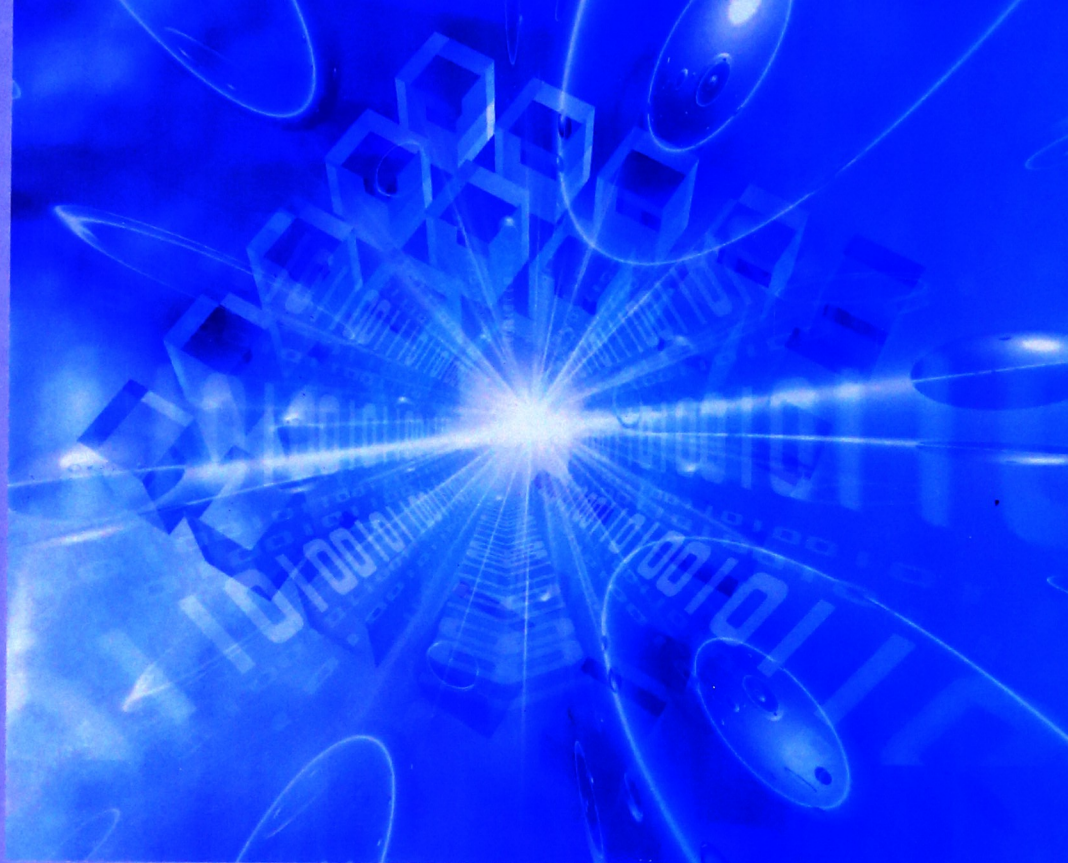




衬底基片超精密加工技术

周 海 编著



科学出版社

江苏省自然科学基金项目资助
江苏省“六大人才高峰”项目资助
盐城工学院学术专著出版基金资助

衬底基片超精密加工技术

周 海 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

近年来光电子材料超精密加工技术获得飞速发展。本书全面系统地讲述了光电子领域重要衬底材料——蓝宝石衬底基片的超精密加工技术。内容包括：蓝宝石晶体生长技术、蓝宝石晶体切片技术、蓝宝石衬底基片倒角技术、衬底基片精密研磨技术、衬底基片精密抛光技术、衬底基片净化技术、衬底基片检测技术。本书详细介绍了蓝宝石衬底基片从晶体生长到可用于外延生长的衬底基片的工艺全过程。本书不仅阐述了蓝宝石衬底基片的超精密加工基本原理，而且结合具体加工设备，分析了蓝宝石衬底基片超精密加工工艺参数，同时介绍了国内外最新的发展和成就。

本书是一部全面、系统地介绍衬底基片超精密加工技术研究成果的专著，总结了作者二十多年来在该领域的研究成果。

本书可供精密和超精密加工技术与装备的研究人员、光电子产品开发人员、高等学校机械设计制造与自动化专业本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

