

The cover features a central golden wireframe globe with a blue arrow looping around it. In the background, there's a satellite in the upper left, a rocket launching in the lower left, and a laptop with binary code in the lower right. The top half has a blue background, and the bottom half has a green background.

现代物理技术及其 应用

马廷钧 主编

国防工业出版社

National Defence Industry Press

<http://www.ndip.com.cn>

现代物理技术及其应用

马廷钧 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍 12 种现代物理技术的原理及其应用方向,其中包括光纤、信息存储、激光、超声、红外与遥感、超导、微波、等离子体、液晶、新能源、新材料、电离辐射等技术,列举实例说明创新应用这些技术大有可为。内容丰富,深入浅出,侧重启发性,能激发读者产生应用这些技术的兴趣和设想,特别是对即将毕业的大学生走上创业之路会有很好的启发和指导作用。

本书可作为大、中专院校相关课程的教材或参考书,也可供关心高新技术的各级管理干部和科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代物理技术及其应用/马廷钧主编. —北京:国防
工业出版社,2002. 9

ISBN 7-118-02918-1

I. 现... II. 马... III. 物理学—技术 IV. 04
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 051221 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×960 1/16 印张 11 $\frac{1}{4}$ 244 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月北京第 1 次印刷

印数 1—4000 册 定价:17.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

进入 21 世纪,高新技术发展之迅猛使每个人都有一种应接不暇的感觉。物理学是高新技术的源泉已是一个不争的事实。如今,现代物理技术的应用已经深入到生产、生活、医疗等各个领域。然而,对现代物理技术更多的创新应用正等待我们去开拓。

许许多多的事实证明,一项以现代物理技术为基础的产品能带出一个成功的公司,能带动一个产业,能培养出一批企业人才。不论是科海集团公司、周林频谱公司还是亚都加湿器集团公司,都向我们展示了这样的道理。

不管您有什么专业背景,更多地了解一些现代物理技术的知识,不仅能开阔视野,而且能使您产生创新应用这些技术的跃跃欲试之感,为您今后的创业打下一个基础。而一旦某项技术在某一领域应用成功,就能迅速产生巨大的社会效益和经济效益。阅读本书后您会发现,搞一两项现代物理技术的创新应用并不难,凭您的知识和努力就能做到。

本书共分 13 章,介绍 12 种现代物理技术的原理及其应用方向。在阐述原理的基础上,侧重列举成功的应用实例。文字力求深入浅出,具有启发性。每章内容均有相对独立性。读者可以根据个人的需要和兴趣,选学部分内容。如果对某项技术产生创新应用的设想和冲动,可参考每一章末尾的参考文献,进一步深入阅读,结合您的智慧,使设想变成现实。

本书是在多年讲授“现代物理技术基础”选修课的基础上写成的。该课程每次开出均受到大学生的欢迎,激发起不少学生对创新应用这些技术的兴趣。其中一些设想已经成功实现。有的设想虽不成熟但很有创见。同学们反映,学习了“现代物理技术基础”为日后的腾飞打下一个基础,为将来捕捉机遇增添了一个重要的砝码。他们非常希望我们尽快把课堂上所讲的内容编写成书出版,使更多的读者受益,使现代物理技术在更多的领域得到创新应用。这也正是作者的希望。

参加本书编著的是:北京工商大学的马廷钧编写第 1、3、5 和 12 章,陈晓白编写第 4 和 10 章,任玉安编写第 8 和 11 章,赵佳编写第 6 和 9 章,林晓满编写第 7 章;北京石油化工学院的张奕林编写第 2 章;景德镇陶瓷学院的彭庶修编写第 13 章。马廷钧主持了本书的编写工作并对各部分进行了审阅和少量的修改。

我们诚恳地期待着来自各方面的宝贵意见和指导。对于在编写过程中所参阅文献的作者表示谢意。

编 者

2002 年 8 月

目 录

第 1 章	创新应用 大有可为	1
第 2 章	光纤技术(Optical Fiber Technology)	9
第 3 章	信息存储技术(Information Storage Technology)	44
第 4 章	激光技术(Laser Technology)	54
第 5 章	超声技术(Ultrasonic Technology)	70
第 6 章	红外与遥感技术(Infrared and Remote Sensing Technology)	85
第 7 章	超导技术(Superconductivity Technology)	97
第 8 章	微波技术(Microwave Technology)	107
第 9 章	等离子体技术(Plasma Technology)	119
第 10 章	液晶技术(Liquid Crystals Technology)	129
第 11 章	新能源技术(New Energy Source Technology)	143
第 12 章	新材料技术(New Material Technology)	157
第 13 章	电离辐射技术(Electro-ionization Radiation Technology)	172

