

ICS 29.140.99  
CCS K 72



团 体 技 术 报 告

T/CSA/TR 009—2020

---

# LED 照明产业链绿色制造评价原则指南

Guidance on green manufacturing evaluation principle for LED lighting  
industry chain

版本：V01.00

2020-11-30 发布

2020-11-30 实施

---

国家半导体照明工程研发及产业联盟发布

## 目 次

前 言.....	I
1 概述.....	1
2 绿色制造评价原则.....	1
3 绿色制造指数的确定.....	2
3.1 功能单元.....	2
3.2 系统边界.....	2
3.3 评价方法的假设.....	3
3.4 绿色制造指数.....	3
3.5 材料评价指标.....	4
3.6 能源评价指标.....	7
3.7 水资源评价指标.....	7
3.8 环境综合评价指标.....	8
附录 A（资料性附录）LED 灯具制造过程原材料清单.....	9
附录 B（资料性附录）金属和金属盐的权重系数计算.....	12
参考文献.....	16

# 前 言

绿色制造是一种综合考虑环境影响和资源能源消耗的现代化制造模式，其目标是使得产品生产的整个周期中，对环境负面影响最小、资源利用率最高，并使企业经济效益和社会效益利益协调优化。LED 作为新一代半导体固态照明光源，以其节能、环保、寿命长等优点，成为照明、背光和信号指示领域的主流器件并具有较大市场规模。本技术报告旨在能够为半导体照明产业的绿色生产和配套技术进步提供理论依据。

本技术报告按照 GB/T 1.1—2020 的规则起草。

本技术报告由国家半导体照明工程研发及产业联盟（CSA）制定发布，版权归 CSA 所有，未经 CSA 许可不得随意复制；其它机构采用本技术报告内容制定标准需经 CSA 允许；任何单位或个人引用本技术报告的内容需指明本技术报告的编号。

到本技术报告正式发布为止，CSAS 未收到任何有关本文件涉及专利的报告。CSAS 不负责任确认本文件的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本技术报告主要起草单位：中国科学院过程工程研究所、厦门市三安光电科技有限公司、中关村半导体照明联合创新重点实验室、浙江阳光照明电器集团股份有限公司、厦门华联电子股份有限公司、中国科学院半导体研究所、杭州华普永明光电股份有限公司、广州市莱帝亚照明股份有限公司、利亚德照明股份有限公司、北京大学东莞光电研究院、哈尔滨照明检测中心、国家半导体器件质量监督检验中心。

本技术报告主要起草人：陈芳芳、孙峙、曹宏斌、高文芳、刘建明、叶大千、蔡燕华、曹峻松、徐浩、余鹭帆、潘安宇、郑智斌、柴储芬、伊晓燕、梁萌、黄建明、吕鹤男、徐有荪、丁晓民、樊庆伟、刘东月。

福建晶安光电有限公司陈铭欣副总经理、天津三安光电有限公司张东炎高级工程师、福建天电光电有限公司袁瑞鸿技术总监、北京赛科康仑环保科技有限公司刘晨明副总经理、中国科学院电工研究所梁锦华助理研究员为本技术报告的撰写提供了大量支持，在此一并表示感谢。



# LED 照明产业链绿色制造评价原则指南

## 1 概述

发展绿色制造成为推进中国制造 2025 的核心内容之一，并在电子等重点领域中全面推行。在 LED 生产过程中，复杂的原材料、不同类型的能源、水循环系统和废弃物的处理都是 LED 绿色制造评价的重要组成部分。LED 生产过程中产生的气体、液体、固体废物中所含的有害物质（如 As），可能对环境（土壤和地下水）、动物和人类的健康造成威胁。无论从哪个角度来看，对 LED 生产过程的评价都是非常重要的。

积极推行低碳化、循环化和集约化的绿色制造技术，有效降低生产过程中的资源环境代价，提高资源利用效率，构建 LED 关键工艺环节绿色制造评价支撑体系，形成科技含量高、资源消耗低、环境污染少的 LED 关键工艺环节绿色制造体系，将极大推动 LED 产业健康发展。

本技术报告是在了解 LED 产品生产过程中详细的材料、能源、水和污染情况的基础上，对 LED 生产过程建立绿色制造评价模型。在系统工程分析中，通过仿真计算和定性分析对系统各要素之间的定量关系进行评价，对原材料、能耗、用水量、环境影响等技术指标进行分析比较。在确定能源和水评价指标的基础上，对能源和水评价进行了研究。为了识别污染对环境的影响，在废气、废水和固体废弃物分析的基础上，开展了综合环境评价。根据工艺和生产环节的不同，对材料、能量和水流进行了估算。最后，用材料、能源、水评价指标和综合环境评价指标定义了绿色制造评价指数（GMI, Green Manufacturing Index）。根据 GMI 的计算，不同 LED 灯具的分类和评价可以在评价生产过程中给予充分的指导，形成较为完善的 LED 绿色关键工艺和工序评价方法，并形成绿色关键技术标准，对绿色转型升级及支持绿色工厂建设和绿色产品应用示范具有重要意义。

## 2 绿色制造评价原则

对于任何生产过程，绿色制造评价都是基于详细的工业生产数据。为了清楚地比较不同质量产品的生产过程，生产过程（图 1）被划分为同一种产品的几个生产工段。从原料到产品，每个生产工段都从能源、水、材料分析和综合环境评价四个方面进行分析评价。材料评价主要关注材料的消耗量、浓度和强度。能量评价主要集中在能量的消耗量上。水评价主要集中在水网络分析和相关的新水、废水流量分析。通过对各工段的物料、能量和水流进行分析计算，可以确定各工段的消耗明细。仔细分析污染的来源和组成，找出固体/液体/气体废物对环境的影响。废物可作处理，再生的固体/液体/气体可应用于某一工段，可大大减少物料/能源/水的耗用。综合评价指标确定后，可对产品进行分级，其结果对有效工段的识别至关重要。优化的过程也可以基于这些结果进行。

