段光谱响应放大倍数和 MIR 波段光谱响应的拼接。由于探测器响应光谱是连续光谱，因此将长波红外波段的响应光谱放大合适倍数，当中波红外和长波红外光电流谱出现连续重叠时，进行拼接就得到连续的光

电流谱。

综上，通过不断探索和优化测试条件，测量了编号为 1P4 阻挡层为  $3\ \mu\text{m}$  的硅掺磷离子注入 BIB 探测器在温度为 5 K 下性能分别如下：

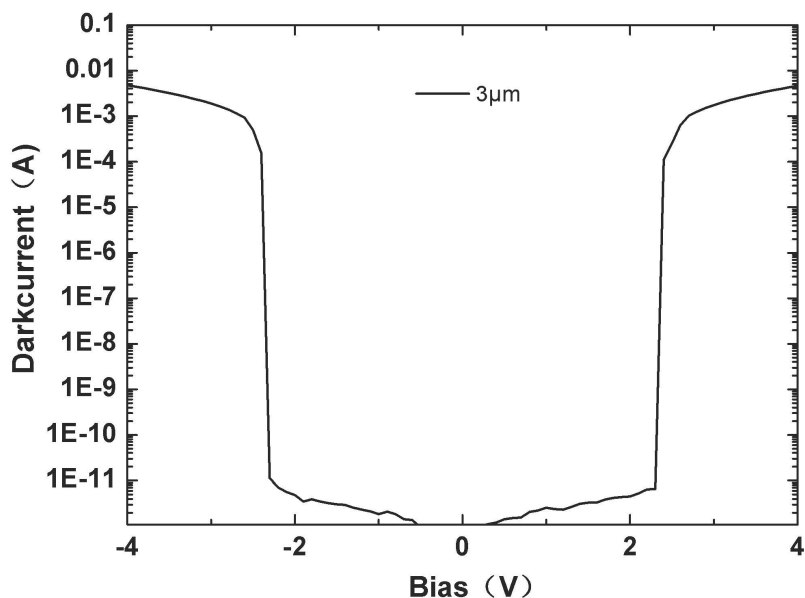


图 3.18 Si:P BIB 探测器 5 K 暗电流曲线

Figure 3.18 Dark current of Si:P BIB detector at 5 K

由图 3.18 可以看出，离子注入 Si:P BIB 探测器在  $-2.3\ \text{V}\sim 2.3\ \text{V}$  偏压范围内，探测器暗电流小于  $1.1\times 10^{-11}\ \text{A}$ ，而且基本随偏压呈线性增加。由于 BIB 探测器结构的不对称性导致暗电流也不对称。当超过偏压范围，暗电流急剧上升。在工作偏压范围内，BIB 探测器的暗电流很小是因为探测器结构中引入了一层阻挡层，吸收层中杂质带能级在阻挡层中被隔断导致不连续，起到了很好的抑制 BIB 探测器暗电流的作用<sup>[1]</sup>。偏压范围内探测器的暗电流特性很好，这个范围的电压被视为 BIB 探测器的工作偏压。

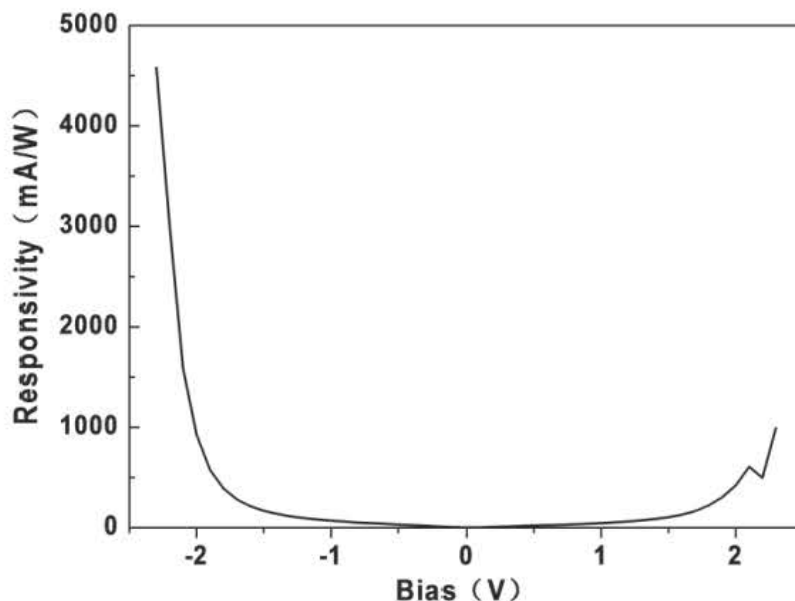


图 3.19 Si:P BIB 探测器 5 K 黑体响应率曲线

Figure 3.19 Blackbody response curve of Si:P BIB detector at 5 K

图 3.19 是 Si:P BIB 探测器工作在 5 K 温度下，黑体温度为 800 K，斩波器频率为 277 Hz 时的黑体响应率曲线。可以看出，无论加正向偏压还是反向偏压时，BIB 探测器都有响应。小偏压范围内黑体响应率比较小，当探测器偏压逐渐增加黑体响应率也急剧增加，偏压为 -2.3 V 时黑体响应率达到 4.6 A/W。

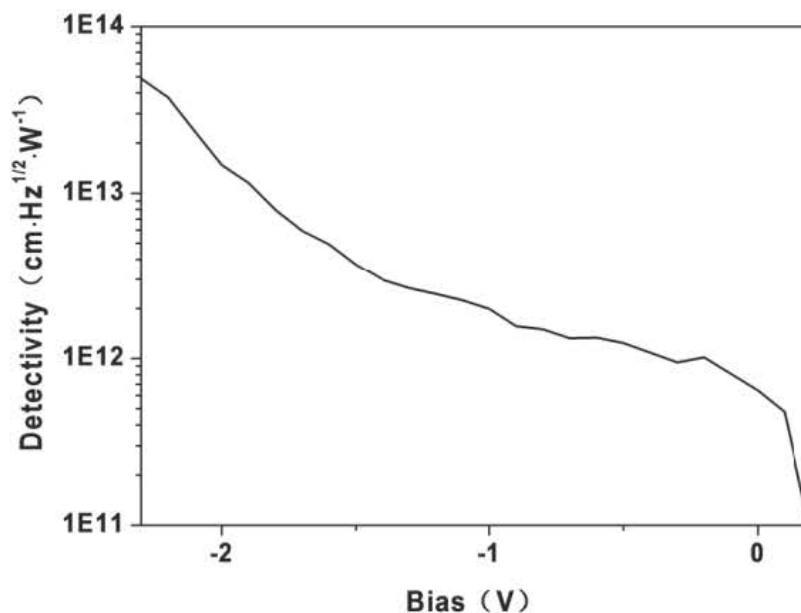


图 3.20 5 K Si:P BIB 探测器探测率曲线

Figure 3.20 Detectivity of Si:P BIB detector at 5 K

图 3.20 是 Si:P BIB 探测器探测率曲线。探测器的探测率可以通过下面公式

(未考虑到噪声增益) 估算出来<sup>[21]</sup>

$$D^* = (R / \sqrt{2qI_{\text{dark}}\Delta f}) \sqrt{A_d \Delta f} \quad (3.8)$$

其中  $R$  表示探测器的黑体响应率,  $I_{\text{dark}}$  表示探测器的暗电流,  $A_d$  表示探测器的光敏元面积,  $\Delta f$  是信号带宽。通过上面的黑体和暗电流的测量, 带入公式可得探测率。在工作偏压范围内加反偏电压时, 探测率逐渐增加。当偏压为  $-2.3 \text{ V}$  时, 探测器的探测率为  $4.9 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。

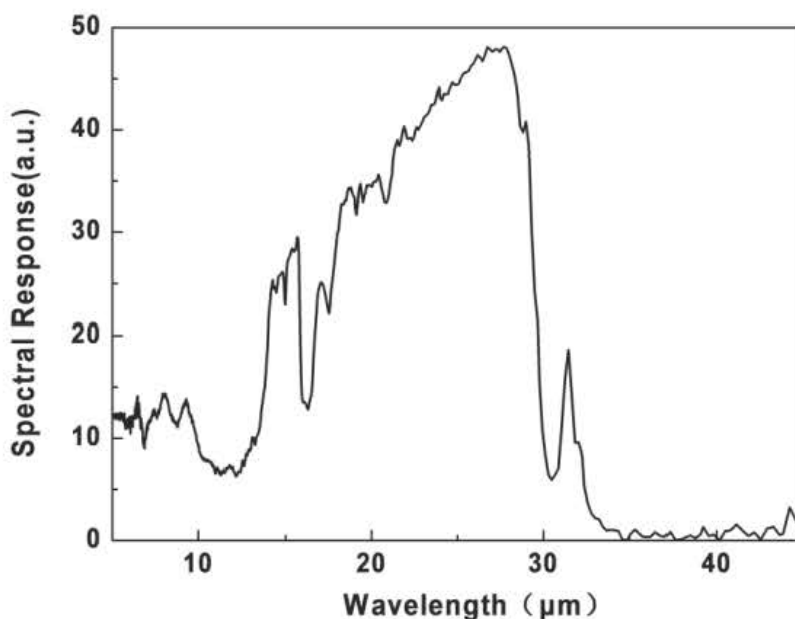


图 3.21 Si:P BIB 探测器光电流谱图

Figure 3.21 Photocurrent spectrum of Si: P BIB detector

图 3.21 是 Si:P BIB 探测器的光电流响应谱。由图可以看到, BIB 探测器响应波段很宽, 从几微米到三十七微米都有响应。探测器的峰值波长为  $27.3 \mu\text{m}$ , 半峰宽波长分别为  $17.6 \mu\text{m}$  和  $29.5 \mu\text{m}$ 。由上图可以看出, Si:P BIB 探测器有两个明显的响应峰, 峰值波长分别为  $27.3 \mu\text{m}$  和  $31.4 \mu\text{m}$ 。这两种响应分别对应的是 P 原子掺杂到硅中杂质带能级的  $1s$  到导带能级和  $1s$  到  $2p_z$  能级<sup>[10,22]</sup>。

通过实验和理论分析, 在界面势垒的基础上提出 BIB 探测器的双激发模型<sup>[4,11]</sup>, 有助于进一步理解 BIB 探测器工作机制。通过拓展模型, 可以将 Si:P BIB 探测器拓展到三十多微米, 也就是太赫兹领域。

早期 BIB 探测器是围绕 Si:As BIB 探测器展开的, 由于砷 (As) 原子相对于磷 (P) 原子具有更大的半径, 具有更大的捕获面积, 理论上具有更好的性质<sup>[23,24]</sup>。外延硅掺砷 BIB 探测器是比较成熟的, 但是离子注入型的性质却鲜有报道。下

面将研究离子注入型 Si:As BIB 探测器的性质。

因为砷原子比磷原子半径更大，离子注入在同样的能量条件下注入的更浅。为了提高光子吸收效率，需要加大掺杂砷离子浓度。硅掺砷 BIB 探测器的离子注入条件能量如 3.22 图所示。

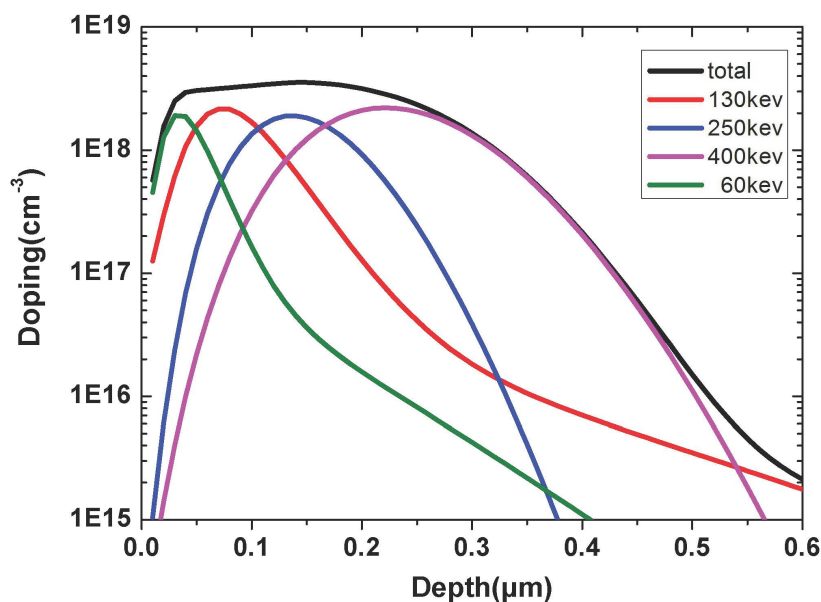


图 3.22 四次 As 离子注条件和分布仿真<sup>[28]</sup>

Figure 3.22 Doping profile of As concentration by four-different-energy ion-implanted scheme<sup>[28]</sup>

砷原子注入能量和剂量分别为：60 keV,  $1.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ；130 keV,  $1.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ；250 keV,  $2.3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ；400 keV,  $4.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。获得了最大浓度约为  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的均匀掺杂层。为修复晶格损伤同时激活注入的砷离子，退火温度设定为  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[25-27]</sup>。在温度 5 K 条件，阻挡层厚度为  $3 \text{ } \mu\text{m}$  的叉指型 Si:As BIB 探测器暗电流性能如下图所示。

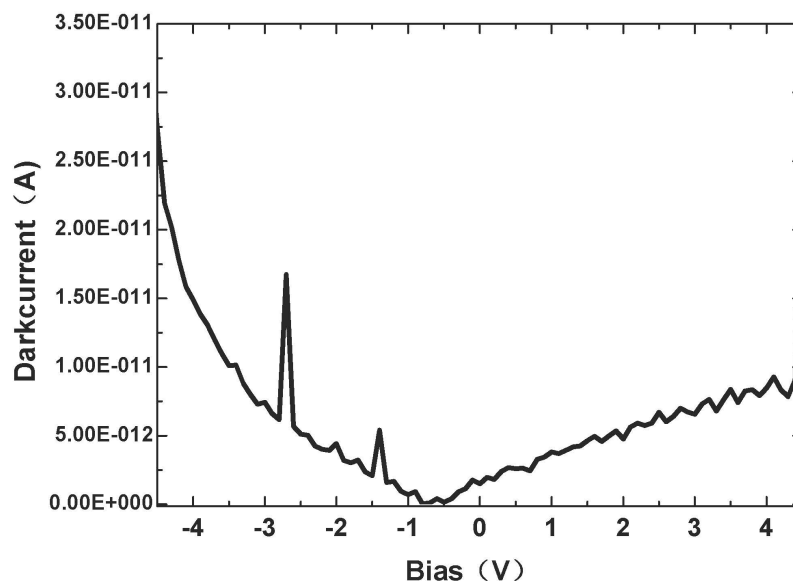


图 3.23 Si:As BIB 探测器 5 K 暗电流曲线<sup>[28]</sup>

Figure 3.23 Dark current of Si:As BIB detector at 5K<sup>[28]</sup>

由图 3.23 可以看出，Si:As BIB 探测器在 5 K 环境下，暗电流比较小，探测器暗电流基本与探测器噪声差不多，暗电流量级为  $10^{-11}$  A。

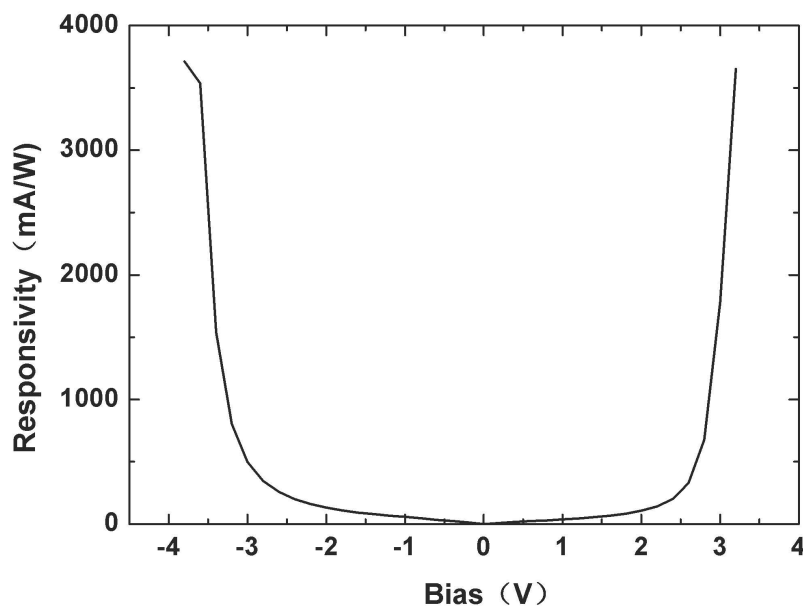


图 3.24 Si:As BIB 探测器 5 K 黑体响应率<sup>[28]</sup>

Figure 3.24 Blackbody response curve of Si:As BIB detector at 5 K<sup>[28]</sup>

图 3.24 是 Si:As BIB 探测器工作在 5 K 温度下，黑体温度为 800 K，斩波器频率为 277 Hz 时的黑体响应率曲线。可以看出，加正向偏压和反向偏压时，Si:As BIB 探测器都有响应。偏压为 -3.8 V 时黑体响应率达到 3.7 A/W。

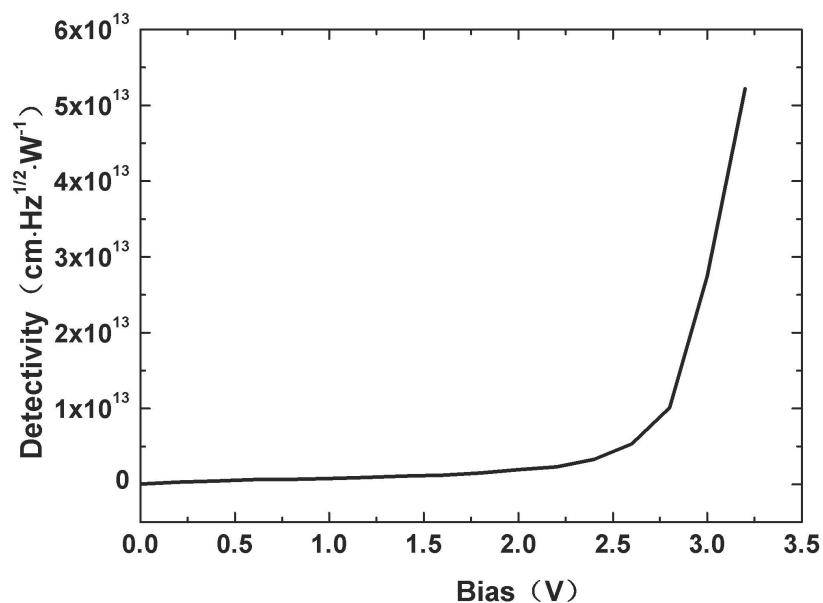


图 3.25 Si:As BIB 探测器 5 K 探测率<sup>[28]</sup>

Figure 3.25 Detectivity of Si:As BIB detector at 5 K<sup>[28]</sup>

由于 Si:As BIB 探测器正偏暗电流比反偏的小，所以正偏压探测率比反偏的大。由图 3.25 正偏压下在工作偏压范围内探测率逐渐增加，当偏压为 3.2V 时，探测率为  $5.2 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。