第 1 章 创新应用 大有可为

1.1 新技术革命与物理学

1. 物理学在新技术革命中的地位

20 世纪下半叶以来,一场新的科学技术革命汹涌澎湃、席卷全球,极大地改变着人类的社会和生活。一大批知识密集型高新技术的兴起成为这场新技术革命的崭新风景。而其中心是以计算机技术为核心的信息技术。进入 21 世纪,方兴未艾的信息技术革命将与生物技术等结合在一起把这场新技术革命推向新的高潮,促使人类生产和生活方式产生更加深刻的革命性变革。

在这场科学技术的革命中,物理学扮演了一个什么角色呢?人们普遍认为,在人类历史上,前两次大的工业革命都是以物理学为中心的:18 世纪热力学的理论和蒸汽机的发明引发了第一次工业革命;电磁学理论和电的利用引发了以电气化为特征的第二次工业革命。时下人们正在经历的科学技术革命与前两次有着重大的差别,它不是以传统物理理论为中心。其特点是随着电子计算机的出现和飞速发展,一大批高新技术呈群体之势诞生。它不是哪一个单一的学科的贡献,而是跨门类、跨学科的产物。科学技术的高度社会化、社会的高度科学技术化,使我们每个人都感到了新技术革命的来势凶猛。哪一个学科都必须吸收其他学科的知识,科学与技术必须在更深更高层次上不断地整合和融合。

从现象上看,这一大群高新技术以信息技术为先导,包括生物技术、空间技术、航天技术、激光技术、自动化技术、海洋技术、新材料技术和新能源技术等。从本质上看,这些技术无一不与物理学有密切的关系或者根本就是物理学。可以说,当今的物理学仍然是一门充满生机和活力的科学,它的原理已经应用到多项高新技术中,它的研究方法和思想已经渗透到各个学科中。它的创造性进展日新月异,它是当代高新技术的源泉,对当代以及未来高新技术的进步和相关产业与发展提供了巨大的推动力。

2. 物理学无处不在

生活在现代社会人们发现科学技术发展太快,需要学的东西太多,而且新知识层出不穷。一个产品,如果技术含量低,就会面临难于生存的境地。我们每天接触到的一切,包括衣食住行、所见所闻,物理学知识的含量不仅不断增多而且在不断加深。人们

常常发问：

收音机接收的电台为什么有调频和调幅之分？

家用电器的红外遥控器是怎么回事？

手机、呼机是怎么通过电磁波传递信息的？

光纤通信、卫星通信、微波通信有什么区别？

空调和电冰箱是怎么工作的？变频空调又是什么意思？

计算机的液晶显示和等离子显示各有什么特点？

纳米科技是什么？什么叫碳纳米管？

“神舟三号”人造卫星的发射成功标志着我国在载人航天技术方面又有了什么新的突破？

核电在中国是否可以大力发展？它有什么优点，有没有潜在的安全问题？

燃料电池是怎么回事？

静电复印、激光制导、全球定位都是什么原理？

磁悬浮列车在我国将有很快的发展，它的原理是什么？常导和超导磁悬浮有什么区别？

电饭煲、微波炉的工作原理是什么？

银行、饭店和学生食堂等场合已普遍采用磁卡，磁卡为什么会具有如此神奇的功能？

计算机的软磁盘和硬磁盘是怎么存储信息的？

光盘(CD)为什么能记录海量信息？磁光盘(MOCD)又是怎么回事，它为什么既能保持光盘的信息存储容量同时又能做到可擦可写？

医院里越来越多地采用一些新的高科技诊断技术，比如核磁共振、多普勒心动图、脑电图、心磁图、伽马刀……更不用说激光手术、X光透视之类已经有了一段历史的治疗和诊断方法了。它们都是怎么工作的呢？

类似以上问题几乎每个人都会遇到。对于社会的一般成员当然不必去管是怎么回事。但作为一个科技工作者或者对科学技术感兴趣的人来说，就完全有必要了解有关的物理知识，了解当今科学技术的发展和未来科技的动向。只有这样，才能跟上时代前进的步伐，才能开阔思路，拓宽知识面，从而改善自己的知识结构，不断激发自己对科学技术的兴趣，进而为有所发现、有所发明、有所创造打下扎实的基础。

现代科技的确发展得太快，就拿通雅系统来说，在过去的18年中，已经更新了5代，信号传递量增加了20倍。现在，一根光纤可以传输50万路电话，或者5000套彩色电视节目。这些信号可以通过跨洋光缆，迅速而通畅地传向全球。今天，我们向地球的任何地方发一封电子邮件，须臾之间对方就能收到。可以毫不夸张地说，光导纤维已经成为信息高速公路的“路面”。而未来“光孤子通信”将会粉墨登场，那时，人造卫星通信将被取代。今天的我们怎么能不了解一下“光孤子通信”的物理机理呢？