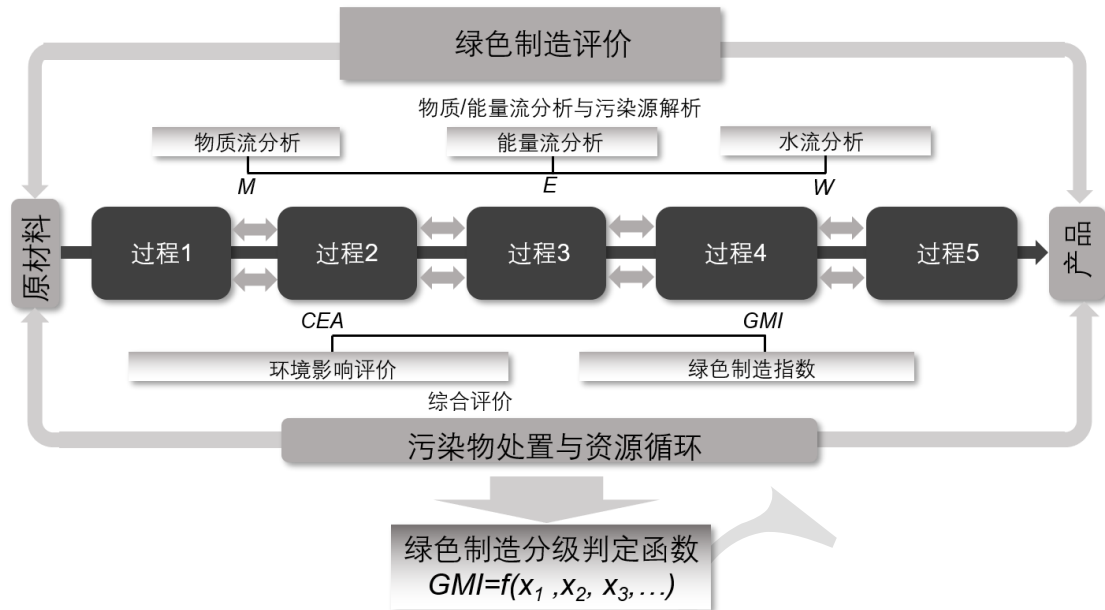


图1 绿色制造评价原则

### 3 绿色制造指数的确定

#### 3.1 功能单元

产品的功能单元为所有相关的输入和输出提供量化的参考。本研究中功能单元是含有 1 亿颗 LED 芯片的生产过程。所有的物质、能量、水和污染物的数量都以这个单位为基础。

#### 3.2 系统边界

LED 照明产品的生产非常复杂，原料种类不同，污染也不同，一个完整的 LED 照明产品生产至少需要 4 个步骤。典型 LED 照明产品的系统边界及详细制作流程如图 2 所示。LED 照明产品能够在可见光谱中发射多种波长的光，因此在商业照明应用中得到了广泛的应用，因为它们与传统光源相比具有许多优势，如高光效和长寿命。因此，本技术报告将根据企业提供的数据和 LED 行业的现状，对球泡灯（普通照明用非定向自镇流 LED 灯）和灯丝灯的生产工艺进行比较，以便于建立评价模型和绿色制造工艺分析。

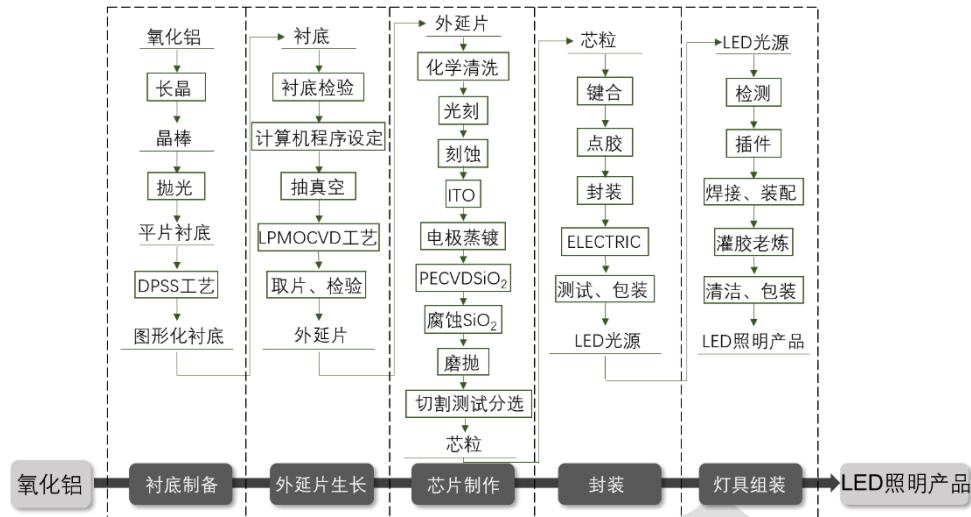


图2 典型LED照明产品生产过程解析

### 3.3 评价方法的假设

LED照明产业链绿色制造评价模型假设条件如下：

- 生产企业外部环境的动态变化不影响生产过程；
- 生产过程连续稳定运行6个月以上；
- 不相容污染物（即遇到爆炸和/或腐蚀）不会同时发生在同一生产过程中，也不需要处理；
- 生产过程中的各工段符合污染物处理和环境保护法律、法规的安全管理要求；
- 仅考虑LED产品的生产过程（从原料到产品），不考虑产品运输、使用和回收的过程；
- 默认产品为同类型LED照明产品，不考虑灯具的性能和寿命；
- 只针对某一类包装产品，其他类型的包装产品在评价中没有进行分析；
- 在照明产品的制造过程中，不考虑各种废弃物的产生和环境影响；
- 废弃物的排放完全包含在未经处理的污染物总量中。

### 3.4 绿色制造指数

在绿色制造评价体系中，绿色制造指数是最重要的参数。本评价考虑到材料/能源/水的消耗和生产过程中的污染物，排除了产品出厂后的过程（即改造、使用、回收）。对于某一产品，绿色制造指数可以通过以下方程进行计算：

$$GMI = \left( \frac{M}{M_{\max}} + \frac{E}{E_{\max}} + \frac{W}{W_{\max}} \right) \times CEA \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$GMI$ ——绿色制造指数；

