# 浙江大学

## 硕士学位论文

# 高亮度LED照明的安全性评价

姓名:李明

申请学位级别:硕士

# 专业:光学工程

指导教师: 郑晓东;刘向东



# 摘要

发光二极管(LED, Light Emitting Diode)被认为是人类发展历史上继火焰、 白炽灯、放电灯之后的第四代光源。和前三代光源相比较,LED 的突出特点是: 其发光芯片的面积非常小,通常只有几百微米到 1mm;发光源,即芯片与被照 射对象之间有光学系统,如传统的 LED 通常制作成炮弹型;其亮度远高于传统 光源。随着 LED 的亮度不断提高,功率不断增大,LED 在使用中的安全性问题 成为越来越现实的问题,应该得到人们的足够重视。由于安全性所涉及问题非常 复杂,明确 LED 的安全问题非常困难,国际上还没有关于此问题的公认的标准。 但照明是人类生活中不可或缺的环境,预测 LED 照明对人眼可能造成的伤害并 正确评价和测量危险的程度,对于保证人类健康具有非常重要的意义。

关于评价方法 ICNIRP、IEC、CIE 这三个标准组织都有关于 LED 安全性的 相关规定,我们根据 IEC 60825-1 中的分类方法来确定 LED 的安全阈值,通过 计算 LED 的对于人眼的 AEL(Accessible emission limit)值来评估 LED 的安全 性。这种评价方法是建立在对 LED 的表观光源的对向角进行测量的基础上的。

在研究中我们首先使用 ASAP 软件对 LED 的出射光束进行了仿真,发现光 束的发散角随芯片的位置和 LED 封装的外形有规律的变化,于是推测 LED 的表 观光源的大小与 LED 的光束发散角和封装的外形有关。之后我们通过透镜成像、 CCD 接收的方法测量了十一种不同类型的 LED 的正面和侧面表观光源大小,在 最危险观察距离(即距离光源 100mm 的位置)计算出相应的对向角,并且根据 IEC 标准中的计算方法算出了各种类型 LED 的 AEL 值,为实际的生产测试提供 了有用的参考数据。

从测得的数据中我们发现,眼睛的视网膜热危害的 AEL 值与 LED 的发散角 和直径分别成线性关系,普通的非大功率 LED 一般不足以造成视网膜热伤害, 但是其中光谱中拥有蓝光成分的很容易造成视网膜光化学伤害,特别是纯蓝光 LED 在实验中所有大小的电流驱动下都超过了1类光源的视网膜光化学伤害的 AEL 值。人们在生产和使用这些 LED 时需要多加小心。

关键词:LED,安全性,表观光源,对向角,AEL(可达发射极限)



# Abstract

As the rapid development of Light Emitting Diode (LED), its brightness become more and more dazzling, its power become higher and higher. The ocular safety problem when using LED should be paid enough attention. Unfortunately, due to the widely use and rapid progress of LEDs, there is still no such a acknowledged safety standard for LEDs.To predict the hazard done to human eyes by LEDs and assess the level of hazard correctly is significant to human health.

After comparing the regulation about LED by ICNIRP  $\$  IEC and CIE, we decide to assess the safety property of LED by calculating its Accessible Emission Limit (AEL) according to the method of classification defined in IEC 60825-1. In this method, the angular subtense of the apparent source size is the essential quantity for optical hazard assessment.

In the research, we use a software called ASAP to simulate the output beam of LEDs at first. We found the divergence angle of the beam changed regularly with the change of the location of the chip or the shape of the LED's package, hence there must be some relationship between the apparent source size and the divergence angle or the diameter of LED. And then the apparent source size is measured by the image formed through lens and received by CCD. The angular subtense is calculated from the apparent source size and the specified most hazardous viewing distance. At last, the AEL of each type of LED is calculated according the formula in IEC60825.

Through the data we got, it can be found that the AEL of retinal thermal hazard has a linear relationship with divergence angle and the diameter of LED respectively. The ordinary non high power LEDs will not cause retinal thermal hazard, but they will probably cause retinal photochemical hazard, especially the ones whose spectrum composed mainly by blue rays.

Keywords: LED, safety, angular subtense, apparent source size, AEL (Accessible Emission Limit)





# 第一章 绪论

## 1.1 引言

发光二级管 LED (Light Emitting Diode) 是一种半导体固体发光器件。它是 利用固体半导体芯片作为发光材料,在半导体中使注入 PN 结的少数载流子与多 数载流子复合而发光,是一种直接把电能转化为光能的器件。LED 的结构主要 由 PN 结芯片、电极和光学系统组成。在电极两端施加正向偏压之后,使电子和 空穴分别注入 P 区和 N 区,当非平衡少数载流子与多数载流子复合时,就会以 辐射光子的形式将多余的能量转化为光能。其发光过程包括三个部分:正向偏压 下的载流子注入、复合辐射和光能传输。

LED 具有很多的优点:首先是节能,产生同样光通量下 LED 的耗电仅为普通白炽灯的 1/10;其次是寿命长,LED 的寿命可达 10 万小时以上,是普通白炽灯的 100 倍;再者,LED 是冷光源,具有光效高、体积小、可平面封装、易于 开发轻薄型产品、结构坚固的特点;此外,LED 光源本身不含汞、铅等有害物质,不会在生产和使用过程中对外界产生污染。LED 的主要缺点如单个 LED 功率低、光通量小、PN 结散热困难、光斑的亮度和色度均匀性差等,也在逐渐被克服。在用于白光通用照明以前,LED 在其它很多方面都已经得到了广泛应用,如各种仪器仪表的指示灯、装饰照明、汽车等各类交通工具照明、交通信号灯、背景显示、电子屏幕等等<sup>[1]</sup>。

随着 LED 技术日新月异的发展,大功率 LED 产品日益增多,再加上其固有 的长寿命、小体积、高亮度、节能等优点,使得 LED 备受设备制造商和用户的 育睐。如今,LED 的市场以每年 20%的速度快速增长。但是,在 LED 功率不断 增大、亮度不断提高的同时,高亮度 LED 发光对于人眼可能带来危害成为一个 越来越现实的问题。我们必须及时关注 LED 产品在使用过程中的光辐射安全问 题。但是,由于 LED 产业的飞速发展,应用场合在不断增加,明确定义 LED 的 安全问题并不是一件容易的事情。至今国际上尚未有一个关于 LED 安全性方面 的统一标准,而且在 LED 应该被归类为激光器类还是非相干光源类这一问题上 也存在争议<sup>[2]</sup>。





## 1.2 LED 及其安全标准的国内外发展现状

### 1.2.1 LED 的技术发展历程

二十世纪 60 年代初,最早的商用 LED 问世了,当时所用的材料是 GaAsP, 发出的是红光(波长 650nm),在驱动电流为 20mA 时,光通量只有千分之几流 明,相应的发光效率为约 0.11m/W。70 年代中期,引入了元素 In 和 N,使 LED 发出了绿光(波长 550nm)、黄光(波长 590nm)和橙光(波长 610nm),发光效 率也提高到 11m/W。80 年代对 GaAlAs 的应用产生了第一代高亮度 LED,先是 红色,接着是黄色和绿色,发光效率达到了 101m/W。90 年代以来,高亮度、全 色化一直是 LED 材料和器件工艺研究的发展方向。超高亮度是指光强达到或超 过 100mcd 的 LED。东芝公司研制的 GaAlInP 红、黄光 LED 和日亚化学研制的 InGaN 蓝、绿光 LED 的成功,使 LED 的光效大幅提高。前者在红、橙区域的光 效达到 1001m/W,后者在蓝、绿区域的光效可达 501m/W。至此彩色显示所需的 三基色红、绿、蓝以及橙、黄等多种颜色的 LED 都达到了 cd 级的发光强度,使 LED 的户外全色显示成为现实<sup>[3]</sup>。

对于通用照明而言,人们更需要白色的光源。1998年日亚化学的白光 LED 开发成功。这种 LED 是将 GaN 基芯片和 YAG 荧光粉封装在一起制做而成的, GaN 芯片发出蓝光(峰值 465nm,半宽 30nm),一部分被 YAG 荧光粉吸收并激 发其发出黄光(峰值 550nm),另一部分蓝光与 YAG 所发出的黄光混合,从而得 到白光。通过改变 YAG 荧光粉的化学组成和调节荧光粉层的厚度,可以获得色 温从 3500 至 10000K 的各色白光。目前已经商用化的白光 LED 大多数都是用这 种方法生产的。还有其它两种发光方式:一种是日本住友电工开发的以 ZnSe 为 材料的白光 LED,但其发光效率较差,没有得到广泛应用;另一种是丰田合成 与东芝共同开发的白光 LED,采用紫外光 LED 与荧光体组合的方式,这种方法 可以弥补蓝光 LED 与荧光体组合方式照在红色物体上效果不理想的缺陷,但是 其发光效率比蓝光组合要低一些<sup>[4]</sup>。

当前 LED 的发展趋势是高光效、高亮度、大功率、高光通量化。根据 LED 领域的 Moore 定律—Haitz 定律, LED 每 18~24 个月可以提升一倍的亮度和功率, 而在往后 10 年内,预计亮度可提升 20 倍, 而成本降低到现在的十分之一, 如图

2



新世纪LED网

www.ledth.com 专业的技术交流与服务平台



1-1 所示。目前市场上的商用 LED 产品的发光效率已经超过了白炽灯(16lm/W) 和荧光灯(85lm/W),达到 100lm/W。超高亮度、大功率的 LED 的应用领域不断扩大,包括各种尺寸的显示屏,各种数码产品的背光源,各种交通信号灯,低 压安全灯,室外景观照明,室内装饰照明,以及白光 LED 照明等等<sup>[5]</sup>。



图 1-1 Haitz 定律(图片来源 lumileds.com)

# 1.2.2 LED 产品的标准化情况

在当前全球能源短缺、环境污染严重的背景下,LED 作为一种新型的绿色 光源,必将在照明领域引发一场革命。为了迎接这场革命,世界各国纷纷制定了 相应的发展规划,如美国的"国家半导体照明研究计划"、欧盟的"彩虹计划" 和日本的"二十一世纪照明研究发展计划"等。我国也于 2003 年启动半导体照 明工程,在材料、芯片、封装和应用产业化支撑技术方面取得较大突破,已具有 一定规模,形成了 LED 的产业链<sup>[6]</sup>。

于此同时,随着 LED 的功率不断增大,亮度不断提高,人们开始越来越多 地关注 LED 产品在使用过程中的光辐射安全性问题。而解决这个问题的最有效 方法就是标准化,科学适用的标准可以使不合格的 LED 产品无所遁形,同时也 可以为人们安全使用 LED 产品提供指导,还可以对整个 LED 产业链起到极大的 促进作用。



国际上各大标准化组织都对LED的光安全性表现出浓厚的兴趣。国际防非电 离辐射委员会(ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)声明建议对LED的安全评估和测试应该遵循非相干光源的指导方针, 尽管该声明不具有法律效力,但是它为开始建立专门的科学适用的LED光安全性 问题方面的标准提供了一个很好的起点<sup>[7]</sup>。

国际照明委员会(CIE, Commission Internationale de L'Eclairage)在CIE S 009/E:2002(Photobiological safety of lamps and lamp systems)标准中对LED的安 全性做出了规定。对LED造成皮肤和眼睛的光化学危害、眼睛的近紫外危害、视 网膜的蓝光光化学危害、视网膜的无晶状体光化学危害、视网膜的热危害和皮肤 热危害等危害的曝光幅度限值做出了规定,这些曝光限值是根据ICNIRP的相应 指导方针得到的。同时此标准还提供了参考测试条件,并为评估和控制来自非相 干的宽波段光源的光辐射所产生的光生物危害提供了一个安全等级分类依据<sup>[8]</sup>。

国际电工委员会(IEC, International Electrotechnical Commission)提供制造 业标准,出版了专门处理激光产品安全性的IEC 60825(Safety of laser products-Part 1:Equipment classification, requirements and user's guide)系列标准,从1993年的版 本开始将LED考虑进来。但根据LED的一般应用场合,可知用于评估激光束的测 试条件并不适合于LED的评估。过去曾经尝试通过修改测试步骤来解决这一问 题,但是国际标准和欧洲标准,以及一些国家标准中对此所作出的修改并不一致 [9]。

我国于 2003 年底制定了"半导体发光二极管测试方法"新标准 (Sj2353.3-83),内容包括超高亮度及白光 LED 的各种光电参数的定义和测试方 法,涉及电学、光学、光度学、色度学、热学等各领域的参数内容,还提出功率 LED 热阻的定义和测试问题。2004 年还根据 CIE 相关标准制定了"灯和灯系统 的光生物安全性"标准 (GB/T 20145-2006),其中包含了对 LED 的规定<sup>[6]</sup>。

#### 1.3 本课题的研究意义

光源辐射的危害主要是指光辐射对人体皮肤、眼睛和视网膜的损伤或引起病 变。在目前各种人工光源广泛应用的情况下,这种危害非常普遍。无论是来自普 通医院的临床病例,还是国际上大量医学研究结果,光危害的严重性是惊人的。





尤其在中国这样的发展中国家,人们的安全意识还不够强,照明产品的安全要求 还处于相对较低的层次。视力衰退、白内障等往往都与光源的不正确使用密切相 关。

虽然各标准化组织做了大量的工作,但由于 LED 产业的飞速发展,LED 应 用场合不断增加,明确 LED 的安全性问题并不是件容易的事情。国际上至今为 止还没有起草过一个专门针对 LED 安全性方面的公认的指导性标准,而且在 LED 究竟应该被归类为激光器还是非相干光源类这一问题上也存在争议。此外, 对于如何测试 LED 的输出光的问题也存在不同观点。

在本课题中,我们试图通过对一系列主流商用 LED 进行测试实验,对 IEC 提出的扩展光源的表观光源大小参数的模型进行验证,尽可能精确的得出各类 LED 的曝光幅度限值,为 LED 产品的安全分类提供依据,进而来评估现有的各 种光生物安全性标准对 LED 的适用性,希望能够为减小目前各种光安全标准之 间的争议和模糊性以及各应用领域选择和评价 LED 的安全性提供有价值的参 考。

## 1.4 本论文的研究工作和结构安排

过去建立光安全性标准的时候,往往以被测光源为中心,一切被测光源的特 性、需要为中心来考虑安全性问题。而 LED 既不同于激光,又不同于传统的白 炽灯、荧光灯等光源,具有全新的特性和更广泛的应用领域。如果完全以 LED 为中心建立一份全新的标准,会有两方面问题:一是由于人们对其认识还不充分, 需要大量人力物力和很长时间;二是由于 LED 发展极其迅速,标准也很容易过 期,需要频繁地修订,会造成很多不便。

我们认为在 LED 光安全标准的建立过程中应该转变思路,从实际的应用场 合入手,根据各个不同场合的要求制定标准。这样可以充分利用现有资源,比如 对于 LED 白光照明可以参考 CIE S 009/E:2002,在功能辐射场合如生物分析、光 疗、光固化等则可参考 IEC 60825。

在 IEC 60825 标准中对 LED 安全级别的分类时,需要计算对向角 (angular subtense)的大小<sup>[8]</sup>。在 CIE S 009/E:2002 中声明,要通过计算对向角来评估光 源对视网膜的危害,就需要计算光源的表观光源大小 (apparent source size),但





