

# 《普通照明 LED 与蓝光》 白皮书

国际半导体照明联盟 (ISA)

国家半导体照明工程研发及产业联盟 (CSA)

中国照明学会 (CIES)

二〇一三年七月

# 《普通照明 LED 与蓝光》白皮书

编写专家组（按姓氏笔画为序）

牟同升

孙延萌

刘剑平

李志君

张善端

邵嘉平

陈 聪

周太明

林燕丹

要 华

俞安琪

遆亚林

曾勇勤

潘建根

# 目 录

前 言	3
第一章 半导体照明是照明领域的一场革命	6
第二章 光源中的蓝光	
2.1 光源的光谱	9
2.2 不同颜色的光对人体的效应	12
2.3 光源蓝光安全的理论分析	16
第三章 蓝光的评估与测试	
3.1 目前国内外标准与测试方法	20
3.2 国内外测试结果	24
3.3 本章结论	31
第四章 光源和照明系统的正确设计及应用	
4.1 正确应用光源和照明系统	32
4.2 照明产品的光生物安全性要求	33
4.3 照明产品的全面质量要求	34
4.4 本章结论	37
第五章 总结	38
参考文献	40

## 前言

半导体照明是继白炽灯、荧光灯和高强度放电（HID）灯之后照明光源的又一次革命。现在普通照明用的白光 LED 的光效已超过传统光源，其灯具效率也明显高于传统灯具。白光 LED 性能稳定，寿命绵长，光品质不断提高。白光 LED 既容易实现调光，又能改变色温，因而可以提供低碳舒适的最佳照明，是改善民生、实现可持续发展的重要途径，既是实现“中国梦”的助推器，也是“中国梦”的组成部分。发展半导体照明是转变经济发展方式、培育新的经济增长点最现实的选择之一，已被列入国家战略性新兴产业。半导体照明作为战略性技术，是第三代半导体材料与应用产业化的第一个突破口，将开启微电子和光电子携手并进的时代，并将促进电力电子、新能源汽车、光伏、可见光通讯等产业的发展，在提高下一代信息技术的核心竞争力方面具有巨大潜力。

半导体照明产业和应用方兴未艾，正以极快的速度发展。在此背景下，国际半导体照明联盟（ISA）和国家半导体照明工程研发及产业联盟（CSA）联合中国照明学会组织照明界的专家、学者编制《普通照明 LED 与蓝光》白皮书，其意义在于：

一是回应社会需求。半导体照明在中国经过十年发展，已处于千家万户所接受的前夜。当业内人士对 LED 早已耳熟能详时，大部分民众，包括众多媒体，对 LED 了解还不够。特别是当这种产品即将进入我们的日常生活，要替代我们已经多年习惯的产品或使用方法时，会产生很多议论和疑问。比如：与传统光源相比，LED 照明的光生物安全性如何，是不是有蓝光危害，对人的视觉的影响如何等等。而对这

些议论和疑问予以科学的回应，是一个行业组织的职责所在，也是一种社会责任。

二是综合国内外最新研究成果，对相关问题给出一个明晰的结论。科学界对光生物安全的研究已超过半个世纪，不管哪种光源出现，这都是个永恒的研究主题。古人云“生有涯而知无涯”。如果对这个“知无涯”增加一个时间轴，在一个相对明确的时间段里，我们对事物的理解和含义还是应该有一个较为清晰的定义和结论。因此，本白皮书将基于现有的国际、国内的科学研究、测量理论和检测方法，对白光 LED 与蓝光的关系进行阐述。

三是防止以讹传讹。防止以讹传讹的最好方法就是信息公开，而且是尽早公开，并且在最大的范围内公开。让公众知道 LED 的原理、技术和产品的科学依据和内容，对其使用的 LED 产品买的放心，用的安心。

以下几点需要向读者说明：

—本白皮书所指的 LED 是指普通照明白光 LED。普通照明（General Lighting）是指为人们的日常生活和工作场所提供的照明。LED 包括了单色 LED 和白光 LED。单色 LED 一般不用于普通照明，因此不在此处所讨论的蓝光影响的范围之内，只有白光 LED 才与之有关。现在人们在日常生活中接触最多、用量最大的白光 LED 的原理是基于蓝光 LED 芯片激发黄色荧光粉转化后形成白光。

—本白皮书的主要受众是普通大众、媒体、相关政府部门、与 LED 有关的制造、设计、应用、咨询、投资、信息等部门。鉴于白皮书的性质，本文未从学术上进行深入的论述。但结论均有出处，并予以一一注明。

—本白皮书所指的人群是指按传统的光生物安全研究所定义的普通人群。

—本白皮书的研究结合了国内外在该领域的现有相关成果和评估规则。

—本白皮书是就白光 LED 与现有的其他普通照明光源相比较。

—本白皮书所说的 LED 照明产品是指经过国家权威检验机构检测，符合国家相关标准和规定的照明产品。

本白皮书引用了中国、其他国家、地区和国际相关组织、研究机构、大学及个人的学术结论或研究成果，我们在此向他们表示衷心感谢。

编写白皮书是一项公益性的活动，参加编写的专家、学者均为义务工作。他们以深厚的专业知识、严谨的工作作风、高度负责的态度和勇于奉献的精神体现了半导体照明界一流专家的水平、效率和风貌。我们谨向他们表示崇高的敬意。

我们希望本白皮书的发布能对广大民众起到答疑解惑的作用，能对推动中国乃至全球半导体照明产业的发展及其应用产生一定的作用。

国际半导体照明联盟（ISA）

国家半导体照明工程研发及产业联盟（CSA）

中国照明学会（CIES）

二〇一三年七月

# 第一章 半导体照明是照明领域的一场革命

自上世纪 90 年代初期高亮度蓝光 LED 面世以来，基于宽禁带氮化镓/氮化镓（InGaN/GaN）材料的蓝光 LED 芯片和黄色荧光粉（以 YAG 荧光粉为代表）组合发出白光方式的半导体照明技术在世界范围内得到了广泛关注和快速发展。

迄今为止，商品化白光 LED 封装器件的光效已经超过 150–160 lm/W（额定注入电流密度约 35 A/cm<sup>2</sup>），而实验室研发已经达到 276 lm/W（约 4000 K 色温，陶瓷基板加硅胶透镜封装），远高于传统白炽灯或卤钨灯（15 lm/W）和荧光灯或气体放电灯（100–120 lm/W）的水平。其显色指数应不同需求可达 80, 90 和 95 以上，可实现高逼真、高还原、人眼舒适型的照明效果。而除了显著的节能效益外，半导体照明全数字化、易控制、可调光等特性更有利于发展健康新型的、可满足人们未来更多及更高品质需求的照明光源、灯具及其相关控制产品。

从市场层面看，LED 已经广泛应用于全彩高分辨显示屏、液晶背光源、信号指示灯、室内外普通照明（如道路和隧道照明、移动式照明、筒射灯、导轨灯）等领域，并已经开始向汽车大灯、舞台灯光、植物生长灯、防爆灯具、生物医疗仪器等特种照明领域渗透，未来有望全面替换各类传统光源，而新型半导体照明光源与灯具产品的智能化控制及系统化集成在未来智能建筑（如酒店、商场、办公室等场

合) 和智能家居等方面也必将有更广阔的发展空间, 会引领照明领域的一场革命。

图 1.1 及图 1.2 为目前全球 LED 半导体照明产业发展总体光效 (lm/W) 及性价比 (\$/klm) 的现状与前景示意图<sup>[1]</sup>:

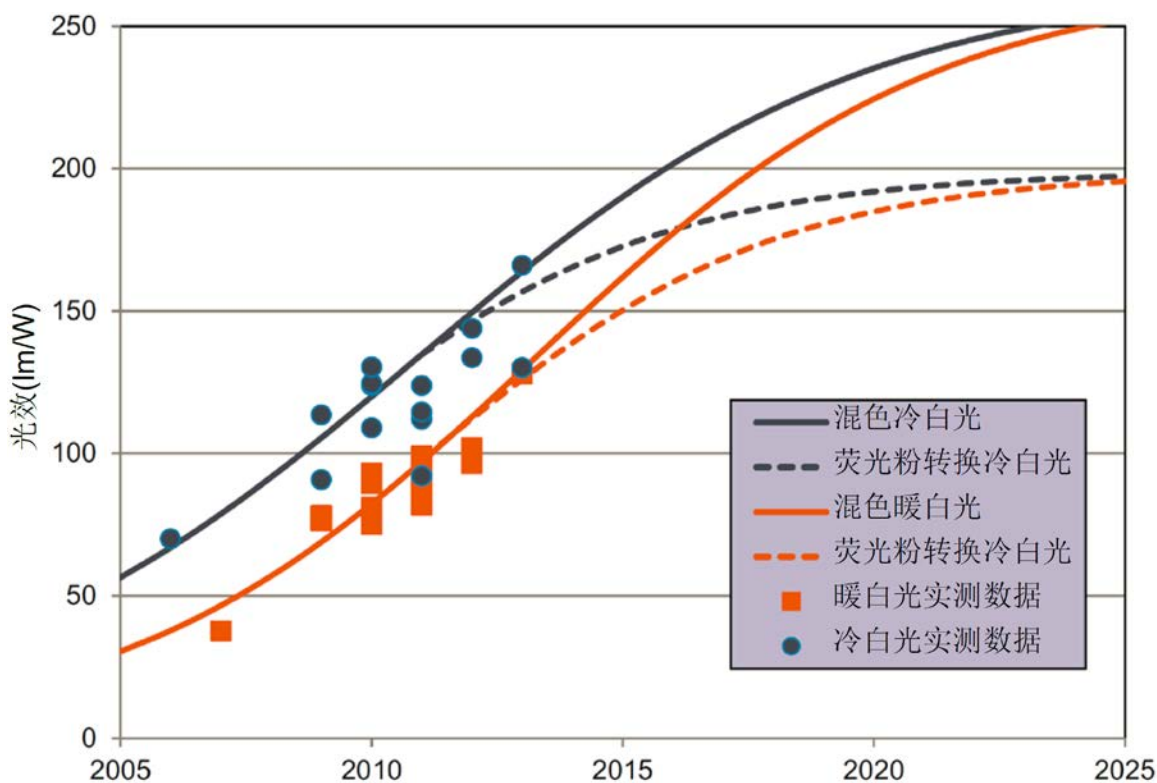


图 1.1 白光 LED 封装器件光效现状及前景示意图<sup>[1]</sup>(以 1 mm × 1 mm 芯片, 35 A/cm<sup>2</sup> 注入电流密度为例)