温差发电利用的是物理上的贝塞尔效应。原则上说，有温差的地方就能依靠温差

产生电流。仔细想来,在广阔的海洋上,海面与海底的温度相差 20°C 左右,能不能用海水来发电呢?如果能,那将是一个取之不尽、用之不竭的能量来源!事实上,在如今大力开发核能的同时,向海洋要能量的步伐已经迈开,美国在夏威夷已经建造了一座温差发电厂。目前,全世界温差发电的总装机容量已超过 2000 万千瓦。再进一步,我们不能向大地要能量呢?要知道,地下是地地道道的庞大热库!

前一段,有新闻媒体报道,说国内火车提速后,一些飞速运行的火车车窗玻璃破裂严重,而且都是向车外方向破裂,原因不明。其实,按照流体力学,当气体高速流动时压强就会降低,火车速度较大时,车厢内外压强差加大。正是这个压强差成为玻璃破裂的罪魁祸首。可见包括我们的记者在内,太需要学习一点物理知识了。

还有,大家都知道,电子计算机科学发展速度快得惊人。集成电路中晶体管的数量也已经超乎人们的想像。按照这样的速度发展下去,再过几年就会达到物理极限。未来,将会出现的量子计算机为我们开辟了新的方向。量子计算机是一个全新的概念,它建立在量子力学理论的基础上。量子计算机不仅能大大提高计算速度,而且它存储信息的密度也将远远大于传统的计算机。它将把当今最前沿的微观物理技术和计算技术结合起来,在计算技术领域产生一场伟大的革命。

另外,21 世纪的互联网正在成为全球经济的巨大推动力。光纤技术的飞速发展使互联网的发展插上了翅膀。光纤通信技术正在从单纯传递信息网向“全光互联网”过渡。一旦量子计算机发展成熟,把量子计算机连起来就能形成功能强大的量子互联网,这一天的到来可能并不遥远。因此,从适应未来的角度,我们也必须学习一些最新的现代物理技术知识。否则,我们就将在新的技术革命到来时处于极其被动的地位,就会落伍。相反,如果我们事前具备相应的物理知识,在飞速发展的科学技术面前,我们完全可以做到不仅不落伍,还能在不断创新的科技面前做出自己的贡献。

3. 物理学是新技术、新思维的源动力,是新学科的先导

物理学有独特的思维方式和先进的研究方法。它从实验出发,有从特殊到一般的分析归纳,有从一般到特殊的演绎,再加上统计和理想模型等许多成功的研究方式。近年来,出现了为数众多的新学科,它们不仅从物理学本身派生出来,如非线性光学、量子电动力学、现代声学等等,也为其他学科的发展提供了新的方向,比如,量子力学的发展导致量子化学、量子生物学、量子天文学等一系列新学科的诞生。物理学对物质结构的深入研究,使人类对晶体电子结构的认识深入到其他许多学科,包括冶金、机电。材料科学也不能不借助物理学向前发展。扫描隧道显微镜技术的诞生为人类直接操纵原子、分子,以至设计和创造新分子提供了崭新的手段。从而使材料科学发生着革命性的变革。所以,说物理学是新学科的先导丝毫也不过分。物理学的任何一项重大突破,都将引发一系列新技术的诞生,反之,新技术的兴起又能推动物理学科向更高更深的层次发展。要想在高新科技飞速发展的社会中驰骋,实在需要用物理学的基本知识武装自己,同时对现代物理技术有广泛的了解,从而主动跟踪世界科技水平的进步,正确地选择、设计和创造自己的未来,成为 21 世纪的强者。

学习和了解现代物理技术原理的目的是为了用。创新地应用现代物理技术绝不是一件神秘莫测、高不可攀的事。

1.2 创新应用,天地广阔

1. 为已有的物理技术找到新的应用就是创新

党中央一再号召科学工作要面向国民经济主战场,而这个主战场需要大量引进现代物理技术,这就是现实。然而靠谁去做呢?不靠天,不靠地,就靠我们自己。要有充分的信心和魄力。发明一项新技术可能比较困难,为一项已有的技术找出路、找应用场合是相对容易的,而且由于它与生产实际接轨,更容易产生直接的经济效益。何乐而不为呢?请看实例。