$CEA$ ——综合环境评价指标；

$M$  ——材料评价指标；

- $E$  ——能源评价指标；
- $W$  ——水资源评价指标；
- $M_{\max}$ ——材料评价指标边界值；
- $E_{\max}$  ——能源评价指标边界值；
- $W_{\max}$ ——水资源评价指标边界值。

注：综合环境评价指标通常指产品生产过程中排放的固体、液体和气体废弃物对环境产生的影响，主要考虑污染物的浓度、相应污染物的国家/行业排放标准和污染物的产生量。

图 3 描述了用于绿色制造指数评估的不同参数之间的相关性。从原材料到产品，每个生产工段都进行了能源、水和材料的分析。然后使用公式（1）确定绿色制造指数。对于任何产品的生产过程， $GMI$  值越小，材料、能源、水和环境影响的综合指数越小，生产过程越绿色。该方法可以对某一生产部门或不同产品的绿色度进行评价，为绿色制造提供指导。

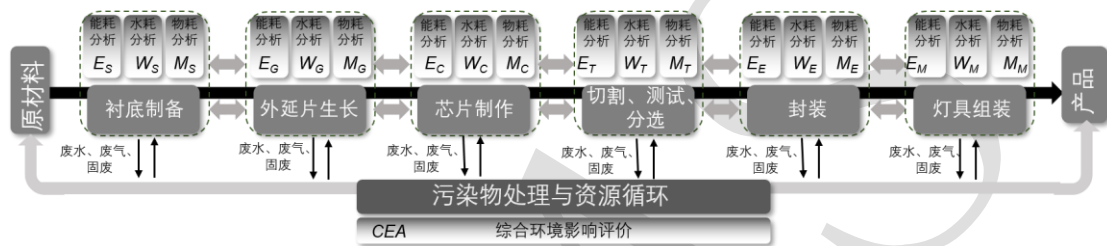


图 3 绿色制造评价各工段指标及重要组成图

注 1：本研究也计划考虑灯的能效指标作为 LED 灯具绿色制造评价指标的一部分。即能源利用效率越高的 LED 产品的绿色制造等级越高，绿色制造指标的计算值越低。

但因数据获取难度较大，能效指标更新频率快，本次计算并未加入相关计算。仅建立了计算公式如下：

$$GMI = \left( \frac{M}{M_{\max}} + \frac{E}{E_{\max}} + \frac{W}{W_{\max}} \right) \times \frac{CEA}{IIE} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$IIE$  ——LED 初始光效（Initial luminous efficacy, lm/W）。

注 2：本技术报告中的  $GMI$  的计算可以针对不同生产过程，可以是全流程 LED 灯具的生产，也可以是衬底的制备生产过程，或者封装的生产过程，但是计算过程中需要把待计算的生产过程看成一个全流程的生产工段，并不是各工段  $GMI$  计算后的简单相加，即  $GMI \neq GMI_1 + GMI_2 + GMI_3 + \dots$ 。

注 3：本技术报告中的材料、能源、水资源等评价指标边界值的计算，由于目前针对以上三种评价指标的数据量比较小，计算相关材料的再循环比例仍然存在问题，无法准确估算目前与行业相对应的评价指标边界值。

### 3.5 材料评价指标

对于生产过程中出现的材料，不仅要考虑产品的原料，还要考虑反应过程所需的化学品和气体。每一种物质在生产过程中的重要性是不同的，获得的难度、可替代性和物质本身的组成也有很大的不同。因此，材料分为金属、有机物、无机物和气体。



在LED灯具的生产过程中，原材料种类繁多（附录A 表A.1）。大多数原材料的成分都很复杂。为了更清楚的说明主要的材料消耗和流程，材料评价只选取了每个生产工段消耗最大的前10种材料。

对于一个生产过程，材料评价指标  $M$  可以通过下列方程计算：

$$M = \sum_i m_i \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$i$  ——工段的数量；

$m_i$  ——第  $i$  工段的材料评价指标。

对于每个产品生产工段，第  $i$  个工段的材料评价指标  $m_i$  可以定义如下：

$$m_i = \sum_j b_i \times a_{i,j} \times m_{i,j} \times (1 - \eta) \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$j$  ——材料类型；

$b$  ——工段的重要性；

$a_{ij}$  ——材料  $j$  的权重系数；

$m_{ij}$  ——材料  $j$  的质量；

$\eta$  ——材料  $j$  的再循环比例。

### 3.5.1 金属的权重系数

在资源和环境危机下，金属和金属盐是材料中最重要的组成部分。影响金属权重系数的因素一般包括资源价值、材料组成、可持续性供应的风险等。

供应风险（SR）是根据主要供应商的集中程度和治理安全来反映对物资供应分配影响的严重程度的。

经济重要性(EI)是通过最终用途和相应部分的附加值来确定特定经济中的物质重要性。

与 EI 类似，环境国家风险（ECR）用来反映由环境原因引起的国家风险。

根据基于生命周期影响的方法所得到的产品中金属含量和相应的重金属权重因子来评估资源消耗潜力（RDP）。

对于金属，其权重系数  $a_{i,j}$  可以通过下列公式计算：

$$a_{i,j} = \sum_d C_{ijd} \times SR_{ijd} \times EI_{ijd} \times ECR_{ijd} \times RDP_{ijd} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$d$  ——材料中的主要金属种类；

$C_{ijd}$  ——主要金属在产品中的质量百分比（wt.%）；

$SR_{ijd}$  ——金属  $d$  的供应风险；

$EI_{ijd}$  ——金属  $d$  的经济重要性；

$ECR_{ijd}$  ——金属  $d$  的环境国家风险；

$RDP_{ijd}$  ——金属  $d$  的资源枯竭潜力。

注：公式（5）中的参数可参照表 B.4 进行计算。

对应的金属  $d$  的供应风险  $SR_{ijd}$ ，其值按式（6）计算：

$$SR_{ijd} = \sigma(1 - \rho)HHI_{WGI} \dots\dots\dots (6)$$

其中， $HHI_{WGI}$ 按式（7）计算：

$$HHI_{WGI} = \sum_c (S_c^2 WGI_c) \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- $\sigma$  ——金属  $d$  在 LED 行业的可替代性；
- $\rho$  ——回收材料满足需求的比例；
- $HHI_{WGI}$ ——生产集中度和国家层面的治理状况；
- $WGI_c$  ——国家  $c$  的世界治理指标；
- $S_c$  ——国家  $c$  在全球产量中所占的比例。

