

摘 要

本文对发光二极管 LED (Light Emitting Diode) 应用于照明的计算和设计进行了探讨和研究。LED 照明的设计对 LED 照明的普及和真正实现绿色照明起到了至关重要的作用。

文中提出的结合照明设计软件和算法的编程对 LED 照明器进行计算机仿真设计的思路, 是一种事前估计, 在照明器制造出以前就可以分析其光学特性是否符合照明标准, 减少了人力和物力的消耗, 缩短了设计和制造周期, 提高了经济效益。

本文在详细介绍了 LED 照明的特点和 LED 光学特性参数的测试方法基础上, 对照明设计软件进行了系统总结, 并对 LED 照明设计中的相关计算方法进行了探讨和具体编程实现, 着重阐述了照明设计软件 ASAP 的使用、LED 照明设计的流程和光学设计原理。最后对 LED 照明设计进行了具体的探讨, 包括 LED 管壳的设计和 LED 的系统设计两方面。LED 管壳设计中给出了不同半强度角的 LED 环氧树脂封装透镜几何形状的设计、制备和分析过程; LED 系统设计中阐述了几种具体的 LED 照明器的设计过程和具体实现, 并同实际测量结果进行了对比。

关键词: 发光二极管、照明计算、照明设计、计算机模拟

Abstract

This thesis is the discussion and research about the calculation and design of illumination based on LED sources. The design of LED illumination plays an important role in its prevalence and the complete realization of green illumination.

Based on the introduction of the characteristics of LED illumination and the measurement of optical parameters of LED, many kinds of illumination softwares are summarized systematically and the related calculation methods are programmed, in which, the process of illumination design, the principles of optical design and how to use the software ASAP are discussed in particular.

A method of computer simulation to the design of LED illumination which combines the illumination software with the program of arithmetic is presented. This method is a pre-estimating one, it can judge whether the optical characteristics suit the illumination standards or not before the illumination devices are produced, so on the one hand, it cuts down the manpower and material resources, on the other hand, it not only reduces the period of design and manufacture but also enhances the economic benefits. At last, the practical design is discussed in the paper. It includes two aspects: the design of encapsulation shape of LED which means the design of geometrical shape, the fabrication and the analytical process of epoxy lens with different half angle, the other aspect is about the systematic design in which the LEDs are used as sources, furthermore, some kinds of LED illumination devices are illustrated which consists of the process of design and the compare with the results of actual measurement.

Keywords: LED, illumination calculation, illumination design, computer simulation

第一章 绪论

§ 1.1 课题背景及意义

§ 1.1.1 半导体照明的发展背景和趋势

“绿色照明”是九十年代初国际上对节约电能、保护环境的照明系统的形象性说法。绿色照明的科学定义为：绿色照明是指通过科学的照明设计，采用效率高、寿命长、安全和性能稳定的照明电器产品（电光源、灯用电器附件、灯具、配线器材，以及调光控制和控光器件），改善提高人们工作、学习、生活的条件和质量，从而创造一个高效、舒适、安全、经济、有益的环境并充分体现现代文明的照明^[1]。许多发达国家和部分发展中国家先后制订了“绿色照明工程”计划，并取得了显著效果。照明的质量和水平已成为人类社会现代化程度的一个重要标志之一，成为人类社会可持续发展的一项重要重要的措施。

作为固体光源的 LED(Light Emitting Diode)发光二极管，真正点燃了“绿色照明”的光辉，被认为是 21 世纪最有价值的新光源，将取代白炽灯和日光灯成为照明市场的主导，使照明技术面临一场新的革命，从而一定程度上改善人类的生产和生活方式。LED 照明的应用前景在全世界都掀起了高潮，被寄予了厚望。

美国能源部预测，到 2010 年将会有 55% 的白炽灯和荧光灯被半导体灯替代，每年可节电 350 亿美元。2001 年 7 月在美国“半导体照明技术蓝图”的基础上，美国能源部启动一项名为“Next-Generation Lighting Initiative”(NGLI)的计划，即“下一代照明计划”(NGLI)^[2]。这项计划提案的目标是要联合产业界、大学和国家重点实验室的力量，加速半导体照明技术的发展和应，这项议案希望从 2003—2011 年，每年提供 5000 万美元支持 NGLI 计划的实施。日本提出，2006 年就要用半导体灯大规模替代传统白炽灯，日本 21 世纪照明计划是由日本金属研发中心(The Japan Research and Development Center of Metals)和新能源产业技术综合开发机构(NEDO)发起和组织的为期 5 年的一个国家计划^[2]。这项计划的参与机构包括 4 所大学、13 家公司和一个协会，目标旨在通

第一章 绪论

§ 1.1 课题背景及意义

§ 1.1.1 半导体照明的发展背景和趋势

“绿色照明”是九十年代初国际上对节约电能、保护环境的照明系统的形象性说法。绿色照明的科学定义为：绿色照明是指通过科学的照明设计，采用效率高、寿命长、安全和性能稳定的照明电器产品（电光源、灯用电器附件、灯具、配线器材，以及调光控制和控光器件），改善提高人们工作、学习、生活的条件和质量，从而创造一个高效、舒适、安全、经济、有益的环境并充分体现现代文明的照明^[1]。许多发达国家和部分发展中国家先后制订了“绿色照明工程”计划，并取得了显著效果。照明的质量和水平已成为人类社会现代化程度的一个重要标志之一，成为人类社会可持续发展的一项重要措施。

作为固体光源的LED(Light Emitting Diode)发光二极管，真正点燃了“绿色照明”的光辉，被认为是 21 世纪最有价值的新光源，将取代白炽灯和日光灯成为照明市场的主导，使照明技术面临一场新的革命，从而一定程度上改善人类的生产和生活方式。LED 照明的应用前景在全世界都掀起了高潮，被寄予了厚望。

美国能源部预测，到 2010 年将会有 55% 的白炽灯和荧光灯被半导体灯替代，每年可节电 350 亿美元。2001 年 7 月在美国“半导体照明技术蓝图”的基础上，美国能源部启动一项名为“Next-Generation Lighting Initiative”(NGLI)的计划，即“下一代照明计划”(NGLI)^[2]。这项计划提案的目标是要联合产业界、大学和国家重点实验室的力量，加速半导体照明技术的发展和应⽤，这项议案希望从 2003—2011 年，每年提供 5000 万美元支持 NGLI 计划的实施。日本提出，2006 年就要用半导体灯大规模替代传统白炽灯，日本 21 世纪照明计划是由日本金属研发中心(The Japan Research and Development Center of Metals)和新能源产业技术综合开发机构(NEDO)发起和组织的为期 5 年的一个国家计划^[2]。这项计划的参与机构包括 4 所大学、13 家公司和一个协会，目标旨在通

过使用长寿命、更薄更轻的 GaN 高效蓝光和紫外 LED 技术使得照明的能量效率提高为传统荧光灯的两倍（即降低传统照明的能量消耗），减少 CO₂ 的产生。欧盟的彩虹计划也已于 2000 年 7 月启动，其计划是通过欧洲共同体的补助金来推广超高亮白光 LED 的应用^[3]。

而我国科技部有关领导提出：我们要以 2008 年北京奥运会和 2010 年上海世博会为契机，推动半导体灯在城市景观照明的应用。科技部“国家半导体照明工程”计划 2007 年半导体照明逐步取代白炽灯，2012 年后取代荧光灯。据预测，在汽车尾灯、交通灯、公共设施以及家庭照明需求的带动下，2003—2007 年我国高亮度发光管芯市场规模将保持年均将近 25.0% 的增长速度，到 2007 年我国高亮度 LED 管芯市场规模将会突破 20 亿元^{[4][5]}。如图 1-1 为 2003-2007 年中国高亮度 LED 管芯市场销售规模预测。

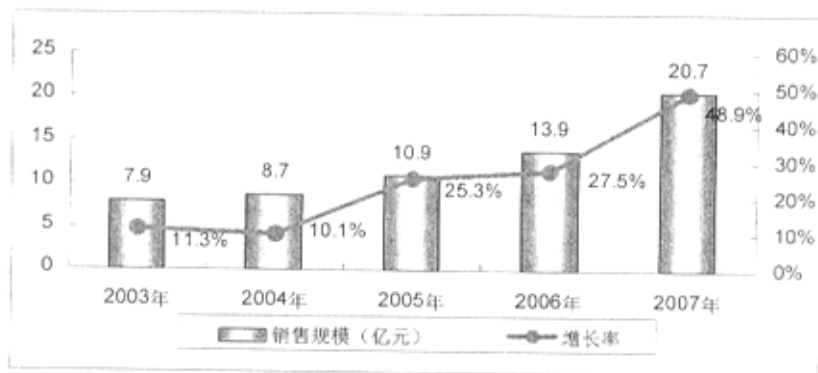


图 1-1 2003—2007 年中国高亮度 LED 管芯市场销售规模预测

另一方面，中国作为 13 亿人口大国，电力能源相对来说比较贫乏，并且随着经济的发展，人民生活水平的不断提高，照明用电在电力消费中占的比例逐年提高。进入九十年代，我国照明用电的年增长在 15% 以上，但是我国照明用电的结构中普通白炽灯仍占有极大的比例。我国人均拥有光源的数量仍比较低，与日本相比，灯的数量是日本的 4.7 倍，使用电力是日本的 5.9 倍，而灯的平均光效率只是日本的 1/3。因此，推广“绿色照明”工程在我国是非常必要的，它的宗旨是节约能源，保护环境，提高照明质量。

随着 LED 材料的革新、工艺的改进和生产规模的提高，LED 的光效将得到提高、价格将下降，可以预测到 LED 在照明领域的应用越来越广，将真正替代白炽灯、荧光灯等传统光源，成为新一代的绿色光源，其在照明市场的潜力将是不可估量的。特别是随着第三代半导体材料 GaN 的突破和蓝、白光发光二极管的问世，继半导体技术引发微

电子革命之后，一场新的产业革命—照明革命正在孕育，其标志是半导体灯将逐步替代白炽灯和荧光灯。一场抢占半导体照明新兴产业制高点的争夺战，已经在全球打响。

§ 1.1.2 LED 应用于照明的发展和国内外概况

在早期，由于 LED 光色、发光效能、光通量、光功率和价格等方面的限制，LED 主要应用于指示、显示领域，如电子电气、热工仪表、自动化系统、通信设置、宇航空间开发、家用电气、交通运输工具中作为指示灯、告示牌、警戒灯以及信息广告、显示牌等。随着 LED 光色的不断丰富，特别是白光 LED 技术的不断成熟，发光效能不断提高，价格逐渐降低，使得 LED 有逐步取代传统的光源的趋势，将作为新一代节能环保型绿色照明灯而受到青睐。这类 LED 光源主要是基于蓝光 LED 的白光 LED 固体新光源，一般应用于诸如应急照明、装饰照明、家用照明等领域。LED 应用于照明领域，涉及到材料器件研制、光学结构设计、封装材料、电子线路、灯具开发、照明效果与视觉匹配等多学科交叉的高新科技领域^[6]。

1. LED 的研究和开发

对于 LED 的研究和开发，国际著名的照明公司均给予了其足够的重视，并斥巨资投入研究与开发，研究的焦点主要集中在新发光材料、封装材料等的开发：PHILIPS 公司与 HP 公司合资的 Lumileds、德国的 OSRAM、美国 GE 以及日本的日亚(Nichia)、美国 EMCORE 和 GE 联合、日本的 Toshiba 和 Honda 联合等均投入大量人力、物力、财力进行研究，以期在这一新世纪光源领域占领制高点。而在国内，约 20 余家研究机构和企业在进行 GaN 蓝绿光 LED 和白光 LED 的研究和开发，但目前与国外的差距还比较大。主要原因是目前在投入资金、设备和人才方面均无法与国外相比，而且研究机构相对比较分散。可是一些科研院所，如中国科学院物理所和长春光机与物理所、北京大学、北京有色金属研究院、石家庄十三所等单位也相继开展了这方面的研究工作，目前已取得了可喜的进步，正在缩短与国际先进水平的差距。

2. LED 用于照明的发展

对于 LED 应用于照明的研究，国内外也都一直致力于光学结构设计、灯具开发和照明效果与视觉匹配等领域的创新和研究^[7]：奥地利的照明设计公司曾采用了 14000 只白光和彩色 LED 的混合照明整个房间，光照水平达到 600—700 勒克斯，足够一普通办

公室的照明；瑞典很多城市采用 LED 作交通信号灯，以减少对发热量大的传统交通信号灯的需求；美国 GE 公司、德国 SIEMENS、OSRAM 公司、日本 NOKIA、SONY 等公司也都致力于 LED 照明产品和照明系统的开发。而我国也正式启动了“国家半导体照明工程”，已经初步形成了珠江三角洲、长江三角洲、江西及福建、北京及大连等北方地区四大 LED 照明研发区域。为实现 LED 从光色照明和特殊照明向普通照明的扩展，国家投入了大量的资金和人力。

3. 照明设计方法的发展

传统的照明设计一般是通过实测进行的，实测法虽然比较准确，但在实验上是一种事后估计，并且只有在灯具曲面制造出来以后才能进行，一旦发现其光学特性不能满足要求，只能重新设计和制造灯具，这不但增加了人力和物力的消耗，而且延长了灯具的设计和制造周期，从而导致企业经济效益下降。特别是随着光源的种类变得越来越复杂，尤其是诸如 LED 等新兴光源的出现，使得传统的照明设计方法已经滞后。

所以，将计算机编程、合适的照明设计软件和合理的光学设计相结合的 LED 照明设计方法，能更有效的进行 LED 照明设计，从而推动 LED 应用于照明的发展。计算机编程使得 LED 照明设计中相关繁琐重复的计算变得简捷和快速，合适的照明设计软件使得设计成为一种事前估计，再加上合理的光学设计，使设计人员在照明器制造出以前就可以分析其光学特性是否符合照明标准，同传统的照明设计方法相比，提高了设计的速度、准确性和经济效益。

§ 1.2 本课题的研究内容

本课题主要围绕着发光二极管 LED，特别是白光 LED 应用于照明的设计来进行研究。

首先对照明设计软件 ASAP (Advanced System Analysis Programme) 进行了讨论说明，对 ASAP 中所涉及的理论知识，包括几何光学、物理光学、数学等方面做了概括，然后对如何在 ASAP 中进行照明设计做了讨论，包括如何构建几何体、模拟光源、追迹光线、输出分析结果、以及如何编写代码进行照明灯具的仿真设计等。ASAP 的仿真效果好，光线追迹速度快而且准确，模拟的功能强大，兼容性比较高，所以在非成像照明、投影显示、成像等领域应用越来越广泛，引起了越来越多的设计人员的重视。

接着对 LED 照明设计中的相关计算，主要是对照度计算和光通量计算的方法进行了探讨。照度计算的方法一般有平面照度计算法：逐点计算法、点光源直射照度计算、平均平面照度计算；非平面照度计算法：平均球面照度和平均柱面照度等方法。LED 光通量的计算方法一般有带状常数积分法，LED 照明器光通量的计算方法包括球带系数法、罗素角法、环带分割法和 $V-H$ 系统法。将这些算法通过计算机编程应用于照明设计中，用来确定 LED 数量、设计光源形状、检验照明计算的结果，并且最终和照明设计软件 ASAP 相结合进行 LED 照明灯具的设计。

最后再对 LED 应用于照明的光学原理和设计过程进行了探讨和研究。结合照明设计软件和计算机编程，LED 应用于照明的设计包括 LED 管壳的设计和 LED 的系统设计：在 LED 管壳设计中，给出了不同半强度角的 LED 环氧树脂封装透镜几何形状的设计、制备以及计算机模拟分析；LED 的系统设计指 LED 作为光源的具体照明器设计，本文中给出了几种具体照明器：LED 矿灯、应用于博物馆文物照明的白光 LED 照明系统、白光 LED 射灯的研究、计算、设计以及同实际测量结果做了对比。

第二章 LED 特性及光度量参数

§ 2.1 LED 的特性

§ 2.1.1 LED 的发光机理

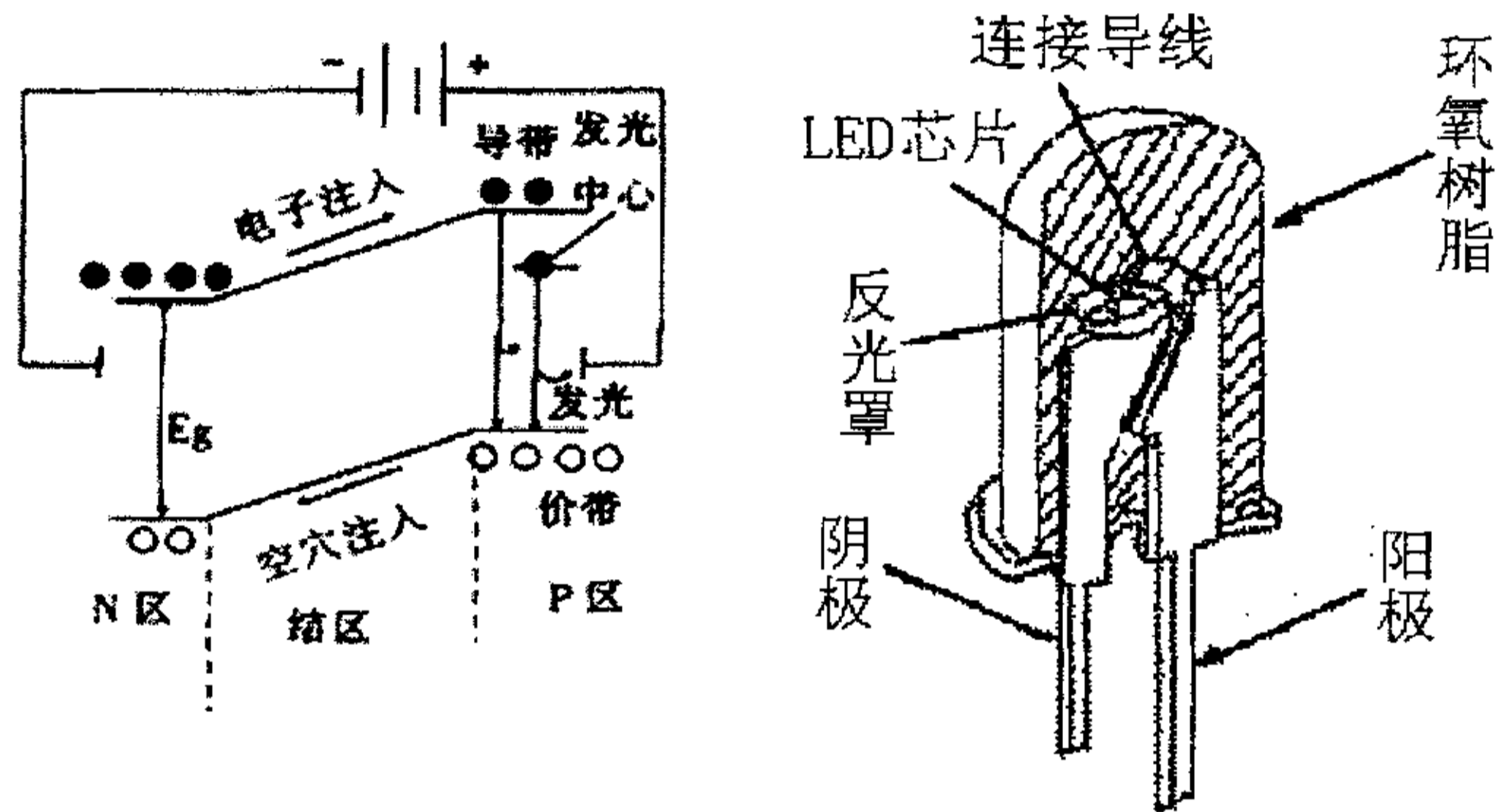


图 2-1 LED 发光原理图 (左) 和 LED 结构图 (右)

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^{[8][9]}：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、价带中间附近，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。

通常定义 LED 的内部量子效率为 PN 结产生的光子数与注入的电子空穴对之比。内部效率与半导体材料的特性、制作工艺有关，通常减少半导体材料的杂质、晶格缺陷和位错，可提高内部效率^[9]。

PN 结发出的光子是非定向的，即向各个方向发射有相同的几率。PN 结半导体材料相对于空气有较高的折射率，因此半导体内部发出的光子只有极少数能逸出半导体材料与空气的界面，大多数被反射回到半导体内部，最终被吸收。我们定义逸出效率为逸出发光二极管的光子数与 PN 结产生的光子数之比。为了提高逸出效率，可以选择不同的封装材料、封装几何形状。这样，从晶片透出的光子首先进入封装透镜，然后再逸出，因为封装材料的折射率在半导体材料和空气折射率之间，因此光子逸出率大大提高，同时，封装透镜还起到保护半导体晶片和控制输出光的分布。

§ 2.1.2 LED 的分类

LED 有很多种类型，下面是几类主要的分类方式^{[10][11]}：

1. 按发光管发光颜色分

按发光颜色分，可分成红色、橙色、绿色（又细分黄绿、标准绿和纯绿）、蓝光、白光等。根据发光二极管出光处掺或不掺散射剂、有色还是无色，上述各种颜色的发光二极管还可分成有色透明、无色透明、有色散射和无色散射四种类型。

2. 按发光管出光面特征分

按发光管出光面特征分圆灯、方灯、矩形、面发光管、侧向管、表面安装用微型管等。圆形灯按直径分为 $\phi 2\text{mm}$ ， $\phi 4.4\text{mm}$ ， $\phi 5\text{mm}$ ， $\phi 8\text{mm}$ ， $\phi 10\text{mm}$ 及 $\phi 20\text{mm}$ 等。在国外通常把 $\phi 3\text{mm}$ 的发光二极管记作 T-1，把 $\phi 5\text{mm}$ 的记作 T-1(3/4)，把 $\phi 4.4\text{mm}$ 的记作 T-1(1/4)。

3. 按发光强度角来分

从发光强度角分布图来分有三类：

(1) 高指向性。一般为尖头环氧封装，或是带金属反射腔封装，且不加散射剂。半强度角为 $5^\circ-20^\circ$ 或更小，具有很高的指向性，可作局部照明光源用。

(2) 标准型。通常作指示灯用，其半强度角为 $20^{\circ} - 45^{\circ}$ 。

(3) 散射型。这是视角较大的指示灯，半强度角为 $45^{\circ} - 90^{\circ}$ 或更大，散射剂的量较大。

4. 按发光二极管的结构分

按发光二极管的结构分有全环氧包封、金属底座环氧封装、陶瓷底座环氧封装及玻璃封装等结构。

5. 按发光强度分

按发光强度分有普通亮度的 LED (发光强度 $< 10\text{mcd}$)，超高亮度的 LED (发光强度 $> 100\text{mcd}$)，发光强度在 $10 - 100\text{mcd}$ 间的叫高亮度发光二极管。

§ 2.1.3 LED 的优点

发光二极管是一种极有竞争力的新型节能光源，有逐渐取代传统照明光源的趋势。它之所以能得到业内人士的普遍关注，在指示、照明领域具有如此大的发展潜力，是因为同传统光源相比，它具有很多优点^{[12][13]}：

1. 效率高：按照通常的光效定义，LED 的发光效率并不高（一般 $10 - 30\text{lm/W}$ ，目前已知光效最高的白色 LED 光效可以达到 55lm/W ），但由于 LED 的光谱几乎全部集中于可见光频段，效率可以达到 $80 - 90\%$ ，而光效差不多的白炽灯其可见光效率仅为 $10 - 20\%$ 。
2. 光线质量高：由于光谱中几乎没有紫外线和红外线，故没有热量，没有辐射，LED 属于典型的绿色照明光源。
3. 光色纯：与白炽灯全频段光谱不同，典型的 LED 光谱狭窄，发出的光线很纯。
4. 能耗小：单体 LED 的功率一般在 $0.05 - 1\text{W}$ ，通过集群方式可以量体裁衣地满足不同的需要，浪费很少。
5. 寿命长：光通量衰减到 70% 的标称寿命为 10 万小时。
6. 可靠耐用：没有钨丝、玻壳等等容易损坏的部件，非正常报废的可能性很小，维护费用极为低廉。
7. 应用灵活：体积小，可平面封装，易开发成轻薄短小产品，做成点、线、面各种形

式的具体应用产品。

8. 绿色环保：废弃物可回收，没有污染，不像荧光灯含有汞成分。

§ 2.2 白光 LED

30 多年来，LED 技术取得了迅猛的进展。从 1962 年第一只红色 LED 问世，接着黄色、绿色、橙色 LED 陆续被开发出，到 1996 年出现蓝光 LED 是其发展史上一个重要的里程碑，1998 年基于蓝光 LED 芯片的白光 LED 被成功开发出，这一创新更是照明史上的巨大转折。

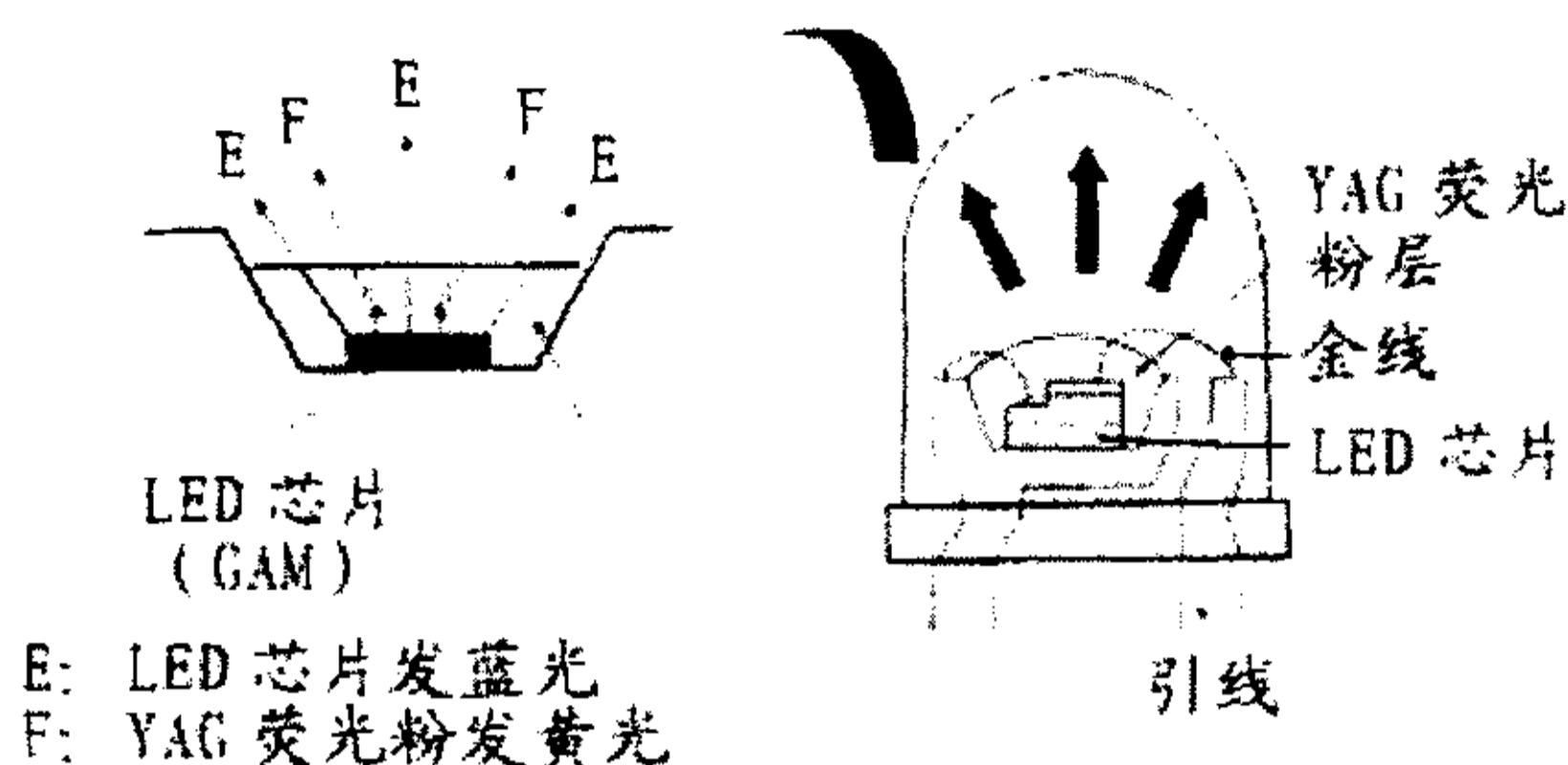
白光 LED 与白炽灯相比，是一种冷光源，辐射主要集中在可见光区，几乎不产生热，也消除了非可见光区电磁波对人的危害；与荧光灯相比，白光 LED 的制造与使用过程都不会引入汞的污染；与叠有许多线装光谱的荧灯光谱相比，白光 LED 的连续光谱更接近自然光；白光 LED 能耗仅为白炽灯的八分之一，荧光灯的二分之一；白光 LED 的寿命可达 10 万小时，是传统荧光灯的 50—100 倍，这些对环境保护和节约能源具有重要意义^{[14][15]}。

白光 LED 有着最诱人的发展前景。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，必须以其它的方式合成白光。合成白光的方式有许多种，一般可以分为单晶型和多晶型两种。其中发展比较迅速的一般有如下三种^{[16][17][18]}：

- 1、多晶型：直接将红、绿、蓝三种颜色的 LED 芯片组成一组，实现白光。其安装结构比较复杂，而且各色 LED 的驱动电压、发光效率、配光特性不同，温度特性也存在差异。
2. 单晶型：蓝色 LED 芯片里涂敷高效黄色荧光粉，蓝光以及被蓝光激发的荧光粉发射的黄光相混互衬后得到不同色温的白光。
3. 多晶型：紫外 LED 芯片里涂敷红、绿、蓝三基色荧光粉，荧光粉被紫外光激发产生白光。

而在本文中所提及的白光 LED 基本上都是采用第二种方式，即蓝光 LED 芯片涂覆黄色荧光粉的方法，其结构原理示意图如图 2-2 所示。其中 GaN 芯片发蓝光 ($\lambda_p = 465\text{nm}$, $w_q = 30\text{nm}$)，YAG 荧光粉受此蓝光激发后发出黄色光，峰值 550nm，LED 基片

发出的蓝光部分被荧光粉吸收，另一部分蓝光与荧光粉发出的黄光混合，从而得到白光。



一种白色 LED 的结构示意图

图 2-2 (蓝光 LED 芯片+黄色荧光粉) 白光 LED 结构示意图

§ 2.3 光度量参数及其测量方法

除了特殊用途的光源（如红外光源和紫外光源）外，大量的光源均作为照明用的。而照明的效果最终是以人眼来评定的，因此照明光源的光学特性必须用如下的基于人眼视觉的光度量参数来描述^{[19][20][21]}：

1. 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：

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} \Phi_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (2-1)$$

式中：

Φ — 光通量，单位为流明 lm；

K_m — 峰值光视效能，683 (lm/W) (对应于 $\lambda = 555\text{nm}$)；

Φ_λ — 光谱辐射能通量，(W/nm)；

$V(\lambda)$ — 明视觉条件下的光谱光视觉效率。

通常 LED 光通量的测量采用积分球法，如图 2-3 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 l 的标准灯进入积分球内的光通量为：

