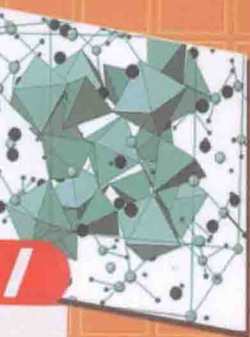


WLED

白光发光二极管制作技术

——由芯片至封装 (原著第二版)

刘如熹 主编 方志烈 审定



化学工业出版社

白光发光二极管制作技术

——由芯片至封装

(原著第二版)

刘如熹 主编

方志烈 审定



化学工业出版社

本书由中国台湾、香港地区以及日本等众多研发专家撰写,内容丰富、通俗易懂,涵盖发光二极管沉积与金属电极制作技术、封装材料(含荧光粉、胶材与散热衬底)及应用白光 LED 等相关知识。主要包括氮化物发光二极管沉积制作技术、高亮度 AlGaInP 四元化合物发光二极管沉积制作技术、发光二极管电极制作技术、紫外光及蓝光发光二极管激发的荧光粉介绍、氮及氮氧化物荧光粉制作技术、发光二极管封装材料介绍及趋势探讨、发光二极管封装衬底及散热技术、白光发光二极管封装与应用、高功率发光二极管封装技术及应用。

本书可供 LED 工程技术人员、大学高年级学生、LED 制造与照明设计的相关人员阅读使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

白光发光二极管制作技术: 由芯片至封装/刘如熹

主编. —北京: 化学工业出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-122-20536-0

I. ①白… II. ①刘… III. ①发光二极管—制作
IV. ①TN383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 083998 号

白光发光二极管制作技术——由晶粒金属化至封装, 第二版

作者: 刘如熹、许育宝、徐大正、丁逸圣、林群哲、解荣军、广崎尚登、黄振东、陈海英、肖国伟、苏宏元

ISBN 978-957-21-8707-4

本书中文简体字版由台湾全华图书股份有限公司独家授权, 仅限于中国大陆地区出版发行, 不含香港、澳门、台湾地区。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2014-2342

责任编辑: 吴 刚

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 边 涛

装帧设计: 全华科友

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 19% 字数 309 千字 2015 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 120.00 元

版权所有 违者必究



推 荐 序

Haitz 等人于 20 世纪末提出半导体将在照明领域完成继电子学之后的又一次革命，即半导体照明革命。

发光二极管的发明者 Holonyak 在 2000 年以“发光二极管是灯的最终形式吗？”为题发表文章，在作了详细的理论分析后，得出的结论是“原则上发光二极管是灯的最终形式，实际上也是如此，它的发展确实能够将所有功率和颜色都实现，了解这一点极为重要”。目前所有颜色的高亮度发光二极管都能生产，白光发光二极管的发光效率提高了二十多倍，实验室水平达到 276 lm/W，生产的最高水平达到 200 lm/W。实现半导体照明革命可以节省电费 1000 亿美元，节省相应的照明灯具 1000 亿美元，还可免去超过 125GW 的发电容量，节省开支 500 亿美元，合计节省 2500 亿美元，并可减少二氧化碳、二氧化硫等污染废气排放 3.5 亿吨。

我国自 2003 年启动国家半导体照明工程以来，经过十年的努力，年产值已达 2576 亿元，初具规模并形成了完整的产业链。涌现了一批年销量近亿元的企业和数家近 10 亿元的企业，涉及半导体照明的上市公司已有 70 余家。MOCVD 关键生产设备已有 1090 台，芯片国产化率达 75%，封装技术接近国际水平，照明等应用技术具有一定优势。全系列 LED 取代灯进入国内外市场，灯具发光效率达 80~120 lm/W。我国已成为全球 LED 封装和应用产品重要的生产和出口基地。

未来的五年，半导体照明产品将开始进入商用市场的成熟期和家用市场的黄金期，LED 照明产品的市场渗透率有望超过 85%。

发光二极管研发和生产都需要技术的引领，广大技术人员迫切需要了解和加深学习专业知识。中国台湾地区的 LED 产业无论是在研发还是生产方面，

都积累了许多先进的宝贵经验。我们感谢化学工业出版社组织出版本书，将中国台湾地区的成功经验介绍给广大工程技术人员。这对促进海峡两岸携手合作，推动这项节能环保的新兴科技和产业，对世界人类作出贡献，做了一件大好事。

