

分类号 \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号 \_\_\_\_\_

# 中国科学院研究生院 硕士学位论文

基于 SOI 材料的集成可调谐光衰减器的研究

韩晓峰

指导老师 博士生导师 吴亚明 研究员

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

申请学位级别 硕士 学科专业名称 微电子学与固体电子学

论文提交日期 2004 年 6 月 论文答辩日期 2004 年 6 月

培养单位 中国科学院上海微系统与信息技术研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 江晓清

# 基于 SOI 材料的集成可调谐光衰减器的研究

## 摘 要

可调谐光衰减器是光网络中最基本的光器件之一,本文提出了一种新型基于 SOI 材料的电注入的集成可调谐光衰减器,介绍了可调谐光衰减器的设计原理和器件结构,提出了器件的近似分析模型,分析和优化了影响器件衰减特性的结构和工艺参数,分析了器件的注入载流子分布、插入损耗和响应时间,介绍了器件的制作工艺,最后给出器件的测试结果。具体内容包括:

介绍了硅(SOI)材料的性质,分析了基于 SOI 材料实现可调谐光衰减器的技术方案的选择。直波导结构的可调谐光衰减器具有结构简单、插入损耗小、工艺容差大、有利于降低成本和提高成品率等优势,因此我们在设计中采用了直波导结构。

详细介绍了 PIN 结载流子注入理论,总结和分析了广泛应用的脊型波导横向 PIN 结构的性质,在此基础上提出了新型的双脊波导横向 PIN 结构。双脊波导横向 PIN 结构可以进一步增大载流子的注入面积,提高载流子的利用率。为了减小单模脊型波导和双脊波导的模式耦合损耗,根据模斑转换器的思想,在器件中设计了渐变双脊波导区。整个器件包含输入/输出波导、渐变双脊波导区和调制区三个部分。

通过近似处理,提出了双脊波导横向 PIN 结构的分析模型,并根据分析模型优化了影响可调谐光衰减器衰减特性的掺杂深度、掺杂浓度、本征区半长等参数,给出了优化后的参数值。分析了器件的注入载流子分布、插入损耗和响应时间。

给出了器件制作的完整的工艺流程,重点介绍了光刻、热扩散、刻蚀光波导、端面抛光等器件制作的关键工艺,并根据可调谐光衰减器制作的特殊要求确定了相应的工艺参数,最后给出器件的制作结果。

介绍了器件的电学特性、衰减特性、插入损耗、响应时间、偏振相关损耗等主要测试参数,给出了相应的测试结果,并对测试结果进行了分析。该可调谐光衰减器衰减量可达 20dB,对应最大功率约为 650mW,器件的芯片上插入损耗约为 4dB,响应时间小于 800 $\mu$ s,偏振相关损耗小于 0.4dB,可以通过改进设计和工艺进一步降低器件的电功耗和插入损耗。

关键词: 可调谐光衰减器 SOI PIN 结 双脊波导

# A novel integrated variable optical attenuator based on SOI material

Han Xiaofeng(micro electronics and solid-state electronics)

Directed by Professor Wu Yaming

## ABSTRACT

Variable optical attenuator is one of the most important optical devices in optical networks. In this thesis, a novel integrated VOA based on SOI material is proposed. We introduced the principle and framework of the device as well as the process methods. We put forward a model to approximately analyze and optimize the device. Finally, we presented the test result of the device.

The electro-optical effects in silicon and SOI material are introduced. We analyzed the methods to realized the VOA. VOA with straight waveguide structure has advantages such as simple structure, low insert loss, high tolerance, low cost and high yield. We used this structure to design our device.

After analyzed the characteristics of transverse PIN junction on rib waveguide, we put forward a new type transverse PIN junction which is formed on double-rib waveguide. The new structure can enlarge the injection area and accordingly enhance the efficiency of the charge carriers utilization. We designed tapered waveguides according to the tapered waveguide mode transformer to reduce the losses derive from the mode mismatching between the input/output waveguides and the modulator. The device contains three parts which are: the input/output waveguides, the tapered waveguides and the modulator.

We put forward a model to approximately analyze and optimize the device. We presented the optimized value of the parameters such as the thickness of the heavily doped regions, the doping concentration of the heavily doped regions and the half-length of the middle intrinsic region. We also analyzed the distribution of the carriers in intrinsic region, the insert loss and the response time of the device.

We introduced the main fabrication processes and predict the parameters in these processes according to the special request of the fabrication of the VOA. All of the processes and the final fabrication results are presented.

The test parameters and according test results are also presented and analyzed. The VOA can achieve up to 20dB attenuation with the highest power consumption of 650mW, The on-chip insert loss of the device is about 4dB. The response time of the device is less than 800  $\mu$  s, and the polarization dependent loss is no more than 0.4dB. we can reduce power consumption and the insert loss by improving the design and the processes.

**Key words:** VOA SOI material PIN junction double-rib waveguide

## 目 录

摘要.....	i
Abstract.....	ii
第一章 绪论.....	1
§1.1. VOA 在光波分复用(WDM)系统中的应用.....	1
1.1.1. WDM 系统介绍.....	1
1.1.2. WDM 系统中的通道间功率不均衡问题.....	2
1.1.3. 利用 VOA 实现光网络的功率均衡控制技术.....	3
1.1.4. VOA 应用的集成化和阵列化趋势.....	4
§1.2. VOA 的主要实现技术.....	6
1.2.1. 机械式光路阻挡的 VOA.....	6
1.2.2. 基于 MEMS 技术的 VOA.....	6
1.2.3. 基于集成光学技术的 VOA.....	8
1.2.4. 基于液晶技术的 VOA.....	11
1.2.5. 小结.....	12
§1.3. 硅集成光学技术.....	12
1.3.1 硅材料的性质.....	12
1.3.2. 基于 SOI 材料的硅集成光学技术.....	14
1.3.3. 基于 SOI 材料实现 VOA 的技术选择.....	15
§1.4. 本论文的研究工作和创新点.....	15
第二章 可调谐光衰减器的理论和设计优化.....	17
§2.1. PIN 结注入载流子的理论分析.....	17
§2.2. 可调谐光衰减器的设计.....	22
2.2.1. 脊型波导横向 PIN 结构分析.....	22
2.2.2. 双脊波导横向 PIN 结构.....	24
2.2.3. 整个器件的设计.....	25
§2.3. 可调谐光衰减器的性能分析和参数优化.....	26
2.3.1. 双脊波导横向 PIN 结构的近似分析模型.....	26
2.3.2. 可调谐光衰减器衰减特性的分析和参数优化.....	27

2.3.3. 注入载流子在本征区分布的分析.....	32
2.3.4. 可调谐光衰减器的插入损耗分析.....	32
2.3.5. 可调谐光衰减器的响应时间分析.....	34
§2.4. 本章小结.....	35
<b>第三章 可调谐光衰减器的制作.....</b>	<b>36</b>
§3.1. 可调谐光衰减器制作的工艺流程.....	36
§3.2. 可调谐光衰减器制作的关键工艺研究.....	39
3.2.1. 光刻工艺中的精细结构制作、台阶覆盖和套刻问题.....	39
3.2.2. 热扩散工艺.....	40
3.2.3. 干法刻蚀光波导.....	41
3.2.4. 波导端面抛光中的应力问题.....	42
§3.3. 可调谐光衰减器的制作结果.....	43
§3.4. 本章小结.....	45
<b>第四章 可调谐光衰减器的测试.....</b>	<b>46</b>
§4.1. 可调谐光衰减器的测试参数和测试结果.....	46
4.1.1. 器件的电学特性.....	46
4.1.2. 器件的衰减特性和插入损耗.....	46
4.1.3. 器件的响应时间.....	47
4.1.4. 器件的偏振相关损耗.....	48
§4.2. 测试结果的分析 and 工艺改进设想.....	49
4.2.1. 测试结果分析.....	49
4.2.2. 关于改进器件制作工艺和设计的几点想法.....	50
§4.2. 本章小结.....	50
<b>第五章 结论.....</b>	<b>51</b>
参考文献.....	52
作者简介.....	55
攻读硕士学位期间发表学术论文和申请专利.....	55
致谢.....	56

# 第一章 绪论

1970 年, 半导体激光器室温连续振荡的成功和低损耗光纤的实现拉开了光电子时代的序幕。目前, 主干信息通信网几乎全部都实现了光通信, 光网络作为信息化基础设施的基石, 已成为了信息化社会的神经中枢, 以发展光信息网络为目标的光电子产业的作用也变得越来越重要。在光纤通信的各种传输技术中, 波分复用 (WDM) 和密集波分复用 (DWDM) 技术是目前被广泛应用的主要传输技术。随着 WDM 系统的规模越来越大, 结构越来越复杂, 在系统中各个通道间进行功率均衡变得越来越重要, 从而带动了对可调谐光衰减器 (VOA) 的巨大需求。本章介绍 VOA 在 WDM 系统中实现通道间功率均衡的重要作用 and 目前报道的主要 VOA 实现技术, 最后介绍 Si (SOI) 材料的性质以及基于 SOI 材料实现 VOA 的技术选择。

## §1.1. VOA 在光波分复用 (WDM) 系统中的应用

### 1.1.1. WDM 系统介绍

以互联网 (Internet) 应用为代表的对信息传输带宽需求的快速增长对电信骨干网的传输容量提出了越来越高的需求, 为满足需求的增长, 人们可以铺设更多的光纤, 或靠提高单波长光信号的信息运载量, 但更主要的方法却是靠发展波分复用技术, 增加光纤的信道数。光波分复用 (WDM) 系统是将光纤的可用波段分成若干个小信道, 每个信道对应一个波长, 使单波长的传输变成多波长同时传输, 从而大大增加光纤的传输容量。图 1.1 所示是 WDM 系统的结构简图, 在发送端, 利用波分复用器 (MUX) 将不同波长的光载波合并起来并送入同一根光纤中; 在接收端, 再利用光波分解复用器 (DMUX) 将这些不同波长的光载波分开。

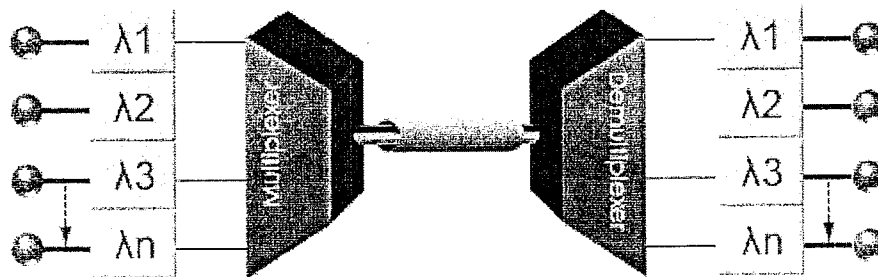


图 1.1 WDM 系统的结构简图

波分复用技术具有如下主要特点:

- 1) 可以充分利用光纤的巨大带宽资源, 使一根光纤的传输容量比单波长传输增加几倍、几十倍、甚至上百倍。WDM 技术可以充分利用 1300nm—1680nm 全波单模光纤的巨大带宽 (约 50THz) 来扩大传输容量。

- 2) 使 N 个波长复用起来在单模光纤中传输,在大容量长途传输时可以节约大量的光纤。另外,对于早期安装的芯数不多的光缆,利用波分复用技术可以不必对原有系统做较大的改动,进行扩容比较方便。
- 3) 由于同一光纤传输的信号波长彼此独立,因而可以传输性质完全不同的信号,完成各种电信业务信号的综合和分离。
- 4) 波分复用通道对数据格式是透明的,在网络扩容和发展中是理想的扩容手段,也是引进宽带新业务的方便手段。通过增加一个附加波长即可引进任意想要的新业务或新容量。
- 5) 利用 WDM 技术选路来实现网络交换和恢复,可以提高网络的灵活性,从而实现透明的、具有高度生存性的网络。

正是由于 WDM 系统的上述特点,使得其在光传输网络中获得广泛的应用,目前,光纤通信网正向着基于 WDM 技术的包括骨干网,城域网和光接入网的全光通信网(AON)方向发展,网络规模越来越大,结构越来越复杂,对网络的管理也提出了越来越高的要求。其中,对通道间光信号功率的控制和均衡是网络管理的一个很重要的方面。

### 1.1.2. WDM 系统中的通道间功率不均衡问题

在 WDM 系统中,为了实现高质量的信息传输,需要对光信号的功率进行控制,对 WDM 系统的多波长信号进行功率谱均衡,使系统处于最佳运行状态<sup>[1]</sup>。随着光通信网络的发展,静态的光信号功率控制和均衡已不能满足要求,需要对每一个波长通道的光信号进行持续的监控和快速的调整,光功率的均衡控制技术成为光网络的关键技术之一。

在 WDM 系统中,通常存在通道间光信号功率不均衡,其原因有:

- 1) 各波长通道的光发射机输出光功率的差异;
- 2) 波分复用器件插入损耗的通道不均匀性;
- 3) 波长路由导致的波长通道的损耗不一致与变化;
- 4) 光放大器的增益谱的不平坦;
- 5) 多通道器件的老化速率不一致等多种因素导致的各通道间信号光功率的不均衡,而且这种不均衡会随时间变化,这将使系统中各个波长通道的光接收机偏离了其最佳工作状态,影响 DWDM 系统光信号的信噪比。

WDM 传输系统要求所有复用通道的光信号在被复用到同一根光纤之前,通道之间的光功率必须均衡。然而,各波长通道的光发射机输出的光功率通常是有差异的,直接控制激光器的驱动电流并不是一个可取的办法,因为驱动电流的改变将会导致不可接受的波长漂移,因此必须在光网络中引入功率均衡器件来实现通道间的光信号功率平衡。

长途光通信系统往往使用多级 EDFA 放大, 受到掺铒光纤的增益谱限制, 不同的波长通道增益各不相同, 各波长通道增益的差异造成增益的不平坦性。特别是在 EDFA 级联使用时, 这种增益差值会逐渐使得强信号愈强, 弱信号愈弱, 造成多波长通道的功率不均衡加剧, 最坏情况下可使某些通道的信号功率超过光接受机的阈值, 而另外的通道光信号功率淹没在噪声里, 导致整个 DWDM 系统的崩溃。

DWDM 系统中, 波长路由是光网络组网, 重构和波长管理的关键技术, OADM、OXC 是实现波长路由的关键设备, 将在光通信网络中得到广泛应用。在 OADM 系统中, 上下路的光信号是不相关的, 通常具有不同的能量, 所以光信号上下路的操作会产生通道间能量不均衡问题。为保证 OADM 系统的性能, 通常需要在上下路操作之后进行通道间的功率均衡, 以使得各通道的光信号在进入新的复用通道之前处于平衡状态。在 OXC 节点上, 光信号传播路径的改变, 一般会伴随波长通道损耗的改变。通道数量的增或减变化, 会导致光放大器增益的变化。网络结构的重构, 使光信号的传输路径发生变化, 这些将导致通道损耗是随时间变化的, 因此需要快速的调整光信号功率以始终保证系统的运行状态。

### 1.1.3. 利用 VOA 实现光网络的功率均衡控制技术

为了解决 WDM 系统的通道间功率不均衡问题, 需要发展光网络的功率均衡控制技术, 目前光网络的功率均衡控制技术主要采用光衰减器, 特别是可调谐光衰减器 (VOA) 及其阵列器件。

从光网络的设计、工程施工、运行和维护来看, 光网络运营商倾向使用 VOA 来取代固定衰减器。由于目前光网络系统越来越复杂、网络的不断扩容和改造, 网络设计的功率预算、工程施工管理和维护也变得越来越困难。通常是将光网络的光功率预算设计为有较大的富裕量, 减少所使用光器件的规格以降低管理和维护工作量、减少备件的数量, 一般采用光衰减器将光信号功率调整为合适值, 因此工程上广泛采用成本低廉的固定光衰减器。由于光衰减器规格太多, 加大了管理和维护的难度和成本, 使用 VOA 可以大大缓解这一困难。光网络发展往往分几期工程, 运行也是波长通道逐步增加, 还不断进行扩容和改造, 导致网络运行环境在不断变化, 每次变动都需要调整光信号的功率。随着系统使用时间的推移, 光器件将出现老化现象, 如光发射机的输出、光放大器的增益和无源器件的插损等都会发生变化, 必须利用 VOA 对光信号进行不断的调整才能保持光接收机处于最佳工作状态。运营商目前非常希望光网络使用可以远程控制、快速调整的电可变光衰减器 (EVOA), 利用电可变的 VOA 阵列可以构成智能化的光网络监视控制系统, 更有效的来管理光网络。

如图 1.2 所示是一种用于 DWDM 系统中的 VOA 阵列和光探测器件构成的光网络监视控制系统结构图, 它是可在线衰减的 VOA 阵列和光探测器以及反馈控制电路构成一个反馈环<sup>[2]</sup>, 多个通道的光信号通过时, 光探测器将光功率探测结果发送给反馈

控制电路，反馈控制电路形成控制信号，控制 VOA 阵列实现对光信号能量的衰减，从而达到均衡通道间光信号能量的目的。

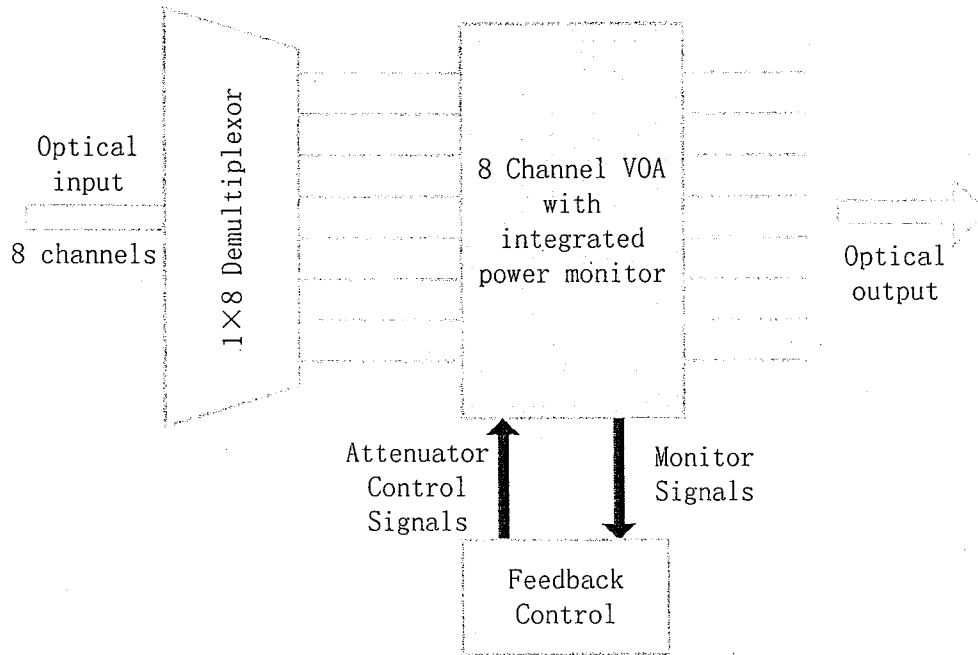


图 1.2 VOA 构成的光网络监视控制系统

利用这种 VOA 阵列构成的智能化的光网络监视控制系统，可以更有效的来管理光网络，这也是智能光网络发展的要求，它不仅大大改善网络的灵活性，提高运营质量，而且可以减少运营成本。VOA 是这种光网络监视控制系统的核心器件，目前存在的主要问题是 VOA 的性能、成本和可靠性还难以满足要求。

在光器件的测试，光通信系统的测试、试验和模拟中也需要 VOA 进行光功率控制。因此，VOA 具有广阔的市场。高性能、多通道、低成本的 VOA 的需求将越来越迫切。

#### 1.1.4. VOA 应用的集成化和阵列化趋势

VOA 在光网络中的应用，通常都是以集成 VOA 阵列的形式来实现的，由于对光信号控制的重要性和广泛需求，出现了多种光器件和 VOA 封装或单片集成在一个模块中的趋势。

波分复用器 (MUX) 与 VOA 阵列集成就构成 V-MUX，形成一个新的光器件<sup>[3]</sup>。目前光多路复用/解复用器主要采用阵列波导光栅 (AWG) 器件，很多公司都提供 VOA 与 AWG 集成的 V-MUX 产品。图 1.3 是英国 Bookham 公司提供的 V-MUX 产品的示意图<sup>[4]</sup>。该器件在 SOI 材料上单片集成了 VOA 阵列和波分复用器，可以在多路光信号进行复用之前进行通道间的在线功率均衡，从而保证了多路信号的复用效果。该类器件因其成本低、体积小、功能集成而具备很强的竞争力。