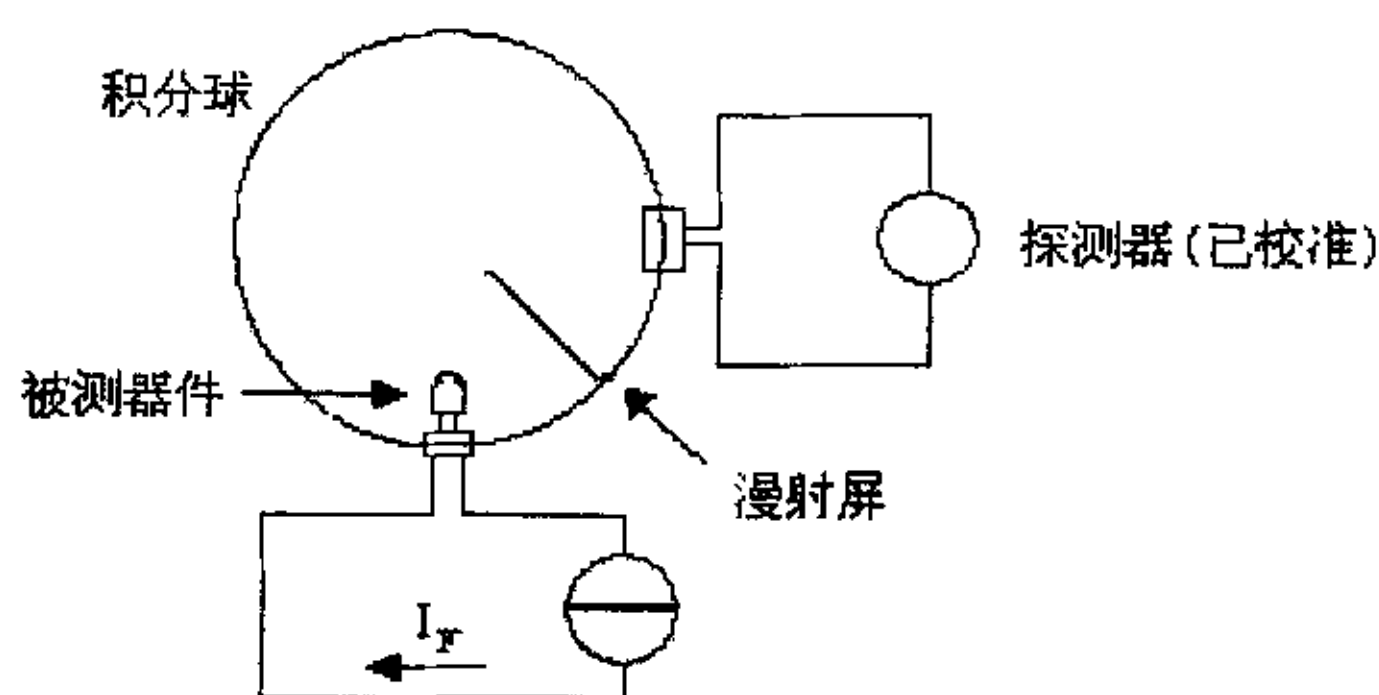


图 2-3 积分球法测试 LED 光通量

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 Φ 为：

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \frac{i}{i_s} \Phi_s \cdot k \quad (2-2)$$

式中：

K —色修正系数

Φ_s —标准灯的光通量。

2. 发光强度

由于辐射发光体在空间发出的光通量不均匀,大小也不同,故为了表示辐射体在不同方向上的光通量分布特性,需引入光通量的角密度概念:光源在给定方向上的一个很小的立体角元内所包含的光通量 $d\Phi$ 与这个立体角 $d\Omega$ 的比值,称为该方向上的光强,单位为坎德拉(cd),即: $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ 。

LED 光强的测量可以分为远场和近场两种情况,在远场条件下,即 LED 光源的尺寸和光探测器的面积与离光探测器的距离相比足够小,LED 光源可以被看做点光源。此时,光探测器表面的光照度 E 遵循距离平方反比定理。

在近场条件下,即测量 LED 时所用的距离 d 相对较短,光源的相对尺寸太大,或者探测器表面与光源构成的角度太大,此时,光探测器测量的光强取决于测量条件。照射在离 LED 一定距离处的光探测器上的光通量 Φ 与探测器构成的立体角 Ω 的比值,即为平均发光强度,此时立体角可用探测器的面积 A 除以测量距离 d 的平方得到:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} = \frac{\Phi}{A/d^2} \quad (2-3)$$

其测量框架图如下图 2-4 所示。

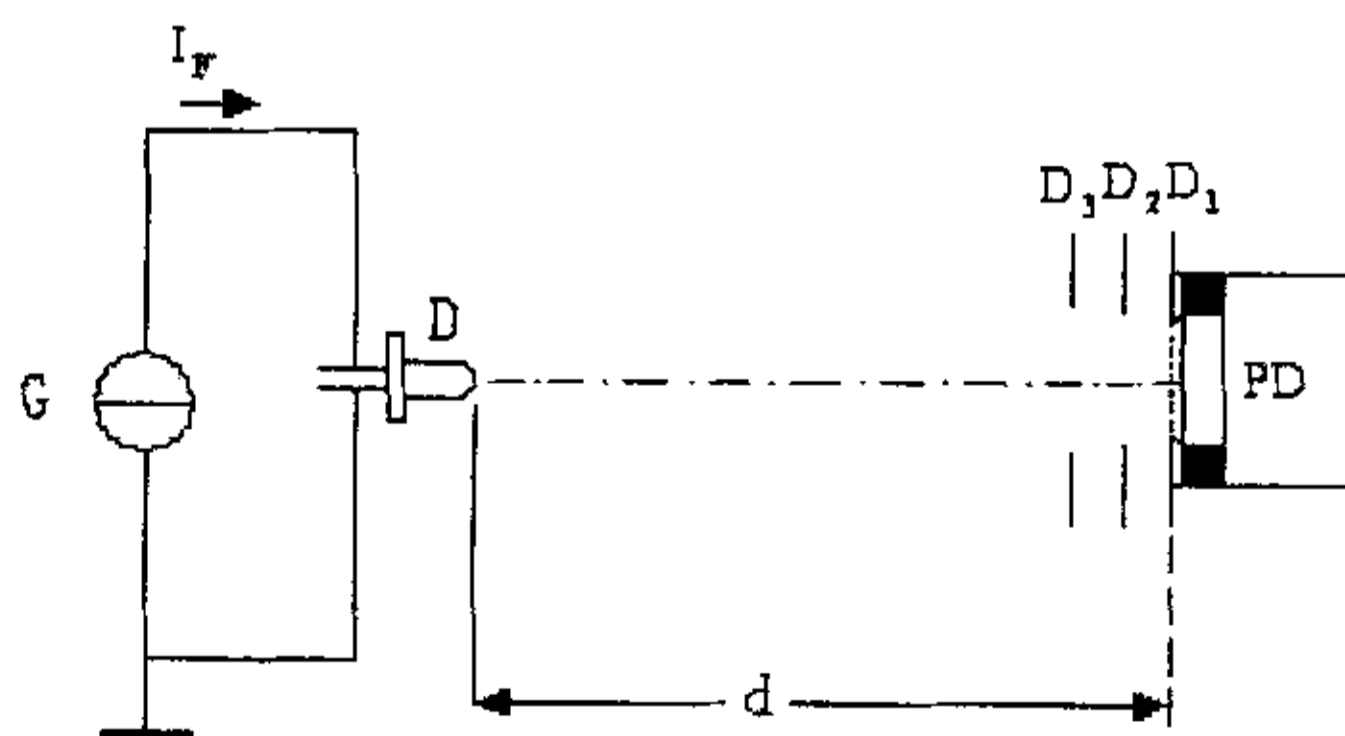


图 2-4 平均发光强度测试框图

图中:

D—被测 LED 器件；

G—电流源；

PD—包括面积为 A 的光阑 D_1 的光度探测器；

D_2, D_3 —消除杂散光光栏， D_2 、 D_3 不应限制探测立体角；

d—LED 器件与光阑 D_1 之间的距离。

测量距离 d 根据 CIE 推荐的标准 A 和 B，按如下表 2—1 设置：

表 2—1 测量距离 d 的设置标准

CIE 推荐	LED 顶端到探测器的距离 d	立体角	平面角（全角）
标准条件 A	316mm	0.001sr	2°
标准条件 B	100mm	0.01sr	6.5°

另外为了能够恰当的反映出光源能量的空间分布，常用如图 2—5 所示的发光强度空间分布图来表示。

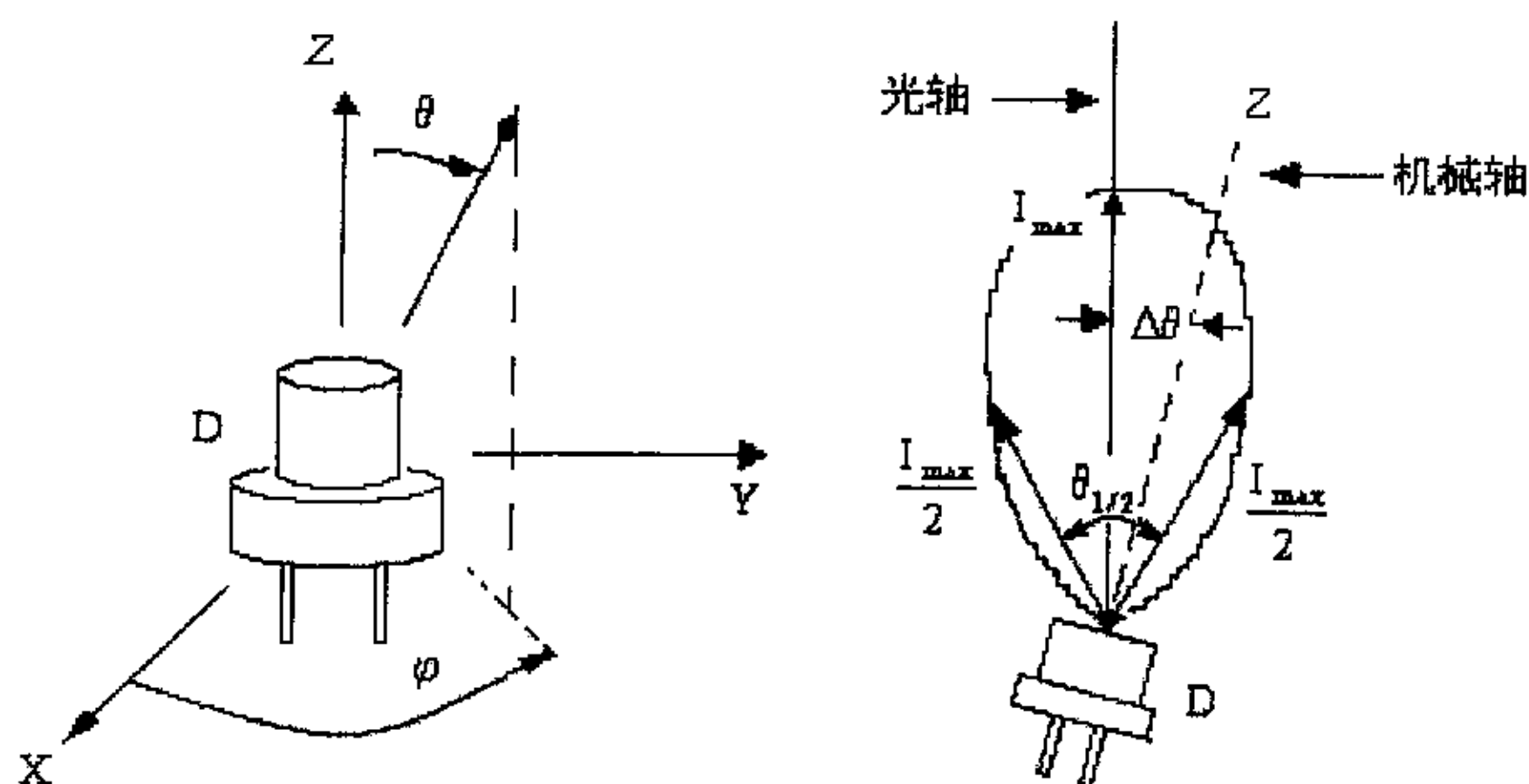


图 2—5 发光强度空间分布的测量

发光强度空间分布图仅仅规定一个平面，常定义发光强度等于最大发光强度一半的位置构成的角度为半强度角，测量时可使被测发光二极管绕顶点旋转，也可使探测器以

d 为半径旋转, 此种测量方法不仅适用 LED, 同样适用于结构上对称的 LED 灯具的测量。先测量各个角度的发光强度, 然后将测得的数据按照极坐标或者直角坐标画出角度和光强之间的关系曲线即为发光强度空间分布图。

3. 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:

$$E = d\Phi / dA$$

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。

在光度测量中应用最广的是硒光电池, 这是因为它的光谱灵敏度比其他探测器更接近人眼的光谱灵敏度。光电池是一种把光能转换成电能的器件, 当硒光电池外电路电流较小时, 光电流与入射光通量(或者入射光照度)有较好的线性关系, 所以可以根据光电流来判断入射光照度。

4. 亮度

为了表征发光面在不同方向上的光学特性, 引入亮度的概念。光源表面一点处的面元在给定方向上的发光强度 dA 与该面元在垂直于给定方向的平面上的正投影面积的比值称作光源在此方向上的亮度:

$$L = \frac{d\Phi}{d\omega dA \cos\theta} \quad (2-4)$$

式中 dA —光源的单元面积;

θ —视线与受照表面法线之间的夹角;

单位为坎德拉每平方米(cd/m^2)。

5. 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 照明理论

§ 3.1 照明器的特性和分类

照明器（灯具）指包括光源在内的由照明附件组成的设备，其功能主要是将光源的光通量重新分配，以达到合理利用光源和避免眩光的目的（光的控制），以及固定和保护光源，使之适用于一定的环境中。

1. 灯具的主要作用：

- (1) 固定和保护灯；
- (2) 控制和分配灯光，实现所需的光分布；
- (3) 装饰与美化环境。

2. 照明器的光分布特性

照明器的光分布特性一般用其周围空间的光强分布（一般称为配光特性），或与照明器轴线垂直或平行的假想平面上的照度来说明。如果照明器的尺寸比其与被照面的距离小很多，照明器可以被看作点光源，那么用发光强度来表明光分布是足够准确的。如果当光源的大小和其到观察点之间的距离相比不是很小时，人们称该光源为广光源，不能直接用光强的概念来描述，需要借助亮度来描述。

光强空间分布特性是用配光曲线来表示，一般极坐标法和直角坐标法来表示曲线。

(1) 极坐标配光曲线

在通过光源中心的测光平面上，测出照明器在不同角度的光强值。从某一给定方向起，以角度为函数，将各个角度的光强用矢量标注出来，连接矢量顶端的连线就是照明器配光的极坐标曲线。对于旋转对称的照明器，在与轴线垂直的平面上各方向的光强值相等，因此只用通过轴线的的一个测光面上的光强分布曲线就能说明其光强在空间的分布。如果照明灯具发光强度在空间的分布是不对称的，则需要用若干测光平面的光强度分布曲线来说明空间光分布。因为大部份的 LED 灯具形状是轴对称的旋转体，只有一个对称轴，也就是说在含有那个轴的任何平面内的分布都是相同的，其发光强度在空间的

(2) 按照明器的用途分类

照明器根据用途可分为功能性照明器与装饰性照明器两种。

功能性照明器首先应该考虑保护光源，提高光效，降低眩光的问题，其次再考虑装饰效果；而装饰性照明首先考虑的是照明器的造型，其次才是照明器的效率和限制眩光。由于本文设计中涉及到的基本都是属于功能性照明器，所以应该以光照设计为重点，效果设计为次要。

表 3-1 按光通量空间分布来分类

类别	光通量分布		特点
	(上半球) %	(下半球) %	
直接型照明器	0—10	100—90	光线集中，工作面上可以获得充分照度
半直接型照明器	10—40	90—60	光线集中在工作面上，眩光比直接型少
漫射型照明器	40—60	60—40	空间各方向光通量基本一致，无眩光
半间接型照明器	60—90	40—10	增加反射光的作用，使光线比较均匀柔和
间接型照明器	90—100	10—0	照明效果好，眩光小

§ 3.2 照明质量的评定标准

照明的效果由许多因素决定，这些因素可以被看作是照明的质量特征，这些特征主要是^{【26】【27】【28】}：

1. 被照面的照度

照度是决定物体明亮程度的直接指标，在一定范围内，照度增加可使视觉能力得以提高。合适的照度有利于保护人的视力，提高劳动效率。所以被照面的照度是照明质量的主要方面。

如果在被照面上存在照度极不相同的表面，则眼睛从一个表面转移到另一个表面时要发生适应过程。在适应过程中，眼的视觉能力是要降低的，适应需要一定的时间，如果经常交替适应，整个视力工作就发生困难，以至导致视觉的疲劳。因此，要求在工作面上有比较均匀的照度分布。

照度均匀度可用工作面上的最低均匀度和平均均匀度来表示。所谓最低均匀度是最低照度与最大照度之比，即 E_{min}/E_{max} ，最低照度是工作面上某一点的最低照度；所谓平均均匀度是最小照度与平均照度之比，即 E_{min}/E_{av} ，平均照度是整个工作面上的平均照度。在整个被照面上并不要求照度十分均匀，但照度的变化必须是缓慢的。从生理上来说，工作面上允许的照明最低均匀度可达 0.5-0.3，一般照明的均匀度不低于 0.7。

2. 眩光

眩光是照明质量的重要特征，它对视觉工作有极不利的影响，所以现代人工照明对眩光很重视，并努力加以限制。

所谓眩光是泛指由于亮度分布或者亮度范围不合适，或在时间上相继出现的亮度相差过大，所造成的观看物体时感觉不舒适或视力减低的视觉条件。在视野内不仅同时出现的大的亮度差异能引起眩光，而且相继出现的大的亮度差异也能引起眩光，甚至亮度数值过大本身也引起眩光。

眩光分直射眩光和反射眩光两种。所谓直射眩光是在观察方向上或附近存在亮的发光体所引起的眩光。所谓反射眩光是在观察方向上或附近由亮的发光体的镜面反射所引起的眩光。眩光按其作用和研究方法的不同分为减视眩光和不舒适眩光两种。减视眩光是从眩光的生理作用出发，用视力的变化来研究和评价眩光的作用，所以也叫生理眩光。不舒适眩光则是从心理作用出发，用主观心理效果来研究和评价眩光作用，所以也叫心理眩光。

§ 3.3 利用软件 ASAP 进行照明设计

§ 3.3.1 关于照明设计软件 ASAP

照明领域中相应不同的用途有不同种类的照明软件，它们的使用减少了繁重的手工劳动，完成了很多原来无法进行的工作，它的应用必将推动照明事业的发展。照明设计和灯具设计领域中的不少内容涉及机械、光学、照明应用等方面的内容，主要的软件如下表所示^{[29][30]}：

本文的 LED 灯具设计中的光学设计主要是反射器和折射器的设计，属几何光学中的非成像光学系统的设计，利用的软件为 ASAP。

表 3-2 常见照明专业领域用软件

软件分类	作用	名称
照明设计	照明计算	LIGHTSTAR,Cophos,PYTHA,OptiWin, Rayfront,Relux,Radiance,Visual
	照明效果仿真	3Dmax,Photoshop,Lightscape
	光度数据处理	Photometric,Toolbox
照明灯具设计	光学设计 成像光路设计	Zmax, CodeV,
	光学设计 非成像光路设计	Photopia,Lighttool,ReflectorCAD, Tracepro,ASAP
	结构设计	AUTOCAD,Solidwork
	热设计	Pro-e,Idea-s
	造型设计	Rhinoceros, Alias,CDRS

ASAP 是 BRO (Breault Reseach Organization) 的一种商业化软件。它具有强大的

机械仿真功能，可以模拟几乎所有的三维几何模型；具有很好的互动性，可以让用户在制作原型系统或者大批量生产前做光学系统的仿真；它应用优化的蒙特卡罗方法进行非序列性的光线追迹，即光线可以不按次序、不计次数的经过各个面，比传统的光线追迹方法而言更快速准确，可以在短时间内进行数百万条光线的计算分析；同时 ASAP 可以和其他很多软件共同使用，通过特定的转换功能来共享图形或者数据文件，这些软件包括 ZMAX, OSLO, AUTOCAD 等；尤其在 ASAP 中，用户不但可以通过 GUI(Guide User Interface)来定义一些简单的几何体和光源，还可以通过编写类似 BASIC 语言的指令代码来定义较复杂的光学系统。由于 ASAP 的仿真效果好，光线追迹速度快而且准确，模拟的功能强大，兼容性比较好，所以在非成像照明、投影显示、成像等领域应用越来越广泛，引起了越来越多的设计人员的重视。但是 ASAP 中涉及到很多几何光学、物理光学以及数学等方面的基础知识等，所以为了能熟练的应用 ASAP 进行照明设计，必须对它有更深入的了解^[31]。

1. ASAP 中几何体的构建和光源的模拟

模拟光学系统首先要构建出系统的立体图形，在 ASAP 中有很多种方法可以实现此功能。一种是通过和 Rhinoceros CAD(Computer Aided Design)软件结合使用，由于它们都支持 IEGS (Initial Graphics Exchange Specification) 格式，所以在 CAD 中系统模型用 NURB(Non-Uniform Rational B-Spline)曲面来数学描述，再输入到 ASAP 中用 Bezier 曲线来描述；也可以在 ASAP 中通过 GUI (Guide User Interface) 来定义简单的线或者面，而复杂的几何体必须通过 ASAP 中类似于 Basic 语言的强大的指令集来编程定义^[32]。

在 ASAP 中可以通过它本身自带的 Light Souce Library 来模拟一般的光源，对于特殊光源的定义可以采取如下的办法：

第一种是通过模拟光源的具体几何形状然后附加光源的特性参数：在 CAD 里先定义几何体，然后通过 IEGS 格式转换到 ASAP 中，而光源的特性参数包括封装材料的折射率、厚度、吸收系数等，这些特性可以通过 ASAP 的 GUI 和指令集来定义；第二种是把发光体的二维发光图形 (BMP 格式) 输入到 ASAP 中，转换为 DIS 格式的文件，再经过 Abel 反变换为光源发光三维立体分布文件^[33]；第三种是直接在 ASAP 中通过已经测得的光源的光强分布来定义：可以定义整个发光体，定义光线数以及每个光线的起始位置、方向、每个光线代表的光通量大小或者每单位立体角内的光线数量、光源的发散角度，因为测量的是光源经过封装的折射、反射、吸收后出射光的光强分布，所以不

需要再单独定义几何体。

2. ASAP 中光线追迹和结果分析

光线追迹是追迹通过三维物理模型的光线，光线的传播路线是由几何体形状、物体材料和光线经过的面的光学性质（反射、折射、散射、衍射、吸收等）所决定。

光线在界面上的反射遵循折、反射定律，对于相干光分别定义 s 和 p 偏振的吸收和反射系数，应用于非成像照明的光源一般定义为非相干光。光线在界面上遵循菲涅尔定律，从而可以计算出折、反射的光通量和光线的方向以及界面上的反射率 R 和透射率 T 。

散射面的定义^[34]是建立在 $BSDF$ (Bidirectional scatter distribution function)基础上，其中 $BSDF$ 是描述光如何从一个面上散射，是关于入射角的函数。而 TIS (Total Integrated Scatter) 表示散射到半球面内的光通量与入射的全部光通量之比。如图 3-2，对于光滑的面而言：

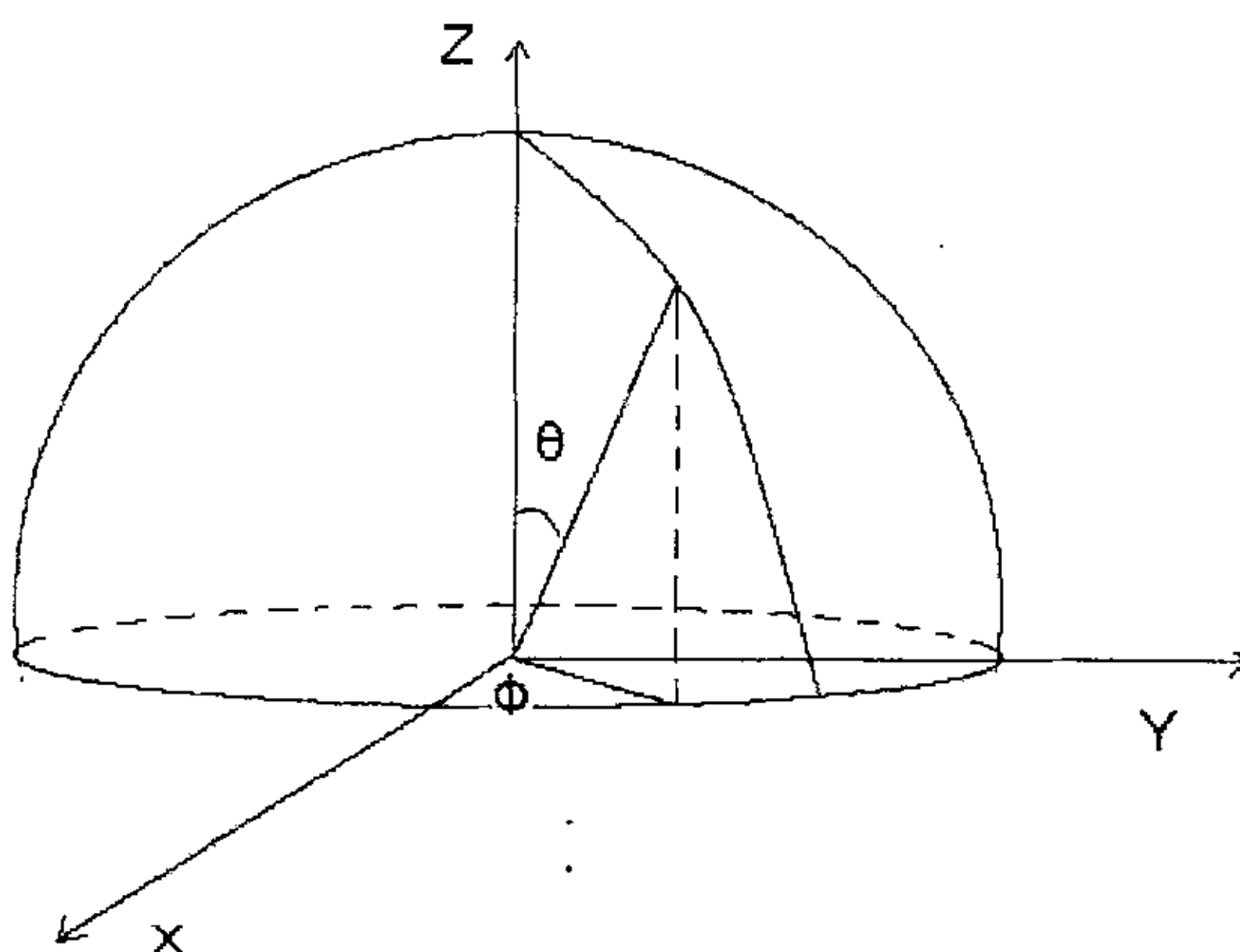


图 3-2 TIS 在半球面内的分布

$$TIS = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} BSDF(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (3-1)$$

衍射模型^[35]是建立在 Huygens-Fresnel 原理的基础上，远场遵循 Fraunhofer 衍射理论，近场遵循 Fresnel 衍射理论。根据光通量守恒，在考虑吸收率 A 的情况下有：

$$R + T + A + TIS = 1 \quad (3-2)$$

在光线追迹中运用蒙特卡罗方法，它是一种数值分析方法，即随机选取光线位置、方向作为样本，随机的折射、散射、衍射，增多样本数量可以提高光线追迹结果的准确性。在进行折、反射光线追迹时候选取反射率 R 和透射率 T 作为随机变量，在进行散射光线追迹的时候选取 TIS 作为随机变量。

在 ASAP 中可以得到一般的分析结果，例如模型立体图，光强、光通量的空间分布，以及在探测屏上的光照度分布，同时可以记录入射到任一面上的光通量和被散射光线的光通量。通过改变各个参数的设置来改变结果输出，不断的模拟，最终可以达到要求。

§ 3.3.2 LED 照明设计步骤

照明光学系统属于非成像光学系统，必须考虑物方空间的亮度分布，光源的形状以及象方亮度分布特性。成像光学系统在像方一般是成一个平面像，照明光学系统需要照亮的往往是一个立体空间。成像光学系统的物象空间有点对称的共轭关系，故可以在视场中心和边缘选取几个抽样点，追迹光线到相应的像点，用垂轴像差、点列图或光学传递函数对系统的成像质量进行评价。而照明光学系统没有物象共轭关系，照明区域中任意一点的照度都是由光源上许多点发出的光能，通过照明系统分配后叠加形成的，故而无法套用成像系统的分析和评价方法，因此一般来说照明光学系统包括：光源、光学系统、照明平面^{【36】【37】【38】}。

1. 光源

在照明光学系统中引入计算机模拟，光源可以用光线数量（单位立体角内）、光线长度、光线方向矢量和光线与光轴的夹角来表示。

2. 光学系统

光学系统用来重新分配光源光通量在空间的分布，光源发出的光线通过光学系统后在照明平面上产生特定分布。照明光学系统由于对像差要求不高，所以一般只需校正球差，一般把最后一个面设计成非球面，来减少和校正系统球差。

3. 照明平面

用户对照明平面提出一定的要求，设计者通过光源的选定和光学系统的设计来达到要求。这是一个反复比较、反复修改的过程，计算光源发出的光线通过光学系统后在目

标面上产生的照度分布，然后与用户要求的照度分布相对照，根据比较结果来修改光学系统。

在此基础上，结合照明设计软件 ASAP，一般按下面的步骤来进行 LED 照明的设计：

- (1) 确定 LED 光源数目，设计 LED 光源形状；
- (2) 加反射器或折射器，放置光源在合适的位置；
- (3) 进行照明计算，包括被照面上光照度的计算，空间各点光强的计算和总的光通量的计算等；
- (4) 检查灯具的配光中的各项参数是否满足预定要求；
- (5) 如未达到设计要求，针对配光曲线中尚未满足的部分，再次进行计算，反复修改。

软件可以帮助设计人员节省时间，使设计工作更加精确、完整，表达方式更加直观，产品更加美观，节省投资。

第四章 LED 照明数据和计算

照明设计的主要任务之一是选择具有合适光分布的照明器并进行合理的布置, 以使得照明场所获得符合要求的亮度分布。实际的照明装置包含许多照明器的反射表面, 光的传递过程是相当复杂的, 所以需要进行比较复杂的计算才能确定场所的亮度分布。由于照度的计算和测量比较容易, 现行照明标准也用照度值来规定工作面的照明数值, 而且当被照表面的反射特性一定, 特别是在大多数场合下这种反射是一种漫反射时, 其亮度取决于单位面积入射光通量即照度。所以在设计中, 照明计算主要是包括两个方面: 一个是照度的计算, 只在一些特殊的场合下需要计算某些表面的亮度, 以检验照明环境的照明质量; 另外一个为光通量的计算, 通过分别计算 LED 灯具的光通量和 LED 光源的光通量来合理布置 LED 的位置、确定 LED 的个数, 合理的添加光学器件, 从而满足不同的照明需要。