是 CIE 标准并没有给出测量表观光源大小的方法<sup>[9]</sup>。在 IEC 60825-13 草案中提出 了测量小发散角光源的表观光源大小的方法,这种方法的有效性在各大标准组织 间存在争议。由于这种方法并没有在 LED 器件上验证过,本文依据此方法建立 了一个实验系统,对目前主流的 LED 产品的表观光源大小进行测试,进而计算 它们的可达发射极限 AEL (Accessible Emission Limit) 是否满足 IEC 和 CIE 标 准的要求。

根据上述思路,本论文的结构安排如下:

第一章绪论,首先介绍了 LED 的技术和产品标准的国内外发展状况,其次 阐述了本课题的研究意义,最后概括介绍了本文的研究思路和实验内容。

第二章,主要从生物学和人类健康角度分析了光辐射对人类眼睛和皮肤的影响。

第三章,结合 CIE 和 IEC 评估光辐射危害的相关标准,阐述了本文实验的 理论依据。

第四章,介绍实验系统的组成,测量的环境和步骤。

第五章, 叙述了表观光源大小测量实验的结果、数据的分析处理, 从中得出 被测的各类 LED 的安全性等级。

第六章,工作总结及展望



# 第二章 光辐射与人类健康

## 2.1 光污染的定义

越来越多的人造光源,给人类的夜生活带来了很大方便,但是同时也给人类 带来了更多的污染、更强的辐射、更频繁的闪烁。人类的视力更容易下降,眼病 更容易发生,近视眼的发病率比 100 年前提高了很多。现代照明不容忽视的问题 ---光污染已经摆在了我们面前。

光污染最早是 20 世纪 70 年代国际天文学会首先提出的。当时是因为大城市 普遍过多使用灯光,使天空太亮,影响了天文台的观测。当时光污染的定义是: 城市室外照明使天空发亮造成对天文馆的负面影响。现今我国环保百科全书中对 光污染作了如下定义:光污染是指过量的光辐射、紫外线辐射、红外线辐射对人 体健康的伤害,以及对城市交通、生物、环境等很多方面造成不良影响的现象。 自然光、反射太阳光、人造光等都可能造成光污染<sup>[10]</sup>。

自然光:自然光主要来源于太阳辐射。太阳光主要由可见光、紫外线、红外 线等组成,适量的阳光照射是必要的,有助于机体钙磷代谢。过量的阳光辐射, 能对人体健康造成不良影响。受日光中的紫外线过渡照射,会引起日光性皮肤炎, 使人体暴露的部位红肿、起水泡、疼痛,身体不适、发烧、恶心等,长期受紫外 线照射能诱发皮肤癌。

反射太阳光:这种光污染是城市中最为严重的。现代建筑为了美观很多采用 玻璃幕墙,其对阳光的反射很强烈,易使正常细胞衰亡,出现血压升高,心急燥 热,视力下降等不良症状。

人造光: 在现代生活中,各处采用的电光源五光十色,但同时给人们带来了 头晕目眩、视力下降、食欲不振等症状。此外,研究表明彩色光能使人产生心理 压力<sup>[11]</sup>。

本文主要关心的是人造光源对人体健康的影响。实际上,各个波段的光辐射 都能对人体造成危害,但又不可能能因为怕受到伤害而一辈子生活在黑暗中。因 此,我们需要了解光辐射效应与人类健康的关系,在各种用光场合中做到合理利 用,避免危害。





在光辐射与人类健康的关系中,最重要的两个方面就是光辐射对眼睛的作用 和光辐射对皮肤的作用。

## 2.2 光辐射对眼睛的作用

#### 2.2.1 光辐射对人眼的作用区域

由于渗透能力的不同,不同光谱范围的光辐射对人眼的作用区域不同,表 2-1 列出了不同波段光辐射对人眼的作用区域。图 2-1 给出了人眼的结构示意图 <sup>[12]</sup>。

辐射波段	作用区域
UVC和UVB(部分)	角膜/结膜
UVB(部分)和UVA	晶状体
可见光	视网膜
	视网膜,玻璃体
IRA(部分)	晶状体
IRB 和 IRC	角膜/结膜

表 2-1 光辐射对人眼的作用区域[12]

其中: 紫外线的波长 UVC < 280nm

UVB 280nm~320nm

UVA 320nm~380nm

可见光的波长: 380nm~780nm

红外线的波长 IRA (短波) 780nm~1400nm

- IRB(中波) 1400nm~3000nm
- IRC(长波) 3000nm~0.4mm

通常将中波和长波红外线统称为远红外线。

此外,光辐射对人眼的渗透深度还与人的年龄有关。年轻人眼睛前部的透光 能力要优于老人。





图 2-1 人眼的结构图

## 2.2.2 光辐射对人眼产生的危害

高强度的光辐射能造成眼睛的损伤。直接损伤发生在光辐射被吸收的位置, 这与光在眼睛中的渗透深度有关。同时也存在间接损伤,例如临近区域的加热可 以导致晶状体损伤。各种波长的光辐射都有可能导致眼睛的损伤。

(1)红外线对眼睛的伤害<sup>[13]</sup>:远红外线只能透入组织深度 0.5cm 左右,几乎 完全被角膜、虹膜、房水和晶状体吸收,角膜、房水、虹膜色素吸收红外线后转 变为热能传导给晶状体,连同晶状体吸收的热能会使晶状体受到损伤,其受伤的 原理就如同鸡蛋清受热变成不透明状类似。这种症状叫红外线白内障,或叫热内 障。

近红外线可以穿透组织 3—8cm 到达视网膜,在虹膜被虹膜色素吸收,在视 网膜由视网膜色素上皮吸收。这部分吸收的红外线波幅在 400nm—1000nm 之间, 最高吸收率是发生在 575nm,可见光及短波红外线经过屈光介质及聚焦后,可以 产生很强的热能而使视网膜脉络膜烧伤。其症状表现为:最初眩光,继而眼前有





黑影飘动,怕光、光幻觉及单色盲或双色盲(红、黄、蓝);24小时后飘动的黑 影收缩,形成一个致密暗点,可以持续几周、几个月甚至永远存在。因视网膜水 肿以及后来出现的退行性变化,常出现视物变形现象。

(2)紫外线对眼睛的伤害<sup>[13]</sup>:短波紫外线会损伤角膜和结膜,通常认为波长 在 280nm 时对角膜的损伤作用最大,而波长在 254nm 左右或 310nm 以上时,其 伤害作用会减小。受照后角膜和结膜的最外层细胞被破坏,在受照 6 到 8 小时后 人将感到一阵钻心的疼痛。不过,这类损伤是可以修复的。由于角膜和结膜的细 胞不断再生,一到两天后即可痊愈。短波紫外线还能引起日光性眼炎,即雪盲症, 临床症状与前者相似,但是程度较轻,特点是出现相对性中央暗点。

长波紫外线(波长 320nm—400nm)可以透过角膜,进入晶状体并被它吸收。 如果人们长期暴露在阳光下,眼的晶体就会产生光化学反应,导致晶体蛋白变性 凝结,在晶体前皮质周边会出现混浊,形成早期老年性白内障,一般叫紫外线性 白内障。而且晶状体组织不同于其他组织,它不生成新的细胞,所以这种病变是 不可修复的。

紫外线还有一个特性,对眼睛造成的伤害具有累积性,即某一点受强度紫外 线间歇照射,中间虽有间断,也能产生如同一次大照射产生的相同效果。老年人 患白内障多的原因,主要就是由于随着年龄增长,眼睛摄入紫外线量累积增加而 造成的。

(3)可见光对眼睛的危害<sup>[13]</sup>: 主要是蓝光对视网膜的光化学危害,过强的光 甚至能够引发视网膜炎。这种危害在 380nm—480nm 之间最为严重,是不可修复 的而且能够致盲。

2.3 光辐射对皮肤的作用

各种波长的光辐射中,对皮肤产生影响的主要是紫外线。在紫外线的三个波 段中,短波紫外线基本被臭氧层所吸收,不能到达地面,因此对人体皮肤有生理 作用的主要是 UVA 和 UVB 区的紫外线。由图 2-2 可以看出,UVB 中波紫外线 绝大部分反被表皮吸收,少量透过真皮,被照射部位产生急性红斑效应。UVA 长波紫外线辐射占紫外线总能量的 98%,绝大部分透过真皮,少量透过真皮的皮 下组织,辐射穿透能力远远大于 UVB,长期照射积累,容易对皮肤造成严重的





损伤[14]。



图 2-2 各种波长的光对皮肤的穿透性

紫外线对皮肤的损伤主要有以下几种[14]:

(1)皮肤晒黑,分为即时晒黑和耐久晒黑两种。即时晒黑是在日光或其它人工 光源下晒几分钟完成的,停晒之后颜色就开始减褪,几个小时后就褪清了。会导 致即时晒黑的光谱波段在 320nm—600nm 范围内,紫外和可见辐射都能产生这种 效果。即时晒黑是一种可逆的反应,持续时间不会很长。

耐久晒黑,它的起因是光辐射引起的其它光化学反应。这些反应主要发生在 活的表皮细胞里,但是部分在角质层中也有所发生。由此而生成的化合物扩散到 基细胞和真皮中去,几小时后引发真皮里血管的扩张,表现为皮肤发红。大约血 管恢复它本来的粗细的同时,表皮中也产生新的变化:在表皮深处浓缩成颗粒状 的称为黑色素体的黑色素开始向皮肤表面迁移。同时有更多的黑色素开始以很快 的速率生成。这两个过程的结果导致皮肤耐久不退的变黑。所以耐久晒黑代表着 皮肤中细胞的受损,这说明皮肤晒黑并不一定是健康的表现。

(2)灼伤。紫外辐射会引发皮肤红斑现象,红斑在几天后逐渐褪去,代之而来的是皮肤变深。剧烈的皮肤灼伤非常疼痛并能引发水肿、水疱、脱皮,伴随有发烧、寒颤、恶心等症状。

(3)皮肤的慢性光老化。长波紫外线对皮肤的穿透能力强,可以穿透表皮和大部分真皮,破坏皮肤内的弹力纤维,使肌肉失去弹性,引起皮肤松弛,导致皮肤





光老化。

(4)皮肤肿瘤。皮肤是一个非常重要的免疫器官,强紫外线照射能抑制某些免疫反应的产生,造成免疫功能系统的失衡。长期大量的紫外辐射对皮肤有直接的破坏作用,会诱发基底细胞癌、鳞状细胞癌及黑色素瘤。

#### 2.4 光辐射危害的评估

照明光源对人体眼睛和皮肤的危害,在国际上已经引起了广泛的关注。针对不同的产品,IEC 分别在不同的标准中提出了相应的曝光幅度限制要求,ICNIRP 和 CIE 也出台了相应的报告和安全指南。

根据 CIE 为评估一般照明灯的光化学危害专门制定的标准—CIE S 009/E:2002 中的要求,主要针对下列八种情况提出了光辐射危害的限值<sup>[15]</sup>:

(1)皮肤和眼睛的光化学紫外危害

入射到没有采取保护措施的皮肤和眼睛的紫外辐射的曝辐限适用于照射时间在8小时以内的情况,在任何一天中连续超过8小时的辐射在这里都不予考虑。 有效辐射的曝辐限为30J•m<sup>-2</sup>。为了保护眼睛或皮肤不受由宽带光源产生的紫外 辐射的损伤,光源的有效积分光谱照度E<sub>s</sub>不应超过由下式定义的限值。

式中:  $E_{\lambda}(\lambda,t)$ --辐照度,单位是 W·m<sup>-2</sup>·nm<sup>-1</sup>

*S<sub>uv</sub>*(λ)--光化学紫外危害加权函数 Δλ--波长带宽,单位是nm t---辐照时间,单位是秒

皮肤和眼睛在没有保护的情况下,允许在紫外辐射下照射的时间由下式确定:

$$t_{\text{max}} = \frac{30}{E_s}$$
 其中  $E_s$  是有效紫外辐照度,单位 W·m<sup>-2</sup>

(2)眼睛的近紫外危害

光谱范围在315nm到400nm(UV-A)之间的光辐射对眼睛的总的曝辐射量,





在时间小于1000s的情况下不能超过10000J·m<sup>-2</sup>;在时间大于1000s的情况下,对 没有保护措施的眼睛UV-A波段辐照度E<sub>UVA</sub>不应超过10W·m<sup>-2</sup>。

$$E_{UVA} \bullet t = \sum_{315}^{400} \sum_{t} E_{\lambda}(\lambda, t) \bullet \Delta t \bullet \Delta \lambda \le 10000 J \bullet m^{-2} \qquad (t < 1000 s) \qquad \exists \chi 2-2$$

$$E_{UVA} \le 10W \cdot m^{-2}$$
 (t \ge 1000s)  $\equiv (t \ge 1000s)$ 

式中:  $E_1(\lambda,t)$ --光谱辐照度,单位是 W·m<sup>-2</sup>·nm<sup>-1</sup>

Δλ--波长带宽,单位是nm

t---辐照时间,单位是秒

当眼睛没有保护措施时,小于1000s的紫外辐射允许时间由下面的公式计算:

$$t_{\text{max}} = \frac{10000}{E_{UVA}}$$
 其中, $E_{UVA}$ 是有效近紫外辐照度,单位 W·m<sup>-2</sup>

注:对近紫外区域对眼睛的照射,ICNIRP在1989年改变了上面的辐照限值,把 10000J•m<sup>-2</sup>曝辐限量的辐照时间从1000s增加到10000s(2.6小时),并将辐照时 间为10000s≤t≤30000s(8小时)的辐照度改变为1W•m<sup>-2</sup>。

(3)视网膜蓝光危害曝辐限

为了防止长期受到蓝光辐射的视网膜产生视网膜光化学损伤,光源的光谱辐 亮度与蓝光危害函数 B(*λ*) 加权积分后的能量,也就是蓝光加权辐亮度L<sub>a</sub>不应该超 过下面的限值:

$$L_B \bullet t = \sum_{300}^{700} \sum_t L_\lambda(\lambda, t) \bullet B(\lambda) \bullet \Delta t \bullet \Delta \lambda \le 10^6 J \bullet m^{-2} \bullet sr^{-1} \qquad (t \le 10^4 s) \qquad \exists 2-4$$

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \le 100W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \qquad (t > 10^4 s) \qquad \exists 2-5$$

式中:  $L_{\lambda}(\lambda,t)$  --光谱辐亮度,单位是 W·m<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>·nm<sup>-1</sup>

 $B(\lambda)$ --蓝光危害加权函数  $\Delta\lambda$ --波长带宽,单位nm t—辐照时间,单位秒

若光源辐亮度L<sub>B</sub>超过100 W·m<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>,则最大允许照射时t<sub>max</sub>应该由下面的公式计



算: 
$$t_{max} = \frac{10^6}{L_B}$$
 (t $\leq 10^4$ s) ,其中L<sub>B</sub>为蓝光加权辐亮度

注: *L<sub>i</sub>* 应该是在正圆锥形视场 α<sub>eff</sub> 中平均得到的,且此处仅适用于单个光源或被 视为整体的光源

(4)视网膜蓝光危害曝辐限—小光源

对于对向角小于11mrad的小型光源,由于光谱幅亮度 L<sub>λ</sub>(λ,t) 是在正圆锥形 视场α<sub>eff</sub>平均得到的,从式2-4可以推导出一个基于光谱辐照度而不是基于光谱亮 度的简单方程:

$$E_B \bullet t = \sum_{300}^{700} \sum_t E_\lambda(\lambda, t) \bullet B(\lambda) \bullet \Delta t \bullet \Delta \lambda \le 100 J \bullet m^{-2} \qquad (t \le 100 s) \qquad \exists 2-6$$

$$E_B = \sum_{300}^{700} E_{\lambda}(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \le 1W \cdot m^{-2} \qquad (t > 100s) \qquad \exists \chi 2-7$$