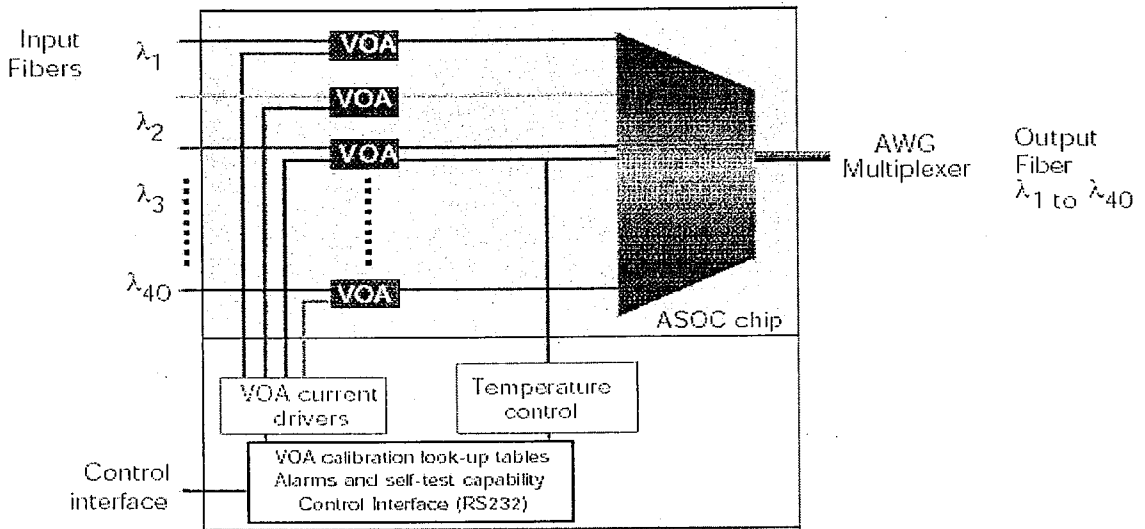


图 1.3 V-Mux 产品示意图

为处理光上下路过程中的通道间光信号能量均衡问题，光分插复用器（OADM）通常要集成 VOA 阵列。如图 1.4 所示是集成 VOA 阵列的 OADM 系统的示意图。它是由解复用模块，上下路功能模块，VOA 阵列，信道检测模块，复用模块等部分构成的。当光经由解复用模块实现不同波长信号的分波后，由上下路功能模块（通常是一组  $1 \times 2$  光开关阵列）将下路的光信号转换到 Drop Port 端口，并将 Add Port 端口的上路光信号转换到相应的通道，这时候，上路的光信号通常和原有的多路光信号具有不同的能量，将 VOA 阵列集成进光分插复用系统，可以在上下路操作后仍能使得多路光信号能量平衡，从而保证光分插复用系统的性能。

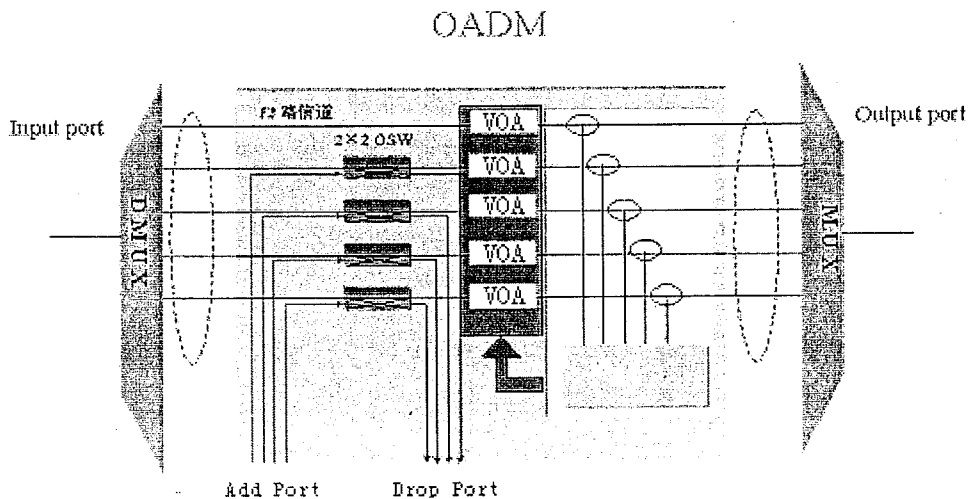


图 1.4 集成 VOA 阵列的 OADM 系统结构示意图

VOA 除了与波分复用器（MUX）、分插复用器（OADM）的集成外，还可以与光交叉连接器（OXC）、光收发模块（Transceiver）、光探测器、可调滤波器、光开关<sup>[5]</sup>等进行集成，这样对 VOA 的尺寸小、阵列化、功耗低提出了更高的要求，同时希望

与其他器件进行单片集成。

VOA 是光通信系统中不可或缺的关键器件，市场对 VOA 及其阵列有着很大的需求，仅次于连接器、耦合器等无源器件。在目前光通信行业不景气的背景下，VOA 的需求量比其他无源器件下降要小，而价格依然坚挺，可以说明 VOA 的重要性的需求。VOA 及其阵列的研究对提升我国光器件产业的水平、促进我国光网络的发展是十分重要的。

## §1.2. VOA 的主要实现技术

光衰减器可以分为固定式<sup>[6]</sup>和可变式，而可变式又分为手动和电可变两种。固定式衰减器由于其成本低而大量应用，但随着系统要求越来越高有逐渐被 VOA 取代的趋势，尤其是 VOA 阵列。国内外大多数有实力的光器件公司都在开展各种 VOA 实现技术的研究，本节介绍主要的 VOA 实现技术。

### 1.2.1. 机械式光路阻挡的 VOA

传统的机械式光路阻挡的 VOA，是目前市场上的主要产品形式，如图 1.5 所示是一种机械式 VOA 的示意图<sup>[7]</sup>。机械式 VOA 存在体积大、成本高、衰减量波长相关、回跳抖动、难以阵列化等矛盾，不符合 VOA 技术发展的方向。

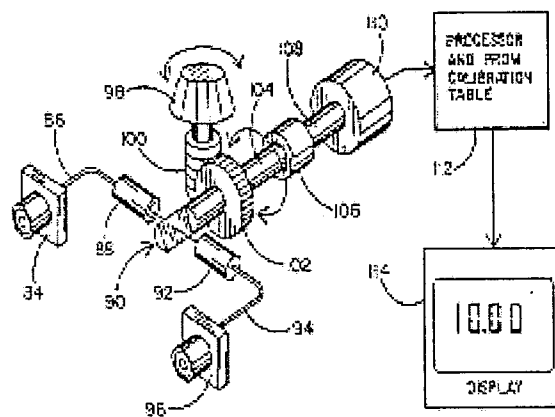


图 1.5 机械式光路阻挡 VOA 结构示意图

### 1.2.2. 基于 MEMS 技术的 VOA

基于 MEMS 技术的 VOA，有光路阻挡、微镜扭转，V 型微镜移动和光栅调整等技术方案。

如图 1.6(a)是一种基于 MEMS 技术的光路阻挡的可调谐光衰减器<sup>[8]</sup>。器件包含两根单模光纤和一个可动的多晶硅镜子，多晶硅镜子利用表面微机械加工技术制作，镜子安装在一个微机械吊桥式执行器上并位于输入光纤的末端位置。当驱动电压施加到吊桥式执行器时，执行器带动镜子移动到光路中并将传输光场的一部分阻塞，电压由

0V 变化到 8V 时，吊桥式执行器可以最多移动几百微米，光衰减量可以达到 45dB，该 VOA 的响应时间为 37 ms，器件的插入损耗为 1.5 dB。

图 1.6(b)是 santeo 公司最新开发的微镜移动的 MEMS VOA<sup>[9]</sup>，该 VOA 可以实现阵列集成，封装的通道数可以是 1、4 和 8 个，各通道的衰减量可达 30dB，插入损耗为 0.8dB，偏振相关损耗 (PDL) 小于 0.2dB，器件设计了 45dB 的保护阻挡功能，以防止外界震动和机械冲击的影响。

如图 1.6(c)是基于 MEMS 技术的 V 型微镜移动 VOA 的原理示意图<sup>[10]</sup>。该可调谐光衰减器以 SOI 材料为衬底，利用静电梳齿驱动器控制 V 型微镜移动，在工作电压为 35V 时，可以实现最大 30dB 的衰减量。该 VOA 通过在 V 型微镜的表面制作 Cr/Au 层来增大微镜的反射率，插入损耗为 0.6dB，器件的响应时间约为 1ms。

如图 1.6(d)是通过光栅调整来实现光衰减的 MEMS 可调谐光衰减器<sup>[11]</sup>。该可调谐光衰减器在驱动部分采用光栅光阑 (GLV: Grating Light Valve)，利用光的衍射原理对入射光进行衰减。器件的基本单元是光栅，当条带不动时，器件是一个平的发射镜，将入射光反射回去，当相间的条带往下运动四分之一波长时，形成光栅，对入射光进行衍射。测试表面，利用条带在零到四分之一波长之间变化，就可以做成高精度的光衰减器。采用八比特字长的控制电压信号驱动条带，获得的衰减精度高于 0.07dB。

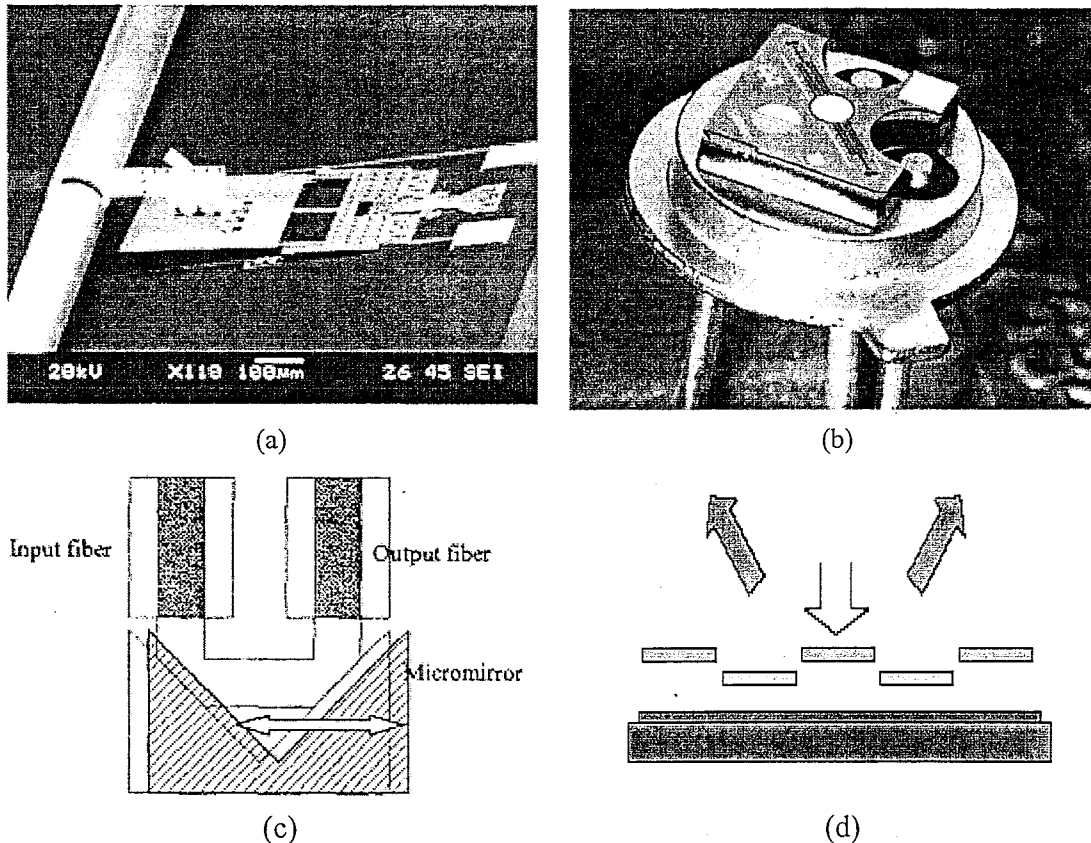


图 1.6 基于 MEMS 技术的 VOA

目前对 MEMS VOA 进行的研究很多<sup>[12-14]</sup>，但推出 MEMS VOA 产品的公司仅有 JDSU、Santec、Lightconnect 等很少几家公司。MEMS VOA 是很有希望的 VOA 方案，但也存在机械式同样的回跳抖动问题，还存在抗震动和使用寿命问题。基于 MEMS 技术的 VOA 进行阵列化集成也有困难，这主要是阵列器件的光学封装存在一定困难。

### 1.2.3. 基于集成光学技术的 VOA

基于集成光学技术的 VOA，技术方案主要有马赫—曾德 (M-Z) 干涉仪、非对称 Y 分支、弯曲损耗、多模激发和直波导电注入载流子吸收等方案。

马赫—曾德干涉仪是集成光学中广泛使用的实现光信号调制的结构，如图 1.7 是马赫—曾德干涉仪的结构示意图。它由两个 3dB 耦合器和两个相移臂组成。光信号由输入光纤入射后先被等功率地分成两束光，对其中的一束光进行相位调制，再经过 3dB 耦合器合束后输出，由于相位差的存在，输出光信号的能量被衰减。

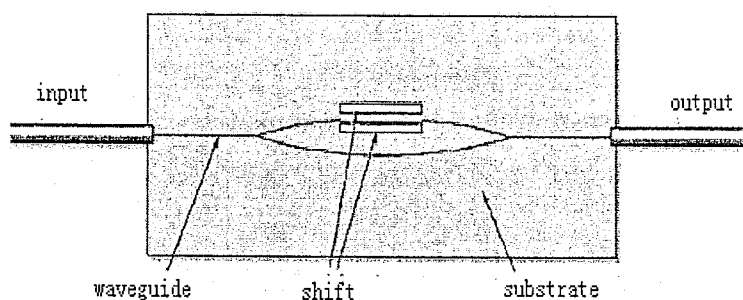


图 1.7 马赫—曾德干涉仪结构图

如图 1.8 是一种以 SOI 材料为衬底的基于热光效应的马赫—曾德干涉仪<sup>[15]</sup>结构的 VOA，它采用多模干涉器 (MMI) 进行分束和合束，利用硅的热光效应实现光的相位调制。器件的加热器长度 2000 微米，器件实现最高 14.2dB 的光功率衰减，所需要的最大功率为 210mW，插入损耗 12dB (其中约 10dB 的端面耦合损耗)。

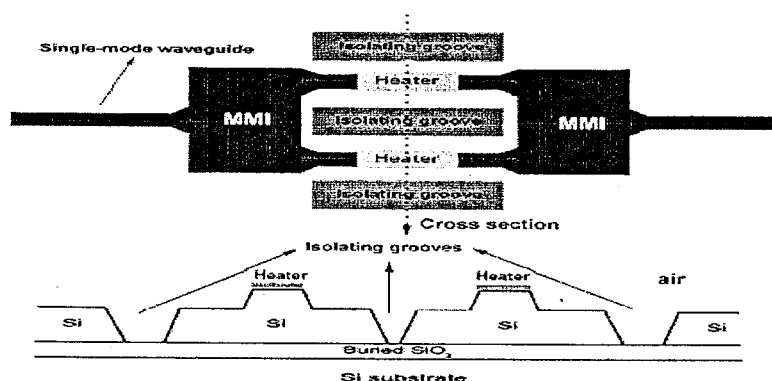


图 1.8 采用 M-Z 结构的热光调制 VOA 结构示意图

采用 M-Z 干涉仪结构实现 VOA，所用的集成工艺一般包括聚合物、SiO<sub>2</sub>/Si 和 SOI 材料等几种，调制机理以热光效应和电光效应为主。M-Z 干涉仪 VOA 可以与阵列波导光栅 (AWG)、波导光开关阵列单片集成，因而引起了极大的关注，但 M-Z 干涉仪结构对工艺控制的要求较高，不利于器件成本的降低和成品率的提高。中科院半导体所在国家 863 项目的支持下研究出了基于 SOI 材料的热光效应 M-Z 干涉仪 VOA，英国 Bookham 公司研制出了基于 SOI 材料的电光效应的 M-Z 干涉仪 VOA<sup>[16]</sup>。

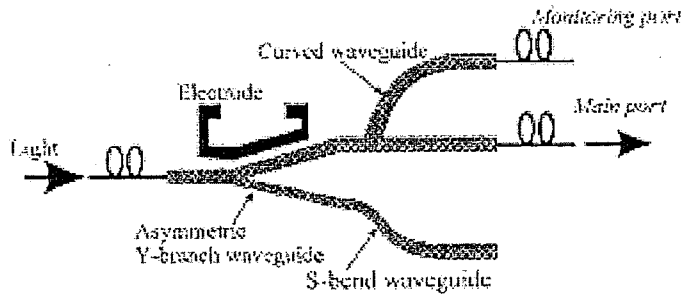


图 1.9 采用非对称 Y 分支结构的 VOA

如图 1.9 所示是采用非对称 Y 分支结构的 VOA 的原理图<sup>[17]</sup>。器件中制作了一个非对称的 Y 分支波导，上面的波导臂宽度较大，下面的波导臂宽度较小。在较宽的波导臂处制作了热电极。当热电极上不施加电压时，入射光基本上都耦合进较宽的波导臂，当热电极上施加电压时，由于热光效应，宽波导臂的折射率减小，一部分入射光会耦合进宽度较小的波导臂，从而使得宽波导臂中的输出减小，实现光能量的衰减。器件中还制作了检测端口，用于实现衰减的反馈控制。已经报道的采用聚合物材料的非对称 Y 分支结构 VOA 可以实现最高 20dB 的衰减量，所对应的功耗为 200mW。器件的插入损耗约为 5dB，偏振相关损耗可以降低到 0.9dB，响应时间为 1ms。采用 Y 分支结构的器件，虽然也可以实现集成化，但器件尺寸一般比较大，不利于大规模集成。该类器件对制作精度的要求较高，制作难度较大。

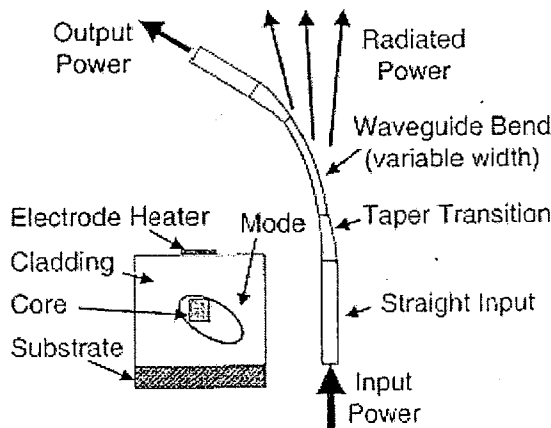


图 1.10 采用弯曲波导结构的 VOA

采用弯曲波导结构的 VOA 如图 1.10 所示<sup>[18]</sup>, 器件的调制部分是一段宽度较小的弯曲波导, 弯曲波导的上部制作了热电极。当热电极上施加电压时, 由于热光效应, 会改变波导的折射率, 从而在弯曲波导中产生辐射模, 使得一部分光能量从波导中辐射掉, 实现光功率的衰减。弯曲波导制作成宽度较小可以提高衰减的效率, 为了减小弯曲波导和输入输出波导之间的耦合损耗, 器件中制作了锥形波导来连接弯曲波导和输入输出波导。已经报道的采用聚合物材料的弯曲波导结构 VOA 可以实现最大 40dB 的衰减量, 相应的功耗为 40mW。器件的插入损耗为 1.5dB, 偏振相关损耗为 0.12dB。该器件的整体尺寸较小, 可以实现大规模的集成。但器件的制作精度要求较高, 制作难度较大。

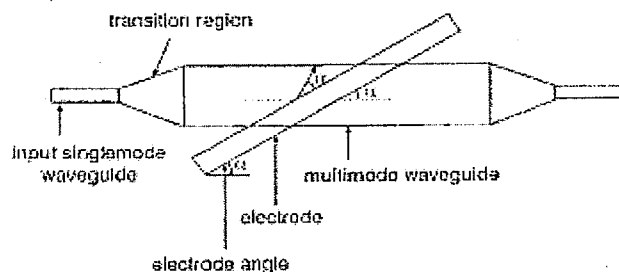


图 1.11 多模激发式 VOA 结构示意图

如图 1.11 所示是一种多模激发式的 VOA<sup>[19]</sup>, 器件采用聚合物材料, 由输入输出单模波导、锥形波导和中间的多模波导等几部分构成, 其中锥形波导用于减少单模波导和多模波导间模式耦合造成的损耗, 在多模波导上制作与波导传输方向成一定角度  $\alpha$  的电极。当电极上施加电压时, 由于热光效应, 电极下面的聚合物材料的折射率减小, 从而对入射的光信号产生反射, 激发出更多的模式, 这些激发的模式会在输出时被过滤掉, 因而实现光功率的衰减。该 VOA 可以实现 30dB 的衰减量, 最大功耗为 80mW。器件的插入损耗为 2dB, 响应时间为 5ms, 偏振相关损耗约为 1dB。采用多模激发技术的 VOA 结构较简单, 因此对工艺控制要求较低, 有利于降低器件制作成本, 该 VOA 的主要缺点是偏振相关损耗较大。

硅材料的自由载流子等离子体色散效应是很显著的电光调制效应, 利用等离子体色散效应改变硅材料折射率的性质, 可以采用马赫-曾德干涉仪结构来制作 VOA<sup>[16]</sup>。由于马赫-曾德干涉仪结构对工艺控制要求较高, 一种更简单的方法是直接利用等离子体色散效应中注入载流子增大硅材料吸收系数的性质, 在直波导上制作 PIN 结注入载流子, 实现光功率衰减。英国 Bookham 公司研制出了基于 SOI 材料的直波导载流子注入 VOA 产品<sup>[20]</sup>, 如图 1.12 所示是器件的结构简图。其中光功率衰减是通过横向 PIN 结注入载流子来控制的, 在器件中制作了加热器来控制温度。该 VOA 可以实现 30dB 的衰减量, 对应的功耗为 220mW。器件的插入损耗为 2dB, 偏振相关损耗小于 0.4dB, 响应时间可以达到微秒级。

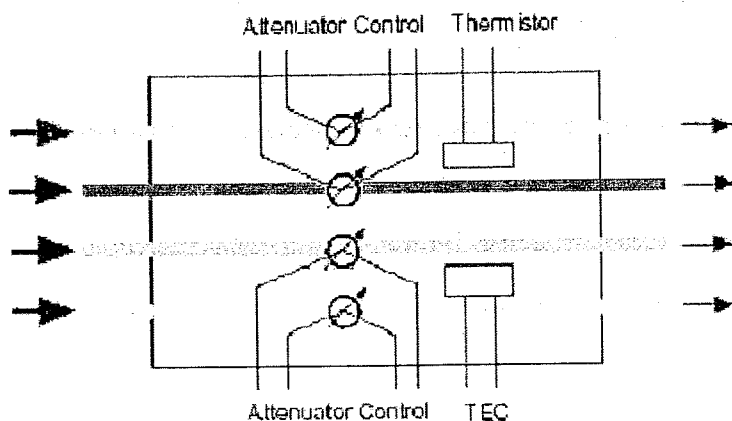


图 1.12 采用直波导结构的 VOA

相对于采用马赫—曾德干涉仪结构的器件，直波导结构更简单，对工艺控制的要求降低，可以提高成品率和降低器件制作成本。直波导结构器件的插入损耗一般也低于马赫—曾德干涉仪结构的器件。相对于热光效应的器件，自由载流子色散效应的器件响应时间更快，受外界（如温度变化）影响更小。因此，自由载流子注入的直波导 VOA 是被看好的 VOA 实现技术之一。