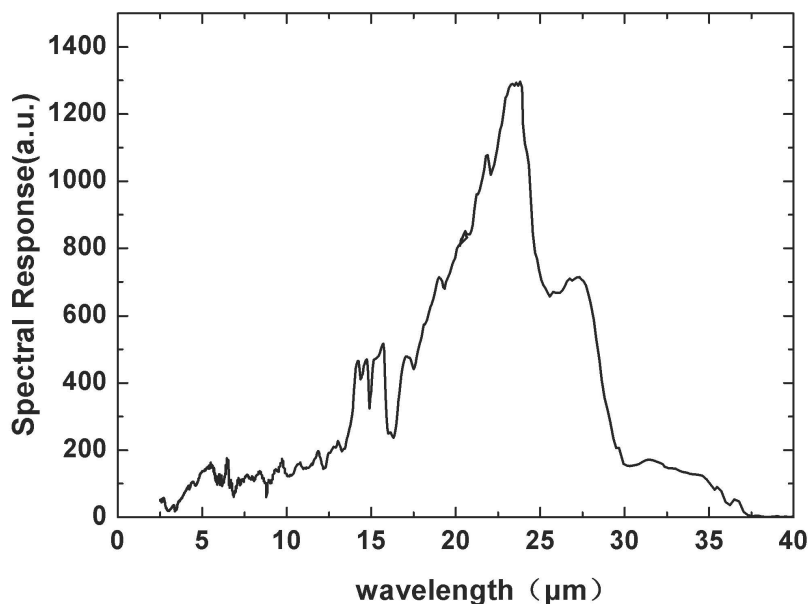


图 3.26 Si:As BIB 探测器光电流谱图<sup>[28]</sup>

Figure 3.26 Photocurrent spectrum of Si:As BIB detector<sup>[28]</sup>

图 3.26 是 Si:As BIB 探测器的光电流响应谱。Si:As BIB 探测器和 Si:P BIB

探测器响应波长范围差不多，但是峰位不一样，Si:As BIB 探测器的峰值波长为  $23.8\ \mu\text{m}$ ，半峰宽波长分别为  $18.7\ \mu\text{m}$  和  $28.0\ \mu\text{m}$ 。探测器在  $15\ \mu\text{m}$  左右有一个吸收峰，这是由硅的声子吸收引起的。波长大于  $16\ \mu\text{m}$  探测器响应急剧上升，到达  $23.8\ \mu\text{m}$  响应峰值后下降，下降过程中出现  $27.3\ \mu\text{m}$  和  $31.4\ \mu\text{m}$  响应峰。通过与杂质带能级对比，峰值波长  $23.8\ \mu\text{m}$  对应的跃迁能带为砷原子掺杂到硅中杂质带的  $1s$  到导带 (CB) 能级， $27.3\ \mu\text{m}$  的响应峰对应的是  $1s$  到  $2p_{\pm}$  能级， $31.4\ \mu\text{m}$  的响应峰对应的是  $1s$  到  $2p_0$  能级<sup>[28]</sup>。

### 3.5 本章小结

在硅基 BIB 探测器工艺基础上进行了优化，制备了离子注入 Si:P 和 Si:As BIB 探测器。测量和表征了探测器在深低温下的性质，离子注入 Si:P 和 Si:As BIB 探测器性能优异。并指认了探测器响应峰对应的杂质能级。离子注入 BIB 探测器可通过光刻和离子注入形成吸收层和阻挡层，解决了阻挡层需要高纯度外延层的工艺难题。优化后的工艺与 CMOS 集成电路工艺相兼容，可以通过集成电路工艺大规模标准化生产离子注入型 BIB 探测器降低成本，同时探测器可以和读出电路集成到同一块芯片上提高了探测器的成像性能。

## 参考文献

- [1] Petroff M D, Stapelbroek M G. BLOCKED IMPURITY BAND DETECTORS, US Patent 4568960 Feb.4, 1986.
- [2] Petroff M D, Stapelbroek M G. Responsivity and noise models of blocked impurity band detectors, [J]. Proceedings of the IRIS Specialty Group on IR Detectors, Seattle, WA, 1984.
- [3] Liao Kai-Sheng, Liu Xi-Hui, Huang Liang, et al. Blocked impurity band infrared detectors for astronomy [J]. Sci. Sin-Phys. Mech. Astron. (廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等. 天文用阻挡杂质带红外探测器. 中国科学: 物理学 力学 天文学), 2014, 44(4): 360-367.
- [4] Liao Kai-Sheng, Li Zhi-Feng, Wang Chao, et al. Si:P blocked impurity band detectors for far infrared detection [J]. J. Infrared Millim.Waves,(廖开升, 李志锋, 王超, 等. 用于远红外探测的 Si:P 阻挡杂质带红外探测器研制. 红外与毫米波学), 2016, 35(1):37-41.
- [5] Stetson S B, Reynolds D B, Stapelbroek M G, et al. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1985,686:48-65.
- [6] Tezcan D S , Putzeys J , Munck K D , et al. Development of a Si:As blocked impurity band detector for far IR detection [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, 6660:66600R-66600R-12.
- [7] Stapelbroek M G, Hogue H H, Atkins E W, et al. Silicon for visible-to-VLWIR photon detection [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 5074(2):188-197.
- [8] 崔铮. 微纳米加工技术及其应用综述[J]. 物理, 2006, 35(1):34-39.
- [9] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学(第7版)[M]. 电子工业出版社, 2008.
- [10] Liao Kai-Sheng, Li Ning, Liu Xi-Hui, et al. Ion-implanted Si:P blocked-impurity-band photodetectors for far-infrared and terahertz radiation detection[C]// ISPDI 2013 - Fifth International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2013.
- [11] Liao Kai-Sheng, Li Ning, Wang Chao, et al. Extended mode in blocked impurity band detectors for terahertz radiation detection [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(14):
- [12] Zhu He, Weng Ze-Ping, Zhu Jia-Qi, et al. Comparison of Photoresponse of Si-Based BIB THz Detectors, [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017,64(3), 1094-1099.
- [13] Zhu Jia-Qi, Zhu He, Xu Han-Lun, et al. Ge-based Mid-infrared Blocked-impurity-band Photodetectors [J]. Infrared Physics & Technology, 2018,92.
- [14] 黄昆. 固体物理学:重排本[M]. 北京大学出版社, 2014.
- [15] Rogalski A. Semiconductor detectors and focal plane arrays for far-infrared imaging [J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(4): 406-426.

- [16] Rogalski A. Infrared detectors[M]. CRC press, 2010.
- [17] Hilger A. Applications of thermal imaging[J]. NDT and E International, 1996, 6(29): 400.
- [18] 红外探测器参数测试方法
- [19] Doyle W M, Hughes N S. Microscope for use in modular FTIR spectrometer system: U.S. Patent 4,852,955[P]. 1989-8-1.
- [20] Dorling K M, Baker M J. Rapid FTIR chemical imaging: highlighting FPA detectors[J]. Trends in biotechnology, 2013, 31(8): 437-438.
- [21] Szmulowicz F, Madarasz F L. Blocked impurity band detectors—an analytical model: figures of merit[J]. Journal of applied physics, 1987, 62(6): 2533-2540.
- [22] Sclar N. Properties of doped silicon and germanium infrared detectors [J]. Progress in Quantum Electronics, 1984, 9(3): 149-257.
- [23] Esaev D G, Sinitsa S P, Chernyavskii E V. Current-voltage characteristics of Si: As blocked impurity band photodetectors with hopping conductivity (BIB-II)[J]. Semiconductors, 1999, 33(8): 915-919.
- [24] McMurray Jr R E, Johnson R R, McCreight C R, et al. Si: As IBC array performance for SIRT/IRAC[C]//Infrared Spaceborne Remote Sensing VIII. International Society for Optics and Photonics, 2000, 4131: 62-69.
- [25] Zhu He, Zhang Bing-Po, Wang Miao, et al. Influence of high dose As ion implantation on electrical properties of high resistivity silicon [J]. Acta Phys. Sin. (朱贺, 张兵坡, 王淼等 高剂量 As 离子注入对高阻 Si 电学特性的影响. 物理学报), 2014, 63(13): 136803-136803.
- [26] Zhu H, Wang Miao, Zhang Bing-Po, et al. Evolution of secondary defects in arsenic implanted Si [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(4): 045504.
- [27] Beeman J W, Goyal S, Reichertz L A, et al. Ion-implanted Ge:B far-infrared blocked-impurity-band detectors [J]. Infrared Physics and Technology, 2007, 51(1):60-65.
- [28] 王超, 李宁, 戴宁, 石旺舟, 胡古今. 离子注入型硅掺砷阻挡杂质带长波红外探测器的研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(3): 290-294.



## 第四章 BIB 探测器抗反射增吸收研究

对于外延型 BIB 探测器，光子要通过电极层才能进入吸收层被吸收。测试结果表明电极层具有较强的反射，BIB 探测器减反成为提高探测器性能亟待解决的问题。

本章主要围绕 BIB 探测器减反展开，研究了外延型和离子注入型 BIB 探测器各种掺杂硅的光学性质，获取了光学参数。分析光学减反方法和设计减反结构，制备样品通过实验验证其减反效果，并从理论上解释了实现减反的原因。

### 4.1 BIB 外延层结构

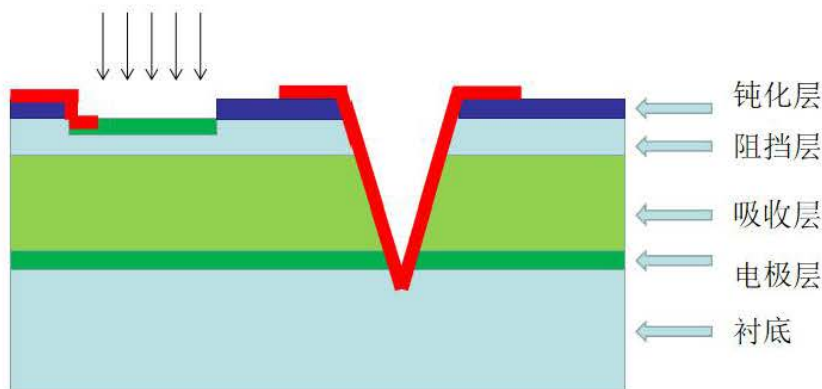


图 4.1 硅基外延 BIB 探测器结构示意图

Figure. 4.1 Schematic diagram of Si-based epitaxial BIB detector

图 4.1 是硅基外延 BIB 探测器的结构。由图可以看出：硅基外延 BIB 探测器在高阻硅衬底上分别外延生长了电极层、吸收层和阻挡层<sup>[1,2]</sup>。外延电极层通过重掺提高导电性，掺杂浓度需要达到  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  甚至更高<sup>[3]</sup>，电极层的厚度比较薄，一般在  $1 \mu\text{m}$  以下；吸收层通过重掺杂在禁带中形成杂质带吸收光子，掺杂浓度约为  $10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，为了提高光的吸收效率，吸收层相对较厚，一般厚度为十几到几十微米<sup>[4-6]</sup>；阻挡层的作用是阻断吸收层杂质带的连续性，一般采用不掺杂的本征硅，阻挡层厚度一般为  $3 \sim 6 \mu\text{m}$ <sup>[2,7]</sup>。通过湿法刻蚀形成 V 型槽与下电极接触，上电极层一般通过离子注入形成重掺与吸收层的硅形成欧姆接触，再生长铝电极<sup>[8]</sup>。表面覆盖一层钝化层，形成结构如图 4.1 所示外延 BIB 探测器。

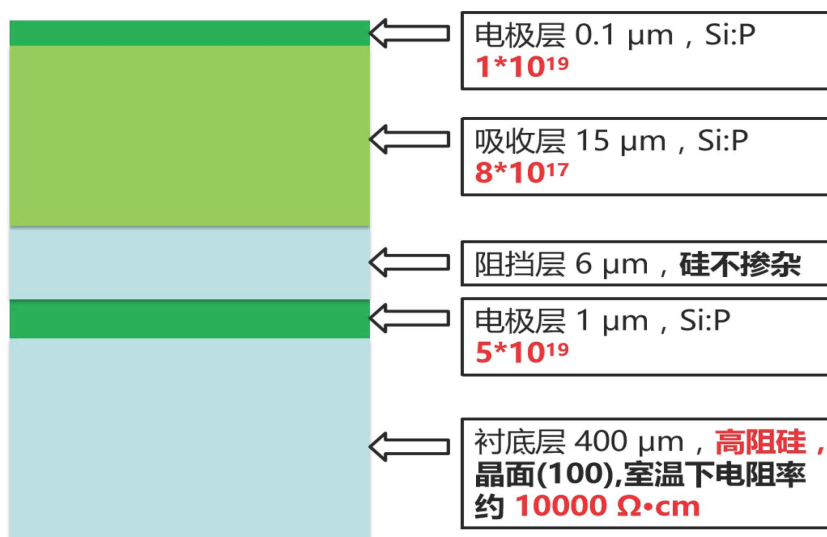


图 4.2 设计的外延 BIB 探测器外延层结构和参数

Figure 4.2 Epitaxial layers and parameters of designed epitaxial BIB detector

常见的外延 BIB 探测器结构需要在高阻硅片上分别外延下电极层、吸收层和阻挡层。为了方便探究 BIB 探测器吸收层的性质，设计了如图 4.2 所示的全外延结构：从下到上各层依次为高阻硅衬底、下电极层、阻挡层、吸收层和上电极层。设计的结构将吸收层与阻挡层的位置调换，使得探测器更容易与表面等离子元等方法相结合，实现对 BIB 探测器的调控；通过外延的方法形成上电极层的设计避免了后续电极层离子注入工艺以及其带来的晶格损伤。

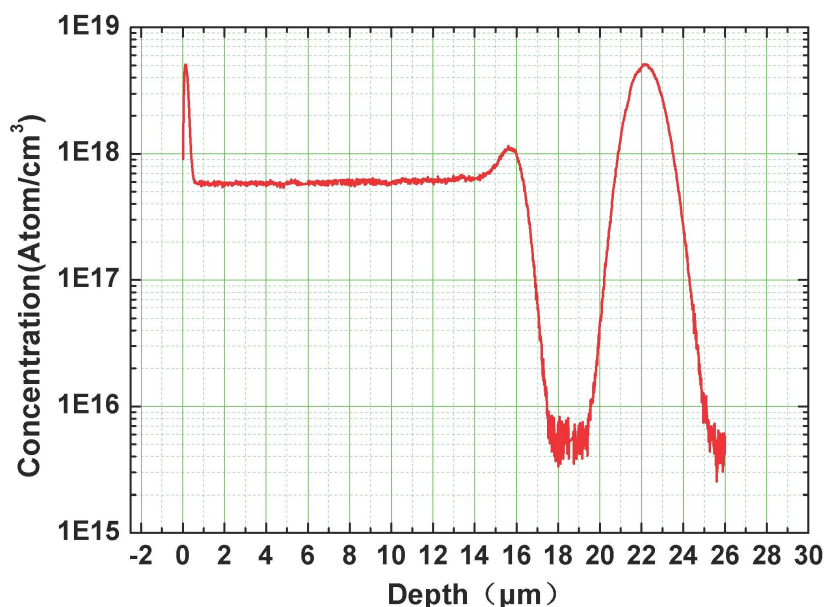


图 4.3 外延 BIB 层 SIMS 测试结果

Figure 4.3 SIMS test result of epitaxial BIB layers

为了表征外延层浓度及厚度，做了电阻率测试和二次离子质谱测试(SIMS)。

由图 4.3 SIMS 测试结果可以看到, 得到的外延 BIB 探测器各层和设计的参数有一定偏差: 上下电极层注入浓度偏低, 峰值都约为  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , 吸收层的掺杂浓度约为  $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 阻挡层的掺杂浓度约为  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。由于阻挡层中载流子浓度对于 BIB 探测器性质非常重要<sup>[2,9]</sup>, 外延阻挡层中掺杂浓度需要进一步降低, 以提高 BIB 探测器性能。

#### 4.2 BIB 外延层光学性质

为了研究 BIB 探测器各层的光学性质, BIB 探测器的每一层都被单独外延在材料参数一样的高阻硅衬底上, 作为陪片以研究每层的光学性质。

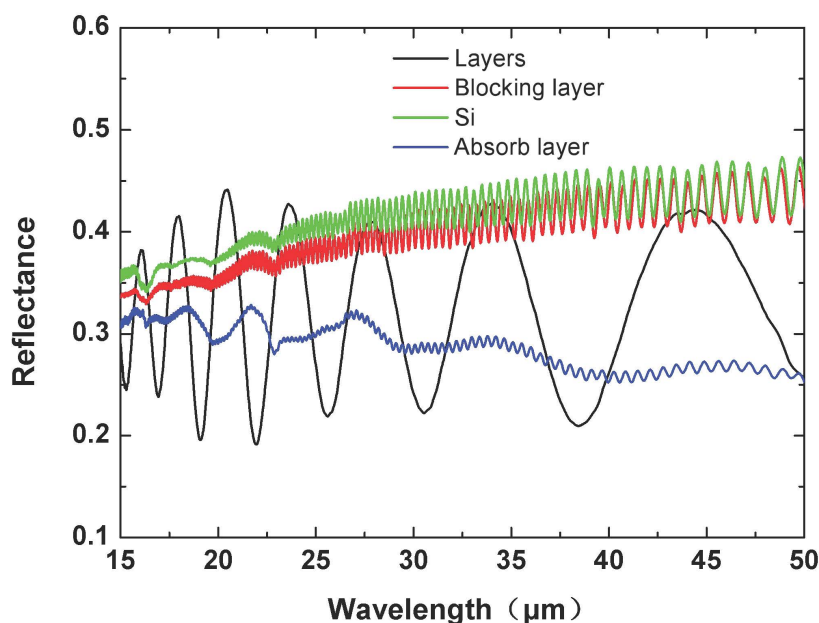


图 4.4 吸收层、阻挡层和外延片反射率

Figure 4.4 Reflectance of absorb layer, blocking layer and epitaxial layers

由图 4.4 可知, 绿色曲线表示硅片在 15~50  $\mu\text{m}$  红外波长范围内的反射率曲线, 反射率随着波长增加呈线性增加的趋势, 反射率由 15  $\mu\text{m}$  波长处的 35% 增长到 50  $\mu\text{m}$  波长处的 45%。阻挡层是外延本征硅, 但也不可避免的掺入了一些杂质元素, 反射率曲线和高阻硅片趋势一致, 阻挡层的反射率略小于高阻硅。蓝色曲线表示吸收层的反射率曲线, 吸收层掺入了一定浓度的磷元素, 在红外波段反射率出现了一定的降低。反射率从 15  $\mu\text{m}$  处的 30% 减小到了 50  $\mu\text{m}$  处的 25%。多层外延硅片整体结构的反射率由黑色曲线表示。