式中:  $E_{\lambda}(\lambda,t)$ --辐照度,单位 W-m<sup>-2</sup>-nm<sup>-1</sup>

Β(λ)--蓝光危害加权函数

Δλ--波长带宽,单位nm

t—辐照时间,单位秒

对于蓝光加权辐照度 $E_B$ 超过1 $W \cdot m^{-2}$ ,则最大允许照射时间 $t_{max}$ 应该由下面的公式计算:

$$t_{\max} = \frac{100}{E_B}$$
 (其中t < 100s) 式2-8

(5)视网膜热伤害

为了防止视网膜热损伤,光源的积分光谱亮度 L<sub>1</sub> 与灼伤危害加权函数 R(1) 加 权后得出的值,即热危害加权辐亮度不应该超过下式定义的限值:

$$L_{R} = \sum_{380}^{1400} L_{\lambda}(\lambda, t) \cdot R(\lambda) \cdot \Delta \lambda \le \frac{50000}{\alpha \cdot t^{0.25}} W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \quad (100 \text{us} \le t \le 10 \text{s}) \qquad \text{ \ensuremath{\vec{x}}$ 2-9}$$

式中:  $L_2$ --光谱辐亮度,单位是W•m<sup>-2</sup>•sr<sup>-1</sup>•nm<sup>-1</sup>

R(λ)--热危害加权函数



Δλ--波长带宽,单位nm

t---观察持续时间(对于脉冲灯则是脉冲宽度),单位是秒

a--光源对向角,单位弧度

注:  $L_{\lambda}$ 应该是在角度为0.0017rad和0.1rad之间的正圆锥形视场中平均得到的,且 此处仅适用单个光源。

(6)视网膜热危害曝辐限---对微弱视觉刺激

对于一个红外热光源或者是任何近红外的光源,它们所产生的微弱视觉刺激 不足以产生不适反应,当用眼睛观察且辐照时间大于10s时,其近红外(780nm 到1400nm之间) 辐亮度L<sub>IB</sub>应被限制在;

其中: L<sub>1</sub>--光谱辐亮度,单位是W•m<sup>-2</sup>•sr<sup>-1</sup>•nm<sup>-1</sup>

R(λ)--热危害加权函数

Δλ--波长带宽,单位nm

t---辐照时间,单位秒

α---光源对向角,单位弧度

微弱视觉刺激在这里被定义为:最大亮度(在对向角为11mrad的圆形视场上的平均值)低于10cd•m<sup>-2</sup>的视觉刺激。

(7)眼睛的红外辐射危害

为了避免对眼角膜的热危害以及对晶状体的后遗症(如白内障),对于在波 长780nm到3000nm之间的红外辐射,当照射时间小于1000s时,红外辐射的视觉 曝辐限应该不能超过下面的限值:

式中:  $E_1$ --光谱辐照度,单位 W·m<sup>-2</sup>·nm<sup>-1</sup>

Δλ--波长带宽,单位是nm



t---照射时间,单位秒

(8)皮肤热危害

可见光和红外辐射(380nm到3000nm)对皮肤的辐照应被限制在:

$$E_{H} \bullet t = \sum_{380}^{3000} \sum_{t} E_{\lambda}(\lambda, t) \bullet \Delta t \bullet \Delta \lambda \le 20000 \bullet t^{0.25} J \bullet m^{-2} \qquad (t \le 10s)$$

式中: E<sub>H</sub>--光谱辐照度,单位 W·m<sup>-2</sup>•nm<sup>-1</sup>

Δλ--波长带宽,单位nm

t---照射时间,单位秒

注:这里的曝辐限值仅适用于小面积辐照,且不提供大于10s的曝辐限

根据上述安全标准,对照明光源进行测量和评估所涉及的光谱范围遍及紫 外、可见和红外,即 200nm 到 3000nm。而实际中使用的光源往往只发射特定光 谱区间的光辐射,例如白光 LED 为 360nm 到 750nm,因此我们在评估某光源的 安全性时需要先确定其辐射的光谱范围,然后测量评估相应范围内可能存在的几 种危害。



# 第三章 LED 光安全性评估:标准、方法和仿真

#### 3.1 指导思想

由于 LED 种类繁多,对于它们应该采用哪种曝光幅度限制标准,国际上一 直是众说纷纭,争论不已。从光谱角度来说,LED 的光谱宽度比激光器大得多, 因此应该按照其它非相干光源的标准来对待,其曝光幅度限值不应过于保守的估 计。而从光束的发散程度来说,LED 的光束相对于其它传统的灯和灯系统是相 当集中的,发散角大部分小于等于 30 度。对于一些特定类型的 LED 来说,无论 认为激光标准更适用还是非相干光源标准更适用都是有道理的。

ICNIRP 建议对于 LED 的安全评估和相应测试应该遵循非相干光源的指导方 针,即 ICNIRP 中所规定的准则,认为这个准则能够对非相干光源进行最精确的 评估。CIE S009/E:2002 标准中对灯和灯系统的光生物安全性做出了评估,这个 标准对所有非相干宽带电光源在200nm 至 3000nm 波长范围内的光学辐射的光生 物危害做出了评估和控制,并声明将 LED 包含于其中。这个标准中给出的曝光 幅度限值是根据 ICNIRP 的相应指导方针得到的。因此上述两个标准对于 LED 的规定其实是一样的,都是将 LED 作为非相干光源对待。

IEC 在专门针对激光产品安全性的 IEC60825 系列标准中,从 1993 年的版本 开始将 LED 考虑进来。但是根据 LED 的一般应用场合,用于评估激光束的安全 性的条件对于 LED 过于严格了,于是曾于 2001 年进行过修订。

本文讨论 LED 的光安全性问题的主导思想是:模拟人在最具危害可能性的 情况下使用 LED 的情况,因为只有在这种情况下 LED 是安全的,那么才可以确 定该 LED 在所有时候都是安全的。基于这个想法,我们决定采用 IEC60825 中的 安全性分级标准对 LED 进行分类。

另外还需要说明两个问题:第一,因为在周围环境亮度较低时,瞳孔的直径 会扩大到 7mm;而在周围环境亮度足够高的情况下,瞳孔直径会减小到约 3mm。 第二由于视网膜的伤害程度随着视网膜上影像大小的改变而改变,而影像大小取 决于观察距离,所以曝光极限值也就随观察距离而改变。人眼能够清晰的聚焦在 一个小物体(如 LED)上的最小距离为 10 到 20cm。10cm 对于人眼近点适应性



新世纪LED网

www.ledth.com 专业的技术交流与服务平台 调节来说是一个最小的距离,即使是儿童也一样。在更小的距离,LED 的像会由于焦点对不准而模糊。由于上述原因,本文在对 LED 进行相关测量时采用 7mm 的孔径光阑,在计算对向角的时候假设人眼距离光源 100mm 来计算。这么做也 是基于上述指导思想的缘故。

#### 3.2 几个重要的概念

①可达发射极限 AEL (Accessible Emission Limit):每一种类别的 LED 范围 内所允许的最大辐射水平。在本文中以这个量的值为标准对 LED 的安全性进行 分类和评估<sup>[9]</sup>。

②最大允许照射量 MPE (maximum permissible exposure): 正常情况下人体 受到光直接照射不会产生不良后果的光辐射水平。MPE 水平指眼睛或皮肤受到 照射后即刻或长时间后没有损伤发生的最大照射水平,它与辐射波长、脉宽或照 射时间、处于危险状态的生物组织以及暴露在 400nm—1400nm 的可见和近红外 辐射中的视网膜成像的大小等有关<sup>[9]</sup>。

MPE 是为用户提供的,其值低于现有实验中已知的危害水平。MPE 值是用 户控制自己受照射量的指南,而不是确定安全与危害水平的严格分界线。在任何 情况下,激光辐射的照射量都越低越好。因此,本文中采用 AEL 作为评价 LED 的安全性的参考量,而不是 MPE。

③表观光源 (apparent source): 在视网膜上可能形成最小影像的实际发光体 或虚发光体。本定义用于确定 400nm—1400nm 波长范围内的光辐射表观发光源 的位置,其中假定表观光源位于眼睛的可调节范围内(≥100mm)。在发散角为 零的极限情况下,即理想的平行光束,表观光源的位置为无穷远。表观光源这一 概念的适用波长可以扩展到 302.5nm—4000nm 的范围,因为这一范围内的光波 均可以用普通透镜聚焦<sup>[9]</sup>。

表观光源的大小是一个虚拟的量,它的提出是为了能够对观察某些具有共同 特点的光源的效果进行比较测量,这些光源的尺寸比一个点大(即不能当作点光 源)而其对向角又小于100mrad(根据 IEC 标准)。

如果 LED 没有和任何透镜/反射镜做成一体,是裸露的,那么其芯片的实际 大小数据是可以用于计算对向角的。但通常 LED 是用胶固定在一个碗状反射面





上,二者整体一起用树脂透镜封装起来的,那么 LED 的实际大小就不能作为计 算对向角的依据,必须将 LED 芯片、反射碗及其树脂透镜的封装作为一个整体 来考虑其表观光源的大小。

④对向角 (angular subtense):对向角是表观光源 (包括漫反射) 在观察者 眼睛或测量点所张的视角,通常用 a 表示。如图 3-1 所示。对于波长在 380nm—1400nm 之间的辐射,视网膜受辐照面积在决定蓝光危害和视网膜热危 害的曝幅限值时是一个重要的因素。因为眼睛的角膜和晶状体将可视光源聚焦在 视网膜上,因此描述受辐照面积的最好方法是把这个面积和可视光源的对向角 a 联系起来<sup>[9]</sup>。



图 3-1 对向角

⑤眼睛运动: 正常人的眼睛,在注视一个物体时,会以几 Hz 的频率做轻微的无规则运动。这种眼睛的快速运动导致一个点光源的图像被散布于视网膜的一个区域上,这个区域的大小相当于约 0.011rad 的对向角对应的区域。此外,对于由目标决定的眼睛运动来说,例如阅读,如果注视时间超过 100s,注视的能力就会下降,从而导致辐射能量在视网膜上进一步散布。后面在计算对向角的时候需要仔细考虑这个问题<sup>[8]</sup>。

#### 3.3 IEC60825 中关于激光器/LED 分类的规定

按照对人眼的危害情况将激光器/LED 分为七个等级:<sup>[9]</sup>

1 类: 在合理可预见的工作条件下是安全的激光器,包括使用光学仪器进行 光束内视的情况。



1M 类: 在合理可预见的工作条件下是安全的激光器,但使用光学仪器进行 光束内视时可能存在危险性。分两种情况: 一是对于发散光束,但在离光源 100mm 内有光学元件用于汇聚光束的情况; 二是对于准直光束,其直径比标准 中规定用于测量照度和曝光量的孔径大的情况。

2 类:发射波长为 400nm 到 700nm 可见光的激光器,通常可由包括眨眼反射在内的回避反应提供眼睛保护。这些反应能够在这类情况下对眼睛提供足够的保护,包括在使用光学仪器进行光束内视的情况下。

2M 类:发射波长为 400nm 到 700nm 可见光的激光器,通常可由包括眨眼 反射在内的回避反应提供眼睛保护,这些反应保证了裸眼观察是安全的。而如果 使用光学仪器(如:双目镜、望远镜、显微镜)内视时可能有危险,分为两种情 况:一是对于发散光束,但在离光源 100mm 范围内有光学元件用于汇聚光束的 情况;二是对于准直光束,其直径比标准中规定用于测量照度和曝光量的孔径大 的情况。

注:在400nm---700nm范围之外的其他辐射,必须比1M类的AEL小

3A 类: AEL 在 400nm—700nm 范围内不大于 2 类的五倍,在其它波长不大于 1 类的五倍的激光器。

3B类: 直接进行光束内视通常会产生危险的激光器。观察漫反射一般是安全的。

4类: 能产生危险的漫反射的激光器。它们可能引起皮肤灼伤,也可引起火 灾。使用这类激光器要特别小心。

由于 IEC 60825 在标准的开始声明其标准中提到的所有的"激光器"都包含 LED,本文决定将上述分类标准应用于 LED 安全性的评估。

LED 产品要综合考虑其在使用时任何工作时间可能接触到的全部辐射波长 和输出功率的基础上进行分类,并将其划分到相应的最高类上。各个类别对视网 膜的 AEL 分别在表 3-1~表 3-4 中给出(按照危害增大的顺序排列)。

在 2.4 节中提到的 CIE 规定的八种可能存在的光生物安全性危害中,根据目前 LED 产品的特性,主要考虑视网膜的蓝光光化学危害,同时应该注意视网膜的热危害以及眼睛的近紫外危害的要求。因此在表 3-1~表 3-4 中只列出了 315nm—1400nm 范围内的 AEL 值。



曝光 被 形 (s) (nm)	10 <sup>-3</sup> ~ 10	10~100	100~ 10 <sup>3</sup>	$10^{3} \sim 10^{4}$	10 <sup>4</sup> ~ 3*10 <sup>4</sup>
315~400	7.9*10 <sup>-7</sup> C <sub>1</sub>	7.9*10 <sup>-3</sup> (J)		7.9*10 <sup>-6</sup> (₩)	_
	(J)				_
400 ~ 700	7*10 <sup>-4</sup> t <sup>0.75</sup> C <sub>6</sub>	视网膜蓝光光化学危害(400nm~600nm)			
	(J)	3.9*10 <sup>-3</sup> C <sub>3</sub> (J)	3.9*10 <sup>-5</sup> C <sub>3</sub> (	₩)	3.9*10 <sup>-5</sup> C <sub>3</sub> (W)
		视网膜热伤害	(400~700n	m)	
		(⊳T2) a≤1	.5mrad:3.9*10	⁴(W)	
		α>	1.5mrad:7*10 <sup>-4</sup> 0	$C_6 T_2^{-0.25}$ (W)	
		(t≤T₂) 7*1	10 <sup>-4</sup> t <sup>0.75</sup> C <sub>6</sub> (J	)	<u> </u>
700 ~ 1050	7*10 <sup>-4</sup> t <sup>0.75</sup> C <sub>4</sub>	(t>T₂) α≤1	.5mrad:3.9*10-	$C_4C_7$ (W)	
	C <sub>6</sub> (J)	α>1	.5mrad:7*10	$^{4}C_{4}C_{6}C_{7}T_{2}^{-0.25}$	(W)
1050 ~ 1400	3.5*10 <sup>-3</sup> t <sup>0.75</sup>	(t≤T₂) 7*10	) <sup>-4</sup> t <sup>0.75</sup> C <sub>4</sub> C <sub>6</sub> C <sub>7</sub>	<b>(</b> J <b>)</b>	
	$C_{\alpha}C_{\gamma}(J)$	1			

