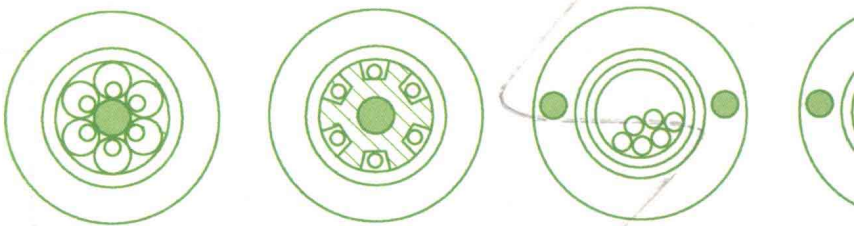


光纤通信 入门130问

GUANGXIAN TONGXIN
RUMEN 130 WEN

原荣 编著



这本书告诉你光纤通信并不神秘

初中以上文化程度的普通读者就能看得懂

带你了解3G/4G手机的工作原理、长途电话/广播电视的传输过程

告诉你光纤到家采用的技术



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



光纤通信入门 130 问

原荣 编著



机械工业出版社

本书就光纤通信的一些基本概念，以问答的方式，用通俗的语言进行了解释。

全书共分8章，第1章回顾了光纤通信的基础知识，第2、3章分别介绍了光纤通信的传输介质——光纤光缆和组成系统的光无源器件，第4~6章分别阐述了光纤通信系统光接收/发射和中继放大技术；第7章就光纤通信系统的主要技术进行了概述，第8章回答了在光接入网中人们经常会碰到的一些问题。

本书是一本初步了解光纤通信的入门读物和普及教材，适合具有初中文化以上水平的读者阅读；同时，对从事光纤通信系统和网络的研究教学、规划设计、管理和维护的有关人员也有一定的参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信入门 130 问/原荣编著. —北京: 机械工业出版社, 2012. 4
ISBN 978-7-111-37800-6

I. ①光… II. ①原… III. ①光纤通信—问题解答 IV. ①TN929.11-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 049960 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 李馨馨 责任编辑: 李馨馨

版式设计: 霍永明 责任校对: 肖琳

封面设计: 鞠杨 责任印制: 乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

140mm × 203mm · 5.375 印张 · 161 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-37800-6

定价: 20.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

自 20 世纪 70 年代中期以来，光纤通信技术的发展速度之快令人震惊，可以说没有任何一种通信方式可以与之相比拟，光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。

光纤通信应用范围不断扩大，已和人们的日常生活密不可分。目前，无论电信骨干网还是用户接入网，无论陆地通信网还是海底光缆网，无论看电视还是打电话，光纤无处不在，无时不用，光纤传输技术随时随地都能碰到。所以，光纤通信已不再是通信界、学术界和商界的事情；对于每个人，比如上网推销农副产品的农民，做小本生意的个体老板，在马路上用手机打电话的过往行人，在家里、车里看电视的人们，他们的一举一动都和光纤通信有关。所以，对于我们每个人，了解一点光纤通信的基本知识也是有必要的。

本书是在作者编著的《光纤通信》（第 3 版）、《宽带光接入技术》、《光纤通信技术》和《光纤通信网络》（第 2 版）等多本书的基础上，选取了光纤通信中最基本的和日常生活密切相关的知识和技术，以通俗易懂、简明扼要、图文并茂的方式进行了讲解，以便那些具有初中以上文化程度的普通读者也能够看懂。本书只需抽一丁点时间就能看完，读者也可在茶余饭后只找出自己感兴趣的问题来阅读。

全书共分 8 章，第 1 章回顾了光纤通信的基础知识，比如光的本质是什么？通信用的光源和太阳光有何不同？第 2、3 章分别介绍了光纤通信的传输介质——光纤光缆和组成系统的

光无源器件，从插入水中的筷子为什么向上弯曲引出光纤传光的原理；第4~6章分别阐述了光纤通信系统光接收/发射和中继放大技术；第7章就光纤通信系统的主要技术进行了概述，比如3G手机用到的码分复用（CDMA），4G手机用到的正交频分复用（OFDM），长途干线用到的波分复用（WDM），看电视用到的光纤同轴电缆混合网络（HFC）等；第8章回答了在光接入网中人们经常会碰到的一些问题，比如何谓三网融合、何谓EPON等。

