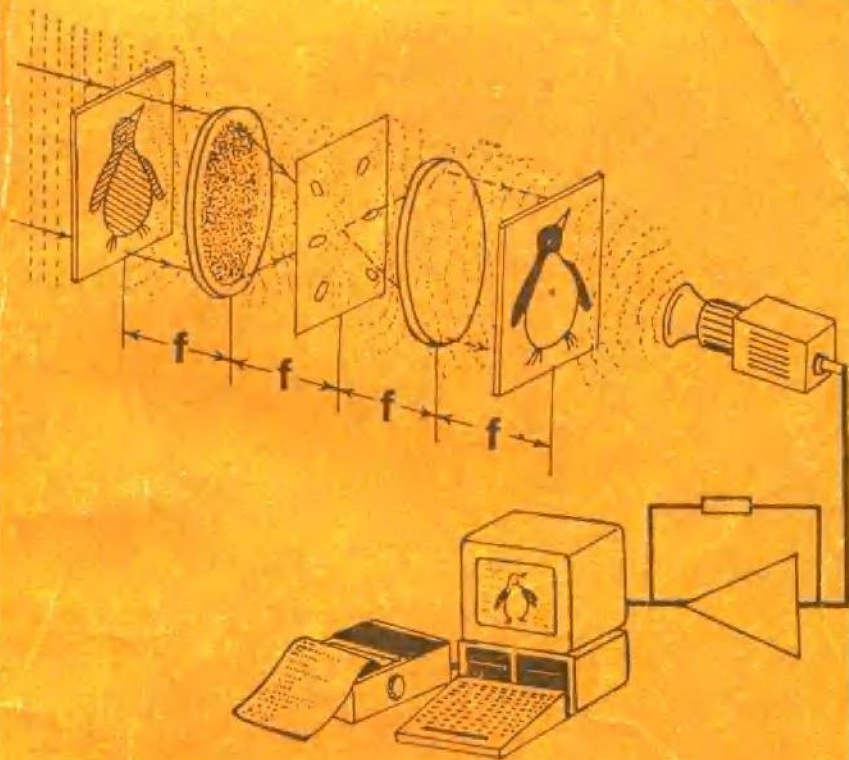


物理学基础丛书

● 宋菲君 编著



从波动光学到 信息光学

● 科学出版社

内 容 简 介

本书将通信和电子学相对比,引入信息光学的基本概念——空间频率,然后从波动光学的原理入手,介绍了信息光学的主要内容:角谱、薄透镜的傅里叶变换效应、相干和非相干模型、阿贝成像原理和光学传递函数、光学信道、噪声和编码、相干光和非相干光信息处理、散斑效应和全息照相等。书中描绘了信息光学的一些主要应用和发展前景。

本书叙述生动,文中仅运用了一些简单的代数式,且插图形象、幽默,内容丰富新颖。可供具有中等以上文化程度的科技人员、青年学生和中学教师阅读。

物理学基础知识丛书 从波动光学到信息光学

宋非君 编著

责任编辑 姜淑华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年4月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1987年4月第一次印刷 印张:8 1/8 插页:1

印数:0001—9,200 字数:181,000

统一书号:13031·3495

本社书号:5070·13—3

定价:1.70元

代 序

1978年8月，中国物理学会在庐山召开年会，不少物理学工作者有感于物理学在提高全民族科学文化水平和实现“四化”中的伟大作用，建议中国物理学会与科学出版社合作，编辑出版一套《物理学基础知识丛书》，有计划有系统地普及物理学的基础知识和介绍物理学的新发展。这一倡议当即得到了广泛的响应。为此，中国物理学会理事会进行了认真讨论，积极热情地支持了这一建议，于是，就在风景绮丽的庐山，在中国物理学会和科学出版社的共同主持下，正式成立了本丛书的编委会，讨论和制定了丛书的编辑方针和选题计划，正式开始了丛书的编辑出版工作。

