



信息光子学与光通信系列丛书

丛书主编 任晓敏

光纤布拉格光栅理论与应用

**Theory and Applications of
Fiber Bragg Gratings**

尹飞飞 戴一堂 编 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

国家出版基金项目

NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION PROJECT

信息光子学与光通信系列丛书

丛书主编 任晓敏

光纤布拉格光栅理论与应用

Theory and Applications of Fiber
Bragg Gratings

尹飞飞 戴一堂 编 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

光纤布拉格光栅是一种重要的光纤器件,可应用于光纤通信系统、光纤激光器等领域,同时也是周期性结构的重要代表之一。本书以最基本的布拉格光栅理论为基础,较为系统、完整地介绍了布拉格光栅的起源和发展历程、典型结构和特性、数学模型和仿真分析方法以及光纤布拉格光栅的设计和制作流程。本书着重介绍了光纤布拉格光栅在光信号处理和宽带处理应用的新进展。通过阅读本书,读者可以全面地了解与光纤布拉格光栅相关的原理、技术与近况。

本书可供从事光纤通信、光纤器件领域研究的科技人员参考,也适合光纤通信相关专业的高年级本科生与研究生阅读,亦可作为研究生相应课程的教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤布拉格光栅理论与应用 / 尹飞飞, 戴一堂编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2019. 4
ISBN 978-7-5635-5699-1

I. ①光… II. ①尹…②戴… III. ①光纤光栅—研究 IV. ①TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 054878 号

书 名: 光纤布拉格光栅理论与应用
作 者: 尹飞飞 戴一堂
责任编辑: 刘 颖
出版发行: 北京邮电大学出版社
社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)
发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578
E-mail: publish@bupt.edu.cn
经 销: 各地新华书店
印 刷: 保定市申画美凯印刷有限公司
开 本: 720 mm×1 000 mm 1/16
印 张: 16.25
字 数: 335 千字
版 次: 2019 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-5699-1

定价: 48.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

丛书总序

2013年联合国第六十八届会议决定将2015年设定为“International Year of Light and Light-based Technologies”，即光和光基技术国际年，简称国际光年。人类对光的探索可以追溯到两三千年以前，早在我国春秋战国时期，墨翟及其弟子所著的《墨经》中就记载了光的直线传播和光在镜面上的反射等现象。光学的发展漫长而曲折：1015年前后，伊本·海赛姆写成的《光学》(Book of Optics)，全面介绍了希腊学者对光的认识，对后世欧洲学者产生了巨大影响；1657年，费马(Fermat)得出著名的费马原理，并从原理出发推出了光的反射和折射定律，这两个定律奠定了几何光学的基础，光学开始真正成为一门科学；1815年，菲涅尔(Fresnel)的光的波动性理论是光学发展之路里程碑式的贡献；1861年，麦克斯韦建立起著名的电磁理论，该理论预言了电磁波的存在，这是继牛顿力学之后划时代的巨大贡献；1905年爱因斯坦运用量子论对光电效应提出了新的解释，说明了光具有粒子性；1965年华裔科学家高锟在光纤光导理论方面提出的通信新模式引起了世界信息通信技术的一次革命，高锟也由此被誉为“光纤之父”。

早期的光学主要研究物质的宏观光学特性，如光的折射、反射、衍射、成像和照明等，随着20世纪60年代初激光的出现，光学进入了现代光学的新阶段，人们着重于研究光子与物质相互作用、光子的本质，以及光子的产生、传播、探测等微观机制。光子学(Photonics)这一领域应运而生，光子学是研究以光子作为信息或能量载体的科学。光子学相对于传统的光学有如电子学相对于经典电学，光子学一经提出即引起世界的高度重视。

如今光子学技术已经广泛应用到工业、农业、交通、国防、环保、医疗、生活娱乐等各个领域，当前的因特网超过90%的信息数据通过高速光纤通信网传输；微纳米光学广泛应用在信息处理和存储上；光伏太阳能发电具有节省能源、降低污染等优势，正向数以千万计用户提供电力。在世界各国经济实力与国防力量的较量中，光子学也起着重要作用。光子学，特别是信息光子学技术的应用已经深入到人类活动的方方面面，与日常生活密不可分，我们应该让人们清楚地认识到光子学对人类生活所起到的巨大作用，以及对人类社会可持续发展产生的重要意义。