§ 4.1 计算照明系统在被照面上产生的照度

照度的计算方法通常有: 利用系数法、概算曲线法、比率法和逐点计算法^[39]。逐点计算法用于计算某点的直射照度, 其特点是准确度高, 可以用来计算任何指定点的照度, 一般适用于局部照明、采用直射光照明器的照明、特殊倾斜面的照明和其他需要准确计算照度的场合。由于逐点计算法可计算任一倾斜面上的照度, 且只计算光源的直射照度 (不含反射光通引起的照度), 适用于带反射罩的灯具, 而一般的 LED 照明器都具有反射罩, 因此在 LED 的照明设计中, 通常采用的是逐点计算法。

逐点计算法是指逐一计算照明器对照度计算点的点照度, 然后进行叠加, 得到其总照度的计算方法。所谓点照度就是入射到包含这点的面积元上的光通量与该面积元之比, 点照度计算即计算照明装置向某一计算点发射的光通量。点照度计算能比较精确的计算被照面某点的照度, 一般用于验算工作点的照度和工作面照度分布的均匀度。一般当光源的最大尺寸不超过光源至被照平面间的最小距离的五分之一时, 就可以将此光源看作点光源。在 LED 照明计算中, 一般将 LED 照明器视为点光源来计算。

§ 4.1.1 点光源直射照度计算

1. 单个点光源^[40]

点光源产生的点照度的基本计算公式，可由下面两个照度定律导出。这两个定律是光度测量和照度计算的基础。

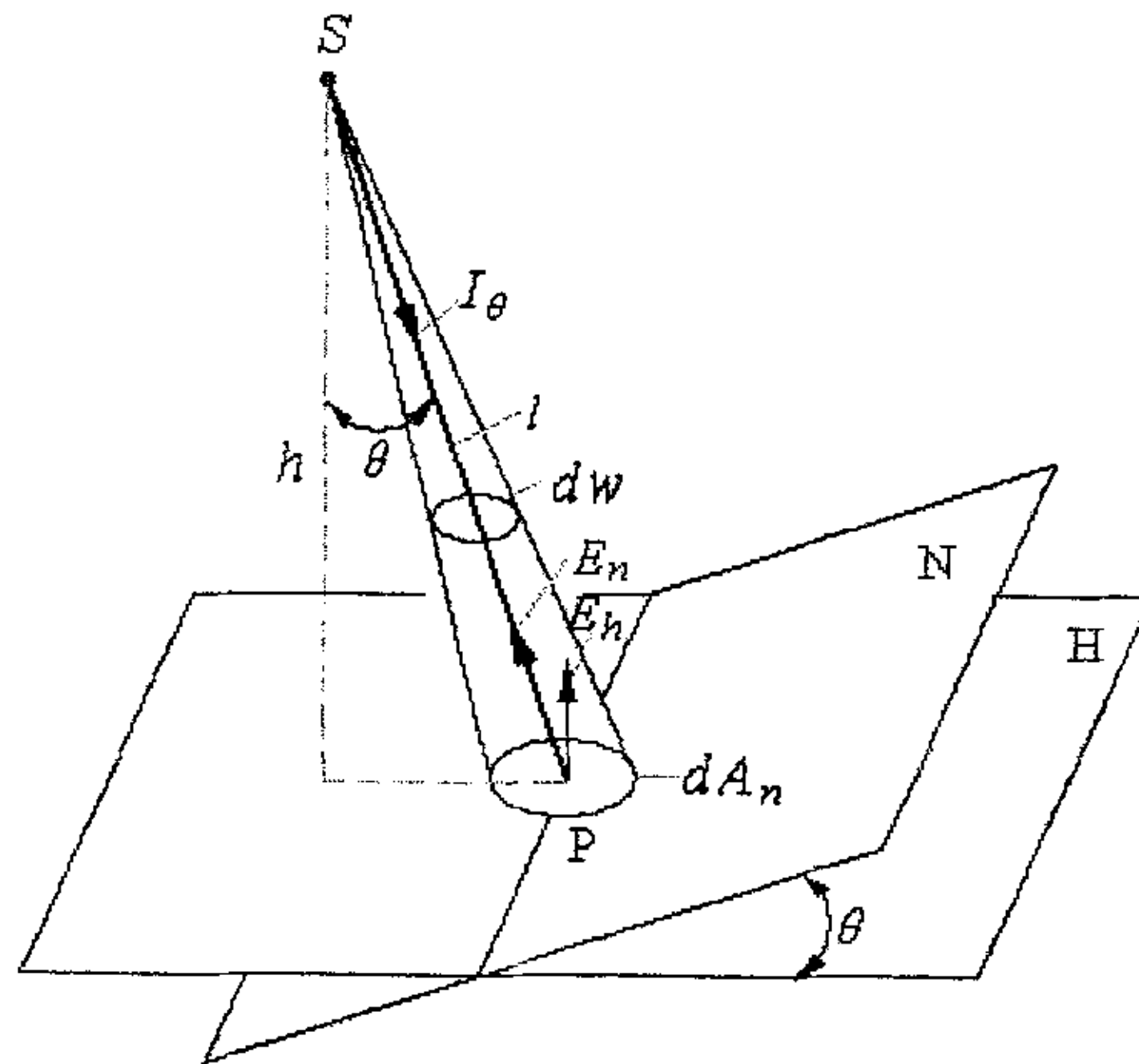


图 4-1 点光源的点照度计算

(1) 距离平方反比定律

如图 4-1 所示，点光源 S 在指向平面 N （与入射光线垂直的平面）上 P 点的方向上光强为 I_θ ，光源到 P 点的距离为 l ，投射到包括 P 点的指向平面上的面元上的光通量为：

$$d\phi = I_\theta d\omega \quad (4-1)$$

因面元 dA_n 很小，可以把它看成是以点光源为球心的球面积的一部分，所以立体角 $d\omega$ 可由下式确定：

$$d\omega = \frac{dA_n}{l^2} \quad (4-2)$$

根据照度的定义，光源在指向平面上 P 点产生的照度 E_n 为：

$$E_n = \frac{d\varphi}{dA_n} = \frac{I_\theta}{l^2} \quad (4-3)$$

距离平方反比定律说明，点光源在与照射方向垂直的平面上产生的照度与光源至被照面的距离的平方成反比。

(2) 余弦定律

如果图中的 P 点在水平面 H 上，则 P 点的照度为：

$$E_h = \frac{I_\theta}{l^2} \cdot \cos \theta \quad (4-4)$$

式中 I_θ — 光源在照度计算点方向的发光强度；

$\cos \theta$ — 光源至照度计算点的连线与光源至照度计算平面的垂线之间夹角的余弦；

l — 光源至照度计算点的距离。

(3) 余弦立方定律

如图 4-1 所示，对于水平面

$$\frac{h}{l} = \cos \theta \quad (4-5)$$

综合式 (4-4)，可以得到：

$$E_h = \frac{I_\theta \cdot h}{l^3} \quad (4-6)$$

2. 多个点光源

因为实际上一般的照明光源并不存在相干的问题，因此当有 n 个点光源同时照射工作面时候， n 个点光源产生的照度等于每一光源分别产生的照度的总和。总照度可用下式表示：

$$E = \sum \frac{I_{\theta n} \cos \theta_n}{l_n^2} \quad (4-7)$$

式中 I_{θ_n} — 第 n 个光源在照度计算点方向的发光强度;

θ_n — 第 n 个光源至照度计算点的连线与光源至照度计算平面的垂线之间夹角的余弦;

l_n — 第 n 个光源至照度计算点的距离。

3. 平均平面照度

当照明器分布比较均匀, 在被照面上各点产生的照度比较均匀时, 平均照度能表征工作面上照明的数量和质量。此时, 照明设计可以采用比较简单的平均照度算法而使得计算简化。

平均照度计算通常采用所谓“流明法”。这个方法是计算落到工作面上的总光通量除以被照面的面积。

§ 4.1.2 非平面照度

1. 平均球面照度^[41]

在照明设计中, 照明质量的主要指标之一照度水平通常指平面照度。但是, 当评价照明质量时, 人们发现在相同的照度水平下, 当光线来自不同的方向时会有非常不同的照明效果, 仅仅考虑平面照度是远远不够的。所以用平均球面照度和平均柱面照度来表现被照物体的立体感。

平均球面照度表示位于受测点处一个无限小的球面上的平均照度。

如下图 4-2 表示, 在受测点处取一半径为 r 的球面, 若光源 S 垂直于小球直径截面方向的光强为 I , 则 P 点的平均球面照度 E_s 可用下式表示:

$$E_s = \frac{\phi}{A} = \frac{I \cdot \pi r^2}{4\pi r^2 d^2} = \frac{I}{4d^2} \quad (4-8)$$

式中 E_s — 平均球面照度, 单位为 lx;

I — 点光源的光强, 单位为 cd;

ϕ 一点光源的光通量;

A 一球体的截面面积;

r 一球体半径;

d 一光源至计算点的距离。

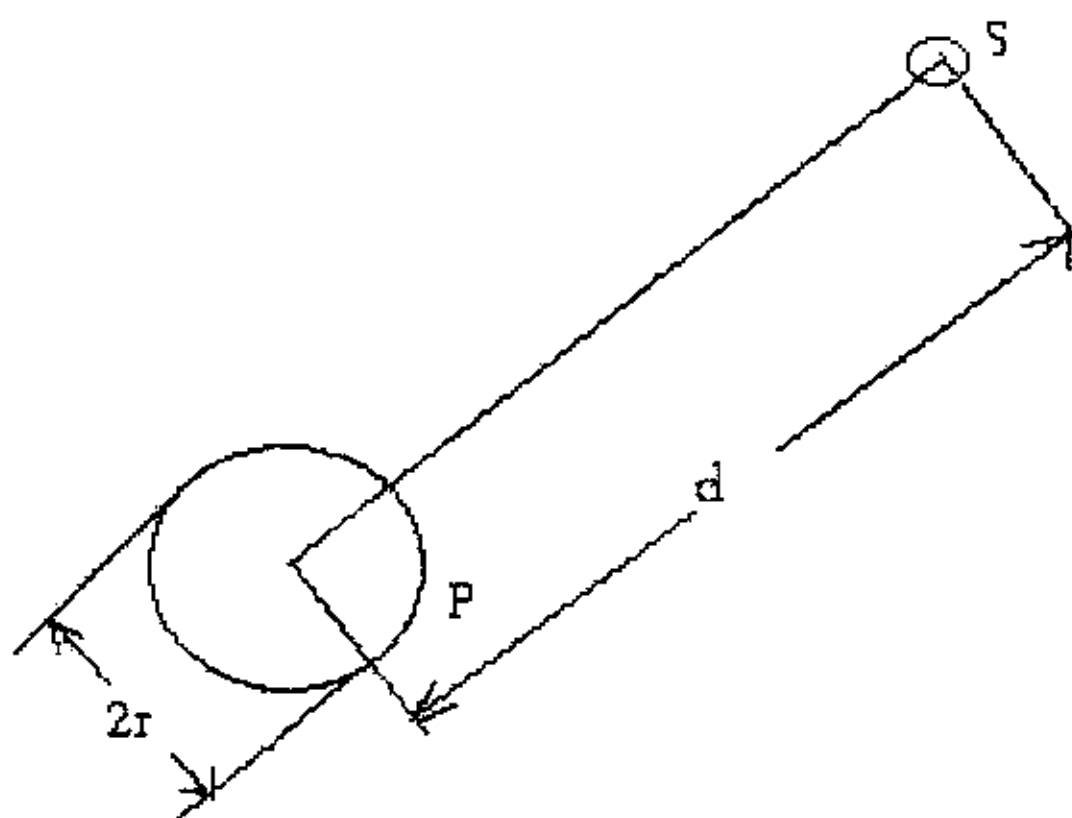


图 4-2 平均球面照度

上式说明了 E_s 与测量球的大小无关, 只与光源的光强 I 成正比, 与光源到被测点的距离的平方成反比。

平均球面照度适用于不需要指明受照面方向, 而要求的无方向的空间照度, 例如在航空港、火车站的候车室, 休息室等处做照明效果评价比平面照度更能反映实际情况。

2. 平均柱面照度^[42]

平均柱面照度是指位于空间某点处的一个小圆柱体测表面上的平均照度, 它表示位于空间某点处的垂直面照度。如图 4-3 所示, 点光源 S 在圆柱体侧面计算点 P 处的平均柱面照度可由下面公式计算:

$$E_c = \frac{\phi}{A} = \frac{I \cdot \frac{2rh}{l^2} \sin \theta}{2\pi rh} = \frac{I \sin \theta}{\pi l^2} \quad (4-9)$$

式中 E_c 一平均柱面照度, 单位为 lx;

I 一点光源的光强;

ϕ 一点光源的光通量;

A —柱体侧面表面积;

r —柱体半径;

h —柱体高度;

θ —点光源光强方向和柱体轴线的夹角;

l —光源至计算点的距离。

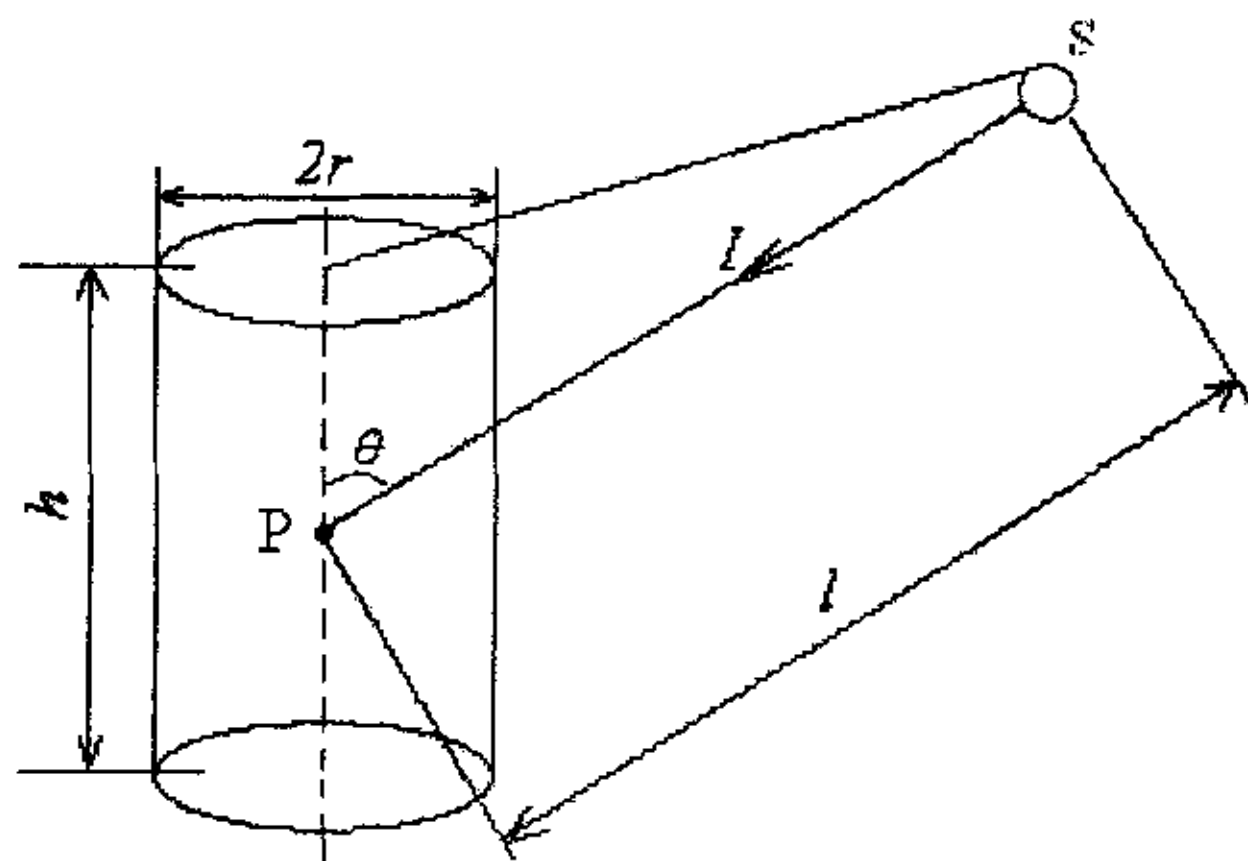


图 4-3 平均柱面照度

(4-9) 式表明平均柱面照度的大小与所取的圆柱体的表面积无关, 只与光源的光强 I 、以及光强与垂直圆柱体的轴线直角的夹角 θ 的正弦成正比, 与光源到计算点之间的距离平方成反比。

§ 4.2 LED 照明器光通量的计算方法

为了确定 LED 光源个数和 LED 的位置, 必须通过有效计算 LED 照明器总的光通量。LED 照明器光通量一般的计算方法如下^{[43][44][45]}:

1. 光强计算法

考虑将 LED 灯具设置于球心, 如图 4-4 所示, 对着球心的立体角可以用纬度角 θ 与 $(\theta + d\theta)$ 之间所界定的环带表示为:

$$d\Omega = \frac{2\pi r \sin \theta r d\theta}{r^2} = 2\pi \sin \theta d\theta \quad (4-10)$$

A —柱体侧面表面积;

r —柱体半径;

h —柱体高度;

θ —点光源光强方向和柱体轴线的夹角;

l —光源至计算点的距离。

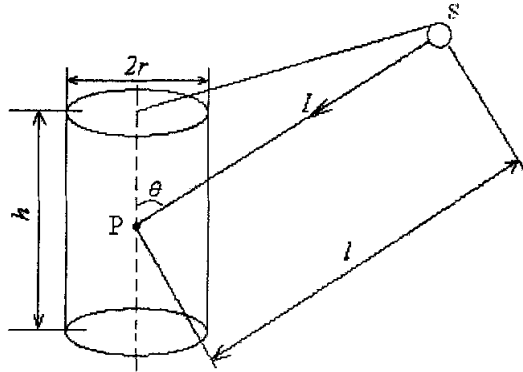


图 4-3 平均柱面照度

(4-9) 式表明平均柱面照度的大小与所取的圆柱体的表面积无关, 只与光源的光强 I 、以及光强与垂直圆柱体的轴线直角的夹角 θ 的正弦成正比, 与光源到计算点之间的距离平方成反比。

§ 4.2 LED 照明器光通量的计算方法

为了确定 LED 光源个数和 LED 的位置, 必须通过有效计算 LED 照明器总的光通量。LED 照明器光通量一般的计算方法如下^{[43][44][45]}:

1. 光强计算法

考虑将 LED 灯具设置于球心, 如图 4-4 所示, 对着球心的立体角可以用纬度角 θ 与 $(\theta + d\theta)$ 之间所界定的环带表示为:

$$d\Omega = \frac{2\pi r \sin \theta r d\theta}{r^2} = 2\pi \sin \theta d\theta \quad (4-10)$$

那么从 θ_1 到 θ_2 环带中出射的光通量为：

$$\Phi = \int I d\Omega = \int_{\theta_1}^{\theta_2} 2\pi I \sin \theta d\theta = 2\pi I (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = I \cdot C \quad (4-11)$$

式中 I —该环带内的平均光强；

C —环带系数。

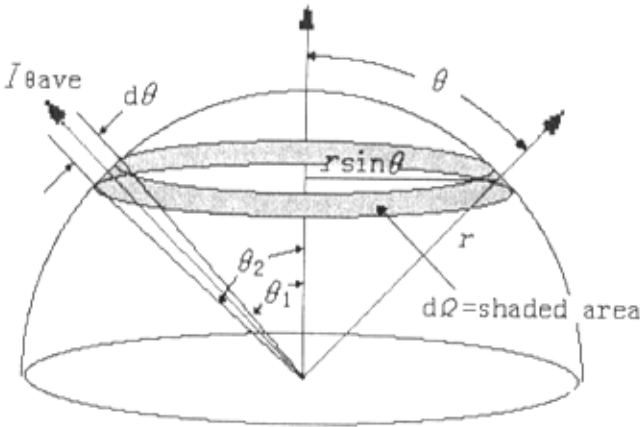


图 4-4 球带法计算灯具光通量

平均光强可以从光强球带内的光强平均值可由光强分布曲线，如图 4-5 来估计。

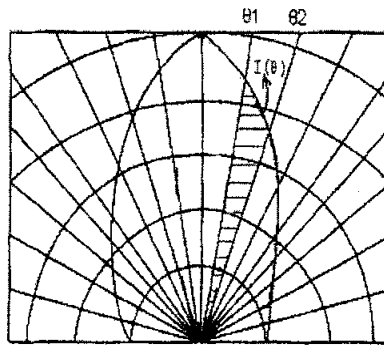


图 4-5 垂直平面的极坐标光强分布曲线

也可以根据函数平均值定理直接计算，得到在从 θ_1 到 θ_2 的球带内的光强平均值：

$$I_{\theta \text{ 平均}} = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} I(\theta) d\theta}{\theta_2 - \theta_1} \quad (4-12)$$

基于此，可以有下面的计算灯具光通量的方法：

(1) 环带系数法

为了求得灯具所发出的总光通量，假设把球体分为 m 个环带，每个环带宽为 $\Delta = (180 / m)^\circ$ ，在每个环带中，把方位角间隔 35° 或者 45° 处的光强值用来计算出该环带上的平均光强值。

$$\text{总光通} \quad F = \sum_{n=1}^m I_n C_n \quad (4-13)$$

式中 $I_n - (\frac{2n-1}{2} \cdot \Delta)^\circ$ 处环带的平均光强；

$$C_n = 2\pi [\cos((n-1) \cdot \Delta) - \cos(n \cdot \Delta)] \text{—球带系数法。}$$

(2) 罗素角法

环带系数法中， m 个环带有相同的角宽度，但与球心相对应的立体角是不相同的。如果选择不同角宽度的环带而立体角相等的话，灯具发出的总光通量就等于该立体角乘以不同环带中的光强值的总和。这种与等立体角相对应的环带中心与铅垂线的夹角，称为罗素角。

同样选取 m 个环带，则立体角为 $4\pi/m$ ，得到如(4-14)的 m 个方程：

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\pi(\cos 0^\circ - \cos \theta_1) = (4\pi/m) \cdot \frac{1}{2} \\ 2\pi(\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = 4\pi/m \\ \quad \quad \quad \cdot \\ \quad \quad \quad \cdot \\ \quad \quad \quad \cdot \\ 2\pi(\cos \theta_{m-2} - \cos \theta_{m-1}) = 4\pi/m \\ 2\pi(\cos 180^\circ - \cos \theta_m) = (4\pi/m) \cdot \frac{1}{2} \end{array} \right. \quad (4-14)$$

从 m 个方程可以解得 $\theta_1, \dots, \theta_m$ 个罗素角的值，总光通量 F 可以表示为：

$$F = (4\pi / m) \cdot (I_{\theta_1} + I_{\theta_2} + \dots + I_{\theta_n}) \quad (4-15)$$

2. 环带分割法

我国照明设计遵循国家颁布的《工业企业照明设计标准》进行照度计算，而照度计算主要依据是灯具的配光曲线即光强分布曲线，但以 LED 为光源的新的灯具在没有配光曲线提供的状况下，可以通过环带法来得到灯具的配光曲线。

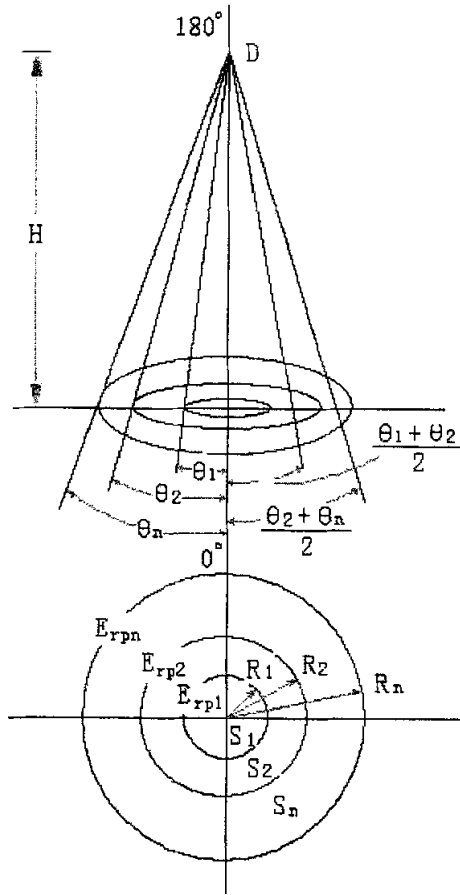


图 4-6 环带法计算灯具的光通量

环带法是在球带法的基础上发展、演变、推导出来的一种简易、方便、实用的计算方法。环带法的具体作法是将灯具固定，让其光线投射到被照面上，被照面被划分为不同半径的若干小环带，将每个小环带的面积乘以该面积上测得的平均照度值，即为该面积上的光通量，各个小环带面积上的光通量相加，即为该灯具所照射的总光通量^[46]。

如图 4-6，灯具固定悬挂在距离被照平面高度为高 H 的位置上，根据不同的中心角 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ ，将被照平面分为对应半径为 R_1, R_2, \dots, R_n 的不同环带，各环带面积分比为 S_1, S_2, \dots, S_n ，对应各环带所测平均照度分别为 $E_{rp1}, E_{rp2}, \dots, E_{rpn}$ ，各环带的光通量分别应为：

$$\text{第一环带光通量: } F_1 = S_1 \cdot E_{rp1} = \pi R_1^2 \cdot E_{rp1};$$

$$\text{第二环带光通量: } F_2 = S_2 \cdot E_{rp2} = \pi(R_2^2 - R_1^2) \cdot E_{rp2};$$

依此类推：

$$\text{第 } n \text{ 环带光通量: } F_n = S_n \cdot E_{rpn} = \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2) \cdot E_{rpn};$$

$$\text{故总的光通量: } F = \sum_{n=1}^m S_n \cdot E_n = \sum_{n=1}^m \pi(R_n^2 - R_{n-1}^2) \cdot E_{rpn} \quad (4-16)$$

环带半径 R 由灯具的悬挂高度 H 和配光曲线要求角度的精度决定，习惯上，配光曲线均采用等角角度分割法，测试中每 5° 为一间隔。

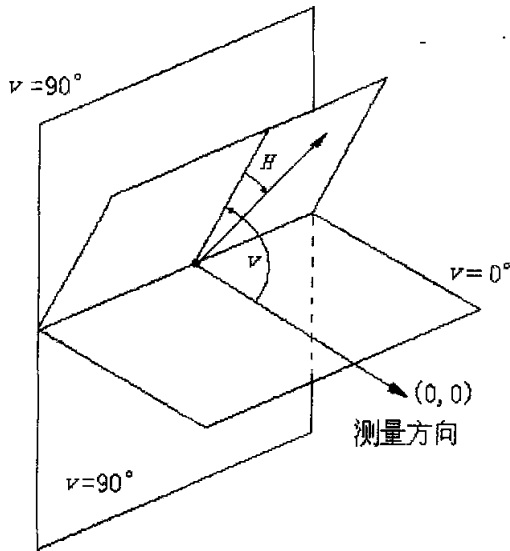


图 4-7 V-H 坐标系统

3. V-H 系统法

对于泛光照明器，使用最广泛的是 $V-H$ 系统，如图 4-7。角 V 是通过照明器轴的平面间的夹角，角 H 在上述平面中计算。泛光照明应用于某处场景或某个物体的照明，通常通过投光灯来实现，目的是大量增加其相对于周围环境的照度。投光灯是利用反射和折射方法增加在有限立体角度内光强的一种灯具，专为泛光照明而设计的投光灯，通常可以被指向任何方向。

表 4-1 LED 信号灯光分布

光强分布 (%)	几何轴 (左右) (°)						
几何轴 上下(°)	0	5	7.5	10	15	20	25
0	100	100	—	50	—	—	—
3	100	—	50	—	—	—	—
5	50	—	—	—	—	7.5	—
7.5	—	—	—	—	12.5	—	—
10	12.5	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	—	—	—	7.5
20	7.5	—	—	—	—	—	—

所以对于泛光灯光分布的要求一般体现为 $V-H$ 系统内光强的分布，例如表 4-1 所示，则总的光通量可以按照下式估算^{[47][48]}：

$$\Phi = \sum_{i=1}^m \Phi_i = \sum_{i=1}^m I_i \cdot (\sin H_{i+\frac{1}{2}} - \sin H_{i-\frac{1}{2}}) \cdot (V_{i+\frac{1}{2}} - V_{i-\frac{1}{2}}) \quad (4-17)$$

式中 Φ_i — 第 i 个立体角区域内的光通量；

I_i — 第 i 个立体角区域内要求的平均光强；

$H_{i+\frac{1}{2}}, H_{i-\frac{1}{2}}$ —第 i 个立体角区域的垂直边界;

$V_{i+\frac{1}{2}}, V_{i-\frac{1}{2}}$ —第 i 个立体角区域的水平边界。

§ 4.3 LED 光通量的计算方法

通常采用如下的带状常数积分法来计算单芯片 LED 的光通量^[49]:

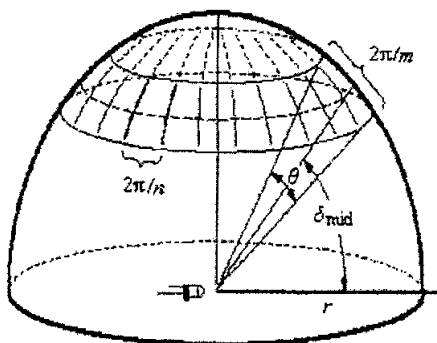


图 4-8 LED 光通量的空间分布模拟图

用图 4-8 来模拟 LED 光通量的空间分布, m 表示在垂直光轴方向的球带等分数, n 表示光轴方向球带等分数, 一般情况下取 $m=n=72$; $\delta = \delta_{mid}$, 如图 4-8 所示, 表示某一水平环带中点所对应的和光轴方向的夹角。则单芯片 LED 的光通量如下:

$$\phi_v = \sum^{m/2} [C_z(\delta) \sum^n I_v(\theta, \delta)] \quad (4-18)$$

式中 $C_z(\delta) = (4\pi^2 / mn) \cos(\delta)$ -带状常数;

$I_v(\theta, \delta)$ —和 LED 光轴夹角为 θ 、和光轴垂直方向的夹角为 δ 的不等于零的点的发光强度。

其中 δ_{mid} 的值可以根据图 4-9 所示的方法得到。

将这些算法经过计算机编程后, 在 LED 照明设计中可以更有效、方便的进行照度计算、LED 照明器光通量的计算和 LED 光源的设计, 结合照明设计软件 ASAP 可以更快

$H_{i+\frac{1}{2}}, H_{i-\frac{1}{2}}$ —第 i 个立体角区域的垂直边界;

$V_{i+\frac{1}{2}}, V_{i-\frac{1}{2}}$ —第 i 个立体角区域的水平边界。

§ 4.3 LED 光通量的计算方法

通常采用如下的带状常数积分法来计算单芯片 LED 的光通量^[49]:

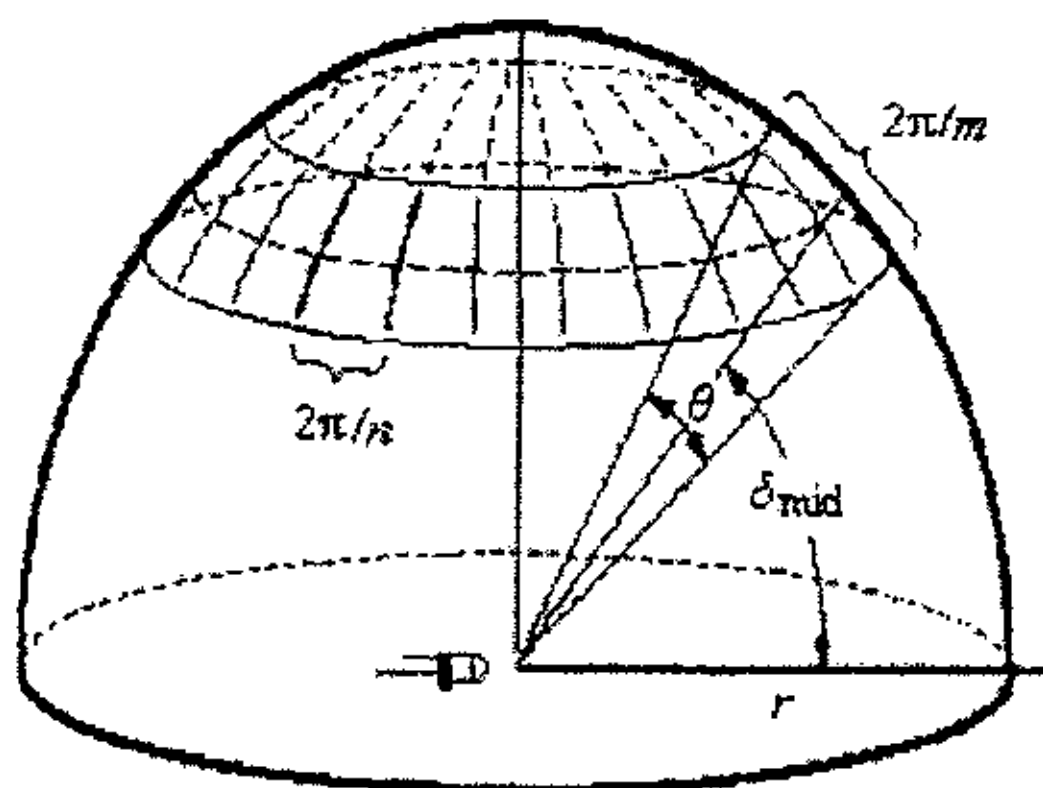


图 4-8 LED 光通量的空间分布模拟图

用图 4-8 来模拟 LED 光通量的空间分布, m 表示在垂直光轴方向的球带等分数, n 表示光轴方向球带等分数, 一般情况下取 $m=n=72$; $\delta = \delta_{mid}$, 如图 4-8 所示, 表示某一水平环带中点所对应的和光轴方向的夹角。则单芯片 LED 的光通量如下:

$$\phi_v = \sum_{\delta}^{m/2} [C_z(\delta) \sum_{\theta}^n I_v(\theta, \delta)] \quad (4-18)$$

式中 $C_z(\delta) = (4\pi^2 / mn) \cos(\delta)$ —带状常数;

$I_v(\theta, \delta)$ —和 LED 光轴夹角为 θ 、和光轴垂直方向的夹角为 δ 的不等于零的点的发光强度。

其中 δ_{mid} 的值可以根据图 4-9 所示的方法得到。

将这些算法经过计算机编程后, 在 LED 照明设计中可以更有效、方便的进行照度计算、LED 照明器光通量的计算和 LED 光源的设计, 结合照明设计软件 ASAP 可以更快

速方便的进行 LED 应用于照明的设计。

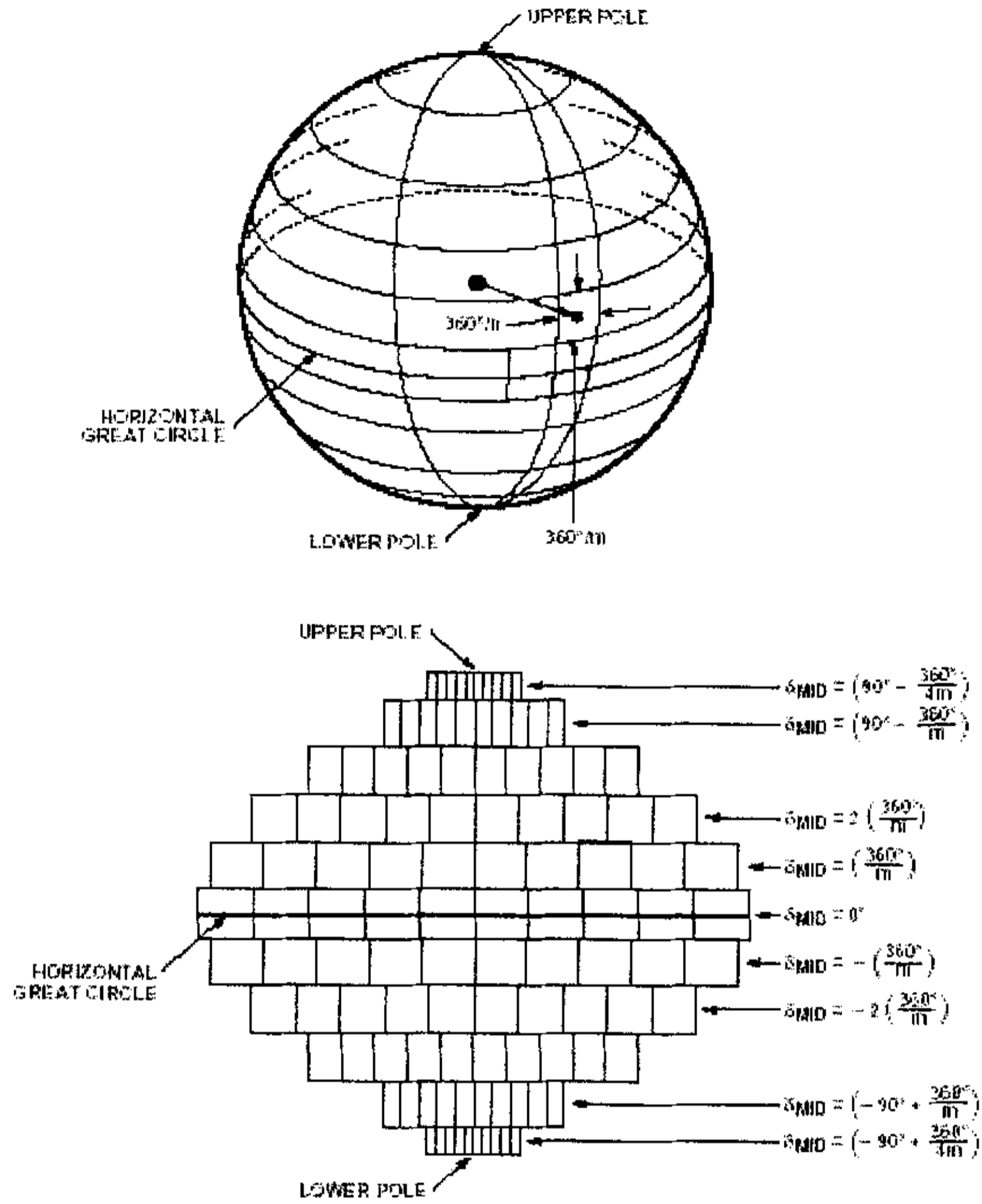


图 4-9 δ_{mid} 值的计算方法

第五章 LED 应用于照明的设计

§ 5.1 LED 照明器光学系统的选择

LED 发光二极管与近代高效节能光源相比,其发光效率还有很大差距。如何提高它的效率以及如果高效的利用 LED 发光二极管已经成为大家关心的问题,所以 LED 应用于照明的设计包括两方面:一是 LED 的管壳设计,二是 LED 的光学系统设计。

如何提高 LED 本身的发光效率,也就是如何提高 LED 的内部量子效率和外部光子逸出率。内部量子效率与半导体材料的特性、制作工艺有关,通常减少半导体材料的杂质、晶格缺陷和位错可以提高 LED 的内部量子效率;外部光子逸出率和 LED 的封装有关,即 LED 的管壳设计,选择不同折射率的封装材料、封装几何形状对光子逸出率的影响不同。首先是 LED 封装的材料,一般采用透明环氧封装,从半导体芯片透出的光子先进入封装透镜,再逸出到空气中,由于封装材料的折射率在空气和半导体芯片材料之间,所以通过封装可以来提高光子的逸出率。其次是封装的几何形状,包括透镜和反光碗。一般透镜采用半球形封装,改变曲率半径从而改变透镜的焦距,起到汇聚或者发散光线的作用,特殊的封装形状通常为旋转二次曲面,比如抛物面、椭球面和双曲面。

如何高效地使用发光二极管,也就是如何设计发光二极管的照明器,如何进行光学系统的选择和添加,即 LED 的光学系统设计。在光学设计中,最初的考虑是采用哪一种系统:反射、折射、漫射、遮挡或它们的混合装置。使用镜面反射材料制成的反射器系统比折射器系统要好,因为通过一个简单的光学系统能控制更多的光通量。特别是光线必须集中成为光束时,反射系统更为有效。除非需要严格的眩光控制,通常在普通用途的室内灯具中都不采用反射系统;当需要从一个光源得到几条光束时,就要采用由棱镜或透镜组合的折射系统。折射系统也应用于道路照明灯具中,因为它需要两束光线但又必须保持灯具的狭小尺寸。

LED 的光学系统设计指把封装后的 LED 做为光源,附加光学器件来达到照明或者显示的要求。一般附加的光学元件可以分为发散光学器件和聚光光学器件,发散光学器件是用来扩散光束角度,比如枕型透镜、齿形折光板、梯形折光板和柱形折光板等;聚光光学器件一般用来将入射光变为平行的出射光,再经发散光学器件后达到设计要求,这

类光学器件典型可以是透镜，比如平凸透镜、平凹透镜或者菲涅尔透镜等，也可以是反射镜，比如抛物面反射镜、椭球面反射镜和双曲面反射镜等。

1. 折光板

折光板的作用是改变光线的方向或在特定的方向上改变光束的角度。

(1) 齿形折光板

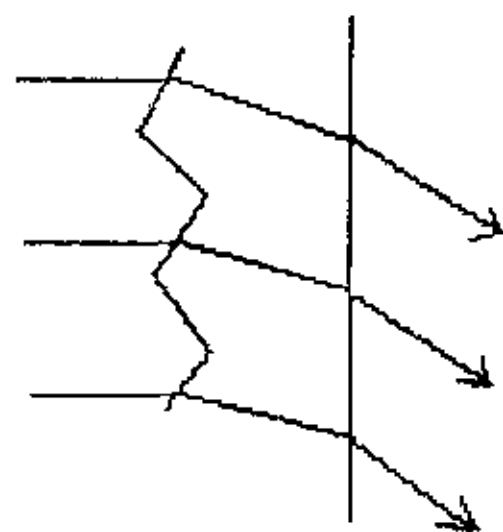


图 5-1 齿形折光板

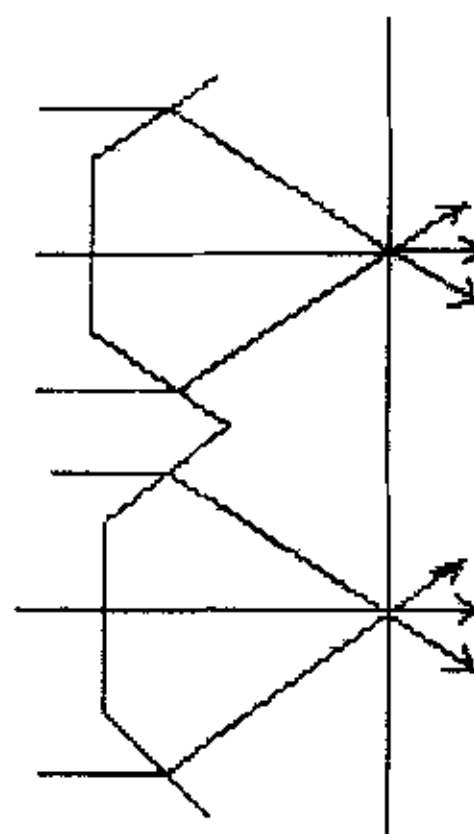


图 5-2 梯形折光板

如图 5-1，齿形折光板的某一齿相当于楔形镜，由于材料表面的折射作用使光线发生偏转，对光束角影响不大。齿形折光板主要用来改变光束方向，作为偏转镜使用。

(2) 梯形折光板

如图 5-2，梯形折光板相当于平板玻璃和楔形镜的组合物。平板玻璃不改变光线方向，楔形镜使光线偏折，其偏折方向与楔角方向相反。平板玻璃两侧斜面方向不同，则光线偏折方向相反。梯形折光板使一束光分成三个方向，三光束的光强比可由平面和斜面的面积比控制。

(3) 柱形（球形）折光板

柱形折光板由一系列圆柱面组成，每个柱面相当于一个透镜。在柱面母线方向上，保持光线原方向。球形折光板也叫复眼透镜，由多个透镜组合而成，其中每个透镜在各个方向都产生会聚或发散。

这两种折光板都是用来扩展光束角度，但柱形板只是在一个方向上改变光束角度。

2. 透镜^{[50][51]}

透镜的作用是使得光源发出的光线汇聚或者发散，从而起到改变光束角度，改变照明面积和光照度的作用，在实际的适用中，通常通过改变光源到镜头的距离来控制光束的发散角。

透镜一般有球面透镜比如凹透镜、凸透镜等，非球面透镜比如菲涅尔透镜等。透镜通过折射原理来对光束起会聚或者发散作用，从而改变光通量的空间分布即光强的分布。透镜的焦距计算公式如式（5-1）所示：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{T(n-1)}{R_1 R_2 n} \right] \quad (5-1)$$

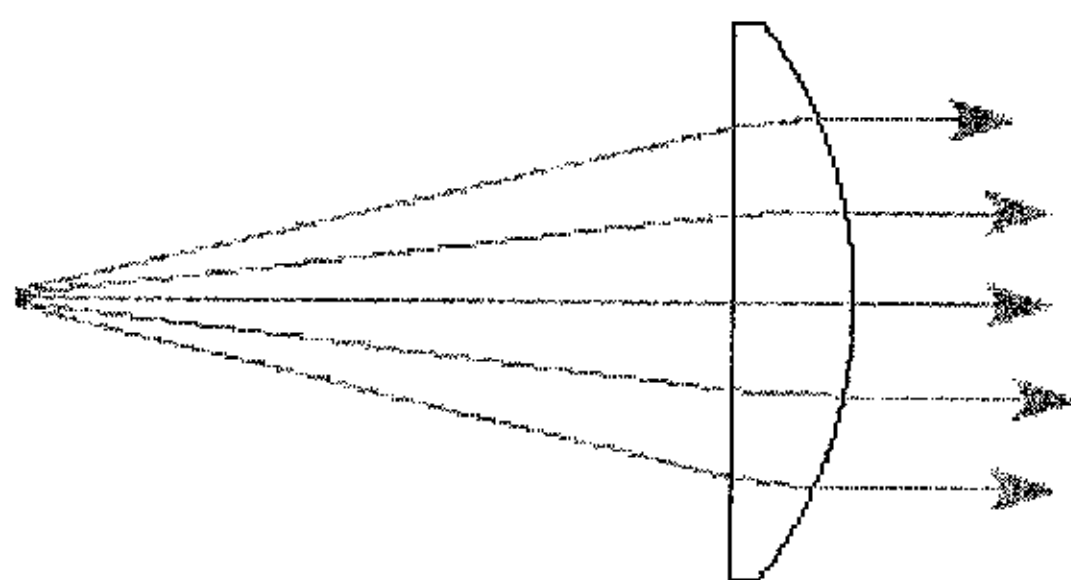


图 5-3 平凸透镜

其中 n 表示透镜的折射率， f 为透镜的焦距， R_1 ， R_2 分别表示透镜两个面的曲率半径； T 表示透镜的厚度，对于薄透镜，则如式（5-2）所示：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right] \quad (5-2)$$

如果设计中所采用的透镜为平凸透镜，如图 5-3，即 $R_1 = \infty$ ，则有：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{R_2} (n-1) \quad (5-3)$$

在 n 已知情况下，根据光源入射光束的半角宽度和照明要求，在折射原理 $n \sin(\theta_1) = \sin(\theta_2)$ 的基础上，通过改变 R_2 来改变 f ，从而设计相应的透镜，其中 θ_1 为透镜入射角， θ_2 透镜出射角， n 为透镜的折射率。

3. 反射镜

反射镜一般有球面反射镜和非球面反射镜。非球面反射镜通常为旋转二次曲面，如：

抛物面、椭球面和双曲面，其光路如下图，不同的反射镜有不同的特性：抛物面反射镜把焦点 F 处发出的光线变为平行光；椭球反射面把左焦点 F_1 处发出的光线会聚于右焦点 F_2 处；双曲面反射镜把左焦点处的光源成像到右焦点，相当于光线由右焦点发出，起到改变光源发散角的作用^[52]。

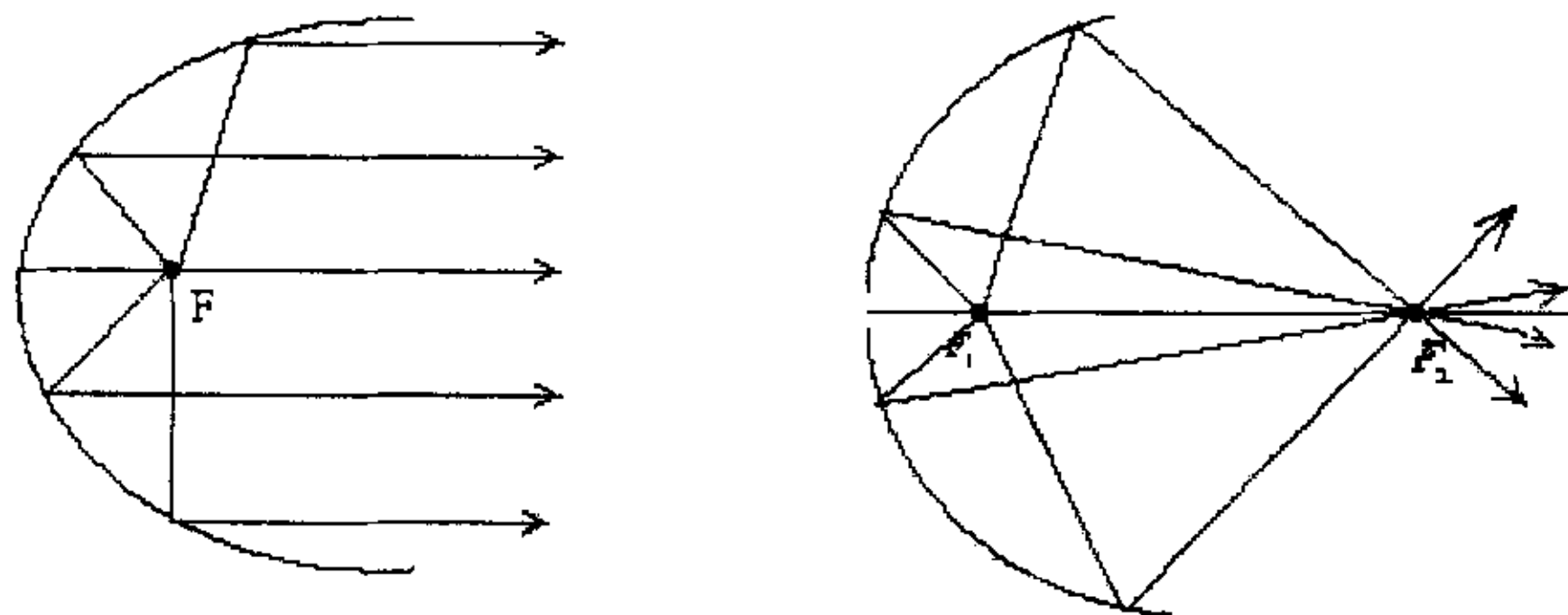


图 5-4 抛物面反射镜（左）和椭球面反射镜（右）

非球面反射镜与透镜在原理上大不相同，透镜用折射原理，反射镜用反射或全反射原理，尽管表面上能改变光源的光束角，但是所包含的孔径角差别很大。由于材料的折射率有限，透镜的孔径角比较小，通常在 40° 以下，而非球面反射镜的孔径角却可以达到 130° 以上。孔径角的大小表示收集光线的能力，也就是说非球面反射镜的集光能力较强，透镜则比较弱。

4. 白光 LED 应用于照明的设计

白色 LED 用于照明，可以根据需求，配制各种不同的 LED 灯，在照明角度，外形设计，亮度变换等方面，将给人们带来极大的自由空间。使用电压也将从 220V 降到 5V，能源节省近 90%。白光 LED 与一般照明设备比较，除了省电外，对于废弃物的回收问题，也比现行日光灯少，可说是既安全又环保。而白光 LED 技术的不断提高，从 1998 年的 5lm/w 到迄今的法向发光强度已达 10cd 以上，光效已超过 25lm/W ，使得高效、节能、长寿命的照明光源成为可能。所以未来应用领域也非常广泛，如交通信号灯、室内照明，建筑照明，小型发光照明工具等^[53]。

白光 LED 的照明设计可以分为 LED 外部系统的设计和 LED 管壳的设计。系统设计是指 LED 作为光源，根据照明的需要，附加光学元件，下面是几个白光 LED 应用于照明的设计实例。

§ 5.2 LED 矿灯的设计

现在矿工使用的传统的矿灯一般是酸碱灯，酸碱矿灯温度高，易产生电火花，而LED矿灯用的冷光源，从根北上杜绝安全隐患。其次是轻便，此前普遍身用的酸碱矿灯包括镀灯盒总重量为0.7公斤，并有一根电缆连接，不方便，而LED灯总重量很小，且电池、电缆均在帽子里，减轻了矿工的头部负重。酸碱灯硫酸易溢出烧坏皮肤，锂电池则不存在这个问题，此外，这种灯还节电，符合环保要求。

1. LED 矿灯的设计基础

单只LED的光能量小，亮度低，为了达到户外照明的要求，一个简单的方法是由多个发光二极管组合在一起形成点光源、面光源或者体光源^[54]。一般LED主要包括几个部分，LED发光芯片，反光杯，连接正负极的引线框和环氧封装。所以单个LED的发光状态即光束角度取决于三方面：1，LED芯片的大小和位置；2，反光杯的形状；3，环氧封装的形状。根据单个LED的设计思想，一般多芯片LED照明工具由三部分组成：LED组合光源、透镜、反射镜。影响系统发光效果的主要因素有：芯片的个数以及放置的位置、透镜和反射镜的形状、特性和位置。

与单个LED不同的是本系统的芯片并非放置在反光碗内，而是把四个LED芯片放

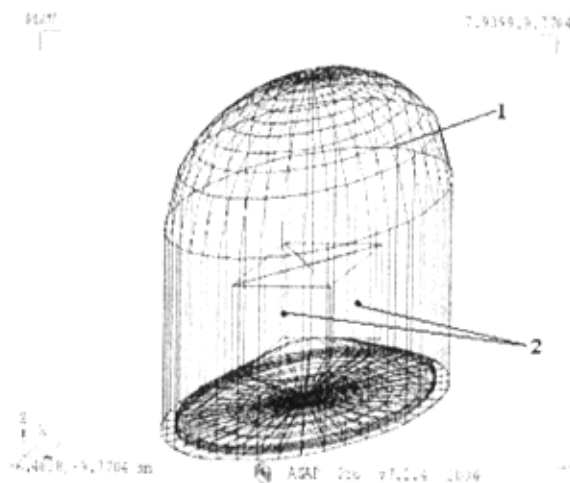


图 5-5 未放入反光碗前的几何模型

1—环氧封装透镜，2—芯片

置于环氧树脂平凸透镜内，如图 5-5 所示，图中 2 表示的是其中两个芯片的位置，另外两个芯片放置在立方体另外两个对应面上，整个发光体放置在抛物面反射镜内，如图 5-6 所示。芯片为发蓝光，外面涂敷高效黄色荧光粉，蓝光以及被蓝光激发的荧光粉发射的黄光相混互衬后，发出白光。环氧树脂的折射率为 1.59，它起到保护四个芯片和集光棱镜的作用，决定了光源的形状。LED 芯片距离环氧树脂透镜的前端越近，出射光束的角度越大。可以通过改变树脂棱镜的焦距，棱镜的位置来得到不同的发光曲线，满足不同的照明要求。

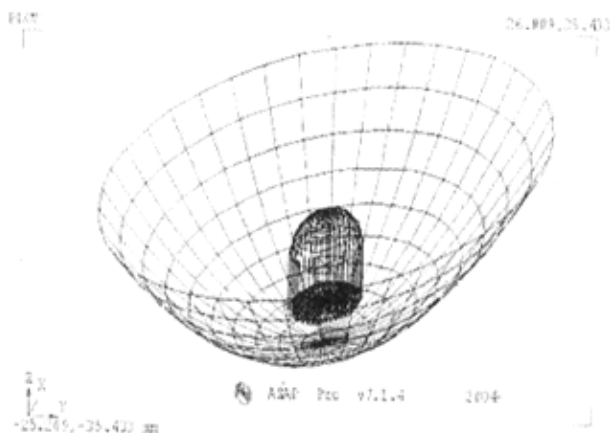


图 5-6 置于反光碗内的几何模型

本文设计中采用抛物面反射镜。如图 5-7 为抛物面反射镜， f 表示抛物面的焦距， r 表示抛物面的焦点到反射面的矢径， ϕ 为对应的半孔径角，根据不同的集光需要，可

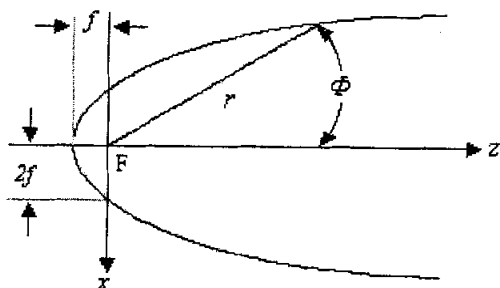


图 5-7 抛物面反射镜

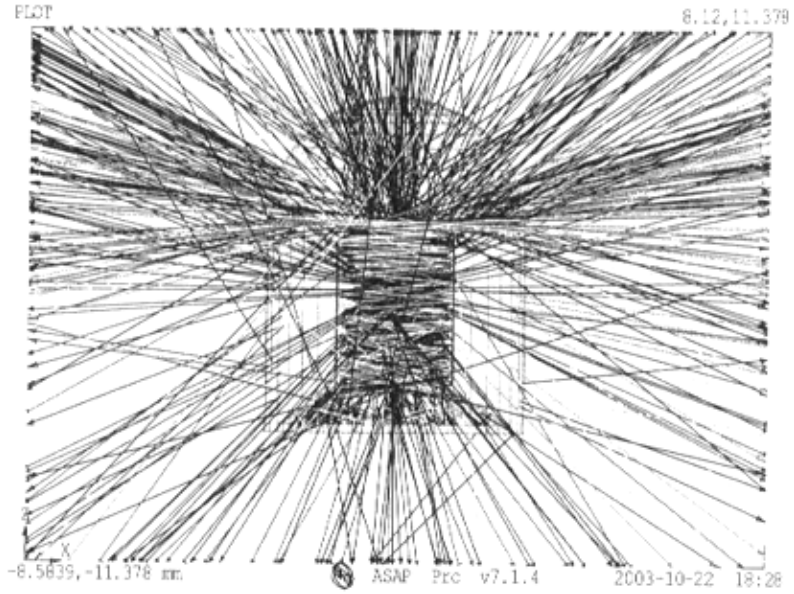


图 5-8 出射光束角为 22° 的几何体的光线追迹

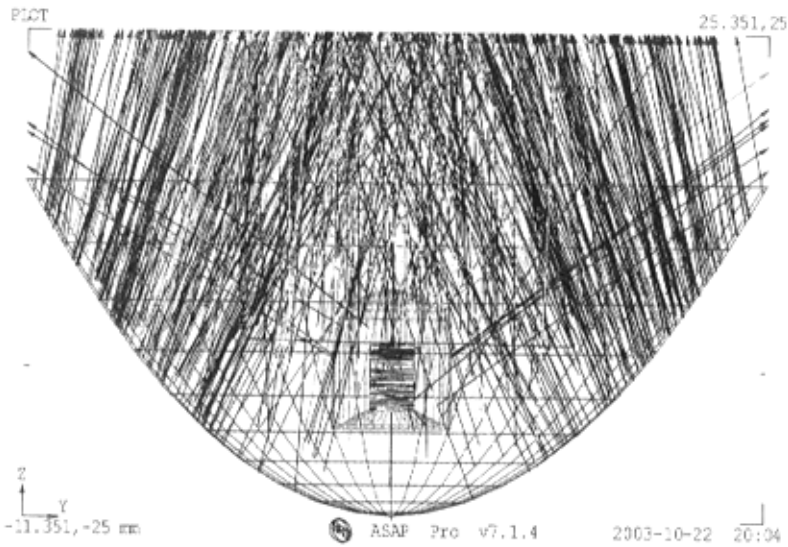


图 5-9 出射光束角为 22° 的反光碗内的几何体的光线追迹

通过改变焦距 f 和相应的半孔径角 ϕ 来设置反射镜。其学表达式如下式 (5-4) 所示:

$$r = \frac{2f}{1 - \cos\phi} \quad (5-4)$$

2. 出射光束角为 22° 的设计

设计中反射杯直径为 35mm，杯深为 18mm。在 ASAP 中分别对加反射杯前和加反射杯后两种情况进行蒙特卡罗追迹，如图 5-8 和图 5-9 所示。

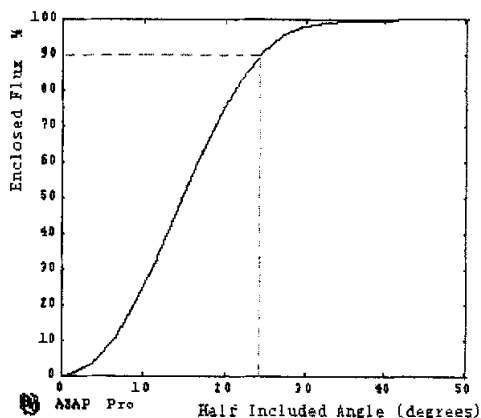


图 5-10 光通量分布曲线

图 5-10 为在 ASAP 中模拟得到的光通量分布曲线，表示 90% 的光通量分布在以光轴为中心，顶角为 22° 的圆锥体内。根据追迹结果模拟出被照面上的相对光强分布曲线，如图 5-11 所示，虚线表示对该照明器件实际测得的相对光强分布曲线，两条曲线基本吻合。由模拟曲线可以得出本设计的半强度角约为 22°，实际测得的约 20°。