采用集成光学技术来实现 VOA 及其阵列是 VOA 研究的一个热点<sup>[21-23]</sup>。集成光学 VOA 的主要优点是易于实现阵列化，并可以与其他集成光学器件实现单片集成，这与 VOA 的应用需求是一致的。

#### 1.2.4. 基于液晶技术的 VOA

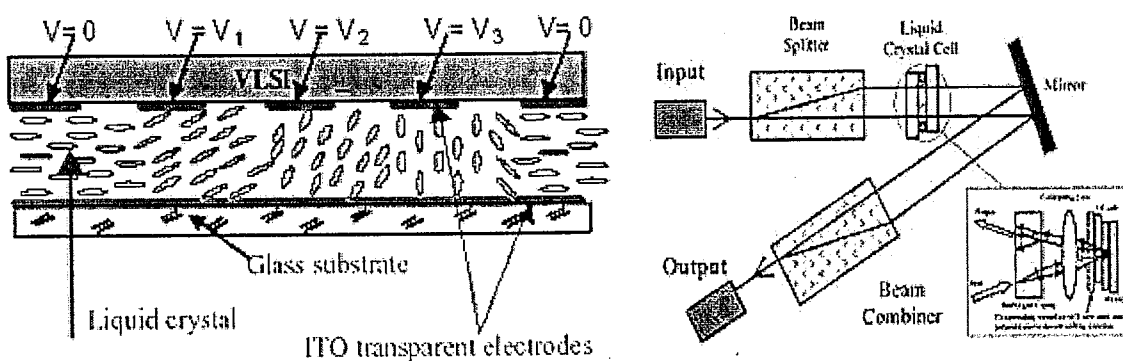


图 1.13 基于液晶技术的 VOA

如图 1.13 是液晶的控制原理和实现液晶 VOA 的结构示意图。液晶盒的两个电极加上电压时，偏振光信号的偏振方向发生转动<sup>[24]</sup>。入射光经过光分束装置被分成两束后通过液晶盒时，由于液晶的偏振方向的变化，使得透射的两束光产生不同的相位变化，形成相位差。经反射镜反射后，两束光重新耦合，实现光能量的衰减。目前已经报道了液晶 VOA 的产品。液晶光衰减器存在环境性能欠佳、插入损耗大、工艺复杂等问题。

### 1.2.5. 小结

除了以上介绍的VOA实现技术,还有光纤声光调制,有机材料电致吸收<sup>[25]</sup>等VOA实现技术。基于光纤声光调制的VOA,其衰减时间可达微秒级,插入损耗小,但器件体积大,驱动电路复杂。为了降低功耗,通常将光纤进行腐蚀以减小其直径,因此其可靠性会有问题。基于有机材料的电致吸收VOA,其插入损耗较大,衰减速度很慢。

纵观目前的各种VOA的研究工作,主要以MEMS和集成波导VOA为主,在解决VOA的阵列化或与AWG集成或实用化方面存在或多或少的不足。VOA的阵列化要求来自于VOA的许多应用是多通道应用,如光功率谱的均衡,VOA的阵列化可以降低成本和减少器件尺寸,因此阵列化是实际应用所希望的。VOA与AWG、光开关的单片集成,不仅有利于大大降低成本,而且有利于减少封装成本、减小尺寸和提高性能,因此VOA和其他集成光器件的集成相容性也是一个很重要的问题。

集成光学技术是光器件制造技术的发展趋势,具备规模化生产、低成本、稳定性好、尺寸小、阵列化和多功能集成的优势。集成光学技术所采用的材料主要有聚合物、SiO<sub>2</sub>/Si和Si(SOI)材料三种,其中采用Si(SOI)材料的硅集成光学技术又因其加工工艺成熟,可集成性好而受到广泛关注。

## §1.3. 硅集成光学技术

硅材料被称为电子工业的粮食,在微电子工业中具有举足轻重的地位。与微电子工业相比,硅集成光学起步较晚。硅材料本身有其适合于集成光学技术的独特优点。首先,硅作为半导体中应用最广泛的一种材料,其成本最低,加工工艺最为成熟,易于实现较大规模的集成。其次,在1.3—1.6 μm波长范围内,硅是透明的,而这正是石英光纤的长波长低损耗窗口。由于硅材料的上述优点以及人们对硅材料光学性质认识的不断深入,硅集成光学日益受到人们的关注,对硅集成光学研究也广泛的展开。

### 1.3.1. 硅材料的性质

在很长一段时间里,集成光电子器件研究主要集中在铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)和III-V(或II-IV)族化合物半导体上,硅材料在集成光电子学领域很少受到人们的重视,这主要是由硅材料本身的两个固有性质决定的:(1)硅是具有反演对称性的晶体,不存在普克尔斯效应(线性电光效应);(2)硅是间接带隙半导体,不具备制作受激发光器件的条件。

80年代中后期的研究表明,硅的这两个固有缺陷不是完全不可以克服的<sup>[26]</sup>。硅虽然没有线性电光效应,但有其他一些电光效应可资利用,如克尔(Kerr)效应,弗朗兹-克尔迪什(Frantz-Keldish)效应和等离子体色散效应。硅的克尔(Kerr)效应

和弗朗兹-克尔迪什 (Frantz-Keldish) 效应都比较弱, 很难实现足够强的电光调制, 但硅的等离子体色散效应相当显著, 足以实现电光调制。

硅的等离子体色散效应是指在电场的作用下硅中自由载流子浓度发生变化时, 自由载流子等离子体通过吸收系数  $\Delta\alpha(\omega, \Delta N)$  对介电常数 (折射率) 产生负作用, 降低介质的折射率。等离子体色散效应可以表示为<sup>[26-27]</sup>:

$$\Delta n = -\frac{q^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \varepsilon_0 n_0} \left[ \frac{\Delta N_e}{m_{ce}^*} + \frac{\Delta N_h}{m_{ch}^*} \right] \quad (1-1)$$

$$\Delta\alpha = -\frac{q^3 \lambda^2}{4\pi^2 c^3 \varepsilon_0 n_0} \left[ \frac{\Delta N_e}{(m_{ce}^*)^2 \mu_e} + \frac{\Delta N_h}{(m_{ch}^*)^2 \mu_h} \right] \quad (1-2)$$

式中  $\Delta n$  和  $\Delta\alpha$  分别是折射率的变化和吸收系数的变化,  $q$  是电子电量,  $\lambda$  为真空波长,  $c$  为真空光速,  $\varepsilon_0$  是真空介电常数,  $n_0$  是本征硅的折射率,  $\mu_e$  和  $\mu_h$  分别是电子和空穴迁移率,  $m_{ce}^*$  和  $m_{ch}^*$  分别是电子和空穴的有效质量, 其中  $m_{ce}^* = 0.26m_0$ ,  $m_{ch}^* = 0.39m_0$ 。当波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时, 硅的等离子体色散效应可以更加简单的表示为

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -[8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}] \quad (1-3)$$

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_e + \Delta\alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_h \quad (1-4)$$

硅的等离子体色散效应是非常显著的, 式 (1-1) 至式 (1-4) 是对硅和 SOI 光波导进行电光调制的物理基础, 即硅材料的折射率和吸收系数受载流子浓度调制的物理基础<sup>[28]</sup>。

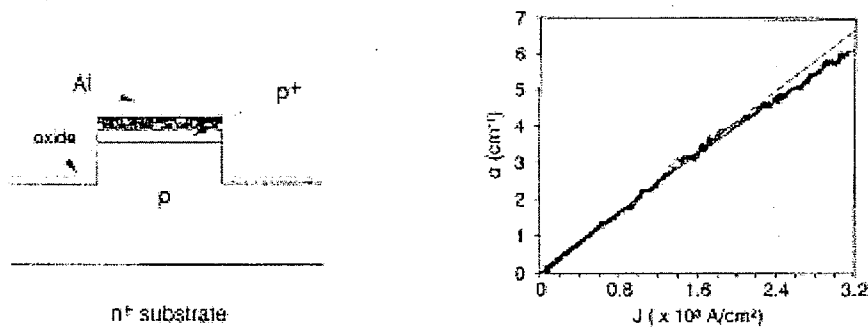


图 1.14 体硅 PIN 结构调制器及其调制特性

已经报道了利用硅的等离子体色散效应, 在体硅材料上研制的 PIN 结构的光调制器<sup>[29]</sup>, 如图 1.14 所示, 在高掺杂的 N 型衬底 ( $\rho < 0.003 \Omega \cdot \text{cm}$ ) 上外延一层  $7.7 \mu\text{m}$  厚的本征层 (P<sup>-</sup>层), 掺杂浓度小于  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , 在本征层顶部通过离子注入形成厚度为  $0.5 \mu\text{m}$  的 P<sup>+</sup>层, 掺杂浓度为  $N_A > 5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ , 通过反应离子刻蚀形成脊高  $4.6 \mu\text{m}$  的脊型波导。这种调制器最大的缺点是插入损耗太大, 一般高于  $10 \text{dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ , 这是由于它利用重掺杂的 P<sup>+</sup>和 N<sup>+</sup>层来限制光场, 包层和波导芯的折射率差很小, 在重掺杂

区域存在消散光场，从而产生了较大的载流子吸收损耗。

另外，硅的热光效应也是很显著的，可以用于在硅材料上实现光调制。

在硅的受激发光的研究方面也在不断取得进展，不少实验室都报道了多孔硅发光技术，即在单晶硅中掺杂，利用等电子陷阱发射波长为  $1.3-1.6\mu\text{m}$  的红外激光。可以说，制作  $1.3-1.6\mu\text{m}$  的硅基光电子器件的可行性已经得到了初步论证。

体硅材料利用重掺杂区限制光场会引起较大的光传输损耗，而绝缘体上的硅（SOI）材料则可以克服这一困难，制作出低损耗的光波导，目前硅集成光学技术的研究大多采用 SOI 材料。

### 1.3.2. 基于 SOI 材料的硅集成光学技术

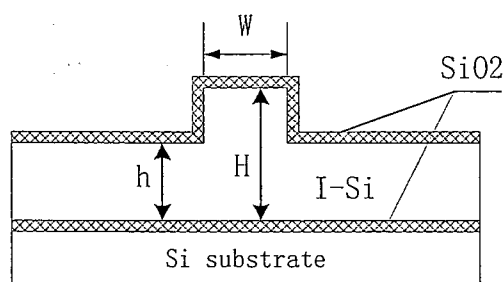


图 1.15 SOI 大截面脊型波导

SOI 材料由器件硅层、SiO<sub>2</sub> 和衬底硅三个部分构成。SOI 光波导以中间的 SiO<sub>2</sub> 层为限制层，与体硅材料相比，波导层和限制层的折射率差更大，因此对光场的限制更强，传输损耗较低。为了减小脊型波导端面与单模光纤（芯径约  $8\mu\text{m}$ ）的耦合损耗，硅波导截面的尺寸必须与光纤截面尺寸相当。Soref 等提出了基于 SOI 材料的大截面脊型波导<sup>[30]</sup>，SOI 大截面脊型光波导的制作工艺与硅工艺兼容，因此制作工艺成熟，并且 SOI 光波导的制作容差也较大。如图 1.15 所示，定义  $H$  是器件层硅的厚度， $h$  是脊外硅层的厚度， $w$  是脊的宽度，则实现单模的条件是：

$$\begin{cases} t > c - r / (1 - r^2)^{1/2} \\ r < 0.5 \end{cases} \quad (1-5)$$

式中： $c=0.3$ ， $t=w/H$ ， $r=h/H$ 。

在 SOI 大截面脊型波导的基础上，目前已经报道了各种基于 SOI 材料的光电子器件，在上一节中介绍的基于热光效应的马赫—曾德干涉仪结构 VOA 以及 Bookham 公司研制的直波导载流子注入 VOA 都是采用了 SOI 材料。最近，Intel 公司报道了利用 MOS 技术研制出的高速硅光调制器<sup>[31]</sup>，该光调制器采用 SOI 材料，通过 MOS 电容控制硅波导中的多子浓度，从而改变硅的折射率，实现对光信号的相位调制，调制速率达到 1G 以上，这是基于 SOI 材料光电子器件研究的重要进展。其他各种基于 SOI

材料的集成光电子器件也都在研制当中,目前已经在实验室实现了诸如光耦合器、光调制器、光开关、光波分复用器等各种基于 SOI 材料的光电子器件,有的已经实现了产品化<sup>[32-34]</sup>。

综上所述,SOI 材料具有硅材料的加工工艺成熟,易于大规模集成等全部优点,又能够实现低损耗的光传输,适合于集成光学技术应用。

### 1.3.3. 基于 SOI 材料实现 VOA 的技术选择

采用 SOI 材料制作 VOA,SOI 光波导加工工艺成熟、易于实现阵列化,并可以与同样基于 SOI 材料的阵列波导光栅波分复用器、光开关等实现单片集成,有很高的研究价值。

在采用的光调制技术方面,利用硅的等离子体色散效应,通过载流子注入方法实现光调制相对于采用热光效应实现光调制具有响应时间更快,受外界(如温度变化)影响更小等优点,因而更加受到人们关注。根据硅的等离子体色散效应,可以在硅上制作横向 PIN 结, PIN 结在正向偏压下向硅波导中注入载流子,改变自由载流子的浓度从而改变硅的折射率和吸收系数。

在采用的器件结构方面,利用等离子体色散效应,可以通过两种结构来实现衰减光功率的目的。一种是通过载流子注入实现光的相位调制,再利用马赫-曾德干涉仪结构来衰减光功率。这种方法必须对光信号进行分束和耦合,这就会引入比较大的插入损耗,并且对工艺制作的精度要求较高,不利于降低成本和提高成品率。第二种是采用直波导结构,直接利用载流子注入改变吸收系数来实现光功率的衰减,相对于马赫-曾德干涉仪(MZ)结构,在相同的器件尺寸下,直波导结构要求对载流子浓度的改变更大,所以会增大器件的电功耗,但这种方法只需要制作直波导,结构简单、插入损耗较小、工艺容差大、更有利于降低成本和提高成品率,并且通过改进设计,可以降低直波导 VOA 的电功耗。因此,直波导结构的 VOA 更具有实用价值。本论文正是考虑到直波导结构的上述优势,在可调谐光衰减器设计中采用了直波导结构。

## §1.4. 本论文的研究工作和创新点

本论文的研究工作围绕基于 SOI 材料的集成可调谐光衰减器,任务是设计、制作和测试可调谐光衰减器,达到电控光衰减的功能。基于 SOI 材料的集成可调谐光衰减器涉及到光学、光波导技术和硅加工技术,并需要将微电子工艺与光电子器件的特殊要求相结合。各章的主要内容:

第一章在介绍 WDM 系统的基础上,介绍了 VOA 在 WDM 系统中实现通道间功率均衡的重要作用以及目前报道的主要 VOA 实现技术,指出集成光学技术具备规模化生产、低成本、稳定性好、尺寸小、阵列化和多功能集成的优势,是发展 VOA 技术的重要方向。介绍了硅材料的性质和优点,指出自由载流子等离子体色散效应是硅

材料比较显著的电光效应。介绍了基于 SOI 材料的大截面脊型波导，分析了基于 SOI 材料研制 VOA 的优势和技术方案。

第二章详细介绍了 PIN 结注入载流子的理论，通过对脊型波导横向 PIN 结构的性质的分析，提出了新型双脊波导的横向 PIN 结构，该结构可以扩大载流子注入面积，提高注入载流子的利用率。设计了渐变双脊波导区来减小输入/输出单模波导和调制区双脊波导的模式耦合损耗。器件采用直波导结构，包含输入/输出波导、渐变双脊波导区和调制区三个部分。通过近似处理，提出了双脊波导横向 PIN 结构的分析模型，并根据分析模型优化了影响可调谐光衰减器衰减特性的掺杂深度、掺杂浓度、本征区半长等参数。在参数优化的结果下，得到器件实现 20dB 衰减所需的电功耗约为 215mW。分析了器件的注入载流子分布、插入损耗和响应时间。

第三章给出了器件制作的完整的工艺流程，重点介绍了光刻、热扩散、刻蚀光波导、端面抛光等器件制作的关键工艺，并根据可调谐光衰减器制作的特殊要求确定了相应的工艺参数，最后给出器件的制作结果。

第四章介绍了器件的电学特性、衰减特性、插入损耗、响应时间、偏振相关损耗等主要测试参数，给出了相应的测试结果，并对测试结果进行了分析。

第五章对全文进行了总结。

本文的主要创新点有：

第一：与传统的脊型波导上制作的横向 PIN 结构不同，本论文提出在双脊波导上制作的横向 PIN 结构，采用该结构可以扩大载流子注入面积，提高注入载流子的利用率。

第二：本论文根据摸斑转换器的思想，设计了第二脊渐变的的双脊波导构成渐变双脊波导区作为输入/输出波导和调制区的连接区，从而解决了输入/输出单模波导和调制区双脊波导的耦合问题，有利于降低器件的插入损耗。

第三：本论文通过近似处理，提出了分析双脊波导横向 PIN 结构的模型，并根据分析模型优化了影响可调谐光衰减器衰减特性的掺杂深度、掺杂浓度、本征区半长等结构和工艺参数。

第四：本论文根据可调谐光衰减器制作的特殊要求，提出了相应的器件制作的工艺参数。

## 第二章 可调谐光衰减器的理论和设计优化

本章介绍 PIN 结注入载流子的理论基础，给出可调谐光衰减器的设计方案和近似分析模型，并利用近似分析模型分析和优化可调谐光衰减器的衰减特性。最后给出了器件的注入载流子分布、插入损耗和响应时间的分析。

### §2.1. PIN 结注入载流子的理论分析

通过 PIN 结注入载流子，利用硅的等离子体色散效应实现光衰减，是本论文设计的光衰减器的物理基础。根据等离子体色散关系，PIN 结注入载流子的浓度直接决定了光衰减量的大小。在 PIN 结中，重掺杂区掺杂深度和掺杂浓度、本征区长度等结构和工艺参数的选择会影响到载流子注入浓度和电功耗之间的关系，进而影响到器件的衰减特性。我们在本节中详细分析上述参数和电流密度、电压等电学量之间的数学关系，这些数学关系对于我们优化器件参数进而提高器件衰减特性是非常重要的。

如图 2.4 是 PIN 结的基本结构和杂质分布，它是使近似本征层“I 层”夹于重掺杂的 P 层和 N 层之间的一种 PN 结。在实际的器件中，“I 层”一般用高阻 P 层或高阻 N 层近似，这并不影响最终的结果，因为载流子注入的浓度远大于高阻层的掺杂浓度。我们以本征区的 midpoint 为坐标原点，本征区的长度为  $2d$ ，两个掺杂边界分别位于  $\pm d$  处。

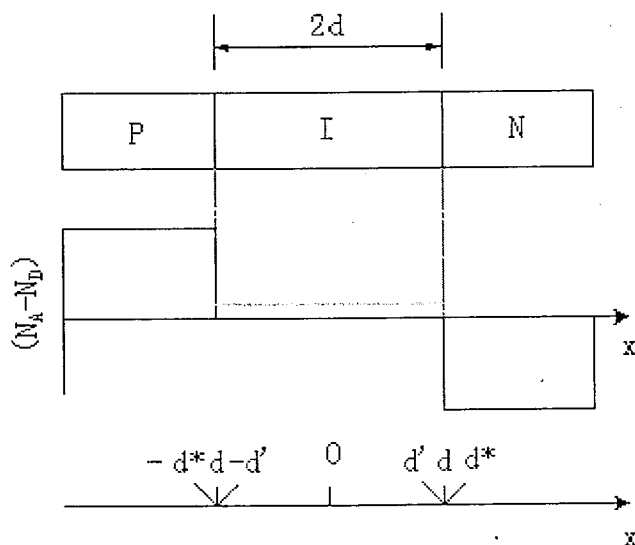


图 2.1 PIN 结构及杂质分布

在两个掺杂边界附近会形成很窄的空间电荷区，所以在边界两侧，电压和载流子浓度变化都很大，为了表征这种情况，我们令空间电荷区和本征区的边界为  $\pm d'$ ，

空间电荷区和两个重掺杂区的边界为 $\pm d^*$ ，由于空间电荷区非常窄，我们在计算中可以认为 $d'=d^*=d$ 。分析PIN结性质时要用到下面的符号：

$\mu_n$  = 本征区电子迁移率；

$\mu_p$  = 本征区空穴迁移率；

$b = \mu_n / \mu_p$  = 本征区电子空穴迁移率比；

$D = k_0 T / q \times 2 (\mu_n \mu_p) / (\mu_n + \mu_p)$  = 双极扩散系数；

$\tau$  = 本征区载流子寿命；

$L$  = 本征区扩散长度；

$n_A$  = P区掺杂浓度；

$n_p = n_i^2 / n_A$  = P区的少子（电子）平衡浓度；

$L_n$  = P区的少子扩散长度；

$d_p$  = P区的掺杂深度；

$n_D$  = N区掺杂浓度；

$p_n = n_i^2 / n_D$  = N区的少子（空穴）平衡浓度；

$L_p$  = N区的少子扩散长度；

$d_n$  = N区的掺杂深度。

在正向偏压下，总的电流密度是由本征区与重掺杂区边界处的少子扩散电流密度 $i_n(-d)$ ， $i_p(+d)$ 和本征区的复合电流 $i_m$ 组成的，即：

$$i = i_n(-d) + i_m + i_p(+d) \quad (2-1)$$

为了进一步求解本征区的载流子浓度分布和电流，我们需要求解偏微分方程（偏微分方程的推导参见参考文献[35]）：

$$\frac{d^2 n}{dx^2} = \frac{n}{L^2} \quad (2-2)$$

不妨设：

$$i_n(-d) = \eta_l \times i, \quad i_p(+d) = \eta_r \times i, \quad i_m = \eta_m \times i \quad (2-3)$$

