

附：光纤通信原理自学考试大纲

光纤通信原理

组编 / 全国高等教育自学考试指导委员会
主编 / 张金菊

全国高等教育自学考试指定教材

计算机通信工程专业 (独立本科段)

中国人民大学出版社

全国高等教育自学考试指定教材
计算机通信工程专业(独立本科段)

光纤通信原理

(附:光纤通信原理自学考试大纲)

全国高等教育自学考试指导委员会 组编

主编 张金菊

中国人民大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信原理/张金菊主编
北京:中国人民大学出版社,1999
全国高等教育自学考试指定教材
ISBN 7-300-02772-5/F·849

I. 光…
II. ①张… ②高…
III. 光缆通信-高等教育-自学考试-教材
IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 25542 号

全国高等教育自学考试指定教材
计算机通信工程专业(独立本科段)

光纤通信原理

(附光纤通信原理自学考试大纲)

全国高等教育自学考试指导委员会 组编

主编 张金菊

责任编辑 陈培林 陈艳春

版式设计 王坤杰

出 版:中国人民大学出版社
(北京海淀路 157 号 邮编 100080)

E-mail: rendafx@263.net

印 刷:北京友谊印刷有限公司

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:16.5

2000 年 3 月第 2 版 2004 年 2 月第 2 次印刷

字数:399 000

定价:21.00 元

(凡购买我社图书者,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,
请与当地教材供应部门联系调换;版权所有,不得翻印)

组 编 前 言

当您开始阅读本书时，人类已经迈入了二十一世纪。

这是一个变幻难测的世纪，这是一个催人奋进的时代。科学技术飞速发展，知识更替日新月异。希望、困惑、机遇、挑战，随时随地都有可能出现在每一个社会成员的生活之中。抓住机遇，寻求发展，迎接挑战，适应变化的制胜法宝就是学习——依靠自己学习、终生学习。

作为我国高等教育组成部分的自学考试，其职责就是在高等教育这个水平上倡导自学、鼓励自学、帮助自学、推动自学，为每一个自学者铺就成才之路。组织编写供读者学习的教材就是履行这个职责的重要环节。毫无疑问，这种教材应当适合自学，应当有利于学习者掌握、了解新知识、新信息，有利于学习者增强创新意识、培养实践能力、形成自学能力，也有利于学习者学以致用、解决实际工作中所遇到的问题。具有如此特点的书，我们虽然沿用了“教材”这个概念，但它与那种仅供教师讲、学生听，教师不讲、学生不懂，以“教”为中心的教科书相比，已经在内容安排、形式体例、行文风格等方面都大不相同了。希望读者对此有所了解，以便从一开始就树立起依靠自己学习的坚定信念，不断探索适合自己的学习方法，充分利用已有的知识基础和实际工作经验，最大限度地发挥自己的潜能以达到学习的目标。

欢迎读者提出意见和建议。

祝每一位读者自学成功。

全国高等教育自学考试指导委员会

1999年10月

编 者 的 话

光纤通信技术的发展速度出乎人们的料想，从 20 世纪 70 年代后期，世界上建立第一条光缆实验线路起，至今在 20 年的时间里，光缆线路已遍及祖国大地。许多工程技术人员迫切要求通过自学，迅速掌握这门通信技术。

然而，光纤通信技术涉及的理论较深，面也广，较难掌握。针对这种情况，我们在多年教学的基础上，编写了这本材料。在编写过程中，注意到既要使学员对光纤通信有全面的了解，又要掌握一定的理论深度。对于较深的理论，尽力考虑到在编写过程中使内容便于自学。为了使没有学过电磁场理论的学员建立起光波传输的概念，我们在教材的前面加了有关光波传输的一些预备知识，供学员在自学过程中参考。

在编写过程中，得到上海交通大学电子信息学院宋文涛教授、北京邮电大学电信工程学院李玲教授、北京邮电大学函授学院李文海教授的热心指导与帮助，在此表示衷心的感谢。

本教材的预备知识由高炜烈、张金菊合编，第一、二、三、四、八章由张金菊同志编写，第五、六、七、九、十章由高炜烈同志编写。全书由张金菊同志统编。

由于编者水平有限，时间仓促，错误不妥之处难免，请读者批评指正。

张金菊 高炜烈

1999 年 2 月

目 录

光纤通信原理

预备知识.....	3
第一节 两种基本的研究方法.....	3
一、几何光学方法.....	3
二、波动光学方法.....	3
第二节 电磁场的基本方程式.....	4
第三节 电磁波的波动现象.....	6
第四节 简谐时变场的波动方程——亥姆霍兹方程.....	6
第五节 均匀平面波的一般概念.....	7
第六节 平面波在两介质交界面的反射和折射.....	9
一、斯奈耳定律.....	9
二、菲涅尔公式.....	10
第七节 平面波的全反射.....	11
第八节 导行波和辐射波.....	11
一、介质 I 中的波.....	12
二、全反射情况下, 介质 II 中的波.....	14
三、导行波.....	16
四、辐射波.....	17
小结.....	17
复习思考题.....	18
参考书.....	18
第一章 概述.....	19
第一节 光的性质.....	19
第二节 光纤通信的特点.....	20
一、光纤通信的主要优点.....	20
二、光纤通信与电通信的比较.....	20
第三节 光纤通信系统的基本组成.....	21
一、强度调制—直接检波通信系统的组成.....	21
二、调制方式.....	21

