

第一章 前言

1.1 LED 的发展历史及特性

1.1.1 照明技术的主要发展历史

二十世纪,白炽灯、荧光灯和高压散射灯一直占据着照明技术的主要位置。1879年,英国发明家 Joseph Swan 和美国发明家 Thomas Edison 分别独立地发明了世界上第一盏真空灯泡。在美国,Thomas Edison 用从他妻子的缝纫机上取下的一根碳化缝纫线制作出了世界上第一盏白炽灯。他第一个产品,是采用碳化竹纤维制成,并在 60 w 的功率下工作了 100 个小时,流明效率接近 1.4 lm/w。随着流明效率得到了进一步的提高,工作电压在 120 V,功率为 60 w 的白炽灯流明效率可达 15 lm/w,其平均寿命达到了 1000 小时。

1901年,美国发明家 Peter Cooper Hewitt 获得了第一盏低压汞蒸汽放电灯的专利权,这是现代所用荧光灯最早的原型。后来,效力于 General Electric 公司的 George Inman 改进了这个设计,并于 1939 年的纽约世界展览会上提出了第一盏可商品化的荧光灯。从那以后,荧光灯的效率逐渐提高到了 65—100 lm/w。

1801年,美国化学家 Humphry Davy 在实验中,使电流流过铂条并引起铂条发光。1810年,他向英国皇家协会展示了放电灯的原理。这促使了高强度放电光源的发展,但直到 1932 年第一盏高压汞蒸汽灯才面世。1961年, Gilbert Reiling 获得了第一盏金卤灯的专利权。这种灯在发光效率上好过汞蒸气灯,并且更适合商场,街道和工业照明。因此,金卤灯在 1964 年的世界展览会上被提出。很快,第一盏高压钠灯也在 1965 年产生。从此,高压放电灯的发光效率提高到了 45-150 lm/W,发光效率的值主要取决于所加电压和功率大小。在过去的 60 到 120 年的时间里,白炽灯、荧光灯和高压散射灯,每一种光源都占据着光源研究和发展的一定的历史舞台。工业研究者们,一直不断的探索,不放过每一点能提高这些光源发光效率的方法,但是很遗憾的是,这些光源的发光效率并没有太大的提高空间。与其恰恰相反的是,固体发光技术的提出,使得固体发光光源不但可以满足现在白光照明的需要,而且其发光效率理论上可以达到以前发光光源的两倍多。这种固体发光被称作发光二极管即 light-emitting diodes (LEDs)^[1]。

1.1.2 LED 的发展历史

20 世纪 60 年代,首只 GaAsP 红色发光二极管问世以来,经过 40 年的时间,LED 的研究和产业得到迅速发展^[2]。早期的 LED 的发光效率很低(0.1 lm/W)光通

量很小(千分之几流明)^[3],且颜色单一(红色),主要应用于指示灯领域。70 年代是 LED 发展史上的一个高潮,利用气相外延(VPE)和液态((LPE)外延制作的外延材料,将光效提高到 1 lm/W, LED 的光谱范围也覆盖了从黄绿色到红外的范围(565nm-940nm)^[3],1985 年 LED 发光强度首次突破 1 cd^[4],由于人们通常将光强 1cd 作为高亮度 LED 和一般 LED 的分界点,因此这次技术突破具有特殊的意义,是制造高亮度 LED 的开端。但是,蓝光绿光 LED 的效率一直很低,成为 LED 广泛应用的瓶颈。

这一缺陷极大地阻碍了发光二极管的应用。二十世纪九十年代初,以氮化物为代表的材料体系获得了历史性突破^[5-9],人们在氮化镓基材料体系上成功地制备出纯绿色、蓝色和紫色发光二极管。这一历史性的突破使得发光二极管的波长向短波方向迈进了一大步,由原来的短波长发光二极管只能做到 550nm 扩展到 380 nm,发光二极管的发射光谱已经覆盖了整个可见光谱区(如表 1-1 所示)。发

表 1-1 可见光谱区发光二极管的材料体系和波长

颜 色	波长 (nm)	正向偏压	材 料
红	660	1.7	GaAlAs
红	635	2.0	GaAsP/GaP
红	625	2.0	InGaAlP
橙	612	2.0	InGaAlP
橙	605	2.1	GaAsP/GaP
黄	595	2.1	InGaAlP
黄	585	2.1	InGaAlP
黄	583	2.1	InGaAlP
黄绿	572	2.1	GaP
黄绿	570	2.1	InGaAlP
绿	565	2.1	GaP
绿	560	2.1	InGaAlP
绿	555	2.1	GaP
纯绿	545	3.5	GaN/SiC
纯绿	525	3.5	GaN/SiC
纯绿	505	3.5	GaN/SiC
纯绿	525	3.5	GaN/SiC
蓝	470	3.5	GaN/SiC
蓝	430	3.5	GaN/SiC
白		3.5	GaN/SiC

光二极管已经成为三基色完备的发光体系,并且蓝色和纯绿色发光二极管的发光效率已经接近并赶上了红色发光二极管的发光效率,发光二极管的应用领域得到

(2) 1965年，全球第一款商用化发光二极管诞生，它是用锗材料做成的可发出红外光的LED，当时的单价约为45美元。其后不久，Monsanto和惠普公司推出了用GaAsP材料制作的商用化红色LED。这种LED的效率为每瓦大约0.1流明，比一般的60至100瓦白炽灯的每瓦15流明要低上100多倍。

(4) 1971年，业界又推出了具有相同效率的GaP绿色芯片LED。

(6) 80年代早期的重大技术突破是开发出了AlGaAs LED, 它能以每瓦10流明的发光效率发出红光。这一技术进步使LED能够应用于室外信息发布以及汽车高位刹车灯(CMSL)设备。

(7) 1990年, 业界又开发出了能够提供相当于最好的红色器件性能的AlInGaP技术, 这比当时标准的GaAsP器件性能要高出10倍。

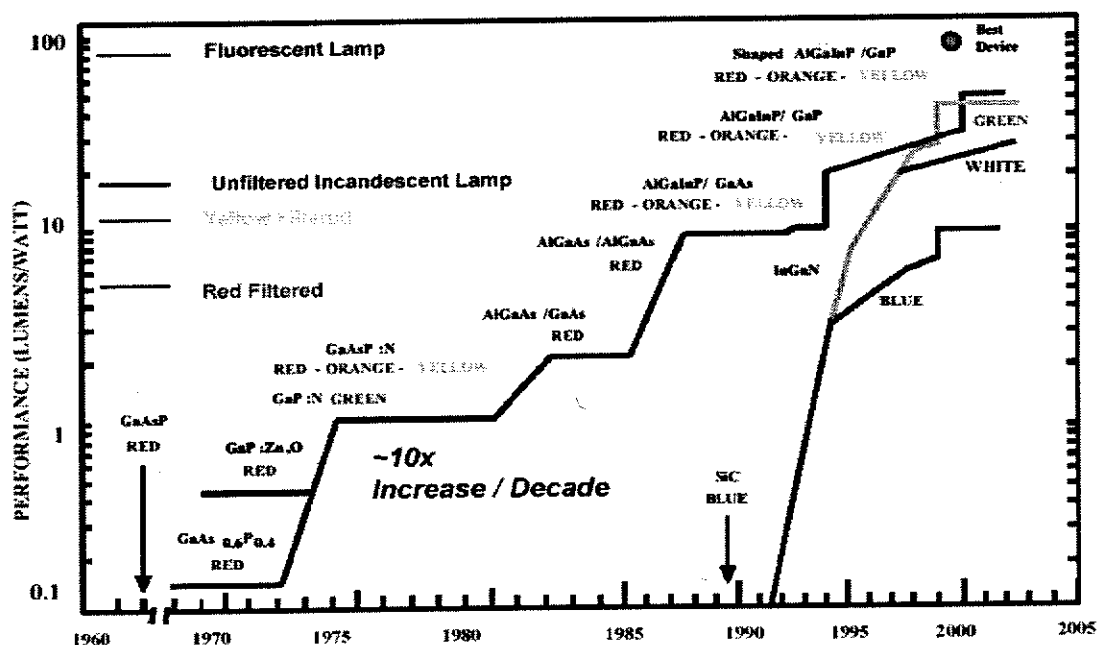


图 1-1 LED 的主要发展历史

(8) 现在效率最高的LED是用透明衬底AlIn-GaP材料做的。在1991年至2001年期间,材料技术、芯片尺寸和外形方面的进一步发展使商用化LED的光通量提高了将近30倍。

(9) 1994年, 日本科学家中村修二在GaN基片上研制出了第一只蓝色发光二极管。

管，由此引发了对GaN基LED研究和开发的热潮。

(10) 20世纪90年代后期，研制出通过蓝光激发YAG荧光粉产生白光的LED，但色泽不均匀，使用寿命短，价格高。随着技术的不断进步，近年来自光LED的发展相当迅速，白光LED的发光效率已经达到100 lm/w，实验室研究成果可以达到138 lm/w，大大超过白炽灯，向荧光灯逼近。

1.1.3 二极管的基本特征

二极管的基本特征主要有以下几个方面：

一：发光效率高

经过几十年的技术发展，LED的发光效率有了较大的提升。白炽灯、卤钨灯的发光效率为12-24 流明/瓦，荧光灯为50~70 流明/瓦，钠灯为90~140 流明/瓦，大部分的电能变成热量被损耗掉。LED的发光效率经改良后最高效率预计将大于200 流明/瓦，而且其光的单色性好、光谱窄，无需过滤可直接发出有色可见光。目前，世界各国均加紧提高LED发光效率方面的研究，在不远的将来其发光效率将有更大的提高。

二：耗电量少

LED单管功率0.03~0.06瓦，采用直流驱动，单管驱动电压1.5~3.5伏，电流15~18毫安，反应速度快，可在高频操作。同样照明效果的情况下，耗电量是白炽灯泡的八分之一，荧光灯管的二分之一。据估计，如采用光效比荧光灯还要高两倍的LED来替代中国大陆的白炽灯和荧光灯。每年可节约的电能相当于三峡工程的一年的发电量。就桥梁护栏灯为例，同样效果的一支日光灯40多瓦，而采用LED每支的功率只有8瓦，而且可以七彩变化。

三：使用寿命长

采用电子光场辐射发光，具有诸多缺点如灯丝发光易烧、热沉积、光衰减等。而采用LED灯体积小、重量轻，环氧树脂封装，可承受高强度机械冲击和震动，不易破碎，平均寿命达5万小时以上。LED灯具的使用寿命可达5~10年，可以大大降低灯具的维护费用，避免经常换灯之苦。

四：安全可靠性强

LED具有发热量低，无热辐射，冷光源，可以安全触摸等优点，并且能精确控制光色及发光角度，光色柔和，无眩光。制作材料中不含汞、钠元素等可能危害健康和环境的物质。内置微处理系统可以控制发光强度，调整发光方式，实现光与艺术结合。

五：有利于环保

LED为全固体发光体，耐震、耐冲击不易破碎，废弃物可回收，没有污染。光源体积小，可以随意组合，易开发成轻便薄短小型照明产品，也便于安装和维护。当然，节能是我们考虑使用LED光源的最主要原因，也许LED光源要比传统光源昂贵，但是用一年时间的节能收回光源的投资，从而获得4~9年中每年

几倍的节能净收益期。

1.2 白光 LED 的发展

1.2.1 白光 LED 的发展

以氮化物为代表的材料体系的历史性突破,以及 LED 完备的三基色发光体系的实现,使得实现白光 LED 成为可能。90 年代是白光 LED 的年代,日亚公司继 1993 年成功制备了以氮化物为代表的高亮度蓝光 LED 后,仅仅过了三年,于 1996 年制成了世界上第一只白光 LED^[11,12],并于 1998 年推上了市场。白光 LED 具有低电压、低能耗、长寿命、高可靠性、易维护等优点,符合绿色照明工程节能与环保的要求。因此,各国政府、照明企业和公司注入极大的资金、人力、物力去研究和开发白光 LED 光源^[13]。

1998 年日本拟定一项“21 世纪光计划”,核心在于高质量材料的生长,高功率管芯的制备以及高效率白光荧光粉的获得,计划解决的问题包括:(1) GaN 基化合物半导体发光机理研究;(2) UV LEDs 的外延生长方法的改进;(3) 大尺寸同质衬底生长;(4) 开发近紫外激发的白光荧光粉,实现使用白光 LED 的照明光源,预期目标 2010 年达到 120 lm/W^[14]。美国能源部设立了“固态照明国家研究项目”

(National Research Program on Solid State Lighting),共有 12 个国家重点实验室、公司和大学参加,由国家能源部、国防先进研究计划总署和光电工业发展协会联合资助执行,计划到 2020 年实现白光 LED 光效 200lm/W,光通量 1500lm 的目标。欧共体设立了“彩虹”计划(Rainbow project AlInGaP for multicolor sources),成立了执行研究总署,委托 6 个大公司和 2 个大学执行。

表 1-2 世界主要国家制定的 LED 发展计划

国家或地区	计划名称	主要内容
美国	国家半导体研究计划	计划于 2000—2010 年政府投资 4 亿美元,由 12 个重点实验室,公司,大学共同执行,研究降低成本和提高 LED 转换效率
欧共体	彩虹计划	于 2000 年 7 月制定,以欧共体补助金投资,由 6 个大公司和 2 所大学共同执行,主要推动白光 LED 应用。
日本	“二十一世纪照明”研究发展计划	政府投资 50 亿日元,由 13 个公司和 4 所大学联合执行,通产省提供资助,计划 2010 年发光效率达 120 lm/w,并制定半导体灯具的国家标准
韩国	固态照明计划	于 2000 年制定,成立光产业振兴会负责计划实施,计划 2000—2008 年政府投资 4.72 亿美元,企业投资 7.36 亿美元,目标成为亚洲最大光电

		子生产国。
中国台湾	次世纪照明光源开发计划	由 14 个企业, 研究机构, 大学参加, 主要是芯片加工, 封装, 应用, 建立信息平台 and 测试平台

我国对发展白光 LED 高度重视^[15], 科技部有“863”、“973”计划研究蓝光、白光 LED 材料, “十五”期间, 2003 年 6 月, 我国正式设立了“国家半导体照明工程项目”的国家级计划。该计划由科技部牵头, 国家发展和改革委员会、信息产业部等参与, 对氮化镓基蓝、绿光 LED 的研究和产业化, 都给予了大力支持, 并取得了重大进展。如专门从事氮化镓基蓝、绿光 LED 生产的上海北大蓝光科技有限公司、上海蓝宝光电子有限公司、深圳方大电子有限公司、厦门三安、大连路美等都得到了国家科技部和国家计委的支持, 产品相继上市, 并正在增资扩股, 扩大生产规模。这些进展为我国白光 LED 照明光源的研究和产业化奠定了基础。

1.2.2 白光 LED 与传统光源的比较

从表1-3可看出, 白光LED与现行一般照明设备白炽灯及荧光灯相比较, 白光LED有一系列优势, 具有高效节能、寿命长、反应速度快、有益环境、体积小可平面封装, 易开发成轻薄短小产品等, 另在发光效率上, 2006年3月10日, 日亚化工宣布开发出了100 lm/w 的标准尺寸白光, 并于同年11月, 推出了流明效率达138 lm/w 的白光LED。目前商业化的标准白光LED其发光效率可达100lm/w, 大功率标准白光LED的发光效率也达到了80 lm/w, 这一结果基本达到了荧光灯的发光效率水平。且早已超过白炽灯泡的发光效率15 lm/w。以白光LED发展进程来看, 只要技术达到成熟, 成本快速下降, 将可逐步取代现有的传统光源。

