

102-132-6165
MOTC-IOT-101-TAA006

交通部門協助推動 LED 路燈 照明策略初探



交通部運輸研究所

中華民國 102 年 8 月

ISBN 978-986-03-7787-3

ISSN 號碼
及條碼

GPN：1010201687

定價 160 元

102-132-6165
MOTC-IOT-101-TAA006

交通部門協助推動 LED 路燈 照明策略初探

著者：黃新薰、朱珮芸
陳國岳、陳怡妃

交通部運輸研究所

中華民國 102 年 8 月

交通部門協助推動 LED 路燈照明策略初探 / 黃新薰
等著. -- 初版. -- 臺北市 : 交通部運研所, 民
102. 08

面 ; 公分
ISBN 978-986-03-7787-3(平裝)

1. 交通安全 2. 照明設備

557

102016564

交通部門協助推動 LED 路燈照明策略初探

著 者：黃新薰、朱珮芸、陳國岳、陳怡妃

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw (中文版>圖書服務>本所出版品)

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國 102 年 8 月

印 刷 者：承亞興企業有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 90 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：160 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

GPN：1010201687

ISBN：978-986-03-7787-3 (平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：交通部門協助推動 LED 路燈照明策略初探			
國際標準書號(或叢刊號) ISBN978-986-03-7787-3 (平裝)	政府出版品統一編號 1010201687	運輸研究所出版品編號 102-132-6165	計畫編號 101-TAA006
主辦單位：綜合技術組 主管：張瓊文 計畫主持人：黃新薰(前任主管) 研究人員：朱珮芸、陳國岳、陳怡妃 聯絡電話：(02)23496869 傳真號碼：(02)27120223			研究期間 自 101 年 1 月 至 101 年 12 月
關鍵詞： 節能減碳、LED 路燈 摘要： <p style="margin-top: 10px;"> 行政院於 98 年 4 月 23 日宣布啟動「綠色能源產業旭升方案」，將 LED 光電照明等 7 項產業列為發展主軸，並設定於 2015 年成為全球最大 LED 光源及模組供應國之目標，且於 100 年 12 月核定「擴大設置 LED 路燈節能減碳專案計畫」。配合前述行政院之政策推動，本研究乃針對交通部門推動 LED 路燈之策略進行初步探討。 </p> <p> 由於 LED 路燈與傳統路燈在光源特性、方向性、演色性、色溫、二次光學、燈桿高度、燈頭重量、維護方式及成本等部分，均有一定程度之差異，因此將對道路照明設計產生極大衝擊。世界各先進國家如美國、日本等，目前均仍以示範建置方式，累積相關經驗。 </p> <p> 本研究因應經濟部之 LED 路燈汰換計畫，在考量交通安全、節能減碳及照明設備維護管養等目標下，研擬相關配合推動作法與配套措施。主要研究成果為蒐集探討世界先進國家 LED 路燈最新發展趨勢及推動機制與策略，探討我國目前示範建置成果及使用維護經驗，以及其成本效益與節能減碳效果，最後提出我國國、省道 LED 路燈推動初步建議，前揭成果可作為後續交通部門與經濟部門合作發展 LED 路燈建置政策與策略之參考依據。 </p>			
出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
102 年 8 月	200	160	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： <input type="checkbox"/> 密 <input type="checkbox"/> 機密 <input type="checkbox"/> 極機密 <input type="checkbox"/> 絕對機密 (解密條件： <input type="checkbox"/> 年 <input type="checkbox"/> 月 <input type="checkbox"/> 日解密， <input type="checkbox"/> 公布後解密， <input type="checkbox"/> 附件抽存後解密， <input type="checkbox"/> 工作完成或會議終了時解密， <input type="checkbox"/> 另行檢討後辦理解密) <input checked="" type="checkbox"/> 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: Strategies of Promoting Light-Emitting Diode Street Lights for Transportation Sectors			
ISBN(OR ISSN) ISBN978-986-03-7787-3 (pbk.)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010201687	IOT SERIAL NUMBER 102-132-6165	PROJECT NUMBER 101-TAA006
DIVISION: Interdisciplinary Research Division DIVISION DIRECTOR: Chiung-Wen Chang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Hsin-Hsun Huang (Former Division Director) PROJECT STAFF: Chiung-Wen Chang, Pei-Yun Chu, Yi-Fei Chen, Kuo Yueh Chen PHONE: 886-2-2349-6869 FAX: 886-2-2712-0223			PROJECT PERIOD FROM January 2012 TO December 2012
KEY WORDS: energy conservation and carbon reduction, Light-Emitting Diode (LED) street lighting			
ABSTRACT: <p>The Executive Yuan considers the Light-Emitting Diode (LED) optoelectronic lighting industry and six additional industries as axes for the development of the Dawning Green Energy Industry Program, which was enacted on April 23, 2009, and aims for becoming the world's largest LED light source and module supplier by 2015. In December 2011, the Executive Yuan further stipulated the Expanding LED Street Light for Energy Conservation and Carbon Reduction Project. To support the promotion of these projects by the Executive Yuan, this study conducts a preliminary discussion on the strategies of promoting LED street lights for transportation sectors.</p> <p>A certain degree of difference exists in light source characteristics, directionality, color rendering index (CRI), color temperature, secondary optics, pole height, lamp weight, and maintenance fee and cost between LED and traditional street lights. These factors can have a great impact on road lighting design. Thus, leading countries including the United States and Japan are developing demonstrative designs to accumulate relevant experience.</p> <p>In response to the LED street light replacement policy administered by the Ministry of Economic Affairs, this study considered traffic safety, energy conservation and carbon reduction, and lighting equipment maintenance to formulate promotion methods and complementary measures. The results of this study are primarily focused on identifying and investigating novel trends, promotion mechanisms, and strategies of LED street light development in leading countries. Moreover, we conducted in-depth examinations on the current establishment of street light demonstrations and maintenance experience in Taiwan, and analyzed its cost-effectiveness and efficacy of energy conservation and carbon reduction. Finally, we proposed preliminary suggestions regarding the establishment of LED street lights on national and provincial highways, which could serve as a reference for future cooperation between the transportation and the economic sectors for policies and strategies when establishing LED street lights.</p>			
DATE OF PUBLICATION August 2013	NUMBER OF PAGES 200	PRICE 160	CLASSIFICATION <input type="checkbox"/> RESTRICTED <input type="checkbox"/> CONFIDENTIAL <input type="checkbox"/> SECRET <input type="checkbox"/> TOP SECRET <input checked="" type="checkbox"/> UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

第一章 緒論	1-1
1.1 研究緣起	1-1
1.2 研究目的	1-2
1.3 研究範圍	1-2
1.4 研究內容與研究流程	1-2
第二章 文獻回顧	2-1
2.1 美國	2-1
2.2 日本	2-10
2.3 中國大陸	2-13
2.4 國內	2-19
2.6 小結	2-22
第三章 LED 照明技術初析	3-1
3.1 傳統路燈簡介	3-1
3.2 LED 發光原理及白光 LED 簡介	3-7
3.3 白光 LED 種類	3-11
3.4 白光 LED 效率分析	3-15
3.5 未來 LED 光源技術改良	3-17
3.6 小結	3-24
第四章 LED 路燈照明發展趨勢	4-1
4.1 LED 路燈特性介紹	4-1
4.2 LED 路燈可靠性分析	4-12
4.2.1 LED 可靠度預估方法	4-12
4.2.2 以系統觀點之 LED 路燈可靠度預測方法	4-20
4.2.3 一般路燈可靠度預估方法	4-23
4.3 LED 路燈效率分析	4-31
4.4 LED 路燈發展趨勢探討	4-47
4.5 小結	4-51
第五章 LED 路燈生命週期與實際案例探討	5-1
5.1 生命週期概念簡述	5-1
5.2 LED 生命週期評估	5-3
5.3 LED 路燈成本效益分析	5-17
5.4 小結	5-17

第六章 結論與建議.....	6-1
6.1 結論.....	6-1
6.2 建議.....	6-2
參考文獻.....	參-1
附錄 1 計畫摘要.....	附錄 1-1
附錄 2 簡報資料.....	附錄 2-1

表 目 錄

表 2.1-1	能源節省預測情境表.....	2-4
表 2.1-2	美國主要戶外照明燈具 2010 至 2030 年能源節省比較表.....	2-7
表 2.6-1	美國、日本、中國大陸政府 LED 路燈推動策略比較表.....	2-23
表 4.1-1	2010 年各種路燈光電效率比.....	4-2
表 4.1-2	各種路燈演色性分析.....	4-4
表 4.1-3	LED 路燈與高壓鈉燈照度與均勻度比較.....	4-6
表 4.1-4	各種路燈之 S/P.....	4-10
表 4.1-5	各種路燈特性比較.....	4-11
表 4.2-1	CREE 的 XM 系列之 TM21 效能表.....	4-17
表 5.2-1	照明用 LED wafer 尺寸趨勢.....	5-5
表 5.2-2	燈殼材質溫室氣體排放分級.....	5-14
表 5.3-1	I-35W Bridge 示範計畫路燈價格比較.....	5-17
表 5.3-2	I-35W Bridge 示範計畫實際照度測量.....	5-18
表 5.3-3	I-35W 示範計畫每年電力成本分析表.....	5-18
表 5.3-4	250W 高壓鈉燈路燈維修費用發生項目與更換費用.....	5-19
表 5.3-5	Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫照度實測表.....	5-22
表 5.3-6	Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫還本期間分析 表.....	5-23
表 5.3-7	Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫不同電價之靜態回收週 期.....	5-23
表 5.3-8	Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫不同電價之生命週期成 本.....	5-25

圖 目 錄

圖 1.4-1 研究流程圖.....	1-3
圖 2.1-1 美國固態照明推動架構.....	2-1
圖 2.1-2 LED 使用壽命圖.....	2-2
圖 2.1-3 LED 使用壽命成本示意圖.....	2-3
圖 2.1-4 美國 2005 至 2030 照明使用能源情形預測圖.....	2-4
圖 2.1-5 美國 Multi-Year Program Plan 固態照明預算.....	2-5
圖 2.1-6 2012 年 Multi-Year Program Plan 固態照明預算圖.....	2-6
圖 2.1-7 美國主要戶外照明燈具市場佔有率預測圖.....	2-6
圖 2.1-8 市場演色需求預測圖.....	2-8
圖 2.1-9 Cree LED 城市計畫.....	2-9
圖 2.1-10 美國 LED 技術與政策發展平台.....	2-10
圖 2.2-1 日本 21 世紀光計畫.....	2-11
圖 2.2-2 日本國道設置 LED 照明燈.....	2-13
圖 2.3-1 十城萬盞計畫執行成果.....	2-15
圖 2.3-2 設計不良產生眩光之 LED 道路照明.....	2-16
圖 2.3-3 中國大陸國家半導體照明工程產業化基地布局.....	2-17
圖 2.3-4 廣東高速公路之 LED 路燈.....	2-19
圖 2.4-1 台灣 LED 路燈發展歷程.....	2-21
圖 2.4-2 2010~2014 我國 LED 路燈累積裝置量分析圖.....	2-22
圖 3.1-1 高壓水銀燈.....	3-2
圖 3.1-2 高壓鈉燈示意圖.....	3-3
圖 3.1-3 低壓鈉燈示意圖.....	3-4
圖 3.1-4 複金屬燈示意圖.....	3-6
圖 3.1-5 燈具光電效率發展.....	3-7
圖 3.2-1 LED 等效電路圖.....	3-8
圖 3.2-2 LED 發光原理.....	3-9
圖 3.2-3 MC-E power LED	3-10
圖 3.2-4 流明效率改善示意圖.....	3-11
圖 3.3-1 白光 LED 調色原理.....	3-12
圖 3.3-2 LED 白光產生方式.....	3-13
圖 3.3-3 白光 LED 路燈分類圖	3-14
圖 3.4-1 螢光粉配光之 LED 效率分析.....	3-16
圖 3.4-2 調光之 LED 效率分析	3-17

圖 3.5-1	LED 效率與穩定性提升技術.....	3-18
圖 3.5-2	雙異質接面示意圖.....	3-19
圖 3.5-3	Philips lumileds luxeon LED 晶體.....	3-20
圖 3.5-4	OSRAM Golden DRAGON OVAL LED 晶片.....	3-20
圖 3.5-5	晶圓鍵合技術(Wafer Bonding Technology).....	3-21
圖 3.5-6	Philips Lumileds Luxeon 封裝結構.....	3-23
圖 3.5-7	不同基板材質 LED 成本分析.....	3-24
圖 4.1-1	照明技術演進.....	4-1
圖 4.1-2	海茲定律(Haitz LAW).....	4-2
圖 4.1-3	LED 路燈效率.....	4-3
圖 4.1-4	LED 散熱方式.....	4-5
圖 4.1-5	LED 溫度與光效率關聯圖.....	4-5
圖 4.1-6	明暗視覺關聯圖.....	4-8
圖 4.1-7	LED 路燈與高壓鈉燈明暗視覺關聯圖.....	4-9
圖 4.2-1	LED 發光原理示意圖.....	4-12
圖 4.2-2	ENERGY STAR 標章圖.....	4-13
圖 4.2-3	LED 燈具流明維持率壽命(Lumen Maintenance Life)曲線.....	4-14
圖 4.2-4	不同接面溫度測試 Lumen Maintenance Life.....	4-15
圖 4.2-5	Cree 公司 XM 系列之 TM11 耐用度曲線圖.....	4-18
圖 4.2-6	TM21-11 樣本測試.....	4-19
圖 4.2-7	LED Life Projection.....	4-19
圖 4.2-8	EPA 6X Rule.....	4-20
圖 4.2-9	LED 系統可靠度分析圖.....	4-21
圖 4.2-10	以元件觀點分析 LED 路燈系統.....	4-22
圖 4.2-11	LED 系統功能示意圖	4-22
圖 4.2-12	電子產品失效率曲線 Bath-tub Curve.....	4-25
圖 4.2-13	LED 可靠度與驅動電流關係圖.....	4-28
圖 4.2-14	LED 可靠度與驅動電流、溫度關係圖.....	4-29
圖 4.3-1	色溫(Color Temperature).....	4-31
圖 4.3-2	不同色溫 LED 效率發展圖	4-32
圖 4.3-3	LED 照明光電轉換示意圖	4-33
圖 4.3-4	LED 驅動特性示意圖	4-34
圖 4.3-5	LED 交換式穩壓器.....	4-34
圖 4.3-6	LED 效率轉換示意圖.....	4-35
圖 4.3-7	溫度與效率關係圖.....	4-37

圖 4.3-8 LED 散熱與成本效益關聯示意圖.....	4-38
圖 4.3-9 LED 路燈散熱器圖.....	4-39
圖 4.3-10 LED 路燈壓電風扇示意圖.....	4-40
圖 4.3-11 LED 路燈熱管熱交換散熱示意圖.....	4-41
圖 4.3-12 Cree XLamp XP-G 光效圖.....	4-42
圖 4.3-13 Golden DRAGON Plus.....	4-43
圖 4.3-14 HID 與白光 LED 燈具效率(Luminaire Efficiency)比較圖.....	4-43
圖 4.3-15 LED 路燈光學損失示意圖.....	4-45
圖 4.3-16 LED 入射光角度和介質界面間折射率關聯示意圖.....	4-46
圖 4.3-17 燈罩髒污導致光衰示意圖.....	4-47
圖 4.4-1 LED 燈具效率提升預測示意圖.....	4-48
圖 4.4-2 LED Escape angle.....	4-50
圖 4.4-3 更換封裝材質減少光學損失示意圖.....	4-51
圖 5.1-1 生命週期分析概念圖.....	5-1
圖 5.1-2 ISO 14040:2006 生命週期評估架構圖.....	5-3
圖 5.2-1 LED 生命週期示意圖.....	5-4
圖 5.2-2 照明用 LED wafer 尺寸趨勢.....	5-5
圖 5.2-3 LED 與其他燈具生命週期環境影響比較圖.....	5-6
圖 5.2-4 LED 成本發展趨勢圖.....	5-7
圖 5.2-5 高頻無電極電磁感應燈示意圖.....	5-8
圖 5.2-6 LED 路燈生命週期效益評估圖.....	5-11
圖 5.2-7 LED 與其他燈具 10 萬小時用量預測圖.....	5-12
圖 5.2-8 各類燈具製造階段溫室氣體比較圖.....	5-13
圖 5.2-9 燈殼排放分析圖.....	5-14
圖 5.2-10 各燈具全生命週期比較.....	5-15
圖 5.2-11 各類燈具毒性分析圖.....	5-15
圖 5.3-1 明尼蘇達州 I-35W 橋 LED 路燈示範建置圖.....	5-17
圖 5.3-2 LED 路燈還本期間分析圖.....	5-20
圖 5.3-3 Franklin D. Roosevelt East River Drive.....	5-21
圖 5.3-4 Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫燈具相對位置.....	5-22
圖 5.3-5 生命週期成本評估法.....	5-24

第一章 緒論

1.1 研究緣起

行政院為使我國得於 10 年內發展成為能源產業大國，並引領臺灣社會邁入低碳化與產業高值化目標，已於 98 年 4 月 23 日宣布啟動「綠色能源產業旭升方案」。其中在 LED 照明方面，已設定在 2015 年成為全球最大 LED 光源及模組供應國，產值達到新台幣 5,400 億元之國家目標。另行政院已於 100 年 12 月核定「擴大設置 LED 路燈節能專案計畫」，同意在中央特別統籌分配稅款項下匡列支應新臺幣 20 億元，經濟部於 101 年度核定相關縣市政府申請補助計畫，預計於 102 年度起汰換 25 萬盞水銀路燈。目前經濟部自 101 年起以節能績效保證模式推動：(一)LED 路燈示範城市計畫；(二)101 年 LED 路燈節能示範計畫及(三)擴大設置 LED 路燈節能專案計畫，汰換之路燈對象主要為 8 米以下道路。其中，LED 路燈示範城市計畫係於 101 年至 103 年間於基隆市、新竹市、嘉義市換裝 5.3 萬盞路燈；101 年 LED 路燈節能示範計畫則於偏遠及離島地區汰換 2.3 萬盞路燈；至擴大設置 LED 路燈節能專案計畫，已於 101 年底於臺北市、新北市、臺南市及高雄市完成開標，預計於 102 年 6 月前完成裝設，共計換裝約 18 萬盞。

我國路燈多數仍為水銀路燈，其發光效率僅 35 lm/W，且有汞污染之問題，不符合目前環保、節能之訴求。目前經濟部能源局透過擴大公共建設應用 LED 照明產品方式，推動 LED 路燈應用示範計畫，97 至 100 年累計推動 2.1 萬盞以上之水銀路燈汰換為 LED 路燈，節能效果可達 60%，每年可節省道路照明用電約逾 1,000 萬度。

由於 LED 路燈與傳統路燈在光源特性、方向性、演色性、色溫、二次光學、燈桿高度、燈頭重量、維護方式及成本等部分，均有一定程度之差異，對道路照明設計將產生極大衝擊。因此，交通部門須在兼顧交通安全、節能減碳及照明設備維運管養成本等目標下，預為研擬交通部門相關配合推動作法與配套措施。

1.2 研究目的

本研究主要目的在蒐集探討世界先進國家 LED 路燈最新發展趨勢及推動機制與策略，以及我國目前示範建置成果及使用維護經驗，與其成本效益與節能減碳效果，最後提出我國國、省道 LED 路燈推動初步建議，可作為後續交通部門與經濟部門合作發展 LED 路燈建置政策與策略之參考依據，並期能發揮節能減碳與產業推動雙贏之綜效。

1.3 研究範圍

本研究透過國內、外 LED 路燈推動情形及政策相關文獻回顧，分析 LED 照明技術及 LED 路燈照明發展趨勢，並探討國外 LED 路燈示範計畫生命週期成本效益，以提出後續交通部門與經濟部門合作推動 LED 路燈之策略建議。

1.4 研究內容與研究流程

本研究之研究流程詳圖 1.4-1 所示，具體工作項目說明如后：

- 1.文獻回顧：蒐集美國、日本、中國大陸等國家及國內 LED 路燈政策，瞭解其配套措施及行動方案，做為國內後續推動 LED 路燈政策之參據。
- 2.LED 照明技術分析：介紹白光 LED 照明原理及效率，並探討未來 LED 光源技術改良趨勢。
- 3.LED 路燈照明發展趨勢：探討 LED 路燈照明特性，並分析其可靠性及效率。
- 4.LED 路燈生命週期及實際案例探討：探討 LED 路燈生命週期議題，並就國內外 LED 路燈實例進行分析檢討。
- 5.提出國內國、省道後續 LED 路燈推動策略之建議，作後續交通部門與經濟部門合作發展 LED 路燈建置政策與策略之參考依據。

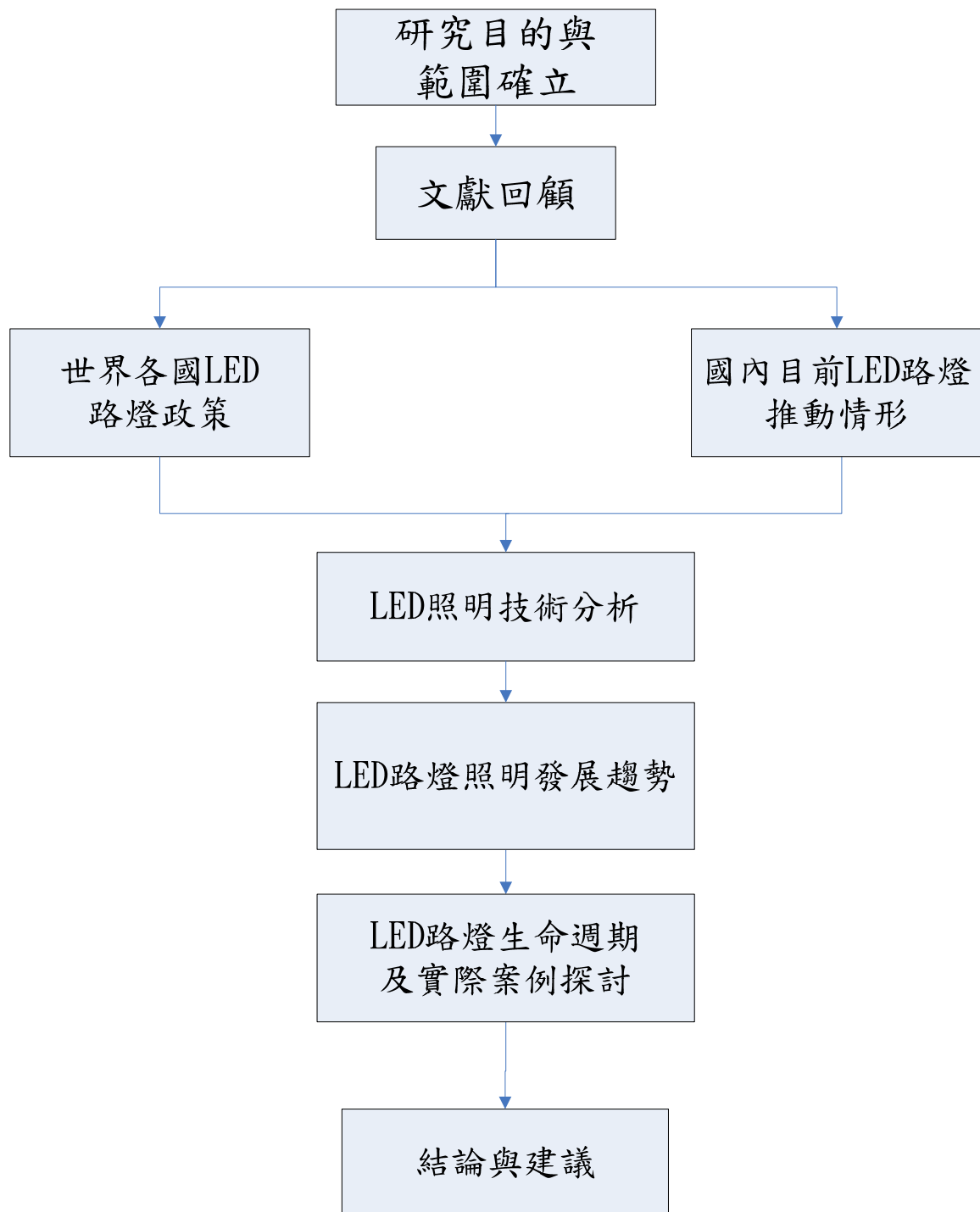


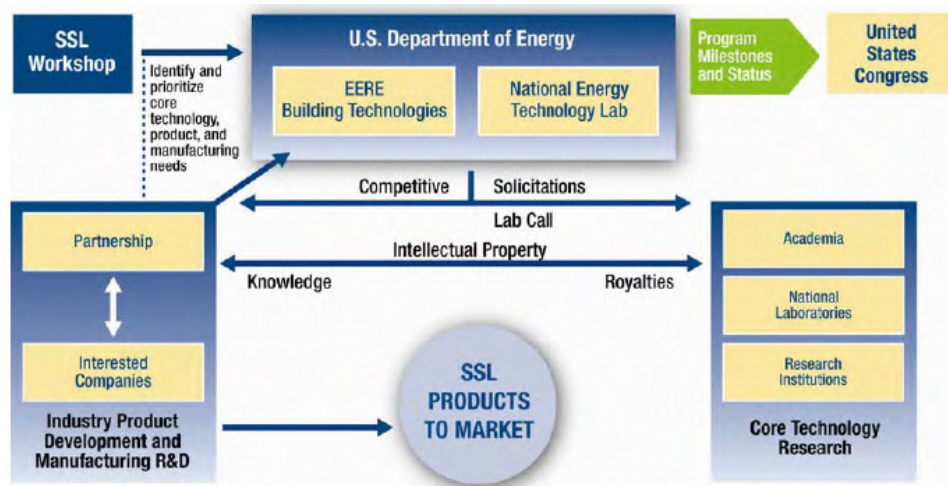
圖 1.4-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

本章蒐集彙整主要先進國家 LED 路燈推動政策情形，分析其成功推動之關鍵因素，以供國內後續推動 LED 路燈政策及配套措施之參據。

2.1 美國

美國在固態照明(Solid State Light, SSL) 發展較早，美國政府做法也相對其他國家積極，2005 年就通過「Energy Policy Act of 2005」以促進固態照明產業的發展。此法由美國能源部(DOE)主導，聯合產業、學界和國家重點實驗室之力量，宣示對「次世代照明計畫」(Next-generation Lighting Initiative, NGLI)的支持。另外，美國能源部從 2004~2012 年，每年提撥 5,000 萬美元支持「次世代照明計畫」，針對固態照明 LED 及 OLED (organic light emitting diode) 兩種技術進行研發，與民間廠商充分合作，主要項目包括尋找提高 LED 效率的半導體材料、LED 燈具結構及系統改善等，如圖 2.1-1 所示。

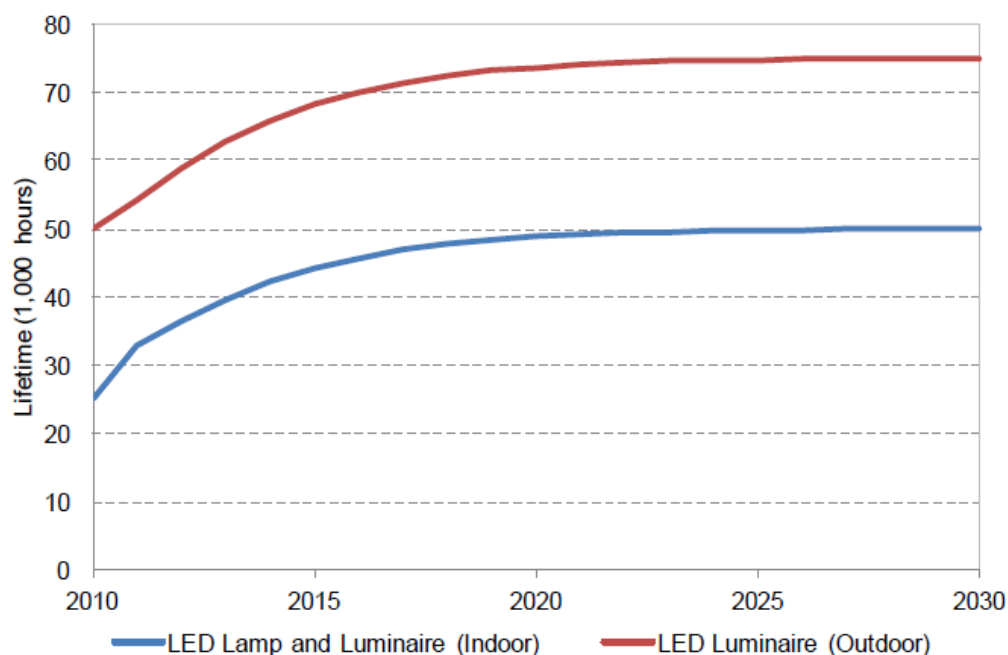


資料來源：Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan March 2012

圖 2.1-1 美國固態照明推動架構

為了固態照明發展，美國能源部大力推動 Solid State Lighting 計畫，預計將投入 5 億美元，進行包括技術發展、標準研究、產品認證

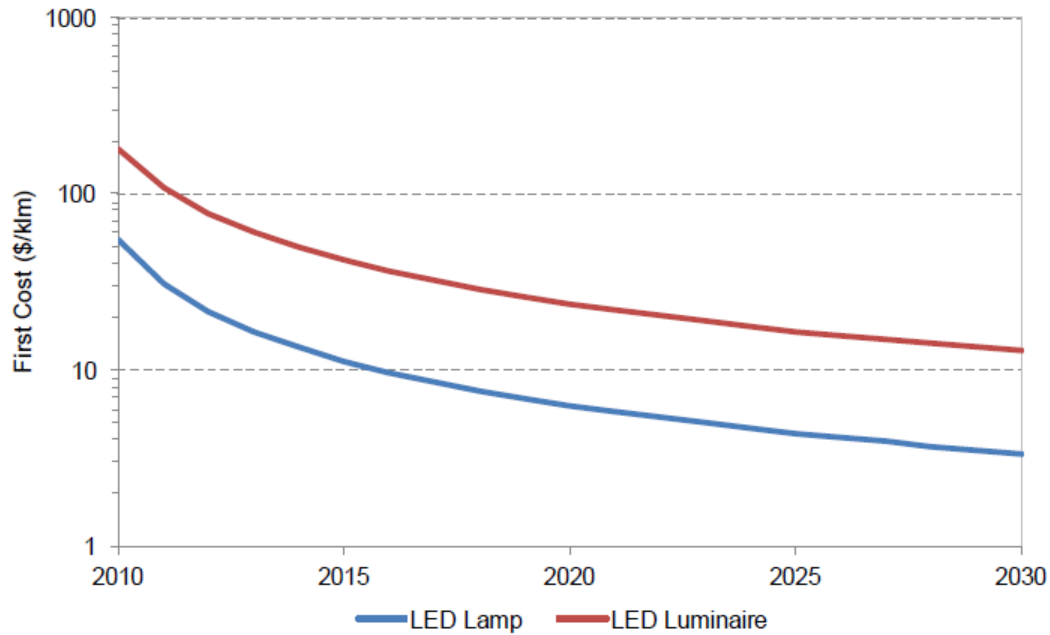
與示範測試，美國能源部認為雖然白光 LED 在目前的效益與價格尚未能與傳統光源直接競爭，不過 LED 照明具有省電、長使用時間等特色，應可吸引照明工業積極投入白光 LED 照明的行列。當然美國也相當重視未來照明工業的發展，藉由 LED 照明技術發展，未來 LED 室內燈具實際使用壽命將由目前 3 萬小時提升至 5 萬小時(戶外部分則將由 5 萬小時提升至 7.5 萬小時)，如圖 2.1-2 所示。



資料來源：Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications

圖 2.1-2 LED 使用壽命圖

因此藉由美國能源部積極推動照明研究計畫，期許 10 年後甚至 2030 年以後，當白光 LED 價格降至不到目前的 10% 時，即每 1,000 流明(Klm)路燈價格由目前將近 200 美元，減少到 20 美元以下，如圖 2.1-3 所示。屆時 LED 照明價格將與傳統照明相當，固態照明將會改變照明歷史，全面取代傳統照明。



資料來源：Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications

圖 2.1-3 LED 使用壽命成本示意圖

根據美國能源部所主導的 Solid State Lighting 計畫，美國能源部一方面是幫有明確核心技術需求之公司向美國國會爭取研發經費，同時也必須將學術界、研究界之研究能量結合起來，引導學術界、研究界的發明結果進入競爭市場，以加速修正研發路線，並且在智慧財產權的歸屬方面，研究機關因擁有專利權，而企業界則擁有製造技術，最後開發出實用之商業產品，進而達到雙贏的局面。此計畫目標為到 2015 年時，固態照明將與傳統照明技術互相抗衡，其目標為最佳的能源效率、較長的壽命，以及有相對的價格競爭力。藉由提升 50 % 的產品系統效率，以加速實現固態照明產品普及化的目標。

美國能源部預估，依照計畫執行的結果開始進行適度的投資，若以投資 LED 為主的情境預測，預估在 2030 年每年可省下約 2.05Quads BTU(quadrillion Btu) 之能源，如圖 2.1-4 所示。若以投資 OLED 為主的情境預測則每年可省下約 1.51Quads BTU 之能源效益，若累積計算 2015 ~2030 年間之總數，在適度投資 LED 照明之下，共可節省 16.02 Quads BTU 之能源計量，若以投資 OLED 照明，則可省下 10.49 Quads BTU 之能源損失，約為 2,000 億美元以上之價值，如表 2.1-1 所示。

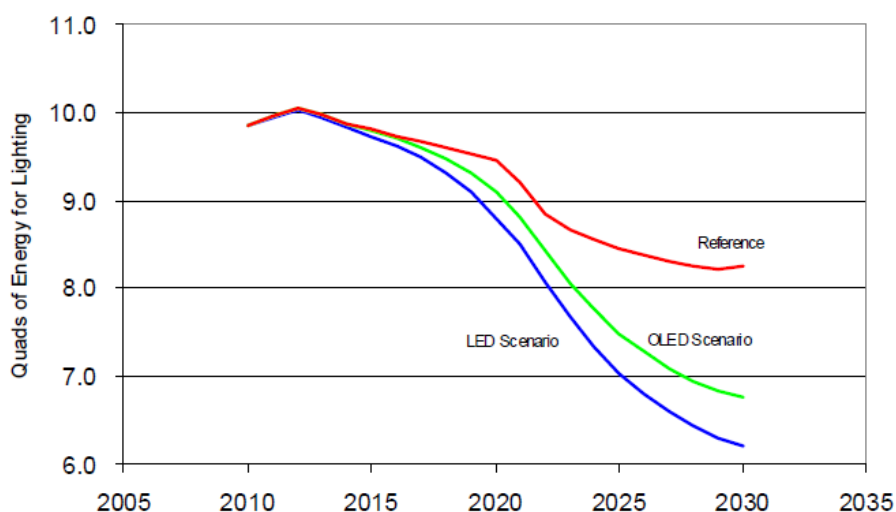
表 2.1-1 LED 與 OLED 能源節省預測情境表

(Quads of primary energy consumption and TWh of site electricity consumption)

Scenario	2015	2020	2025	2030	Cumulative (2010 - 2030)
Reference	9.81 quads	9.45 quads	8.46 quads	8.26 quads	n/a
	911 TWh	878 TWh	785 TWh	768 TWh	n/a
<i>Quads of primary energy savings and TWh of site electricity savings relative to Reference</i>					
LED Scenario	0.07 quads	0.65 quads	1.42 quads	2.05 quads	16.02 quads
	7 TWh	60 TWh	132 TWh	190 TWh	1,488 TWh
OLED Scenario	0.01 quads	0.36 quads	0.96 quads	1.51 quads	10.49 quads
	1 TWh	33 TWh	90 TWh	140 TWh	974 TWh

資料來源：Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications 2010 to 2030

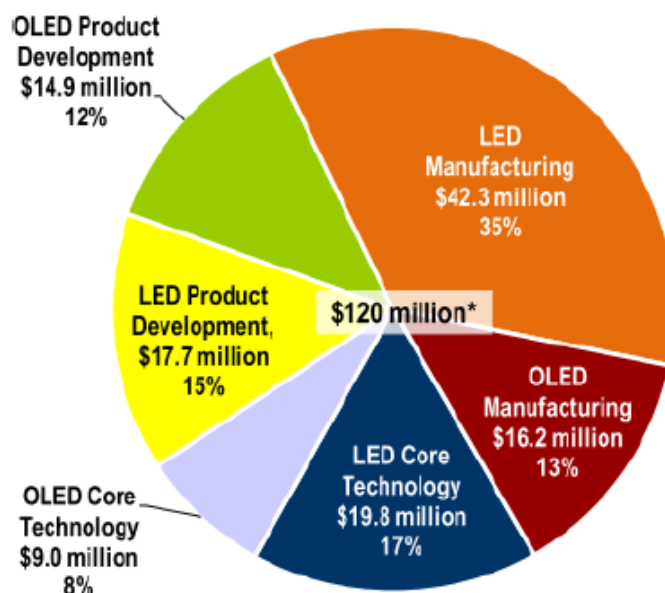
對照明耗能預測，美國能源部 Solid State Lighting 計畫亦針對固態照明發展趨勢分析，雖然隨經濟發展照明需求不斷提高，使能耗相對增加，但隨著節能燈具政策推動，預期將於 2013 年以後耗能可逐漸下降，其中 LED 燈具推動將帶來最大節能效益，若市場成功開展，至 2030 年 LED 燈具推動將可較 2013 年降低約 40%之照明能耗，如圖 2.1-4 所示。



資料來源：Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications 2010 to 2030

圖 2.1-4 美國 2005 至 2030 年照明使用能源情形預測圖

由於看好 LED 和 OLED 的未來性，美國除能源部 Solid State Lighting 計畫進行相關研究測試之外，美國政府亦於「美國經濟復甦與再投資法案」(American Recovery and Reinvestment Act；ARRA) 中，將固態照明列入，並與美國能源部進行 Solid State Lighting 計畫整合，希望能加速推動，以創造節能減碳與產業發展雙贏。



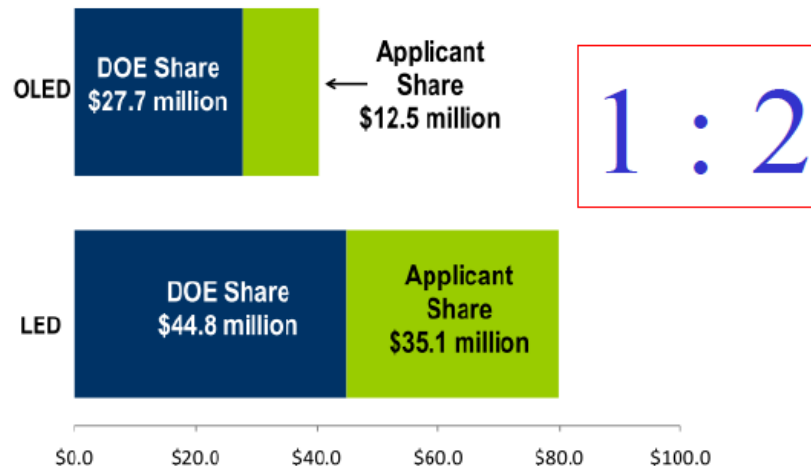
資料來源：2011/2012 Manufacturing Workshop and Roundtable attendees with support from the Cost Model

圖 2.1-5 美國 SSL Multi-Year Program Plan 預算圖

美國能源部與產業、大學、國家實驗室合作加速改進 Solid State Lighting 技術，如圖 2.1-5 所示，主要目標以節能及全光譜白光光源應用在一般照明為主因此 美國能源部支持 Solid State Lighting 研究 6 大項目包括：

1. LED 量子效率
2. LED 壽命
3. LED 燈具穩定性與控制
4. LED 封裝
5. LED 燈具基礎結構
6. 降低整體 LED 燈具成本

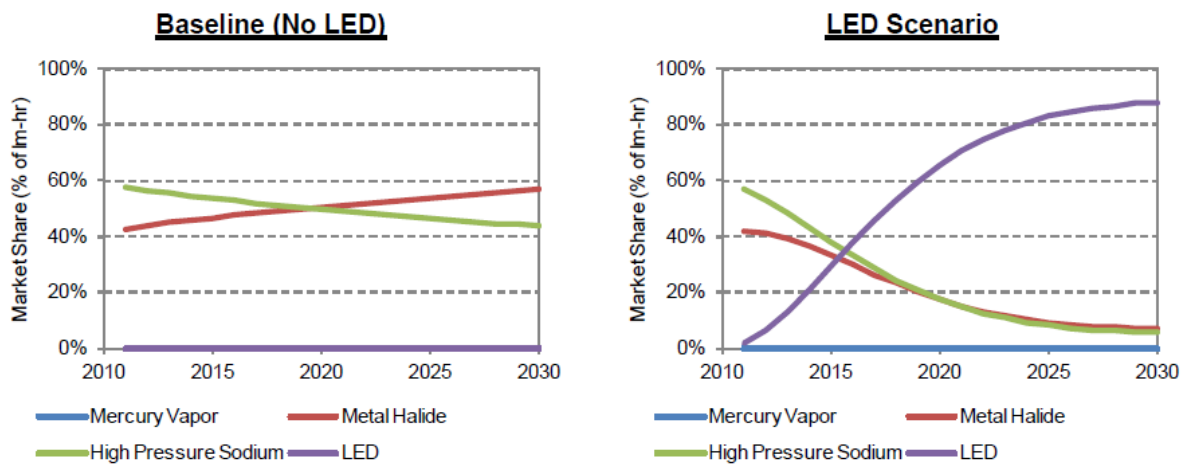
在前述 6 項前提之下，美國能源部支持的 Solid State Lighting 研究以 LED 和 OLED 1 比 2 預算配置分配其研究預算(如圖 2.1-6 所示)。



資料來源：2011/2012 Manufacturing Workshop and Roundtable attendees with support from the Cost Model

圖 2.1-6 2012 年美國 SSL Multi-Year Program Plan 固態照明預算圖

美國能源部以前述針對 LED 技術、價格發展之預期為基礎，估計未來美國 LED 路燈市場發展趨勢如圖 2.1-7 所示，假設只考慮傳統高強度氣體放電路燈及加入 LED 路燈兩種情境，基本上美國能源部認為水銀燈由於效率太差，未來將在市場上消失，若未考慮 LED 路燈，傳統高強度氣體放電路燈則以複金屬燈最被看好，至 2030 年估計將佔有 6 成新建置路燈市場，若 LED 路燈技術、價格發展如預期，則到 2030 年，LED 路燈將佔有 80% 市場，傳統高強度氣體放電路燈將只剩下 20% 以下。



資料來源：Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications 2010 to 2030

圖 2.1-7 美國主要戶外照明燈具市場佔有率預測圖

依據前述遠景，美國能源部於 2012 年固態照明(Solid-State Lighting)在一般照明應用的節能潛力分析顯示 2030 年美國 LED 照明的普及可將能源消耗節省 50%；若以流明-小時(lumen-hours)來計算，到了 2020 年 LED 照明在一般應用市場的普及率將達 65%，並於 2030 年攀升至 87%，如表 2.1-2 所示。

表 2.1-2 美國主要戶外照明燈具 2010 至 2030 年能源節省比較表

	2010	2015	2020	2025	2030	Cumulative (2010-2030)
Baseline site electricity consumption (TWh)	98	101	109	115	121	2,274
LED market share (% of lm-hr)	-	29.3%	65.3%	82.7%	87.8%	-
Site electricity savings (TWh)	-	5	23	44	60	532
Site electricity savings (%)	-	4.8%	20.8%	37.9%	50.0%	23.4%

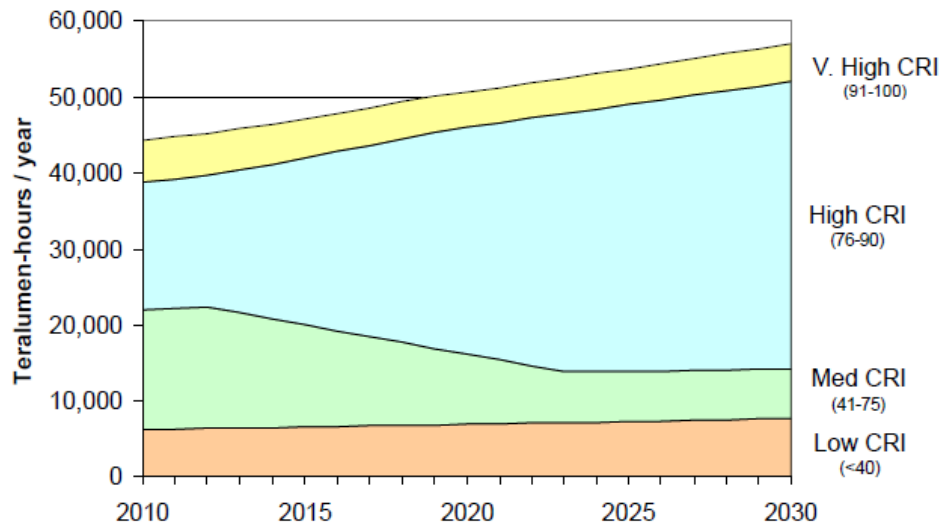
資料來源：Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications 2010 to 2030