2015 年是国际光年,也是著名光学科学家王大珩院士和著名光通信科学家叶培大院士(依托北京邮电大学的信息光子学与光通信国家重点实验室创始人)诞辰 100 周年;2016 年又恰逢通信光纤和半导体双异质结构制备成功 50 周年,信息论的创始人香农诞辰 100 周年。值此之际,信息光子学与光通信国家重点实验室编写完成了本丛书,旨在促进信息光子学的进一步发展。希望读者通过本丛书能够了解该领域中的一些新的重要进展,产生某些新的思考。

谨此小序,欢迎交流斧正。

信息光子学与光通信国家重点实验室(北京邮电大学)



任晓敏



徐坤

2016 年 8 月

前 言

自 1978 年加拿大通信研究中心的 Ken Hill 博士制作得到世界上第一个永久性的光纤光栅已四十余年。经过四十余年的发展,光纤光栅在理论、形成机理、制作方法等方面都日趋成熟。目前光纤光栅已经成为光纤通信、光纤激光器、光纤传感中最重要的无源器件之一。随着光纤通信、光纤传感等系统的发展,光纤光栅的应用前景十分广阔。

在光纤布拉格光栅兴起的最初十几年中,人们对光纤布拉格光栅的认识是:光纤布拉格光栅是简单的“滤波器”。1999 年,英国南安普顿大学光学研究中心的 R. Feced 博士等人提出分层剥离理论,该理论的结论是非常鼓舞人的:任何物理可实现的幅频和相频特性都可以设计对应的光纤布拉格光栅将其实现。分层剥离理论也提出了相应算法,可以简单地从频响重构得到光纤布拉格光栅的折射率分布。从此,人们开始进一步探索光纤布拉格光栅对光控制能力的边界,光纤布拉格光栅的理论得到了一次突破式发展。现在,光纤布拉格光栅已不再是在用作简单的“滤波器”,更多的是用作完成各种不同功能的“信号处理器”;其频率响应不仅仅是规规矩矩的矩形反射谱,甚至可以是像相位编解码器那样形如噪声、但却内含密码的幅频响应。人们突然感受到了光纤布拉格光栅的潜力:如此简单的周期性结构,居然可以实现宽带或宽或窄、信道或单或多、色散或大或小等对外性能各异的器件,而其中的诀窍仅仅是对其周期性结构的包络作相应的调整。

本书以最基本的布拉格光栅理论为基础,较为系统、完整地介绍了布拉格光栅的起源和发展历程,典型结构和特性,数学模型和仿真分析方法,以及光纤光栅的设计和制作流程;尤其,本书重点介绍 2000 年之后光纤布拉格光栅领域所呈现的新理论和应用。同时,作者也希望本书的介绍能够启发读者对光纤布拉格光栅的发展、创新理论与应用的思考。

全书共分 6 章。第 1 章是绪论,介绍光纤布拉格光栅的历史起源;第 2 章介绍光纤布拉格光栅耦合模式基本理论;第 3 章介绍光纤布拉格光栅的数值仿真分析方法,并列举了典型光纤布拉格光栅的仿真实例;第 4 章介绍重构理论,通过重构就可以根据所需的光纤光栅的频率响应特性得到折射率调制分布;第 5

章介绍多信道光纤布拉格光栅;第6章介绍重构在光纤布拉格光栅制作过程中的实际应用,利用重构对光纤制作过程进行修正,最终得到接近完美的光纤布拉格光栅频率响应。

本书是作者与合作者多年的研究工作总结。

本书可供从事光纤通信、光纤器件领域研究的科技人员参考,也适合光纤通信相关专业的高年级本科生与研究生阅读,亦可作为研究生相应课程的教学用书。鉴于作者水平有限,书中难免有不妥和错误之处,恳请读者指正和赐教。

作 者

目 录

第 1 章 从光纤到光纤光栅	1
1.1 光纤布拉格光栅的历史	1
1.1.1 光纤和光纤器件	1
1.1.2 光纤光栅的起源	4
1.1.3 光纤布拉格光栅的发展	9
1.1.4 光纤布拉格光栅的研究现状	14
1.2 光纤波导	20
1.2.1 光纤概述	20
1.2.2 折射率和时谐场	22
1.2.3 标量波动方程,从平面波到模式	27
1.2.4 模式的性质	36
1.3 从周期性结构开始	41
1.3.1 周期性平面介质层结构	41
1.3.2 一次反射近似	46
第 2 章 光纤布拉格光栅的理论	50
2.1 耦合模式理论	50
2.1.1 反射耦合理论	50
2.1.2 模式耦合理论	55
2.1.3 布拉格条件	60
2.2 布拉格光栅的数学描述	64
2.2.1 耦合模方程	64
2.2.2 折射率调制	65
2.2.3 弱耦合近似	74
2.2.4 均匀布拉格光栅	75
2.2.5 光纤布拉格光栅的级联传输矩阵模型	77