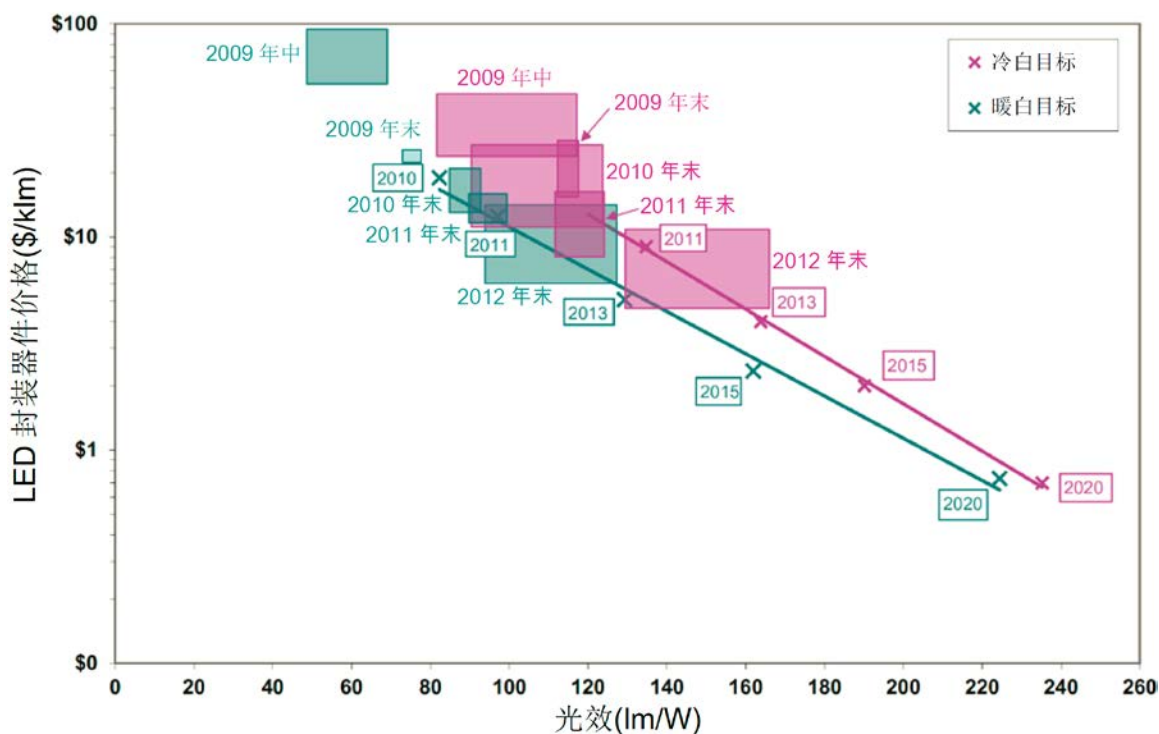


图 1.2 LED 封装器件性价比现状及前景示意图<sup>[1]</sup> (以芯片注入电流密度  $35 \text{ A/cm}^2$ , 千流明美元成本  $\$/\text{klm}$  为例)

半导体照明光源与灯具的系统光效、可靠性、寿命等技术指标的提  
升，需要在 LED 材料、外延、芯片、封装和应用各环节取得不断进  
步，而光色品质（如显色指数、色品容差、光色一致性等方面）的持  
续改善，也是光生物效应研究、光生物健康照明等领域的核心课题之  
一。针对社会上有人质疑 LED 蓝光危害及一些认识误区，本文探讨的  
主题——“普通照明 LED 与蓝光”旨在抛砖引玉，明辨有关概念，以期  
向人们传递对有关问题的正确认识。

## 第二章 光源中的蓝光

### 2.1 光源的光谱

可见光的波长范围是 380–780 nm。按照波长从长至短，眼睛可区分七种颜色：红色、橙色、黄色、绿色、青色、蓝色和紫色。各种颜色对应的大致波长范围如图 2.1 所示<sup>[2]</sup>，其中 435–500 nm 对应蓝色和青色，但一般将 400–500 nm 波段统称为蓝光区。

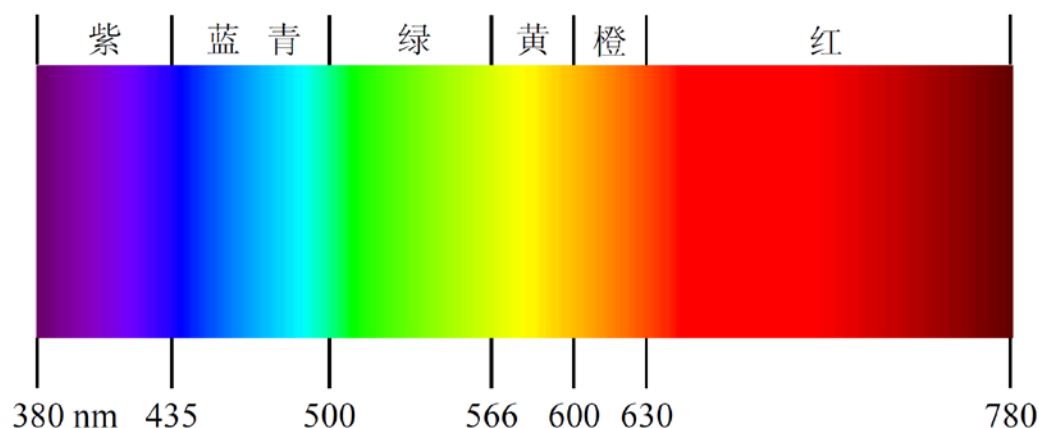


图 2.1 可见光的颜色和波长

照明光源主要分为 2 大类：自然光 and 人造光源。自然光包括太阳直射光和天空散射光，是人类出现几百万年来最主要的光源。评价人造光源的特性均以自然光为基础。普通照明中使用的人造光源均为白光，主要分三种：(1) 热辐射光源，包括白炽灯和卤钨灯；(2) 气体放电光源，包括荧光灯(分直管荧光灯和紧凑型荧光灯，后者俗称节能灯)和高强度气体放电灯(主要是金卤灯和高压钠灯)；(3) 半导体光源，包括 LED 和 OLED。

各种光源都有自己的特征光谱，即绝对或相对辐射量随波长的变化。在不同色温下，光源呈现不同的光谱功率分布，如图 2.2–2.5 所

示。除太阳光谱采用 6000 K 黑体近似外，其余光源的光谱均为代表性产品的实验测量值。

图 2.2 所示的热辐射光源的光谱很平滑，没有突变，这称为连续谱。热辐射光源可以是高温高密度等离子体，如太阳等恒星；或高温固体，如白炽灯和卤钨灯。它们的光谱与温度和光谱发射系数有关，温度升高时峰值波长向蓝光移动。当温度为 2900 K 时(白炽灯、卤钨灯的温度)，峰值波长为 1000 nm；当温度为 6000 K 时(太阳表面温度)，峰值波长为 483 nm，正好位于蓝光波长区。

图 2.3 所示为三基色荧光灯的光谱，是在荧光粉的窄带谱本底上迭加了汞原子 405, 436, 546 nm 线光谱。低色温时蓝色荧光粉的辐射很少，而高色温时蓝粉的连续谱明显增强。