原 荣

2011年12月16日于桂林

中国电子科技集团公司（CETC）第三十四研究所

（桂林激光通信研究所）

目 录

前言

第 1 章 光纤通信概述	1
1-1 什么叫光纤通信?	1
1-2 光是电磁波吗? 激光器发出的光与太阳光有什么不同?	1
1-3 光的本质是什么?	4
1-4 频率、波长和光速有什么关系?	6
1-5 模拟/数字信号的频率/比特率各用什么单位表示?	7
1-6 光在真空中传播和在玻璃中传播哪个快?	8
1-7 古代用光传递信息吗?	8
1-8 谁发明了光电话?	9
1-9 谁发明了激光器?	10
1-10 谁是光纤通信的鼻祖?	10
1-11 光纤通信有哪些优点?	12
1-12 如何组成一个光纤通信系统?	13
第 2 章 光纤通信传输介质	15
2-1 光纤和光缆由什么物质组成? 结构如何?	15
2-2 插入水中的筷子为什么向上弯曲了?	16
2-3 水下的潜水员在什么位置看不到岸上的姑娘? 何谓临界角?	16
2-4 当光波从折射率较大的介质以不同的人射角进入折射率较小的介质时会出现哪三种不同的情况?	17
2-5 光纤是怎样传光的?	18
2-6 什么是阶跃光纤? 什么是渐变光纤?	19
2-7 为什么渐变多模光纤内的光线能同时到达输出端?	20
2-8 光线在单模光纤中传输为什么比在多模光纤中传输得快?	22
2-9 光纤是如何制造出来的?	23
2-10 光纤有损耗吗?	24

2-11	dBm 与 mW、 μ W 如何换算?	25
2-12	如何用功率比表示 dB 值?	25
2-13	光纤的损耗与波长有关吗?	26
2-14	什么是色散? 光纤色散是如何产生的?	26
2-15	什么是模式色散? 它是如何影响系统性能的?	27
2-16	为什么渐变折射率多模光纤的色散比阶跃光纤的小?	28
第 3 章	光纤通信器件	30
3-1	什么是光纤连接器? 什么是连接器跳线?	30
3-2	什么是光耦合器? 有哪几种光耦合器?	31
3-3	什么是可调谐光滤波器?	32
3-4	什么是干涉? 如何构成法布里 - 珀罗 (F-P) 谐振腔?	33
3-5	商用干涉滤波器的工作原理是什么?	36
3-6	什么是 F-P 干涉仪? 如何构成光纤 F-P 干涉仪	37
3-7	什么是马赫 - 曾德尔 (M-Z) 滤波器?	38
3-8	什么是介质薄膜光滤波解复用器?	39
3-9	三角棱镜如何将太阳白光分解为七色光谱?	41
3-10	什么是波分复用器? 什么是波分解复用器? 棱镜如何完成波 分解复用?	42
3-11	什么是阵列波导光栅 (AWG) 复用/解复用器?	43
3-12	什么是光交换?	44
3-13	什么是微机电系统 (MEMS) 光开关?	45
第 4 章	光纤通信光发射机	48
4-1	直接调制和外调制发射机有何不同?	48
4-2	为什么半导体晶体能够发光?	49
4-3	激光器 (LD) 和发光二极管 (LED) 有何不同? 激光器和 探测器有何本质区别?	50
4-4	什么是相干光? 什么是非相干光?	51
4-5	LD 激光发射的条件是什么?	54
4-6	LED 和 LD 的波长特性有何不同?	56
4-7	什么是分布反馈 (DFB) 激光器	57
4-8	什么是光的衍射? 什么是衍射光栅?	57
4-9	如何构成一个波长可调激光器?	60
4-10	模拟强度光调制和数字强度光调制有何不同?	61