美國能源部的 Solid State Lighting 計畫分析未來綠色照明必須兼顧環保與節能高效能照明設備研發趨勢，具備以下 8 項特點。

- 1.高發光效率
- 2.提高使用光源的使用壽命
- 3.有效壽命期內之光束衰減率低
- 4.朝高演色性的光源發展，相對演色性評價係數(Ra,或 CRI) ≥ 80
- 5.色溫的多樣性，依據環境及使用需求自低色溫(2,800K)至高色溫(7,500K)多元發展
- 6.發光穩定性高，低閃爍
- 7.受電壓變動影響輕微
- 8.合理而高效率的照明品質應且兼顧環保與節能策略

以前述 8 點進行評估，固態照明具有壽命長、省電、較耐用、耐震、牢靠、適合量產、體積小、反應快的優點，尤其固態照明省電節能的優點，使得固態照明成為人類下一代照明的希望所在。事實上因為固態照明為自發光源，及它具有的相對優點，如色溫可調整和演色性較一般傳統燈具優良，其演色性指數達 75 以上，屬於高演色性，被看好在 2030 年超過 80%以上之市占率。理由之一係針對未來照明

品質要求之提升，如圖 2.1-8 所示，預期 2030 年高演色性(CRI76~90)燈具佔有率將較目前成長 40%，美國能源部要求，LED 燈具演色性應在 CRI80 以上。



資料來源：Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications

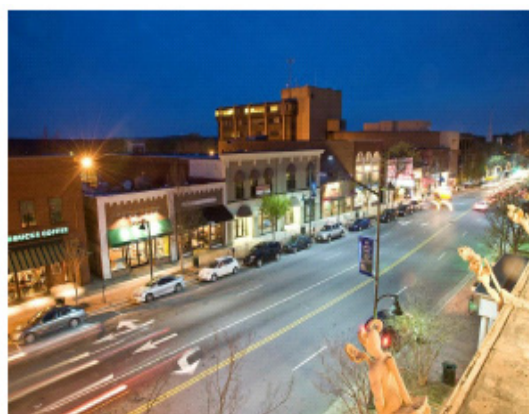
圖 2.1-8 市場演色需求預測圖

美國平均每度電(kWh)排放 0.718 kg 的 CO₂，2012 年估計全美共約有 1.31 億盞路燈和戶外區域照明燈，其中路燈大約 3,500 萬盞，以平均每天使用 12 小時計算，用電量每年約 11.84TWh，其中路燈部分估計相當於排放 3,300 萬公噸的 CO₂，如何減少排碳以減少經濟與環境負擔已是其未來政府施政重要議題。

在 LED 路燈示範方面，自 2008 年起由美國能源部主導的 Solid-State Lighting 計畫中之 SSL GATEWAY 示範計畫，是一項固態照明產品於一般室內和室外照明應用的示範性計畫，並進行實地成效評估，目前已完成 9 項示範性計畫，大多聚焦於道路照明，主要以目前道路照明廣泛使用的高壓鈉燈(HPS)和 LED 路燈作分析比較。而美國復甦與再投資法案(ARRA)通過後，已有多達 30 個左右的城市將提出對 ARRA 經費的申請協助，規劃路燈 LED 化工程。

據美國能源部彙整的研究報告指出，目前美國 LED 技術的演變相當快速，整體而言，LED 每年的實驗室產品發光效率進步幅度約 35%，製造成本降低約 20%。

在民間推動方面，其推動係以 CREE 公司為主，該公司掌握大功率 LED 照明重要關鍵技術，最近有許多城市已宣佈加入 CREE LED 城市計畫（CREE LED City Program）。CREE LED City 計畫成立於 2007 年，鼓勵用戶共享經驗和數據，加速了 LED 照明在城市實施推廣。CREE LED 城市計畫路燈係採用 CREE 公司的 XLamp MC-E 和 XP-E LED，裝設前後情形如圖 2.1-9 所示。由圖 2.1-9 可發現，裝設後道路照明輝度提升，而該計畫換裝之 LED 每盞路燈最大功率為 74W，並宣稱發出的光源照度相當於一個 150W 的高壓鈉燈，預期每盞 LED 路燈節能可達 60%。目前美國能源部估計，LED 路燈若要以節省電費進行還本(Payback)，時間約為 10 年，建議之最佳全面建置時機應在 LED 發光效率達到 150lm/W 以後。

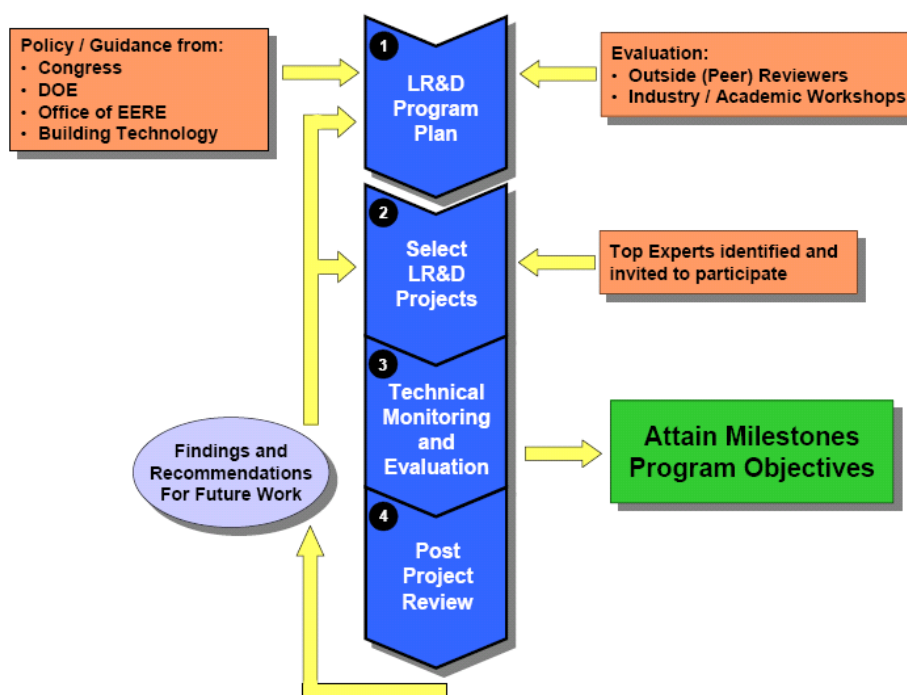


資料來源：CREE LED City Program

圖 2.1-9 CREE LED 城市計畫

在公私部門合作方面，美國能源部公布，CREE LED 城市計畫的美國成員將與美國能源部街道固態照明協會（The DOE Municipal Solid-State Street Lighting Consortium）合作，以 web2.0 觀念建立完整資訊平台，如圖 2.1-10 所示。同時美國照明協會將向 CREE LED 城市計畫委員和評估公共街道及其他公眾地方之固態照明技術的新成員，提供技術指導，同時相關使用結果可供未來制定政策、產業發展之參考依據。CREE LED 城市計畫將同時提供一個 LED 街道照明的學習和交流論壇，使 LED 購買者和製造者可以獲取相關資訊、討論的最佳做法和共享吸取的經驗。

另外美國對 LED 照明標準投入最多，參與之單位包括美國國家標準學會(American National Standards Institute, ANSI)、北美照明工程協會(Illuminating Engineering Society of North America, IESNA)、美國聯邦通信委員會(Federal Communications Commission, FCC)、美國國家標準與技術研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 等，相關標準包含 LED 性能、壽命、電源、模組、照明產品及量測方法等。美國能源部於 2007 年 9 月完成固態照明能源之星的標準，並每年根據技術發展逐年修定，其範圍涵括住商用燈具、室內燈具、戶外燈具(含路燈)等。值得注意其規範 LED 燈具共用標準為色溫、色均勻度、色偏移、演色性、不點燈耗電低於 0.5W、保固 3 年及散熱管理。



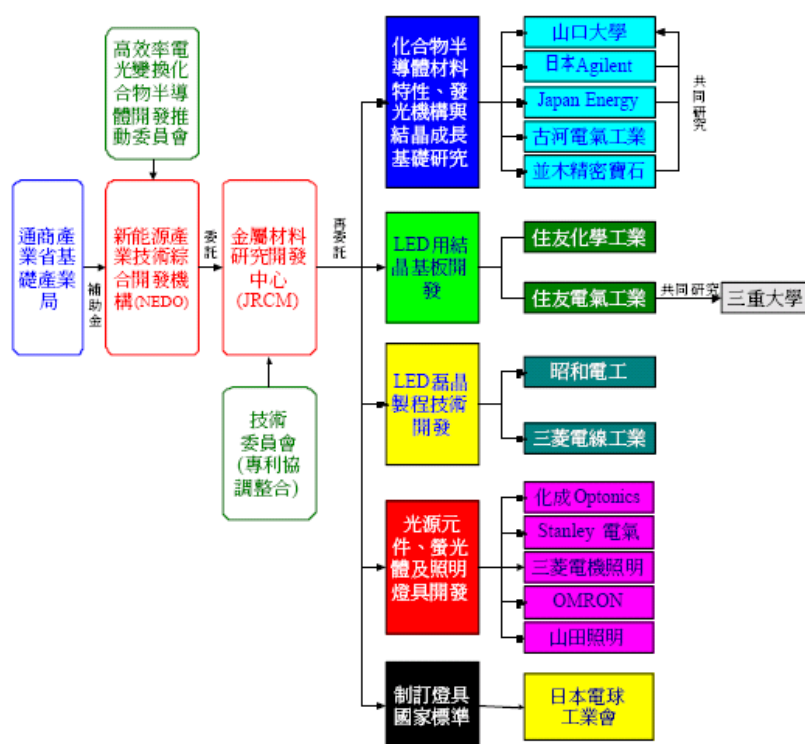
資料來源：Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan. Prepared by Bardsley Consulting, Navigant Consulting, Inc., Radcliffe Advisors

圖 2.1-1 美國 LED 技術與政策發展平台

2.2 日本

以進度而言，國際上以日本「21 世紀光計畫」(高效率電光變換

化合物半導體開發計畫)係最先驅發展且快速。這項自 1998 年開始，為期 5 年的整合性計畫，目前已經有商品化的白光 LED 照明燈具，如圖 2.2-1 所示。日本對白光 LED 的投入非常積極，一方面是因為日亞公司掌握全球技術的領先地位，另一方面是日本政府因應 1997 年 12 月全球氣候變化綱要公約締約國第三次會議(COP3)中，同意於 2010 年時因使用能源而產生之 CO₂ 排放量能較 1990 年更安定化，以防止地球溫暖化以及減少 CO₂ 排放量，因此將民生部門的節約能源列為重要課題。日本國內照明方面所耗電力約佔全國之 20%，希望藉由省能源型之照明裝置的開發而達到上述目標，因此具有低耗電、長壽命、小型以及輕量等優點的 LED 便列為開發新節能照明實用化的目標。與美國「次世代照明計畫」以經濟發展為主不同，日本「21 世紀光計畫」係以節能為主要訴求。



資料來源：Japan LED Association

圖 2.2-1 日本 21 世紀光計畫

日本 21 世紀光計畫結束之後，由日本電球工業會(Japan Electric Lamp Manufacturers Association, JEL)、日本照明學會(Illuminating

Engineering Society of Japan, JIES)、日本照明委員會(Japan's Commission on Illumination, JCIE)、日本照明器具工業會(JIL)四大團體在 2004 年成立日本 LED 照明推進協議會(Japan LED Association, JLED) 並於 2005 年完成「照明用白光 LED 量測標準」，此一標準曾在 2006 年 3 月修改，提交日本工業標準(JIS)審核而在 2007 年 7 月成為日本工業標準。在推動國際標準方面是由日本政府主導，期望達成標準國際化，政策方面日本政府與國際能源總署合作，技術方面則與日本照明委員會及日本照明學會共同合作。日本 LED 照明推進協議會於 2010 年提出建議之 LED 照明設計準則：

1. 符合工作要求的照度水準
2. 照明器具的選擇
3. 對照明環境的考慮
4. 易於維護管理的設計
5. 有效的配線設計與照明控制系統

雖然日本 21 世紀光計畫已於 2003 年結束，後續日本並未有以技術研發為主體大型國家計畫出現。但觀察日本 LED 政策走向，發現日本對於 LED 產業政策發展已轉向，由過去以協助技術成長為主，轉向於建構/培養需求市場，具體作為以協助 LED 標準設立及租稅獎助 LED 使用，以擴大市場。其技術或標準均由民間廠商自行負責，技術方面日本廠商已掌握磊晶與螢光粉重要關鍵專利，標準目前由日本 LED 照明推進協議會負責業界標準制定事宜。故日本政府方面已逐漸將 LED 政策主導權由通產省轉向國土交通省，其國土交通省於 2010 年 11 月率先在東京都江東區的國道約 1km 的區間內設置約 40 盞 LED 照明燈，之後並於 2011 年 3 月底前在九州島地區國道設置 50~60 盞 LED 照明燈(如圖 2.2-2 所示)，藉此對 LED 照明燈進行測試。國土交通省計畫藉由上述指導方針，來促進日本企業加速研發 LED 燈泡，降低利用成本，增加國道導入 LED 燈泡的數量。



資料來源：<http://www.pref.osaka.jp/dorokankyo/led/bosyuu.html>

圖 2.2-2 日本國道設置 LED 照明燈

日本 21 世紀光計畫研究顯示，由於日本在電力能源上的消耗量比 15 年前增加了 50%。此現象若持續下去，在 2050 年前需建造幾十座發電廠，其結果可能造成自然環境之破壞與地球環境的污染。同時，CO₂ 之持續排放亦使地球溫度不斷地上升。因此為了產生新的電力能源，目前各界正提倡各種新的發電系統，但目前包括太陽能發電、風力發電等清淨能源僅佔日本全部發電量 6% 以下，而且上述的新能源在製造時會有較高的成本負擔問題，因此如何有效的利用現有的能源乃是人類重要的課題。目前日本照明用電量約佔總用電量的 20%，而在都市裡所使用之電力若可降低 1/2 時，預估將可減少一個發電廠。換言之，未來必須在維持目前生活水準之前提下積極節省能源，來達到節約電力消耗的目的，尤其在福島核災之後，日本政府更加積極推動 LED 照明。

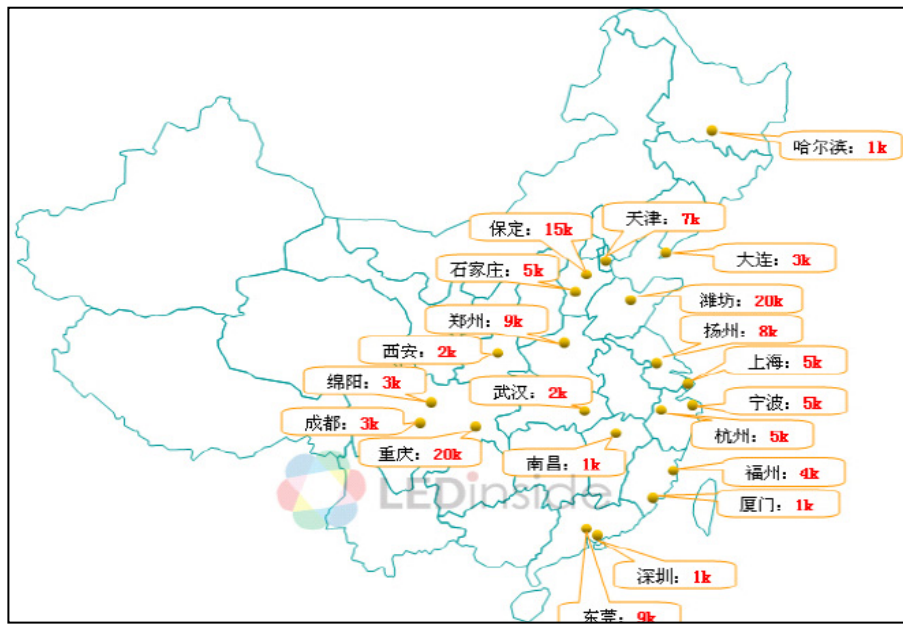
2.3 中國大陸

中國大陸路燈市場規模約達 2,800-3,000 萬盞左右，每年新增路燈約在 150-200 萬盞，目前所使用路燈種類係以水銀燈與高壓鈉燈為主。中國大陸在 2007 年左右投入 LED 路燈建置，發展時間相對美國、日本、我國和南韓等國家晚，且其技術能力遠遠不及前述各國。

但由於中國大陸政府對於政策貫徹力極高，以致於在 LED 路燈發展上，越過小區域、產品示範測試階段，直接進入大區域路燈 LED 化工程，希望能帶動其 LED 照明產業發展後來居上。

中國大陸於 2003 年 6 月啟動國家半導體照明工程，2006 年 2 月提出國家中長期科學技術發展規劃綱要，主要係由科技部、工信部、財政部、交通部等 13 個部會組成發展委員會，主要任務係支持地方政府全力投入 LED 照明建置。2008 年中共正式提出十一五計畫項下「SSL 重點計畫-十城萬盞」半導體照明示範計畫-以降低能源依賴與碳排放及平衡外銷型經濟為兩大戰略目標，為當今世上最大半導體照明示範計畫，同時由信息產業部於 2005 年 11 月成立「半導體照明技術標準組」，並結合交通部、地方政府、協會、產業聯盟架構其半導體照明技術標準體系，技術規範涵蓋 LED 磊晶片、晶粒、元件、模組、LED 相關材料與照明應用產品等，自 2009 年起至 2011 年相繼制定了 LED 道路隧道照明產品節能認證技術規範、LED 道路隧道照明產品節能認證規則與電磁兼容認證規則等，依照產品生產和使用的現狀制定節能認證技術規範，利於政府公共工程採購單位參考所需之 LED 標準技術規範。

十城萬盞計畫共分三階段，自 2009 年開始為所謂試點階段，於 20 個試點城市建置 100 萬盞 LED 公共照明燈具，以及 LED 零組件國產比例 60%，並達成年節約電力 2.2 億度目標。2010~2012 年為示範階段，將擴增至 50 個試點城市、200 萬盞 LED 公共照明燈具、LED 零組件國產比例 70%並達成年節約電力 10 億度目標。最後進入全面推廣階段，SSL 占全國通用照明 30%以上、節約電力 1,400 億度以及百萬人就業，並成為世界 SSL 前三強(目前為日本、美國、韓國與我國)，中國大陸 SSL 重點計畫預定之 LED 照明推廣順序：運輸場站(地鐵、機場、停車場)、火車車廂、加油站、隧道、一般道路至通用照明，2009 年執行狀況如圖 2.3-1 所示。



資料來源：LEDinside

圖 2.3-1 十城萬盞計畫執行成果

中國大陸 LED 路燈快速發展有許多的原因，2012 年中華人民共和國國家發展和改革委員會歸納其中最重要的四大因素如後所述。

1. 環保、節能減碳

中國大陸自 2009 年超過美國成為全球碳排放第一大國之後，為了自身的國際形象及永續發展，對節能減排及綠色產業較為重視，LED 照明符合大陸對「節能減排」這一國策的要求。十二五計畫以 2015 年路燈預期安裝量 250 萬盞計算，能夠實現年節電 18 億度，將可超過大陸中央政府 10 億度的年節電目標。在「減排」方面，按 0.374 公斤/度計，可節約 6.7 億噸標準煤；按 0.011 公斤/度計，可減排 0.2 億噸二氧化硫；按 0.83 公斤/度計，可減排 14.9 億噸二氧化碳。其節能「減排」效果很明顯。此情境係以 125W 的 LED 路燈替換 250W 高壓鈉燈進行估算，中國大陸政府認為，若是以功率較大的 250W LED 路燈替換 400W 高壓鈉燈，節省的電能絕對值更大，「減排」效果也更明顯。因此大陸從中央政府到地方政府，基於節能「減排」的特點，將 LED 路燈列為重點發展項目，希望以官方示範帶動民間消費。

2. 電價上漲

由於能源價格高漲，大陸電力企業聯合會對電價改革課題進行分析研究，於 2010 年提出電價改革中長期路線圖。其提出的改革路徑是：2011~2013 年實施並完善煤電或氣電聯動機制，研究所謂 2 部制電價實施細則，簡單來說，就是提高電價。

中華人民共和國國家發展和改革委員會認為之前 LED 燈具較難推廣的原因，除了 LED 燈具本身較高的造價之外，其相對歐美先進國家較低的電價也造成 LED 燈具在使用中「省電不省錢」的尷尬局面，即節省的電費無法抵消購買 LED 燈具的增加費用，希望將電價合理化後，透過官方公共照明示範，促使其民眾自動接受 LED 燈具。

3. LED 路燈效率提升、價格下降

早年由於中國大陸 LED 產業剛起步，LED 路燈技術不成熟，發光效率較低，光色偏冷，散熱技術嚴重影響 LED 路燈整體壽命、節能效果與宣傳不符，LED 路燈價格和維護成本都很高，產品良莠不齊，依據中國國家電光源質量監督檢驗中心觀察，有些地區的街道試點了 LED 路燈 1 年後，變成「鬼街」(即整段路沒有一盞 LED 路燈點亮)的「批量化」出現，或不亮或忽明忽暗、色偏嚴重，同時並未考慮道路鋪面，造成路面反光嚴重，造成車輛用路人和附近民眾對 LED 路燈無法接受，反而對 LED 照明推展造成困擾。



資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Street Lighting

圖 2.3-2 設計不良產生眩光之 LED 道路照明

但中華人民共和國國家發展和改革委員會認為中國經過近幾年的技術發展和積累，隨著大功率 LED 光效迅速提高和價格的持續下降，加上近幾年電源與驅動電路可靠性、散熱技術、色溫及照度等技術均有不同程度的提升，LED 路燈逐步進入實用階段。2012 年 11 月中國大陸國家半導體發光器應用產品品質監督檢測中心宣稱，其國產 LED 晶片平均初始光電轉換效率達到 131.42lm/w，已超過了目前國際包括美國、日本與臺灣等 LED 三強之 LED 平均初始光電轉換效率，領先國際進入成熟推廣期，惟國際上大多存疑。

4.扶持各地方政府大力發展之 LED 產業

LED 產業既符合大陸其「節能減排」國家政策的要求，又符合大陸目前產業升級和轉型及解決就業的迫切需求，因此受到眾多地方政府的高度重視，中國大陸很多省份都將發展當地 LED 產業作為因應十二五發展的一項重要績效工程、LED 路燈數量已成為各省重視之代表性實力指標。已先後建成上海、深圳、廈門、大連、南昌、揚州、石家莊、天津、杭州、武漢、東莞、西安和寧波共 13 個國家級半導體照明產業基地(如圖 2.3-3 所示)。由於各地政府發展 LED 態度積極，因此大陸 LED 路燈建置數量才會超過其中央政府指派的數量，超越既定的發展目標。



資料來源：<http://www.topology.com.tw>

圖 2.3-3 中國大陸國家半導體照明工程產業化基地布局

有關中國大陸的 LED 路燈推動，利用 EMC(Energy Management Contract)，即合同能源管理，是一種新型的市場化節能機制，其實質為一種以減少的能源費用來支付節能專案全部成本的節能業務方式。其主要精神係仿照歐美日等國家於 1980 年代及目前我國所推動之節能績效保證契約 (Energy Saving Performance Contract, ESPC)

大陸政府發展 LED 產業，一般有 2 種 EMC 合作模式：(1)對於每年節省的電費按比例由政府與廠商分成，逐年返還，直至完成合同約定金額為止，通常在該模式下，合同執行週期較長；(2)對於每年節省的電費，全額返回給 LED 廠商，直至合同約定金額為止。

依據中國國家電光源質量監督檢驗中心分析，由於 LED 路燈產品不成熟、本土廠商技術低劣、跳躍式 LED 路燈發展模式、中央監督力度不足，造成中國大陸目前 LED 路燈建置面臨損壞率超過 30%、執行率卻超前 25%、節能未達到預期績效等問題，亦讓 LED 照明產品負面訊息不斷，反使民間購買意願不如預期。惟中國大陸生態獨特，導致各地地方政府與相關廠商，仍積極投入此一市場，如廣東省於 2010 年開始大規模實施「千里十萬」大功率 LED 路燈產業化示範推廣工程，即在廣州、東莞、佛山、中山、肇慶、汕頭等市間高快速公路建設 LED 路燈，總里程 1,500 公里左右，直接將 LED 路燈應用於高快速公路(如圖 2.3-4 所示)，建置規模約 10 萬盞的 LED 路燈示範推廣工程，其中 2011 年 9 月勤上光電完成大陸首次大規模應用 LED 路燈於高速公路(深圳高速公路)，共計 120 公里的 LED 路燈高速公路及隧道燈照明工程，採用 100W 的 LED 路燈取代原有的 250W 的高壓鈉燈。是迄今為止世界第一個大規模應用 LED 路燈的高速公路項目，深高速也是目前大陸應用 LED 路燈里程數最長、要求最嚴格的高速公路項目。廣東省政府宣稱達到節能 70%與地面平均照度 20lux 之目標，同時於 2012 年宣布在 2015 年底前，廣東將自行建置 200 萬盞 LED 路燈，中國大陸建置 LED 路燈之規模與進度均超過美國、日本與我國等當今世界 LED 前三強。



資料來源：<http://www.topology.com.tw>

圖 2.3-4 廣東高速公路之 LED 路燈

目前國際上普遍認為大陸政府於 2015 年實現 200 萬盞 LED 路燈的目標似乎過於保守了一點。至 2011 年底，大陸 LED 路燈已安裝數量約為 75 萬盞(包括 LED 隧橋燈)，較 2009 年 20 餘萬盞成長了 257%，據中華人民共和國國家發展和改革委員會於 2012 年初統計，其 LED 路燈之複合年增率（Compound Annual Growth Rate，CAGR）高達 89%。在大陸中央和地方政府的大力推動及其他相關因素刺激下，根據中華人民共和國國家發展和改革委員會統計 2012 年全年大陸 LED 路燈的安裝數量達到 110 萬盞，且後續仍將以 31% 的 CAGR 高速增長，至 2013 年底將提前完成大陸中央政府制定的 2014 年 200 萬盞 LED 路燈目標，2015 年將實現大陸 LED 路燈 250 萬盞的市場規模，估計相較政府同期目標超額 25~100%。

2.4 國內

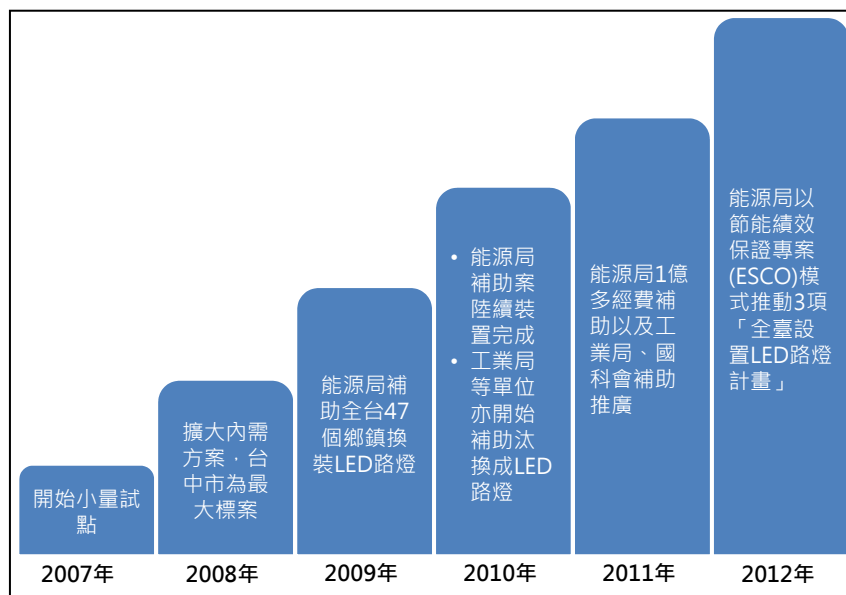
行政院於 98 年 4 月 23 日宣布啟動「綠色能源產業旭升方案」，以積極推動我國具有良好產業基礎及躍升能量的綠色能源產業，為使我國得於 10 年內發展成為能源產業大國，主要目標即係引領我國的社會邁入低碳化與產業高值化的境界。其中以包括太陽光電、LED 光電照明、風力發電、生質燃料、氫能與燃料電池、能源資通訊、電動車輛等 7 項產業為發展主軸。而在 LED 照明方面，以 2015 年成為全球最大 LED 光源及模組供應國，產值達到新台幣 5,400 億元為國家目標。

2012 年起依行政院 2011 年 12 月 1 日第 3275 次院會通過「經濟景氣因應方案」七大策略之「助產業」項下「全臺設置 LED 路燈」措施，並以節能績效保證模式(ESCO)推動：LED 路燈示範城市計畫、2012 年 LED 路燈節能示範計畫及擴大設置 LED 路燈節能專案計畫，預定 3 項計畫陸續投入經費約新台幣 27.68 億元，換裝約 32.6 萬盞 LED 路燈，每年可節約 1.43 億度電，減少 8.75 萬公噸二氧化碳排放，帶動新台幣 44.81 億元產值。

在示範建置方面，由於我國政策導向係以產業發展為主，故目前由經濟部能源局負責主要推動計畫，能源局自 97 年起(如圖 2.4-1 所示)，分別於臺中市、嘉義市、臺中縣、南投縣、新竹市等 13 個縣市 8 米以下道路進行 LED 路燈換裝測試。

我國目前 LED 標準制定由經濟部標準檢驗局所主導，近幾年積極支持相關國內 LED 業界廠商組成產業聯盟，齊力制定標準草案，並送交至經濟部標準局進行最後的審查與國家標準的公告。2007 年 6 月經濟部技術處推動「LED 照明標準及品質研發聯盟」制定完成 LED 晶粒、元件模組、光源系統到應用產品的量測標準與品質改善驗證方案，擬定 17 項草案送交經濟部標準檢驗局。經濟部標準檢驗局則據以針對 LED 路燈領先世界推出 CNS15233 LED 路燈標準。在運輸部門配合方面，臺北松山國際機場已於 2009 年建置 LED 路燈，桃園火車站預計 2010、2011 年全面改為 LED 照明，成為國內第一個改為

LED 照明的火車站，交通部公路總局於 100 年開始於南投縣台 76 號快速公路進行 LED 路燈測試評估，高速公路局則是於 101 年起，選擇部分休息站展開測試。



資料來源：工研院 IEK 台灣 LED 路燈市場發展概況

圖 2.4-1 國內 LED 路燈發展歷程

我國在 LED 發展上與世界各國相比較，具有產業發展與分工體系完整等優勢，分述如下：

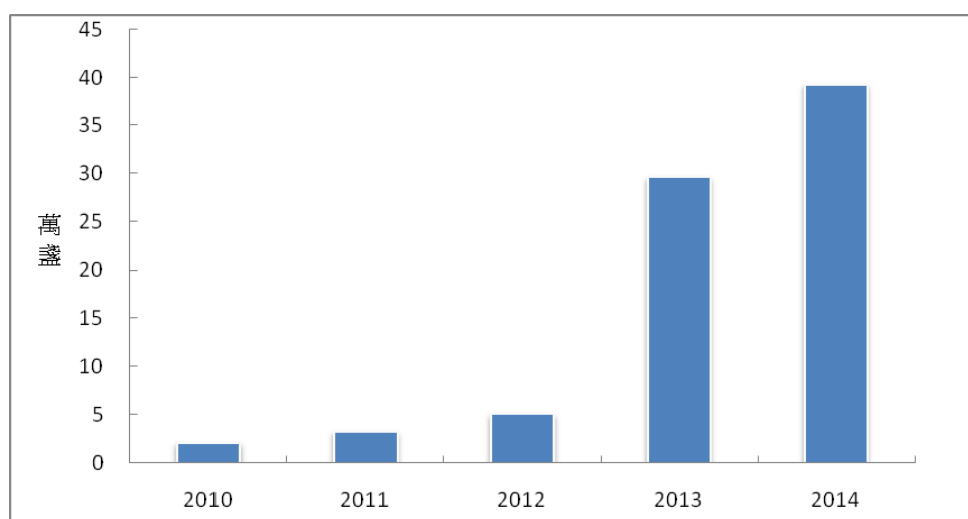
- 1.LED 元件及背光模組產業量產能力優越：包括掌握全球高亮度 LED 約 40-50%左右產能、LED 元件產值全球第二、LCD 背光模組產值全球第一。
- 2.產業結構相對美國、日本與中國大陸完整。
- 3.我國為中小企業產業結構，靈活具有彈性，有利於市場開拓。
- 4.兩岸簽訂 ECFA 後之關係調整，可進軍中國大陸之十城萬盞計畫並與其節能補助政策結合之商機。
- 5.我國擁有之有機金屬化學氣相沉積 (MOCVD, Metal-organic Chemical Vapor Deposition)機台密度世界第一。

但我國在發展上，仍面臨關鍵專利掌握於美國與日本、重要生產設備無法自製等缺點，以及面臨韓國快速進逼壓力，為此行政院研擬包括技術突圍、關鍵投資、環境塑造、出口轉進、內需擴大等五大主

軸策略予以因應，冀望未來我國於 LED 路燈發展能夠有突破性之成長。

我國於執行 LED 路燈示範建置過程中發現，高快速公路與主幹道在 LED 路燈的適用性上仍有困難，若沿用現有燈桿距離與高度直接更換 LED 燈具，往往造成均勻度欠理想，同時造價偏高(高壓鈉燈 4 倍以上)、使用壽命無法達到號稱的 3 萬甚至 5 萬小時的壽命、節能效益不如預期等問題尚待克服，現階段僅適合建置於 8 米以下之新設道路，尚不適合全面建置。

我國 LED 路燈市場主要成長動力來自於政府政策支持及補助，因此近幾年來政府大力支持之下，國內 LED 路燈裝置量不斷成長。2011 年國內 LED 路燈累積裝置量為 3.2 萬盞左右。未來在能源局以節能績效保證專案(ESCO)模式，推動 3 項「全臺設置 LED 路燈計畫」執行後，將帶動市場大幅成長，2012 年 LED 路燈累積裝置量達 5 萬盞以上，2014 年將有機會成長至 39.3 萬盞，詳如圖 2.4-2 所示。



資料來源：工研院 IEK 台灣 LED 路燈市場發展概況

圖 2.4-2 2010~2014 我國 LED 路燈累積裝置量分析圖

2.6 小結

過去 LED 由於發光效率低，光通量低，因此並不期望其能應用於路燈。但因 LED 技術快速成長，產品特性不斷改良，發光效率提升、成本降低與演色性已經大幅提升至具有實用性階段與價值，使得 LED 路燈發展被寄予節能減碳與帶動產業之厚望，各先進國家紛紛投入相關研究或建

置。

由美國、日本、中國大陸發展經驗可知，LED 路燈未來已是潮流所趨，由於各國國情、技術能力、政府扮演角色、目的、發展方式均不相同，彙整如表 2.6-1 所示。是故，推動 LED 路燈必須採循序漸進、因地制宜等原則與以推動，並考量技術成熟度、產業發展等策略因素，以確保能發揮 LED 路燈最大效益。

表 2.6-1 美國、日本、中國大陸政府 LED 路燈推動策略比較表

項目	美國	日本	中國大陸
發展目的	建立產業	節能減碳	建立產業 節能減碳
主導部會	能源部	國土交通省	中央集體領導(包括科技部、工信部、交通部、財政部等 13 個部會)
優勢	重要關鍵技術掌握 (調光技術、大功率 LED 技術)	重要關鍵技術掌握 (磊晶與螢光粉)	政府創造超大內需
關鍵計畫	次世代照明計畫	21 世紀光計畫	十一五計畫
執行方式	按部就班	按部就班	跳躍式
標準制定	政府、民間	民間聯盟	政府
示範建置	地方政府與民間	中央政府	中央政府監督、地方政府執行
建置區域	都市街道、運輸場站	都市街道 運輸場站 高速公路	逐步擴大設置
建置範圍	小區域	小區域	大區域

資料來源：本研究整理。

第三章 LED 照明技術初析

發光二極體(Light Emitting Diode, LED)是一種利用積體電路技術產生的固態光源，和傳統燈具加熱產生方式不同。LED 燈具有體積小、耐震性佳、省電、壽命長、顏色多樣等優點，在國際能源價格上漲、溫室氣體 CO₂ 之減量需求與節能環保壓力的發展趨勢，以 LED 替代一般照明光源已成為全球共同發展之目標。

由於白光 LED 仍屬於發展中技術，目前製造技術隨功率的大小有不同選擇，如小功率所普遍採用藍光 LED 搭配螢光粉產生白光、大功率白光 LED 採調光技術等。未來在公共照明應用上，其發光效率與傳統燈具相比，如何降低價格、提昇品質與節能效率超越目前表現優異、品質可靠之高壓鈉燈是世界各國發展重點。

3.1 傳統路燈簡介

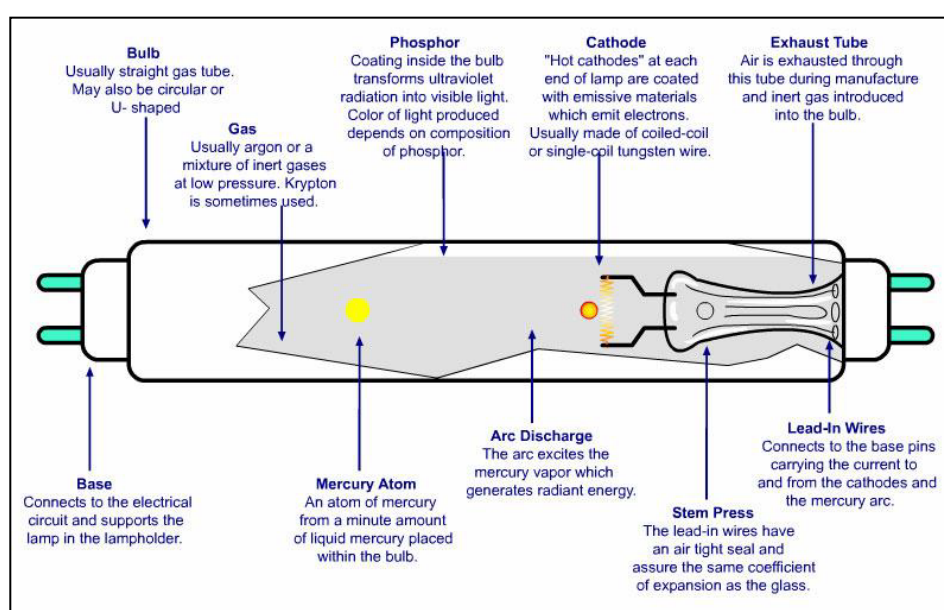
根據工研院 IEK 統計，我國 2010 年路燈總數量約 180 萬盞，總耗電量達 17.3 億度。不過由於道路建設已日趨完整，因此未來路燈市場規模將有限，僅呈現微幅成長情形，至 2012 年我國路燈市場規模約 182 萬盞左右。2011 年國內路燈使用光源仍以水銀燈為主，市場佔有率達 50% 左右，其他係以高壓鈉燈、低壓鈉燈、複金屬燈、金屬鹵化燈所組成，占比最大之水銀燈發光效率與總流明輸出均為最差。

目前全世界路燈照明主流仍為高強度氣體放電燈具 (High-intensity discharge, 簡稱 HID) 燈泡，高壓鈉燈、低壓鈉燈、複金屬燈、金屬鹵化燈這些燈泡均屬此類，即發光元件是一顆置於耐高溫燈管 (弧光管) 內安定的電弧放電器，並有超過 3 W/cm² (19.4 W/in.²) 的發光能力。

水銀燈在我國目前道路系統係最廣泛應用，目前水銀燈有「低壓」、「高壓」和「超高壓」三種類型，高壓水銀燈發光效率較低壓水銀高，使用壽命長，可用於街道的照明，而超高壓水銀燈是一種點光源，主要用於光學儀器。

高壓水銀燈在正常點燈狀態下，其燈管內水銀蒸氣氣壓高達

1~2.5 氣壓左右。有內管與外管雙重構造(如圖 3.1-1 所示)，內管為發光管，在兩端有主電極，上面塗有放電物質。管內依照發光的體積充入適當份量的水銀，而且為了幫助啟動也在管內放有少許的氬氣。當主電極與補助電極間開始作局部放電時，漸漸使主電極間產生主放電。放電一開始，水銀蒸氣氣壓還相當低，但是只要等到因為放電而使溫度升高、水銀蒸發後，放電的光色慢慢趨近白色到穩定後，管內的水銀全部蒸發為氣體，使放電電弧集中管的中心，同時管電壓輝度、效率皆上升。



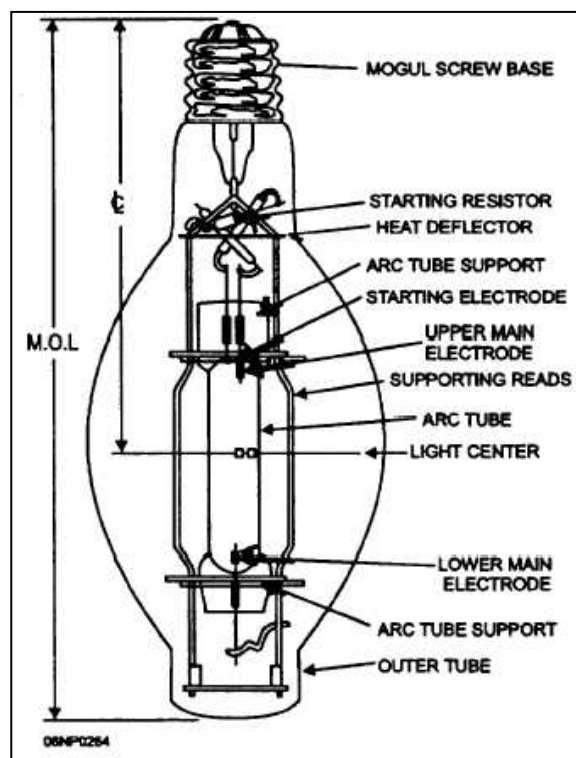
資料來源：High Intensity Discharge Lamps

圖 3.1-1 高壓水銀燈

水銀燈完成前述點燈全部程序大約需要 3~6 分鐘才能完成，且有低溫啟動不易與汞污染的問題，不過由於產品單價低，因此廣泛使用在路燈中，但其效率差(約 30~60lm/W)一直被詬病，2010 年我國水銀燈市場佔有率已逐漸下滑至 49%左右。經濟部能源局自 2012 年起已規劃禁止新建道路裝設水銀路燈，並逐步禁止採購水銀路燈，預計於 2018 年全面禁用水銀路燈。

目前道路主管單位用於取代水銀路燈係高壓鈉燈(high pressure sodium lamp,如圖 3.1-2 所示)，高壓鈉燈的研製始於 1930 年代，當時是為了改善低壓鈉燈單色性太強、顯色性很差、電弧管過長等缺點。

高壓鈉燈研製過程中遇到兩個主要問題：一是電弧管材料問題。要提高鈉蒸氣壓，使蒸氣壓強達到 $2.67 \times 10^5 \text{Pa}$ 左右，管壁溫度須維持在 700°C 以上，可使其顯色性大為改善，亮度提高。其原理為啟動後，電弧管兩端電極之間產生電弧，由於電弧的高溫作用使管內的鈉汞齊受熱蒸發成為汞蒸氣和鈉蒸氣，陰極發射的電在向陽極運動過程中，撞擊放電物質有原子，使其獲得能量產生電離激發，然後由激發態回複到穩定態；或由電離態(plasma state)變為激發態(excited-state)，再回到原來無限循環，多餘的能量以光輻射的形式釋放，便產生了光。高壓鈉燈中放電物質蒸氣壓很高，也即鈉原子密度高，電子與鈉原子之間碰撞次數頻繁，使共振輻射譜線加寬，出現其它可見光譜的輻射。同其他氣體放電燈泡一樣，另一問題係高壓鈉燈工作是弧光放電狀態，其電流電壓特性曲線為負斜率，即輸入電流上升，而燈泡電壓卻下降。在恒定電源條件下，為了維持高壓鈉燈穩定地工作，電路中必須串聯一具有正阻特性的電路部件來平衡這種負阻特性，穩定工作電流。電弧管是燈的關鍵部件，直接影響燈的光電參數及壽命，多採用耐高溫、耐高壓、抗鈉腐蝕的半透明多晶氧化鋁陶瓷管製作。