实例 1:中关村科海集团在创业初期所做的第一件事十分具有启发意义。20 世纪 80 年代初,当时科海公司的总裁慧眼发现了一条重要信息。那就是鞍山钢铁公司有一个技术难题一直没能得到解决。在炼钢时每天要向炼钢炉里喷大量的重油。国外已采用重油掺水技术。但鞍钢当时多次试验在重油中掺水均未获成功。了解到这一信息后,这位总裁请来了中国科学院声学研究所的几位专家。这几位专家一致认为“利用超声波进行油水混合的乳化技术是早已成熟的现成的技术,完全可以用于重油乳化”。于是,他们很快组成了一个小组前往鞍钢。仅仅用了三个月的时间,重油乳化器就研究成功了。这一技术难题的攻克,不仅给鞍钢带来了巨大的经济效益,而且给科海的发展创造了极其有利的条件。把重油乳化器在鞍钢仅用于一个冶炼厂,一年就创出效益 554 万元。后来,冶金部在全国炼钢厂推广了这一技术,在更大的范围产生的经济效益可想而知。

实例 2:科海集团当初办的第二件大事是为胜利油田解决了因油田污染农田每年向农民大量赔偿的难题。多年来,胜利油田不论是否增加了污染农田的面积,每年都必须向农民赔偿相当数额的费用。他们苦于无法拿出科学的证据,说明究竟今年是否比上一年增加了污染面积。了解了这一情况后,科海公司租了一架飞机,进行了油田的航空遥感拍照,每年进行一次。他们利用每年的照片与上一年的照片进行对比,对每一口油井都能做出定量的污染评估。这样一来,在与农民交涉时变得既非常客观又非常具有说服力。从而为油田节约了大量资金。

实例 3:著名的亚都加湿器公司以加湿器为主要产品,打入市场一举成功。加湿技术是利用超声波的空化作用产生雾状水汽实现的。事实上超声波的空化作用能产生雾状水汽是人们早已知道的现象,但把它拿来给空气加湿,并且制造出加湿器产品就是一种创新。这一创新如果能适合市场的需要,就会取得很好的经济效益。

实例 4:全球定位技术(GPS)是一项新开发的高技术。在汽车上安装全球定位系统就可以随时确定自己的准确位置;野外考察有了全球定位系统就不会迷失方向。中国科学院测量与地球物理研究所把全球定位技术广泛用于大地测量,结合该研

究所具有地理信息的优势,开发出动态 GPS 定位系统。他们在天文观测和时间标准技术的优势基础上,自主开发了 GPS 短期高精度时间信号同步的廉价晶体钟,掌握了长期高精度时间标准技术。目前,他们已经把此技术与邮电部门联合开发成新产品,使我国通信网高精度时间同步技术迈上一个新台阶,并取得了巨大的社会效益和经济效益。

这些成功的事例给我们一个重要的启发:应用已有的物理知识或技术,为它们寻找新的应用方向,正是我们科技工作者应当大力提倡的精神;是让科学技术面向经济主战场,发挥科技威力的实际行动。这条路不仅可行而且能为经济建设做出“短、平、快”的贡献。

当然,把已有的物理知识或技术应用于生产实际中绝不是一件简单的事。就拿超声波乳化技术用于炼钢厂重油乳化来说。仔细分析这一过程就会发现,第一要有需求新信息;第二要有现代物理技术的基本知识;第三要有灵活的头脑;第四要有脚踏实地的精神化力气去开发。这个开发就是创新,因为它是前人没有做过的事。这种创新需要开发者具有较高的科学素质和较强的创新应用现代物理技术的意识。

一个人的科学素质包括多个方面。比如,合理的知识结构,敢于创新的精神,踏实的工作作风和科学态度以及与人合作的精神等等。然而,判断一个人科学素质高低的最重要的标准是看他科学是否有强烈的好奇心。好奇心是成功的前提,是科学素质高的具体体现。

我们强调要培养创新应用型人才,就是要让受教育者善于在实践中发现问题,为科学找到应用。一个人如果能把某一项现代物理技术引入生产实际并创造出价值,那就是一件了不起的事情。

2. 学习现代物理技术,启发自己的创新思维

一方面,我们一定要努力学习各种现代物理技术的基本知识,了解大量的应用实例;另一方面要努力寻找能够应用这些现代物理技术的场合。

北大方正集团的激光排版系统为我们树立了很好的榜样。激光排版系统引进出版印刷行业立即引起了一场革命性的变化,也造就了一大批高科技人才。类似的事情也发生在周林频谱公司,周林利用不同频率的电磁波神奇地为很多病人解除了痛苦。他开发的周林频谱仪由于确有实效而成为畅销产品,使周林公司迅速发展成以周林频谱仪为拳头产品的跨国公司。还有,著名的时代公司,依靠它的硬度计打天下也取得了骄人的战绩,占领着全国 80% 的硬度计市场。

可见,一项物理技术能够引发一个产品,而一个产品能够带出一个成功的公司。当你接触到大量的现代物理技术应用的实例后,你就会产生创新应用现代物理技术的冲动,就会产生应用某项技术的新想法。有些想法可能是脱离实际的,有些则完全可能成为现实。千万不要错过成功的机会!