本书由中国台湾、香港地区以及日本的众多研发专家合力撰写，包括外延技术、芯片制造、封装材料、封装技术及白光 LED 应用等相关内容。比较已出版的同类书籍，本书对荧光粉、胶材、衬底材料以及散热技术的论述尤为深入，相信从事半导体照明研发和生产的技术人员均可从中得到教益。

复旦大学

方志烈

前 言

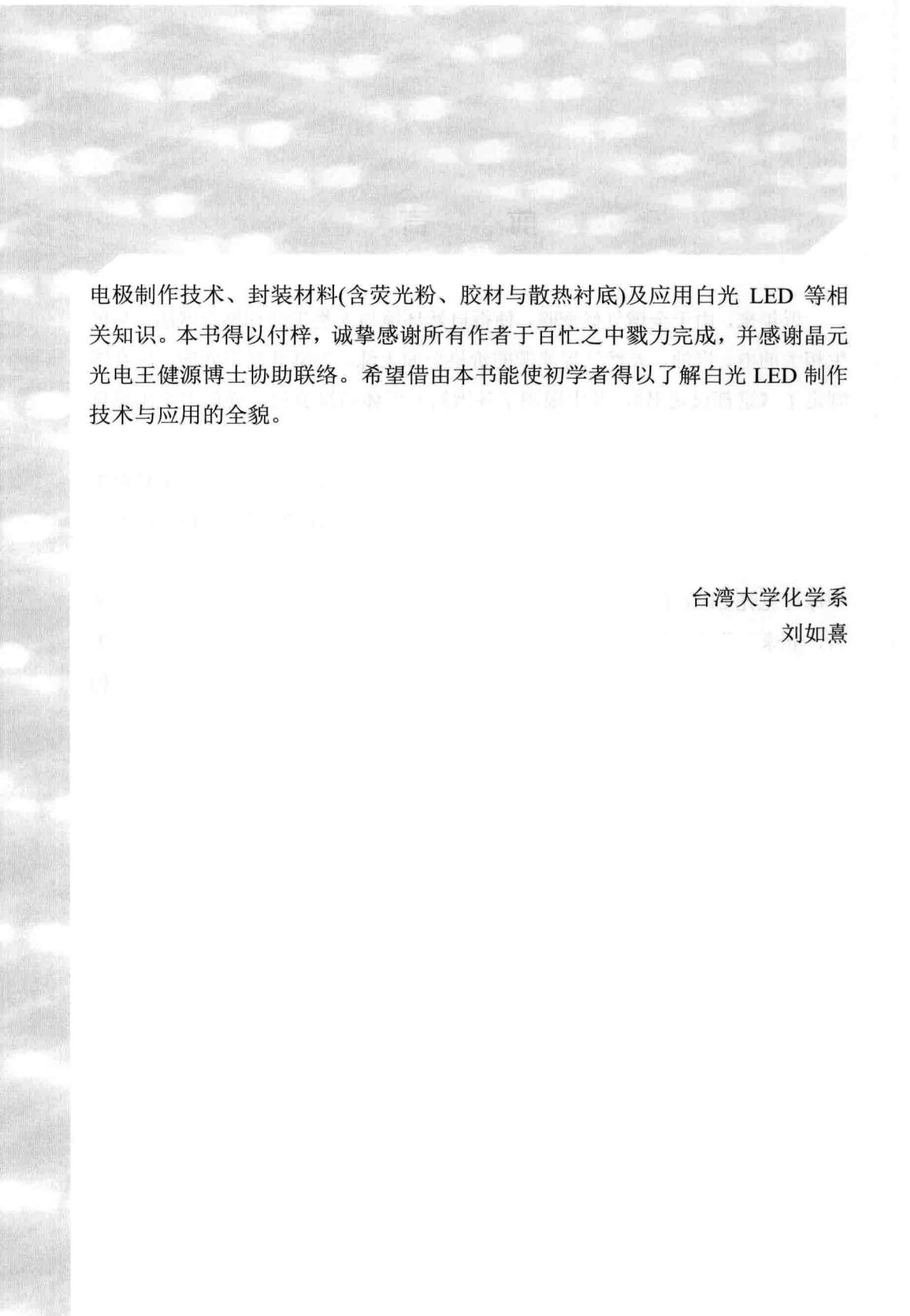
近年来,由于全球气候变暖,使得自然环境与人类生活均饱受威胁。与民生相关的电、汽油、天然气等能源的价格全面上涨。为降低温室效应,联合国制定了《京都议定书》,其中限制了各国温室气体的排放量,提倡“全民减排与节能”运动。