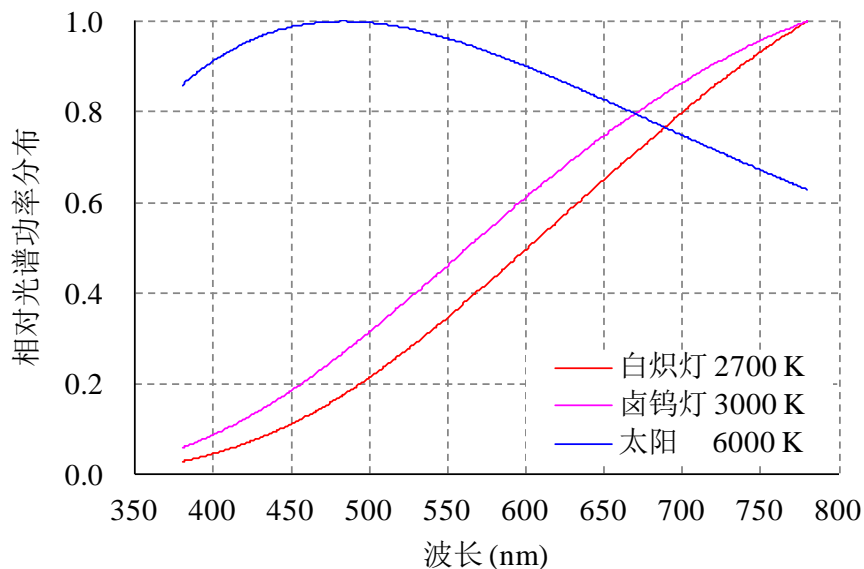


图 2.2 热辐射光源光谱

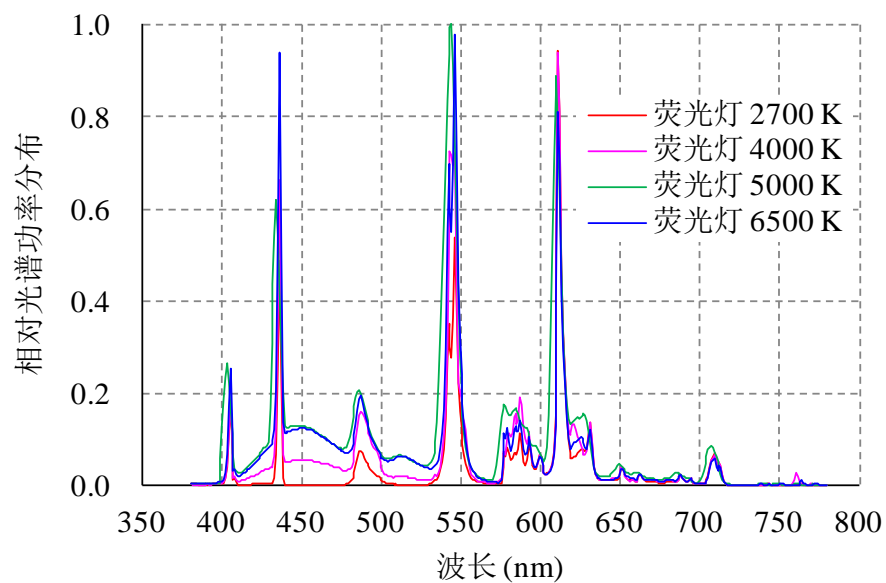


图 2.3 荧光灯光谱

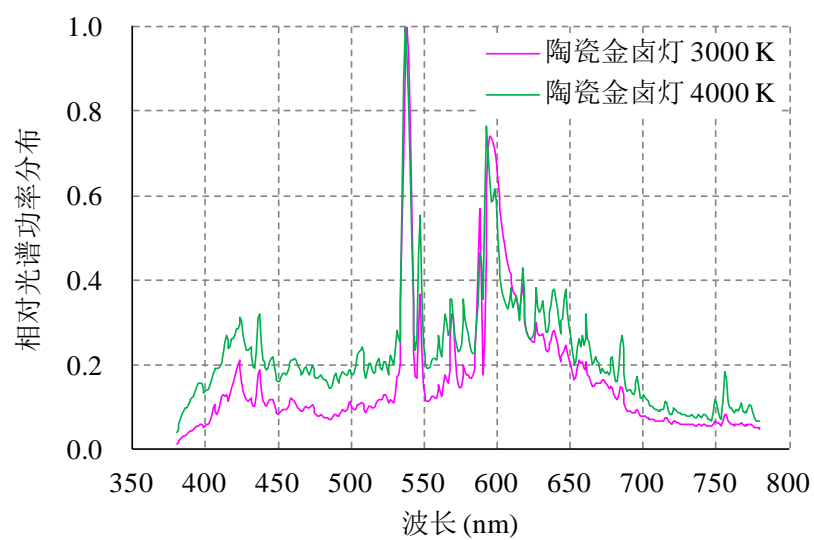


图 2.4 陶瓷金卤灯光谱

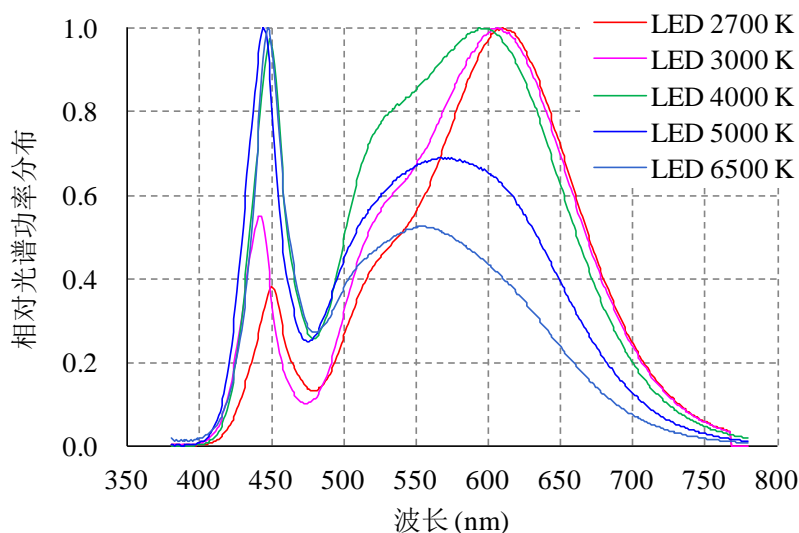


图 2.5 LED 光谱

图 2.4 为陶瓷金卤灯的光谱，其特征是在温度约 5000 K 的电弧连续辐射的本底上，迭加了放宽的铊(535 nm)和钠(589 nm)原子线光谱，以及稀土原子(如镝、钬、铥等)的密集线光谱。当色温提高时，蓝光波段的辐射增强。

图 2.5 为采用 LED 蓝光激发黄色荧光粉转换成的白光 LED 的光谱，其绿光部分较弱，蓝光和黄光部分强。芯片蓝光的峰值波长在 440–460 nm，半宽度约 25 nm；随色温从低到高，荧光粉黄光的峰值波长在 610–550 nm 之间变化。色温升高时，LED 光谱的蓝光比例增加，但与荧光灯光谱的蓝光相比并无特别之处。

## 2.2 不同颜色的光对人体的效应

### (1) 形成颜色视觉

可见光波段的电磁波穿过眼睛的角膜，由晶状体成像在视网膜上，经感光细胞转化为生理信号，视神经接收后产生视觉，如图 2.6 所示<sup>[3]</sup>。视觉细胞分为两类：第一类是锥状细胞，感知红、绿、蓝三种光的颜色；第二类是杆状细胞，感知光的强度。不同波长的可见光引起

人眼视觉响应的灵敏度可以用光谱光效率函数  $V(\lambda)$  来表示，其峰值为 555 nm 的绿光。各种颜色的光对人类认知外部世界是必须的。在白光中蓝光必不可少，因为缺少了蓝光，就无法真实地反映物体的颜色。

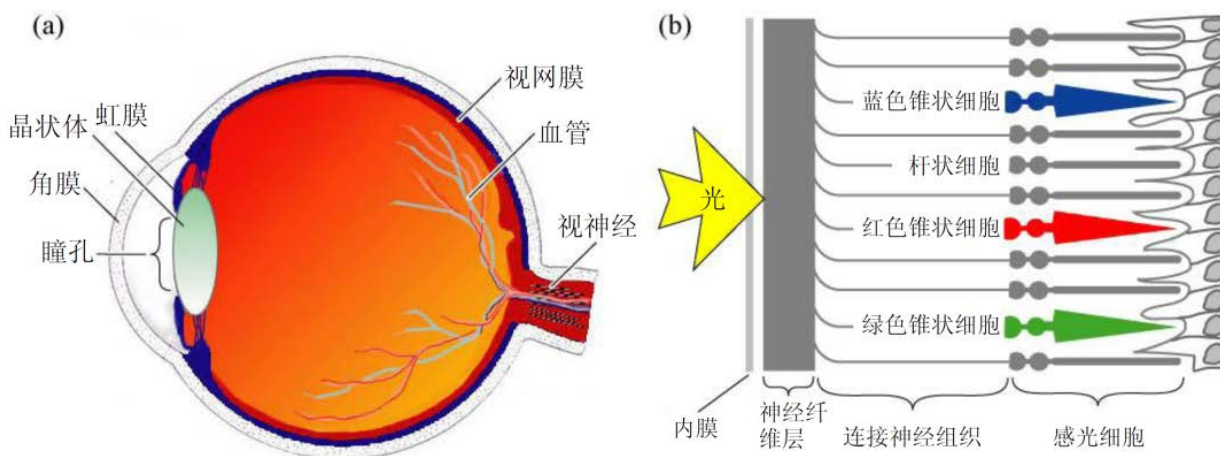


图 2.6 (a) 眼睛截面图 (b) 视网膜示意图, 包括锥状和杆状感光细胞

[3]

## (2) 调节人体生理节律

可见光除了刺激视觉形成外，还有第二类作用：调节人体的生理节律、警觉度和代谢过程，保持人体健康。可见光中的蓝光成分在这一作用中的影响尤其明显。其作用机制是通过抑制松果体分泌褪黑激素、刺激肾上腺分泌皮质激素(可的松)等，起到改变生理节律、调节人体生物钟的作用，这称为非视觉生物效应。2002 年，美国《科学》杂志同期发表 2 篇研究论文，报道 Berson 和 Hattar 等人的研究成果，揭示了人体非视觉生物效应的生理基础<sup>[4, 5]</sup>。Berson 等人发现，哺乳动物视网膜上除了锥状细胞和杆状细胞外，还有第三类感光细胞：视网膜特化感光神经节细胞(ipRGC)<sup>[4]</sup>。非视觉生物效应函数  $C(\lambda)$  的峰值波长为 464 nm, 位于蓝光区域。为了调节人体的生理节律，蓝光是必不可少的。

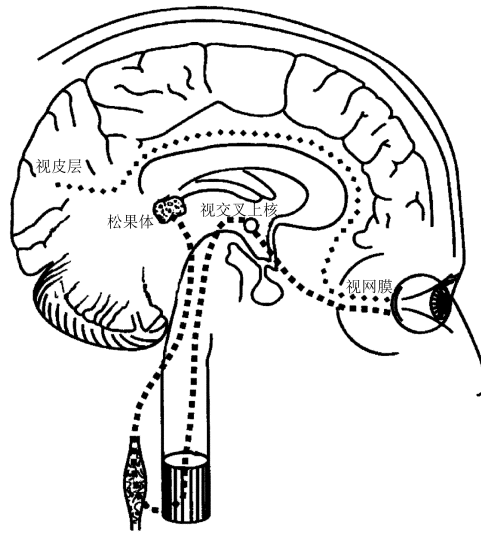


图 2.7 视觉和生物神经传导通路<sup>[6]</sup>

图 2.7 为视觉和生物神经传导通路示意图，包括眼睛视网膜的锥状和杆状细胞与视皮质的神经连接(细点线)，以及视网膜的特化感光神经节细胞与视交叉上核(SCN)和松果体的神经连接(粗点线)。

在自然环境中，室外的日光可以满足同步调节人体生理节律(或称为生物钟)的功能，这是人类几百万年进化的结果。然而，在当今社会中，由于人们有越来越多的时间在室内度过(如办公室、学校、消费场所等)，可能导致所接收的蓝光照射远少于室外活动所接收的剂量。蓝光和冷白光源可用于建立合适的光环境，帮助人们获得每日所需的蓝光剂量，以保证其生理节律与自然的昼夜节律相协调。