注：公式（6）中的参数可参照表 B.1 进行计算。

对应的金属  $d$  的经济重要性  $EI_{ijd}$ ，其值按式（8）计算：

$$EI_{ijd} = \frac{1}{GDP} x \times A \times SI \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- $x$  ——LED 行业原金属需求比例；
- $A$  ——对应行业价值；
- $SI$  ——LED 工业中金属的重要性。

注：公式（8）中的参数可参照表 B.2 进行计算。

其中，原材料的所有应用都包括在内满足  $\sum X_i = 1$ 。

对应的金属  $d$  的环境国家风险  $ECR_{ijd}$ ，其值按式（9）计算：

$$ECR = \sigma(1 - \rho)HHI_{EPI} \dots\dots\dots (9)$$

其中， $HHI_{EPI}$ 按式（10）计算：

$$HHI_{EPI} = \sum_c (S_c^2)EPI_c \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$HHI_{EPI}$ ——生产集中度和环境层面的治理状况。

注：公式（9）中的参数可参照表 B.3 进行计算。

### 3.5.2 有机物的权重系数

对于有机物，其权重系数  $a_{i,j}$  可以通过式（11）计算：

$$a_{i,j} = \sum_f C_{ijf} \times TP_{ijf} \times CL_{ijf} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

- $f$  ——材料中的主要有机物；
- $C_{ijf}$  ——材料中主要有机物的质量百分比（wt.%）；

$TP_{if}$ ——有机物  $f$  的毒性;

$CL_{ijt}$ ——有机物  $f$  的有机链长。

### 3.5.3 无机物的权重系数

对于无机物, 非金属无机物(如酸、过氧化氢)没有明显的资源效应和污染, 建议将  $a_{i,j}$  值设为 1。

### 3.5.4 气体的权重系数

对于气体, 从获取难度和适用范围来看, 空气/大气气体、合成/加工气体和特殊气体的  $a_{i,j}$  建议设置为 0.33:0.67:1。

## 3.6 能源评价指标

在工业过程中, 有许多种能源, 如电、蒸汽、天然气和氢。为了统一能源参数, 将每一种能源类型按热量转换为标准煤。因此, 能量评价指标  $E$  可计算为:

$$E = \sum_i e_i \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$e_i$  ——第  $i$  个工段的能量评价指标。

对于每个生产工段, 第  $i$  个工段的能源评价指标  $e_i$  定义如下:

$$e_i = \sum_k b_i \times c_{i,k} \times e_{i,k} \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$k$  ——能量类型;

$c_{i,k}$  ——能量  $k$  的标准煤转换系数;

$e_{i,k}$  ——能量  $k$  的质量。

## 3.7 水资源评价指标

在工业生产过程中, 水不仅可以作为生产所需的水, 如溶液的配置, 而且可以作为蒸汽加热反应。废水也会对环境产生影响。因此, 水的消耗是独立于材料、能源和污染物的分析。耗水量分析也可以简化为水平衡分析, 即只关注进入系统的淡水和离开系统的废水。废水中含有许多污染物, 其对环境的影响将在环境影响部分进行分析。水评价指标的分析主要依靠以下计算:

$$W = \sum_i w_i \dots\dots\dots (14)$$

式中:

$w_i$  ——第  $i$  个工段的水质评价指标。

对于每个生产工段, 第  $i$  个工段的水评价指标  $w_i$  可以定义如下:

$$w_i = \sum_l b_i \times w_{i,l} \times (1 - \eta) \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$l$  ——水的类型；

$w_{i,l}$  ——水的质量。

### 3.8 综合环境评价指标

污染物的环境影响/风险评估是非常重要的，在评价生产过程中是必须考虑的。生产过程对环境的影响通常来自可能含有有害或危险成分的废气/液体/固体。金属生产过程的环境综合评价按以下公式进行：

$$\begin{cases} R_x = 0, S_{\max,x,y} \leq S_x^* \\ R_x = \frac{1}{y} \sum_y \left( \frac{S_{\max,x,y}}{S_x^*} \right), S_{\max,x,y} > S_x^* \end{cases} \dots\dots\dots (16)$$

$$W_x = \frac{R_x}{\sum_x R_x} \dots\dots\dots (17)$$

$$\begin{aligned} CEA &= \sum_x W_x CEA_x \\ &= \sum_x W_x \left[ \sum_y m_{x,y} (S_{\max,x,y} - S_x^*) \right] \dots\dots\dots (18) \\ &= \sum_x W_x \left[ \sum_y m'_{x,y} (1 - \eta_{x,y}) (S_{\max,x,y} - S_x^*) \right] \end{aligned}$$

式中：

$CEA$ ——全废弃物的综合环境评价指标；

$CEA_x$ ——废弃物  $x$  的综合环境评价指标；

$x$  ——废气/液体/固体（如 COD、氟化物、 $NH_4-N$ ）中的污染物类型；

$y$  ——废物（如某段后的废水）的类型；

$S_x^*$  ——污染物  $x$  的排放标准；

$S_{\max,x,y}$ ——废弃物  $y$  中污染物  $x$  的最高浓度；

$R_x$  ——废弃物  $x$  的相关比率；

$W_x$  ——污染因子  $x$  在所有污染物中的权重；

$m_{x,y}$  ——废弃物  $y$  中危险化合物的量；

$m'_{x,y}$  ——生产过程中  $y$  的质量/体积比；

$\eta_{x,y}$  ——生产过程中  $y$  的再循环百分比。

附录 A  
(资料性附录)  
LED灯具制造过程原材料清单

A.1 典型球泡灯和灯丝灯的生产过程原材料清单

在 LED 照明产品的生产过程中，大多数原材料的成分都很复杂，而且不同种类照明产品的原材料成分也不尽相同。为了更清楚的说明主要的材料消耗和流程，本技术报告以球泡灯和灯丝灯为例，整理了生产过程原材料清单（表 A.1），评价方法以每个生产工段消耗最大的前 10 种材料为主。

