

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

光电子器件 物理学

卢俊 王丹 陈亚孚 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

光电子器件物理学

卢俊 王丹 陈亚孚 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

全书共六章,第1章对光电器件一个多世纪的发展历程,分五个阶段做了评述;第2,3,4,5章对光电器件和光电子技术相关的物理理论作了精选和评述;第6章讲述实用光电器件原理与技术,选择当今最具代表性和正在发展中的器件作了特别论述。在浩如烟海的光电子技术中,本书给读者一种清晰的思路和深入的物理思想启发,可供大学高年级学生和研究生及光电技术科技工作者学习和工作参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光电子器件物理学/卢俊,王丹,陈亚孚著. —北京:电子工业出版社,2009.6
ISBN 978-7-121-09009-7

I. 光… II. ①卢…②王…③陈… III. 光电器件—物理学 IV. TN15

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第091791号

责任编辑:赵娜

印刷:北京东光印刷厂

装订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:23.25 字数:580千字

印次:2009年6月第1次印刷

印数:3000册 定价:49.80元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序 言

信息化社会的技术基础是光通信和光电子器件，社会对信息的巨大需求，又直接推动着光电子器件和技术的发展。大容量、高速度、小型化和集成化，是在量子力学基本理论应用的物理基础上发展起来的。光学和光子学、电子学、光电子器件、光电子集成、量子力学原理有机地结合起来，推动着科学技术的发展。具有各种知识背景，包括电子学、光学工程、半导体物理学、光电器件设计与制造和计算机方面的研究人员、工程师和技术人员，迫切地感到需要拓宽自己的知识面。而实际工作的紧迫性又要求尽快掌握满足工程需要的基础知识而暂时避开精细而严密的系统理论，包括在科学技术前沿仍然处于发展中的科学原理和仍处在争议中的科学问题。工程应用首先要求在实践上重复可靠的量子力学理论，具有可操作性。这些已经得到实际应用的物理原理的灵活应用还有很大的发展和创新空间。如量子尺寸效应，即量子阱、超晶格的理论，已经是大量光电子器件的物理基础，但是在量子理论中，这只是非常少的一部分。因此，我们很需要像《光电子器件物理学》这样一本为交叉学科发展服务的精炼的学术专著。

这本书是作者多年从事光电子器件物理教学与研究工作的结晶。他根据器件制造和新型光电子器件发展的要求，从光的电磁场理论、固体物理学、半导体物理学和量子力学提取必要的知识，组建了关于光电子器件物理的综合性基础理论，能满足有不同知识背景而从事光电子器件设计、制造及器件应用的一般工程技术人员和研究生的需求，也可以用作高等学校教学用参考书。甚至对一般关心光电子器件发展及其应用的读者也会有很大的帮助，这将有利于推动光电子器件的发展和应用。

刘颂豪

2009年4月1日于广州

前 言

近年来，我国的高科技技术得到了迅速的发展，其标志性技术在光子、电子学技术领域，也称光电子技术。光电子技术已形成了密集的理论和技术分支，把物质世界推进到空前繁荣的光电子和光电信息技术时代。人们对光电子技术带给他们的美好生活和生存环境赞叹不已的同时，渴望了解光电子技术的理论技术知识和参与创新的欲望，与日俱增。

本书的作者多年来从事集成光学、微电子和纤维光学等器件原理和应用物理方面教学和科学研究，开设多门光电子技术专业物理教学课程，并有多本物理理论和技术专著出版。承担和主持过多项光电子技术方面科学研究项目，并发表过若干学术论文。现在把作者的教学和科学研究的积累和见解汇总，写成这本书，奉献给读者，希望能满足有不同知识背景而从事光电技术理论及应用研究人员的需要。有兴趣阅读本书的读者，会发现本书的理论规律体系结构、概念、原理的文字叙述较简练，如2,3,4,5章只用了20多万字。技术部分的第1,6章只用了10多万字，凝炼而不失全面性和系统性。

因为光电子技术中光子学、电子学器件跟基础物理理论连接紧密，因此本书称为“光电子器件物理学”。

在光电子科学技术的链条上，光电子器件的设计、制造和应用是涉及物理理论最多最密集的地方，也是光电子技术的核心位置。

鉴于近三十年来激光、集成光学和纤维光学的迅速发展，出现的新兴光学技术很多，诸如光纤通信、光孤子通信、超晶格量子阱激光器、微腔激光器、光纤激光器、光传输多媒体、光子晶体、多孔硅发光和纳米技术等。因此，本书中光子学器件理论和技术原理方面的内容占据较多的篇幅。