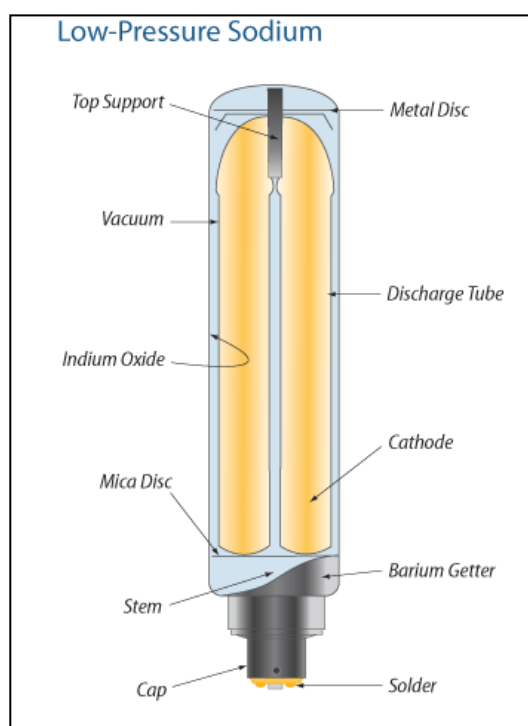


資料來源：<http://www.pwm.pe.kr/MH400EB.pdf>

圖 3.1-2 高壓鈉燈示意圖

由於高壓鈉燈發光效率達 110~160lm/W 之間，單一燈具可提供之總發光流明達 25,000 流明以上，具有優越的光輸出，再加上產品單價合理，因此逐漸取代水銀燈成為路燈最普遍使用的光源，2009 年路燈市場佔有率約 35%左右，預估 2015 年將成長至 38%左右。

低壓鈉燈(如圖 3.1-3 所示)為目前高強度氣體放電燈具中效率最高，係利用稀有氣體(低壓鈉)放電原理而發光，其原理為室溫時鈉是固體，單純使用鈉的氣體放電燈不易啟動。在燈的玻璃管內充入氬氖混合後，電弧放電並產生熱量使放電管溫度提高，導致鈉開始蒸發；因鈉的電離電位和激發電位比氬和氖低，放電很快轉入鈉蒸氣中，輻射出可見光。低壓鈉放電波長主要集中在 589.0nm 和 589.6nm 的兩條光譜上，發光效率極高，約 200lm/W 左右，但光色近於黃光，演色性甚差，因受限於物理特性，其顏色較無法調整。



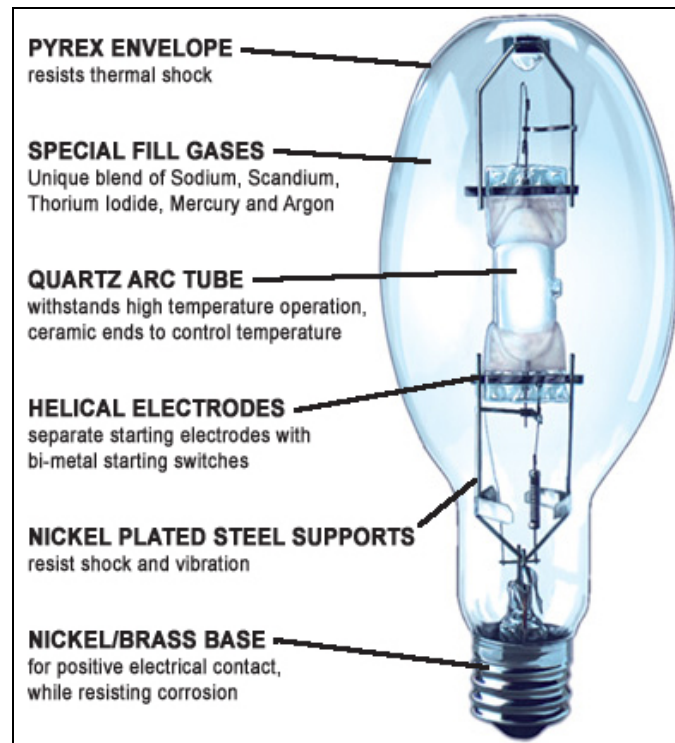
資料來源：High-Intensity Discharge Lamps Analysis of Potential Energy Savings

圖 3.1-3 低壓鈉燈示意圖

低壓鈉燈是目前可以買的到發光效率最高的產品(如圖 3.1-3 所示)，目前大部分用於隧道，因為它的燈管太長，反射器的設計比較難，因為燈管長所以成本也會變的比較高，且目前只有少數幾家大廠

有能力生產，如 OSRAM，PHILIPS 等，且其功率多限制於 200W 以下，加上其色溫與演色性調整空間較少，在應用上限制比高壓鈉燈多，這也是低壓鈉燈這麼多年來一直沒法變成道路照明主流產品的原因。在目前道路交通節能照明應用上，高壓鈉燈是比較成功的產品。

複金屬燈(Metal Halide Lamps)又名金屬鹵化燈(如圖 3.1-4 所示)，是高壓水銀燈改良性光源，經歷 50 年由石英管(Quartz ARC Tube)演進到陶瓷管(Ceramic ARC Tube)，大幅提升演色性、發光效率及光穩定性，複金屬燈工作時，由於燈內存在大量電子、正離子等帶電粒子，這些粒子在電場作用下形成電流，但由於正離子質量大、速度慢，所形成的電流可以忽略。複金屬燈發光的基本過程可分為三個階段的物理機制 (1)自由電子被外加電場加速形成電子流；(2)當運動的電子與氣體原子碰撞時，電子的動能就轉交給原子使其激發；(3)當受激原子返回基態時，所吸收的能量以輻射發光的形式釋放出來。自由電子不斷地被外加電場加速，而上述過程也就不斷地在燈中進行。在複金屬燈燈管內，由於管壁和電弧中心溫度相差很大，金屬鹵化物會產生分解和再複合的循環過程，在管壁的工作溫度下，金屬鹵化物大量蒸發後，因濃度梯度而向電弧中心擴散。在電弧中心的高溫區域(約 $4,000^{\circ}\text{K}\sim 6,000^{\circ}\text{K}$)，金屬鹵化物分子分解為金屬原子和鹵素原子，其中金屬原子參與放電，並產生輻射；鹵素原子則獲得自由電子，形成負離子。由於電弧中心金屬原子和鹵素原子的濃度較高，其向管壁擴散，在接近管壁的低溫區域又重新複合成金屬鹵化物分子。如此不斷地循環，而電弧中心也不斷地有足夠濃度的金屬原子，作為輻射發光之用。

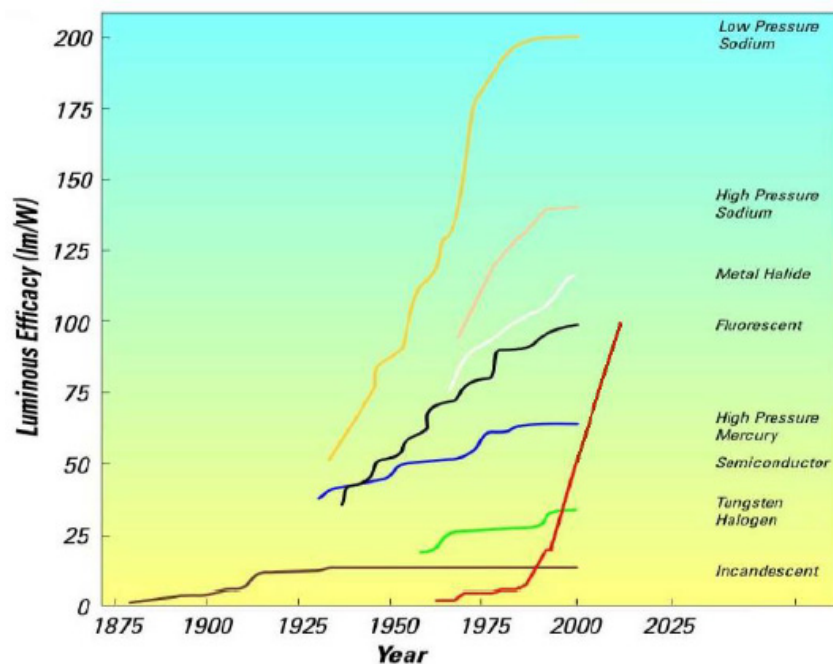


資料來源：National Lighting Product Information Program (NLPIP), Lighting Answers: Mid-Wattage Metal Halide Lamps

圖 3.1-4 複金屬燈示意圖

目前複金屬燈商品性能發光效率達 110Lm/W 以上、演色係數達 80 以上，壽命超過 10,000 小時，提供功率範圍 20~400W 可以選擇，其主要缺點為音頻共振 (Acoustic Resonance) 的特性，會造成弧光放電不穩定、光輸出變動和色溫改變等情形，但複金屬燈仍為高強度氣體放電燈具中最具潛力的光源。

低壓鈉燈的缺點在於色溫低、演色性差，目前用於道路及隧道照明。高壓鈉燈的演色性較佳，其又藉由增加填充氣體的壓力以增加效率，此即所謂強光型高壓鈉燈，其常用於隧道照明。由於鈉燈具有高效率、壽命長及低光衰減的特性，在部分場合有逐漸取代演色性不佳、效率低及壽命短的水銀燈的趨勢。



資料來源：High-Intensity Discharge Lamps Analysis of Potential Energy Savings

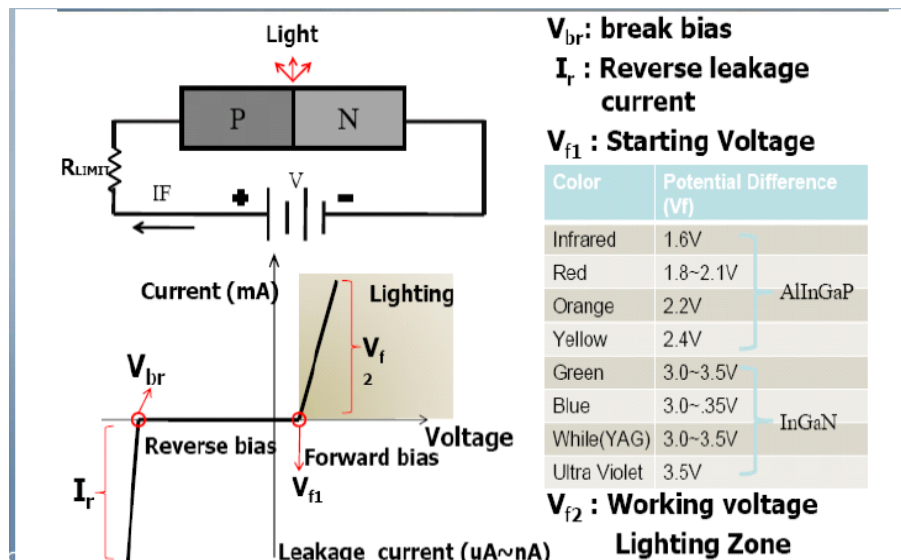
圖 3.1-5 燈具光電效率發展

3.2 LED 發光原理及白光 LED 簡介

隨著科技進步，發光技術逐漸由鎢絲加熱演進到氣體加熱，照明之效率和照明品質也被要求更高。目前光源技術依發光原理分為熱輻射發光、氣體放電發光、場致發光(electroluminescent)、半導體發光四大類。發光二極體(Light Emitting Diode, LED)是一種利用積體電路技術產生的固態半導體光源，和傳統燈具加熱產生方式不同。早年，發光二極體以指示光源為最主要的應用，應用於照明領域相當少，僅應用於指示燈。不過過去三、四年來，由於發光二極體製造成本持續降低，以及效率和亮度不斷提高，配合製程技術改善，LED 燈具發光效率逐漸提昇、演色性進步以及色溫、波長逐漸可以和傳統燈具相近，使其照明應用領域更為寬廣，其節能潛力亦逐步展現。近年來，LED 在各國政府全力推動下，其發光效率及性能改善皆達到一定水準，透過各研發單位所訂定的目標，可以發現未來的 LED 照明發展將走向超高亮度及高功率、高效率的時代。在國際能源價格上漲、溫室氣體 CO₂ 之減量需求與節能環保壓力的發展趨勢下，以 LED 替代

一般照明光源已成為全球共同發展之目標。

發光二極體 LED 是一種特殊的二極體，其工作原理雖和普通的二極體一樣，由 P-type 半導體與 N-type 半導體組成（如圖 3.2-1 所示），然普通二極體大多只提供電路開關控制。而 LED 係利用此特性產生固態光源，和傳統燈具加熱產生方式不同。LED 與普通二極體一樣，兩者的電流可以藉由順偏(Forward)從 P 流向 N，普通的二極體當電洞（Hole）和電子(Electron)產生複合（Recombination）會產生空乏區(depletion region)，但在發光二極體中，此區域被稱為主動區(active region)，由此區域以光子的模式釋放出能量，產生之光具方向性，係以電流直接驅動電路，與其他光源以加熱氣體方式並不相同，產生熱量較低。



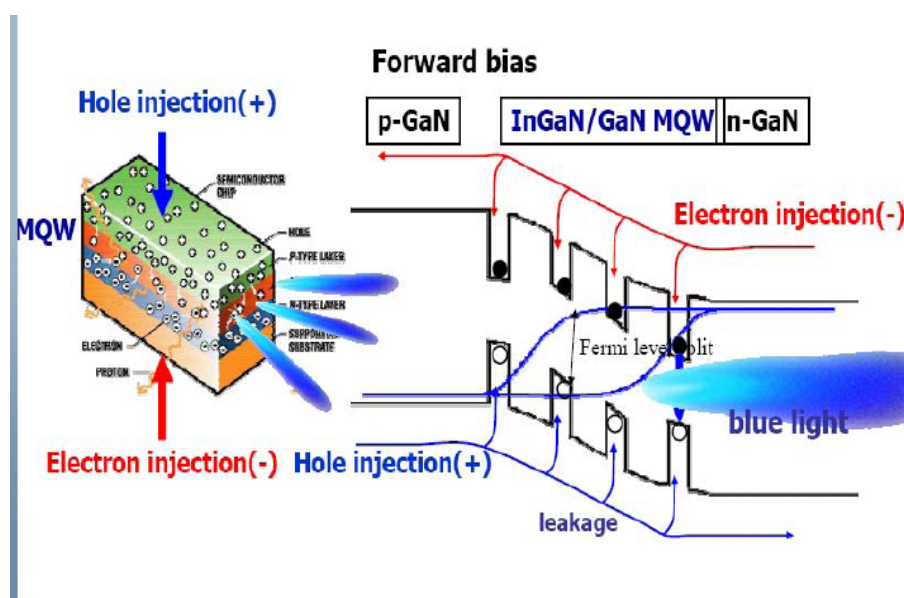
資料來源：Solid-State Lighting: Preparing for the Opportunity

圖 3.2-1 LED 等效電路圖

進一步觀察圖 3.2-1 可以發現，LED 啟動電壓約 1.6V，比一般常用之二極體約 0.5~0.7V 高，AlInGaP（磷化鋁鎵銦發光二極體）之 LED 在 1.6V 偏壓狀況下，產生光線為紅外線(Infrared)，AlInGaP 透過佈植(doping)的改變，可製造出直流電壓 1.8V 之時，產生紅光的效果，同樣方式電壓在 2.2~2.4V，則陸續可產生包括橘光及黃光。InGaN（氮化銦鎵發光二極體）之 LED 則可產生綠、藍等顏色之光源。

由前述可知 LED 發光的波長、顏色等係利用材料產生之量子效應(Quantum effect)來決定，藉由佈植造成材質變化產生量子井

(Quantum Well)，在電子和電洞複合之同時（如圖 3.2-2 所示），部分能量以光子形式釋出，和傳統加熱氣體產生光線原理並不相同，稱為固態光源（Solid State Light, SSL），LED 因佈植的材料不同，其內量子井產生的能階（Energy Step）變化也有所不同，結合後釋出的光子能量不同，造成啟動之工作電壓亦不相同，因而產生不同波長的光，也就是不同顏色的光可以藉由佈植和其他參數如透明導電薄膜 (Indium tin oxide, ITO) 厚度等調整，精確控制所要顏色，圖 3.1-2 即為藍光產生過程。由於 LED 係工作於順向偏壓狀態，故量子效應 (Quantum effect) 將影響能隙 (bandgap) 大小，藉由能隙大小之改變，同時可以決定偏壓大小、產生光子之數量與通過電流，乃致決定 LED 發光效率。



資料來源：LED Street Light Feature Sirio Model

圖 3.2-2 LED 發光原理

LED 於 1962 年第一個商用可見光產品問世，但由於製程技術的關係，大多只有小功率、紅光的產品，一直到 1993 年日本 NICHIA 商用藍光 LED 問世，該公司工程師 Nakamura (中村修二博士)，在 1996 年發表白光 LED，使 LED 進入照明領域，1999 年，該員又進一步提升 LED 使用功率，產生更佳亮度之白光 LED 照明，從此全世界開始投入 LED 照明發展。

1996 年前後由中村修二博士發展出來的白光 LED 光源產品，是

使用Ⅲ_V族氮化物半導體材料製作藍光LED，再搭配黃光螢光粉所製成。其中LED的藍光經由黃光螢光粉的部分進行光轉換及混光作用而獲得白光，這類白光LED的推出引起全球的矚目，其後發展分為單晶封裝和多晶封裝兩種，這兩種方式若以目前於路燈應用之高功率LED的設計製造，需要克服兩個最大的難題是：散熱問題以及如何讓其照明之品質達到指定要求。而面對這兩個問題，先前市場一般以採用多個單晶LED為主流，而非採用多晶封裝，因多晶封裝尚需考慮不同顏色或製程造成晶粒品質不一問題。但美國CREE公司宣稱已於2010年6月成功發表4晶封裝MC-E power LED(如圖3.2-3所示)，已成功解決了前述問題。

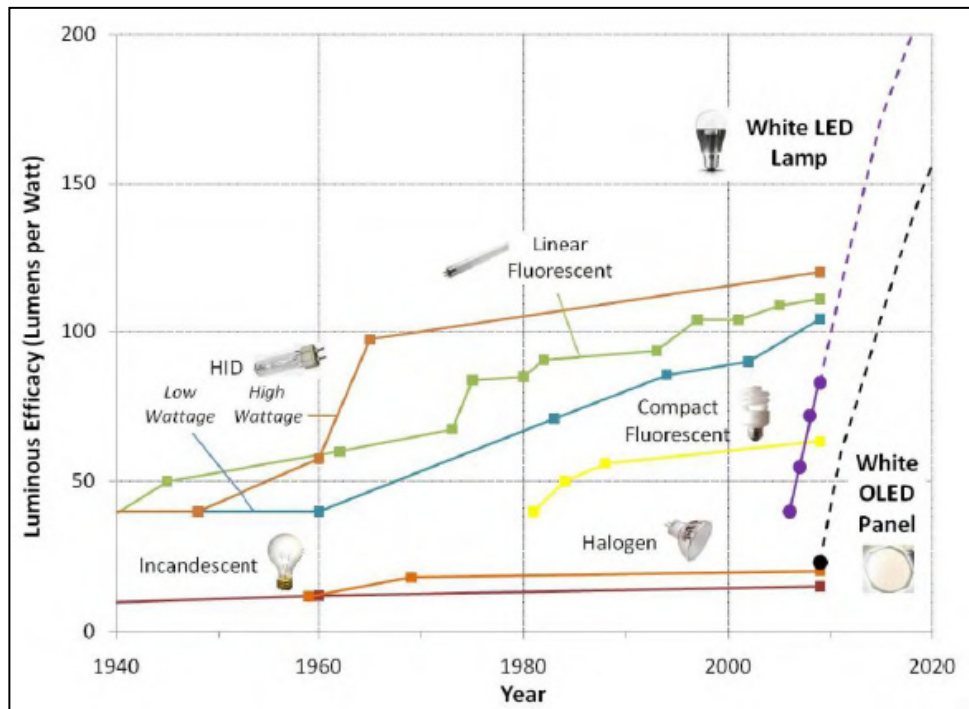


資料來源：<http://www.cree.com>

圖 3.2-3 MC-E power LED

2010 年底 CREE 公司已經可以量產供應 160lm/W 的 XLamp X-ML 的 LED 封裝元件，價格也隨量產技術增進不斷地降低，2009 年 2 月，日亞化學工業公司發表了效率高達 249 lm/W 的 LED，此為實驗室數據，2012 年 4 月及 10 月 Cree 實驗室發表 254 lm/W 及 269 lm/W 的 LED 照明產品再度刷新紀錄。投入 LED 照明技術研發是全球性的。白光 LED 性能在最近 5 年有突破性的進展，無論是晶粒、封裝與應用都有顯著成果。雖然在基板與取光技術仍積極發展中，散熱問題也仍存在，白光 LED 的發光效率在實驗室已宣布達到 260Lm/W 以上，超過預期，因此美國與日本均預計白光 LED 商用產品的發光效率 2020 年應可提高到 200Lm/W 的理想目標(如圖 3.2-4 所

示)。白光 LED 的出現，使高亮度白光 LED 的應用領域跨足至需要高效率照明光源的市場，近年來白光 LED 發光效率逐步提升下，對照明產品應用的領域更加的多元化。



資料來源：LED Street Light Research Project Remaking Cities Institute
Pittsburgh, Pennsylvania September 2011

圖 3.2-4 流明效率改善示意圖

對於所有照明元件而言，光電轉換效率(發光效率)是所有技術核心與產品發展關鍵課題。隨著 LED 由過去指示或標誌應用領域擴展至照明領域發展，由於其所面對之傳統光源如高壓鈉燈之價格相當便宜，LED 為了替代傳統光源，擴展 LED 在照明市場佔有率，勢必須要大幅度降低產品成本，縮短與傳統光源如高壓鈉燈採購價格(Initial Cost)之落差，並在效率上大幅超越傳統光源才行。因此，提昇 LED 發光效率與降低成本即成為 LED 技術發展兩大挑戰。

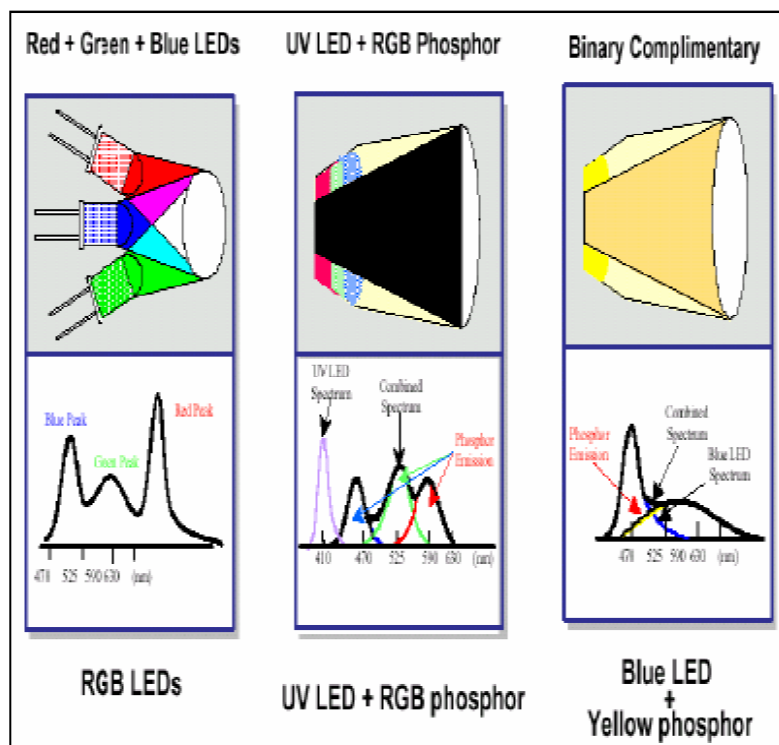
3.3 白光 LED 種類

目前白光 LED 照明的種類，依照其光源激發之方式(如圖 3.3-1)，其原理可概略分為以下 4 種：

- 1.運用紫外光發光二極體(UV LED)激發螢光物質，產生紅、藍、綠三

種色光後再混合成白光。此種方式產生之白光演色係數約為 75~80，色溫範圍約為 5,000~6,500K。此種白光 LED 具有驅動電路簡單、成本低等優點，佔有目前大部分的市場。

- 2.利用綠色與紅色螢光物質塗抹在藍光 LED 上，以發出白光。此方式因演色係數過低，因此前景並不被看好。
- 3.運用黃色的螢光粉以及藍光 LED，使黃光與藍光混合後發出白光。此種方式需要克服光環效應，並進一步改善螢光物質的轉換量子效率與溫度穩定度
- 4.混合紅、藍、綠三顆三原色 LED 的發光得到白光。而為了獲得白光，紅、綠、藍的亮度比為 3：6：1；或只利用紅、綠或藍、黃兩顆，利用調整其個別 LED 亮度方式發出白光。

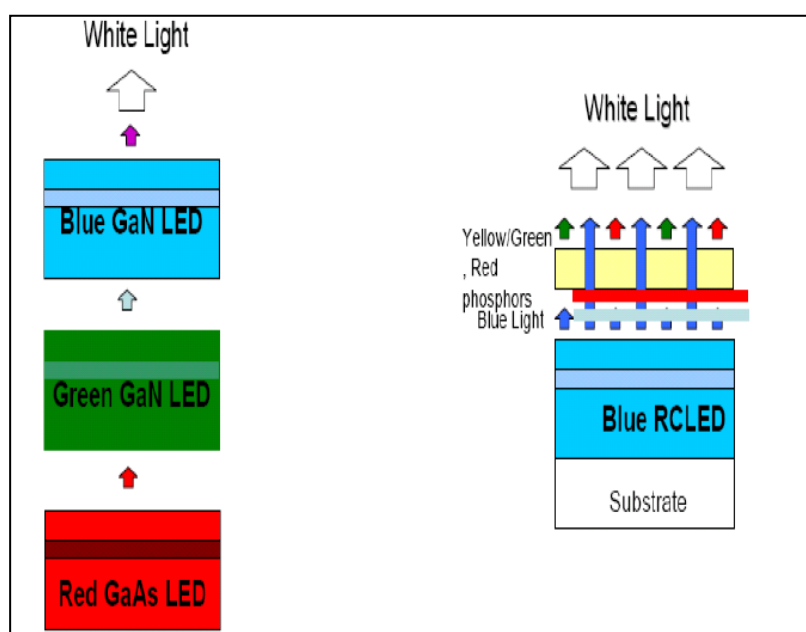


資料來源：LED City. 2010. <http://www.ledcity.org/>

圖 3.3-1 白光 LED 調色原理

若更加簡單說法，前 3 種係利用螢光粉 (Fluorescent) 進行配光，其原理類似螢光燈以紫外光 (Ultraviolet、UV) 激發螢光粉的白光 LED 模式(如圖 3.3-2 所示)，在 2000 年開始之日本與美國國家型照明發展計畫中備受重視，因為此種技術所製作的白光 LED，在搭配

高效率的三色或多色螢光粉後，將具有更好的演色性，容易調配的色溫，並減少因為藍光 LED 在各放射角度光強度不均勻所導致所謂的光環現象，而 UV-LED 發光效率偏低的問題，目前正透過改善磊晶（Epitaxial）品質來解決。日本 Nichia 公司的產品則以藍光 LED 激發摻 Ce^{3+} 之 YAG (Yttrium-Aluminum-Garnet 鈮鋁石榴石) 螢光粉（黃光）為主。另外一種技術則為 Osram 等其他公司所採用之 TAG (Terbium-Aluminum-Garnet 鉕鋁石榴石) 或其他種類的螢光粉，但發光效率較 YAG 稍略遜色。利用藍光 LED 激發螢光粉所製作之白光 LED，具有驅動電路簡單、製造成本低等優點；缺點則是螢光粉轉換導致效率差、藍光 LED 光放射強度不均勻、易受操作溫度影響、演色性較調光技術所產生之白光略差。目前日本 Nichia 公司在波長 365 nm 之小功率 UV-LED 光輸出效率已達到 249lm/W。

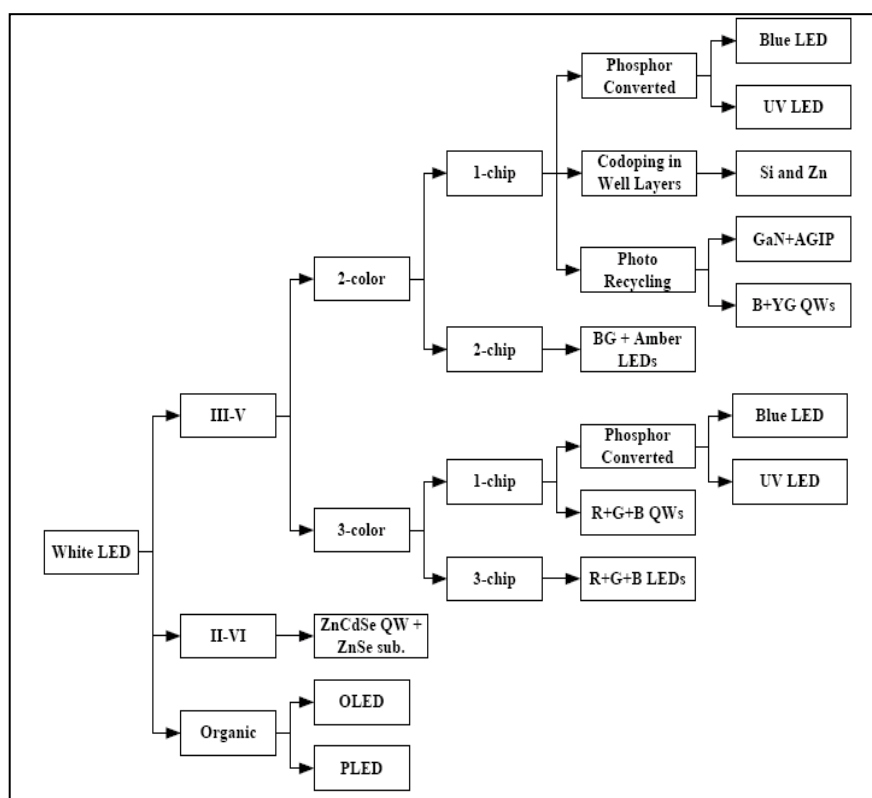


資料來源：Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap August 2012

圖 3.3-2 LED 白光產生方式

使用多顆不同顏色之 LED 晶粒，透過調光技術與晶粒排列也可產生白光。其方式可以分為將互補兩色光進行調光，或直接以三原色進行調配。多色晶粒組合之白光 LED 具有高演色性、高亮度、減少螢光粉光轉換損失、可個別調整各色 LED 之輸出強度進而變化彩度等優點，因此以長遠的眼光來看，將可能成為照明應用上的最佳方

案。美國運輸部為解決 LED 路燈雨霧穿透能力較差而影響道路安全問題，目前已研擬雙色溫 LED 路燈解決方案，天氣好時採用高色溫、高演色性照明方式，天氣差時模擬類似高壓鈉燈之低色溫照明，惟此種方案目前以調光技術相對前述螢光粉配光技術較有可能達到。但調光技術與晶粒排列方式須克服不同顏色 LED 間的差異（工作溫度、驅動電流、壽命等等），也需要搭配更加精確的驅動電路才能克服 LED 照明實用化的問題，目前大功率之 LED 路燈照明、液晶面板的 LED 背光模組，也多採用此種 LED 晶粒組合模組，此項技術係美國 CREE 公司為突破日本 NICHIA 公司專利限制所主導發展，2010 年 5 月 CREE 公司實驗室所發表大功率照明（100W 以上）之光輸出效率已可達到 209lm/W，超過高壓鈉燈(120~160 lm/W)。



資料來源：Solid-State Lighting Research and Development:
Manufacturing Roadmap August 2012

圖 3.3-3 白光 LED 路燈分類圖

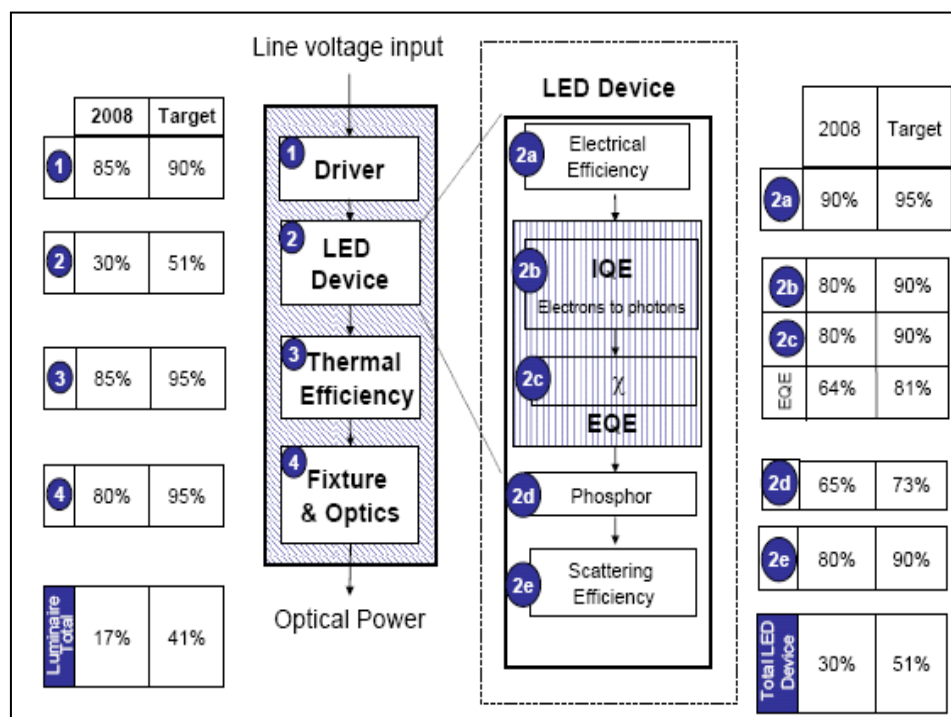
前述分類方式尚無法完整代表目前 LED 照明，完整分類方式應如圖 3.3-3 所示，以材料來分，其主要分類包括 III-V 族半導體、II-VI 族半導體，以及有機化合物(Organic)等三大類，III-V 族半導體仍是目

前主流發展技術，II-VI 族半導體仍於起步階段，有機化合物被視為取代 LED 之下一代照明，由於耐用度不佳，其技術仍未成熟。另外，單晶片(1 Chip)或多晶片（2~3Chip）製作方式以及螢光粉種類，都是分類主要模式。

3.4 白光 LED 效率分析

白光 LED 若要全面取代通用照明，首先必須克服問題是價格和效率，其中效率係指商用產品光電轉換效率必須提昇至 150 lm/W，方可和目前道路最廣泛使用之高壓鈉燈相比。美國能源部針對利用螢光粉產生之白光 LED 進行分析(如圖 3.4-1 所示)，驅動電路、LED 元件本身、散熱效率以及燈具和光學四部分轉換效率中，驅動電路、散熱效率，以及燈具和光學三部分轉換效率均在 80~85%之間，以 LED 元件本身轉換效率僅 30%最差，四者乘積之後僅 17%，故可以確立提升 LED 本身效率為未來發展之重點。進一步分析 LED 本身效率影響因素包括電力效率(Electrical efficiency)、內部量子效率(IQE: Internal Quantum Efficiency)、取光效率(Light Extraction Efficiency)、外部量子效率(EQE: External Quantum Efficiency)、螢光粉(Phosphor)反射效率及光線散射效率(Scattering efficiency)、調光效率(Color Mixing Efficiency)等 7 種。電力效率係指交流和直流轉換時之損失，內部量子效率係指電子或電洞越過能隙(bandgap)所造成之損失，取光效率則為主動區所產生光子和實際 LED 照明提供之光子之比值，螢光粉反射效率係利用螢光粉進行配光之損失，若利用 RGB 三原色混光則稱為調光效率。其中內部量子效率與取光效率提升係決定之因素。這兩項之乘積就是 LED 元件本身光電轉換效率(LED active region 發射出光子數除以驅動電路提供之電流)。這主要和 LED 元件本身特性如佈植、能隙、晶格結構等相關。藉由改變佈植、能隙、晶格結構是目前提升 LED 光電轉換效率主要技術研發方向。美國能源部認為 LED 本身發光效率需持續提高，為達到 150lm/W 之目標，整體效率需由目前 17%提升至 41%，故 LED 本身之光電轉換效率需由目前 30%提升至 50%。為達到此目標，LED 內部量子效率要由 80%提升至 90%，取光效率要由 80%提升至 90%，外部量子效率由 64%提升至 84%(如

圖 7 所示)，並針對壽命、可靠度提升與生產成本下降持續予以發展，才有與高壓鈉燈競爭之機會。另外由 LED 照明系統角度，追求發光效率、壽命、可靠度與成本，將成為 LED 未來照明裝置光源之主流關鍵。

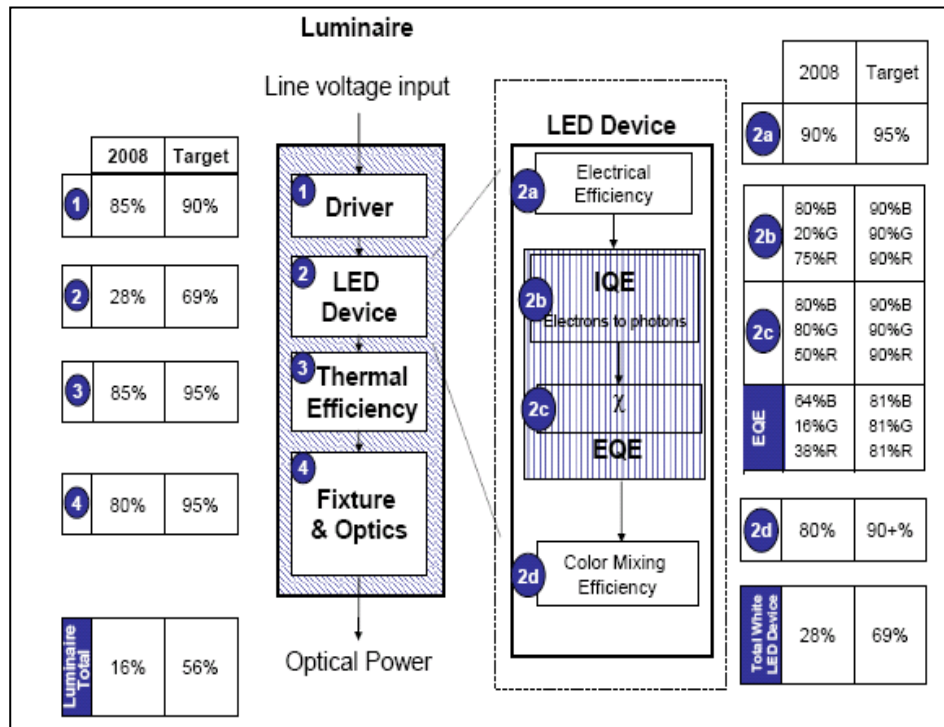


資料來源：Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan April 2009 Prepared for: Lighting Research and Development Building Technologies Program

圖 3.4-1 螢光粉配光之 LED 效率分析

依美國能源部分析，2008 年商用之螢光粉配光 LED 燈具效率僅有 17% 左右，而調光之 LED 效率僅 16%（如圖 3.4-2 所示），進一步比較圖 3.3-1 及圖 3.3-2 可以發現，不管是利用螢光粉或調光技術驅動、LED 元件本身、散熱效率以及燈具和光學四部分轉換效率中，以 LED 元件本身轉換效率最差。進一步分析調光之 LED 效率較螢光粉配光 LED 低的原因，就在調光之 LED 必須同時考慮三原色之 LED 發光效率，其中綠光 LED 內部量子效率與外部量子效率均偏低，這主要和目前材質 AlInGaP 本身有關，如其中鋁的濃度影響、製程參數等控制，另外調光之 LED 雖無螢光粉反射效率及光線散射效率之損失，但進行調光過程中，仍不能避免產生損失，必須考慮其調光效率 (Color Mixing Efficiency)，調光效率目前約 80%，未來希望能透過相

關技術將其提升至 90%以上。



資料來源：Solid-State Lighting Research and Development:Multi-Year Program Plan April 2009 Prepared for: Lighting Research and Development Building Technologies Program

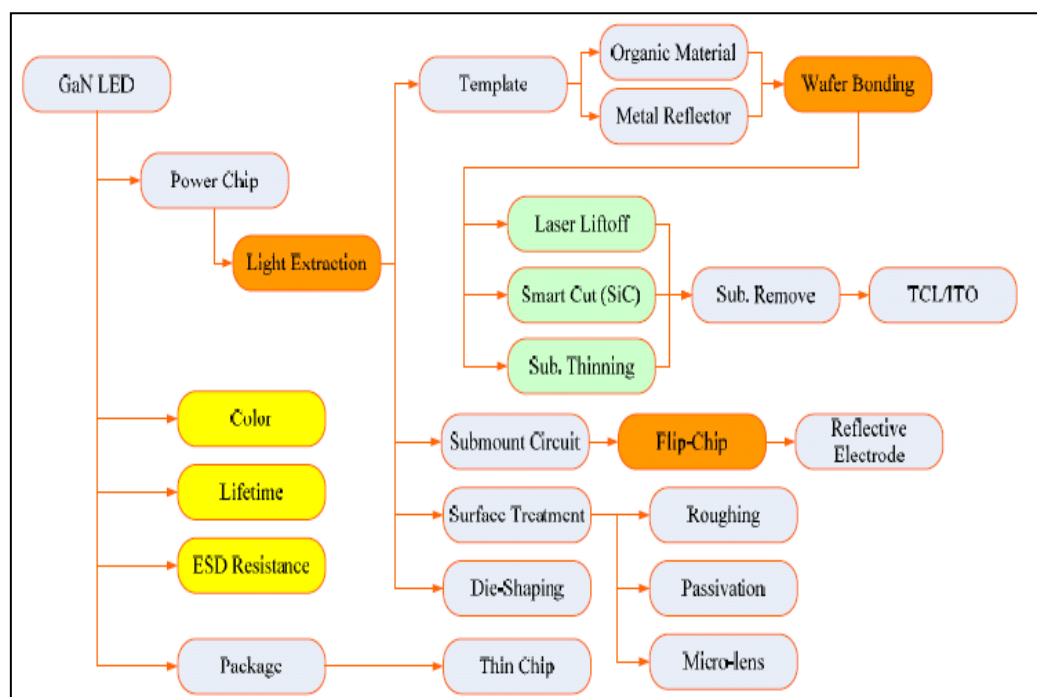
圖 3.4-2 調光之 LED 效率分析

3.5 未來 LED 光源技術改良

以當前 LED 路燈照明技術發展，面臨發光效率不如預期、驅動電源故障、結構與電路設計過度複雜、燈具散熱不良等問題。其中驅動電源故障是燈具在短時間即發生的重要原因，目前正透過增加產品穩定設計等方式改善。結構與電路設計過於複雜，增加了發生故障的機率，由於當前 LED 設計係於 85°C 以下環境工作，故散熱不良將引起 LED 燈具的使用壽命減少、故障率上升，並減低 LED 路燈發光效率等問題。

以藍光 LED 照射螢光粉產生白光之技術發展為例，為解決 LED 所面臨相關問題，目前藍光 LED 晶片主要係以 Sapphire(藍寶石基板)為基版，利用磊晶技術逐步堆疊 GaN(氮化鎵)與 InGaN(氮化鎵鎵)薄膜，但由於 Sapphire 與磊晶層所堆疊氮化鎵或氮化鎵鎵之材料特性分屬不同類型的材質，容易在氮化鎵薄膜邊界產生大量的 Trap，進而

影響到 LED 發光效率以及使用壽命，此外，Sapphire 除有晶格不匹配的問題外，還有其材料特性中不導電、導熱性不佳等問題影響其可靠度與使用壽命，因此目前美國、日本與我國均積極投入開發其他基板包括 GaN 基板、SiC（碳化矽）基板、Si 基板等，期望取代目前使用之 Sapphire 基板，並解決晶格不匹配影響發光效率之問題。至整體提升藍光 LED 照射螢光粉以產生白光技術流程如圖 3.4-1 所示。



