

集成光波导传感器的研究

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.3 主要研究内容及组织结构.....	2
2 光波导的理论及制备方法	3
2.1 光波导简介.....	3
2.2 光波导的特点.....	3
2.3 光波导的分类.....	4
2.4 光波导的制备方法.....	7
3 集成光波导传感器研究	9
3.1 集成光波导传感器传感原理.....	9
3.2 集成光波导传感器种类.....	9
3.2.1 表面等离子体共振型光波导传感器.....	9
3.2.2 平面薄膜波导型光波导传感器.....	10
3.2.3 M-Z 干涉型波导传感器	10
3.2.4 布拉格光栅型波导传感器.....	11
3.2.5 环形谐振腔型光波导传感器.....	12
4 集成光波导传感器应用	14
4.1 集成光波导型压力传感器.....	14
4.2 集成光波导型温度传感器.....	15
4.3 集成光波导型湿度传感器.....	15
4.4 集成光波导型生物传感器.....	16
4.5 集成光波导型流量传感器.....	16
4.6 集成光波导型电磁场传感器	17
4.7 集成光波导型超声波传感器.....	18
4.8 集成光波导型气体传感器.....	19
5 总结及展望	21
5.1 本文工作总结.....	21
5.2 研究工作展望	21

摘 要

近年来，用集成光波导传感元件构成的新型光传感器是集成光学技术、光纤技术迅速发展，不断从实验研究走向应用研究的产物。光波导传感器的出现，引起了传感与高精度检测领域的关注，其原因是光波导传感器可以把整个系统集成在一个很小的衬底上，使检测系统微型化，性能更加稳定、可靠。它用光而不用电作为传感信息的载体，用光纤而不用金属导线传递待测信息，因而具有高绝缘、抗电磁干扰、便于实现远距离遥控检测盒微机数据处理等优点。

本文从光波导的概念出发，首先对光波导的相关理论进行阐述，包括光波导的特点及分类等，然后介绍了光波导的两种主要制备方法。进而引出了对集成光波导传感器的阐述，集成光波导传感器主要是利用了光波导的某些特性，并加以推广，制作成传感器后用于各种数据的传感和检测。论文还对表面等离子体共振型，平面薄膜波导型、M-Z干涉型、布拉格光栅型、环形谐振腔型光波导的特性进行了详细论述。最后，论文介绍了几种常用的集成光波导传感器的应用，并对集成光波导传感器的应用前景作出了大胆预测。

关键词：光波导；集成光学；M-Z干涉型；布拉格光栅型

Abstract

In recent years, with the integrated optical waveguide sensing components, new optical sensors are integrated optics technology, the rapid development of optical fiber technology, and constantly toward applied research from an experimental study of the product. The emergence of the optical waveguide sensor, causing the sensor with high-precision detection areas of concern, the reason is the optical waveguide sensor can be integrated into the entire system a small substrate, so that the detection system miniaturization, performance is more stable and reliable. It ran without electricity as the sensing information carrier, optical fiber instead of metal wires to pass the test information, which has high insulation, anti-electromagnetic interference, easy to implement long-distance remote computer data processing test kits, etc..

In this paper, the concept of optical waveguides, optical waveguide first elaborate theories, including the optical waveguide characteristics and classification, and then introduces the two main preparation method of the optical waveguide. Thus leads to the elaboration of the integrated optical waveguide sensor, integrated optical waveguide sensor is the use of certain characteristics of the waveguide, and promote them to produce a variety of data into the sensor for sensing and detection. The paper also based on surface plasmon resonance, planar thin film waveguide type, MZ interferometer, Bragg grating type optical waveguide ring resonator characteristics are discussed in detail. Finally, the paper describes several common integrated optical waveguide sensor applications, and integrated optical waveguide sensor application prospects made a bold prediction.

Key Words: Waveguide; integrated optics; MZ interferometer; Bragg grating

1 绪论

1.1 研究背景及意义

在光电子领域高新技术产品的研究中，以集成光学元件作为检测手段的应用研究具有十分广阔的应用前景。因为集成光波导传感元件具有光路系统集成新型光学传感器结构^[1]，使得它在检测领域的应用具有其他结构传感器无法比拟的优点。它将光学系统集成在同一基板上，使检测系统变得超小型化，具有稳定性好、精度高、可远距离遥控等优点。1983年，苏黎世的瑞士联邦工学院光学实验室根据100~150nm厚的高折射率SiO₂和TiO₂平面波导对相对湿度反映敏感的现象发明了一种新的集成光学传感器，揭开了集成光波导传感器研究的序幕。目前，利用集成光波导技术实现的各种类型的传感器正成为当代研究的热点课题之一。