其中 $\eta_l$ 、 $\eta_r$ 、 $\eta_m$ 分别是三个电流分量的系数，显然有关系式：

$$\eta_l + \eta_r + \eta_m = 1 \quad (2-4)$$

偏微分方程的边界条件可表示如下：

$$i_n(-d) = \eta_l \times i \quad i_p(-d) = (1 - \eta_l) \times i \quad (2-5)$$

$$i_p(+d) = \eta_r \times i \quad i_n(+d) = (1 - \eta_r) \times i \quad (2-6)$$

根据边界条件可得到方程的解（具体求解过程参见参考文献[36]）：

$$n(x) = i_m \frac{\tau}{2qL} \left[ \frac{\cosh(x/L)}{\sinh(d/L)} - B \frac{\sinh(x/L)}{\cosh(d/L)} \right] \quad (2-7)$$

其中

$$B = \frac{1}{\eta_m} \left( \frac{b-1}{b+1} + \eta_l + \eta_r \right) \quad (2-8)$$

B 的更具体的值我们将在后面引入一些参量后给出。由式 (2-7) 可以看出, 本征区的注入载流子浓度是和本征区的复合电流密度成正比的, 其分布与两种载流子的迁移率以及边界处的扩散电流密度相关。对于固定的复合电流密度, 平均注入载流子浓度  $\Delta N_j$  与 B 无关, 我们可以得到:

$$\Delta N_j = \frac{i_m \tau}{2dq} \quad (2-9)$$

将  $\Delta N_j$  代入方程 (2-7) 可以得到本征区边界处的载流子分布:

$$n(-d') = \Delta N_j \frac{d}{L} \coth\left(\frac{d}{L}\right) \times \left[ 1 + B \tanh^2\left(\frac{d}{L}\right) \right] \quad (2-10)$$

$$n(+d') = \Delta N_j \frac{d}{L} \coth\left(\frac{d}{L}\right) \times \left[ 1 - B \tanh^2\left(\frac{d}{L}\right) \right] \quad (2-11)$$

为了进一步求得边界处少子扩散电流的密度, 我们可以写出空间电荷区和重掺杂区边界处的少子浓度:

$$n(-d^*) = \frac{n(-d')^2}{n_A} \quad (2-12)$$

$$p(-d^*) = \frac{n(+d')^2}{n_D} \quad (2-13)$$

在两个重掺杂区, 载流子注入浓度很低, 本征区和重掺杂区边界处的少子扩散电流可以表示为:

$$i_n(-d) = q \frac{D_n}{L_n} \coth\left(\frac{d_p}{L_n}\right) n(-d^*) \quad (2-14)$$

$$i_p(+d) = q \frac{D_p}{L_p} \coth\left(\frac{d_n}{L_p}\right) n(+d^*) \quad (2-15)$$

其中  $\coth(d_p/L_n)$  和  $\coth(d_n/L_p)$  两项是在假定重掺杂区和金属电极界面由于表面复合的作用, 少数载流子保持平衡浓度所得出的结果。将 (2-12) (2-13) 代入 (2-14) (2-15) 我们得到:

$$i_n(-d) = q \frac{D_n}{L_n} \coth\left(\frac{d_p}{L_n}\right) \times \frac{n(-d')^2}{n_A} \quad (2-16)$$

$$i_p(+d) = q \frac{D_p}{L_p} \coth\left(\frac{d_n}{L_p}\right) \times \frac{n(+d')^2}{n_D} \quad (2-17)$$

引入重掺杂区的 P 区少子饱和电流密度  $i_{ns}$  和 N 区少子饱和电流密度  $i_{ps}$ :

$$i_{ns} = q \frac{D_n}{L_n} \coth\left(\frac{d_p}{L_n}\right) \times n_p = q \frac{D_n}{L_n} \coth\left(\frac{d_p}{L_n}\right) \times \frac{n_i^2}{n_A} \quad (2-18)$$

$$i_{ps} = q \frac{D_p}{L_p} \coth\left(\frac{d_n}{L_p}\right) \times p_n = q \frac{D_p}{L_p} \coth\left(\frac{d_n}{L_p}\right) \times \frac{n_i^2}{n_D} \quad (2-19)$$

则式 (2-16) (2-17) 可以表示为:

$$i_n(-d) = i_{ns} \times \left(\frac{n(-d')}{n_i}\right)^2 \quad (2-20)$$

$$i_p(+d) = i_{ps} \times \left(\frac{n(+d')}{n_i}\right)^2 \quad (2-21)$$

将 (2-10) (2-11) 代入 (2-20) (2-21), 可以得到

$$i_n(-d) = i_{ns} \left[ \frac{\Delta N_j d}{n_i L} \coth\left(\frac{d}{L}\right) \right]^2 \times \left[ 1 + B \tanh^2\left(\frac{d}{L}\right) \right]^2 \quad (2-22)$$

$$i_p(+d) = i_{ps} \left[ \frac{\Delta N_j d}{n_i L} \coth\left(\frac{d}{L}\right) \right]^2 \times \left[ 1 - B \tanh^2\left(\frac{d}{L}\right) \right]^2 \quad (2-23)$$

为了获得 I-V 特性, 考虑 PIN 结的电压, 在两个重掺杂区, 由于注入载流子很少, 电压降可以忽略, 因此, 总电压是两个空间电荷区上的电压降  $U_l$  和  $U_r$  与中间本征区的电压降  $U_m$  之和:

$$U = U_l + U_m + U_r \quad (2-24)$$

$U_m$  是电势场  $E(x)$  在整个中间本征区的积分, 即:

$$U_m = \int_{-d'}^{+d'} E(x) dx \quad (2-25)$$

为了求解  $E(x)$ , 我们考虑电流密度方程:

$$i = q [\mu_n n(x) + \mu_p p(x)] E(x) + k_0 T \left( \mu_n \frac{dn}{dx} + \mu_p \frac{dp}{dx} \right) \quad (2-26)$$

中间的本征区可以认为是准中性区域, 即可以认为在中间本征区满足:

$$n(x) = p(x), \quad \frac{dn}{dx} = \frac{dp}{dx} \quad (2-27)$$

由此我们可以把 (2-27) 写成下面的形式:

$$E(x) = \frac{i}{q(\mu_p + \mu_n)n(x)} - \frac{b-1}{b+1} \frac{k_0T}{q} \frac{dn}{dx} \frac{1}{n(x)} \quad (2-28)$$

这样, 电场强度实际上是由两部分构成的, 一部分和电流密度成正比, 另一部分和载流子的分布相关。考虑到式 (2-7), 我们得到

$$U_m = \frac{k_0T}{q} \frac{i}{i_m} \frac{8b}{(b+1)^2} \frac{\sinh \frac{d}{L}}{\sqrt{1-B^2 \tanh^2 \left( \frac{d}{L} \right)}} \times \arctg \left\{ \sqrt{[1-B^2 \tanh^2 \left( \frac{d}{L} \right)] \sinh \left( \frac{d}{L} \right)} \right\} + \frac{k_0T}{q} \frac{b-1}{b+1} \times \ln \left[ \frac{1+B \tanh^2 \left( \frac{d}{L} \right)}{1-B \tanh^2 \left( \frac{d}{L} \right)} \right] \quad (2-29)$$

为了求解两个空间电荷区的电压降  $U_l$  和  $U_r$ , 我们写出在  $\pm d'$  处的载流子浓度分布:

$$n(-d') = n_i \exp\left(\frac{qU_l}{k_0T}\right) \quad (2-30)$$

$$n(+d') = n_i \exp\left(\frac{qU_r}{k_0T}\right) \quad (2-31)$$

将上式代入 (2-7) 得到:

$$i_m = \frac{2qL}{\tau} \frac{\tanh(d/L)}{\sqrt{1-B^2 \tanh^4(d/L)}} \times n_i \exp[(U_l + U_r)q/2k_0T] \quad (2-32)$$

由式 (2-9) 和 (2-32), 我们得到  $U_l + U_r$  的值:

$$U_l + U_r = \frac{2k_0T}{q} \ln \left[ \frac{\Delta N_j}{n_i} \frac{d}{L} \coth \left( \frac{d}{L} \right) \times \sqrt{1-B^2 \tanh^4(d/L)} \right] \quad (2-33)$$

在前面求解偏微分方程的结果中, 参数  $B$  的具体值还没有给出,  $B$  是一个很复杂的量, 为明了起见, 引入参量:

$$n_1 = \frac{1}{n_i} \frac{2}{\sqrt{b} + \sqrt{1/b}} \frac{d}{2qn_i D} \sqrt{i_{ns} i_{ps}}, \quad s = \sqrt{b \frac{i_{ps}}{i_{ns}}} \quad (2-34)$$

我们可以得到  $B$  的表达式<sup>[36]</sup>:

$$B = \frac{1 + 2(s + 1/s)\Delta N_j n_1}{2(s - 1/s)\Delta N_j n_1} \times \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left[ \frac{2(s - 1/s)\Delta N_j n_1}{1 + 2(s + 1/s)\Delta N_j n_1} \right]^2} \times \left[ 1 + \frac{(b - 1)/(b + 1) \tanh^2(d/L)}{(s - 1/s)\Delta N_j n_1} \right] \right\} \quad (2-35)$$

至此，我们得到了 PIN 结的各个重要量的方程，式 (2-7) 给出了注入载流子在本征区的分布，式 (2-9)、(2-22)、(2-23) 描述了三个电流分量，并通过 (2-1) 描述总电流密度  $i$ ，式 (2-29)、(2-33) 描述了电压分量，并通过式 (2-24) 描述总电压  $U$ ，所有的量通过式 (2-35) 联系起来。

## §2.2. 可调谐光衰减器的设计

在可调谐光衰减器的设计中，要考虑的主要设计指标包括器件的衰减量、电功耗、插入损耗、偏振相关损耗、响应时间等。

可调谐光衰减器一般要求响应时间小于几个毫秒，利用硅的等离子体色散效应，通过载流子注入方法实现光调制相对于采用热光效应实现光调制具有更快的响应时间，一般响应时间可以做到微秒量级，所以本论文采用载流子注入方法实现光衰减器，器件的响应时间是比较容易满足应用需求的。

本论文设计的可调谐光衰减器采用直波导的结构。直波导结构与马赫-曾德干涉仪结构相比，波导结构简单，不需要对光信号进行分束和耦合，所以插入损耗和偏振相关损耗都比较小，并且工艺容差较大，更有利于降低成本和提高成品率。

可调谐光衰减器的衰减量和电功耗是相关的，这种关系表现为器件的衰减特性。由于直波导结构的光衰减器直接利用载流子注入改变吸收系数来实现光功率的衰减，相对于马赫-曾德干涉仪结构，在相同的器件尺寸下实现同样的衰减量，直波导结构要求对载流子浓度的改变一般会更大，所以会增大器件的电功耗。例如，采用马赫-曾德干涉仪结构，通常需要光信号的相位变化小于  $\pi$ ，假设调制长度为 1mm，则根据等离子体色散关系，可以求得实现  $\pi$  相移所需要的注入载流子浓度约为  $2.03 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，而如果采用直波导结构，仍假设调制长度为 1mm，要实现 20dB 的衰减量，需要的注入载流子浓度约为  $3.18 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，需要注入的载流子浓度增大了一个量级，这就需要更大的电功耗来实现所需要的载流子注入浓度，所以在直波导结构可调谐光衰减器的设计中，努力降低器件的电功耗是器件设计中很重要的一个方面。在本论文中，我们设计了衰减量为 20dB 的直波导可调谐光衰减器，我们希望通过改进设计和优化参数，可以降低直波导 VOA 的电功耗。

### 2.2.1. 脊型波导横向 PIN 结构分析

如图 2.5 所示是基于 SOI 材料的脊型波导横向 PIN 结构<sup>[37]</sup>的示意图，该结构在

载流子注入中被广泛采用。它是在基于 SOI 材料的大截面脊型波导上制作了横向的 PIN 结，其中 SOI 材料的器件层硅为高阻硅，掺杂浓度小于  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ，P<sup>+</sup>和 N<sup>+</sup>层为重掺杂层，掺杂浓度为  $10^{18} - 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 。

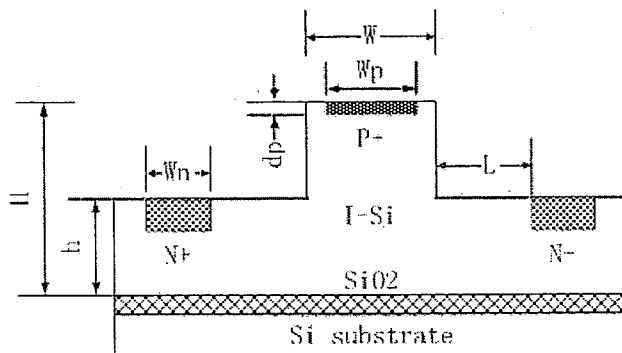


图 2.2 脊型波导上制作的硅调制器

很多人做了脊型波导横向 PIN 结性质的模拟和实验工作<sup>[38,39]</sup>，这里总结一下脊型波导横向 PIN 结的性质。定义图 2.2 中的结构参数如下：

- H=SOI 材料器件层厚度；
- h=脊型波导的脊外高度；
- W=脊型波导宽度；
- L=两个重掺杂区的横向间距；
- W<sub>p</sub>=P 型重掺杂区的宽度；
- d<sub>p</sub>=P 型重掺杂区的掺杂深度；
- W<sub>n</sub>=N 型重掺杂区的宽度；
- d<sub>n</sub>=N 型重掺杂区的掺杂深度。

我们将脊型波导横向 PIN 结的性质总结在下表中：

表 2.1 脊型波导横向 PIN 结的性质

增大	最大调制深度	功耗	插入损耗
横向间距 L	减小	增大	略减小
P 区宽度 W <sub>p</sub>	略增大	略减小	基本无影响
P 区掺杂深度 d <sub>p</sub>	增大	减小	增大
N 区宽度 W <sub>n</sub>	略增大	增大	基本无影响
N 区掺杂深度 d <sub>n</sub>	增大	略有减小	基本无影响

运用 PIN 结注入载流子的理论很容易解释横向 PIN 结的上述性质：

- 1) 横向间距 L 实际上是反映 PIN 结中本征区长度的一个参量，增大 L 时，注入载流子进入光场区域前的扩散长度会增加，因而会减小调制深度和增大器件的功耗，但增大 L 时，光场受到的限制会有所减小，能够在一定程度上减小器件的

吸收损耗，不过，由于光场主要是由脊型波导的几何参数  $H$ 、 $h$  和  $W$  决定的， $N$  型重掺杂区一般在光场之外，所以插入损耗的改变是很小的。如果我们减小  $L$ ，会得到相反的结果，调制深度增大，功耗降低，插入损耗略有增大。

- 2) 增大  $P$  区宽度  $W_p$  相当于增大了  $P$  型重掺杂区的注入面积，但由于  $W_p$  一般和脊型波导宽度  $W$  相当，所以会相应的使中间本征区变大，两者相互抵消，对器件的影响不是很大，并且  $W_p$  受到脊型波导的几何尺寸限制，一般变化不大。
- 3) 增大  $P$  区掺杂深度  $d_p$ ，相当于在增大重掺杂区厚度的同时使本征区变小，所以调制深度增大，功耗减小，但光场受限制增强，由于在脊型波导调制结构中， $P$  型重掺杂区担当了限制光场的作用，所以增大  $d_p$  对插入损耗的影响是比较大的。
- 4) 增大  $N$  型重掺杂区的宽度  $W_n$  相当于增大了  $N$  型区的注入面积，但这和  $P$  型区不同，在脊型波导横向 PIN 结构下，增大的  $W_n$  部分所对应的横向间距  $L$  相当于也增大了，并使得本征区增大很快，相应降低了载流子的利用率，所以会增大功耗。
- 5) 增大  $N$  区掺杂深度  $d_n$  事实上相当于增大了  $N$  型重掺杂区的注入面积，却不增加本征区的大小，所以会增大调制深度，减小功耗，但由于掺杂工艺的限制，在保证掺杂浓度的情况下， $d_n$  的改变范围往往是很小的，所以功耗只是略有减小。同样，由于对光场的影响较小，所以增大  $d_n$  对插入损耗的影响也较小。

以上我们已经分析了影响脊型波导横向 PIN 结构性质的各种因素，也分析了横向 PIN 结构下各结构参数对调制器的影响，我们发现： $L$  的取值是考虑光场宽度，PIN 结电学特性和工艺参数三个因素平衡的结果，一般变化不大； $P$  区的宽度  $W_p$  的改变对器件的影响不大，并且由于脊型波导几何尺寸的限制， $P$  区的变化范围也很小； $N$  区的面积增加虽然可以增大  $N$  区的载流子注入面积，但面积增加越多，增加部分的横向 PN 间距越大，反而会使得器件的功耗增加；增大  $d_n$  可以在不改变 PN 间距  $L$  的情况下增大注入面积，从而提高器件的调制深度，降低功耗，但受到掺杂工艺的限制， $d_n$  的变化范围非常有限。因此，在脊型波导横向 PIN 结构中，很难通过结构参数的调整来降低器件的电功耗，要实现降低器件电功耗的目的，必须提出新的结构。

### 2.2.2. 双脊波导横向 PIN 结构

根据上一节中对影响器件电功耗的各种因素的分析，我们提出双脊波导横向 PIN 结构，来增大 PIN 结的注入面积，提高载流子的利用率。双脊波导的横向 PIN 结构如图 2.3 所示，该结构是在脊型波导的基础上，通过二次刻蚀形成第二脊。与原来脊型波导横向 PIN 结构通过在波导两侧的表面掺杂形成  $N$  型重掺杂区不同，双脊波导结构通过侧壁扩散形成  $N$  型重掺杂区。这样，充分利用脊型波导两侧的硅层厚度来扩展注入面积，可以在不改变横向间距的情况下增大  $N$  区的注入面积。在双



脊波导区, 第二脊的宽度在两个边界值之间逐渐变化, 从而起到模斑转换器的作用。

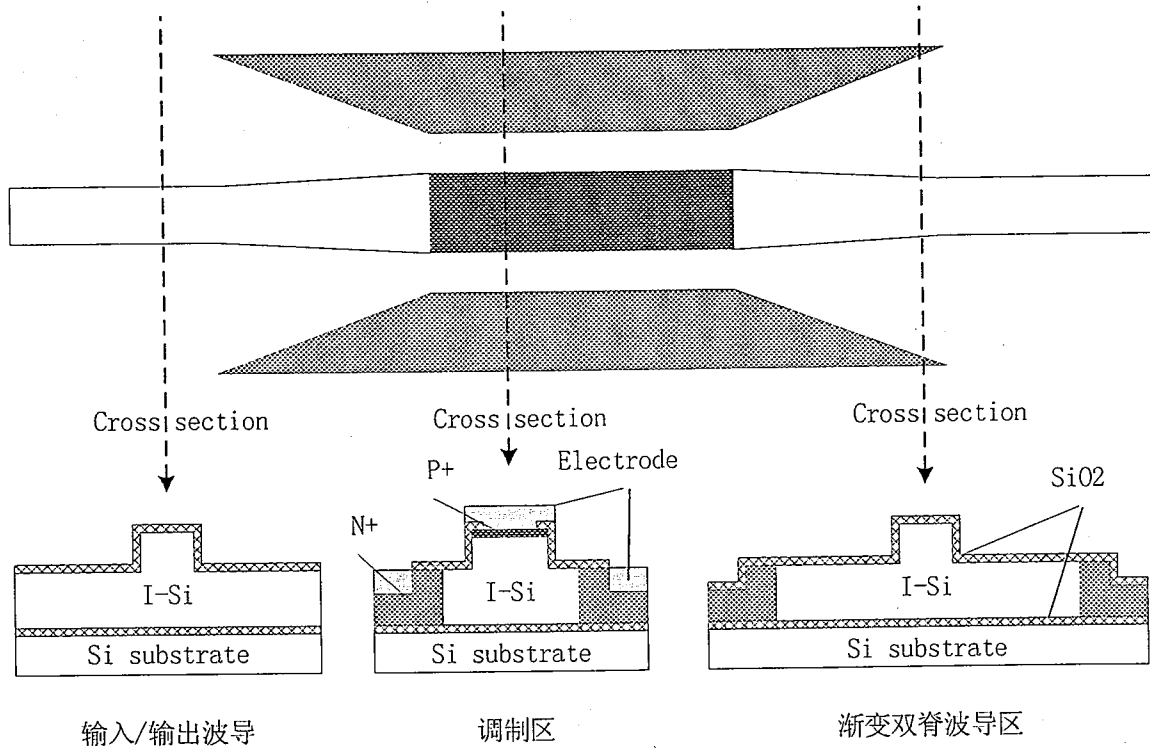


图 2.4 可调谐光衰减器的结构示意图

## §2.3. 可调谐光衰减器的性能分析和参数优化

### 2.3.1. 双脊波导横向 PIN 结构的近似分析模型

严格的讲, 必须运用有限元分析的方法才能给出双脊波导横向 PIN 结构的较准确描述, 但是, 通过将结构适当简化, 仍然可以通过一般 PIN 结的理论来分析双脊波导横向 PIN 结构的性质, 赵策洲等<sup>[37]</sup>假定载流子在波导截面中沿纵向均匀分布, 在横向上分析了脊型波导横向 PIN 结构的性质, 结果与用有限元法所作的分析相符合。对于双脊波导横向 PIN 结构, 我们认为, 载流子沿纵向的行为不能忽略, 为此, 我们将 PIN 结构做了变形, 结果如图 2.5 所示。图中中间的虚线将器件分为左右两个部分, 可以认为两部分是并联的, 所以我们只需要考虑其中任何一部分的性质。我们希望将双脊波导横向 PIN 结构等效成简单的 PIN 结构, 在我们选择的参数中, P 型区的半宽  $W/2$  和 N 型区的纵向宽度  $h_1$  的大小基本上是相等的(不相等的情况下, 可以取两者的平均值来估算), 本征区的长度可以参照光场的中心点分成  $L_1$ ,  $L'$ ,  $L_2$  三个部分, 其中  $L'$  的值我们参照集成电路中电阻线的近似方式, 取折线长度的一半, 两个重掺杂区的掺杂深度仍然取原来横向 PIN 结构下的值, 这样, 我们就可以将器件等效成如图 2.5 (b) 所示的形式。该 PIN 结构的 P 型区宽度为  $d_p$ , N 型区