图 4.5 是电极层的反射率曲线图, 以硅片为基准。前照式 BIB 探测器下电极

层由于不需要考虑对红外光的透过率,因此为了提高其导电性可以适当提高电极层厚度与掺杂浓度。下电极的设计厚度为  $1\ \mu\text{m}$ , 掺杂磷元素的浓度为  $5 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 。

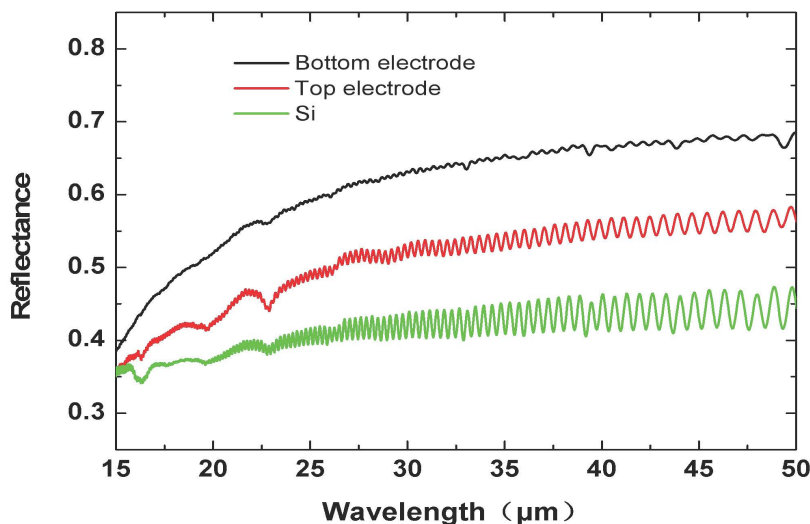


图 4.5 电极层反射率

Figure 4.5 Reflectance of electrode layer

由器件的工作原理可知,上电极层对导电性能和红外光的透过率同时具有较高的要求。为了保证红外光的透过率与电极层的导电性,本文中上电极层的设计厚度为  $0.1\ \mu\text{m}$ , 掺杂磷元素的浓度为  $1 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ 。

由于扩散效应的影响,实际的多层外延硅片体系的上电极层和下电极层存在着很大的厚度差别。由图 4.5 知,上电极层反射率从  $15\ \mu\text{m}$  处的 35% 增加到  $30\ \mu\text{m}$  处的 50%, 后又缓慢增加到  $50\ \mu\text{m}$  处的 57% 左右。下电极的反射率与上电极反射率曲线类似,从  $15\ \mu\text{m}$  处的 38% 增长到  $30\ \mu\text{m}$  处的 60%, 再缓慢增长到  $50\ \mu\text{m}$  处的 70% 左右。

电极层的功能是通过其施加外加电场从而使探测器在偏压下工作,为了保证电极层的电学性能往往需要通过重掺提升其导电性,然而电极层反射率会随着掺杂浓度的提高而上升。实验结果表明(见图 4.5)两种上下电极层的陪片在 Si:P BIB 探测器主要响应波段  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  范围反射率都超过了 40%, 响应峰值  $27.5\ \mu\text{m}$  处反射率甚至超过了 50%, 而本征硅片的反射率在  $20\sim 30\ \mu\text{m}$  也超过了 35%, 探测器对于光子的吸收效率和器件的量子效率都受到了极大的影响。

为了解决 BIB 探测器反射率比较高的问题,需要研究外延 BIB 探测器结构各层的光学参数和减反方法等。

### 4.3 BIB 探测器减反方法

由前面内容的分析可知，BIB 探测器电极层有较强反射，减小反射是提高 BIB 探测器增强吸收提高性能的重要途径，下面简要分析 BIB 探测器减反需求并介绍几种减反方法。

薄膜干涉减反方法是最简单有效的方法，如图 4.6 所示，当一束光从空气或玻璃（折射率为  $n_0$ ）向硅（折射率为  $n_2$ ）入射时，在两者之间添加减反射膜（折射率为  $n_1$ ）可以利用干涉相消原理达到减反效果。其中满足减反膜折射率

$n_1 = \sqrt{n_0 n_2}$ ，减反膜厚度  $d = m \frac{\lambda}{4n_1}$  ( $m$  为奇数)，可形成完美减反的效果。

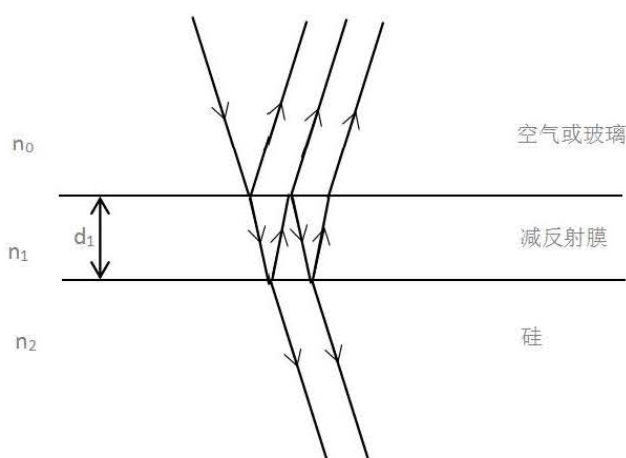


图 4.6 薄膜干涉减反示意图

Figure 4.6 Schematic diagram of thin film interference reduction

对于 BIB 探测器而言，氮化硅等材料的折射率虽然满足干涉相消的减反要求，但是 BIB 探测器工作在远红外甚至太赫兹波段，所需要的薄膜厚度较厚；另一方面，BIB 探测器响应波段较宽，需要宽波段减反，薄膜干涉不能很好满足需求。

梯度介质减反方法的原理是构造光学参数梯度渐变的体系使光波在传播的过程中不会遇到光学性质突变的界面从而减小了光的反射，通常通过利用多层膜构建折射率渐变的减反膜的方法来实现<sup>[10,11]</sup>，这种方法受到减反材料和减反体系尺寸的限制且加工过程较为复杂，与 BIB 探测器焦平面发展趋势的集成化和小型化要求不一致<sup>[9,12,13]</sup>。

He Zhu 等人首次将表面等离子激元与离子注入 BIB 探测器相结合<sup>[14,15]</sup>，提升了离子注入 BIB 探测器的光电响应性能。表面等离子激元和超表面为近些年兴起

的能调控电磁波的研究方向<sup>[16,17]</sup>，近些年来受到研究人员越来越多的人的关注，为外延 BIB 探测器减反工作提供了新思路。

Li Huang 等人于 2017 提出了双层超表面的减反结构，并最终在太赫兹和中红外两个波段都取得了一定的宽波段减反效果<sup>[18]</sup>。减反结构和减反效果如图 4.7 所示。

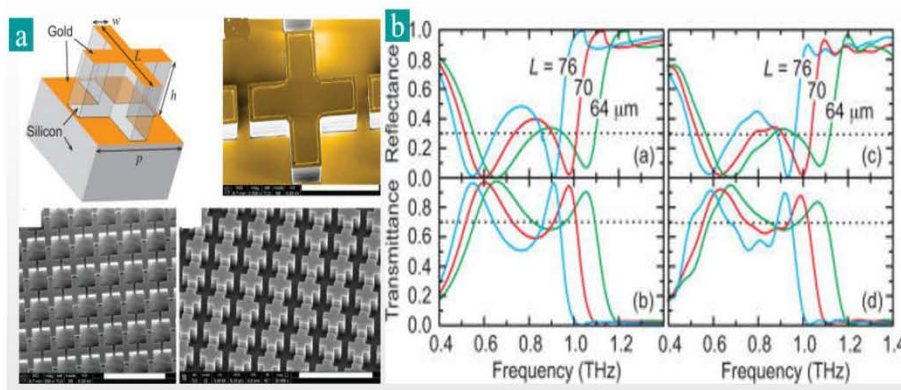


图 4.7 双层超表面减反结构和反射率<sup>[18]</sup>

Figure 4.7 Antireflection structure and reflectance of bilayer metasurface<sup>[18]</sup>

图 4.7 a 为双层超表面的结构，通过刻蚀材料表面和生长金属薄膜形成了上下界面。图 b 左边是不同“十”字长度结构的仿真透射率和反射率结果，右边为实验测试结果。

这种结构不仅简单易于制备，而且可以通过调节器件的结构、尺寸、材料等实现对不同波长范围的调控<sup>[19-23]</sup>。另外这项工作中的报道的减反波段相比较早期的报道结果要宽<sup>[22,24,25]</sup>。这些特性都是外延 BIB 探测器减反所需要的。

此外，由图 4.4 可知，器件的反射谱出现明显的震荡行为(反射率值在 20% 到 40%之间变化)，这是由于该器件是由多层膜结构组成，光波在该结构中发生多次反射，类似于法布里-珀罗 (FP) 谐振腔，存在多束光波干涉的现象。FP 腔效应强烈依赖于体系的结构参数，因此，可以通过调节 BIB 层的结构参数，使想要增强波段的反射率减小。这是后续优化 BIB 探测器结构的一个参考因素。

#### 4.4 BIB 光学参数

为了实现通过引入人工微结构来调控 BIB 探测器光学性质的目的，需要对外延 BIB 探测器各层薄膜性质进行研究。由上述可知，BIB 探测器各层薄膜光学性质不同，构成了一个复杂的光学结构系统。为了研究组成的光学系统，需要研

究外延层的光学参数。

在金属和半导体中，自由电子对材料光吸收起到了非常重要的作用。Drude 模型被广泛地应用在材料光吸收方面拟合材料的介电常数<sup>[26,27]</sup>。

Drude 模型的表达式为：

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma\omega} \quad (4.1)$$

$\varepsilon_r$  表示相对介电常数， $\varepsilon_\infty$  表示高频下的介电常数， $\omega_p$  表示等离子体频率。

$$\omega_p = \frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_0} \quad (4.2)$$

将磷重掺杂硅通过重掺硅的 Drude 模型<sup>[28]</sup>，可以计算拟合出 BIB 探测器的吸收层和上下电极层的光学参数 N：

$$N = n + ik \quad (4.3)$$

光学参数 N，实部 n 表示折射率，虚部 k 表示消光系数。

通过 Drude 模型，可以计算出 BIB 探测器外延层：吸收层 (Si:P  $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ )、上电极层 (Si:P  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) 和下电极层 (Si:P  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) 各层的光学参数，得到的 n 和 k 参数如图 4.8 所示。

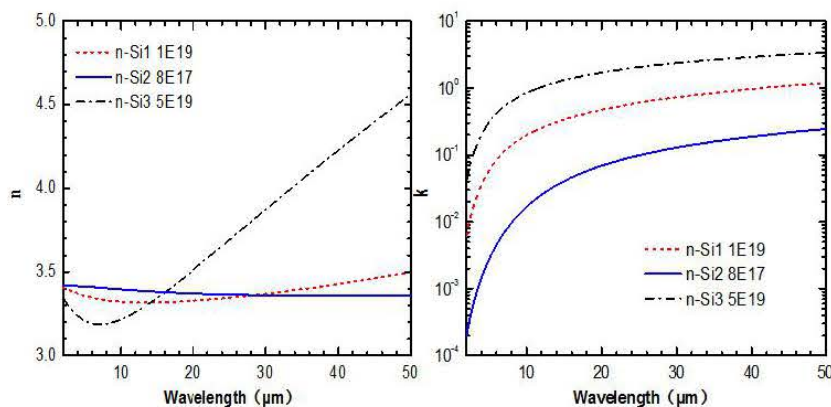


图 4.8 计算得到的不同掺杂浓度层的折射率 n 和消光系数 k

Figure 4.8 Calculated dependence of refractive index and extinction coefficient of silicon of varying doping concentrations.

由图 4.8 可以看出，折射率 n 随着掺杂浓度和波长发生较大的变化，掺杂浓度为  $10^{17}$  量级时，折射率 n 基本不随波长变化。当掺杂浓度到  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  量级时，折射率 n 在波长大于 10 微米范围内随着波长变大而增加。消光系数 k 随波长变化有明显变化，而且随着掺杂浓度的增加而逐渐变大。

#### 4.5 BIB 减反结果

为了降低外延 BIB 探测器在远红外波段的反射率，通过文献调研与技术方法的比较，最终确定了类光栅的双层超表面结构作为减反结构。设计的类光栅双层超表面减反结构如下图所示。

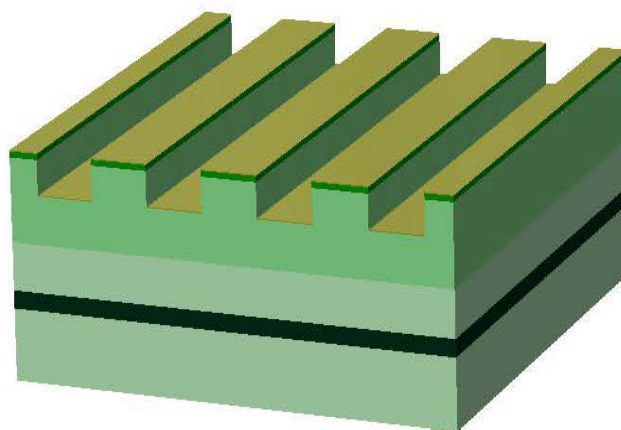


图 4.9 外延 BIB 探测器减反结构示意图

Figure 4.9 Antireflection structure diagram of epitaxial BIB detector

如图 4.9 所示，展示了类光栅的双层超表面结构。通过光刻工艺，在硅基 BIB 外延片上光刻出条形光栅图形，再通过深硅刻蚀机刻蚀得到垂直性比较好的光栅结构，再通过电子束蒸发在光栅的上下表面沉积一层金属薄膜。通过微纳加工，得到如上图所示的带有双层超表面的减反结构的外延 BIB 探测器结构。加工了一系列参数变化的减反结构，主要展示周期为  $9\ \mu\text{m}$  的，沉积金属层为金的样品为例来说明制作流程和测试结果。

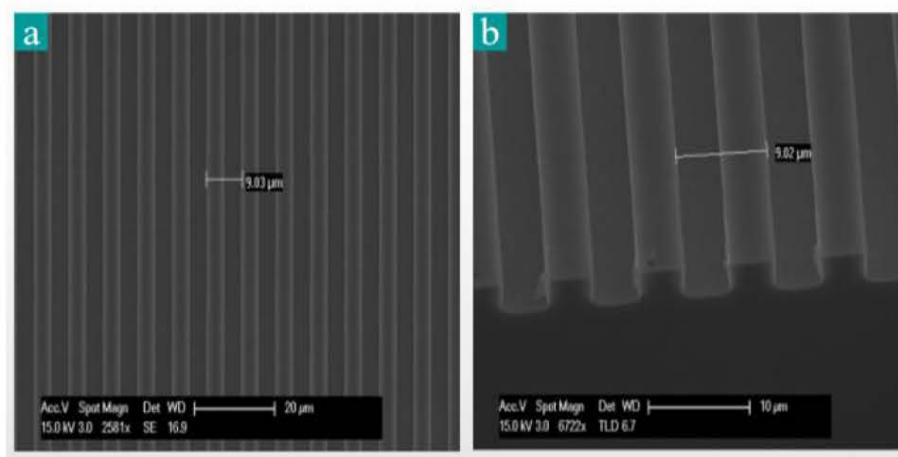


图 4.10 减反结构样品 SEM 图 (a)平面 (b)截面

Figure 4.10 SEM image of antireflection structure sample(a) plane (b) cross section

由图 4.10 (a)平面图可以看到, 样品表面排布着周期性的类光栅的结构, 周期性结构尺寸为  $9\ \mu\text{m}$ 。由图 4.10 (b)截面图可以更加清楚地看到通过刻蚀得到的双层超表面的光栅结构, 由于表面覆盖了一层薄薄的金属, 导电性能比较好, SEM 图比较清晰地展示了类光栅结构。



图 4.11 样品的光学显微镜照片

Figure 4.11 Photomicrograph of the sample

图 4.11 是样品的光学显微镜照片, 由于表面覆盖了一层厚度为  $30\ \text{nm}$  的金层, 样品呈现金黄色, 由图中的刻度尺也能看出样品的周期尺寸约为  $9\ \mu\text{m}$ 。

由于硅掺磷 BIB 探测器的响应峰值在  $27.5\ \mu\text{m}$  左右, 所以所设计的双层超表面结构的减反工作波长主要为  $25\sim 30\ \mu\text{m}$ 。

通过文献调研和仿真数值模拟的结果发现: 调节光栅结构的占空比和周期, 可以调控探测器减反结构的工作波长。设计和制备了不同周期长度、占空比、刻蚀深度和表面金属种类的样品, 进行光学测试。

红外光谱的测试仪器为红外傅里叶光谱仪, 其型号是布鲁克 Vertex 80V, 偏振片为 KRS-5 红外偏振片, 偏振度为 98%。

实验上通过测试不同结构和不同测试条件下的减反结构器件来验证前期设计的正确性。实验主要研究了反射条件下不同入射角度对反射结构的影响, 偏振片和光栅结构之间相对角度的关系, 以及具有减反结构的多层外延硅的透射率。

最终, 以编号为 Au30-Grating-9-5-3 的器件为例, 它的金厚度为  $30\ \text{nm}$  周期长度为  $9\ \mu\text{m}$ , 光栅间距为  $5\ \mu\text{m}$ , 刻蚀深度为  $3\ \mu\text{m}$ 。通过表征该器件性能来说明减反结构的效果。