第3章 光纤布拉格光栅的仿真分析	81
3.1 均匀布拉格光栅的频时分析	81
3.1.1 频率响应特性	81
3.1.2 时域仿真	95
3.2 任意折射率调制布拉格光栅的仿真分析	104
3.2.1 级联传输矩阵仿真	104
3.2.2 空间分布	112
3.3 典型光纤布拉格光栅	118
3.3.1 切趾与滤波	119
3.3.2 啁啾与色散	122
3.3.3 相移与谐振	133
3.3.4 叠印布拉格光栅	147
3.3.5 采样布拉格光栅	150
第4章 光纤布拉格光栅的重构	153
4.1 重构的理论	153
4.1.1 基于傅里叶变换的重构	153
4.1.2 分层剥离重构	158
4.2 重构的等效实现	166
4.2.1 等效啁啾	166
4.2.2 重构-等效啁啾理论	170
4.2.3 重构-等效啁啾的修正模型	176
4.2.4 等效相移	180
4.3 等效的推广	186
4.3.1 正系统和等效相位调制	186
4.3.2 采样布拉格光栅中的其他等效	189
第5章 多信道布拉格光栅	191
5.1 宽带多信道布拉格光栅	191
5.2 采样大啁啾布拉格光栅	194
5.2.1 两类采样光栅模型·相位采样	194
5.2.2 采样大啁啾理论	198
5.2.3 基于 LCSBG 的多信道色散补偿	207
5.2.4 采样大啁啾光栅的修正模型·信道间色散斜率	213

第 6 章 基于重构的采样布拉格光栅的制作	219
6.1 面向采样光栅的重构和修正方法	219
6.1.1 制作平台和可重复性	219
6.1.2 光谱的局部重构与光栅的整体修正	221
6.2 应用举例	223
6.2.1 重构-等效啁啾方法	223
6.2.2 采样大啁啾光纤光栅	241

第 1 章 从光纤到光纤光栅

1.1 光纤布拉格光栅的历史

人们对光纤布拉格光栅的态度,侧面反映了对光信号处理前途的态度。

1.1.1 光纤和光纤器件

2009年10月6日是值得光纤通信领域的所有研究人员关注和记住的日子:瑞典皇家科学院向华裔物理学家高锟博士颁发了诺贝尔物理学奖,以表彰他在“有关光在纤维中的传输以用于光学通信方面”取得的突破性成就。1966年,高锟博士发表了一篇题为《光频率介质纤维表面波导》的论文,描述了长程及高信息量光通信所需绝缘性纤维的结构和材料特性,开创性地提出光导纤维在通信上应用的基本原理。自此,光纤开始深入长距离通信的各个领域,光纤本身的性能也得到迅速提升:

- 1970年,美国康宁公司三名科研人员马瑞尔、卡普隆、凯克用改进型化学相沉积法成功研制成传输损耗只有 20 dB/km 的低损耗石英光纤。
- 1972年,光纤的传输损耗降低至 4 dB/km。
- 1974年,美国贝尔研究所发明了低损耗光纤制作法(即气相沉积法),使光纤传输损耗降低到 1.1 dB/km。
- 1976年,光纤传输损耗被降低至 0.5 dB/km。
- 1979年,该数值又被刷新至 0.2 dB。
- 1990年,光纤传输损耗降低至 0.14 dB/km,已经接近石英光纤的理论衰耗极限值、即 0.1 dB/km。
- 2017年9月28日,美国康宁公司宣布已成功控制 10 亿千米光纤。

两个因素决定了光纤在长途通信中的地位:光载波的超高频特性;光纤的超低损耗。前者保证了海量的信号可以承载到光这一特殊频段的电磁波之上,而后者则保证了光纤有能力将承载信号的光传播到地球上的任何地方。目前,单根光纤的通信容量已经可以轻松地突破 100 Tbit/s。利用多股光纤制作而成的光缆已经铺遍全球,成为互联网、全球通信网络等的基石,它的应用是全球信息化进程的一次革命,构成了支撑我们信息社会的骨架。