表 1-3 白光与常规光源的主要技术特性比较

	白光 LED	白炽灯	荧光灯
发热量	☆	△	○
寿命	☆	△	○
省电	☆	△	☆
体积	☆	△	△
反应速度	☆	△	△
环保	☆	☆	△
耐碰撞性	☆	△	△
指向性	☆	△	△
发光效率	○	△	☆

价格	△	☆	○
----	---	---	---

☆：优势；○：中间；△：劣势

1.3 LED 的应用及发展趋势

目前LED的典型应用如表1-4所示，80% 的应用主要集中在手机、汽车、消费性家电产品显示器及显示应用(包括广告显示屏与景观照明)等方面。生产LED的相关产业厂商则以世界前五大供货商占尽优势，例如：Cree公司2004年增长了37%，营业额3.6亿美元，获利8.5千万美元；Lumileds增长44%，营业额2.8亿美元，获利6千万美元。除了日本因为是白光LED的研发母厂及专利受益者而占据一席之地外，亚洲地区大部分LED制造厂商则因供过于求与恶性价格竞争，加上技术质量的劣势，大部分集中在低端市场。

表 1-4 LED 的典型应用

汽车照明		液晶显示器： 液晶电视 笔记本电脑液晶显示器 用于替换各类定制尺寸液晶显示器中的背光源用传统冷阴极荧光管
内照明：	外照明：	
领航灯 阅读灯 顶 灯 门 灯 环境灯	外部照明 信号灯 转向灯 尾 灯 车头灯 中间高位刹车灯 刹车灯 后组合灯 倒车灯 雾 灯 后视镜脚灯	
摄像闪光灯		
		娱乐照明： 剧院，演播室，摄影棚，夜总会，餐厅以及其它高标准展示场合的效果照明
		通用照明： 点/面照明 wall washing 景观照明
		便携式照明： 闪光灯 头戴式作业灯 自行车和步行运动安全指示灯 潜水灯

目前,照明用电约占整个电力消耗的20%,降低照明用电是节省能源的重要途径,为实现这一目标业界已研究开发出许多种节能照明器具,并显示出了一定的成效。但是,距离“绿色照明”的要求还远远不够,开发和应用更高效、可靠、安全、耐用的新型光源势在必行。LED以其固有的优越性正吸引着世界的目光。美国、日本等国家和中国台湾地区分别对LED照明效益进行了预测:如果美国55%白炽灯及55%的日光灯被LED取代,每年节省350亿美元电费,每年减少7.55亿吨二氧化碳排放量。日本100%白炽灯换成LED,可减少1~2座核电厂发电量,每年节省10亿公升以上的原油消耗。中国台湾地区25%白炽灯及100%的日光灯被白光LED取代,每年节省110亿度电。近年来,日本日亚化工、丰田合成、SONY、住友电工等都已LED照明产品问世。世界著名的照明公司如飞利浦、欧司朗、GE等也投入大量的人力物力进行LED照明产品的研究开发和生产。美国GE公司和EMCORE公司合作成立新公司,专门开发白光LED,以取代白炽灯、紧凑型荧光灯、卤钨灯和汽车灯。德国欧司朗公司与西门子公司合作开发LED照明系统。台湾目前的LED产量仅次于日本,列在美国之前,从1998年开始投入6亿台币进行相关工作。

LED发展历史已经几十年,但在照明领域的应用还是新技术。随着LED技术的迅猛发展,其发光效率的逐步提高,LED的应用市场将更加广阔。特别在全球能源短缺的忧虑再度升高的背景下,LED在照明市场的前景更备受全球瞩目,被业界认为在未来10年成为最被看好的市场以及最大的市场,将是取代白炽灯、钨丝灯和荧光灯的最大潜力商品。

1.4 本文主要研究的内容

白光LED作为照明光源具有诸多优势,其中流明效率总是被首要关注的参数,在白光LED的诸多研究中如散热,封装等,究其最终目的均是为了追求更高的发光效率,本文主要从理论角度,针对白光LED发光效率的相关方面做了一定分析。

第一章:主要介绍了LED以及白光LED的主要发展历史,同时介绍了LED的基本特征,并将其特点与传统光源进行了比较。对白光LED作为新型照明光源的应用以及发展趋势进行了展望。

第二章:对白光LED的发光机理进行了阐述,并对白光LED的制备工艺以及性能参数的测量进行了研究。

第三章:对制备白光LED用的YAG荧光粉的制备方法做了简要介绍,并对其进行了发射光谱和激发光谱的测试。

第四章:针对白光LED发光效率进行了相关计算,计算主要包括了光通量变化,蓝光功率效率,不同色温LED的发光效率以及理论极值等五部分内容。

第五章:结论,对全文进行了总结,分析了论文的主要工作和成绩。

第二章 LED 的发光原理及工艺技术

2.1 单色 LED 发光机理

LED 主要是由 III-IV 族化合物, 如 GaAs(砷化镓)、GaP(磷化镓)、GaAsP(磷砷化镓)等半导体制成的, 其核心是 PN 结。

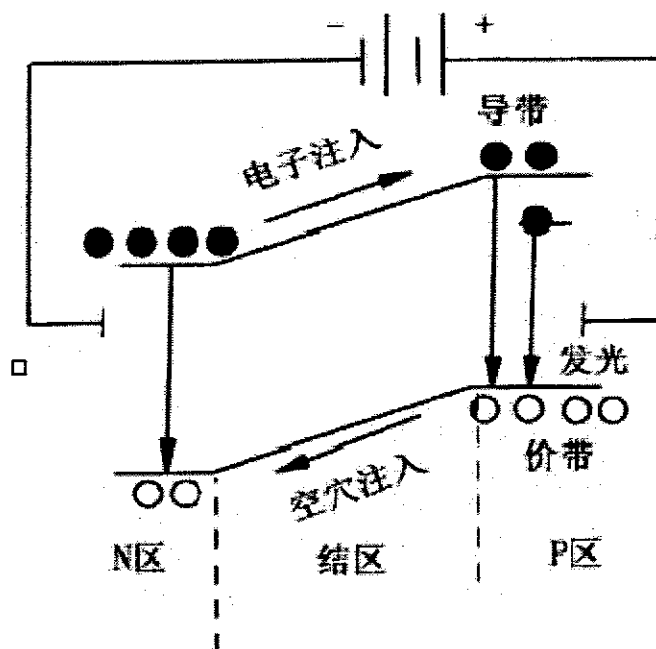


图 2-1 发光二极管的发光原理示意图

发光二极管的发光原理可以用图 2-1 中 PN 结的能带结构来解释^[16,17]制作半导体发光二极管的材料是重掺杂的, 热平衡状态下形成 PN 结, 扩散和漂移运动相等时, 内建电场稳定, 此时 N 区有很多迁移率很高的电子, P 区有较多的迁移率较低的空穴。由于 PN 结阻挡层的限制, 在常态下, 二者不能发生自然复合, 当 PN 结加正向电压时, 外加电场将削弱内建电场, 使空间电荷区变窄, 结区势垒降低, 载流子的扩散运动加强。由于电子迁移率总是远大于空穴的迁移率, 因此电子由 N 区扩散到 P 区是载流子扩散运动的主体。由半导体的能带理论可知, 当导带中的电子与价带中的空穴复合时, 电子由高能级跃迁到低能级, 电子将多余的能量以发射光子的形式释放出来, 产生电致发光现象。除了这种发光复合外, 还有些电子被非发光中心(这个中心介于导带、介带中间附近, 也就是杂质能级或者缺陷)捕获, 尔后再与空穴复合, 每次释放的能量不大, 不能形成可见光。

也就是说这些不发光的载流子将可能被杂质能级(或缺陷)所捕获,最后以发热的形式消耗掉。

2.2 白光 LED 发光机理

白光 LED 有着诱人的发展前景。但半导体材料的发光机理决定了单一 LED 芯片不可能发出连续光谱的白光,必须以其他的方式合成白光,目前实现无机白光 LED)的方法主要有以下几种^[18-27]。

一, 蓝光LED与YAG黄色荧光粉的组合方式

目前最常见的白光LED制作方式。主要是使用蓝光LED和YAG黄色荧光粉组合而成,由于此种组合的制作简易,在所有各种白光LED组合中,成本最低而效率最高。大部分公开的白光LED效率指标都以此种方式制成,目前实验室的白光LED雏形品的世界记录为82流明/瓦,由美国CREE公司于2004年10月在Intertech主办的LED国际会议上发表,与日光灯的发光效率属同一水准,而一般白光LED商品的发光效率也花30-50流明/瓦之间为传统灯泡的2-3倍。虽然这种白光LED效率指标同时受蓝光LED和荧光粉两者的影响,然而荧光粉的效率提高不大,近年来提高的动力主要来自蓝光LED 的贡献,详细探讨见下节说明。

然而,经过实际使用后,此方式制作的白光LED的最大不足是演色性偏低,最大仅为83左右。以分光分析法精密测试,可发现主要是因为荧光粉在红光区域的光度太弱所致。虽然目前白光LED商品的发光效率为传统灯泡的2—3倍,但若要在一般照明中取代灯泡,除了价格之外,演色性和暖色性仍有待提高,如表3所示,目前一般照明应用不选用日光灯,而使用灯泡的最大原因就在于选择其优异的演色性和暖色特性。因此,寻找和添加高效率红色荧光粉以提高演色性,是生产技术研发上的主要课题之一。

另外,这种白色LED因为其色温均匀性不佳还常常造成使用者的困扰。以眼睛观察时,很容易在一堆白光LED元件里,发现每一颗的颜色都有不同,甚至,同一颗LED于不同角度观察时,也可发现色温有所差异。这是因为此种LED研发出的蓝光直接参与混光,在生产白光LED当中所用的蓝光LED发光量,以及所添加的荧光粉数量,都有自然的误差值,此误差事实上就足以被我们灵敏的眼睛所察觉。因此,提高荧光粉添加的控制精度,也是生产改善方面的重要课题。

就整体而言,由于这种白光LED的特点,应用面逐年扩大,尤其在小型彩色LCD背光源,大量使用于手机、PDA、数码相机中,或者直接组成手电筒、照相手机的闪光灯等消费性产品。由于日本日亚公司拥有该组合方式的多国专利,即便有少数公司与其交互授权,但是这一市场事实上非常接近独占的状态,价格居高不下,若以单位发光量的成本计算,其价格几乎为传统灯泡的100倍左右。虽然近来世界各地投入荧光粉的研发逐渐增加,荧光粉的数量繁多,截止目前为止,YAG荧光粉依然具有最高的蓝光LED转换效率状态似乎难以有所突破。

二, 使用红 / 绿 / 蓝三种LED晶粒组合的方式

从目前的最佳报告数据来看,各颜色的发光效率分别为,蓝光LED~30流明/瓦;绿光LED~43流明/瓦;红光LED~100流明/瓦,组成白光后的平均效率大于80流明/瓦,而演色性可达90以上。此种白光LED的最大优势是,只要配合适当的控制器个别操控各色LED,很容易让使用者随意调整喜爱的颜色,这是其它光源无法提供的特色,因此,已成为舞台、咖啡厅或讲究声色场所等特殊照明应用者的最爱。

近来因红/绿/蓝三色LED的组合色饱和度很高,逐渐受到大型LCD TV背光源需求所重视,各国相继开发LED背光源LCD TV,如最近液晶82英寸液晶面板用LED背照灯由美国欧司朗光半导体(OSRAM Opto Semiconductors)开发成功,并在“2005年显示信息学会(SID2005)”上举办的展览会上首次公开了样品。总计使用了1120个LED,其中包括红色和蓝色LED各280个以及560个绿色LED,配合使用散光板与散光膜,实现了10000cd/m²的亮度。欧司朗光半导体计划向背照灯装置生产商推销这次的82英寸背照灯所使用的LED模块。据称2005年6月即可供应样品。2005年9月开始量产,2006年初正式投产。此外IG飞利浦、韩国三星和日本日立分别在今年的“2005年显示信息学会(SID2005)”上发表了LED TV的LED背照灯新技术,达到了CCFI无法达到的优异性能和新功能。预计其未来随LCD TV进入家庭的潜力极大。

三、紫外LED与多色荧光粉的组合

第三种白光LED是使用紫外LED与多种、色荧光粉组合而成,其概念与日光灯相似,由于紫外线光子的能量较蓝光还高,可激发的荧光粉选择性增加,无论是那种颜色,荧光粉的效率大都随激发光源波长的缩短而增加,尤其是红粉。这种LED封装方式和第一种LED完全相同,成本相同,但因为所有白光都来自于荧光粉本身,紫外光本身未参与混光,因此颜色的控制较第一种LED容易得多,色彩均匀度极佳,演色性根据所混合的荧光粉数量和种类而定,通常控制在90左右。然而,这种白光LED最大的问题在于效率相对偏低,主要原因在于所使用的紫外LED效率偏低,许多研究结果表明,GaN LED效率对波长变化时,在400nm时达到最大值,低于400nm后效率急剧下降;此外,因为前后两个光子的能量差为自然能量损失,由于紫外光转换为红光时,其能量损失比从蓝光转换时高10~20%,这也会影响整体效率。目前这种白光LED商品比较少,使用的紫外LED在380~400nm左右,其最终效率只有第一种白光LED的一半。

四、多量子阱型^[28]是在芯片发光层的生长过程中,掺杂不同的杂质以制造结构不同的量子阱,通过不同量子阱发出的多种光子复合直接发出白光。1998年8月,中国台湾的陈金源等人在p-n结二极管中生长量子阱结构,通过调变晶体取向生长时的温度、压力、氨气流量、载气比例、掺杂硅镁杂质等,在特定的参数范围内使量子阱结构发射出不同能量的光子,调变出白光。该方法提高发光效率,可降低成本,降低包装及电路的控制难度;但技术难度相对较大。

五、此外还有类似光转换型的所谓“光子再循环”白光LED^[29]。日本Sumitomo Electric在1999年研制出ZnSe材料的白光LED。其技术是先在ZnSe单晶基底

上生长一层 CdZnSe 薄膜，通电后该薄膜发出的蓝光与基板 ZnSe 作用发出互补的黄光，从而形成一白光光源。美国 Boston 大学光子研究中心用同样的方法在蓝光 GaN-LED 上叠放一层 AlInGaP 半导体复合物，也生成了白光。

六，量子点白光技术^[30]，Sandia 国家实验室是世界上第一个采用量子点白光技术获得白光照明的研究单位。与传统的荧光粉不同，量子点技术通过改变量子点的尺寸调节发光的颜色。该技术的困难在于，把量子点从有机溶剂中用环氧数脂包裹，方法不当会引起光效下降。

以上几种实现白光 LED 的方法中，利用蓝光芯片配合黄色荧光粉的技术最为成熟^[31]，目前市场上销售的白光 LED 绝大部分都是用这种方法制成的，也是本文论述的重点。

2.3 白光发光二极管的主要制备工艺及参数测量

2.3.1 白光发光二极管制备工艺

由目前实现白光 LED 各种方法可知，利用蓝光芯片配合黄色荧光粉的技术最为成熟，我们在实验中所用白光发光二极管也采用此方法制成，因此在这里我们主要对此方法的工艺流程进行了概述。

利用蓝光芯片配合黄色荧光粉的方法实现白光，其主要原理是利用 GaN 基蓝光作为基础光源，利用荧光粉作为光转换材料，通过 GaN 基蓝光发光二极管所发出的一部分蓝光激发荧光粉使荧光粉发出黄绿色光，另一部分蓝光透过荧光粉发射出来，荧光粉发出的黄绿色光和透过荧光粉发出的蓝光混合成白光(见图 2.2)