第 5 章 光纤通信光接收机	62
5-1 光接收机的作用是什么?	62
5-2 光探测器的作用和原理是什么?	62
5-3 什么是 PIN 光探测器?	63
5-4 什么是雪崩光敏二极管 (APD)?	64
5-5 什么是波导光探测器 (WG-PD)?	65
5-6 数字光接收机主要由哪几部分组成? 各有什么作用?	67
5-7 为什么接收机前置放大器特别重要?	68
5-8 光接收机中存在哪些噪声? 什么是信噪比?	68
5-9 什么是比特误码率 (BER)? 通常数字光接收机要求的 BER 是多少? 接收机灵敏度的定义是什么?	70
5-10 监测光纤通信系统性能好坏通常采用什么最直观、最简单 的方法?	70
5-11 什么是相干探测? 为什么要用相干探测?	71
第 6 章 光纤通信光中继放大器	73
6-1 再生中继器的功能和缺点是什么?	73
6-2 光放大中继器的作用是什么?	73
6-3 什么是掺铒光纤放大器 (EDFA)?	74
6-4 如何构成一个 EDFA?	74
6-5 EDFA 的工作原理是什么?	75
6-6 EDFA 有哪些应用方式?	76
6-7 EDFA 有几种泵浦方式? 哪种方式转换效率高? 哪种噪声系数小?	77
6-8 EDFA 增益频谱特性如何?	78
6-9 EDFA 级联需要考虑哪些问题?	78
6-10 半导体光放大器 (SOA) 的工作原理是什么?	79
6-11 如何使 LD 变为 SOA?	81
6-12 什么是分布式拉曼放大器? 有何应用? 与 EDFA 比较有何 不同?	81
第 7 章 光纤通信系统	84
7-1 为什么要将模拟信号变为数字信号? 如何变为数字信号?	84
7-2 有几种光复用技术?	86
7-3 什么是波分复用 (WDM) 技术?	87

7-4	WDM 系统有哪几种网络单元?	89
7-5	WDM 系统光线路终端 (OLT) 如何构成?	90
7-6	WDM 系统光分插复用器 (OADM) 如何构成?	91
7-7	WDM 系统光交叉连接器 (OXC) 如何构成?	92
7-8	WDM 系统光线路放大器 (OLA) 如何构成?	93
7-9	如何让光携带声音和数字信号?	93
7-10	光调制器如何分类?	95
7-11	最常用的外调制器是什么?	96
7-12	如何实现频分复用 (FDM) 和波分复用 (WDM)?	97
7-13	时分复用 (TDM) 的基本原理是什么?	99
7-14	电视台送到各家各户的电视节目是采用何种复用技术? 3G 和 4G 手机信号和固定电话信号各采用何种复用技术? ..	101
7-15	SDH 如何将低速信号复用映射成高速信号?	102
7-16	不同等级的 STM- <i>N</i> 速率是多少? 如何进行等级复用? ..	103
7-17	SDH 有哪几种传输终端设备? SDH 系统通常用什么 结构?	103
7-18	ATM 与 STM (SDH) 有什么不同?	107
7-19	何谓 IP? 提供什么服务? IP 进入光传送网有几种可能的 方式?	109
7-20	STM、ATM 和 IP 数据分组有何不同?	111
7-21	以太网如何接入互联网?	112
7-22	什么是多协议标记交换 (MPLS)?	112
7-23	什么是通用多协议标记交换 (GMPLS)?	114
7-24	什么是自动交换光网络 (ASON)?	116
7-25	什么是光正交频分复用 (O-OFDM) 系统?	118
7-26	什么是网络生存性?	119
7-27	如何对 SDH 网络进行保护?	120
7-28	光纤通信系统按拓扑结构如何分类?	122
7-29	光纤通信网络按网径大小分成几类?	123
第 8 章	光接入网	125
8-1	接入网在网络建设中有什么作用?	125
8-2	光接入网技术是怎样演进的?	125
8-3	什么是三网融合? 为什么说它是接入网的发展趋势?	128