首先要感谢刘松豪院士为本书作序。感谢陈铁民和任大翠教授对本书撰写的支持、帮助和鼓励，并作最终审定。还有学生郝影、张乾、李俊、代会娜、孙阳对文字、图表的整理所做的大量工作。

鉴于本书作者学识和科学研究经验有限，错漏之处在所难免，恳请阅读本书的专家和学者批评指正，这里先表谢意！

作 者

2009年4月15日于北京

目 录

第 1 章 光电子器件概论	1
1.1 光子学与电子学器件	1
1.1.1 电子管	1
1.1.2 晶体管	2
1.1.3 激光器	3
1.1.4 集成电路出现	4
1.1.5 集成光学和光纤通信	4
1.1.6 半导体激光器	7
1.1.7 半导体光电探测器	10
1.2 超晶格量子阱器件	12
1.3 光电图像转换器	16
1.3.1 引言	17
1.3.2 摄像管	18
1.3.3 变像管和像增强器	21
1.3.4 光电图像转换器的应用	23
1.4 微细加工技术	24
1.4.1 微细加工技术的产生	24
1.4.2 平面薄膜加工技术	25
1.4.3 几何图形制作技术	31
1.5 光电子信息技术发展评述	33
1.5.1 光电子信息技术发展阶段	33
1.5.2 光电子技术理论与理论	36
1.5.3 当今发展光子和电子技术必须的物理理论	38
第 2 章 光波与电磁波理论基础	40
2.1 电磁场	40
2.1.1 静电场和高斯定理	40
2.1.2 电介质的极化与极化强度	42
2.1.3 电介质中的电场与电感应强度	44
2.2 静电势、泊松方程与拉普拉斯方程	45
2.2.1 静电势	45
2.2.2 泊松方程	46
2.2.3 分离变量法求解拉普拉斯方程	47
2.3 静电能	48
2.3.1 真空中点电荷系的静电能	48

2.3.2	电荷连续分布时的静电场	49
2.3.3	导体系的静电能	50
2.4	稳恒电流与磁场	50
2.4.1	稳恒电流与稳恒电场	50
2.4.2	欧姆定律及维持稳恒电流的条件	51
2.4.3	稳恒电流与稳恒电场分布	53
2.5	真空中稳恒电流的磁场	54
2.5.1	电流间相互作用的安培定律	54
2.5.2	电流的磁场、毕奥—萨伐尔定律	54
2.5.3	磁场的散度与旋度	55
2.5.4	磁感应强度的边值关系	56
2.6	磁介质中的磁场	56
2.6.1	磁介质的磁化和磁化强度	56
2.6.2	磁介质中的磁场强度与环路定理	58
2.7	静磁场的矢势与环形电流的磁场	59
2.7.1	静磁场的矢势及其满足的微分方程	59
2.7.2	静磁场的标势及其满足的微分方程	60
2.8	麦克斯韦方程组	60
2.8.1	法拉第电磁感应定律	60
2.8.2	麦克斯韦方程组	62
2.8.3	洛伦兹力公式	64
2.9	电磁场能量与动量	64
2.9.1	电磁场的能量与能量守恒	64
2.9.2	电磁场的动量与动量守恒	66
2.10	电磁波与电磁波方程	67
2.10.1	波动方程	67
2.10.2	平面电磁波	69
2.10.3	电磁波在绝缘介质分界面上的反射与折射	72
2.10.4	电磁波在导电介质中的传播及其在导体表面上的反射	75
2.11	电磁波在波导中的传播	77
2.11.1	矩形波导	78
2.11.2	圆柱形波导中传播的电磁波	80
2.12	电磁波在同轴传输线中的传播	82
2.12.1	同轴传输线中传播的电磁波	83
2.12.2	同轴线中传播的 TEM 主波	84
2.12.3	同轴传输线的电报方程	85
2.13	电介质波导与光导纤维	86
2.13.1	圆柱形介质波导的解	87
2.13.2	边值关系与特征方程	90
2.13.3	光纤中的导模	91

