

● 复旦大学出版社

半导体发光材料和器件

LED DISPLAY LED DISPLAY

● 方志烈 编著

第 10 章 图形用户界面

LED DISPLAY LED DISPLAY

半导体发光材料和器件

方志烈 编著

复旦大学出版社

(沪)新登字202号

责任编辑：秦金妹

责任校对：陈优生

半导体发光材料和器件

方志烈 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路579号)

新华书店上海发行所发行 诸暨印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 12.5 字数 370,000

1992年1月第1版 1992年1月第1次印刷

印数 1—3000

ISBN7-309-00708-5/O·96

定价：8.50元

内 容 提 要

半导体发光材料和器件,包括发光二极管、半导体激光器及其材料,在现代显示技术、光纤通信技术以及其它各种光电子技术领域中,正起着重要的作用,发展非常迅速,已形成颇具规模的新兴产业。本书主要论述发光二极管,半导体激光器及其材料的基本特性、发光原理、制备工艺、测试方法 and 应用等方面的知识,也介绍了最近的进展。

本书可作为大专院校有关专业的教材。曾在电子工业部委托复旦大学举办的“半导体发光材料和器件”进修班上采用,效果颇好。也可供有关方面的科研人员、工程技术人员参考

前 言

半导体发光材料和器件是本世纪六十年代末开始发展起来的半导体技术中的一个分支,所用的材料主要是Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体。由于用此材料制成的发光器件可广泛地用于信息显示、光纤通信等方面,因此在材料制备方法、性能检测以及器件工艺改进等领域的研究和开发工作的发展也甚为迅速。国内外均已发展成新兴产业,国内年产的发光二极管数量也已达十亿余只。

由于科研、生产的发展,从事这方面工作的科技人员迫切需要这方面的理论和实际知识,而国内目前至今仍没有介绍半导体发光材料和器件的专著,因此本书的编著和出版是非常及时的。初稿曾被电子工业部委托复旦大学举办的“半导体发光材料和器件”进修班所采用,效果颇好。很多单位都来函索取讲义,考虑到国内对这类教材的需求,作者对初稿删去了目前尚处在发展初始阶段的半导体集成光学一章外,并对其他章节进行了适当的增补。此书将由复旦大学出版社作为教材出版,它也是这一学科方面的专著。

本书具有以下三个特点:

(一) 内容比较系统和全面

本书包括晶体结构、能带理论、发光机理、晶体生长、材料制备、器件设计与制造、性能研究、特性参数测试及应用等十四章,内容比较系统和全面。书中还列有许多数据表,可供读者查阅参考。

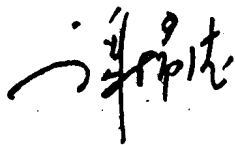
(二) 理论联系实际

本书对和发光有关的理论,例如光度学、结晶学、相图、能带理论等做了深入浅出的介绍的同时,也论述了有关半导体发光机理、单晶生长、外延技术、发光器件设计制造和测试、应用等内容。在各专题论述方面,注重从基本理论出发,阐明原理,分析机理,并对涉及器件设计有关的实际问题进行了讨论。

(三) 反映新的成果

本书比较详尽地介绍了该领域的最新进展,如新材料、新器件和生长材料的新技术以及器件应用的新方向等,使读者对本学科的新进展和发展方向有一清晰的了解。书中相当一部分内容反映了作者及其同事们在这一领域的科研成果。

本书可供高等学校有关专业的师生阅读,也可供从事半导体发光材料和器件研究和制造的科研人员和生产技术人员参考。



一九九一年八月二十二日

绪 言

发光二极管是指在半导体 PN 结通以正向电流时,发出可见光或近红外光的器件。虽然早在 1923 年,O.W. Lossew 就已经发现了碳化硅的 PN 结发光现象,但是发光二极管作为一种电子器件来说,直至 60 年代后期,才得到了较大的进展。自 1965 年之后,由于在发光机理、晶体生长和器件工艺等方面卓有成效的研究,使发光二极管的研制和应用得到了较快的发展。1968 年美国孟山都公司首先提供磷砷化镓红色发光二极管商品,1982 年全世界总产值达到五亿四千多万美元,超过了液晶、工业应用的阴极射线管(不包括民用电视显像管)以及等离子体等显示器件。近几年来,我国的产量也成倍增长,1990 年生产半导体发光器件所用芯片达到十亿只。

为什么发光二极管会得到如此迅速的发展呢?主要是由于它有下列优异性能:

