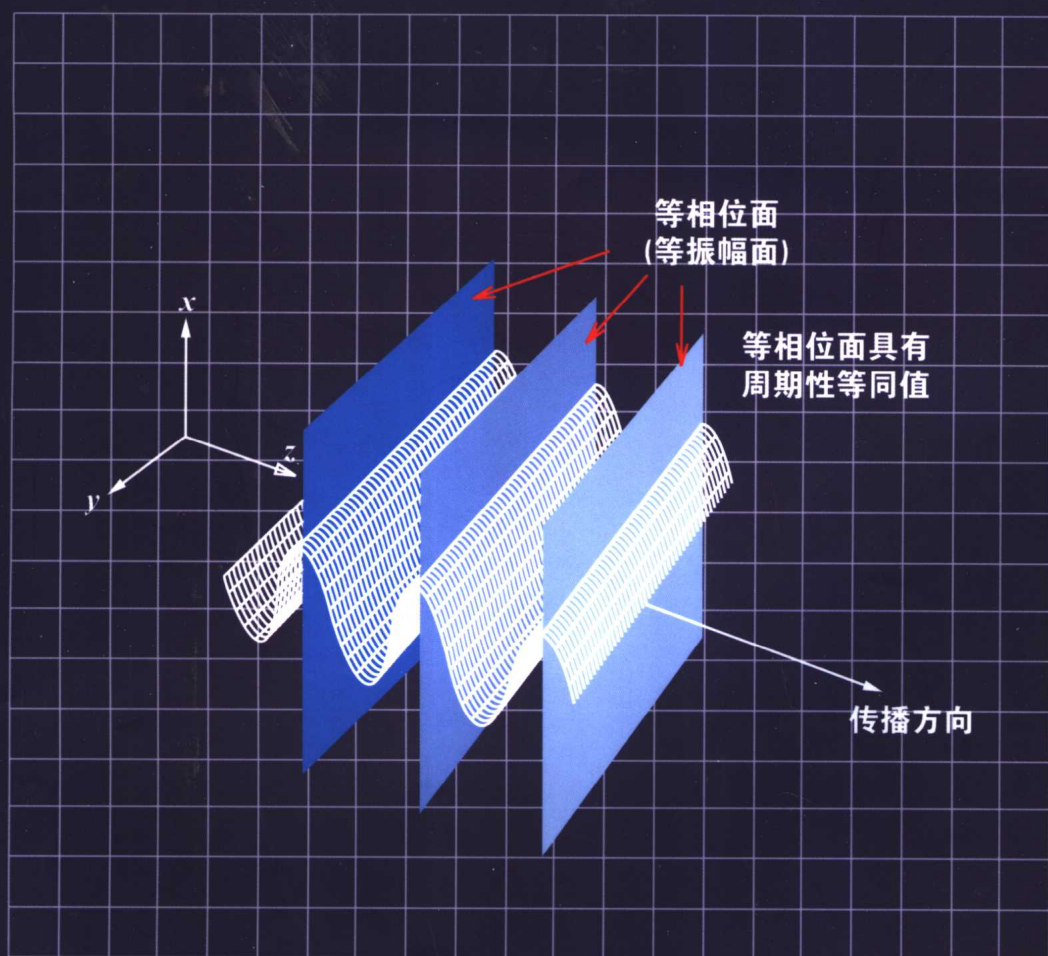


OHM 大学理工系列

光与电磁波

〔日〕西原 浩 编著



科学出版社

www.sciencep.com



OHM 大学理工系列

光与电磁波

〔日〕西原 浩 编著
熊 纓 胡夏夏 译

科学出版社
北 京

图字:01-2003-0415 号

Original Japanese language edition

Shinsedai Kougaku Series; Kou • Denjiha Kougaku

By Hiroshi Nishihara, Yasuyuki Okamura, Katsumi Morishita, Yoshihiko Sugio and Tetsuo Tsugawa