資料來源：<https://www.tsmc.com>

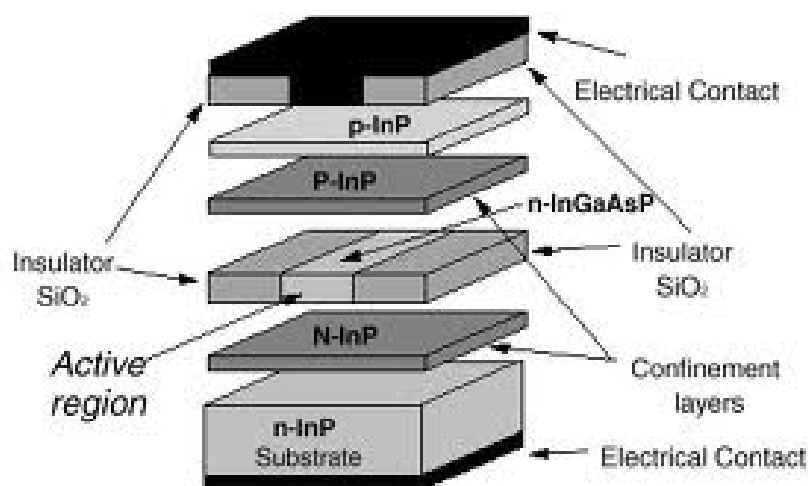
圖 3.5-1 LED 效率與穩定性提升技術

進一步觀察圖 3.5-1，可以了解要提升 LED 晶片的發光效率與可靠度，可從結構設計與材料選擇、磊晶與製程以及封裝等三個面向進行，在結構設計與材料選擇方面，可以前述更換晶格匹配之基板材料以減少 Trap 產生。

磊晶與製程方面則透過採用異質接面、分散電流、減少磊晶層缺陷密度、增加 ITO 反射層製作、增加主動發光區的載子效率等技術，或是直接更換導熱性、導電性佳、機械性、加工更優異的 SiC 基板，甚至是晶格一致、熱膨脹性與化學穩定性高之 GaN 基板。同時必須減少歐姆接觸(ohmic contact)、使用分散式電極、使用晶片鍵合(Wafer

Bonding)或覆晶(Flip-Chip)技術、製作反射金屬層，或進行表面粗糙(Surface Roughing)技術處理以提升光線反射效率等等，以異質接面、強化電流分布、晶粒外型設計、增加 ITO 反射層製作、晶片鍵合最廣為各家光電廠所採用。

對於內部量子效率而言，元件接面的特性對電光轉換效率影響很大，在同質接面(homo-junction)結構裡，半導體內沒有很大的能障讓電子電洞流動，使得非放射性複合(non emissivity combination)的電子電洞對增加，發光效率因為複合造成溫度上升而減低。而雙異質接面(double hetero-junction)有很大的能障使導帶與價帶電子電洞對非放射性複合率減低，因此提高發光效率(如圖 3.5-2 所示)。



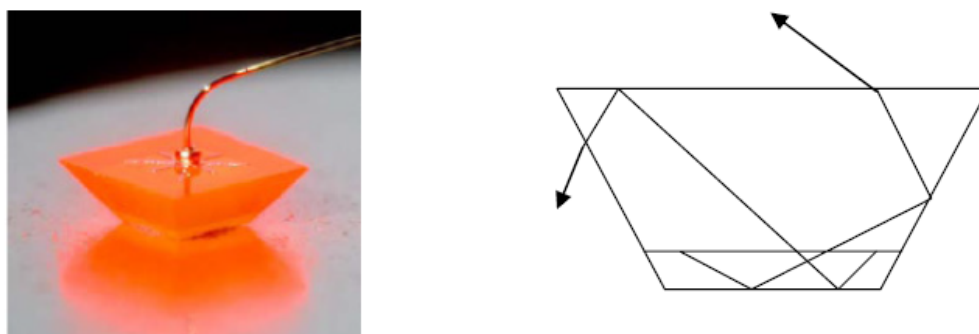
資料來源：<https://www.cree.com>

圖 3.5-2 雙異質接面示意圖

LED 陽極與陰極分布的位置有兩種，一種是陽極與陰極在同一側，電流在 active layer 中橫向導通時，將會流動不等的距離，使得電流分佈不均，可使用指叉型電極結構或是螺旋型電極結構，平均分散電極位置，藉此達到強化電流分布的效果，另一種陽極與陰極在 LED 兩側，電流為垂直導通，除了電阻降低外，亦可強化電流分布。

另一種改變晶粒外型，早期 LED 為矩形形狀，由於半導體材料與封裝材料折射率相差很多，許多光線因此侷限在 LED 內部，因此 Philips Lumileds 公司所發展出的倒角錐(Truncated Inverted Pyramid, TIP)結構，係利用晶粒削切(Chip Shaping)方式，減少光線在內部反射

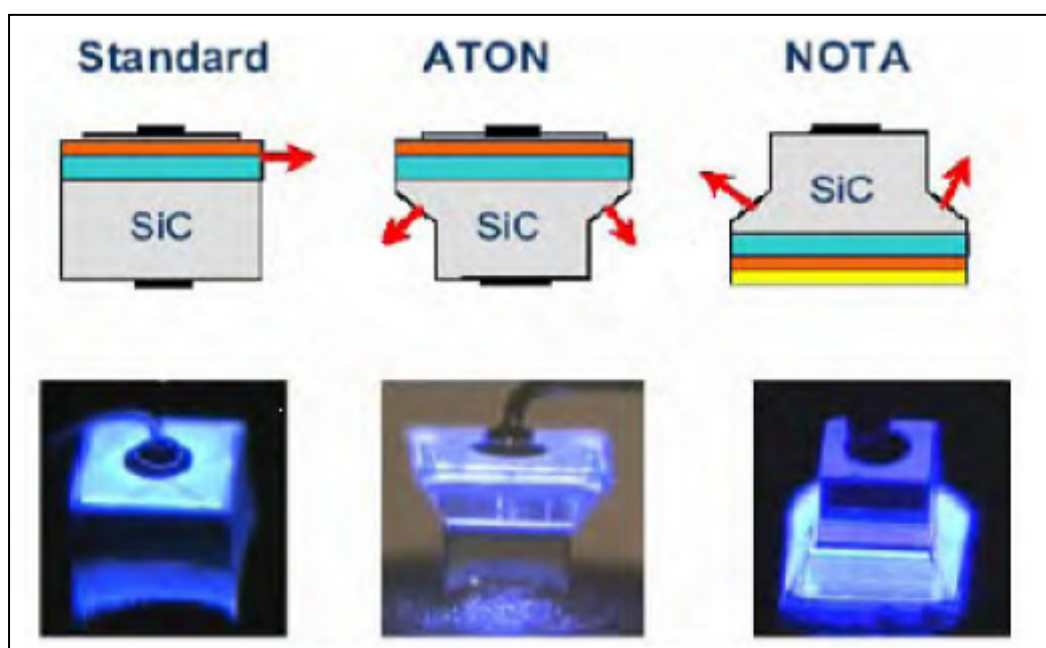
的次數而能被萃取出來，例如在紅光波長下，OSRAM 宣稱外部量子效率提升至 55%(如圖 3.4-3 所示)。



資料來源:<https://www.philips.com>

圖 3.5-3 Philips lumileds luxeon LED 晶體

而 OSRAM 公司 Golden DRAGON OVAL 之 LED 路燈也以 SiC 為基板，以採用 ATON 與 NOTA 兩種結構，其實際測試發光效率也比傳統的晶粒外型多 1.5 倍(如圖 3.5-4 所示)。

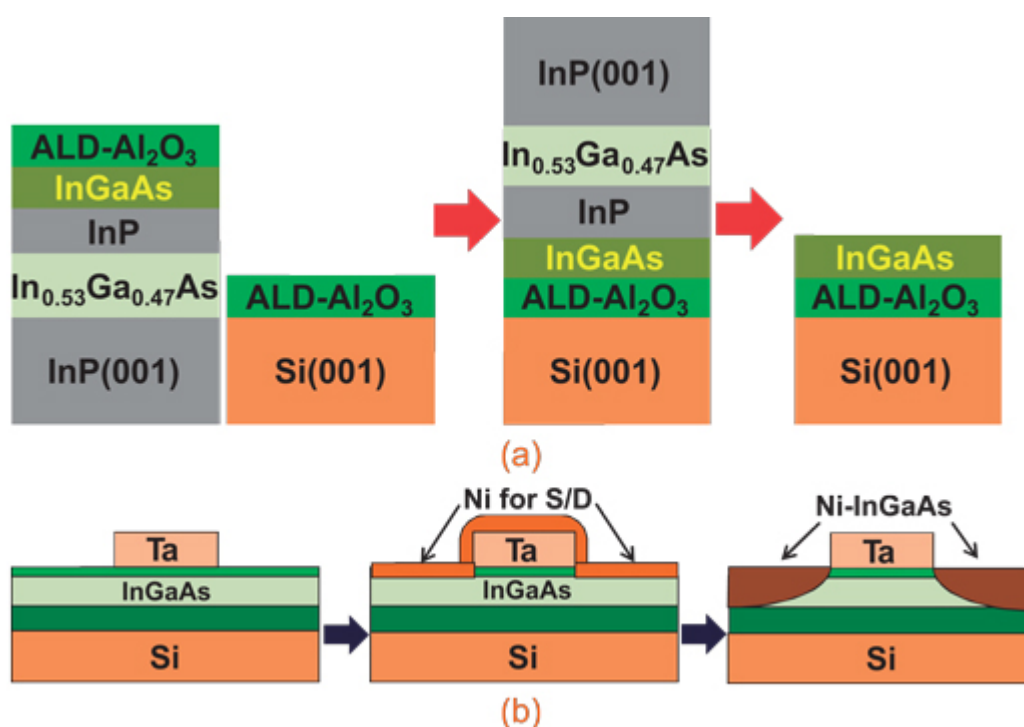


資料來源:<https://www.osram.com>

圖 3.5-4 OSRAM Golden DRAGON OVAL LED 晶片

晶圓鍵合技術(Wafer Bonding Technology)是利用兩片表面具平滑鏡面、平坦，可互為相同或相異材質、單晶或是多晶形態之晶圓材

料的表面原子間之鍵合力，作初步面對面接合，再經由退火處理，使此兩片晶圓表面原子反應，產生共價鍵合，讓兩平面彼此間的鍵合能 (Bonding Energy) 達到一定強度，而使這兩晶片能夠不使用黏接媒介物，純由原子鍵結成為一體。這種特性能使接合界面保持絕對純淨，避免無預期之化學黏接物雜質污染，以符合現代微電子材料、光電材料及奈米等級微機電器件嚴格製作要求。早期磷化鋁鎵銦 (AlGaInP) 材料的 LED 其基板材料為砷化鎵 (GaAs)，不透明表面的砷化鎵使發出的光經過多次全反射後，有一半被半導體材料與封裝材料吸收，造成出光量的損耗，之後改用透明的磷化鎵材料來做基板，用化學蝕刻的方式將砷化鎵移除，在高溫高壓下，將磷化鎵基板黏貼上去 (如圖 3.5-5 所示)。這項技術可複合不同晶格、不同種類之單晶或多晶材料，利用複合之材料具有之不同的物理性質 (如熱傳導度，機械強度)、化學性質 (如活化能)、電子性質 (如原子能階) 等，以製造具備特殊物理或化學特性之先進高性能光電材料，以照明用之 LED 而言，此技術已被廣泛使用。



資料來源: <https://www.tsmc.com>

圖 3.5-5 晶圓鍵合技術 (Wafer Bonding Technology)

在封裝方面則需考慮使用散熱性佳且耐用的樹脂材料、降低熱阻係數等等。封裝技術對於 LED 來說，屬於下游製程，對於高功率的 LED 封裝而言，最重要的兩個因素就是出光與散熱。

出光對於外部封裝而言，由於半導體材料的折射率與空氣相差很多，因此目前許多光電廠利用環氧樹脂或是矽膠當作與空氣間的媒介，除了能夠保護 LED 晶片以及內部驅動電路外，也可以減少內部大量的全反射，使出光量提升。而同時藉由透鏡來改善出光量以及設計光型分布，一般封裝製程會使用不同硬度的膠材來保護晶片，較靠近晶片的會使用硬度係數較低的膠材，靠近空氣端的界面則會使用硬度係數較高的膠材以保護 LED 內部。

散熱對於大功率 LED 而言，如果不能將晶片產生的熱量及時的散出，保持晶片內部的溫度在允許範圍內，將無法獲得穩定的出光量以及使用的壽命。散熱材料裡，銀與銅的散熱最佳，銀的導熱率比銅好，但是成本較高，因此，以成本來說，銅算是量產的重要材料，目前 LED 路燈中的晶片多以銅為主要封裝材料。

LED 路燈基本上是以高電流來驅動。主要是採用較輕 PCB 板和反射層材料，以 Philips Lumileds Luxeon 系列 LED 來說，用晶片黏貼的方式，將 AlGaInN 材料的晶片焊接在有錫料凸點的矽載體上，用金線連接晶片正負極至各自的接腳，再將環氧樹脂透鏡封裝上去，內部填充硬度較軟的矽膠，在可承受 120 度至零下 40 度之冷熱範圍，LED 不會因為熱脹冷縮將金線撐斷，內部框架也不會氧化，環氧樹脂透鏡也不會變黃，反射杯與透鏡也是經過設計，使得光萃取效率提升許多，十分適合 LED 路燈使用。

以 Philips Lumileds Luxeon 最新產品為例，其封裝結構以六角型鋁基板當基座，Philips Lumileds 提供之資料顯示，電流可驅動到 700mA 以上，熱阻也降到 13°C/W ，出光效率可超過 100lm/W ，為非常適合應用環境複雜之路燈使用(如圖 3.5-6 所示)。

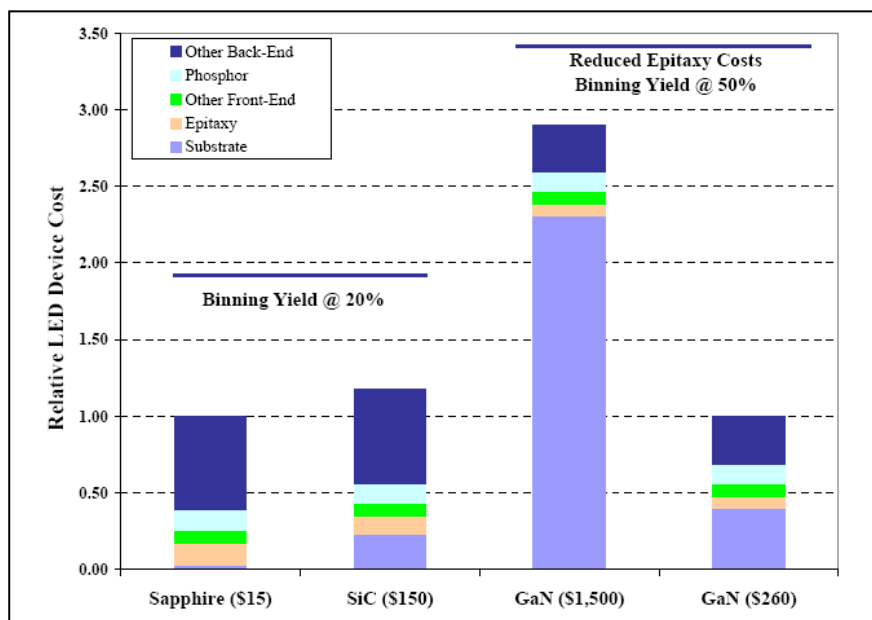


資料來源:Philips lumileds

圖 3.5-6 Philips Lumileds Luxeon 封裝結構

由材料之選擇、製程技術、封裝技術等 3 個技術層次著手，雖可改善 LED 照明目前面對的部分技術問題，但所衍生之其他問題仍有待解決。首先就基板材質選擇方面，由圖 3.5-7 分析知，GaN 基板、SiC 基板之成本高出 Sapphire 基板甚多，與目前降低成本趨勢背道而馳，故目前 Sapphire 基板仍是主流。另外製程改善方面，以增加取光效率引進之 Surface Roughing 技術處理為例，其品質控制不穩定，且須面對日本 NICHIA 公司之專利侵權訴訟。2010 年另有最新改善對策如 Photonic Crystal，惟其需要更高等製程技術如電子束顯影蝕刻 (Beam Lithography)，該技術較現有光電系統所用技術昂貴且艱難，多用於高等積體電路製造而非一般光電系統，且將造成量產速度緩慢導致成本上升。在封裝技術方面，LED 散熱路徑係由多個元件組成(基座、基板、散熱座、散熱片等)，且為串連形式接觸空氣，與傳統燈具不同，必須全部更換熱傳導係數 (thermal conductivity) 高材質 (以基板為例，Sapphire 熱傳導係數為 35W/m-K 而 GaN、SiC 分別為 210 與 490 W/m-K) 或是製作完成後移除部分 Sapphire 鍍上金屬，才可提昇散熱系統之效率，惟其成本則將大幅上昇。

基上可知，就目前整體提升 LED 光源技術與可靠度之成效而言，LED 照明尚屬未成熟產品，難以和物美價廉傳統氣體光源如高壓鈉燈相比，故較不適合全面推廣。



資料來源：LED Technology for High Efficiency & High Brightness Applications
Dr David Lacey

圖 3.5-7 不同基板材質 LED 成本分析

3.6 小結

1. 隨著 LED 由過去指示或標誌應用領域擴展至照明領域發展，面對物美價廉的傳統光源，要全面推展 LED 照明，有關提昇 LED 發光效率及降低成本之課題，即成為 LED 技術發展之兩大挑戰。
2. 當前白光 LED 兩種主要技術分類為利用螢光粉進行配光，以及使用多顆不同顏色之 LED 晶粒，透過調光技術與晶粒排列產生白光，分別由日本 NICHIA 公司與美國 CREE 公司所主導發展，其中於大功率之路燈照明方面，利用調光技術與多晶粒排列產生白光之技術較為看好。
3. 當前 LED 效率提升四大課題：驅動電路、LED 元件本身、散熱效率以及燈具和光學四部分轉換效率，以 LED 元件本身所面臨課題最大。LED 商用產品光電轉換效率必須提昇至 150lm/W 方可和目

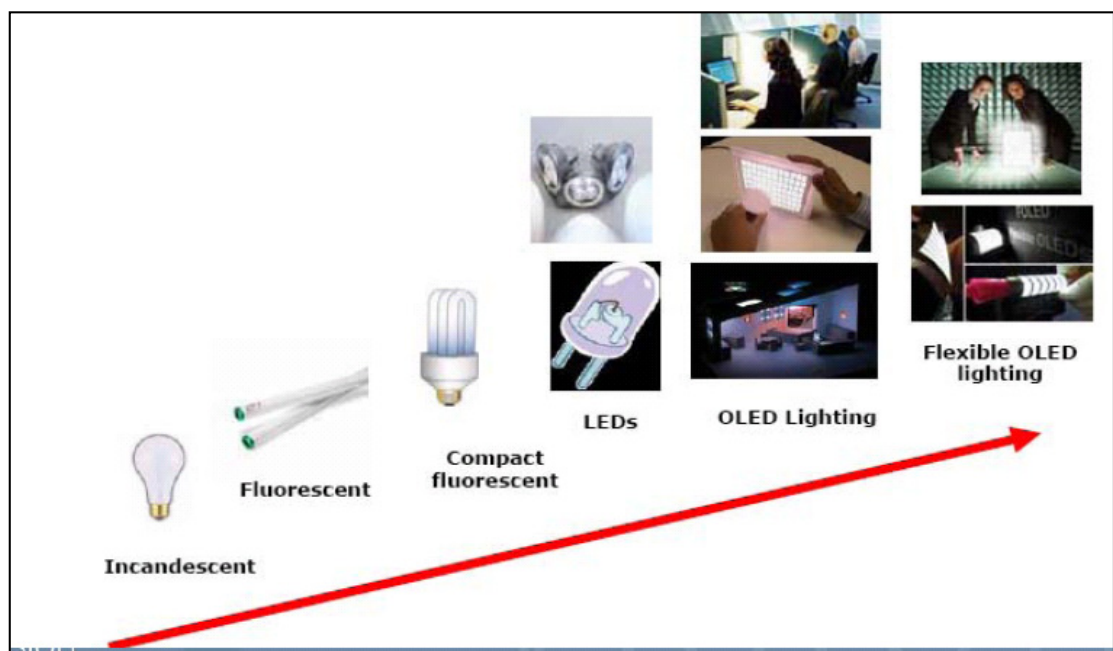
前道路最廣泛使用之高壓鈉燈競爭。

- 4.LED 路燈照明技術發展，目前面臨發光效率不如預期、驅動電源故障、結構與電路設計過度複雜、燈具散熱不良等問題使其可靠度偏低。目前可從材料選擇與結構設計、磊晶與製程技術及封裝等三個技術方向分別進行改良，如更換基板材質、改良相關製程技術以提高取光率、更換高熱傳係數材質等，但衍生包括成本提高、智慧財產權限制、生產速度減慢等新問題須克服。

第四章 LED 路燈發展趨勢

4.1 LED 路燈特性介紹

自電力發明之後，人類近代照明技術發展趨勢如圖 4.1-1 所示，依其形式可簡略分為幾個世代，第一世代分鎢絲燈（tungsten lamp）與鹵素燈（Halogen lamp），係利用電流讓發熱體加熱至白熱化狀態，乃至放射光線，其一般能量效率只有 20%，約 17~25lm/W。第二世代光源為螢光燈管，主要利用螢光粉加熱產生光線，其開啟了近代光源技術的演進，引發一連串放電光源技術的開發，如第三世代光源省電燈泡問世與低壓鈉燈、高壓鈉燈等氣體光源之發展。到了 1996 年，白光發光二極體的出現，正式宣告第四世代光源固態照明(Solid State Light, SSL)的到來。茲針對 LED 路燈與現有路燈各項特性進行比較，分述如後。



資料來源：<http://www.pida.org.tw/>

圖 4.1-1 照明技術演進

1. 光電轉換效率(照明效率)

道路照明目前以高壓鈉燈與水銀燈為主，若以目前最佳之商用 LED 路燈和傳統之水銀燈相比，單一同瓦特數比較下，LED 之發光強度約為 2 倍，和高壓鈉燈約為相當或稍差（如表 4.1-1 所示），故若

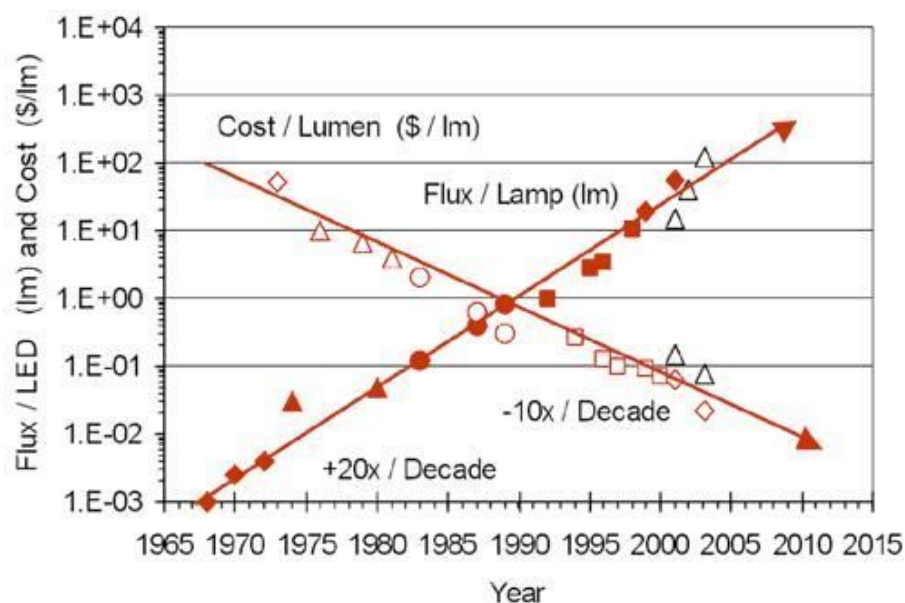
將水銀燈換成高壓鈉燈更具節能減碳效益，惟 LED 照明仍在快速發展中，效率正逐年提高。

表 4.1-1 2010 年各種路燈光電效率比較

	高壓鈉燈	低壓鈉燈	水銀燈	LED
Efficiency(lm/W)	110~125	160~200	50	75~100

資料來源：本研究整理

由表 4.1-1 可知，LED 路燈目前尚難以與壓鈉燈或高壓鈉燈相比，且經查其價格約為高壓鈉燈或水銀燈的 3~4 倍，故尚難以全面推展。其受矚目原因係 Lumileds Lighting 公司的 Roland Haitz 於 2003 年歸納出 LED 界的摩爾定律(Moore LAW)—海茲定律(Haitz LAW)(如圖 4.1-2 所示)，說明 LED 約每 18~24 個月可提升一倍的亮度，以此定理推估 10 年內 LED 亮度可以再提升 20 倍，而成本將可降低 90%，達到可完全取代現有照明技術之目標。

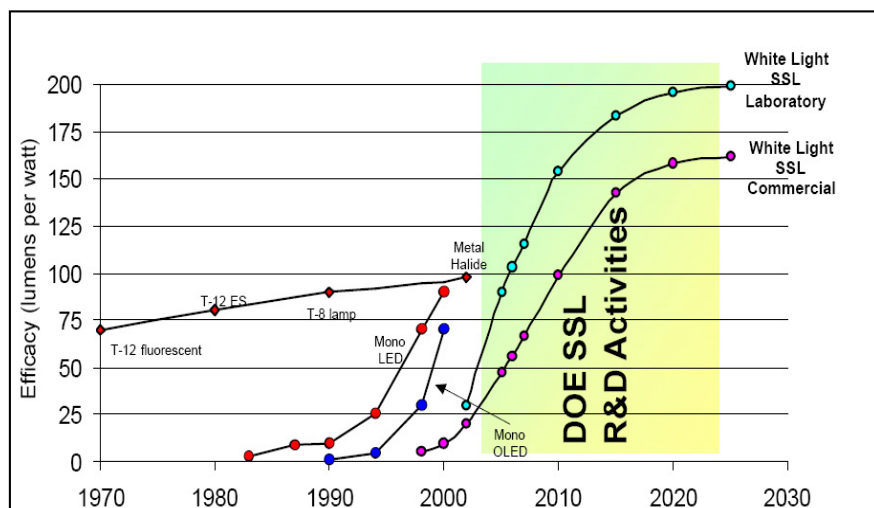


資料來源：Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap

圖 4.1-2 海茲定律(Haitz LAW)

美國能源部(Department of Energy, DOE)於 2007 年研究顯示 2010 年 LED 路燈之實驗室產品可達到 150 lm/W(如圖 4.1-3 所示)，趕上高壓鈉燈，但實際商用產品光源效率仍僅約 90~100lm/W，必須到 2015 年，LED 照明商用產品才可達到 150 lm/W，對照現今白光 LED 發展，實驗室進度明顯超越預估發展期程（美國 Cree 實驗室於今(2010)年 1

月發表 219 lm/W 白光 LED，2011 年 5 月日本 NICHIA 發表 249 lm/W 之白光 LED），商用產品之發展期程則略為落後（日本 NICHIA 已於 2011 年 9 月開始販售 95 lm/W 之白光 LED，係目前最佳之光源效率）。



資料來源：Next Generation Luminaires (NGL). 2010. Solid-state Lighting (SSL) Design Competition 2010.

圖 4.1-3 LED 路燈效率

2. 成本

在 LED 路燈成本方面，目前單一 LED 燈具價格為傳統氣體放光燈具如高壓鈉燈 4 倍以上，但 LED 路燈成本隨發光效率與技術而下降，根據美國能源部分析，到 2015 年，高色溫（Correlated Color Temperature, CCT）LED（色溫若大於 5,000，則其光線令人感到寒冷，又稱為 Cool White）效率將發展至 188 lm/W，低色溫 LED（色溫若低於 3,000，則其光線令人感到溫暖，又稱為 Warm White）效率將發展至 138 lm/W，而其價格也將由目前每 klm 售價 50 美元降至 14 美元。

3. 演色性

所謂演色性即光源對物體的顯色能力稱為演色性，係通過與同色溫的參考或基準光源（白熾燈或晝光）下物體外觀顏色的比較。光所發射的光譜內容決定光源的光色，但同樣光色可由許多、少數甚至僅僅兩個單色光波組合而成，影響所及，對各個顏色的演色性亦大不相同。二相同光色的光源會有相異的光譜組成，光譜組成較廣的光源較有可能提供較佳的演色品質，由於 LED 光譜組成範圍比傳統氣體燈具廣，因此預期 LED 燈具接受度會逐年提高。而演色性比較係採用演色指

數(Color Rendering Index, CRI)系統，以中午晝光與白熾燈的演色指數定義為 100，視為理想的基準光源比較在測試光源下與在同色溫的基準光源下 8 種顏色的偏離(deviation)程度，以測量該光源的演色指數，取平均偏差值 Ra 20~100，愈接近 100 表示其演色性越優良。

表 4.1-2 各種路燈演色性分析

項目	高壓鈉燈	低壓鈉燈	水銀燈	LED (高色溫)	LED (低色溫)
演色係數	20~25	0~5	50	75	85

資料來源：本研究整理

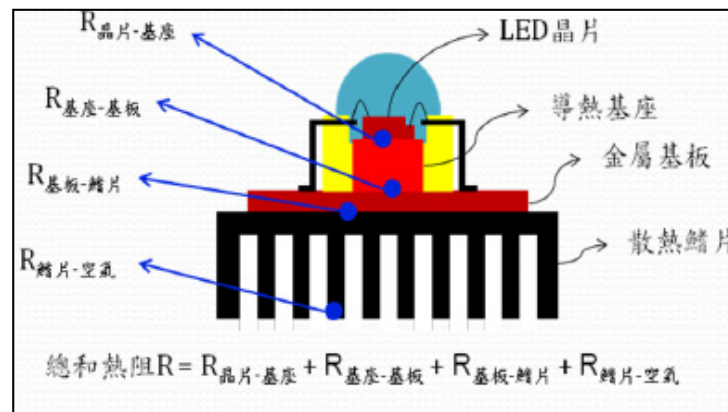
由表 4.1-2 可以發現，低壓鈉燈雖為目前世界上光電效率最佳之照明，但其演色性過差，容易造成駕駛人顏色判斷失真，並不適合應用於一般道路，而 LED 照明演色性確實優於目前使用之路燈照明系統。LED 照明的演色性雖不及白熾燈(CRI=100)，但其效率遠優於白熾燈，目前包括美國及韓國標準(KS, Korea Standard)都有針對 LED 照明演色性進行規範。而根據美國能源局要求，其演色係數應在 80 以上；而韓國 KS 要求的演色係數是在 70 以上。

4. 使用壽命

LED 路燈另一個受到注意的特色為使用壽命，起初曾用平均壽命(mean time before failure, MTBF)的觀念定義壽命，理論值高達 50,000 小時，比一般高壓鈉燈 6,000~10,000 小時高出甚多。而目前評估照明系統改採用流明數衰減(lumen depreciation)的程度來定義。通常選擇光源產生之流明數衰減至原來 50%或 70%所需的時間(分別以 L50 或 L70 表示)，做為 LED 光源的壽命指標。針對 LED 的照明模組而言，目前美國能源之星(Energy Star)規範訂定 LED 公共照明應用產品的 L70 是高於 25,000~35,000 小時，亦遠優於高壓鈉燈之 6,000 小時(L70)，該規定於 2009 年 12 月 4 日發布了最後的確認版本，並於 2010 年 8 月 31 日生效。

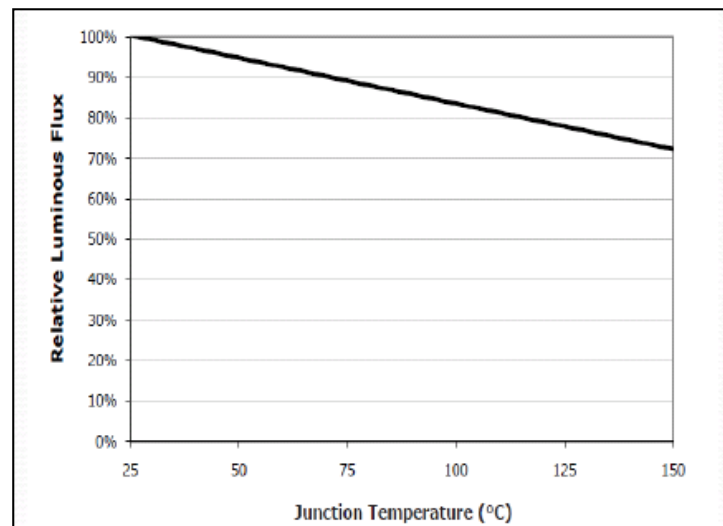
根據目前世界各國測試結果，LED 路燈耐用程度較高壓鈉燈低甚多，主要原因有二，第一為電源供應器，LED 係工作於 1.8~3.5V(直流)環境，若電源供應器無法成功將 220V 之交流電準確轉換為

1.8~3.5V 直流電壓時，則 LED 系統將無法運作，而高壓鈉燈只需將 220V 之交流電升壓至 400V 以上即可。第二是散熱不佳，高壓鈉燈產生之熱雖遠高於 LED 路燈，但主要是加熱燈殼中的氣體，而包覆之燈殼、燈罩係直接受熱，這些物體本身都屬耐熱元件、且直接與空氣接觸散熱，熱阻係數極低。LED 路燈發熱來源卻是 LED 晶片本身，無法與空氣接觸散熱(如圖 4.1-4 所示)，熱阻過大。此外，溫度上升除使壽命減短(每上升 10°C 則減半)，亦同時造成光效率降低(如圖 4.1-5 所示)。



資料來源：<http://www.innolux.com>

圖 4.1-4 LED 散熱方式



資料來源：Opto Semiconductors OSRAM

圖 4.1-5 LED 溫度與光效率關聯圖

5. 照度均勻性

美國能源部在舊金山奧克蘭地區選擇 4 條街道進行測試，各燈桿相距 100、150 及 200 英尺，測量不同間隔距離之照度，以 4 種不同 LED 路燈與高壓鈉燈進行均勻性比較，照度平均值係採用呎燭光（foot-candle）為計算單位，測量燈具最大照度與最小照度，並根據最大與最小照度計算 LED 路燈與高壓鈉燈最大/最小均勻度，相關結果如表 4.1-3，發現高壓鈉燈照度較 LED 路燈優良 30%以上。

表 4.1-3 LED 路燈與高壓鈉燈照度與均勻度比較

Luminaries (Spacing)	Grid Points Illuminated²⁸	Average Illuminant	Average-to- Minimum Uniformity (All Modeled Points)	Maximum-to- Minimum Uniformity (All Modeled Points)
HPS (100')	100%	0.93	7 : 1	17 : 1
LED A (100')	100%	0.44	3 : 1	6 : 1
LED B (100')	80%	0.51	215 : 1	868 : 1
LED C (100')	100%	0.22	2 : 1	3 : 1
LED D (100')	100%	0.51	4 : 1	11 : 1
HPS (150')	100%	0.63	9 : 1	36 : 1
LED A (150')	99%	0.30	6 : 1	21 : 1
LED B (150')	72%	0.34	165 : 1	981 : 1
LED C (150')	100%	0.15	2 : 1	6 : 1
LED D (150')	79%	0.35	22 : 1	98 : 1
HPS (200')	79%	0.48	39 : 1	198 : 1
LED A (200')	84%	0.23	11 : 1	47 : 1
LED B (200')	49%	0.26	168 : 1	1,318 : 1
LED C (200')	65%	0.11	5 : 1	19 : 1
LED D (200')	60%	0.26	1,228 : 1	7,176 : 1

資料來源：U.S. Department of Energy and Pacific & Electric by Energy Solutions

6. 環保

LED 為積體電路製程，高壓鈉燈或水銀燈均需填入強毒性物質，產生環保問題。

7. 熱量產生

由於驅動方式不同，LED 路燈係以積體電路方式產生光線，而高壓鈉燈或水銀燈均係加熱燈殼中氣體與汞等物質產生光線，LED 產生之廢熱量遠低於高壓鈉燈或水銀燈。

8. 技術成熟度

高壓鈉燈或水銀燈是目前技術成熟產品，LED 路燈目前仍在發展中，規格並不統一，功率受到限制，因此需考慮安裝地點及條件。

9. 安裝數量

LED 路燈若要達到和高壓鈉燈或水銀燈一樣之照明效果，至少需要多 20~30%以上數量。

10. 駕駛安全

LED 路燈由於照度均勻性不佳，若安裝數量不足可能造成高速行駛之駕駛眩光。

11. 啟動性

LED 路燈完全點亮以 μ Sec 計算，高壓鈉燈或水銀燈由於需加熱氣體，故其啟動時間係以分鐘計算。

12. 清淨能源使用

LED 路燈由於工作電壓較低(1.8~3.5V)且為直流電壓，較高壓鈉燈或水銀燈容易接受如太陽能、風力等清淨能源提供之電力。

13. 天候影響

目前 LED 產品受製程因素影響，目前產品多為色溫 4,000K 以上，穿透力差，受到雨霧干擾影響大，故其受天候影響較大。高壓鈉燈或水銀燈色溫約為 2,300K，穿透力佳，受到雨霧干擾影響較 LED 路燈小。

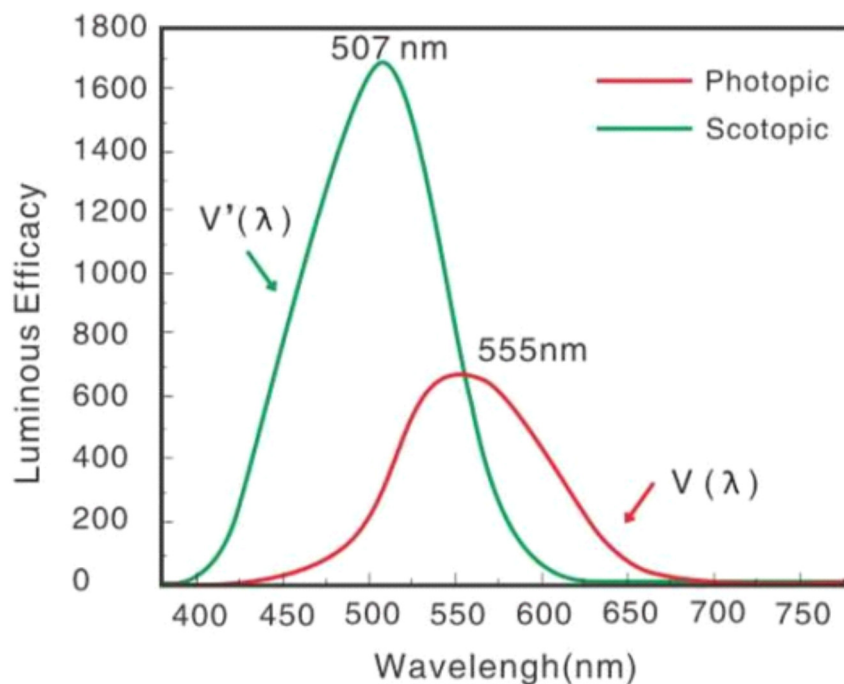
14. 路燈裝設高度

受限於 LED 發光具方向性之特性，LED 路燈所需燈桿高度必須較

高壓鈉燈或水銀燈高 15%以上。

15. 視覺影響

人眼對外部的光學訊息，主要由兩種細胞負責接收，第一種是柱狀細胞(rod cell)，第二種是錐狀細胞(cone cell)。前者負責接收環境的光強度資訊，並無任何色彩的資訊，而後者又分為三種類型，分別負責接收入射光長、中、短三種可見光波段分佈的資訊，這三個波段大致對應到人感受的紅、綠、藍三種顏色。依據日本工業標準(Japanese Industrial Standards, JIS)中針對道路照明提出之建議，當道路環境照度高於 10 lux 時(一般夜間路燈點亮的街道)，採用的稱為明視覺(Photopic vision)，此時對外部物體辨識，主要來自眼球中錐狀細胞的反應，因此對外部物體辨識除了亮度，還可保有色彩的資訊。而當路環境照度低於時 0.1 lux (如只有星光的道路環境)，則採用暗視覺(Scotopic vision)，此時的路環境照度還不足以刺激錐狀細胞產生應答，因此資訊接收，主要由眼球中柱狀細胞負責，只能獲得明暗的亮度資訊，而沒有色彩的訊息。而環境亮度介於兩者之間時，則稱為中間視覺(mesopic vision)，這時錐狀細胞和柱狀細胞同時會作用，對照明知感覺為兩者的比例關係(如圖 4.1-6 所示)。

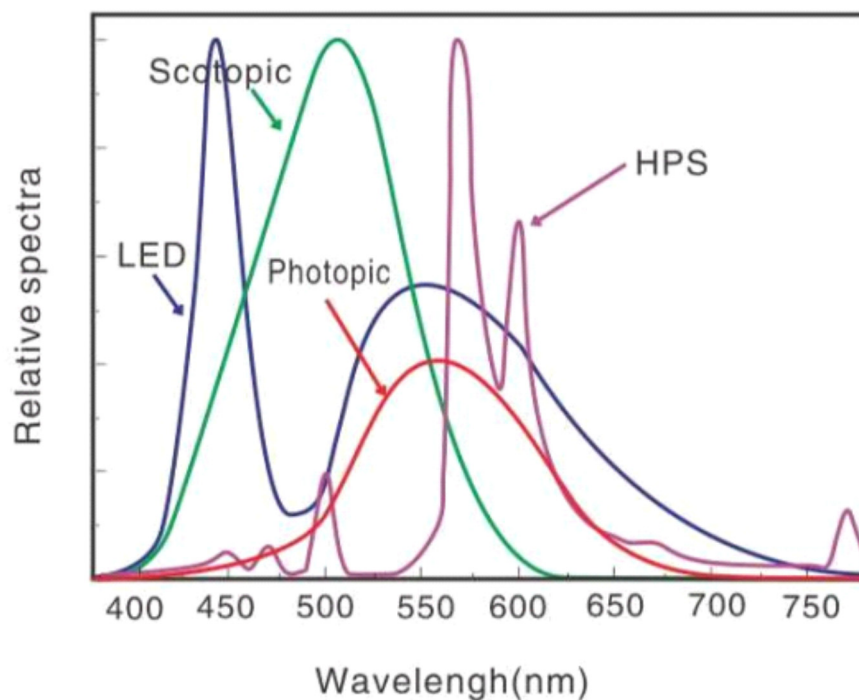


資料來源：International Commission on Illumination

圖 4.1-6 明暗視覺關聯圖

建立中間視覺光度學有效系統一直是國際照明界關注的專題，2010 年國際照明委員會(International Commission on Illumination, CIE)提出了中間視覺光度學系統。對以往基於明視覺光度學構建的道路照明系統帶來挑戰和衝擊，並被外界認為對作為未來光源的 LED 的發展和應用產生了重大影響。

國際照明委員會定義中間視覺係以暗視覺/明視覺比值 S/P (Scotopic/Photopic Ratio)的參數表示，用來衡量光源頻譜對於柱狀細胞的刺激比較。其依據柱狀細胞對藍、綠波段的敏感度較高，因此當光源含有較多的藍、綠光波段時(通常指色溫較高的光源)，光源會有較高的暗/明視覺比值，以路燈系統中高壓鈉燈和 LED 路燈進行比較，如圖 4.1-7 所示。



資料來源：International Commission on Illumination

圖 4.1-7 LED 路燈與高壓鈉燈明暗視覺關聯圖

明視曲線用於決定所有光源光譜能量分佈曲線所代表的光通量，國際照明委員會認為人眼對同瓦數的 555 nm 與 450 nm 的光所感受的光通量做比較，前者高於後者幾乎 25 倍，係因人眼較不敏感於 450 nm 的波長而看起來較暗。由圖 4.1-7 可知，高壓鈉燈產生大量中波的光，使用 LED 路燈(S/P ratio 1.97~2.04)和高壓鈉燈(S/P

ratio 0.4~0.62)相比，國際照明委員會認為人眼對於外界動作的反應時間減少一半，因此認為高暗視覺/明視覺比值的光源適合用在室外場所。英國及意大利等國及中國大陸部分地區在相關規定中指出，使用高 S/P 光源時，在同等級道路照明時，照度可以降低一個等級。我國經濟部技術處指出，人眼將光源調整至中間視覺區，則維持相同之視覺功能，白光 LED 路路燈較高壓路燈可降低三成的功率。台灣照明委員會 (CIE-Taiwan) 定義各種戶外照明燈具 S/P 值如表 4.1-4 所示。