发光二极管(light emitting diode, LED)为中国台湾光电产业中最具竞争力的产品之一,台湾的光电产业发展至今所构建最完整的项目也首推 LED,由上游的外延片、中游的芯片至下游的封装,均有企业投入。台湾目前已成为全球可见光 LED 下游封装产品最大的供应中心,高亮度 LED 也已进入世界排名,全球竞争力大幅提升。目前,中国台湾的发光二极管产业仅次于日本、美国,排名世界第三。中国台湾 LED 中下游的芯片切割、封装和应用产业结构完整,上游外延片的研发及生产也在快速成长中,台湾地区具有成为全球第一大 LED 生产地的实力。

LED 依制作流程可分为上游、中游、下游与应用四步,上游为衬底单晶片与外延片的制造,中游为芯片,下游为 LED 产品的封装,应用层面是将 LED 产品运用于显示广告牌、指示灯或照明灯等产品上。中国台湾的企业初期由 LED 下游封装起家,逐步发展至中游的芯片,近几年更切入上游外延片的制造。

早期蓝光发光二极管受限于制作流程并无重大突破,直至 1994 年,日亚化学 Nakamura 等人成功生长出蓝光发光二极管,并搭配黄色铈掺杂的钇铝石榴石(cerium doped yttrium aluminum garnet, YAG:Ce),从而成功发展了白光 LED。其可应用于未来的照明领域,被视为自 1879 年爱迪生发明电灯泡以来,人类照明方式的另一次革命。

本书由中国台湾、香港地区及日本的众多研发专家撰写,包含沉积与金属



电极制作技术、封装材料(含荧光粉、胶材与散热衬底)及应用白光 LED 等相关知识。本书得以付梓,诚挚感谢所有作者于百忙之中戮力完成,并感谢晶元光电王健源博士协助联络。希望借由本书能使初学者得以了解白光 LED 制作技术与应用的全貌。

台湾大学化学系

刘如熹

目 录

第 1 章 氮化物发光二极管沉积制作技术

1.1 引言	2
1.2 MOCVD 的化学反应	4
1.3 衬底	5
1.3.1 蓝宝石 (Al_2O_3)	5
1.3.2 6H-碳化硅 (SiC)	6
1.3.3 硅衬底 (Si)	6
1.3.4 其他衬底	7
1.4 GaN 材料	7
1.5 P 型 GaN 材料	9
1.6 氮化镓/氮化镓 (InGaN/GaN) 材料	11
参考文献	24

第 2 章 高亮度 AlGaInP 四元化合物发光二极管沉积制作技术

2.1 引言	28
2.2 化合物半导体材料系统	28
2.3 AlGaInP 的外延生长	32
2.3.1 原料的选择	32
2.3.2 AlGaInP 的 MOCVD 外延生长条件	33
2.3.3 AlGaInP 系列 LED 外延生长中的 N 型和 P 型 掺杂	38
参考文献	40

第 3 章 发光二极管电极制作技术

3.1 引言	44
--------------	----

3.2 LED 芯片制程说明	46
3.2.1 常用制程技术简介	47
3.2.2 芯片前段制程	51
3.2.3 芯片后段制程	63
3.2.4 芯片检验方法	72
3.3 高功率 LED 芯片的制备工艺发展趋势	73
3.3.1 高功率 LED 芯片的发展方向	73
3.3.2 高功率 LED 芯片的散热考虑	76
参考文献	80

第 4 章 紫外线及蓝光发光二极管激发的荧光粉介绍

4.1 引言	82
4.2 荧光材料的组成	82
4.3 影响荧光材料发光效率的因素与定律	85
4.3.1 主体晶格效应	85
4.3.2 浓度淬灭效应	86
4.3.3 热淬灭	86
4.3.4 斯托克斯位移与卡萨定律	87
4.3.5 法兰克-康顿原理	88
4.3.6 能量传递	90
4.4 荧光粉种类概述	91
4.4.1 铝酸盐系列荧光粉	91
4.4.2 硅酸盐系列荧光粉	95
4.4.3 磷酸盐系列荧光粉	100
4.4.4 含硫系列荧光粉	107
4.4.5 其他 LED 用的荧光粉	112
参考文献	114