1. 寿命长,亮度减半的寿命大于 10 万小时,即 10 年以上。
2. 功耗小,亮度高。可与集成电路匹配。最好的商品器件在 20 mA 下已达 2000~5000 mcd,实验室最高水平已达 10000 mcd 左右,可供日光条件下使用。
3. 体积小,重量轻。可封装成各种类型的显示器件。
4. 坚固耐用,不怕震动。
5. 多色显示。现已制得全部可见光颜色的商品器件可实现彩色显示。此外还有 $0.85 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的近红外发光器件。
6. 工作温度稳定性好。
7. 响应时间快。一般为毫微秒数量级。
8. 冷光——不是热光源。
9. 当与硅光电检出器结合时可以作为低噪声光开关。
10. 电压低,可以用太阳能电池作电源,并易与集成电路相匹配。

表 1 是各类显示器件的性能比较。

表 1 各类显示器件性能比较表

特 性 \ 分 类	发光二极管 LED	液 晶 LCD	荧 光 FIP	等离子体 PDP
驱动电压	A	A	B	C
功率损耗	B	A	C	C
亮 度	B	被动	A	C
外形尺寸	A	A	C	B
集成电路匹配	A	B	B	C
多色性	A	B	B	C
响应速度	A	C	A	A
温度范围	A	C	B	B
寿 命	A	C	B	C
可靠性	A	B	B	B

注: A为最好 B为中等 C为较差

发光二极管主要应用于“人机联系”的显示领域,作为指示灯,数码管、矩阵管、字符管、电平表广泛应用于各种仪器,数字化仪表,计算机、汽车、飞机、收录音机、电视机、时钟、定时器、电子玩具等工业和科研设备与民用电器,也可以制成显示屏幕。此外,还可应用于光纤通信,信息处理和自动控制等领域。半导体发光器件已成为现代化电子仪器和新技术中的重要器件,这正是发光二极管近些年来深受重视,并得到迅速发展的主要原因。

目 录

前 言	1
绪 言	1
第 一 章 光、光度学和色度学	1
§ 1.1 光的本质	1
§ 1.2 光的产生	3
§ 1.3 光度学	6
§ 1.3.1 能量的辐射分布	6
§ 1.3.2 辐射度量及单位	7
§ 1.3.3 朗伯定律	9
§ 1.3.4 视见函数	9
§ 1.3.5 光度量及单位	14
§ 1.4 色度学	17
第 二 章 半导体发光材料晶体导论	22
§ 2.1 晶体结构	22
§ 2.1.1 空间点阵	22
§ 2.1.2 晶面与晶向	24
§ 2.1.3 闪锌矿结构、金刚石结构和纤锌矿结构	26
§ 2.1.4 缺陷及其对发光的影响	30
§ 2.2 能带结构	35
§ 2.3 半导体晶体材料的电学性质	42
§ 2.3.1 费米能级和载流子	42
§ 2.3.2 载流子的漂移和迁移率	44
§ 2.3.3 电阻率和载流子浓度	45
§ 2.4 半导体发光材料的条件	46
§ 2.4.1 带隙宽度合适	46
§ 2.4.2 可获得电导率高的 P 型和 N 型晶体	47

§ 2.4.3	可获得完整性好的优质晶体	47
§ 2.4.4	发光复合几率大	47
第三章	单晶的熔体生长	48
§ 3.1	相图	48
§ 3.2	砷-镓体系的 $P-T-x$ 相图	52
§ 3.3	$P-T-x$ 相图在制备砷化镓晶体中的应用	55
§ 3.4	水平布里支曼法生长砷化镓单晶	59
§ 3.5	液体密封法从熔体中直接生长砷化镓单晶	60
§ 3.5.1	合适的液体密封剂	61
§ 3.5.2	工艺控制分析	61
§ 3.5.3	工艺操作过程	62
§ 3.6	液封直拉砷化镓的掺杂控制	65
§ 3.6.1	估计所需掺杂量的经验公式	66
§ 3.6.2	影响 GaAs 单晶中杂质分布均匀性的因素及 改善均匀性的方法	66
§ 3.7	半绝缘砷化镓单晶生长	68
§ 3.8	用高压单晶炉生长 GaP、InP 等单晶材料	71
§ 3.9	合成溶质扩散法(SSD 法)	73
第四章	半导体的激发与发光	76
§ 4.1	PN 结 及其特性	76
§ 4.1.1	理想的 PN 结	77
§ 4.1.2	实际的 PN 结	87
§ 4.2	注入载流子的复合	90
§ 4.2.1	复合的种类	90
§ 4.2.2	辐射型复合	91
§ 4.2.3	非辐射型复合	95
第五章	半导体发光材料	97
§ 5.1	砷化镓	98
§ 5.1.1	基本性质	98
§ 5.1.2	砷化镓的发光机理	99
§ 5.2	磷化镓	104