衬底基片超精密加工技术 / 周海编著. —北京：科学出版社，2014.11

ISBN 978-7-03-039281-7

I. ①衬… II. ①周… III. ①发光二极管—生产工艺 IV. ①TN383.05

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 289839 号

责任编辑：邓 静 / 责任校对：蒋 萍
责任印制：徐晓晨 / 封面设计：迷底书装

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014 年 11 月第 一 版 开本：720×1 000 B5

2014 年 11 月第一次印刷 印张：11 1/2

字数：221 000

定价：58.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

随着发光二极管(LED)的问世,全球正在进行一场半导体照明革命。在同样亮度下,LED灯耗电仅为普通白炽灯的1/10,而寿命却是白炽灯的100多倍,同时它具有免维护、环保等优点。目前高亮度LED已经广泛用于手机的背光源、彩色电视、显示屏、汽车车灯、交通信号灯等领域,其正在逐渐代替白炽灯和荧光灯,并将主导照明市场。

用于制造发光二极管的氮化镓薄膜,目前主要采用金属有机物化学气相沉积工艺在蓝宝石、碳化硅等衬底基片上生长,该工艺要求衬底基片晶格完整、表面无损伤层、无晶向偏差、纳米级表面粗糙度。由于蓝宝石、碳化硅等衬底基片属于硬度高、脆性大的材料,对其进行机械加工已经十分困难,表面晶格完整的纳米级超精密加工和检测技术更为复杂,它涉及机械学科、材料学科和化学工程学科等多个学科。鉴于当前国内尚缺少这方面的科技书籍,实际需求又很迫切,因此,出版衬底基片超精密加工技术方面的科技著作十分必要。作者结合多年来对衬底基片的研究经验,并综合国内外这一领域的研究成果编写了此书。希望此书的出版能够有助于提高我国衬底基片的超精密加工技术水平和光电子材料的应用水平。

本书共8章。第1章介绍LED与衬底基片,第2章介绍蓝宝石晶体的生长技术,第3章介绍蓝宝石晶体的切片技术,第4章介绍蓝宝石衬底基片的倒角技术,第5章介绍蓝宝石衬底基片的研磨技术,第6章介绍蓝宝石衬底基片的抛光技术,第7章介绍蓝宝石衬底基片的净化技术,第8章介绍衬底基片的质量检测技术。

本书以蓝宝石衬底基片为主,反映衬底基片超精密加工的基本内容和最新进展。书中的部分内容和插图引自公开发表的文献和仪器设备的使用说明书。在此对原作者和单位表示衷心感谢。

本书编写过程中得到作者所在单位盐城工学院和出版单位的大力支持,得到江苏省自然科学基金项目、江苏省高校科研成果产业化推进项目、江苏省产学研前瞻性创新资金项目、江苏省高校国际科技合作聘专重点项目、江苏省“青蓝工程”项目、江苏省“六大人才高峰”项目、江苏省新型环保重点实验室开放课题项目、江苏省生态环境材料重点建设实验室开放项目的资助,在此表示衷心感谢。

本书编写过程中,曾得到很多同志的关心和帮助,特别是黄传锦博士、陈西府博士、王正刚教授、吴乃领副教授、刘德仿教授、葛友华教授、杭寅教授、王斌博士、张本国博士等,以及白立刚、卓志国、徐晓明、臧跃、高翔、张圆、冯欢、高鹏、崔志翔、王黛萍、周鹏飞等的大力支持。在此,一并向所有对相关项目研究和本书编写出版过程中给予关心、支持和帮助的人表示诚挚的谢意。

由于光电子材料的超精密加工技术发展迅速，加之作者水平有限，书中欠妥之处在所难免，真诚希望同行专家、广大读者批评指正。来信请寄盐城工学院机械工程学院（邮编 224051），或发电子邮件至 zhouhai@ycit.cn。