表 3-1 1 类和 1M 类光源的 AEL

#### 表 3-2 2 类和 2M 类光源的 AEL

波长 (nm)	曝光时间(s)	Class 2 AEL
400 ~700	t < 0.25	与1类 AEL 相同
	t≥0.25	C <sub>6</sub> *10 <sup>-3</sup> W

#### 表 3-3 3A 类光源的 AEL

曝光 <sub>时</sub> 波 长 (nm)	10 <sup>-3</sup> ~ 0.25	0.25 ~ 10	10 ~ 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> ~ 3*10 <sup>4</sup>
315~400	$4.0*10^{-6}C_1(J)$		4.0*10 <sup>-2</sup> (J)	4.0*10 <sup>-5</sup> (W)
400 ~ 700	(⊵0.25s) 5.0*10 <sup>-3</sup> C <sub>6</sub> (₩) (t < 0.25s) 3.5*10 <sup>-3</sup> t <sup>0.75</sup> C <sub>6</sub> J	5.0*10 <sup>-3</sup> C <sub>6</sub> (W)	5.0*10 <sup>-3</sup> C <sub>6</sub> (W)	
700~1050	3.5*10 <sup>-3</sup> t <sup>0.75</sup> C <sub>4</sub> C <sub>6</sub>	(J)	$(t > T_2)$	
1050 ~ 1400	1.8*10 <sup>-2</sup> t <sup>0.75</sup> C <sub>6</sub> C <sub>7</sub>	(J)	α≤1.5mrad:2.0 α>1.5mrad:3.5*1 (t≤T <sub>2</sub> ) 3.5*10 <sup>-3</sup> t <sup>0.75</sup> C₄C <sub>6</sub> 6	*10 <sup>-3</sup> C <sup>4</sup> C <sup>7</sup> (W) 0 <sup>-3</sup> C <sub>4</sub> C <sub>6</sub> C <sub>7</sub> T <sub>2</sub> <sup>-0.25</sup> W C <sub>7</sub> (J)



表 3-4 3B 类光源的 AEL

曝 光 时 间 长 (nm)	10 <sup>-9</sup> ~ 0.25	0.25 ~ 3*10 <sup>4</sup>
315~400	0.125 J	0.5 W
400 ~ 700	(t<0.06s) 0.03 J (t≥0.06s) 0.5 W	0.5 W
700 ~ 1050	t<0.06C₄ s:0.03C₄ J t≥0.06C₄ s:0.5 W	0.5 W
1050~1400	0.15 J	0.5 W

各表中的修正因子 C1~C7 和断点 T1、T2 是根据下列式子确定的

参数	波长范围 (nm)
$C_1 = 5.6 \times 10^3 t^{0.25}$	302.5 ~400
$C_2 = 10^{0.2(\lambda - 295)}$	302.5 ~ 315
C <sub>3</sub> =1.0	400 ~ 450
$C_3 = 10^{0.02(\lambda-700)}$	450 ~ 600
$C_4=10^{0.002(\lambda-700)}$	700 ~ 1050
C <sub>4</sub> =5	1050 ~ 1400
C <sub>5</sub> =N <sup>-1/4</sup>	400 ~ 10 <sup>6</sup> ·
$C_6=1(\alpha \leq \alpha_{\min})$	400 ~ 1400
$C_6 = \alpha / \alpha_{\min} (\alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max})$	400 ~ 1400
$C_6 = \alpha_{max} / \alpha_{min} (\alpha > \alpha_{max})$	400 ~ 1400
C <sub>7</sub> =1	700 ~ 1150
$C_7 = 10^{0.018(\lambda-1150)}$	1150 ~ 1200
C <sub>7</sub> =8	1200 ~ 1400
$T_1 = 10^{0.8(\lambda - 295)} * 10^{-15} s$	302.5 ~ 315
$T_2=10*10^{[(\alpha-camin)/98.5]}$ s	400 ~ 1400

注: C5 只用于脉宽小于 0.25s 的脉冲光源

在曝光时间大于 10s 的情况下,计算 C<sub>6</sub>的式子中  $\alpha$  用接收角  $\gamma_p$  代替 当  $\alpha \leqslant \alpha_{min}$  时, T<sub>2</sub>=10s; 当  $\alpha > \alpha_{max}$ 时, T<sub>2</sub>=100s



## 3.4 AEL 值的计算方法

如前所述,对于 LED 这类波长在 380nm—1400nm 之间的辐射,视网膜受辐 照的面积在决定蓝光危害和视网膜热危害的曝幅限值上是一个重要的因素。因为 眼睛的角膜和晶状体将可视光源聚焦在视网膜上,因此描述受辐照面积的最好方 法是把这个面积和可视光源的对向角联系起来,如图 3-1 所示。

由于眼睛在生理上的局限 , 在静止眼睛的视网膜上能成像的图像所对应的 最小对向角的值记为 α<sub>min</sub>,本标准中 α<sub>min</sub>=1.5mrad。当对向角小于 α<sub>min</sub>时,光源 被认为是点光源;对向角大于 α<sub>min</sub>的光源称为扩展光源。

对视网膜受到的热伤害进行评估时 (400nm—1400nm), 扩展光源的 AEL 直接随着光源的对向角变化而变化, 具体可见表 3-1~表 3-4, 计算 AEL 时所用到的修正因子 C<sub>6</sub>和 T<sub>2</sub>与对向角的值有关。

对视网膜受到的蓝光光化学危害评估时(400nm--600nm),如果曝光时间大于 10s, AEL 不会直接随着对向角的改变而改变,而取决于曝光时间。这时转而 采用一个叫做"限制接收角 y<sub>o</sub>"的参数用于计算,它随曝光的时间的变化而变化:

 $\gamma_p = 11 \text{ mrad}$   $10s < t \le 100s$ 
 $\gamma_p = 1.1t^{0.5} \text{ mrad}$   $100s < t \le 10^4 \text{s}$ 
 $\gamma_n = 100 \text{ mrad}$   $10^4 \text{s} < t \le 3 \cdot 10^4 \text{s}$ 

采用这些值的原因是,当曝光时间大于 10s 的时候,眼睛的运动会使光源的 像产生模糊,形成一个更大的角度。当辐射时间为 10s 以上时,光源的模糊像覆 盖了视网膜上更大的区域,这个区域对应的角度大约为 11mrad。而照射时间大 于 100s 时,由于眼睛的运动使视网膜上被一个小光源照射的区域进一步扩散成 一个较大的区域,这时光源所对应的角度与时间的平方根成正比增加。当照射时 间大于 10000s 的时候,光源所对应的角度被设定为 100mrad。本标准中,对于 所有类型的视网膜危害对向角的最大值 α<sub>max</sub> 都是 100mrad,因此超过 10000s 的 γ<sub>p</sub> 都等于 α<sub>max</sub>。

对于那些对向角小于  $\alpha_{min}$  和大于  $\alpha_{max}$  的可视光源,对视网膜危害的 AEL 值 与光源的尺寸无关。任何大于  $\alpha_{max}$  的角度将被限定为  $\alpha_{max}$ ,而任何角度小于  $\alpha_{min}$  的辐射角度将被限定为  $\alpha_{min}$ <sup>[9]</sup>。

根据 ICNIRP 的建议,矩形光源的尺寸由它面积的平方根来度量,椭圆形光



www.ledth.com

源的尺寸由它的长短轴乘积的平方根来度量(实际上也是其面积除以π再开方)。 比如,对于一个横截面长 10mm、直径 3mm 的光源,在光轴方向正前方 r=100mm 处的 α 将由平均尺寸 z 决定:

Z = sprt(10\*3) = 5.48mm

 $\alpha = \arctan(z / r) = \arctan(5.48/100) = 54.7 \text{mrad}$ 

需要注意的是,任何大于 α<sub>max</sub> 的角度将被限定为 α<sub>max</sub>,而任何角度小于 α<sub>min</sub> 的辐 射角度将被限定为 α<sub>min</sub> 这一规律优先于上述的数学平均计算。在上例中,如果光 源的长度大于 10mm,则在长方向的 α 大于 100mrad (α<sub>max</sub>),那么在计算有效光 源辐射角度的时候只能用 10mm 来计算<sup>[7]</sup>。

## 3.5 表观光源大小的测量方法

从上面所描述的评估标准来看, LED 的 AEL 值主要和眼睛的曝光时间和光 源的对向角大小有关。而对向角既可以由视网膜上成像的大小和眼睛的长度之比 来得到,也可以由表观光源的大小与光源和人眼之间的距离这两个量之比来得 到,如图 3-1 所示。两者相比,显然采用后一种办法要方便很多。在本文前面的 讨论中,已经假设人眼位于"最危险观察距离"处,即距离光源 100mm 的位置, 因为这是人眼能够进行适应性调节的最小距离,但这不包含所有可能的危险范 围。那么,接下来的问题就是:如何测量 LED 表观光源的大小。

目前关于测量 LED 的表观光源大小并没有公认的国际标准。本文拟采用如下的方法:如图 3-2 所示,首先使 LED 发出的光束经过一块透镜。在透镜的另一侧使 CCD 沿着光轴前后移动,在不同的平面上接收经过透镜的 LED 光束,得到光束在每个平面上的空间强度分布轮廓,同时观察各个截面上光斑的直径变化,当看到光斑直径收缩为最小时,截取此时 CCD 上所显示的图像并记录下此时 CCD 的位置,这个束腰位置的光斑的大小就是表观光源经过透镜所成的像。 根据像平面上的光强分布情况,取其光强下降到最强处二分之一内的范围作为像的大小,计算出对应的像直径。得到束腰光斑大小和它对应的像距之后,就可以计算出 LED 表观光源的大小和位置<sup>[16][17]</sup>。





#### 图 3-2 LED 表观光源大小的测量方法

认为变换后光束束腰位置的光斑与表观光源关于透镜互为共轭,其理论依据 如下:所谓表观光源就是指在人眼中所看到的实发光体或虚发光体,如果将人眼 的晶状体看作一块透镜,那么表观光源就是进入人眼的出射光线通过透镜在视网 膜上所成的像所对应的实物或虚物。因此我们可以用一块透镜来模拟人眼的功 能,对表观光源进行成像,再通过像的大小计算表观光源的大小。既然是成像, 像所在的位置应该是光斑最清晰的位置,由于经过透镜后光束是会聚的,这个位 置就是光斑最小的位置,也就是光束束腰位置。

将 LED 的外部封装视为一个折射球面,其焦距为 f, LED 芯片距离折射球 面的顶点距离为 l。如果 l<f, 那么芯片经过折射球面所成的是虚像,其位置和芯 片处于折射球面的同侧,经过折射球面出射的光束就是发散的;如果 l>f, 那么 芯片经过折射球面成实像,其位置处于折射球面的另一侧,也就是与芯片处于球 面的异侧,经过折射球面出射的光束是会聚的。由于光束的发散程度不同,人眼 接收到的光功率就不同,所以表观光源的大小和芯片在 LED 封装内部的位置有 密切的关系。现在所有的 LED 中,芯片的位置都处于 l<f 的范围,出射的光束是 发散的。





这个方法中透镜的作用是模拟人眼的功能,将 LED 发出的发散光束变换为 会聚的,使表观光源通过透镜成像于透镜的另一侧,以便 CCD 能够有足够的测 量空间。因为如前所述,表观光源是人眼中所看到的 LED 的样子,是一个虚拟 的量,无法直接测量出它的大小,采用透镜是有必要的。另外需要在距离 LED 顶点 100mm 处加上一个直径 7mm 的孔径光阑,用来模拟处于最大状态的人眼 瞳孔。

## 3.6 LED 的封装技术对表观光源的影响

LED 的核心发光部分是由 PN 结构成的芯片,可是 PN 结区发出的光子是非 定向的,即向各个方向发射都有相同的几率,并不是芯片产生的所有光都可以释 放出来,这主要取决于半导体材料的质量、芯片的结构、封装内部结构与封装材 料。常规的直径 5mm 型 LED 封装是将边长 0.2mm 的正方形芯片粘结在引线架 上,芯片的正极通过球形接触点与金丝键合为内引线与一条管脚相连,负极通过 反射碗和引线架的另一管脚相连,然后其顶部用环氧树脂包封起来,与外界隔绝。

目前商用 LED 的封装形式主要有引脚式封装、表面贴片封装(SMD)两种。 其中引脚式封装的技术最成熟,最方便也最经济,能承受 0.1W 左右的输入功率, 90%的热量由引脚散发出去。SMD 封装在近些年成为热点,很好地解决了亮度、 视角、可靠性等问题,在显示反射层需要填充的环氧树脂更少,并去除较重的碳 钢材料引脚,可轻易地将产品重量减轻一半,尤其适合户内、半户外全彩显示屏 的应用<sup>[18]</sup>。

我们认为表观光源大小与 LED 的光束发散角和整体的几何形状有密切的关系,而这两者都是由 LED 的封装方式决定的。

#### 3.6.1 芯片和反射碗的位置

反射碗的作用是收集芯片侧面、表面发出大发散角的光,向期望的方向角内 发射,其直径通常为 1mm,深度约为 0.6mm。芯片与反射碗是连为一体的,反 射碗能够使芯片发出的光束向机械轴集中,对 LED 的发光强度和发散角会有一 定的影响。如图 3-3 所示,芯片发出的光线经过反射碗反射后其出射光线改变方 向,使之靠近垂直的机械轴方向,而侧面出射的光线比表面出射的光线经反射碗





反射后角度改变更多, 更靠近 LED 的机械轴, 它对 LED 的法向光强的提高起了 很大作用。不过反射碗对于侧面出射光多的这类芯片的发光强度提升很大, 而对 表面出射光占主要地位的芯片则提升比较小。目前市场上主要的商用 LED 都是 表面发光型的, 因此反射碗所起到的作用十分有限<sup>[18]</sup>。



图 3-3 光在反射碗中的情形示意图

对光束发散角能产生影响的主要因素是反射碗所在的位置,也就是 LED 芯 片所在的位置。如 3.5 节中所述,将外部的环氧树脂封装视为一个球面镜,则芯 片的前后位置不同,相应的成像方式就不同,出射光束的发散角也随之变化。相 对于反射碗所能产生的作用,芯片前后位置的变化对光束发散角的影响要大得 多,进而也就会影响表观光源的大小。

为了验证这个想法,我们使用 ASAP 软件对芯片处于不同位置的情况进行了 模拟。假设 LED 的外形为圆柱加帽型,直径 5mm,长 8.7mm,模型为长 6.2mm 的圆柱和直径 5mm 的半球组合而成,封装树脂的折射率为 1.45。反射碗底的直 径为 1mm,深度 0.6mm,碗壁与垂直碗底方向夹角 45 度,芯片为正方形,边长 0.2mm。光线追迹情况如图 3-4 所示。





图 3-4 LED 光线追迹图

图中红色线代表直接从芯片发出的光线,黑色线代表经过反射碗反射之后出射的 光线。

将芯片置于距离 LED 前端半球顶点 6mm、5.5mm、5mm 和 4.5mm 四个不同位置分别进行模拟,可以得到在距离 LED 前端半球顶点 100mm 处的接收面上的光线分布情况,如图 3-5 所示。