表 4.1-4 各種路燈之 S/P

光源類型	S/P
高壓鈉燈(透明)250W	0.63
高壓鈉燈(透明)400W	0.66
水銀燈 175W	1.08
水銀燈 400W	1.33
白熾燈	1.36
複金屬燈(透明) 175W	1.51
複金屬燈(透明) 400W	1.57
5000K 白色光螢光燈	1.97
6500K 白色光螢光燈	2.19
6500K 白色光 LED	2.04

資料來源：International Commission on Illumination Taiwan

綜合以上所述，LED 路燈目前面對高壓鈉燈並無明顯之優勢，由於成本及照度均勻性為其弱點，造成使用環境上之限制，故目前我國能源局補助地方政府僅限於 8 米以下道路取代水銀燈，要全面換裝仍待研究突破，相關結果如表 4.1-5 所示。

表 4.1-5 各種路燈特性比較

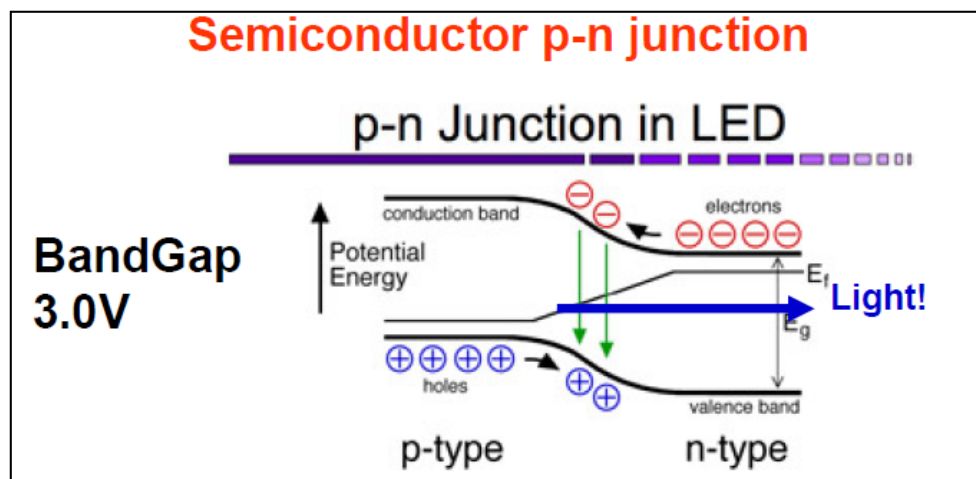
特性	LED	高壓鈉燈	水銀燈
照明效率	目前約 100Lm/W	80~140Lm/W	35~60Lm/W
成本	單一 LED 路燈比高壓鈉燈或水銀燈高 2~4 倍	低	最低
演色性 (演色係數)	65~75	20~25	20
使用壽命 (理論值)	40,000~50,000 小時	12,000~24,000 小時	12,000~24,000 小時
照度均勻性	差	較 LED 燈優良 30% 以上，三者最優	較 LED 燈優良 30% 以上
環保	佳	差	最差
熱量產生	佳	差	最差
技術成熟度	目前仍在發展中，規格並不統一	技術成熟	技術成熟
安裝數量	LED 路燈若要達到和高壓鈉燈或水銀燈一樣之照明效果，至少需要多 20~30% 以上數量	最少	少
駕駛安全	安裝數量不足可能造成高速行駛之駕駛眩光	佳	佳
啟動性	以 μSec 計算	以分鐘計算	以分鐘計算
清淨能源使用	容易	難度較高	難度較高
天候影響	較高	低	低
路燈裝設高度	燈桿高度必須較高 壓鈉燈或水銀燈高 15% 以上	一般	一般

資料來源：本研究整理。

4.2 LED 路燈可靠性分析

4.2.1 LED 可靠度預估方法

LED 發光原理乃是利用半導體接面(Junction)的正向電壓(forward-voltage)使電能產生光反應輸出(如圖 4.2-1 所示)。



資料來源：<http://www.innolux.com>

圖 4.2-1 LED 發光原理示意圖

目前 LED 路燈壽命預估最常被引用係美國能源之星(ENERGY STAR)認證，ENERGY STAR 標誌(如圖 4.2-2 所示)是由美國環保署(Environmental Protection Agency, EPA) 和美國能源部 (Department of Energy, DOE)共同創建，旨在保證所列管產品的能效符合法規要求並可獲得政府相關補助。相關節能產品必須通過 EPA 所認可的認證機構(EPA-recognized CB)審核，並根據特定條件完成認可測試(Qualification Testing)，才能使用能源之星標誌並獲取相關補助。美國在制定 LED 標準規範方面，發展相當快速，由於美國亦為目前世界上照明最大的市場之一，所以要銷售該地必須遵守其標準與規範，故往往成為各國標準的重要參考。



資料來源：ENERGY STAR

圖 4.2-2 ENERGY STAR 標章圖

美國政府制定 LED 標準重要之相關單位，包括國際電工委員會（International Electrotechnical Commission）、國際照明委員會（INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION）、北美照明委員會（Illuminating Engineering Society of North America）、美國電器用品生產者協會（National Electrical Manufacturers Association，NEMA）、美國國家標準（American National Standards Institute，ANSI）、美國國家標準與技術研究院（National Institute of Standards and Technology，NIST）等主要標準制定單位召開會議，搭配能源之星（Energy Star）提出的固態照明燈具規範，訂定不同的工業測試標準。國際組織層級的標準制定單位有國際電工委員會（IEC）、國際照明委員會（CIE）、國際標準組織（ISO）。其中國際電工委員會（IEC）所制定之標準主要包含電子、電磁、電工、電氣、電信、能源生產和分配等相關技術之標準，以其多年在全球建立起指標性的權威，亦為各國標準的重要依循。北美照明工程學會所訂出 LM-80 的光衰減檢測標準，不僅為 LED 應用產品提供量測標準，也為消費者提供品質保證，目前已成為全球採用度最高的檢測標準。

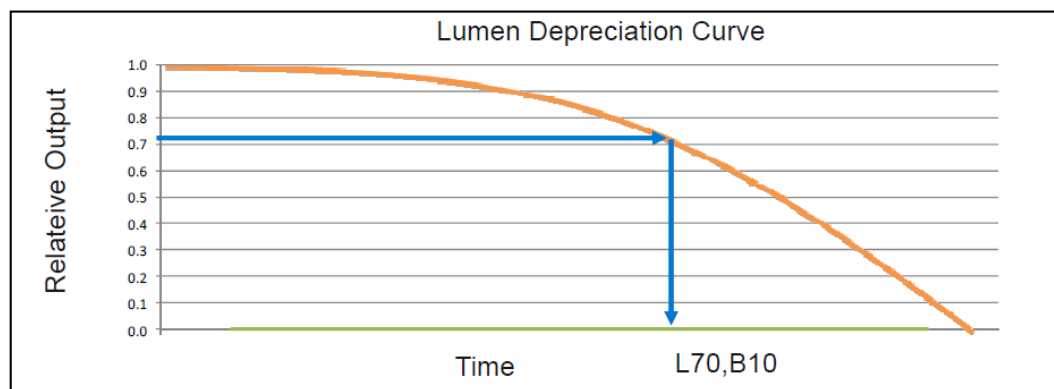
LED 燈具壽命很長，與其他燈具相同，LED 燈具也會隨時間漸漸降低光輸出量。但是不同於其他燈具的是，LED 燈具會漸漸變暗而非直接燒壞，並不像其他燈泡會突然直接壞掉。不適當的溫度、功率和過高濕度是造成 LED 燈具毀壞的主要原因，也是決定 LED 燈具壽命的因素。

能源之星提出 LED 燈具的驗證方式，其內容中表示若要取得其 LED 燈具的認證，在可靠度上須檢附 Lumen Maintenance Life 相關資

料，即為LED的壽命由功率數下降至一定門檻所經過的時數來決定。而其檢驗方式係依照北美照明委員會所制定之 IESNA Testing Procedures Committee.依據 IESNA IES 出版之光源光衰測試手冊”LM-80-08 Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources” 所制定一套檢測 LED 壽命的程序(照度變暗至多少時該淘汰)進行認定，一般簡稱 LM-80。

LM-80 以設定之試驗溫度與試驗電流持續點亮 LED，並且每隔一段時間量測與記錄 LED 之光輸出，由 LED 光輸出隨時間衰減程度，推算 LED 之光輸出衰減至一設定光衰程度時所需的時間。通過將光源或燈具在全新狀態下的發光量與將來特定時間的光輸出量進行比較，就可以得到流明維持率壽命(Lumen Maintenance Life)。

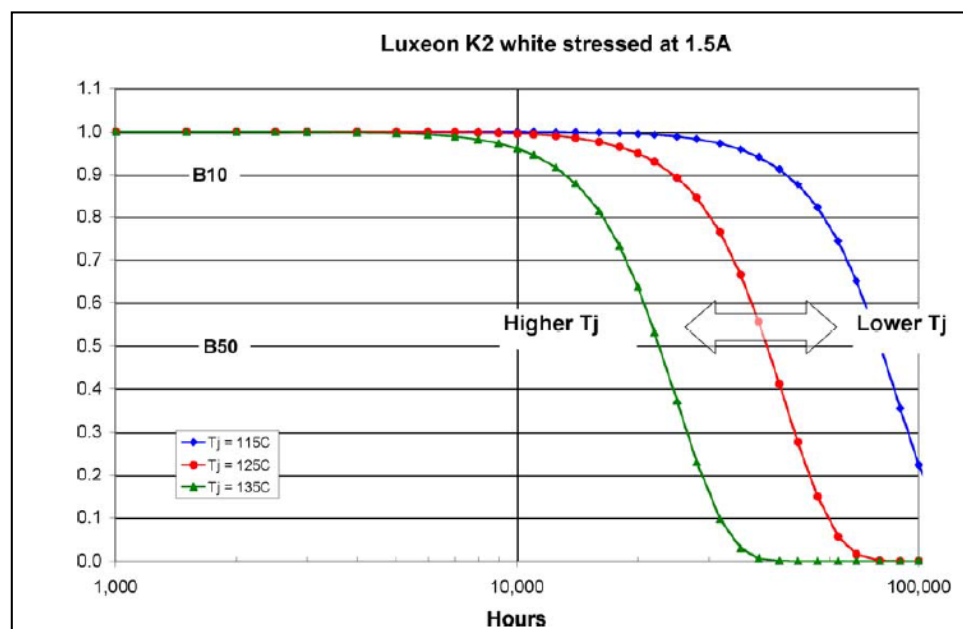
LM-80-08 版手冊規定兩種不同標準，一種規定 LED 燈具流明數低於原本的 70%即不適合繼續使用，另一種則規定流明數低於原本的 50%就不再使用。第一種標準(L70)主要是一般照明的 LED 燈具所採用的，第二種標準(L50)則是裝飾性的 LED 燈具採用。這兩種 LED 壽命標準是由北美照明委員會的固態照明系統和技術聯盟小組(ASSIST)所制定的。因此 L70(如圖 4.2-3 所示)已成為 ENERGY STAR®檢驗 LED 燈具最重要數字，並為世界各國廣泛採用。LED 光源認證中最重要的流明維持率數值，需要 LED 製造商依照 IESNA LM-80-08 所規定的測試方法提出 LED 元件(Package/Array/Module)至少 6,000 小時的驗證資料，LED 製造商再依 IESNA TM-21-11 的方式進行燈具流明維持的推估，以利使用者瞭解該燈具的使用壽命。



資料來源：IESNA Testing Procedures Committee. IESNA IES LM-80-08 Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources

圖 4.2-3 LED 燈具流明維持率壽命(Lumen Maintenance Life)曲線

照明需求提高造成 LED 功率增加，LED 電流所產生之廢熱無法有效散出，導致發光效率嚴重下降。因此 LED 發光效率會隨著使用時間及次數而降低，而過高的接面溫度則會加速 LED 發光效率衰減。LED 隨著晶片技術的日益成熟，目前單一的 LED 晶片輸入功率可達到 5W，甚至更高，所以防止 LED 工作溫度過高也越來越顯得重要。若不能有效的將晶片熱量散出，後續的熱效應也會變得越來越明顯，使得晶片接面溫度升高，進而直接減少晶片射出的光子能量，降低出光效率。溫度的升高也會使得晶片發射出的光譜產生所謂紅移紅移（Redshift）現象，使色溫品質下降。故 LM-80-08 係以不同接面溫度測試 Lumen Maintenance Life(如圖 4.2-4 所示)。



資料來源：Cree® XLamp® XT-E LEDs Product family data sheet

圖 4.2-4 不同接面溫度測試 Lumen Maintenance Life

LM-80-08 版手冊中規定 LED 燈具在進行壽命試驗時，提供額定電流點燈，並在三個指定溫度(TS)下進行點燈，其中兩個溫度為 55 °C 和 85 °C，另外一個溫度由製造商指定。由製造商選定的溫度和電流應該是要符合使用環境溫度範圍。在進行壽命測試時，燈體溫度變化應控制在-2 °C 以內，燈體周圍的溫度應控制在-5 °C 以內，測試環境溫度及溼度應被監控。在壽命測試時溼度需小於 65% RH。在 LM-80-08 指定的環境溫度下，測試至少要持續 6,000 小時，且至少每 1,000 小時進行一次量測。當要進行更進一步的壽命預估，LM-80-08

則建議延長至 10,000 小時的測試。

LM-80-08 實際上並沒有提供估算 LED 壽命的方法，估算方式是由北美照明委員會的技術備忘錄”TM-21-11Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources”提供建議，TM-21-11 從 LM-80-08 檢測過程中得到的數據計算 LED 光源的維持率。此份備忘錄是用來估計 LED 光源維持率和高過 6,000 小時的壽命。IES LUMENS-80 手冊中規定三種不同的檢測環境溫度。而 TM-21-11 則可基於這三種檢測結果估計 LED 光源的 Lumen Maintenance Life。

若 LED 燈具工作溫度與所提供之指定溫度不同，LM-80-08 以下列規則進行估計：

1. 若 LED 燈具之指定溫度 \leq LM-80 測試最低溫度(25°C)：LED 燈具直接使用 LM-80 報告 25°C 數值(L70)作為其光衰數值。
2. LM-80 低溫(25°C) \leq LED 燈具指定溫度(TS) \leq LM-80 高溫(55°C /85°C)：在此狀況下，LM-80-08 規定測試數據提供 Arrhenius Equation 模型建立，為元件壽命評估根據。
3. LM-80 高溫(85°C) \leq LED 燈具指定溫度(TS)：LED 燈具無法使用 LM-80 報告中光衰數值，須採用燈具 ENERGY STAR®中燈具點亮方式進行，或用 LM-80-08 進行更高溫度測試。

從 Arrhenius Equation 模型可以看到，LED 燈具針對耐久性測試，影響其速率的只有反應物濃度及速率常數。LM-80-08 中設定溫度當然不會改變反應物濃度，Arrhenius Equation 模型中需要計算就只有速率常數了。反應速率常數 k 之對數值隨溫度 T 的變化率與絕對溫度平方之倒數成正比。

$$\alpha_i = A \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T_{s,i}}\right) \dots\dots\dots(式 1)$$

Ea = Energy of Activation，單位為電子伏特

k_B = 波茲曼常數 (8.617 x 10⁻⁵ eV/°K)

T_s=指定溫度(TS)，單位 °K(°K = °C + 273)

其中 Ea 目前 0.43 eV 是較廣泛被採用，這個數值係美軍手冊 MIL-HDBK-217C 對計算半導體的互連接故障推薦的 Energy of Activation 值，代表 luminescence 隨著溫度上升而有減弱的現象，Quantum well 層數越多，Ea 也隨之提高。目前包括 Philips Lumileds Luxeon 系列及 CREE 的 XM 系列均採用此數值。Ts 指定溫度即為 LED 模組參考點溫度，而且參考點溫度應儘量接近 LED 模組，此參考點由製造廠商指定之。主要因為 LED 元件的 PN 接面之溫度（junction temperature, Tj）無法直接量測，通常採用 LED 元件的 VF 電壓隨溫度的變動率推算之。參考點位於 LED 模組主要熱傳導路徑上，可作為 LED 模組之 PN 接面溫度的參考，並為可量測溫度之位置，以此點的溫度根據我們目前的瞭解利用前述方程式進行求解，可以得到特定溫度之 LED 燈具耐用度曲線 L_P。

$$L_p = \frac{\ln\left(100 \times \frac{B_0}{p}\right)}{\alpha_i} \dots\dots\dots (式 2)$$

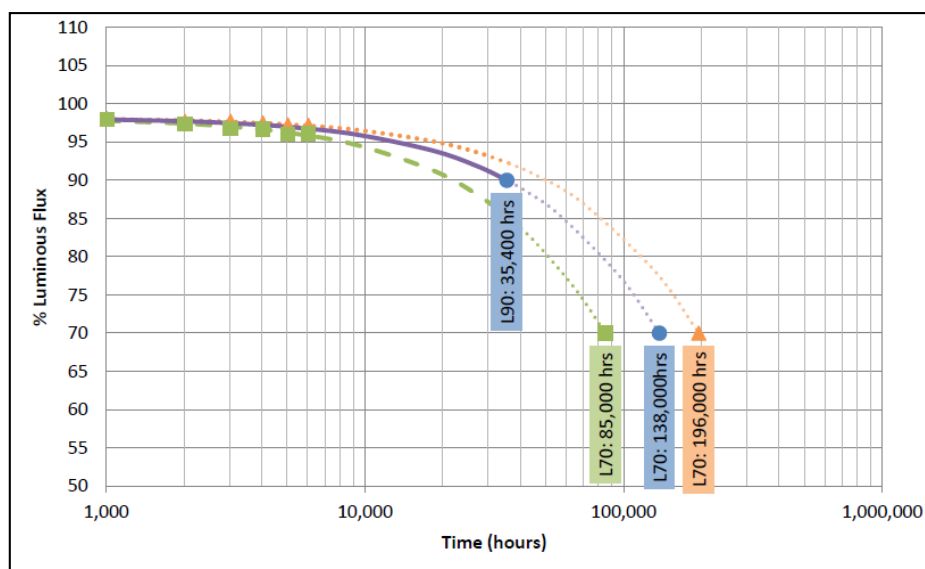
其中 B₀ 代表初始亮度，p=70 即可推估在新設定溫度下，LED 亮度降低至 70%之時間。

以 Cree 公司 XM 系列為例，在 55℃的狀況下，L70 時間推估為 196,000 小時，若溫度為 85℃則為 85,000 小時(如表 4.2-1 所示)，以前述方式估計 67℃的 L70 時間應為 138,000 小時(如圖 4.2-5 所示)。

表 4.2-1 Cree 公司 XM 系列之 TM21 耐用度分析表

LED	XLamp XM-L White		
I	2000 mA		
	Ts1	Tsi (Interpolated)	Ts2
Tsp	55°C	67°C	85°C
Tsp	328.15 K	339.15 K	358.15 K
Ea/kB	3266.12		
A	3.6344E-02		
α	1.729E-06	2.457E-06	3.980E-06
β	9.816E-01	9.818E-01	9.820E-01
Calculated L70	L70(6k) = 196,000 hours	L70(6k) = 138,000 hours	L70(6k) = 85,000 hours
Reported L70	L70(6k) > 36,300 hours	L70(6k) > 36,300 hours	L70(6k) > 36,300 hours
Calculated Lifetime		L90(6k) = 35,400 hours	
Reported Lifetime		L90(6k) = 35,400 hours	

資料來源：Cree XLamp XT-E LEDs Product family data sheet



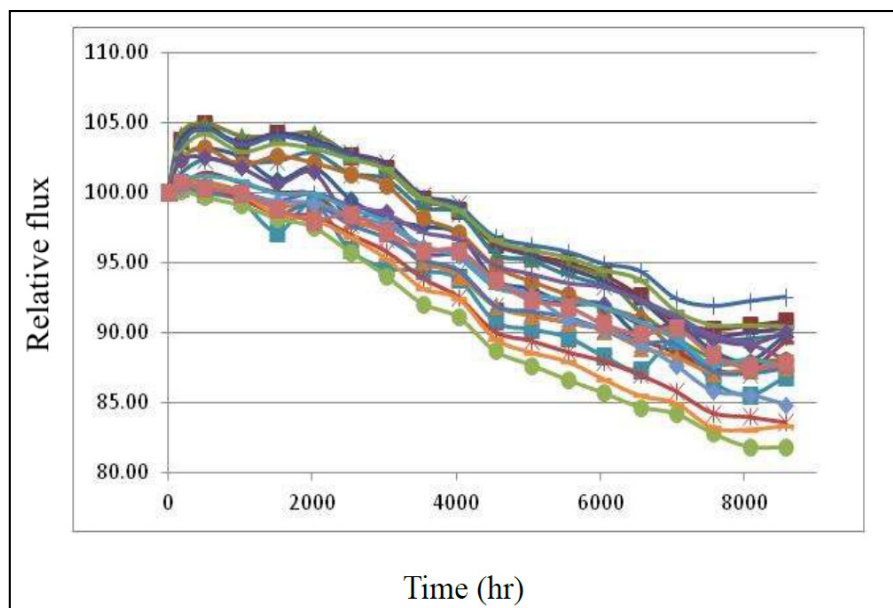
資料來源：Cree® XLamp® XT-E LEDs Product family data sheet

圖 4.2-5 Cree 公司 XM 系列之 TM11 耐用度曲線圖

LM-80-08 的實驗目的為計算 LED 元件的平均光衰維持率，其實驗時間長達 6,000 ~ 10,000 小時，美國環保署與能源部因此建議廠商的 LED 產品至少要先執行過一般的可靠度實驗如:HTOL(High Temperature Operating Life)測試，確認產品無可靠性問題後再執行 LM-80 的實驗，如此便可降低 LM-80 實驗執行過程相關風險。

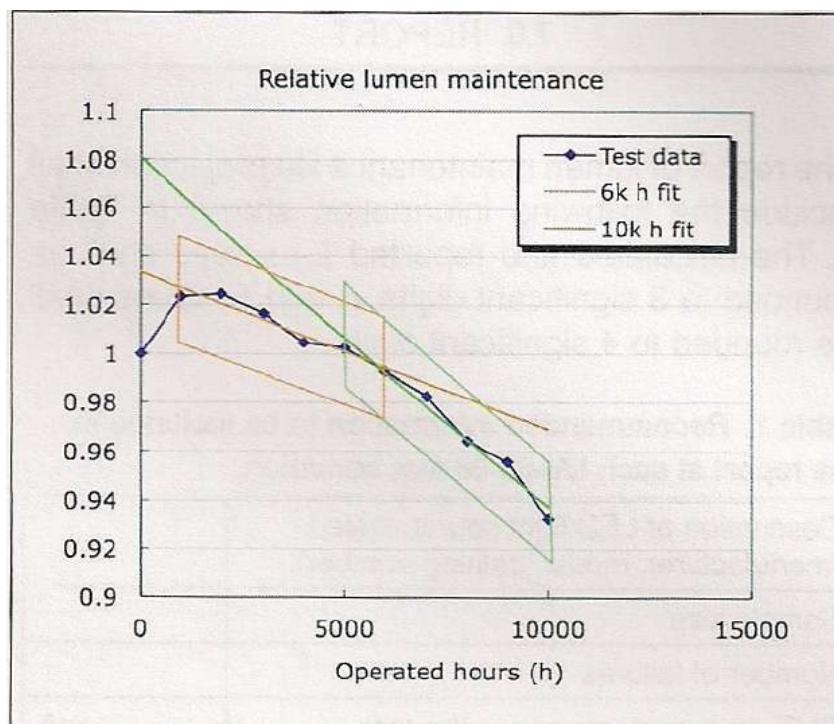
TM21-11 在 Lumen Maintenance Life Projection 則是依照下列標準程序進行：

1. 將 LED 燈具初始亮度定為 1(即 100%)。
2. 開始針對 10 個以上樣本進行測試，每 1,000 小時記錄一次。第一次紀錄值(即 1,000 小時)必需忽略(如圖 4.2-6 所示)。
3. 如果測試時間介於 6,000~10,000 小時之間，則採用其最後 5,000 小時資料進行 Life Projection(如圖 4.2-7 所示)。
4. 如果測試時間大於 10,000 小時，則採取最後 50%資料進行 Life Projection。
5. 前述之 Life Projection 結果必須依照美國環保署規定之 EPA 6X Rule 進行，即不得超過實驗結果的 6 倍(如圖 4.2-8 所示)。圖 4.2-6 及圖 4.2-7 之縱軸代表 LED 測試點與初始亮點之相對光通量(Luminous)比值。



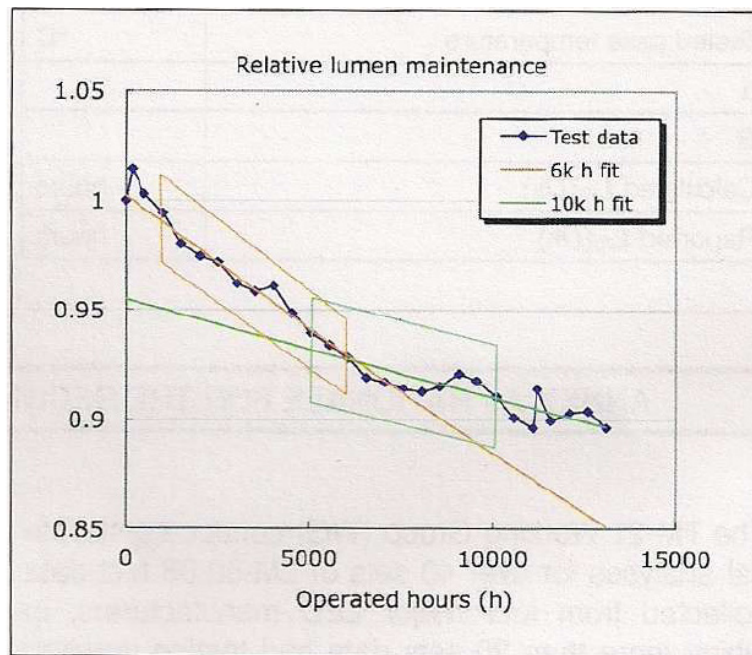
資料來源：EPA ENERGY STAR Lamp Round Table San Diego, CA

圖 4.2-6 TM21-11 樣本測試



資料來源：EPA ENERGY STAR Lamp Round Table San Diego, CA

圖 4.2-7 LED Life Projection



資料來源：EPA ENERGY STAR Lamp Round Table San Diego, CA

圖 4.2-8 EPA 6X Rule

美國能源部在執行相關 LED 路燈示範計畫時，認為道路主管單位應該依據北美照明委員會 LUMENS-79-08 和 LUMENS-80-08 確認 LED 路燈是否真的通過檢測標準。LED 路燈製造商應該依 IES TM-21 為基準，提供 Lumen Maintenance Life 數據。道路主管單位應該向 LED 製造商要求提供 IES LUMENS-79-08 和 LUMENS-80-08 檢測過程數據和檢測結果評估報告，並有能力依照本身使用環境適度調整數據。

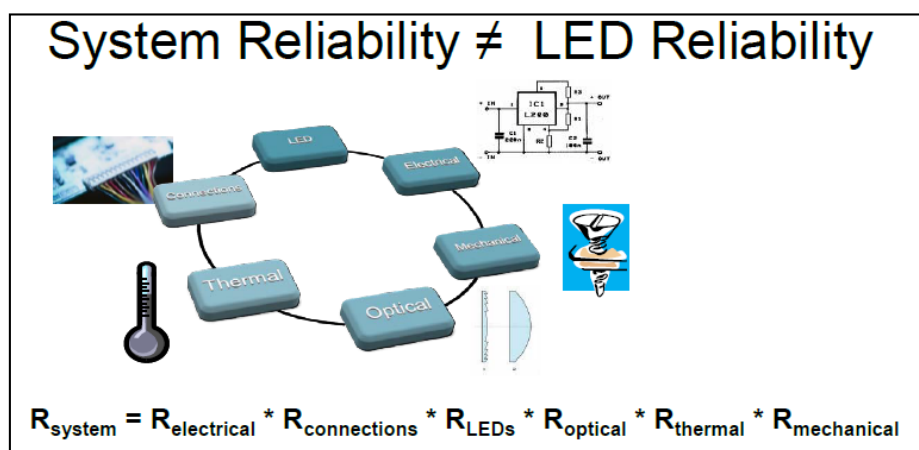
新產品通過 LM-80 檢測很有幫助，但檢測時間可能需要更長，

因為完整的檢測過程需耗費 6,000 小時，這也是 LM80-08 測試價格居高不下的主要原因。

4.2.2 以系統觀點之 LED 路燈可靠度預測方法

前述已完整說明 LED 目前宣稱具備 5 萬小時以上使用壽命之依據，檢測方式係針對 LED 晶片本身，並無法代表整個 LED 路燈系統，LED 路燈是由光學、熱學和電子學組成的複雜系統(如圖 4.2-9 所示)，雖然 LED 本身的理論壽命較長，但必須考慮多項不確定因素。

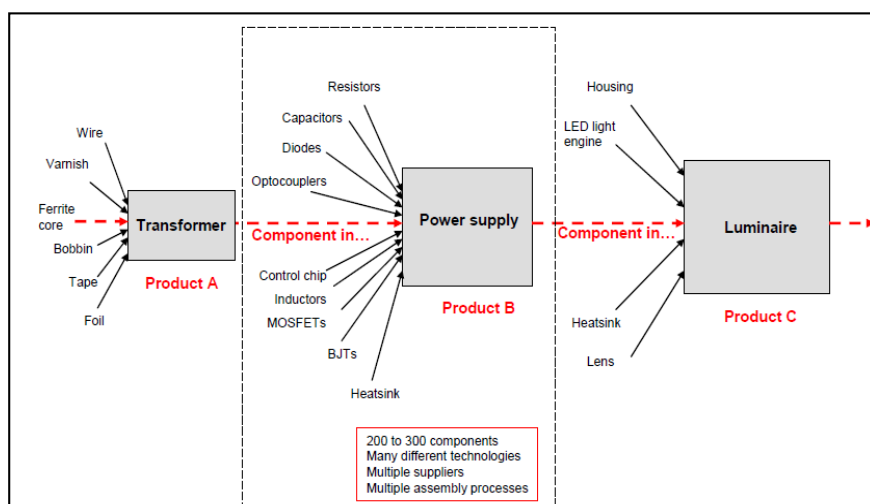
要探討影響 LED 路燈可靠度的因素，除須考慮 LED 路燈組成零件等產品相關(product factor)因素外，亦受在生命週期中的非零件過程因素 (process factor)與實際使用情形的影響，包括系統需求管理、產品設計、製造技術等系統層次，以及交付後的使用、後勤支援、環境因素如溫度、溼度等因素。產品相關因素則須考慮如 LED 之驅動電路設計、LED 本身的溫度管理、電源供應器及散熱、組裝局部缺陷及瞬時狀態現象、緩衝保護措施等因素。



資料來源：Led-based Public Lighting System Reliability for a Reduced Impact on Environment and Energy Consumption

圖 4.2-9 LED 系統可靠度分析圖

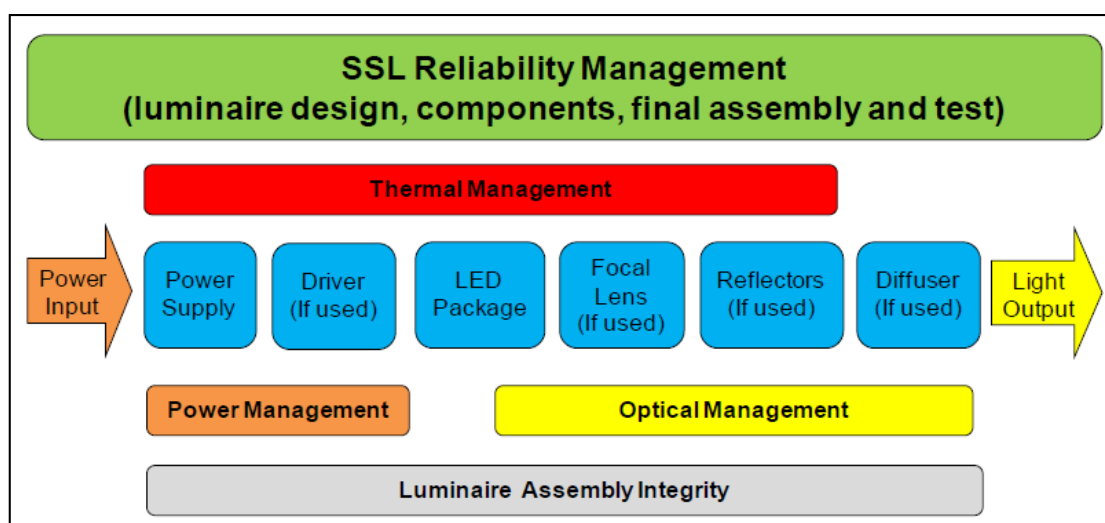
而且 LED 路燈組成元件較傳統路燈複雜許多，LED 路燈功能正常或失效之定義須視各元件設計製造所建立的能力（Capacity）與使用者的需求（Requirement）而界定。不同的定義，會有不同的相互關係，與傳統路燈考慮方式不盡相同。如以元件觀點考慮圖 4.2-10 顯示之 LED 路燈系統，包含變壓配電(Transformer)、電源供應器(Power supply)、LED 照明系統(Luminaire)三個次系統，根據日本國土交通省 21 世紀光計畫分析 LED 路燈示範計畫經驗，電源供應器故障率較 LED 照明系統高出 10~20%。但分析目前 LED 路燈所使用的電源供應器，係由 200 個以上的零件所組成，很難像 LED 照明系統進行元件分析。



資料來源：LED LUMINAIRE LIFETIME: Recommendations for Testing and Reporting

圖 4.2-10 以元件觀點分析 LED 路燈系統

美國能源部以另一種觀點分析 LED 路燈之可靠度，其以系統運作流程，探討目前能源之星 LM-80-08 與 TM-21-11 所預測之 LED 使用壽命與實際值產生落差之原因，如圖 4.2-11 所示，LED 路燈與傳統路燈一樣是將電能變成光，但其程序複雜許多，其系統包括輸入能量控制與管理 (Power Management)、光學管理 (Optical Management) 的組合，散熱管理 (Thermal Management) 等所組成，LM-80-08 與 TM-21-11 則主要針對其中散熱部分進行測試，無法完整模擬包括環境、維護等變數，是造成落差原因，因此系統化預估模式的探討是必須的。



資料來源：Reliability and Lifetime of LEDs Application Note 2012 OSRAM

圖 4.2-11 LED 系統功能示意圖

4.2.3 一般路燈可靠度預估方法

一般路燈類產品可靠度預估大多採用 3 種方式，第一種稱為壽命預估法(Prediction)，根據 MIL HDBK 217 之零件計數法(Part count) (裝備可靠度為一般性零件數目、品質水準與應用環境的函數，裝備中的零件並按一定的原則分為數個等級)與零件應力法(Part stress)的原則，利用軟體計算產品的壽命。

美國 RCA 公司於 1957 年進行電子設備可靠度應力分析報告，開始可靠度預估的工作，並研擬 MIL HDBK 217 手冊。美國國防部早在六十年代即推動政府與工業界資料交換計畫(government-industry data exchange program)，簡稱 GIDEP 計畫，建立相當完善的裝備使用與維護資料庫，經過多年的努力與研究成果，對於零件失效率資訊的掌握，由先前的資料庫(data base)變成現代的模型庫(model base)，除更進一步讓使用者掌握電子裝備的使用品質與可靠度外，更輔助研發設計人員在設計初期即能掌握產品的特性，免除產品製造後測試驗證產品可靠度的必要性。MIL HDBK 217 相關成果由美國海軍接續發展，並於 1962 年正式發行可靠度預估手冊，於 1965 年第一次改版，MIL-HDBK-217A。1970 年之後美國軍方可靠度業務改由美國空軍 RADC(Rome Air Development Center)負責，MIL HDBK 217 主要是依據測試與蒐集現場使用失效資料，經統計分析後歸納而成。MIL-HDBK-217 優點係耗時短、成本低，但其缺點為結果若因相關因素考慮不周，則預估結果易與實際產品壽命差異甚遠。美國國防部於 2001 年之後已停止對 MIL-HDBK-217 操作手冊之更新，目前最廣為應用的是 2000 年公布的 MIL-HDBK-217F。

零件計數法係將系統分解成由 N 個獨立次系統串聯在一起組成的最簡單系統，再代入 MIL-HDBK-217 操作手冊相關數據。若以 LED 路燈使用壽命預測為例，時間(t)為重要因素時，其可靠度數學模式為：

$$Rs(t) = \sum_{i=1}^n Ri(t) \dots\dots\dots(式 3)$$

其中 Rs(t)=系統在時間為 t 之前不失效的機率，Ri(t)=系統中第 i

個次系統在時間為 t 之前不失效的機率，前述道路主管單位可自行依照使用經驗選擇機率適合模型，以最簡單的指數分佈(Exponential Distribution)為例，前述方程式如下：

$$R_s(t) = \sum_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) \dots\dots\dots(式 4)$$

λ_i 稱為次系統失敗機率，亦可由此推算，系統平均失效間隔時間(Mean Time Between Failure, MTBF)為： $MTBF = \theta_s = 1/\lambda_s$ 。

指數分佈在一般電子產品可靠度研究中用途極廣，但是不宜於 LED 路燈使用，以美軍 MIL-HDBK-217 的計算說明 MIL-HDBK-338 手冊中建議使用韋伯分佈(Weibull Distribution)進行估計，而韋伯分佈(如式 5)是在壽命試驗之可靠度評估中，除指數分佈外，應用最廣的機率分佈。

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \dots\dots\dots(式 5)$$

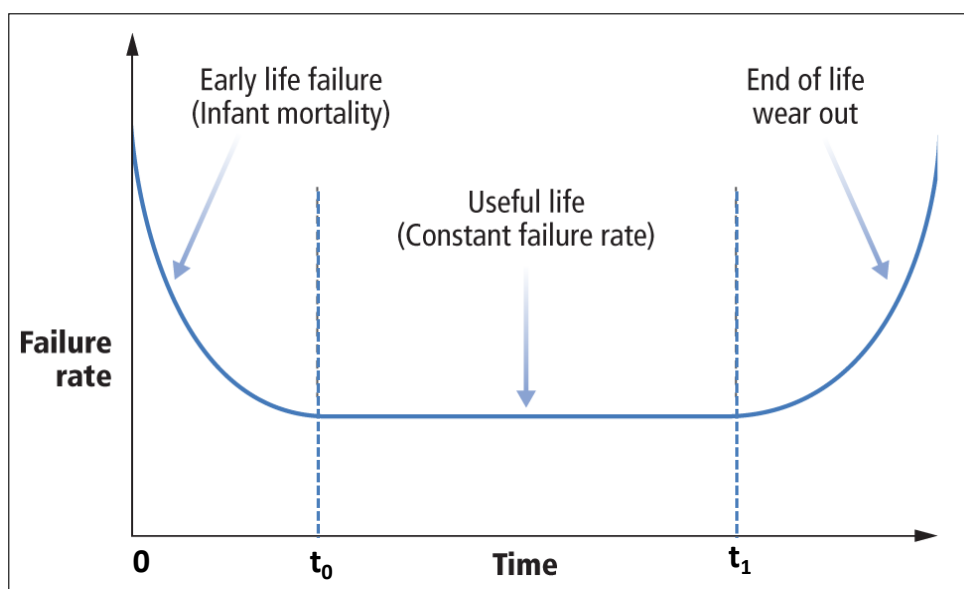
參數 β 稱為形狀參數(Shape Parameter)或韋伯斜率(Slope)，參數 η 稱為尺度參數(Scale Parameter)，參數 γ 稱為位置參數(Location Parameter)，代表最低壽命(Minimum Life)。若最低壽命為零即成為兩個參數的韋伯分佈，如式 6。

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \dots\dots\dots(式 6)$$

美軍 MIL-HDBK-338 手冊建議使用韋伯分佈之原因，係因韋伯特定的 β 值，擁有與其它分佈相同之特性。當 $\beta=1$ ，曲線分佈呈現指數分佈；當 $\beta=2$ ，曲線分佈呈現瑞利分佈 (Rayleigh Distribution)；當 $\beta=3.44$ ，曲線分佈呈現常態分佈對稱之特性，由此顯見韋伯分佈在描述可靠度曲線或資料統計方面，適用性相當強，美軍 MIL-HDBK-338 中均提供詳細說明與範例，美國能源部在推行 LED 路燈示範計畫時，亦建議採用。

另一種常用估計方式主要針對電子產品之失效率 $\lambda(t)$ ，如圖 4.2-12 故障率曲線所示，因隨使用時間而改變，此曲線類似浴缸曲線 (Bath-tub Curve)。

由圖 4.2-12 可知，電子產品使用之初期，圖中時間由 0 至 t_0 ，故障率急劇地減少，此期間稱為早夭期(Early Failure Period)。之後，由 t_0 至 t_1 其失效率趨於穩定狀態，此期間稱為機遇失效期間(Chance Failure Period)，該期間是故障率最低，最穩定的期間。偶發故障期間終了後，即時間大於 t_1 之後，故障率急劇地升高，此期間稱為磨耗期(Wear out Period)。所謂的磨耗期，是指產品因劣化而壽命將近尾聲的期間，將故障機率依照不同時期帶入(式 3)即可進行可靠度預估。



資料來源：Philips Lumileds Luxeon V Data sheet

圖 4.2-12 電子產品失效率曲線 Bath-tub Curve

MIL-HDBK-217 提供另一種預估方式為零件應力法，使用時機係系統與裝備研發工作進入後期細部設計階段之後，大部分的設計均已完成，而且可以獲得包括零件應力的詳細材料零件清單 (Bill of Material, BOM)，則可以使用應力分析法預估系統裝備的可靠度。此一預估方法同時也可以在設計後期的細部設計階段，作為材料元件高失效率時考量零件選用及零件因溫度效應產生的應力因素之資料來源。由於在這時候有關零件操作或零件使用的應力及環境已經有詳細資料可詢，所以預估出來的數據一般較為精確。應力分析法為

MIL-HDBK-217 F 的主要預估方法，以零件失效率資料為預估工作的基本項目，如應用於 LED 路燈，則必須將 LED 路燈中所有標準零件按其功能再做細分類，以電阻為例，必須視其設計再細分為固定電阻、可變電阻、晶片型電阻等。MIL-HDBK-217 F 附錄中，亦提供應用於電子裝備各種零件的失效率模型條件與相關資料，包括小型迴路、分立式半導體、電子管、光電或雷射元件、電阻器、電容器、電感器、繼電器及其他雜項零件。MIL-HDBK-217 F 中所列的失效率為裝備在正常操作使用條件下的結果，亦即裝備是處於開電源(Power ON)的狀態，並且在規定的環境條件下執行其規定的功能。

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.13 節之說明，光電二極體裝置之零件失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_I \pi_A \pi_P \pi_T \pi_E \pi_Q, \text{ fr}/10^6\text{hr} \dots\dots\dots(\text{式 } 7)$$

其相關函數定義如下：

λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

π_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_I = 電流修正因子；

π_A = 應用因子；

π_P = 功率退化因子；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

若使用零件應力法則必須考慮到零件的品質及規格對零件失效率有直接的影響，MIL-HDBK-217 在模型中以一個係數來修正，一般稱之為品質因子，以 π_Q 表示之，MIL-HDBK-217 中係以「軍規 (MIL-SPEC)」與「低級(Lower)」兩種等級表示。

若使用零件應力法則必須考慮到零件的品質及規格對零件失效率有直接的影響，MIL-HDBK-217 在模型中以一個係數來修正，一般稱之為品質因子，以 π_Q 表示之，MIL-HDBK-217 中係以「軍規

(MIL-SPEC)」與「低級(Lower)」兩種等級表示。

MIL-HDBK-217 將所有零件可靠度模式均透過環境因子 π_E 之運用，來涵蓋除了離子輻射以外的環境應力效應，這些環境項目以裝備的主要應用環境加以分類，MIL-HDBK-217 最初將其區分為 27 類，至 MIL-HDBK-217F 則簡化區分為 14 類，如地面溫和(GB)、地面固定(GF)、地面運動(GM)、海面等，每一項零件失效率模式所使用的環境因子 π_E 均規定有定量的數值。

相關因子參數均可於 MIL-HDBK-217F 參數表中查表取得，將不同機率分布如指數、韋伯分佈等代入 λb ，即可計算各種分佈狀況下 LED 路燈之系統平均失效間隔時間。