8-4	何谓无源光网络? 目前有哪几种无源光网络?	129
8-5	下行复用采用哪几种技术?	129
8-6	上行接入采用哪几种技术? 3G 和 4G 移动通信网络各采用 何种接入技术?	130
8-7	为什么正交频分复用 (OFDM) 各副载波信号可以互不干扰 而频谱利用率又高?	132
8-8	4G 移动通信还用到哪些关键技术?	133
8-9	时分多址接入 (TDMA) 是如何实现的?	134
8-10	移动通信使用光纤传输吗?	136
8-11	什么是 EPON? 它与 APON 有什么不同?	138
8-12	10G EPON 如何与 1G EPON 兼容?	138
8-13	为什么 PON 系统上行方向均选用 1 260 ~ 1 360 nm 波长的 发射机, 而下行方向则选用 1 480 ~ 1 500 nm 波长的 发射机?	139
8-14	为什么要提出 GPON?	139
8-15	GPON 与 EPON 比较有哪些优势?	140
8-16	GPON 有哪两种传输模式? 为什么 GPON 能够支持实时 业务?	141
8-17	为什么要提出 WDM-PON?	142
8-18	如何构成波长固定 WDM-PON?	142
8-19	如何构成 ONU 波长可调 WDM-PON?	143
8-20	如何构成 ONU 无色 WDM-PON?	144
8-21	与 PS-PON 比较 WDM-PON 技术上有什么优点?	146
8-22	什么是 WDM/TDM 混合无源光网络?	146
8-23	什么是正交频分复用 PON (OFDM-PON)?	147
8-24	什么是射频信号光纤传输 (RoF) 系统?	149
8-25	如何将光正交频分复用 (O-OFDM) 技术应用到 RoF 无线通信网络中?	149
8-26	什么是光纤/电缆混合 (HFC) 网?	150
8-27	什么是 ADSL 接入?	155
8-28	如何将 SDH 用于接入网?	157
8-29	什么是大气光通信传输系统?	158
附录	160

第 1 章 光纤通信概述

1966 年，英籍华人高锟发表了关于通信传输新介质的论文，指出利用玻璃纤维进行信息传输的可能性和技术途径，从而奠定了光纤通信的基础。在此后短短的 40 多年中，光纤损耗由当时的 3 000 dB/km 已经降低到目前的 0.151 dB/km。在光纤损耗降低的同时，光纤通信用光源、探测器和无源/有源器件，无论是分立元件，还是集成器件都取得了突破性的进展。自 20 世纪 70 年代中期以来，光纤通信的发展速度之快令人震惊，可以说没有任何一种通信方式可以与之相比拟，光纤通信已成为所有通信系统的最佳技术选择。

目前，无论电信骨干网还是用户接入网，无论陆地通信网还是海底光缆网，无论看电视还是打电话，甚至网上购物、QQ 聊天、网上银行也都用到光纤通信。光纤无处不在，无时不用，光纤传输技术随时随地都能碰到。所以，了解光纤通信技术，不仅是通信界的事情，普通人员也很有必要。

本书就以通俗的语言对光纤通信的基础知识做一个介绍。

1-1 什么叫光纤通信？

光纤通信是利用人眼看不见的一种光线作为载体来传递打电话的声音、网上购物发出的订单、电视台传送的节目的一种通信。这种光线的频率比调频广播的频率高得多，但又比可见光的频率低一些，它的频率范围在 230 ~ 187 THz，1 THz 等于 10^{12} Hz；波长范围在 1.3 ~ 1.6 μm ，1 $\mu\text{m} = 10^{-6}$ m。我们看到的红光波长是 0.66 ~ 0.73 μm ，紫光波长是 0.4 ~ 0.44 μm ，而橙光、黄光、绿光、青光和蓝光的波长则在红光和紫光之间。