三、损耗和传输带宽	22
第四节 光纤通信的发展动向	22
参考书	23
第二章 介质薄膜波导	24
第一节 薄膜波导的结构	24
第二节 薄膜波导中波的分类	25
一、导波	25
二、衬底辐射模	25
三、数层辐射模	26
第三节 用射线法分析薄膜波导中的导波	26
一、薄膜波导中导波的形式	27
二、薄膜波导中导波的特点	27
三、薄膜波导中的单模传输条件	31
四、薄膜波导中模数量的求法	31
小结	32
复习思考题	33
习题	34
参考书	34
第三章 光导纤维和光缆	35
第一节 光纤的结构和分类	35
一、光纤的结构	35
二、光纤的种类	35
第二节 阶跃型光纤	37
一、阶跃型光纤光射线的理论分析	37
二、阶跃光纤的标量近似分析法	40
第三节 渐变型光纤	51
一、渐变型光纤光射线的理论分析	51
二、渐变型光纤的标量近似解法	56
第四节 单模光纤	62
一、单模光纤的折射率分布	62
二、单模传输的理论分析	64
三、单模光纤的双折射	66
第五节 光纤的传输特性	68
一、光纤的损耗特性	68
二、光纤的色散特性	70
第六节 常用的光缆结构和种类	79
一、光缆的基本结构	80
二、光缆的种类	81
小结	82

复习思考题	83
习题	83
参考书	84
附录一 标量解场方程的推导	85
一、横向电场 E_y 的表示式	85
二、横向磁场 H_x 的表示式	87
三、轴向电场 E_z 和轴向磁场 H_z 的表示式	87
附录二 双曲正割型折射指数分布光纤可以获得 自聚焦的证明	90
附录三 标量亥姆霍兹方程解的推导	92
第四章 光源和光发射机	95
第一节 与激光器有关的概念	95
一、光子	95
二、费米能级	95
三、光与物质的三种作用形式	97
第二节 激光器的一般工作原理	98
一、粒子数反转分布与光放大之间的关系	98
二、激光器的基本组成	99
三、激光器的参量	100
四、谐振频率	101
第三节 半导体激光器 (LD)	102
一、半导体激光器的结构和工作原理	103
二、半导体激光器的工作特性	106
第四节 半导体发光二极管 (LED)	109
第五节 光源的调制	110
一、光源的直接调制	111
二、光源的间接调制	112
第六节 光发射机	112
一、对光发射机的要求	113
二、光发射机的组成	113
小结	116
复习思考题	117
习题	117
参考书	117
第五章 光电检测器和光接收机	118
第一节 半导体的光电效应	118
第二节 光纤通信中常用的半导体光电检测器	119
一、PIN 光电二极管	119
二、APD 光电二极管	120

第三节	光电检测器的特性	122
一、	响应度 R_0 和量子效率 η	122
二、	响应时间	122
三、	暗电流 I_D	123
四、	雪崩倍增因子 G	123
五、	倍增噪声和过剩噪声系数 $F(G)$	123
第四节	数字光纤通信接收机的基本组成	124
一、	数字光纤通信接收机的组成方框图	125
二、	各组成部分的功能	125
三、	一个实际的光接收机电路	132
第五节	光接收机的灵敏度和动态范围	132
一、	光接收机灵敏度	132
二、	接收机的动态范围	133
第六节	光接收机的噪声	133
一、	研究光接收机噪声的目的	133
二、	光接收机噪声的主要来源	134
三、	计算光接收机噪声的说明	134
四、	计算光接收机灵敏度的说明	135
小结		135
复习思考题		136
习题		136
参考书		136
第六章	光纤通信系统	137
第一节	强度调制—直接检测光纤通信系统的组成	137
一、	系统的组成方框图	137
二、	光中继器	137
三、	监视控制系统	139
四、	脉冲插入与脉冲分离	143
五、	光路中的无源器件	143
第二节	光纤通信中的线路码型	147
一、	研究传输码型的必要性	147
二、	选择码型应满足的主要要求	148
三、	光纤通信中常用码型	148
第三节	光纤通信系统的性能指标——误码率和抖动	153
一、	误码性能	153
二、	抖动性能	155
第四节	光纤通信系统设计概述	157
一、	系统部件的选择	157
二、	设计光纤通信系统时有关指标的计算和验算	158