宽度为  $d_n$ ，中间本征区宽度  $2d=L_1+L'+L_2$ 。虽然这种转换过程是近似的，不能准确计算双脊波导横向 PIN 结构的各个参量，但用于预测以及粗略的估算横向 PIN 结构的性质还是合适的。

根据式 (1-4)，通常在衰减器的设计中，根据所需要的衰减量的大小确定载流子的注入浓度  $\Delta N_j$ ，在分析各个参数对调制器的影响时， $\Delta N_j$  可以做为已知量来考虑。另外，在重掺杂的情况下，载流子的扩散系数  $D_p, D_n$  以及扩散长度  $L_p, L_n$  的值随浓度的变化也很小，可以认为基本不变。这样，影响调制器性能的结构参数和工艺参数在重掺杂区中主要是掺杂深度  $d_p, d_n$  和掺杂浓度  $n_A, n_D$ ，在本征区，主要是本征区的半长  $d$ ，这里  $d=(L_1+L_2+L')/2$ 。我们可以通过优化这些参数来改善可调谐光衰减器的衰减特性。

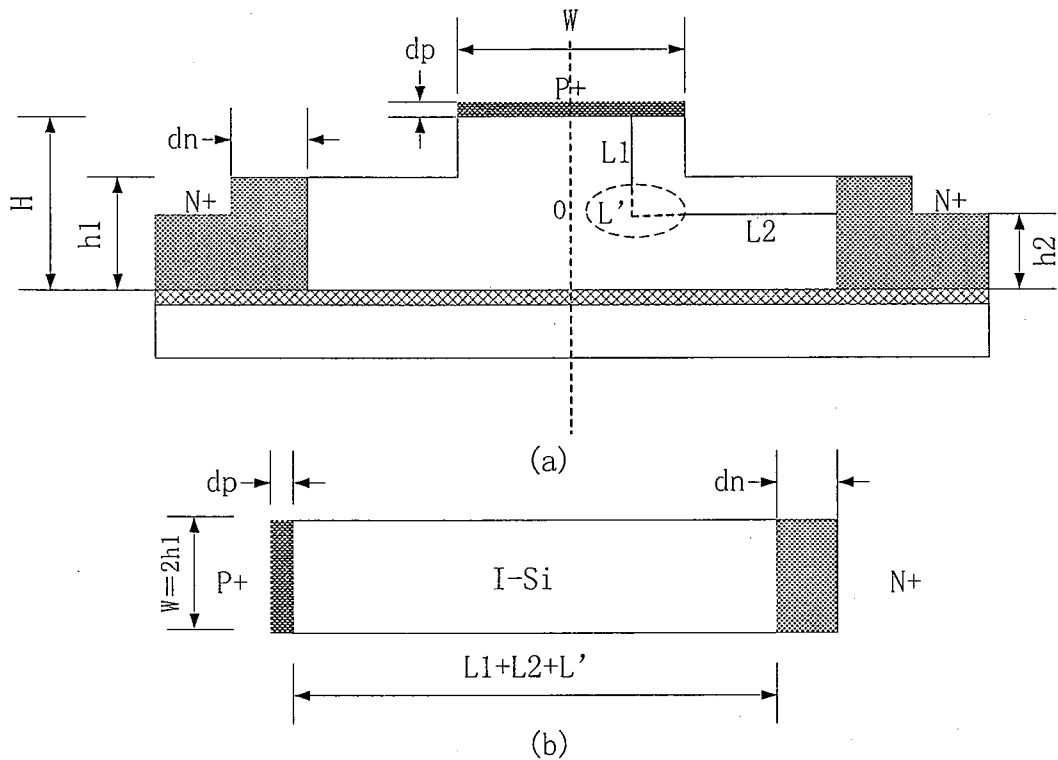


图 2.5 双脊波导上的 PIN 结构的近似分析模型

### 2.3.2. 可调谐光衰减器衰减特性的分析和参数优化

可调谐光衰减器的衰减特性主要指光功率的衰减量和器件电功耗之间的关系，衰减量定义为：

$$A = -10 \lg(I_0 / I) \quad (2-36)$$

其中  $I$  为有调制时的透射强度， $I_0$  为输入光强。根据吸收系数的定义：

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2-37)$$

其中  $\alpha$  是吸收系数,  $x$  为光信号传播距离。联立式 (2-36) 和 (2-37), 我们可以得到衰减量和吸收系数的关系:

$$A = -10\alpha \cdot x \cdot \lg e \quad (2-38)$$

可见衰减量  $A$  和吸收系数及光信号传播距离 (即调制区的长度) 成正比。通常来说我们希望器件的尺寸不要太大, 即  $x$  的取值较小, 所以主要通过增大吸收系数来提高器件的衰减量。根据自由载流子色散关系式 (1-4), 吸收系数和平均注入载流子浓度  $\Delta N_j$  成正比。而平均注入载流子浓度  $\Delta N_j$  又可以和功耗联系起来。这样, 就可以找到衰减量和功耗的关系。

由于注入机理的复杂性, 在大注入的情况下, 很难建立器件电功耗和衰减量之间的简单数学关系式, 要分析和优化器件的衰减特性, 有两种方法可以选择。一种是在一定电功耗的情况下, 分析如何优化参数, 来实现最大的衰减量; 另一种是在满足一定的衰减量的情况下, 分析如何优化参数来降低电功耗。由于在设计中我们总是先设定一个衰减量的目标, 并且衰减量  $A$  和平均注入载流子浓度  $\Delta N_j$  成正比, 所涉及的物理量关系相对简单, 所以我们选择第二种方法来优化器件的衰减特性。

器件的电功耗是电流和电压的乘积, 我们降低器件的电功耗, 需要在保证衰减量的情况下, 尽量降低器件的电流和电压。在 PIN 结构中, 根据公式 (2-1), 总的电流密度  $i$  是由少子扩散电流密度  $i_n(-d)$ 、 $i_p(+d)$  和本征区的复合电流  $i_m$  三个部分构成的; 根据公式 (2-24), 总电压  $U$  是由空间电荷区上的电压降  $U_l$ 、 $U_r$  以及本征区的电压降  $U_m$  三部分构成的。对少子扩散电流, 根据式 (2-22)、(2-23), 其受到的参数影响基本一致, 所以可以统一考虑, 这样, 分析各个参数对电流的影响时, 主要分析其对少子扩散电流  $i_n(-d) + i_p(+d)$  以及本征区复合电流  $i_m$  的影响。根据式 (2-29) 和 (2-33), 我们可以统一考虑 PIN 结两端的总电压  $U$ , 所以只需考虑各个参数对总电压  $U$  的影响。

表 2.2 影响电功耗的因素及其影响参数

影响功耗的因素及构成		影响参数	参考公式
电 流 密 度	少子扩散电流密度: $i_n(-d) + i_p(+d)$	$d_p$ 、 $d_n$ 、 $n_A$ 、 $n_D$	(2-22)、(2-23)
	本征区复合电流密度: $i_m$	$d/L$	(2-9)
电压: $U_l + U_r + U_m$		$d_p$ 、 $d_n$ 、 $n_A$ 、 $n_D$ 、 $d/L$	(2-29)、(2-33)

根据双脊波导 PIN 结构的近似分析模型, 我们主要分析重掺杂区掺杂深度  $d_p$ 、 $d_n$  和掺杂浓度  $n_A$ 、 $n_D$ , 本征区半长  $d$  等结构和工艺参数对电流和电压的影响, 进而得到各个参数的优化值, 其中由于在数学关系中本征区半长  $d$  和双极扩散长度  $L$  是

紧密相关的,在优化参数时通常是考虑本征区的半长  $d$  与双极扩散长度  $L$  的比值  $d/L$  的值。在表 2.2 中列出了影响电功耗的因素及其影响参数。

根据所用 SOI 材料的性质,在以下的分析计算中,我们设少子扩散系数  $D_p=1.4\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $D_n=1.9\text{cm}^2/\text{s}$ , 少子扩散长度  $L_p=1.88\mu\text{m}$ ,  $L_n=2.2\mu\text{m}$ ; 本征区的载流子迁移率  $\mu_p=500\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_n=1400\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , 双极扩散系数  $D=18\text{cm}^2/\text{s}$ , 双极寿命  $\tau=200\text{ns}$ , 对应双极扩散长度  $L=18.9\mu\text{m}$ 。

### 2.3.2.1. 重掺杂区掺杂深度 $d_p$ 和 $d_n$ 的优化:

重掺杂区的掺杂深度  $d_p$  和  $d_n$  影响少子扩散电流和电压。重掺杂区掺杂深度  $d_p$ ,  $d_n$  和少子扩散电流密度的关系如图 2.6 所示,可以看到杂质掺杂深度  $d_p$  和  $d_n$  对少子扩散电流  $i_p(+d)+i_n(-d)$  的影响很大,  $d_p$  和  $d_n$  的值越小, 电流密度增长越快, 当  $d_p$  和  $d_n$  大于某个值时, 电流密度基本趋于稳定。为了减小少子扩散电流, 掺杂深度应当选择大一些。图 2.11 是掺杂深度和 PIN 两端电压的关系, 可以看到  $d_p$  和  $d_n$  对电压的影响不大, 引起的电压变化范围约为十分之几伏, 与  $d_p$  和  $d_n$  对电流密度的影响相似,  $d_p$  和  $d_n$  取值越小, 电压越大, 当  $d_p$  和  $d_n$  高于某个值的时候, 电压基本稳定, 不再变化。其实这是很容易解释的, 我们在求解方程中总认为在金属电极和重掺杂区的界面有足够的表面复合, 从而不存在过剩载流子。少子在重掺杂区有一个很短的扩散长度, 当掺杂深度小于这个扩散长度时, 其对少子扩散电流和电压影响较大, 当掺杂深度和少子扩散长度相当或大于少子扩散长度时, 其对电流和电压的影响就较小, 从而出现了我们所看到的结果。

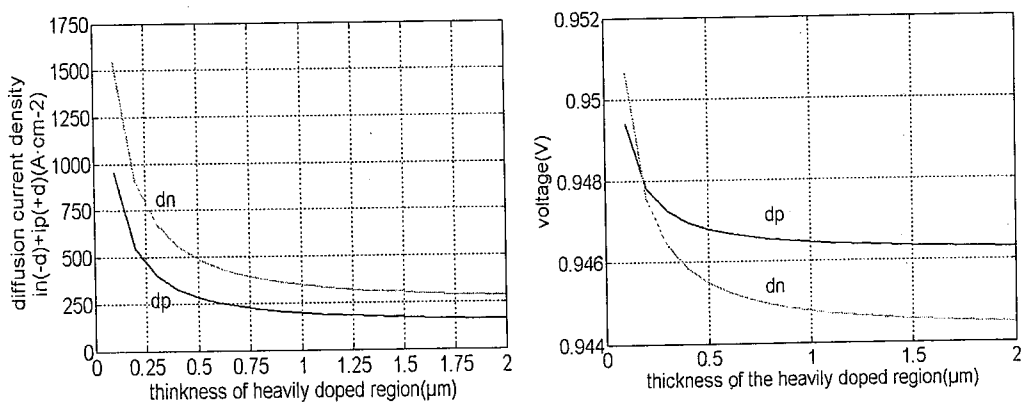


图 2.6 掺杂深度与少子扩散电流的关系 图 2.7 掺杂深度和 PIN 两端电压的关系

总的来讲, 我们需要掺杂深度的取值大一些来减小少子扩散电流和总电压, 但由于掺杂深度太大很难保证掺杂浓度, 并且需要考虑掺杂对光场的影响, 所以必须适当选择掺杂深度  $d_p$  和  $d_n$ , 一般  $d_p$  为  $0.5\mu\text{m}$  左右,  $d_n$  为  $1\mu\text{m}-2\mu\text{m}$  左右。

### 2.3.2.2. 重掺杂区的掺杂浓度 $n_A$ 和 $n_D$ 的优化:

重掺杂区的掺杂浓度  $n_A$  和  $n_D$  对少子扩散电流和电压有影响。图 2.12 是掺杂浓

度和总的少子扩散电流的关系。可以看到掺杂浓度越高，少子扩散电流越小，为了使得少子扩散电流尽量的小，我们必须有足够的掺杂浓度。通常掺杂浓度要比注入浓度高出 1—2 个数量级，才能保证少子扩散电流足够小。如图 2.13 是重掺杂区掺杂浓度和 PIN 结两端电压的关系，可以看到掺杂浓度较高时，总电压会变小。掺杂浓度对电压的影响还是比较小的，一般百分之几伏特。

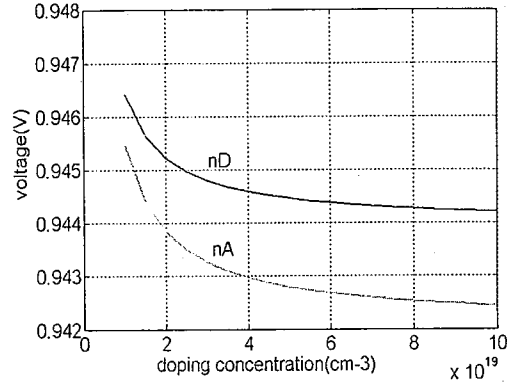
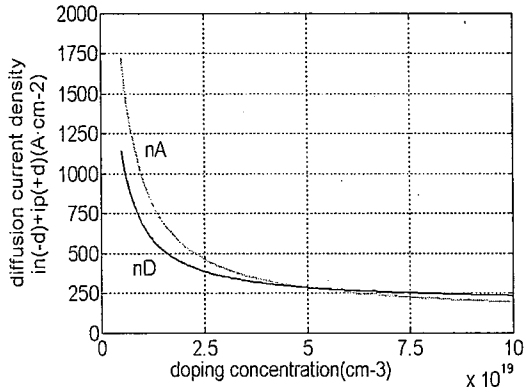


图 2.8 掺杂浓度和少子扩散电流关系

2.9 掺杂浓度和 PIN 结两端电压关系

为了减小少子扩散电流和总电压，我们希望获得较高的掺杂浓度，但掺杂浓度往往受到杂质在硅中固熔度的限制，并且掺杂浓度过高的情况下，硅半导体会发生简并，杂质不能完全电离。通常选择掺杂浓度在  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3} - 2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$  之间。

以上分析了重掺杂区的掺杂深度和掺杂浓度对少子扩散电流和电压的影响，并给出了参数的优化值。实际上，由式 (2-22) 和 (2-23) 可以看出，重掺杂区主要通过少子饱和电流  $i_{ns}$ ,  $i_{ps}$  来影响少子扩散电流和电压，由式 (2-34) 可以知道，影响参数 B 的  $n_1$  和  $s$  实际上也是表征了  $i_{ns}$ ,  $i_{ps}$  的影响。为了减小电流和电压，我们都希望减小  $i_{ns}$  和  $i_{ps}$ ，根据式 (2-18) 和 (2-19)，在可以改变的量中，我们可以适当增大  $d_p$ ,  $d_n$ ，但最重要的，我们必须增大掺杂浓度。

2.3.2.3. 本征区半长和双极扩散长度比值  $d/L$  的优化:

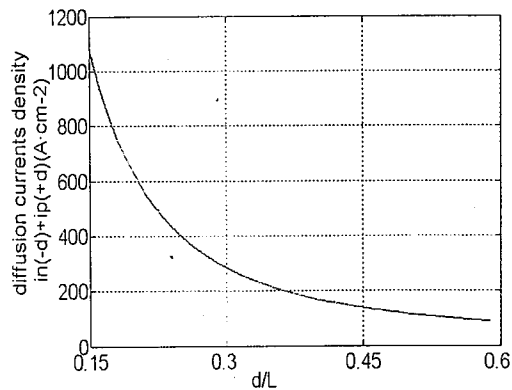
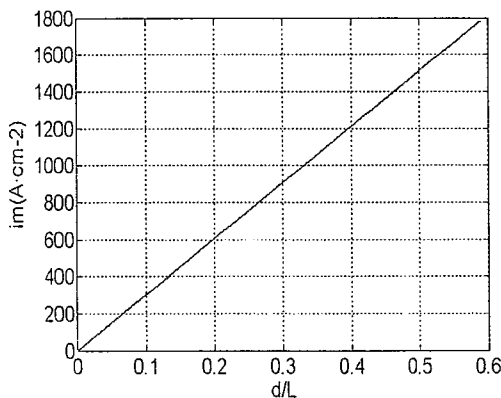


图 2.10  $d/L$  和本征区复合电流密度的关系

2.11  $d/L$  和少子扩散电流密度的关系

在本征区中，本征区的半长  $d$  影响电流和电压的各个分量进而影响总的功率。在优化参数时通常是考虑本征区的半长  $d$  与双极扩散长度  $L$  的比值  $d/L$  的值，为此，将 (2-9) 式做如下变形：

$$i_m = \frac{2qL\Delta N_j}{\tau} \times \frac{d}{L} \quad (2-39)$$

由上式可以看出，在注入载流子浓度一定的情况下，本征区的复合电流密度  $i_m$  是和  $d/L$  成正比的，图 2.14 是  $d/L$  和本征区复合电流密度的关系。通常为了使得发热不影响器件正常工作，我们希望将电流密度控制在  $1 \times 10^3 \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，所以希望  $d/L$  的值小一些。

从另一个方面考虑， $d/L$  也不能太小，因为  $d/L$  也会对少子扩散电流密度产生影响， $d/L$  减小时，少子扩散电流密度变大，会增加器件的功耗。图 2.15 是  $d/L$  和少子扩散电流密度的关系，可以看到，少子扩散电流密度随  $d/L$  的减小是增大的，这和本征区复合电流的变化刚好相反。为此，我们计算了  $d/L$  和总电流密度的关系，如图 2.12 所示：

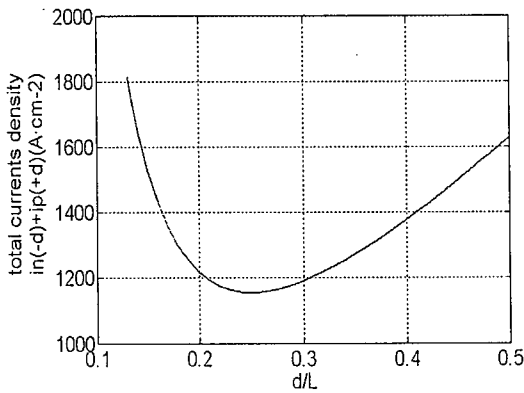


图 2.12  $d/L$  和总电流密度的关系

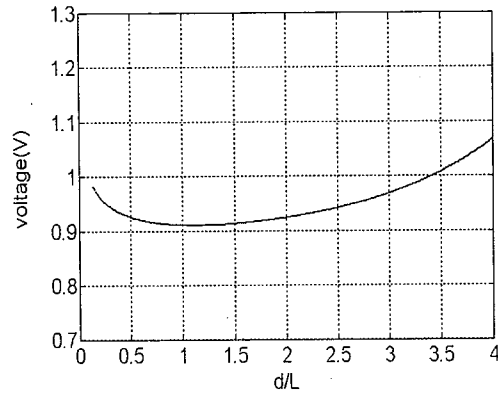


图 2.13  $d/L$  和 PIN 结两端电压的关系

可以看到，由于少子扩散电流密度和本征区复合电流密度的共同影响， $d/L$  有一个最佳值，使得总的电流密度最小，这个值在 0.2—0.3 之间。如图 2.13 是  $d/L$  和 PIN 结两端电压的关系，我们可以看到， $d/L$  对总电压的影响不是很显著，在图中的变化范围内小于 0.2V。与  $d/L$  和总的电流密度的关系相似，也存在一个  $d/L$  的最佳值，使得 PIN 结两端电压最小，不过这个  $d/L$  值比较大，在  $d/L$  等于 1 附近。由于  $d/L$  对电流的影响更显著，所以我们主要考虑对电流的影响来优化  $d/L$  的值，一般选择  $d/L$  的值为 0.3 左右。

以上分析了双脊波导横向 PIN 结构中各项参数对功耗的影响，并给出了优化的值。根据双脊波导的横向 PIN 结构的近似模型，如果我们取掺杂深度  $d_p$  为  $0.5 \mu\text{m}$ ， $d_n$  为  $2 \mu\text{m}$ ，P 区和 N 区掺杂浓度均为  $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ， $d/L$  的值为 0.3，则可以得到器件调制区长度为 3.18mm，在衰减量为 20dB 时电功耗约为 215mW。在可调谐光衰