§ 5.2.1	基本性质	10
§ 5.2.2	磷化镓的发光机理	107
§ 5.3	氮化镓	119
§ 5.4	磷砷化镓	122
§ 5.5	镓铝砷	135
§ 5.6	其它发光材料	137
§ 5.6.1	其它 III-V 族固溶体	138
§ 5.6.2	碳化硅	139
§ 5.6.3	硫化锌、硒化锌	141
§ 5.7	半导体发光材料的比较	142
第 六 章	气相外延生长	147
§ 6.1	卤化物气相外延	147
§ 6.1.1	GaAsP 的氯化物体系外延生长	148
§ 6.1.2	氢化物法气相外延 GaAsP	150
§ 6.1.3	氢化物体系的热力学分析	156
§ 6.1.4	GaP 的气相外延	160
§ 6.1.5	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}$ 的气相外延生长	164
§ 6.1.6	氮化镓的气相外延	165
§ 6.2	金属有机物化学气相淀积(MOCVD)	167
§ 6.3	分子束外延(MBE)	171
§ 6.3.1	分子束外延的特点	171
§ 6.3.2	仪器设备和原理,原料的气化,外延动力学	172
第 七 章	液相外延生长	178
§ 7.1	液相外延(LPE)概论	178
§ 7.2	液相外延原理	181
§ 7.3	液相电外延	188
§ 7.4	电学及光学性能的控制	191
§ 7.5	表面形貌	194
§ 7.5.1	由于衬底不完整性造成的特征	195
§ 7.5.2	台阶面和波纹	195
§ 7.5.3	L 线、T 线和弯月线	196

§ 7.5.4 交叉影格线	199
§ 7.6 砷化镓的液相外延	200
§ 7.7 磷化镓的液相外延	202
§ 7.8 镓铝砷的液相外延	221
§ 7.9 碳化硅的液相外延	228
第八章 发光二极管制造技术	230
§ 8.1 材料	231
§ 8.2 光刻技术	232
§ 8.3 氮化硅生长	235
§ 8.4 扩散	236
§ 8.5 欧姆接触电极	240
§ 8.6 切割	243
§ 8.7 装架和键合	244
§ 8.8 封装	245
第九章 半导体发光器件设计	249
§ 9.1 电学设计	249
§ 9.2 热学设计	254
§ 9.3 光学设计	255
§ 9.4 视觉因素	258
§ 9.5 点发光器件	261
§ 9.6 简单组合器件	263
§ 9.7 字符显示器	264
§ 9.7.1 条段式的字符显示器	265
§ 9.7.2 矩阵字符显示器	268
§ 9.8 平板显示屏	272
第十章 半导体发光器件的应用	275
§ 10.1 发光二极管与光电子学	275
§ 10.2 发光二极管的驱动方法	276
§ 10.2.1 直流驱动	276
§ 10.2.2 交流驱动	277

§ 10.2.3	晶体管驱动电路	278
§ 10.2.4	集成电路驱动	279
§ 10.3	发光二极管单管的应用	280
§ 10.3.1	发光二极管的合理选用	281
§ 10.3.2	电平指示应用	283
§ 10.4	字符显示器的驱动和应用	286
§ 10.5	大型固体显示屏幕应用	288
§ 10.6	光电耦合器件及其应用	294
第十一章	光纤通信用半导体激光器	298
§ 11.1	镓铝砷半导体激光材料和器件	298
§ 11.2	镓铟砷磷材料和激光器	307
§ 11.2.1	二个自由度	308
§ 11.2.2	材料制备与特性	311
§ 11.2.3	长波长激光器	316
第十二章	光纤通信用的红外发光二极管	323
§ 12.1	短距离光纤通信用发光二极管	324
§ 12.1.1	单异质结 GaAlAs 发光二极管	324
§ 12.1.2	GaAs _{0.90} P _{0.10} 发光二极管	326
§ 12.1.3	双异质结 GaAlAs 发光二极管	327
§ 12.2	中距离光纤通信用的发光二极管	337
§ 12.2.1	1.5 μm 波长的发光二极管	337
§ 12.2.2	高速长波长发光二极管	338
§ 12.2.3	自体棱镜发光二极管	339
§ 12.2.4	波分复用发光二极管	341
§ 12.2.5	透明的四元系发光二极管	344
第十三章	半导体发光器件的可靠性	345
§ 13.1	发光器件可靠性的一些实验结果	345
§ 13.2	器件的寿命分析	347
§ 13.2.1	环氧系塑料的寿命分析	347
§ 13.2.2	管芯的寿命分析	350
§ 13.3	失效机理	352