表 A.1 典型球泡灯和灯丝灯的生产过程原材料清单

序号	材料名称	衬底制备 kg	外延层生长 &芯片制备 kg	封装 kg	LED 灯组装 kg	
					球泡灯	灯丝灯
1	钻石线 (m) 0.2725g/m	0.29	-	-	-	-
2	高纯氧化铝晶块	1.91	-	-	-	-
3	切削液	0.19	-	-	-	-
4	氩气	-	-	-	-	-
5	无水乙醇	0.32	29.95	-	58.32	12.5
6	硫酸	21.14	10.85	-	-	-
7	氮气	69.63	-	-	-	-
8	粘着剂	0.01	-	-	-	-
9	钻石液	0.65	-	-	-	-
10	抛光液	18.53	37.65	-	-	-
11	研磨粉	9.27	-	-	-	-
12	清洗剂	3.45	-	-	-	-
13	悬浮剂	0.09	-	-	-	-
14	双氧水	6.48	3.29	-	-	-
15	氨水	0.52	-	-	-	-
16	液氮	272.44	-	-	-	-
17	光刻胶	0.86	-	-	-	-
18	边胶清洗液	0.49	11.97	-	-	-
19	显影液	20.84	28.56	-	-	-
20	三氯化硼 BCL <sub>3</sub>	0.25	0.14	-	-	-
21	CHF <sub>3</sub>	0.15	-	-	-	-
22	去胶液	0.24	48.80	-	-	-
23	氦气 He	22.55	0.09	-	-	-
24	丙酮	0.42	60.13	-	-	-
25	蓝宝石衬底 (片)	-	1315250.07	-	-	-
26	黄金/铂/铝	-	0.82	-	-	-
27	三甲基镓	-	3.99	-	-	-
28	三甲基铟	-	0.17	-	-	-

表 A.1 LED 灯具原材料清单 (续 1)

序号	材料名称	衬底制备 kg	外延层生长 &芯片制备 kg	封装 kg	灯具组装 kg	
					球泡灯	灯丝灯
29	三甲基铝	-	0.08	-	-	-
30	盐酸-36%	-	0.96	-	-	-
31	去光阻液	-	45.31	-	-	-
32	光阻液	-	2.22	-	-	-
33	BOE 氟化铵腐蚀液	-	20.54	-	-	-
34	ITO 蚀刻液	-	6.45	-	-	-
35	IPA 异丙酮	-	44.47	-	-	-
36	去蜡液	-	37.69	-	-	-
37	四氟化碳 CF <sub>4</sub>	-	1.28	-	-	-
38	氧气	-	1.04	-	-	50
39	氯气	-	0.86	-	-	-
40	氩气 Ar	-	0.57	-	-	-
41	笑气 N <sub>2</sub> O	-	5.81	-	-	-
42	磷酸	-	0.68	-	-	-
43	硝酸	-	0.38	-	-	-
44	氢氧化钾	-	2.03	-	-	-
45	氢氧化钠	-	1.80	-	-	-
46	SiH <sub>4</sub> (10%)/H <sub>2</sub>	-	0.84	-	-	-
47	SiH <sub>4</sub> (10%)/Ar	-	3.35	-	-	-
48	N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> 混合气体	-	8.87	-	-	-
49	含贵金属腔体料	-	0.34	-	-	-
50	含贵金属胶带	-	0.68	-	-	-
51	含贵金属蚀刻液	-	0.17	-	-	-
52	亚硫酸钠	-	-	-	-	-
53	芯粒	-	-	881.25	-	-
54	硅胶	-	-	2992.50	-	-
55	绝缘胶(固晶胶)	-	-	20.00	-	-
56	荧光粉	-	-	1226.25	-	-
57	导线(金线)	-	-	63.75	-	-
58	支架	-	-	29601.25	-	-
59	胶盘	-	-	13096.25	-	-
60	载带	-	-	7660.00	-	-
61	盖带	-	-	5596.25	-	-
62	铝箔袋	-	-	4630.00	-	-
63	干燥剂	-	-	638.75	-	-
64	封箱胶带	-	-	0.00	-	-
65	标签纸	-	-	513.75	-	-
66	纸箱	-	-	4646.25	-	-

表 A.1 LED 灯具原材料清单 (续 2)

序号	材料名称	衬底制备 kg	外延层生长 &芯片制备 kg	封装 kg	灯具组装 kg	
					球泡灯	灯丝灯
67	栈板	-	-	8831.25	-	-
68	清洗剂	-	-	2812.50	-	-
69	LED 发光二极管	-	-	-	1458	-
70	泡壳	-	-	-	23328	-
71	光源铝基板	-	-	-	7290	-
72	硅酮类导热胶	-	-	-	291.6	-
73	无铅锡丝	-	-	-	583.2	125
74	集成块	-	-	-	1458	-
75	贴片电阻电容	-	-	-	10206	-
76	PCB 板	-	-	-	2916	187.5
77	连接件	-	-	-	2332.8	-
78	吸塑盒	-	-	-	11664	2500
79	塑料主体	-	-	-	17496	-
80	绝缘塑料件	-	-	-	4374	-
81	辅助材料	-	-	-	58.32	-
82	灯头	-	-	-	874.8	-
83	贴片红胶	-	-	-	29.16	-
84	助焊剂	-	-	-	11.664	-
85	喷码油墨	-	-	-	11.664	-
86	铝合金制品	-	-	-	43740	-
87	稀释剂-环己酮	-	-	-	0	0.625
88	彩盒	-	-	-	11664	2500
89	外箱	-	-	-	58320	12500
90	隔离衬	-	-	-	5832	1250
91	排气管	-	-	-	-	1250
92	实心柱	-	-	-	-	750
93	导丝	-	-	-	-	125
94	喇叭管	-	-	-	-	1562.5
95	玻璃泡壳	-	-	-	-	13125
96	灯丝	-	-	-	-	937.5
97	焊泥粉	-	-	-	-	137.5
98	AB 胶	-	-	-	-	437.5
99	油墨	-	-	-	-	2.5
100	稀释剂 (环己酮)	-	-	-	-	0.625
101	二氧化硅粉末	-	-	-	-	12.5