减器的设计中, 根据不同的需求, 可以适当调整这些参数, 来满足设计要求。

### 2.3.3. 注入载流子在本征区分布的分析

通常我们希望注入载流子在整个本征区(光模场区)均匀分布, 根据式(2-7), 可以得到注入载流子在本征区的分布。在  $d/L=0.3$  的情况下, 我们画出了本征区载流子的分布图, 如图 2.14 所示。图 2.14 (a)中纵坐标为线性坐标, 我们可以看到, 载流子分布并不完全对称, 这是由于电子和空穴具有不同的迁移率所致, 但这种影响并不大, 图 2.14 (b)画出了以对数坐标为纵坐标的注入载流子分布, 我们可以看到, 注入载流子在本征区的分布基本上是一致的, 在所设定的条件下, 约为  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。

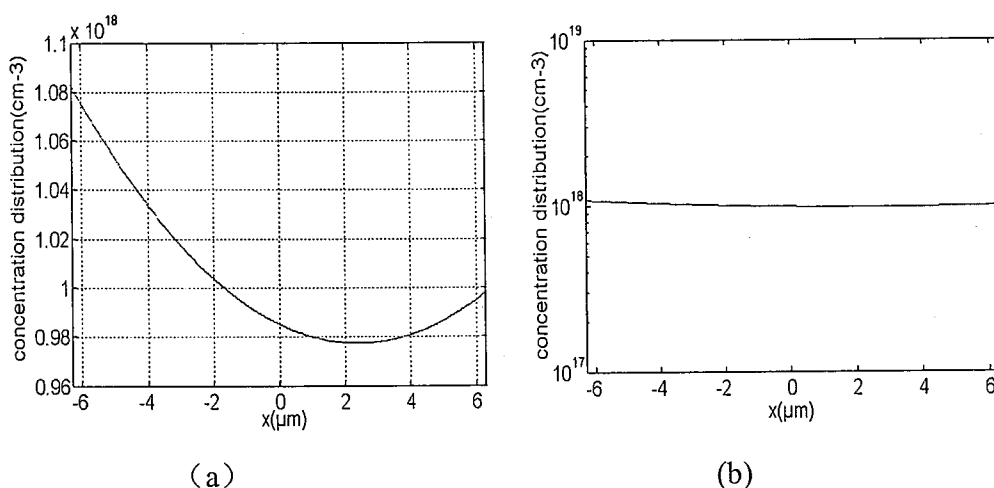


图 2.14 注入载流子在本征区的分布

### 2.3.4. 可调谐光衰减器的插入损耗分析

一般情况下, 可调谐光衰减器的插入损耗主要包括端面耦合损耗和片上损耗(on-chip insert loss)两个部分。端面耦合损耗包括端面反射损耗和模场耦合损耗, 输入输出波导和光纤耦合时的偏移等其他因素也会影响端面耦合损耗。片上损耗是指器件本身的波导结构以及杂质吸收、金属铝电极吸收等因素造成的损耗, 如果可调谐光衰减器和其他器件单片集成应用, 则只需要考虑片上损耗的影响。

波导与空气交界面的菲涅尔反射会造成一定的损耗, 称为端面反射损耗, 其公式为:

$$L = 10 \log \left( 1 - \left( \frac{n_s - n_0}{n_s + n_0} \right)^2 \right) (dB) \quad (2-40)$$

由于在波导的两个端面均有反射损耗, 所以反射损耗要取 2 倍。反射损耗与波导和空气的折射率有关, Si 波导的折射率为  $n_s=3.4223$ , 空气的折射率  $n_0=1$ , 则波导端面与空气两个交界面的菲涅尔反射损耗为 3.098dB。通常可以在波导端面镀增透射

膜来减小端面反射损耗。

输入输出波导和单模光纤的模式失配造成的模场耦合损耗用解析的方法较难处理，一般要采用数值分析的方法来进行模拟。我们采用了 BPM (Beam Propagation Method) 法<sup>[41]</sup>来进行分析，如图 2.16 和 2.17 分别是我们用 BPM 方法对器件的输入/输出单模波导和单模光纤进行模拟得到的光模场分布。利用 BPM Tools 对两个模场进行交集积分，可以得到模场耦合损耗。由于在输入输出都存在模场耦合损耗，所以模场耦合损耗的值要取两倍。BPM Tools 的模场交集积分计算界面如图 2.17 所示，最后求得的模场耦合损耗约为 6.1dB。通常可以用模斑耦合器来减小模式耦合损耗。

根据以上的计算和模拟，端面反射和模场耦合共产生约 9.2dB 的端面耦合损耗。通常在单片集成的应用中，不用考虑端面耦合损耗的问题，所以往往更关心片上损耗的影响。

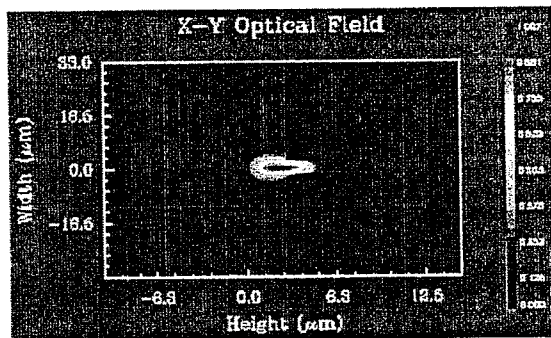


图 2.15 单模脊型波导中的光场分布

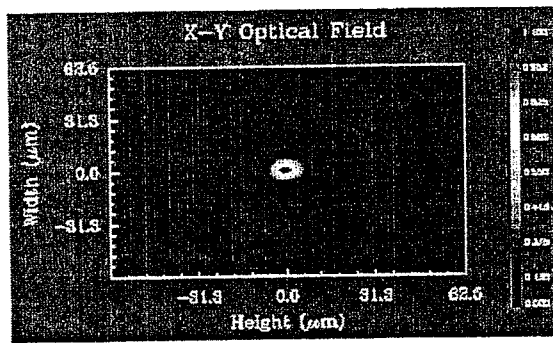


图 2.16 单模光纤中的光场分布

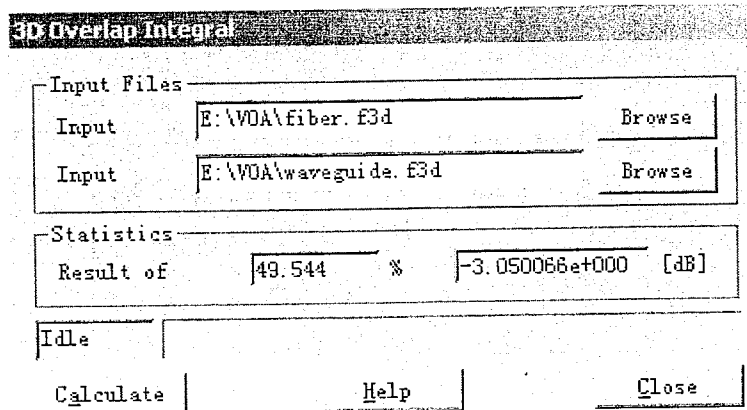


图 2.17 BPM Tools 的模场交集积分计算界面

器件本身的波导结构产生的传输损耗是片上损耗的重要来源，传输损耗也可以用 BPM 法来模拟。在器件设计中，由于输入/输出波导和调制区的双脊波导具有不同的截面，当二者直接连接时由于模场不匹配，会产生很大的损耗，在输入输出波导之间设计的渐变双脊波导区，其双脊波导第二脊宽度值的渐变起到了模斑转换器

中锥形波导的作用，可以减少因模式转换而造成的模式损耗。

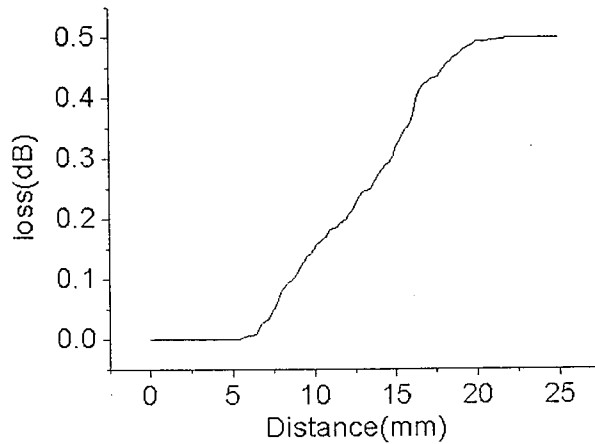


图 2.18 器件的传输损耗特性

如图 2.18 所示是根据 BPM 模拟的结果得到的可调谐光衰减器的传输损耗曲线，我们可以看到，如果仅从波导结构而言，器件的片上损耗小于 0.5dB，这是比较低的。需要说明的是，我们在 BPM 模拟中假设器件的制作工艺是完善的，即不考虑波导表面粗糙度对传输损耗的影响。

除了波导结构造成的传输损耗，还有很多其他因素会影响片上损耗，如重掺杂区产生的杂质吸收损耗、金属铝电极的吸收损耗等。在工艺条件不完善的情况下，这些因素的影响可能会很大，甚至对器件的片上损耗产生决定性的影响。

### 2.3.5. 可调谐光衰减器的响应时间分析

利用载流子注入的方法实现光调制，器件的响应时间主要受到注入载流子复合和寄生电容的影响。由于寄生电容的计算较为复杂，我们主要分析载流子复合对响应时间的影响。

假设本征区中注入的载流子均匀分布，其浓度为  $N$ ，在  $t=0$  的时刻，外加电压停止时，不再产生新的电注入载流子，则  $N$  将随时间减少，单位时间内注入载流子浓度的减少为： $-dN/dt$ ，它是由于载流子的复合引起的，应该等于载流子的复合率。在半导体中，注入载流子的平均生存时间定义为载流子寿命  $\tau$ ，显然单位时间内注入载流子的复合概率为  $1/\tau$ ，所以注入载流子的复合率为  $N/\tau$ ，因此有：

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{N(t)}{\tau} \quad (2-41)$$

假定  $\tau$  为一恒量，与  $N(t)$  无关，式 (1) 的通解为：

$$N(t) = Ce^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2-42)$$

将  $N(0) = N$  代入式 (2) 得到  $C=N$ ，则

$$N(t) = Ne^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2-43)$$

这样就得到了注入载流子随时间衰减的规律。设载流子复合引起的响应时间为  $T$ ，并设  $N(T_1) = 0.9N$ ， $N(T_2) = 0.1N$ ，响应时间定义为：当控制信号改变时，输出光信号从变化量的 10% 到变化量的 90% 所需的时间，所以有：

$$T = T_2 - T_1 \quad (2-44)$$

根据式 (2-43)，可以求得  $T_1 = \ln(10/9) \times \tau$ ， $T_2 = \ln 10 \times \tau$ ，若取  $\tau = 200\text{ns}$ ，则载流子复合引起的响应时间约为  $T = 440\text{ns}$ 。

影响器件响应时间的另一个因素是寄生电容产生的时延，由于寄生电容较为复杂，没有办法通过简单的模型分析。总的来说，寄生电容是非线性电容，和外加电压有关，其电容值受到 PN 结面积和杂质浓度分布状况等因素的影响。寄生电容对器件响应时间影响很大，一般来说，根据不同的器件结构和工艺情况，寄生电容引起的响应时间从几个微秒到几百个微秒。

从以上的分析可以看出，载流子复合引起的响应时间是比较短的，如果能够控制好寄生电容的影响，可调谐光衰减器的响应时间完全可以做到微秒量级。

## §2.4. 本章小结

本章详细介绍了 PIN 结注入载流子的理论，通过对脊型波导横向 PIN 结构的性质的分析，提出了新型的双脊波导横向 PIN 结构，该结构可以扩大载流子注入面积，提高注入载流子的利用率。设计了渐变双脊波导区来减小输入/输出单模波导和调制区双脊波导的模式耦合损耗。器件采用直波导结构，包含输入/输出波导、渐变双脊波导区和调制区三个部分。通过近似处理，提出了双脊波导横向 PIN 结构的分析模型，并根据分析模型优化了影响可调谐光衰减器衰减特性的掺杂深度、掺杂浓度、本征区半长等结构和工艺参数。在参数优化的结果下，得到器件实现 20dB 衰减所需的电功耗约为 215mW。分析了器件的注入载流子分布、插入损耗和响应时间。

## 第三章 可调谐光衰减器的制作

本论文设计的可调谐光衰减器结构简单，因此，器件的制作工艺并不复杂。本章给出完整的器件制作工艺流程，并对可调谐光衰减器制作的关键工艺进行重点介绍，最后给出器件的制作结果。

### §3.1. 可调谐光衰减器制作的工艺流程

我们在可调谐光衰减器制作中采用的是本实验室的 MEMS 加工工艺线，需要根据可调谐光衰减器制作的特殊要求确定相应的工艺参数。根据本实验室的工艺条件，我们采用了如图 3.1 所示的工艺流程，并对整个工艺流程说明如下：

材料：四英寸热键合 SOI 片子，器件层厚度  $5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ ，掺杂类型为 P 型，电阻率  $14 - 22 \Omega\text{cm}$ ，晶向  $\langle 100 \rangle$  方向 ( $\pm 0.2^\circ$ )，衬底硅厚度  $531 \pm 15 \mu\text{m}$ ，氧化层厚度  $1 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 。

- 1) 一次氧化，生成的二氧化硅用于做硼扩散的阻挡层，二氧化硅厚度约为 1800 埃。
- 2) 光刻一，打开硼扩散的窗口。注意由于此时片子表面是平坦的，可以选择厚度较小的光刻胶，我们选择正胶 6809。
- 3) 腐蚀二氧化硅，由于硼扩散受到二氧化硅的阻挡作用很大，所以一定要把二氧化硅去干净，否则严重影响硼扩散的质量。
- 4) 硼扩散和再分布，由于需要制作突变结，并且要求扩散浓度较高，预淀积温度控制一般要求较高，并且预淀积时间也较长。做再分布之前要先用 1: 10 的 HF 溶液漂掉硼硅玻璃，时间一般为 30 秒。再分布的作用主要是使得残余的硼硅玻璃容易去掉，不影响波导的刻蚀，温度一般较低，时间也较短。
- 5) 腐蚀二氧化硅，将二氧化硅全部腐蚀掉，直到表面疏水为止。
- 6) 光刻二，打开干法刻蚀波导第一脊的窗口，由于波导要求的精度非常高，并且对光刻图形边缘的要求也很高，所以一定要用薄胶，并且控制好曝光和显影时间，所选光刻胶为正胶 6809。
- 7) 干法刻蚀波导第一脊。为了保证波导的表面光滑度，选择的反应离子刻蚀的配方为 SM1\_O2，通氧时间 3 秒，刻蚀时间约为 3 分 20 秒，形成波导深度约为  $2 \mu\text{m}$ 。这里特别注意，硼扩散部分和非硼扩散部分的刻蚀速度是不一样的，硼扩散部分的刻蚀速度慢一些，由于输入输出部分要求必须是单模波导，故这里的刻蚀时间选择以非硼扩散部分为准，在测量时也应注意这一点。
- 8) 二次氧化，生成的氧化硅用于作干法刻蚀波导第二脊和磷扩散的掩膜，由于干法刻蚀中反应离子对二氧化硅和硅的选择比较高，所以主要根据磷扩散阻挡层的需要选择二氧化硅的厚度，由于已经在前面做过硼扩散工艺，为了不影响硼扩散形

- 成的突变结，二次氧化必须选择比较低的温度，时间也尽量短一些，二氧化硅的厚度够用即可，我们生长的二氧化硅约 2500 埃。
- 9) 光刻三，打开磷扩散窗口。由于已经刻蚀出波导的第一脊，硅片表面不平整，存在台阶覆盖的问题，必须加涂粘合剂，并选择厚一些的光刻胶，适当调整涂胶时甩胶机的转速，以保证器件表面能够完全被光刻胶覆盖，我们选择正胶 1818，甩胶机的转速为 2000 转/分。
  - 10) 干法刻蚀波导第二脊和磷扩散窗口。选择的干法刻蚀配方为 SM1\_O2，通氧时间 3 秒，刻蚀时间约为 50 秒，形成波导深度约为 1 微米。
  - 11) 磷扩散。与硼扩散相似，希望制作突变结，所以要求扩散浓度较高，预淀积温度控制一般要求较高，并且预淀积时间也较长。做再分布之前要先用 1: 10 的 HF 溶液漂掉磷硅玻璃，时间为 10 秒，预淀积的温度和时间要保证形成制作突变结所需要的浓度和结深。再分布形成的二氧化硅作为溅射金属电极的掩模。
  - 12) 光刻四，打开欧姆接触的窗口。由于此时双脊结构已经形成，所以还必须考虑台阶覆盖问题，要先涂粘合剂，选择正胶 1818，甩胶机转速 2000 转/分。
  - 13) 腐蚀二氧化硅。这一步的腐蚀二氧化硅很关键，由于引线孔做在波导上，所以腐蚀时间长的话会将波导侧面的氧化层也腐蚀掉，腐蚀时间短的话二氧化硅去不干净，影响电极接触。而且，硼扩散的部位二氧化硅腐蚀速度比磷扩散部位二氧化硅腐蚀速度要慢，故在时间控制上要以波导脊上的窗口为准，不能仅看片子是否疏水，腐蚀一小段时间就在显微镜下观察，脊上线条显白亮色则腐蚀完全了。
  - 14) 溅射铝。由于台阶的存在，为能使得铝膜覆盖台阶，选择的溅射功率要小一些，时间要长一些，这样形成的铝膜的质量较好，爬坡较容易，我们选择的功率为 6000 瓦，时间 85 秒，溅射铝厚度约为 1.0 微米—1.2 微米。
  - 15) 五次光刻，打开反刻铝的窗口。仍然是要先涂粘合剂，选择正胶 1818，甩胶机转速 2000 转/分。
  - 16) 反刻铝，形成金属电极。用浓磷酸溶液腐蚀铝膜，温度为 70 度，由于腐蚀过程的化学反应较剧烈，要通过不停地晃动片子，以使得反应生成物不覆盖片子表面，影响腐蚀速度和均匀性。
  - 17) 合金化，在氮气保护下进行合金化，温度为 450 度。
  - 18) 端面抛光。由于在前面工艺中 SOI 片子的器件硅层已经很薄，并经过了磷扩散，器件层硅和 SOI 材料的二氧化硅层之间张力很大，所以正常的抛光过程会将表面硅层掀起，达不到抛光的效果。这里选择 15 微米的磨料磨掉约 500 微米，3 微米的磨料磨掉约 200 微米，抛光液抛光 3 小时左右，则片子端面基本可以达到要求。
  - 19) 压焊点。选择热金的 PCB 版做管脚，压好焊点。注意去掉片子表面的有机物。

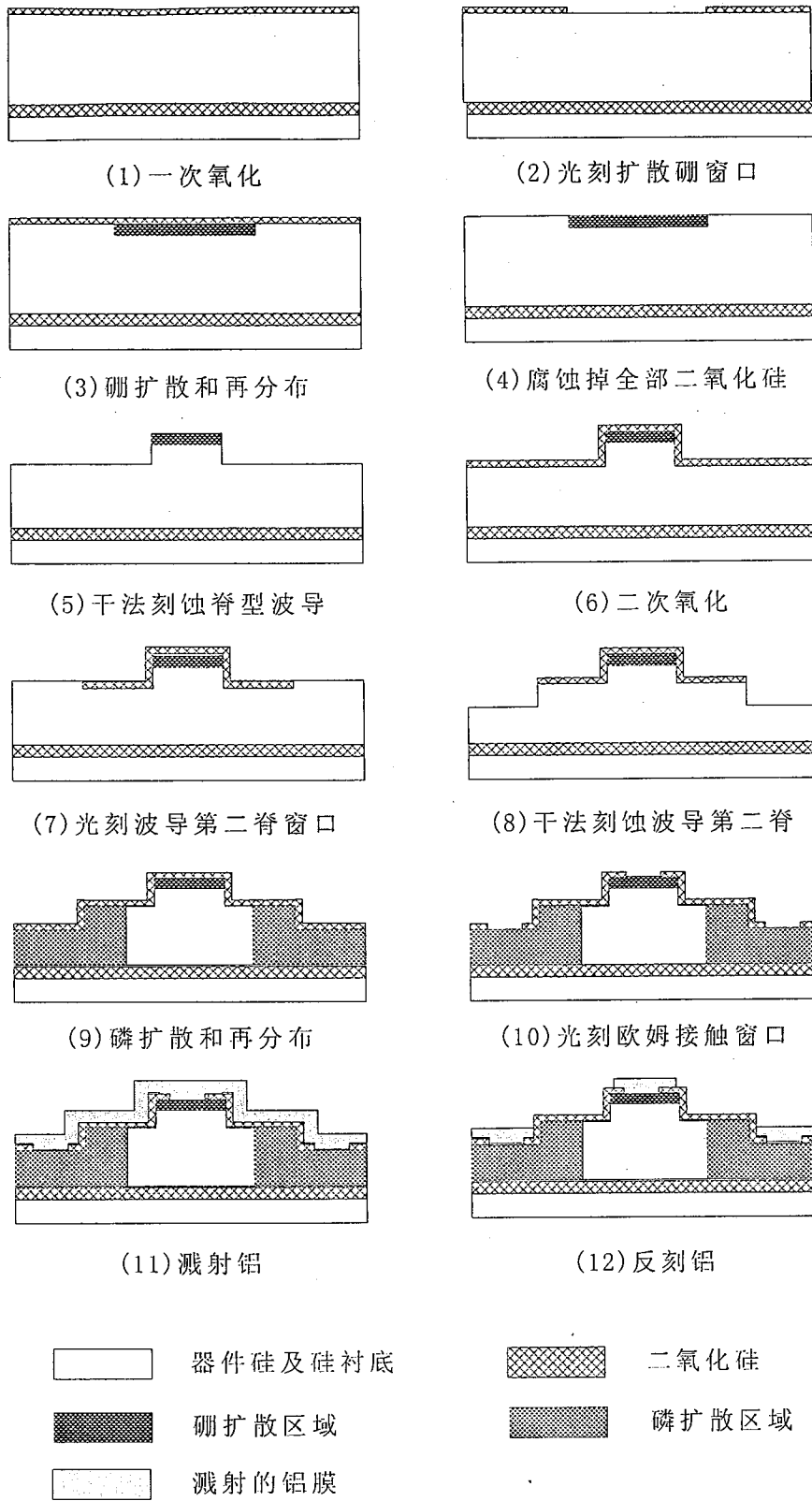


图 3.1 调制区的制作工艺流程

### §3.2. 可调谐光衰减器制作的关键工艺研究

可调谐光衰减器制作的关键工艺包括光刻、热扩散、干法刻蚀光波导和端面抛光等工艺，在每一项工艺中，针对可调谐光衰减器制作的需要，都要适当的选择参数，以获得好的制作结果。