### (3) 蓝光对视网膜的危害

蓝光危害是指光源的 400–500 nm 蓝光波段如果亮度过高，眼睛长时间直视光源后可能引起视网膜的光化学损伤。这种损伤主要分为两类：蓝光直接与视觉感光细胞中的视觉色素反应所产生的损伤，以及蓝光与视网膜色素上皮细胞中的脂褐素反应所引发的损伤。这些光化学反应都会产生大量具有细胞毒性的自由基，破坏细胞正常生长。



蓝光危害程度取决于人眼在灯光下所累积接收的蓝光剂量。针对蓝光对视网膜的伤害，国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)基于各种实验结果，总结定义出针对不同条件下的曝辐限值的具体值。该值被所有国际照明标准所采用。无论如何，日常使用的各种光源都需要保证其对用户的安全性。通过制订国际和国家安全标准，照明厂商按照标准的规定来制造灯具，可以保证光源和灯具的蓝光安全。

蓝光危害的峰值波长为 437 nm。国内外经过多年研究和评估，已制订了光生物安全标准，规定了蓝光危害的加权函数  $B(\lambda)$ 、蓝光加权辐亮度和辐照度的阈值<sup>[7, 8]</sup>。这对企业规范生产，对人们安全、合理地使用光源和灯具起到指导作用。

光谱光效率函数  $V(\lambda)$ 、蓝光危害的加权函数  $B(\lambda)$ 和非视觉生物效应函数  $C(\lambda)$ 随波长的变化如图 2.8 所示。

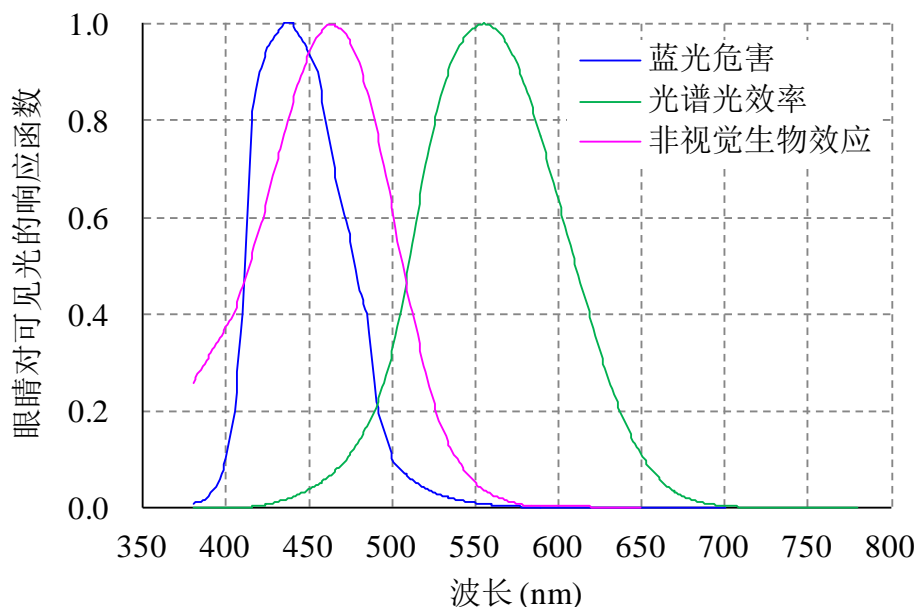


图 2.8 眼睛对可见光的响应函数<sup>[2, 7-10]</sup>

简而言之，蓝光的正面效应包括形成蓝色视觉、抑制褪黑激素分泌、刺激可的松分泌等；负面效应是若设计和使用不当造成亮度过高



则对视网膜会有蓝光危害，可以通过控制光源的亮度、减少眩光等方法来解决。目前以 LED 为代表的新光源产品可以根据人体生理节律的需要动态调节光谱，在普通照明应用中具有独特的优势。

LED 易调节光谱的特点，还可用于光治疗<sup>[11]</sup>，在哺乳动物<sup>[12]</sup>、家禽<sup>[13]</sup>和鱼类<sup>[14]</sup>的养殖中也适用。

### 2.3 光源蓝光安全的理论分析

根据标准，光源的蓝光必须达到一定的剂量才会对视网膜产生危害。光源不同波长的光谱辐亮度与蓝光危害加权函数  $B(\lambda)$  相乘，然后对波长积分，可得蓝光加权辐亮度  $L_B$ 。当眼睛注视光源的时间  $t \leq 10^4$  s,  $L_B$  与时间的乘积不应该超过  $10^6 \text{ J m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$ ，这用于评估蓝光加权辐亮度很大的光源对于人眼视网膜的短时间照射所引起的伤害。当眼睛长时间注视光源( $t > 10^4$  s), 限制  $L_B \leq 100 \text{ W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$ ，用于评估蓝光加权辐亮度较小的光源由于长时间照射所引起的视网膜伤害。

蓝光问题实质是辐亮度、蓝光加权函数和时间的共同作用。只有光源的辐亮度高、蓝光成分丰富、作用时间长，才会引起蓝光危害。太阳是离我们最近的具有极高辐亮度的自然光源，由于其辐亮度高达  $2 \times 10^7 \text{ W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$  (亮度为  $1.6 \text{ Gcd m}^{-2}$ )，蓝光加权辐亮度为  $2.1 \times 10^6 \text{ W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$ ，只要注视时间超过 0.5 s 就可能引起蓝光危害。当然，人们在看到强光时会自我保护，视线会很快离开强光源。

对于辐亮度较太阳低 2–3 个量级的光源，如金卤灯、卤钨灯、白炽灯和 LED 封装器件，长时间注视后会产生危害。以钨丝温度 2700 K 的白炽灯为例，其蓝光加权辐亮度为  $1.3 \times 10^3 \text{ W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$ ，注视时间超过 770 s 后会产生蓝光危害。室外 LED 灯具有防眩光措施，室内 LED 灯具一般通过扩散板出光，亮度已降低到荧光灯的水平，不会产生蓝光

危害。

为比较不同光源发出的光中蓝光波段的比例，可以定义蓝光含量(或特定蓝光辐射功率)，它等于千流明光通量中的蓝光加权辐射功率，单位  $\text{W klm}^{-1}$ 。利用图 2.2–2.5 的光谱，可以计算出热辐射光源(白炽灯、卤钨灯和以 6000 K 黑体近似的太阳)、荧光灯、陶瓷金卤灯和 LED 在各种色温下的蓝光含量，如图 2.9 所示。可见各种光源在同色温时的蓝光含量相差不大，在色温 3000 K 时  $<0.4 \text{ W klm}^{-1}$ ，在 6000 K 时  $<1.0 \text{ W klm}^{-1}$ 。

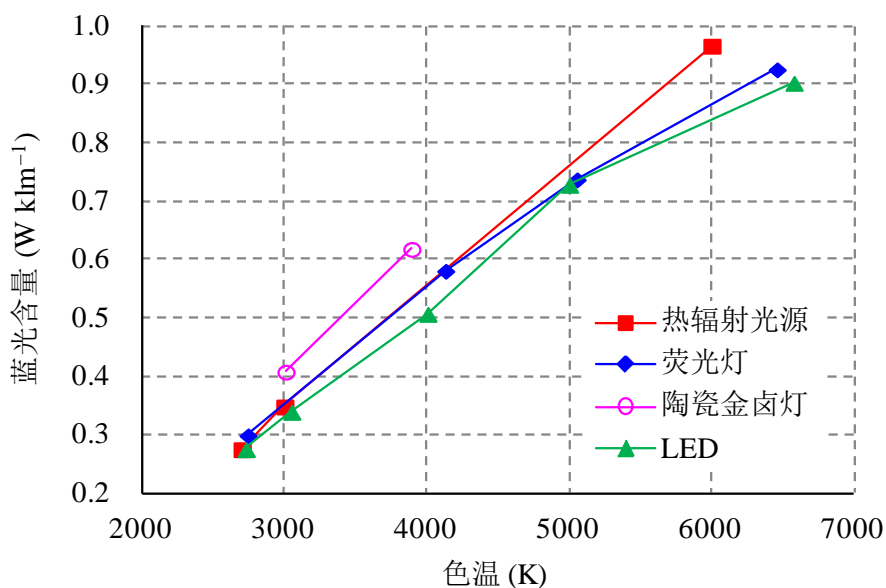


图 2.9 各种光源在不同色温下的蓝光剂量

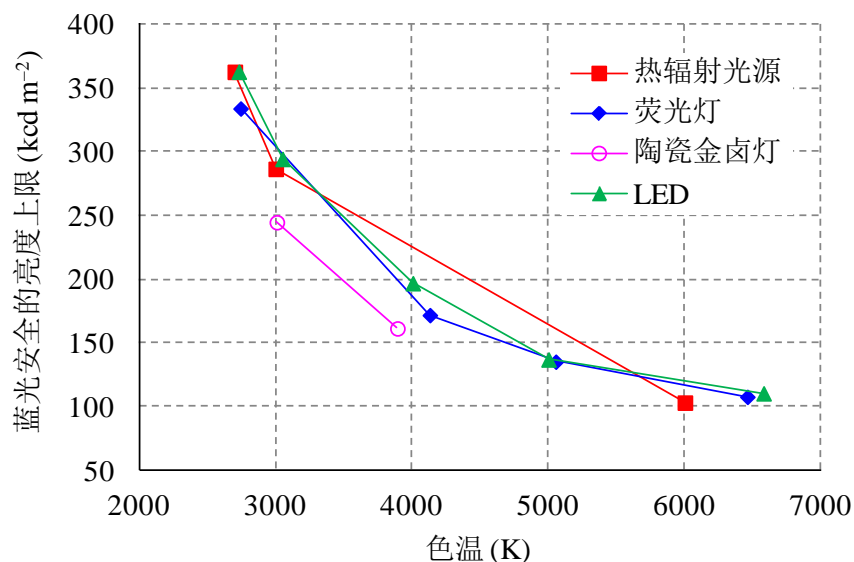


图 2.10 蓝光安全亮度上限

由于辐亮度为辐射量，一般人不易理解。由光源的光谱计算出亮度和蓝光加权辐亮度的比值<sup>[15]</sup>，再根据蓝光加权辐亮度的限制值( $100 \text{ W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$ )，可以算得蓝光安全的亮度上限，这更易于从另一个角度理解蓝光危害。图 2.10 为热辐射光源、荧光灯、陶瓷金卤灯和 LED 在不同色温下的蓝光安全亮度上限。