附录 B  
(资料性附录)  
金属和金属盐的权重系数计算

### B.1 金属和金属盐的权重系数

金属在 LED 生产中起着非常重要的作用。半导体中的金属(Ga, In)和彩色转换载流子晶体(Ge, Mg, Si)是战略性金属。色转换器载流子晶体中的 Y、Gd、Lu 和色转换器掺杂元素中的 Ce、Eu 均为稀土金属。因此, 金属的权重系数  $a_{i,j}$  是最重要的参数。本节对原料中的金属离子和金属盐进行了评价。

LED 生产过程中金属的供应风险如表 B.1 所示, 其中 Ga 和 In 的供应风险较高。

表 B.1 供应风险相关指标及计算

工段	参数设置	主要成分	金属	$S_c$	$WGI$ scaled	$HHI_{wgi}$	$\sigma$	$\rho$	$SR$
衬底制备	高纯氧化铝晶块	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	0.34	6.18	0.714408	0.63	0.25	0.3376
	研磨粉	45%-50%氧化铈 CeO <sub>2</sub>	Ce	0.31	6.18	N.C.	N.C.	N.C.	0.0370
外延片和芯片制备	黄金/铂/铝	Au	Au	0.09	6.18	0.05	0.72	0.99	0.0003
	砷化镓基片	GaAs	As	0.54	6.18	1.80	N.C.	N.C.	0.0370
			Ga	0.90	6.18	5.01	0.60	0.10	2.7031
	三甲基镓	Ga(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Ga	0.90	6.18	5.01	0.60	0.10	2.7031
	三甲基铟	In(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	In	0.58	6.18	2.08	0.82	0.28	1.2359
	三甲基铝	Al(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Al	0.34	6.18	0.71	0.63	0.28	0.3263
			In	0.58	6.18	2.08	0.82	0.28	1.2359
ITO 蚀刻液	氧化铟锡	Sn	0.31	6.18	0.60	0.60	0.28	0.2625	
砷化氢	AsH <sub>3</sub>	As	0.54	6.18	1.80	N.C.	N.C.	0.0370	
封装制备	导线-金线	Au	Au	0.09	6.18	0.05	0.72	0.99	0.0003
			Al	0.34	6.18	0.71	0.63	0.80	0.0900
	支架	Cu	Cu	0.04	6.18	0.01	0.62	0.90	0.0006
	铝箔袋	Al	Al	0.34	6.18	0.71	0.63	0.80	0.0900
	COB 基板	Al	Al	0.34	6.18	0.71	0.63	0.80	0.0900
	固晶胶	银胶	Ag	0.13	6.18	0.10	0.72	0.25	0.0564
球泡灯	光源铝基板	Al	Al	0.34	6.18	0.71	0.63	0.80	0.0900
	PCB 板	Al	Al	0.34	6.18	0.71	0.63	0.80	0.0900
	铝合金制品	Al	Al	0.34	6.18	0.71	0.63	0.80	0.0900
	无铅锡丝	Sn	Sn	0.31	6.18	0.60	0.60	0.28	0.2625
灯丝灯	无铅锡丝	Sn	Sn	0.31	6.18	0.60	0.60	0.28	0.2625
	PCB 板	Al	Al	0.34	6.18	0.71	0.63	0.80	0.0900
	排气管	Fe	Fe	0.35	6.18	0.76	0.84	0.90	0.0636
	实心柱	Cu	Cu	0.04	6.18	0.01	0.62	0.90	0.0006



表 B.1 供应风险相关指标及计算 (续)

工段	参数设置	主要成分	金属元素	$S_c$	$WGI$ scaled	$HHI_{WGI}$	$\sigma$	$\rho$	$SR$
灯丝灯	喇叭管	Fe	Fe	0.35	6.18	0.76	0.84	0.90	0.0636
	导丝	Cu	Cu	0.04	6.18	0.01	0.62	0.90	0.0006

在式 7 中, 相关指标及经济重要性计算如表 B.2 所示。

表 B.2 相关指标及经济重要性计算

工段	参数设置	主要成分	金属元素	$x$	$A_i$	$SI$	$EI$
衬底制备	高纯氧化铝晶块	$Al_2O_3$	Al	0.07	63.30	0.50	2.22
	研磨粉	45%-50%氧化铈 $CeO_2$	Ce	0.12	94.97	0.65	7.35
外延片和芯片制备	黄金/铂/铝	Au	Au	0.04	63.30	0.50	1.27
	砷化镓基片	GaAs	As	0.12	94.97	0.65	7.35
			Ga	0.25	104.90	0.70	18.36
	三甲基镓	$Ga(CH_3)_3$	Ga	0.25	104.90	0.70	18.36
	三甲基铟	$In(CH_3)_3$	In	0.03	104.90	0.70	2.20
	三甲基铝	$Al(CH_3)_3$	Al	0.07	63.30	0.50	2.22
	ITO 蚀刻液	氧化铟锡	In	0.03	104.90	0.70	2.20
			Sn	0.15	94.97	0.70	9.97
砷化氢	$AsH_3$	As	0.12	94.97	0.65	7.35	
封装制备	导线-金线	Au	Au	0.04	63.30	0.50	1.27
			Al	0.07	63.30	0.50	2.22
	支架	Cu	Cu	0.06	104.90	0.70	4.41
	铝箔袋	Al	Al	0.16	63.30	0.70	7.09
	COB 基板	Al	Al	0.26	104.4	0.5	13.572
	固晶胶	银胶-80% Ag	Ag	0.17	104.9	0.5	8.9165
球泡灯	光源铝基板	Al	Al	0.26	104.4	0.5	13.572
	PCB 板	Al	Al	0.26	104.4	0.5	13.572
	铝合金制品	Al	Al	0.07	63.3	0.5	2.2155
	无铅锡丝	Sn	Sn	0.08	63.3	0.5	2.532
灯丝灯	无铅锡丝	Sn	Sn	0.08	63.3	0.5	2.532
	PCB 板	Al	Al	0.26	104.4	0.5	13.572
	排气管	Fe	Fe	0.12	164.6	1	19.752
	实心柱	Cu	Cu	0.06	104.90	0.70	4.41
	喇叭管	Fe	Fe	0.12	164.6	1	19.752
	导丝	Cu	Cu	0.06	104.90	0.70	4.41