若將「零件計數法」與「應力分析法」進行比較，系統的失效率以「零件計數法」求得時，系統的失效率是所有零件的個別基礎失效率的總和。然而，系統的失效率以「應力分析法」進行預估時，系統失效率必須考量零件的許多影響因子，如：品質因子、應用因子、環境溫度、功率額定因子、溫度因子、電壓應力因子等。

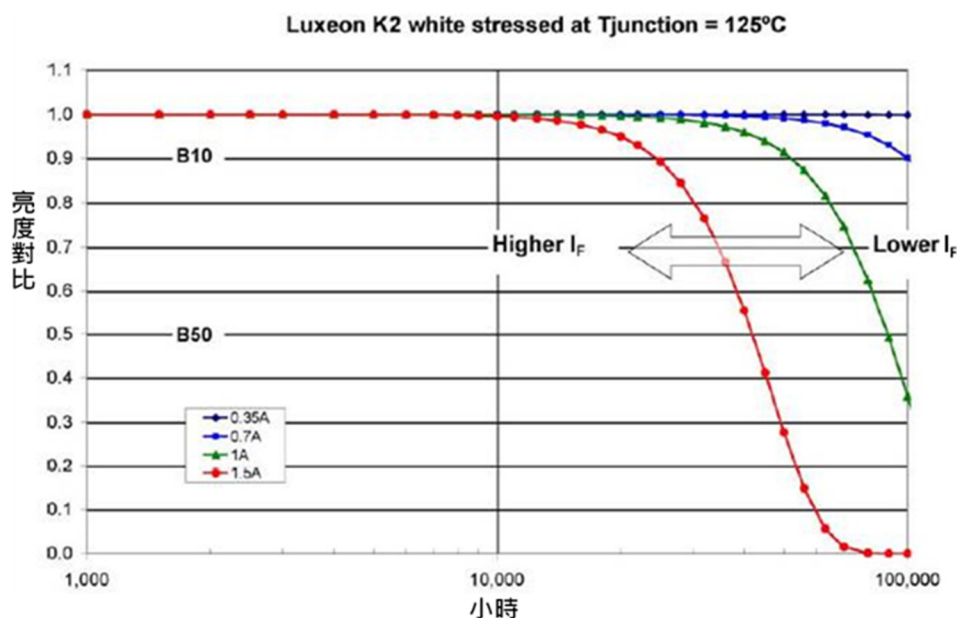
第 2 種為壽命實測法(Demonstration)，其為預估 LED 路燈壽命較為精準方法，主要係利用加速模型(Acceleration model)求出加速因子(Acceleration factor)，並提供實際樣品利用環境試驗模擬機進行樣品實測求得產品壽命。加速試驗乃對於產品施予較嚴苛之應力，使其在短時間內發生失效，以利分析產品品質及推估產品之可靠度。

壽命實測法發展的目的在於驗證系統或產品是否能達到所要求的可靠度，主要多用於電子產品。近年來因科技進步之賜，產品壽命逐漸地提升，惟近年來電子產品朝多樣化發展且汰換速度甚快，以至產品的生命週期甚短。為達快速地了解產品之壽命狀況，進而了解並改善產品的品質以達到理想的境界或要求，而欲於短時間內取得產品的可靠度及失效分佈模式，可使用壽命實測法來達此一目的。

一般對於產品施予較正常使用環境的嚴苛應力，而使產品在短時間內發生失效的行為，同時觀察其失效狀況，得知應力與壽命之關係，進而推估得知產品於正常使用下的平均壽命與失效分佈，壽命實測法是在物理與時間上，加速產品的劣化速度，以較短的時間試驗，獲取必要之壽命分佈數據，進而予以推估產品在正常使用狀態的壽命或失

效率。加速模型在傳統路燈類產品以 Arrhenius 模型(高溫加速)、Coffin-Manson 模型(溫度循環加速)及 Hallberg-Peck 模型(濕度加速)採用度最高。以 Arrhenius 模型為例，其主要針對溫度的變化對於電子產品壽命影響有十分密切的關係，因為電子元件其內部化學變化的速度是隨著溫度的不同而改變，稱做 Arrhenius equation 的關係，前述之 LM-80 即屬此類。

在 LED 路燈方面，針對其產品特性，加大環境應力條件來加快 LED 的衰減速度，從而減少壽命試驗的時間，因此目前 LED 路燈加速壽命試驗可分為增大測試電流和提高環境溫度兩種加速方法，其中測試電流方式主要係針對 LED 流明維持率和驅動電流反比的特性(如圖 4.2-13 所示)。



資料來源：Philips Lumileds Luxeon K2 operation data

圖 4.2-13 LED 可靠度與驅動電流關係圖

以常用之 Black Model 為例，此模型可同時考慮 LED 路燈受到電流與溫度兩個加速因子的影響，進而了解 LED 路燈的品質，並可提供改善產品品質之建議以達到理想的境界或要求，於短時間內取得 LED 路燈的失效分佈模式，其模型如式(8)所示。

$$AF = \left(\frac{J_{acc}}{J_{norm}} \right)^N \exp \left(\frac{E_a}{K} \left\{ \frac{1}{T_{norm}} - \frac{1}{T_{acc}} \right\} \right) \dots\dots\dots (式 8)$$

AF = 加速係數 Acceleration Factor

J_{acc} = 加大壓力之電流密度(Accelerated current density)

J_{norm} = 正常工作條件之電流密度(Nominal operation current density)

E_a = Activation energy of 0.43 eV

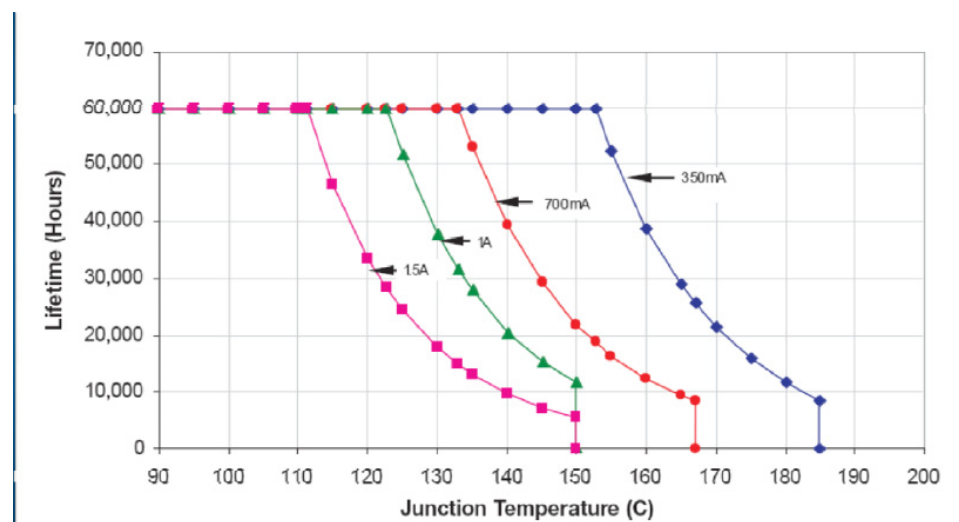
K = 波茲曼常數(Boltzmann's constant) 8.62×10^{-5} eV/K

T_{norm} = 正常工作條件之 LED 指定溫度(application ambient operating temperature)

T_{acc} = 加大壓力之 LED 指定溫度(Accelerated operating temperature)

根據前述條件，在執行 LED 路燈相關壽命預估時可大幅縮短測試時間，如 CREE 公司 XM 系列用於 70W 路燈時，驅動電流 $I_F=5mA$ ，工作溫度 $60^{\circ}C$ ，如加大壓力至驅動電流 $I_F=20mA$ ，工作溫度 $125^{\circ}C$ ，可由前式得到加速係數 187，意即執行 100 小時加壓測試可模擬 18,700 小時正常使用結果。

利用加速模型，LED 路燈更可以與未來智慧型照明系統整合，了解各種不同溫度與電流工作狀況組合對 LED 路燈使用壽命之影響（如圖 4.2-14 所示）。



資料來源：Philips Lumileds Luxeon K2 operation data

圖 4.2-14 LED 可靠度與驅動電流、溫度關係圖

壽命實測法結果較預估法真實，業界接受度高，傳統路燈的劣化零組件單純，擬訂加速壽命測試計畫較為容易。但 LED 路燈往往牽

涉到很多失效零組件，即使欲同時加速，加速程度也因失效零組件而異，可能發生迥異於實際操作上的失效模式。加速壽命測試之基本條件是不能損壞產品原有的失效特性，因此要儘量選擇不會導致失效模式變化的測試條件，或失效零組件容易單純化的測試條件，壽命實測法缺點為所需成本較高且較預估法耗時。

第 3 種為市場回饋法(Field return)，係於蒐集產品使用者在市場上所使用的狀況，優點為結果等於真實壽命，缺點為時間與成本更長、市場使用狀況難以取得，通常僅品牌公司自我保存，且 LED 路燈係全新產品，此種方式顯然較不可行。因此美國能源部在 LED LUMINAIRE LIFETIME: Recommendations for Testing and Reporting 中建議與類似裝備法(Similar Equipment Method)及類似複雜性法(Similar Complexity Method)相整合。

由於 LED 路燈發展速度極快，產品推陳出新甚為頻繁，故僅能就以往類似產品可靠度的經驗與資料，比較兩者之異同加以分析推算，據以估計新產品之可靠度。

新的 LED 路燈在進行類似裝備可靠度預估時，美國能源部建議之實施程序如下：

- 1.確立 LED 路燈的種類與型式、操作模式與條件、使用環境，以及任何已知的資料。
- 2.根據以上資料，在現有 LED 路燈中找出性質相近，使用中產品的使用狀況和可靠度條件。
- 3.將類似裝備的這些資料與新 LED 路燈產品的條件加以分析比較，特別注意其操作條件和使用環境應儘可能相近。
- 4.綜合以上結果，利用現有產品市場回饋法所蒐集可靠度資料，評估與判斷 LED 路燈的可靠度估計值。

類似複雜性法則為前述類似裝備法的進一步改良，以一般經驗法則得知 LED 路燈產品的可靠度與其複雜性有關，越複雜的產品，越不容易達到高可靠度的需求。特別是所使用的主動零件越多，發生失效的機率就越高，則可靠度就越低。基於此道理，可根據相關示範計畫經驗，發展出一套 LED 路燈產品可靠度與複雜性（功能複雜性，

零件數目多寡)的圖表資料，其考慮的條件包括使用環境，以及品質等級的零件。

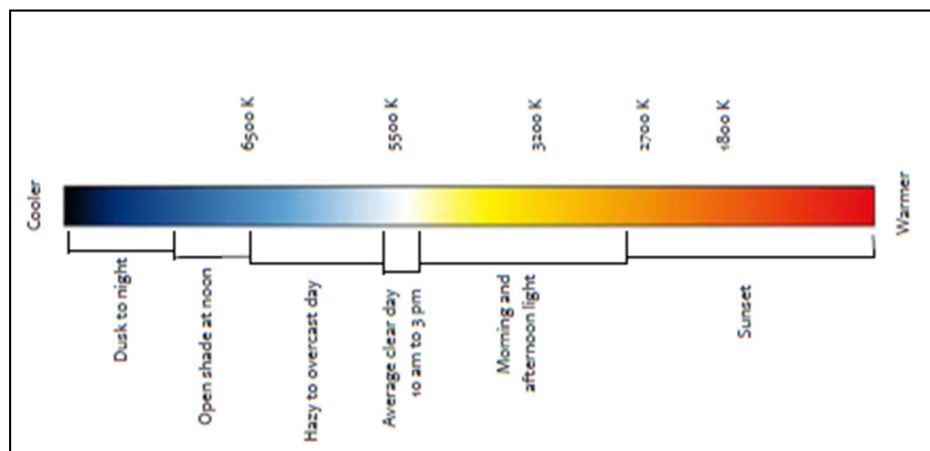
因此只要找出新產品中預定使用的主動零件數量、使用環境及品質等級等，即可以查閱美軍 MIL-HDBK-338A 中的圖表，利用現有產品市場回饋法所蒐集之可靠度資料再粗略估計該產品可能的可靠度水準。

4.3 LED 路燈效率分析

LED 燈具目前被歸類為綠色照明，在節能減碳上被寄予厚望，惟LED燈具為固態照明，其效率評估方式和傳統燈具並不完全相同，以下就差異最大部分進行比較。

一、色溫

所謂光源的色溫(Color Temperature)是通過對比它的色彩和理論的熱黑體輻射體來確定的。熱黑體輻射體與光源的色彩相匹配時的絕對溫度就是那個光源的色溫，意即直接和普朗克黑體輻射定律相聯繫。測量方式為使用一種標準黑體(如黑鐵)，將它加熱，此黑體會由深紅色轉到紅、白、藍，其中加熱過程中，不同溫度會產生不同顏色，此時的絕對溫度就以相對顏色對照，並以 K(絕對溫度)表示之(如圖 4.3-1 所示)。另外一種定義方式係以天空顏色為準，日出為 2,700K，中午為 5,500K、晚上為 6,500K。

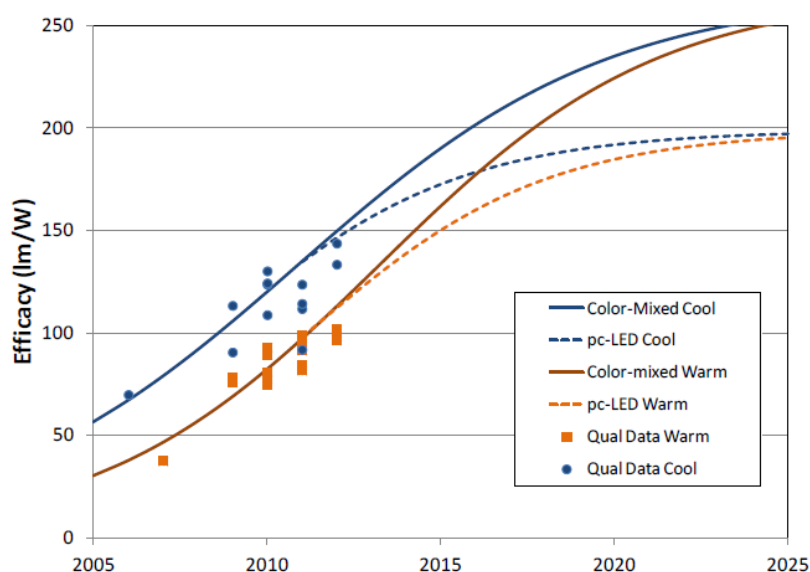


資料來源：IESNA. (2009). ANSI/IES RP-16-10 Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering

圖 4.3-1 色溫(Color Temperature)

美國國家標準協會 (American National Standards Institute, ANSI) 對色溫定義係目前最廣為各界採用，該協會依色溫不同區分為三大區：2,580K~3,500K 為暖白光(Warm White)、3,500K~5,000K 為正白光(Neutral White)及 5,000K~8,200K 為冷白光(Cool White)。

傳統高強度氣體放電燈其色溫多為 3,500K 以下暖白光，色溫變化對效率影響不大。但對 LED 來說，色溫對發光效率影響就非常明顯，以激發螢光粉 LED (phosphor converted LED, pc-LED)為例，產生冷白光效率最高，傳統的藍光激發 YAG 鋁酸鹽螢光粉產生的冷白光色溫較高，但受限於螢光粉塗佈的均勻性、晶粒特性變異、操作溫度變異等技術瓶頸，發光波長會有漂移而造成產生暖白光遇到困難，雖可使用藍光激發紅光與綠光兩種螢光粉的技術，得到高演色性的暖白光，但就目前市場上的商品調查，(如圖 4.3-2 所示)，暖白光的 LED 效率較冷白光的 LED 差。



資料來源：Energy Savings Potential of Solid-State Lighting in General Illumination Applications 2011 to 2035

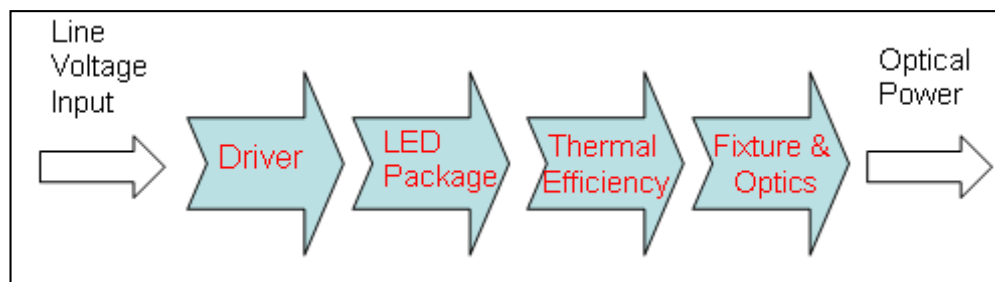
圖 4.3-2 不同色溫 LED 效率發展圖

道路主管單位一般認為暖白光的雨霧穿透能力較佳，且較不會引起駕駛人疲勞，但暖白光的 LED 路燈效率目前較冷白光的 LED 路燈效率差，以 2011 年來說，兩者差距近 40%，暖白光的 LED 路燈效率與高壓鈉燈差距則超過 45%，並無任何節能效益可言。但美國能源部預期未來透過製程改善，暖白光的 LED 路燈有機會效率提升到與冷

白光的 LED 路燈水準相近。

二、LED 驅動效率

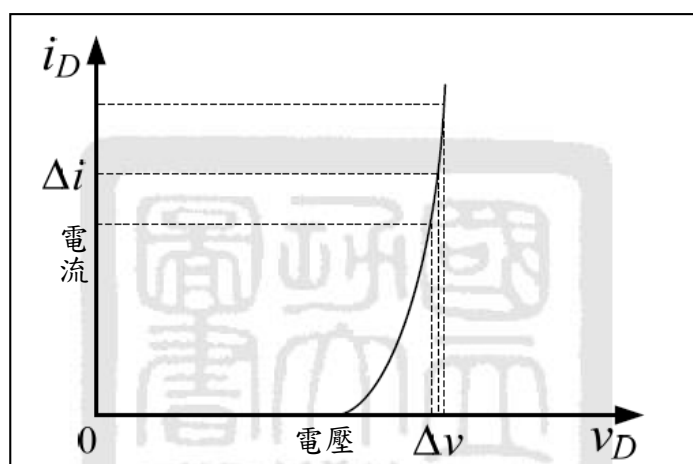
LED 照明燈具是結合光、機、電與熱特性的系統性產品，除了 LED 封裝元件本身的效率損失外，LED 燈殼(Fixture)與光學系統的效率也是 LED 照明設計考量的重點，其他如操作溫度變異（熱效應管理）、電源供應和 LED Driver 的效率損失等，對最終 LED 照明產品的發光效率都有重大影響(如圖 4.3-3 所示)，綜合考量各變異因素，如何最佳化設計參數，產出最具性價比效率或最佳發光效率的 LED 照明產品，正是 LED 照明未來努力尋求突破的重點。



資料來源：Final Report prepared in support of the U.S. DOE Solid State Lighting Technology Demonstration GATEWAY Program

圖 4.3-3 LED 照明光電轉換示意圖

所以 LED 路燈的更換必須考慮整組燈具效率，燈具效率須包含驅動、LED 元件本身、散熱效率和光學效率所組成，由於將白光 LED 操作於順向區，可以使用定電壓(Constant Voltage, C.V.)驅動或定電流(Constant Current, C.C.)方式來驅動。若以定電壓方式來驅動時，順向電壓因電源穩定度所導致的微小變動將會使白光 LED 的順向電流有著大幅度地變化(如圖 4.3-4 所示)，因此造成光輸出大幅的不穩定，進而使 LED 的光度不易控制。反之，若以定電流方式來驅動時，順向電流在微小的變動下，對順向電壓的影響將可相對較小，能使 LED 的光度得到較穩定的掌控。因此目前白光 LED 大多以順向電流來作為驅動。就白光 LED 典型規格進行分析，按照 LED 的電流、電壓變化規律，一般應用順向電壓為 3.0-3.6V 左右，典型偏壓為 3.3V，電流為 20mA，當加於 LED 兩端的正向電壓超過 3.6V 後，順向電壓稍微增加一點，則 LED 的正向電流隨之增加很快，因此 LED 溫升很快，從而加速 LED 的光衰減，使 LED 的壽命縮短，甚至燒壞 LED。

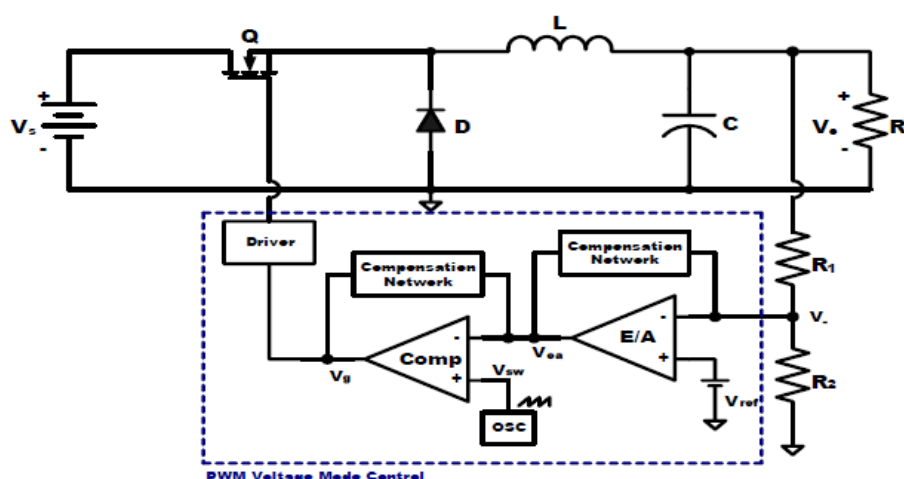


資料來源：High-efficiency Optical Technology for LED Lighting

圖 4.3-4 LED 驅動特性示意圖

前述控制方式屬於線性式穩壓器(Linear Regulator)將功率電晶體操作在線性區(當可變電阻用)，並藉由回授機制控制輸出電壓或電流，為維持 LED 照明品質，避免產生色偏，同時因應智慧化調光，因應環境需求如車流狀況，調整道路照明，獲得更有效光源控制。

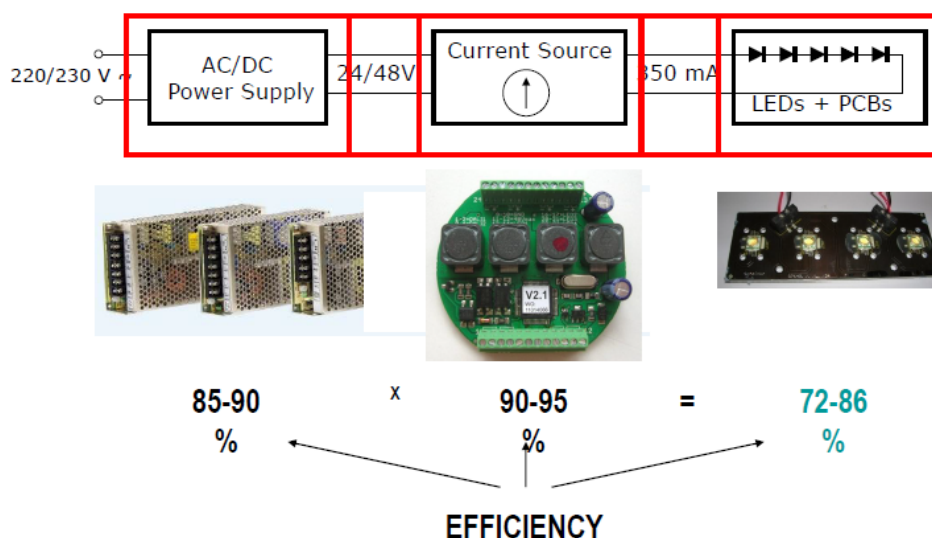
另一種方式係採用交換式穩壓器(Switching Regulator)將功率電晶體操作在飽和區與截止區(當開關用)，同樣並藉由回授機制控制輸出電壓或電流，利用 PWM(Pulse Width Modulation)控制，較傳統線性式穩壓器獲得更佳穩定電壓、電流與調光品質(如圖 4.3-5 所示)。



資料來源：Cree® XLamp® XT-E LEDs Product family data sheet

圖 4.3-5 LED 交換式穩壓器

針對驅動電路對整體效率的影響，可採用 Cree 公司生產的 LED 晶片 XM 系列為例(如圖 4.3-6 所示)，LED 路燈在路側輸入端獲取 220V 交流電源，經過 AC/DC 轉換成 24/48V 的直流電壓，假設路燈系統商將其搭配轉換效率為 85~90%的變壓器，而後續配合效率 90~95%的穩壓器再將直流電壓轉換成 350mA 定電流輸入 LED 晶片，號稱 150lm/W 的光電轉換效率，再納入驅動、電源供應後，其實際光電轉換效率約為原本的 72~86%之間，大約為 100~120lm/W。



資料來源：OSRAM Golden DRAGON OVAL LED operation manual

圖 4.3-6 LED 效率轉換示意圖

LED 驅動電路係依照功率應用範圍與選擇，小功率(10W 以下)多以簡單的降壓型(Buck Converter)、昇壓型(Boost Converter)、升降壓型(Buck-Boost Converter)等形式設計驅動電路，中功率(100W 以下)則多以返馳式(Flyback Converter)、順向式(Forward Converter)為主，100W 以上則採用順向式(Forward Converter)、推挽式(Push-Pull Converter)、半橋式(Half-Bridge Converter)、全橋式(Full-Bridge Converter)。

提升驅動系統效率策略主要包括改善功率因數，不僅要求滿載的總能效(總效率)與功率因數，更要求智慧照明低功率或輕載之功率因數。其次為提高產品的可靠性並因應供電品質容許更具彈性輸入電源範圍。

提升功率因素方式包括被動式(Passive)功率因數修正:用大電感與電容器所組成的濾波器來修正輸入電流波形，以提升功率因素，此種方式優點為便宜，缺點為僅能提升至 0.7 左右且增加許多重量，主動式(Active)功率因數修正器架構多為昇壓型電路架構 (Boost Topology)，其優點係功因值可提升至 0.95 以上，重量較動式功率因數修正低，缺點為成本較動式功率因數修正高且系統較複雜。

三、溫度

傳統高壓鈉氣燈泡輸出流明與功率成正比，不受周圍溫度的影響，相較之下 LED 發光效率相關的另一個技術難題在於散熱技術。LED 在進行電光轉換過程中，一部分轉換為可視光，其他未轉換光的能量便以熱的方式呈現出來。所有的燈具都必須有對應之散熱機制，分為熱傳導、熱對流、熱輻射三種。

熱傳導是指在固體介質中，熱流由高溫處傳遞至低溫處的現象。不同的介質有不同的傳熱效果，熱傳導之介質以金屬與陶瓷材料具有較佳的導熱係數，若物體之截面積大，則亦有助於熱傳導。

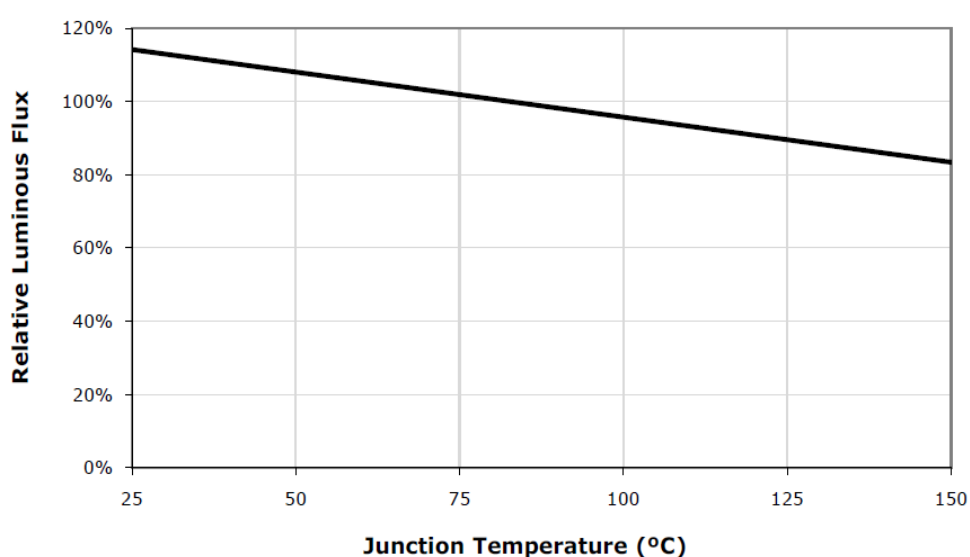
熱對流是物體在流體介質中，熱量被較冷的流體帶走而達到熱傳遞的行為。高溫物體靜置在空氣中、冷卻水內或以風扇降溫，都屬熱對流傳遞。較低的流體溫度、較高的流體流速及較大的接觸面積，均有助於熱對流效果。

熱輻射散熱為物體因熱的關係而產生電磁波輻射，稱為熱輻射 (Thermal Radiation)。熱輻射係由物體內部微觀粒子的熱運動狀態改變時激發出來的能量，由於其傳送以不連續量子(Discrete Quanta)的形式產生，故不需介質傳遞。

雖然 LED 所發出光線屬於冷光源，但事實上，LED 是一種高熱的發光元件，其中，近代發展之高功率 LED 的發熱量遠遠超過傳統之 LED。但是轉換效能上，高強度氣體放電燈具在 100W 的輸出功率下，約有約 10~15%轉換成熱，約 70%轉換成紅外線輻射，僅 10~20%轉成可見光。相較之下，LED 約有 15%~30%可轉換成可見光，其餘全轉換成熱，但因 LED 封裝體積小且因封裝灌膠之影響，p-n 接面發光時會產生高熱，因此假如散熱設計不佳，將導致 LED 發光產生之熱量累積於 p-n 接面，造成其亮度減低、壽命衰減與波長漂移，且

溫度過高，亦會因為內部各元件的熱膨脹係數不同造成 LED 晶片損壞，或導致元件間承受過大機械應力而損毀。因此，LED 之散熱需求變成提昇其使用效率之重要條件。

同為照明元件，高強度氣體放電燈具所散發出來之熱量很多，雖然多數未轉換成可視光之能源，但會成為紅外線輻射直接被釋放到外部，不須要考慮散熱問題。而且高強度氣體放電燈具主要構成材料為玻璃、鎢、黃銅、鋁等不怕熱的部分，所以不須花費散熱的成本。然而 LED 卻是怕熱的元件，多數製造商保證 LED 效率其工作接面溫度為-10~85°C 左右，由此可推算，LED 操作溫度必須維持在 50°C 以下。當使用溫度接近溫度上限時，LED 亮度及相關效率會下降(如圖 4.3-7 所示)，若超過溫度上限，LED 會損壞 (Failure)。而且在溫度上限附近使用的話，無法保證正常使用時的 5 萬小時左右壽命。因此 LED 為了要維持性能、保證壽命，LED 操作溫度必須以散熱機制控制在 50°C 左右以下。

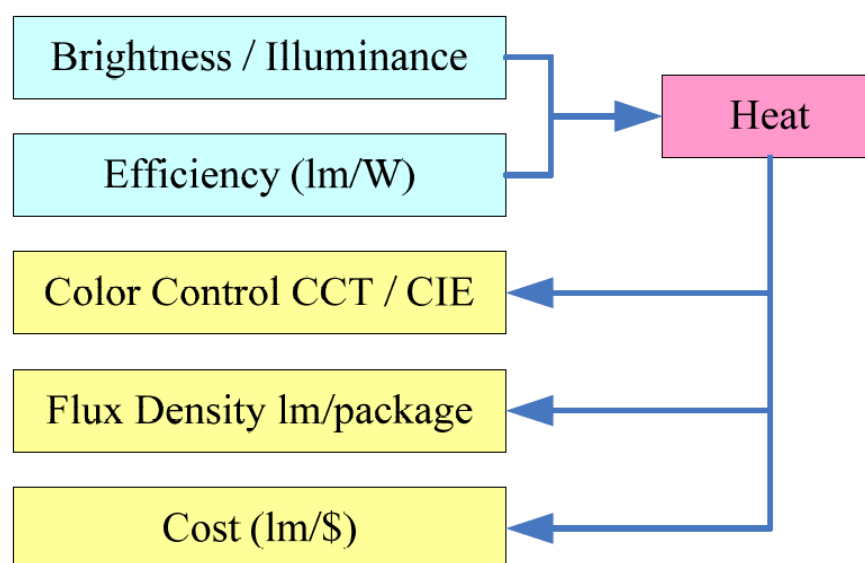


資料來源：Energy Consumption in the Production of High-Brightness Light-Emitting Diodes. Sustainable Systems and Technology

圖 4.3-7 溫度與效率關係圖

隨著白光 LED 應用在路燈照明，所需要的輸出流明數也越來越高，但是很明顯地，單顆白光 LED 其驅動電源偏低，因此，以目前的封裝技術不太可能以單顆白光 LED 來達到照明所需要的流明數。針對此一個問題，目前主要的解決方法大致上可分為兩類，一是較傳

統的將多顆 LED 利用組成光源模組來使用，而其中每單顆 LED 所需要的驅動電源與一般所使用的相同(約為 20~30 mA)；另一種方法則為目前幾個高亮度發光二極體製造商所使用的方法，即是使用所謂的大面積晶粒製程，此時不再使用傳統晶粒的大小，而將晶粒製程為更大的尺寸，並使用高功率電流來驅動這樣的發光元件(依據驅動電流區分，LED 又可區分為標準型($\leq 20\text{mA}$)、高電流(50~150mA)與高功率($\geq 150\text{mA}$)三類)。但無論是使用何種方法，都必須在極小的 LED 封裝中處理極高的溫度，若元件無法將高熱散去，除了各種封裝材料會因為彼此間膨脹係數的不同而有產品可靠度的問題，晶粒的發光效率更會隨著溫度的上升而有明顯地下降，並造成元件壽命明顯縮短、產生色偏使照明品質下降，同時高熱也造成 LED 燈具整體成本提高、限制元件密度與整體輸出(如圖 4.3-8 所示)。因此如何散去 LED 元件中的高熱，成為目前 LED 封裝技術的重要課題。



資料來源：Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan March 2011

圖 4.3-8 LED 散熱與成本效益關聯示意圖

LED 與白熾燈泡不同，其體積小可以散熱面積相對也小，另外 LED 所使用環氧樹脂等封裝材料散熱性極差，幾乎無法藉由元件正面散熱，僅能將熱傳導到其直接接觸的支架或基板上，再將基板連結到更大的散熱元件上。常見的散熱方式包括：散熱鰭片(finned heat sink)、迴路熱管 (Loop Heat Pipe, LHP)、導熱塗料(如氮化硼產品)、

封裝材料的改變(如矽樹脂)，其中以前三項較為常見。

散熱鰭片方式係屬被動散熱機構，為熱傳導方式，主要是靠傳導與自然對流方式進行散熱，為目前 LED 燈具最常見的散熱方式，散熱鰭片利用增加散熱面積與搭配風道、開氣孔設計，提升傳導和自然對流能力。也就是散熱鰭片除了一般清洗外，並不需要加以維護，成本較低，可配合燈具形式以不同製作方式如鋁擠、鑄壓、鍛造、刨切等方式製作成不同形狀(如圖 4.3-9 所示)。散熱鰭片本身不需額外電力供應，其散熱面位於 LED 燈具上方，以及體型受限制較小等有利於空氣自然對流散熱，且無任何主動元件，不會造成故障等優點，其缺點為無法適應目前高功率系統，且為了增加散熱面積，通常採取密集式鰭片式散熱機構，若安裝於多風沙地區，或高快速道路車流量大之區域，因車輛所排放煙塵，容易在散熱機構堆積造成堵塞散熱區域，使風無法通過散熱鰭片帶走熱源，因而造成溫度上升使 LED 燈具效能下降，其次維護清洗上也是一大問題，另外被動散熱機構無法根據工作狀況調整散熱，對其應用造成限制。不過未來由於 LED 光源發光效率不斷提升，相對熱源產生預期將減少，應用範圍將可進一步擴大。

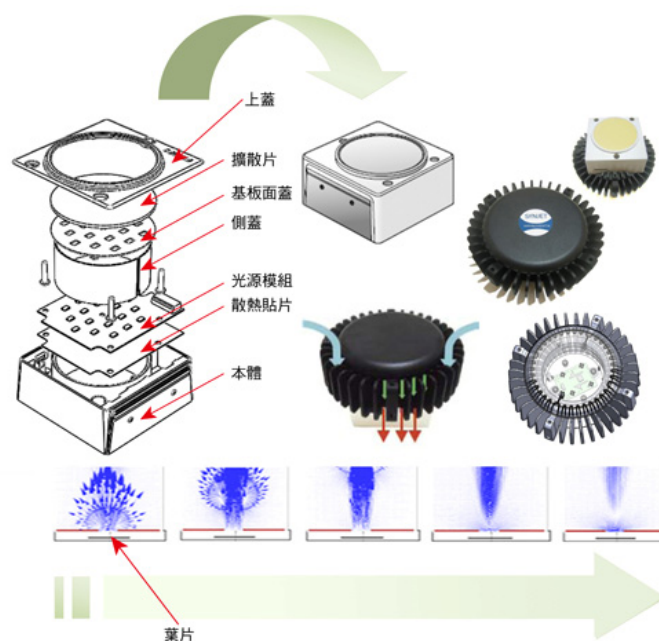


資料來源：Final Report prepared in support of the U.S. DOE Solid State Lighting Technology Demonstration GATEWAY Program

圖 4.3-9 LED 路燈散熱器圖

另外為適應日漸加大的功率帶來的散熱需求，因此在散熱鰭片加裝軸流風扇強制散熱方式，利用熱對流原理將熱帶走。此系統雖簡單，

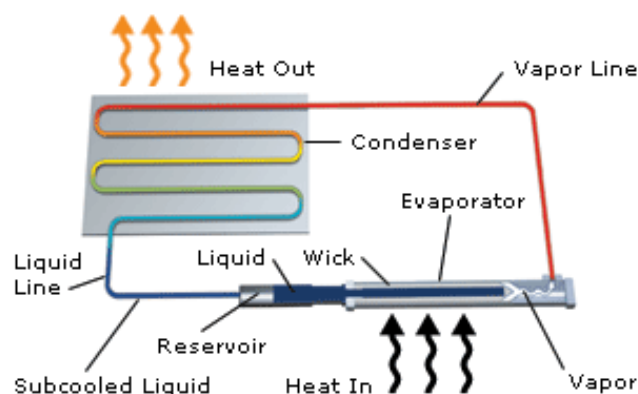
散熱效果較只有散熱鰭片佳，但當風扇無法運作時，立即會造成過熱現象，而造成 LED 路燈損壞，故一般會加裝溫控開關，當 LED 燈具內溫度過高時，立即跳脫電源，以保護 LED 模組。另由於加裝風扇強制散熱方式必須靠進出口，才能將熱源帶出燈具外，若安裝於多風沙地區，或高快速道路車流量大之區域，因車輛所排放煙塵，容易使風扇卡住，造成 LED 燈具效能下降，且將來維護上多一個機構外，在維護上也較單純散熱鰭片系統複雜。為改善前述缺點，有些系統採用壓電風扇(Piezo Fans)取代傳統軸流風扇，其壓電風扇運作耗能範圍約為 0.02W~0.1W 之間，僅為傳統軸流風扇(2W)的 1%~5%。根據研究顯示，壓電材料在正常使用下，壽命可以超過 50,000 小時。因為壓電風扇相較於一般的傳統風扇而言，壓電風扇具備體積小、消耗功率小、噪音小、長壽命等優點，這些優點相當適用於現在 LED 燈具散熱所需的低功率、低噪音和不占空間的要求。而壓電風扇則是利用壓電材料具有壓電效應 (Piezoelectricity) 的特性來造成葉片的擺動，造成空氣流動來帶走 LED 產生的溫度(如圖 4.3-10 所示)。一般選用壓電風扇性能參數在於其壓電參數、扇葉厚度和黏合膠(Bonding Glue)之不同。其適用系統功率較單純散熱鰭片系統高。



資料來源：<http://www.ledinside.com.tw/>

圖 4.3-10 LED 路燈壓電風扇示意圖

熱管熱交換散熱方式係目前可適應最大功率 LED 燈具之散熱方式，使用的散熱設備為迴路熱管(Loop Heat Pipe, LHP)，係內含化學液體的封閉循環銅管與玻璃管，化學液體就會週而復始地在 LHP 中進行降溫(如圖 4.3-11 所示)。迴路熱管原理是依靠封閉式迴路管內的化學液體，在加熱端與冷卻端的熱交換進而達成熱量傳遞。熱量從加熱端傳遞給化學液體，使化學液體變成蒸氣。而當蒸氣流經冷卻端(Condenser)時，其被冷凝成液體，而加熱端內部的毛細管結構可利用毛細原理將冷凝液體帶回蒸發器(Evaporator)，如此即可完成流體循環，達成熱能的傳遞。



資料來源：Opto Semiconductors OSRAM

圖 4.3-11 LED 路燈熱管熱交換散熱示意圖

除一般傳統熱管的優點外，迴路熱管最大優點在於它可做長距離熱量傳遞、管路可彎曲，因此極富靈活性且不受重力場的影響，任何方向均可操作。因此藉由迴路熱管遠距離熱傳特性，將 LED 熱源所釋放出來的熱藉由銅管迴路傳遞至燈殼上(散熱板)，並利用大面積燈殼表面與空氣接觸，在自然對流運作下，毋須借助任何額外電力，可不斷循環散熱，有效解決散熱的問題，進而提升 LED 燈具壽命。而其缺點為冷凝管中所含的低比熱化學液體經過長時間加熱及降溫後，容易產生不可循環之化學變化，而冷凝效果衰退後，銅管內液體溫度升高，使得 LHP 在高熱能下進行循環動作，進而導致散熱效果下降，且其成本較前述二者更高。

四、燈具效率

LED 路燈與傳統路燈在光源特性上最大的差異來自於發光特性，傳統光源在發光角度上為 360 度，且其各方向光強度均一致，而 LED 發光面積小為點光源，可多顆結合成面光源，光指向性強。傳統光源為全向性，LED 有高指向性的發光角度，現有 LED 生產大廠所生產之 LED 晶片一般多屬於 Lambertian 出光模式，以 Cree XLamp XP-G 系列為例，其資料手冊宣稱其單一晶粒發光角度為近 180 度，但在 60 度角光強度為中心光強度的一半，在 80 度只剩下約 20%，如圖 4.3-12 所示。

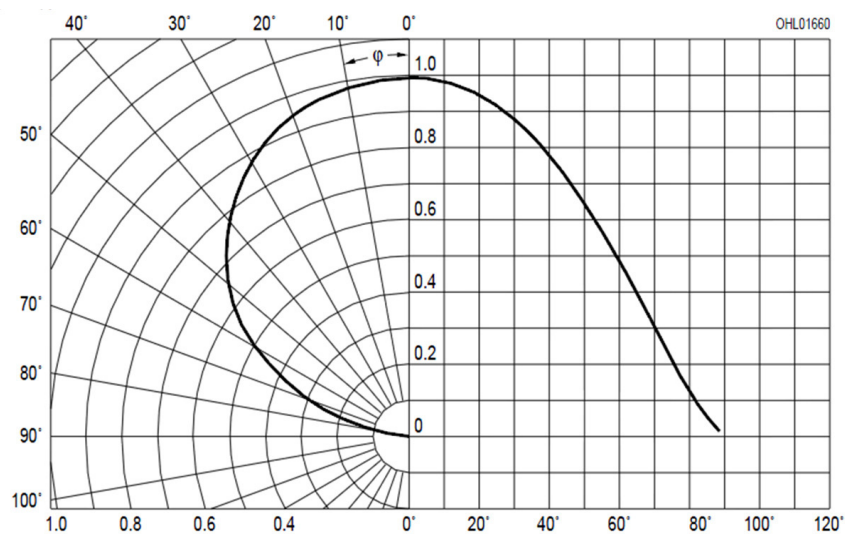
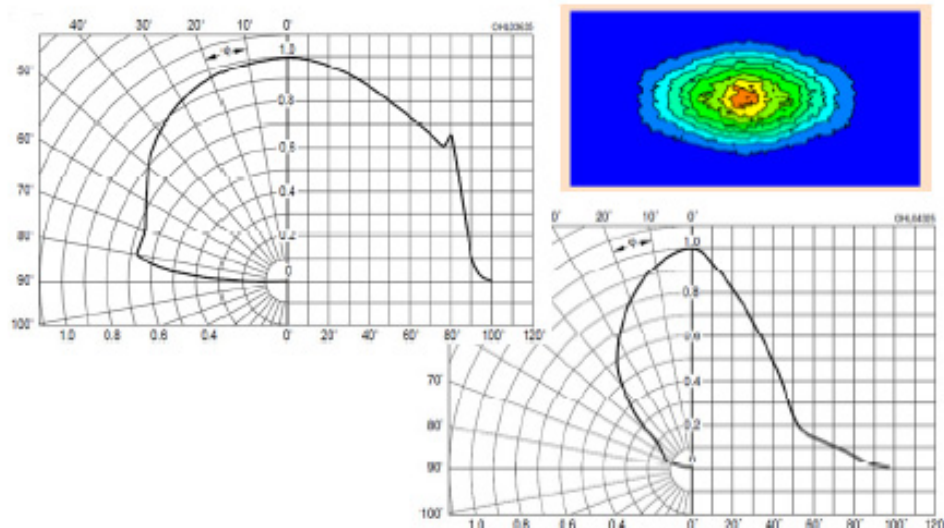