在 2010 年全球光纤通信盛会上,光通信领域的科学家和研究人员汇聚一堂,共

同庆祝这一盛事,并以“100年的成就”给高锟博士对全球通信领域的贡献定位。巧合的是,100年前(即1909年),意大利科学家伽利尔摩·马可尼以实用无线电报通信的创始人获得了诺贝尔物理学奖,从此开创了无线电通信的时代,被世人称为“无线电之父”。该发明之后,“长途靠无线、短途靠有线”的通信模式,迅速成为世界主流。而光纤的发明给通信模式带来了巨大的变革,正如诺贝尔奖评委会的描述,“光流动在细小如线的玻璃丝中,它携带着各种信息数据传递向每一个方向,文本、音乐、图片和视频,因此能在瞬间传遍全球”。光纤发明后,通信方式演化为“长途靠有线、短途靠无线”的模式,高锟博士也成为名副其实的“光纤之父”。

光纤通过特殊的截面结构将光限制在其中,只能沿着光纤延时的方向传播。光信号在光纤内的传播,不可避免地要受到光纤这一载体的影响。因此,人们关注光纤的损耗,关注入纤功率增大后引发的非线性效应,关注入纤信号速率提高后凸显的光纤色散和偏振模色散,等等。光纤固有的这些效应,一直是人们设计和拉制光纤的时候重点关注的对象,它们是光纤通信容量的限制因素。然而,这些效应也可被人为地利用,从而实现某种特定的光信号处理,并成为光纤通信或其他应用所需要的手段。比如,可以对光纤材料进行掺杂和泵浦,使光纤具有增益特性,实现光信号的直接放大(即不通过光电和电光转换);可以增强光纤芯径对光的束缚能力、提高模式色散,实现高色散系数的光纤,用来补偿普通的通信光纤内的色散;可以通过降低光纤的有效模场面积来实现光纤非线性效应的增强,达到高速光信号处理等目的。也就是说,光纤除具有众人熟知的光信号长距离传输能力外,还具有光信号处理的能力(只要我们对材料或者结构进行有目的的修改)。上面提到的增益光纤、色散补偿光纤、高非线性光纤等,仅改造了光纤非常纤细的截面特性或者结构;更多的修改,可以发生在沿着光纤延伸方向的纵向上。比如,将两根光纤沿着延伸方向并行排列,使它们芯径之间的距离极大地缩减,两根光纤各自的模式不再独立,两者之间就会发生耦合,从而得到人们广泛使用的光纤耦合器(如图1-1-1所示)、光纤波分复用器等。另一种修改方式是,在光纤纵向使其结构不再均匀,形成某种周期性的变化。经过此修改方式后所得的结构即是本书将重点讲述的光纤光栅。

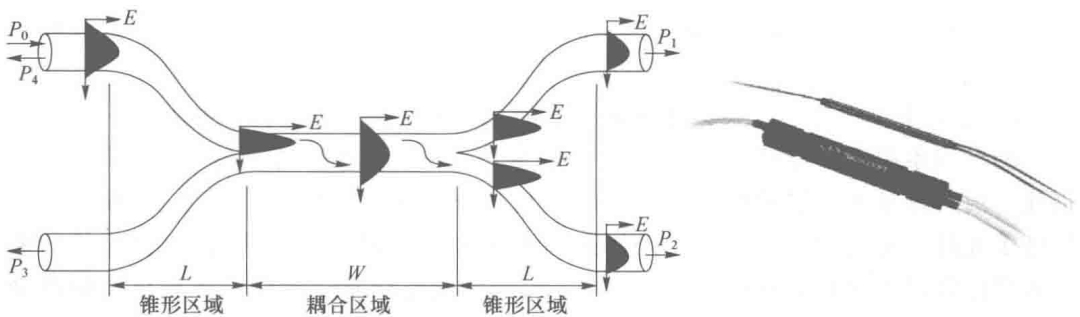


图 1-1-1 光纤耦合器

在光纤逐渐成为信息传输的重要载体的同时,基于光纤的各种器件也被人们寄

予厚望,希望它们成为光纤系统中的重要角色。光纤器件最大的优势在于,能够和传输光纤兼容。既然要用到光纤系统中,功能器件和光纤必须物理连接。光纤器件只需要通过光纤焊接机就可以永久地与光纤连接,如图 1-1-2(a)所示。随着焊接技术的发展,光纤和光纤之间的连接损耗很快就被控制在 0.1 dB 以内。