物理学研究物质的运动规律，物质的结构及其相互作用，它是许多科学技术的基础。从本世纪开始，物理学经历了极其深刻的革命，从宏观发展到微观，从低速发展到高速，由此诞生了量子物理学和相对论，并在许多科学技术领域引起了深刻的变革。本世纪以来，物理学在认识和改造物质世界方面不断取得伟大成就，不断揭开物质世界的奥秘。原子能的利用，使人类掌握了新的能源；半导体科学技术的发展，导致了计算技术和自动控制系统的革命；激光的出现焕发了经典光学的青春；凝聚态物理学的发展，使人们不断创造出许多性能大大提高的材料……。因此，向广大读者宣传物理学的基础知识以及物理学的新发展，乃是提高全民族科学文化水平和实现“四化”的需要。我们编辑出版本丛书的目的，就是试图在这方面贡献一份力量。

本丛书将着重介绍现代物理学的基础知识，介绍物理学的最新发展，要求注重科学性。我们希望作者发扬创新精神，力求做到题材新颖，风格多样，勇于发表独创性、探索性的见解，以活跃读者思路。在文风上则要求做到准确、鲜明、生动，深入浅出、引人入胜，以说透物理意义为主，尽量少用数学公式。

在编辑出版丛书工作中，我们得到了广大物理学工作者的热情支持和鼓励，还得到老一辈物理学家严济慈、钱临照、陆学善等同志的热情赞助和关怀。美国加州大学热斐尔学院院长吴家玮教授应邀积极参加编委会工作，并约请了美籍学者为丛书撰稿。我们一并在此致以谢意。

《物理学基础知识丛书》编委会

序

信息光学是三十多年来发展起来的一门新兴学科。1948年全息术的提出，1955年作为像质评价的光学传递函数概念的建立，以及1960年新型光源——激光的诞生，是现代光学发展中有重要意义的几件大事。现代光学的最重大进展之一是引入了傅里叶变换的概念，从“空域”走向“频域”，为光学信息处理开辟了广阔的前景。现代信息光学已渗透到科学技术的许多领域，得到越来越广泛的应用。写这样一本较为通俗的小册子向广大读者介绍，肯定是十分有意义的。

宋菲君同志自从1966年毕业于北京大学物理系之后，一直处于光学仪器的科研、设计和生产第一线，他光学理论功底扎实，实践经验丰富，可以期望，他写的这本小册子将会使读者感兴趣，并有所裨益。

赵凯华

1985年6月于北大燕园

目 录

第一章 从经典光学到近代光学	(1)
一、光的世界	(1)
二、从波动光学到信息光学	(2)
第二章 时间、空间和频率	(5)
一、收音机和显微镜	(5)
二、时间、空间和频率, “时域”、“空域”和“频域”	(8)
三、光学仪器和“低通滤波器”	(12)
四、基波、谐波和傅里叶分析	(13)
五、通信和傅里叶光学	(15)
第三章 从惠更斯原理到“角谱”	(19)
一、湖畔遐想	(19)
二、惠更斯的次波迭加观念和菲涅耳的发展	(20)
三、平面衍射屏和基尔霍夫假设	(22)
四、再谈衍射屏和信息传递	(23)
五、光栅的衍射	(25)
六、光波的分频和角谱	(29)
第四章 透镜和“光学计算机”	(32)
一、放大镜等于电子计算机吗?	(32)
二、透镜聚焦的启示	(32)
三、后焦面上“别有洞天”	(35)
四、频域的开发和傅里叶变换的光学实现	(37)
五、电子数字计算机和光学模拟计算机	(40)