1.2 国内外研究现状

目前，国际上已有很多国家对几十种集成光波导型传感器进行研制。以发达国家美国和日本为例，美国海军实验室主要研究机载和舰载系统及数据传输和传感系统的集成光波导传感器。从财政投资额看，美国“星球大战”计划预算为1亿美元，其中最大的投资项目是光电传感器和电子器件^[2]。美国航天飞机上使用的传感器大约100多种4000多支，其中光电传感器1200多支。

近年来，日本NHK技术局一直采用集成光波导型电磁场传感器作为电视中继传输局中的无电源光传输系统进行实用机开发。日立公司光器件开发中心于1996年研究成功了集成光波导型电磁场传感器并实现了商品化，现已广泛用于电磁场测量仪/辐射噪声波形测试仪、电器机械内部电磁场分布测试仪中。日本TOKIN公司与日本电力部门合作开发了用于大电力变电设备及高压传输系统局部漏电检测仪，此外，还与广播电视局合作开发了TV/无线电波无电源传输接收机等。据TOKIN公司的社长介绍，该公司研制集成光波导型电磁场传感器的主要目标是，利用它测量大气空间电磁场分布、机理，探讨手机等便携式通信工具的电磁场辐射干扰波形，弄清它们对飞机中接收系统的影响，解决在飞机飞行中限制使用手机等问题^[3]。

中科院长春光机与物理所在国内率先研制出了集成光波导型电磁场传感器。该项目是以集成光学器件作为检测技术的应用基础性研究，作为跟踪国际高技术前沿性课题而提出的。它扩大了传感器的应用领域，可成为火箭发射系统，电力部门高压绝缘漏电，局部高压放电，空间电位分布，大气电磁场分布等方面的检测手段。

1.3 主要研究内容及组织结构

本课题主要研究集成光波导传感器的相关技术。

集成光波导传感器是光纤传感器的有利补充，以其灵敏度高、小受外部电磁场干扰等优点吸引了科研作者的注意。与光纤传感器相比，集成光波导传感器具有以下优势：(1)通过灵活选择波导材料和优化结构的设计，可获得更高的灵敏度；(2)通过单片集成，可实现多信道同时测量以及系统微型化和多功能化，并降低功耗；(3)通过与微机械、微电子技术相结合(MOEM)可提供新的传感应用和集成潜力；(4)通过集成工艺实现规模化生产，可降低成本^[4]。可见，集成光波导传感器不但继承了光纤传感器的优点，还更有利于实现多功能集成、紧凑封装和批量生产，拥有小型轻量、稳定可靠、低耗高效等其他结构传感器无法比拟的优势，是新一代微型化、集成化和智能化传感器系统的重要组成部分。

本文共分为五章：

第一章简述了选题背景、研究目的及意义、国内外研究现状和主要技术，以及本文的主要工作。

第二章主要对光波导这一技术领域进行了详细的阐述。包括光波导的简介、特点、分类以及光波导的制备方法。通过对光波导技术的讨论，引出后文对集成光波导传感器的研究。

第三章从集成光波导传感器的原理和种类两个方面展开，详细论述了集成光波导传感器所利用的倏逝波原理，并对表面等离子体共振型、平面薄膜型、M-Z干涉型、布拉格光栅型、环形谐振腔型光波导传感器进行了详细阐述。

第四章主要论述了当前国际、国内对集成光波导传感器的研究现状，即各种各样的传感器的应用。对各种传感器应用作了简单的概念性介绍，并对其特性和应用点进行展开讨论。

第五章对本文进行了总结与展望，对本文所做的工作进行总结，并给出就本文中的不足所提出的改进的想法。

2 光波导的理论及制备方法

2.1 光波导简介

光波导（optical waveguide）由光透明介质(如石英玻璃)构成的传输光频电磁波的导行结构。光波导的传输原理是在不同折射率的介质分界面上，电磁波的全反射现象使光波局限在波导及其周围有限区域内传播。其结构如图 2-1 所示：



图 2-1 光波导结构图

如图中共有三层平面相层叠的光学介质，其对应折射率 N_0 , N_1 , N_2 。其中白色曲折线表示光的传播路径形式。可以看出，这是依靠全反射原理使光线限制在一层薄薄的介质中传播，这就是光波导的基本原理。为了形成全反射，图中要求 $N_1 > N_0, N_2$ 。一般来讲，被限制的方向微米量级的尺度。