周 海

2013 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 LED 与衬底基片	1
1.1 LED 概述	1
1.1.1 LED 的发展历程	1
1.1.2 LED 的原理和特点	1
1.1.3 LED 的特点	2
1.2 LED 应用	3
1.2.1 普通照明领域	3
1.2.2 背光照明领域	3
1.2.3 道路交通领域	4
1.2.4 其他领域	4
1.3 LED 制备工艺	5
1.4 LED 对衬底基片的要求	6
1.5 衬底材料的性能	7
1.5.1 蓝宝石	7
1.5.2 碳化硅	9
1.5.3 氧化锌	11
1.5.4 硅	13
1.5.5 常见衬底基片材料性质的对比	15
第 2 章 蓝宝石晶体的生长技术	16
2.1 提拉法	16
2.1.1 提拉法简介	16
2.1.2 提拉法晶体生长装置	17
2.1.3 提拉法晶体生长过程	18
2.1.4 提拉法晶体生长工艺参数	21
2.2 泡生法	23
2.2.1 泡生法简介	23
2.2.2 泡生法晶体生长装置	24

2.2.3	泡生法晶体生长工艺过程	25
2.2.4	泡生法生长工艺参数	26
2.3	温梯法	27
2.3.1	温度梯度法简介	27
2.3.2	温度梯度法晶体生长的特点	27
2.3.3	温度梯度法蓝宝石晶体生长工艺	28
2.4	焰熔法	29
第 3 章	蓝宝石晶体的切片技术	30
3.1	晶体切片的目的和工艺	30
3.1.1	晶体切片的目的	30
3.1.2	蓝宝石晶体的切片工艺流程	31
3.2	晶体的定向技术	33
3.2.1	蓝宝石晶向	33
3.2.2	晶体定向	34
3.3	晶体的切片技术	35
第 4 章	蓝宝石衬底基片的倒角技术	45
4.1	衬底基片对倒角的要求	45
4.2	衬底基片的倒角原理和设备	46
4.3	衬底基片的倒角工艺参数	49
第 5 章	蓝宝石衬底基片的研磨技术	51
5.1	衬底基片对研磨的要求	51
5.2	衬底基片的研磨设备	52
5.2.1	双面研磨设备	53
5.2.2	单面研磨设备	59
5.3	衬底基片的研磨工艺	69
5.3.1	研磨工艺流程	69
5.3.2	研磨中各工艺参数对研磨结果的影响	75
5.3.3	研磨前后衬底基片的对比	79
5.4	研磨的运动轨迹分析	81
5.4.1	研磨轨迹的介绍	82
5.4.2	双面研磨运动轨迹分析	82
5.4.3	单面研磨运动轨迹分析	90

5.5	研磨液的配制.....	93
5.5.1	研磨液的作用	93
5.5.2	双面研磨中研磨液的组成.....	93
5.5.3	单面研磨中研磨液的组成.....	94
第 6 章	蓝宝石衬底基片的抛光技术	97
6.1	衬底基片的抛光目的	97
6.2	衬底基片的抛光方法	97
6.2.1	以机械作用为主的抛光方法	98
6.2.2	以化学作用为主的抛光方法	99
6.2.3	化学与机械作用相互作用的抛光方法	100
6.3	化学机械抛光原理.....	101
6.3.1	化学机械抛光原理	101
6.3.2	化学机械抛光机理	102
6.4	化学机械抛光设备.....	103
6.4.1	化学机械抛光设备的工作原理	103
6.4.2	化学机械抛光设备的组成结构	105
6.4.3	化学机械抛光设备的关键零部件分析	106
6.4.4	化学机械抛光设备的操作要领	111
6.5	化学机械抛光工艺.....	112
6.5.1	抛光工艺流程	112
6.5.2	抛光工艺参数对抛光效果的影响	114
6.5.3	抛光后衬底基片表面形貌.....	118
6.6	抛光液的配制.....	121
6.6.1	磨料	121
6.6.2	pH 调节剂	121
6.6.3	氧化剂	122
6.6.4	分散剂	122
6.6.5	表面活性剂	122
6.6.6	抛光液的配制	123
6.7	抛光垫的种类和选择	124
6.7.1	抛光垫的作用	124
6.7.2	抛光垫的种类	124
6.7.3	抛光垫的性能	126
6.7.4	抛光垫的选择	127