六、光学模拟计算机的先天不足	(43)
七、光学计算机的今天和明天	(45)
第五章 相干和非相干	(48)
一、点光源、面光源和“相干面积”	(48)
二、单色光、白光和“相干时间”	(51)
三、“超长列车”和迈克耳逊实验	(52)
四、相干照明模型和非相干照明模型	(55)
第六章 阿贝成像原理和光学传递函数	(58)
一、照相机的光圈, 分辨率和景深	(58)
二、光学仪器的极限分辨率和瑞利判据	(58)
三、阿贝的两步成像原理	(62)
四、光阑的拦光效应和低通滤波	(64)
五、截止频率、极限分辨率和显微镜的油浸物镜	(66)
六、眼睛的截止频率和光学显微镜放大率极限	(69)
七、物像多一对应和“腰像”	(72)
八、星点鉴别率和显微镜检验师的苦恼	(75)
九、从阿贝的“次级像”转向“初级像”, 空域评价和频 域评价	(77)
十、相干传递函数 (CTF) 和光学传递函数 (OTF)	(79)
十一、彩色玻璃、透过率谱和OTF	(84)
十二、离焦和“黑白反转”	(87)
十三、变频光栅和光学传递函数仪	(90)
十四、分辨率、层次感、“调子”和清晰度	(91)
十五、平面成像和空间成像——回到景深问题上来	(93)
第七章 信息、信道、噪声和编码	(95)
一、消息、信息和编码	(95)
二、成像和光学信道	(98)
三、时间带宽积、空间带宽积和信息量	(100)
四、显微镜能传递给我们多少信息?	(104)
五、能精确测定两点的间距吗? ——有限带宽和测不准原	

理	(109)
六、噪声与杂光	(111)
七、超外差收音机和光学仪器的超分辨	(116)
第八章 光学魔术——相干光图像处理	(122)
一、返老还童的魔镜——柔光镜	(122)
二、奇妙的阿贝-波特实验	(124)
三、近代光学信息处理	(128)
四、神通广大的4f系统	(130)
五、轮廓突出效应和低对比图形识别	(136)
六、低通滤波和新闻照片的平滑化处置	(138)
七、照相底片滤波和“光学去污”	(142)
八、指纹识别和光学侦破	(144)
九、卷积运算和图形的复现	(148)
十、光学图像相减和卫星遥感图像处理 (I)	(150)
十一、相衬显微镜, 泽尼克先生 把透明标本变成了黑白 标本	(153)
十二、模糊图像的清晰化处理	(156)
第九章 白光信息处理和假彩色编码技术	(164)
一、黑白图像彩色图像和假彩色编码	(164)
二、“彩色拼版”—— θ 调制假彩色编码	(165)
三、黑白图像等密度假彩色编码	(169)
四、用黑白胶卷拍摄、存贮和再现彩色图像的特技	(173)
五、浮雕技术、位相调制假彩色编码 和卫星遥感图像处 理 (I)	(177)
第十章 噪声、斑纹和散斑测量术	(185)
一、噪声、电视屏幕斑纹和激光散斑	(185)
二、噪声和信息载体二重性	(186)
三、杨氏实验、多光束干涉和激光散斑的形成	(188)
四、二次曝光和位移散斑图	(191)
五、散斑场怎样荷载位移信息	(193)

六、散斑图逐点分析和桥梁设计	(196)
七、散斑照相法轮胎无损检验	(199)
八、散斑图像相减	(202)
第十一章 立体成像和全息术	(205)
一、平面成像和立体成像	(205)
二、波的传播和信息的传递	(207)
三、近距作用, 物体光波和视觉	(209)
四、没有物体的物体光波和“虚物体”	(210)
五、光栅的制作和衍射的启发	(212)
六、物光的全息记录和再现	(215)
七、普通照相与全息照相	(217)
八、全息术进展四部曲	(221)
九、光源相干性的影响	(222)
十、“空间分割”和“时间分割”干涉仪	(224)
十一、二次曝光全息干涉技术和文物内部缺陷无损 检测	(226)
十二、实时法全息术探测蘑菇生长的奥秘	(228)
十三、浸没液法测定透明材料的不均匀性	(230)
十四、傅里叶变换全息图和超高密度资料存贮	(233)
十五、全息显微镜	(236)
十六、虚拟物体的计算全息图和远古世界“漫游”	(239)
十七、非球面的计算全息检测	(241)
十八、彩虹全息	(243)
十九、白光反射全息和商店橱窗装饰	(245)
二十、二十一世纪的全息电影	(247)