ECR 计算结果如表 B.3 所示。

表 B.3 国家环境风险的相关指标及计算

工段	参数设置	主要成分	金属元素	$S_c$	$EPI$ -China	$HHI_{EPI}$	$\sigma$	$\rho$	$ECR$
衬底制备	高纯氧化铝晶块	$Al_2O_3$	Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.25	2.3072
	研磨粉	氧化铈 $CeO_2$	Ce	0.31	42.24	N.C.	N.C.	N.C.	0.0370
外延片和芯片制备	黄金/铂/铝	Au	Au	0.09	42.24	0.31	0.72	0.99	0.0022
	砷化镓晶片	GaAs	As	0.54	42.24	N.C.	N.C.	N.C.	0.0370
			Ga	0.90	42.24	34.21	0.60	0.10	18.4758
	三甲基镓	$Ga(CH_3)_3$	Ga	0.90	42.24	34.21	0.60	0.10	18.4758
	三甲基铟	$In(CH_3)_3$	In	0.58	42.24	14.21	0.82	0.28	8.4476
	三甲基铝	$Al(CH_3)_3$	Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.28	2.2303
	ITO 蚀刻液	氧化铟锡	In	0.58	42.24	14.21	0.82	0.28	8.4476
Sn			0.31	42.24	4.13	0.60	0.28	1.7944	
砷化氢	$AsH_3$	As	0.54	42.24	N.C.	N.C.	N.C.	0.0370	
封装制备	导线-金线	Au	Au	0.09	42.24	0.31	0.72	0.99	0.0022
			Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.80	0.6153
	支架	Cu	Cu	0.04	42.24	0.06	0.62	0.90	0.0038
	铝箔袋	Al	Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.80	0.6153
	COB 基板	Al	Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.80	0.6153
	固晶胶	银胶	Ag	0.13	42.24	0.71	0.72	0.25	0.3855
球泡灯	光源铝基板	Al	Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.80	0.6153
	PCB 板	Al	Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.80	0.6153
	铝合金制品	Al	Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.80	0.6153
	无铅锡丝	Sn	Sn	0.31	42.24	4.13	0.60	0.60	0.9900
灯丝灯	无铅锡丝	Sn	Sn	0.31	42.24	4.13	0.60	0.60	0.9900
	PCB 板	Al	Al	0.34	42.24	4.88	0.63	0.80	0.6153
	排气管	Fe	Fe	0.35	42.24	5.17	0.84	0.90	0.4346
	实心柱	Cu	Cu	0.04	42.24	0.06	0.62	0.90	0.0038
	喇叭管	Fe	Fe	0.35	42.24	5.17	0.84	0.90	0.4346
	导丝	Cu	Cu	0.04	42.24	0.06	0.62	0.90	0.0038

金属资源耗竭潜力(RDP)采用 EPS 2000/环境负荷单元-ELU7-8 的方法,数据如表 B.4 所示。

在 SR、EI、ECR 和 RDP 的基础上,计算了金属和金属盐的权重系数测定  $a_{i,j}$ , 具体参数和计算如表 B.4 所示。

表B.4 金属和金属盐的权重系数的确定

参数设置	主要成分	金属元素	$C_{ijd}$	$RDP$	$SR$	$EI$	$ECR$	$a_{i,d}$	$a_i$
高纯氧化铝晶块	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al	0.5294	1.0100	0.3376	2.22	2.3072	0.9226	0.9226
研磨粉	氧化铈 CeO <sub>2</sub>	Ce	0.4000	1.0000	0.0370	7.35	0.0370	0.0040	0.0040
黄金/铂/铝	Au	Au	1.0000	1.2000	0.0003	1.27	0.0022	1.12E-06	1.12E-06
砷化镓晶片	GaAs	As	0.5180	1.0000	0.0370	7.35	0.0370	0.0052	442.1815
		Ga	0.4820	1.0006	2.7031	18.36	18.4758	442.1763	
三甲基镓	Ga(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Ga	0.5775	1.0006	2.7031	18.36	18.4758	529.7323	529.7323
三甲基铟	In(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	In	0.7184	1.0000	1.2359	2.20	8.4476	16.5230	16.5230
三甲基铝	Al(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Al	0.3750	1.0100	0.3263	2.22	2.2303	0.6107	0.6107
ITO 蚀刻液	氧化铟 锡	In	0.4899	1.0000	1.2359	2.20	8.4476	11.2676	13.8075
		Sn	0.5101	1.0600	0.2625	9.97	1.7944	2.5399	
砷化氢	AsH <sub>3</sub>	As	0.9615	1.0000	0.0370	7.35	0.0370	0.0097	0.0097
导线-金线	Au	Au	0.7672	1.2000	0.0003	1.27	0.0022	7.72E-07	0.0288
		Al	0.2328	1.0100	0.0900	2.22	0.6153	0.0288	
支架	Cu	Cu	1.0000	1.2100	0.0006	4.41	0.0038	1.11E-05	1.11E-05
铝箔袋	Al	Al	1.0000	1.0100	0.0900	7.09	0.6153	0.3966	0.3966
COB 基板	Al	Al	1.0000	1.0100	0.0900	13.572	0.6153	0.7592	0.7592
固晶胶	银胶	Ag	0.8000	1.4300	0.0564	8.9165	0.3855	0.2218	0.2218
光源铝基板	Al	Al	1.0000	1.0100	0.0900	13.572	0.6153	0.7592	0.7592
PCB 板	Al	Al	0.9000	1.0100	0.0900	13.572	0.6153	0.6832	0.6832
铝合金制品	Al	Al	1.0000	1.0100	0.0900	2.2155	0.6153	0.1239	0.1239
无铅锡丝	Sn	Sn	1.0000	1.0600	0.1448	2.532	0.9900	0.3849	0.3849
无铅锡丝	Sn	Sn	1.0000	1.0600	0.1448	2.532	0.9900	0.3849	0.3849
PCB 板	Al	Al	0.9000	1.0100	0.0900	13.572	0.6153	0.6832	0.6832
排气管	Fe	Fe	1.0000	1.0003	0.0636	19.752	0.4346	0.5461	0.5461
实心柱	Cu	Cu	1.0000	1.2100	0.0006	4.41	0.0038	1.11E-05	1.11E-05
喇叭管	Fe	Fe	1.0000	1.0003	0.0636	19.752	0.4346	0.5461	0.5461
导丝	Cu	Cu	1.0000	1.2100	0.0006	4.41	0.0038	1.11E-05	1.11E-05