第5章 氮及氮氧化物荧光粉制作技术

5.1	引言	118
5.2	氮化物的分类和结晶化学	120
5.2.1	氮化物的分类	120
5.2.2	氮化物的结晶化学	121
5.3	氮氧化物/氮化物荧光粉的晶体结构和发光特性	122
5.3.1	氮氧化物蓝色荧光粉	122
5.3.2	氮氧化物绿色荧光粉	129
5.3.3	氮氧化物黄色荧光粉	135
5.3.4	氮化物红色荧光粉	137
5.4	氮氧化物/氮化物荧光粉的合成	142
5.4.1	高压氮气热烧结法	142
5.4.2	气体还原氮化法	143
5.4.3	碳热还原氮化法	145
5.4.4	其他方法	146
5.5	氮氧化物/氮化物荧光粉在白光 LED 中的应用	147
5.5.1	蓝色 LED+ α -赛隆黄色荧光粉	147
5.5.2	蓝色 LED+绿色荧光粉+红色荧光粉	148
5.5.3	近紫外 LED+蓝色荧光粉+绿色荧光粉+红色荧光粉	149
	参考文献	150

第6章 发光二极管封装材料介绍及趋势探讨

6.1	引言	156
6.2	LED 封装方式介绍	157
6.2.1	灌注式封装	157

6.2.2 低压移送成型封装	160
6.2.3 其他封装方式	165
6.3 环氧树脂封装材料介绍	165
6.3.1 液态封装材料	167
6.3.2 固体环氧树脂封装材料介绍	173
6.4 环氧树脂封装材料特性说明	174
6.5 环氧树脂紫外线老化问题	179
6.6 硅胶封装材料	180
6.7 LED 用封装材料发展趋势	183
6.8 环氧树脂封装材料紫外线老化改善	184
6.9 封装材料散热设计	188
6.10 无铅焊锡封装材料耐热性要求	189
6.11 高折射率封装材料	190
6.12 硅胶封装材料发展	191
参考文献	192

第 7 章 发光二极管封装衬底及散热技术

7.1 引言	194
7.2 LED 封装的热管理挑战	194
7.3 常见 LED 封装衬底材料	197
7.3.1 印刷电路衬底	200
7.3.2 金属芯印刷电路衬底	201
7.3.3 陶瓷衬底	205
7.3.4 直接铜键合衬底	206
7.4 先进 LED 复合衬底材料	208
7.5 LED 散热技术	212

7.5.1 散热片	213
7.5.2 热管	220
7.5.3 平板热管	224
7.5.4 回路热管	225
参考文献	227

第 8 章 白光发光二极管封装与应用

8.1 白光 LED 的应用前景	230
8.1.1 特殊场所的应用	231
8.1.2 交通工具中应用	232
8.1.3 公共场所照明	234
8.1.4 家庭用灯	236
8.2 白光 LED 的挑战	237
8.2.1 白光 LED 效率的提高	237
8.2.2 高显色指数的白光 LED	238
8.2.3 大功率白光 LED 的散热解决方案	239
8.2.4 光学设计	239
8.2.5 电学设计	239
8.3 白光 LED 的光学和散热设计的解决方案	240
8.3.1 LED 封装的光学设计	241
8.3.2 散热的解决	244
8.3.3 硅胶材料对于光学设计和热管理的重要性	247
8.4 白光 LED 的封装流程及封装形式	250
8.4.1 直插式小功率草帽型白光 LED 的封装流程	250
8.4.2 功率型白光 LED 的封装流程	251
8.5 白光 LED 封装类型	253
8.5.1 引脚式封装	253

8.5.2	数码管式的封装	254
8.5.3	表面贴装封装	255
8.5.4	功率型封装	256
8.6	超大功率大模组的解决方案	259
8.6.1	传统正装芯片实现的模组	259
8.6.2	用单电极芯片实现的模组	260
8.6.3	用倒装焊接方法实现的模组	260
8.6.4	封装合格率的提升	261
8.6.5	散热的优势	262
8.6.6	封装流程的简化	262
8.6.7	长期使用可靠性的提高	263
	参考文献	264