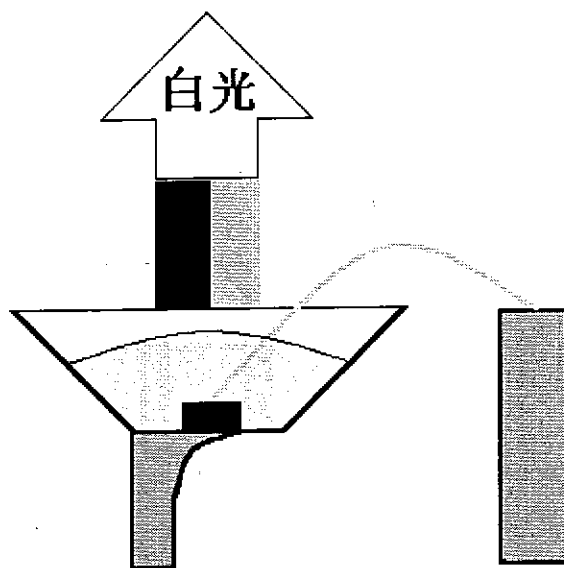


图 2-2 白光发光二极管的发光原理示意图

其主要工艺制备过程是指将外延好的发光二极管芯片作成成品发光二极管的过程，图 2-3 是通常的发光二极管的制备流程图。

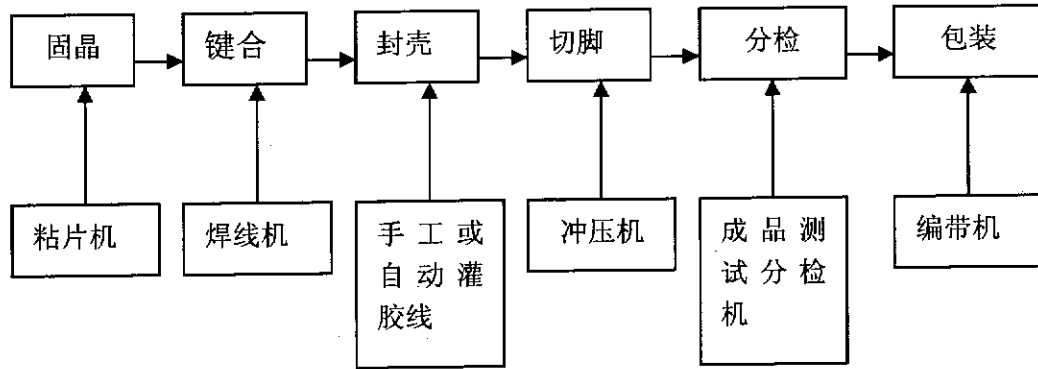


图 2-3 发光二极管的制备流程图

制备工艺主要包括以下几部分：烧结（固晶）、键合、涂粉，灌封(发光二极管结构见图 2.4)。

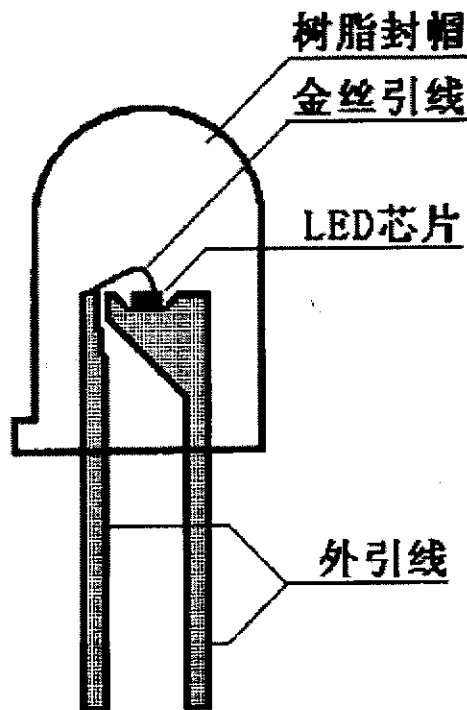


图 2-4 发光二极管的结构示意图

烧结:是将外延好的芯片粘在管架上;

键合:是利用金丝球焊或超声焊接的方法将电极与外引线腿连接起来;

涂粉:是将荧光粉涂敷在蓝光发光二极管芯片表面(只用于白光);

灌封:是将键合后的芯片用环氧树脂进行包封(见图 2.5).

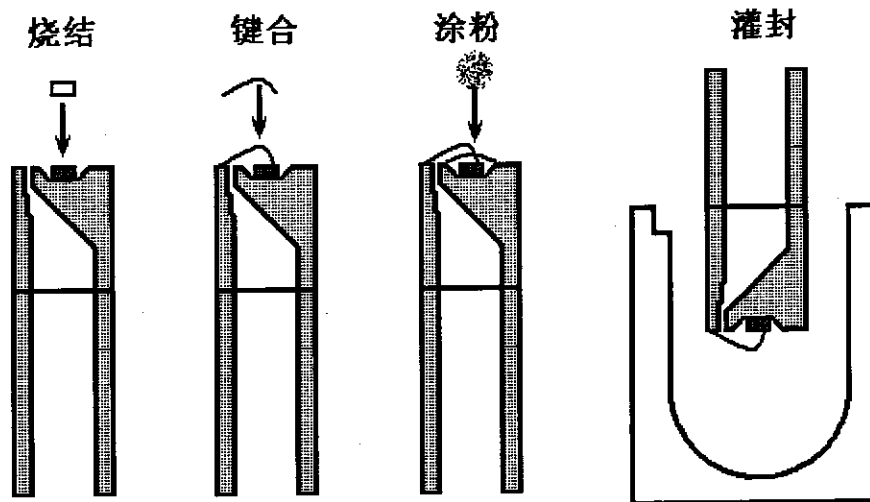


图 2-5 发光二极管的工艺过程示意图

烧结: 烧结工艺是利用导电银浆将芯片粘接在金属管架上。利用导电银浆将芯片沾在发光二极管管架的反光碗中心见图 2.5 所示, 保证制备成的发光二极管光轴不会偏离设计光轴, 将粘好芯片的发光二极管管架放置在烘箱中加温, 通常所说的高温导电银浆大约需要在 180°C 条件下加热 60 分钟, 使导电银浆固化, 通常所说的低温导电银浆大约需要在 140°C 条件下加热 60 分钟, 使导电银浆固化。在粘接芯片时导电银浆的量一定要很好地控制, 如果涂敷导电银浆的量过多, 容易引起发光二极管的短路, 如果涂敷导电银浆的量过少, 容易引起芯片下电极与管架之间的接触不好, 从而导致发光二极管的 $I-V$ 特性的变化, 使器件工作电压升高。

对于蓝宝石(MA)衬底的 GaN 基芯片则不同, 它的两个电极都在上面, 都要通过键合工艺向外引出电极, 导电银浆只是起到粘接芯片的作用。由于蓝宝石衬底的 GaN 基芯片的厚度非常薄, 在烧结工艺中非常容易出现银浆量过大所导致的短路现象。另一个值得注意的是加热时间, 导电银浆加热时间不足, 导电银浆不能完全固化, 在键合过程中容易出现芯片脱落, 导电银浆加热时间过长, 导电银浆的脆化, 在键合工艺中容易出现芯片脱落。烧结工艺主要解决下电极与金属管架之间的欧姆接触。

键合: 键合工艺是利用金丝球焊或超声焊接的方法将电极与外引线腿连接起来。当烧结工艺结束后, 芯片被沾接在金属管架上, 利用金丝球焊或超声焊接方法将芯片上电极和金属管架的另外一条腿连接起来。超声焊接过程如图 2.6 所

示,这种焊接方式在半导体工艺中被广泛应用,已经成为一个十分成熟的半导体工艺技术,由于 Sic 衬底的 GaN 基芯片的结构与传统发光二极管的结构十分类

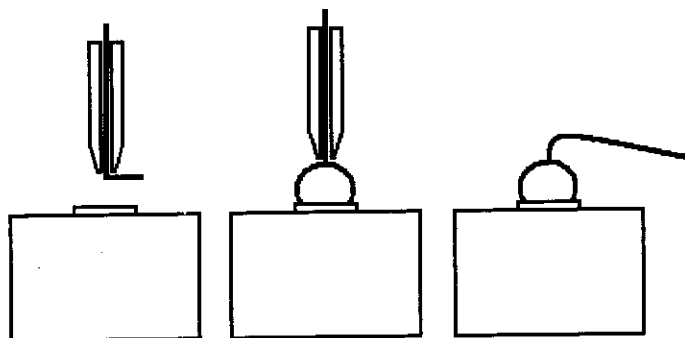


图 2-6 超声焊接过程示意图

似,因此,对于 Sic 衬底的 GaN 基芯片,常规的发光二极管键合工艺完全实用。但是对于蓝宝石(A120₃)衬底的 GaN 基芯片,采用常规的发光二极管键合工艺可能会有问题,由于蓝宝石(A120₃)衬底的 GaN 基芯片的衬底材料是绝缘的,结构如图 2-7(b)所示,因此它的两个电极都在上面,这里要注意的是在焊接与 p 型层连接的电极时焊接的球一定不能过大,如果焊接的球过大易于出现焊接球与 p-n 结的导通,这样制备出的器件虽然也可能发光,但是正向有较大的漏电流现象,这个问题还不易被及时发现,因为在晶体管图示仪上,采用通常的当灵敏度

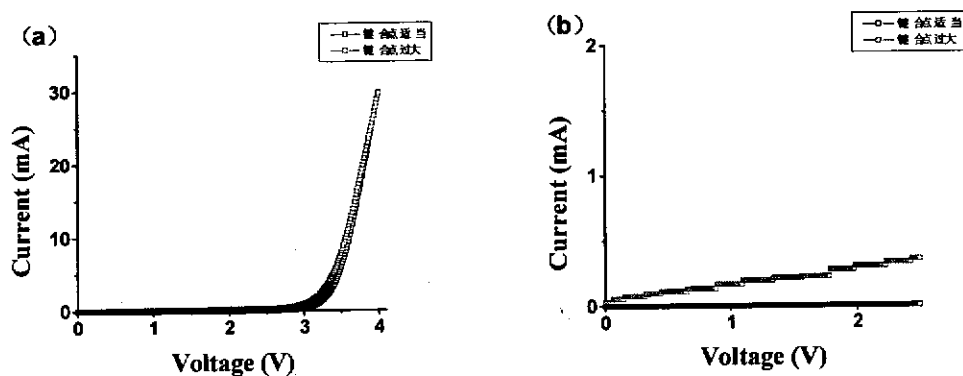


图 2-7 由于键合工艺造成的漏电流

为 5mA/cm² 时,看不出漏电流(见图 2.7(a)),当提高到 0.5mA/cm² 时,与正常的相比,漏电流就可以非常明显的表现出来(见图 2.7(b)).另外超声时间不能过长,超声功率不能太大,这些都可能对芯片造成损伤。

涂粉:涂粉工艺是将用于光转换的荧光粉涂敷在芯片表面或发光二极管管架的反光碗中。在涂粉过程中,涂粉的量一定要适当,如果涂敷的量过大做出的发光二极管偏黄,如果涂敷的量过小,做出的发光二极管偏蓝,具体的量应根据荧光粉的光谱和配色要求而定。

灌封: 灌封工艺是将涂好荧光粉的发光二极管封装在环氧树脂中。将发光二极管专用模具中注入适量的环氧树脂, 然后将带有发光二极管芯片的管架倒过来插入装有环氧树脂的模具中, 放入烘箱中固化。具体固化可分为两部分: 第一为初始固化, 固化初期温度低, 树脂黏度大, 但随着温度的升高, 树脂开始软化。随着温度的继续升高和保温时间的延长, 黏度持续下降。当黏度降低到一定值时, 胶液开始浸渍纤维和充满模腔, 随后固化反应加快, 环氧树脂的聚合度增加, 从而造成黏度增加, 当聚合度增加至凝胶点, 交联网络开始形成, 初始固化完成; 第二为后固化, 之后再高温加热进行后固化, 后固化是交联网络充分形成的必要条件。环氧树脂的三维交联结构形成后, 后固化时间越长, 粘结强度却不一定增强。这是由于在三维交联网络结构形成后, 若继续施加以高温, 会破坏三维交联结构的分子链, 使自己固化的环氧树脂脆化, 其不仅影响环杨的韧性, 也影响粘结强度。固化是指封装环氧的固化, 一般环氧固化条件在 135°C , 1 小时。后固化对于提高环氧与支架 (PCB) 的粘接强度非常重要, 一般条件为 120°C , 4 小时。

2.3.2 白光发光二极管的主要性能参数及测量

对于照明光源来说, 照明的效果最终是以人眼来评定的, 其光学特性也主要用如下的基于人眼视觉的光度量参数来描述^[32,33,34]:

一: 光强

光强: 光的强度, 在某一特定角度内所放射光的能量。单位: 坎德拉 cd; 符号用 I 表示。由于 LED 方向性强, 通常应检测 LED 光束轴线方向的光强。光束轴线是指 LED 周围的光强分布大约呈对称状态的轴线。光束轴线不一定是 LED 物理尺寸的轴线。检测设备包括照度计, 光导轨, 挡光屏, 光强标准灯等。测量应在没有外来光和杂散射光的环境 (暗室) 中进行。

二: 光强分布

光强随空间角度 (方向) 而变化的关系称作光强分布, 由此种分布连成的封闭曲线称为光强分布曲线, 由于测点较多, 且每点都经数据处理通常采用自动的分布光度计进行测量。方向是光度计的光敏器件以被测灯为中心转动, 取一定角度间隔测点的强度测量值而成。

光分布曲线分轴坐标曲线与直角坐标曲线, 采取何种形式视曲线的尖锐 (窄宽) 程度与使用场所而定。光强分布的数据主要用于照明设计计算以及为光源配置反射罩时进行反射面形状设计计算等。

三: 亮度

光源在某方向的亮度为光源在该方向单位投影面积上的发光强度, 亮度单位为尼特 (nt), 符号用 L 表示。亮度通常用亮度计测量。

亮度也是 LED 与 LED 组合体 (模块) 的重要指标。尤其是对于用来为显示组元的 LED, 此指标更为重要。由 LED 组成的显示屏幕也要有一定亮度要求。

四: 照度

照度是用来表示被照面上光的强弱, 它是以被照场所光通量的面积密度来表示的。即表面上一点的照度 E 定义为入射光通量 $d\Phi$ 与该单元面积 dA 之比:

$$E = d\Phi / dA \quad (2-1)$$

照度的单位为勒克斯 (lx)

而对于任意大小的表面积 A , 若入射光通量为 Φ , 则表面积上的平均照度为: $E = \Phi / A$ 。一般采用照度计测量受照面上的照度, 照度计主要是利用光生伏特效应: 某些半导体材料受到光照后, 在受照面和背面之间会产生电位差, 如果在两面之间接入电流计, 就会有电流产生, 这种光电效应称为光生伏特效应。具有光生伏特效应的器件有半导体光电二极管、光电池等。