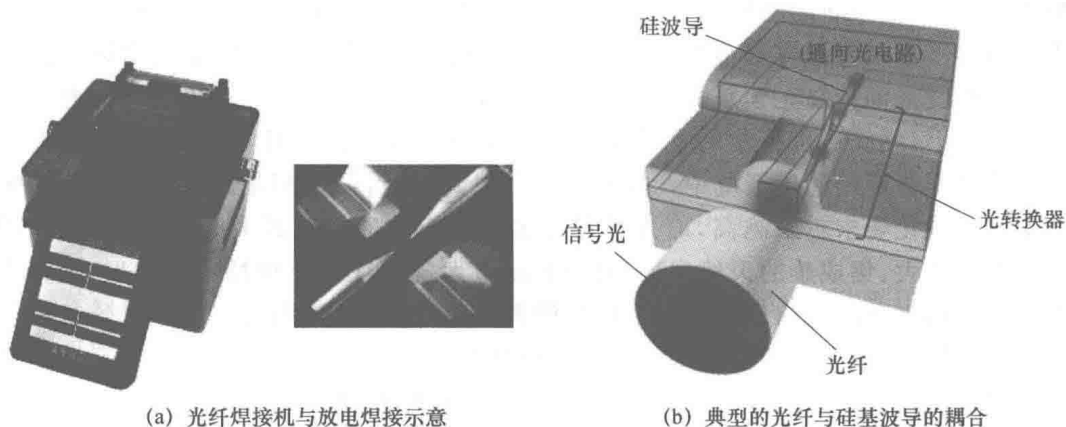


图 1-1-2 光纤的连接与耦合

而其他光器件与光纤的连接基本无法实现永久性焊接,通常需要微透镜等结构,通过精细对准等操作才能实现,如图 1-1-2(b)所示;而且,虽然绝大多数光器件的输入输出端口也是光波导,但由于材料和波导结构的差异,其模场结构与光纤的模场之间往往具有较大的变化,两者之间的模式转换既要求对准精度高,又难以达到极低的损耗。另外,集成光器件与光纤之间的耦合,当前仍缺乏有效的自动完成装备,仍属于劳动密集型操作,成本高。可见,光纤器件的优势是非常明显的。

在几十年的发展中,有几种确实或者曾经成为光纤系统的不可或缺的成员。最成功的当属掺铒光纤放大器(EDFA),它的基本功能就是能够对覆盖十几纳米的光进行高增益的放大;而且,掺铒光纤放大器的材料特性,决定了它具有很长的弛豫振动周期,当光信号功率变化超过 MHz 时,放大器的放大特性是线性、格式无关的,即没有半导体放大器中所存在的严重的码型效应。掺铒光纤放大器的成功之处在于它使得波分复用技术成为可能;而波分复用技术在 20 世纪 90 年代席卷了整个光纤通信领域,极大地提高了光纤的通信容量,而且成功地将它在当时的有力的竞争对手——相干光纤通信技术——的研究拖后了十几年,直至波分复用系统完全成熟之后。光纤放大器的长弛豫振动周期产生了另一个奇妙之处,其增益可以与光脉冲的峰值功率无关,因而可以对峰值功率远超泵浦功率的光脉冲实现高增益放大。这使得光纤放大器在超短脉冲光源方面具有重要应用。光纤耦合器、功分器也是光纤系统中不可缺少的器件,虽然其从原理到制作过程都非常简单,但正是由于这种简单使其成本极低,从而大量地应用到光纤网络中。不可否认,掺铒光纤放大器或者光纤耦合器的功能都非常单一。实际上,即使较为复杂的光纤耦合器也只能具有较弱

的频率选择性,比如用到掺铒光纤放大器中作为 980 nm 和 1 550 nm 两个波段的波分复用器。光纤系统需要具有更多功能的光纤器件,尤其是当波分复用、密集波分复用等技术发展起来之后,人们将眼光投向了光纤光栅。