2.2 光波导的特点

光波导可以用于限制光线传播光路，由于本身其尺寸在微米量级，就使得其有很多较好的特点：

(1) 光密度大大增强

光波导的尺寸量级是微米量级，这样就使得光斑从平方毫米尺度到平方微米尺度光密度增大 10^4 - 10^6 倍。

(2) 光的衍射被限制

从前面可以看出，图示的光波导已经将光波限制在平面区域内，后面会提到稍微变动一下技术就可以做成条形光波导了，这样就把光波限制在一维条形区域传播，这就限制了光波的衍射，有一维限制（一个方向），二维限制（两个方向）区分（注：此处“一维”与“二维”的说法并不是专业术语，仅仅指光的传播方向的空间自由度，不与此研究专业领域的说法相混同）。

(3) 微型元件集成化

微米量级的尺寸集成度高，相应的成本降低。

(4) 某些特性最优化

非线性倍频阈值降低，波导激光阈值降低。

综上所述，光波导本身的尺寸优势使得其有很好的研究前景以及广泛的应用范围。

2.3 光波导的分类

一般来讲，光波导可以分为平板波导（Planar）、条形波导（Channel）、圆柱波导（Fiber）三类。

平板波导由三层介质组成，中间层介质折射率最大，称为导波层。上下两层折射率较低，分别称为覆盖层和衬底层。当衬底层和覆盖层材料折射率相等时，称其为对称平板波导。平板波导具有几何尺寸小、重复性好（可批量生产）、可在掩膜过程中实现复杂的支路结构、与光纤容易对准等优点。如图 2-2 为平板光波导的结构图：

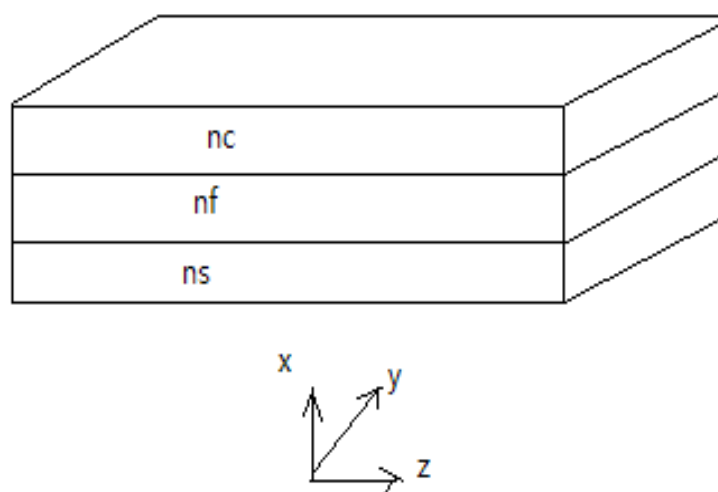


图 2-2 平板波导结构图

条形波导又称之为矩形波导，其结构如图 2-3 所示。条形波导通常是由金属材料（铜、铝等）制成的，矩形截面的、内部填充空气介质的规则金属波导。条形波导不能传播 TEM 波，只能传播 TE 波或 TM 波。

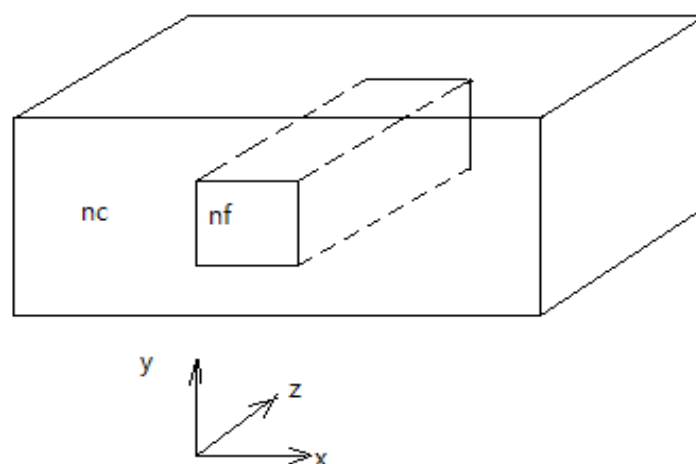


图 2-3 条形波导结构图

同轴电缆是由两个共轴的导体柱面构成，柱面之间的空间或是真空或充满电介质，信号就在两个导体柱面上传输。这就是圆柱形波导。沿着 z 轴为无限长，横截面不随 z 坐标而改变，其内区被平行于 $x y$ 平面的闭合曲线 C 包围，外边界为平行于 z 轴的柱面。