Copyright © 2000 by Hiroshi Nishihara, Yasuyuki Okamura, Katsumi Morishita, Yoshihiko Sugio and

Tetsuo Tsugawa

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

新世代工学シリーズ

光・電磁波工学

西原 浩 オーム社 2000

图书在版编目(CIP)数据

光与电磁波/(日)西原浩编著;熊纓,胡夏夏译. —北京:科学出版社,2003

(OHM 大学理工系列)

ISBN 7-03-010945-7

I. 光… II. ①西…②熊…③胡… III. 光学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 088989 号

责任编辑 崔炳哲 樊友民 责任制作 魏 谨

责任印制 刘士平 封面设计 李 力

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2003 年 2 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 1—5 000

字数: 154 000

定 价: 24.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

丛 书 序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行院系调整以及学科、专业的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系授课,特别是由于学期制教学计划的引入,使得原来分册编写的教材很难在一个学期的教学中消化。因此,各学校对“易教”、“易学”教材的需求越来越迫切。

本系列是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教学参考系列。系列中的各册均由活跃在相应学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富、精炼,有利于对学科基础的理解。设计版面时着意为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教学参考书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

OHM 大学理工系列编辑委员会

主 编

樱井良文 大阪大学名誉教授

副主编

西川祯一 大阪工业大学校长
京都大学名誉教授

编委(按姓氏笔画顺序)

广濑全孝	广岛大学教授	井口征士	大阪大学教授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东京大学教授
白井良明	大阪大学教授	西原 浩	大阪大学名誉教授
池田克夫	京都大学教授	滨川圭弘	立命馆大学副校长 大阪大学名誉教授

前言

人类开始步入信息化社会。如今,信息媒体和工具随处可见。我们的日常生活已经离不开电话、传真、电脑、电视、广播、因特网等信息传递工具。驾驭这些信息传输的技术基础就是电子学中的通信、广播技术。

我们知道,收音机和电视转播是利用电波传递信息的,而移动电话、固定电话、因特网等通信系统,除了靠电波传输外,目前已广泛以光波作为载体。以因特网为例,当今的通信需求呈爆炸性增长,为了满足这一需求,人类计划在近十几年内将光纤网络铺设到千家万户。实现这种广播、通信的载体就是电波或光波。因此,为了与当今社会的发展相适应,掌握光与电磁波工程的基本知识具有现实意义。

正因为光也是一种电磁波,我们将光学工程和电磁波工程合并为一门课,通过两者的对比来系统地学习这两门技术,既有其易学的优点,又有实际意义。本书正是从这一角度出发,编写上力求将光学工程和电磁波工程融为一体,便于读者理解和掌握。本书即可作为大学相关专业本科三年级或四年级一学期用的教材,也可作为其他专业人士了解该专业的入门书。

OHM 大学理工系列中有《电磁学》一书。本书是作为《电磁学》的续篇而编著的。因此,读者最好具备电磁学的基础知识。本书编写中,尽量不使用特别难的数学表述,而是从各种事例入手,从中掌握事物现象所表现的基本原理和物理性质。此外,表达行进的平面波时,使用了电工学中通用的公式 $\exp(j\omega t - j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ 。按理,有关物理单位应该使用 SI 单位,但是由于光的波长比微波的波长还要短,因此,按照光学中的习惯,书中使用了 mm、 μm 、nm 等单位(参照附录 2),希望读者能够习惯这些单位。

本书的第 1 章、第 2~4 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章分别由西原、冈村、杉尾、森下、津川编写,最后由西原校订全书。在编写过程中,我们充分协商,力求避免叙述上的不一致。

将来,无论读者在哪一领域发展。都需要掌握信息化社会的

基本技能,从这个角度来讲,学习本教科书中的有关电磁波的知识显得尤为重要。本书作为光与电磁波工程的人门书,如果对有志于在这一领域发展的人士有所帮助的话,我们将感到万分荣幸。