图 4.12 为上述样品的在 15 度入射角，真空中偏振片和类光栅结构平行的条件下反射测试结果和仿真对比图。

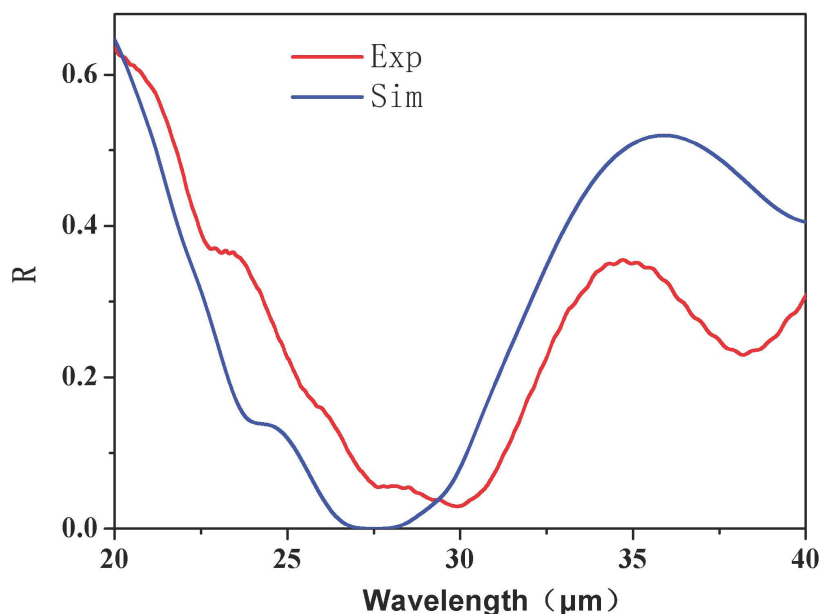


图 4.12 反射实验和仿真图

Figure 4.12 Reflection experiment and simulation

由图 4.12 可以看出，周期为  $9\ \mu\text{m}$  样品的反射率仿真曲线如图 4.12 中的蓝色曲线所示，最低点与硅掺磷 BIB 探测器的响应峰值范围接近。在  $26\sim 28\ \mu\text{m}$  范围内，数值模拟仿真结果显示体系的反射率小于 1%。实验结果如图 4.12 中红色曲线所示。仿真结果和模拟结果曲线基本相符合，反射率从  $20\ \mu\text{m}$  处大于 60% 逐渐下降，类光栅双层超表面减反结构的减反效果在  $30\ \mu\text{m}$  处达到最优，反射率小于 3%，基本实现了无反射。在波长  $27.5\ \mu\text{m}$  处，反射率也小于 5%。类光栅双层超表面减反结构在不同波段减反效果不同，减反效果具有波长选择性。

外延阻挡杂质带探测器减反结构的实验结果和仿真波形基本相符合，取得了良好的减反效果。波形不完全重合，分析主要有以下三种主要原因：1、与无减反结构时理论与实验结果差异原因类似，即计算所采用结构与真实的样品结构之间存在差别；2、测量时实际反射的入射光线与法线夹角不为零度，而是一个大约为  $\pi/6$  立体角；3、偏振片不够理想，KRS-5 偏振片在测量的红外波段只有近 98% 的偏振度。

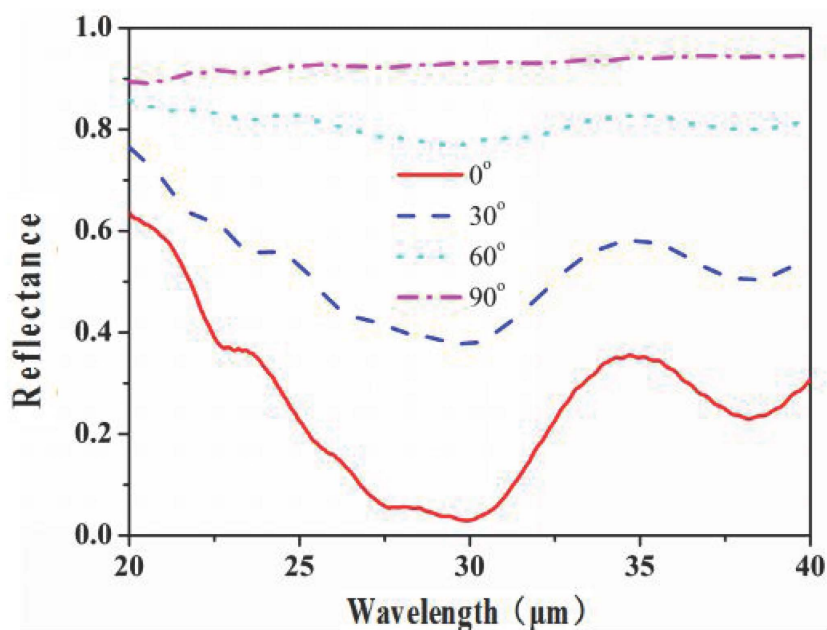


图 4.13 偏振片与光栅不同夹角的反射率

Figure 4.13 Reflectance at different angles between polarizer and grating

为了研究反射率是否受偏振片和类光栅结构之间夹角影响,测量了偏振片和类光栅结构不同夹角的反射率结果如图 4.13 所示。改变偏振片与光栅之间的夹角,减反的峰值波长基本不发生变化。夹角越大,最小反射率也越大。为实现最佳减反效果,偏振片应该与类光栅结构平行。

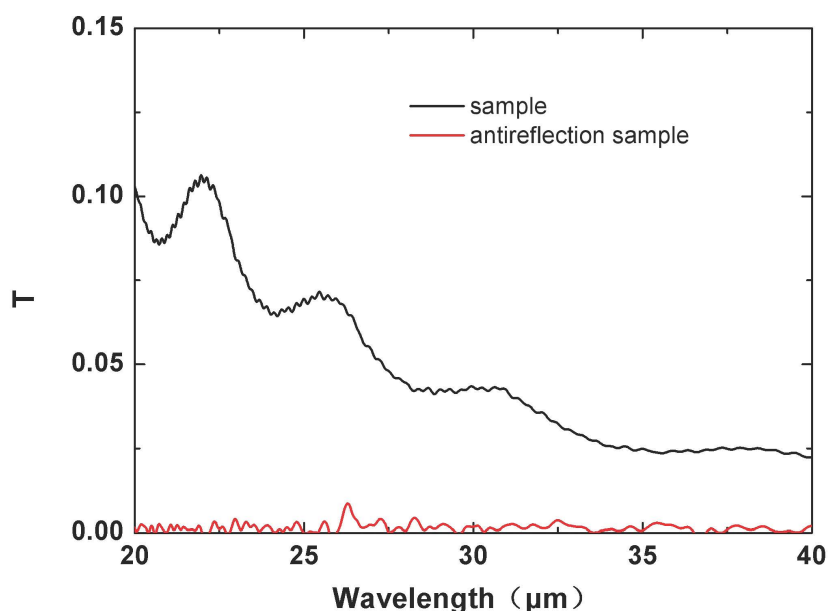


图 4.14 样品透射率图

Figure 4.14 Sample transmittance diagram

探测器的吸收不仅和反射有关,还与透射相关。由图 4.14 可以看到,测量

了类光栅双层超表面减反结构的透射率和无减反结构透射率。定制的没有减反结构阻挡杂质带探测器结构的透射率在 23~40  $\mu\text{m}$  波段透射率逐渐下降，在探测器响应峰值 27.5  $\mu\text{m}$  处透射率约为 4.6%。有类光栅双层超表面结构由于金薄膜的存在透射率基本为零。说明类光栅双层超表面结构不仅能减少反射，还能降低 BIB 探测器的透射。

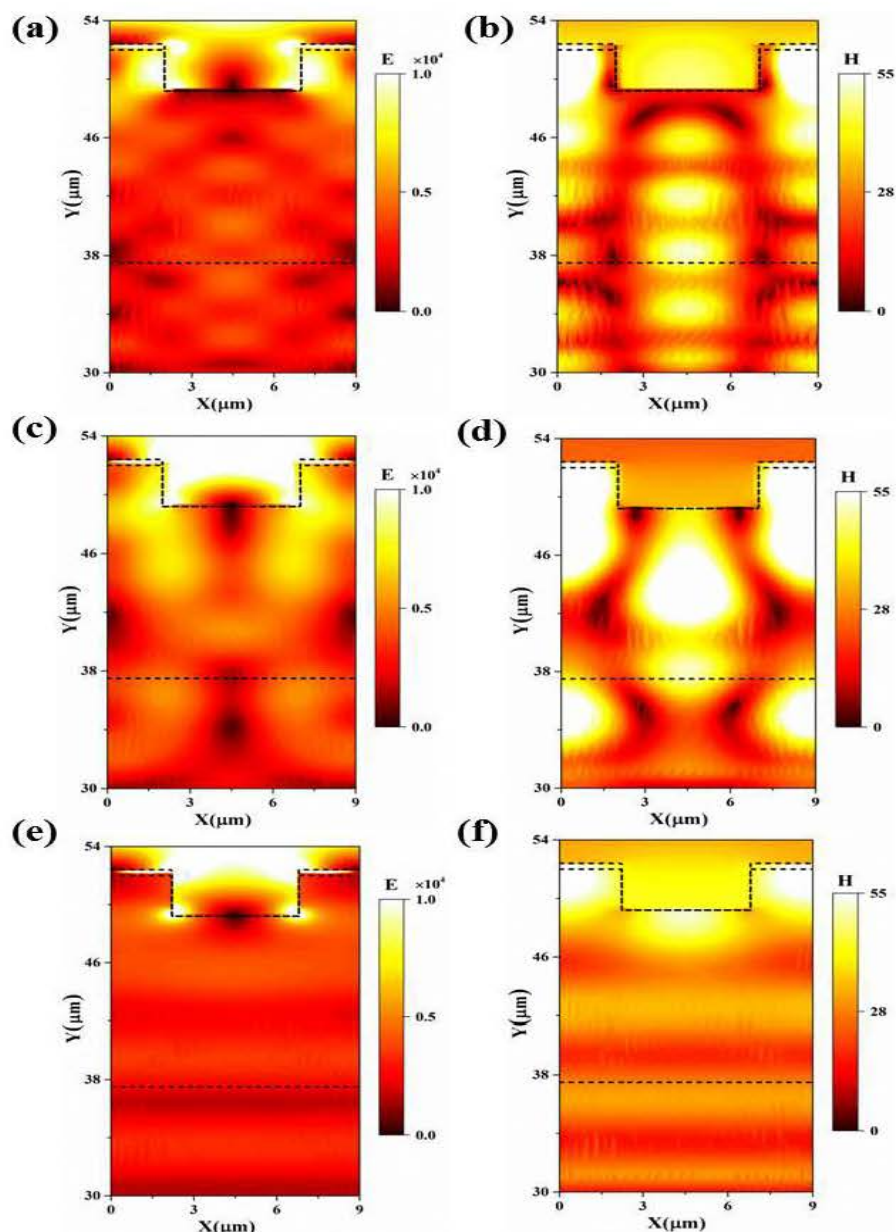


图 4.15 具有超构表面减反微结构器件在正入射条件下电磁场分布图。左列：电场；右列：磁场。(a、b)入射光波长为 20  $\mu\text{m}$ ；(c、d)入射光波长为 27.5  $\mu\text{m}$ ；(e、f)入射光波长为 40  $\mu\text{m}$

**Figure 4.15** Electromagnetic field distributions for the metasurface-based BIB detector at the normal incidence. Left column: electric field; Right column: magnetic field. (a) and (b) at the wavelength of 20  $\mu\text{m}$ , (c) and (d) at the wavelength of 27.5  $\mu\text{m}$ , (e) and (f) at the wavelength of 40  $\mu\text{m}$ .

本文分别选取了工作波长为  $20\ \mu\text{m}$ 、 $27.5\ \mu\text{m}$  和  $40\ \mu\text{m}$  时的电场和磁场强度分布图，由数值模拟计算和实验测试结果可知，人工微结构在入射光波长为  $27.5\ \mu\text{m}$  处起到了明显的减反效果，而在入射光波长为  $20\ \mu\text{m}$  和  $40\ \mu\text{m}$  处减反效果较为一般。由图 4.15(a)(b)可见，当入射光波长为  $20\ \mu\text{m}$  时，由于入射光波长较短，人工微结构并没有满足深亚波长的条件，整体结构的光学性质由结构的表面的金薄膜主导，反射率较高，此时的电场与磁场并没有被局域在吸收层处，整体结构对于电磁波的吸收较弱。而当入射光波长为  $40\ \mu\text{m}$  时，此时的人工微结构具有很好的深亚波长性质，但是由于波长所对应的频率偏离了人工微结构的共振频率，因此人工微结构虽然能够部分将电场与磁场束缚在结构中（图 4.15(e)(f)），但是并没有引起强烈的结构共振吸收。只有当入射光波长为  $27.5\ \mu\text{m}$  时，见图 4.15(c)(d)，人工微结构既满足了深亚波长性也满足了共振吸收条件，将电场与磁场很好的局域在了结构的吸收层之中，对探测器的减小反射提高吸收起到了明显的效果。

二维孔状阵列（2DHA）结构简单，不需要长金属易于加工，而且减反效果在离子注入器件上得到了验证。设计了 2DHA 结构的减反，周期也为  $9\ \mu\text{m}$ ，圆孔直径为  $5\ \mu\text{m}$ ，深度为  $3\ \mu\text{m}$ 。当上表面没有覆盖金薄膜层时，其结构示意图如图 4.16 所示。

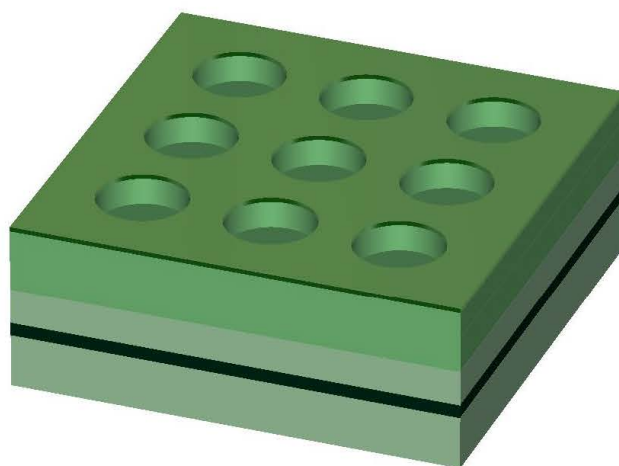


图 4.16 二维孔状阵列减反结构示意图

Figure 4.16 Schematic diagram of two-dimensional hole array antireflection structure

外延 BIB 结构经过光刻和深硅刻蚀，得到 2DHA 减反结构。实验测得有 2DHA 减反结构和无减反结构外延 BIB 硅片的反射率曲线如 4.17 所示。

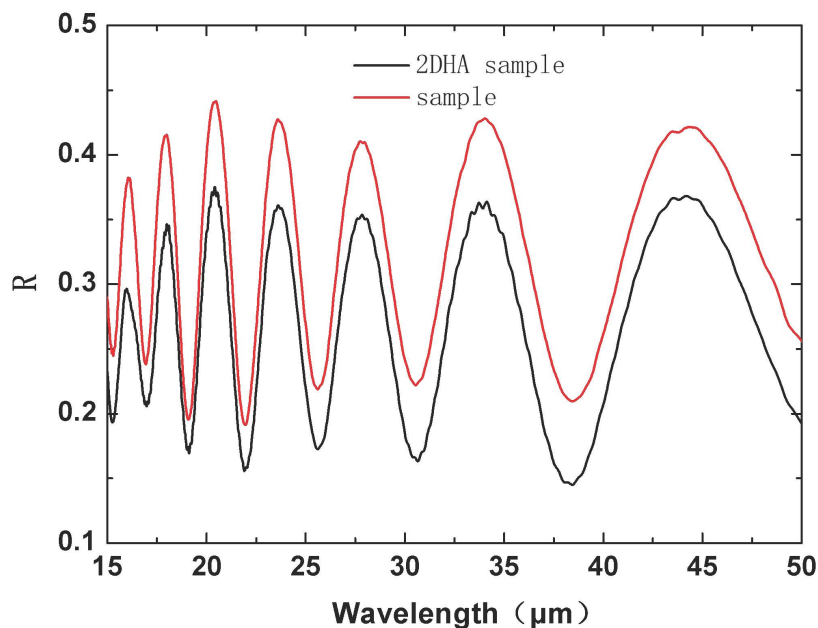


图 4.17 二维孔状阵列和无结构反射率

Figure 4.17 Reflectance of two-dimensional hole array and unstructured

由图 4.17 可以看出, 当外延 BIB 硅片表面具有二维孔状阵列结构时, 外延 BIB 硅片的反射率出现了下降, 说明周期性的二维孔状阵列结构起到了减反的效果。在 BIB 探测器响应峰值波长附近, 27.5  $\mu\text{m}$  处没有结构的反射率为 40%, 有周期性二维孔状阵列结构的反射率为 35%, 反射率值减少了 5%; 在 30.5  $\mu\text{m}$  处, 反射率从 22.2% 下降到 16.5%, 反射率减小 5.7%。从现有结果看, 具有周期性的二维孔状阵列结构起到了一定的减反作用, 但效果不甚明显, 主要原因是结构参数不是最优, 下一步将对该结构做更深入的优化。

#### 4.6 离子注入 BIB 减反增吸收

由前面的内容可知, 离子注入 BIB 探测器和外延 BIB 探测器结构不同, 硅基离子注入 BIB 探测器结构示意图如第一章图 1.9 所示。离子注入 BIB 探测器是横向的, 电场方向和光入射方向不相同, 光可以直接入射到 BIB 探测器吸收区而不用经过电极层。这就减小了电极层的高反射率对探测器性能的影响, 这也是离子注入 BIB 探测器的优势。

由图 4.4 可以看到, 硅片在 30  $\mu\text{m}$  波段也有 30%~40% 的反射率, 为了研究离子注入 BIB 探测器减反增加吸收的问题, 对离子注入 BIB 探测器的涉及到的各种离子注入薄膜和外延的钝化层进行了研究。

由于光进入离子注入 BIB 探测器仅通过钝化层 (SiN<sub>x</sub>)、吸收层 (P1) 和衬底, 下面就对吸收层和具有钝化层的吸收层体系的透射率和反射率进行研究。透射和反射结果见图 4.18。

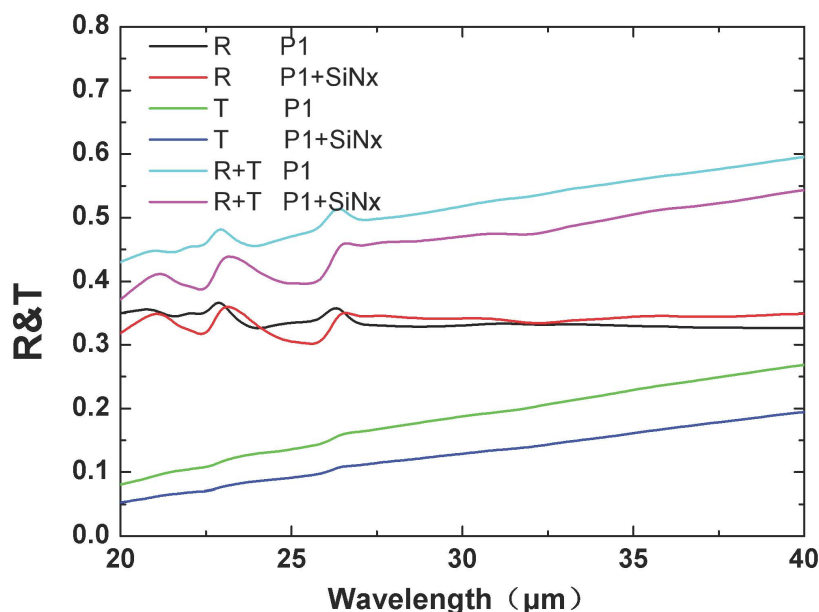


图 4.18 吸收层和加钝化层后的透射和反射

Figure 4.18 Transmittance and reflectance of absorption layer and passivation layer