2.13.4	色散曲线和场分量分布	94
第3章	电子与量子力学理论	96
3.1	量子力学产生的直接物理背景	96
3.1.1	黑体辐射能实验及普朗克开创量子论	96
3.1.2	普朗克量子论创新点与理论方法	97
3.1.3	光电效应与爱因斯坦的光量子学说	99
3.1.4	原子线状光谱与玻尔的旧量子论	99
3.1.5	量子概念的其他实验证明	100
3.2	量子论的基本概念和基本原理	101
3.2.1	一个观点	102
3.2.2	两条规律	102
3.2.3	五条基本原理	104
3.3	状态和薛定谔方程	106
3.3.1	状态和波函数的引进	106
3.3.2	薛定谔方程	108
3.4	体系粒子数守恒	114
3.4.1	体系的定态	115
3.4.2	粒子流密度公式与守恒定律	115
3.4.3	几率流密度矢量应用举例	116
3.5	一维无限深方势阱	117
3.5.1	求解定态问题的思考方法条理化	117
3.5.2	讨论	119
3.6	一维有限深方势阱(对称型)	121
3.7	一维线性谐振子	124
3.8	一维三角势阱	128
3.9	一维势垒与势阱的量子透射	130
3.9.1	一维方势垒量子反射与透射系数	130
3.9.2	一维势阱的量子透射讨论	133
3.9.3	δ 势阱与势垒的透射	134
3.10	简并态微扰理论	136
3.10.1	非简并态微扰理论	136
3.10.2	定态简并微扰理论	138
3.10.3	简并与非简并微扰的例题	138
3.11	含时微扰的量子跃迁	141
3.11.1	含时微扰的基本方程	141
3.11.2	状态跃迁几率	143
3.11.3	含时周期微扰的共振跃迁	144
3.11.4	光跃迁的测不准关系	144
3.12	单量子阱光吸收和发射的初步量子理论	145
3.12.1	爱因斯坦的光发射与吸收原理	145

3.12.2	平衡态三种跃迁几率的公式推导	146
3.12.3	受光照射的原子体系量子跃迁	147
第 4 章	固体物理与半导体物理基础	149
4.1	固体原子周期性排列的空间描述	149
4.1.1	晶体原子的几何空间描述	149
4.1.2	晶胞、晶面的矢量表示	152
4.1.3	晶体的对称性	153
4.2	倒格矢与布里渊区	155
4.2.1	倒易空间的晶格描述	155
4.2.2	布里渊区	156
4.3	晶格振动的量子论描述	157
4.3.1	简谐振动与热容量的量子理论	157
4.3.2	爱因斯坦和德拜的热容量理论	160
4.3.3	晶格线性微振动的格波解——光学支与声学支	161
4.4	固体电子运动的量子论描述	164
4.4.1	晶体价电子运动的理论模型	164
4.4.2	单电子近似与布洛赫波	165
4.5	准自由电子近似	165
4.5.1	定态微扰	166
4.5.2	简并微扰	168
4.5.3	能带与布里渊区	170
4.6	固体能带理论的启发性概念	173
4.6.1	电子运动的准经典粒子模型	173
4.6.2	能态密度与费米面	175
4.6.3	外场作用下的准经典粒子（有效质量概念）	175
4.6.4	导体、绝缘体和半导体能带区别	176
4.6.5	导电机制的定性讨论	177
4.7	金属电子论的基本问题	178
4.7.1	单电子近似模型	178
4.7.2	金属电子的费米分布	179
4.7.3	低温费米能级	179
4.8	光场作用的固体	180
4.8.1	固体介质极化	180
4.8.2	光的散射现象	182
4.8.3	光的吸收	183
4.8.4	激子	184
4.9	半导体的能带结构特性	186
4.9.1	带隙与带边有效质量	186
4.9.2	常见半导体的能带结构	188
4.10	布里渊区与能带杂质能级	192