§ 13.4 可靠性试验	357
§ 13.4.1 工艺筛选	358
§ 13.4.2 例行试验	359
第十四章 发光材料和器件测试	360
§ 14.1 发光材料测试	360
§ 14.1.1 检测外延层中缺陷的腐蚀方法	360
§ 14.1.2 外延层厚度的测定	362
§ 14.1.3 外延层电学性质的测定	362
§ 14.1.4 外延层光学性质的测定	365
§ 14.2 发光器件的效率	368
§ 14.2.1 发光效率	369
§ 14.2.2 功率效率	369
§ 14.2.3 量子效率	369
§ 14.3 电学参数	371
§ 14.3.1 伏安特性	371
§ 14.3.2 结电容	372
§ 14.3.3 响应特性	373
§ 14.4 光学参数	374
§ 14.4.1 色度学参数	374
§ 14.4.2 光度学参数	378
参考文献	383

第一章 光、光度学和色度学

人类的发展与火密切相关,起火技术不仅使人得以由吃野果、生肉转为吃熟食、热菜,生产上开始有刀耕、火种,而且还有一个很重要的方面是用作照明,使人类的活动范围和时间从受自然阳光的限制下获得解放而大为扩大,火也用以作为通信工具,中国古代的烽火就是一种发光信号,而在公元 283 年就用灯塔作为航标。随着科学技术的发展,由电能转变为光能技术的诞生,电灯的发明,电气、电工学、电光源的发展,使照明技术取得巨大进展。

另一方面,阴极射线管作为电→光信号的转换装置的代表而诞生,光电管的发明使光→电信号转换装置得以发展,透镜和滤光等光学系统技术和胶卷、磁性存贮材料等信息记录技术的发展,这些都是产生电影、传真、电视的前提。以后又发明了利用光的计算机输入装置和程序控制装置,它们在当今信息社会中完成很大部分的工作,在工业自动控制等方面发挥重大作用。

最近正在继续发展的半导体发光器件、激光器件、检出器件使信息显示技术、超大容量的光纤通信、超高速的光计算机、集成光学等新技术取得明显的进展。光学和电子学相结合的光电子学领域正在迅速开发,它对现代科学技术的发展起着巨大的推动作用。

§ 1.1 光的本质

光的本质是什么?这是一个难以用简单语句表述的问题。光的传播、干涉、衍射和偏振现象可以用波动学说解释,早在 1864 年麦克斯韦就提出了光是一电磁波的理论。而在考虑光和物质粒子相互作用的场合里,光就为具有粒子的性质了。例如,作为光电管机理的光电效应:当光照射到金属板上时,金属中的电子吸收光的能量而逸出金属板,当

然，一个电子从光吸收的能量的值是一定的。这个能量值为 $h\nu$, h (普朗克常数) $= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J/s}$, ν 称为光的振动频率，单位是 Hz。电子从光吸收的能量 $h\nu$ 不是分成许多次如每次为 0.1 或 0.01 $h\nu$ 吸收的，电子只是每次吸收一个 $h\nu$ 能量。电子吸收的能量大于此值，则逸出金属，小于此值则不逸出去。按照通常理解，在以极弱的光长时间地照射金属板时，由于金属板中的电子长时间地一点一点地吸收能量，金属板中的电子迟早会逸出金属。然而，事实并非如此，即 $h\nu$ 只和照射光的频率有关，当此频率达到电子能逸出的频率时，不管光如何弱，电子都会逸出。光的强弱与每秒钟内逸出的电子数有关，而与是否能逸出无关。就是说逸出电子的动能与光的强度无关，而简单地依赖于频率，即随频率线性增加。

为了解释这一现象，必须认为光波中的能量，即一份一份的 $h\nu$ 附于一个一个的粒子中，这种粒子就是光子，光线就是流动的光子。这就是光的波粒二象性。其实不仅光子具有这种二象性，组成物质的其它基本粒子(如电子，质子、中子等)也都具有波粒二象性。

光的波动性，是指光是一种电磁波。图 1-1 示出了各种不同波长的电磁波谱。从中可以看出，作为可见光来说，它只占极小的一部分。和其它电磁波一样，它也具有波长、频率、发射、吸收、传播速度等特性。电磁波能量的传播称为辐射，辐射在通过物质时一般不改变频率，速度则随物质而改变。在真空中，速度是一常数 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，在真空中的速度、频率和波长之间的关系为

$$c = \lambda \nu \quad (1.1)$$

λ 为波长。

电磁波包括电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 γ 射线、宇宙射线等。通常所谓的光就是指人眼所能感觉到的辐射，波长范围从 380 ~ 760 nm。

光的微粒性就是指光束是微粒流，发光体不断发射出微粒，微粒的运动速度就是光速，这些粒子就是光子，不同波长的光，具有不同的能量，即由不同能量的光子组成的。光子具有的能量 E 正比于光的频率：