吸收层 P1 是第三章中进行了离子注入的硅, 在硅表面形成了约 1 μm 厚、磷离子注入浓度约为  $6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$  的硅片。由图 4.16 中黑色曲线可以看到, 吸收层的反射率在 20~40 μm 的波段范围内约为 35%, 透射率是图中绿色曲线, 基本接近线性。透射率从 20 μm 处的 8% 增长到 40 μm 处的 27%。覆盖一层 CVD 生长的 200 nm SiN<sub>x</sub> 钝化层以后, 反射率基本不变, 但是透射率蓝色曲线一直在绿色曲线下, 说明加 SiN<sub>x</sub> 层以后透射率减小。

加 SiN<sub>x</sub> 钝化层以后, 吸收层的透射率和反射率之和比以前减少, 说明 SiN<sub>x</sub> 钝化层不仅起到了抑制暗电流的作用, 还增强了吸收层的光吸收。

#### 4.7 本章小结

通过分析 BIB 探测器结构和减反方法, 利用人工微结构的类光栅双层超表面减反结构对外延 BIB 探测器实现了减反。2DHA 减反结构在 30.5 μm 波段, 反射率由 22.2% 下降到 16.7%。类光栅双层超表面结构具有偏振选择性, 加偏振片测量在 30 μm 波段反射率小于 3%, 在外延 Si:P BIB 探测器响应峰值 27.5 μm 处反射率小于 5%。通过类光栅双层超表面结构实现了外延 BIB 探测器的减反, 同

时获得了偏振信息，符合第四代焦平面获取更多偏振信息的发展趋势。双层超表面减反结构具有调节波段宽、调谐灵活、结构尺寸小、易于加工等特点，在硅基阻挡杂质带探测器中的成功应用还可以拓展到锗基或者砷化镓基阻挡杂质带探测器中，进而提高阻挡杂质带探测器焦平面成像性能，也可以进一步拓展到其他红外和太赫兹探测器中应用。

## 参考文献

- [1] Petroff M D, Stapelbroek M G. BLOCKED IMPURITY BAND DETECTORS, US Patent 4568960 Feb.4, 1986.
- [2] Szmulowicz F, Madarasz F L. Blocked impurity band detectors—an analytical model: figures of merit[J]. Journal of applied physics, 1987, 62(6): 2533-2540.
- [3] Liao K, Li N, Liu X, et al. Ion-implanted Si: P blocked-impurity-band photodetectors for far-infrared and terahertz radiation detection[C]//International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Terahertz Technologies and Applications. International Society for Optics and Photonics, 2013, 8909: 890913.
- [4] 廖开升, 刘希辉, 黄亮, 等. 天文用阻挡杂质带红外探测器. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(4): 360-367.
- [5] Sclar N. Properties of doped silicon and germanium infrared detectors[J]. Progress in Quantum Electronics, 1984, 9(3): 149-257.
- [6] Huffman J E, Crouse A G, Halleck B L, et al. Si: Sb blocked impurity band detectors for infrared astronomy[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(1): 273-275.
- [7] Stetson S B, Reynolds D B, Stapelbroek M G, et al. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1985, 686: 48-65.
- [8] Liao Kai-Sheng, Li Zhi-Feng, Wang Chao, et al. Si:P blocked impurity band detectors for far infrared detection[J]. J. Infrared Millim. Waves, (廖开升, 李志锋, 王超, 等. 用于远红外探测的 Si : P 阻挡杂质带红外探测器研制. 红外与毫米波学), 2016, 35(1): 37-41.
- [9] Rogalski A. Infrared detectors[M]. CRC press, 2010.
- [10] Rayleigh L. On reflection of vibrations at the confines of two media between which the transition is gradual[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1879, 1(1): 51-56.
- [11] Xi J. Q., Schubert M. F., Kim J. K., Schubert E. F., Chen M., Lin S.-Y., Liu W., Smart J. A. Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection [J]. Nature Photonics, 2007, 1(3): 176-9.
- [12] Martyniuk P, Antoszewski J, Martyniuk M, et al. New concepts in infrared photodetector designs[J]. Applied Physics Reviews, 2014, 1(4): 041102.
- [13] Tezcan D S, Putzeys J, Munck K D, et al. Development of a Si:As blocked impurity band detector for far IR detection[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007, 6660: 66600R-66600R-12.
- [14] Zhu H, Weng Z, Zhu J, et al. Surface plasmon enhanced Si-based BIB terahertz detectors[J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(5): 053505.

- [15] Zhu H, Xu J, Zhu J, et al. The effect of infrared plasmon on the performance of Si-based THz detectors[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28(1): 839-844.
- [16] 王振林, WANGZhen-lin. 表面等离激元研究新进展[J]. *物理学进展*, 2009, 29(3):287-324.
- [17] 屈绍波. 超表面研究及应用方向展望[C]// 中国功能材料科技与产业高层论坛, 2014.
- [18] Huang L, Chang C C, Zeng B, et al. Bilayer metasurfaces for dual-and broadband optical antireflection[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(9): 2111-2116.
- [19] Fesharaki F, Jooshesh A, Bahrami-Yekta V, et al. Plasmonic antireflection coating for photoconductive terahertz generation[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(6): 1350-1354.
- [20] Zhang B, Hendrickson J, Nader N, et al. Metasurface optical antireflection coating[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(24): 241113.
- [21] Hao J, Qiu C W, Qiu M, et al. Design of an ultrathin broadband transparent and high-conductive screen using plasmonic nanostructures[J]. *Optics letters*, 2012, 37(23): 4955-4957.
- [22] Chen H T, Zhou J, O'Hara J F, et al. Antireflection coating using metamaterials and identification of its mechanism[J]. *Physical review letters*, 2010, 105(7): 073901.
- [23] Jeon J, Bhattarai K, Kim D K, et al. A low-loss metasurface antireflection coating on dispersive surface plasmon structure[J]. *Scientific reports*, 2016, 6: 36190.
- [24] Chen H T, Zhang B, Guo J, et al. Metasurface optical antireflection coatings[C]//CLEO: QELS\_Fundamental Science. Optical Society of America, 2015: FW4C. 4.
- [25] Chen H T, Zhou J F, O'Hara J F, et al. A numerical investigation of metamaterial antireflection coatings[J]. *Int. J. THz Sci. Technol.*, 2010, 3: 66-73.
- [26] Smith N V . Classical generalization of the Drude formula for the optical conductivity[J]. *Physical review. B, Condensed matter*, 2001, 64(15):155106.
- [27] Masetti G , Severi M , Solmi S . Modeling of carrier mobility against carrier concentration in arsenic-, phosphorus-, and boron-doped silicon[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1983, 30(7):764-769.
- [28] S. Basu B. J. L., Z. M. Zhang. Infrared Radiative Properties of Heavily Doped Silicon at Room Temperature [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2010, 132.

## 第五章 BIB 探测器深低温读出电路探究

红外探测器由于可以应用在军事以及民用等领域,许多欧美发达国家在相关方面投入了大量资源进行研究<sup>[1-7]</sup>。与发达国家相比,我国的红外探测器及低温电路方面发展较晚,技术相对落后<sup>[8-11]</sup>。同时由于该领域应用的重要性的敏感性,美国等发达国家对我国进行技术封锁<sup>[12-13]</sup>。电路在深低温中工作时,会受到低温带来的影响。因此,研究 CMOS 深低温特性以及电路设计尤其重要。深低温电路的研究,对于我国的红外领域、红外光电子科学技术的发展以及我国航空、航天和国家安全都具有非常重要的现实意义<sup>[1-3,14-16]</sup>。

BIB 探测器是非本征杂质带跃迁的光电导类型探测器,它具有波长覆盖宽、响应速度快、光电导增益高、暗电流比较低、抗辐照性能强等优点,使 BIB 探测器成为了波长大于  $5\ \mu\text{m}$  天文红外探测的首选探测器<sup>[17-20]</sup>。

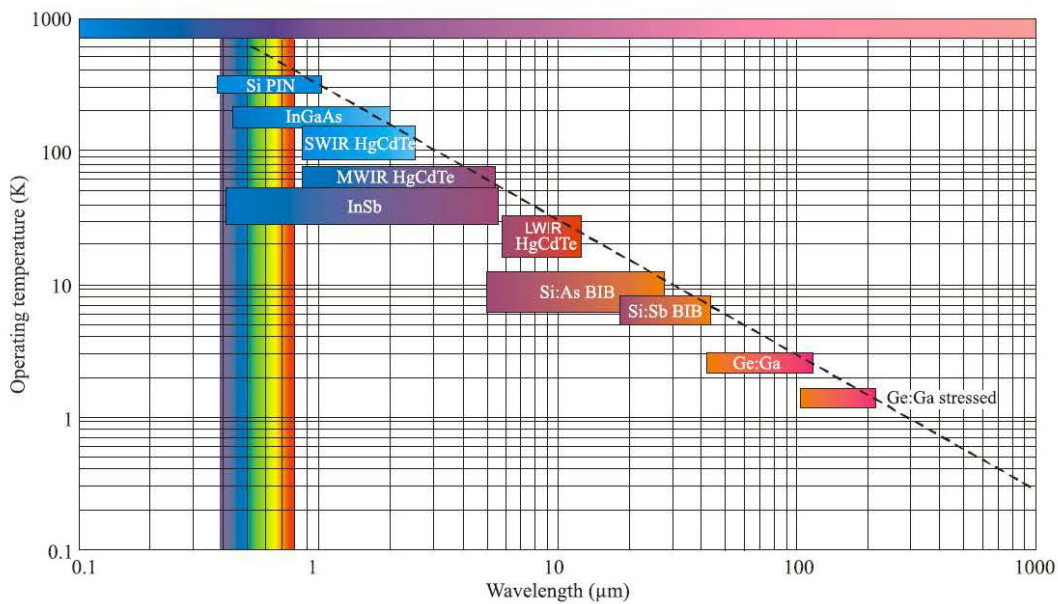


图 5.1 具有最大灵敏度光谱带的低背景材料体系的工作温度<sup>[1]</sup>

Figure 5.1 Operating temperature of low-background material system with maximum sensitivity spectral band<sup>[1]</sup>

图 5.1 列出了几种低背景光应用的高性能探测器件,不同波长应用的探测器材料不同,而且具有较长截止波长的探测器要工作在相应较低的工作温度,以满足较低暗电流性能的需求。非本征光电导探测器较本征光电导探测器性能要弱,低背景光电探测器的探测过程是通过光子吸收而不是热激励主导自由载流子的

产生。探测器长波截止波长和温度大致有如下关系：

$$T_{\max} = \frac{300}{\lambda_c} \quad (5.1)$$

由上图和公式可以看出，Si:As BIB 探测器的探测波长可以覆盖到 30  $\mu\text{m}$ ，相应的工作温度要低于 10 K，相匹配的读出电路同样也要工作于深低温下<sup>[21]</sup>。Ge:Ga 探测器波长可达百微米，需要工作在更低温度下。

CCD 和 CMOS 是构成探测器读出电路的两种选择，下面来分析比较哪种更适合用来作为 BIB 探测器的深低温读出电路。

### 5.1 CCD 与 CMOS 电路比较

CCD(Charged Coupled Device)早在 1969 年于贝尔试验室研制成功<sup>[22,23]</sup>，CCD 可用于制作可见光成像器等。CCD 和 CMOS 都可用于制作读出电路，与 CMOS 相比 CCD 主要具有噪声低的优点。CCD 由于电子特殊的传输方式，读出噪声很低，信噪比较高。CCD 缺点是 CCD 制作工艺相比特殊制作成本较高、CCD 抗辐射能力较弱，不能在许多有辐射的地方使用<sup>[23]</sup>。红外焦平面的读出电路经常需要在外太空等辐射严重的环境中工作。CCD 抗辐射差特性限制了其在 BIB 探测器中的使用。

CMOS 与 CCD 在读出电路方面相比较，主要有以下几个优势<sup>[4]</sup>：

(1)系统集成度高，成本低。高系统集成性是 CMOS 读出电路相对 CCD 读出电路具备最突出优点。CMOS 读出电路可由标准电路工艺制造，不需要其他的制造装备，而且能与其他功能的器件集成到一起。相对而言 CMOS 读出电路的制造成本比 CCD 读出电路低；

(2)CMOS 读出电路抗辐射能力较强，可在外太空等辐射较强环境工作；

(3)能耗小，CMOS 读出电路系统由统一的低压电源供电，能耗小，更加适用于机载、星载和便携式电子设备使用<sup>[4]</sup>；

(4)CMOS 读出电路数据信号读出更加灵活，CMOS 电路能够整行整列读出，也能够编码方式选取任意像素信号进行读出和放大<sup>[10,13]</sup>。

由于 CMOS 读出电路具有上述优点，更加符合红外深低温读出电路要求和发展趋势，所以有必要研究适用于 BIB 探测器的深低温 CMOS 读出电路。

## 5.2 CMOS 深低温性质

由前面章节的分析可知，载流子深低温下会出现冻析效应，会使 CMOS 出现一些怪异现象<sup>[16,24-30]</sup>。

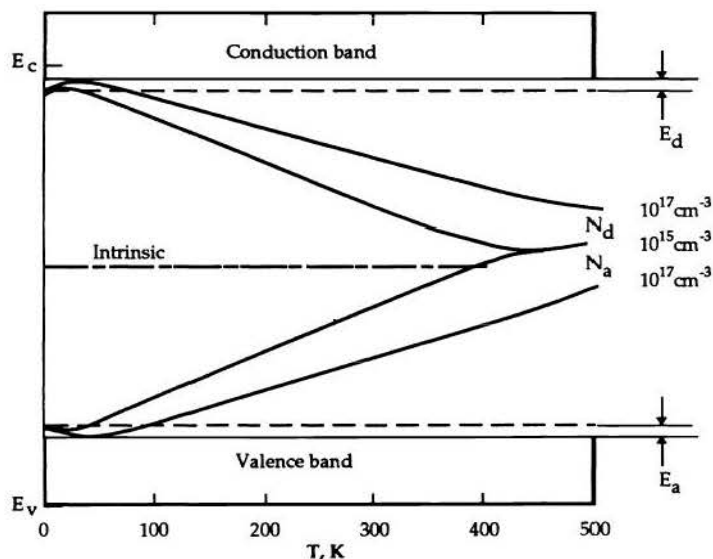


图 5.2 不同掺杂浓度的费米能级和温度的关系<sup>[24]</sup>

Figure 5.2 Effect of doping concentration on Fermi level as a function of temperature <sup>[24]</sup>

图 5.2 是掺杂浓度对费米能级影响关于温度的函数。由半导体知识可知，载流子在室温或者较高温度下拥有较高的平均热动能，能克服杂质能级的束缚，使其能够变为自由电子，即杂质基本上完全电离。随着温度逐渐降低，载流子所具有的热动能逐渐下降，不能克服杂质能级的束缚，杂质电离能力减弱。当温度降到 77 K 甚至 4 K 时，杂质电离能力变弱甚至基本不电离，这种从常温到低温载流子浓度逐渐降低的现象被称为载流子冻析效应<sup>[1]</sup>。冻析效应对低温工作的 MOSFET 性能有着重要影响<sup>[31]</sup>，对 NMOS 而言，伴随着温度的降低，衬底的费米能级  $E_F$  逐渐向价带顶移动，使更多的可移动空穴冻析到受主杂质上。图 5.2 分别展示了 N 型和 P 型两种掺杂不同浓度费米能级和温度的变化关系。

Kink 效应<sup>[16]</sup>：如图 5.3 所示，相较于常温下的输出特性曲线，NMOS 在饱和区电流忽然增加，曲线发生翘曲的现象。出现饱和区电流突然增加现象的原因是由于在深低温下，衬底的电势会发生变化，造成源极和衬底之间的 PN 结出现正偏，从而使衬底的多数载流子流向源极，增大了漏源之间的电流，其作用相当于减小了器件的阈值电压<sup>[24,31-35]</sup>。

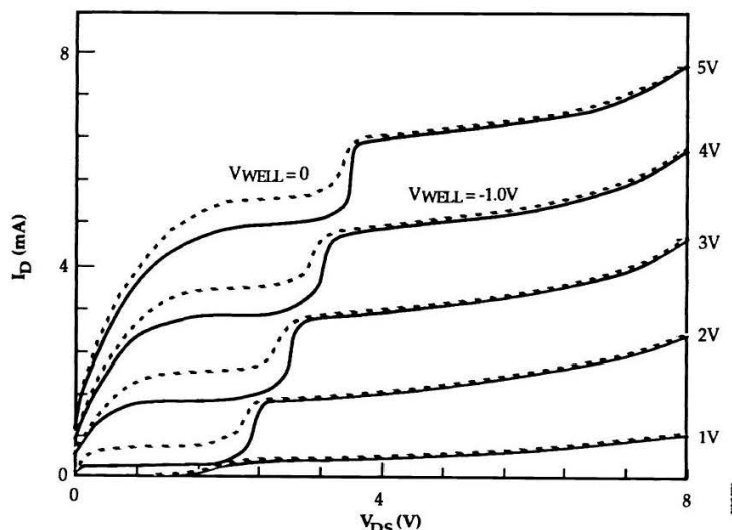


图 5.3 典型的 NMOS 器件伏安特性中的 Kink 效应<sup>[24]</sup>

Figure 5.3 Kink in device I-V characteristics for a conventional NMOS<sup>[24]</sup>

Kink 效应的出现会使 CMOS 读出电路在低温下的结构性能发生变化，比如源跟随器的输出呈现很强的非线性现象，Kink 效应也会使 CMOS 电路共源放大器与两级运放的增益出现非线性<sup>[16]</sup>。

除了 Kink 效应外，还有磁滞回 (Hysteresis) 效应<sup>[36-39]</sup>、过冲 (Toe/Overshoot) 效应等<sup>[40-42]</sup>，这些效应都会对读出电路产生一定的影响。

CMOS 电路在低温下工作时会出现上述怪异现象，但也有部分性能会提升。由于温度的下降，载流子的迁移率与饱和速度相应会增加。器件关断方面性能得到提高，热噪声会减小。闩锁阻抗同时会增加，常温困扰的闩锁效应问题对器件影响减弱<sup>[24,43-46]</sup>。CMOS 适合用于低温电路系统，场效应特性在低温下更理想<sup>[47,48]</sup>。CMOS 良好特性让很多 CMOS 研究人员希望更好认识它的温度特性，使它更好地运用于电路模拟<sup>[48-52]</sup>。在 150 K 温度以下，掺杂离子的冻析效应出现急剧变化<sup>[24,52]</sup>。