4.10.1	布里渊区与能带	192
4.10.2	杂质能级	194
4.11	半导体载流子统计分布	195
4.11.1	导带的状态密度	195
4.11.2	载流子统计分布的玻耳兹曼近似	196
4.11.3	本征激发	197
4.11.4	杂质激发	198
4.12	杂质半导体特性	199
4.12.1	N 型杂质半导体讨论	199
4.12.2	简并半导体	201
4.13	半导体导电性	203
4.13.1	迁移和电导率	203
4.13.2	非平衡载流子的扩散与复合	204
4.13.3	强电场效应和耿氏效应	204
4.13.4	朗道 (Landau) 能级与量子霍尔效应	204
4.14	半导体表面与界面表面电场效应	207
4.14.1	表面与界面能带结构	207
4.14.2	表面电场效应	208
4.15	半导体表面 PN 结特性	214
4.15.1	半导体 PN 结载流子分布	214
4.15.2	电场作用下的 PN 结	215
第 5 章	集成光学与光纤通信基础	219
5.1	集成光学与技术	219
5.1.1	集成光学的发展	219
5.1.2	介质薄膜光波导的制造技术	222
5.1.3	光路几何图形的微细加工技术	222
5.1.4	集成光路制造的耦合技术	223
5.1.5	集成光路的调制技术	225
5.1.6	光纤和光纤技术	225
5.2	光波导的电磁波理论基础	227
5.2.1	光波导基本方程	227
5.2.2	平板波导方程与模判别条件	229
5.2.3	突变波导的解与模阶方程	232
5.3	集成光学中的光调制	233
5.3.1	光调制的基本概念	234
5.3.2	调制光的光谱的分析	238
5.3.3	光脉冲	241
5.4	光线光学的基本原理	245
5.4.1	光线与光线方程	246
5.4.2	费马 (Fermat) 原理与简化光线方程	249

5.5	光线力学与应用	254
5.5.1	光线力学	254
5.5.2	麦克斯韦鱼眼与兰伯尔格透镜	257
5.6	梯度折射率光纤	263
5.6.1	$n^2 = n_0^2[1 - a^2(x^2 + y^2)]$ 情况	265
5.6.2	$n^2 = n_0^2[1 + a^2(x^2 + y^2)]$ 情况	266
5.6.3	子午光线	267
5.6.4	螺旋光线	270
5.6.5	径向分布介质近轴光线特性	271
第 6 章	实用光电子器件	273
6.1	光电成像器件	273
6.1.1	光电子成像器件的分类	273
6.1.2	微光夜视器件	274
6.1.3	红外成像器件	275
6.2	像增强器的原理与功能	276
6.2.1	像增强器的功能	276
6.2.2	实用像增强管	277
6.3	图像显示器件	285
6.3.1	电子束显示器件中的荧光屏	285
6.3.2	平板显示器件	286
6.4	微通道板倍增管 (MCP) 和传像束纤维	287
6.4.1	MCP 的工作原理	288
6.4.2	传像束光导纤维	290
6.5	气体激光器	292
6.5.1	氦—氖气体激光器	292
6.5.2	二氧化碳激光器	293
6.6	固体激光器	296
6.6.1	固体激光器的基本结构	296
6.6.2	固体激光工作物质	297
6.6.3	红宝石晶体	299
6.6.4	掺钕钇铝石榴石 (Nd^{3+} : YAG)	302
6.6.5	钕玻璃	304
6.6.6	激光二极管泵浦的固体激光器 (DPSL)	305
6.7	半导体激光器	309
6.7.1	器件结构	310
6.7.2	I-V 特性和 P-I 特性	312
6.8	半导体激光器的光电特性	314
6.8.1	光学特性	314
6.8.2	半导体激光器的电导特性	318
6.9	异质结构半导体激光器	319

6.9.1	双异质 (DH) 宽接触芯片结构	319
6.9.2	阈值电流密度	320
6.9.3	半导体激光器的效率	321
6.9.4	半导体蓝、绿光激光器	322
6.10	超晶格量子阱激光器	323
6.10.1	量子阱激光器的结构	324
6.10.2	量子阱激光器的基本特征	326
6.11	光纤激光器	329
6.11.1	光纤激光器的基本工作原理	329
6.11.2	稀土掺杂的光纤激光器	331
6.11.3	非线性效应光纤激光器	332
6.11.4	光孤子和单晶光纤激光器	332
6.11.5	塑料光纤激光器	333
6.11.6	光纤光栅激光器	333
6.12	集成光路器件	336
6.12.1	光放大器	336
6.12.2	光调制器在光纤光路中的作用	346
6.12.3	光开关	349
参考文献		355

第1章 光电子器件概论

1.1 光子学与电子学器件

现代光电器件是光子学器件和电子学器件的总称。而在历史上光电器件的内涵发生过很大的变化。本节按照器件发展的时间顺序、物理原理和器件结构特点，以及推动光电技术发展的力量，选择代表性器件加以阐述。首先要注意电子在器件中进进出出所做的贡献。