五: 光通量

通常用光功率来表示光源在单位时间内发射的光能量大小, 光功率在辐射度学中用辐射通量 ϕ_E 表示。LED 在某个波长发射的辐射通量称为单色辐射通量,

写为 Φ_λ , 单位为 (W/nm)。

辐射通量的概念可适用于所有光谱段的光和辐射。但是人眼对不同波长的光的视觉灵敏度 $V(\lambda)$ 却是不一样的, 对于波长小于 380nm 和大于 780nm 之间的那部分不可见光 $V(\lambda) = 0$ 。因此将光源发射的辐射通量并且能够引起人眼视觉的那部分能量称作为光通量, 即光通量是指光源向整个空间在单位时间内发射的能引起人眼视觉的辐射通量, 表示为:

$$\Phi = K_m * \int_{380}^{780} \Phi_\lambda * V(\lambda) d\lambda \quad (2-2)$$

通常 LED 光通量的测量采用积分球法, 如图 2-8 所示: 积分球内壁和漫射屏表面镀有均匀的高反射率漫反射镀层, 被测 LED 器件发射的光辐射经积分球壁的多次反射, 产生与光通量成比例的均匀的面出光度, 这个面出光度被位于球壁的探测器测量到, 同时位于球内的一漫射屏挡住光线, 不使探测器直接接收到被测器件的光辐射。LED 的总光通量计算方法如下: 离积分球入射窗口距离为 1 的标准灯进入积分球内的光通量为:

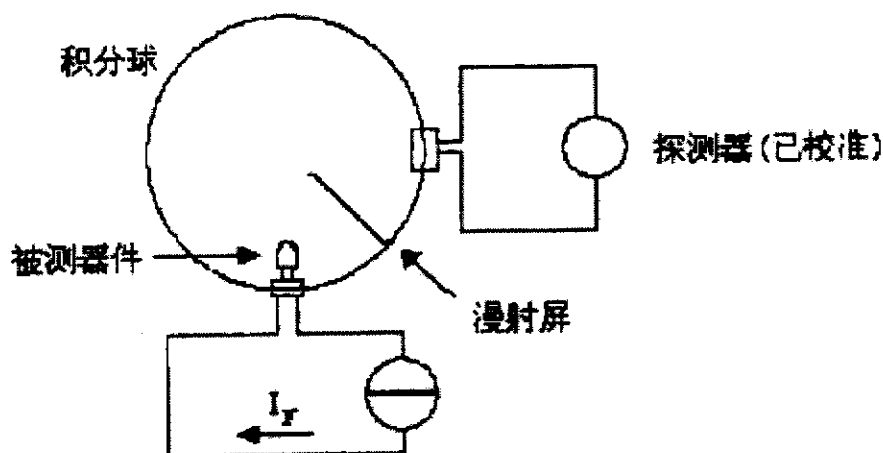


图 2-8 积分球法测试 LED 光通量

读出接收器上的光电流信号 i_s ，然后把 LED 置于窗口上，读出相应的接收器光电流信号 i ，则 LED 的总光通量中为：

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \frac{i}{i_s} * \Phi_s * K \quad (2-3)$$

式中：

K 为色修正系数

Φ_s 为标准灯的光通量。

由于在测量过程中自吸收效应^[35]的存在，即任一个物体均不可能是完全的反射体或吸收体，换言之积分球内的任何物体包括被测光源本身，都不可避免地要吸收一部分被测光源发射的光。为了测量LED的总光通量，必须把LED放入积分球内，至少其发光部分要放入球内，这样LED就不可避免地要吸收一部分自身发出的光，从而造成测量误差。为了减小次误差，我们在测量过程中采用了如下的解决方法：

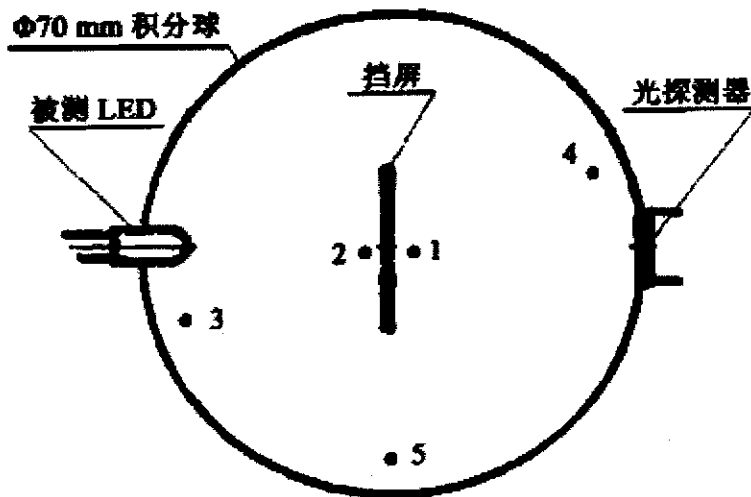


图2-9 同一管子不同位置的自吸收

解决的办法如图2-9所示。它们仅适用于直径为60mm至100mm的积分球，在积分球内插入一个或二个同型号的辅助LED但不点燃。测量分两次进行。第一次没有辅助LED，在相应的空缺位置上补放相同内径和涂料的积分球壁，得到被测LED的光通量值 Φ_1 。第二次插入一个或二个辅助LED，如图2-10(a)和(b)所示，得到被测LED的光通量值： Φ_2 或 Φ_3 ，由于LED的自吸收效应，显然有 $\Phi_1 > \Phi_2 > \Phi_3$ 。则设：

$$\Phi'_a = \Phi_1 - \Phi_2 \quad \text{或} \quad \Phi'_b = \Phi_1 - \Phi_3$$

则校正后的被测LED的光通量为：

$$\Phi_a = \Phi_1 + 2\Phi'_a \quad \text{或} \quad \Phi_b = \Phi_1 + 2\Phi'_b$$

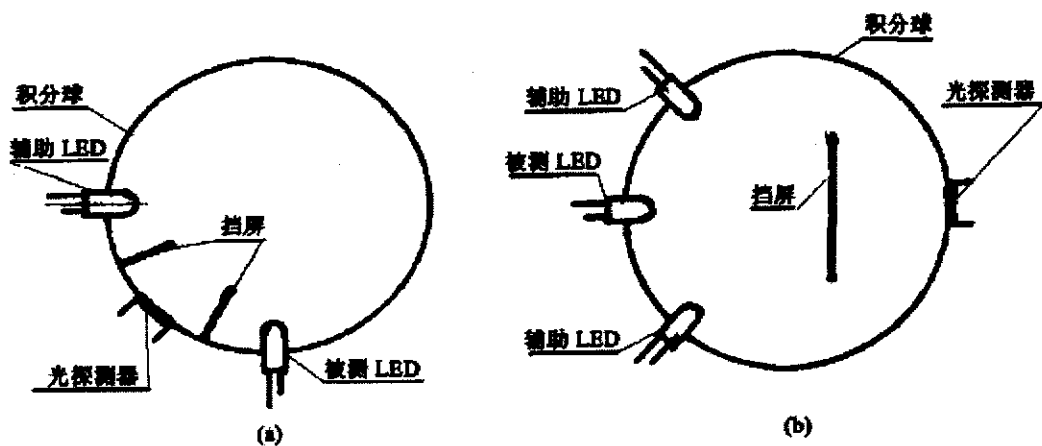


图2-10 自吸收效应的校正

六:光效

光源的发光效率,就是光源所发生的光通量和它所消耗的电功率之比,简称光效。单位为流明/瓦(lm/W)。

第三章 实验用 YAG 荧光粉的制备和特性

3.1 制备方法简介

随着科技的发展和人类对荧光物质认识的进步,荧光粉的制备方法也逐渐趋于多样化^[36],相应的发展出了高温固相法、溶胶-凝胶法,燃烧合成法、共沉淀法、有机高分子网络凝胶法等制备方法^[37]。这些制备方法的基本原理有着显著的差别,适用性也有所不同,具有较强的针对性。

高温固相法:高温固相法是制备荧光粉的基本方法。这种生产工艺相当成熟,在反应条件控制、还原剂使用、助熔剂选择等方面都日趋优化。首先将满足纯度要求的原料按一定比例称量,加入一定量的助熔剂混和至充分均匀。将混和均匀的生料装入柑锅,送入焙烧炉,在一定条件下(温度、还原或保护气氛、反应时间等)进行焙烧得到产品。

有机-无机杂化凝胶法:按 Y: Ce: Al 物质的量之比 2.96: 0.04: 5 取一定体积的硝酸钇、硝酸铈和硝酸铝溶液来配制混合溶液(所配溶液中硝酸盐的总浓度为 $0.16\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 在该溶液中加入一定量的柠檬酸(硝酸钇与柠檬酸的物质的量之比 100: 5),搅拌,于 70°C 水浴中缓慢蒸发,得粘滞性溶液,再于 120°C 烘干得黄色干凝胶。将干凝胶于设定温度下在碳粉保护还原气氛中煅烧 1h,得粉末状荧光粉。

燃烧合成法:最早由前苏联专家研制出来,当时用于研究火箭固体推进剂的燃烧过程,并首次命名为:自蔓延高温合成法(Self-propagating Hightemperature Synthesis)。它是制备无机化合物耐高温材料的新方法。在一个燃烧合成反应中,反应物达到放热反应的点火温度时,以某种方法点燃,随后依靠原料燃烧释放的热量,来维持反应系统处于高温状态,使合成过程独自维持下去,直至反应结束,燃烧产物即目的产物。西南科技大学材料学院的周传仓^[38]等人,采用燃烧合成法制备出了 Eu^{3+} , Dy^{3+} 掺杂的铝酸锶(SrAl_2O_4) 磷光体,反应温度(600°C)较高温合成法(1000°C 以上)低,反应速度快(几十秒),反应产物蓬松多孔,容易研磨。

本文制备的 YAG: Ce^{3+} 均采用高温固相法。基本过程为:按化学计量比例称取氧化钇,氧化铝,氧化铈,和适量的助熔剂混和,放入行星球磨机研磨 90 分钟后,放入小坩埚,再将小坩埚放入盛有活性炭粒的大坩埚中,将大坩埚置于马福炉内,设置合适的升温程序,在碳还原气氛下高温烧结 12 小时,烧结产物冷却后,再经过行星球磨机粉碎、研磨,用 120 目筛子筛去较大颗粒,用稀硝酸洗涤,除去剩余的助熔剂,用恒温烘箱烘干 12 小时,即得到 YAG: Ce^{3+} 黄色荧光粉。

3.2 实验

3.2.1 样品的制备

本文实验用荧光粉是由固相反应法合成。按照精确的化学配比,称取氧化钇(Y_2O_3 ,99.99%)、氧化铝(Al_2O_3 ,99.99%)、氧化铈(CeO_2 ,99.99%),同时加入 NH_4F (99.9%) 来促进化学反应。在不加助熔剂的条件下,我们在 $1500\sim 1600\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下制备了 $\text{Y}_{3-x}\text{Ce}_x\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 样品。而加助熔剂后,样品的合成温度为 $1300\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$,合成的时间都为 4 小时。为获得较好亮度,部分样品则是以 NH_4F 为助熔剂, BaF_2 或者 MgF_2 为电荷补偿剂进行共掺合成, x 值都定为 0.3。所有样品中助熔剂的含量约为 5wt.%,电荷补偿剂的含量都固定为 10at.%,每种样品合成前的总重量都为 10 g 左右。把称得的样品放入玛瑙研钵内,混合均匀(20 min 左右),得到一致性较好的样品。将混合好的反应物盛入刚玉坩埚中,放入高温反应炉,在碳还原气氛下进行反应。在有 NH_4F 作为助熔剂的情况下,缓缓升温到 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 后恒温一个小时,然后再逐渐升温到 $1300\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$,持续反应四个小时。反应完毕后冷却到室温,碾碎待用。

3.2.2 光谱特性的测试

制得的部分粉末样品在荧光光谱仪(Hitachi F-4500, Japan)上进行激发光谱与发射光谱的测试。样品的测试均在室温下进行,为了把误差降到最低,在测试过程中采用多次测试取平均值的方法。

如图 3-1 所示,是以 460 nm 为激发波长,测得的样品的发射光谱。样品分别为(a) $\text{Y}_{2.6}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.1\text{Ba}^{2+}$; (b) $\text{Y}_{2.6}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.1\text{Mg}^{2+}$; (c) $\text{Y}_{2.7}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 。从图中可以看出,样品都有一个宽的从 500 nm 到 600 nm 的发射带,这正好可以与 GaN 蓝光 LED 芯片匹配生成白光。

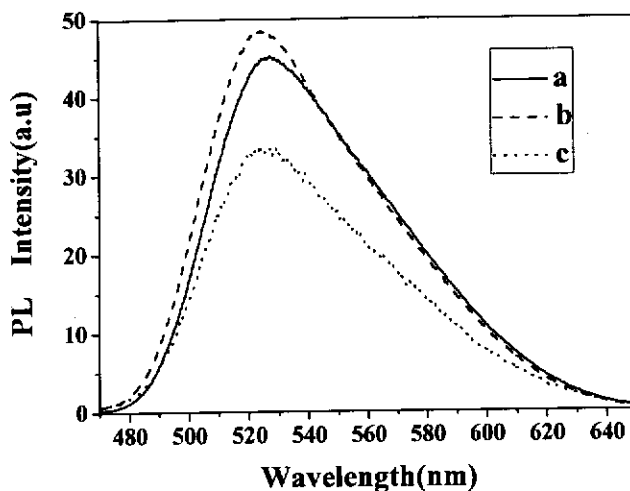


图 3-1 不同样品的发射光谱(460 nm 激发)

(a) $\text{Y}_{2.6}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.1\text{Ba}^{2+}$; (b) $\text{Y}_{2.6}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.1\text{Mg}^{2+}$; (c) $\text{Y}_{2.7}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

以 550 nm 为监测波长, 测得上述样品的激发光谱如图 3-2 所示。从图中得知, 电荷补偿剂的引入并没有使激发光谱的峰位产生明显的移动。 $\text{Y}_{2.6}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.1\text{Ba}^{2+}$ 的激发强度比 $\text{Y}_{2.6}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.1\text{Mg}^{2+}$ 略高。由于 Ce^{3+} 能级的劈裂, 使得 YAG: Ce 有两个宽的激发带, 峰值在 340 nm 和 463 nm 处。尤其是从 400 nm 到 500 nm 的激发带具有更高的强度, 能够与发射波长为 450~480 nm 的 GaN LED 芯片匹配。

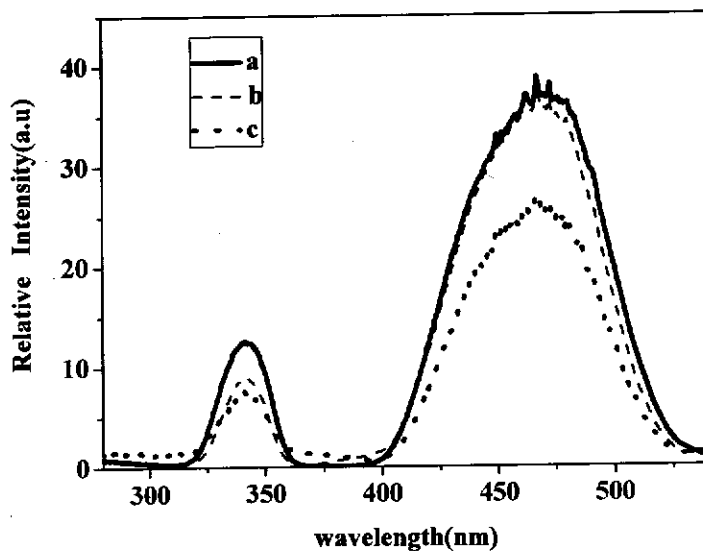


图 3-2 样品的激发光谱(监测波长为 550 nm)

(a) $\text{Y}_{2.6}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.1\text{Ba}^{2+}$; (b) $\text{Y}_{2.6}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}:0.1\text{Mg}^{2+}$; (c) $\text{Y}_{2.7}\text{Ce}_{0.3}\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