## 参考文献

1. Fang, S.; Yan, W.; Cao, H.; Song, Q.; Zhang, Y.; Sun, Z., Evaluation on end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *182*, 624-633.
2. Lim, S. R.; Kang, D.; Ogunseitan, O. A.; Schoenung, J. M., Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs. *Environmental science & technology* **2013**, *47*, (2), 1040-7.
3. Dönmez, B.; Demir, F.; Laçın, O., Leaching kinetics of calcined magnesite in acetic acid solutions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* **2009**, *15*, (6), 865-869.
4. Bayrak, B.; Laçın, O.; Saraç, H., Kinetic study on the leaching of calcined magnesite in gluconic acid solutions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* **2010**, *16*, (3), 479-484.
5. Szymczycha-Madeja, A., Kinetics of Mo, Ni, V and Al leaching from a spent hydrodesulphurization catalyst in a solution containing oxalic acid and hydrogen peroxide. *Journal of hazardous materials* **2011**, *186*, (2-3), 2157-61.
6. Lim, S. R.; Kang, D.; Ogunseitan, O. A.; Schoenung, J. M., Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs): Metallic Resources, Toxicity, and Hazardous Waste Classification. *Environmental science and technology* **2010**, *45*, 320-327.
7. Wang, S.; Yan, L. C.; Zheng, S. S.; Li, T. T.; Fan, L. Y.; Huang, T.; Li, C.; Zhao, Y. H., Toxicity of some prevalent organic chemicals to tadpoles and comparison with toxicity to fish based on mode of toxic action. *Ecotoxicology and environmental safety* **2019**, *167*, 138-145.
8. Clavreul, J.; Baumeister, H.; Christensen, T. H.; Damgaard, A., An environmental assessment system for environmental technologies. *Environmental Modelling & Software* **2014**, *60*, 18-30.
9. Hernando, M. D.; Mezcuca, M.; Fernandez-Alba, A. R.; Barcelo, D., Environmental risk assessment of pharmaceutical residues in wastewater effluents, surface waters and sediments. *Talanta* **2006**, *69*, (2), 334-42.
10. Kosma, C. I.; Lambropoulou, D. A.; Albanis, T. A., Investigation of PPCPs in wastewater treatment plants in Greece: occurrence, removal and environmental risk assessment. *The Science of the total environment* **2014**, *466-467*, 421-38.
11. China, M. o. E. a. E. o. p. s. R. o., Integrated waste water discharge standard. In *GB 8978-1996*, 1996.
12. Guan, Y., A Discussion on Evaluating Groundwater Quality by Nemerow Index Method. *Shanxi Hydrotechnics* **2012**, *1*, 81-84.
13. JINAN OPTOELECTRONICS Co., L., Environmental Impact Statement of Jinan Optoelectronics in Fujian of China. In Fujian, China, 2017.
14. San'an Optoelectronics Co., L., Environmental Impact Statement of San'an Optoelectronics in Xiamen of China. In Xiamen, China, 2017.
15. San'an Optoelectronics Co., L., Environmental Impact Statement of San'an

- Optoelectronics in Tianjin of China. In Tianjin, China, 2011.
16. Lightning, T., Environmental Impact Statement of Tiandian Lightning in Fujian of China. In Fujian, China, 2016.
  17. YANKON, Environmental Impact Statement of YANKON in China. In Fujian, China, 2016.
  18. Negley, G. H. METHOD FOR PRODUCING HIGH EFFICIENCY LIGHTEMITTING DODES AND RESULTING DODESTRUCTURES. 1994.
  19. Zhao, L.; Zhu, S.; Wu, C.; Yang, C.; Yu, Z.; Yang, H.; Liu, L., GaN-based LEDs for light communication. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* **2016**, *59*, (10).
  20. Zhan, L.; Xia, F.; Ye, Q.; Xiang, X.; Xie, B., Novel recycle technology for recovering rare metals (Ga, In) from waste light-emitting diodes. *Journal of hazardous materials* **2015**, *299*, 388-94.
  21. <2010\_critical\_raw\_materials\_for\_eu\_eu\_ad\_hoc\_working\_group.pdf>.
  22. EU Report on critical raw materials for EU. In: Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Material. [http://refhub.elsevier.com/S0959-6526\(18\)30297-X/sref10](http://refhub.elsevier.com/S0959-6526(18)30297-X/sref10)
  23. China, M. o. E. a. E. o. p. s. R. o.; Regulation, S. A. f. M., General Principles for Computing Comprehensive Energy Consumption In *GB 2589-2008*, 2008.
  24. Pfaff, M.; Glöser-Chahoud, S.; Chrubasik, L.; Walz, R., Resource efficiency in the German copper cycle: Analysis of stock and flow dynamics resulting from different efficiency measures. *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, *139*, 205-218.
  25. Sun, Z.; Cao, H. B.; Zhang, X. H.; Lin, X.; Zheng, W. W.; Cao, G. Q.; Sun, Y.; Zhang, Y., Spent lead-acid battery recycling in China - A review and sustainable analyses on mass flow of lead. *Waste Manage* **2017**, *64*, 190-201.
  26. Hendrickson, C. T.; Matthews, D. H.; Ashe, M.; Jaramillo, P.; McMichael, F. C., Reducing environmental burdens of solid-state lighting through end-of-life design. *Environmental Research Letters* **2010**, *5*, (1), 014016.
  27. Bessho, M.; Shimizu, K., Latest trends in LED lighting. *Electronics and Communications in Japan* **2012**, *95*, (1), 1-7.
  28. LLC., S.-A. Sigma-aldrich.  
<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/AdvancedSearchPage.do> (12.04),
  29. Tähkämö, L.; Bazzana, M.; Ravel, P.; Grannec, F.; Martinsons, C.; Zissis, G., Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire—a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **2013**, *18*, (5), 1009-1018.
-