6.7.5 抛光垫的修整	127
第 7 章 蓝宝石衬底基片的净化技术	130
7.1 衬底基片的净化目的	130
7.2 衬底基片表面杂质的来源和分类	130
7.2.1 衬底基片表面杂质的来源	130
7.2.2 衬底基片表面杂质的分类	131
7.3 衬底基片净化机理	132
7.3.1 蓝宝石衬底基片的表面洁净度要求	132
7.3.2 吸附理论	133
7.3.3 净化原理	134
7.4 衬底基片净化工艺	134
7.4.1 物理方法净化	134
7.4.2 化学方法净化	135
7.4.3 蓝宝石衬底基片净化工艺	137
7.5 衬底基片净化设备	141
7.5.1 超声净化原理	141
7.5.2 超声波清洗机	141
7.6 衬底基片净化环境	146
第 8 章 衬底基片的质量检测技术	149
8.1 衬底基片的质量指标	149
8.1.1 晶体生长质量检测指标	149
8.1.2 几何参数类质量检测指标	150
8.1.3 表面缺陷类质量检测指标	152
8.2 衬底基片的检测方法 with 检测设备	153
8.2.1 检测方法	153
8.2.2 检测设备	154
8.3 典型衬底基片技术参数与检测结果	156
8.3.1 典型的衬底基片技术参数	156
8.3.2 典型的衬底基片检测结果	157
附录	160
参考文献	167

第 1 章 LED 与衬底基片

1.1 LED 概述

1.1.1 LED 的发展历程

LED(Light Emitting Diode, 发光二极管)是一种会发光的半导体组件, 它可以直接把电能转化为光能。

早在 1907 年, 人类就发现将半导体材料通电后可以发光。1962 年, Nick Holonyak 及其所在的通用电气团队发明了第一只真正商用的发光二极管。早期 LED 所用的材料为 GaAsP, 发红光($\lambda_p=650\text{nm}$), 在驱动电流 20mA 时, 光通量只有千分之几流明, 发光效率(简称光效)只有 0.11 lm/W, 只能用做指示灯。20 世纪 70 年代, 随着人们对半导体材料研究的不断深入, 引入了 In 和 P, 使 LED 产生绿光($\lambda_p=555\text{nm}$)、黄光($\lambda_p=590\text{nm}$)和橙光($\lambda_p=610\text{nm}$), 光效提高到 1 lm/W, LED 应用进入显示领域。80 年代, 出现了 GaAlAs 的 LED, 其封装技术也逐步提高, 红色、黄色 LED 光效可达 10 lm/W。90 年代, 随着发红光、黄光的 GaAlInP 和发绿光、蓝光的 GaInN 两种新材料相继开发成功, LED 光效得到大幅度提高。表 1-1 列出了 LED 的发展情况。

表 1-1 LED 发展情况

时间	LED 的颜色	LED 的光效/(lm/W)
1962 年	红色	0.1
20 世纪 70 年代	绿色	1
20 世纪 80 年代	红色、黄色	10
20 世纪 90 年代	绿色、蓝色	20
	全色	10
2000 年	绿色、蓝色	20
	全色	10
2010 年	橙、红色	120

1.1.2 LED 的原理和特点

如图 1-1 所示为典型 LED 的基本构造图, LED 的核心是一个半导体晶片, 晶片的一端附着在一个支架上, 连接电源的负极; 另一端连接电源的正极。整个晶片被封装(用环氧树脂材料)起来。半导体晶片由两部分组成, 一部分是 p 型半导体, 在

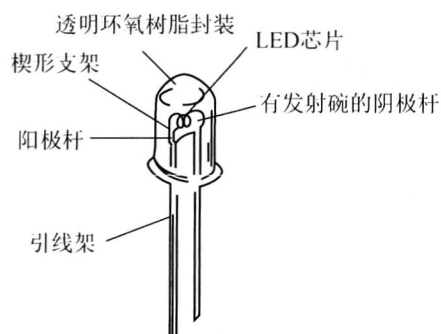


图 1-1 典型 LED 的基本构造图

它里面空穴占主导地位；另一端是 n 型半导体，在这边主要是电子。但当这两种半导体连接起来时，它们之间就形成一个 p-n 结。当电流通过导线作用于这个晶片时，由于电流注入产生的少数载流子是不稳定的，对于 p-n 结系统，注入到价带中的非平衡空穴要与导带中的电子复合，其中多余的能量将以光的形式向外辐射，这就是 LED 发光的原理。光的颜色由光的波长决定，而光的波长是由形成 p-n 结材料决定的。对于 GaAs、GaAsP、GaN 等半导体材料，其禁带宽度对应的