人们曾经希望,光纤光栅能够像掺铒光纤放大器、光纤耦合器一样在光纤系统中不可或缺,带来新的里程碑式的革命。甚至有人曾经认为,“光纤光栅的出现迫使人们不得不重新考虑光通信系统中的每一个设计……将来光通信系统中如果没有光纤光栅就如同传统光学系统中没有镜片一样令人难以置信”。该论断的确有所夸张。事实上,光纤通信技术的发展在近十年内可以说是日新月异,光纤光栅没有像预期的那样在商用通信系统中大规模使用。究其原因,一方面是因为当前高速系统对器件集成化要求越来越高,而光纤器件虽然具有与通信光纤兼容的天然优势,但也具有体积大、集成难的天然劣势;另一方面是大规模数字处理技术的发展,使得人们具有了将复杂的光信号处理向电信号处理转移这一预期,而这一预期又恰好同当前微电子技术、数字处理技术的发展势头相吻合。

即使如此,光纤光栅的特殊性使其在光纤系统中仍然占有一席之地。除了商用光纤通信系统,在光纤传感、非通信用光纤器件中,光纤光栅往往是研究或开发人员经常想起和采纳的手段。这是因为,除之前所说的与光纤兼容外,在实现的功能上,光纤光栅具有下面两个与其他光器件有明显区别的特点。首先,光纤光栅基于其周期性结构和众所周知的布拉格条件,具有波长选择性,而该特性正是波分复用系统所需要的。其次,光纤光栅的载体仍然是损耗极低的光纤,因而其几何尺寸可以做得较大;由于与波长相关的光器件绝大多数都是基于干涉原理的,器件的尺寸大意味着其波长选择性的精度高,即光纤光栅在频域可以对光信号进行更为精细的处理。这些特性在光纤光栅的发展过程中都已经被认证。除此之外,光纤光栅的周期性结构可以推广到其他波导器件中。

1.1.2 光纤光栅的起源

光纤的诞生催生了各种对其近似或者精确描述的理论。不管理论简单还是复杂,它们都告诉我们,如果把光比作自由流动的水,那么光纤就是一根管道,它能够将光束束缚在其内向前传输。光纤光栅,就像是水管内壁,垂直于水流方向假设人为刻的一排槽:当被束缚的光沿着光纤传播的时候,将被周期性地扰动。横向被束缚,纵向被周期性地扰动,是光纤光栅最直观的物理图像。很显然,“横向被束缚”是所有光波导所共有的物理过程;而“纵向被周期性地扰动”则是光纤光栅的特色。但如果我们追溯历史,并且放宽眼界,就会发现后一物理过程也并不是光纤特有的。光甚至更广义的电磁波受周期性结构的扰动而形成干涉条纹,是一个经典的模型^①。

光的干涉现象,是历史上首次实际观察到的光的波动特性。伽柏在 1971 年获得

① [印度]Ajoy Ghatak. 光学[M]. 4 版. 张晓光、席丽霞、余和军,译. 北京:清华大学出版社,2013.

诺贝尔物理学奖的时候说：“托马斯·杨于1801年通过一个出奇简单的实验，第一次令人信服地解释了光的波动本性……他让一束太阳光射入暗室，在暗室的前面放置一个带有两个针孔的黑屏，在黑屏后面一定距离放置一个白屏。他在一条亮线两边看到了两条微暗的线，这样的结果让他有足够的勇气去重复做这个实验。他使用了撒有食盐的火焰作为光源，来产生明亮的钠黄光。这次，他观察到了一系列规则排列的暗纹；第一次明确给出了光波与光波叠加能产生暗纹的证据。这个现象被称作干涉。托马斯·杨在之前就预料到了这个结果，因为他相信光的波动理论。”所谓干涉，是指光和光所必须满足的叠加规则。这一规则，在当时被称为波动特性，并且受限于当时的理论水平，科学家们只能唯像地利用三角函数对光进行描述。直到几十年后，詹姆斯·麦克斯韦天才般地指出光实际上是具有特殊频段的电磁场，并且给出了完美的数学描述。

对利用电磁理论描述的光而言，干涉叠加是无条件满足的；但要在实际中观察到稳定的干涉叠加，则要求参与叠加的光之间具有相干性，比如托马斯·杨在实验（如图1-1-3所示）中所用到的，由同一光源发射，但由两个小孔分开的两个光源。这两个点光源向四周发送光波，在空间中的任意点相遇，通过计算该任意点到两个点光源之间的相位差，就可以知道光场在该点是相干相长还是相干相消。那些完全相干相消、强度最小的点构成的曲线，被称为节线；对于两个完全相同的理想点光源，它们构成的节线是双曲线组。节线和节线之间，存在着相干相长之处；因而在这里，干涉现象的表现形式是，空间分布的明暗条纹，如图1-1-3所示。