图 3-5 100mm 处接收面上的光线分布图

从上图中可以清楚的看出,随着芯片的位置离 LED 前端球面顶点的距离不断减小,在横截面上的光斑越来越大,光束的发散程度越来越高。如图 3-6 所示, 从 6mm 到 4.5mm 的四个位置,中间光线集中部分的光斑半径分别为 18mm、 24mm、36mm 和 60mm,相应的光束发散角为 20 度、27 度、40 度和 60 度。从 这些结果中可以看出,芯片的位置对 LED 出射光束的发散角具有非常大的影响。 由于光束的功率分布集中程度与发散角有很大关系,发散角与人眼观察的安全性 有密切关系。而根据 IEC 标准 LED 的 AEL 值由表观光源的大小决定,因此我们 可以猜想表观光源的大小与出射光束的发散角之间存在某种联系。





图 3-6 100mm 接收面上光束能量分布图

## 3.6.2 LED 封装的几何形状

LED 外部封装的环氧树脂做成一定形状,有这样几种作用:保护芯片等不 受外界侵蚀;采用不同的形状和材料性质(掺或不掺散色剂),起透镜或者漫射 透镜功能,控制光的发散角;芯片折射率与空气折射率相差太大,致使芯片内部 的全反射临界角很小,其有源层产生的光只有小部分被取出,大部分在芯片内部 经过多次反射而被吸收,容易发生全反射导致过多光损失,选用相应折射率的环 氧树脂作为过渡,可以提高芯片的光出射效率。

用作构成管壳的环氧树脂必须具有耐湿性,绝缘性,一定的机械强度,对芯 片发出光的折射率和透射率高。选择不同折射率的封装材料、封装的几何形状, 对光子逸出效率的影响是不同的,出射光束的角分布也与芯片结构、光输出方式、





封装透镜所用材质和形状有关。如果采用尖形树脂透镜,可以使光集中到 LED 的轴线方向,相应的视角较小;如果顶部的树脂透镜为圆型或平面型,其相应的 视角将增大。

为了验证上述想法,我们同样使用 ASAP 软件对几种不同几何形状的 LED 进行模拟。在模拟的过程中,假设芯片距离外部封装前端的距离和整个器件长度 的比例保持不变。这样做是希望不要引入芯片前后位置变化对光束带来的影响。

(1)直径 3mm 圆柱形加帽 LED:长 5.5mm,芯片距离顶端 2.5mm。其在 100mm 处的接收面上的光束分布如图 3-7 所示。其光斑半径为 22mm,发散角为 25 度。



图 3-7 Φ3mmLED 光束分布

(2)直径 5mm 圆柱形加帽 LED: 长 8.7mm, 芯片距离前端半球体顶端 4.5mm。 其在 100mm 处的接收面上的光束分布如图 3-5 和 3-6 中所示。其光斑半径为 24mm, 发散角为 27 度。

(3)直径 10mm 圆柱形加帽 LED: 长 13.6mm,芯片距离半球体顶端 8.6mm。 其在 100mm 处的接收面上的光束分布如图 3-8 所示。其光斑半径为 70mm,发 散角为 70 度。





图 3-8 Φ10mmLED 光束分布

(4)横截面为 5mm×5mm 的长方体平头 LED: 长 7mm, 芯片距离前端 4.4mm。 其在 100mm 处的接收面上光束分布如图 3-9 所示。其正方形光斑边长为 65mm, 发散角为 66 度。



图 3-9 7mm×5mm×5mm 长方体 LED 光束分布

(5)草帽型"食人鱼"LED:外形为7.62mm×7.62mm×2.5mm的长方体和一个 直径 5mm 的半球体的组合,芯片在中心,距离半球体顶端 4mm,如图 3-10 所 示。其在 100mm 处的接收面上的光束分布如图 3-11 所示。可以得到其光斑半径 为 23mm,光束发散角为 26 度。





图 3-10 草帽型 LED 示意图



#### 图 3-11 草帽型 LED 的光束分布

通过上面 5 个例子的模拟分析,我们可以看出:在芯片距离 LED 封装前端 的距离和 LED 总长度的比例保持不变的情况下,对于同一种外形的 LED (如圆 柱加帽型),光束的发散角随着 LED 尺寸的增大而增大 (直径从 3mm 增加到 10mm 的过程中,发散角从 25 度增加到 70 度)。而对于同样尺寸不同外形的 LED 来说,长方体的 LED 比圆柱体的发散角要大得多,例如同样直径为 5mm 的圆柱 形 LED 发散角为 27 度,而长方体的发散角则为 66 度。草帽型 LED 其前端半球 体的直径也是 5mm,虽然其芯片距离半球体顶端的距离 4mm 比 3.6.1 节中模拟 几种情况都要近,但是它的形状却很好地限制了它的光束发散角。它的发散角为 26 度,只相当于圆柱形 LED 芯片距离顶端 5.5mm 情况下的水平。




综上所述, LED 封装的几何形状对其出射光束的发散角也有很大影响。因此,表观光源的大小与芯片的在 LED 中的位置和 LED 封装的几何形状有着密切的关系。

## 3.7 测量对象的选择

我们猜想, LED 的表观光源大小与它的光束发散角有关。而根据 3.6 节中的 分析,光束发散角与芯片在 LED 中的相对位置和 LED 封装的几何形状这两个因 素有着密切关系。由于 LED 制造商通常不会提供芯片在 LED 中的位置参数,而 是直接提供光束的发散角,我们选择实验对象的时候就从外形和发散角两方面来 考虑,对于具有相同外形的 LED,不同的发散角就代表着芯片位置的不同。此 外,根据 3.1 中所述的危害最大化的原则,我们在测量时选用的均为更有可能对 人眼造成危害的高亮度 LED,而不是普通型 LED。在目前主流的商用 LED 产品 中,我们选择了以下几种有代表性的进行实验:



图 3-12 五种不同封装形状的 LED

 ①圆柱形身加半球形圆顶封装:如图 3-12(1)所示,黄绿光透明 Φ3mm,发 散角 25 度;白光透明 Φ5mm,发散角 15 度/20 度/30 度;红光透明 Φ5mm,发
 散角 25 度;红光透明 Φ8mm,发散角 25 度;白光透明 Φ10mm,发散角 25 度。

②子弹头型封装:如图 3-12(2)所示,红光透明Φ5mm。发散角 10 度。

③长方体封装:如图 3-12(3)所示,红光透明 7×5×2mm<sup>3</sup>型;红光透明 7×5×5mm<sup>3</sup>型。



34

④食人鱼(草帽)型封装:如图 3-12(4)所示,蓝光透明,顶部半球Φ5mm,
 发散角 60 度。

⑤大功率 LED: 如图 3-12(5)所示, 白光, 功率 1W



# 第四章 实验装置及步骤

## 4.1 实验系统的组成

测量 LED 表观光源大小的实验所使用的仪器如图 4-1 所示:



### 图 4-1 实验系统的组成

①可调稳流电源:可调范围 0~40mA,用于驱动 LED。

②带刻度的导轨:搭建光路的平台,长1米,其上标有刻度,可以用于确定 各个部件之间的相对位置,读数精度 1mm。

③LED 支架: 与稳流电源相连,用于安放 LED,位置可以沿纵向和横向调整。

④孔径光阑:在实验中调整为直径 7mm 的圆形状态,用于模拟扩张到最大情况下的人眼瞳孔。

⑤光衰减器:由于测量中使用的都是高亮度的 LED, CCD 很容易产生饱和, 使得测量结果不准确,因此有必要在光路中加上衰减器,使 CCD 能够更准确地





分辨出光斑的大小。

⑥透镜及透镜架:透镜的焦距为 50mm,作用是用于将 LED 发出的发散光束变换为会聚的,使表观光源通过透镜成像,以便 CCD 能够有足够的测量空间。 透镜架可以沿横向进行二维调整,使透镜和 LED 保持共轴。透镜的厚度为 5mm, 远小于焦距,后面计算时可以当作薄透镜来考虑。

⑦CCD 及其底座: CCD 用于实时记录当前位置的光斑大小。本实验所采用 的 CCD 为 SONATA 公司的 YM-191 型。使用时应该将其背面的自动增益控制 (AGC)开关打开,否则无法得到清晰的光斑图像。使用之前需要对其进行定 标,其分辨率为 352×288(像素),用读数显微镜测得对应的尺寸为 5.284mm×4.323mm,因此 CCD 显示的图象上 352 像素对应的距离为 5.284mm。 CCD 与计算机相连,在计算机屏幕上可以实时显示当前位置的光斑大小。支架 可以沿横向上下左右调整,尽量使光斑位于 CCD 接收面的中央。

4.2 实验步骤

为了消除背景光和杂散光对 CCD 的影响,使测量结构进可能精确,实验是 在暗房内进行的。

实验光路如图 4-2 所示。

一.将 LED 安装在支架上,固定好支架的高度,接通电源。用一块白屏沿着导轨前后移动,察看屏上光斑的变化情况,调整 LED 的角度使光束的光轴和导轨的主轴平行。

二.使用游标卡尺将孔径光阑的直径设置为 7mm,将光阑移动至接近 LED 的地方,调整光阑的高度,以孔径能够套住 LED 并使之位于孔径中央为宜。调整好之后,将光阑移动到距离 LED 前端顶点 100mm 的位置,固定下来。

三. 将光衰减器放置在孔径光阑后面,紧贴着光阑,调节衰减器的高度,使 其接收面上的光斑位于接收面的中央。





#### 图 4-2 实验光路示意图

四. 将透镜放在接近 LED 的位置,调整其高度和角度,使光束能够经过透 镜的中心。然后将透镜移动至光衰减器之后,不要距离光衰减器过远,记录下透 镜的位置坐标。

五. 用读数显微镜测量 CCD 的接收面和 CCD 镜头盖口所在的平面之间的 距离,记为 s。将 CCD 固定在底座上,使 CCD 镜头盖口所在的平面和底座的前 端平齐。之后将底座和 CCD 放置在导轨上,位于透镜之后。

六. 打开与 CCD 配套的观测软件 Avercap.exe, 将 CCD 接收到的光斑显示 于计算机屏幕上。观察光强分布情况以确定 CCD 是否饱和:光强从中央到边缘 应该是逐渐变小的,如果中间部分显示的光强值保持不变而到了边缘处急剧变 小,说明 CCD 处于饱和状态,则应该调节光衰减器使光强进一步衰减,直到 CCD 不再饱和。

七. 调整 CCD 底座的高度和位置,使光斑位于屏幕的中央。随后将 CCD 沿着光轴方向在导轨上前后移动,同时观察屏幕上光斑的大小,直到找到光斑最 小处的位置为止。记录下此时 CCD 底座前端和透镜之间的距离,记为 x。那么 x+s=L'就是最小光斑到 LED 的距离,也就是表观光源经过透镜所成的像的像距。





八. 利用透镜成像公式  $\frac{1}{L'} - \frac{1}{L} = \frac{1}{f}$  可以计算出表观光源的位置 L 和垂轴放大

率  $\beta = \frac{L'}{L}$ 。利用与 CCD 配套的图像处理软件可以定位光斑质心的坐标。将光斑 图像的数据导入到 origin 软件中,对质心所在的那一列数据以像素为横坐标、光 强为纵坐标生成相应的光强分布曲线,从曲线上就可以读出光斑直径大小(以像 素为单位)。根据前面定标的结果,CCD 的 352 个像素对应 5.284mm 的长度, 可以计算出最小光斑的直径 d,再除以垂轴放大率就能得到 LED 的表观光源直 径。要注意的是,在确定光斑的大小时,以光强下降到中心最强处的二分之一的 位置为边界。

九. 换上另一种类型的 LED, 重复以上步骤。



# 第五章 实验数据处理及分析

实际进行测量时,透镜距离 LED 前端顶点 200mm。每一种类型的 LED 都 使用了 5 个样品加以测量,结果取算术平均值。下面所列出的结果皆为平均值。

从实用的角度出发,我们在评价 LED 的安全等级时,在时间上只考虑人眼 长时间观察的情况,即曝光时间大于 10<sup>3</sup>s 的情况;在波长方面,人眼最可能长 时间接触到的是用于显示、照明和指示的 LED,而用于这些用途的 LED 通常是 可见光 LED,其波长范围 380nm~780nm,由于某些可见光 LED 因为发光机理的 不同发出的光谱可能超出上述范围,因此我们主要考虑 315nm 到 1050nm 的波长 范围。

我们从正面和侧面两个方向分别对 LED 进行了测量,得到的结果如下。

## 5.1 正面的表观光源大小及相关结果

## 5.1.1 表观光源的大小及 AEL 值的计算

在实际测量时,我们发现由于 CCD 的灵敏度高,当 LED 工作在额定电流 (20mA)下的时候,即使衰减器调整到衰减程度最大的状态,对于某些类型的 LED,CCD 接收到的图像依然是饱和的。于是我们将驱动电流减小到 10mA 后 再次进行测量,发现虽然 CCD 不再饱和,但是出现了一个新的问题:对于一些 类型的 LED 所接收到光斑轮廓发生了明显变化,只有中间芯片的轮廓内光强依 然饱和或接近饱和,而周围一圈的光强已经几乎衰减为零(具体可见本节中实例 图片)。用一块光屏在 CCD 之前接收光束,发现在光屏上的光斑已经微弱到肉眼 无法分辨的程度。我们认为这种情况下 CCD 所接收到光斑是芯片通过透镜所成 的像,已经不能反映实际的 LED 表观光源在人眼中的样子,因为实际在额定电 流下观察 LED 时人眼只能观察到 LED 整体的轮廓,无法从中分辨出芯片的样子。 因此对于这种情况在后面计算 AEL 值的时候仍然采用在驱动电流为 20mA 的情 况下测得的数据。

本次实验一共测量了四类不同几何形状的 LED, 共计十一种。下面的数据



40

分析过程按照不同类型分别加以叙述。

(1)圆柱形加帽 LED (透明封装,共7种):

①Φ3mm 黄绿光 LED,发散角 25 度:

驱动电流为 20mA 下的光束在束腰处的光斑形状如图 5-1 所示,此时 CCD 发生饱和。驱动电流 10mA 下的光束束腰光斑如图 5-2 所示,此时只剩下芯片依 然部分依然可见。计算时采用前者的数据。

根据 4.2 节中所述的方法, 计算得光斑的直径为 1.291mm, 离透镜的距离为 66.2mm。根据透镜成像公式计算得到



图 5-1 Ф3mm 圆柱形 LED (驱动电流 20mA)





图 5-2 Φ3mm 圆柱形 LED (驱动电流 10mA)

表观光源位于透镜左侧 204.32m 的位置,也就是在 LED 封装内部距离半球体顶 点 4.32mm 的位置,其直径为 3.985mm,所对应的对向角 α 为 38.2mrad。 根据 3.4 中所述,这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个参数分别为

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 38.2/1.5 = 25.47$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha-\alpha min)/98.5]} = 23.58(s)$ 

根据表 3-1 计算得这种类型 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害(315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup>(W)

视网膜的光化学危害(400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> = 3.9×10<sup>-5</sup>×160=6.24×10<sup>-3</sup>(W)

视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 8.091×10<sup>-3</sup> (W)

700nm~1050nm:  $8.091 \times 10^{-3} \times C_4 = 0$  (W)

根据表 3-2 计算得其对应的 2 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害(315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup>(W) 400nm~700nm 的所有危害: 2.547×10<sup>-2</sup>(W) 视网膜的热伤害(700nm~1050nm): 8.091×10<sup>-3</sup>×C₄ =0(W)