1.1.1 电子管

自从1904年英国科学家佛莱明（Fleming.J.A）发明二极管电子管以来，至今一百多年，光电器件和由器件推动的光电技术获得了很大发展，1906年出现的无线电广播，是美国科学家费森登（Fessenden.R.A）首先发明的。同年德国科学家德福雷斯特·李（D Forest.Lee）发明了三极管电子管，此后无线广播和无线电收音技术开始兴起，直到1950年半导体晶体管出现以前，都称为真空电子管和无线电技术时代。

1897年英国科学家汤姆逊（Thomson.G.P）在阴极射线中发现了电子，1910年密立根（Millikan.R.A）在油滴实验中看到了电子，而光子作为独立粒子至今还没有被看到。20世纪60年代以前，电子管制作都是用加热的方法从金属片上发射电子，发射电子的金属材料称阴极或发射阴极，收集电子的材料称阳极。阴极和阳极装在一个类似灯泡的玻璃真空管内用金属丝通电加热发射电子，这就是二极管电子管的结构设计原理。在真空管内加上栅极，用栅极电磁场控制（或调制）这些在真空管内自由状态的电子，从而控制电子携带的电流和产生的电压，这就是三极管电子管的结构原理，如图1-1-1所示，而栅极的功能就是注入外部信息（如声音波动）的电流波动。电子管最早装配在无线电的发射和接收装置上，是根据赫兹关于电子振荡产生电磁波的原理做成的装置，这就出现了电台和收音机等通信工具，那些带有栅极的真空电子管，还可以根据不同需要加几个栅极，做成三极、四极、五极电子管，这就制造出有许多功能的电子管器件。

根据1887年赫兹发现光电效应，在1945年德国科学家希尔等人还制作出真空光电管，后来又发展出光电倍增管，这种光电管是在电子管中用特殊金属材料（后来称为光敏材料）制作成发射阴极，用光照射也能发射电子，把这种真空电子管称为光电管，在光电管内把电子加速称为光电倍增管，如图1-1-2所示，这就是最早的光电管和光电器件，实际是光照驱动发射电子，仍属电子管，它的用途是借助电子电流或电压检测光强度。

最后还要注意的，在真空电子管时代，发明了数字电子计算机（1946年美国曼哈顿工程原子弹设计中心）。当时的电子计算机是一个由数万只真空电流管组成的庞大的电子学系统，占地300m²。在20世纪60年代以前，电子管及相应的无线电路的阻容器件（电阻和电容）已经成熟了，只是单个器件体积都很大，无线电通信技术也已经成熟了。作为早期的

大体积的电子学器件已普及并进入批量生产，这是光电器件和光电技术的初级阶段，那时还没有光子功能性的器件，称这个阶段为电子管和无线电技术时代。

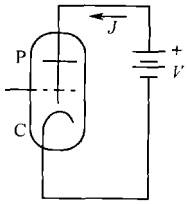


图1-1-1 三极电子管示意图

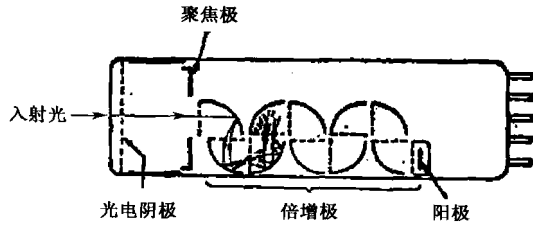


图1-1-2 光电倍增管示意图

1.1.2 晶体管

第二次世界大战后，随着半导体物理和半导体材料研究的发展，1950年美国科学家肖克利（Shockley, W）发明半导体 N-P-N 结三极管，开始了光电器件发展的第二阶段——光电器件固体化的晶体管和电子技术时代。因为这时电子在固体中工作，而不是在真空管中自由运动，无线电技术也推广到科研、生产和医疗方面，这个阶段被称为晶体管和电子技术时代。因为这个时代的晶体管设计原理是利用半导体 P-N 结的整流原理，制作晶体整流二极管，接着利用调节半导体载流子流量方法发明了晶体三极管等一系列晶体结构的电子学器件，这个阶段电子学器件完成了两个物理原理上的飞跃，一是大体积的真空“灯泡”转换成固体或晶体的小型化器件，二是使电子粒子由真空自由运动进入晶体的束缚运动。半导体二极管和三极管的结构如图 1-1-3 和图 1-1-4 所示。晶体管的体积小、工作效率高，极大地推动了电子技术的发展，使其出现很大的飞跃。产生这样巨大变化的直接原因是 20 世纪的物理学风暴的影响。20 世纪初量子力学的创立，引起了整个经典物理学的变革，其中固体物理的电子能带理论，使固体物理发生了颠覆性的变革，并在半导体晶体上得到成功的应用，提出了载流子概