圖 4.3-12 Cree XLamp XP-G 光效圖

並非每一個 LED 晶片發光角度都採用 Lambertian 出光模式，舉例來說，針對大型會場或單邊路側照明，OSRAM 生產之 Golden DRAGON Plus 或 OSLO 80° LEDs 就有不同方式配光，由圖 4.3-13 可知，其光形為 0 度開始，左側順時針方向配光。

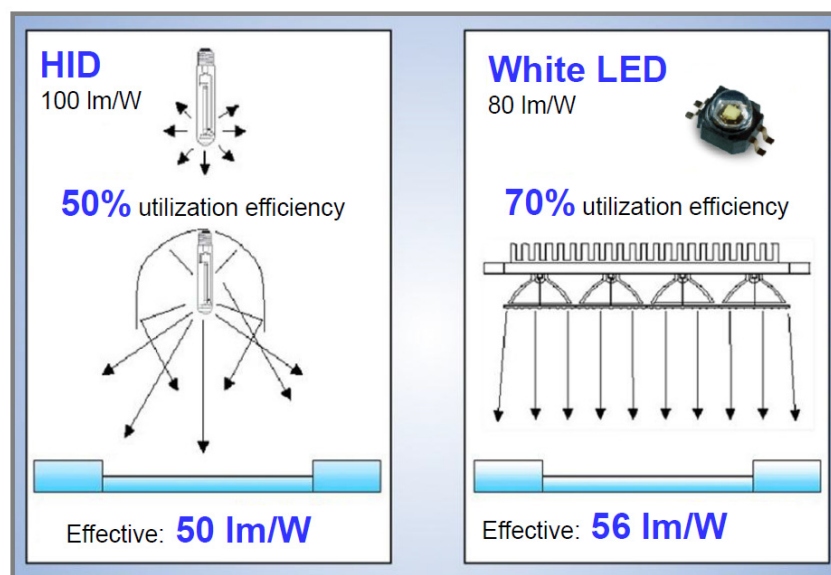
燈具效率(Luminaire Efficiency 又稱燈具光輸出比)是用來評估燈具能源效率的一項重要標準，其值是將裝有光源的燈具所發出之有效光通量除以所裝光源本身所發出光通量所得之商值。在應用於道路照明時，若單純以路燈周圍地面輝度為目標，則 LED 在效率計算上比高強度氣體放電燈具具有優勢，傳統高強度氣體放電燈具即使經過光學設計，可投射至路面流明數約為 50%，但 LED 約為 70%以上，若

以 100lm/W 高壓鈉燈和 80lm/W 的白光 LED 進行燈具效率比較，實際照射至路面分別為 50lm/W 和 56lm/W。此項特性較適合景觀道路或 8 米以下巷道，對高速公路用路人則有產生眩光之疑慮，如圖 4.3-14 所示。



資料來源：OSRAM Golden DRAGON OVAL LED operation manual

圖 4.3-13 Golden DRAGON Plus



資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED)
Roadway Lighting

圖 4.3-14 HID 與白光 LED 燈具效率(Luminaire Efficiency)比較圖

五、光學效率

LED 發光的機制與效果不等同於傳統光源，光源一改變，相當於輸入改變，要須滿足輸出端的要求，照明系統必須重新設計。以 LED 置換傳統高強度氣體放電燈具，由於光型等特性不同，燈具也必須重新設計，才能滿足使用者的需求。

區分一次光學、二次光學可根據光行進的行為，若只有折射，稱為一次光學設計，若同時有折射與反射，稱為二次光學設計，加上繞射，則為三次光學設計。由此檢視 LED 發光，一般其一次光學多以 Lambertian 出光模式，二次光學則以折射和繞射調整出光之形式。

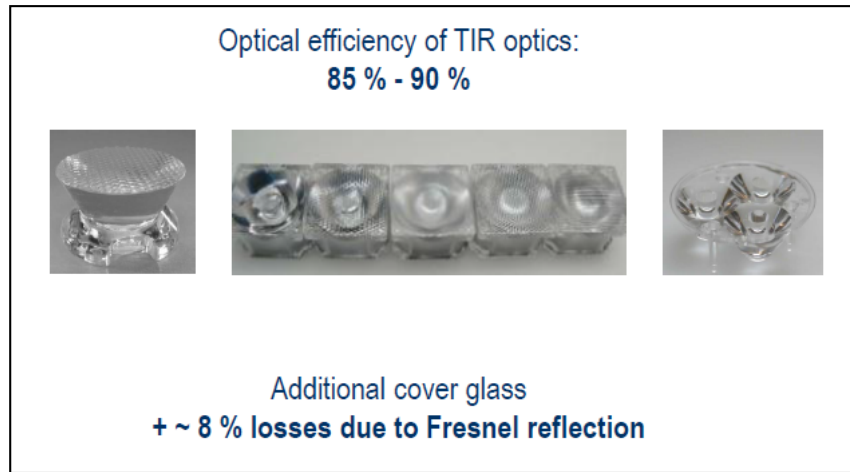
另一種分類方式係根據與光源的距離，在 LED 封裝內部設計，稱為一次光學設計，在 LED 封裝外部設計，而 LED 晶片不可視為點光源，稱為二次光學設計。

若根據光學元件的功能區分，在 LED 封裝內部之設計，純粹以增加出光效率為目的，稱為一次光學設計，在封裝外部設計，例如縮減聚光角度之設計，稱為二次光學設計。

把 LED IC 封裝成 LED 光電零組件時，要先進行一次光學設計，以解決 LED 的出光角度、光強、光通量大小、光強分佈、色溫的範圍與分佈。這就是所謂的一次光學設計。二次光學設計是針對大功率 LED 照明來說：一般大功率 LED 都有一次透鏡，發光角度為 120 度左右的 Lambertian 形式，晶片製造廠所宣稱之光電轉換效率有些會納入一次光學造成之損失。二次光學就是將經過一次透鏡後的光再通過一個光學透鏡改變它的光學性能。簡單地說，一次光學設計的目的是儘可能多取出 LED 晶片發出的光。二次光學設計的目的則是讓整個燈具系統發出的光能滿足設計需求，此項損失係於後端組裝燈具所無法避免效率損失。

LED 為一半導體材料，相較於空氣有著較高的折射率(Refractive Index)，如氮化銦鎵(InGaN)之折射率約為 2.4、磷化鋁鎵銦(AlGaInP)折射率更高達約 3.5，因此 LED 晶片從主動層發出之光子要由 LED 晶片經過一次光學、二次光學進入所要照明之範圍，必定受到介質高低折射率界面間的所產生全反射(Total Internal Reflection, TIR)和 Fresnel 反射(Fresnel Reflection)之損耗(如圖 4.3-15 所示)，而 LED 材料本身

的吸收效應亦會導致光萃取效率 (Light Extraction Efficiency, LEE) 的下降。



資料來源：Final Report prepared in support of the U.S. DOE Solid State Lighting Technology Demonstration GATEWAY Program

圖 4.3-15 LED 路燈光學損失示意圖

分析 LED 照明產生光學損失的原因主要三點原因如下：

光學全反射損失(Critical Loss)：光由 LED 入射到空氣時，入射光與折射光所行走的路線會遵守 Snell's law，如下所示

$$n_s \sin \theta_1 = n_{air} \sin \theta_2$$

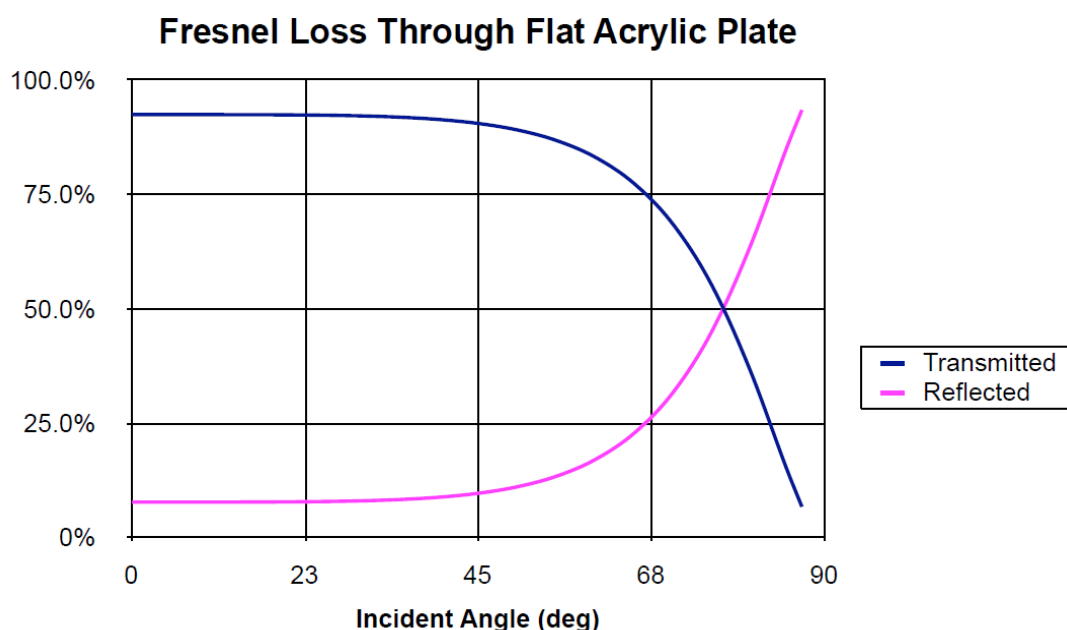
其中 n_s 為半導體介質的折射率， n_{air} 為空氣介質的折射率， θ_1 為入射角， θ_2 為折射角。由於光是由高折射率介質入射到低折射率介質($n_s > n_{air}$)，折射角 θ_2 會大於入射角 θ_1 ，且折射角會隨著入射角度增大而跟著增加，當折射角等於 90° 時，此時的入射角稱為臨界角 (Critical Angle, θ_c)，只有當入射角度小於臨界角的光才能被有效萃取。其它任何入射角度大於光射出錐的光則會在晶片內發生全反射的現象，使光被陷(Trapped)於晶片內形成如同 Waveguide 的形式，最終被 LED 材料吸收而轉化為熱能。

$$R_s = \left(\frac{n_s \cos \theta_1 - n_{air} \cos \theta_2}{n_s \cos \theta_1 + n_{air} \cos \theta_2} \right)^2 ; R_s \text{ 折射率}$$

$$R_p = \left(\frac{n_{air} \cos \theta_1 - n_s \cos \theta_2}{n_{air} \cos \theta_1 + n_s \cos \theta_2} \right)^2 ; R_p \text{ 反射率}$$

Fresnel 損耗(Fresnel Loss)：Fresnel 損耗是界面間不可避免的能量損失，由 Fresnel 方程式可以得知，當光通過兩不同折射率界面時，會同時存在反射(Fresnel Reflection)和穿透(Fresnel Transmittance)的現象，而光的反射現象會造成穿透光能量上的損失進而降低光萃取效率，屬於光學介面損失。此外，由於光具有不同的偏振態，界面間的反射率亦會受到偏振態不同的影響而有所差異。

LED 發光屬非偏振光，當光通過半導體和空氣之界面時，可以將 s 偏振光和 p 偏振光之反射率取平均值，可看出反射率的高低受到入射光角度和介質界面間折射率的差異所影響(如圖 4.3-16)，當平均反射率越大時，能量的損耗也越嚴重，由此可知半導體高折射率的特性對於光的萃取而言有著負面的影響。



資料來源：Are LEDs an efficient light source for high mast lighting? by Johann Schleritzko 2012

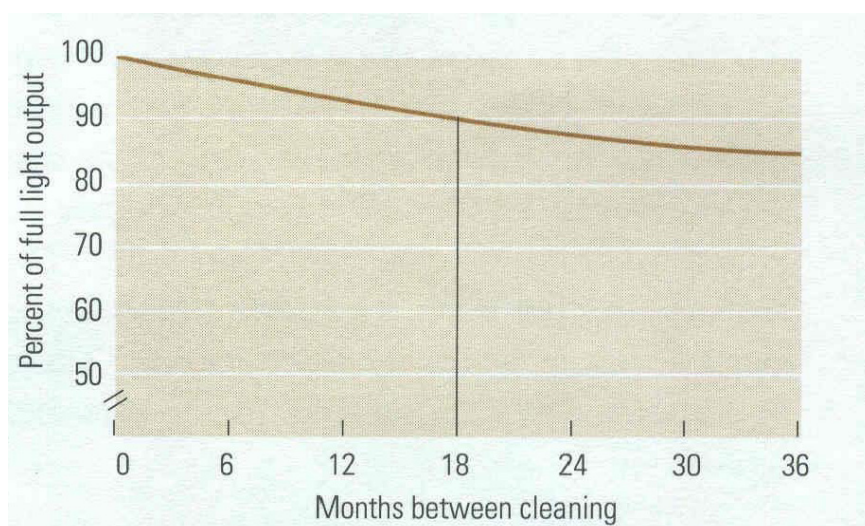
圖 4.3-16 LED 入射光角度和介質界面間折射率關聯示意圖

LED 材料的吸收效應：半導體材料除了發光的特性外，不同材料對於特定波長的光，亦有吸收的特性，稱為晶片材料吸收(Material Absorption Loss)。就一個均勻吸收介質而言，可將吸收係數視為一常數，用來表示其對光吸收的強弱，其值越大代表吸收越強烈。

早期 LED 元件發展著重於提升光電之轉換效率，其利用提高磊

晶的品質及改變磊晶的結構，使電能不易轉換成熱能，進而提高光電之轉換效率。故轉由研發晶片取光效率技術，方能獲得更高發光效率。LED 的光學效率，目前多為 80~90%之間，其中光學介面損失就大約佔 8%。

另外值得注意的是，許多國外 LED 路燈示範計畫發現，LED 路燈由於係屬於冷光源，其光學燈罩較一般高強度氣體放電燈具容易積塵，造成透光率下降，約 18 個月會減少 10%，36 個月會減少 15%，文獻顯示一般高強度氣體放電燈具 36 個月約減少 7~9%。



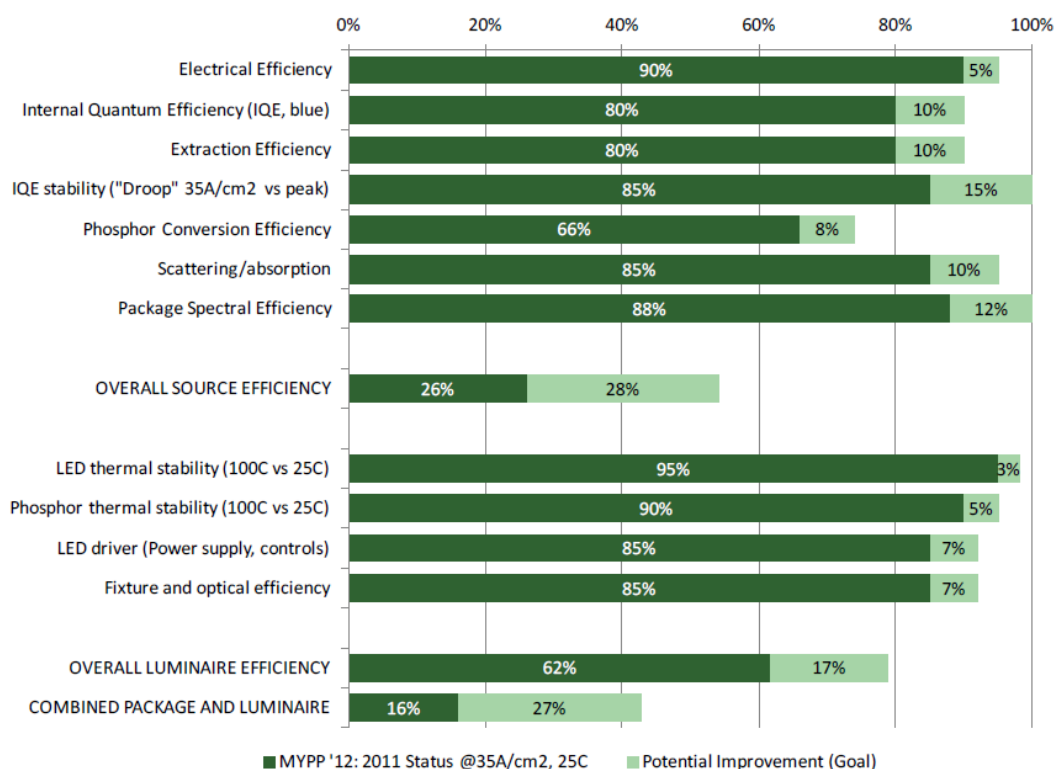
資料來源：LED Street Light Research Project Remaking Cities Institute
Pittsburgh

圖 4.3-17 燈罩髒污導致光衰示意圖

4.4 LED 路燈發展趨勢探討

由於 LED 燈具系統組成複雜，提升效率必須多方面進行，早期效率分析在提升內部量子效率，方法主要是利用提高磊晶的品質及改變磊晶的結構，使電能不易轉換成熱能，進而間接提高 LED 的發光效率，預期可獲得約 90%左右的理論內部量子效率。但是這樣的內部量子效率幾乎已經接近理論的極限，在這樣的狀況下，光靠提升元件的內部量子效率是不可能達到預期 2020 年 300lm/W 之目標，因此效率提升必需藉由整體系統通盤考量達到。

美國能源部於 2012 年將 LED 路燈系統分為電源、驅動、LED 元件本身、散熱效率和光學效率分別考慮，列出目前 LED 路燈最常採用之螢光法(藍光 LED 與黃色螢光粉)效率提升潛力趨勢檢討如圖 4.4-1 所示。



資料來源：DOE. (2012a). Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan. Washington DC.

圖 4.4-1 LED 燈具效率提升預測示意圖

現今的 LED 一般擁有高的內部量子效率，但是光萃取效率卻僅有 10~20%，這是因為許多光子被侷限在 LED 內，使得出光效率低落，浪費了許多能量。從光學的角度來看，造成 LED 光萃取效率不高的主要原因歸咎於 LED 本身材料的吸收、Fresnel Loss 以及全反射角損耗(Critical Angle Loss)。由圖 4.4-1 分析，其效率提升重點除核心元件 IQE 提升之外，包括電源、螢光粉、熱管理、光學等 4 個部分。

在電源部分，藉由主動式(Active)功率因數修正，同時採用更新技術或最佳化的電源拓撲 (Topology) 結構及方案，應可在 2020 年將其變壓效率由目前 90%提昇至 95%。

在螢光粉方面，未來所採用的螢光粉和現有螢光粉比較起來，有

以下幾種特色：

1. 強吸收度 (Strong absorption efficiency)

螢光粉體本身之吸收能量越強，越有利於釋放出高能量之光線，故透過製程改良或材質選擇，螢光粉之吸收光譜範圍越精確，其吸收效率越高，可望在 2020 年由目前 85% 提昇至 95%。

2. 發光效率 (Conversion efficiency)

螢光粉另外一項發展重點為高發光效率，螢光粉受內部激發態能階電子影響，其具不同能階位能。當發光物質經光能激發而吸收能量，電子即由基態躍遷至激發態，透過內部、外部轉換或系統間轉換損耗能量，再經熱平衡而回至基態，其中發光效率受能量損耗影響，過程中若損耗過多能量（一般以熱方式損失），則發光之能量較弱，反之則亦然。因此發光效率對於螢光粉之使用亦有不可或缺之重要性，未來透過材質改良，其光電轉換效率可由目前 66% 提升至 74%。

未來 LED 發光效率提升重點在散熱管理，主要目的係降低接面溫度，接面溫度影響到了不只是效率或壽命等關係，接面溫度越高其壽命衰減越快。德國的 OSRAM 公司提出未來散熱管理應以下列 4 個方向同時進行：

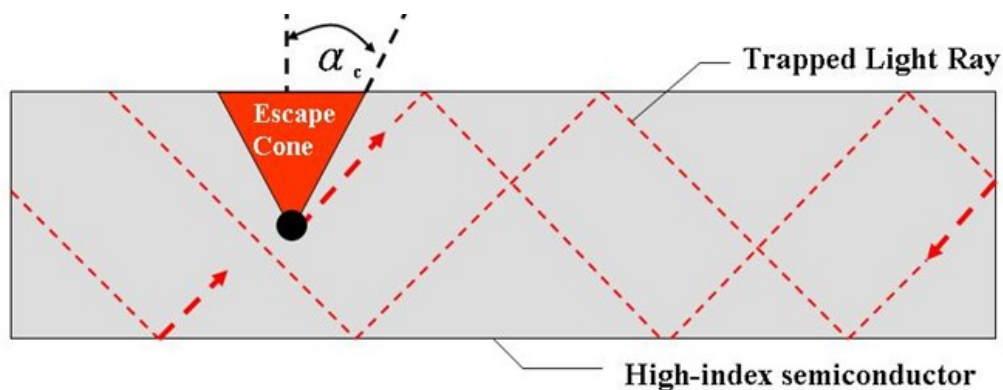
1. LED 晶片 (Chip level)：由於目前 LED 光的取出效率只有大約 20~30%，其他部分都變成熱。但燈具中熱如果無法適時的排出，就會發生光衰的問題。具體做法包括降低封裝的熱阻抗、改善晶片外形、採用小型晶粒、改用矽質封裝材料與陶瓷封裝材料，能使 LED 的使用壽命提高等改善方式。

2. LED 封裝 (Package level)：主要降低封裝的熱阻抗以控制 LED 溫度，利用挑選好的導熱係數材質，把 LED 所產生的熱導出，不管是利用自然散熱、透過其他散熱機制散熱或是選用導熱係數大的金屬材料等等，在未來因為高功率的 LED 會因為輸出功率提升，造成熱的問題也相繼提升，且要把 LED 熱完全導出將是一個重要的課題。目前採用方式包括最佳化熱通道，即對通道進行 LS 控制，L 越短越好，S 越大越好來消除熱傳導上的瓶頸。以及改良封裝製程以強

化導/散熱功能，或採用二次散熱機構並減少 LED 與第二次散熱機構之間的熱阻。

3. LED 電路板 (Heat spreading level)：LED 照明其技術核心在於將印刷電路板貼附在一金屬板，目前已開始運用底部的鋁或銅等熱傳導性較佳的金屬來加速散熱，以改善 LED 燈具傳熱路徑。
4. LED 散熱模組 (Thermal module level)：LED 燈具的散熱組件與 CPU 散熱相似，都是由散熱鰭片、熱管及熱介面材料所組成。不同之處，在於 LED 的散熱只能憑藉空氣自然對流來傳遞熱量。有鑑於此，如何減短熱傳導路徑以達成降低界面溫度之目的為其技術關鍵。一般高功率 LED 單晶粒的封裝模組中的散熱片使用，整體封裝模組的結構包括光學透鏡、LED 晶粒、透明封裝樹脂、螢光、電極導線及散熱片等，其通常作法是以焊料或散熱膏將 LED 晶粒黏貼在散熱片上，經由散熱片來降低封裝模組的熱阻抗，這亦是市場上用最廣為採用的 LED 封裝模組。透過整體燈具散熱機制改良，估計分別可以提升 LED 本身與螢光粉的效率 3~5%。

在光學介面損失改良上，為減少光的反射現象會造成穿透光能量上的損失進而降低光萃取效率，依據光學原理任一物質對於光的物理性質為：反射率+吸收率+穿透率 = 100%，目前一般作為 LED 選擇之材料多以對光的吸收率必須極低為主。另外就是以 Escape angle 控制，以減少 Fresnel 損耗，所謂 Escape angle 為其實就是光由 LED 入射至 LED/空氣界面的臨界角，就是考慮 LED 的高折射係數，這將使得 LED 所產生的光受到侷限(Trapped Light)。

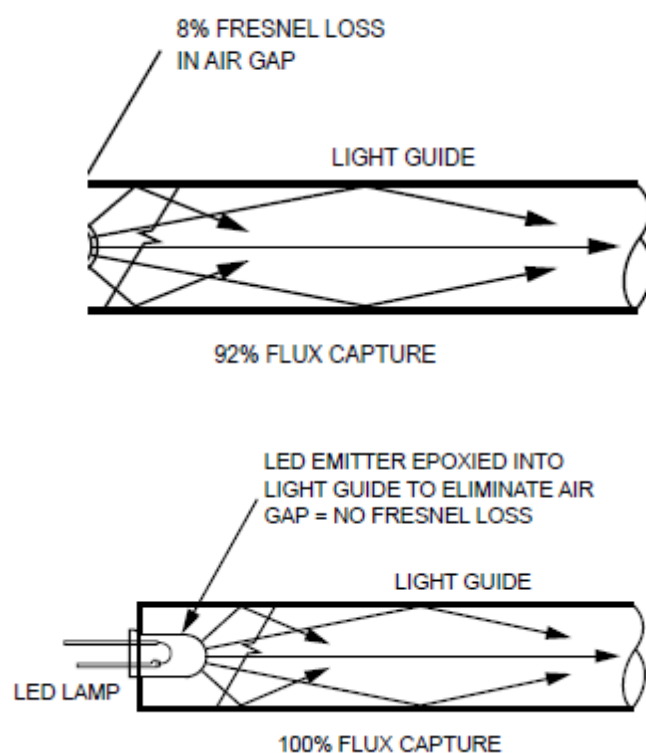


資料來源：Are LEDs an efficient light source for high mast lighting?
by Johann Schleritzko 2012

圖 4.4-2 LED Escape angle

如圖 4.4-2 所示，從主動區所發射的光線在到達半導體與周圍空氣之界面時，如果光的入射角大於 Escape Angle 時，則會產生全內反射(Total Internal Reflection)，而當光子全反射多次後，光子可能被半導體材料吸收而消失。只有與 LED/空氣界面的法線夾角小於 Escape angle 的光線，才能藉折射讓部分光子離開 LED。

由前述可知，為避免所以大部分從主動區所發射的光線，將被侷限(Trapped)於 LED 內部，產生非輻射復合效應(Recombine Non-Radiatively)，進而降低 LED 效率。所以目前 LED 封裝材質多使用環氧樹脂(Epoxy)封裝技術，配合導光設計減少光學損失(如圖 4.4-3 所示)，約可提升約 8%的光學效率。



資料來源：Philips Lumileds Luxeon K2 operation data

圖 4.4-3 更換封裝材質減少光學損失示意圖

4.5 小結

綜前所述可知，在相同照度下以 LED 路燈取代水銀路燈可節能至少 50%以上，在節能減碳上係屬值得推動之綠能產品。至於以 LED 路燈取代較高瓦數（200W 以上）高壓燈或低壓鈉燈，以其目前發光

效率來看，在節能方面未必有明顯優勢；如取代低瓦數的高壓鈉燈及低壓鈉燈，因其發光效率僅 60~70 lm/w，以目前 LED 路燈產品光效普遍已達 80~90 lm/w，仍有其汰換的節能效益。

此外，利用 LED 路燈與智慧型控制系統結合，在車流量尖峰時段調亮照度，在深夜車流量小時降低照度，亦可節省不少路燈用電量。目前國外如美國加州聖荷西市於 2009 年即有這樣的節能案例，國內目前則有金門於 2010 年增設「LED 路燈智慧型遠端監控系統」，可透過自動化、集中化的資訊蒐集及分析管理，適時提供路燈損壞及異常通報並建立資料。

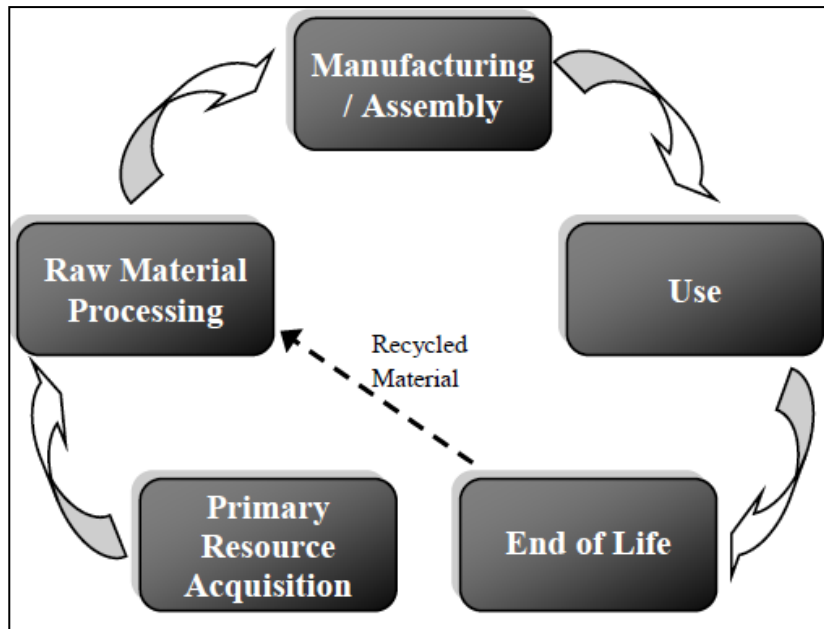
根據統計及研析，LED 路燈系統的故障原因，電源供應器仍是主因，而 LED 元件亦有慢慢呈現故障的現象，至於是否影響照度需求，仍待後續觀察及量測。LED 燈具是否能發揮其長壽命之特點，對於其功能性失效與損壞性失效均需再針對燈具系統各關鍵器件進行可靠度的探討。除此，換裝 LED 道路照明產品時，除了燈具本身之外，在其電源系統仍需注意是否加裝過載及漏電保護開關、是否接地、是否加裝抗突波保護裝置，以及接線要注意導線連接應確實，避免增加接觸電阻，造成導線過熱而損毀。

由於 LED 仍屬於發展中，產品標準欠完善，此狀況衍生出 LED 照明產品的諸多問題，如品質不穩定、性能差異大，散熱設計及環境因素造成壽命降低、不良的光學設計影響照明品質等，這是生產業者本身需嚴格把關之課題。對於使用單位而言，後續維管上亦必須定期抽測，以確保 LED 路燈品質、節能、長壽命之特點。整體而言，LED 路燈推動注意事項包括：模組化、規格化、價格平民化等面向，這也是未來 LED 道路照明產品廣泛應用之關鍵。

第五章 LED 路燈生命週期與實際案例探討

5.1 生命週期概念簡述

由於全球環境惡化速度無法有效減低，高度工業與經濟發展區域及國家的永續環境理念發酵，所以，綠色技術因應而生，所謂綠色技術則包括產品綠色技術、製程綠色技術、產品使用端綠色技術、產品廢棄後資源化技術等。即產品必須在各自應用領域中具有良好的使用性能，在原料製備、產品製造、使用以及再生利用或者廢棄物處理等環節中，需對環境負荷最小或者有利於人類健康。因此必須由整個產品之生命週期進行整體分析，所謂生命週期的定義為，產品從原物料取得、生產、使用及處置(如圖 5.1-1 所示)，對整個生命過程中的環境考量面與潛在衝擊，需要考量的環境衝擊通常包括資源使用、人體健康、生態影響等 3 方面。而生命週期分析(Life Cycle Assessment, LCA)主要係分析產品對環境產生的衝擊，我國環保署針對生命週期分析規定包括能源、空氣、水污染、廢棄回收等四項主要考慮之因素。



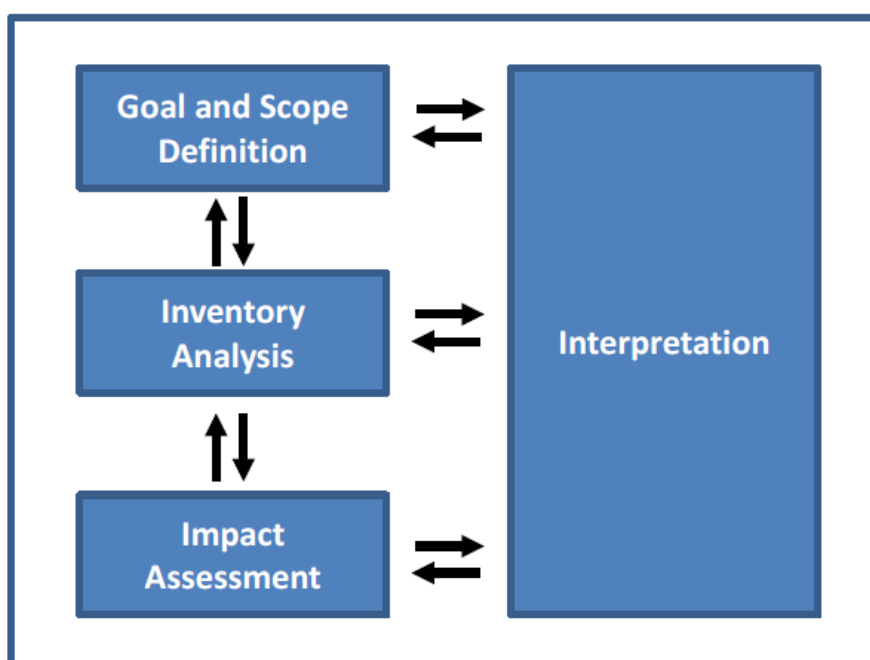
資料來源：ISO. (2006). Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.

圖 5.1-1 生命週期分析概念圖

首先是能源的消耗，其中包括原料的萃取、轉換、運送以及妥善處理廢棄物所可能消耗的電能、熱能。第二個因素是空氣污染，分析範圍針對使產品在各個階段所產生的廢氣能符合現在排放法規所需要的清潔空氣體積。第三個因素是水污染，也是指在製造成品每階段，將廢水稀釋至符合排放標準所需的清水量。最後一個要考慮的因素，則是產品生命週期中，每個階段所產生的廢棄物量。

生命週期評估屬於系統分析方法之一，其為「對產品系統自原物料的取得到最終處置的生命週期中，投入和產出及潛在環境衝擊之彙整與評估。」(ISO14040, 2006)在這所謂「產品系統」，不僅包括實體產品，亦包括服務系統。而需考量之環境衝擊通常包括資源使用、人體健康及生態影響等。生命週期評估的概念應用於環境管理上，可追溯至 1990 年，環境毒理化學協會(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC)所提出的「操作標準」(Code of Practice)，提出生命週期評估的定義與架構。而國際標準組織(International organization for standardization, ISO)則於 1996 年起，公布 ISO 14040 系列標準，制訂生命週期評估應用至環境管理上的標準評估架構及步驟，聯合國環境規劃總署(UNEP)與 SETAC 共同合作，推行為期十年的生命週期計畫(Life Cycle Initiative)，使 LCA 與生命週期思考(Life Cycle Thinking)能實際應用至產業生產及政府決策之中。

在全生命週期的評估作業，目前最廣泛採用為 ISO 14040:2006 生命週期評估，ISO 14040 系列包含 ISO 14040 與 14044 兩標準，ISO 14040 全名為「環境管理 - 生命週期評估 - 原則與架構」，而 ISO 14044 全名為「環境管理 - 生命週期評估 - 要求事項與指導綱要」；故 ISO 14040 規範生命週期評估之原則，而 ISO 14044 則詳述進行生命週期評估之所有要求事項以及對社會大眾報告結果的詳細辦法。包括美國能源部及我國經濟部標準檢驗局都採用 ISO 14044 做為生命週期評估標準程序(如圖 5.1-2 所示)。



資料來源：ISO. (2006). Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.

圖 5.1-2 ISO 14040:2006 生命週期評估架構圖

ISO 14044 全生命週期的評估作業分為以下 4 個階段，第 1 階段為目的與範疇界定階段(Goal & Scope Definition)，包括系統界限與詳細程度，視作業主題與其預期用途而定。全生命週期的評估作業的深度與廣度，視特定全生命週期的評估作業之目的可有顯著的差異。

第 2 為盤查分析階段(Inventory Analysis)，係關於作業的系統投入及產出資料之盤查清單，包含為符合所界定的作業目的必要資料之蒐集。

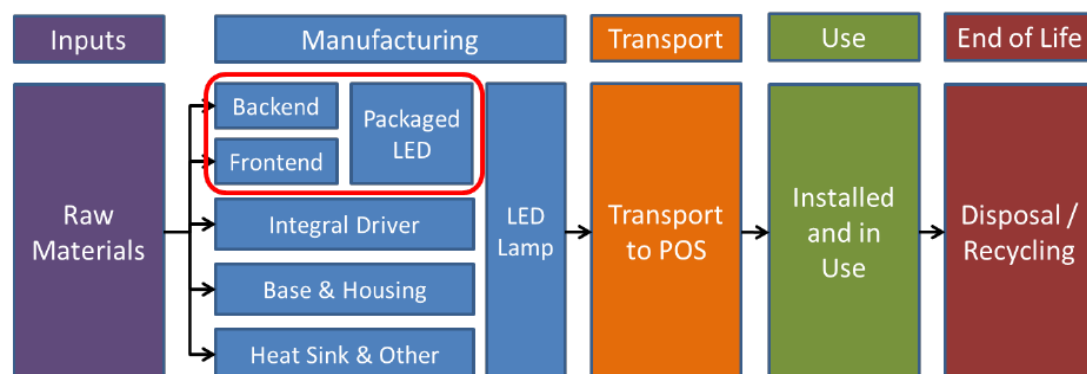
第 3 階段為衝擊評估階段(Impact Assessment)，衝擊評估之目的，係提供附加的資訊，以協助評估產品系統的結果，使得以進一步瞭解其環境重要性。

第 4 階段為闡釋階段(Interpretation)，生命週期闡釋為全生命週期評估作業的最終階段，依據目的與範疇界定，歸納並討論作為結論事項、建議事項及達成決議的基準。

5.2 LED 生命週期評估

美國能源部在固態照明研究計畫中，以前述界定之範圍及程序，

針對 LED 照明光源，展開了生命週期中對能源與環境的影響評估，仔細比較市場上幾種主流光源包括 LED 燈具、氣體放電燈具及白熾燈具，它們在原料取得、製造、包裝、運送、使用與廢棄處理的環節中(如圖 5.2-1 所示)各耗能多少，以及生命週期不同階段對環境的衝擊多寡，並具體解析量化數據。

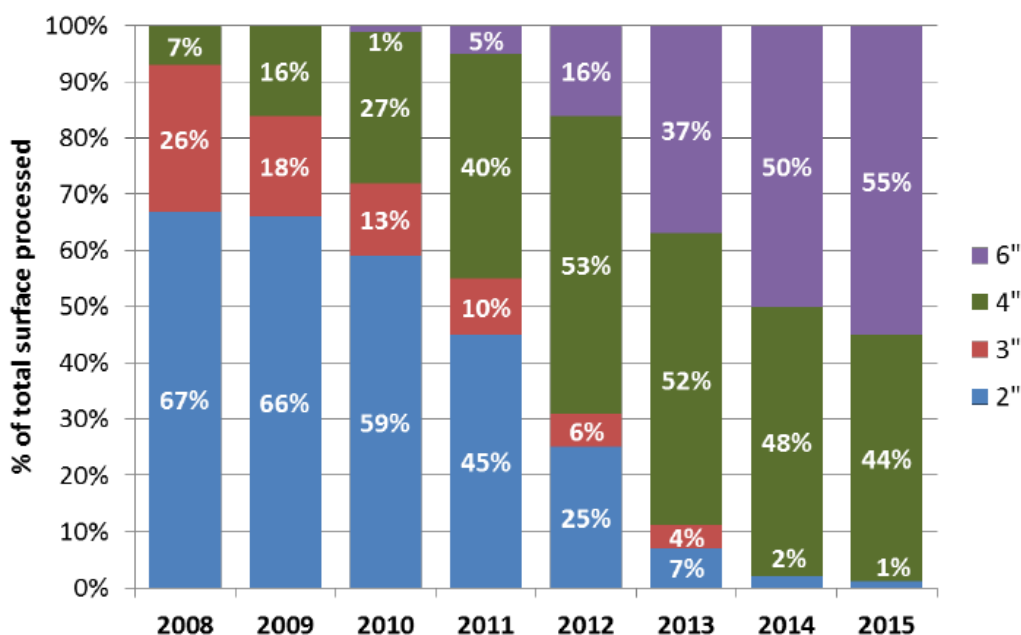


資料來源：Life Cycle Assessment of Illuminants A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps

圖 5.2-1 LED 生命週期示意圖

美國能源部在全生命週期所設定的 LED 光源，以目前最普及的藍寶石基板上磊晶氮化鎵藍光 LED，燈罩塗布黃磷螢光粉的類型為分析目標。其所有的統計分析，皆未計入回收的考量，亦即假設所有產品都來自於全新的原物料。運輸及產品壽命估算，並非來自於實際的量測，乃參考現有文獻或市場資訊而得到的。全生命週期以使用階段的能源消耗而言，係以產出 2 千萬流明小時(20 million lumen-hours) 的照明為比較基礎，即以 LED 照明提供 1,000 流明，其預估壽命 20,000 小時，單隻 LED 共可產出 2 千萬流明小時的光線。而 1,000 流明之氣體放電燈具，預估壽命 5,000 小時，以產出 2 千萬流明小時則需 4 組燈具。因此美國能源部此次評估係以 LED 晶片之生產製造及封裝為主要考慮(如圖 5.2-2 所示)，其餘多引用文獻或市場資訊。

此全生命週期所設定晶圓尺寸採用的是 3 英吋為計算基準，但隨著生產技術的進步，預期至 2015 年，99% 以上的 LED 將採用 4 英吋晶圓生產。



資料來源：Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 2: LED Manufacturing and Performance

圖 5.2-2 照明用 LED wafer 尺寸趨勢

隨著科技不斷發展，wafer 尺寸不斷增大，產生的晶片越來越多，使單位光通亮生產耗能減少(如表 5.2-1 所示)，預期 LED 燈泡的整體環境危害將可預期再降。

表 5.2-1 照明用 LED wafer 尺寸趨勢

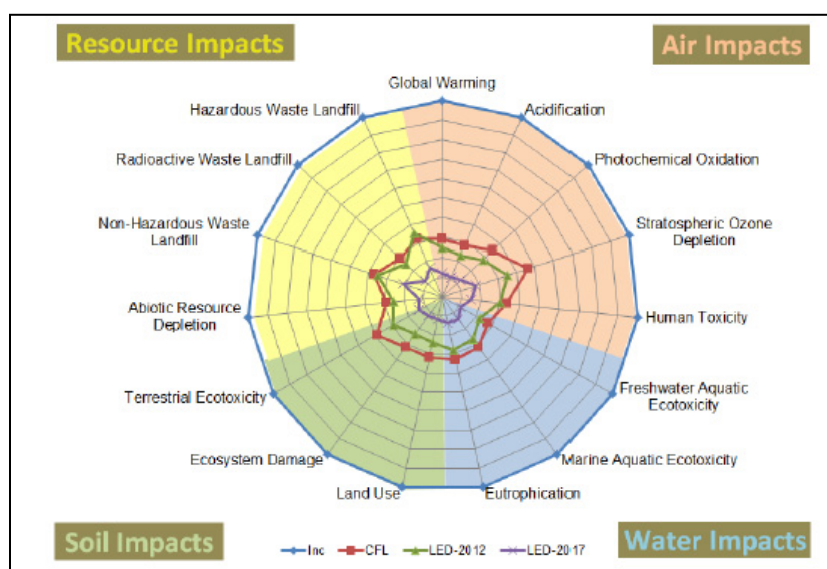
Wafer Size	Surface Area Multiplier	Yield Multiplier (i.e., Number of LED Chips)
2 inch (51 mm)	S	N
4 inch (100 mm)	4·S	4.5·N to 5·N
6 inch (150 mm)	9·S	10·N to 12·N
8 inch (200 mm)	16·S	20·N to 22·N
12 inch (300mm)	36·S	45·N to 50·N

資料來源：Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 2: LED Manufacturing and Performance

由於高強度氣體放電燈具、LED 燈泡的發光原理與表現不同(高強度氣體放電燈具為激發的氣態發光，LED 則為晶體固態發光)，為便於比較，美國能源部進行全生命週期為每種光源提供相同照度的情形下，全生命週期(含原料取得、生產、運送、安裝使用、廢棄處理等)所需的能耗進行比較在空氣、土地、水、自然資源等 4 大類的環境影響評估項下，細分包括全球暖化(Global Warming Potential)、