第一章 从经典光学到近代光学

一、光的世界

光学是一门古老的科学。自从伽利略发明了以他的名字命名的望远镜到现在，光学已经走过了几百年漫长的道路。

光学的研究对象——光波，是传递信息的媒介。人类接受外界信息的主要通道，就是人体上的一具天然而精巧的光学仪器——眼睛。

几百年以来，经过伽利略、牛顿、惠更斯、菲涅耳、夫琅和费、麦克斯韦、爱因斯坦等伟大先驱们持续的努力，光学已发展成为物理学中一门极为重要的基础学科，它运用了严格的数学理论和方法，发展和形成了一套完整的理论体系，以及一套与理论相配合的实验方法。

光学是研究光波传播规律的科学。例如，它研究光波怎样从几百万光年以远的银河外星系传播到地球上；研究从显微镜的灯泡辐射的光波通过聚光镜照亮标本，再通过物镜成像，经过目镜放大，最后透过眼睛的晶状体投影到视网膜上的全过程；研究信号灯的光怎样透过晨雾传播到火车司机的眼中；研究黑夜里地面目标发出的不可见红外线怎样被高空卫星上的接收器接收；研究遥远的村庄、湖泊通过沙漠上空灼热大气的折射，形成海市蜃楼的奇观……。

光学又是研究光波与物质相互作用的科学。它研究在太阳光照射下植物的光合作用；研究照射到照相底片上的光波

引起感光乳胶的变化；研究光波照射半导体的 PN 结产生的感生电流；研究光照下等离子体放电电流的变化；研究光的辐照如何影响癌细胞的繁衍；研究光照对生物的遗传、变异的影响……。

光学从它诞生的那一天起，就是一门“仪器化”的科学，在它数百年发展的历程中，逐渐形成了一系列很有特色的实验装置和测试设备——光学仪器。从最简单的放大镜、眼镜，到具有几百个光学镜片和复杂的电气、机械系统的大型天象仪；从观剧用的双筒望远镜到直径为几米、重量达数百吨的大型天文望远镜；从简单的生物显微镜，到计算机控制的图像分析显微镜；从照相机、放大机、复印机，到糖厂使用的旋光仪，建筑工程队使用的经纬仪，潜艇使用的潜望镜，坦克使用的红外测距仪，轰炸机使用的瞄准具，……以及研究所、大学实验室使用的成百个品种、上千个型号的光学仪器。可以说，在现代世界，已经很难找到一个和光学仪器无关的领域。

二、从波动光学到信息光学

从牛顿、伽利略时代到本世纪五十年代的几百年内，光学已经取得了许多重要的成就。光学的两个主要分支——几何光学和物理光学，都已发展到接近成熟的阶段。而作为物理光学的主要部分——波动光学，则非常成功地解释了当时发现的大部分光学现象和光学效应，例如光的干涉、衍射、偏振，光的发射、吸收、色散等等。加工工艺和生产也达到了前所未有的高水平。其中，光学透镜、棱镜的表面不规则程度，已经可以做到 $0.1\ \mu\text{m}$ 以内，也就是光波波长的五分之一或一根头发丝的七百分之一以内，甚至几千分之一以

内。

六十年代以来电子工业的高速发展，也大大促进了光学工业，一批新型光学仪器出现了，它们利用电子技术来实现操作的自动化，用光电管来代替眼睛，用数字电路和数码管来代替仪表指针。一批“光-机-电”三结合的光学仪器，例如数字式工具显微镜、光电测距仪、数字式分光光度计等，象雨后春笋般出现了。近几十年来，光学作为物理学的一个分支，发生了十分深刻的变化！

随着物理学中的原子物理学、量子电子学、凝聚态物理学等其它分支的迅速发展，在光学中发生了三件大事：第一，1948年全息术诞生了，物理学家们第一次精确地拍摄下一张立体的物体像，它几乎记录了光波所携带的全部信息（这正是“全息”名称的来历）！第二，1955年，科学家们第一次提出了“光学传递函数”的新概念，并且用它来评价光学镜头的质量。第三，1960年，一种全新的光源——激光器——诞生了，它的出现几乎震动了整个科学技术界。由于激光的应用，全息术获得了新的生命。全息术和光学传递函数的概念，后来又进一步发展，使光学工程师和电气工程师们有了共同的语言，用共同的观念、共同的理论体系、共同的方法来处理光学和通信这两个不同领域中的课题，使它们在“信息学”的范畴内统一起来。光学工程师不再仅仅局限于用光强、振幅或透过率的空间分布来描述光学图像。他们开始想象：一幅图像是由缓慢变化的背景、粗的轮廓等比较低的“空间频率”成分和急剧变化的细节等比较高的“空间频率”成分构成的，他们也象电气工程师那样，用频率的分布和变化来描述光学图像，并从熟悉的“空域”或“空间坐标系”中走了出来，进入了尚不熟悉的“频域”或“频率坐标系”的广阔天地。