我们在教学中,开设了“现代物理技术基础”的选修课。学生在学习过程中表现出相当大的热情。他们联系实际写出了不少小论文,现将其中的一部分题目列举如

下：

- 激光在农产品储藏中的应用；
- 利用激光防止汽车追尾的装置；
- 发光二极管的新应用；
- 无屏电影设想；
- 红外自动计数装置；
- 超导储能的应用；
- 微波实时监控系统；
- 光纤传感器在卫生间的应用；
- 用超声波测量骨折和骨裂；
- 用超声波测量猪的脂肪厚度；
- 用超声波测量液体流速和流量；
- 磁场在锅炉水垢处理方面的应用；
- 强磁场与强电场在灭菌方面的应用；

⋮

其实，在传统的物理学范围内，对力学、热学、声学、光学和电学等经典知识，开发出新的应用也应当属于现代物理技术。

几年前，一次国际会议名称为“电刺激杀牛技术国际讨论会”。会上许多专家报告了他们利用自己设计的装置，在宰杀肉牛之前，先用一定的电压和电流对牛实施刺激，然后再进行宰杀。结果加工时，剔骨头比以前容易多了，而且肉的味道也更加鲜美。像这样的设想和试验难道我们没有能力提出吗？答案是否定的！

材料科学是一门十分活跃的现代学科，它与物理学有密切的关系。就拿近年来出现的许许多多现代意义的功能材料来说，你一定能为它们设想出很多新的应用方向。这些新材料各自具有独特的力、热、声、光、电、磁性能。充分了解它们的性能就能为开发它们的应用创造条件。例如，形状记忆合金在一定的温度下可以记住自己的形状。有人把它用于制作人造卫星的天线，发射前先把它卷起来放入卫星内。卫星进入轨道后借助太阳光加热，它就会“恢复记忆”，自动展开成原来的形状。又比如，在日本市场上有一种玩具叫做“顽童入浴”，十分畅销。一个垂头丧气、手脚卷缩的玩偶，当把它放在热水中时，马上变得精神抖擞起来，头发竖立、手脚伸展，面部表情也从沮丧变成眉飞色舞、洋洋得意。可是，一旦离开温水，它立即就会恢复原来的状态。再说说超塑合金。超塑合金具有比普通金属大得多的延展性，在适当的温度下它能像泡泡糖那样伸长10倍、20倍、几十倍甚至上百倍，既不出现缩颈，也不会断裂。

你能不能给形状记忆合金和超塑合金另外找几项新的应用？相信你一定能！

让我们行动起来，试试自己的创新思维和创新能力。

3. 丰富多彩的物理效应与现代物理技术

说到为已有的物理技术寻找新的应用方向,有的人会说,我对已有物理技术的了解也并不多。那么,您就很有必要多学习一些现代物理知识了。除此以外,物理学中有大量的物理效应,你也可以从大量的物理效应中寻找机遇。

多年的基础物理科学研究为我们发现了丰富多彩的物理效应和它们的规律。有很多物理效应已被开发出很多可以直接应用的元件。例如,光电效应是众所周知的现象,如果想把它用于传感方面,只需到市场上购买光电管、光电倍增管,就可以直接拿来用。它们不仅灵敏度很好,而且也很便宜;受到微弱电流的刺激,就能生成电流,从而为我们做出诸如自动控制、光电开关等神奇的动作。

霍尔效应的原理是,如果把一块通有电流的块状金属放在与电流垂直的横向磁场中(如图 1.1.1 所示),其上下两侧将可以输出一个电压,即霍尔电压。霍尔电压的大小由下式决定

$$U_H = K \frac{IB}{b}$$

式中, b 为导体的宽度。显然,霍尔电压的大小除了与材料有关外,由三个因素决定:电流强度

I 、磁场的磁感应强度 B 以及导体的宽度 b 。对于一定的金属材料,当 I 、 B 、 b 确定后, U_H 能计算出来。其实 U_H 、 I 、 B 、 b 四个量中已知三个就能求出另一个。通常 U_H 、 I 和 b 采用仪表测出,从而精确地计算出磁感应强度 B 的大小。换句话说,用霍尔效应可以测量磁场。现在,能发挥霍尔效应功能的霍尔元件已经成批生产,它们的体积很小,有四条引线。其中两条引线用于通入电流,另外两条可输出霍尔电压。用霍尔元件来测磁场很方便。专用于测量磁场的特斯拉计也是用霍尔元件制做的。