1-2 光是电磁波吗？激光器发出的光与太阳光有什么不同？

一提到光，人们会立刻联想到太阳光和电灯光。与收音机用的

无线电波一样，光也是一种电磁波，不过它的波长比无线电波的波长短得多，或者说，它的频率比无线电波高得多，如图 1-1 所示。太阳光和电灯光可以看做是波长在可见光范围内的电磁波的混合体。与此相反，光纤通信使用的激光器发出的光则是单色光，具有极窄的光谱宽度。点光源是只有几何位置而没有大小的光源。在自然界，理想的点光源是不存在的，但是对于均匀发光的小球体，如果它本身的大小和它到观察点的距离相比小得多，我们就可以近似地把它看做点光源。激光器发出的光也可以看做是点光源。光线是光向前传播的一条类似于几何线的直线。有一定关系的一些光线的集合叫光束。

光是一种电磁波，即由密切相关的电场和磁场交替变化形成的一种偏振横波，它是电波和磁波的结合。它的电场和磁场随时间不断地变化，分别用 E_x 和 H_y 表示，在空间沿着 z 方向并与 z 方向垂直向前传播，这种波称为行波，如图 1-2 所示。由于电磁感应，当磁场发生变化时，会产生与磁通量的变化成比例的电场；反过来，电场的变化也会产生相应的磁场。并且 E_x 和 H_y 总是相互正交传输。最简单的行波是正弦波，沿 z 方向传播的数学表达式为

$$E_x = E_0 \cos(\omega t - kz + \phi_0) \quad (1-1)$$

式中， E_x 是时间 t 在 z 方向传输的电场； E_0 是波幅； ω 是角频率； k 是传输常数或波数， $k = 2\pi/\lambda$ ，这里 λ 是波长； ϕ_0 是相位常数。在 $t=0$ 和 $z=0$ 时， E_x 可以是零也可以不是零，这要由起点决定。 $\omega t - kz + \phi_0$ 称为波的相位，用 ϕ 来表示。

由于时间和空间的关系，对于给定的相位 ϕ 对应的最大场，根据式 (1-1)，常数 ϕ 可用下式描述：

$$\phi = \omega t - kz + \phi_0 \quad (1-2)$$

在时间间隔 δt 内，波前移动了 δz ，因此该波的相速度是 $\delta z/\delta t$ 。于是相速度为

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = \nu\lambda \quad (1-3)$$

式中， ν 是频率 ($\omega = 2\pi\nu$)，单位是赫兹 (Hz)，1 Hz 等于每秒振荡 1 周，两个相邻振荡波峰之间的时间间隔称为周期 T ，等于光波频率的倒数，即 $\nu = 1/T$ 。

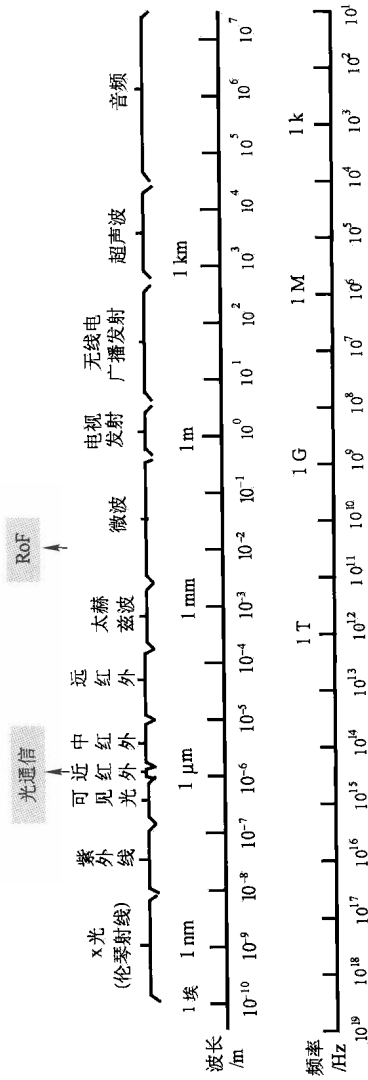


图 1-1 电磁波频率与波长的换算

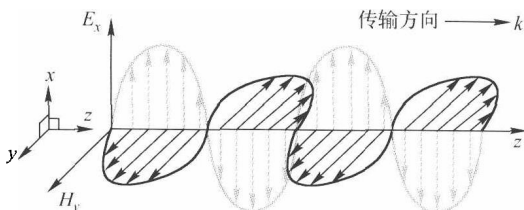


图 1-2 电磁波电场 E_x 和磁场 H_y 随时间不断变化，
在空间沿着 z 方向总是相互正交传输

假如波沿着 z 方向依波矢量 k 传播，如式 (1-1) 所示，被 Δz 分开的两点间的相位差 $\Delta\phi$ 可用 $k\Delta z$ 简单表示，因为对于每一点 ωt 是相同的。假如相位差是 0 或 2π 的整数倍，则两个点是同相位，于是相位差 $\Delta\phi$ 可表示为