西原 浩

目 录

第 1 章	光与电磁波的关系	1
1.1	电磁波的分类	1
1.2	电磁波的发生	3
1.3	电磁波应用系统	6
1.3.1	广播、通信系统	6
1.3.2	能源应用系统	7
1.3.3	激光应用系统	7
1.4	本书的学习方法	7
第 2 章	电磁波的基本性质	9
2.1	麦克斯韦方程	9
2.1.1	位置矢量和矢量函数	9
2.1.2	法拉第电磁感应定律	10
2.1.3	安培环路定律	11
2.1.4	结构方程	12
2.1.5	位移电流	13
2.1.6	连续方程(电荷守恒定律)	14
2.2	波动方程	16
2.2.1	矢量波动方程	16
2.2.2	标量波动方程	17
2.3	电磁波是横波	18
2.3.1	波动方程的解	18
2.3.2	平面波中的电场和磁场的关系	21
2.4	电磁波的偏振	22
2.5	电磁波的能量传输	27
	练习题	28
第 3 章	电磁波在空间及介质中的传播	29
3.1	电磁波的分类	29

3.1.1	直角坐标系中的平面波传输	30
3.1.2	圆柱坐标系中的圆柱波传输	31
3.1.3	球坐标系中的球面波传输	33
3.2	电磁波在介质分界面上的反射和透射	36
3.2.1	边界条件	36
3.2.2	电介质分界面的反射和透射	37
3.2.3	金属分界面的反射	41
3.2.4	全反射现象和布儒斯特角	43
3.2.5	反射率(电力反射系数)、透射率(电力透射系数)	44
3.3	光的空间传播	46
3.4	电波的空间传播	50
	练习题	51

第4章 电磁波的干涉和衍射 53

4.1	双波引起的干涉	53
4.1.1	干涉	53
4.1.2	干涉方法	54
4.1.3	干涉的数学处理方式	56
4.2	单层介质膜的干涉	59
4.3	相干性	61
4.3.1	时间相干性	61
4.3.2	空间相干性	63
4.4	衍射	63
4.4.1	衍射公式的推导	64
4.4.2	傍轴近似	65
4.5	简单的衍射图案	68
4.5.1	单缝衍射	68
4.5.2	双缝衍射	69
4.5.3	圆孔衍射	71
4.6	实例	72
	练习题	72

第5章 电波传输线 75

5.1	电波传输线的基本理论	75
-----	------------	----

5.1.1	传输线的种类	75
5.1.2	模式和传播速度	76
5.1.3	同一传输线中的电磁场基本公式	77
5.2	平行平板波导	78
5.2.1	平行平板波导的模式	78
5.2.2	TEM 模	80
5.2.3	TE 模	80
5.2.4	TM 模	81
5.2.5	物理性质	82
5.2.6	相速度和群速度	83
5.3	波导及微带线	84
5.3.1	矩形波导的 TE 模和 TM 模	85
5.3.2	圆波导的 TE 模和 TM 模	87
5.3.3	波导的低阶模衰减	88
5.3.4	微带线	89
5.4	传输线的分布参数电路分析	90
5.4.1	传输线分布参数的计算	90
5.4.2	反射波和驻波	93
5.4.3	阻抗和史密斯图表	93
5.5	微波电路元件	95
5.5.1	电抗元件	95
5.5.2	谐振器	96
5.5.3	定向耦合器	97
5.6	微波应用系统	99
5.6.1	雷 达	99
5.6.2	移动电话	101
	练习题	102

第 6 章 光的传输线

6.1	光波导传输理论	105
6.1.1	光波导	105
6.1.2	光波导的光(射)线分析(平板介质 光波导)	107
6.2	光纤传输理论	109
6.2.1	近似标量波动方程式的推导	109