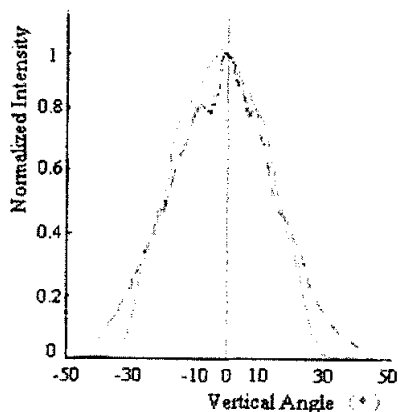


图 5-11 光强分布曲线图

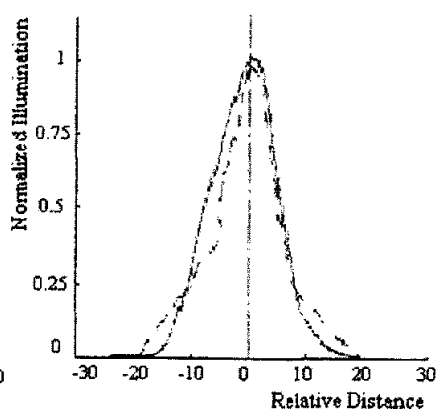


图 5-12 光照度分布曲线

对于一般的照明器件，其光度数据通常需以照度分布的形式在离开照明器较远的指定平面上体现出来。本例中根据实际测得的光强，利用上文提到的逐点计算法得出，计

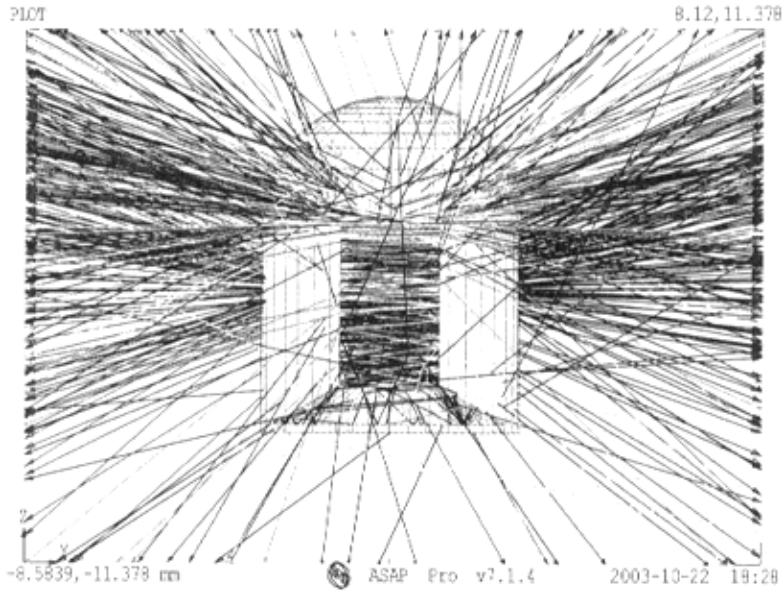


图 5-13 出射光束为平行光的几何体的光线追迹

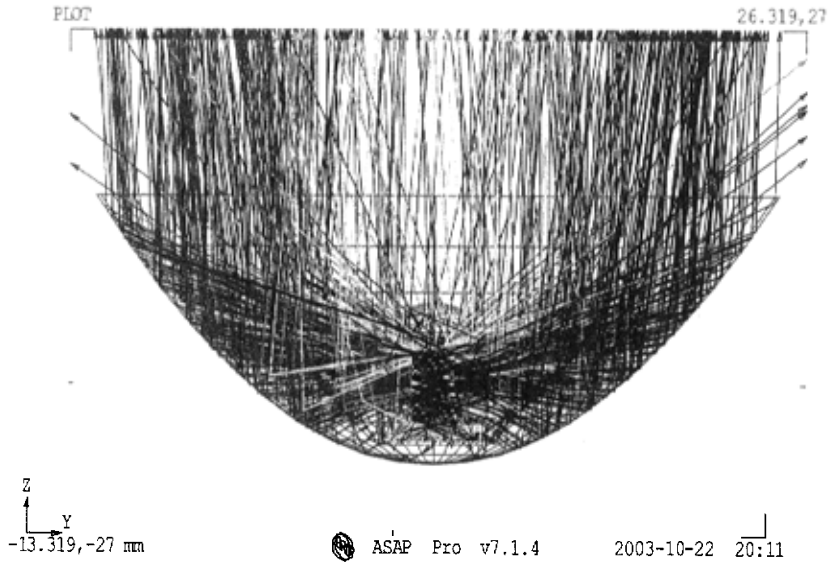


图 5-14 出射光束为平行光的反光碗内几何体的光线追迹

算得到被照面上的相对光照度分布曲线如图 5-12 中虚线所示, 在 ASAP 中模拟得到的相同条件下被照面上的相对光照度分布曲线如图 5-12 中实线所示。

3. 出射光为平行光的设计

为了使光线以近似于平行光的形式出射到被照射面上, 修改反光碗焦距、球面凸透镜焦距、圆柱形透镜、光源位置等参数。修改后的反射杯直径为 50mm, 杯深 16mm。在 ASAP 中对加反射杯前后两种情况重新进行光线追迹, 追迹结果如图 5-13 和 5-14 所示。

修改后的系统相对光强分布曲线如图 5-15 所示, 半强度角约为 3° , 表示光线基本以平行光出射, 相对光照度分布曲线如图 5-16 所示, 修改后的系统照度分布相对更加均匀和集中, 中心照度相对集中, 周围照度逐渐减小。

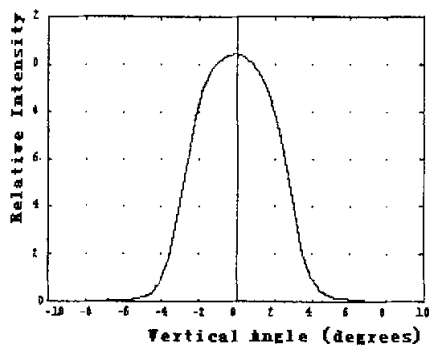


图 5-15 修改后的系统相对光强分布曲线

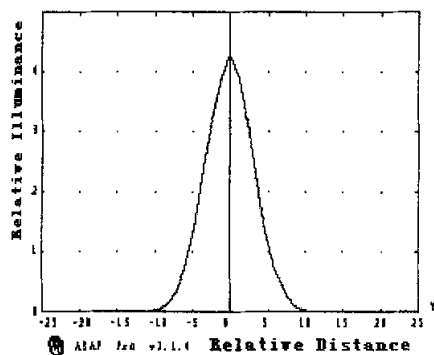


图 5-16 修改后的系统相对光照度分布

由以上分析结果可以看出, 在一般照明设计的理论基础上, 通过定义光强分布和发光体几何形状在 ASAP 中模拟光源, 通过大量光线的蒙特卡罗追迹结果可以得到光强、光通量和光照度等相关的分布曲线。通过改变设计的参数, 例如凸透镜的焦距、反光碗的焦距和位置、光源放置的位置等来达到设计要求, 即在制作原型系统或者大批量生产前做光学系统的仿真, 使设计人员可以更直观快速的看到设计结果, 从而缩短了产品市场化的时间, 同时减少了材料的浪费。

§ 5.3 应用于博物馆文物展示的白光 LED 照明系统

由于 LED 直接将电能转化为可见光, 无热辐射, 效率高, 光谱几乎全部集中于可

算得到被照面上的相对光照度分布曲线如图 5-12 中虚线所示, 在 ASAP 中模拟得到的相同条件下被照面上的相对光照度分布曲线如图 5-12 中实线所示。

3. 出射光为平行光的设计

为了使光线以近似于平行光的形式出射到被照射面上, 修改反光碗焦距、球面凸透镜焦距、圆柱形透镜、光源位置等参数。修改后的反射杯直径为 50mm, 杯深 16mm。在 ASAP 中对加反射杯前后两种情况重新进行光线追迹, 追迹结果如图 5-13 和 5-14 所示。

修改后的系统相对光强分布曲线如图 5-15 所示, 半强度角约为 3° , 表示光线基本以平行光出射, 相对光照度分布曲线如图 5-16 所示, 修改后的系统照度分布相对更加均匀和集中, 中心照度相对集中, 周围照度逐渐减小。

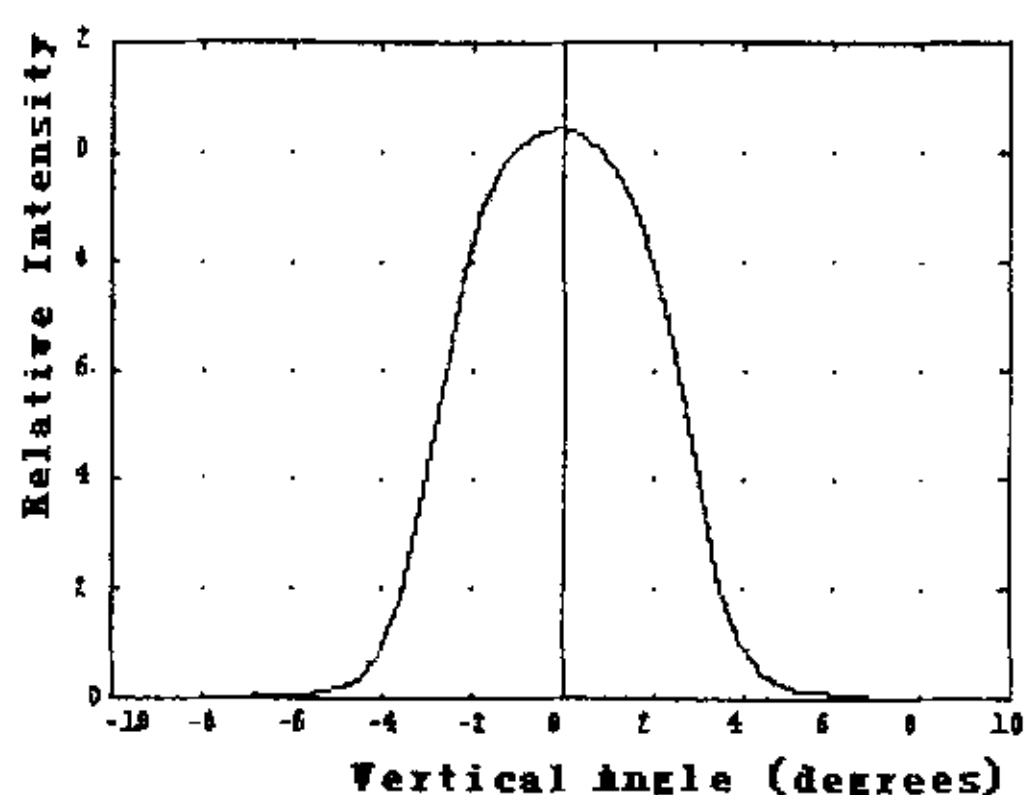


图 5-15 修改后的系统相对光强分布曲线

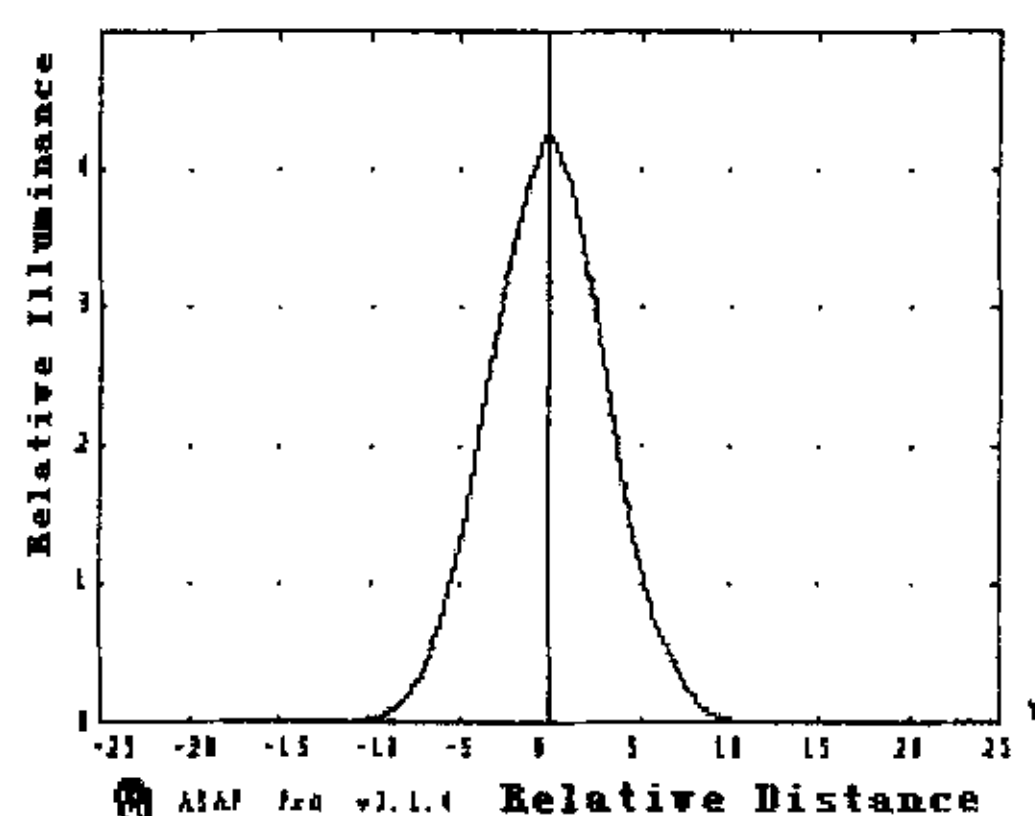


图 5-16 修改后的系统相对光照度分布

由以上分析结果可以看出, 在一般照明设计的理论基础上, 通过定义光强分布和发光体几何形状在 ASAP 中模拟光源, 通过大量光线的蒙特卡罗追迹结果可以得到光强、光通量和光照度等相关的分布曲线。通过改变设计的参数, 例如凸透镜的焦距、反光碗的焦距和位置、光源放置的位置等来达到设计要求, 即在制作原型系统或者大批量生产前做光学系统的仿真, 使设计人员可以更直观快速的看到设计结果, 从而缩短了产品市场化的时间, 同时减少了材料的浪费。

§ 5.3 应用于博物馆文物展示的白光 LED 照明系统

由于 LED 直接将电能转化为可见光, 无热辐射, 效率高, 光谱几乎全部集中于可

可见光波段,无紫外辐射,而且其寿命长、安全环保,因此属于典型的绿色光源。由于应用于博物馆文物展示照明时,还要考虑到光源发出的紫外辐射或者红外热辐射可能会对文物造成不同程度的损害,而白色发光二极管光源可以使得此损害降低到最小程度。如图 5-17 由白光 LED 光谱分布曲线可得在可见光范围 400—760nm 波段内的相对光强比较大;在紫外和红外波段相对光强很小,基本处于截止区域。而由白炽灯光谱分布曲线可得,虽在紫外波段相对光强较小,但红外波段相对光强很大,因此产生的热辐射相对白光 LED 而言要大得多^{[55][56]}。由此可知白光 LED 照明辐射危害较小,更适用于博物馆文物展示照明。总之,白光发光二极管在博物馆文物照明中的应用有很大的发展潜力。

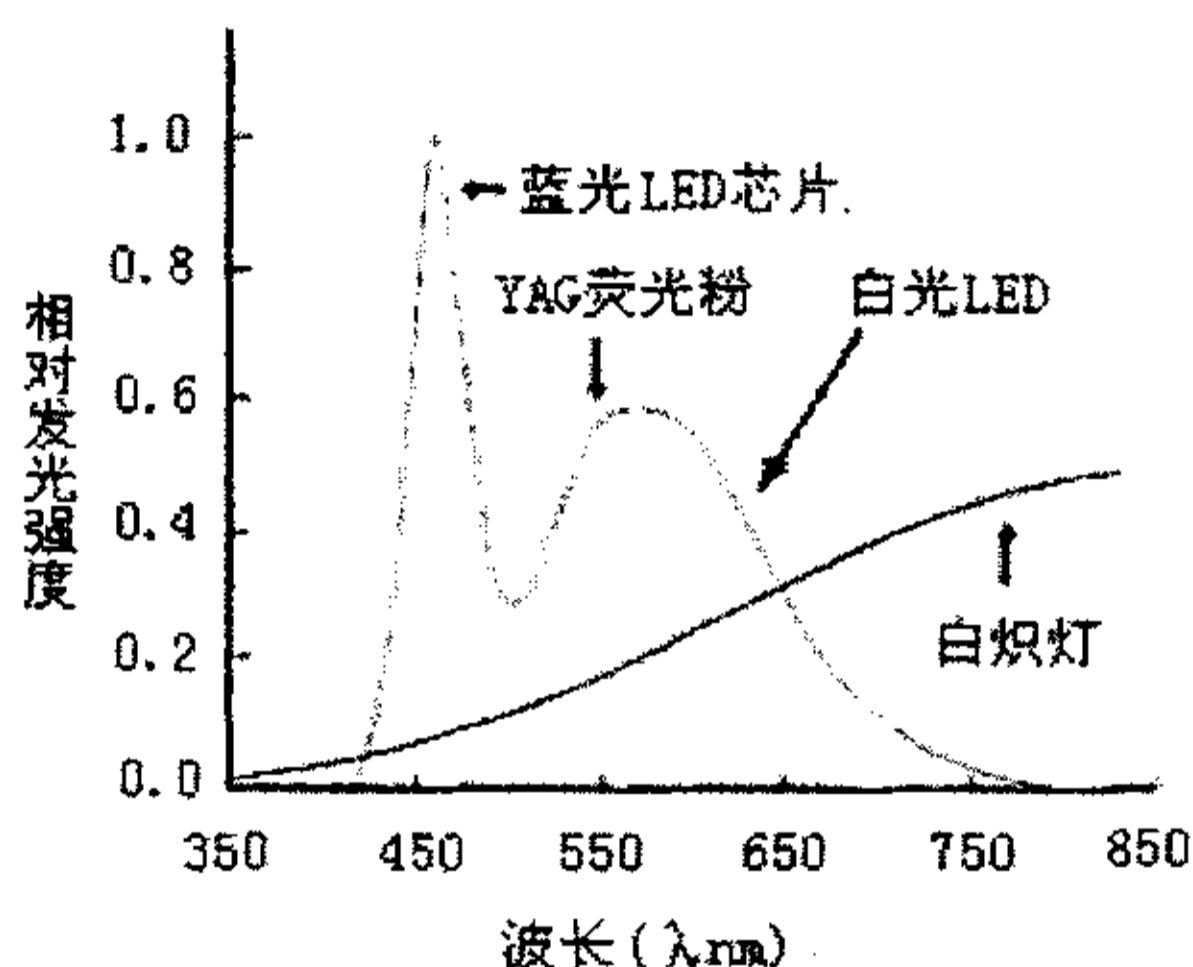


图 5-17 一种白光 LED 和白炽灯的光谱曲线

基于此,本设计提出了一种白色 LED 环形光源的照明系统,可以应用于博物馆文物展示的三维照明,并给出了该系统的光学设计和理论模型。本文通过计算机编程得到相应的反射镜面曲线方程参数,并在光学软件 ASAP (Advanced System Analysis Program) 中模拟出几何模型,进行光线追迹和数据分析,理论上证实此系统的可行性。

根据 R.Winston 的关于点光源的方法,光线被反射镜反射到被照面上,光源的光通量和被照射面所接收到的光通量相等, Benjamin A 将此理论应用到扩展光源,本文在此基础上设计了一种白色 LED 照明系统^{[57][58][59]}。

1. 基本的设计思想

(1) 光通量守恒

为了更清楚的表达设计的基本思路,假设光源为扩展光源,博物馆所展示文物形状

为圆柱体，被照面为圆柱体的侧面，光线经由反射镜到被照面上。假定圆柱体底面所在平面为 xy 平面，如图 5-18 为整个系统在 xz 平面的投影图，其中圆柱体高 H ，底面半径为 r_c ，光源的内径为 r_{in} ，外径为 r_{out} 。

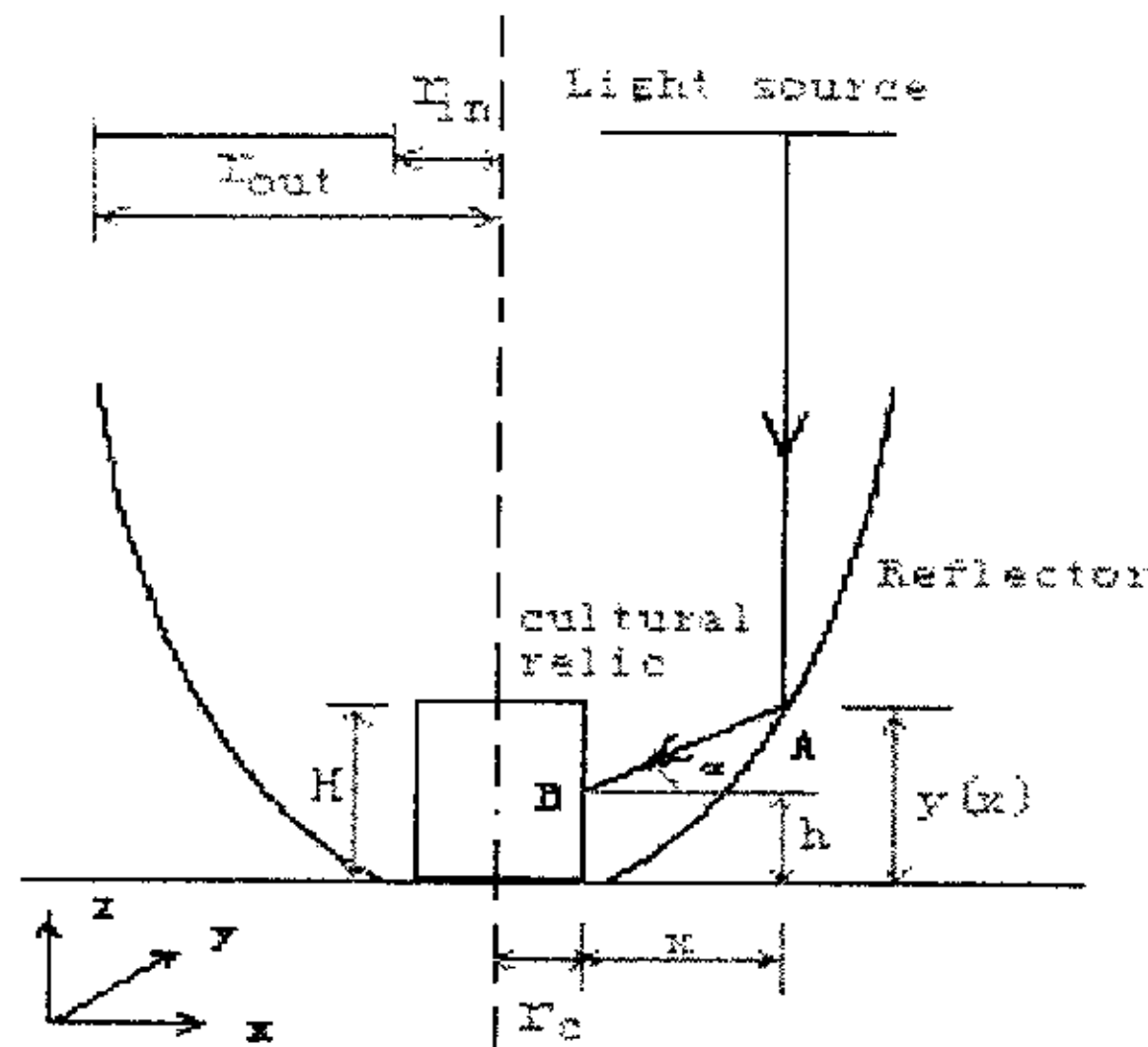


图 5-18 系统投影图

假设光源总的光通量为 F_0 ，单位面积上光源发出的光通量为：

$$dF_{source}(x) = F'_{source}(x) \cdot ds = \frac{F_0}{A_{source}} ds \quad (5-5)$$

其中 $A_{source} = \pi(r_{out}^2 - r_{in}^2)$ 为环形光源的面积，单位面元 $ds = 2\pi x dx$ 。

对应的分布在圆柱体侧面上单位面积上的光通量为：

$$dF_{target}(h) = \frac{F_0}{A_{target}} ds = \frac{F_0}{2\pi r_c \cdot H} \cdot 2\pi r_c dh = \frac{F_0}{H} dh \quad (5-6)$$

由光通量守恒，即 $dF_{source}(x) = dF_{target}(h)$ ，得到：

$$h = \frac{H}{r_{out}^2 - r_{in}^2} (x^2 - r_{in}^2) r_c \quad (5-7)$$

其中 x 的值介于 r_{in} 和 r_{out} 之间。

(2) 反射定律

如图 5-18 中，反射镜上 A 点处的一条光线被反射到圆柱体侧面的 B 处，假设

反射镜的曲线方程为 $z(x)$, 在 x 处的切线斜率为 $z'(x)$, 则可以得到:

$$h = z(x) - (x - r_c) \tan \alpha \quad (5-8)$$

又 $\alpha = 2 \arctan(z'(x)) - \pi/2$, 所以:

$$h = z(x) - (x - r_c) \frac{z'(x)^2 - 1}{2z'(x)} \quad (5-9)$$

综合等式 (5-7) 和 (5-9) 可以得到:

$$\frac{z(x) - A(x^2 - B)}{x - C} = \frac{z'(x)^2 - 1}{2z'(x)} \quad (5-10)$$

其中 $A = \frac{H}{r_{out}^2 - r_{in}^2}$, $B = r_{in}^2$, $C = r_c$ 。

当应用于博物馆照明时候, 反光镜上被镀上半透半反膜, 如果遵循光通量守恒, 光源发出的光线经过反射镜后一半的光线被反射到圆柱体侧面, 圆柱体侧面上接收到的光通量应该等于光源发出的总的光通量的一半, 因此, 式 (5-10) 中的:

$$A = \frac{H}{2(r_{out}^2 - r_{in}^2)}。$$

2. 系统的计算机模拟

在光学软件 ASAP 中对整个系统进行模拟分析:

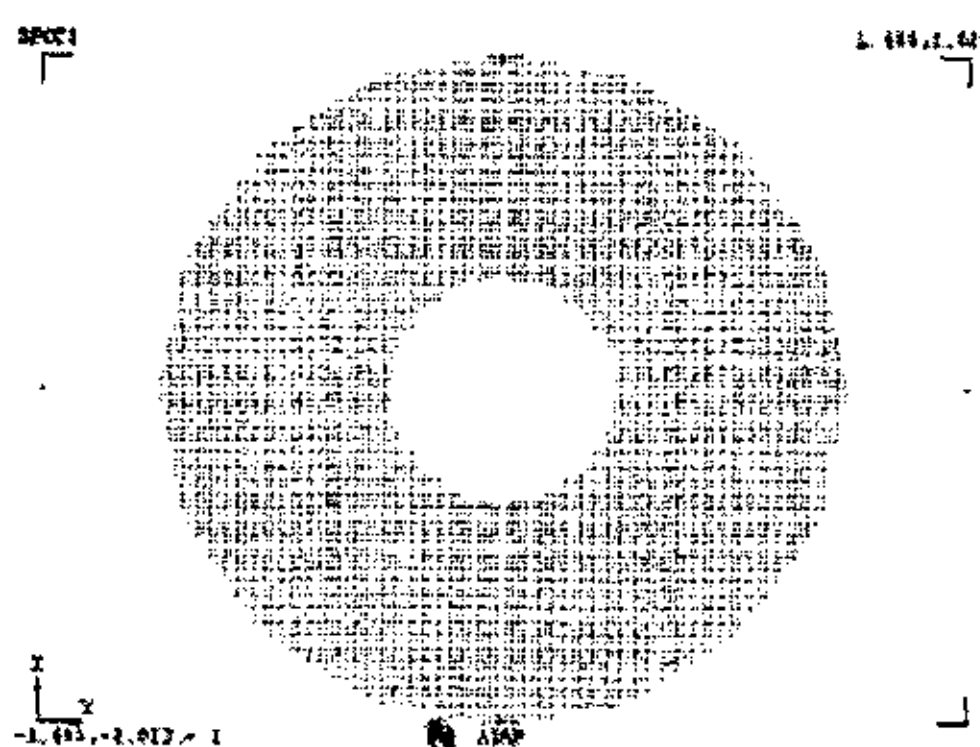


图 5-19 光源在平面上的投影图

光源采用白光 LED 环形光源, 共有 12 个白光 LED 环状排列, 每个 LED 的半强度角为 3° , 属于高指向性白光 LED, 型号为 T-1 (3/4), 封装形式为环氧封装。经平凸

透镜会聚为平行光束，如图 5-19 所示为光源在 xy 平面上的投影分布图。假定圆柱体底面中心为坐标轴原点，为了方便计算，取环形体外半径 $r_{out} = 1.5\text{cm}$ ，内半径 $r_{in} = 0.5\text{cm}$ ，圆柱体半径 $r_c = 0.3\text{cm}$ ，高度为 $H = 0.66\text{cm}$ ，则计算得到 $A = 0.165$ ， $B = 0.25$ ， $C = 0.3$ 。

通过计算机编程可以从方程 (5-10) 得到一系列的对应于不同的 x 的 z 和 z' 值，在光学软件 ASAP 中模拟出旋转对称的反射镜面和圆柱体，并进行光线追迹，追迹图形在 xz 平面的分布如图 5-20 所示。在 ASAP 中进行蒙特卡罗光线追迹时，设定光源发出 28004 条光线，并使得其光通量归一化为 1，追迹数据显示约 14096 条光线经过反射镜到达圆柱体侧面，光通量约为 0.5，表明光源发出的光线经过反射镜后一半的光线几乎全部被反射到圆柱体侧面上，即光通量守恒：光源被反射的光通量和被照射面所接收到的光通量相等。