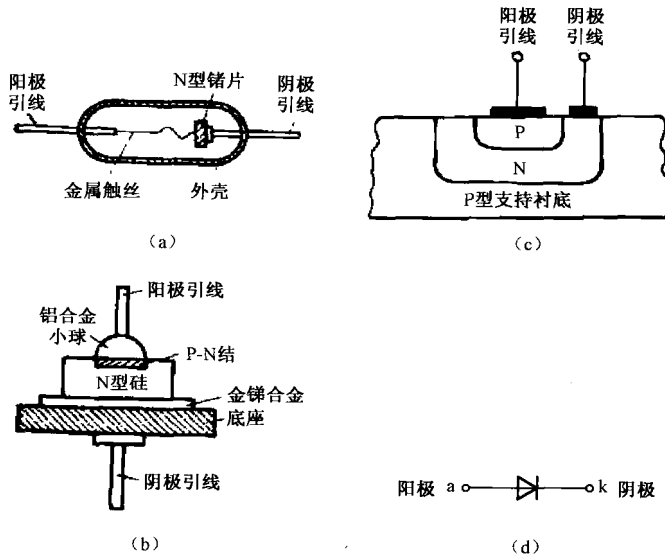


图1-1-3 半导体二极管结构图

念、界面的 P-N 结概念和杂质半导体概念等，创立了半导体物理学科，促进了半导体材料研究、冶炼和生产的迅速发展，制造出品质优秀的半导体晶体电子管，并发展出制造电子学器件的平面工艺，为以后的器件小型化和集成化打下了技术基础。也就在这时，电子管计算机发展为小型印刷电路的电子计算机，使计算速度由 2000 提高到 10 000 次，占地 20m^2 。从此数字电子计算机开始进入科学技术发展的领域。

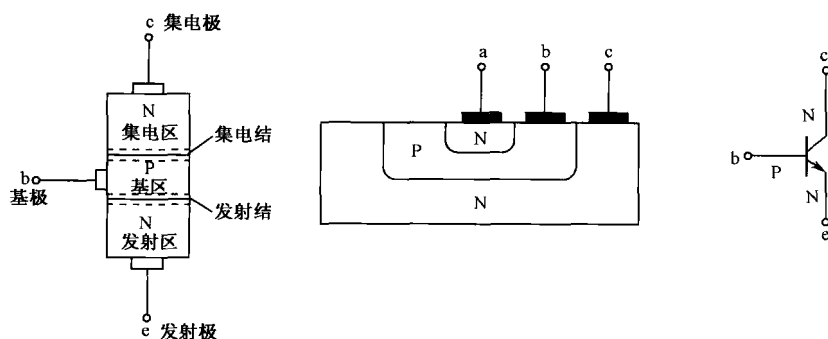


图1-1-4 半导体三极管结构图和管芯结构剖面图

这个阶段的技术原理已经是应用“电子”粒子在晶体中的运行特性设计电子学器件和开发电子技术应用，但这时的光学器件仍然停留在古老的光学玻璃的设计和制作水平上，工艺方法也是传统的机械工艺方法。

1.1.3 激光器

1960 年美国人梅曼 (Maiman.T.H) 发明第一台红宝石激光器，如图 1-1-5 所示，使光电子器件发展进入了第三个阶段，激光器的发明使这时的电子学器件改称为光电子器件，电子技术时代改称为光电子技术时代，因为这时真正有了光学功能的器件，所以在器件和技术前面都可以加上“光”字。激光器的发明使人类有了第一个由人工可以设计发光强度和波段频率（或颜色）的光源，也就是光束超细、能量超强的单色光源，改变了过去光源只有照明观察功能，现在已经成为生产工具（如打孔、医疗手术等），同时这个新光源可以更深入更细微更精密地研究物质结构。后来的发展表明，激光器的出现推动了自然科学六大学科和各个技术领域的发展。因此激光器的出现，改变了光学在自然科学中的地位，成为自然科学中必不可少的观测、探索和生产工具，从此有了激光器和电子学器件联合开发的光电子技术领域，也就是在这时电子技术转变为光电子技术，进而成为科学发展的引领技术，使人类科学发展踏入一个新的历程，同时光电子技术也获得了迅速发展，20 世纪 70 年代初的十年间，半导体激光器也出现了，这个阶段光电子技术跨越两个台阶：一是有了真正的光电子器件和光电子技术，二是为光电子技术的小型化和集成化开辟了硬件基础。