低温 CMOS 和室温 CMOS 相比有性质主要有以下几点变化：

阈值电压上升：根据半导体器件知识可知，CMOS 器件的阈值电压定义为引起衬底材料由弱反型状态过渡到强反型状态的临界栅极电压，硅和二氧化硅的接触面表面电势为  $\varphi_s \approx 2\varphi_{fp}$ ， $\varphi_{fp}$  代表硅的费米能势<sup>[1,2]</sup>。NMOS 作为代表，其阈值电压表达式如下：

$$V_{th} = \frac{|Q'_{SD}(\max)|}{C_{ox}} + V_{FB} + 2\phi_{fp} \quad (5.2)$$

上述  $V_{FB}$  表示 CMOS 器件中的平带电压。 $\phi_{fp}$  表示的费米能势，和衬底载流子的浓度关系式如下：

$$\phi_{fp} = V_t \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (5.3)$$

随着温度的逐渐降低，半导体中载流子冻析效应越来越显著。CMOS 器件衬底材料的本征激发的载流子浓度  $n_i$  与掺杂产生电离的浓度  $N_a$  降低。由于本征载流子浓度的下降比掺杂物产生电离浓度下降快得多，导致费米能势  $\phi_{fp}$  上升，导致阈值电压逐渐上升。PMOS 器件和 NMOS 器件性质类似，阈值电压在低温下改变类似。

**载流子迁移率增大：**温度改变对 CMOS 器件的载流子迁移率产生影响，温度降低载流子迁移率提高，器件性能得到提升。工作在饱和区时，施加的栅压高于 CMOS 器件阈值电压，载流子电场作用下在硅衬底表面聚集，硅材料衬底的表面粗糙程度决定了载流子迁移率<sup>[53]</sup>。

**器件跨导增大：**因为器件的跨导公式可知，它和 CMOS 载流子迁移率是正相关关系。所以伴随着载流子迁移率的提高，CMOS 的跨导加大<sup>[24]</sup>。

**载流子饱和速度增加：**由器件物理可知，给沟道两端施加足够大电场时，载流子速度将会产生饱和，过驱动电压和漏电流之间呈现线性关系。饱和速度和跨导之间成线性关系，所以随着温度下降，CMOS 中载流子饱和速度增加<sup>[1]</sup>。

**亚阈值斜率增大：**因为探测器读出电路工作方式是直接注入式 CMOS 电路，采用的注入管工作时处于亚阈值区域。所以需要研究 CMOS 器件的亚阈值转移特性随温度变化的情况。通常温度降低，CMOS 的亚阈值转移特性曲线斜率会增大，关断漏电流出现减小，CMOS 器件性能得到提高。伴随着半导体技术的发展，器件尺寸越来越小供电电压越来越低，工艺上能够把器件的阈值电压控制更小，可以增加电路的电压余度<sup>[54]</sup>。

**沟道串联电阻异常：**沟道轻掺杂漏区（LDD）串联电阻随着  $V_{ds}$  的变小而加大，会导致沟道电导在较小  $V_{ds}$  区域随着  $V_{ds}$  降低而变小<sup>[55,56]</sup>。

### 5.3 BIB 探测器读出电路实现方案

雷神视觉系统公司采用改进后的深低温 CMOS 工艺实现了 BIB 探测器深低温读出电路。现在已经制造出了  $2048 \times 2048$  的超大规模低噪声高像素密度集成

的电路。图 5.4 是典型背照型 BIB 探测器结构与与读出电路互联的结构示意图。

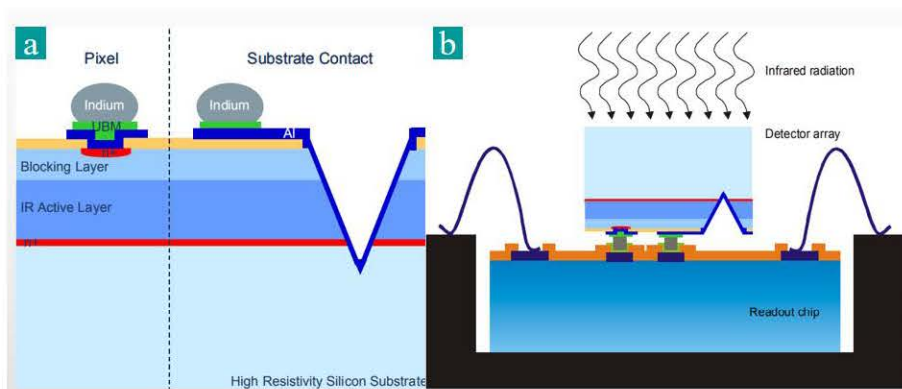


图 5.4 BIB 探测器结构与读出电路连接结构示意图<sup>[58]</sup>

Figure 5.4 BIB detector structure and readout circuits connection structure diagram <sup>[58]</sup>

图 5.4 (a) 是背照型 BIB 探测器的结构图，探测器电极和读出电路之间通过钼柱互联技术连接，结构示意图如图 5.4 (b) 所示，将探测器产生信号通过读出电路放大处理形成想要的信号。

表 5.1 列出了美国雷神视觉系统公司 (Raytheon Vision Systems) 近些年为 IBC (BIB) 探测器定制的读出电路的一些关键参数。

表 5.1 雷神视觉系统公司为 IBC(BIB)探测器定制的低噪声高像素密度读出电路<sup>[3]</sup>

Table 5.1 RVS ROICs designed specifically to support IBC(BIB) detectors and provide for low noise and high pixel densities<sup>[3]</sup>

Parameter	Si: As IBC	Aladdin	Phoenix	MIRI	Aquarius
Format	320 x 240	1024 x 1024	1024 x 1024, 2048 x 2048	1024 x 1024	1024 x 1024
Pixel Size	50 $\mu\text{m}$	27 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$
ROIC Type	DI	SFD	SFD	SFD	SFD
Fill Factor	>95%	>95%	>95%	>98%	>98%
ROIC Input Referred Noise	< 1000 e- RMS	10-SOe-RMs	6 - 20 e- RMS	10 to 30 e-	Low Gain <100e-RMS High Gain <100e- RMS
Integration Capacity	7 or 20 x 10 <sup>6</sup> e-	2.0 x 10 <sup>5</sup> e-	3 x 10 <sup>5</sup> e-	2 x 10 <sup>5</sup> e-	1 or 11 x 10 <sup>6</sup> e-
Max. Frame Rates	100 to 500 Hz	1 to 20 Hz	0.1Hz	0.1 Hz	120 Hz
Number of Outputs	16 or 32	32	4	4	16 or 64
Packaging	LCC	LCC	LCC	Module	Module - 2 side buttable

深低温时, NMOS 由于受到 Kink 效应和磁滞回效应等影响比较大, 而 PMOS 影响比较小基本可以正常工作, 图 5.5 是欧洲南方天文台 AQUARIUS 卫星 BIB 探测器读出电路方案。图 5.5(a) 是 BIB 探测器与读出电路相互连接的结构示意图, 读出电路通过标准的“3T”结构在时序电路控制下将产生的信号采集, 由于“3T”结构全部都由 PMOS 构成, 可以与 BIB 探测通过钽柱互连工作在深低温下。图 5.5(b) 是多路复用读出电路方案, 每列有单独的一个运算放大器, 可以将前面采集的信号进行放大处理。运算放大器能够工作在室温下, 不受低温载流子冻析给 CMOS 晶体管带来的影响。

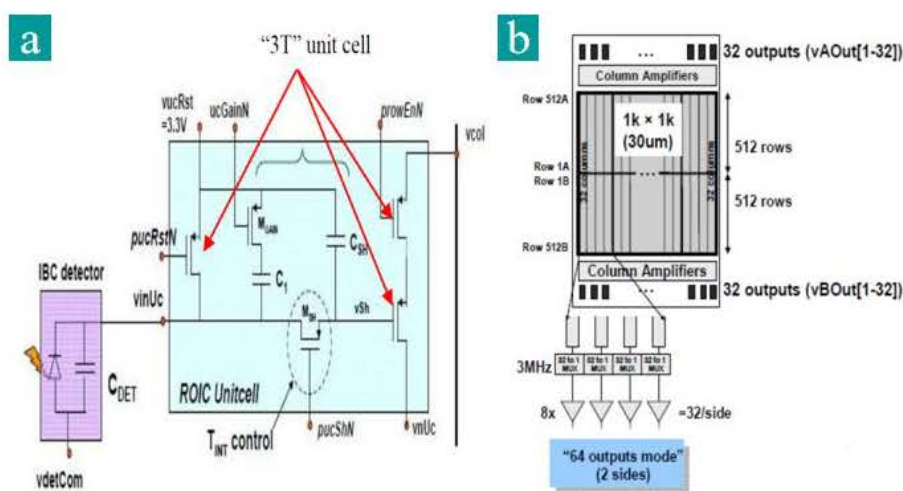


图 5.5 AQUARIUS BIB 读出电路方案<sup>[59]</sup>

Figure 5.5 BIB readout circuits scheme of AQUARIUS <sup>[59]</sup>

上图介绍的红外探测器和前置放大器是分开封装的, 即红外探测器在低温下工作, 前置放大器在常温下工作, 这种设计使探测到的信号在传输至前置放大器的过程中容易产生干扰, 引起噪声。而探测信号一般很弱, 微弱的干扰都会对探测器性能产生较大的影响<sup>[60]</sup>。

随着航空航天技术的发展, 对红外探测器的性能方面提出了更高的要求, 为了能更好地发挥探测器性能水平, 降低探测信号传输到前置放大器过程的噪声干扰, 提高探测信号的信噪比, 要求实现探测器和前置放大器一同封装, 即前置放大器在低温环境也能正常工作。

红外探测器阵列与读出电路通过钽柱进行“倒装”连接, 探测器的阵列元与读出电路单元中的每一个前置放大元相对应。由于一般的焦平面器件的探测器用的材料和读出电路所用材料不同, 所以要考虑让探测器的单元和读出电路单元准

确互连和热匹配,还要考虑适当的输入电路以解决探测器和多路传输器电路匹配问题,使电路信号有效地读出,输入级电路是信号有效读出的关键<sup>[12,16]</sup>。

因此,CMOS 器件与电路的深低温工作特性的研究和模型参数的确立、深低温红外焦平面读出电路的设计研究,对于甚长波红外焦平面器件的研制是十分必要的<sup>[16,30]</sup>。

目前 CMOS 集成电路制造厂商通常只提供 CMOS 器件的室温仿真模型。实验表明,根据室温模型设计的 CMOS 读出电路在温度降低到 35 K 深低温以下时,读出电路会出现大的性能偏差,甚至完全失效<sup>[6]</sup>。国外一般通过建立专门的读出电路 CMOS 工艺来满足深低温读出电路的需求,用来防止载流子冻析效应引起的一些异常现象,确保电路能够在深低温下工作<sup>[24,32]</sup>。

因此分析和研究深低温下 MOS 器件的工作特性和参数变化,建立 CMOS 器件的深低温 SPICE 模型,研究读出电路在低温下的工作特性,设计出适合于在低温下工作的读出电路,对于甚长波红外量子阱、HgCdTe 焦平面等研究也有着十分重要的现实意义<sup>[12,15]</sup>。

对国内外低温 CMOS 电路发展以及 CMOS 模型参数的研究进展进行了分析小结。最近几十年,CMOS 特征尺寸随着集成电路技术的发展,遵循着摩尔定律不断的缩小,温度对 CMOS 参数的影响逐渐变大。如前述的其中一部分参数性能得到提升,另外一部分参数变化影响了电路正常运行。伴随着红外技术的发展,CMOS 技术应用到深低温环境下越来越迫切。使得 CMOS 的低温特性研究越来越必要,CMOS 深低温电路的研究逐渐成为热点<sup>[24]</sup>。美国在这方面开展的比较早,研究的比较深入。发射了很多红外天文卫星,应用到了深低温读出电路技术。Rockwell 公司针对深低温读出电路,对常温 CMOS 工艺和结构进行了研究和改造,使之能工作在 10 K 以下的深低温中<sup>[24]</sup>。图 5.6 展示了改进工艺后 NMOS 的深低温伏安特性曲线。

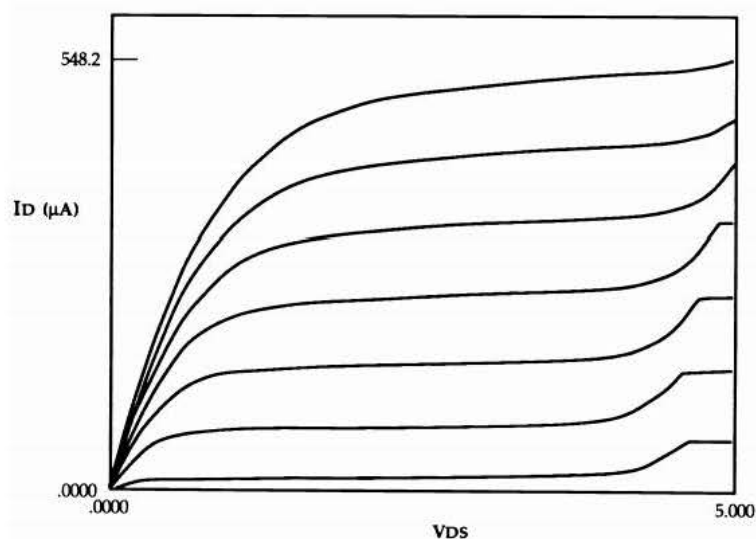


图 5.6 深低温下改进工艺后 NMOS 伏安特性曲线<sup>[24]</sup>

Figure 5.6 I-V Characteristics of cryogenic NMOS at cryogenic temperature<sup>[24]</sup>

目前, 深低温 CMOS 研究领域主要在液氮低温 (77 K) 附近, 液氦温度 (4.2 K) 相关研究文献报道较少。

电路的仿真和应用必要有精准的 SPICE 模型, BSIM3V3 模型是应用比较广泛的一种<sup>[61-64]</sup>。国外已经文献报道的能够建立精确 BSIM3V3 或类似 SPICE 模型的主要有:

(1) 法国 P.Martin, M.Bucher 和 C.Enz 在 2002 年研究和建立了液氮温度 (77 K) 下的 SPICE 模型, 增加了其他参数, 能够较好地模拟液氮温度下 CMOS 的特性, 并且将其运用到了红外焦平面读出电路<sup>[65,66]</sup>。

(2) 日本横滨大学的 N. Yoshikawa 等测量了液氦温度 (4 K) 下 CMOS 的伏安特性及电容特性, 调整了 BSIM3 模型的几个参数数据, 获得了温度为 4 K 模型, 并将其运用到了数字电路的设计中, 检验了这个模型的有效性和正确性<sup>[67]</sup>, NMOS 的 BSIM3 模型和实际测量对比如图 5.7 所示。由图可以看出, 建立的 BSIM 模型很好地模拟了 NMOS 深低温下的性质。

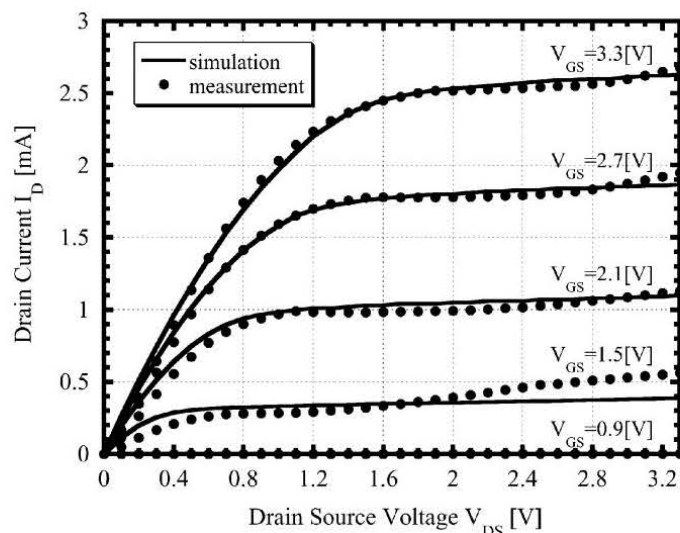


图 5.7 BSIM3 模型和实际测量结果对比<sup>[67]</sup>

Figure 5.7 I-V characteristics of NMOS device and BSIM3 device model<sup>[67]</sup>

目前国内对深低温 CMOS 电路模型设计 and 应用方面很是匮乏。由于应用范围的限制，国内工艺厂商没有研制相关的深低温模型。早期报道的一些结果只做了测试和一些定性分析，离实际应用需要的有效精确的模型还差很远<sup>[16]</sup>。随着红外探测技术的发展，国内对低温 CMOS 模型研究也越来越深入：

(1)东南大学在 90 年代研究了 CMOS 器件的低温物理特性及其互联特性。分析了 CMOS 在低温下冻析效应引起的低温迁移速率和漂移速度变化，以及它们对 CMOS 电路设计带来的影响<sup>[68,69]</sup>。

(2)南京大学的电子工程系，通过测量低温特性，修改了 CMOS BSIM3 模型的参数，建立了低温 BSIM3 模型，设计环形振荡器进行了验证<sup>[70,71]</sup>。

(3)中国科学院上海技术物理研究所通过流片测量建立了无锡上华（CSMC）0.6 微米工艺低温 BSIM3v3 模型。通过测量和仿真，并通过检验对深低温影响较大的环形振荡器、运放和 CTIA 电路等，证明建立模型能在 77 K、35 K 下进行仿真。并且总结了低温集成电路设计注意要点，可以在各种低温集成电路的研制中拓展<sup>[16,56]</sup>。

(4)天津大学通过修改 Chartered (GF) 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺参数，建立了能适用于低温仿真的 MOS 晶体管模型。通过理论分析与低温测试 CMOS，深入研究分析低温对 CMOS 主要参数的影响核对数字、模拟电路性能的影响以及在低温 CMOS 特性分析基础上建立了能用于 80 K 和 130 K 的低温电路仿真的 CMOS 修正模型。结合低温模型建立了可用于 80 K~300 K 的超宽温度范围工作的低功耗

耗读出电路<sup>[72,73]</sup>。

为了探究 CMOS 器件在深低温下的特性,测量了深低温下分立和集成 NMOS 管的一些电学性质。通过测量 NMOS 在 5 K 和 300 K 下测得的伏安特性曲线。通过对比和计算,结合其他的一些数据可得下图:

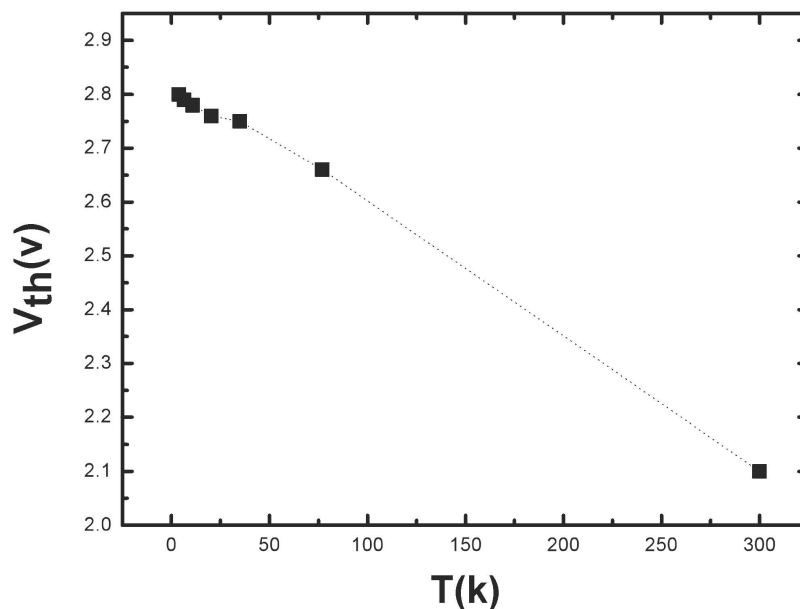


图 5.8 阈值电压随温度变化

Figure 5.8 The threshold voltage varies with temperature

阈值电压方面测量了 NMOS 在温度为 300 K、77 K、35 K、20 K、15 K、10 K 和 5 K 环境下阈值电压的数据,由各个温度测量伏安特性曲线计算得到。从图 5.8 可以看到,阈值电压随着温度的下降出现上升,从温度为 300 K 的 2.1 V 变化到温度为 5 K 的 2.8 V,计算得到的点基本在一条线上,阈值电压与温度之间的关系接近于线性变化。