#### 3.2.1. 光刻工艺中的精细结构制作、台阶覆盖和套刻问题

光刻工艺是半导体工艺中进行图形转移的核心工艺，它的好坏直接影响和决定了器件制作的成功与否。在可调谐光衰减器的制作中，波导的结构较为精细，容易浮胶，并且光刻波导图形要求边缘整齐，这就需要适当选择光刻胶、曝光时间和显影时间。器件表面是不平坦的，凸起的波导部分只占整个衬底表面的很小一部分，这就会在涂胶中遇到台阶覆盖的问题。另外，要在宽度为几个微米的波导上光刻图形，对套刻精度的要求非常高。本实验室对光刻有一套标准的工艺流程：涂胶，选择光刻胶的类型，甩胶机转速，旋转时间等参数；前烘，针对光刻胶的厚度，选用合适的前烘温度和时间；曝光，根据光刻胶的厚度和类型，选择合适的曝光时间和曝光强度；显影，根据光刻胶类型选择合适的显影液和浓度，选择合适的显影时间；后烘，选择合适的后烘温度和时间。

对于较为精细的波导结构的制作，我们选择的光刻参数如下：

- 1) 涂胶：先涂粘合剂，防止浮胶，再涂正胶 6809，甩胶机转速 4000 转/分钟，甩胶时间为 15 秒钟。
- 2) 前烘：90 °C 加热板，时间为 120 秒。
- 3) 曝光：使用 Carl Suss MA6 光刻机，曝光时间为 6 秒。
- 4) 显影：使用 Shepley 显影液，显影时间为 20 秒左右。
- 5) 后烘：120 °C 烘箱，时间 25 分钟。

为了解决可调谐光衰减器制作中的光刻胶台阶覆盖问题，我们经过了多次实验，总结出一套合适的光刻参数，并拍摄了截面的电子扫描图片。在存在台阶的情况下，我们采用的光刻参数是：

- 1) 涂胶：先涂粘合剂，再涂正胶 1818，甩胶机转速 2000 转/分钟，甩胶时间为 10 秒钟。
- 2) 前烘：90 °C 加热板，时间为 120 秒。
- 3) 曝光：使用 Carl Suss MA6 光刻机，曝光时间为 6 秒。
- 4) 显影：使用 Shepley 显影液，显影时间为 25 秒左右，根据特别设计的显影标记适当调整。
- 5) 后烘：120 °C 烘箱，时间 30 分钟。

如图 3.2 所示是刻蚀完波导第一脊和第二脊后，按上述参数涂胶的器件截面的扫

描电镜照片，我们可以看出在此参数下，光刻胶覆盖器件表面是没有问题的，但通过对比图 (a)、(b)、(c)、(d)，我们发现在波导脊的顶端，波导与脊下硅层交界处以及在脊下硅层上的光刻胶厚度有很大的差别。在确定显影时间时必须考虑这种差别，我们采用的方法是在器件高度不同的位置分别制作显影标记图形，通过观察显影标记图形来判断显影的程度，并根据每一步工艺的特殊要求来最终确定显影时间。

硼掺杂的窗口是在波导上面光刻产生的，这对光刻套准的精度要求很高，因为如果光刻偏离波导，就会影响波导第一脊的侧面，从而改变光场，为了防止这种情况出现，我们采用了先在器件的调制区大面积扩散硼，再在扩散硼区域光刻出光波导窗口，通过干法刻蚀去掉多余的硼扩散层的办法，从而降低了光刻套准的难度。

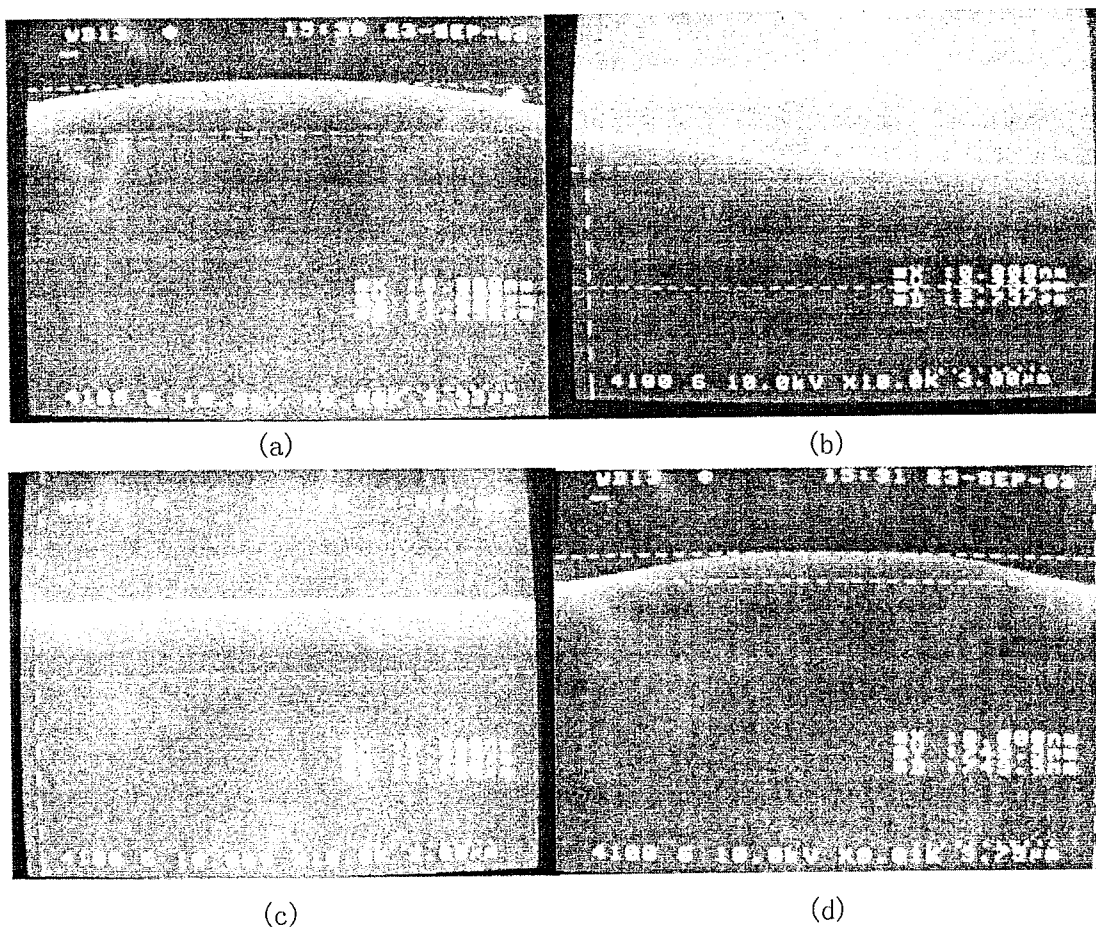


图 3.2 涂胶后的截面扫描电镜照片

### 3.2.2. 热扩散工艺

我们用热扩散的方法实现硼和磷的重掺杂。关于热扩散的原理可以参照参考文献 [42]，一般来说，热扩散可以分为两步：预沉积和再分布，预沉积是一种恒定表面浓度的扩散，也就是说在整个预沉积过程中，硅片的表面浓度保持恒定，这样就可以获得一层浓度很高的掺杂层。再分布是一种限定源扩散，其杂质源是预沉积过程形成的

浓度很高的掺杂层, 没有外来杂质的补充。再分布的过程将原来的高浓度杂质层进一步向硅层内部推进, 通过温度和控制时间的控制来获得合适的掺杂浓度和掺杂深度, 再分布的过程一般通氧气来获得所需要的二氧化硅层。对于可调谐光衰减器的制作, 我们希望获得掺杂浓度很高, 并且界面突变的掺杂层, 所以采用的方法是预淀积的温度较高, 时间较长, 使得掺杂区的掺杂浓度和掺杂深度基本达到设计要求, 其后的再分布温度较低, 时间也较短, 主要是保证掺杂区窗口生长足够厚的二氧化硅薄层, 在以后的工艺中起掩模的作用。

由于再分布的过程中扩散和氧化是同时进行的, 必须考虑杂质在  $\text{SiO}_2$ -Si 界面的分凝效应对扩散分布的影响。一般用分凝系数来表示分凝效应, 当杂质的分凝系数大于 1 时, 意味着在二氧化硅生长过程中, 二氧化硅把杂质排向硅中, 造成  $\text{SiO}_2$ -Si 界面处的硅一侧杂质浓度增大, 这种现象称为“杂质堆积”, 反之, 如果杂质的分凝系数小于 1 时, 在二氧化硅生长过程中, 二氧化硅有吸收更多杂质的倾向, 从而使  $\text{SiO}_2$ -Si 界面处的硅一侧杂质浓度降低, 这种现象称为“杂质丢失”。硼的分凝系数为 0.3, 磷的分凝系数为 10, 所以对硼来说, 在  $\text{SiO}_2$ -Si 界面处的硅一侧将出现“杂质丢失”, 对于磷来说, 在  $\text{SiO}_2$ -Si 界面处的硅一侧将出现“杂质堆积”。磷扩散时, 由于杂质在硅中固溶度的限制, 通常杂质在硅表面的“杂质堆积”对扩散分布的影响是很小的, 所以可以不必考虑“杂质堆积”的影响, 但硼扩散时, 杂质的分凝效应将使硅表面的浓度显著下降, 氧化速率越快, 硅表面的杂质浓度下降的程度越严重。解决的办法是在硼扩散再分布时增加通干氧的时间, 因为干氧的氧化速度较慢, 生成的二氧化硅也较致密, 这样可以减小“杂质丢失”的影响。

### 3.2.3. 干法刻蚀光波导

可调谐光衰减器的光波导是用干法刻蚀制作的。本实验室使用 STS 公司的电感耦合等离子体 ICP(Inductively Coupled Plasma) 刻蚀设备<sup>[43]</sup>, 与常规的反应离子刻蚀 RIE (Reactive Ion Etching) 相比, ICP 设备使得等离子体的密度增加了两个数量级, 从  $10^9\text{cm}^{-3}$  增加到  $10^{11}\text{cm}^{-3}$ , 刻蚀速率大大提高。在 DRIE 工艺中, 使用时间—多元反应工艺, 即在钝化保护和刻蚀之间做连续不断地切换钝化, 如图 3.3 所示。钝化保护步骤时,  $\text{CF}_2$  系列保护物对刻蚀目标的侧壁进行覆盖, 钝化的持续时间一般为 5 秒, 钝化结束后马上开始刻蚀过程, F 系列刻蚀气体在等离子体作用下离化, 其很快去除正面的保护物, 但侧壁仍被保护物覆盖, 这样, F 离子仅刻蚀底部的硅, 刻蚀的持续时间一般为 8 秒。上述过程不断重复, 就能实现各向异性、高深宽比、竖直性好的微型刻蚀。

由于制作可调谐光衰减器的波导结构所需要刻蚀的深度不大, 但对波导侧壁表面的要求较高, 我们发展了光滑侧壁的刻蚀技术, 选用的刻蚀配方为  $\text{SM1\_O}_2$ , 刻蚀前先通氧气, 通氧时间约为 3 秒, 氧气可以去除光刻显影残留的光刻胶, 并使得光刻图

形的边缘整齐。试验表明，在刻蚀深度不大于 5 微米时，使用该刻蚀配方制作的光波导侧壁粗糙度减小到几个纳米，垂直度优于 90.5 度。

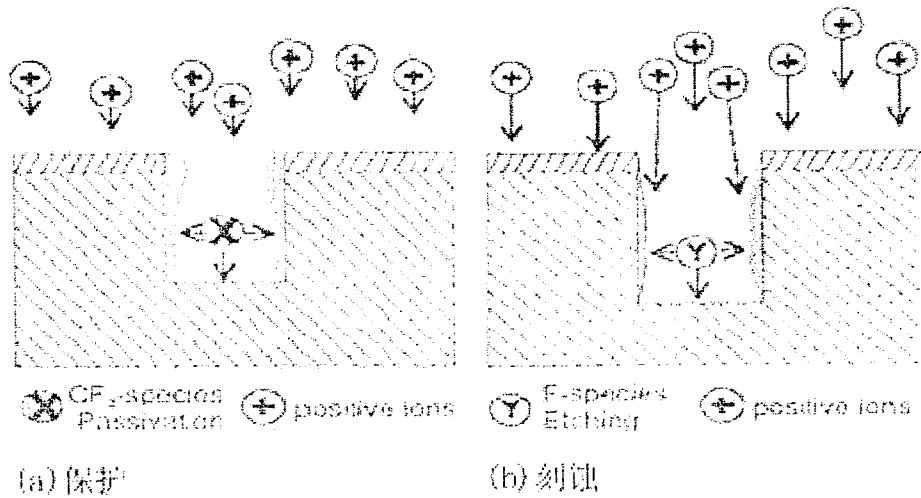


图 3.3 ICP 设备工作原理

由于 ICP 设备比较复杂，很难笼统地给出一个刻蚀速率，在使用 SM1\_O2 刻蚀配方时，参考值约为  $0.6\mu\text{m}/\text{min}$ 。对掩膜的刻蚀速率，常见的光刻胶与硅的刻蚀选择比约为 1: 50—1: 100，二氧化硅与硅的刻蚀选择比约为 1: 150。我们在试验中发现，用光刻胶做掩模制作的光波导侧壁更光滑。由于可调谐光衰减器中，光波导的第一脊侧面要求非常高，所以在制作第一脊时我们采用光刻胶做掩模，光波导的第二脊要经过磷扩散的过程，与光场的界面实际上是磷扩散形成的，所以对第二脊的平滑度要求较低，我们采用二氧化硅作为第二脊 ICP 刻蚀的掩模。

另外，在实验中我们发现，掺杂对干法刻蚀的速率有一定影响，由于在刻蚀光波导第一脊时要刻蚀掉硼重掺杂区域，调制区的刻蚀速率会有所下降，根据我们的测量，硼重掺杂区刻蚀速率与非掺杂区相比约下降 10%—15%，这样会形成调制区和输入/输出波导区脊型高度不一致的情况。不过由于硼重掺杂区的厚度很小，最后形成的调制区和输入/输出波导区脊型高度差约为  $0.1\mu\text{m}$  左右，对光场传输的影响基本可以忽略，由于输入/输出波导必须是单模波导，而调制区的波导并没有这样的要求，所以我们在确定刻蚀时间时是根据输入/输出波导的刻蚀深度确定的。

#### 3.2.4. 波导端面抛光中的应力问题

可调谐光衰减器的输出/输出波导端面必须经过化学机械抛光 (CMP)，才能和光纤进行耦合。我们实验室通常对光波导端面抛光采用三个步骤组成的工艺流程： $15\mu\text{m}$  氧化铝磨料的研磨，约磨掉端面厚度  $500\mu\text{m}$  左右，研磨时间约为 20 分钟，主要用于将端面基本磨平整； $3\mu\text{m}$  氧化铝磨料的研磨，约磨掉端面厚度  $100\mu\text{m}$ — $200\mu\text{m}$  左右，时间约为 60 分钟—90 分钟， $3\mu\text{m}$  氧化铝磨料的研磨速度要慢一些，主要用于将端面

进一步磨平滑，为抛光液的抛光作准备；抛光液抛光，与磨料的机械方式抛光不同，抛光液主要通过化学作用的方式抛光端面，可以使得端面达到纳米级的光滑程度，满足光学耦合的要求。抛光液抛光的时间一般约为 20—30 分钟。特别需要注意的是，在不同磨料和抛光液之间转换时，一定要彻底清洗器件端面和抛光设备接触磨料和抛光液的部分，否则会严重影响最后的抛光效果，达不到所需要的要求。

我们采用常规的抛光方法对可调谐光衰减器进行了端面抛光，如图 3.4(a)是抛光后在高倍显微镜下拍到的端面图，其中亮的部分是器件硅和硅衬底，中间比较暗的细线是 SOI 材料的二氧化硅层，我们发现虽然硅衬底经过抛光之后已经很平滑，但器件硅部分变得残缺不全，甚至部分 SOI 材料的二氧化硅层也断掉了。在排除了因清洗问题带来该结果之后，我们判断这是由于可调谐光衰减器特殊的结构造成的。在 SOI 材料中，硅和二氧化硅层之间存在界面应力，由于衬底硅很厚，所以基本不受应力的影响，但是器件层硅很薄，应力对它的影响是不可忽略的。在可调谐光衰减器的制作中，刻蚀了双脊波导，器件层硅最薄的地方仅为  $2\mu\text{m}$  左右，并且经过了磷扩散过程，使得应力进一步加大，所以机械研磨过程对器件层硅的影响是非常大的，甚至将器件层硅大片掀起，造成了图 3.4(a) 所示的情况。

针对可调谐光衰减器端面抛光存在的问题，我们调整了抛光各个阶段的参数，将化学抛光的时间加大到 3 小时以上，获得了较好的端面抛光结果，如图 3.4(b)所示，可以清晰的看到波导图形。

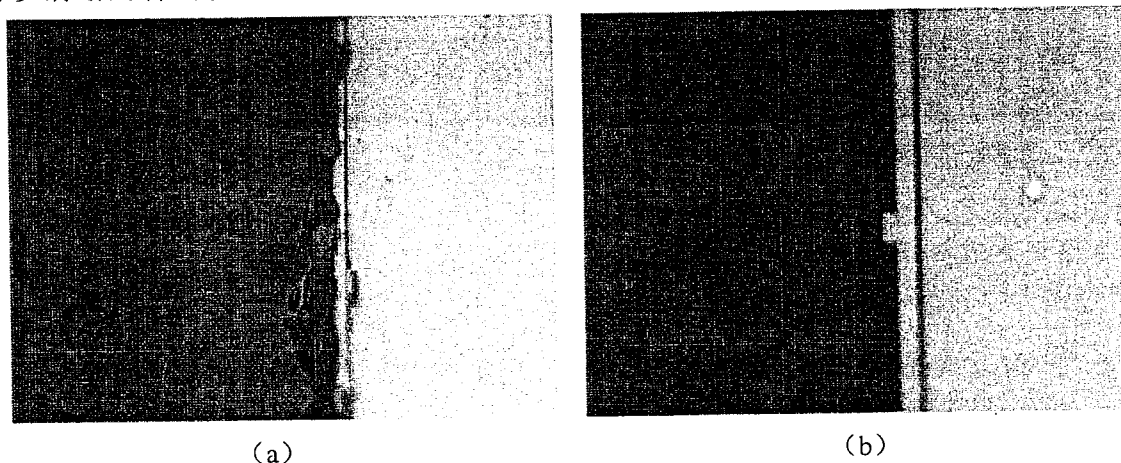


图 3.4 抛光后波导端面图片

### §3.3. 可调谐光衰减器制作结果

我们根据第一节介绍的工艺在 SOI 材料上制作了集成可调谐光衰减器，如图 3.5 所示是四通道的集成可调谐光衰减器的照片。

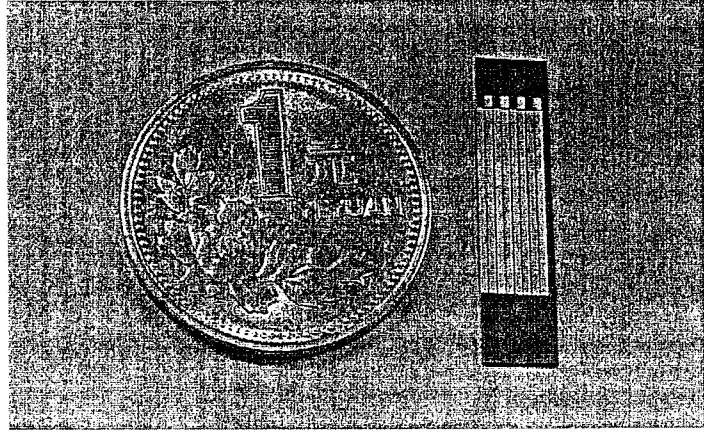


图 3.5 四通道集成可调谐光衰减器

图 3.6 和图 3.7 分别是调制区双脊波导和输入/输出单模脊型波导的扫描电镜图片。图 3.8 中给出了器件制作过程中的部分 CCD 照片。

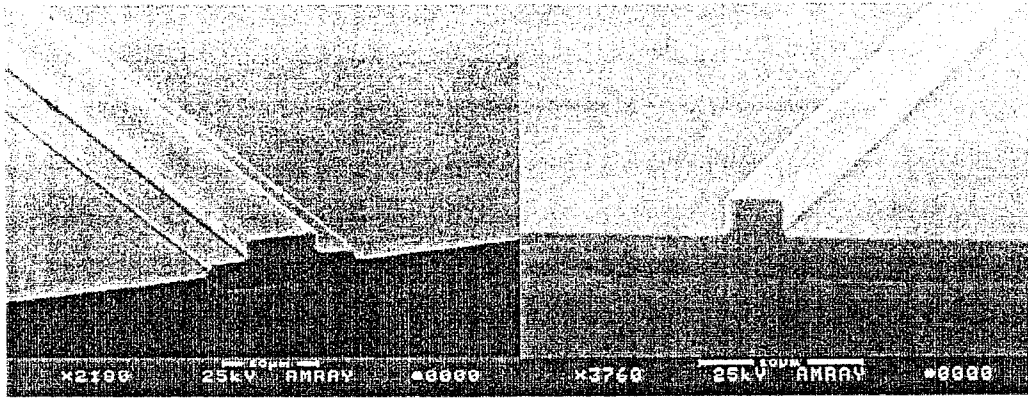
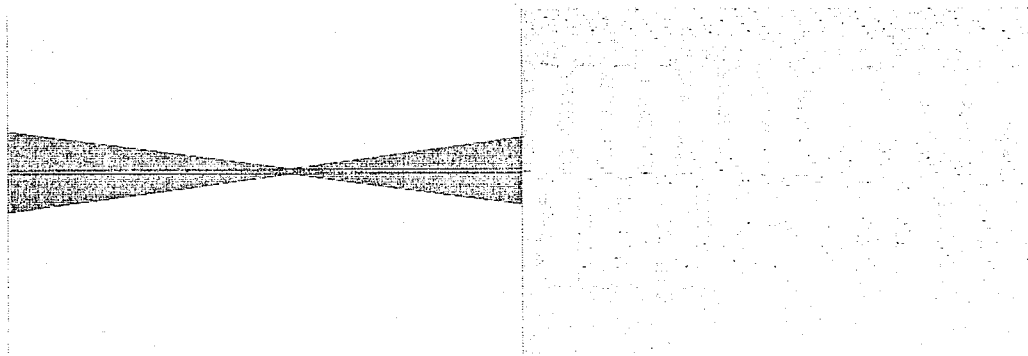