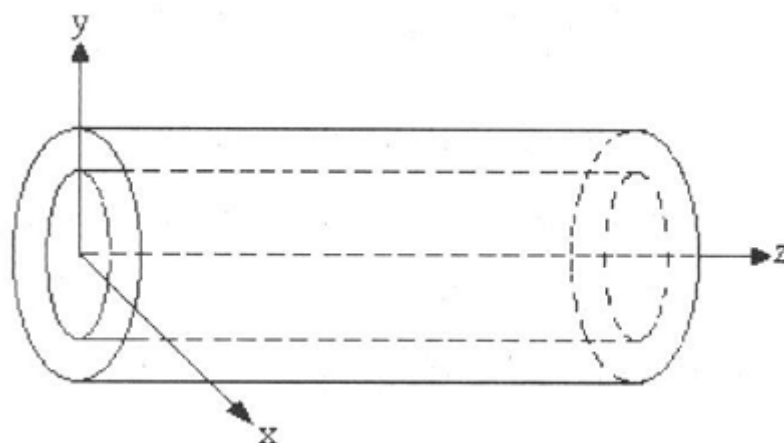


图 2-4 圆柱形波导结构图

光纤一般由同心的纤芯、包层、涂敷层和护套层四部分构成，如图 2-5 所示。涂敷层与护套层主要保护裸纤不受外界损伤，增加光纤的韧性和机械强度。纤芯和包层是光纤的主体结构，其形状、折射率及其分布情况决定了光纤本身的光传输特性。纤芯和包层通常是同一种基质材料而掺入不同的杂质，使得纤芯的折射率略大于包层的折射率，相差约 1 %。

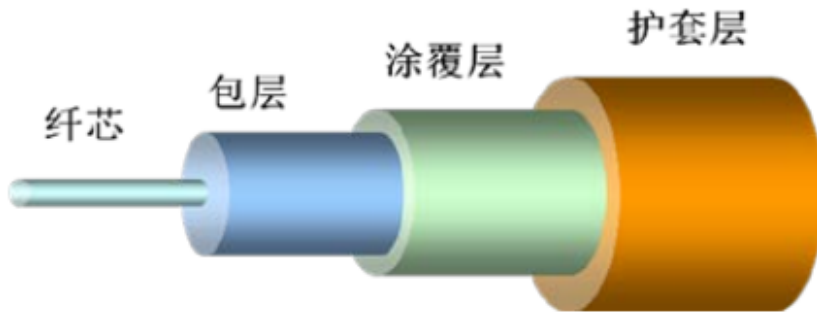


图 2-5 光纤基本结构示意图

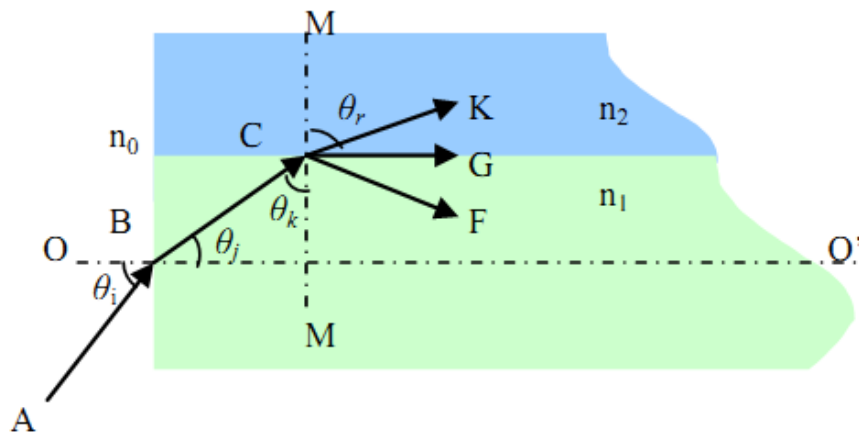


图 2-6 光波导原理示意图

图 2-6 所示为光波导原理剖面示意图。纤芯折射率为 n_1 ，包层折射率为 n_2 ，且 $n_1 > n_2$ 。光线 AB 以入射角 θ_i 从空气（折射率为 n_0 ）入射到空气与纤芯界面，部分光线被反射回空气，部分光线 BC 折射进入纤芯并到达纤芯与包层界面，再次发生反射和折射。部分光线 CF 反射回纤芯，部分光线 CK 以折射角 θ_r 进入包层。根据 Snell 定律^[6]，考虑到空气折射率 $n_0 \approx 1$ ，可得到入射角 θ_i 和折射角 θ_r 之间的关系

$$\sin \theta_i = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \sin^2 \theta_r} \quad (\text{式 2-1})$$