第五节 光纤模拟通信系统	163
一、光纤图像模拟传输系统	163
二、光纤脉冲模拟传输系统	164
小结	166
复习思考题	166
习题	167
参考书	167
第七章 同步数字体系 (SDH)	168
第一节 同步数字体系的产生	168
一、准同步数字体系 (PDH) 的复接情况	168
二、PDH 的固有缺点	168
三、SDH 网的提出和基本特点	169
第二节 SDH 的速率与帧结构	170
一、同步数字体系的速率	171
二、同步数字体系的帧结构	171
第三节 SDH 的复用结构和映射方法	173
一、我国采用的复用结构和映射方法	174
二、图中各符号说明	175
三、映射、定位、复用过程举例	176
四、SDH 传送网的分层模型	178
第四节 SDH 的开销功能	179
一、关于通道、复用段、再生段的说明	180
二、段开销 (SOH)	180
三、通道开销 (POH)	183
第五节 SDH 的指针	183
一、AU—4 指针的作用	184
二、AU—4 指针的位置及偏移编号	184
三、AU—4 的指针值	185
四、指针的频率调整作用	186
五、新数据标帜 (NDF)	186
第六节 SDH 中的关键设备——复用设备和交叉连接设备	187
一、SDH 设备的规范方法	187
二、功能参考模型方法	187
三、SDH 复用设备 (简单介绍)	188
四、数字交叉连接器 (SDXC)	189
第七节 SDH 的自愈网	191
一、网络保护的概念	191
二、自愈网的种类	191
小结	193

复习思考题	194
习题	194
参考书	194
第八章 光放大器	196
第一节 光放大器的分类	196
第二节 掺铒光纤放大器的结构	197
一、同向泵浦结构	197
二、反向泵浦结构	197
三、双向泵浦结构	198
第三节 掺铒光纤放大器的工作原理	198
第四节 掺铒光纤放大器的特性指标	199
一、功率增益	199
二、输出饱和功率	200
三、噪声系数	201
第五节 掺铒光纤放大器在光纤通信系统中的应用	201
一、作前置放大器使用	201
二、作发射机功率放大器使用	202
三、作光中继器使用	202
小结	202
复习思考题	203
参考书	203
第九章 现代光纤通信技术介绍	204
第一节 光纤通信中的复用系统	204
一、波分复用系统	204
二、光频分复用系统	206
三、副载波强度调制系统	207
第二节 光纤通信多终端网络系统	208
一、光纤局部区域网 (LAN)	208
二、宽带综合业务数字网 (B-ISDN)	210
第三节 外差光纤通信系统	210
一、光发射机	211
二、光放大器	211
三、光接收机	212
四、外差光纤通信系统中的几个技术问题	213
第四节 光纤的非线性效应及光孤子通信	213
一、光纤的非线性效应	213
二、光孤子通信	215
小结	218
复习思考题	218

参考书.....	218
第十章 光纤及光纤通信系统的测量.....	219
第一节 光纤参数的测量.....	219
一、单模光纤模场直径的测量.....	219
二、光纤损耗的测量.....	220
三、光纤色散与带宽的测量.....	223
第二节 光纤通信系统的测量.....	227
一、光发射机发送光功率的测量.....	227
二、光源消光比的测量.....	227
三、光接收机灵敏度的测量.....	227
四、光接收机动态范围的测量.....	228
五、光纤通信系统测量中的眼图.....	228
小结.....	229
复习思考题.....	229
参考书.....	230

附 光纤通信原理自学考试大纲

《自学考试大纲》出版前言	233
I. 课程性质与设置目的要求	234
II. 课程内容与考核目标	235
III. 有关说明与实施要求	
附录 题型举例	
《自学考试大纲》后记	

光纤通信原理

预 备 知 识

为了便于读者学习，本教材首先简单介绍必须掌握的电磁场理论和光学有关的基本概念。这部分的主要内容是：

- 电磁场的基本方程式；
- 电磁波的波动现象；
- 简谐时变场的波动方程；
- 均匀平面波的一般概念；
- 平面波在两介质交界面的反射和折射；
- 全反射现象；
- 导行波的概念。

第一节 两种基本的研究方法

分析光纤导光的原理有两种基本的研究方法：

一、几何光学方法

又称射线理论法。采用这种方法的条件是，光波波长 λ 要远小于光波导（光纤就是一种光波导）的横向尺寸。这样就可近似认为光波波长为零 ($\lambda \rightarrow 0$)，于是，光的衍射现象可以忽略，光的发散角可近似为零。从而，可将光看成为一条射线。几何光学方法就是基于这种观点，对光射线在光波导中的传播、反射、折射等问题进行分析。显然，这种分析方法具有直观、简单的优点。