根据表 3-3 计算得其对应的 3A 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup> (W) 400nm~700nm 的所有危害: 0.127 (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 4.045×10<sup>-2</sup>C<sub>4</sub> =0(W)

其中 C3, C4 值由波长决定,具体见本节末备注。



②Φ5mm 白光 LED, 发散角 15 度:

驱动电流为 20mA 时光束在束腰处的光斑形状如图 5-3 所示, CCD 在此情况下没有饱和。

经过计算得到光斑的直径为 1.756mm,离透镜的距离为 66mm。根据透镜成 像公式计算得到,表观光源距透镜左侧 206.25mm 处,也就是 LED 封装内部距 离半球顶点 6.25mm 的地方,其直径为 5.488mm,所对应的对向角 a = 51.62mrad。 这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 51.6 / 1.5 = 34.4$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha min)/98.5]} = 32.26$  (s)



图 5-3 Ф5mm 圆柱形 LED (发散角 15 度, 驱动电流 20mA)



根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>6</sup> (W)

视网膜的光化学危害(400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> = 3.9×10<sup>-5</sup>×31.33=1.22×10<sup>-3</sup>(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 1.01×10<sup>-2</sup>(W)

700nm~1050nm:  $1.01 \times 10^{-2} \times C_{4} = 0(W)$ 

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害 (315~400nm): 同1类

400nm~700nm 的所有危害: 3.44×10<sup>-2</sup> (W)

视网膜的热伤害(700nm~1050nm): 同1类

根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup> (W)

400nm~700nm 的所有危害: 0.172 (W)

视网膜的热伤害(700nm~1050nm); 5.05×10<sup>-2</sup>×C4=0(W)

其中 C3,C4 值由波长决定,具体见本节末备注。

③Φ5mm 白光 LED,发散角 20 度:

驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-4 所示, CCD 在这种情况下没有饱和。

经过计算得到光斑的直径为 1.891mm,离透镜的距离为 66mm。根据透镜成 像公式计算得到,表观光源距离透镜左侧 206.25mm 处,也就是 LED 封装内部 距离半球顶点 6.25mm 的地方,其直径为 5.91mm,所对应的对向角  $\alpha$  = 55.58mrad。 这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub>和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 55.58 / 1.5 = 37.05$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha min)/98.5]} = 35.40(s)$ 





图 5-4 Ф5mm 圆柱形 LED (发散角 20 度,驱动电流 20mA)

根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup> (W) 视网膜的光化学危害(400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> = 3.9×10<sup>-5</sup>×31.33=1.22×10<sup>-3</sup>(W)

视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 1.063×10<sup>-2</sup> (W)

700nm~1050nm:  $1.063 \times 10^{-2} \times C_4 = 0(W)$ 

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315~400nm):同 1 类 400nm~700nm 的所有危害: 3.705×10<sup>-2</sup> (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm):同 1 类



根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup> (W) 400nm~700nm 的所有危害: 0.185 (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 5.316×10<sup>-2</sup>×C<sub>4</sub> =0(W)

C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>值由波长决定,具体见本节末注释。

### ④Φ5mm 红光 LED,发散角 25 度:

驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-5 所示, CCD 在此 情况下饱和。驱动电流为 10mA 时,光斑形状如图 5-6 所示。计算时采用前者的 数据。

经过计算得到光斑的直径为 2.027mm, 离透镜的距离为 66mm。根据透镜成 像公式计算得到, 表观光源距离透镜左侧 206.25mm 处, 也就是 LED 封装内部 距离半球顶点 6.25mm 的地方, 其直径为 6.334mm,所对应的对向角 α = 59.57mrad。这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 59.57/1.5 = 39.71$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha-\alpha min)/98.5]} = 38.86$  (s)





图 5-5 Φ5mm 圆柱形红光 LED (发散角 25 度, 驱动电流 20mA) 根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup> (W) 视网膜的光化学危害 (400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> =0(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 1.113×10<sup>-2</sup> (W) 700nm~1050nm: 1.113×10<sup>-2</sup>×C<sub>4</sub> =0(W)

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315~400nm):同 1 类 400nm~700nm 的所有危害: 3.971×10<sup>-2</sup> (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm):同 1 类





图 5-6 Φ5mm 圆柱形红光 LED (发散角 25 度, 驱动电流 10mA)

根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup> (W)

400nm~700nm 的所有危害: 0.199(W)

视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 5.567×10<sup>-2</sup>×C<sub>4</sub>=0(W)

C3, C4值由波长决定,具体见本节末注释。

⑤Φ5mm 白光 LED,发散角 30 度:

驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-7 所示, CCD 在此 情况下没有饱和。

经过计算得到光斑的直径为 2.147mm, 离透镜的距离为 66mm。根据透镜成





像公式计算得到,表观光源距离透镜左侧 206.25mm 处,也就是 LED 封装内部 距离半球顶点 6.25mm 的地方,其直径为 6.709mm,所对应的对向角  $\alpha = 63.09$ mrad。这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub>和 T<sub>2</sub>两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 63.09 / 1.5 = 42.06$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha min)/98.5]} = 42.20$  (s)



图 5-7 Φ5mm 圆柱形白光 LED (发散角 30 度, 驱动电流 20mA) 根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup> (W) 视网膜的光化学危害(400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> =3.9×10<sup>-5</sup>×31.33=1.22×10<sup>-3</sup>(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 1.16×10<sup>-2</sup> (W)



700nm~1050nm:  $1.16 \times 10^{-2} \times C_4 = 0(W)$ 

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害 (315~400nm): 同1类

400nm~700nm 的所有危害: 4.206×10<sup>-2</sup> (W)

视网膜的热伤害(700nm~1050nm):同1类

根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害(315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup>(W)

400nm~700nm 的所有危害: 0.21 (W)

视网膜的热伤害(700nm~1050nm): 5.776×10<sup>-2</sup>×C4 =0(W)

C3, C4值由波长决定,具体见本节末注释。

**⑥Φ8mm 红光 LED, 发散角 25 度:** 

驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-8 所示,此时 CCD 发生饱和。驱动电流为 10mA 时,光斑形状如图 5-9 所示。计算时采用后者的数据。

经过计算得到光斑的直径为 2.342mm, 离透镜的距离为 65.7mm。根据透镜 成像公式计算得到,表观光源距离透镜左侧 209.24mm 处,也就是 LED 封装内 部距离半球顶点 9.24mm 的地方,其直径为 7.459mm,所对应的对向角 a = 68.22mrad。这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 69/1.5 = 45.48$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{((\alpha - \alpha min)/98.5]} = 47.57$  (s)





图 5-8 Φ8mm 圆柱形红光 LED (发散角 25 度, 驱动电流 20mA) 根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup> (W) 视网膜的蓝光光化学危害 (400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> =0(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 1.21×10<sup>-2</sup> (W)

700nm~1050nm: 1.21×10<sup>-2</sup>×C<sub>4</sub> =0(W)

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315~400nm): 同 1 类 400nm~700nm 的所有危害: 4.548×10<sup>-2</sup> (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 同 1 类





图 5-9Ф8mm 圆柱形红光 LED (发散角 25 度, 驱动电流 10mA) 根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup> (W) 400nm~700nm 的所有危害: 0.227 (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 6.061×10<sup>-2</sup>×C<sub>4</sub> =0(W)

C3, C4值由波长决定,具体见本节末注释。

⑦Φ10mm 白光 LED,发散角 25 度:

驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-10 所示,此时 CCD 发生饱和。驱动电流为 10mA 时,光斑形状如图 5-11 所示。在计算时采用后者 的数据。





图 5-10 Φ10mm 圆柱形白光 LED (发散角 25 度, 驱动电流 20mA)

经过计算得到光斑的直径为 3.017mm, 离透镜的距离为 65.5mm。根据透镜 成像公式计算得到, 表观光源距离透镜左侧 211.29mm 处, 也就是 LED 封装内 部距离半球顶点 11.29mm 的地方, 其直径为 9.732mm, 所对应的对向角 α = 87.35mrad。这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 87.35 / 1.5 = 58.23$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha min)/98.5]} = 74.4$  (s)





图 5-11 Φ10mm 圆柱形白光 LED (发散角 25 度, 驱动电流 10mA) 根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup> (W) 视网膜的光化学危害 (400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub>=1.22×10<sup>-3</sup>(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 1.38×10<sup>-2</sup> (W)

700nm~1050nm: 1.38×10<sup>-2</sup>×C<sub>4</sub> =0(W)

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315~400nm):同 1 类 400nm~700nm 的所有危害: 5.823×10<sup>-2</sup> (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm):同 1 类



根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup> (W) 400nm~700nm 的所有危害: 0.291 (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 6.94×10<sup>-2</sup>×C<sub>4</sub> =0(W)

C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>值由波长决定,具体见本节末注释。
(2)长方体型 LED (透明封装,发红光,共2种)

### ①长7mm, 橫截面 5mm×5mm

驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-12 所示,此时 CCD 没有发生饱和。矩形 LED 的表观光源尺寸由其横截面积的开方值来度量,具体见 3.4 节。



图 5-12 长方体(7×5×5)红光 LED(驱动电流 20mA)





经过计算得到光斑的等效直径为 1.982mm,离透镜的距离为 66mm。根据透 镜成像公式计算得到,表观光源距离透镜左侧 206.25mm 处,也就是 LED 封装 内部距离前端平面 6.25mm 的地方,其直径为 6.193mm,所对应的对向角 α = 58.25mrad。这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 58.25 / 1.5 = 38.83$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha min)/98.5]} = 37.68$  (s)

根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup> (W) 视网膜的光化学危害 (400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> =0(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 1.10×10<sup>-2</sup> (W)

700nm~1050nm:  $1.10 \times 10^{-2} \times C_4 = 0(W)$ 

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害 (315~400nm): 同1类

400nm~700nm 的所有危害: 3.883×10<sup>-2</sup> (W)

视网膜的热伤害(700nm~1050nm);同1类

根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害(315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup>(W)

400nm~700nm 的所有危害: 0.194 (W)

视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 5.485×10<sup>-2</sup>×C4 =0(W)

C3, C4值由波长决定,具体见本节末注释。

②长 7mm, 横截面为 2mm×5mm

驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-13 所示,此时 CCD 没有发生饱和。

经过计算得到光斑的等效直径为 1.266mm,离透镜的距离为 66mm。根据透 镜成像公式计算得到,表观光源距离透镜左侧 206.25mm 处,也就是 LED 封装 内部距离前端平面 6.25mm 的地方,其等效直径为 3.956mm,所对应的对向角 α = 37.21mrad。这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 \approx \alpha / \alpha_{min} = 37.21/1.5 = 24.81$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha min)/98.5]} = 23.04$  (s)





图 5-13 长方体(7×5×2)红光 LED (驱动电流 20mA) 根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup> (W) 视网膜的光化学危害 (400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> =0(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 7.927×10<sup>-3</sup> (W) 700nm~1050nm: 7.927×10<sup>-3</sup>×C<sub>4</sub> =0(W)

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315~400nm):同1类 400nm~700nm 的所有危害: 4.6×10<sup>-2</sup> (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm):同1类



根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup> (W) 400nm~700nm 的所有危害: 0.23 (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 3.963×10<sup>-2</sup>×C4 =0(W)

C3, C4值由波长决定,具体见本节末注释。

### (3)草帽型 LED (透明封装,发蓝光)

这种类型的 LED 外形为 7.62mm×7.62mm×2.5mm 的长方体和一个直径 5mm 的半球体的组合,芯片在中心,距离半球体顶端约 4mm。



图 5-13 草帽形 LED (未经过衰减器)

图 5-13 为没有经过衰减器时 CCD 接收到的图像,可以分辨出底座的正方形





轮廓。而经过衰减器后底座已经彻底消失,中心的圆形光斑也减小了一半以上: 驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-14 所示,此时 CCD 发生 饱和。驱动电流为 10mA 时,光斑形状如图 5-15 所示,此时 CCD 没有饱和。计 算时采用前者的数据。



图 5-14 草帽形 LED (经过衰减器, 驱动电流 20mA)

经过计算得到光斑的直径为 1.966mm, 离透镜的距离为 66.2mm。根据透镜 成像公式计算得到, 表观光源距离透镜左侧 204.32mm 处, 也就是 LED 封装内 部距离半球体顶端 4.32mm 的地方, 其直径为 6.068mm, 所对应的对向角 α = 58.12mrad。这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 16/1.5 = 38.75$ 



 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha min)/98.5]} = 37.57$  (s)



图 5-15 草帽形 LED (经过衰减器,驱动电流 10mA)

根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup> (W) 视网膜的光化学危害 (400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub> =3.9×10<sup>-5</sup>×1.51=5.9×10<sup>-5</sup>(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 1.10×10<sup>-2</sup> (W)

 $700nm \sim 1050nm: 1.10 \times 10^{-2} \times C_4 = 0(W)$ 

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为:

眼睛的近紫外危害 (315~400nm): 同1类

400nm~700nm 的所有危害: 3.875×10<sup>-2</sup> (W)

视网膜的热伤害(700nm~1050nm):同1类

根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害(315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup>(W) 400nm~700nm 的所有危害: 0.194(W)

视网膜的热伤害(700nm~1050nm): 5.5×10<sup>-2</sup>×C<sub>4</sub>=0(W)

C3, C4值由波长决定,具体见本节末注释。

## (4)子弹头型 LED (透明封装,最宽处直径 5mm,发红光)

驱动电流为 20mA 时,光束在束腰处的光斑形状如图 5-16 所示,此时 CCD



发生饱和。驱动电流为 10mA 时,光斑形状如图 5-17 所示。在计算时采用后者的数据。

经过计算得到光斑的直径为 1.68mm, 离透镜的距离为 66mm。根据透镜成 像公式计算得到,表观光源距离透镜左侧 206.25mm 处,也就是 LED 封装内部 距离前端顶点 6.25mm 的地方,其直径为 5.25mm,所对应的对向角α = 49.38mrad。 这种类型的光源对应的 C<sub>6</sub> 和 T<sub>2</sub> 两个修正因子为:

 $C_6 = \alpha / \alpha_{min} = 49.38/1.5 = 32.92$ 

 $T_2 = 10 \times 10^{[(\alpha - \alpha min)/98.5]} = 30.63$  (s)



图 5-16 子弹型 LED (驱动电流 20mA)





图 5-17 子弹型 LED (驱动电流 10mA)

根据表 3-1 计算得这种类型的 LED 对应的 1 类光源 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 7.9×10<sup>-6</sup>(W) 视网膜的光化学危害 (400nm~600nm): 3.9×10<sup>-5</sup>×C<sub>3</sub>=0(W) 视网膜的热伤害: 400nm~700nm: 9.8×10<sup>-3</sup>(W)

700nm~1050nm: 9.8×10<sup>-3</sup>×C<sub>4</sub> (W)

根据表 3-2 计算得这种类型的 LED 对应的 2 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315~400nm): 同 1 类 400nm~700nm 的所有危害: 3.292×10<sup>-2</sup> (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 同 1 类



根据表 3-3 计算得这种类型的 LED 对应的 3A 类光源的 AEL 值为: 眼睛的近紫外危害 (315nm~400nm): 4.0×10<sup>-5</sup> (W) 400nm~700nm 的所有危害: 0.165 (W) 视网膜的热伤害 (700nm~1050nm): 4.9×10<sup>-2</sup>×C₄ =0(W)