6.2.2	标量近似法分析阶跃形光纤导波模	111
6.2.3	光纤的传播速度	116
6.3	光学器件	119
6.3.1	微小光学器件	119
6.3.2	纤维型光学器件	121
6.3.3	集成光学器件	125
6.4	光纤应用系统	128
6.4.1	多波长光通信系统	128
6.4.2	光纤陀螺仪	129
	练习题	131

第7章 电波的辐射和天线 133

7.1	电波的辐射	133
7.1.1	赫兹对称振子的电波辐射	133
7.1.2	基本电流源的辐射	135
7.1.3	对称振子线天线的辐射	138
7.1.4	直线阵天线的辐射	140
7.1.5	开口面天线的辐射	142
7.2	天线的基本特性参量	144
7.2.1	辐射方向性	144
7.2.2	辐射阻抗和输入阻抗	144
7.2.3	功率增益	146
7.2.4	有效长度、有效高度	147
7.2.5	接收天线特性	148
7.3	常用天线	149
7.3.1	长、中波天线	149
7.3.2	短波天线	151
7.3.3	微波天线	153
7.3.4	便携电话天线	155
	练习题	157

附录 159

1	基本物理常数表	159
2	10 进倍数和分数单位的词头	159

3	直角坐标系中的公式	160
4	圆柱坐标系中的公式	160
5	球坐标系中的公式	161
练习题简答		163
参考文献		179

第 1 章

光与电磁波的关系

光波是一种电磁波,光波与电波均可当作电磁波来研究。电磁波既有自然存在的,也可以人工发生,后者已广泛用于通信、广播电视等领域。如今,日常生活中应用的电磁波波长范围已经非常广,其最短和最长波长之比达到 $1:10^{20}$ 。

电磁波的传播现象完全可以用麦克斯韦方程组来描述。

1.1 电磁波的分类

我们的身边存在着各种各样的电磁波。其中,既有来自雷电(自然界产生)的电波,也有用于广播电视传播(人工发射)的电波。电磁波所涉及的频谱范围极其广泛,从用于特殊通信的数千赫(kHz)的低频电磁波,到医疗上胸透使用的高频 X 射线,而其中间的波段就是光。

19 世纪中叶以前,人们还没有认识到上述这些波段都是电磁波。自古以来,光就被当作一种奇特的物质,光学的历史也可以追溯到古希腊时代。但是,光学作为一门自然科学研究始于 17 世纪,在天才科学家牛顿为首的众多科学家的共同努力下,直到 18、19 世纪光学理论才取得了进一步发展。与此同时,电磁波理论在 19 世纪也得到了巨大发展。1864 年,麦克斯韦预言了电磁波的存在,并证明了它是以光速传播的,推导出了麦克斯韦方程。又在 1871 年断言,光波也是一种电磁波。至此,一直独立沿着各自方向发展的光学和电磁学终于融为一体。

1888 年赫兹用实验方法证明了电磁波的存在,接着,俄国的波波夫和意大利的马可尼分别于 1894 年和 1895 年成功地发明了无线通信装置,推进了电磁波技术的迅速发展。之后,继 1906 年发明了三极真空管,微波电真空管的研制方面获得了巨大成就,速