图 2.10 表明，色温相同时，LED 的蓝光安全亮度上限跟荧光灯差不多：在色温 2700 K 时为  $360 \text{ kcd m}^{-2}$ ，在色温 6500 K 时为  $110 \text{ kcd m}^{-2}$ 。这说明只要光源和灯具的表面亮度  $< 100 \text{ kcd m}^{-2}$ ，那它对眼睛就是“绝对”安全的，即使一直盯着看也没有问题。由于室内使用的 LED 一般都带有扩散罩或扩散板，亮度  $< 100 \text{ kcd m}^{-2}$ ，所以其不存在蓝光危害问题。

虽然人们对 LED 光谱中的蓝光的负面作用有特别的顾虑，尤其是蓝光危害，但我们也不能忽视蓝光在调整人体生理节律、警觉度和代谢过程中的重要作用。在普通照明应用的光谱范围内，高色温或冷白

的 LED 光源可用于营造与自然的昼夜节律相协调的光环境，保持人们生理状态的健康。

在普通照明应用中，LED 的蓝光危害与其他光源相比没有区别，并不比其他光源危险。对于色温在 6500K 以下的室内照明应用，应该控制眩光，建议把光源的亮度控制在  $100\text{kcdm}^{-2}$  以下。

## 第三章 蓝光的评估与测试

### 3.1 目前国内外标准与测试方法

#### 3.1.1 国内外标准

当前，蓝光成分导致的光化学伤害可以通过一些国际标准进行评价。在欧洲和其他采用国际电工技术委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）标准的国家规定使用 IEC/EN 62471 系列标准<sup>[8, 16]</sup>进行光生物安全评估。在美国则规定使用 ANSI/IESNA RP27 系列标准<sup>[17, 18]</sup>。在中国，国标 GB/T 20145<sup>[7]</sup>主要采纳了国际照明学会标准 CIE S009:2002 的相关内容，具有与 IEC 62471 相同的基本要求。这些标准可能会因为不同的国家或地域而在名称上有差异，但都是基于同样已经被认可的科学研究结果，并在主要内容上基本相同。所有标准所采用的曝辐限值的具体值都来自于国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)<sup>[19]</sup>的导则。

#### 3.1.2 蓝光危害的测试计算方法

上述各国内外标准针对于蓝光危害的测试的条件定义及方法是一致的，现总结如下<sup>[7, 8, 17]</sup>。

人在灯和灯系统附近所受到的辐射不应超过所定义条件下的曝辐限值。光生物安全标准中的曝辐限值适用于辐射持续时间在 0.01 ms 至 8 h 之间的连续照射源。在宽波段可见光或短波红外光(IR-A)辐射下，眼睛所允许曝辐限值以在观察者眼睛位置所测得的光源的光谱辐亮度  $L_d$  和总辐照度  $E$  为基础。通常来说，当光源亮度小于  $10 \text{ kcd m}^{-2}$ ，则不会超出曝辐限值。

进入眼睛被视网膜吸收的辐射正比于瞳孔的面积。在针对蓝光危害的曝辐限值计算中，由于亮度较高（ $>10 \text{ cd m}^{-2}$ ）且持续时间大于 0.25 s，通常采用 3 mm 的瞳孔直径（面积为  $7 \text{ mm}^2$ ）。

同时，视网膜受辐照面积也影响曝辐限值计算。该面积可以和表观光源的对边角  $\alpha$  联系起来。由于眼睛的生理局限，在静止的眼睛的视网膜上可以成像的图像最小弧度值为  $\alpha_{\min}=0.0017 \text{ rad}$ ，甚至对点光源也是如此。当时间大于 0.25 s，由于人眼的快速眼动功能使光源像模糊，所形成的角度被定义为有效对边角  $\alpha_{\text{eff}}$ 。当辐射时间大于 100 s 时，由于作业任务导致的眼睛运动时使小光源在视网膜上成像区域进一步增大。因此对于测量蓝光危害的曝辐限值相对应的辐亮度，在时间短于 100 s 时，采用  $\alpha_{\text{eff}}=0.011 \text{ rad}$ ；当时间大于 10000 s 时，采用  $\alpha_{\text{eff}}=0.1 \text{ rad}$ 。在 100–10000 s 之间，可大致采用  $\alpha_{\text{eff}}=0.011\sqrt{t/100}$ 。

为了防止长期受到蓝光辐射而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  $B(\lambda)$  加权积分后的能量，即蓝光加权辐亮度  $L_B$  不应该超过下面公式所计算得出的曝辐限值：

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t L_{\lambda}(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta t \cdot \Delta \lambda \leq 10^6 \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}) \quad (t \leq 10^4 \text{ s}), \quad (1)$$

$$L_B = \sum_{300}^{700} L_{\lambda} \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \leq 100 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}) \quad (t > 10^4 \text{ s}), \quad (2)$$

式中  $L_{\lambda}(\lambda, t)$  为光谱辐亮度 ( $\text{W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ )， $L_B$  为蓝光加权辐亮度 ( $\text{W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$ )， $B(\lambda)$  为蓝光危害加权函数， $\Delta \lambda$  为波长带宽 (nm)， $t$  为辐射持续时间 (s)。蓝光加权函数  $B(\lambda)$  在各标准中皆有提供。

当  $L_B$  超过  $100 \text{ W m}^{-2} \text{ Sr}^{-1}$ ，最大允许照射时间  $t_{\max}$  可以计算如下：

$$t_{\max} = \frac{10^6}{L_B} (\text{s}) \quad (t \leq 10^4 \text{ s}). \quad (3)$$

对于对边角小于 0.011 rad 的小光源，可通过推导产生一个基于光谱辐照度的视网膜蓝光危害曝辐限值，公式为

$$E_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t E_\lambda(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t \leq 100 \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (t \leq 100 \text{ s}), \quad (4)$$

$$E_B = \sum_{300}^{700} E_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \leq 1 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (t > 100 \text{ s}), \quad (5)$$

式中  $E_\lambda(\lambda, t)$  为光谱辐照度 ( $\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ )， $E_B$  为蓝光加权辐照度 ( $\text{W m}^{-2}$ )。

当  $E_B$  超过  $0.01 \text{ W m}^{-2}$  的光源，最大允许照射时间  $t_{\max}$  可以计算如下：

$$t_{\max} = \frac{100}{E_B} (\text{s}) \quad (t \leq 100 \text{ s}). \quad (6)$$

以上给出了蓝光危害的测试计算方法，具体的测量设置都已在相应标准中详细描述，读者可在需要的时候查找相应内容。

### 3.1.3 灯分类

灯辐射产生的危险可以划分为不同等级。取决于被测光源的应用，以下两种测量准则之一会被用于危害水平的测量<sup>[8, 20]</sup>：

- 1) 500 lx 照度准则：该准则在距光源所提供照度为 500 lx 的距离进行光生物安全的测量。适用于以普通照明为目的光源（包括应用于办公室、学校、家庭、工厂、道路及汽车照明的光源）。
- 2) 200 mm 距离准则：该准则在距光源固定 200 mm 处进行光生物安全的测量。适用于普通照明之外的其他光源（例如应用于胶片投影、复印过程、皮肤日晒、工业处理、医疗及探照等专业照明领域的光源）。

通过正确使用两种方法之一进行测量，一个被测光源将会被划分到相应的危险等级。该等级表明此光源是否具有潜在的光照风险并对具有危险的产品提出用于提醒用户的标识要求。

针对连续光源或灯具的蓝光危害，其危险等级分类描述如下<sup>[7, 8, 18]</sup>。

- 1) 无危险类：灯在标准所定义的极限条件下也不造成任何危害。所包含的蓝光危害部分定义为在 10000 s（约 2.8 h）内不造成对视网膜蓝光危害( $L_B$ )；
- 2) 1 类危险：灯在正常行为所限制的曝光条件下不造成任何危害。对于蓝光危害部分，满足这一要求的灯，其限制量大于无危害类，但在 100 s 内不会造成视网膜蓝光危害( $L_B$ )；
- 3) 2 类危险：由于人对特别强光或不舒适的温度的本能规避反应而不会由灯造成危害，对于蓝光危害部分，满足这一要求的灯，其限制量大于 1 类危险，但在 0.25 s 内不会造成视网膜蓝光危害( $L_B$ )；
- 4) 3 类危险：灯可以在瞬间造成危害。

常用的典型消费照明产品都属于安全的无危险类或 1 类危险（正常使用条件下）。

对于产品危险等级的标识，ANSI/IESNA RP27 及 IEC/TR 62471-2 中给出类似的定义<sup>[16, 18]</sup>：

- 1) 对于所使用光源属于无危险类或 1 类危险的灯具，无须提供警告或提示。



- 2) 对于所使用光源属于 2 类危险或 3 类危险的灯具, 产品信息中必须标明该产品的危险等级并包括适当的警告或提示。

### 3.2 国内外测试结果

目前为止, 国际及国内各类质量认证机构(例如 Underwriters Laboratories (UL)、DEKRA 等)及专业照明厂商都以上述光生物安全标准为依据, 针对各种光源的蓝光辐射进行系统测评。针对蓝光安全问题, 不同国家的相关政府机构(例如法国国家食品环境及劳动卫生署(ANSES)<sup>[21, 22]</sup>, 美国国家能源部(US DOE)<sup>[23]</sup>, 中国国家电光源质量监督检验中心(上海)<sup>[24]</sup>等)及各类照明行业组织(例如欧洲灯泡制造商联盟(ELC)和欧洲灯具协会(CELMA)<sup>[25]</sup>, Lighting Europe<sup>[26]</sup>, Global Lighting Association (GLA)<sup>[20]</sup>等)也基于市场上 LED 照明产品的采样测试结果分别对 LED 照明的蓝光安全问题作出了分析总结及声明。