二、波动光学方法

又称波动理论方法。这种方法的根据是：认为光波是一种波长很短的电磁波（如在第一章第一节中所述）。因此，所谓波动光学方法，就是根据电磁场理论对光波导的基本问题进行求解。显然，相对于几何光学方法来讲，这种方法是一种较为严格、全面的分析方法。当然，也是一种很烦的分析方法。

第二节 电磁场的基本方程式

光波既然是一种电磁波，那么，它必然服从电磁场的基本规律。而一切宏观电磁现象应遵循的基本规律又是麦克斯韦方程式，因此，光波在光导纤维中传播问题一定服从麦克斯韦方程即电磁场的基本方程式。

这样，当用波动理论方法来研究光在光纤中传播问题时，显然应从麦克斯韦方程式出发。这也正是为什么在一些“光纤通信”的书中，对光纤分析时出现电场强度 \mathbf{E} 和磁感应强度 \mathbf{B} 这些电磁场参量的原因。

由物理的电磁学知识知道，麦克斯韦方程式的积分形式（即在一个范围内应满足的规律）为：

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \quad (0-1)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (0-2)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (0-3)$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q \quad (0-4)$$

利用高斯散度定理和斯托克斯公式，可将上述积分形式，推导为麦克斯韦方程式的微分形式（即在一个点上应满足的规律）。它为：

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (0-5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (0-6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (0-7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (0-8)$$

式中 \mathbf{E} ——电场强度矢量，单位是 V/m。

\mathbf{H} ——磁场强度矢量，单位是 A/m。

\mathbf{B} ——磁感应强度矢量，单位是 Wb/m²。

\mathbf{D} ——电位移矢量，单位是 C/m²。

\mathbf{J} ——电流密度矢量，单位是 A/m²。

ρ ——电荷密度，单位是 C/m³。

在微分形式中

$\nabla \times$ —— 旋度。

$\nabla \cdot$ —— 散度。

方程组中，各式的物理意义为

式 (0-1) 与式 (0-5) 表示电场随时间变化，将产生变化磁场，称为全电流定律。

式 (0-2) 与式 (0-6) ——表示变化的磁场，将感应出变化电场，称为电磁感应定律，

又称法拉第定律。

式 (0-3) 与式 (0-7) ——表示磁力线是闭合的, 无头无尾的称为磁通连续性定理。

式 (0-4) 与式 (0-8) ——表示电位移矢量与源之间的关系。称为高斯定理。

上述方程式中, 对于各向同性^①的媒质, \mathbf{D} 和 \mathbf{E} , \mathbf{B} 和 \mathbf{H} 存在如下关系

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (0-9)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (0-10)$$

式中 ϵ ——称为介质的介电常数, 是不随时间及空间变化的标量。

μ ——称为介质的磁导率, 是不随时间及空间变化的标量。

当时变电磁场随时间作简谐 (正弦或余弦) 规律变化, 则麦克斯韦方程式表示为复数形式。

复数形式麦克斯韦方程的积分形式为:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S (\mathbf{J} + j\omega \mathbf{D}) \cdot d\mathbf{S} \quad (0-11)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -j\omega \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (0-12)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (0-13)$$

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \dot{q} \quad (0-14)$$

复数形式麦克斯韦方程的微分形式为:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + j\omega \mathbf{D} \quad (0-15)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \quad (0-16)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (0-17)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \dot{\rho} \quad (0-18)$$

由上述各表达式看出, 在电磁场随时间作简谐变化条件下, 麦克斯韦方程式中没有时间因子 t 项, 这样, \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 场量中原来的四个变量 (x , y , z , t) 中时间变量 t 被隐去。显然, 这样做对问题的分析带来了便利。

电磁波在各向同性、无源的均匀介质中传播时, 因此复数形式麦克斯韦方程的微分形式中 $\mathbf{J} = 0$, $\dot{\rho} = 0$, 这时, 方程式就为如下形式:

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \epsilon \mathbf{E} \quad (0-19)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu \mathbf{H} \quad (0-20)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (0-21)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (0-22)$$

(注: 上述表达式中利用了 $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ 及 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ 的关系)

显然, 光在光导纤维中传播时, 光波中的 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} , 应满足上述这种关系式。当然, 这种关系是不便于求解的, 因为在表达式中既有 \mathbf{E} 又有 \mathbf{H} 。还需进一步推导, 这就是下一节将要讨论的问题。

^① 所谓各向同性, 是指在介质中, 不论在什么方向加电场和磁场, 介质的参量 ϵ 和 μ 的数值保持不变。