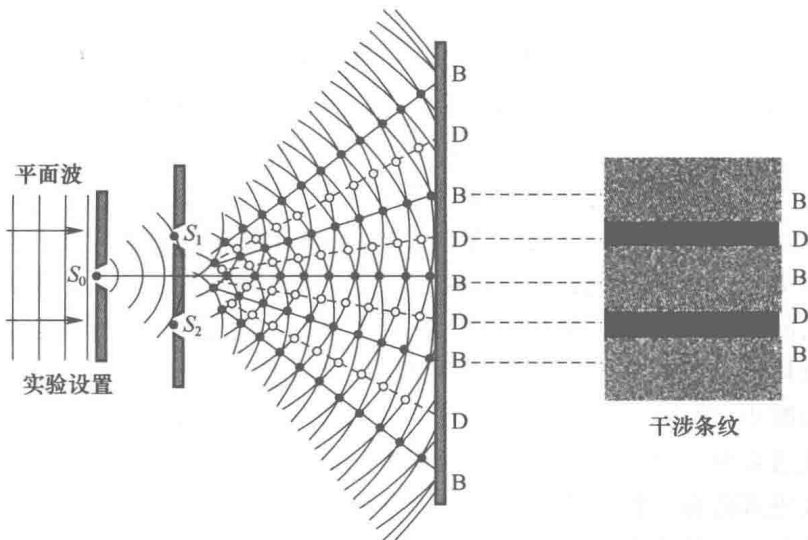


图 1-1-3 杨氏双缝干涉实验示意图

在这个分布中，有两条特殊的分布线，即两个点光源的连接线向外的延长线部分。在那里，每个点到两个点光源之间的相位差是恒定的；也就是说，在这些地方，光场叠加导致这些地方具有恒定的场强。在这些地方我们看不到干涉导致的具有

空间分布的干涉条纹；但干涉仍然存在，因为其场强仍然由该点到两个点光源之间的相位差决定。这个相位差，和光源所发射的光波的频率是相关的；这时候如果我们改变点光源的频率，相位差自然也随之改变，场强则同样能够经历从相干相长到相干相消的周期性过程。换句话说，在这种情况下，我们几乎可以在任意点处，观察到场强在频域中的明暗条纹分布。能够实现该功能的装置，包括由美国物理学家迈克耳孙发明，因 1887 年进行了迈克耳孙-莫雷实验得到了以太风测量零结果而闻名的迈克耳孙干涉仪，如图 1-1-4 所示。

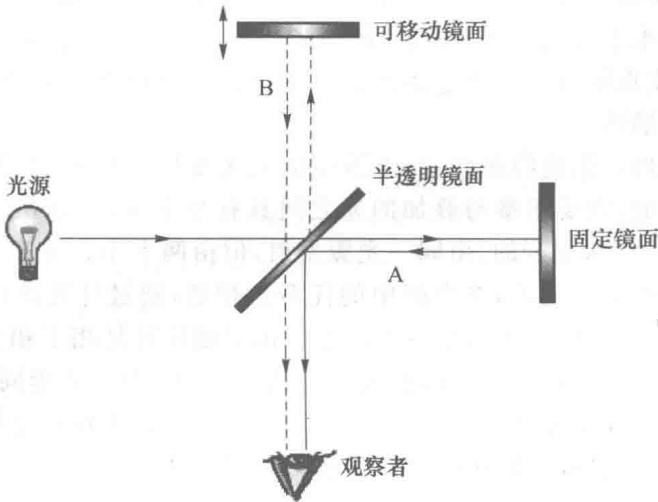


图 1-1-4 迈克耳孙干涉仪

在迈克耳孙干涉仪中，一束光被一个半反射半透射的膜片分成两束，从而保证了参与叠加的光场之间的相干性。而在 1897 年发明的法布里-珀罗干涉仪中，一束光被两个平行放置的半反射半透射膜片反复分割，可以保证更多的、具有相干性的光场参与叠加。除能够同样形成频域的干涉条纹外，法布里-珀罗干涉仪中参与干涉的光束数目更多，不再是以前的双光束干涉了。光束数目增多，意味着它们在两个反射膜片之间往返的距离更大，其相位随光波频率的改变将更加敏感；因而能够保证所有光束均满足最大相干相长或同时满足最小相干相消的频率范围也随光束数目的增大而减小，也就是说，频域干涉条纹将更细，如图 1-1-5 所示。因而，法布里-珀罗干涉仪比迈克耳孙干涉仪更多地应用到高分辨光谱学中。