发光波长正好处于 380~780nm 的可见光区域，从而为 LED 的发展与应用开辟了广阔的空间。

1.1.3 LED 的特点

1. LED 优点

LED 的内在特征，决定了它具有以下优点。

1) 体积小、重量轻

LED 是被环氧树脂封装起来的一块面积很小 (0.01mm^2 左右) 的半导体晶片，所以，它具有体积非常小、重量非常轻的特点。

2) 能耗低

LED 直流驱动，电光功率转换接近 30%。LED 的一般工作电压是 2~3.6V，工作电流是 0.02~0.03A，LED 消耗的电能不超过 0.1W。在相同照明效果下，LED 比传统光源节能 80% 左右。

3) 寿命长

LED 为固体冷光源，环氧树脂封装，灯体内也没有松动的部分，不存在灯丝发光易烧、热沉积、光衰等缺点，使用寿命可达 $1 \times 10^6\text{h}$ ，是传统光源寿命的 100 倍，所以 LED 被称为长寿灯。

4) 发热量低

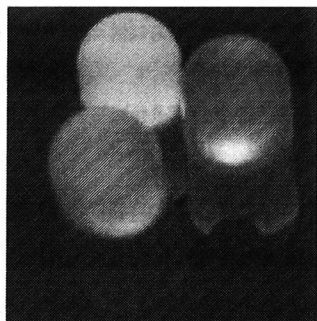
LED 使用冷发光技术，发热量比普通照明灯具低很多。

5) 环保

LED 基本上是由无毒材料制成的，不像荧光灯含水银会造成污染。光谱中没有紫外线和红外线，没有辐射，眩光小，冷光源，可以安全触摸，属于典型的绿色照明光源。

6) 色彩变幻多

在计算机技术控制下, LED 光源可利用红、绿、蓝三基色原理, 使三种颜色具有 256 级灰度并任意混合, 可产生 $256 \times 256 \times 256 = 16777216$ 种颜色, 形成不同光色的组合, 实现丰富多彩的动态变化效果, 如图 1-2 所示。



2. LED 缺点

(1) 通常要将多个 LED 模集成在线路板上, 形成一个比较大的发光源, 由此会造成大量热量积累, 所以 LED 灯具的散热一定要好。

(2) LED 白光形成主要是靠 450~455nm 波长蓝光激发荧光粉, 蓝光杀伤人眼活性细胞的能力是绿光的 10 倍。所以 LED 灯具在使用过程中会使人产生头晕眼花、不舒服的感觉, 长期使用会伤害眼睛, 导致患眼病的概率会有所提高。

图 1-2 多彩的LED灯

1.2 LED 应用

1.2.1 普通照明领域

对于 LED 的应用, 其在普通照明领域的广泛普及是人们最期待的。目前, 照明 LED 的应用主要限于局部照明、装饰照明、轮廓照明等方面, 而人们迫切希望 LED 成为新一代普通照明光源。虽然现在 LED 在电光转换效率和价格方面尚不能与荧光灯相比, 但其光效提高速度惊人, 且随着 LED 技术的不断提高和生产规模的扩大, 其价格也会显著下降。只要突破了价格的临界点, LED 照明市场将会骤然放大。

中国绿色照明工程促进项目办公室进行过调查, 我国照明用电每年在 3×10^{12} 度以上, 如果使用 LED 取代全部白炽灯或部分取代荧光灯, 那么每年将节省 1/3 的照明用电, 约 1×10^{12} 度, 相当于三峡工程全年的发电量。这对能源十分紧张的我国来说, 无疑具有十分重要的战略意义。

1.2.2 背光照明领域

目前在 LED 的各种应用中, 其用于手机等小型液晶屏幕的背光源市场需求量最大。在手机上到处可以见到 LED 的应用, 如液晶屏的背光源、按键照明、收到信号时的发光提示、照相机闪光灯等, 甚至一部手机中安装了多达 20 个 LED。省电、小巧的 LED 有助于延长手机的通话时间, 并有利于手机小型化。

作为中大型液晶背景光源,现在一般采用冷阴极灯管,但其作为面光源,使用不够灵活,成本偏高,有污染。由于 LED 不含汞等污染物质,所以 LED 在汽车导航、电脑显示器等中大型液晶背光源领域有广阔的发展前景。目前使用 LED 作背光源的高显色性、高清晰画质的大屏幕液晶电视已完全实现商品化。