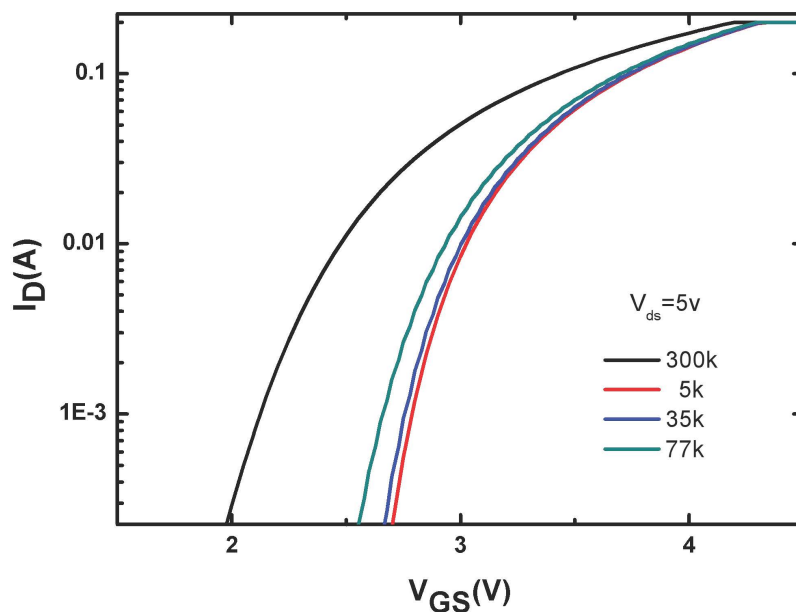


图 5.9 NMOS 器件亚阈值特性

Figure 5.9 Subthreshold characteristics of NMOS devices

由图可知，随着温度降低，器件的亚阈值斜率增大，器件性能得到改善。这一点对于器件尺寸减小，器件需要降低工作电压，而且要保障一定速率需要降低阈值电压非常有益。

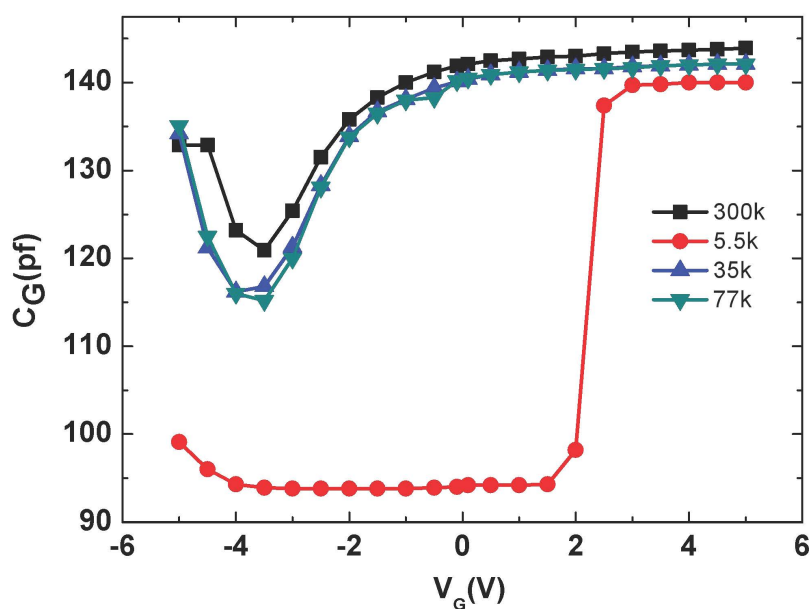


图 5.10 不同温度栅电容和栅电压变化关系

Figure 5.10 Relationship between gate capacitance and gate voltage at different temperatures

CMOS 电路中电容对读出电路高频应用有着重要的影响，也要考虑电容随温度的变化关系。图 5.10 为测量的栅极电容随温度的变化关系。栅电容  $C_G$  包括栅

和沟道之间的氧化层电容、衬底和沟道之间的耗尽层电容和多晶硅栅与源漏交叠而产生的电容，偏压  $V_G$  为栅和衬底之间的电压，测量栅压时将衬底和源端、漏端接在一起。由图 5.10 可以看出，当温度从 300 K 降低到 77 K 或 35 K 时，栅电容变化不大。继续降低温度到 5.5 K 时，栅电容变化比较明显，这也是文献很少报道的。对于研究 10 K 以下深低温读出电路需要考虑和注意的问题。电容出现明显变化是因为载流子冻析效应在深低温下变得越来越显著。

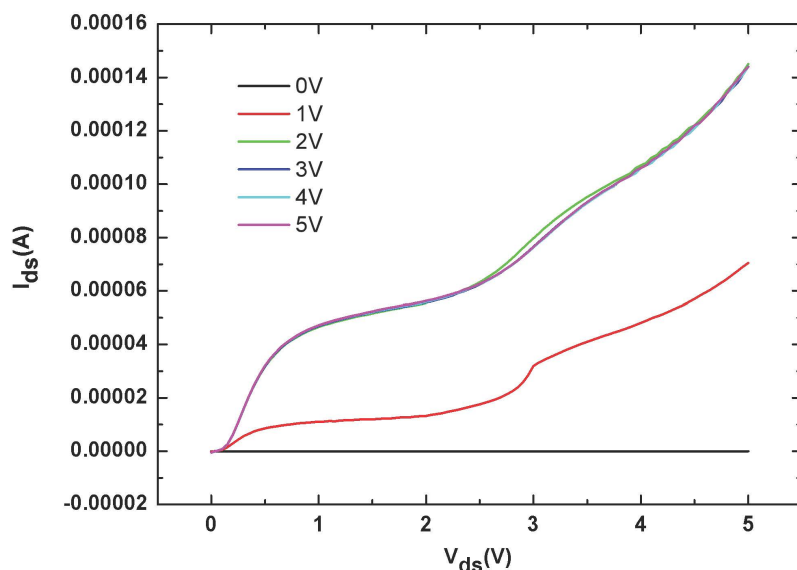


图 5.11 温度 5 K 的 NMOS 伏安特性曲线

Figure 5.11 I-V characteristics of NMOS at 5 K

为了进一步了解 MOS 器件在深低温下的性质，测试了 CSMC 0.6  $\mu\text{m}$  工艺 NMOS 和 PMOS 管的在 5 K 温度下的性质。由图 5.11 可知，深低温下 NMOS 呈现出明显的 Kink 效应；加偏压时，容易饱和。这种工艺 CMOS 器件很难直接应用在深低温下。

由于 PMOS 的 Kink 效应不明显<sup>[74]</sup>，而且 Kink 效应与沟道长  $L$  度有关<sup>[26]</sup>。总结了已下克服 Kink 效应的办法<sup>[16]</sup>：使用 PMOS 代替 NMOS，如 PMOS 源跟随器；使用短沟道 NMOS；在 NMOS 的四周做一圈衬底或者阱的接触<sup>[75]</sup>，用来收集空穴以达到阻止衬底电势的升高的目的。

根据以上经验和结论，选用了 GF0.18  $\mu\text{m}$  的工艺，最小沟道长度是 0.18  $\mu\text{m}$  的短沟道器件；设计了全部 PMOS 的标准“3T”结构；由于读出电路中不仅有 CMOS 器件，还有电容、电阻等器件，为进一步验证低温下 CMOS、电容和电阻的特性，以及运算放大器在深低温下的性质，应用 GF0.18  $\mu\text{m}$  工艺，设计了包

含上述结构的芯片。芯片的整体版图如下所示。

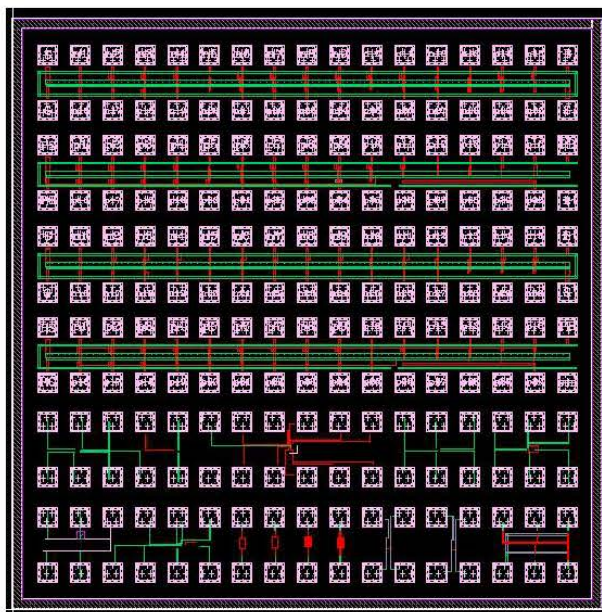


图 5.12 芯片整体版图

Figure 5.12 Overall layout of the chip

最上面两排分别是最小沟道长度为  $0.18\ \mu\text{m}$  的 NMOS 和 PMOS，设计了一系列不同宽长尺寸的 NMOS 和 PMOS。在深低温下测量后，可以提取不同的器件参数，建立 NMOS 和 PMOS 在深低温下的模型，用于后续的运放设计。中间两排是最小结构尺寸为  $0.35\ \mu\text{m}$  的不同宽长的 NMOS 和 PMOS，和最上面两排形成对比，研究小沟道器件或者最小尺寸变化对低温性质的影响。最下面两排设计了电阻、电容、标准“3T”结构和运算放大器等结构。

芯片经过 MPW 流片后，封装后测试了 300 K 和 77 K 下的性质，伏安特性曲线如图 5.13 所示，从图上可以看出 300 K 和 77 K 伏安特性曲线基本一致，77 K 时没有出现明显的 Kink 效应，但是相同栅压 77 K 时的电流相对 300 K 较大，说明阈值电压等发生了变化。

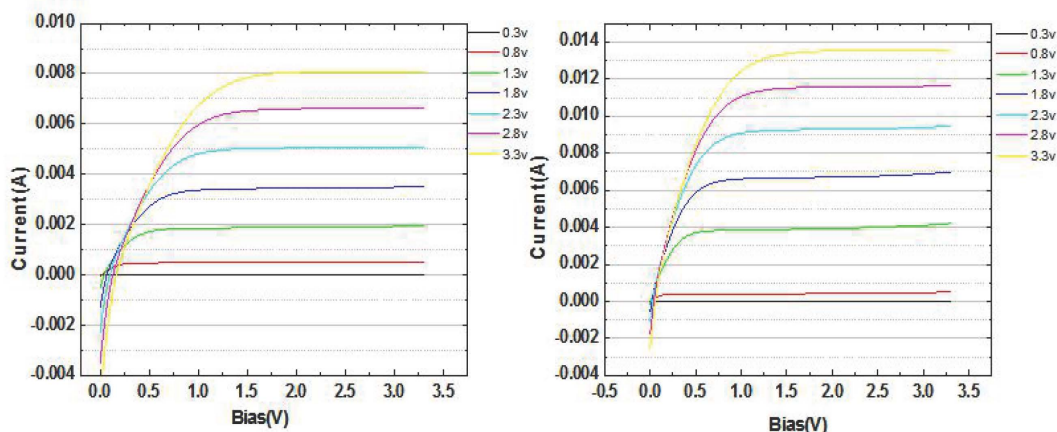


图 5.13 NMOS 300 K 和 77 K 不同偏压伏安特性曲线

Figure 5.13 I-V characteristics of NMOS at 300 K and 77 K

选择偏压为 3.3 V 时, 300 K 和 77 K 伏安特性曲线对比如图 5.14 所示:

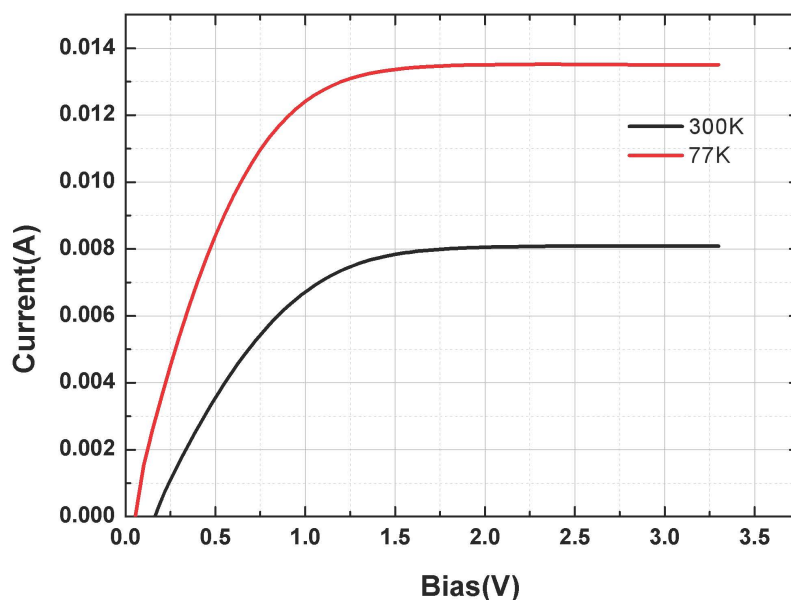


图 5.14 栅压 3.3 V 时 NMOS 300 K 和 77 K 伏安特性

Figure 5.14 I-V characteristics of NMOS at 300 K and 77 K at bias of 3.3 v

由图 5.14 可以看出, 77 K 时 NMOS 没有出现明显的 Kink 效应, 修改 CMOS 器件模型参数就可以在 77 K 环境下应用。BIB 探测器工作的深低温 CMOS 特性有待进一步了解。

当温度小于 40 K 时, CMOS 器件性能和理想状态可能出现很大偏差, 很难建立 CMOS 器件的低温模型<sup>[24]</sup>。因此, 最方便直接的办法是建立低温 CMOS 工艺, 通过改变结构和工艺参数使 CMOS 适用于深低温条件下。这样不仅模型参数更加精确, 便于读出电路的设计, 而且读出电路的性能会更好。

#### 5.4 本章小结

本章先说明了深低温电路的重要性,比较了 CCD 和 CMOS 电路各自的优缺点,CMOS 读出电路更适合 BIB 探测器深低温电路发展。列举了深低温下 CMOS 出现的一些异常现象并说明其出现的原因。BIB 探测器运算放大器不在深低温下工作时,可以通过 PMOS 将探测器信号传输出来,再在常温下放大处理。可以实现 BIB 探测器信号读出,但是读出噪声偏大。运算放大器工作在深低温下,需要低温工艺和低温 CMOS 模型。总结了国内外低温 CMOS 模型建立的情况,最后通过总结 CMOS 低温电路设计经验,设计了一套研究低温电路的方案,并流片了低温运算放大器电路涉及的一些基本结构,测试了部分电路的深低温特性,为下一步深低温读出电路和焦平面发展打下基础。

## 参考文献

- [1] Rogalski, A. Semiconductor detectors and focal plane arrays for far-infrared imaging[J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(4):406-426.
- [2] 汤定元. 光电器件概论. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [3] Mills R, Edwards J, Beuville E, et al. High-performance large format impurity band conductor focal plane arrays for astronomy applications[C]//Detectors and Imaging Devices: Infrared, Focal Plane, Single Photon. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7780: 778003.
- [4] 沈学础. 半导体光谱和光学性质. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] 廖开升, 刘希辉, 黄亮, et al. 天文用阻挡杂质带红外探测器[J]. 中国科学:物理学力学天文学, 2014(4):360-367.
- [6] 袁继俊. 红外探测器发展述评[J]. 激光与红外, 2006, 36(12):1099-1102.
- [7] Erick T Y. Space infrared detectors from IRAS to SIRTf. SPIE, 1993,
- [8] Li X Y, Yao S Y, Zhao Y Q. CMOS readout circuit with new background suppression technique for room-temperature infrared FPA applications[J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 2010, 29(6): 1027-1040.
- [9] 陈长水, 刘荣挺, 刘颂豪. 红外探测器的最新进展[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(1)
- [10] Yang G, Sun C, Shaw T, et al. High dynamic range low-noise focal plane readout for VLWIR applications implemented with current mode background subtraction[C]//Infrared Readout Electronics IV. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3360: 42-51.
- [11] 李辉, 王子兵. 国外背景限红外探测系统的发展[J]. 红外与激光技术, 1993(5):33-40.
- [12] 赵毅强, 孙淑云, 周航宇, et al. 红外探测器专用前置放大电路低温特性的研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4).
- [13] 孙志君. 红外焦平面阵列技术的发展现状[J]. 半导体光电, 2000, 21(z1).
- [14] 刘莉萍. 红外焦平面读出电路技术及发展趋势[J]. 激光与红外, 2007, 37(7):598-600.
- [15] 方丹. 红外焦平面阵列读出电路技术分析[J]. 红外技术, 2004, 26(2):23-28.
- [16] 刘文永, 冯琪, 丁瑞军. Kink 效应对低温 CMOS 读出电路的影响[J]. 激光与红外, 2007, 37(B09): 990-992.
- [17] Erick T Y. Space infrared detectors from IRAS to SIRTf. SPIE, 1993, 2019: 96ed wi
- [18] Stetson S B, Reynolds D B, Stapelbroek M G, et al. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays. Proc SPIE, 1986, 686: 48-65.