如果我们把思路再放开一些。既然霍尔元件可以测磁场,而且任何电流周围都能激发磁场,那么,通过测磁场能不能间接地测出导线里的电流强度呢?这个问题很有意义。通常我们用安培表测量电流强度需要先把导线断开,将电流表接入电路。如果导线中的电流强度相当大或者电压相当高,用这种方式测量不仅不方便,而且也有危险。但是,如果我们把霍尔元件放在这段导线旁边,就能间接测出导线中的电流强度。这种方法的优点十分明显,既避免了仪器需要串入电路,保证了测量的安全;而且直流、交流都可以直接测量。

到市场去看看,利用声学效应制成的声控开关已经广泛用于儿童玩具,无线电遥控装置不仅体积小,而且价格很便宜。就拿普通公寓中楼道的电灯来说,在黑暗时,一跺脚灯就亮。但你会发现,白天故意跺脚它也不会亮。可见,小小的控制开关既有声控又有光控功能。然而价格只有 12 元左右。现在,市场上的光电二极管、光电三极管等用于传感的元件也都具有体积小、安全可靠、价格低的特点。我们为什么不能为它们设计出新的用途呢?

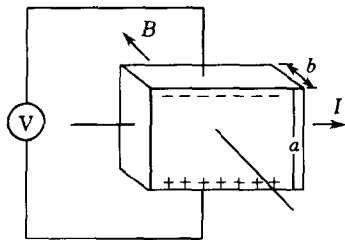


图 1.1.1 金属导体的霍尔效应

参 考 文 献

- 1 周济等. 科技创新院士谈. 北京: 科学出版社, 2001
- 2 马俊如, 余翔林. 高技术前沿展望. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995
- 3 陈谊生等. 物理效应及其应用. 天津: 天津大学出版社, 1996

第2章 光纤技术 (Optical Fiber Technology)

从信息领域的视角观察,光纤技术主要涉及两个方面:信息的传输与采集,前者属于光纤通信技术,后者属于光纤传感技术。这两种技术对光纤性能的要求有相同点也有不同点。光纤通信技术对光纤性能的要求主要是其损耗、色散值。而光纤传感技术对光纤性能的要求则是多种多样:有的仅需测出光强的调制信号;有的则需检测其相位或偏振的调制信号;而且不少情况下需传输的模拟信号会在传输过程中发生畸变;有的则需对光纤进行增敏或去敏处理;等等。本章在介绍光纤的基本原理以后,将着重介绍光纤通信技术和光纤传感技术,以及它们的最新进展,以使读者对光纤的使用有一个比较全面的了解。

2.1 光纤原理

2.1.1 光纤的结构与分类

光纤是光导纤维的简称。它是工作在光波波段的—种介质波导,截面通常是圆柱形。它把以光的形式出现的电磁波能量利用全反射的原理约束在其界面内,并引导光波沿着光纤轴线的方向传播。光纤的基本结构是两层圆柱形媒质,内层为纤芯,外层为包层;纤芯的折射率 n_1 比包层的折射率 n_2 稍大。当满足一定的人射条件时,光波就能沿着纤芯向前传播。图 2.1.1 是单根光纤的结构图。实际上光纤的包层外面还有一层保护层,其用途是保护光纤免受污染和机械损伤。有的光纤结构更为复杂,以满足不同的使用要求。

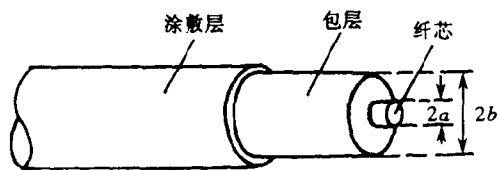


图 2.1.1 光纤的基本结构

光波在光纤中传播时,由于纤芯边界的限制,其电磁场解是不连续的。这种不连续的场解称为模式。从几何光学的角度看,在光纤的受光角内以某一角度射入光纤端面,并能在其内传播的一条光线,称之为一个传播模式。光纤分类的方法很多。按传播模式的数量可分为单模光纤和多模光纤:只能传播一种模式的光纤称为单模光纤;能同时