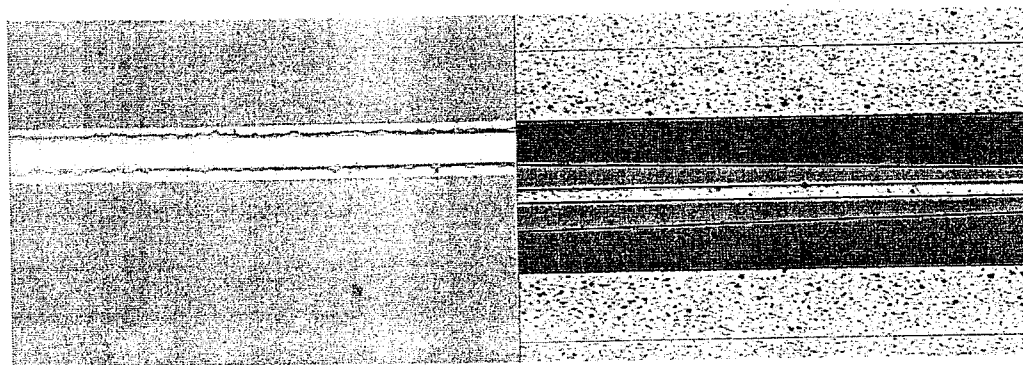
图 3.6 调制区双脊波导

图 3.7 输入/输出单模脊型波导



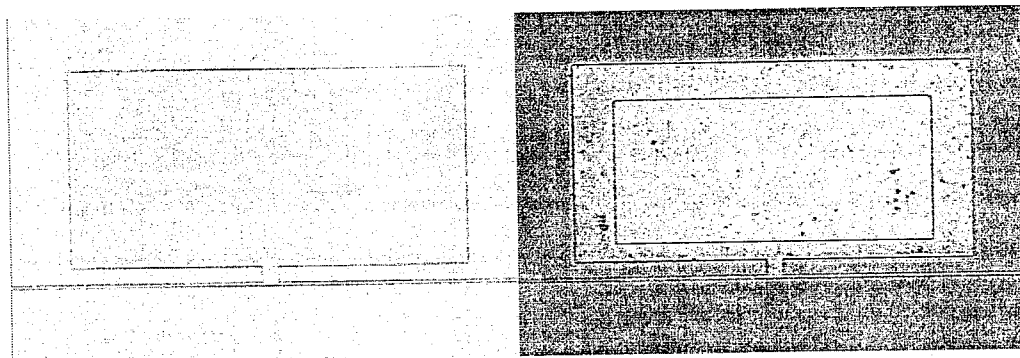
(a)波导对称性的测试图形

(b)光刻中的显影标记



(c) 腐蚀二氧化硅形成欧姆接触窗口

(d) 反刻铝后波导上形成的铝线



(e) 通过横向波导引出电极图形

(f) 电极图形上溅射铝形成电极

图 3.8 器件制作过程中部分 CCD 照片

### §3.4. 本章小结

本章给出了器件制作的整个工艺流程，重点介绍了光刻、热扩散、干法刻蚀光波导、端面抛光等几项可调谐光衰减器制作过程中的关键工艺，并根据可调谐光衰减器制作的特殊要求确定了相应的工艺参数，最后给出了器件的制作结果。

## 第四章 可调谐光衰减器的测试

本章介绍可调谐光衰减器的主要测试参数和测试结果,并对测试结果进行分析。最后提出进一步改进设计和工艺的一些设想。

### §4.1. 可调谐光衰减器的测试参数及测试结果

#### 4.1.1. 器件的电学特性

从应用的角度而言,并不是特别关心可调谐光衰减器的电学特性,我们主要测量了器件的电流—电压关系,如图 4.1 所示。可以看到器件存在一个开启电压,开启电压约为 0.7V 左右。当电压高于开启电压时,电流—电压关系在一定范围内接近于线性。

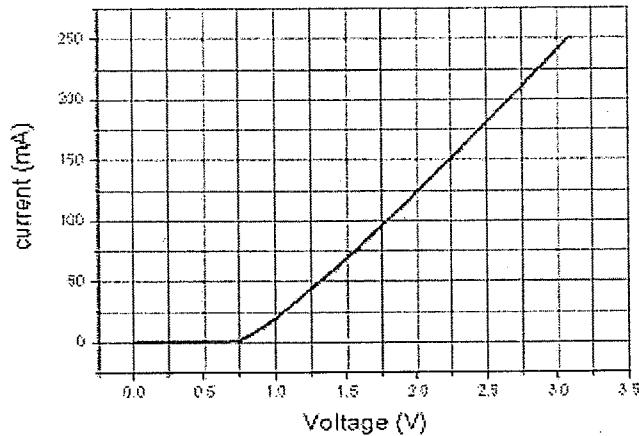


图 4.1 器件的电流—电压关系

#### 4.1.2. 器件的衰减特性和插入损耗

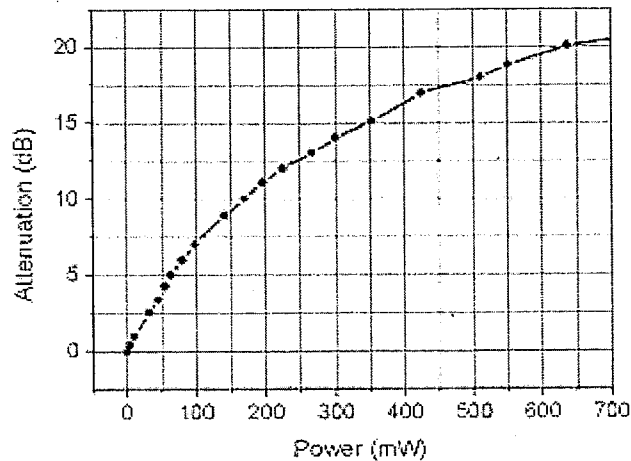


图 4.2 器件的衰减特性

可调谐光衰减器的衰减特性主要指光功率的衰减量和器件电功耗之间的关系，在第二章中，我们已经给出光功率衰减量的定义：

$$A = -10\lg(I_0 / I) \quad (2-36)$$

其中  $I$  为有调制时的透射强度， $I_0$  为输入光强。通常我们希望器件的衰减特性为光功率衰减量大，器件电功耗小。我们测得器件的光功率衰减量和器件电功耗的关系如图 4.2 所示。器件可实现 20dB 的衰减量，对应最大电功耗约为 650mW。

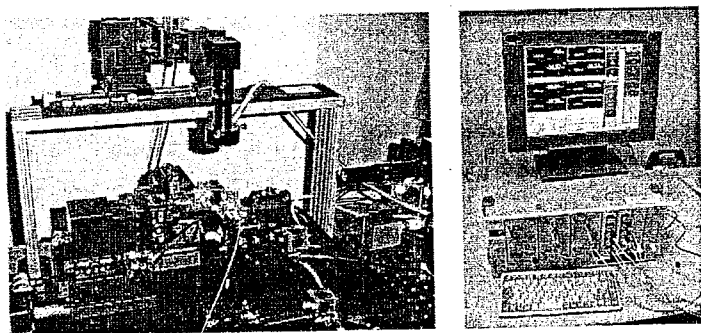


图 4.3 光学测试系统

插入损耗，是指由于可调谐光衰减器的引入而导致的光路的光功率损耗，定义为在没有电输入的情况下，器件的输出光功率与输入光功率比的分贝数。我们测得器件的插入损耗约为 14.6dB，在理论计算中，我们算得端面反射和模场耦合损耗等端面耦合损耗有 9.2dB，实际器件的测量中由于测量系统并不是理想的，测得的端面耦合损耗往往比计算的值要大一些，我们制作的相同尺寸的波导测得的端面耦合损耗约为 10dB—11dB，所以器件的片上损耗约为 4dB 左右，图 4.3 是我们在测试中用到的光学测试系统。

#### 4.1.3. 器件的响应时间

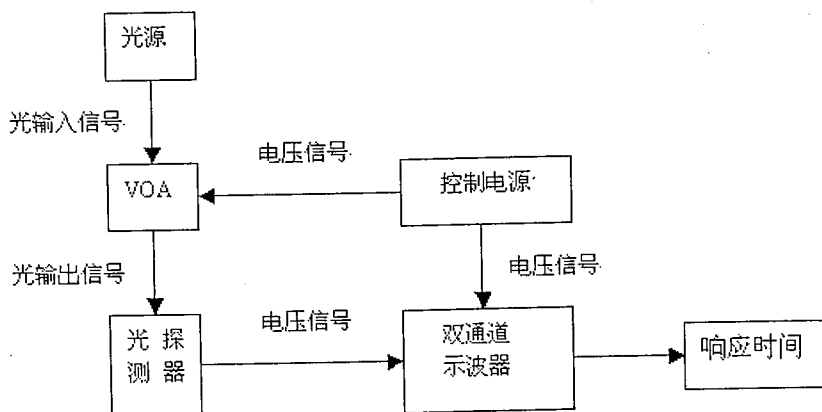


图 4.4 可调谐光衰减器的响应时间测量系统

响应时间也是可调谐光衰减器的重要参数，它定义为当控制信号改变时，输出光信号从变化量的 10% 到变化量的 90% 所需的时间，响应时间包括上升时间和下降

时间两个部分。通常光通信中要求可调谐光衰减器的响应时间在几个毫秒以下。为了测量可调谐光衰减器的响应时间，采用了如图 4.4 所示的测量系统，我们将光信号通过光探测器转化为电压信号，并与可调谐光衰减器的控制电压信号进行对比。如图 4.5 所示是在 50Hz 的方波信号下获得的可调谐光衰减器的响应信号，可以看到器件的响应时间主要表现为下降时间，测得器件的响应时间小于  $800\mu\text{s}$ 。

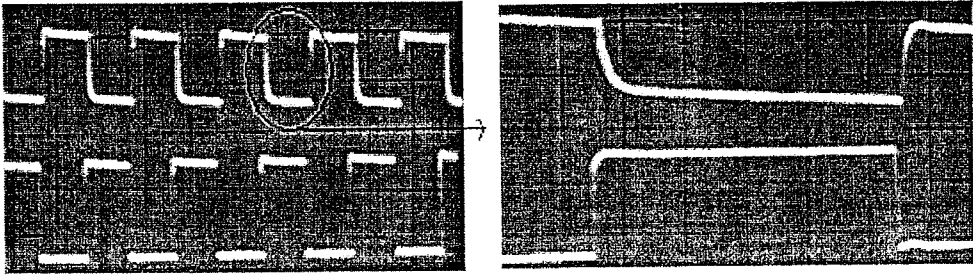


图 4.5 器件的响应时间测试

#### 4.1.4. 器件的偏振相关损耗

偏振相关损耗 (PDL: Polarization dependent loss) 是指光器件在所有偏振态下的最大传输差值，定义为光器件在所有偏振态下最大传输和最小传输的比的分贝数。

由于采用直波导设计，没有分束和耦合等过程，所以器件的偏振相关损耗较低，主要受器件的刻蚀深度及对称性影响，对于对称性较好的器件，偏振相关损耗基本可以控制在  $0.2\text{dB}-0.4\text{dB}$  左右。选取不同的衰减量测量偏振相关损耗，可以发现衰减量对偏振相关损耗的影响并不大，测试的结果如图 4.6 所示：

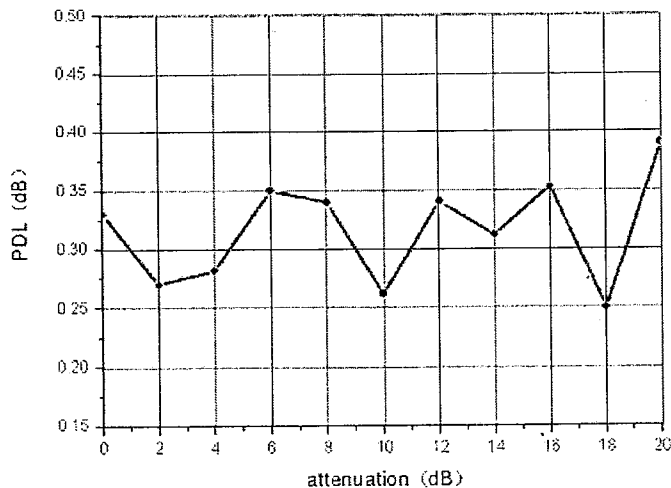


图 4.6 偏振相关损耗和衰减量的关系

## §4.2. 测试结果的分析和工艺改进设想

### 4.2.1. 测试结果分析

由于受到试验条件和时间的限制，我们得出了初步的试验结果，我们设计并制作的可调谐光衰减器衰减量可达 20dB，对应最大电功耗约为 650mW，芯片上插入损耗约为 4dB，响应时间约为 800 $\mu$ s，偏振相关损耗小于 0.4dB。

器件的电功耗和插入损耗都比第二章中的理论分析结果要偏大。我们分析，掺杂区和本征区的界面不理想是造成电功耗偏大的重要原因。在器件制造的工艺过程中，由于 P<sup>+</sup> 区和 N<sup>+</sup> 区均通过热扩散形成，扩散区和非扩散区的界面并不是突变界面，而是一个掺杂浓度按高斯分布缓变过渡的界面，如图 4.7 所示

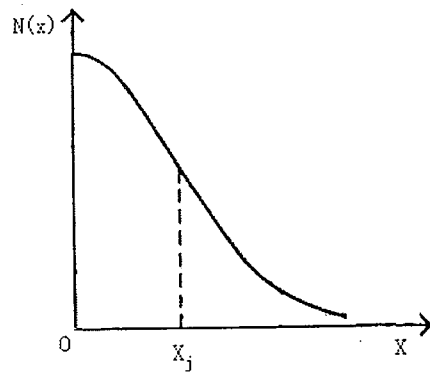


图 4.7 掺杂区杂质分布

设  $x_j$  处为结的位置，这个结并不是突变的，不能保证结的两侧有足够的浓度差，根据第二章介绍的 PIN 结注入理论，会产生很大的少子扩散电流，从而增大器件的功耗。如图 4.8 所示是我们计算的在不同的掺杂浓度下实现 20dB 衰减时的电功耗的变化曲线，可以看到器件的电功耗随边界处掺杂浓度的降低增长很快。在器件制作过程中氧化等高温工艺影响下，掺杂区的界面进一步推移，杂质浓度也会进一步降低，从而增加器件的电功耗。

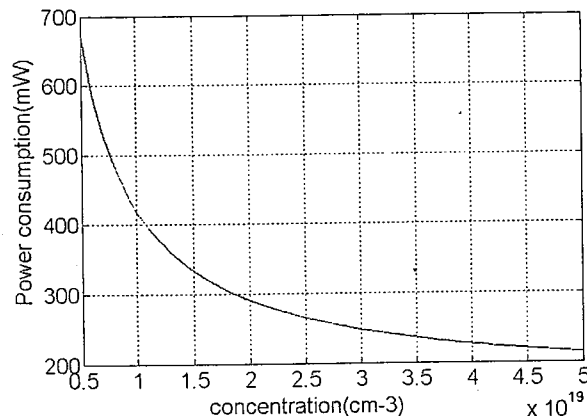


图 4.8 掺杂浓度和器件功耗的关系

器件制作中铝电极和扩散区的欧姆接触有可能不理想，压焊点时金线和铝电极之间也可能由于器件表面存在有机物而不能形成理想的接触，这些情况都会形成附加电阻，附加电阻上会形成电压降，使降落在 PIN 结上的有效电压减小，为了实现等量的光功率衰减，就需要增大总的外加电压，从而增大了器件的电功耗。

掺杂区和本征区的界面不理想也是影响插入损耗的重要因素，由于杂质浓度的降低，对光场的限制作用减弱，会使得光模场扩展到掺杂区，从而增加掺杂区对光信号能量的吸收。氧化等热处理过程，将会把掺杂区的界面进一步推移，进一步增大器件的插入损耗。

在第二章的理论分析中，我们是在假定工艺条件完善，不考虑波导表面粗糙度影响的情况下得出的器件的片上损耗，在实际器件制作过程中，工艺条件很难保持在理想的情况下，我们制作的相同尺寸的直波导一般会有 1dB 左右的损耗，这是影响片上损耗的重要因素。

器件的波导上制作了金属铝电极，金属铝电极会吸收部分光能量，这也会影响器件的芯片上插入损耗。

#### 4.2.2. 关于改进器件制作工艺和设计的几点想法

根据上一节的分析，可以通过改进器件制作工艺和器件设计来降低器件的电功耗和插入损耗，提高器件的性能。这里提出几点改进的想法：

- 1) 为了获得较为理想的本征区和掺杂区界面，器件的掺杂工艺可以考虑采用离子注入工艺，并在退火时采用快速热处理的办法，以获得较好的突变结。
- 2) 热处理过程会将掺杂区界面向本征区推进，并且降低掺杂区的浓度，增大器件的电功耗和插入损耗。在器件的制作中热处理过程主要是热生长二氧化硅，可以考虑用化学气相沉积二氧化硅的办法代替热生长二氧化硅工艺，利用低压化学气相沉积 (LPCVD) 技术，可以在  $650^{\circ}\text{C}$ — $750^{\circ}\text{C}$  温度范围内沉积二氧化硅，并保证较好的台阶覆盖，该温度大大低于热生长二氧化硅所需要的温度（通常  $1000^{\circ}\text{C}$  以上）。
- 3) 在设计器件尺寸时充分考虑到热处理过程对掺杂区的影响，留出余量，从而减小掺杂区对光场的影响。
- 4) 在设计器件的金属电极时，尽量减小金属电极的面积，从而降低金属电极的吸收损耗。

以上提出了改进器件制作工艺和设计的想法，我们将在以后的器件设计和制作中采用，以证实其有效性。

## 第五章总结

本论文主要围绕一种新型的基于 SOI 材料的集成可调谐光衰减器展开，介绍了可调谐光衰减器的设计原理和器件结构，提出了器件的近似分析模型，讨论了器件衰减特性的参数优化方法并给出优化后的参数值，分析了器件的注入载流子分布、插入损耗和响应时间，介绍了器件的主要制作工艺，最后给出器件的测试结果，具体内容主要包括：

1. 介绍了硅 (SOI) 材料的电光调制特性，指出自由载流子等离子体色散效应是硅材料比较显著的电光效应。介绍了基于 SOI 材料的大截面单模脊型波导，分析了基于 SOI 材料研制可调谐光衰减器的优势和技术方案。
2. 详细介绍了 PIN 结载流子注入理论，分析了脊型波导横向 PIN 结构的性质，提出了新型的双脊波导横向 PIN 结构。双脊波导横向 PIN 结构可以增大载流子的注入面积和利用率。
3. 根据模斑转换器的思想，设计了渐变双脊波导区来减小输入/输出单模波导和调制区双脊波导的模式耦合损耗。设计的器件采用直波导结构，包含输入/输出波导、缓变双脊波导区和调制区三个部分。
4. 通过近似处理，提出了双脊波导横向 PIN 结构的分析模型，并根据分析模型优化了影响可调谐光衰减器衰减特性的掺杂深度、掺杂浓度、本征区半长等结构和工艺参数，给出了优化后的参数值，计算了在参数优化的结果下，器件实现 20dB 衰减所需电功耗约为 215mW。分析了器件的注入载流子分布、插入损耗和响应时间。
5. 给出了器件制作的完整的工艺流程，重点介绍了光刻、热扩散、刻蚀光波导、端面抛光等器件制作的关键工艺，并根据可调谐光衰减器制作的特殊要求确定了相应的工艺参数，最后给出了器件的制作结果。
6. 介绍了器件的电学特性、衰减特性、插入损耗、响应时间、偏振相关损耗等主要测试参数，给出了相应的测试结果，并对测试结果进行了分析，提出了进一步改进器件设计和工艺的设计。

总之，我们设计并制作了基于 SOI 材料的集成可调谐光衰减器，测试结果表明该可调谐光衰减器衰减量可达 20dB，对应最大功耗约为 650mW，器件的芯片上插入损耗约为 4dB，响应时间小于 800 $\mu$ s，偏振相关损耗小于 0.4dB，可以通过改进设计和工艺来进一步降低器件的电功耗和插入损耗。