一门新的前沿学科——信息光学（或傅里叶光学），从传统的、经典的波动光学中脱颖而出，很快就在科学技术和国民经济各部门获得了广泛的应用。

第二章 时间、空间和频率

一、收音机和显微镜

人们一般认为收音机和显微镜是完全不相干的两件东西，然而仔细地分析一下，就会发现它们之间有许多相似之处。

显微镜是一种常用光学仪器。它常被用来对细小物体进行观察或测量。但化验员们经常为显微镜下看不清楚标本中的细节而苦恼，半导体工厂的年轻女工，也往往由于长期在质量低劣的显微镜下工作而视力衰退。她们感到显微镜的“成像质量差”，或者说：“像质差”。

的确，“成像质量”或“像质”是显微镜的重要性能指标。两台同样规格的显微镜，虽使用了放大倍率相同的物镜和目镜，但常常会发现它们的像质有很大差别：在像质好的显微镜下进行观察，物体成像清晰、层次丰富、“调子”（反差度或反衬度）适中。反之，在像质差的显微镜下进行观察，会觉得物体成像模糊、层次不清、调子不适当（调子过“硬”或过“软”）。

听半导体收音机时，也会发现类似情况：两只同样规格的半导体收音机，音质差别往往很大。这里我们用“音质”来衡量收音机的质量，犹如用“像质”来衡量显微镜的质量一样。一只音质好的收音机，听起来声音清晰、调子优美。反之，一只音质不好的收音机，听起来声音含混不清，音域很窄，有时还会产生严重的失真。