第9章 高功率发光二极管封装技术及应用

9.1	高功率 LED 封装技术现况及应用	266
9.1.1	单颗 LED 芯片的封装器件产品	267
9.1.2	多颗 LED 芯片封装模组	276
9.2	高功率 LED 光学封装技术探析	282
9.2.1	LED 的光学设计	282
9.2.2	白光 LED 的色彩封装技术	284
9.2.3	LED 用透明封装材料现况	285
9.2.4	LED 用透明封装材料发展趋势	290
9.3	高功率 LED 散热封装技术探析	294
9.3.1	LED 整体散热能力的评估	295
9.3.2	散热设计	298
	参考文献	304

第 1 章

氮化物发光二极管沉积制作技术

1.1

引言

1.2

MOCVD 的化学反应

1.3

衬底

1.4

GaN 材料

1.5

P 型 GaN 材料

1.6

氮化铟镓 / 氮化镓 (InGaN/GaN) 材料



1.1 引言

自 1962 年至今,发光二极管已广泛用于各种电器产品的显示应用上。因发光二极管的亮度不断地提升,加上蓝、绿光与紫外线发光二极管研发成功,使发光二极管的应用层面愈来愈广,带来无限的商机。发光二极管主要应用于车用市场,大、中、小尺寸液晶面板背光源和照明设备等三大领域。其中,氮化物(GaN-based)系列具有宽直接带隙(direct band gap),波长可从紫外线至红外线,涵盖整个可见光区(图 1-1),但是由于缺乏适合的衬底,很难生长出高质量的氮化物薄膜。直到 1971 年 Pankove^[1]实验室第一个制造出氮化物系列的发光二极管。然而,由于一直无法找到晶格常数匹配的衬底和无法得到高质量的 P 型氮化镓,使得在 1984 年之前氮化物系列的发光二极管研究无法有所突破。1986 年 Amano^[2]研究团队以金属有机物化学气相沉积法,于低温外延生长一层薄的氮化铝缓冲层以减少缺陷密度,再于高温生长氮化镓层。利用此方法可以得到像镜面的薄膜。1989 年 Amano^[4]研究团队首先利用低能量电子束(low-energy electron-beam irradiation, LEEBI)照射掺杂 Mg 的氮化镓得到 P 型氮化镓,利用此技术可使掺杂浓度达约 10^{17} cm^{-3} 和电阻率约 $12 \Omega \cdot \text{cm}$ 。1991 年日亚公司中村修二(Nakamura)^[3]改用低温的氮化镓缓冲层,也可得到高质量且像镜面的薄膜。Nakamura^[5]研究团队发现只要利用在高温和氮气的环境中,即可得低阻值的 P 型氮化镓,至此如何得到 P 型氮化镓的问题也获得解决。如图 1-2 所示,自从 1994 年 Nakamura 研制出高亮度蓝光 LED 之后,氮化物近二十年发展迅速,日本日亚公司在 2006 年已经研制出亮度为 133 lm/W 的发光二极管,在 2008 年更将其亮度推到 249 lm/W ,因此本文着重于对氮化镓系列材料研究做系统性的介绍。

目前主要有三种方式生长氮化物系列材料:氢化物气相外延法(hydride vapor-phase epitaxy, HVPE),分子束外延法(molecular-beam epitaxy, MBE)和金属有机物化学气相沉积法(metalorganic chemical vapor deposition, MOCVD)。在业界最主要的方式是 MOCVD 外延生长高质量的氮化物系列材料,其中采用的 III A 族有机金属包括:三甲基镓(trimethyl-gallium, TMGa)、三甲基铝(trimethyl-aluminum, TMAI)、三甲基铟(trimethyl-indium, TMIIn)和三乙基镓(triethyl-gallium, TEGa)。另外,VA 族及掺杂物分别通入氨气(NH_3)提供氮