第四章 白光 LED 发光效率的相关计算

4.1 视觉函数和光度学

物理学中描述强度和辐射计量单位是反映客观实际规律的一种方法，它与人的主观意识无关，而光度学所要研究的辐射强度和辐射计量单位不仅和客观规律有关，也与人的主观意识相联系，它受人的主观意识(视觉)所限制，因此，光度学所要研究的辐射强度和辐射计量单位是利用人的视觉函数对物理学中辐射强度和辐射计量单位的修正。因此，在介绍光度学之前，我们先应对人的视觉系统有一个初步了解。

4.1.1 人的视觉系统

大部分可见光发光二极管的发光是被人眼所接收，这里我们先对人眼的视觉系统作一个初步了解，特别光强、颜色对人眼的作用进行简要讨论。图 4.1 (a)，给出了人眼的结构示意图，人眼被视网膜所包袱，视网膜是人眼的光敏感部分，图 4-1 (b) 展示了人眼视网膜细胞结构，它包含了视网膜杆细胞，锥面细胞和与

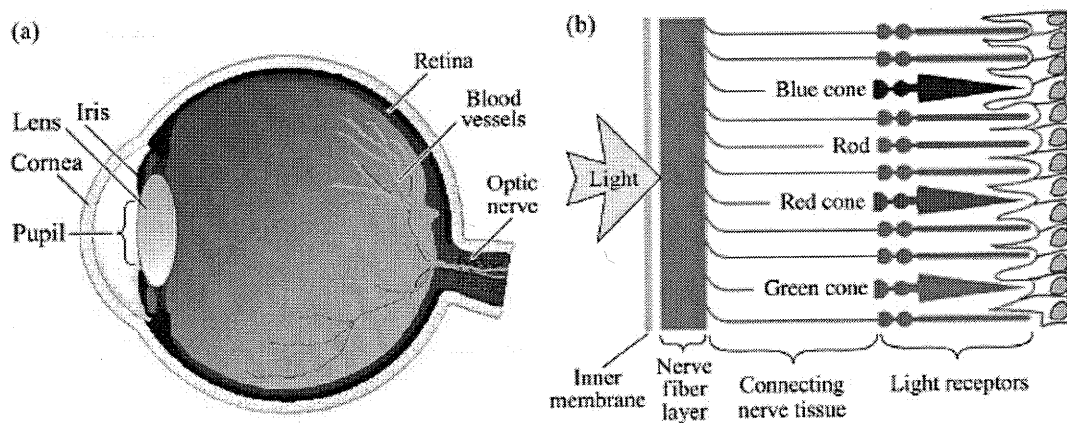


图 4-1 (a)人眼剖面示意图 (b)人眼视网膜示意图

大脑相连的信息传输神经，视网膜杆细胞比视网膜锥面细胞更多，对光更加敏感，视网膜杆细胞对整个可见光谱区敏感，在视网膜内有三种锥面细胞，被称作锥细胞，锥细胞对红、绿、蓝光谱区敏感，锥细胞可以被表示成红、绿、蓝锥细胞。

强光适应视觉主要与明亮环境光水平下人的视觉相关（白天光照环境），主要靠视网膜锥细胞调节，暗光适应视觉主要与暗环境光水平下人的视觉相关（夜

里), 主要靠视网膜杆细胞调节, 视网膜杆细胞对光的敏感程度比视网膜锥细胞高的多, 在暗光环境下, 辨别颜色的视网膜锥细胞受敏感度的限制, 无法识别颜色, 导致人眼在夜间看物体时, 物体失去原有的色彩, 只能显示出不同的灰度水平, 下面主要介绍明亮环境下的视觉规律。

4.1.2 光度学

在物理学里度量辐射强度的单位, 如光子数、光子能量、光功率等等, 这些量和单位是客观存在的, 与人的主观意识(或接受器的性能)无关, 在光度学中并不能适用, 光度学研究的是人眼与光相互作用这个界面的一些性质, 它必须考虑人的视觉函数, 例如: 很强的红外和紫外辐射, 由于人的视觉系统对它们不敏感, 在人眼中无法体现出流明效率。实际上大部分测量系统都是不同范围内的光度学问题, 因为每一种测量, 即使不用人的视觉系统, 也必须采用不同的光电探测器, 每一种光电探测器都有自己的响应曲线, 也就是相应探测器的“视觉函数”, 这里我们只讨论照明中的光度学问题, 也就是说讨论与人眼相关的光度学问题。首先我们先看一下人眼这种探测器的“响应曲线”视觉函数(见图 4.2)。从图 4.2 可以看出人眼对波长为 555nm 的光最为敏感, 在视觉函数中把人眼对 555nm

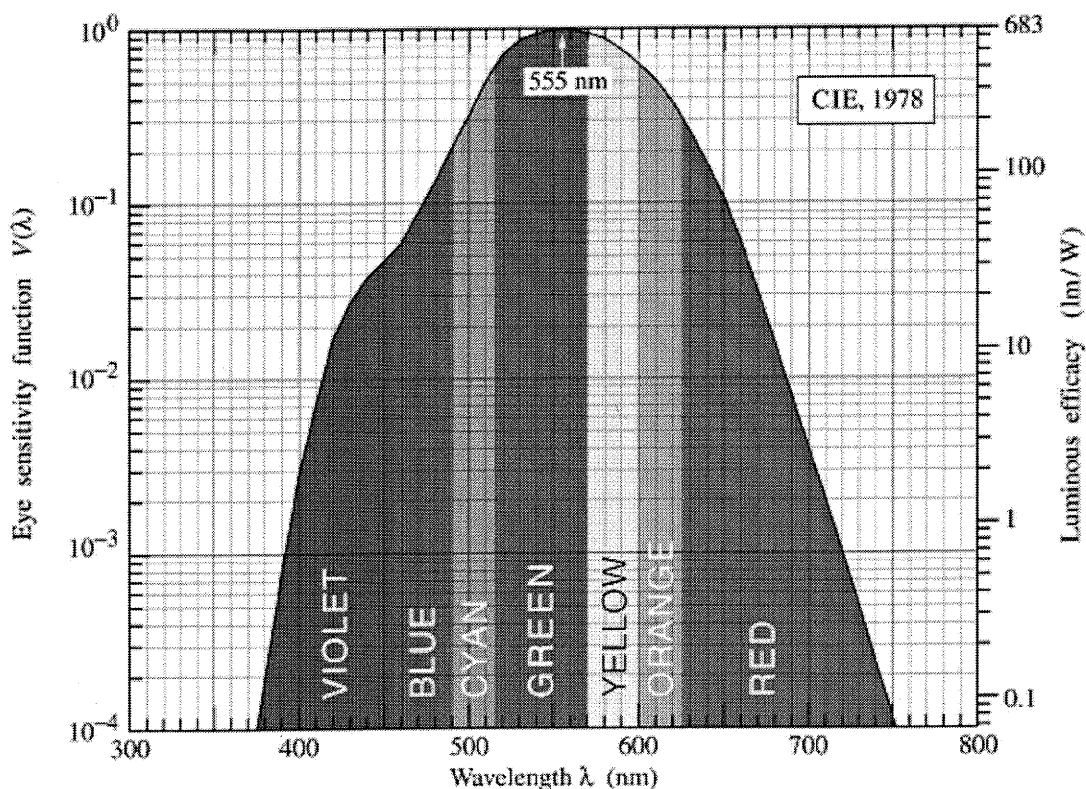


图 4-2 人眼视觉函数 (左坐标); 流明效率 (右坐标)

波长光的敏感度定为 1, 对于功率为 1 瓦、波长为 555nm 的光反映在人眼睛中的光通量为 683lm, 683lm/W 被称为光功当量, 在波长 390-720nm, 人眼敏感度大于 10^{-3} , 人们对波长小于 390nm 和波长大于 720nm 的光也有响应, 但是灵敏度非常低, 因此, 人们通常将波长 390-720nm 之间的光谱区称作可见光谱区, 视觉函数是一个统计结果, 它并不代表每个人的视觉函数都是这样, 但是绝大多数人的视觉函数与图 4.2 类似。

颜色与波长之间的关系是一个渐变的过程, 颜色也只有反映在人的视觉系统才有意义, 颜色和波长之间的对应关系也是通过大量统计后人为规定的, 颜色只是发光二极管行业里对一定波长范围的表述, 只能作为一个参考, 见表 4.1.

表 4-1 颜色与波长之间的对应关系

Color	Wavelength
Ultraviolet	< 390 nm
Violet	390~455 nm
Blue	455~490 nm
Cyan	490~515 nm
Green	515~570 nm
Yellow	570~590 nm
Amber	590~600 nm
Orange	600~625 nm
Red	625~720 nm
Infrared	> 720 nm

下面为几个主要的光度学参量:

流明强度: 计量光源被人眼所观察时呈现的光强度, 流明强度用 Candela 来度量, 一个波长为 555nm 的单色光源, 发射光功率为 1/683 瓦、在一个单位立体角的流明光强度为 1Candela。对于波长为 λ_0 的光来说:

$$\text{流明强度} = \frac{\text{流明}}{\text{单位立体角}} = \frac{1}{683V(\lambda_0)} \frac{\text{光功率}}{\text{单位立体角}} = \text{Candela} \quad (4-1)$$

流明通量: 计量光源被人眼所观察时呈现的光功率, 流明通量的单位用 Lumen 来度量, 一个波长为 555nm 的单色光源, 发射光功率为 1/683 瓦、光源的流明通量为 1 Lumen。对于波长为 λ 的光源来说:

$$\text{流明通量}(\lambda_0) = \frac{\text{光功率}}{683V(\lambda_0)} = \text{Lumen} \quad (4-2)$$

照度: 照射在单位面积上流明通量, 照度采用 Lux 来度量($\text{Lux} = \text{Lm/m}^2$)。

$$\text{照度} = \frac{\text{流明通量}}{\text{面积}} = \text{Lux} \quad (4-3)$$

不同环境条件下的照度列于表 4.2 中。

表 4-2 不同环境下的典型照度值

Illumination condition	Illuminance
Full moon	1 lux
Street lighting	10 lux
Home lighting	30~300 lux
Office desk lighting	100~1,000 lux
Surgery lighting	10,000 lux
Direct sunlight	100,000 lux

要想正确反映光度学计量，我们必须利用人类视觉函数对辐射计量进行修正，如果我们知道辐射光功率分布 $P(\lambda)$ ，我们可以计算出流明通量分布规律：

$$\Phi(\lambda)d\lambda = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (4-4)$$

我们也可以计算出总流明通量：

$$\Phi_{\text{lum}} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda \quad (4-5)$$

其中 $P(\lambda)$ 是光功率谱，也就是每单位波长光发射功率，683 lm/W 是标准化因子。光源总的光发射功率可以被给出：

$$P = \int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda \quad (4-6)$$

光辐射的流明效率是光的流明光通与光源总的发射功率之比：

$$\eta_e = \frac{\Phi_{lum}}{P} = \frac{683 \frac{lm}{w} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda} \left(\frac{lm}{w} \right) \quad (4-7)$$

这个流明效率 η_e 。为人类视觉系统对不同波段的光敏感度而造成人类主观反映的降低。这个流明效率是人类视觉系统造成的。

光源流明效率:是指输入每瓦电功率所产生的流明光通, 计量单位也是 lm/W,

$$\eta_p = \frac{\Phi_{lum}}{IV} \left(\frac{lm}{w} \right) \quad (4-8)$$

通常标定光源效率时所用的流明效率都是指 η_e , 表 4.3 列出了各种不同光源的流明效率值。

表 4-3 各种不同光源的流明效率

Light source	Luminous efficiency
Edison's first light bulb	1.4 lm/W
Tungsten filament light bulb	15~20 lm/W
Quartz halogen light bulb	20~25 lm/W
Flourescent light tube and compact bulb	50~80 lm/W
Mercury vapor light bulb	50~60 lm/W
Metal halide light bulb	80~125 lm/W
High-pressure sodium vapor light bulb	100~140 lm/W

可见光发光二极管过去主要用于指示和显示, 未来的发展趋势是向照明领域发展, 无论用在指示、显示还是照明, 它都是被人的视觉系统所感知, 因此, 上述概念对 LED 也是十分重要的。发光二极管的相关概念和解释被列于表 4.4 中。

表 4-4 发光二极管的光度学和量子效率

Figure of merit	Explanation	Unit
Luminous efficacy	Luminous flux per optical unit power	lm/W
Luminous flux efficiency	Luminous flux per input electrical unit power	lm/W
Luminous intensity efficiency	Luminous flux per sr per input electrical unit power	cd/W
Power efficiency	Optical output power per input electrical unit power	%
Internal quantum efficiency	Photons emitted in active region per electron injected	%
External quantum efficiency	Photons emitted from LED per electron injected	%
Extraction efficiency	Escape probability of photons emitted in active region	%

4.1.3 色度学

色匹配函数和色坐标：光能够引起眼球中红、绿、蓝视网膜锥细胞的不同刺激水平，每个人对颜色和流明通量的感知有着细微的差别，对颜色的感知是一个主观的量，它不能被客观测量，因此国际照明委员会(CIE)用色匹配函数和色坐标图将测量颜色标准化^[39]，色匹配函数和色坐标图是一致的，只是两种不同表述方式。CIE 于 1931 年制定色匹配函数示于图 4.3 中，三种色匹配函数^[40] $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$ 分别对应人类视觉系统的红、绿、蓝视网膜锥细胞的敏感响应曲线。彩色光的感知是通过三种视网膜锥细胞的光刺激程度获得的，刺激程度可以使人来判断所有可能的颜色。绿色匹配函数就是人视觉函数 $Y(\lambda) = V(\lambda)$ 。

这里应当注意， $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$ 都是无量纲的量。三种锥细胞刺激程度可以用下式给出：

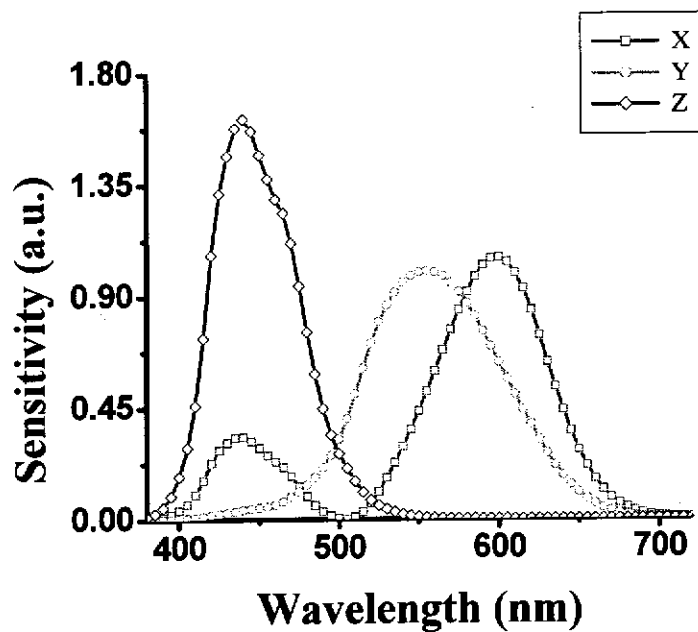


图 4-3 色匹配函数图

$$x = \int_{\lambda} X(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (4-9)$$

$$y = \int_{\lambda} Y(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (4-10)$$

$$z = \int_{\lambda} Z(\lambda)P(\lambda)d\lambda \quad (4-11)$$

这里 x, y, Z 三个刺激值，代表每一个分别对三种视网膜锥细胞的刺激。三个刺激值 x, y, z 的单位是瓦，将积分前面的因子量纲包含进去，则 x, y, Z 将成为无量纲的量。如果采用三个刺激值比率，积分因子和单位将被取消。