调管、磁控管、行波管相继问世,电磁波技术逐渐趋于向短波方向发展,直到1960年发明了激光。当前,日常生活中所用的最短波长的电磁波是1895年伦琴发现的X射线。

按波长以及频率划分的电磁波谱如图1.1所示。电波在各个波段及频带上有其对应的名称。

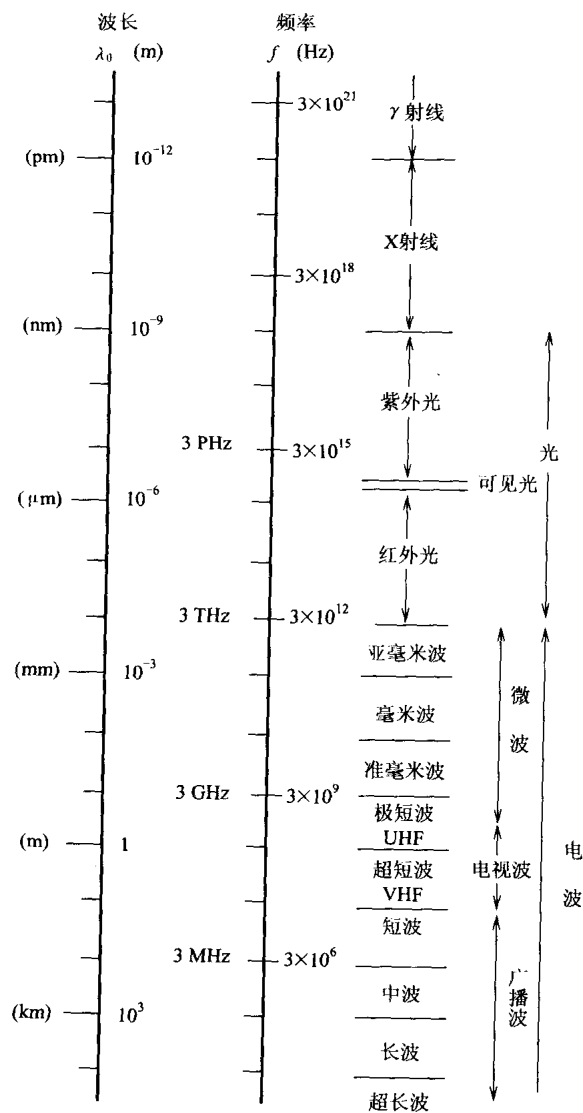


图 1.1 电磁波谱图

前面已经讲过,电磁波可以分为自然存在的电磁波,和利用谐振器人工发射的频率可控的优质电磁波。可干涉性(相干性)是普通波具有的一个重要性质,电磁波的分类就是基于这一性质。可干涉性是一个表示波的干涉难易程度的量,后面将详细说明(4.3节)。自然界存在的电磁波难以产生干涉(可干涉性低),通过谐振器人工发射的电磁波就很容易产生干涉(可干涉性高)。前者有太阳光、电灯光以及用于胸透的X射线等,后者有通信、广播电视所用的电波及信息设备使用的激光等,如表1.1所列。

表 1.1 按照可干涉性分类的电磁波

	自然界发生的电磁波 (可干涉性低)	利用谐振器人工发射的电磁波 (可干涉性高)
电 波	雷产生的电波等	广播电波、通信电波、移动电话的电波等
光	太阳光等	激 光

1.2 电磁波的发生

电磁波发生装置的工作原理如图1.2所示,它是由振荡(放大)器件和谐振回路构成的。振荡器件通常使用的是真空管或半导体元件。低频带区域的谐振回路可以看成是电感和电容等“集总”参量(既不随时间变化,也不随空间变化)元件组合构成的,而高频带区域的谐振回路则视为是立体谐振器。

产生电磁波的振荡器件大致分为真空管和半导体元件两类。1960年以前,用于微波发射的器件主要是真空管,到了1970年以后,逐渐被半导体元件代替,目前,除了大功率的发射装置仍用真空管外,半导体元件已逐渐占据主导地位。作为大功率的激光发生装置有气体激光发生器和固体激光发生器,此外,还有半导体激光器。

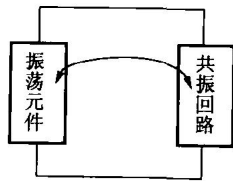


图 1.2 产生电磁波的电路基本结构

下面,我们简单介绍一下主要的振荡器件。

① 真空管 最早出现的是前面讲过的三极真空管,接着诞生

了能够高频工作的四极真空管(板极管),随后又开发出了用于高频率、大功率电磁波发射装置的速调管、磁控管、行波管(TWT)等等。真空管的实质就是将真空中运行的电子束的动能转化为电磁波的能量。上述微波管的能量转化机制各不相同。这里,我们以板极管为例来说明其结构原理。图 1.3 是板极管及其振荡回路空腔谐振器的断面结构(轴对称)示意图。输入空腔谐振器的高频电场集中在阴极与栅极之间,经该电场调制的电子束通过栅极与阳极之间时,使输出空腔谐振器产生激励。如果该输出功率被反馈到输入空腔谐振器,那么,整个空腔谐振器将产生振荡,从而得到更高的电磁波功率。振动频率根据谐振器的尺寸而定(图中省略),其尺寸大小可以调节。