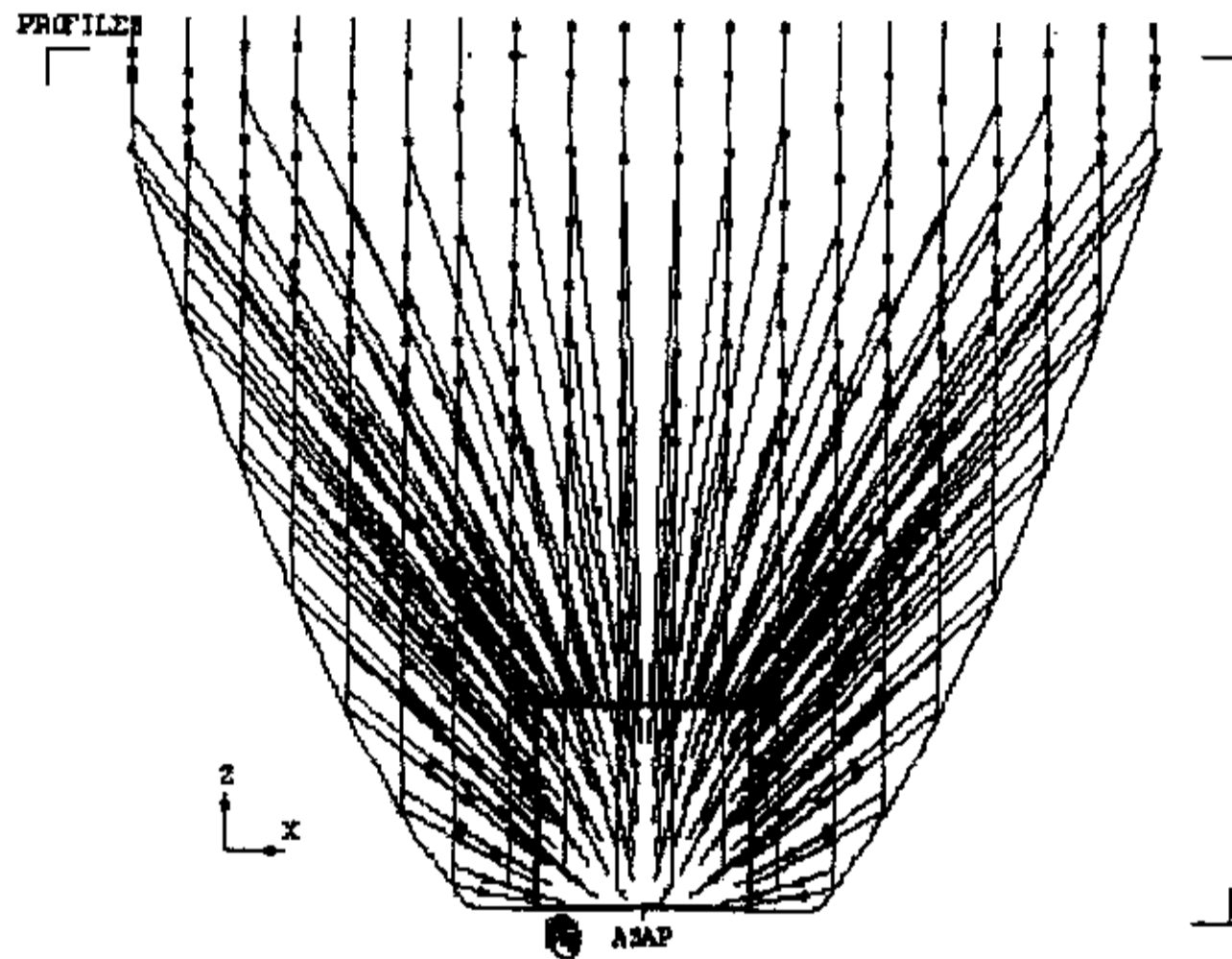


图 5-20 光线追迹图

将光源放置在距离圆柱体底端足够远处，选取十一条光线进行追迹，从表 5-1 的追迹结果可以看出十一条光线经过反射镜后遵循反射定律，均匀的分布在圆柱体侧面。如图 5-21 为圆柱体侧面上光照度的分布，图 5-22 为圆柱体侧面上光通量的分布，可以看到 90% 的光通量均匀的分布在圆柱体侧面上。

对于博物馆中展示的不同的文物，根据形状的不同由上式 (5-10) 计算得到相应的 A, B, C 值，可以在 ASAP 软件中模拟出相应的反射镜曲面；另外通过调整 LED 的个数、位置和发散角，同样可以改变整个系统的光线分布，从而在被照射物体上得到不同的照度分布，满足不同的照明要求。

博物馆照明不但要考虑照明器布局美观，不产生眩光，展品颜色显现性好，而且要考虑照明费用经济合理，展厅的设计不要求千篇一律，应根据每次展览所需强调的主题，制定恰当的设计方案等多种因素。因此恰当地选择光源照明器，合理布置照明器，利用计算机辅助设计计算，合理地测量等对照明设计来说都是非常重要的。所以照明软件的应用为博物馆照明系统的设计是不可缺少的。

表 5-1 光线追迹数据

光线与反射镜交点坐标 (x,y,z)	光线于圆柱面交点坐标 (x,y,z)
(0.5,0,0.022)	(0.3,0,0)
(0.6,0,0.15)	(0.3,0,0.036)
(0.7,0,0.31)	(0.3,0,0.08)
(0.8,0,0.45)	(0.3,0,0.14)
(0.9,0,0.70)	(0.3,0,0.18)
(1.0,0,0.96)	(0.3,0,0.24)
(1.1,0,1.18)	(0.3,0,0.32)
(1.2,0,1.44)	(0.3,0,0.39)
(1.3,0,1.72)	(0.3,0,0.48)
(1.4,0,2.01)	(0.3,0,0.56)
(1.5,0,2.30)	(0.3,0,0.66)

随着白色 LED 技术不断完善，LED 的光效不断提高，可以预计 2006 年白光 LED 光效可以达到 50lm/w，而到 2010-2015 年则可以达到 150—200lm/w^[60]，LED 在照明市场的前景将是不可估量的。上文提出的白光 LED 照明系统，是利用光学软件 ASAP 进行计算机模拟，设计出适合博物馆不同的文物展示照明系统，不但使得展示效果提高而且使得由紫外辐射或红外辐射对文物造成的危害程度降低，保护了文物。但是要使应用于博物馆文物展示的照明系统产品在实际中得到生产和应用，需要 LED 的生产逐渐规模化、市场化，LED 的价格逐渐降低，同时还需要博物馆文物保护人员的认可和关注，需

要照明设计人员的共同努力。

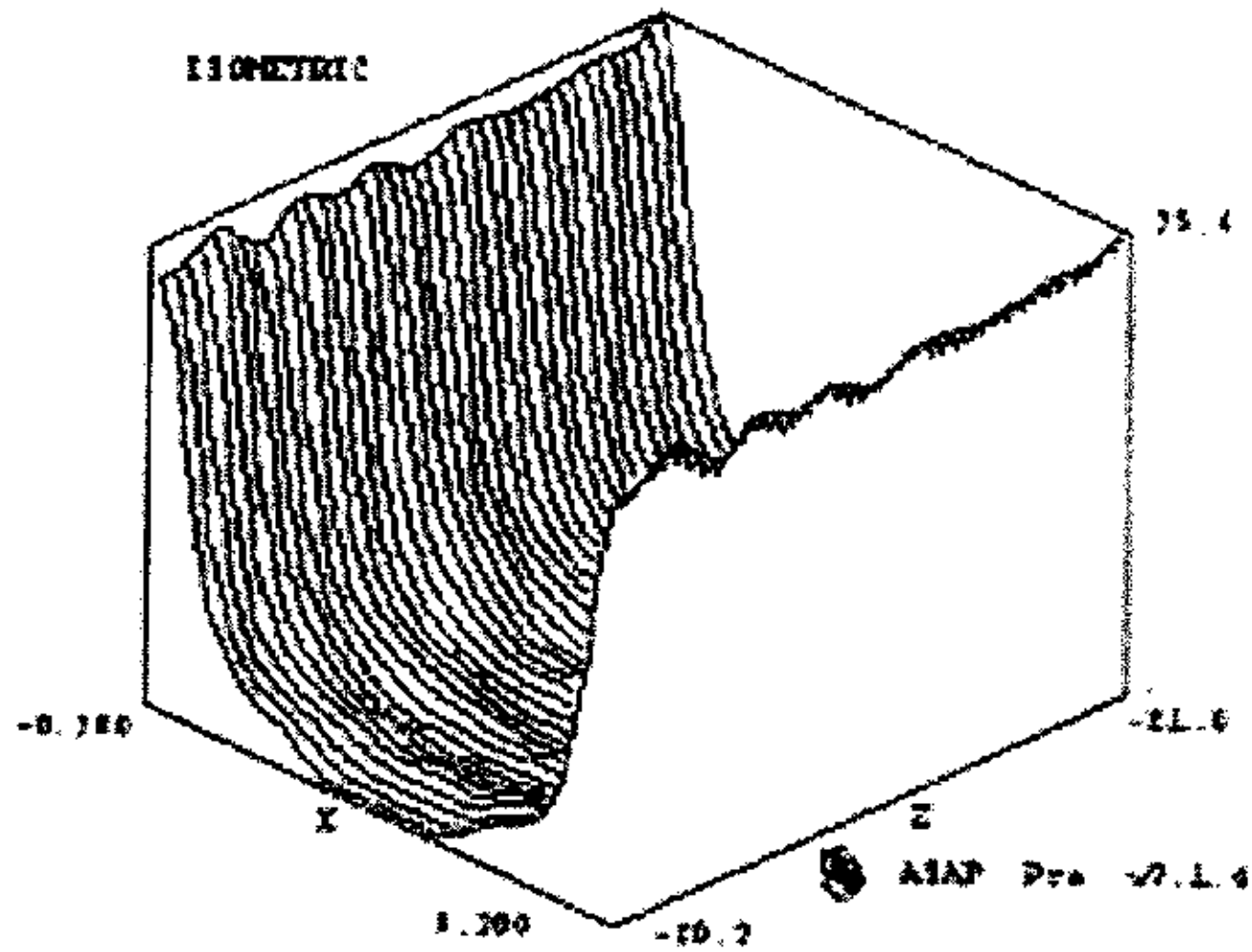


图 5—21 圆柱体侧面上的光照度分布图

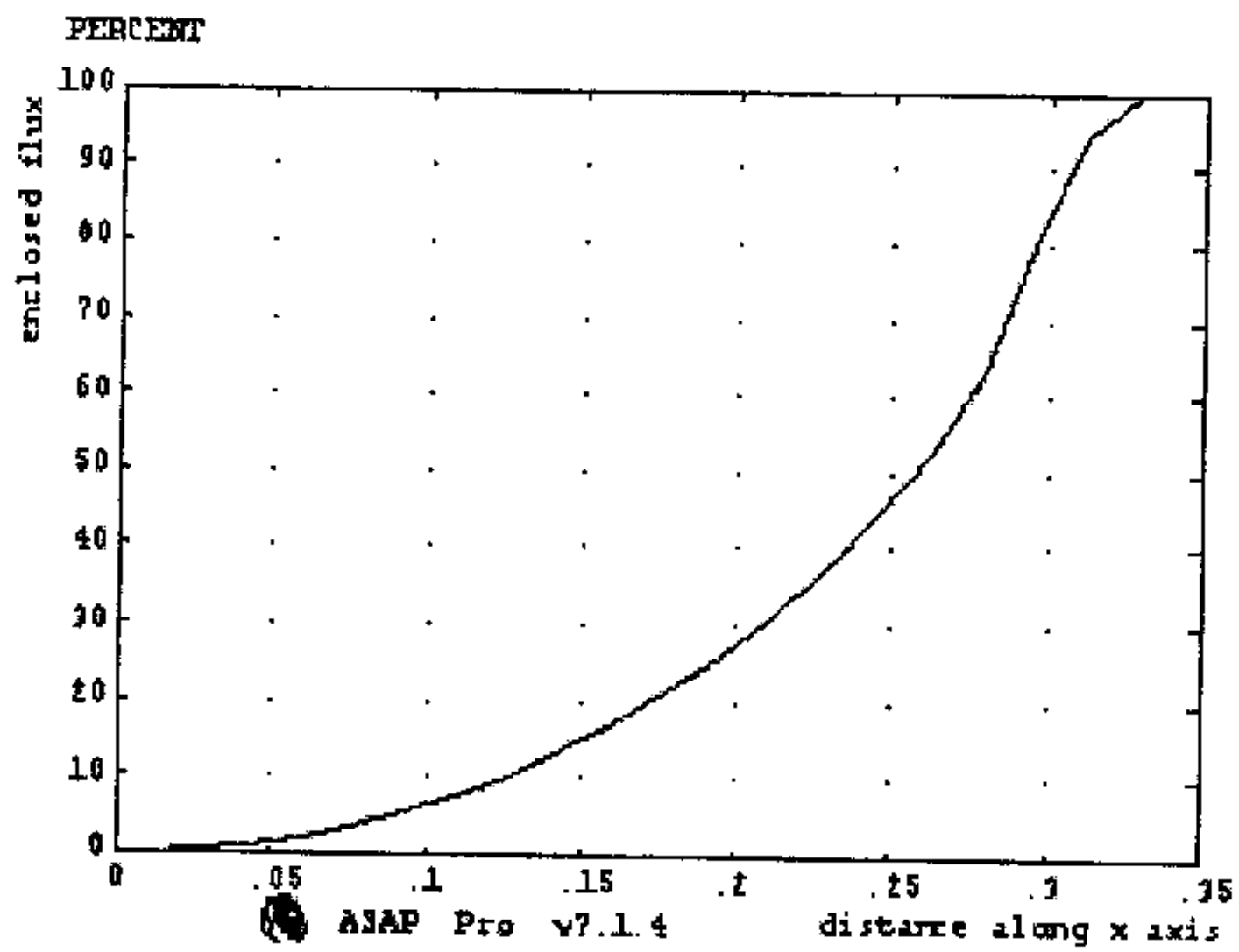


图 5—22 圆柱体侧面光通量分布

§ 5.4 白光 LED 射灯的设计

射灯在灯饰分类中属于定向投射灯。是一种局部照明灯具，亮度非常高，显色性优，控制配光非常容易，点光、光泽、阴影和材质感的表现力非常强。特定视觉工作作用的、为照亮某个局部而设置的照明称为局部照明。局部照明只能照射有限面积，对于局部地

点需要高照度并对照射方向有要求时，可装设局部照明。对于因一般照明受到遮挡或需要克服工作区及其附近的光幕反射时，也宜采用局部照明，具体在下列情况下宜采用 LED 射灯：

- (1) 局部需要有较高的照度
- (2) 由于遮挡而使一般照明照射不到的某些范围
- (3) 视觉功能降低的人需要有较高的亮度
- (4) 需要减少工作区的反射眩光
- (5) 需加强某一方向的光照，以增强质感

1. 白光 LED 射灯的设计

设计中的射灯光源内部 LED 芯片封装如图 5-23 所示，共有 49 个芯片。LED 芯片尺寸 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ ，1W 光源芯片个数 16 个，在直径 5mm 的平面上居中 4×4 矩阵分布，2W 芯片个数 33 个，在直径 5mm 固定平面上近似均匀分布。其外部封装如下图 5-24 所示，外部封装材料为亚克力 (PMMA)，折射率 $n=1.49$ ，半径为 4mm，内部为透光率 92% 的硅胶材料，折射率 $n=1.41$ ，半径为 3.5mm，封装后总的透光率约为 90%。

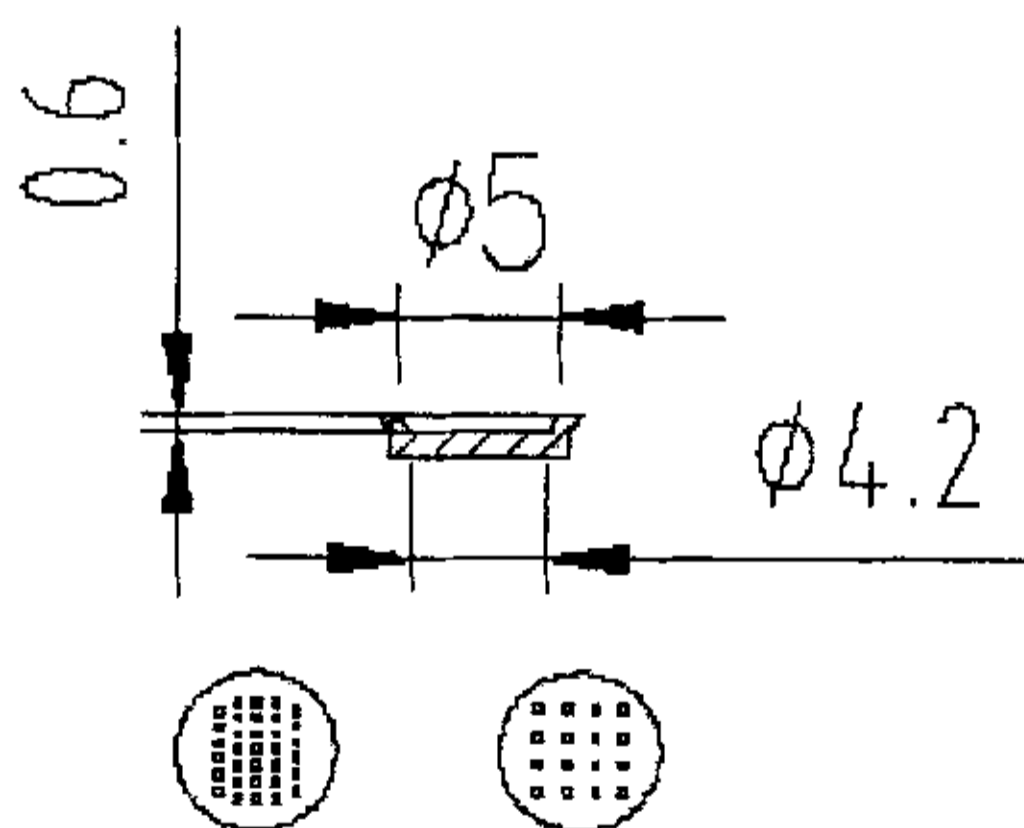


图 5-23 内部 LED 芯片分布状态示意

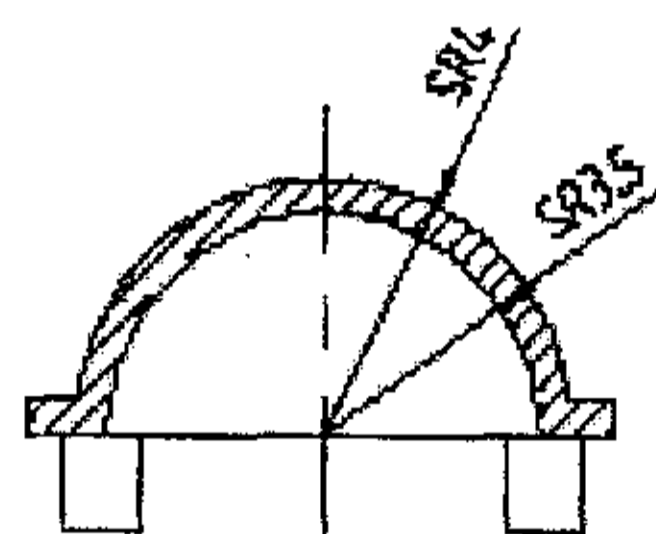


图 5-24 外部 LED 封装透镜示意图

传统的白炽灯射灯，由于发光部位集中在很小的范围内，加上合适的反射器就可以精确的控制光源发出的光线在空间的分布。一般的反射型射灯是采用抛物面形状的反射镜面。为了减少眩光，灯被装在一中遮挡得很好的下照灯具中。眩光的部分被挡住了，但是灯光的利用效率也降低了。如果采用椭球面反射器，根据椭球面反光镜的原理，LED

光源发出的光不会受到灯具挡屏的影响，从而提高了灯光的利用效率，使下照光的强度比同功率的抛物面反射型高；椭球反射面的另一个重要特点是在易产生眩光的角度范围内灯的亮度很低，因而能产生舒适的照明。椭球面反射型射灯如图 5-25 所示。

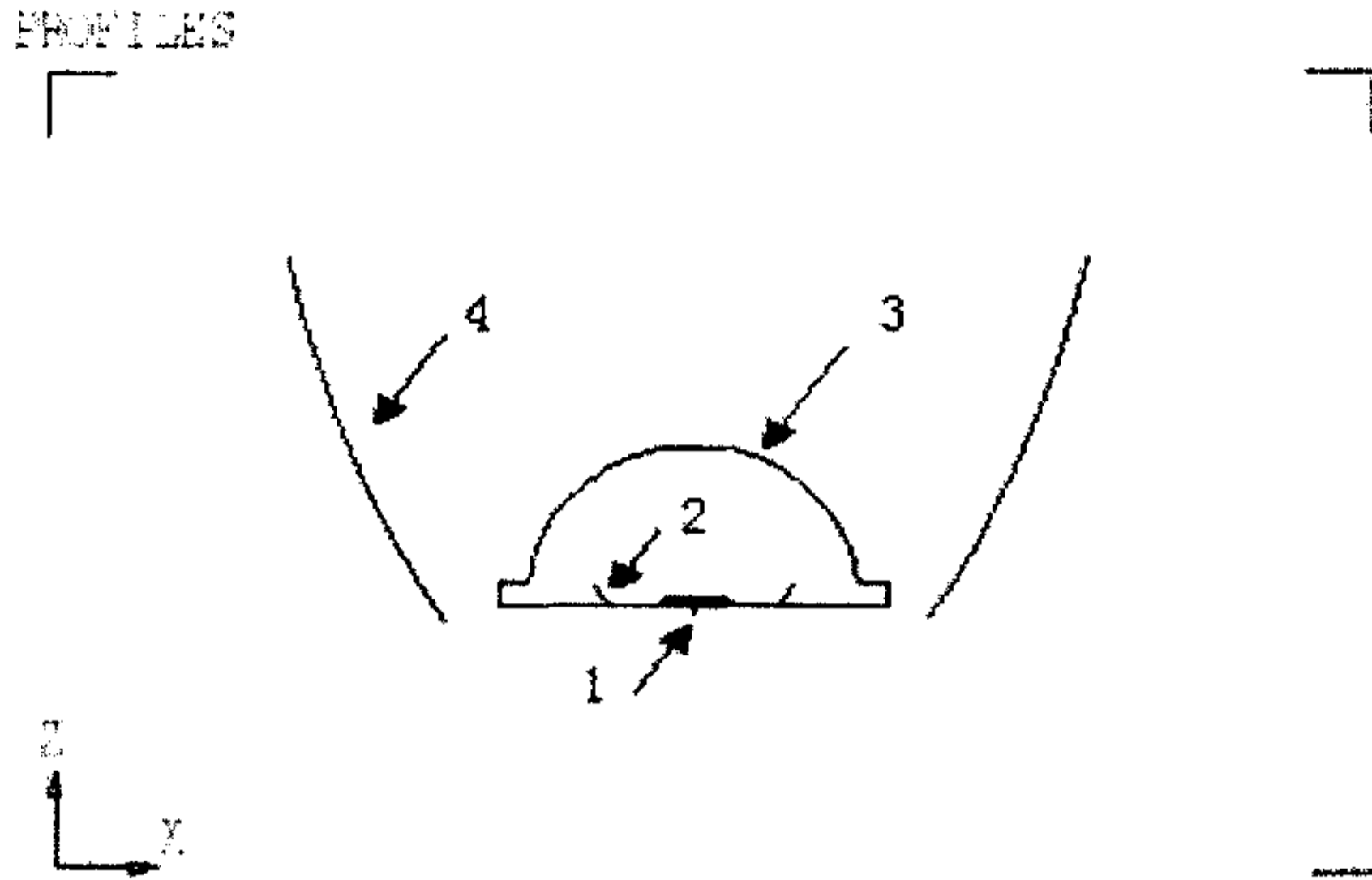


图 5-25 椭球面反射型射灯

1-LED 芯片，2-抛物面反光碗，3-球面透镜，4-椭球面反射镜。

反光碗为旋转椭圆面，如图 5-26 所示。椭圆方程为 $(\frac{z}{33})^2 + (\frac{x}{22.5})^2 = 1$ ，即长半轴为 33mm，短半轴为 22.5mm，光源放置在反光碗的底部（即光源下口径为 4.7mm 的地方放置在底部），反光碗（图中红色部分）总深为 13mm。

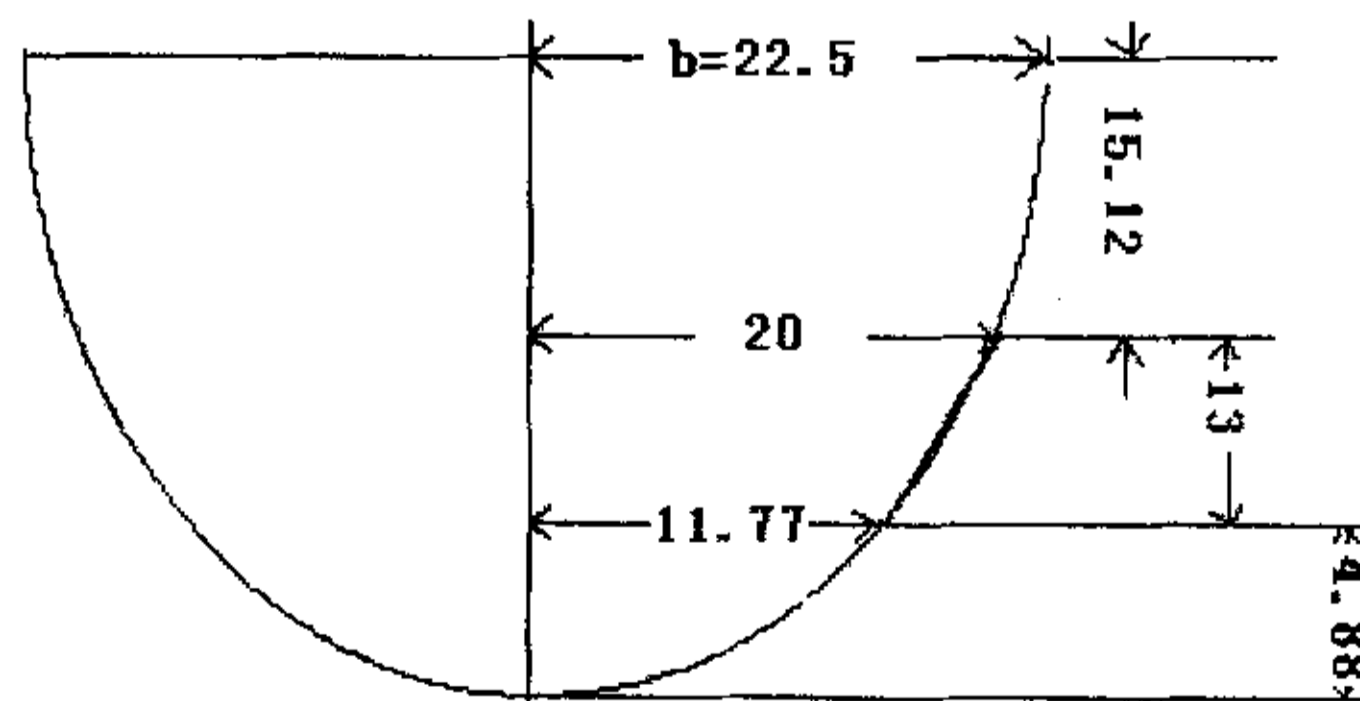


图 5-26 椭球反光碗的侧面投影图

2. 白光 LED 射灯特性参数

白光 LED 椭圆反射型射灯相对于传统的抛物面白炽灯射灯而言，白光 LED 射灯具

有工作电压小、功率低、发光效能高的特点；同时，白光 LED 射灯还具有寿命长、环保、不易损坏等特点。在相对测试条件下（其中温度为 26.5°），分别测量 MR16 型白炽灯射灯和白光 LED 射灯的系统特性参数，测量结果如表 5-2 所示。

如图 5-27 和 5-28 分别是白光 LED 光源和白光 LED 射灯的光通量空间分布图，白光 LED 光源的光通量分布在上半空间内，而白光 LED 射灯大约 90% 的光通量分布在 35° 的立体圆锥角内，表明反光碗重新分配了光通量的分布。

表 5-2 白炽灯射灯和白光 LED 射灯特性参数

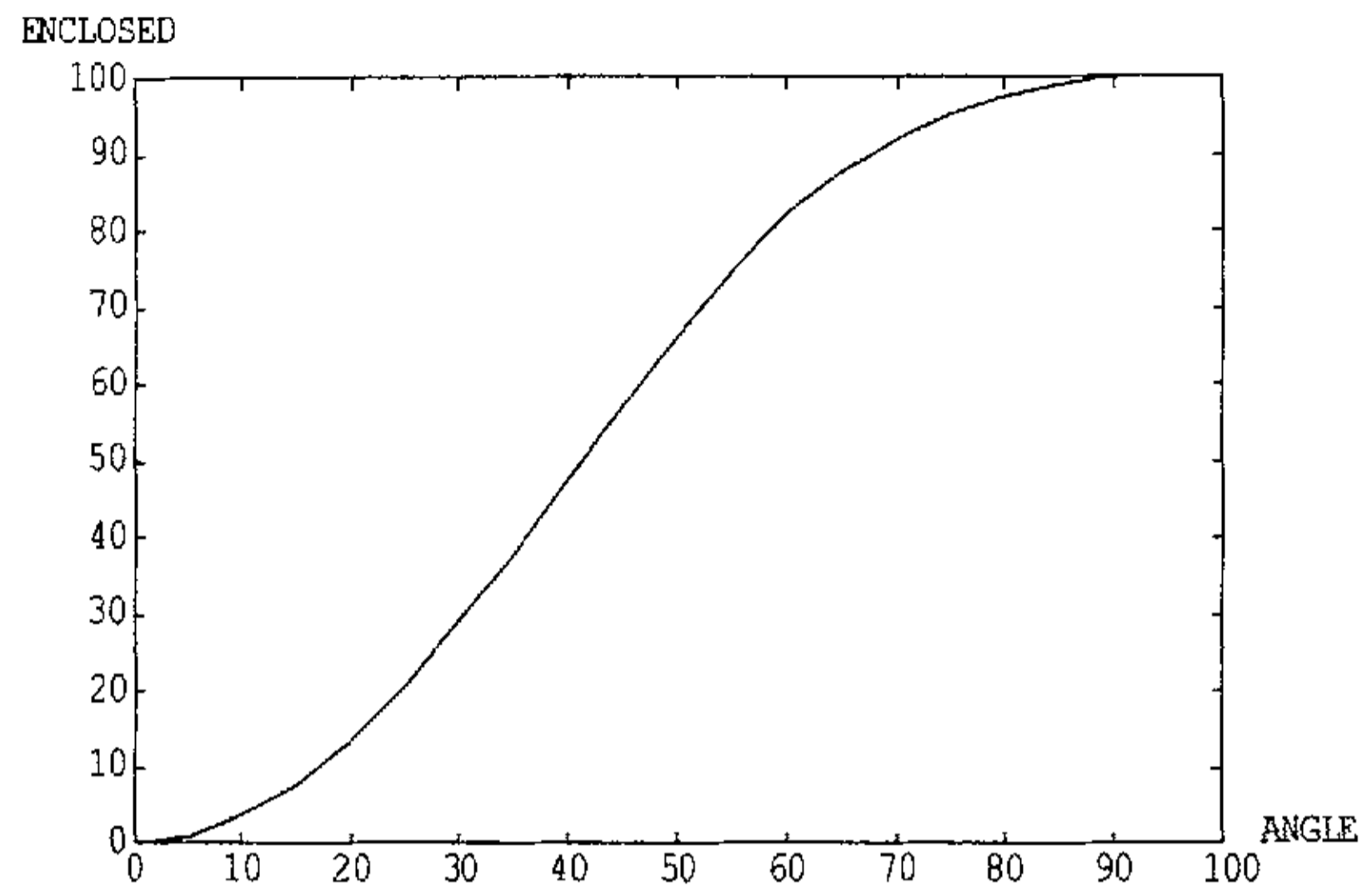
类别 参数	白炽灯(MR16)	白光 LED 光源	白光 LED 射灯
工作电流(mA)	408	348	348
工作电压(V)	120	3.2	3.2
功率(W)	49.3	1.1	1.1
光束角(°)	17	45	19
最大中心光强(cd)	1099	8.72	34.44
光通量(lm)	487.1	16.6	14.5
发光效能(lm/W)	9.931	15.1	13.18