色坐标可以通过三个刺激因子和下面的公式来计算：

$$X = \frac{x}{x+y+z} \quad (4-12)$$

$$Y = \frac{y}{x+y+z} \quad (4-13)$$

色坐标是将刺激值用 $x+y+z$ 归一化后给出的值, $z=1-x-y$, 所以它不是独立变量, 在色坐标中可以不包含它。色坐标示于图 4-4, 从色坐标图中我们可以看出, 红色和绿色分别对应 X, Y 值较大, X, Y 在色匹配函数中也对应红色和绿色, 从色匹配函数可以看出, 当 z 刺激值大时呈现出兰色, 因此, 对应的 X, Y 值较小, 接近色坐标的坐标原点。单色光的色坐标落在色坐标图的周边上, 白光

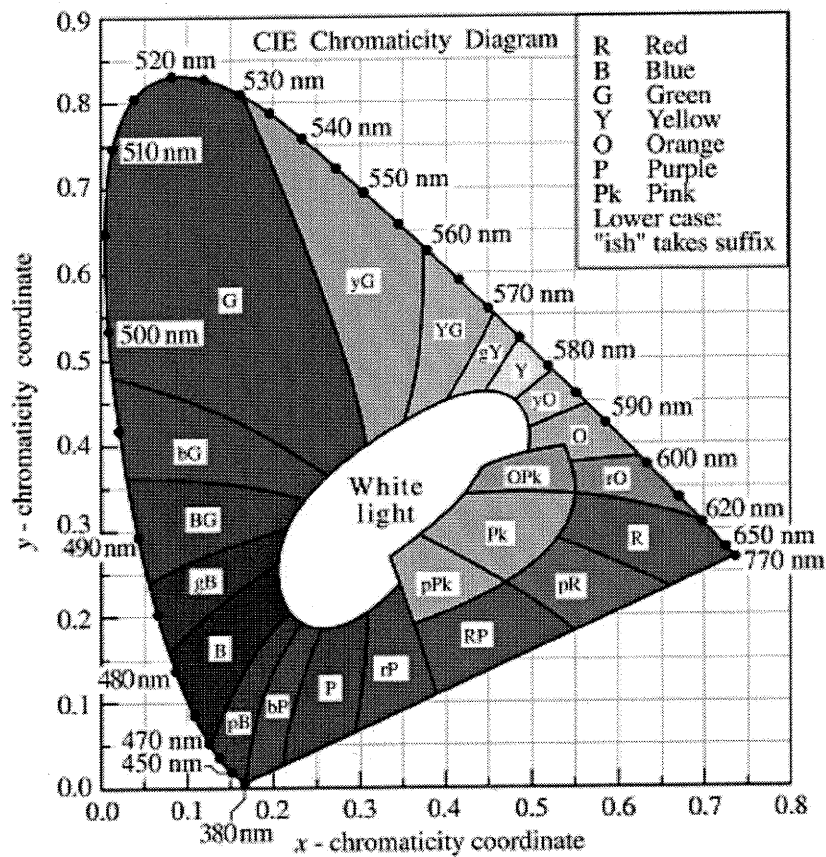


图 4-4 色坐标图

颜色在色坐标图上都可以找到自己的位置。

色纯度: 色纯度是指光的单色性, 单色光源中 $\Delta \lambda \sim 0$, 单色光源的位置都是在色坐标的周边上, 当光谱的线宽加宽对应的色坐标位置向色坐标的中心移动。谱线的线宽越窄色纯度越高, 谱线的线宽越宽色纯度越低, 根据这一原则人们将色纯度量化, 定义一个光源的色纯度是通过光源所在的色坐标位置(a)和色坐标的标准白光点 $X=0.33, Y=0.33$, 连一条直线见(图 4-5), 直线的延长线与色坐标图的边缘交于(b)点, 色坐标位置在(a)点的光源的色纯度为:

$$Color \cdot purity = \frac{ca}{cb} \frac{\sqrt{(X_a - 0.33)^2 + (Y_a - 0.33)^2}}{\sqrt{(X_b - 0.33)^2 + (Y_b - 0.33)^2}} \quad (4-14)$$

色坐标边缘的(b)点对应一个波长为 520nm 单色光的色坐标位置, 因此, 称光源的主波长为 520nm, 色坐标位置为 X_a, Y_a 。图 4-5 中给出了几种典型发光二极管色坐标位置。

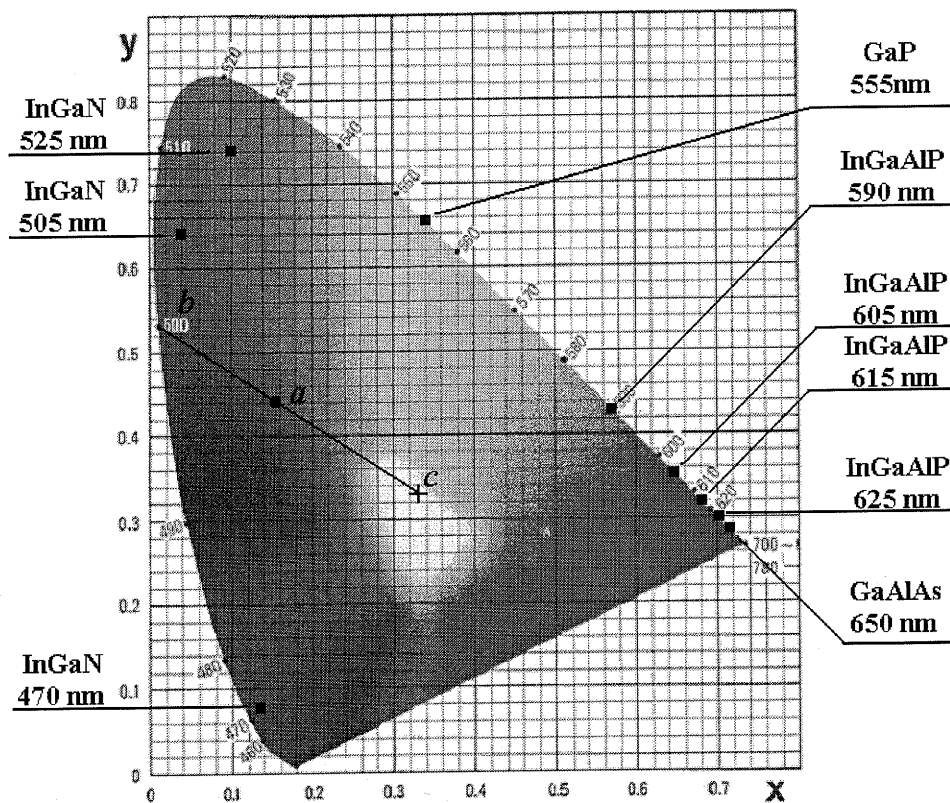


图 4-5 发光二极管在色坐标图中的位置

色温: 色温的概念来自于黑体辐射, 只有接近于黑体辐射的发光体讨论色温才有意义, 对应一个具体光源来说, 它的色坐标位置只有接近色坐标中的 Planck 轨迹, 这时讨论色温才有意义, 色坐标中的 Planck 轨迹是不同色温的黑体辐射发光体的色坐标位置在色坐标图上形成的一条曲线, 人们把这条曲线称作 Planck 轨迹。见图 4-6

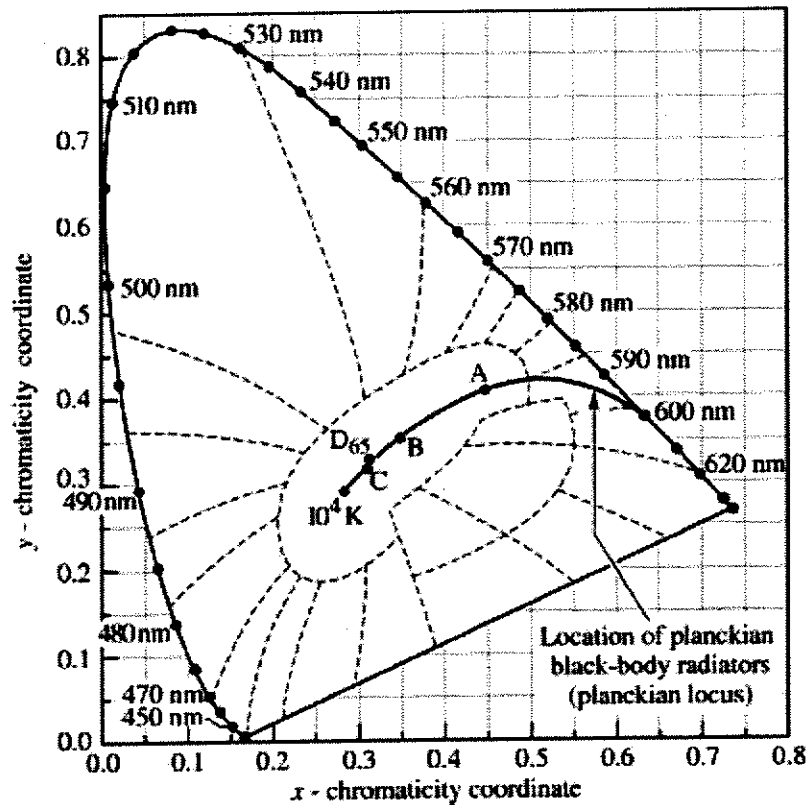


图 4-6 色坐标图中的 Planck 轨迹

显色指数：显色指数(CRI)也是白色照明光源的一个重要指标，它是用来测量光源照到被照射物体上面，还原被照射物体所有颜色能力的指标。当光源被用于照明时，物体的色还原非常重要，因此，要求光源的显色性好，如果光源用于指示灯、显示，这样的光源显色性就显得不是很重要。一个被测光源的色还原能力是通过对被测光源和参考光源计算出来的。用来计算显色指数的参考光源通常是一个具有同样相关色温的 Planck 黑体发射体，或一个标准发光体。国际照明委员会(CIE)推荐(CIE1995)参考光源应是 Planck 黑体辐射体^[41]，黑体温度为光源相关色温。定义参考光源具有理想的色还原特性，它的显色指数为 CRI=100，发光体不同于选择的参考光源，它的显色指数小于 100。但是我们必须注意显色指数(CRI)的计算依赖于标准光源的选择，当对比不同光源的 CRI 时，参考光源的选择是非常重要的。石英卤素灯是人造光源中显色性最好的光源之一，这种光源主要被用于对显色性要求比较高的场所，如：博物馆、艺术馆等等，石英卤素灯的缺点是效率低、能耗大。不同光源的显色指数被列于表 4-5。

表 4-5 各种光源的显色指数

光 源	显色指数
太阳光	100
石英卤素钨丝白炽灯	100
钨丝白炽灯	100
荧光灯	60~85
三色白光 LED	60~85
荧光粉转换白光 LED	55~85
宽带双色白光 LED	10~60
覆盖荧光粉的汞蒸汽灯	50
汞蒸汽灯	33
低、高压钠蒸汽灯	10~22
绿单色光灯	-50

4.2 光通量变化大小的计算

4.2.1 光谱光视效率及流明效率

从辐射度学角度,光源的辐射通量表示以辐射形式发射,传输或接收的功率,即单位时间内光源发出的全部能量。而在光度学研究中,先引入了光谱光视效率函数 $V(\lambda)$ 来表示视觉灵敏度的光谱特性,其后再研究包括光通量在内的几种光度量。规定人眼最灵敏的波长 $\lambda = 555\text{nm}$, 所对应的 $V(555)=1$ 。设光源的辐射通量为 Φ_e , 人眼感觉到的光通量为 Φ_v , 按照 CIE 标准光度观察者的视觉特性 $[V(\lambda)]$ 来评价的辐通量 Φ_e 即为光通量 Φ_v 。辐通量与光通量的关系式为:

$$\Phi_v = K_m * \int \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (4-15)$$

$V(\lambda)$ 为明视觉光谱光效率函数, K_m 为明视觉的最大光谱光效率函数。按国际实用温标 IPTS-68 的理论计算值, $K_m = 683\text{lm/w}$ 。

对于由电源驱动的电光源,流明效率即为输出光通量与输入电功率之比,通

常也称为电光源的电光转换效率,表示为 η_L ,单位也是 lm/w。输入电功率可由工作电流、电压的乘积得到。输出光通量可由相对光谱功率分布 $E(\lambda)$ 得到,公式如下:

$$\Phi_v = K_m * \int E(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (4-16)$$

4.2.2 光通量变化大小的计算

本计算所用参考白光二极管由蓝光芯片+黄色荧光粉的方法制得,并对其光谱进行了归一化,如图4-7所示。其色坐标为(0.325, 0.332),显色指数为81.5,

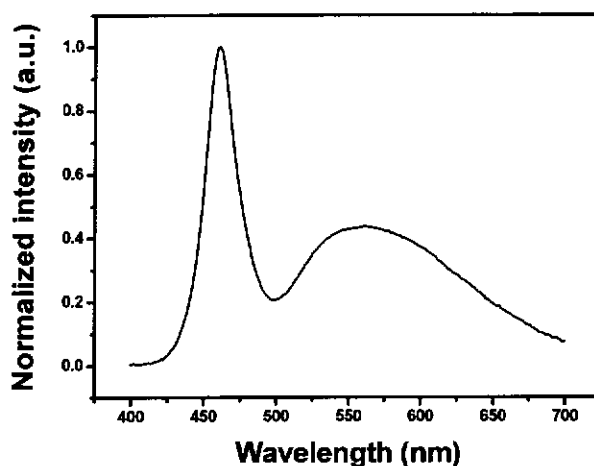


图4-7 归一化的白光光谱图

色温为 5914K, 各种指标接近标准白光 LED 光谱。由于白光二极管的光通量受色坐标位置的影响,以图 1 所示光谱作为基础,在保持总光子数不变的情况下,改变图 4-7 中两个发射峰的相对发光强度,在 $(0.33 \pm 0.05, 0.33 \pm 0.05)$ 范围内,计算出获得最大及最小光通量的色坐标位置。具体计算内容如下:

假设荧光粉的量子效率为100%,图4-7所示的光谱对应的光通量为100 lm,我们可以得到光通量为100 lm时对应的实际光谱 $\psi'(\lambda)$,同时由公式(4-17)也可以得到光通量为100 lm时对应的总光子数 N_c ,

$$N_c = \int \frac{\psi'(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda \quad (4-17)$$

通过高斯拟合将图4-7所示光谱的蓝光芯片发光和荧光粉发光分开,用 $\psi_1(\lambda)$ 表示剩余蓝光的光谱(见图4-8(a)),用 $\psi_2(\lambda)$ 表示荧光粉的光谱(见图4-8(b)),则 $\psi'(\lambda) = \psi_1(\lambda) + \psi_2(\lambda)$ 。