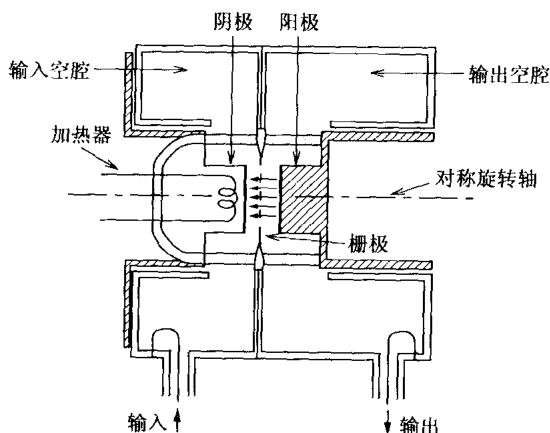


图 1.3 微波发射用板极管及其空腔谐振器的典型结构(断面图)

② 半导体器件 目前开发的微波、毫米波区域的低功率振荡器件有锗二极管、双极晶体管(HBT)、场效应晶体管(field effect transistor, FET)等。而半导体材料大致分两大类,一类是以 GaAs(砷化镓)为代表的化合物半导体,另一类就是最常用的 Si(硅)单晶。一般而言, Si 适合较低的频带,化合物半导体适合较高的频带。归根结底,都是将流经半导体的电子能转化为电磁波能。图 1.4 的例子是将 GaAs-FET 和微带线结构(5.4 节)的谐振回路一同集成在一块电路板上,下面所示的图是其中的 GaAs-FET 结构示意图。

③ 发光器件有各种激光器 其结构主要是由激光的振荡(放大)元件——激活介质,以及激活介质两端的两面镜子(反射膜)构成的谐振腔。开发的 InGaAs 系的化合物半导体激光器,输出的是

10~100mW 级的低功率激光,主要应用在光纤通信和激光唱盘。另外,还开发了 1W~1kW 级的高功率激光器,分别是 YAG 固体激光器和 CO_2 气体激光器。图 1.5 是半导体激光器的结构示意图。