1.2.3 道路交通领域

LED 在道路交通领域的应用主要为交通信号灯。与传统白炽灯的信号灯相比,LED 信号灯的能效提高显著,如车辆用信号灯功率由 75W 降至 15W,节能约 80%;行人用信号灯由 60W 降至 15W 以下,节能 75%以上。1987 年,高亮度红色 LED 首次作为中心高位刹车灯光源安装在汽车上,随后 LED 在汽车上获得广泛使用,LED 车灯的主要优点为响应时间短、识别性强、能耗低、寿命长。最近,LED 开始用于轻轨车厢内部照明,薄形的 LED 灯具很符合车厢内的照明要求。

1.2.4 其他领域

1. 农业

太阳光中有紫外到红外多种波长的光辐射,而植物光合作用并不需要所有波长的光。用 LED 产生利于植物生长发育的特定波长的光,并在恰当的时间照射植物,可提高植物培育效率,并且 LED 与白炽灯不同,它没有热辐射,不会灼伤嫩叶。

2. 渔业

在捕鱼作业中,可以使用 LED 诱鱼灯。已经研制成功的蓝光 LED 诱鱼灯,主波长(450~500nm)在海里的光强衰减小,非常接近乌贼类鱼的视觉灵敏波长范围(470~490nm)。

3. 通信

LED 在光通信领域的发展也备受关注。若配以恰当的驱动电路,LED 就能应用于 $100\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高速数字通信中,可组建家庭信息局域网;而在欧洲使用 LED 的光通信车载 LAN 已在奔驰等多款汽车中应用。

4. 野外作业、军事行动

由于 LED 光源具有抗振性、耐候性、密封性好,以及热辐射低、体积小、便于携带等特点,可广泛应用于防爆、野外作业、矿山、军事行动等特殊工作场所或恶劣工作环境之中。

1.3 LED 制备工艺

LED 制备可以分为三个主要环节：外延片的生长、芯片制备和二极管封装。

其中，LED 芯片制作流程与一般半导体器件的制造工艺相似。如图 1-3 所示为 LED 芯片的制作工艺流程图。

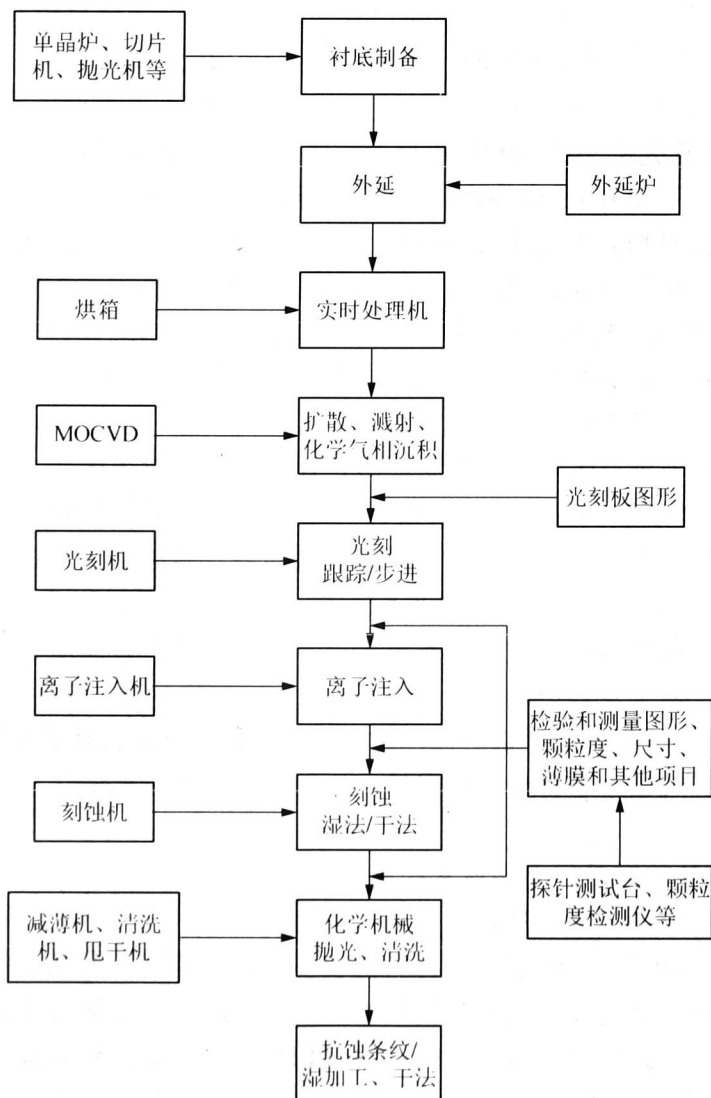


图 1-3 LED 芯片的制作工艺流程图

LED 芯片制作工艺大致可以分为四个步骤。第一，在衬底基片上生长氮化镓 (GaN) 基片，这个过程主要是在金属有机物化学气相沉积 (Metalorganic Chemical