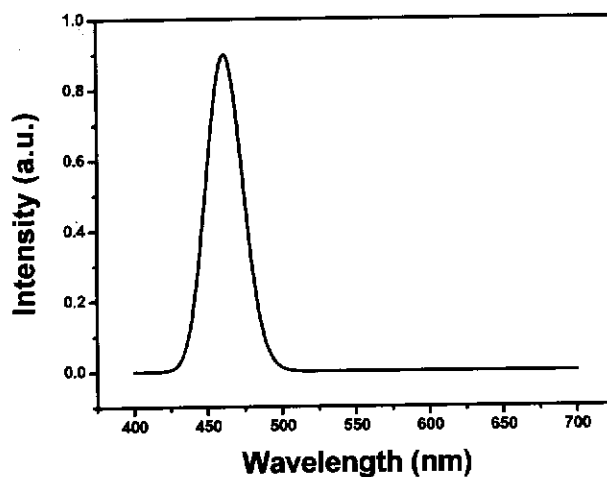


图4-8 (a):剩余的蓝光光谱

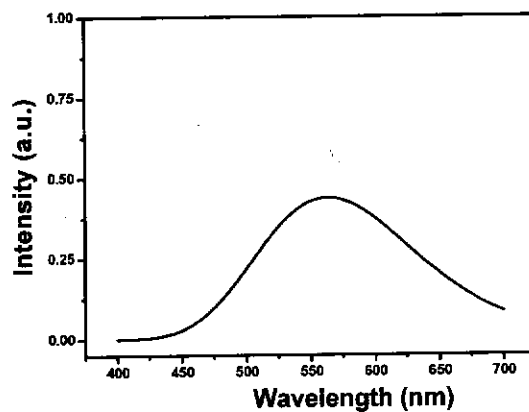


图4-8 (b):荧光粉光谱

在同样蓝光芯片和荧光粉情况下,保持调整后白光光谱的总光子数与 $\psi'(\lambda)$

的总光子数 N_c 相等, 通过 c_1 , c_2 的比值大小调整两部分的相对强度, 可得调整后的白光光谱为 $\psi(\lambda) = c_1\psi_1(\lambda) + c_2\psi_2(\lambda)$ 。由

$$\begin{cases} N_c = \int \frac{\psi(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda = c_1 \int \frac{\psi_1(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda + c_2 \int \frac{\psi_2(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda = \int \frac{\psi'(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda & (4-18) \\ \Phi_v = K_m * \int \psi(\lambda) * V(\lambda) d\lambda & (4-19) \end{cases}$$

$$\text{得到一个关系式 } \Phi_v = 20.62 + \frac{317.80}{c_1/c_2 + 2.93} \quad (\text{lm}) \quad (4-20)$$

由关系式(4-20)可知, Φ_v 是 c_1/c_2 的单调减函数, 若想使得 Φ_v 值变大, c_1/c_2 的比值越小越好。 c_1/c_2 的比值范围可由我们所限定的白光色坐标范围 $X, Y = [0.33, 0.33](\pm 0.05)$ 决定。
色坐标的计算公式如下:

$$X' = \int \bar{x}(\lambda) * \psi(\lambda) d\lambda = c_1 \int \bar{x}(\lambda) * \psi_1(\lambda) d\lambda + c_2 \int \bar{x}(\lambda) * \psi_2(\lambda) d\lambda \quad (4-21)$$

$$Y' = \int \bar{y}(\lambda) * \psi(\lambda) d\lambda = c_1 \int \bar{y}(\lambda) * \psi_1(\lambda) d\lambda + c_2 \int \bar{y}(\lambda) * \psi_2(\lambda) d\lambda \quad (4-22)$$

$$Z' = \int \bar{z}(\lambda) * \psi(\lambda) d\lambda = c_1 \int \bar{z}(\lambda) * \psi_1(\lambda) d\lambda + c_2 \int \bar{z}(\lambda) * \psi_2(\lambda) d\lambda \quad (4-23)$$

$$X = \frac{X'}{X' + Y' + Z'} \quad (4-24)$$

$$Y = \frac{Y'}{X' + Y' + Z'} \quad (4-25)$$

其中 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 为已知标准观察者的光谱三刺激值。

由式(4-21)~(4-25)组成的方程式组以及所限定的白光色坐标范围 $X, Y = [0.33, 0.33](\pm 0.05)$, 可求得 c_1/c_2 的比值范围以及不同的比值所对应的色坐标位置, 将 c_1/c_2 的比值代入关系式(4-20)可求得不同色坐标位置所对应的光

通量 Φ_v 的大小。

通过式(4-21)~(4-25)计算得 c_1/c_2 的比值范围为0.548~1.429。因此, 将 c_1/c_2 的比值代入式(4-20)可知, 当 c_1/c_2 取0.548时光通量的值最大, 此时对应的色坐标为 $X, Y=(0.35, 0.38)$, 而当 c_1/c_2 取1.429时光通量的值最小, 此时对应的色坐标为 $X, Y=(0.29, 0.28)$ 。当 c_1/c_2 分别为0.548和1.429时, 求得对应的光通量分别为

$$\Phi_{v,0.548} = 112.0 \text{ lm} \quad \Phi_{v,1.429} = 93.5 \text{ lm}$$

光通量最大值与最小值的差为 18.5 lm, 相对于 100 lm 时的光通量变化达 18.5%。光通量为最大值、最小值以及 100 lm 时的归一化光谱图如图 4-9 所示。由图中归一化的光谱可看出, 随着蓝光芯片和荧光粉相对发光强度的变化, 光通量也随之变化。由于此处, 假设荧光粉的量子效率为 100%, 则蓝光芯片和荧光粉相对发光强度的变化决定于荧光粉的涂覆量。随着荧光粉涂覆量的增加即荧光粉相对发光强度的增强, 光通量由 93.5 lm 增大到 112.0 lm, 而对应的色坐标则由 $X, Y=(0.29, 0.28)$ 趋向于 $X, Y=(0.35, 0.38)$ 。由以上的计算可知, 在白光 LED 的

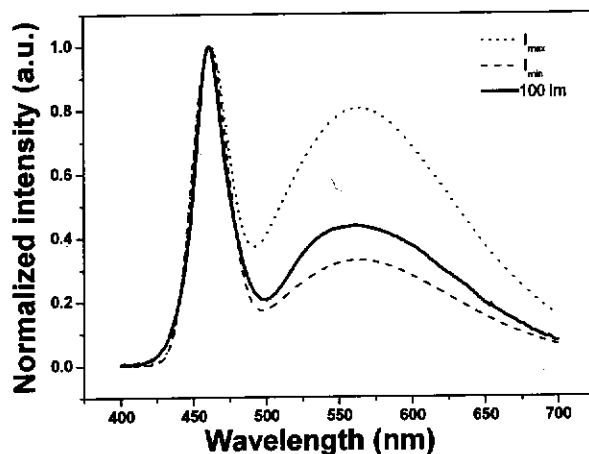


图4-9 白光光通量最大、最小以及为100流明时的归一化光谱图

实际生产中, 如果我们想要得到更高的光通量或者流明效率, 而对于白光 LED 的其它参数可不作重点考虑时, 我们应该控制荧光粉的涂覆量, 尽量使得白光 LED

的色坐标向 $X, Y=(0.35, 0.38)$ 靠近。值得注意的是, 此处有关光通量最值的计算, 是以图 1 的参考白光为基础的, 而此参考白光由实验测得。因此, 如果所用参考白光由不同于图 1 的蓝光芯片和荧光粉制得, 计算所得光通量的最大值也将发生变化。由于对于其它不同的蓝光芯片和荧光粉, 光通量的最值均可用我们所提出的计算方法得到, 因此本文未对其进行详细的计算和讨论。

4.2.3 实验

为进一步验证以上理论计算方法, 我们采用蓝光 LED+黄光荧光粉的方法, 制备了一系列白光 LED。样品采用 Cree 公司的蓝光芯片结合我们自制的 YAG:Ce 荧光粉制得。并对不同样品的色坐标及其光通量进行了测量, 实验结果如表 4-6 所示。

表4.6 不同样品的光通量和色坐标 ($I=20\text{mA}$)

样品号	色坐标		光通量 (lm)
	X	Y	
1	0.291	0.281	668
2	0.295	0.281	744
3	0.298	0.281	745
4	0.296	0.288	761
5	0.297	0.289	793
6	0.307	0.294	810
7	0.326	0.324	861
8	0.338	0.345	867
9	0.341	0.348	882
10	0.354	0.369	890
11	0.355	0.379	910

由表 4.6 可知, 随着色坐标由 $(0.291, 0.281)$ 趋向于 $(0.355, 0.379)$, 光通量的值逐渐增加, 此趋势与计算结果基本一致。样品 1 与样品 11 的光通量差为 242 lm, 此差距相对于样品 7 的光通量变化达 28.1%, 由此可见, 在实际的白光 LED 制作中, 白光范围 $(0.33 \pm 0.05, 0.33 \pm 0.05)$ 内, 光通量的变化更为明显。所以要获得更高光通量的白光 LED, 对 LED 色坐标位置的控制就显得更为重要。影响光通量变化大小的主要因素可归纳为以下几点: 一, 在理论计算中假设荧光粉量子转换效率为 100%, 而实际实验中量子效率不可能达到 100%; 二, 所用蓝光芯片种类不同以及同批次蓝光芯片也存在固有差别; 三, 实验误差所带

来的影响。

4.2.4 结论

以色度学原理为基础,提出了一种色坐标与光通量关系的计算方法,并对不同色坐标的白光进行了理论上的计算,光通量的最大值和最小值对应的色坐标位置分别为 $X, Y=(0.35, 0.38)$ 和 $X, Y=(0.29, 0.28)$,对应的光通量分别为112.0 lm和93.5 lm,光通量的差距达18.5 %。这一结果与实验结果趋势基本一致,随着荧光粉涂层厚度的增加,色坐标值增大,光通量增加。本计算结果可因采用的白光光谱的不同而存在差异,对于不同的光谱,以上变量均可采用我们所提出的方法求得。

4.3 蓝光功率效率的计算

4.3.1 计算内容

以100 lm/w作为一个参考,我们主要计算了,要实现此目标,蓝光功率应至少所达到的水平。以下为主要计算过程,假设各种转换过程中没有光子损耗,即量子转换效率为100 %,且其流明效率为100 lm/w。归一化的白光光谱如图4-10所示,其色坐标为 $(0.325, 0.332)$,色温为5914k。对白光光谱的实际光通量进行调整,使其达到100lm。

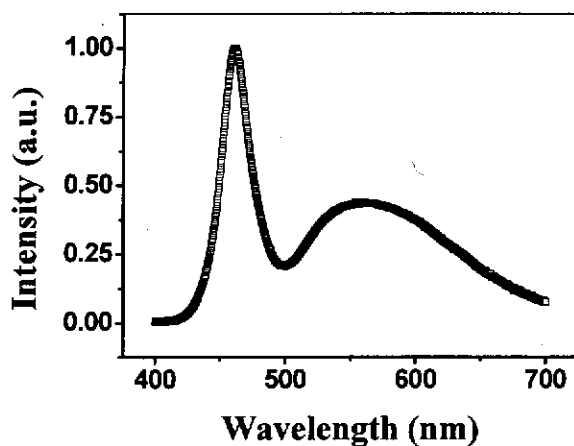


图 4-10 白光光谱

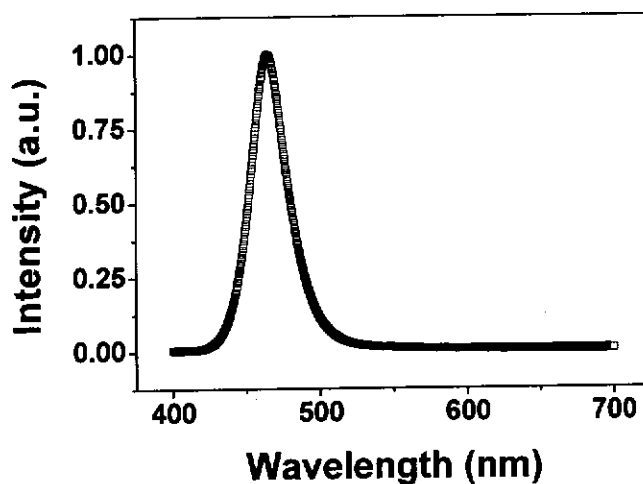


图 4-11 蓝光光谱

根据蓝光转换为白光的量子转换效率为100%，对蓝光光谱进行调整，如图4-11。然后根据下面公式计算调整后的蓝光功率，得到理想情况下的蓝光功率 W_b 为：

$$W_b = \int \psi'_b(\lambda) d\lambda = 0.382 w \quad (4-26)$$

其中 $\psi'_b(\lambda)$ 为调整后的蓝光光谱。

此时蓝光的光功率效率为：

$$W_b/w = 0.388w/w = 38.2\% \quad (4-27)$$

4.3.2 结论

从以上计算结果可以看出，在量子转换效率为100%的理想情况下，蓝光芯片至少要达到0.382w或者说至少要达到38.2%的转换效率才能实现流明效率为100lm/w的白光。图4-12给出了，对于此类芯片，要实现不同的流明效率所需蓝光芯片的功率效率。

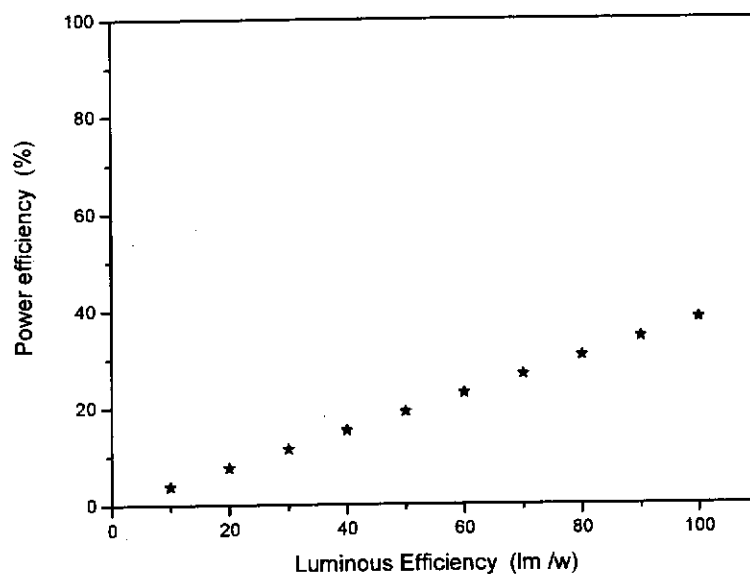


图 4-12 实现不同流明效率时所需蓝光芯片的功率转换效率

4.4 不同色温 LED 的流明效率

在此实验中，我们采用相同的蓝光芯片和荧光粉，并通过控制荧光粉与环氧树脂的比例来实现不同色温的二极管。对所得不同色温得二极管进行了测量，其结果如图 4-13 所示。

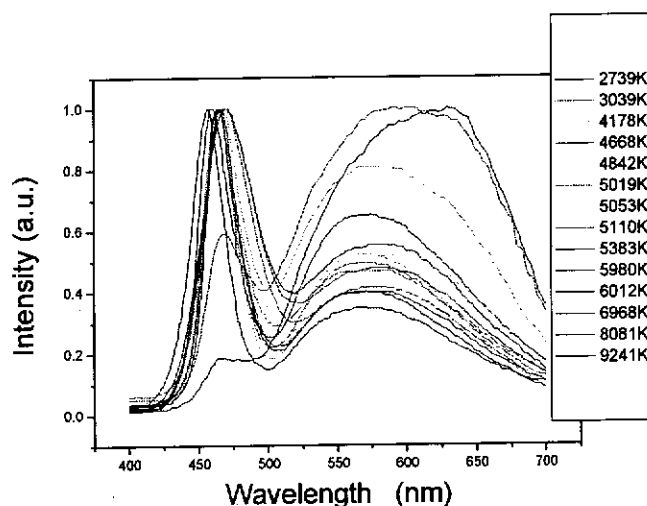


图 4-13 不同色温 LED 的归一化光谱图

采用第 4.3 节所提出得功率计算的方法, 对图 4-13 中不同色温的二极管进行了相同的计算, 计算结果如表 4-7 所示。为了能更准确的理解表 4-7 的计算结果, 我们从另一个角度对以上结果进行了整理, 如表 4-8 所示。在表 4-8 中, 以同样的理想条件为前提, 即量子转换效率为 100 %, 流明效率为 100 lm/w, 我们让蓝光芯片的功率均为 100 mw, 这样我们就可以得到, 在相同功率的蓝光芯片情况下, 不同色温的二极管所能达到的最大光通量分别为多少。