各方结论均显示, 常用的普通照明光源不会形成蓝光危害。当这些光源被用于照明器材或灯具中时, 这些器材或灯具通常同样不形成蓝光危害。以下分别给出国内外最新发布的具有代表性的测试结论。国内测试结论基于国家电光源质量监督检验中心(上海)的 LED 照明产品市场抽样测试<sup>[24]</sup>。经白皮书编写专家组详细的讨论, 决定引用其结果作为本白皮书的国内测试部分。国外测试结论基于欧洲灯泡制造商联盟(ELC)与欧洲灯具协会(CELMA)联合发布的 LED 照明光安全报告<sup>[25]</sup>。Global Lighting Association (GLA) 作为全球照明行业的公认权威之一, 联合了全球主要国家及地区在照明技术处于领先地位的行业组织, 讨论并采纳了 ELC-CELMA 关于 LED 照明光安全的测试内容及结论, 并于 2012 年发布了针对高效普通照明光源的光学及光生物安全白

皮书，进一步对包括 LED 在内的普通照明光源的光生物安全作出了立场声明<sup>[20]</sup>。

**3.2.1 国内测试结果：**国家电光源质量监督检验中心(上海)进行的 LED 照明产品测试<sup>[24]</sup>

国家电光源质量监督检验中心(上海)针对当前国内市场上 LED 照明产品的视网膜蓝光危害进行了采样测评研究。27 个受测样品 (包括 LED 台灯、LED 射灯、LED 筒灯、LED 灯泡和 LED 平板灯) 分别取自小的非正规商店、大型超市以及大中型生产企业的试验留样。

该测评基于国标 GB/T 20145-2006 “灯和灯系统的光生物安全性”。该标准主要采纳了国际照明学会标准 CIE S009:2002 的相关内容。国际电工委员会-实验室委员会 (IECEE CTL)的决议 DSH 0744 被作为判定依据(见 3.1.3 节)。

本次试验对产品进行了二个状态下的分析，包括：

a. 对正常使用 LED 产品进行检测及对数据进行蓝光危险分析 (27 个样品)

b. 对可能出现的异常使用状态下的 LED 产品的检测数据进行蓝光危险分析，即将灯具的前半透明扩散板拆下检测并进行蓝光危险分析 (11 个样品)

测评结果表明在正常使用状态下，所测试的 27 个样品都属于无危险或 1 类危险等级，未发现达到 2 类蓝光危险的情况，都可安全使用；在异常使用状态条件下，所测试的 11 样品大多数都在 1 类危险等级下，只有 1 个样品达到 2 类危险，如无防护措施可能对人体造成危险。对于在异常使用状态下达到 2 类危险的 1 个样品，分析发现该灯具使用的 LED 模组的单颗功率为 1 瓦，属于功率型 LED 封装，所以单

位面积内的光输出高，对这类产品应特别关注光源的蓝光危险等级，并对最终产品采取必要的结构防护措施和加贴警告标记。

表 1 列出了正常使用状态下 LED 产品的检测数据，表 2 列出了异常使用状态 LED 产品检测数据与同一产品正常使用状态下的检测数据对比。

表 1 正常使用 LED 产品的检测数据

样品	样品 编号	色温 (K)	功率 (W)	测量辐亮度值	所属危害类别限值( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ )		
					无危险	1 类危险	2 类危险
LED 台灯	1	5548	5	$1.71 \times 10^1$	●		
	2	3849	6	$1.45 \times 10^3$		●	
	3	7710	3.5	$6.20 \times 10^1$	●		
	4	5798	6	$2.36 \times 10^2$		●	
	5	6122	6	$2.18 \times 10^1$	●		
	6	8563	未标	$1.17 \times 10^3$		●	
	7	10367	未标	$4.73 \times 10^2$		●	
	8	8679	未标	$5.45 \times 10^2$		●	
LED 射灯	9	2700	11.5	$1.96 \times 10^3$		●	
	10	5000	14	$2.50 \times 10^3$		●	
	11	5700	12.5	$5.34 \times 10^3$		●	
	12	4000	16	$3.50 \times 10^3$		●	
	13	3000	12	$1.72 \times 10^3$		●	
	14	5979	未标	$1.33 \times 10^2$		●	
	15	> 100000	未标	$1.53 \times 10^3$		●	
LED 筒灯	16	2700	8	$5.03 \times 10^1$	●		
	17	3000	12	$8.31 \times 10^0$	●		
	18	3500	18	$4.88 \times 10^1$	●		
	19	4000	14	$3.12 \times 10^1$	●		
	20	4500	21.5	$3.91 \times 10^1$	●		
	21	5000	20	$8.50 \times 10^1$	●		
	22	5600	12	$2.91 \times 10^1$	●		
	23	5700	20	$3.17 \times 10^1$	●		
	24	6500	24	$4.45 \times 10^1$	●		
LED 球泡灯	25	8216	未标	$4.34 \times 10^2$		●	
LED 平板灯	26	6485	未标	$1.56 \times 10^1$	●		
	27	6890	未标	$1.26 \times 10^1$	●		
合计	-	-	-	-	14	13	0

表 2 异常使用和正常使用状态 LED 产品的检测数据对比表

样品	样品 编号	色温 (K)	功率 (W)	测量 辐亮度值 (W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )	所属危害类别限值(W·m <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup> )		
					无危险 ≤100	1 类危险 ≤1×10 <sup>4</sup>	2 类危险 ≤4×10 <sup>6</sup>
LED 台灯	3	7710	3.5	6.20×10 <sup>1</sup>	●		
		7710	3.5	6.73×10 <sup>2</sup>		●	
	4	5798	6	2.36×10 <sup>2</sup>		●	
		5798	6	1.87×10 <sup>3</sup>		●	
LED 筒灯	16	2700	8	5.03×10 <sup>1</sup>	●		
		2700	8	3.72×10 <sup>3</sup>		●	
	17	3000	12	8.31×10 <sup>0</sup>	●		
		3000	12	8.15×10 <sup>2</sup>		●	
	18	3500	18	4.88×10 <sup>1</sup>	●		
		3500	18	3.07×10 <sup>3</sup>		●	
	19	4000	14	3.12×10 <sup>1</sup>	●		
		4000	14	5.46×10 <sup>3</sup>		●	
	20	4500	21.5	3.91×10 <sup>1</sup>	●		
		4500	21.5	1.32×10 <sup>4</sup>			●
	21	5000	20	8.50×10 <sup>1</sup>	●		
		5000	20	3.14×10 <sup>3</sup>		●	
	22	5600	12	2.91×10 <sup>1</sup>	●		
		5600	12	8.82×10 <sup>2</sup>		●	
	23	5700	20	3.17×10 <sup>1</sup>	●		
		5700	20	8.84×10 <sup>2</sup>		●	
	24	6500	24	4.45×10 <sup>1</sup>	●		
		6500	24	1.17×10 <sup>3</sup>		●	

备注：阴影部分为异常使用状态（拆除前半透明扩散板）的数据

**3.2.2 国际测试结果：**欧洲灯泡制造商联盟(ELC)与欧洲灯具协会(CELMA)联合发布的白光 LED 产品光安全测试报告<sup>[25]</sup>

- 基于 500 lx 照度准则的测试

结果显示，在使用 500 lx 检测准则的条件下，所有测试的 LED 产品都未达到 2 类危险等级。法国国家食品环境及劳动卫生署于 2010 年对法国市场上的不同白光 LED 产品的调查同样表明，基于 500 lx 照度的检测准则，即使高输出的分立 LED 封装器件也都属于无危险级(0 级)或 1 类危险级(1 级)<sup>[21]</sup>。

- LED 与其他家用照明光源的光谱比较

从光生物安全的角度来衡量，LED 与以白炽灯，荧光灯为例的传统照明光源并没有本质上的差别。在同样的色温下，由典型 LED 所产生的蓝光成分并不比其他技术下的光源所产生的蓝光成分高。相对于其将替代的照明产品而言，LED 或紧凑型荧光灯具有类似的危险等级。虽然从光谱来看，LED、紧凑型荧光灯、卤钨灯及白炽灯的光谱曲线各不相同，但在类似的色温下，它们的蓝光成分却没有太大的差异，正如 2.3 节所述。并且 LED 的蓝光（或紫外）的发射远远低于日光中的发射剂量。对于所有应用于普通照明的灯，其紫外发射量都低于 IEC/EN 62471 和 IESNA RP27 标准中所定义的曝辐限值。应用于普通照明中的 LED 本身不产生任何紫外波长的光（不包括在工业及特殊应用中所用的紫外 LED 光源）。

- LED 与其他光源的蓝光辐射比较

基于在蓝光危害作用光谱曲线下所对应的光谱数据，专门针对蓝光危害的危险评估也在 LED 和其他光源中展开。

需要考虑以下两种不同的基本情况：

- 1) 观测被照亮的场景（辐照度测量）

光源照亮场景或空间而同时避免直视光源。在该情况下，辐照度即投射在表面（场景）上的辐射成为与测量相关的属性。这种情况通常被认为是安全的照明环境。例如，注视散射的蓝色天空（蓝光辐照度高，但辐亮度低）是完全安全的。由于人造光源所形成的蓝光辐照度远远小于蓝色天空，所以也同样是安全的。

为了更好的和日光的效果做比较，需要指出通常日光所提供的照度值远远高于 500 lx。图 3.1 纵观展示了一批光源在 500 lx 下的蓝光危害加权辐照度。很明显，在相似的色温下所有的光源提供了数值相近的蓝光危害加权辐照度。原因在于为了形成白光，蓝光成份所占的比例是相对固定的。