Vapor Deposition, MOCVD) 外延炉中完成的; 第二, 加工用于 p-n 结的两个电极; 第三, 对外延片进行减薄、划片; 第四, 对外延片进行测试和分选; 从而制备出所需要的 LED 芯片。

在整个 LED 产业链中, 外延片生长投资要占到总投资的 80% 左右, 外延片成本要占到 LED 总成本的 70% 左右, 同时外延片生长技术是业界公认的核心, 也是我国目前技术最薄弱的环节。简单地讲, 外延片的水平决定了整个 LED 产业水平。

1.4 LED 对衬底基片的要求

由于制造发光二极管的外延片(主要是氮化镓薄膜), 是生长在蓝宝石($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)、碳化硅(SiC)、硅(Si)、氧化锌(ZnO)等衬底基片上的, 这些衬底基片的材质和质量直接影响其上氮化镓薄膜生长质量, 如果衬底基片的质量稍差, 会使制造出来的发光二极管发光性能低劣, 甚至做不出管子。目前氮化镓薄膜生长主要采用 MOCVD 工艺在衬底基片上生长, 该工艺要求衬底基片表面超光滑、无损伤。通常超光滑表面是指表面粗糙度小于 1nm(RMS) 的表面; 无损伤表面是指加工表面不能有加工变质层, 且表面晶格完整。

在选择适合外延片生长的衬底材料时, 通常要考虑以下因素。

(1) 衬底与外延膜的结构匹配程度。外延材料与衬底材料的晶体结构相同或相近、晶格常数失配小, 这样外延材料的结晶性能好、缺陷密度低。

(2) 衬底与外延膜的热膨胀系数匹配程度。热膨胀系数的匹配非常重要, 如果外延膜与衬底材料在热膨胀系数上相差过大, 不仅可能使外延膜质量下降, 还会在器件工作过程中, 由于发热而造成器件损坏。

(3) 衬底与外延膜的化学稳定性匹配程度。衬底材料要有好的化学稳定性, 在外延生长的温度和气氛中不易分解和腐蚀, 不能因为与外延膜的化学反应使外延膜质量下降。

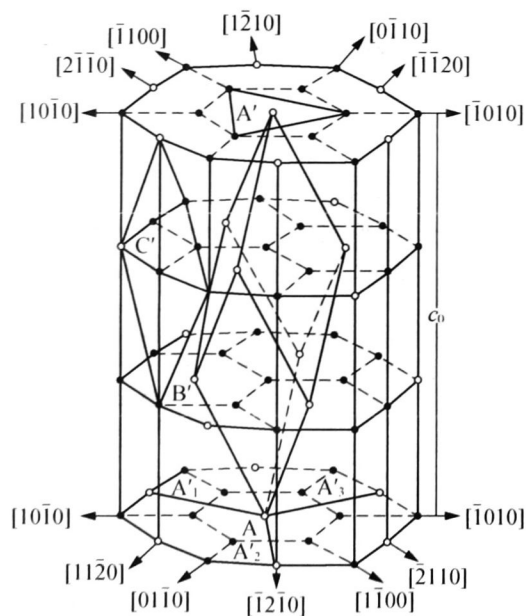
(4) 材料制备的难易程度和成本的高低。考虑到产业化发展的需要, 衬底材料的制备要求简洁, 成本不宜太高。

当前用于 GaN 基 LED 的衬底材料比较多, 但是能用于商品化的衬底目前只有两种, 即蓝宝石和碳化硅衬底, 其他如 GaN、Si、ZnO 衬底还处于研发阶段, 离产业化还有一段距离。目前, 国际上公认的 LED 主要衬底材料为蓝宝石(Sapphire, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), 其晶体结构与 GaN 相似, 符合 GaN 薄膜生长过程中耐高温的要求, 具有良好的高温稳定性和机械力学性能, 而且生产技术成熟, 价格便宜。