- [19] Hogue H H, Guptill M T, Monson J C, et al. Far-infrared blocked impurity band detector development[C] Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2007: 667809-667809-11.
- [20] Haller, E. E., and J. W. Beeman. Far infrared photoconductors: recent advances and future prospects. Far-IR, Sub-mm & MM Detector Technology Workshop, Monterey. 2002.
- [21] Low, Frank J. Unfulfilled needs in IR astronomy focal-plane readout electronics , Infrared readout electronics; Proceedings of the Meeting, Orlando, FL, Apr. 21, 22, 1992 (A93-53076 23-33), p. 168-174.
- [22] Ko J S. Structure of charged coupled device: U.S. Patent 5,321,204[P]. 1994-6-14.
- [23] Baker W D. Charge-coupled devices[M]. Berlin: Springer, 1980.
- [24] Glidden R M, Lizotte S C, Cable J S, et al. Optimization of cryogenic CMOS processes for sub-10-kelvin applications[C]//Infrared Readout Electronics. International Society for Optics and Photonics, 1992, 1684: 2-39.
- [25] Hafez I M, Ghibaud G, Balestra F. Analysis of the kink effect in MOS transistors[J]. IEEE transactions on electron devices, 1990, 37(3): 818-821.
- [26] Colinge J P. Reduction of kink effect in thin-film SOI MOSFETs[J]. IEEE Electron Device Letters, 1988, 9(2): 97-99.
- [27] Dierickx B, Simoen E, Vermeiren J, et al. Operation of majority and minority carrier MOSFET's at liquid helium temperature[C]//ESSDERC'88: 18th European Solid State Device Research Conference. IEEE, 1988: c4-741-c4-744.
- [28] Broadbent S. Operation of CMOS devices at 10 Kelvin[C]//Proc Symposium on Low Temperature Electronics and High Temperature Superconductors. The Electrochemical Society Inc Pennington, NJ, USA, 1988: 170-176.
- [29] Simoen E, Dierickx B, Claeys C. Analytical model for the kink in nMOSTs operating at Liquid Helium Temperatures (LHT)[J]. Solid-state electronics, 1990, 33(4): 445-454. Bock N E.
- [30] 袁红辉, 陈永平, 陈世军, 等. 亚微米 CMOS 低温特性与物理建模[J]. 低温物理学报, 2013, 35(4): 268-272.
- [31] 刘卫东, 魏同立, 李焱. 低温 CMOS-器件物理和互连特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 1995 (A04): 64-72.
- [32] Silicon cryogenic MOST[J]. Solid State Electronics, 1995, 4(38): 931-932.
- [33] Bock N E, Cherepov E I. Cryogenic MOST for focal plane readout electronics[C]//Infrared Readout Electronics IV. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3360: 122-127.
- [34] Stetson S B, Reynolds D B, Stapelbroek M G, et al. Design and performance of blocked-impurity-band detector focal plane arrays[C]//Infrared Detectors, Sensors, and Focal Plane Arrays. International Society for Optics and Photonics, 1986, 686: 48-65.
- [35] Akturk A, Peckerar M, Dornajafi M, et al. Impact ionization and freeze-out model for simulation of low gate bias kink effect in SOI-MOSFETs operating at liquid He

- temperature[C]//2009 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices. IEEE, 2009: 1-4.
- [36] Sobelman G E, Fant K. CMOS circuit design of threshold gates with hysteresis[C]//ISCAS'98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (Cat. No. 98CH36187). IEEE, 1998, 2: 61-64.
- [37] Katyal V, Geiger R L, Chen D J. Adjustable hysteresis CMOS Schmitt triggers[C]//2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. IEEE, 2008: 1938-1941.
- [38] DeWeerth S P, Morris T G. CMOS current mode winner-take-all circuit with distributed hysteresis[J]. Electronics Letters, 1995, 31(13): 1051-1053.
- [39] Woo A K. CMOS power-on reset circuit using hysteresis: U.S. Patent 5,534,804[P]. 1996-7-9.
- [40] Huang Z, Kurokawa A, Hashimoto M, et al. Modeling the overshooting effect for CMOS inverter delay analysis in nanometer technologies[J]. IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems, 2010, 29(2): 250-260.
- [41] Ge L, Fossum J G, Liu B. Physical compact modeling and analysis of velocity overshoot in extremely scaled CMOS devices and circuits[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(9): 2074-2080.
- [42] Chen J, Fang P, Ko P K, et al. Noise overshoot at drain current kink in SOI MOSFET[C]//1990 IEEE SOS/SOI Technology Conference. Proceedings. IEEE, 1990: 40-41.
- [43] Gregory B L, Shafer B D. Latch-up in CMOS integrated circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1973, 20(6): 293-299.
- [44] Ochoa A, Dawes W, Estreich D. Latch-up control in CMOS integrated circuits[J]. IEEE transactions on nuclear science, 1979, 26(6): 5065-5068.
- [45] Hu G J. A better understanding of CMOS latch-up[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, 31(1): 62-67.
- [46] Deferm L, Simoen E, Dierickx B, et al. Anomalous latch-up behaviour of CMOS at liquid helium temperatures[J]. Cryogenics, 1990, 30(12): 1051-1055.
- [47] Selberherr, S., MOS Device Modeling at 77K, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 36, no.8, August 1989, pp. 1464-1474.
- [48] Kalonia, K. S. and F. C. Jam, An Analytical Two-Dimensional Model for CMOS Devices at Room and Cryogenic Temperatures, Solid-State Electronics, vol. 33, no. 7, July 1990, pp. 947-951. Huang, C-L. and G. S. Goldenblat, Engineering Model of MOS Transistors for the 60-300K Temperature Range, Electronics Letters, vol. 26, no. 6, 15th March 1990, pp. 365-367.
- [49] Jeon, D. S. and D. E. Burk, MOSFET Electron Inversion Layer Mobilities-A Physically Based Semi-Empirical Model for a Wide Temperature Range, IEEE Transactions on Electron Devices, vol.36, no. 8, August 1989, pp. 1456-1463.

- [50] Fox, R. M. and R. C. Jaeger, MOSFET Behavior and Circuit Considerations for Analog Applications at 77K, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 34, no. 1, January 1987, pp. 114-123.
- [51] Tewksbury, S. K., Transient Response of n-Channel Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors During Turnon at 10-25 K, Journal of Applied Physics, vol. 53, no. 5, May 1982, pp. 3865-3872.
- [52] Bock N E , Cherepov E I , Pain B , et al. SPIE Proceedings [SPIE Aerospace/Defense Sensing and Controls - Orlando, FL (Monday 13 April 1998)] Infrared Readout Electronics IV - [C]// 1998:122-127.
- [53] Hairapetian, A., D. Gitlin, and C. R. Viswanathan, Low-Temperature Mobility Measurements on CMOS Devices, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 36, no. 8, August 1989, pp. 1448-1455.
- [54] Pires, R. C., R. M. Dickstein, S. L. Titcomb, and R. L. Anderson, Carrier Freezeout in Silicon, Cryogenics, vol. 30, December 1990, pp. 1064-1068.
- [55] Rais K, Hafez L M, Emrani A, et al. Physical Properties of Silicon CMOS Devices Operated between Liquid Helium and Room Temperature[C]//Solid State Device Research Conference, 1993. ESSDERC'93. 23rd European. IEEE, 1993: 193-196.
- [56] 刘文永, 丁瑞军, 冯琪, 等. 35K CMOS 器件 LDD 结构的 SPICE 宏模型[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(6): 465-469.
- [57] Razavi B. Design of analog CMOS integrated circuits[M]. 清华大学出版社有限公司, 2005.
- [58] Tezcan D S , Putzeys J , Munck K D , et al. Development of a Si:As blocked impurity band detector for far
- [59] Ives D, Finger G, Jakob G, et al. AQUARIUS: the next generation mid-IR detector for ground-based astronomy[C]//High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8453: 845312.
- [60] 袁红辉, 陈永平. 一种长波红外光导探测器 CMOS 电路设计, Infrared and Laser Engineering Vol. 43 No. 3.
- [61] Fox R M, Jaeger R C. MOSFET behavior and circuit considerations for analog applications at 77 K[J]. Electron Devices, IEEE Transactions on, 1987, 34(1): 114-123.
- [62] Sheu B J, Scharfetter D L, Ko P K, et al. BSIM: Berkeley short-channel IGFET model for MOS transistors[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1987, 22(4): 558-566.
- [63] Cheng Y, Chan M, Hui K, et al. BSIM3v3 manual[J]. University of California, 1995, 1996.
- [64] Cheng Y, Jeng M C, Liu Z, et al. A physical and scalable IV model in BSIM3v3 for analog/digital circuit simulation[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1997, 44(2): 277-287.
- [65] P. Castelein, P. Audebert and P. Martin. IRFPA advanced behavioral modeling dedicated to optronic systems evaluations. SPIE, Vol. 4369, pp. 600-609, 2001.

- [66] P. Martin, M. Bucher and C. Enz. MOSFET modeling and parameter extraction for low temperature analog circuit design. *Journal de Physique IV*, Vol. 12, pp. 3.51-3.56, 2002.
- [67] N. Yoshikawa, T. Tomida, M. Tokuda, Q. Liu, X. Meng, S. R. Whiteley and T. Van Duzer. Characterization of 4K CMOS devices and circuits for hybrid Josephson-CMOS systems. *IEEE Transactions on applied superconductivity*, Vol. 15, no. 2, pp. 267-271, June 2005.
- [68] Feng Y, Zhou P, Liu H, et al. Characterization and modelling of MOSFET operating at cryogenic temperature for hybrid superconductor-CMOS circuits[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2004, 19(12):1381-1385.
- [69] 刘卫东, 魏同立, 李焱. 低温 CMOS 器件物理和互连特性[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 1995, 25(4):64-72.
- [70] 吴金. 硅低温 CMOS/BiCMOS 门电路的分析与设计[D]. 1996.
- [71] 周鹏, 冯一军. CMOS 电路低温特性及其仿真. *低温物理学报*, Vol. 27, pp. 331-336, Nov. 2005.
- [72] Hongliang Z, Yiqiang Z, Zhisheng Z. A cryogenic SAR ADC for infrared readout circuits[J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, 32(11): 115015.
- [73] Zhao H, Liu X, Xu C. A low power cryogenic 512c SAR ADC for infrared readout circuits[J]. *Journal of Semiconductors*, 2011, 32(11): 115015.
- [74] Hanamura H, Aoki M, Masuhara T, et al. Operation of bulk CMOS devices at very low temperatures[J]. *IEEE journal of solid-state circuits*, 1986, 21(3): 484-490.
- [75] Kleine U, Bieger J, Seifert H. A low-noise CMOS preamplifier operating at 4.2 K[J]. *IEEE journal of solid-state circuits*, 1994, 29(8): 921-926.



## 第六章 总结与展望

### 6.1 本论文的工作总结

本论文围绕阻挡杂质带 (BIB) 红外探测器, 主旨为提高 BIB 探测器性能, 做了一系列工作, 在工艺优化、探测器减反以及深低温读出电路探究等方面有了以下初步结果:

1. 利用优化离子注入 BIB 探测器工艺, 加工生产了离子注入型的 Si:P 和 Si:As BIB 探测器。Si:P BIB 探测器工作温度为 5 K 时, 工作偏压范围内 (-2.3V~2.3V), 器件暗电流小于  $1.1 \times 10^{-11}$  A, 器件工作偏压为 -2.3 V 时, 800 K 黑体, 斩波频率为 277 Hz 时黑体响应率为 4.6 A/W, 黑体探测率为  $4.9 \times 10^{13}$   $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。探测器响应波长为 2~35  $\mu\text{m}$ , 峰值波长为 27.3  $\mu\text{m}$ , g 因子数值为 17.5。Si:As BIB 探测器工作温度 5 K 的响应波段为 2~37  $\mu\text{m}$ , 探测器的暗电流在工作偏范围内小于  $10^{-10}$  A, 工作偏压 -3.8 V 时, 探测器峰值波长 23.8  $\mu\text{m}$ , 器件的 800 K 黑体斩波频率为 277 Hz 的黑体响应率为 3.7 A/W, 工作偏压为 3.2 V 时, 探测率为  $5.2 \times 10^{13}$   $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。优化后离子注入 BIB 探测器工艺与 CMOS 工艺兼容, 可以利用 CMOS 工艺加工生产离子注入型 BIB 探测器, 可以将 BIB 探测器和 CMOS 读出电路集成到一块芯片上, 减少读出电路噪声。利用 CMOS 工艺加工离子注入型 BIB 探测器, 可以促进 BIB 探测器的标准化生产降低成本, 同时探测器和读出电路集成一起也可以提高成像性能。
2. 针对外延 BIB 探测器反射率比较高吸收不足的问题, 设计了外延 BIB 探测器各层参数和结构, 并做了陪片。通过傅里叶红外光谱仪测得透反射数据, 应用光学模型拟合了不同掺杂浓度外延硅的光学参数。经过分析选择类光栅双层超表面结构减反, 利用计算机模型仿真和优化了结构尺寸。通过微纳加工在外延硅表面实现了减反结构。测量发现: 加了偏振片的外延 BIB 探测器结构对 25~30  $\mu\text{m}$  波段实现了明显的减反效果, 最小反射率小于 3%, 基本没有透射, 并且减反效果对入射角度不敏感。实现了减反射增吸收的效果,

提高了 BIB 探测器性能。类光栅双层超表面结构还能获得偏振信息，符合第四代焦平面获取偏振信息的发展趋势。

3. 分析了 CMOS 读出电路深低温时遇到的问题，分析两种解决方法的利弊：运放不在深低温工作时可以用 PMOS 实现读出，再在常温下进行放大处理；运放在深低温工作时，要改善工艺还要获取深低温 MOS 模型参数。测量了无锡上华 0.6  $\mu\text{m}$  工艺在 5 K、77 K 下 MOS 管的性质，5 K 时 Kink 效应比较严重。利用 GF 0.18  $\mu\text{m}$  工艺设计不同尺寸 MOS 管、电阻、电容、“3T”结构和运算放大器等结构，测量了部分电路深低温下的性质，为 BIB 探测器读出电路和焦平面发展做了进一步探索。

## 6.2 不足与展望

### 6.2.1 本工作中的不足

虽然针对 BIB 探测器增强性能方面做了一系列工作，取得了一些成果，但仍然还有一些问题没有得到充分研究，具体如下：

1. BIB 探测器测试方面，噪声没有很好表征。深低温下 BIB 探测器噪声构成比较复杂，通过更精密的仪器不同条件下测量可以分析出 BIB 探测器噪声构成，从机理上解降低 BIB 探测器噪声。
2. BIB 探测器减反方面，二维孔状结构使反射率下降 5%左右，但是还不是最优，需要进一步优化设计。双层超表面减反结构加了偏振片获得很好的减反效果，并且获得偏振信息，但是加偏振片有能量损失。
3. 读出电路方面，虽然可以利用先读出再放大能实现 BIB 探测器信号读出。但是由于无法改动商用常温 CMOS 工艺结构尺寸等，深低温下 NMOS 还会出现载流子冻析效应引起的 Kink 等效应。

### 6.2.2 展望

除了上述问题以外，国内 BIB 探测器成像研究距国外已经研制出的高性能成像的红外焦平面还有很长的路要走。下面是我们已经展开或者以后可以展开进行研究的一些内容：

1. 双色或者多色 BIB 探测器：硅基 BIB 探测器可以通过注入不同离子，实现对不同波长的吸收。之前我们进行过 Si:Mg 和 Si:P 双色 BIB 方面的研究，也可以加入更多注入离子实现双色或者多色 BIB 探测器。
2. 探测器减反方面，不加偏振片情况下对远红外 BIB 探测器减反做进一步优化，将硅基 BIB 探测器减反拓展到锗基和砷化镓基 BIB 探测器中。
3. 研究焦平面工艺，缩小现有探测器尺寸：我们已经设计了一系列不同尺寸 BIB 探测器的掩膜版，优化工艺可以缩小现有结构尺寸，更加满足焦平面的需求。
4. 读出电路方面：先利用我们流片出的探测器和 CMOS 读出电路结构实现 BIB 探测器的信号先读出再放大模式读出，分析这种模式读出电路性能。利用低温理论指导和改进常温 CMOS 结构尺寸，使改进后的 CMOS 克服低温下一系列异常现象，实现深低温运算放大器。



## 作者简介及在学期间发表的学术论文及研究成果

### 作者简介:

1989年5月出生于安徽芜湖。

2008年9月——2012年7月,在河北工业大学理学院获得学士学位。

2012年9月——2020年7月,在中国科学院上海技术物理研究所攻读博士学位。

### 已发表的学术论文:

- [1] **王超**, 李宁, 戴宁, 石旺舟, 胡古今. 离子注入型硅掺砷阻挡杂质带长波红外探测器的研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(3):290-294.
- [2] **王超**, 姚尧, 文政绩, 郝加明, 胡古今, 戴宁. 外延阻挡杂质带探测器抗反射研究 [J]. 红外与毫米波学报. (已接受)
- [3] He Zhu, **Chao Wang**, Peng Wang, Jiale He, Weida Hu. Optimized Si-based blocked impurity band detector under alternative operational mode[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, PP(99):1-5.
- [4] Kaisheng Liao , Ning Li, **Chao Wang**, Liang Li, Jie Wen, M.Y. Li , Han Wang, Xiaohao Zhou, Zhifeng Li , Wei Lu. Extended mode in blocked impurity band detectors for terahertz radiation detection[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(14):143501.
- [5] 廖开升, 李志锋, **王超**, 周孝好, 李宁, 戴宁. 用于远红外探测的Si:P阻挡杂质带红外探测器研制 [J]. 红外与毫米波学, 2016, 35(1):37-41.
- [6] 廖开升, 李志锋, 李梁, **王超**, 周孝好, 戴宁, 李宁. 阻挡杂质带红外探测器中的界面势垒效应[J]. 物理学报, 2015, v. 64(22):370-376.
- [7] Yucong Liu, Jiadong Chen, **Chao Wang**, Huiyong Deng, Da-Ming Zhu, Gujin Hu, Xiaoshuang Chen, Ning Dai. Bulk photovoltaic effect at infrared wavelength in strained Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> films[J]. Applied Physics Letters: Material, 2016, 4(12):126104.
- [8] Shimin Li, Gujin Hu, **Chao Wang**, Wenchao Zhao, Guohong Ma, Xiaoshuang Chen, Junhao Chu, Ning Dai. PbZr<sub>0.4</sub>Ti<sub>0.6</sub>O<sub>3</sub> dielectric reflectors with large photonic band gap and high average optical reflectivity[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017, 100(4): 1275-1279.

- [9] Shimin Li, Guohong Ma, **Wang Chao**, Wenchao Zhao, Xiaoshuang Chen, Junhao Chu, Ning Dai, Wangzhou Shi, Gujin Hu. Electrical and optical properties of a kind of ferroelectric oxide films comprising of  $\text{PbZr}_{0.4}\text{Ti}_{0.6}\text{O}_3$  stacks[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(2): 024102.
- [10] 王洋, 胡淑红, **王超**, 谢浩, 林虹宇, 孙艳, 戴宁, GaSb/GaAs 量子点红外探测器的液相外延生长及其光电性能的研究 [J]. 半导体光电.
- [11] Yang Wang, Shuhong Hu, Wei Zhou, Yan Sun, Bin Zhang, **Chao Wang** and Ning Dai, LPE growth and optical characteristics of  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$  epilayer [J]. Journal of Crystal Growth 2017, 463: 123–127.
- [12] Yang Wang, Shuhong Hu, Hao Xie, Hongyu Lin, Hongbo Lu, **Chao Wang**, Yan Sun and Ning Dai, Photoluminescence investigation of type-II GaSb/GaAs quantum dots grown by liquid phase epitaxy [J]. Infrared Physics & Technology 2018, 91: 68–71.