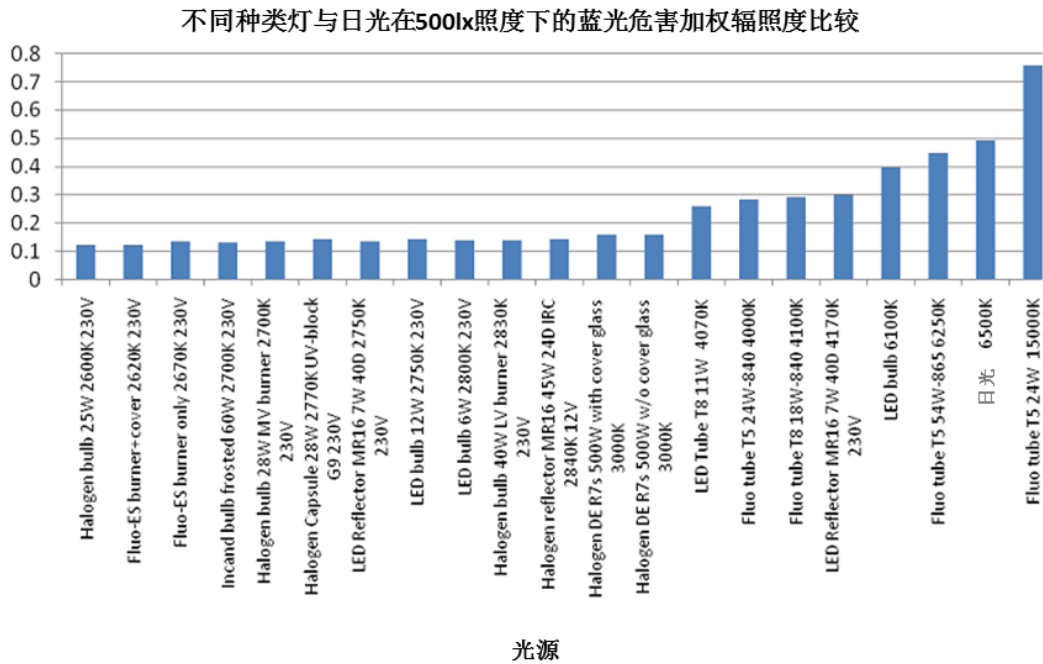


图 3.1 不同种类灯与日光在蓝光危害加权辐照度值上的比较，该数据取自对典型产品的实验室测量。<sup>[25]</sup>

## 2) 观测光源（辐亮度测量）

直视光源的情况很少，但也会发生。在这种情况下，辐亮度即投入眼睛的辐射强度成为评价蓝光危害的关键因素。该条件下，标准针对光源的尺寸和应用提供了不同的测试方法。距离光源 200 mm 进行测量被选作为最严格的测试方法。标准的蓝光危害作用曲线被用来计算各光源的蓝光危害加权辐亮度值  $L_B$ 。

对于散射的暖白光源来说，直视光源通常是安全的。然而，当直视冷白或蓝色光源、高强度亮光源以及点状亮光源时建议保持谨慎。这类光源包括白炽灯灯丝、电弧或者 LED 封装器件，甚至汽车方向灯透镜后面的 LED 芯片。这些点光源在视网膜上投射形成汇聚的光斑，当强度足够高且光谱的蓝光成分高时，会对该投射点上的视网膜造成伤害。

### • 关于蓝光危害加权辐亮度的结论

散射光源的蓝光危害加权辐亮度值是相对较低的。按 IEC 62471 定义的危险等级划分，绝大多数散射光源属于 0 级(无危险)。在超过 1 h 的最大辐照时间下，一些较高色温光源(如 4000 K 色温)有可能刚刚触及 1 级。请注意该辐照时间是指在近距离直视光源的情况下测得的。在通常的使用条件下，人眼与光源的距离远大于这里测量所使用的 200 mm, 所以是非常安全的。此外人类对明亮的光源具有本能的躲避反应，所以实际生活中不可能达到如此之长(超过 1 h)的辐照时间。

所有被测评的点状光源都落于危险等级 1 级之内。基于标准规定是安全的且无需额外的警告标志，但应该避免对这些光源的长时间的直视，尤其在较短的距离下。被测试灯的最大辐照时间为 200 s 或更长。但正如之前所提到的，人们通常在这种情况下会闭眼或转移视线

(本能逃避反应)。这对高亮度 LED 光源以及我们在普通照明中使用多年的传统高亮度光源是同样适用的。

Global Lighting Association (GLA) 成员广泛讨论并确认了上述测试结果，2012 年在针对高效普通照明光源的光学及光生物安全白皮书中发布了这些结果。在该白皮书中，GLA 进一步对包括 LED 在内的普通照明光源的光生物安全作出了立场声明：当用作拟定用途时，所有包括 LED 与节能型荧光灯在内用于普通照明的光源（灯泡或系统）和灯具，都可以被消费者安全地使用<sup>[20]</sup>。

### 3.3 本章结论

国内外的理论计算及测试结果保持一致。针对 LED 与其他光源在蓝光发射特性的测评研究表明，一般常用于普通照明的 LED 光源是无危害的。当这些光源用在照明器材或灯具中时，基于当前的光生物安全标准的定义，这些器材或灯具一般也不会具有危害。

从光生物安全的角度来衡量，LED 与白炽灯和荧光灯等传统照明光源并没有本质上的差别。在同样的色温下，由典型 LED 所产生的蓝光成分并不比其他技术下的光源所产生的蓝光成分高，并且远远低于日光中的蓝光辐射剂量<sup>[25]</sup>。

对于散射和暖白光源来说，直视光源通常是安全的。然而，当直视冷白或蓝色光源、高强度亮光源以及点状亮光源时建议保持谨慎<sup>[20]</sup>。在用户正确操作和使用的情况下，由经过认证的照明厂商按照安全标准及规定生产的 LED 灯是与其他普通照明光源同样安全的。同时，可以期待，伴随着照明技术、测量技术以及对光在健康和优质生活领域的深入理解，相关的标准及规章也将会不断地更新发展。



## 第四章 光源和照明系统的正确设计及应用

光源和照明系统的正确设计及应用是保证光质量和安全的关键。高质量的光源和照明系统能够保证使用者安全并提供舒适愉悦的用户体验。照明界和政府相关部门都对光源和照明系统的设计及应用提出了标准化的要求，并颁布执行了相应的系列标准，以保障照明产品的安全和质量。与此同时，在各方的努力下，业界对照明产品，尤其是新兴的 LED 照明产品的性能、可靠性、光生物安全等关键指标参数也逐渐达成了共识并形成规范。在实际情况下，正确地选用照明产品是保证用户安全的基本前提；严格遵循相关标准、法律及规范开展生产制造是产品质量的基本保证。

### 4.1 正确应用光源和照明系统

照明产品种类繁多，不同的产品种类往往针对一定的应用范围。根据相关的法律法规，光源和照明系统产品都必须在其包装上注明产品的重要规格参数和应用条件。对于可能给产品和用户带来严重损害的特定误操作，应当在产品的包装上有明确的警告及标示。用户在使用照明产品时，应当根据产品说明和指导，在产品规定的应用范围内进行正确使用。例如，用户应当使用符合照明产品电气参数标识的供电系统。对于标明只能应用于开放式灯具的光源，用户不得将其装入封闭式灯具使用或者在使用中对光源进行遮蔽。另外，对于户外（包括半户外）照明产品来说，应当根据实际应用情况来合理地选择具有一定防尘、防水等级的照明产品。只有对照明产品进行正确的应用，才能保证照明的质量和安全性。

对于专业照明应用领域，也有对不同应用场合下的照明设计进行规范的相关法规，如我国的国标 GB 50034《建筑设计照明标准》。该标准对照明设计需达到的照明质量、照明标准值、照明节能、照明配电及控制、照明管理与监督进行了详细的规范。并主要规定了居住、公共、工业建筑的照明标准值、照明质量和照明功率密度。在照明质量方面，该标准根据不同的应用环境给出了各关键参数的量化指标,主要包括：照度、维护系数、照度均匀性、眩光等级、光源颜色、显色性、反射比等。照明标准值依据不同应用场合进行分类。该标准针对各种场合，对应用的光源和照明系统的参考平面及高度、照度标准值（lx）、显色性（Ra）、眩光等级（UGR）给出了具体目标值。

#### 4.2 照明产品的光生物安全性要求

随着照明技术的发展，特别是 LED 白光光源的出现，照明产品的光生物安全性问题越来越为人们所关注。包括我国在内的世界上许多国家和地区都出台了明确的安全标准进行规范，如国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP）发布的光辐射相关导则，国际照明委员会（CIE）发布的 CIE S 009/E: 2002 和 IEC 出版的光生物安全标准 IEC 62471 2006 和 IEC/TR 62471-2。我国也于 2006 年出台了国标 GB/T 20145-2006《灯和灯系统的光生物安全性》标准。

以上这些标准对于各种光源和照明系统的光生物安全进行指导和规范。覆盖波长范围 200–3000 nm 的所有非相干宽带光源，对曝辐限值、参考技术和产品安全性分级进行明确规定。对照明产品而言，光辐射安全性在国外是强制要求。

以 IEC 62471 以及国标 GB/T 20145 为例，标准对照明产品的光辐射特性进行六方面危害性评估。具体包括：皮肤热危害、眼睛红外辐

射危害、视网膜热危害、视网膜蓝光光化学危害、眼睛近紫外危害和皮肤及眼睛近紫外光化学危害。对于应用于普通照明的 LED 白光光源及照明系统产品而言，主要评估视网膜蓝光光化学危害和视网膜热危害等参数。光辐射安全性与表观光源的位置大小、脉冲、辐射持续时间、有效辐照度和有效辐亮度等有关。

IEC 62471 以及 GB/T 20145 根据不同的危害性程度将产品共分为四个安全等级。不同的危害等级都对应了设计与标示的防控措施与注意事项，需要制造厂商严格遵守。但由于日常普通照明的 LED 灯具都属于 0 级或 1 级，属于安全范畴，未在此展开。但厂商需按照 IEC 62471-II 的要求严格执行（例如加遮光部件或滤光措施等）。

此外该标准要求：对于各种光源及照明系统产品，都应当进行光生物安全的测试。具体产品种类包括 LED 灯具、节能灯、白炽灯、高强度气体放电灯以及直管荧光灯，完全覆盖了普通照明产品。对于超出 0 级（无危险级）分类的产品，则生产厂商需提供包括危害等级声明以及详细使用指导的相关信息。用户应当在实际应用中严格遵循产品的安全导则使用产品，在这样的前提下，即使是具有较高安全分类等级的产品仍然能够保证使用者的安全。

### **4.3 照明产品的全面质量要求**

光源和照明系统的制造厂商应当根据产品的安全分类等级正确设计制造产品，并且在此基础之上正确地管理产品的安全标识。所谓正确设计制造产品指的是照明产品的制造厂商根据 IEC 6247-II 中光生物安全分类等级对产品的设计及制造进行严格的控制，以确保产品能够达到规范要求的安全级别。具体产品的安全设计要求是由该照明产品的类型以及使用范围来决定的。在正确设计制造产品的前提下，光源