传播多种模式的光纤称为多模光纤。单模光纤和多模光纤的主要差别是纤芯的尺寸和纤芯—包层折射率的差值。多模光纤的芯径大($2a = (50 \sim 500) \mu\text{m}$), 芯—皮折射率的差大($\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 = 0.01 \sim 0.02$); 单模光纤的芯径小($2a = (2 \sim 12) \mu\text{m}$), 芯—皮折射率的差也小($\Delta = 0.0005 \sim 0.01$)。按纤芯折射率分布的方式可把光纤分为阶跃光纤和梯度光纤。前者纤芯折射率是均匀的, 在纤芯和包层的分界面, 折射率发生突变(或称阶跃); 后者的折射率是按一定的函数关系随光纤中心径向距离而变化。图 2.1.2 给出了这两种光纤的示意图和典型尺寸, 其中(a)是单模阶跃光纤, (b)和(c)分别是多模阶跃光纤和多模梯度光纤。

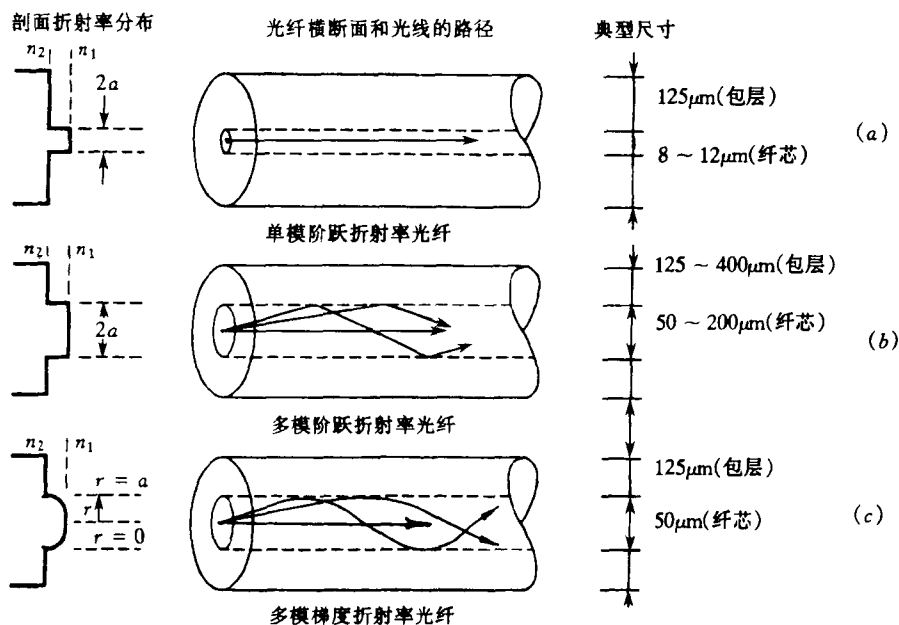


图 2.1.2 两种光纤的示意图和典型尺寸

按传输的偏振态分, 单模光纤可分为非保偏光纤和保偏光纤。其不同是前者不能传输偏振光, 而后者可以。保偏光纤又可再分为单偏振光纤、高双折射光纤、低双折射光纤和圆保偏光纤四种。只能传输一种偏振模式的光纤称为单偏振光纤; 只能传输两正交偏振模式、且其传播速度相差很大者为高双折射光纤; 而其传播速度近乎相等为低双折射光纤; 能传输圆偏振光的则称为圆保偏光纤。

按制造光纤的材料分, 有: ①高纯度石英光纤, 其特点是材料的传输损耗低, 一般小于 1 dB/km , 有的可低到 0.2 dB/km ; ②多组分玻璃光纤, 其特点是芯—皮折射率可在较大范围内变化, 因此有利于制造数值孔径大的光纤, 缺点是材料损耗相对较大, 在可见光波段一般为 1 dB/km ; ③塑料光纤, 其特点是成本低, 缺点是材料损耗大, 温度性能较差; ④红外光纤, 其特点是可透过近红外($(1 \sim 5) \mu\text{m}$)或中红外($\approx 10 \mu\text{m}$)的光; ⑤液体光纤, 特点是纤芯为液体, 因而可满足特殊需要; ⑥晶体光纤, 特点是纤芯为单晶, 可用

于制造各种有源和无源光纤器件。

2.1.2 光在阶跃光纤中的传播

分析光在光纤中的传播有两种方法,即几何光学的方法和波动光学的方法。限于篇幅,以介绍第一种方法为主,后一种方法仅做简单介绍。下面用几何光学的方法(即光线理论)分析光在阶跃光纤中的传播特性。

通过光纤中心轴的任何平面都叫做子午面,位于子午面内的光线叫做子午光线。显然,子午面有无数个。根据光的反射定律:入射光线、反射光线和分界面的法线均在同一平面,光线在光纤的芯—皮分界面反射时,其分界面的法线就是纤芯的半径。因此,子午光线的入射光线、反射光线和分界面的法线均在子午面内,如图 2.1.3 所示。这是子午光线传播的特点。