$$\Delta\phi = k\Delta z \quad \text{或} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi\Delta z}{\lambda} \quad (1-4)$$

我们经常对光波上给定时间被一定的距离分开的两点间的相位差感兴趣，比如由马赫 - 曾德尔 (M - Z) 干涉仪构成的滤波器、复用/解复用器和调制器，由阵列波导光栅 (AWG) 构成的诸多器件 (滤波器、波分复用/解复用器、光分插复用器和波长可调/多频激光器等)，以及由电光效应制成的外调制器和由热光效应制成的热光开关等，它们的工作原理均用到相位差的概念，所以大家要特别给予关注，本书以后有关问题也会经常用到这一概念，并使用式 (1-4)。

1867 年，麦克斯韦证实了光是一种电磁波，光的传播就是通过电场、磁场的状态随时间变化的规律表现出来的。他把这种变化列成了数学方程，后来人们就称它为麦克斯韦波动方程，这种统一电磁波的理论获得了极大的成功。

1-3 光的本质是什么？

光既是波又是粒子，具有两种特性，即波动性和粒子性。光在传播时，表现为波动性；光与物质作用时，表现为粒子性。

1. 光的波动性

1864年, 麦克斯韦 (Maxwell) 通过理论研究指出, 和无线电波、x 射线一样, 光是一种电磁波, 光学现象实质上是一种电磁现象, 光波就是一种频率很高的电磁波, 光波是电磁波谱的一个组成部分, 如图 1-1 所示。

1888年, 德国物理学家赫兹首先用人工的方法获得了电磁波, 并且通过电谐振接收到它, 这就证实了电磁波的实际存在。后来又通过实验发现, 电磁波在金属表面上要反射, 在金属凹面镜上反射后会聚焦, 通过沥青棱镜时要发生折射等现象。从而证实了光波在本质上跟电磁波是一样的。

1891~1893年, 科学家们分别用实验的方法测出了电磁波的传播速度, 它和光的传播速度近似相等。

利用光的波动性可解释光的反射、折射、衍射、干涉和衰减等特性。单频光称为单色光, 在均匀介质中, 可用麦克斯韦波动方程的弱导近似形式描述。

光波可以用频率 (波长)、相位和传播速度来描述。频率是每秒传播的波数, 波长是在介质或真空中传输一个波 (波峰 - 波峰) 的距离。频率用赫兹 (Hz)、MHz、GHz 或 THz 表示, 波长用微米 (μm) 或纳米 (nm) 表示。在日常生活中, 把“光”定义为可用眼睛看见的辐射。图 1-3a 表示人的眼睛对各种波长辐射的相对灵敏度, 由图可见, 人眼对黄绿光最灵敏。

2. 光的粒子性

利用光的波动性可以解释很多现象, 但是很多时候光的行为并不像一个波, 而更像是由许多微粒组成的集合体, 这种微粒称为光子, 这种假设由爱因斯坦 1905 年首先提出。单色光的最小单位是光子, 可用能量方程来描述, 即

$$E = h\nu \quad (1-5)$$

式中, h 是普朗克常数 ($h = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$); ν 是频率 (单位为 Hz)。光子能量 E 与它的频率 ν 成正比, 频率越高, 能量越大。光子能量用电子伏特 (eV) 表示, 1eV 就是一个电子电荷经过 1V 电位