在折射角 $\theta_r = 90^\circ$ 的临界情况下，折射光线 CG 将沿纤芯与包层界面传播。此时入射角 θ_{i0} 满足

$$\sin \theta_{i0} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{式 2-2})$$

θ_{i0} 是光纤的最大接收半角。光纤接收光的能力用数值孔径 NA(Numerical Aperture) 来表示

$$NA = \sin \theta_{i0} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{式 2-3})$$

当 $\theta_i > \arcsin(NA)$ 时，光线进入光纤后在包层消失不能传播；当 $\theta_i < \arcsin(NA)$ 时，光线进入光纤被全反射而向前传播。

2.4 光波导的制备方法

光波导的研究条件与当前科技的飞速发展是密不可分的，随着技术的发展，新的制备方法不断产生，从而形成了各种各样的制备方法，其中下面主要介绍离子交换和离子注入：

离子交换

借助于固体离子交换剂中的离子与稀溶液中的离子进行交换,以达到提取或去除溶液中某些离子的目的,是一种属于传质分离过程的单元操作^[7]。离子交换法制作光波导的理论基础，属于光通信技术领域，涉及光波导技术。在使用离子交换法制作光波导的过程中，折射率是形成波导的关键条件。该理论的核心内容就是阐述了是离子交换中的哪些因素以及这些因素又是怎样来影响折射率的增加和减小的。其具体内容主要有以下两点：1) 折射率与交换离子的原子大小尺寸有关；2) 与电子位移极化率有关。

离子注入

具有在任意温度下对离子注入的剂量和深度可以精确控制，从而改变材料表面性质的优越性，引起了人们的广泛关注。离子注入法是较新的一种形成光波导的技术^[8]，与这几种传统的波导制作方法相比，离子注入法具有以下独特的优点：1) 注入的离子可任意选择，不受化学组分的限制；2) 离子注入可在各种温度下进行；3) 离子注入的深度和注入剂量(影响折射率的变化)可以精确地控制，能够有目的地形成各种分布；4) 离子注入法具有可靠的重复性等。

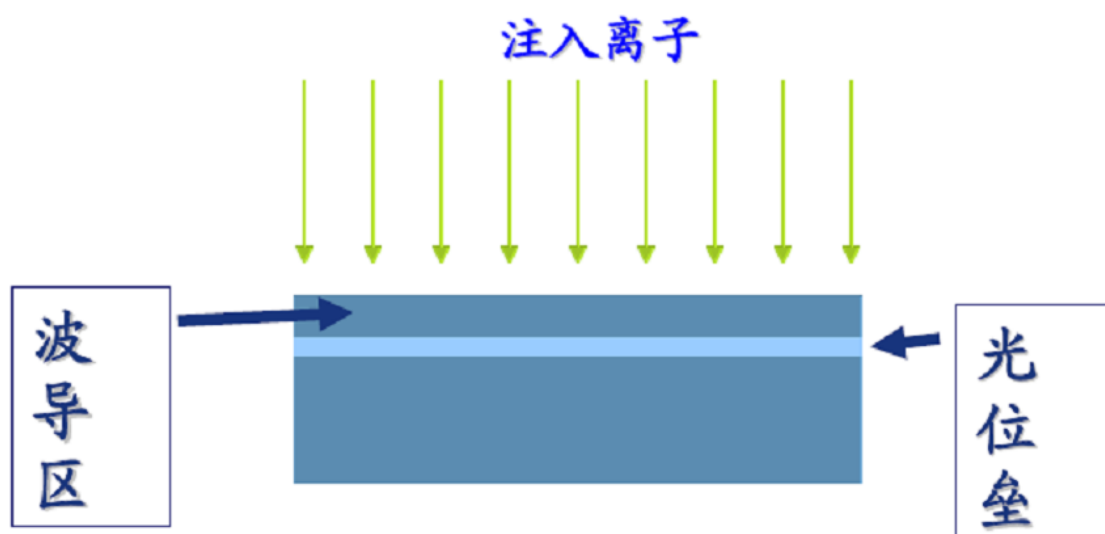


图 2-7 平面波导离子注入法的制备

离子注入可以改变固体表面及近表面的特性，是近代科学史上的重大发现^[9]，离子注入光波导是核技术与材料科学、信息科学交叉的新领域。简单来讲离子注入就是将重离子或者轻离子（技术及性质有一定差别，所以分开说）加速后注入事先制作好的晶体或者其他物质中，以引起注入位置的性质（包括折射率）有一定分布。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/107200020136010025>