原子而硅烷 (SiH_4)、二茂镁 (CP_2Mg) 则提供 N 型氮化镓和 P 型氮化镓的掺杂剂, 所以本文特别叙述此种沉积法。

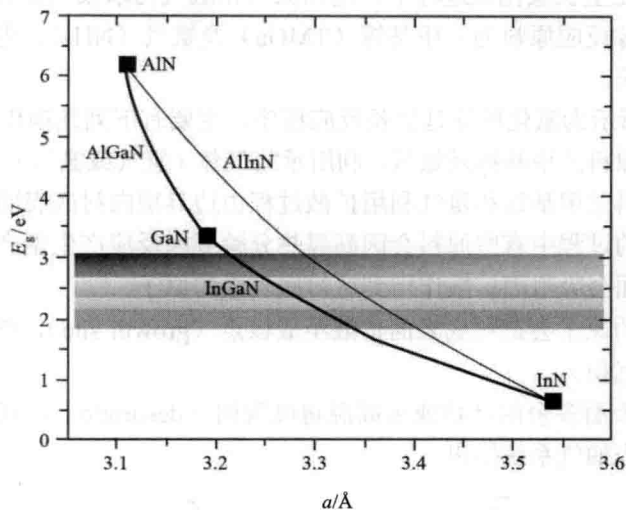


图 1-1 带隙与晶格常数的关系

($1\text{\AA}=10^{-10}\text{m}$, 后同)

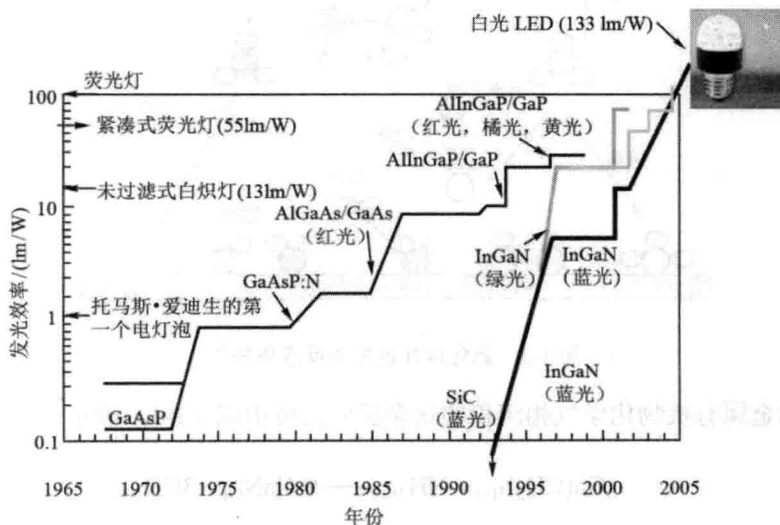


图 1-2 发光二极管的进展 (数据源: UCSB, Nakamura 实验室)



1.2 MOCVD 的化学反应

MOCVD 在生长氮化镓过程中，是以氮气和氢气为承载气体将反应原料带进反应腔，氮化镓反应原料为三甲基镓（TMGa）及氨气（ NH_3 ），借以在高温环境下进行化学反应。

如图 1-3 所示为氮化镓外延生长反应程序，主要有下列几项步骤。

- ①将反应原料三甲基镓及氨气，利用承载气体（氢气或氮气）带至反应腔中。
- ②反应原料三甲基镓和氨气利用扩散过程由边界层向衬底表面输送。
- ③在扩散的过程中有些原料会因高温热分解或因反应产生副产物。
- ④衬底表面会吸附因扩散作用到达衬底表面的原子。
- ⑤被吸附的原子会在衬底表面扩散至成核点（growth site），参与表面化学反应，形成薄膜沉积。
- ⑥在衬底表面多余的产物或因高温再度脱附（desorption），通过传输边界层进入主气流，由抽气系统排出。

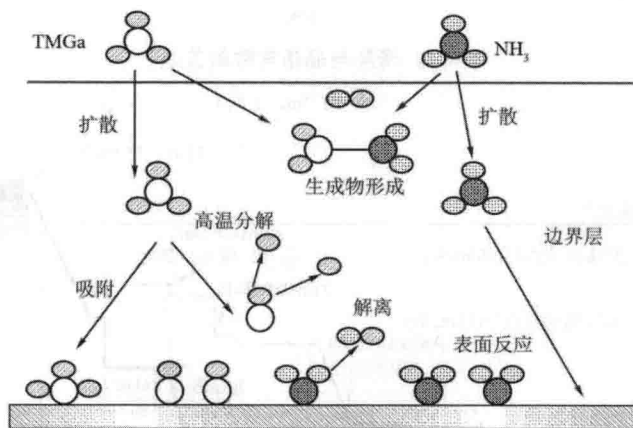


图 1-3 氮化镓外延生长反应程序^[6]

基本金属有机物化学气相沉积的化学反应式可由式（1-1）表示：



式中，v 代表气相；s 代表固相。

事实上，详细的化学反应目前仍然未知。DenBaar^[6]在 1986 年发表可能的反