图 5-29 和图 5-30 分别是白光 LED 光源和白光 LED 射灯的光强分布，白光 LED 光源的光强角约为 45°，白光 LED 射灯的光强角约为 19°。

照度的均匀度与照明器的型式(光分布)有关,在一般照明方式中,直射光照明器产生最大的不均匀,间接配光和半间接配光照明器得到最好的照明均匀度。

按光通量在空间的分布来分,该设计中的 LED 射灯属于半直接型照明器,即光通量 10-40%分布在上半球,90-60%分布在下半球,光线集中在工作面上,空间环境有适当照度比,直接型眩光小,同时可以在被照面上得到很好的照明均匀度。

Enclosed Energy vs. Angle from Zenith

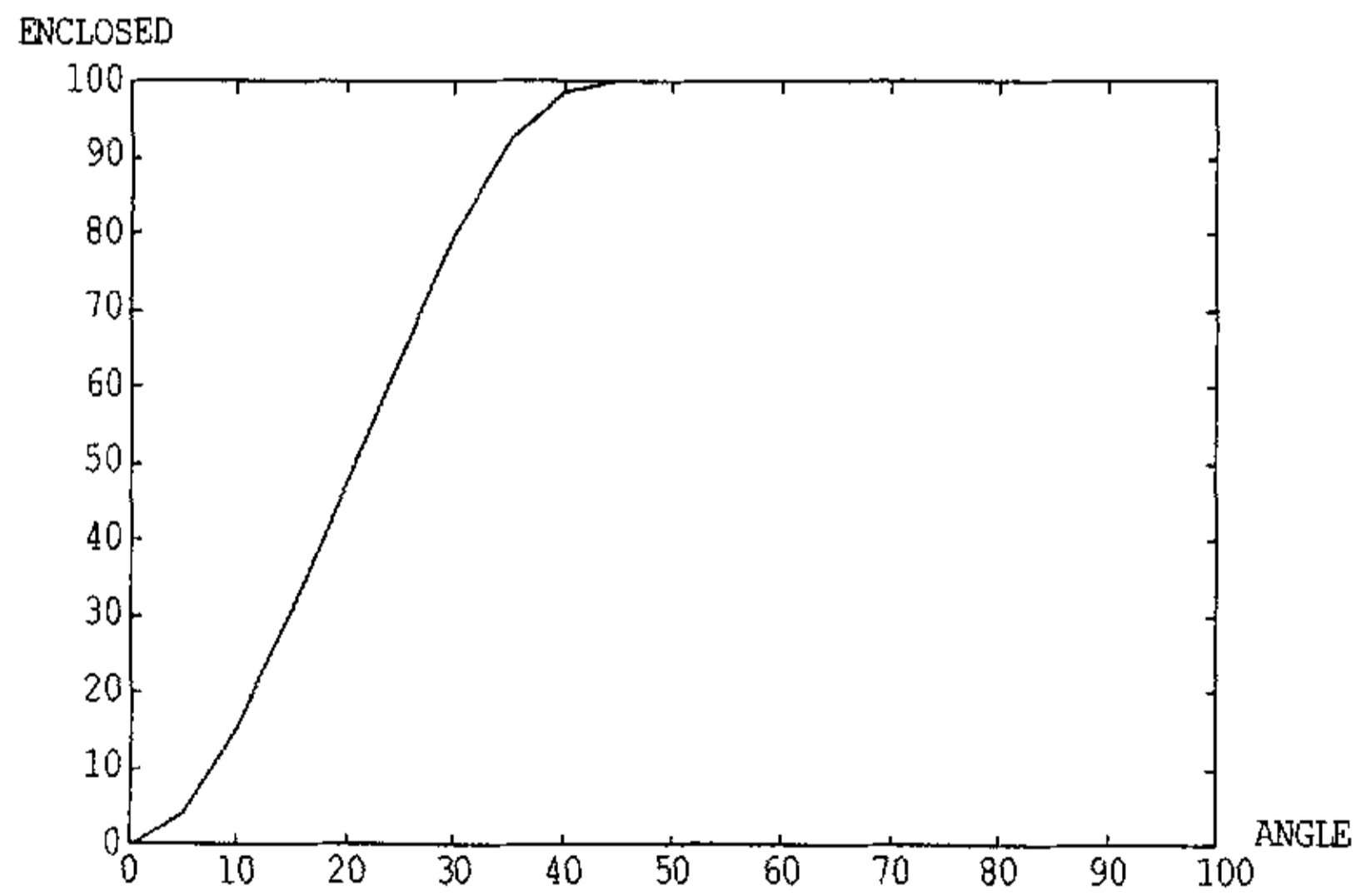


ASAP Pro v7.1.4

2004-09-08 08:40

图 5-27 LED 光源的光通量空间分布

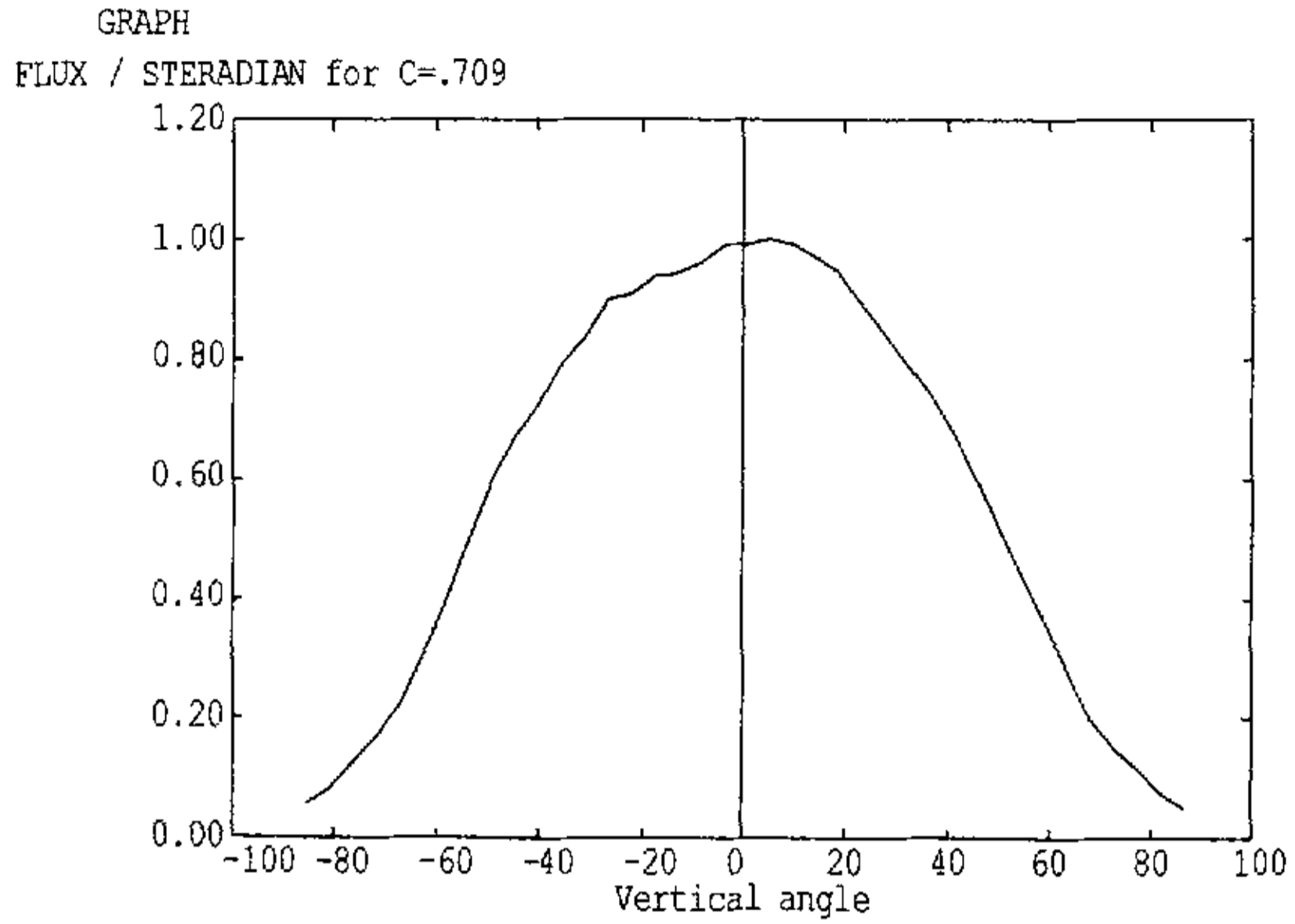
Enclosed Energy vs. Angle from Zenith



ASAP Pro v7.1.4

2004-09-08 08:41

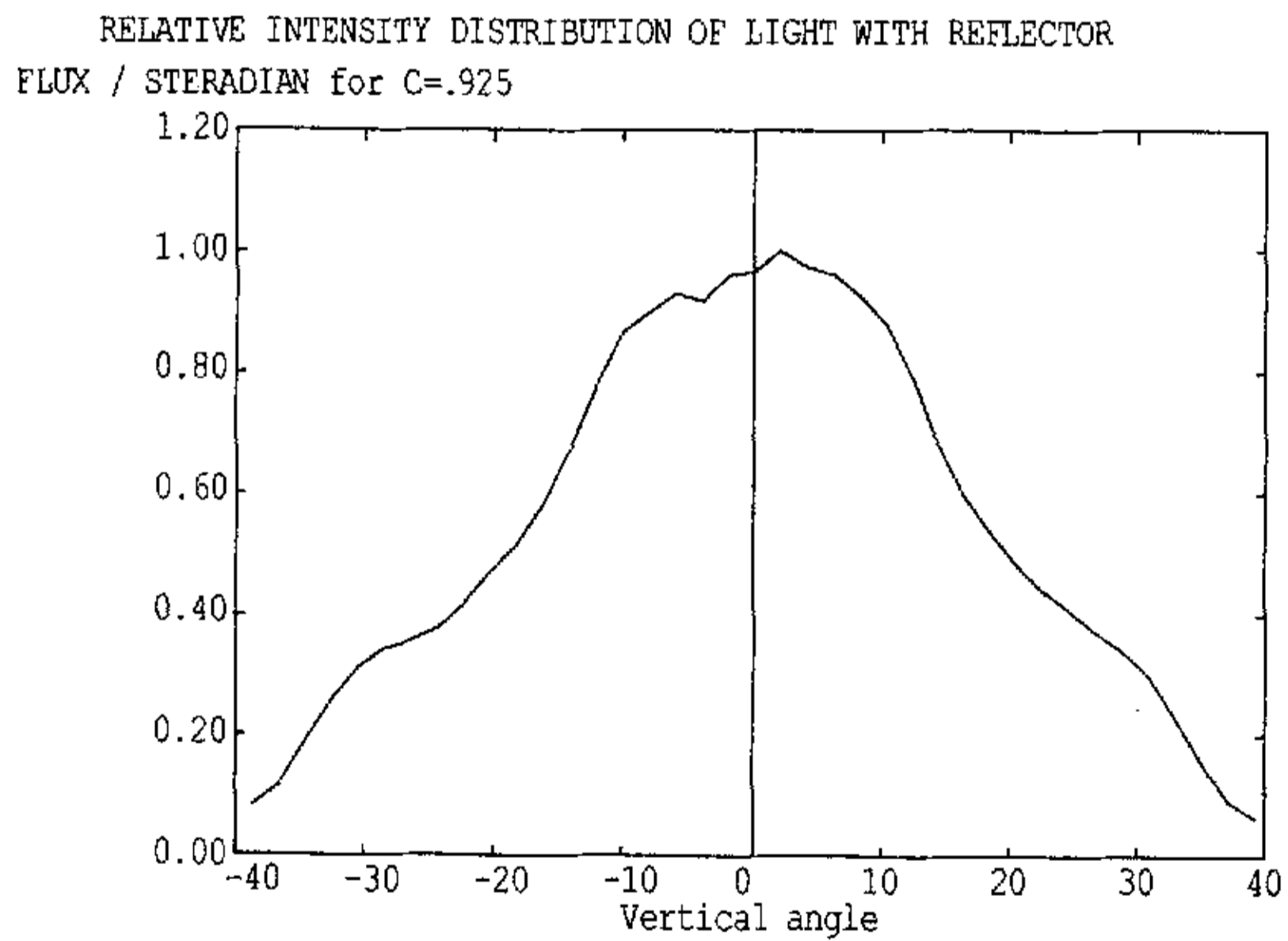
图 5-28 白光 LED 射灯光通量的空间分布



ASAP Pro v7.1.4

2004-09-10 09:09

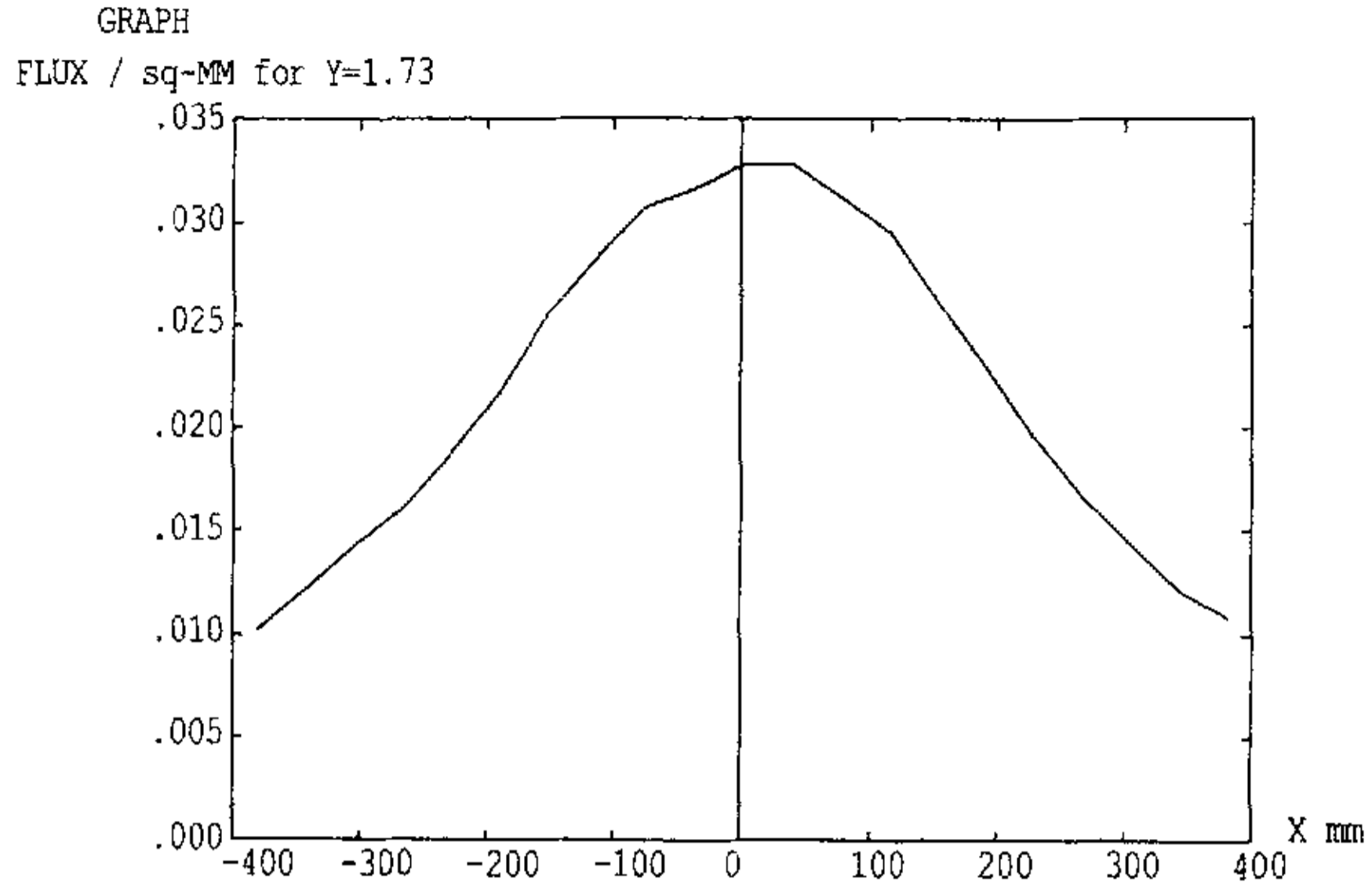
图 5-29 LED 光源的相对光强分布



ASAP Pro v7.1.4

2004-09-10 09:22

图 5-30 白光 LED 射灯的相对光强分布



ASAP Pro v7.1.4

2004-09-10 10:21

图 5-31 被照面上白光 LED 相对照度分布

从图 5-31 上可以得出工作面上最小照度与最大照度之比约为 0.34，即最低均匀度为 0.34。按照照明标准规定符合工作面允许的照明最低均匀度可达 0.5~0.3，所以此白光 LED 射灯满足被照面上的要求；平均均匀度是最小照度与平均照度之比，同样从上图 5-31 得到平均均匀度约为 0.41，同样符合照明最低平均均匀度的要求。

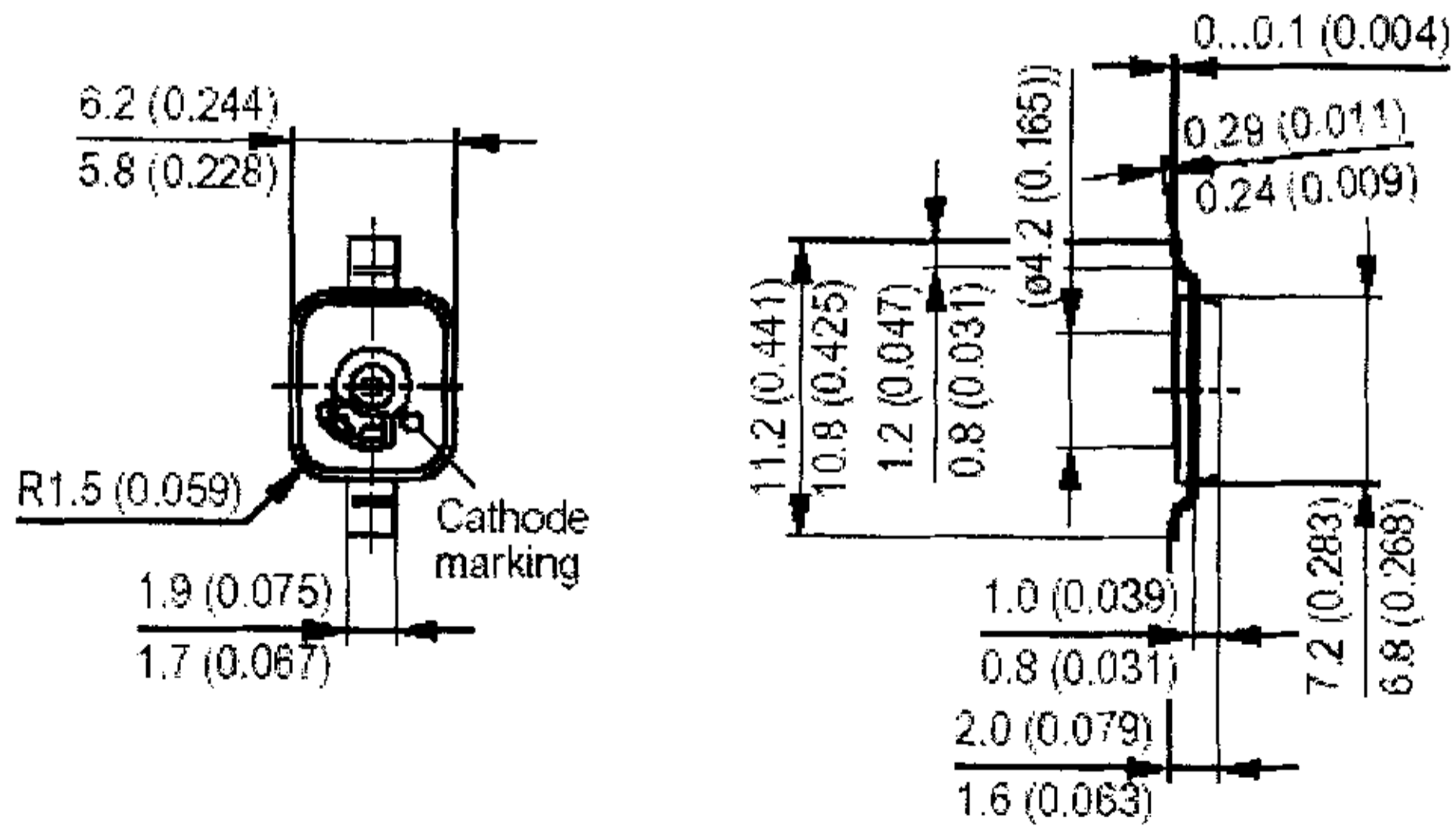


图 5-32 芯片结构尺寸图

§ 5.5 单芯片 LED 的设计和封装

§ 5.5.1 LED 封装透镜的设计

1. 芯片类型

该芯片属于德国 OSRAM 公司最新 Golden DRAGON®1W 系列贴片大功率发光二极管(HIGH POWER SMT-LED)(SURFACE MOUNTABLE-LED)芯片,白光光通量最高可达 39lm 以上。其特性参数如表 5-3 所示。

如图 5-32 为此芯片的结构尺寸图,图 5-33 为芯片的发光强度分布图,其半强度角为 60°。

表 5-3 芯片特性参数

颜色	白色
光通量	21(lm)
半强度角	60°
色温	6500
显色指数	80
正向电流	350(mA)
最大中心光强	10000(mcd)

2. 半强度角为 30° 和 19° 的 LED 的设计

根据单个折射球面的成像原理:

$$\frac{n_1}{l_1} - \frac{n}{l} = \frac{n_1 - n}{R} \quad (5-11)$$

式中 n_1 — 透镜材料折射率,在此指环氧树脂的折射率;

$$I_{\text{rel}} = f(\varphi); T_A = 25^\circ\text{C}$$

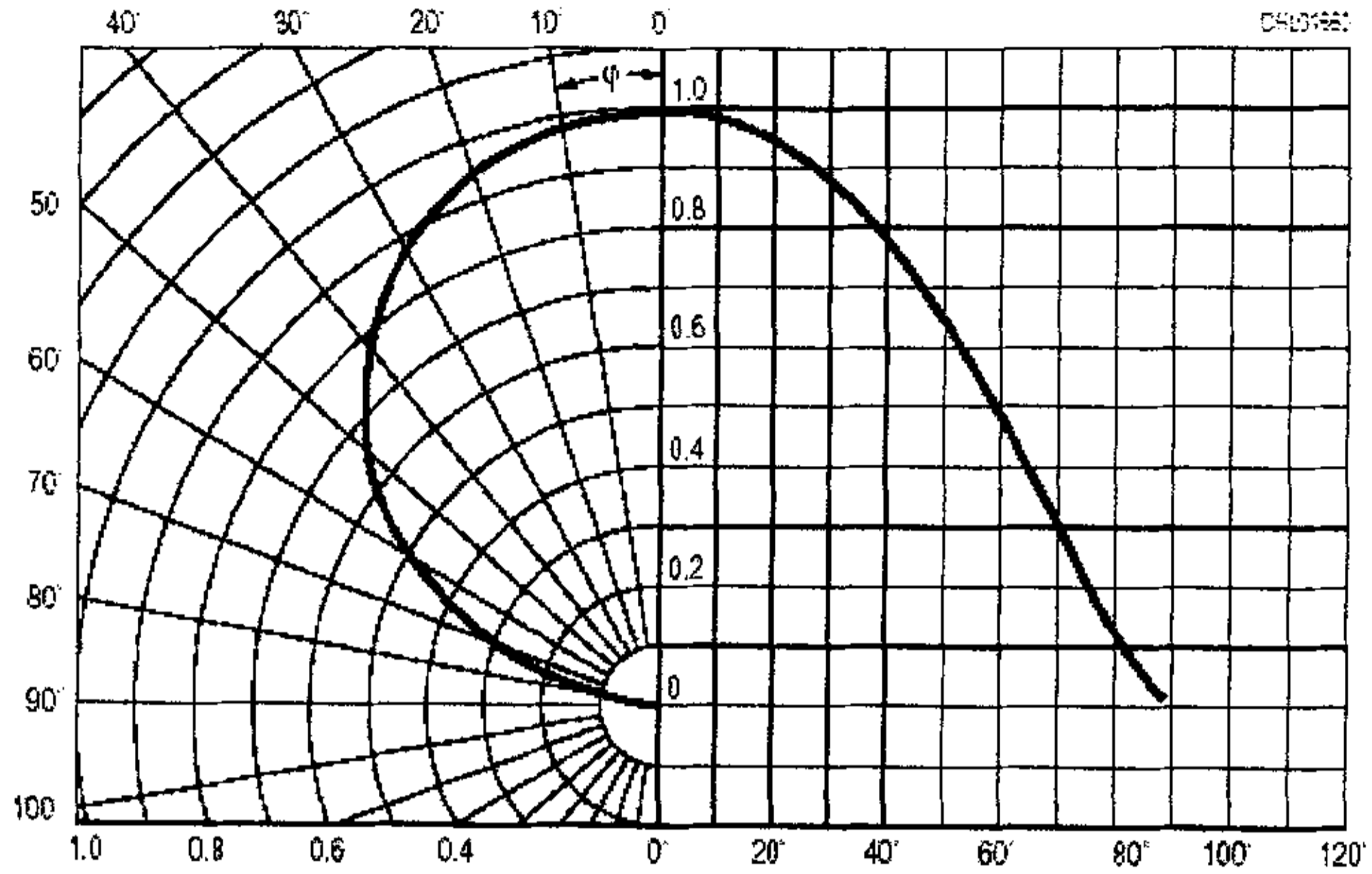


图 5-33 芯片光强分布图

l_1 — 象点到折射球面顶点的距离；

n — 物方空间折射率，在此指空气的折射率；

l — 物点到折射球面顶点的距离，在此指芯片到折射球面顶点的距离；

R — 环氧树脂折射球面曲率半径。

再结合折射定理：

$$n_1 \sin \theta_1 = n \sin \theta \quad (5-12)$$

式中 θ_1 — 入射光线和环氧树脂透镜法线的夹角；

θ — 出射光线和环氧树脂透镜法线的夹角；

n_1 — 透镜材料折射率，在此指环氧树脂的折射率；

n — 物方空间折射率，在此指空气的折射率。

设计的半强度角为 30° 的 LED 环氧封装透镜尺寸如下图 5-34：

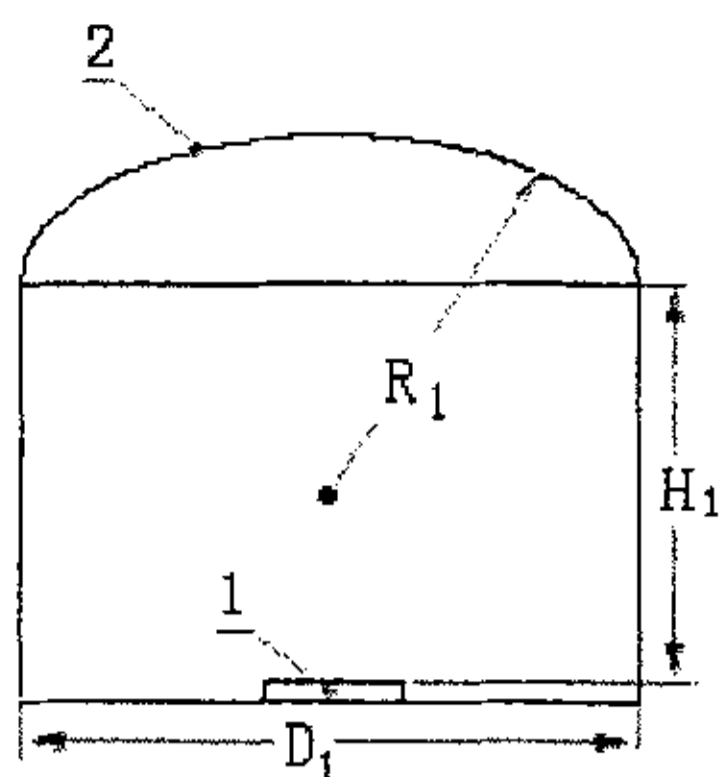


图 5-34 半光强角为 30° 的 LED 设计尺寸图

1-芯片, 2-环氧树脂

环氧树脂透镜半径 R_1 : 10.5mm

芯片距球面透镜截面的距离 H_1 : 9.4mm

球面透镜截面直径 D_1 : 20.4mm

设计的半光强角为 19° 的 LED 环氧封装透镜尺寸如下图 5-35:

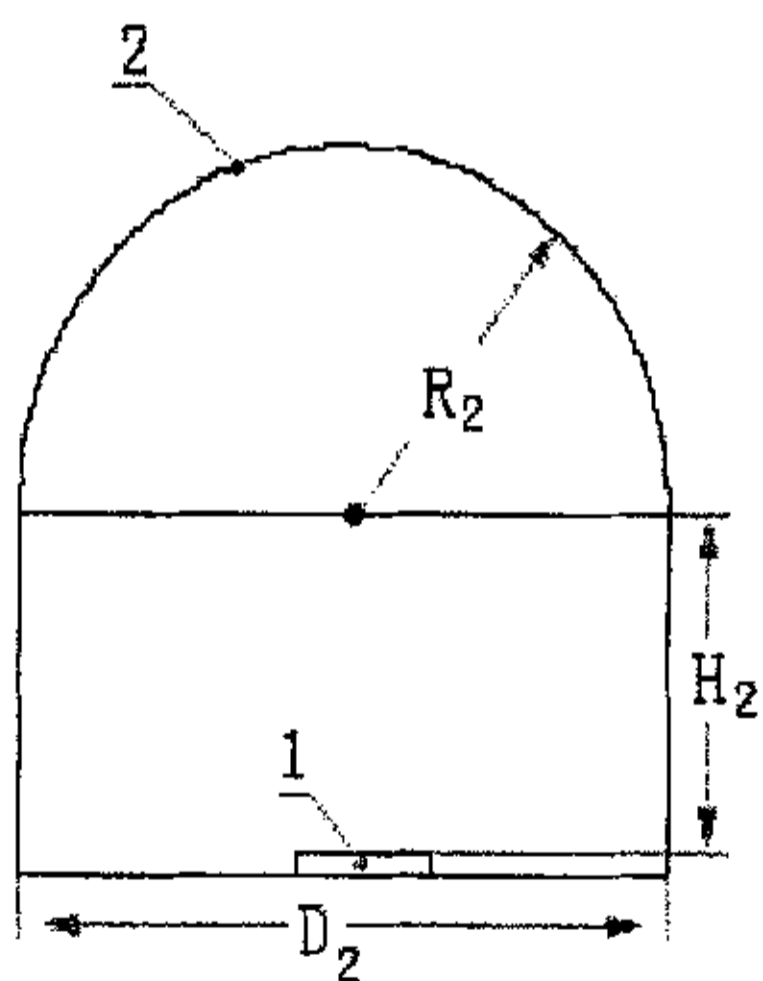


图 5-35 半光强角为 19° 的 LED 设计尺寸图

1-芯片, 2-环氧树脂

环氧树脂透镜半径 R_2 : 3.5mm

芯片距球面透镜截面的距离 H_2 : 3.1mm

球面透镜截面直径 D_2 : 7mm

§ 5.5.2 LED 的封装

半导体产品的封装大部分都采用环氧树脂。它的一般特性包括：成形性、耐热性、良好的机械强度及电器绝缘性。同时为了防止对封装产品的特性劣化，树脂的热膨胀系数要小，水蒸气的透过性要小，不含对元件有影响的不纯物，引线脚的接触性要良好。单纯的一种树脂要能完全满足上述特性是很困难的，因此大多数树脂中均加入填充剂、偶合剂、硬化剂等成为复合材料来使用。一般来说环氧树脂比其他的树脂更具有优越的电器性、接触性、及良好的低压成形流动性，而且价格便宜，因此成为最常用的半导体塑封材料。