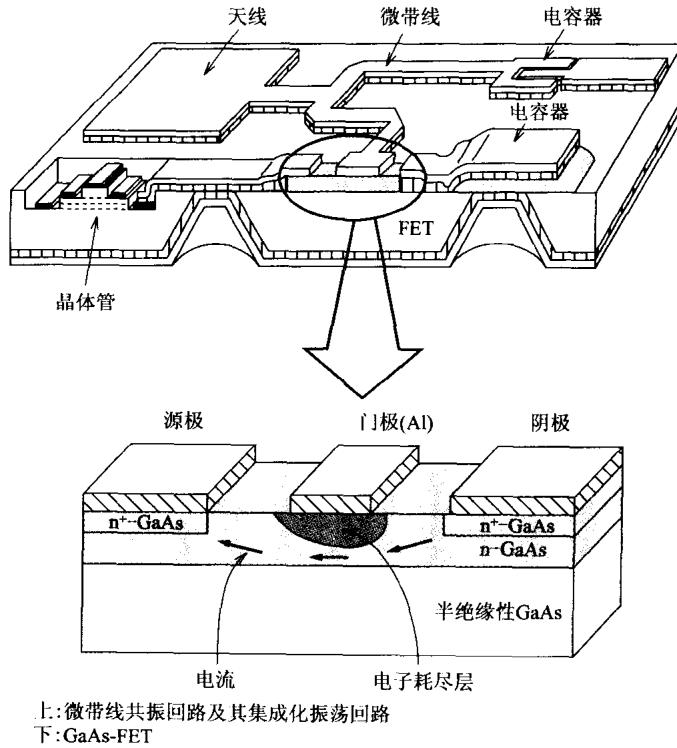


图 1.4 GaAs-FET 谐振回路的典型结构

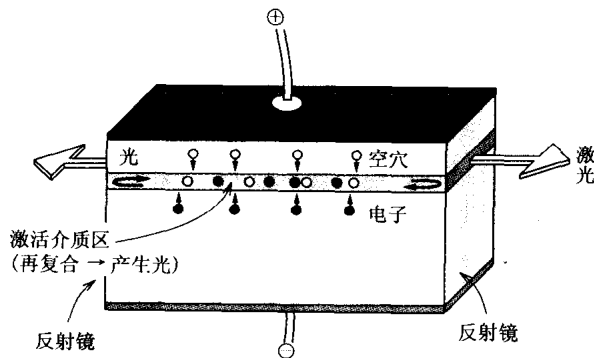
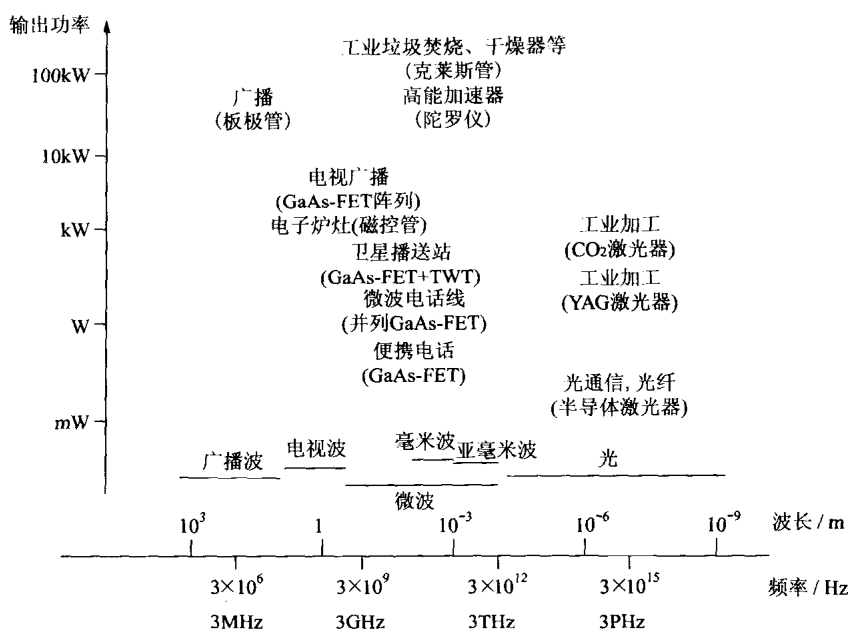


图 1.5 半导体激光器的基本结构



1.3 电磁波应用系统

我们的日常生活中,有许多应用电磁波的系统。图 1.6 是按照输出功率列出的每一频段具有代表性的应用系统,并标明了相应系统所用的电磁波发生器件。

1.3.1 广播、通信系统

1MHz 频带的广播传送站使用的是 10~100kW 级的大功率管——四极真空管,通称板极管。频带范围 100~200MHz 的电视播送站需要采用几百个阵列的 GaAs-FET。卫星通信从地面发射到卫星要占据 17GHz 的频带,通过行波管将 GaAs-FET 的输出功率放大即可得到 600W 级的微波。电话用微波线路的频带范围是 4~6GHz,通常将几个 GaAs-FET 并列工作,使用 5~10W 级的微波谐振模式。

最近迅速普及的移动电话,它所发射的是 0.5W 级的 1~2GHz 频带的电波,因此,只需采用单个 GaAs-FET 便可获得。