1.5 衬底材料的性能

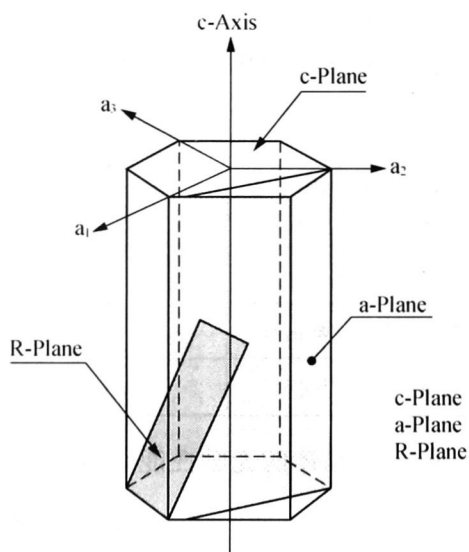
1.5.1 蓝宝石

蓝宝石俗称刚玉，又称白宝石，其化学成分为氧化铝(Al_2O_3)，由三个氧原子和两个铝原子以共价键形式结合而成，晶体结构为六方晶格结构，其中氧原子间的八面体配位约有 $2/3$ 的空隙是由铝原子所填充的，如图 1-4 所示为蓝宝石晶体的分子结构。常被应用的切面有 A 面、C 面和 R 面。由于蓝宝石的光学穿透带很宽，从近紫外光(190nm)到中红外线都具有很好的透光性，所以被大量用在光学元件、红外装置、高强度激光镜片材料和光罩材料上。蓝宝石具有高声速、耐高温、抗腐蚀、高硬度(莫氏硬度 9 级)、高透光性、高熔点(2045℃)等特点。蓝宝石单晶的 C 面与 III-V 和 II-VI 族化合物(氮化镓等)沉积薄膜之间的晶格常数失配率小，同时还符合 GaN 的 MOCVD 工艺中耐高温的要求，因此使得蓝宝石晶片成为制作白、蓝、绿光 LED 中，生长氮化镓的重要材料。



(a) 蓝宝石晶体结构简图

黑色的点为氧原子，白色的点为铝原子



(b) 蓝宝石晶体切面图

图 1-4 蓝宝石晶体的分子结构

此外，蓝宝石还具有以下优良特性：强度高，硬度高(莫氏硬度 9)，耐高温(熔点达 2045℃)，光透性能好，电绝缘性能优良，化学稳定性好，一般不溶于水，耐

酸腐蚀，只有在高温下(300℃以上)才能被氢氟酸(HF)、磷酸(H₂PO₄)和熔化的氢氧化钾(KOH)所侵蚀。

蓝宝石晶体的结构参数，如表 1-2 所示。

表 1-2 蓝宝石晶体的结构参数

化学式	Al ₂ O ₃	晶格常数	$a=4.758(0001)$ $c=12.991(11\bar{2}0)$
空间群	R3 _c	晶体结构	六方晶系
单位晶胞分子数	2 个	分子量	101.9612
晶向角	$\alpha=\beta=90^\circ$	晶向角	$\gamma=120^\circ$

蓝宝石晶体的电学性能参数，如表 1-3 所示。

表 1-3 蓝宝石晶体的电学性能参数

电阻率 /($\Omega\cdot\text{cm}$)	$>10^{14}$	介电强度/(V/cm)	4.8×10^5
介电常数 ϵ	$\perp\text{C 轴 } 9.3$ $//\text{C 轴 } 11.5$	裂解能/(eV)	8.8

蓝宝石晶体的热学性能参数，如表 1-4 所示。

表 1-4 蓝宝石晶体材料的热学性能

热传导率(25℃)/ ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	0.2717	热膨胀系数/($^\circ\text{C}^{-1}$)	7.5×10^{-6}
比热/($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.78	热容/($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	77
抗热振系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$)	790	热导系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	25.12
比热/($\text{W}\cdot\text{s}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.418	抗热冲击品质因子	2.10

蓝宝石晶体的光学性能参数，如表 1-5 所示。

表 1-5 蓝宝石晶体的光学性能参数

折射率	$n_o=1.7717$ $n_e=1.7636$	泊松比	0.25~0.30
光透性/(3~5 μm)	$>80\%$	吸收系数 α	0.009

蓝宝石晶体的物理力学性能参数，如表 1-6 所示。