为了让更多的相干性光束参与到干涉叠加中，法布里-珀罗干涉仪的两个膜片要求很高的反射率。倘若膜片反射率很低，则有一种等效的方式来实现多光束干涉：将反射膜片在空间上周期性展开来模拟多次反射的效果。这样，当光入射后，它被每个膜片所反射（多次反射可以在每个膜片反射率很低的近似下忽略掉），所有的反射光束在入射端相干叠加，如图 1-1-6 所示。可以想象，该结构在频域的干涉条纹将具有和法布里-珀罗干涉仪相近的特性：反射层面数目越多，频域干涉条纹越细。法

布里-珀罗干涉仪中两个膜片之间的反射保证了参与干涉的多光束之间的相位差别是严格相等的；既然新结构是用来模拟法布里-珀罗干涉仪的，那它也具有周期性，即相邻反射膜片之间的光程是相同的。

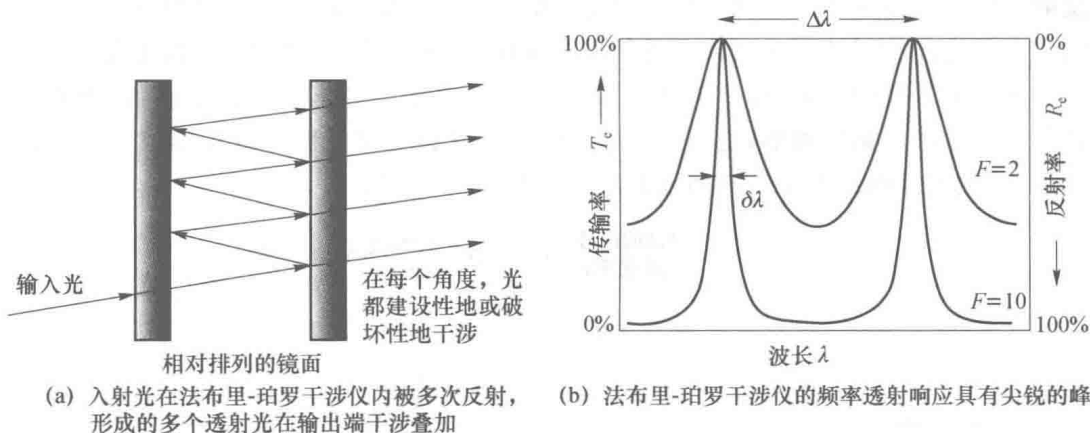


图 1-1-5 法布里-珀罗干涉仪原理与响应

干涉是大自然赋予我们的，在“空”和“频”两个维度对光进行有效控制（正如上面的条纹的形成过程，或者在某处增强光场，或者在某处抑制光场）的手段，并且被敏感的先贤们准确地捕捉到。从简单的双缝到复杂的周期性结构，干涉都在坚定不移地发挥着作用；实际上，周期性结构只不过是双缝干涉的复杂版本而已。而光纤光栅这一存在于光纤内部的周期性结构，也只不过是周期性结构的一种具体的表现形式。很自然地，光纤光栅必将具有周期性结构的共性。在前人坚实而又普适的基础上，光纤光栅的兴起只需要解决一个问题：如何在光纤内引入周期性结构。

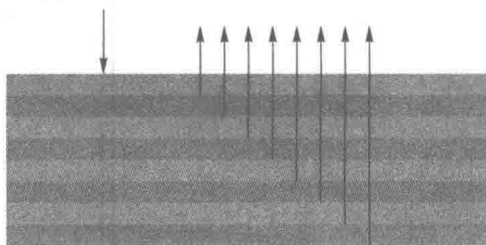


图 1-1-6 周期性结构带来的逐层反射

世界上第一个永久性的光纤光栅是 1978 年由加拿大通信研究中心的 Ken Hill 博士等人制作得到；更准确地说，是他们发现了光纤的光敏性。这次发现是一个很偶然的过程。当时的研究内容，是氦离子激光器输出的高强度可见光在掺锗光纤内引起的非线性效应；却意外发现入射的光会被反射回来，而且几分钟后反射率开始增大，直到反射率接近 100%。频谱测量发现，1 m 长的光纤具有一个很窄的反射峰；而且该反射谱对温度、应力均敏感。经过分析，研究人员认为这种反射是由于入射光在光纤内部写入