表 4-7 不同色温 LED 的功率效率(假设各不同色温 LED 的流明效率为 100 lm/w)

	CCT (k)	Power efficiency (%)
1	2739	38.19
2	3039	37.92
3	4178	37.68
4	4668	37.92
5	4842	38.37
6	5019	39.52
7	5053	40.08
8	5110	40.1
9	5383	39.88

10	5980	41.07
11	6012	40.77
12	6968	41.63
13	8081	42.66
14	9241	51.67

表 4-8 不同色温 LED 的最大光通量（所用蓝光芯片的功率为 100mw）

	CCT (k)	Luminous flux (lm)
1	2739	26.18
2	3039	26.37
3	4178	26.54
4	4668	26.37
5	4842	26.06
6	5019	25.3
7	5053	24.95
8	5110	24.94
9	5383	25.08
10	5980	24.35
11	6012	24.53
12	6968	24.02
13	8081	23.44
14	9241	19.35

将表 4-8 的结果绘于图 4-14 并通过高斯公式对其进行了拟合。从拟合的曲线可以看出，曲线在 3554k 存在一个峰值，由此我们推断，对于相同的蓝光芯片及荧光粉，以及在相同的假设条件下，必存在某一色温使得此色温时的光通量最大。即在此色温时，能实现此类蓝光芯片与荧光粉结合所能实现的光通量的极限值。

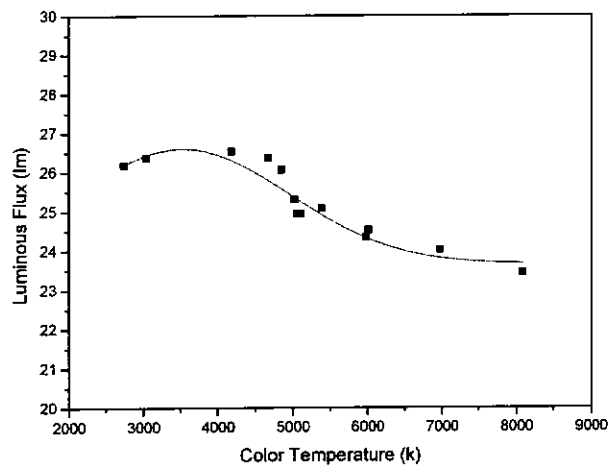


图 4-14 不同色温 LED 的最大光通量

为了验证以上拟合曲线趋势的正确性，我们在现有的实际实验条件下，做了另一组实验。实验结果及其拟合曲线如图 4-15 所示。不同色温的 LED 采用同一圆片上的蓝光芯片和相同的荧光粉制成，光通量在同一电流（20ma）情况下测得。由图 4-15 可以看出，拟合曲线的峰值在 4465k，此拟合曲线的趋势与图 4-14 理想情况下得到的拟合曲线的趋势相一致。峰值的不同，主要由在制作 LED 的过程中所使用的蓝光芯片和荧光粉的不同所引起。其它因素，如人为的操作，环境的影响，以及所用仪器的精度等也可对峰值产生影响。

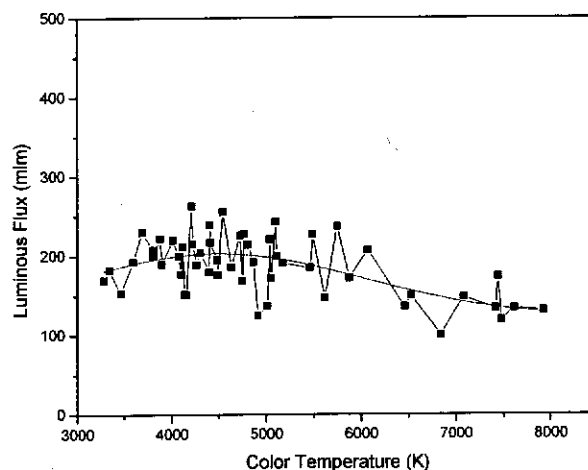


图 4-15 不同色温 LED 的光通量及其高斯拟合曲线

4.5 理论极值的计算

4.5.1 计算内容

现在大家都在预计白光LED的发展, 及其发展到怎样的一个水平, 也就是发光效率会达到多少。能否超过现有的光源从而进入一般照明领域, 或者预期进展的速度怎么样, 白光LED替代现有光源的可能性如何, 这些问题都是业内人士普遍关心的热点问题。在很长一段时间里, 我们听到了各种各样的信息, 关于LED白光可能达到的光效就有几种说法, 有约180 lm/w的, 也有大于200 lm/w甚至大于300 lm/w的说法都有。至于何时能达到或超过现有光源的发光效率的说法更是众说纷纭。在这里, 我们针对于此进行了具体的计算, 估算出了白光LED所能达到的理论极值。具体内容如下:

首先, 计算归一化的白光光谱(如图4-16)的功率值, 将其调整到1w, 并计算此时的光通量值 Φ :

$$\text{功率的计算: } 1 = a \int_{400}^{700} \phi_w(\lambda) d\lambda \quad (4-28)$$

$$\text{光通量: } \Phi = k_m \int_{400}^{700} \phi_w(\lambda) * V(\lambda) d\lambda = 298.74 \text{ lm} \quad (4-29)$$

其中, a 值为调整系数, $\phi_w(\lambda)$ 为调整后的白光光谱

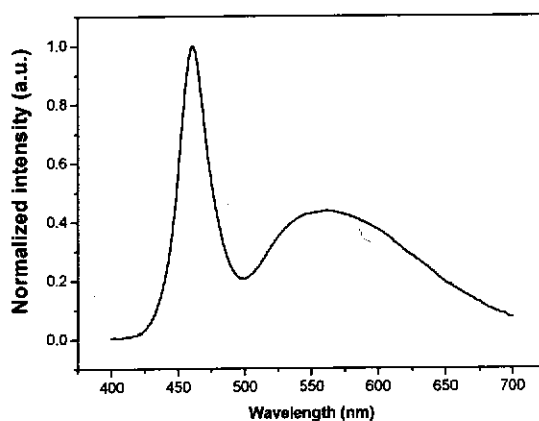


图 4-16 归一化的白光光谱图

此时假设黄光粉的量子效率为1, 白光光子数应等于蓝光光子数, 归一化蓝光光谱图如图4-17所示, 则可得到光子数的具体值:

$$N = \int_{400}^{700} \frac{\phi_w(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda = \int_{400}^{700} \frac{\phi_b(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda \quad (4-30)$$

$$N \cdot hc = a \int_{400}^{700} \phi_w(\lambda) \cdot \lambda d\lambda = 540.45326 \quad (4-31)$$

$$N = 540.45326/(hc) = \frac{540.45326}{6.626 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8} = 2.72 \times 10^{18} \quad (4-32)$$

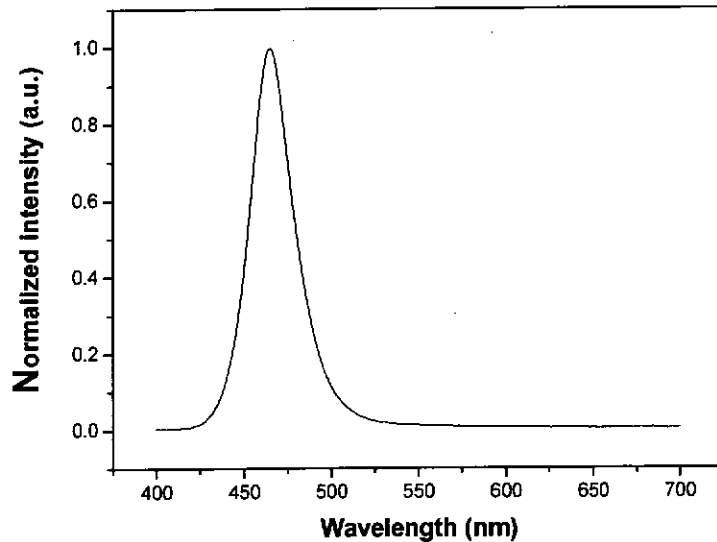


图 4-17 归一化的蓝光光谱图

理想情况下, 注入一个电子—空穴对产生一个蓝光光子, 荧光粉的量子效率为 1, 因此, 注入的电子—空穴对数等于白光光子数。注入电子—空穴对需要的电功率可求得(白光 LED 工作电压 3.2V)。

通过以下关系式可以计算出白光 LED 每辐射一瓦的光功率所需的电功率。

$$W = 3.2eVN_w/t = 1.38 \text{ w} \quad (4-33)$$

其中 e 为电子电量, V 为工作电压。

根据上述计算已得到的 1W 白光辐射光功率给出的光通量值及所需的电功率即可得到理想情况下的极限流明效率值。

流明效率 = LED 的光通量 / 外加耗电功率 W

$$1.38W \Rightarrow 1W \Leftarrow 298.7lm \quad (4-34)$$

图 4-16 所示的发光光谱对应的白光 LED 对应于电—光转换的极限流明效率

为 216.4 lm/W。

进一步我们可计算得此时蓝光光谱功率的值：

$$\int_{400}^{700} \phi_b(\lambda) d\lambda = b \int_{400}^{700} \phi_b(\lambda) d\lambda$$

$$= \frac{a \int_{400}^{700} \phi_w(\lambda) * \lambda d\lambda}{\int_{400}^{700} \phi_b(\lambda) * \lambda d\lambda} \cdot \int_{400}^{700} \phi_b(\lambda) d\lambda = 1.143 \quad (4-35)$$

4.5.2 结论

通过图 4-16 所示的白光光谱图计算得到，光功率为 1 w 的白光的光通量为 298.74 lm。由于，白光是由蓝光通过荧光粉转换实现白光的，因此，荧光粉转换过程是下转换过程，即便荧光粉量子效率为 1，下转换过程中的能量损失是不可避免的，光功率为 1w 的白光需要蓝光的光功率为 1.143 w。电子注入过程中，我们假定芯片的外量子效率为 1，工作电压为 3.2V，电子注入转换成蓝光光子，能量不可避免要有些损失，综合计算得到白光 LED 流明效率的极限值为 216.4 lm/w。根据发光光谱的不同，计算所得流明效率极值有细小差别。根据美国能源部计划提供的可能达到的目标水平（如图 4-18）为外量子效率达到 81%，如果外量子效率达到 81%，我们推算的流明效率可以达到 157.8 lm/W，这一结果与美国能源部 2007 年提出的 160 lm/w 相符合。

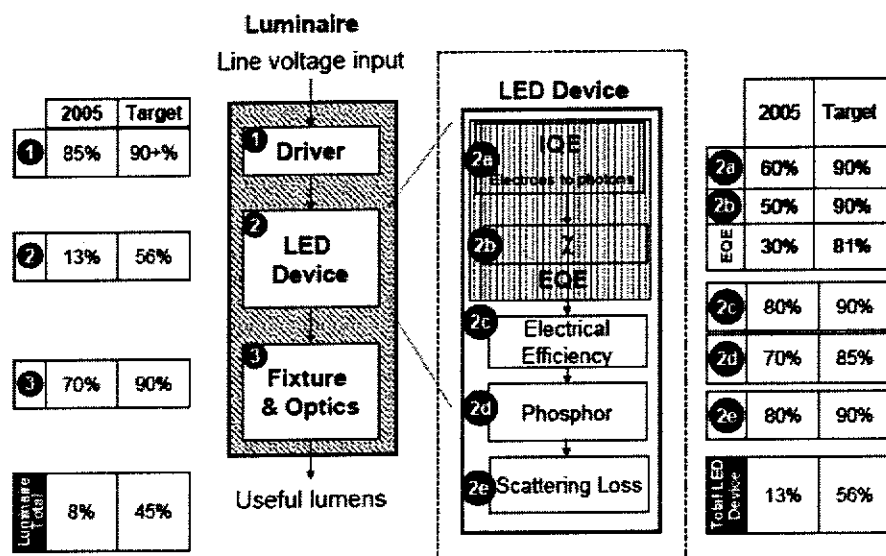


图 4-18. 荧光粉转换白光 LED 所能达到的目标效率与 2005 年效率水平。

第五章 结论

本文在基于发光学, 色度学, 光谱学等理论的基础上, 针对白光LED的发光效率提出了关于白光LED的光通量变化, 蓝光功率效率等相关内容的理论推导方法。在理论结果基础上也进行了相应的实验, 对两者进行了相应的比较和分析。以下是对本文进行的理论推导所得主要结论的总结:

1. 从理论上讨论了白光色坐标范围 (0.33 ± 0.05 , 0.33 ± 0.05) 内, 光通量随着色坐标位置的变化规律。在相同芯片和荧光粉条件下, 不同色坐标位置对应的光通量。假定色坐标位置在 (0.33, 0.33) 时, 光通量为 100 lm, 理论计算的结果可以看出, 在上述色坐标范围内, 最大光通量对应的色坐标位置为 (0.35, 0.38), 光通量为 112 lm; 最小光通量对应的色坐标位置为 (0.29, 0.28), 光通量为 93.5 lm。相对于 100 lm 的变化幅度达到 18.5 %。

2. 提出了, 在白光 LED 为 100 lm/w 的发光效率下, 需要蓝光芯片功率效率为多少的计算方法。从所得结果可以看出, 在量子效率为 100% 的理想情况下, 蓝光芯片至少要达到 38.2 % 的功率效率才能实现流明效率为 100 lm/w 的白光。

3. 推导了不同色温的白光 LED 要达到 100 lm/w 各自所需要的蓝光功率效率的变化。随着色温由低变高, 要达到 100 lm/w 的发光效率, 所需要的蓝光功率先减小后增大, 并存在一个极值。

4. 对于相同蓝光芯片和荧光粉制作得到的不同色温白光 LED 所能达到最大流明效率规律进行了计算和分析, 并以现有的实验条件为基础, 对应理论计算结果, 进行了一系列相应的实验验证。由两者的分析比较可知, 对于相同的蓝光芯片及荧光粉, 以及在相同的假设条件下, 必存在某一色温使得此色温时的光通量最大。即在此色温时, 能实现此类蓝光芯片与荧光粉结合所能实现的光通量的极限值。

5. 进行了白光 LED 所能达到的理论极值的估算。计算结果显示, 光功率为 1 w 的白光的光通量为 298.74 lm。由于, 白光是由蓝光通过荧光粉转换实现白光的, 因此, 荧光粉转换过程中的能量损失是不可避免的, 光功率为 1w 的白光需要蓝光的光功率为 1.143 w。电子注入过程中, 我们假定芯片的外量子效率为 1, 工作电压为 3.2V, 电子注入转换成蓝光光子, 能量不可避免要有些损失, 综合计算得到白光 LED 流明效率的极限值为 216.4 lm/w。根据发光光谱的不同, 计算所得流明效率极值有细小差别。根据美国能源部计划提供的可能达到的目标水平为外量子效率达到 81%, 我们推算得流明效率可以达到 157.8 lm/W, 这一结果与美国能源部 2007 年提出的 160 lm/w 相符合。该计算还进一步得到, 达到此极值时蓝光所需要达到的功率值约为 1.143 w。

本文进行的以上理论推导，均是基于荧光粉转换法实现白光的方法基础上的。对于其它诸如三基色法等实现白光的方法，由于时间的原因未进行同类的推导。但本文提出的通过光谱进行发光效率分析的思路，稍做调整，对于其它的白光实现方法也可进行相应的分析。