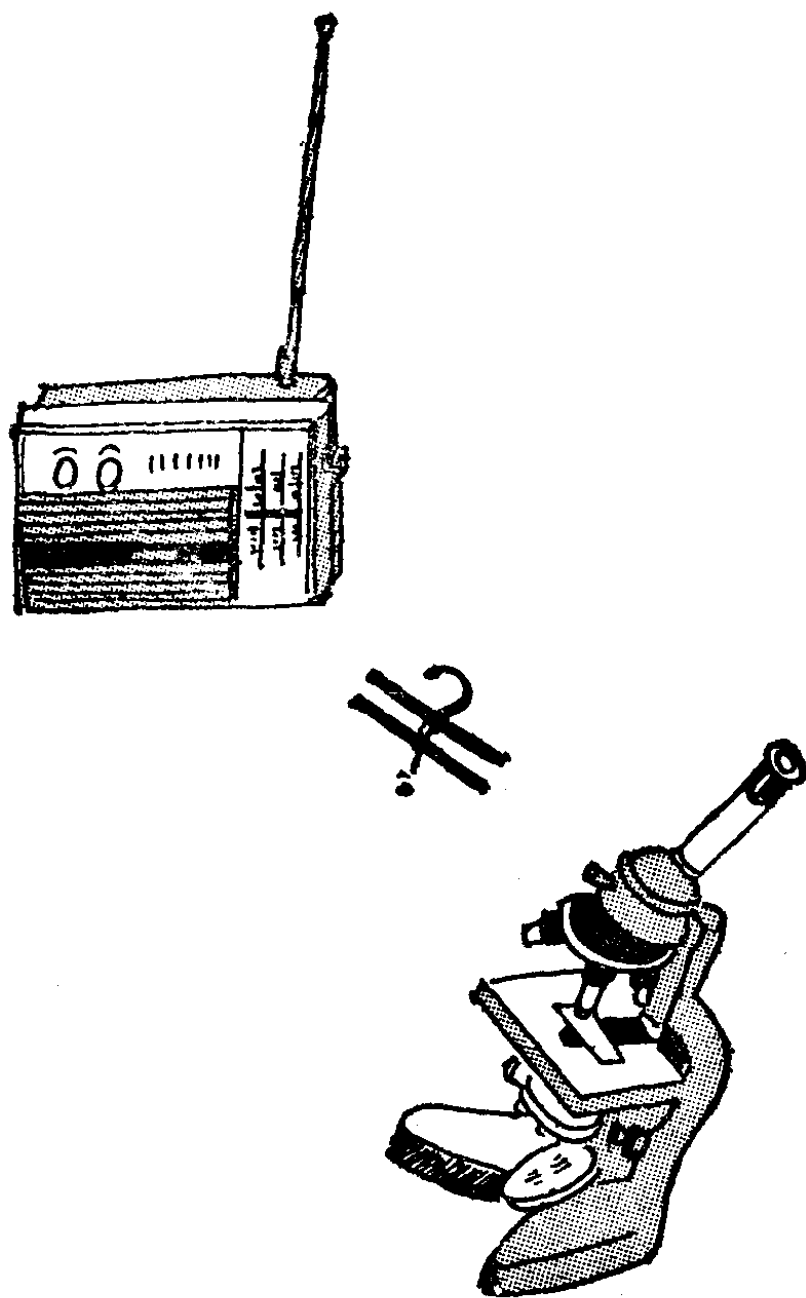


图 2-1 收音机与显微镜

再仔细观察一下，就会发现每个显微镜都带有一个“物镜转换器”，上面装三个到四个物镜。根据所观察标本的大小，可以选择一个合适的放大倍率。一般讲，用低倍的物镜只能看清物体的轮廓，用高倍的物镜却能看清物体的细节。

在选择收音机时也有类似的情况：一只袖珍半导体收音机，用来听新闻、外语广播效果还可以，然而用它来欣赏音

乐，效果就差多了。
欣赏音乐，最好用高
音质、高保真度的组
合式音箱或高级收录
机。音箱的效果究竟
比袖珍收音机好在哪儿？许多人都会回
答：音箱带有大的扬
声器，它的低音好，
音箱还有高音头，它
的高音也好。