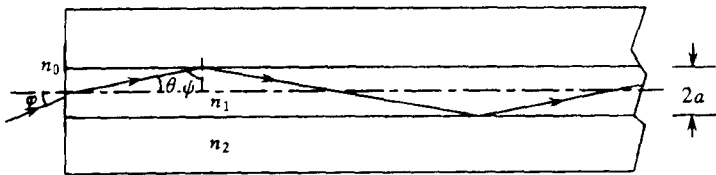


图 2.1.3 子午光线在光纤内的传播

由图 2.1.3 可求出子午光线在光纤内全反射应该满足的条件。图中 n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层的折射率, n_0 为光纤周围媒质的折射率。要使光完全限制在光纤内传播,则应使光线在纤芯—包层分界面上的入射角 ψ 大于(至少等于)临界角 ψ_0 ,即

$$\sin\psi_0 = \frac{n_2}{n_1}, \psi \geq \psi_0 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

或

$$\sin\theta_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

式中, $\theta_0 = \frac{\pi}{2} - \psi_0$ 。再利用 $n_0 \sin\varphi = n_1 \sin\theta$, 可得

$$n_0 \sin\varphi_0 = n_1 \sin\theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

对应于临界角 ψ_0 的入射角 φ_0 , 通称孔径角。与此类似, $n_0 \sin\varphi_0$ 则定义为光纤的数值孔径, 一般用 NA(Numerical Aperture) 表示, 即

$$\text{NA} = n_0 \sin\varphi_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.1.1)$$

式中, NA 表示子午面内的数值孔径, 它反映了光纤集光能力的大小。NA 越大, 光纤的集光能力越强。但是 NA 太大时, 光纤的模式畸变会增加, 影响光纤的带宽。对于通信光纤, NA 应在 0.18 ~ 0.24 的范围内(误差 ± 0.02), 而传光束的 NA 可以稍大些。

2.1.3 光波导理论简介

前面我们用几何光学的方法研究了光在光纤中的传播,这在光纤直径比光的波长大的情况下是适用的。但是,当光纤直径减少到与光的波长接近时,再用几何光学的方法来分析就很不准确,有时甚至无法解释。要对光纤中的光传播得出严格而正确的数学解释,必须采用波动光学的方法。光波是电磁波的一种。与无线电波相比,光波的频率要高得多。因此,光波在光纤中传输的一些基本性质都可以从电磁场的基本方程推导出来,这些方程就是麦克斯韦方程组。麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

式中, \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 分别表示电场强度、磁场强度、电位移和磁感应强度; \mathbf{j} 和 ρ 分别表示电流密度和电荷密度。麦克斯韦方程组严格地描述了电磁场在均匀的、各向同性的无源介质中的时空依赖关系。光纤是圆柱状波导。为了描述光波在光纤中的传播,一般选用柱坐标 (r, θ, z) 。光纤中心轴取做 z 轴,它到参考平面的距离是 z_0 ,径向坐标 r 和角坐标 θ 可确定光纤中任一个空间点的位置。从麦克斯韦方程组可推导出波动方程的电场解为

$$E(r, \theta, z, t) = E(r, \theta) e^{-j(\omega t - \beta z)} \quad (2.1.3)$$

写成正弦函数形式

$$E(r, \theta, z, t) = E(r, \theta) \sin(\omega t - \beta z) \quad (2.1.4)$$

式中, $E(r, \theta)$ 是振幅因子,它取决于 r, θ 的数值;而 $\omega = 2\pi f$; β 是传播常数; f 是光波的频率。为了描述光在阶跃光纤中的传播特征,常使用 V 参数, V 表示归一化频率。

$$V = 2\pi a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} / \lambda_0 \quad (2.1.5)$$

即

$$V = 2\pi a (\text{NA}) / \lambda_0$$

式中, a 为纤芯半径; λ_0 为真空中的波长; NA 为光纤的数值孔径。

根据光波理论,波动方程只存在特定的分立解,这些解对应着以特定速度沿着光纤轴传播的独立波。图 2.1.4 中纵坐标表示传播常数 β ,横坐标表示 V 参数的值,每条曲线对应着波动方程的一个特定解, V 参数随着纤芯半径的增加而增加,随着波长的增加而减少, V 参数的增加,意味着所允许的模式数增加。图中, $V < 2.40$ 时,只允许一个模式存在,即 HE_{11} 模,这就是单模光纤的传输模式; V 在 $2.4 \sim 3.8$ 的范围内,允许有四个模式(或波)存在,它们是 HE_{11} , TE_{01} , TM_{01} 和 HE_{21} ; V 更大时,允许有更多的模式存在。