差时，电场力所做的功。

像所有运动的粒子一样，光子与其他物质碰撞时也会产生光压。光也是一种能量的载体，当光子流打到物质表面上时，它不但要把能量传递给对方，也要把动量传递给对方，而且也遵守能量守恒定律和动量守恒定律。为了验证上述说法的正确性，可用图 1-3b 表示的实验装置进行实验。图中有一个抽成真空的玻璃容器，容器内装有阳极 A 和金属锌板的阴极 K。两个电极分别与电流计 G、伏特计 V 和电池组 B 连接。当光子照射到阴极 K 的金属表面上时，它的能量被金属中的电子全部吸收，如果光子的能量足够大，大到可以克服金属表面对电子的吸引力，电子就能跑出金属表面，在加速电场的作用下，向阳极 A 移动而形成电流。这种现象就叫做光电效应。实验表明，使用可见光照射时，不论光的强度多么大，照射时间多么久，电流计总是没有电流；但使用紫外光照射时，不论光的强度多么微弱，照射时间多么短暂，电流计总是有电流，说明金属板上有电子跑出来。这是因为可见光的频率低，光子能量小，小于锌的电子溢出功；而紫外光的频率高，光子能量大，大于锌的电子溢出功。

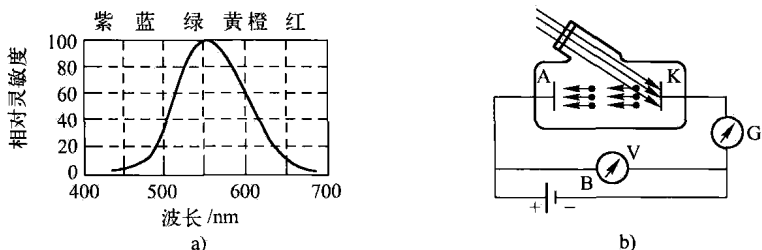


图 1-3 光的波动性和粒子性

a) 人眼对不同波长光的灵敏度 b) 光电效应实验装置图

1-4 频率、波长和光速有什么关系？

光在不同的介质中具有不同的传播速度，在真空中它以最大的速度直线传播，光子能量 E 可用爱因斯坦方程描述，即

$$E = mc^2 \quad (1-6)$$

式中, m 是光子质量, 单位是 kg; c 是光速, 单位为 m/s。

频率 ν 、波长 λ 和光速 c 的关系为

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (1-7)$$

用式 (1-7) 可进行电磁波频率与波长的换算。图 1-1 表示电磁波频率与波长的换算, 同时也标出了光通信和射频信号光纤传输 (RoF) 所用到的波段。

从式 (1-6)、式 (1-7) 可以得到 $\nu = mc^2/h$ 和 $m = h\nu/c^2$ 。当光通过强电磁场时, 由于相互作用, 它的运动轨迹要改变方向, 电磁场越强, 改变越大, 如图 1-4 所示。

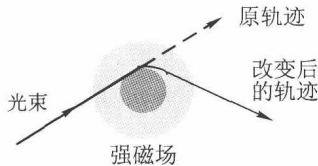


图 1-4 光通过强电磁场时轨迹要改变

1-5 模拟/数字信号的频率/比特率各用什么单位表示?

对于模拟信号, 频率用 f 表示, 频率是每秒传输的波数, 单位为 Hz, 如图 1-5a 所示。

对于数字信号, 比特率用 B 表示, 比特率是每秒传输的比特 (bit) 数, 单位为 bit/s 如图 1-5b 所示。

对于模拟信号, $T = 0.2 \text{ s}$, $f = 1/T = 5 \text{ Hz}$, 如已知 $f = 100 \text{ Hz}$, 则 $T = 1/f = 0.01 \text{ s}$; $f = 1 \text{ GHz}$, $T = 1/f = 1 \text{ ns}$ 。

对于归零脉冲数字信号, 同样, $T = 0.2 \text{ s}$, $B = 1/T = 1/0.2 \text{ s} = 5 \text{ bit/s}$, 如已知 $B = 100 \text{ bit/s}$, 则 $T = 1/B = 0.01 \text{ s}$, $B = 1 \text{ Gbit/s}$, $T = 1/B = 1 \text{ ns}$ 。