C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>值由波长决定,具体见本节末注释。 备注:

(1)  $C_3 = 10^{0.02(\lambda - 450)} (450 \text{ nm} \le \lambda \le 600 \text{ nm}), \quad \text{C3} = 1(400 \text{ nm} \le \lambda \le 450 \text{ nm})$ 

 $C_4 = 10^{0.002(\lambda - 700)} (700 \text{ nm} \le \lambda \le 1050 \text{ nm})$ 

对于实验中被测的几种 LED, C3、C4 分别计算如下:

红光:峰值波长 651.1nm,半宽 22.73nm

C<sub>3</sub>,C<sub>4</sub> 都=0,因为光谱所覆盖范围正好在 400nm~600nm 和 700~1050nm 之外。

黄绿光:峰值波长 560.2nm,半宽 29.5nm

 $C_3 = 10^{0.02(560.2-450)} = 160$ 

C4=0

蓝光:峰值波长 459nm,半宽 30.34nm

 $C_3 = 10^{0.02(459.450)} = 1.514$ 

C4=0

白光:两个峰值波长分别在 539.5nm 和 450.2nm,其中前者处的强度大于后者。  $C_3 = [10^{0.02(539.5-450)} + 10^{0.02(450.2-450)}]/2 = 31.33$ 

(2)以上所计算的视网膜光化学危害(400nm~600nm)和视网膜热危害 (700nm~1050nm)这两类值,由于与波长有关,只对被测的那种颜色的 LED 有效。而其它的 AEL 值对所有形状、发散角与被测 LED 一样的 LED 都有效,与颜色无关。

(3)本节所计算出的这些 AEL 值越小,表示该种类型的 LED 越容易对人眼造成伤害,越应该小心。对于某种 LED 而言,如果它发出的光功率小于相应1类 光源的 AEL 值,那么人眼长时间直视不会有危险;如果它发出的光功率大于相 应的1类光源的 AEL 值而小于2类的 AEL 值,人眼长时间直视会有危险,但可 由眨眼反应提供保护,不会受到实际伤害;如果光功率大于相应的2类光源的



AEL 值而小于 3 类的 AEL, 眨眼反应已经不足以提供保护, 只能进行很短时间 的观察; 如果光功率大于相应的 3A 类 AEL 值, 那么这类 LED 人眼决不能直视, 但是观察漫反射通常是安全的。

### 5.1.2 被测 LED 的安全性评价

我们对被测 LED 在不同大小的电流驱动下的功率进行了测量,用以考察它 们是否符合计算得到的 AEL 值,见表 5-1 所示。其中 20mA 为额定工作电流。

电 <sub>流</sub> (mA) LED	20mA	25mA	30mA	35mA
Φ3mm 黄绿光	0.041	0.05	0.059	0.068
Φ5mm 白光 15°	1.087	1.301	1.492	1.685
Φ5mm 白光 20°	0.963	1.123	1.264	1.390
Φ5mm 红光 25°	0.376	0.491	0.596	0.701
Ф5mm 白光 30°	0.430	0.520	0.598	0.678
Φ8mm 红光	0.964	1.2	1.424	1.644
Ф10mm 白光	2.14	2.54	2.9	3.24
长方体 7*5*5 红	0.018	0.023	0.027	0.032
长方体 7*5*2 红	0.044	0.052	0.06	0.068
草帽型蓝光	0.621	0.73	0.837	0.929
子弹头型红光	1.47	1.83	2.20	2.55

表 5-1 被测 LED 在不同工作电流下的光功率(单位 mW)

由上表可以看出,被测 LED 的光功率都为 mW 量级,波长范围都在 400nm~700nm 范围内。而 5.1.1 中计算的所有类型的 LED 的 400nm~700nm 范围 的视网膜热伤害 AEL 值都在 10<sup>-2</sup>W 的数量级,因此可以认为普通的非大功率型 LED 不会产生视网膜热伤害,只可能产生视网膜光化学伤害。

由于红光 LED 的光谱范围均在 400nm~600nm 之外,不会产生视网膜光化学 伤害,下面只讨论黄绿光、蓝光和白光 LED 的光化学伤害情况。

由于只有 400nm~600nm 范围内的光才会产生光化学伤害, 将各种光谱对于



64

波长积分,可以得到 400nm~600nm 范围内的光功率占总光功率的比例:黄绿光 为 91.5%, 白光为 76.4%, 蓝光为 100%。由此可以得到表 5-2。

电 流 (mA) LED	20mA	25mA	30mA	35mA
Φ3mm 黄绿光	0.0375	0.0468	0.054	0.062
Ф5mm 白光 15	0.83	0.833	1.14	1.287
Ф5mm 白光 20°	0.736	0.858	0.966	1.062
Ф5mm 白光 30°	0.329	0397	0.457	0.518
<b>Φ10mm</b> 白光	1.635	1.941	2.216	2.475
草帽型蓝光	0.621	0.73	0.837	0.929

表 5-2 被测 LED 在 400nm~600nm 范围内的光功率(单位 mW)

被测 Φ3mm 黄绿光 LED 在表中所有情况下均满足 1 类光源的光化学危害标准,长时间持续观察不会对人眼产生视网膜光化学伤害。

被测 Φ5mm 白光 LED (发散角 15°) 在驱动电流为 30mA 及以下时满足 1 类光源的光化学危害标准,即长时间观察不会对人眼产生危害。在驱动电流大于 30mA 时超过了 1 类标准的视网膜光化学危害的 AEL 值,但是满足 2 类光源的 标准,即长时间观察会产生危害,但可以由眨眼反应提供足够的保护。

被测 Φ5mm 白光 LED (发散角 20°) 在所有情况下均满足 1 类光源的光化学 危害标准,长时间持续观察不会对人眼产生视网膜光化学伤害。

被测 Φ10mm 白光 LED (发散角 25°)在所有情况下均超过了 1 类光源的光 化学危害标准,但是满足 2 类光源的标准,即长时间观察会产生危害,但可以由 眨眼反应提供足够的保护。

被测草帽型蓝光 LED 在所有情况下均超过了1类光源的光化学危害标准, 但是满足2类光源的标准,即长时间观察会产生危害,但可以由眨眼反应提供足够的保护。



## 5.1.3 一些推论

我们试图寻找光安全性和 LED 的一些特性参数之间的联系,以便在实际的 生产测试过程中能够方便的评价 LED 的安全性。通过上面的实验我们有了以下 几个发现:

(1)视网膜热伤害的 AEL 值和 LED 的光束发散角之间的关系:

对于具有同样外形和尺寸的 LED 来说,其视网膜热伤害的 AEL 值随着出射 光束的发散角的变化而变化。以直径 5mm 的圆柱形 LED 为例,发散角从 15 度 到 30 度变化,AEL 值与光束发散角成良好的线性关系,如图 5-18 所示。



图 5-18 1 类视网膜热伤害 AEL 值与发散角的关系

由于光束发散角测量十分方便,根据这个关系可以方便的对各种 LED 的功率做 出规定。

(2)视网膜热伤害的 AEL 值和 LED 尺寸之间的关系

对于具有同样光束发散角和外形而尺寸不同的 LED,其视网膜热伤害的 AEL 值随着 LED 的尺寸的变化而变化。同样以圆柱形 LED 为例,其尺寸可以用 直径来度量。对于发散角同为 25 度,而直径从 3mm 到 10mm 变化的圆柱形 LED,





AEL 值和 LED 直径的关系如图 5-19 所示。考虑到误差的因素,可以认为 AEL 值和 LED 的横截面直径也存在着线性关系。

(3)LED 可能对眼睛造成的几种伤害中,视网膜的光化学伤害主要由短波长的蓝光造成,因此峰值波长越短,该 LED 的光化学伤害的 AEL 值就越小;而且这种伤害只和光谱范围有关,与 LED 的表观光源大小无关。根据 5.1.2 的结果显示,即使是普通型非大功率 LED 也很容易造成视网膜光化学伤害,因此有必要尽量减少 LED 光束中的蓝光成分。

与表观光源大小有关的是视网膜的热伤害,其中 400nm~700nm 的部分占主要地位,其 AEL 值要小于 700nm~1050nm 的部分。根据 5.1.2 的结果,普通型非大功率 LED 基本不会造成视网膜的热伤害。

(4)相对于圆柱形 LED 来说, 同样尺寸的长方体 LED 的表观光源会更大一些, 对眼睛产生危害的可能性小, 而子弹头型 LED 的表观光源更小, 光束显得更加 集中, 对人眼产生的伤害的可能性要大一些; 比子弹头更有可能产生危害的是草 帽型 LED, 它的光强分布相对于其它 LED 来说非常不均匀, 在经过衰减器后周 围的光强都被衰减到零的情况下, 中心直径 1.67mm 左右的范围内的光强仍然足 以使 CCD 饱和。对于这两种 LED 在测试的时候需要多加小心。



图 5-19 1 类视网膜热伤害 AEL 值与 LED 直径的关系



(5)实际测得的尺寸较小的 LED (包括所有 Φ3mm 和 Φ5mm 的圆柱形 LED、 子弹头 LED 以及两种长方体 LED)的表观光源大小比它们的实际物理尺寸要大, 而尺寸较大的 LED (包括 Φ8mm 和 Φ10mm 的圆柱形 LED)的表观光源大小比 它们的实际物理尺寸要小,具体见 5.1.1 节,为方便起见列于表 5-3。

我们怀疑 Φ8mm 和 Φ10mm 的圆柱形 LED 的情况与孔径光阑的限制有关。 于是撤掉孔径光阑,保持衰减器,再次测量了这两种 LED 的表观光源大小:Φ8mm 的 LED 为 9.156mm, Φ10mm 的 LED 为 11.245mm,都比它们的物理尺寸要大一 些。

这种结果应该是由于某些角度较大的光线受到孔径光阑的限制没能进入到 CCD 所导致的。如图 5-20 所示,光线①和光线②的反向延长线交于 A 点,如果 这两条光线能够进入 CCD,那么从 CCD 所接收的像看来这两条光线是从 A 点发 出的,表观光源的尺寸就因为众多类似 A 的点的作用而大于了实际的物理尺寸。 而如果这两条光线由于光阑的阻挡没有进入 CCD,那么从 CCD 所接收的像看来 A 点就是不存在的,表观光源的尺寸就不会大于实际的物理尺寸。



图 5-20 光线轨迹示意图

LED 类型	实际物理尺寸(mm)	表观光源尺寸(mm)
Φ3mm 圆柱形(发散角 25°)	3	3.985
Φ5mm 圆柱形(发散角 15)	5	5.488
Φ5mm 圆柱形(发散角 20°)	5	5.91
Φ5mm 圆柱形(发散角 25')	5	6.334
Φ5mm 圆柱形(发散角 30)	5	6.709

表 5-3 LED 表观光源尺寸与实际物理尺寸对比





子弹头型	5	5.25
7×5×5 型长方体	5	6.183
7×5×2型长方体	3.162	3.956
Ф8mm 圆柱形(发散角 25°)	8	7.459
Ф10mm 圆柱形(发散角 25°)	10	9.732

# 5.2 表观光源的组成分析

## 5.2.1 LED 出射光束的分布

以直径 5mm 的白光 LED 为例,图 5-21 和 5-22 分别是从侧面和横截面两个不同角度拍摄的光束分布情况。



图 5-21 LED 光束分布(侧面)




图 5-22 LED 光束分布(横截面)

从图中可以看出, LED 的前方出射的光束的能量只占其发出的所有能量的一小部分,在 5.1.2 节中所计算的光功率就是指这部分光束的功率。

从图 5-22 中可以看出中间部分光束的能量非常集中,亮度很大;而周围的 亮度逐渐暗淡下去,直至变黑,之后再次逐渐变亮。这种现象是由于 LED 的外 部封装对光线产生全反射引起的,如图 5-20 所示。中间部分的光线通过半球面 折射直接出射,这对应着图 5-22 中间最亮的光斑;角度大一些的光线在圆柱面 上发生全反射,比如其中的光线②,这是图 5-22 中中间部分亮度变暗的原因; 角度更大一些的光线在圆柱面上发生折射而出射,这就是图 5-22 中外部再次变 亮的原因。

5.2.2 侧面表观光源的测量

(1)圆柱形加帽 LED (透明封装, 共4种)

#### ①Φ3mm 黄绿光 LED

其侧面表观光源的像如图 5-23 所示,表观光源包含了两个亮度显著高于周围部分亮度的光斑,一个位于芯片所在位置,一个位于 LED 封装的半球的顶点处。经计算得左边的光斑所对应的表观光源光斑等效直径为 1.56mm,右边的为 1.12mm。





图 5-23 Φ3mmLED 侧面表观光源像

#### ②Φ5mm 白光 LED

其側面表观光源的像如图 5-24 所示,表观光源同样包含了两个亮度显著高 于周围部分的光斑,光斑位置与 Φ3mm 的 LED 相同。左边的光斑所对应的表观 光源光斑的等效直径为 2.094mm,右边的为 1.305mm。



#### 图 5-24 Φ5mmLED 侧面表观光源像

#### ③Φ8mm 红光 LED

其侧面表观光源的像如图 5-25 所示,表观光源的两个高亮光斑中,左边的 也就是处于芯片位置处的光斑亮度与周围部分的亮度区别不像前两种 LED 那么 显著,右边的也就是处于半球顶端的光斑则比前两者有明显扩大,与周围环境的 亮度对比区别亦更加显著。左边光斑所对应的表观光源光斑的等效直径为 1.99mm,右边的为 3.342mm。





图 5-25 Φ8mmLED 侧面表观光源像

### ④ Φ10mm 白光 LED

其侧面表观光源的像如图 5-26 所示,右边的高亮光斑与周围部分的亮度差别更加显著。左边光斑所对应的表观光源光斑的等效直径为 1.322mm,右边的为 3.32mm。



图 5-26 Φ10mmLED 侧面表观光源像

### (2)长方体型 LED (红光,规格 7mm\*5mm\*2mm)

其侧面表观光源的像如图 5-27 所示,从图中可以看出这种类型的 LED 只有 在芯片所在位置有一个亮度明显高于周围亮度的光斑,而在 LED 的右边顶端不 存在这样的光斑。这个光斑对应的表观光源光斑的等效直径为 2.376mm。





图 5-27 752 型长方体 LED 侧面表观光源像

(3)子弹型 LED (发红光,直径最大处 Φ5mm)

其侧面表观光源的像如图 5-28 所示,它也拥有两个两个亮度显著高于周围 部分亮度的光斑,右边的光斑比同等尺寸的圆柱形 LED 要大得多。左边光斑所 对应的表观光源的等效直径为 1.201mm,右边的为 2.805mm。



图 5-28 子弹型 LED 侧面表观光源像

(4)草帽型 LED(蓝光,顶端半球直径 5mm)

其侧面表观光源的像如图 5-29 所示,从左到右一共有 4 个亮度明显高于周围部分的亮度的光斑。其中最右边的一个亮度和周围部分亮度差别并不太多,而 且其位置也不像同样带帽的圆柱形 LED 那样位于半球体的顶端,而是位于半球体的中间。