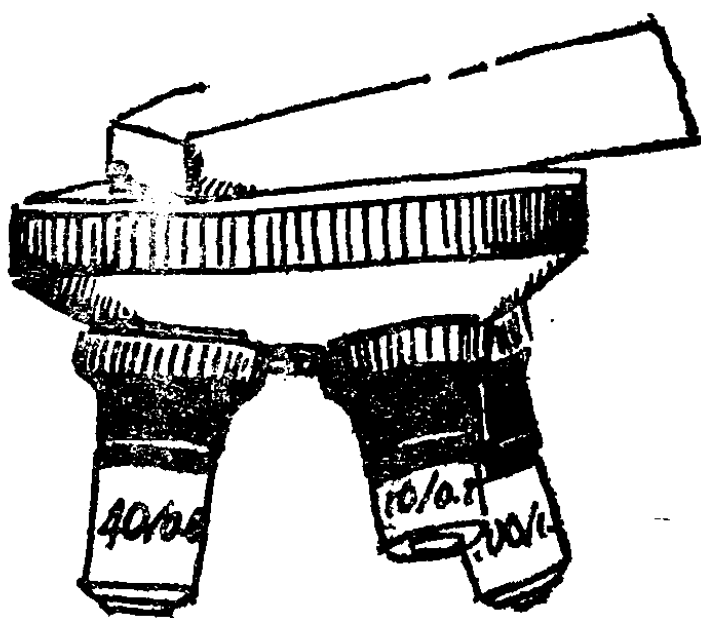


图 2-2 显微镜的物镜转换器

这里所说的低音，就是低音频，高音就是高音频。也就是说，在评价收音机质量时，常常使用频率的概念。

电气工程师们通常用“频率响应”曲线来全面、科学地评价放大器、收音机等的质量。图 2-3 是袖珍半导体收音机和高级收录机的频率响应曲线。

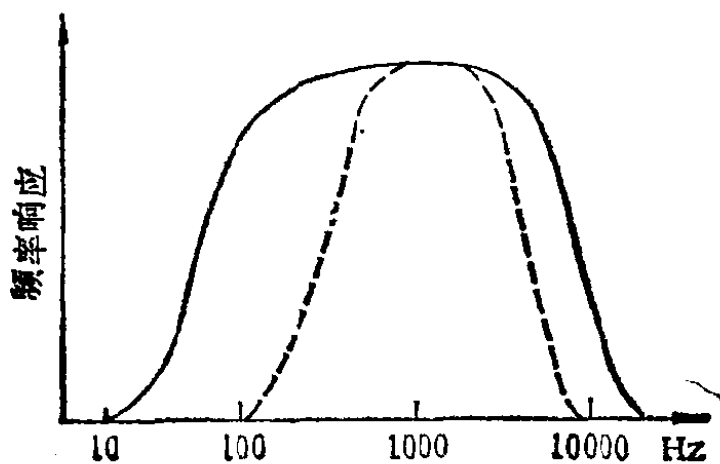


图 2-3 频率响应曲线

—— 高级音箱
----- 袖珍半导体收音机

从图 2-3 可见，袖珍半导体的频率响应特性，在低端

(100Hz以下)及高端(10000Hz以上)都明显地变坏(低落)。我们说它的通频带比较窄。由于语言的音域本身也不宽,因此用它来听听新闻或外语广播效果还可以,但用它来欣赏轻音乐,则效果不佳。

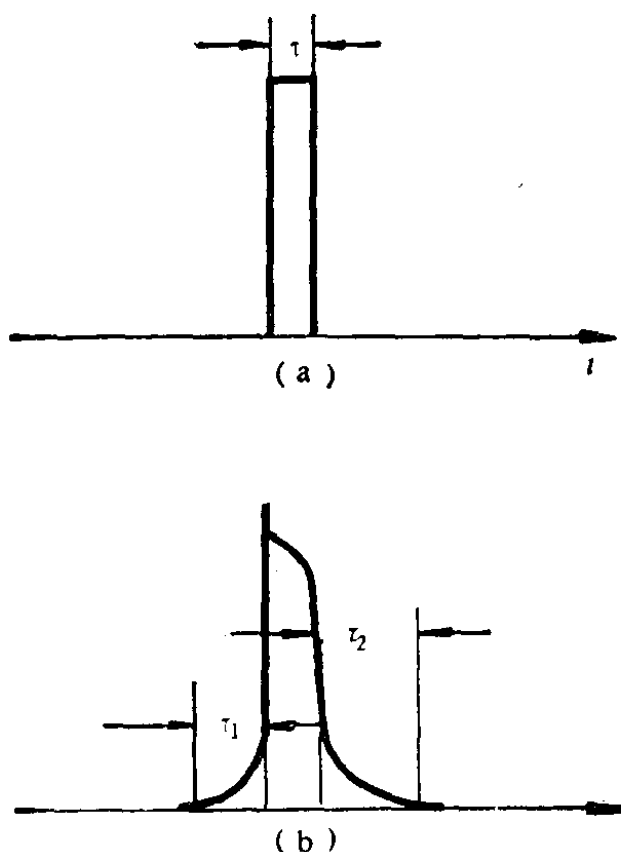
二、时间、空间和频率,“时域”、“空域”和“频域”

看来,电气工程师们是习惯于用频率特性来描述收音机和电子仪器的质量的。他们常常在以频率作为横坐标,以电压或电流大小作为纵坐标的坐标系中绘制频率响应曲线。换句话说,他们常常在频率的范畴内考察电信号。我们称这个

范畴为“频域”。

不过有时候,电信号也可以在时间坐标系中加以考察。例如,可以描述一个电信号随时间的变化。

当一个脉冲(图2-4(a))输入电路时,输出信号往往呈图2-4(b)的形状,我们常用“上升时间”(“前沿”)、“下降时间”(“后沿”)、“脉宽”这些表示信号随时间变化的术语来描述这个信号。这



τ :脉宽 τ_1 :上升时间(前沿) τ_2 :下降时间(后沿)

图 2-4 电脉冲