在封装中用到的材料主要由 Yglue 9000A/B 环氧树脂，即主剂 Yglue 9000A、固化剂 Yglue 9000B 和光扩散剂 DF090 三部分组成，其主要成分为电子级、低粘度环氧树脂和助剂、酸无水物、高扩散性填料，本树脂专用于高透光性数码、点阵封装，最大特点是水透性佳，另外，其 500 小时高温不黄化性能是它的另一明显特色。

本树脂在常温时混合物粘度低，可使用期长，低温、中温固化速度快，固化物的机械强度，电器性能、耐温性能佳，收缩率高。

1. 硬化前的特性

表 5-4 是环氧树脂硬化前，主剂 YgYglue 9000A、固化剂 Yglue 9000B 的外观特性、比重特性、粘度特性。

表 5-4 环氧树脂硬化前的特性

	Yglue 9000A	Yglue9000B
外观	透明淡紫色液体	无色透明液体
粘度	9000	50
比重	1.15-1.18	1.16

2. 混合物的特性

主剂 YgYglue 9000A、固化剂 Yglue 9000B 混合物的特性如下表 5-5 所示：

表 5-5 混合物特性

配合比例	Yglue9000A:Yglue9000B=1:1
可使用时间	6 小时 (25°)
温度	70° -90°
固化时间	4-6 小时

3. 封装方法

具体的 LED 环氧树脂透镜封装方法如下表：

表 5-6 LED 环氧树脂封装步骤

树脂预热	使用主剂 YglueA 之前先以温度为 60°，时间为 1 小时，将树脂在烘箱内预热
混合	主剂、扩散剂一起加热的同时搅拌均匀（温度控制在 40° -50° 之间），之后加入固化剂再搅拌均匀
脱泡	以真空脱泡机将气泡去除
短烤	温度控制在 70°，时间为 4 小时
长烤	温度控制在 85°，时间为 6 小时

4. 固化物的特性

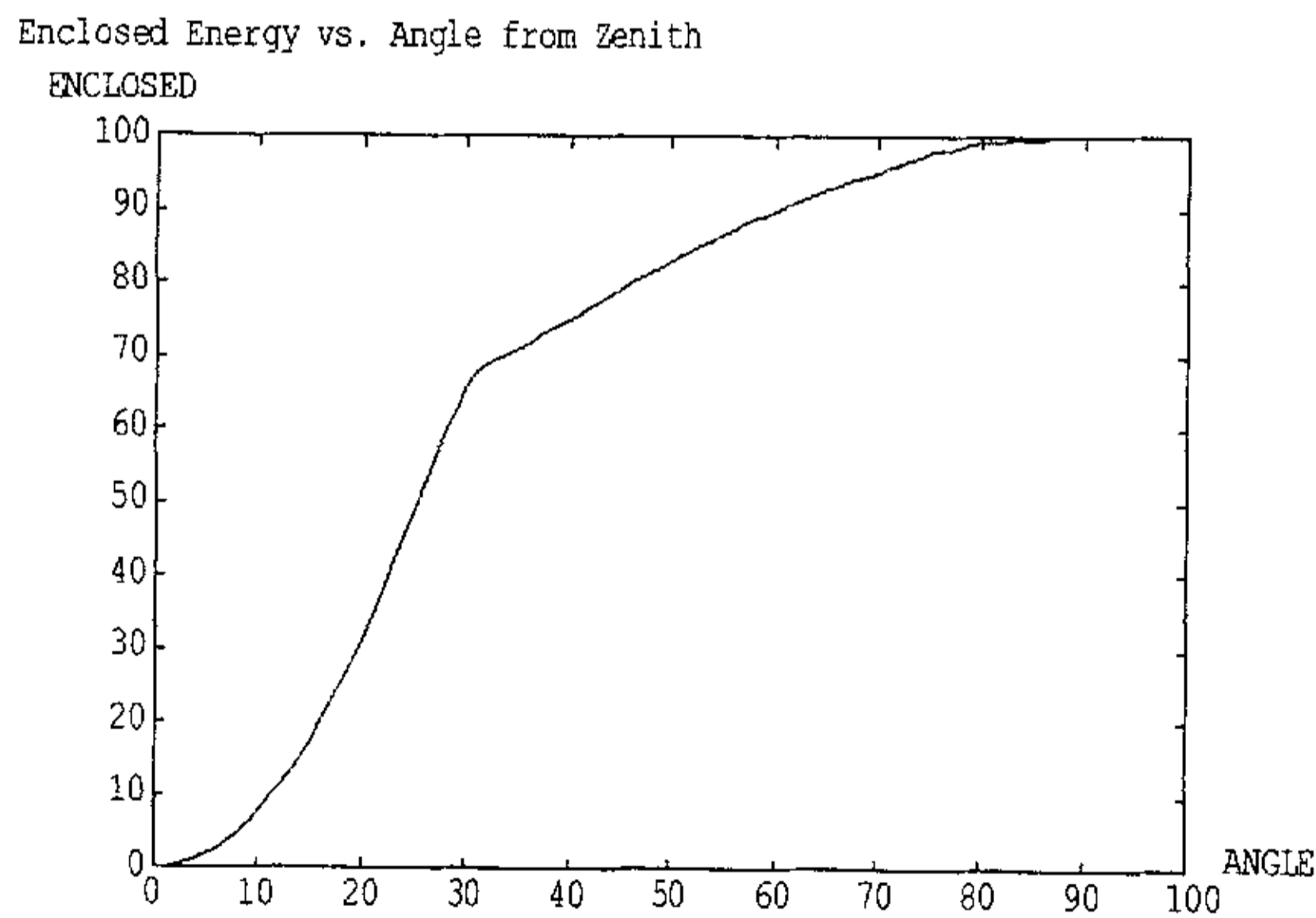
经过预热、混合、脱泡、短烤和长烤等一系列处理后，环氧树脂固化物的特性如下表 5-7。

表 5-7 固化物特性

项目	测定值	测定方法以及条件
玻璃转移温度	120 度	TMA 热一机分析法
热膨胀率	9*10 度以下	TMA 热一机分析法
硬度	120	SHORE D 肖氏硬度
吸水率	0.36%	JISK-6911
耐冲击	12	KJ/M ²
折射率	1.538	

§ 5.5.3 封装后 LED 的发光特性

半强度角为 30° 的 LED 的光通量分布图如图 5-36 所示，接近 70% 的光通量都分布在角度为 30° 圆锥立体角内，其光强分布图如图 5-37。



ASAP Pro v7.1.4

2004-07-28 19:04

图 5-36 半强度角为 30° 的 LED 的光通量空间分布图

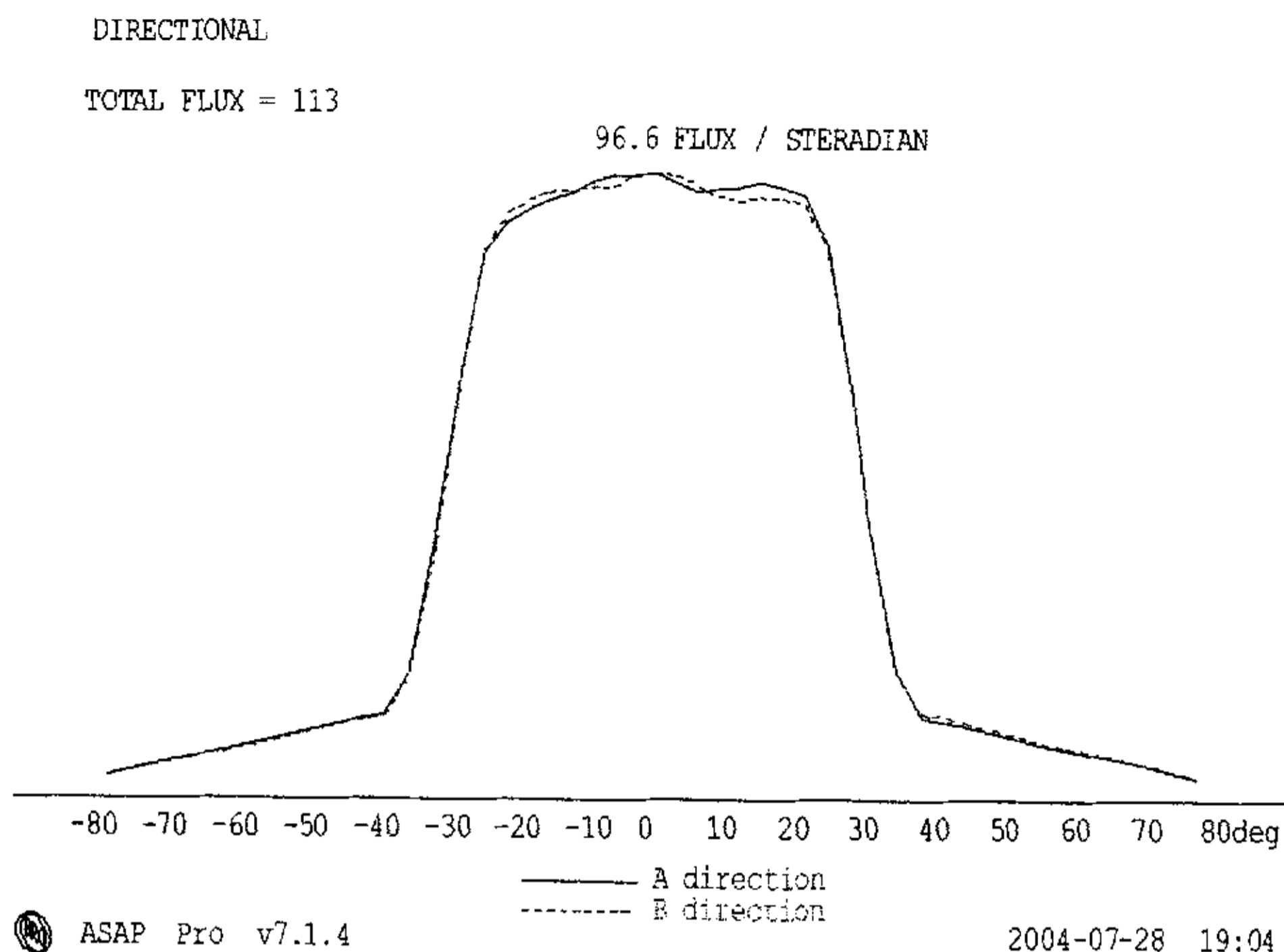
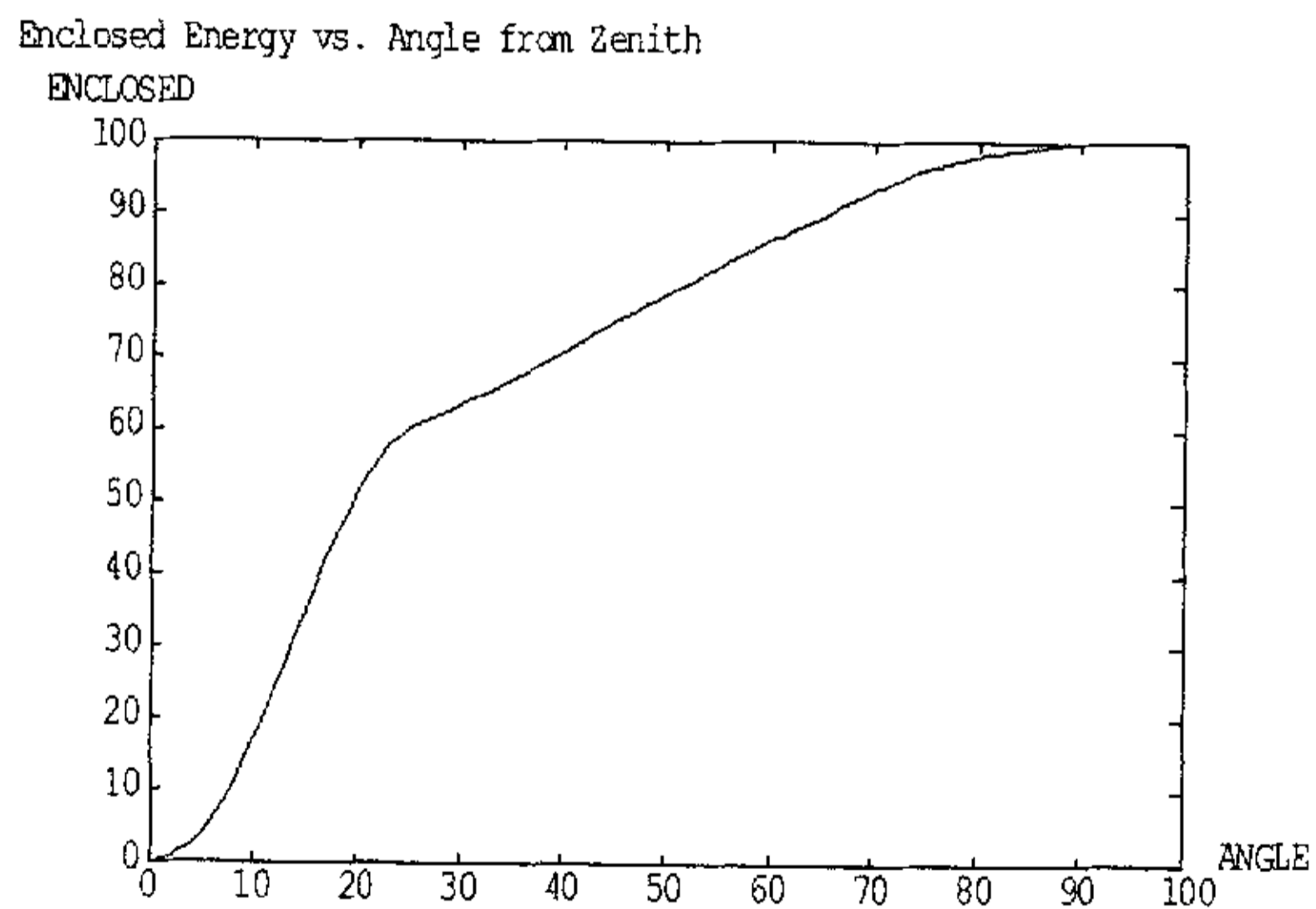


图 5-37 半强度角为 30° 的 LED 的光强分布图

半强度角为 30° 的 LED 的光通量分布如图 5-38 所示，50% 以上的光通量都分布在角度为 19° 的圆锥立体角内，其光强分布如图 5-39。



ASAP Pro v7.1.4

2004-07-28 15:07

图 5-38 半强度角为 19 度的 LED 的光通量空间分布图

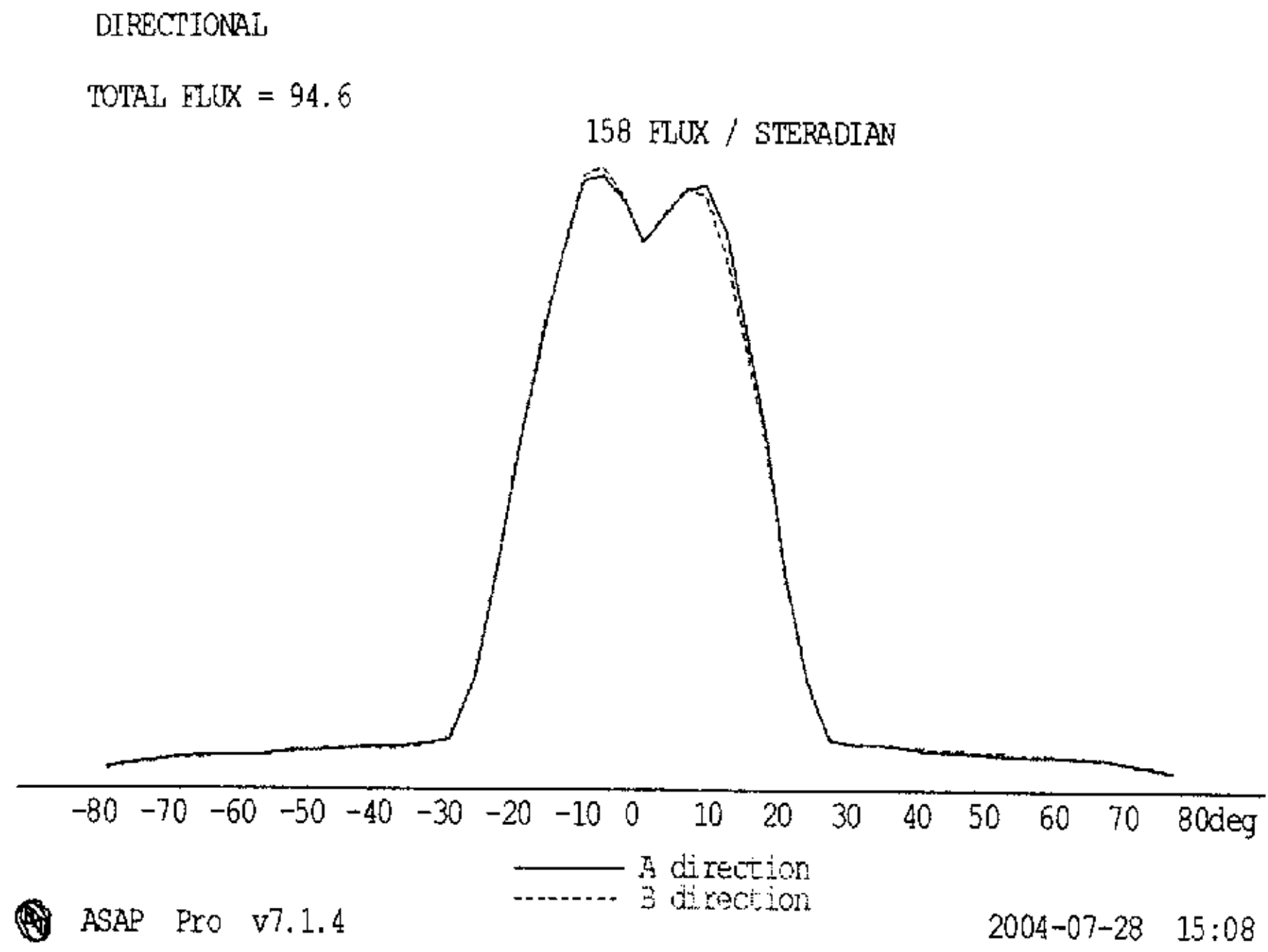


图 5—39 半强度角为 19° 的 LED 的光强分布图

第六章 总结与展望

§ 6.1 本课题完成的主要工作

本论文在 LED 应用于照明的计算和设计方面进行了一些研究工作。主要的工作总结如下：

1. 对 LED 照明设计中的相关计算，主要是对照度计算和光通量计算的方法进行了总结和编程计算。照度计算的方法一般有平面照度算法：逐点算法、点光源直射照度计算、平均平面照度计算；非平面照度算法：平均球面照度和平均柱面照度等方法。LED 光通量的计算方法一般有带状常数积分法，LED 照明器光通量的计算方法包括球带系数法、罗素角法、环带分割法和 $V-H$ 系统法。将这些算法通过计算机编程应用于照明设计中，用来确定 LED 数量、设计光源形状、检验照明计算的结果，并且最终和照明设计软件 ASAP 相结合进行 LED 照明灯具的设计。
2. 对 LED 应用于照明的设计进行了探讨，包括 LED 管壳的设计和 LED 的系统设计。在光学设计的基础上，对不同半强度角的 LED 环氧树脂封装透镜的几何形状进行设计，并对环氧树脂透镜进行制备和在 ASAP 中进行模拟分析；对几种具体的 LED 照明器的设计过程进行详细的论述：LED 矿灯、应用于博物馆文物照明的白光 LED 照明系统、白光 LED 射灯，在 ASAP 照明设计软件中进行计算机模拟，并和实际测量结果进行比较，结合相关照明计算，不断优化设计结果，满足相应的照明标准。

§ 6.2 本课题今后的研究方向

LED 照明目前还只能用于一些特殊场合。广泛适用的照明光源应该是白光 LED，而目前国内外已研制出的白光 LED 光效还不够高，功率也不够大，价格较贵。如果要求全面取代目前普遍适用的白炽灯或荧光灯，尚有一些技术上的难题需要研究解决。

1. LED 光通量有待进一步提高。采用 LED 作为照明光源，必须可以发出更多的光，必须具有更高的能量效率。提高 LED 的发光效率最主要大方法是改进半导体材料与 LED 芯片的结构和制造工艺，需要扎实的理论研究基础和先进的半导体工艺。

2. LED 发出的光与自然光仍有一定的差距。白炽灯具有非常强的黄色光的成分，给人一种温暖的感觉。而白光 LED 发出的白光带有蓝色光的成分，在这种光的照明下，人们的视觉不很自然。

3. 为了更有效的利用 LED，使其在照明领域普及，更复杂的光学系统设计是必须的。一个照明系统需要多个 LED 管组成，其参数离散性也是一个技术问题。除了通过预选、分类，尽量保证一致性以外，还必须设计合理的灯具结构（包括 LED 排列和位置）。通过合理的光学设计，使 LED 照明应用到更多的领域，比如在家用照明，在汽车尾灯上的应用等。

通过提高 LED 发光效率、增大 LED 功率、降低 LED 的价格、有效的设计光学系统、合理的分配光通量，使 LED 应用于照明普及化。

参考文献

- 1) 中国绿色照明项目促进办公室, 中国绿色照明工程实施展望, 中国能源 Vol. 26, No. 7, p36-39 (2004. 7)
- 2) Optoelectronics Industry Development Association, *The Promise of Solid State Lighting for General Illumination-LEDs* (2001)
- 3) 崔元日、潘苏予, 第四代照明光源—白光 LED, 灯与照明, Vol. 28, No. 2, p31-34 (2004)
- 4) 白杉、子荫, 半导体灯掀起照明的绿色革命, 光源与照明, No. 1, p42-43 (2004)
- 5) 易安, 半导体照明—21 世纪的节能新光源, 中国创业投资与新科技 (2004. 8)
- 6) Ali Serpenguzel, *Solid state lamp: The new paradigm in illumination*, World Congress on Housing Process&Produce (2003)
- 7) 张伟, 国外 LED 照明的研究和应用, 照明科技 (2004)
- 8) 陈华山、刘子强, 半导体发光器件及其应用, 电工与电子, No. 5, p26-39 (1994)
- 9) A. A. Bergh, P. J. Dean, *Light Emitting Diodes*, Clarendon Press, Oxford (1976)
- 10) 李卓、朱崇恩、刘小鸿, 固态发光器件前景光明, 中国照明电器, No. 7, p11-13 (2003)
- 11) Mach R, Mueller G O, *Wight light emitting diodes for illumination*, SPIE, 3938, p30-41 (2000)
- 12) Hewlett-Packard Co, *Benefits of Lumileds Solid State Lighting Solutions vs Conventional Lighting*, Application Note, Vol. 1149, No. 6 (1998)
- 13) 雷玉堂、黎慧, 未来的照明光源—白光LED技术及其发展, 光学与光电技术, Vol. 5, p33-34 (2003)
- 14) 杨国栋、沈培宏, 二十一世纪的光明—白光LED产品发展简析, 国际光电产业资讯, No. 1 (2002)
- 15) 陈乃塘, 白光LED进入战国时代, 国际光电与显示, No. 7 (2002)
- 16) Daniel A. Steigerwald, Jerome C. Bhat., *Illumination With Solid State Lighting Techonlogy*, IEEE. J. selecte. Topics. QuantrumEctronics, vol. 8, p316-317 (Mar. -Apr. 2002)
- 17) 田口常正, 白色LED, 照明学会志, Vol. 85, No. 7, p496 (2001)
- 18) 刘行仁、薛胜薛、黄德森, 白光LED现状和问题, 光源与照明, No. 3 (2003)

- 19) 鲍超, 发光二极管测试技术和标准, 物理, Vol. 32, No. 5, p321 (2003)
- 20) CIE, Standard methods for specifying and measuring LED cluster characteristics, Proceedings of the 2nd CIE Expert Symposium on LED Measurement[C] (2001)
- 21) 中国光协光电子行业协会光电器件分会, 发光二极管测试方法 (2002)
- 22) (英) J. R. 柯顿编著, 《光源与照明》, 陈大华 刘九昌 徐庆辉 刘动译, 上海: 复旦大学出版社, p71-72 (2000)
- 23) 庞蕴凡, 《视觉与照明》, 北京: 中国铁道出版社, p50-54 (1993)
- 24) 赵振民, 《照明工程设计手册》, 天津: 天津科技出版社 (2001)
- 25) 孙建民, 《电器照明技术》, 北京: 中国建筑工业出版社, p100-102 (1998)
- 26) 俞丽华、朱桐城, 《电器照明》, 上海: 同济大学出版社 (1990)
- 27) 日本照明学会编, 照明手册翻译组译, 《照明手册》, 北京: 中国建筑工业出版社 (1985)
- 28) 顾国维, 《绿色技术及其应用》, 上海: 同济大学出版社 (1999)
- 29) M. Cote, R. J. Pagano, and M. A. Stevenson, **Optical System Performance Visualizaton**, Proc. of Optical Design and Analysis Software, Ed. R. C. Juergens, Vol. 3708, p3-13, SPIE, Bellingham, (1999)
- 30) J. Schweyen, D. Jenkins, **Smart Lightpipe Designs**, Photonics Spectra, Jan (1997)
- 31) Lungershausen A, Eckhardt S K, Holcomb J M, *et al*, **Light engine design: the software dilemma**, SPIE, Vol. 3296, p53-61 (1995)
- 32) Stevenson. M. A, Campillo C J Jenkins D G, **Advanced optical system simulation in a coupled CAD/optical analysis**, SPIE, Vol. 3634, p112-118 (1999)
- 33) Freniere. E. R, Tourtellott. J, **Abrief history of generalized raytracing**, SPIE, Vol. 3130, p170-178 (1996)
- 34) Coffe K L. y, Priestley K J, Mahan J. R. , M, *et al*. **Diffraction models of radiation entering an aperture for use in a Monte Carlo ray-trace environment**, SPIE, Vol. 3429, p213-219 (1998)
- 35) Frasch H J, **Monte Carlo methods in ray-tracing software**, SPIE, Vol. 4769, p55 (2000)
- 36) Larn Powell, Amanda Brewsher, **Software development for design of illumination**

- systems, *Optical Engineering*, Vol. 33, No. 5 (1994)
- 37) 周建忠, 灯具曲面设计中的光线追踪法, *江苏理工大学学报(自然科学版)*, Vol. 18, No. 2, p28-33 (1997)
- 38) 周建忠 朱金山, 灯具曲面光学性能的计算机仿真研究, *江苏理工大学学报(自然科学版)* Vol. 16, No. 1, p18-24 (1995)
- 39) 韦课常编, 《电器照明技术基础与设计》, 北京: 水利电力出版社, p144-146 (1983)
- 40) 王晓东主编, 《电器照明技术》, 北京: 机械工业出版社 (2004)
- 41) 全国灯泡工业科技情报站译, 《灯与照明》, 北京: 轻工业出版社, p26-27 (1976)
- 42) 石野幸三, 室内照明设计法, 森北出版株式会社 (1972)
- 43) 陈捷, 汽车前照灯配光镜的仿真设计初探, *照明工程学报*, Vol. 12, No. 2, p19-22 (2001)
- 44) 周军、张继勇、周莉, FFR 汽车前照灯的光学设计, *照明工程学报*, Vol. 10, No. 2, p45-52 (1999)
- 45) 周太明, 《光源原理与设计》, 上海: 复旦大学出版社 (1993)
- 46) Thomas. p, *Semiautomatic Design of illuminating Systems*, *Applied Optics*, Vol. 11, No. 5 (1972)
- 47) Henderson S. T, Marsden A. M, *Lamps and lighting*, London: Edward amold (1972)
- 48) Stringfellow G B, *High Bright LED*, New York: Academic Press (1972)
- 49) Hewlett-Packard Co, *Secondary Optics Design Considerations for Super Flux LEDs*, *Application Note*, Vol. 1149, No. 5 (1998)
- 50) 李晓彤, 《几何光学和光学设计》, 杭州: 浙江大学出版社 (1996)
- 51) 袁旭沧等, 《光学设计》, 北京: 科学出版社 (1983)
- 52) 张泽湘, 《二次曲线》上海: 上海教育出版社 (1981)
- 53) 雷玉堂、黎慧, 未来的照明光源—白光 LED 技术及其发展, *光学与光电技术*, Vol. 1, No. 5, p33-34 (2003)
- 54) 王尔镇、王春锋, 白色 LED 的开发和应用, *光电技术*, Vol. 43, No. 1, p1-9 (2002)
- 55) 雷祖康, LED 光源在博物馆文物展示环境中应用展望, *照明工程学报*, Vol. 14, No. 3, p50-54 (2003)
- 56) 方志烈, LED 白色照明光源, *国际光电与显示*, Vol. 12, p58-59 (2000)
- 57) R. Winston, *Nonimaging optics: an overview*, *Optics and Photonics News*, Vol. 6, No. 11 (1995)
- 58) R. Winston and H. Ries, *Nonimaging reflectors an functions of the acceptance*

angle, J. Opt. Soc. Am. A10 (1993)

59) H. Ries and R. Winston, Tailored edge-ray reflectors for illumination,
J. Opt. Soc. Am. A11 (1994)

60) 路绍泉, LED 照明—半导体的又一次革命, 灯与照明, Vol. 26, No. 4 (2002)

附录 I 硕士期间发表的论文

1. 一种小型 LED 照明工具的设计方法研究, 王乐、鲍超, 《光学仪器》, 2004.8 录用。
2. 一种应用于博物馆展示照明的 LED 照明系统, 王乐、鲍超, 《照明工程学报》, 2004.12 发表。

致 谢

本论文的研究工作是在导师鲍超教授的悉心指导下完成的，首先要感谢鲍老师在我研究生阶段的学习、工作上对我的帮助和关心。鲍超老师渊博的知识、严谨的治学态度、一丝不苟的工作作风给我留下了深刻的印象，对我产生了积极的影响。

其次，我要感谢实验室的吴沧海老师，他的热心和勤奋感染了我，他乐于助人的精神和乐观的人生态度都使我受益匪浅；同时，我还要感谢刘华锋老师，他为人和善，工作勤勤恳恳，科研上取得了很大成就，给我们树立了良好的榜样，感谢他对我论文提出了宝贵的意见。

最后，我要感谢我的父母以及金波硕士和杨慧硕士在生活和学习上给了我很多鼓励，还要感谢我的很多朋友和同学，特别是我们实验室的同学，他们在我研究生阶段给了我很多关心，正是他们的帮助，我才顺利完成毕业论文。

王 乐

2005.1 于浙大求是园