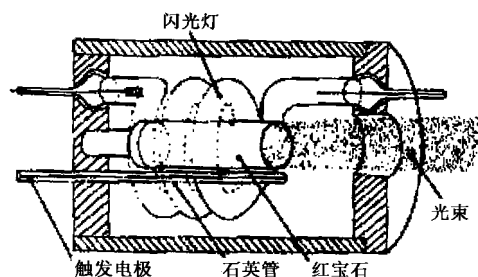


图1-1-5 梅曼第一台红宝石激光器

1.1.4 集成电路出现

集成电路是光电子器件和光电子技术发展的第四阶段。当无线电技术成熟,晶体管出现以后,特别是晶体管的出现推动了器件制作工艺中的镀膜技术的成熟和发展,器件薄膜化也为集成化提供了基本技术条件。科技工作者很快意识到电子学器件组成的回路小型化问题,于是借助镀膜技术,在20世纪70年代中期出现了集成电路,集成电路的标志是电子技术回路中所有电子学器件(包括各种晶体管、传输线和阻容器件)的小型化、薄膜化和集成化,把具有众多的电子器件应用回路形成一个固定的电子学块状器件,就是集成电路。集成电路的出现使电子学器件和电子技术完成了一次飞跃。集成电路(现在已经是大规模超高速的集成电路,称为集成块)的出现把电子学器件和电子应用回路推向高速度、宽频带、超小型、长寿命和坚固廉价的高度。使电子技术的科技含量上到一个新高度,如集成电路装制成的电子计算机已经是台式计算机,计算速度达到了100万次,可以称为计算机了。计算机的出现和迅速发展,把各个科学领域推向配置计算机的智能化发展阶段。计算机更新了信息技术领域,使人类社会迈进了信息技术发展时代,由于智能化电子技术在自然科学研究和技术领域广泛应用,使人类文明进入到一个新的高度。

1.1.5 集成光学和光纤通信

集成光学和光纤通信技术出现是光电子技术发展的第五个阶段,称为光电信息技术时代,这是一个具有里程碑意义的时代。20世纪60年代以来,由于集成电路的奇迹般发展和应用,再加上计算机技术和半导体激光器技术的迅速发展,极大地推动了各个科学技术领域的小型化和集成化的进程,伴随出现了制造业的巨大变革,出现了微细加工技术,即集成电路和半导体激光器制造中原子和分子尺寸水平的固体材料加工技术,其中包括薄膜制作的真空镀膜、离子交换、固体材料的气相和液相外延生长、固体表面层热扩散等,回路几何图形的光学和化学的照相翻拍刻蚀、离子铣刻蚀和离子注入等,完全是现代物理实验中的设备和仪器走进了集成电路和半导体激光器制作车间,抛弃了传统的机械加工中的车(切削)、抛(抛光)、刨、磨等工艺方法。在集成电路小型化和薄膜集成化思想的启发下,再加上小型化半导体激光器的出现,1969年美国贝尔实验室科学家S.E.Miller等人提出了集成光学(Integrated Optics)的科学思想,立刻引起学术界的广泛关注。集成光学的第一个目标就是制作小型化的光学器件、集成化和薄膜化的光学回路系统,称为集成光路。这个科学思想的提出在于要使三百多年的传统光学中的宏观零部件走向小型化,宏观光学中的光学系统也要走向集成化,如同电子学器件和电子学回路那样,向小型化和集成化方向发展。这个科学思想的提出,将使传统光学理论、技术原理,光学工程中的材料加工工艺等都发生前所未有的变革,最重要的是光波载息,将比电波载息的智能化水平提高 $10^4 \sim 10^6$ 个数量级,于是设想了“光计算机”和“光电视”的美好前景。因此集成光学这个大胆的科学思想立刻引起了学术界和军工部门、民用光学企业等产业部门的极大兴趣,集成光学的出现是信息光学发展中的里程碑变革。