和照明系统的制造厂商还应当对产品的安全标识进行正确的管理，包括正确标明产品所属的安全等级以及必要的警告内容等。通过以上的规范，市场上照明产品的光生物安全能够得到充分的保证。

对于照明产品。除了光生物安全性要求之外，还有包括产品其他安全要求、性能要求、可靠性要求以及环保法规要求等诸多质量要求。只有全面符合各项质量要求的照明产品，才是合格的。

符合安全要求的产品是合格光源和照明系统的基本要求之一。具有安全隐患的照明产品会对使用者的人身和环境形成重大威胁。各照明产品生产企业应当严格遵守相关法律规定，保证只有完全符合安全要求的产品才能进入市场。如与 LED 光源及照明系统安全性能相关的国家标准主要包括：GB 24906 《普通照明用 50V 以上自镇流 LED 灯安全要求》、GB 24819 《普通照明用 LED 模块安全要求》、GB 15910.14 《LED 模块用直流或交流控制电子装置的特殊要求》、GB 19651.3 《LED 模块用连接器的特殊要求》以及 GB 7000.1 《灯具一般安全要求与实验》等。综合来说，照明产品的安全性要求主要包括防火、防触电、防烫伤、互换性、失效安全以及防水防尘共六大类。另外，电磁兼容性（EMC）要求也是对光源与照明系统产品的强制要求之一。

光源和照明系统产品的关键性能指标包括：光通量、光束角和中心光强（方向性射灯）、光效、色温及一致性、显色指数和眩光等级等。光通量是照明产品的基本性能指标。该指标表示产品在正常工作情况下的总发光量，单位用流明（lm）。对于如射灯等具有方向性照明的产品，表示其性能的参数应该是基于一定光束角的中心光强值，一般用坎德拉（cd）表示。光效是衡量照明产品节能特性的重要指标，

一般采用光源发出的光通量除以光源所消耗的功率，即流明每瓦（lm/W）来表示。光效越高的照明产品，其节能特性也越为显著。在照明产品的应用中，另一项重要的性能就是色温，这关系到 LED 照明产品所显示的颜色特性，一般的灯具也都有色温的规格。在照明产品的使用中，应当根据实际应用来选择合适色温的产品。除了色温本身，同规格产品色温的一致性（即色容差）也相当重要。光源对物体本身颜色真实呈现的程度称为显色性（CRI），也就是颜色还原的逼真程度；光源的显色性是由显色指数来表示，它表示物体在光照下颜色比基准光（太阳光）照明时颜色的偏离，可以全面反映光源的颜色特性。尤其对于采用荧光粉转换光谱的照明产品，如荧光灯和白光 LED 灯等，可以采取调整不同基色荧光粉比例的方法来调整光的显色指数，并根据实际应用来选择合适显色性的照明产品。此外对于灯具产品来说，防眩光也是基本的产品性能之一。眩光的程度会直接影响到用户使用照明灯具的舒适度。

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内，完成设计功能的能力。LED 灯具作为一种新型节能的照明产品，由于目前其光源及部件的不易替换性，更由于 LED 发光器件和材料在不同工作环境条件下光通衰减的不稳定性，因而对 LED 照明产品的可靠性要求显得特别重要。LED 光源及照明系统的失效模式主要分为三大类：一是光衰，亦称光通维持率；二是失效，即整个系统无法正常工作；三是光输出颜色随着使用时间的漂移，一般以色容差 SDCM 来表示。

照明产品作为电子产品的一大类，其设计和生产应当严格遵守相关的环境保护的法律法规。与照明产品相关的环保法律法规有 RoHS 和 REACH。其主要用于规范电子电气产品的材料及工艺标准，使之更

加有利于人体健康及环境保护。合格的光源及照明系统产品应当通过 RoHS 和 REACH 认证。

#### **4.4 本章结论**

综上所述，只要产品符合安全指标要求、合理的设计、用户正确应用，LED 光源和照明系统是完全安全的。对企业来说，开发产品要严格符合各项标准要求，同时注重光学设计，关注眩光、色温、显色指数及光效等性能指标，才能确保照明产品的安全和质量。

## 第五章 总结

以上四章分别介绍了普通白光 LED 的特性及发展的现状、光源中的蓝光、国内外蓝光的评估标准与测试及其结果、光源和照明系统的正确设计及应用，并给出了相应的定论性意见。综合这些意见，可以得出如下结论：

1. 正确使用合格的普通照明白光 LED 产品，对于人眼是完全安全的。
2. 现在普通照明用的白光 LED 的光效已超过传统光源，其灯具效率也明显高于传统灯具。白光 LED 显色性良好，性能稳定，其智能照明系统既可调节亮度，又能实现从暖白光到冷白光的改变，因而可以提供低碳舒适的最佳照明。
3. 蓝光是白光的基本成分。与日光和传统光源一样，白光 LED 也含有蓝光。适量的蓝光不仅为保证光源的显色性能所必需，还能对人的生理节律有调节作用。
4. 各种光源和日光光谱计算得到的数据及国内外权威实验室的测量结果表明：白光 LED 光源的蓝光含量不高于相同色温下荧光灯和金属卤化物灯等传统光源及日光；白光 LED 光源在人眼视网膜上的蓝光辐照量与相同色温下荧光灯和金属卤化物灯等传统光源类似，属于安全照明产品(光生物安全国内外标准中的 0 类和 1 类产品)。与传统光源和日光一样，如果不当使用或使用不合格 LED 产品，导致波长为 400–500 nm 的蓝光对于视网膜的过量辐射，则可能造成伤害。

5. 为了确保 LED 照明产品的光生物安全和照明质量，LED 光源和照明系统必须符合国内外相关标准，并采用合理的光学设计，将出光面的表面亮度控制在合适的水平。在使用时，所采用的照度和色温应根据具体应用而定。



## 参考文献

- [1] U.S. Department of Energy: Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan[R]. 2012.
- [2] 周太明,周详,蔡伟新. 光源原理与设计 (第二版)[M]. 复旦大学出版社, 2006.
- [3] SCHUBERT E F, GESSMANN T, KIM J K. Light emitting diodes[M]. 2. Cambridge University Press, 2006.
- [4] BERSON D M, DUNN F A, TAKAO M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock [J]. Science, 2002, 295(5557): 1070-1073.
- [5] HATTAR S, LIAO H-W, TAKAO M, et al. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity [J]. Science, 2002, 295(5557): 1065-1070.
- [6] VAN BOMMEL W J. Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work [J]. Applied ergonomics, 2006, 37(4): 461-466.
- [7] 中华人民共和国国家标准 GB/T 20145-2006 / CIE S 009/ E:2002 灯和灯系统的光生物安全性 [S]. 中国国家标准化管理委员会/中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2006.
- [8] IEC 62471/ CIE S 009:2002 : Photobiological safety of lamps and lamp systems [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [9] BRAINARD G C, HANIFIN J P, GREESON J M, et al. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor [J]. The Journal of Neuroscience, 2001, 21(16): 6405-6412.
- [10] REA M, FIGUEIRO M, BIERMAN A, et al. Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system [J]. Lighting Research and Technology, 2012, 44(4): 386-396.
- [11] GENINA E A, BASHKATOV A N, SIMONENKO G V, et al. Low-intensity indocyanine-green laser phototherapy of acne vulgaris: pilot study [J]. Journal of biomedical optics, 2004, 9(4): 828-834.
- [12] SAUNDERS J, JARVIS J, WATHES C. Calculating luminous flux and lighting levels for domesticated mammals and birds [J]. animal, 2008, 2(06): 921-932.
- [13] PRESCOTT N, WATHES C. Spectral sensitivity of the domestic fowl (*Gallus g. domesticus*) [J]. British poultry science, 1999, 40(3): 332-339.
- [14] MATSUMOTO T, OKADA T, SAWADA Y, et al. Visual spectral sensitivity of photopic juvenile Pacific bluefin tuna (*Thunnus orientalis*) [J]. Fish physiology and biochemistry, 2012, 38(4): 911-917.

- [15] ZHENG J, LI J, MOU T. Blue light hazard evaluation based on the luminance of light sources [C]. Proceedings of the 2011 International Laser Safety Conference (ILSC 2011) Mar 14-17, San Jose CA, USA. Laser Institute of America: 250-253.
- [16] IEC 62471 -2: Photobiological safety of lamps and lamp systems – Part2: Guidance on manufacturing requirements relating to non-laser optical radiation safety[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [17] ANSI/IESNA RP-27.1-05: Photobiological Safety for Lamps and Lamp Systems-General Requirements[S]. American National Standards Institute, 2005.
- [18] ANSI/IESNA RP-27.3-07: Recommended Practice for Photobiological Safety for Lamps - Risk Group Classification and Labeling[S]. American National Standards Institute, 2007.
- [19] ICNIRP: Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0.38 to 3  $\mu\text{m}$ ) [J]. Health Physics, 1997, 73(3): 539-554.
- [20] Optical and Photobiological Safety of LED, CFLs and Other High Efficiency General Lighting Sources (White Paper)[R]. Global Lighting Association, 2012.
- [21] Effets sanitaires des systèmes d'éclairage utilisant des diodes électroluminescentes (LED)[R]. The French Agency for Food Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES), 2010.
- [22] BEHAR-COHEN F, MARTINSONS C, VIENOT F, et al. Light-emitting diodes (LED) for domestic lighting: any risks for the eye? [J]. Prog Retin Eye Res, 2011, 30(4): 239-257.
- [23] Solid-State Lighting Technology Fact Sheet: Optical Safety of LEDs[R]. ENERGY D O, 2013: 4.
- [24] 俞安琪. 对 LED 蓝光危害检测结果的分析及建议[R]. 国家电光源质量监督检验中心(上海)/上海时代之光照明电器检测有限公司, 2013.
- [25] ELC-CELMA position paper on Optical Safety of LED Lighting[R]. European Lamp Companies Federation (ELC) & Federation of National Manufacturers Association for Luminaires and Electrotechnical Components for Luminaires in the European Union (CELMA), 2011.
- [26] LightingEurope Guide on Photobiological Safety in General Lighting Products for Use in Working Places[R]. LightingEurope, 2013.