图 5-29 草帽型 LED 側面表观光源像

从以上四种类型 LED 的侧面表观光源的成像测量结果来看,对于圆柱形 LED 来说,随着 LED 的尺寸增大,而位于半球顶端的高亮光斑的尺寸不断增加, 与周围部分的亮度对比差别越来越大。子弹头型 LED 右边的高亮光斑比同等尺 寸的圆柱型 LED 的亮度和尺寸都大得多,说明子弹头 LED 对光束的会聚作用显 著强于圆柱形 LED。草帽型 LED 在半球体部分的光亮度分布比较均匀,其最右 边的高亮光斑的亮度和周围部分亮度差别并不太多,而且其位置也不像同样带帽 的圆柱形 LED 那样位于半球体的顶端,而是位于半球体的中间。长方体型 LED 对光束没有会聚作用,其右边顶端不存在高亮光斑。

由上述分析可以看出,在 5.1 中所测量的正面的表观光源的像,之所以分辨 不出芯片的轮廓,是由于半球顶端高亮光斑的影响。

## 5.2.3 表观光源的实质



那么,表观光源究竟是什么?从下面两张图中我们可以得到结论。图 5-30

图 5-30 Φ8mm 红光 LED 表观光源



是直径 8mm 的圆柱形红光 LED 的正面表观光源像。其中 a 是驱动电流减小到 0.01mA 时的像,可以看出光斑由三部分构成:中央方形的是芯片,芯片之外的 圆形光斑是反射碗所成的像,再外面一圈黑色环是由全反射形成的,黑环的外边 沿是 LED 的圆柱轮廓所对应的像,最外圈的亮环是 LED 的帽沿所成的像。B 是 驱动电流为 20mA 时的像,可以看到反射碗和芯片的像已合为一体无法分辨,前 面我们计算相应的表观光源大小和 AEL 值时取的就是中间的光斑,所以表观光 源实际上就是反射碗经过 LED 外部封装所成的像。

图 5-31 是直径 5mm 的圆柱形红光 LED 的表观光源像,同样 a 是电流为 0.01mA 的情况, b 是电流为 20mA 的情况。对于 Φ5mm 的 LED,反射碗的像和 圆柱的轮廓几乎重合在一起,没有 Φ8mm 那样明显的界限。



图 5-31 Φ5mm 红光 LED 表观光源

上述现象只能在观察单色光 LED 时得到,对于白光 LED 无法分辨芯片与反射碗的像,因为白光 LED 的反射碗中已经填充满了荧光粉,覆盖住了芯片。

5.3 理论分析

通过 5.2 节中的分析,我们确定 LED 表观光源就是反射碗经过 LED 外部封 装所成的像。下面我们从理论角度来分析一下表观光源的位置、大小以及能够被 利用的光功率(就是指图 5-21 和 5-22 中中央部分光束的功率)与芯片位置(即 反射碗位置)的关系。

以直径 5mm 的圆柱形 LED 为例, 假设 LED 的芯片距离半球顶端的距离为 *l*,表观光源距离半球顶端的距离为*l*,表观光源相对反射碗的垂轴放大率为β, 可利用的光功率占芯片发出的总光功率的比率为*T*。





根据折射球面成像公式可以得到, *l*'与*l*的关系如图 5-32 所示, β 与*l*的关系如图 5-33 所示。





假设 LED 芯片为一个余弦辐射体,可以得到 T 和 l 的关系,如图 5-34 所示。





图 5-34 可用光功率占总功率的比例与芯片位置的关系

由于 LED 的形状种类众多,通过成像法测量 LED 的表观光源来评价 LED 的安全性是一项非常复杂的工作,不过从本文所测量的几种 LED 的结果与直接 用肉眼观察的结果对比来看,对于单个 LED,用成像法测量 LED 的表观光源是 一种很有效的方法。



## 第六章 总结与展望

本课题旨在研究如何评估 LED 对人眼的危害性,通过 ASAP 仿真和实际对 多种 LED 进行测量,探索 LED 表观光源的各种特性,以及 LED 的光生物安全 性与这些特性之间的关系。

## 6.1 本论文完成的主要工作

(1)分析了 ICNIRP1997、IEC60825 和 CIE S009/E:2002 三个标准中关于 LED 的规定,确定以表观光源的大小来度量 LED 对人眼的危害。由于表观光源的提出是为了度量光功率在人眼视网膜上的分布,进而评价 LED 光源的安全性,而出射光功率的分布与光束的发散角和 LED 封装的几何形状有关,根据工程光学的理论,LED 表观光源的大小与 LED 芯片在封装中的位置以及封装外形有关, 提出了利用透镜成像的方法来测量 LED 表观光源的大小。

(2)使用 ASAP 软件对外形相同、芯片位置不同的 LED 和芯片相对位置相同 而外形不同的 LED 的出射光束情况分别进行仿真,得到了光束发散角和芯片相 对位置以及 LED 外形的关系。

(3)对十一种不同类型的高亮度 LED 进行了测量,从正面和侧面两个方向得 到了它们的表观光源的大小和位置,并计算出光强最强的方向上(光轴方向)各 种类型的 LED 的 AEL 值,为实际生产测试提供了有价值的参考数据。

(4)根据测得的数据分析了 LED 可能造成的视网膜光化学危害和视网膜热伤 害与表观光源大小, LED 外形尺寸以及出射光谱范围的关系,得出了以下结论: 普通非大功率型可见光 LED 不会对人眼产生视网膜热伤害,但是包含蓝光成分 的 LED 很容易对人眼产生视网膜光化学伤害;视网膜热伤害的 AEL 值与 LED 的光束发散角和圆柱部分的直径分别成线性关系。这些结论对于 LED 实际应用 中估算 LED 的照明安全性具有重要意义。

(5)表观光源是一个变化的量,随着 LED 驱动电流的不同呈现出不同的样子。 在驱动电流微弱时所看到的是芯片的样子,而在驱动电流为正常额定电流时看到 的则是与 LED 外形相似的样子。



(6)从侧面的测量结果看出,表观光源的组成非常复杂。对于圆柱形 LED 来 说,表观光源包含了两个亮度明显高于周围部分的光斑,一个位于芯片所在的位 置,另一个位于半球体顶端。随着 LED 的尺寸增大,位于芯片位置的高亮光斑 逐渐变为清晰的长方形,能够反映出芯片的轮廓形状;而位于半球顶端的高亮光 斑的尺寸不断增加,与周围部分的亮度对比差别越来越大。子弹头型 LED 右边 的高亮光斑比同等尺寸的圆柱型 LED 的亮度和尺寸都大得多,说明子弹头 LED 对光束的会聚作用显著强于圆柱形 LED。草帽型 LED 在半球体部分的光亮度分 布比较均匀,其最右边的高亮光斑的亮度和周围部分亮度差别并不太多,而且其 位置也不像同样带帽的圆柱形 LED 那样位于半球体的顶端,而是位于半球体的 中间。长方体型 LED 对光束没有会聚作用,其右边顶端不存在高亮光斑。

(7)从测量得到的数据中,发现测得的表观光源尺寸比 LED 的实际物理尺寸 要大一些,对这种情况进行了分析,给出了理论上的解释。另一方面这种现象也 说明了表观光源不能被直接测量,需要采取其它手段,比如成像法。

(8)从本文测量的结果看来,对于单个的 LED,用透镜成像法测量表观光源 来评价它的安全性是行之有效的办法。

### 6.2 本课题今后的研究方向

(1)由于实验条件限制,本文所测得的结果还不够精确。利用透镜成像法测量 表观光源,最终的表观光源大小是根据成像公式计算出来的,这就对像距、物距 有很高的精度要求。而本文实验中所用导轨的读数精度只到 1mm,这样确定的 CCD 和透镜之间的距离不够精确,会影响到最终表观光源的计算。

(2)IEC 标准中在安全分类中,将裸眼直视没有危险而经过光学仪器内视会产 生危险的 LED 与裸眼直视和经过光学仪器内视都不会产生危险的 LED 分为两个 不同的安全级别,但是在计算每个安全级别的 AEL 时又将上述两种情况归为一 类。我们认为这样是不合理的,但是经过光学仪器后的伤害应该如何度量,是对 各种不同的仪器分别度量还是确立一个统一的标准,还有待研究。

(3)本文测量 LED 的表观光源大小时,都是针对单颗的 LED。而实际应用中 LED 经常是多颗组合在一起的,例如用作交通灯的 LED 阵列。这种情况下 LED 在眼睛中成像的情况十分复杂,随着距离的改变在眼中成像的 LED 个数会不同,





这样能产生最大危害的地方可能是离开光源的某个距离处,而不是最近处。

(4)随着 LED 的亮度不断提高,对人眼产生眩光危害的可能性越来越大。眩 光就是指在视野中由于亮度分布不均,在空间或时间上存在极端的亮度对比,以 致引起人眼不舒适和降低物体可见度的视觉条件。已经有很多夜间行驶的司机反 映 LED 的交通灯看上去很不舒服。产生眩光的因素很多,主要有光源的亮度(亮 度越高、眩光越显著),光源的位置(在视场内越接近人眼,眩光越显著),光源 的外观大小与数量(表观面积越大,数目越多,眩光越显著)以及周围环境亮度 (环境越暗,眩光越显著)等。这也是 LED 安全性研究的一个重要方面。



# 参考文献

[1] LED driver market emphasizes high-power requirements, LEDs Magazine Issue 6 April 2006

[2] Standardization requirements and safety concerns drive LED test and measurement developments, LEDs Magazine Issue 6 April 2006

[3] 王国宏, 半导体照明大功率 LED 进展, 产业透视, 2004 年第 6 期

[4] 郑代顺, 钱可元, 功率型白光 LED 研究进展, 中国照明电器, 2006 年第 3 期

[5] 晨光, 白光 LED 的发展趋势, 光源与照明, 2004 年第1期

[6] 彭万华,我国超高亮度及白光 LED 产业的现状与发展,激光与红外,第 35 卷第 4 期,2005 年 4 月

[7] ICNIRP statement on light-emitting diodes and laser diodes: inplications for hazard assessment, Health Physics June 2000, Volume 78, Number 6

[8] CIE S 009/E:2002, Photobiological safety of lamps and lamp systems, 2006-11

[9] IEC60825-1, Safety of laser products-Part 1:Equipment classification, requirements and user's guide, Edition 1.2, 2001-08

[10] 魏明, 冯海亮, 浅谈光污染与人类健康, 灯与照明, 2004年6月

[11] 王爱英,警惕室外照明的光污染,灯与照明,2002 年第3期

[12] [立陶宛]A.Zukauskas,[美]Michael S Shur,[美]Remis Gaska,固体照明导论,黄 世华译,化学工业出版社,2006-1

[13] 梅满海,对眼睛造成伤害的几种辐射光线,眼睛与眼镜,1999年第二期

[14] 涂国荣, 王旭辉, 紫外线对皮肤的光辐射损伤与防护研究, 第 32 卷第 1 期, 2002 年 2 月

[15] GB/T 20145-2006,灯和灯系统的光生物安全性

[16] Simon Hall, Laura Crane, David Gibbs, Investigation of a measurement technique to determine the apparent source size for light emitting diodes, National Physical Laboratory, Health & Safety Executive 2005





[17] Richard Young, Measuring light emission from LEDs, SPIE Vol.635563550H(2006)

[18] 钱可元, 胡飞等, 大功率白光 LED 的封装技术研究, Semiconductor Optoel Electronics Vol.26 No.2

[19] Hong Luo, Jong Kyu Kim, Yangang Xi, High-power packages for phosphor-based white-light-emitting diode lamps, Applied Physics Letters 86,243505(2005)

[20] 01/714514 DC ISO/CD 11146-2. Lasers and laser-related equipment.Test methods for laser beam widths.divergence angle and beam propagation factor.Part 1:Stigmatic and simple astigmatic beams

[21] Ian Ashdown, Marc Salsbury. A Near-field Goniospectroradiometer for LED Measurements, Proc.SPIE Vol.6342,634215(2006)

[22] A.E.Siegman, Defining the Effective Radius of Curvature for a Nonideal Optical Beam, IEEE 0018-9197/91/0500-1146

[23] John F.Van Derlofske, Michele W.McColgan, White LED sources for vehicle forward lighting, Proc. SPIE 4776,195(2002)

[24] Greg Craig, Todd Macuda, Paul Thomas, Light source halos in night vision goggles:psychophysical assessments, Proc.SPIE 5800,40(2005)

[25] Y.G.Soskind, J.A.Campin, M.D.Hopler, Solid state lighting and photobiological safety, Proc.SPIE 6426,64262C(2007)

[26] Bert Braune, Herbert Brunner, Highly efficient UV-based conversion LEDs for the generation of saturated colors with improved eye safety, Proc.SPIE 5366,97(2004)
[27] James W.Ness, Harry Zwick, David J.Lund, Eye movements during fixation: implications to long-term viewing of small optical sources, Proc.SPIE 3591,344(1999)

[28] 陶久祥,李洪波,激光和 LED 产品的光学安全要求,灯与照明,2006 年 12月

[29] 鲍超,超高亮度 LED 测量问题,液晶与显示,第 18 卷第 4 期,2003 年 8 月

[30] 刘宏,张晓晶,高亮度白光 LED 直流照明灯的研究,节能与环保,2005 年





8月刊

[31] 林燕丹, LED 汽车前照灯: 眩光与显色性,中国照明电器,2006 年第5期
[32] 郑智斌, InGaAlP LED 发光特性分析,液晶与显示,第18卷第6期,2003年12月

[33] 鲍超,发光二极管测试技术和标准,物理学和高新技术,2003年第5期

[34] 鲍超, 超高亮度 LED 测量问题, 液晶与显示, 第 18 卷第 4 期, 2003 年 8 月

[35] 薛才之,照明用 LED 光学性能检测原理和方法,深圳特区科技,2005 年 11 期

[36] 方志烈,半导体发光材料和器件,复旦大学出版社



# 硕士在读期间发表论文

郑晓东,李明: LED 空间发光特性的研究,浙江大学学报(已投稿) 夏若彬,李明,郑晓东:利用小波法去除 CCD 光谱测量噪声,光电子·激光(已 投稿)



## 致 谢

我非常荣幸地师从于郑晓东副教授,从事本项研究工作。导师对科学的执着 追求及其创新精神,永远是我学习的榜样。导师的严谨治学态度和一丝不苟的工 作精神,深深地影响了我,将使我终生受益。

感谢我的导师郑晓东副教授和刘向东教授给予我的悉心指导和帮助,从课题 的选题到论文的撰写,每一步都倾注了导师的心血。在将近两年的科研和学习中, 导师不仅培养锻炼了我的学习和工作能力,还指导我养成一种严谨踏实的学习、 工作作风。此外导师还在生活上给予我无私的帮助和热情的鼓励,在此我向郑老 师和刘老师表示最衷心的感谢。

特别感谢闻春敖老师和毛小兰老师在实验方面给我的帮助和建议。

还要感谢各位参与评审本论文的老师,你们的意见和建议是十分宝贵的。

感谢实验室的刘立明硕士、夏若彬硕士、黄健硕士以及已毕业的金新华硕士、 王帅硕士、汪扬春硕士在日常工作和生活中对我的支持和帮助,他们在工作中所 表现的才智和勤勉给我留下了非常深刻的印象。

深深地感谢我的父母和亲人在我多年来的求学之路上给予的无私关爱和奉献。父母的爱是我这么多年来坚持的精神支柱,他们的关心和鼓励将始终伴随着 我向人生的更高目标奋进。