集成光学提出以后遇到的第一个麻烦就是把光传输控制在固体材料中长距离传播,这是以往没有的,在自然界也找不到这样的材料,所以第一个集成光学器件就是光波导,其示意图如图1-1-6所示是光在固体薄膜中传播的器件,即光的传输线。但是当时还没有固体介质

传导光波的实验支持, 人工制造光波导也是空白, 而且早在 20 世纪 40 年代自由电子理论创始人, 德国科学家德鲁多 (Drude P.K.L.) 已经否定了光在玻璃中长途传播的可能性, 可以看到集成光学遇到首要问题是找到能够传输光波的固体介质 (即电子学的导线), 而这在电子学线路中根本就不是问题, 只要是金属材料都可以用来做导线, 传输电流, 但在光学中就没有这样的天然材料做成传光的传输线。所以集成光学中第一个光子学器件就是研究制作光波导 (即导线), 好在美国西北大学的 Smith 已经在实验中证明了 (1970 年) 经过加工的玻璃片薄膜上可以有较长距离的传输光, 并且不改变传播模式其试验装置如图 1-1-7 所示。高锟等人在光导纤维上 (即玻璃丝) 获得低损耗导光的突破, 立刻在通信方面获得应用, 此后不到三年 (1973) 就出现了风靡世界的光纤通信技术领域, 这证明了介质薄膜上长距离传输光的可能性是存在的。可以说光纤是集成光学中的第一个成功的光波导, 见图 1-1-8。光纤通信也是集成光学中第一个走向技术应用的成果, 见图 1-1-9 和图 1-1-10, 他们都是光电信息技术发展的转折点。

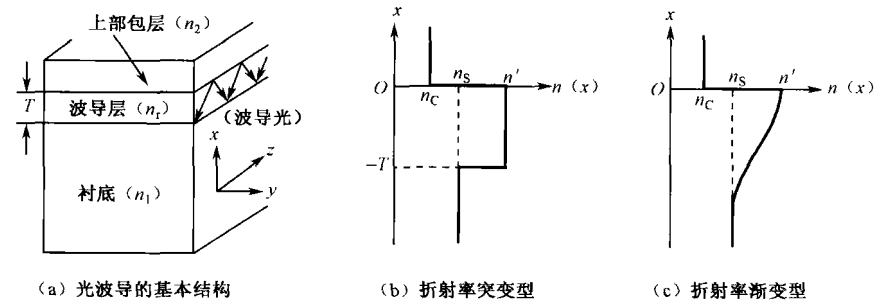


图1-1-6 平面光波导示意图

到了 20 世纪 70 年代中期光波导的制作趋于成熟, 从导光材料的选取, 到利用集成电路中微细加工工艺手段制作光波导, 都取得了初步成果。那时光波导的制作工艺主要受集成电路制作技术的带动。主要差别是在光通路中对光波能量的限制是很麻烦的事情, 因为天然物质没有导光材料, 所以需要人工制作。接着就试图制作集成光路所需要的调制器、分束器、耦合器、光开关等单个器件, 也试图制作简单的集成光路。但是集成光路研究中遇到的最大麻烦就是光波导中无法有效控制光能量的损失和泄漏, 因为没有物理理论的支持, 这个麻烦至今也没有解决。

集成光学的提出引起专家、学者和广大科学工作者的研究兴趣, 在 20 世纪 70~90 年代参与研究的人很多, 是学术界是非常热门的研究课题。许多人开始都是出自追求光载波作信息处理的美好前景, 如光计算机将提高 $10^4 \sim 10^6$ 量级的速度和容量, 光波电视的声、色图像 (现也称多媒体) 等。虽然有些前景现在已经实现了, 后来的发展表明要做成有三个以上单元器件功能的集成光路, 是非常困难的。集成光路制作流程如图 1-1-8 所示, 至今也没能实现, 这使光计算机的发展几乎成为泡影等。原因是集成电路的工作物质是电子, 电子的微观运动行为完全可以用量子力学理论解释和预言, 用量子力学理论形成技术原理, 在理论和技术原

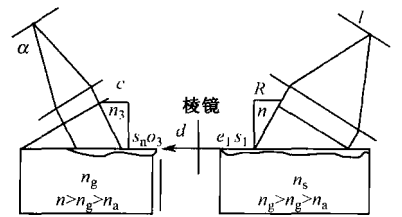


图1-1-7 Smith试验装置