酸化 (Acidification Potential)、光化學氧化 (Photochemical Ozone Creation Potential)、平流層臭氧損耗 (Ozone Depleting Potential)、人類毒性 (Human Toxicity Potential)、淡水生生態毒性 (Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential)、海水生生態毒性 (Marine Aquatic Ecotoxicity Potential)、優氧化 (Eutrophication Potential)、土地利用 (Land Use)、生態系統的破壞 (Ecosystem Damage Potential)、陸生性生態毒性 (Terrestrial Ecotoxicity Potential)、生物資源損耗 (Abiotic Resource Depletion)、非危險性廢棄物掩埋 (Non-Hazardous Waste Landfilled)、放射性廢棄物掩埋 (Radioactive Waste Landfilled)、危險性廢棄物掩埋 (Hazardous Waste Landfilled) 等 15 個子項，針對氣體放電燈具、螢光燈具、LED 燈具 (分為 2012 年現有水準及 2017 年預期水準) 進行環境影響評估分析，在標準化各項資料後，以雷達圖表示，最外圍的影響最大，越靠近圓心影響越小。

必須強調的是，氣體放電燈具之所以帶來最大的環境影響，美國能源部並非各種燈具各拿 1 個進行比較；其比較方式為，為了產出 2 千萬流明小時的照明，必須使用之燈具數量加總。LED 燈具占優勢原因係因其壽命較長，故圖 5.2-3 係一個 LED 與 4~5 個氣體放電燈具比較之結果。

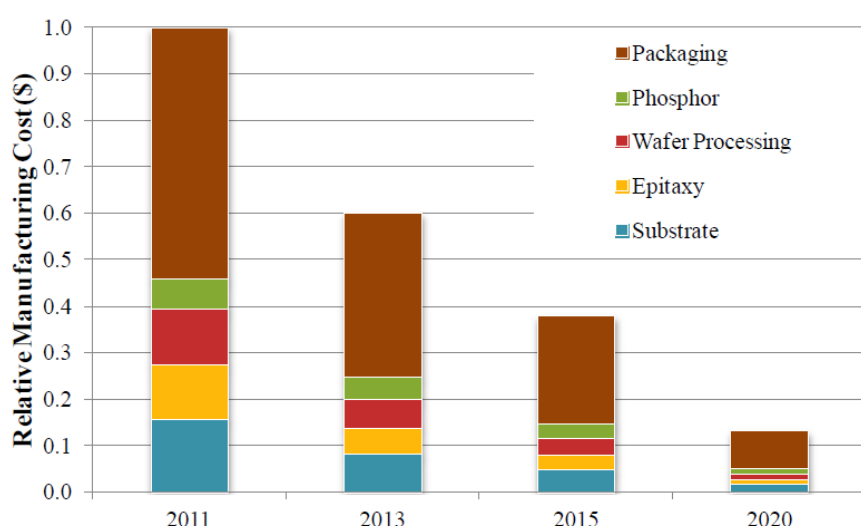


資料來源：U.S. EPA. (2011, November 1). Calculations and References. Retrieved January 31, 2012, from Greenhouse Gas Equivalencies Calculator

圖 5.2-3 LED 與其他燈具生命週期環境影響比較圖

氣體放電燈具及 LED 燈具（2012 年）的環境影響程度相近，前者在 14 個項目中都微幅高於後者，唯獨有害廢棄物這項相反，肇因於 LED 燈具所用的 wafer 中鋁製程及鋁散熱座產生的環境危害。美國能源部認為 LED 在製程、效能及驅動電子技術逐步改善的預期中，2017 年後的 LED 燈具將不再受限於此。

綜觀能源耗用分析與整體的環境影響評估，LED 燈泡極具未來性，預期 2017 年之後將可大幅拉開與傳統燈具之差距，透過效能的提升及散熱座的縮小，將輸入電力更有效率地轉換成光能而降低熱能的產生，同時減少鋁的原料使用，至 2020 年 LED 燈泡成本（如圖 5.2-4 所示）可望降低 80%，並較省電燈泡少 70% 的環境衝擊，也較 2012 年的 LED 燈泡少一半的環境衝擊。



資料來源：Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap

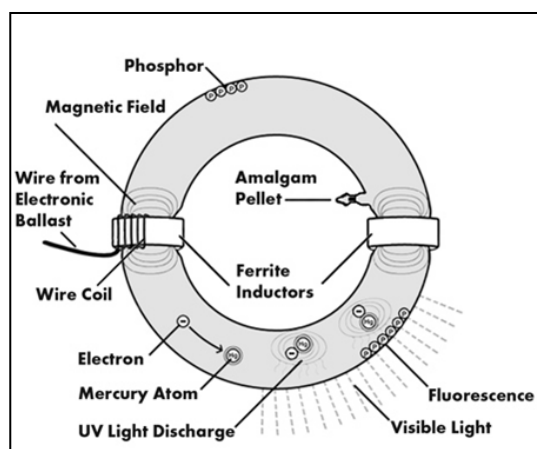
圖 5.2-4 LED 成本發展趨勢圖

另外一個 LED 路燈生命週期效益分析係賓州 Pittsburgh 市 LED 路燈示範測試，該計畫係以汰換全市 40,000 盞 230W 老舊高壓鈉燈為 93W 之 LED 路燈為目標，預期年省 600kWh 耗電量，粗估約 140 萬美元的電費和維修費用。日前，Pittsburgh 市政府委託匹茲堡大學 Mascaro Center 進行生命週期評估，以 LED 燈與複金屬燈、高壓鈉燈和高頻無電極電磁感應燈相互比較，分析結果顯示 LED 路燈之全生命週期效益仍優於其他燈具。

前述高頻無電極電磁感應燈(Electro-magnetic induction lamp)係

近年來氣體放電燈具新發展，又簡稱高頻無極燈。藉由高頻感應磁場的方式將能量耦合到燈泡內，使燈泡內的氣體達到 Avalanche Conduction 而電離形成電漿(plasma)，氣體電漿受激發，當原子返回基態時自體輻射發出波長為 254 nm 波長的紫外線，燈泡內壁的螢光粉受紫外線激發而發出可見光。其原理與螢光燈將電能轉換為可見光相同，主要的分別在於無電極電磁感應燈沒有電極，避免了傳統氣體放電燈具因為電極材料在電場的作用下會產生濺射，長期使用下致使電極衰老、玻璃殼發黑，加之玻璃殼材料和電極材料的膨脹係數不同，引起的慢性漏氣使傳統光源的使用壽命難以提高，因而大大延長其使用壽命。

無電極電磁感應燈的發明建基於電磁互感和氣體受激放電原理，高頻無電極電磁感應燈系統是由激勵電源、高頻耦合器和燈泡三部分組成。激勵電源產生一個 250 kHz-2.65 MHz 頻率範圍的交變高頻電流，當高頻電流通過高頻耦合器時，產生一個高頻電磁場。再由套在燈管外面的一對磁芯在燈管內形成感應電流，從而在放電區產生交變磁場，根據法拉第電磁感應定律，變化的磁場即產生一個垂直於磁場變化的電場，使燈泡內部放電空間的電子被電場加速，當能量達到一定值時，電子與泡殼內的低壓汞和惰性氣體的混合蒸氣分子發生碰撞，使混合氣體到達 Avalanche Conduction 形成電漿，電漿受激原子返回基態時，自發射出紫外光，它激發燈泡壁上的螢光粉轉化為可見光（如圖 5.2-5 所示）。



資料來源：Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies
Mascaro Center for Sustainable Innovation

圖 5.2-5 高頻無電極電磁感應燈示意圖

高頻無電極電磁感應燈之優點為功率因數達 0.996-0.9997%，高於一般傳統，且燈具壽命為 60,000~100,000 小時（正常使用約 10 年，一般保用 5 年）。高頻無電極電磁感應燈沒有燈絲和電極，激勵源在燈泡外，其本身的發熱量僅為高壓鈉燈、複金屬燈等高強度氣體放電燈具的 1/5 以下，因此壽命超長。而高頻無電極電磁感應燈工作頻率為 2.65MHz，能有效的把電能轉換成可風光，無頻閃問題，不會造成眼睛疲勞。演色性大於 80，其光源特性為高亮度、低眩光、一般來說光色度接近太陽光。啟動時間低於 0.5 秒，比高強度氣體放電燈具快無其必須預熱之缺點，並可以重複啟動。色溫範圍在 2,700K~6,400K 之間，可根據環境需求做成各種顏色。高頻無電極電磁感應燈工作電壓為交流電壓 85V~275V、直流電壓 8V-45V 範圍內均可正常工作，且根據環境需求要求訂做，可調光。由於高頻無電極電磁感應燈的使用壽命較長，故非常適合應用於更換困難及維修費用昂貴的情況下。另一方面，一般螢光燈的陰極放射限制了放電電流，因而限制了螢光燈的最大額定功率。但是，高頻無電極電磁感應燈並沒有這方面的限制，其燈管額定功率可達 185W 以上，而其發光效率目前約在 60 至 80 lm/W 之間。高頻無電極電磁感應燈目前號稱 10 萬小時以上使用壽命，市場上多以 6 萬小時進行估計，優於 LED 燈具。

至於高頻無電極電磁感應燈的缺點係為光效低，目前最高光效只有 80lm/W 左右，其效率難以和高壓鈉燈相比，目前市場上可提供之最大的功率為燈泡形 185W，環形 210W 左右，造成應用範圍受限制。高頻無電極電磁感應燈的配套燈具受限於目前市場上的燈具主要是為點光源、面光源服務的，用在高頻無電極電磁感應燈出光率都不是太理想，造成整體效率下降，不過荷蘭飛利浦（Philips）、美國的奇異公司（GE），德國的歐司朗（Osram），日本的松下（National）已經開發出部分適用於高頻無電極電磁感應燈之燈具。另外高頻無電極電磁感應燈採用高頻點燈，強烈的電磁干擾會對人體健康和安全，對鄰近其他用電設備的工作，對無線電通信構成干擾。因此電磁相容 EMC (Electro-Magnetic Compatibility) 就成為技術與驗證的核心議題，一方面要求燈管在所處環境內具有抵抗外來電磁干擾能力 EMS (Electro-Magnetic Susceptibility)；另一方面要求燈管對處於同一電磁

環境內的其他裝置不產生超過規定限度的電磁干擾 EMI (Electro-Magnetic Interference)，而世界各國對電磁相容管制法令並不相同，我國路燈系統目前尚未引進高頻無電極電磁感應燈。

匹茲堡大學在此 LED 路燈評估案中，與美國能源部不同，採用以下兩個步驟進行全生命週期分析：

Step 1：詳細描述產品生命週期內所產生廢棄物或使用的物料，建立相關特徵因子。

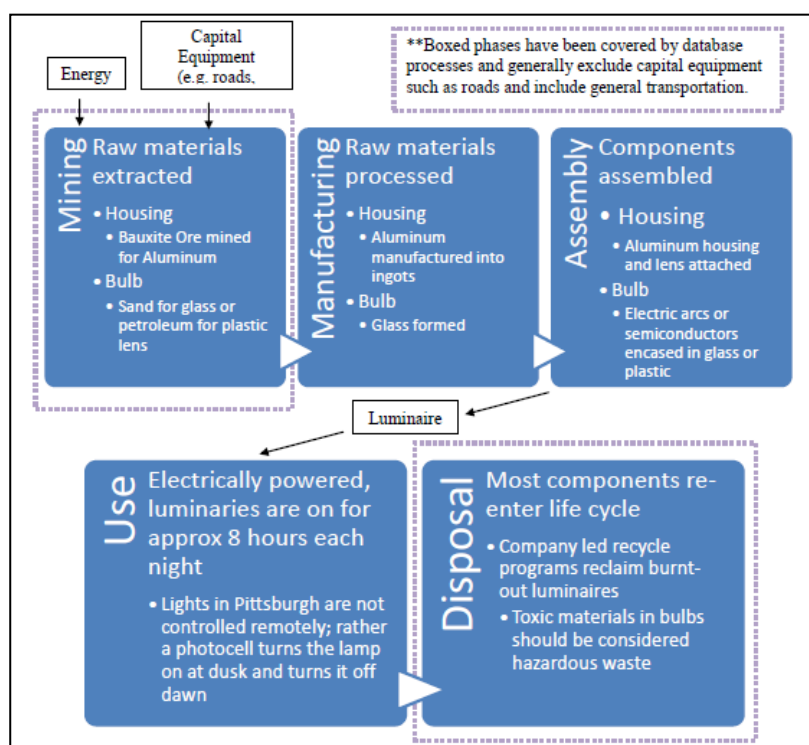
Step 2：評估產品所產生廢棄物或使用的物料對於環境的影響，一般稱為環境評估步驟。

在特徵因子建立階段，Mascaro Center 參考美國環保署所建立的生命週期衝擊評估方法，應用化學物質與其他環境衝擊減輕與評估工具 TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) 進行 LED 路燈之特徵因子建立。

環境評估步驟上，Mascaro Center 係採用 SimaPro 進行生命週期評估，將 TRACI 所得到之特徵因子輸入 SimaPro 進行分析。SimaPro 軟體是由荷蘭 Leiden 大學於 1990 年開發出來，現今已發展至 SimaPro 7 的版本，在生命週期評估的領域中，屬於國際上相當普遍使用的軟體。因為 Mascaro Center 認為 SimaPro 除了具有生命週期盤查的資料外，同時也給予環境衝擊的評估，並可比較在不同程序及原物料中對於環境所產生的衝擊大小。SimaPro 軟體除了針對各種環境衝擊可以建立一個環境指標外，還可分析環境負荷，藉由各個輸入的能量與物料的分類，並在各項分類的子系統中以衡量的方式，依據類似像溫度計的表達方式，快速的判斷該物料及能量對環境之衝擊性。Mascaro Center 定義本次 LED 路燈生命週期分析乃結合能源、原料資源及製造過程中釋放之污染等影響因子，進行工業產品對環境衝擊之評估。以標準製造過程之產出物為依據與數據，可協助環境管理模式之發展與標準化之執行。

Mascaro Center 本次評估並納入計算溫室氣體排放當量的 IPCC 2007 GWP 方法，使用者輸入溫室氣體如二氧化碳、甲烷等特徵因子，透過此方法快速算出 LED 路燈及其他傳統路燈之碳足跡，做為產品全生命週期評估之重要參考資訊。Mascaro Center 在此次評估主要針

對燈泡和燈殼兩大部分，由原料取得、製造、組裝、使用、回收五個程序評估 LED 路燈和傳統路燈生命週期效益（如圖 5.2-6 所示）。

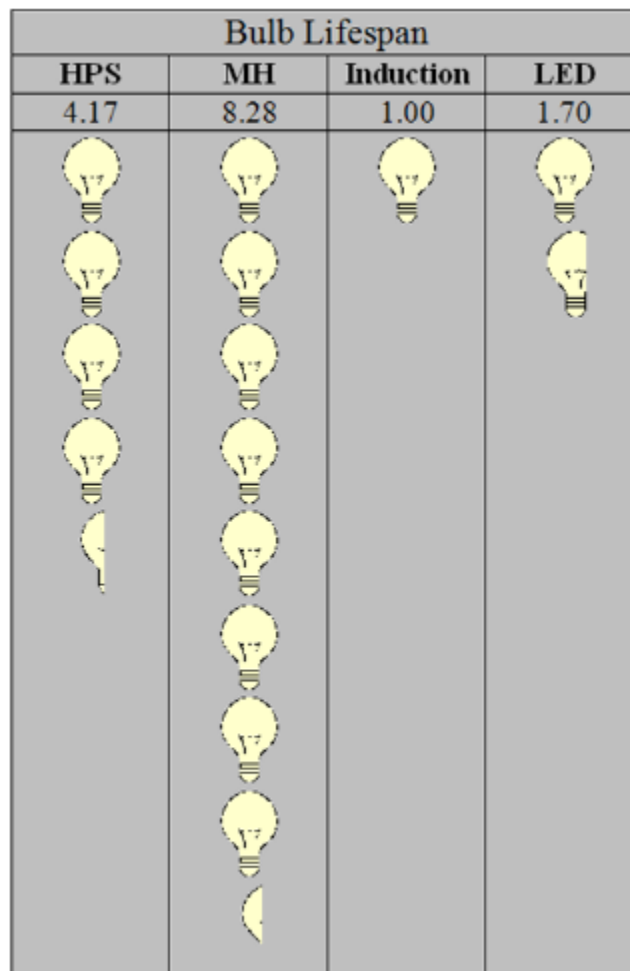


資料來源：Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies Mascaro Center for Sustainable Innovation

圖 5.2-6 LED 路燈生命週期效益評估圖

在進行比較之時，氣體放電燈具相關資料係引用 Franklin USA 98, ETH ESU 96, Zurich, Ecoinvent, Industry Data 2.0, IDEMAT 2001, USLCI 等資料庫，而 LED 路燈資料則是由市場數據蒐集，以及製造商所提供之相關資料。

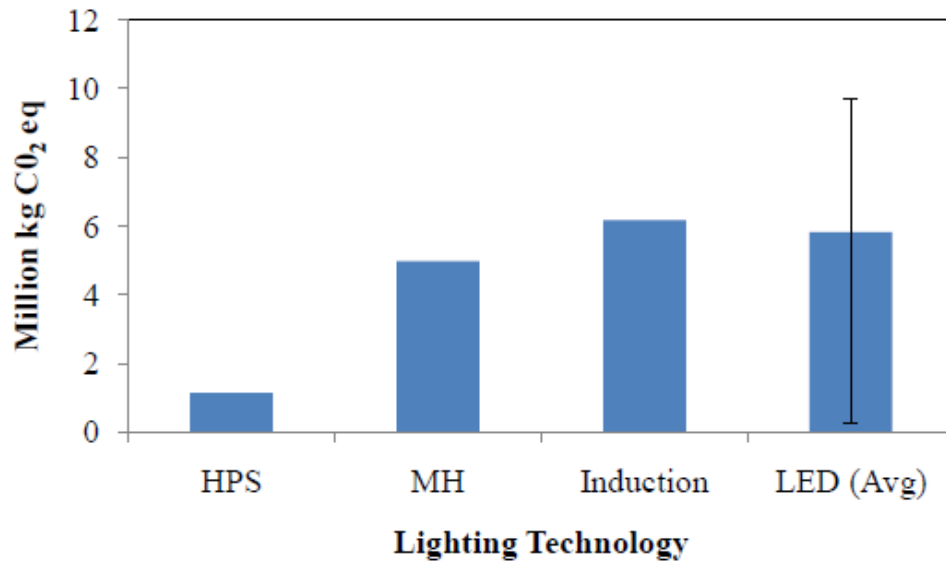
有關生命週期時間設定的長度，則是以 10 萬小時為基礎，在使用壽命設定上，以 70% 之流明維持率為比較基礎，各燈具之壽命以美國環保署 Material Safety Data Sheet 所提供之數據為準，因此 10 萬小時所需之燈具數量如圖 5.2-7 所示。



資料來源：<http://www.osram-os.com/>

圖 5.2-7 LED 與其他燈具 10 萬小時用量預測圖

Mascaro Center 分別調查各種燈具原料階段的投入，生產製造所使用的能源與電源，及排放空氣，水及廢棄物等各項污染，主要的目的是針對前述所訂定 10 萬小時使用時間，進行所有相關對於環境產生影響之資料收集，包括使用之原料、產生製造階段及製造階段之排放物，以及運銷、使用階段，到最終產品廢棄所有之資料以 TRACI 進行特徵因子分析，利用 SimaPro 量化系統的相關投入與產出（Input/Output），進行環境評估步驟。由原料開採至製造完成所排放溫室氣體進行各燈具分析比較發現，LED 路燈所排放之溫室氣體較其他燈具為高(如圖 5.2-8 所示)，和高壓鈉燈相比，其排放量約為 4 倍以上。



資料來源：Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies Mascaro Center for Sustainable Innovation

圖 5.2-8 各類燈具製造階段溫室氣體比較圖

Mascaro Center 計算方式係從原料開採與資源使用過程等生命週期各階段中，各種路燈所產生的污染排放數據以及對環境造成的衝擊，最後將這些環境議題給予不同的權重評價，最後歸結為三種損害類別，分別為對人體健康、生態系統品質及資源耗用方面，透過此三方面可獲得較完整的生命週期之環境衝擊分析，剖析不同環境衝擊議題在特徵化對於整體性傷害的貢獻分析，其特性與美國能源部評估方法相似，將不同資料歸類量化為相同的環境衝擊類別之特徵化值，並進行標準化之要項，並將其轉換為二氧化碳，以比較損害評比，作為生命週期評估的應用。最後將前述指標彙整生態毒性(Ecotoxicity)指標，評估各種路燈的健康性。掌握以現有理化分析查明的污染物的生物影響，評估及保護生態系統的健康性。因此在計入生態毒性之加權後，製造階段溫室氣體比較仍以 LED 燈具排放最多

另一個值得注意的是，LED 製造過程所排放之溫室氣體係以平均值方式計算，主要是各 LED 製造公司所公布之數據差異極大，由於 LED 製程相較其他傳統燈具複雜許多，很難確實加以盤查考證，因此製造階段 LED 路燈之溫室氣體排放採用平均方式，其他燈具則分別引用 Franklin USA 98、ETH ESU 96、IDEMAT 2001 等資料庫所提供之相關資料。

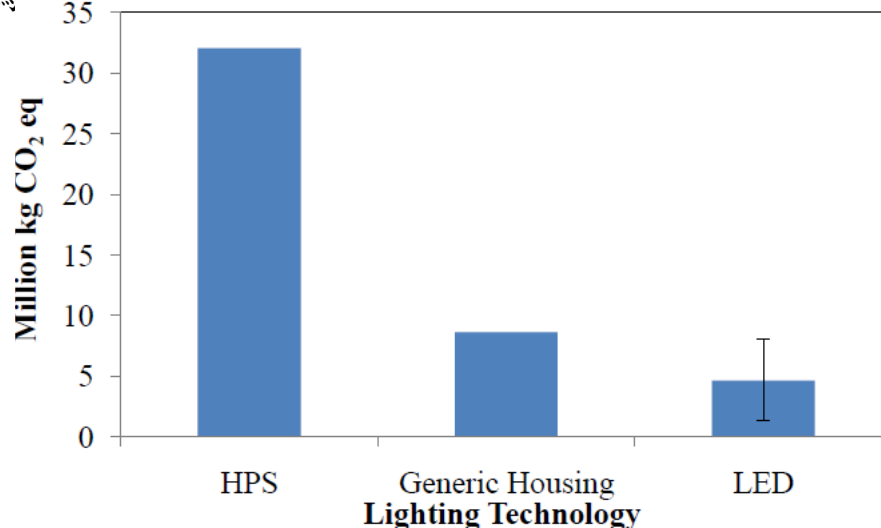
另外一個分析係針對燈殼，以燈殼製造過程所需之能源造成溫室氣體排放進行分析，將其材料對溫室氣體排放分為 3 級，如鋁、印刷電路板對溫室氣體排放系最嚴重、陶瓷、玻璃等次之，塑膠與連接線等溫室氣體排放為最少(如表 5.2-2 所示)。

表 5.2-2 燈殼材質溫室氣體排放分級

HIGH	aluminum, printed circuit boards,
MEDIUM	glass, steel, galvanized steel, ceramics,
LOW	plastics and wire

資料來源：<http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-resources/refs.html>

各種燈具之燈殼製造過程產生之溫室氣體排放如圖 11 所示，LED 路燈仍以平均值表示，一般燈具大多具備標準規格、材質與重量，95W 之 LED 路燈其燈具之重量卻由 6.88 公斤~15.04 公斤不等，所採用之材質也不同，Mascaro Center 係採用加權平均方式，設定 LED 燈具燈殼重量為 8.75 公斤。

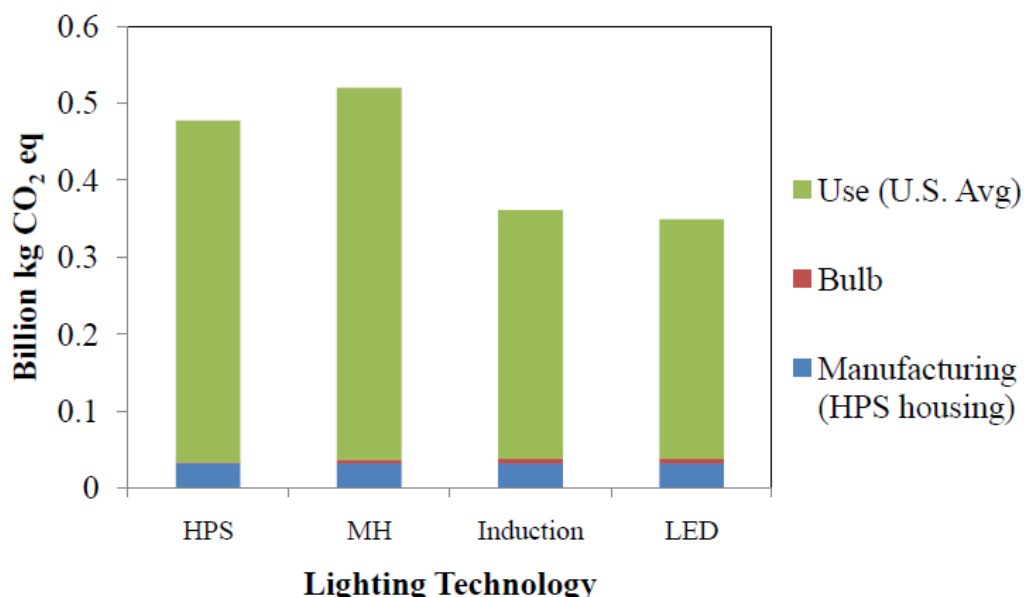


資料來源：Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies
Mascaro Center for Sustainable Innovation

圖 5.2-9 燈殼排放分析圖

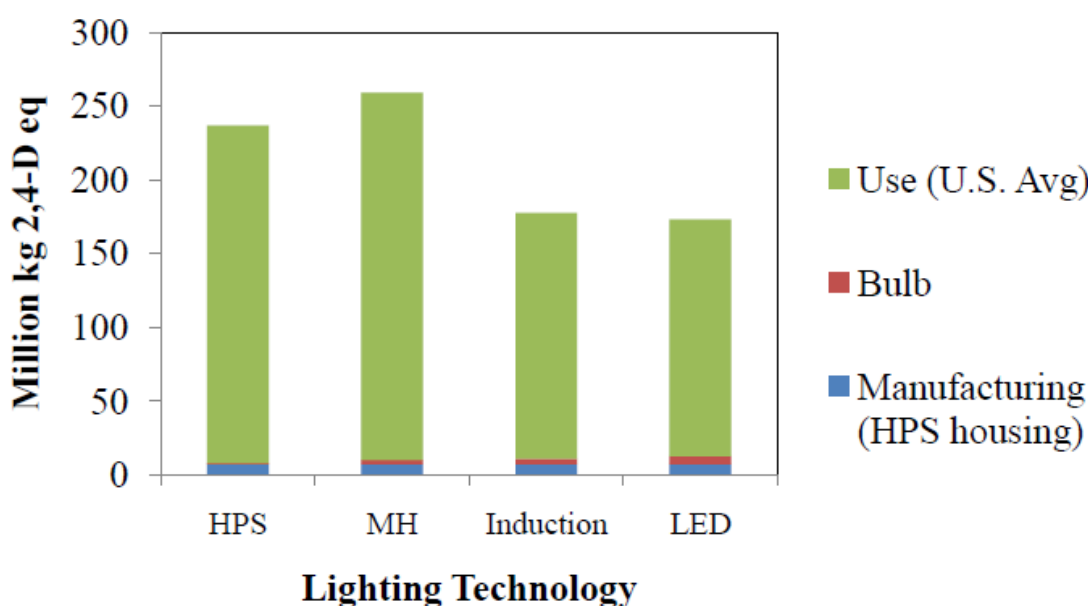
Mascaro Center 以 SimaPro 分析各種燈俱全生命週期的報告顯示，儘管 LED 燈具的製造階段成本較高，溫室氣體排放也比傳統路燈高，但 LED 路燈使用階段所消耗的能源具有相對優勢。LED 路燈

與複金屬燈和高壓鈉燈相比，加上使用壽命是其 5 倍以上，並且能產生更多的光源。高頻無電極電磁感應燈是另一項新興技術，以分析結果觀察，能源節約和光效而言，高頻無電極電磁感應燈發展尚無法和 LED 路燈相比，在使用過程中溫室氣體仍高於 LED 路燈，因此 Mascaro Center 認為 LED 路燈應為最佳選擇(如圖 5.2-10 所示)。



資料來源：Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies Mascaro Center for Sustainable Innovation

圖 5.2-10 各燈具全生命週期比較



資料來源：Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies Mascaro Center for Sustainable Innovation

圖 5.2-11 各類燈具毒性分析圖

另外針對生態毒性方面，雖然 LED 路燈在製造階段產生之污染較多，但如計入使用階段，則其污染反而最低(如圖 5.2-11 所示)，Mascaro Center 依據分析結果認為，路燈使用階段對比製造階段，不管是溫室氣體排放或是生態毒性之影響性，大約為 10~100 倍之間。

5.3 LED 路燈成本效益分析

由於 LED 路燈價格較傳統路燈高，對政府部門推動上造成極大負擔，因此利用 LED 之節能與可靠度特性進行財務評估規劃，廣為美國與歐洲國家所採用。

第 1 種常使用評估方式為還本期間法(Payback Period Method)：指經由預期報酬，全數收回淨投資額所須期間的長短，即在計算還本期間需時多長。還本期間愈短的方案應愈優先考慮，因投資回收期愈長，不確定因素也愈多，風險也就相對地提高。

由美國能源部所執行的固照明 GATEWAY 示範計畫，於明尼蘇達州 35 號州際公路西線的高速公路大橋(I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota)所執行之示範測試(如圖 5.3-1 所示)，採用符合明尼蘇達州運輸部所規範之道路照明規範設定，並非目前包含我國在內之示範計畫常用之以 150W LED 路燈直接替換 250W 之高壓鈉燈。為符合道路照明規範，明尼蘇達州運輸部採用 200W 與 220W 之 LED 路燈進行比較，利用還本期間法評估 LED 路燈成本效益模型。

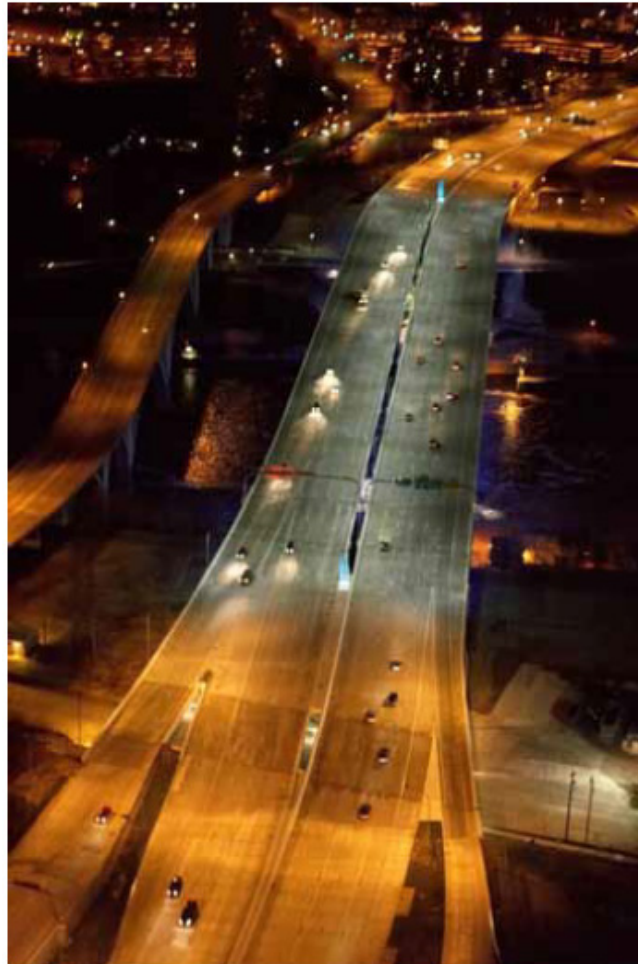
而本次示範計畫由於位於高速公路，因此由明尼蘇達州運輸部協助進行道路照明設計，明尼蘇達州運輸部使用 lighting simulation software (AGi 32)進行設計，採用 Type V 光分佈(設置於路側或區域邊緣，呈現橢圓形光分佈範圍，為燈具高度 2.75 倍以上，通常應用在寬廣之道路)的 10-LED array(共 200 顆 LED，總光通量 16,500 lumens)LED 路燈，以及 Type III 光分佈(設置於路側或區域邊緣，呈現橢圓形光分佈範圍，為燈具高度之 1.75 至 2.75 倍，通常應用在一般寬度之道路)的 12-LED array(共 240 顆 LED，總光通量 19,000 lumens) LED 路燈。其價格比較如表 5.3-1 所示。

表 5.3-1 I-35W Bridge 示範計畫路燈價格比較

Product	Unit Cost	Quantity Used	Total Cost
Mongoose 250W HPS Cobra Head ¹	\$440	20	\$8,800
LED 10-bar Type V	\$2,250	16	\$36,000
LED 12-bar Type III	\$2,500	4	\$10,000

資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

而經過測量，LED 路燈之功率因素為 0.94，高壓鈉燈為 0.90，因交通安全考量，避免色溫急速變化，該示範計畫係以 20 盞 250W 高壓鈉燈搭配 16 盞 Type V 光分佈 LED 路燈與 4 盞 Type III 光分佈 LED 路燈。高壓鈉燈配置於匝道，匝道匯入主線則為高壓鈉燈與 Type III 光分佈 LED 路燈，主橋面則為 Type V 光分佈 LED 路燈。



資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

圖 5.3-1 明尼蘇達州 I-35W 橋 LED 路燈示範建置圖

明尼蘇達州運輸部於建置完成後，實際測量橋面各點之照度如表 5.3-2 所示，確認其符合該州之道路照明規範，惟 LED 路燈照明區域照度變化大於高壓鈉燈照明區域。

表 5.3-2 I-35W Bridge 示範計畫實際照度測量

	<i>Bridge Span</i> LED Luminaires Only	<i>Transition Zone</i> HPS & LED Luminaires	<i>Approach</i> HPS Luminaires Only
Average	0.91 fc	1.28 fc	1.69 fc
Maximum	1.97 fc	3.62 fc	3.46 fc
Minimum	0.26 fc	0.27 fc	0.92 fc
Avg:Min	3.51	4.74	1.84
Max:Min	7.58	13.41	3.76

資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

各路燈的用電度數和電費支出以一年使用 4,380 小時、每度電費 0.0674 美元計算，同樣安裝 20 盞，在符合高快速道路照明標準為前提要求下，LED 路燈比 250W HPS 路燈的節能 13%，電費年省金額 \$222.55，因功率類似，節能幅度並不明顯（如表 5.3-3 所示）。

表 5.3-3 I-35W 示範計畫每年電力成本分析表

	Operating Hours	Power (kW)	Annual Energy (kWh)	Energy Saved
HPS Baseline	4,380	5.81	25,465	—
LED	4,380	5.06	22,163	13%

資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

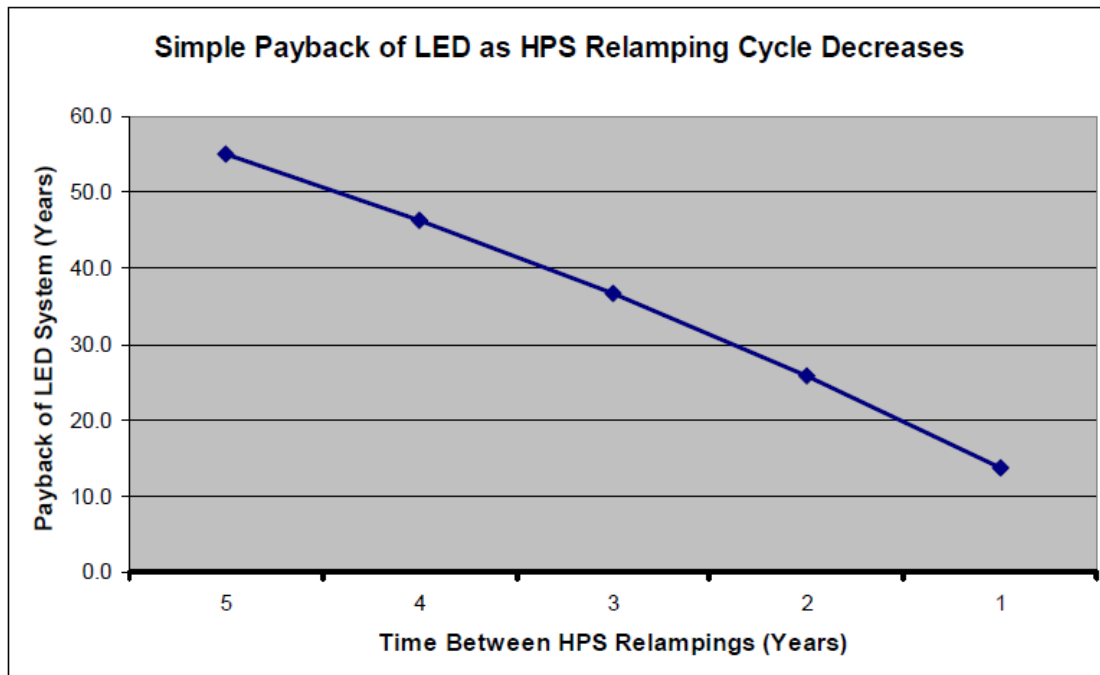
另外在路燈之管養方面，由於明尼蘇達州運輸部是以外包方式維護路燈照明系統，並未納入維修項目。因此在路燈管養成本估算的精確程度上有實際困難，透過明尼蘇達州運輸部以過往維護經驗估算方式所提供之資料詳表 5.3-4 所列出之 250W 高壓鈉燈維修時可能發生之費用項目，大致可估算出參考數值。明尼蘇達州運輸部以更換 20 盞 HPS 路燈進行所需總時數、所需工人數、每小時工資、運輸往返時間、每盞路燈維護/更換材料之平均成本、所需器材成本等，以 5 年為高壓鈉燈更換周期，得到每盞路燈維護總成本為 137.25 美元，平均每年約 27.5 美元，每 2 年約 50%之無法修復必須直接更新之故障率來預估，則 5 年該示範計畫區高壓鈉燈需投入 2,745 美元維護及更換費用，平均每年 539 美元。

表 5.3-4 250W 高壓鈉燈路燈維修費用發生項目與更換費用

Number of Lamps changed per hour	4.00
Total Hours to complete job (20 luminaires at 4 per hour)	5.00
Hourly cost of bucket truck	\$ 50.00
Hourly cost of trailing signage vehicle	\$ 25.00
Total number of staff for relamping interstate bridge	4.00
Hourly Labor rate per staff member	\$ 50.00
Transit time to and from (hours)	2.00
Relamp Materials per lamp	\$ 41.00
Equipment (Truck) Cost per lamp	\$ 18.75
Relamp Labor per lamp	\$ 50.00
Total cost in transit*	\$ 550.00
Total Cost per fixture relamped	\$ 137.25
Total site cost for relamp	\$ 2,745.00
Relamp cycle (# of years)	5.0
Annualized relamp cost	\$ 549.00

資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

至於 LED 路燈，由於缺乏使用壽命期間維修費用的實際發生數據，因此明尼蘇達州運輸部暫先假設 LED 路燈使用壽命期間不會發生維修費用，作為和 250W 高壓鈉燈之比較基準，加上電費節省與 LED 路燈理論壽命較長，以還本期間法分析 LED 路燈之成本效益，明尼蘇達州運輸部發現目前若以高壓鈉燈壽命 5 年計算，整個還本期間將長達 55.1 年，就算以高壓鈉燈壽命 1 年計算，還本期間仍長達 13.7 年（如圖 5.3-2 所示），因此明尼蘇達州運輸部認為若 LED 光電轉換效率不能對高壓鈉燈取得絕對優勢，目前在高快速道路上使用 LED 路燈並不符合成本效益。



資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

圖 5.3-2 LED 路燈還本期間分析圖

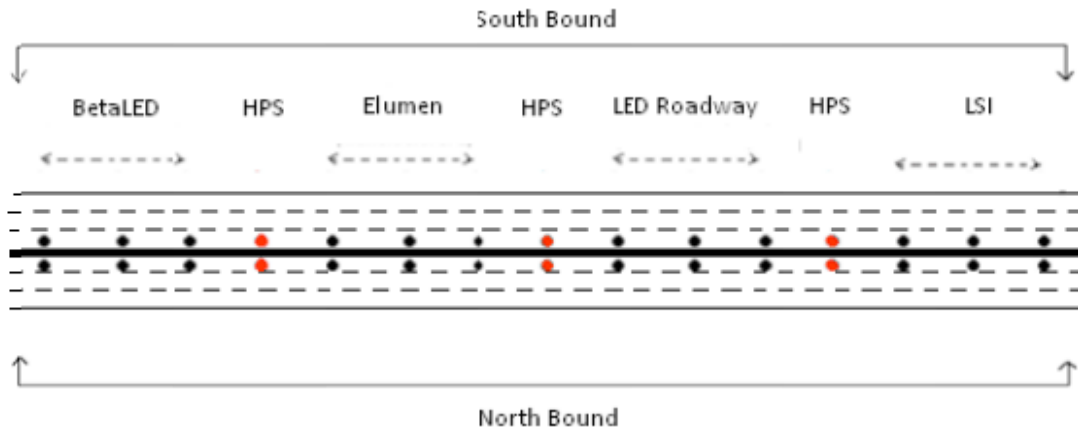
另外一個評估案例係美國能源部與紐約市交通局於曼哈頓高速公路執行之示範計畫，該計畫於雙向 6 線之紐約羅斯福東河公園大道（Franklin D. Roosevelt East River Drive, FDR Drive），為曼哈頓島東側之公園大道，紐約市最繁忙的高速公路（如圖 5.3-3 所示），東河公園大道南側為河岸，北側為市區，羅斯福東河公園大道速限為 40 英里(約 65 公里)。該示範區域由 16 街到 25 街之間，自 2010 年起，採用 150W 之高壓鈉燈與 90W(LED Roadway Lighting)、75~90W(LSI Industries)、100W(Elumen)、125W(BetaLED)之 LED 路燈進行分析，為確實了解各燈具照明效果，採用混合建置方式，執行 2 年期測試，紐約市交通局採取每 4 個月追蹤照明品質方式執行。



資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

圖 5.3-3 Franklin D. Roosevelt East River Drive

本示範區域之鋪面分類(Pavement Classification)所對應之照明要求，依據紐約市交通局之照明規範該路段之照明要求應為光照度 (Illuminaition) 0.9 呎燭光 (footcandle) 或 9lux，在照度均勻性要求上，平均照度與最低照度以及平均照度與最大照度比值分別為 3 和 0.3。該示範區照明建置前以利用 AGi32 完成模擬，由於羅斯福東河公園大道環境特殊，紐約市交通局利用 AGi32 計算羅斯福東河公園大道環境中路燈及背景光的分布，以逐點方式快速計算一次光量和交互反射影響較大情況下的光量，以模擬方式算出所有道路之的輝度，完成本示範計畫之相關規劃。為精確掌握每一種燈具光源效率與特性，各種燈具排列方式如圖 5.3-4 所示。



資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

圖 5.3-4 Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫燈具相對位置圖

在示範計畫建設完成之後，紐約市交通局於建置完成 1 個月後進行路段照度測量，發現高壓鈉燈在光照度以及均勻性方面符合照明規範之要求，較 LED 路燈表現優異(如表 5.3-5 所示)。

表 5.3-5 Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫照度實測表

Product	Average		Max		Min		Avg/Min	Max/Min
	Lx	Fc	lx	fc	lx	fc		
HPS	9.0	0.9	25.0	2.5	3.0	0.3	3.0:1	8.3:1
LED Roadway Lighting	12.0	1.2	24.0	2.4	4.0	0.4	3.0:1	6.0:1
LSI Industries	10.0	1.0	22.0	2.2	3.0	0.3	3.3:1	7.3:1
Elumen	6.0	0.6	19.0	1.9	2.0	0.2	3.0:1	9.5:1
BetaLED	13.0	1.3	40.0	4.0	4.0	0.4	3.3:1	10.0:1

資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

紐約市交通局利用此示範計畫，進行利用還本期間法評估，假設每年路燈點亮 4,100 小時，每度電費 0.169 美元，事實上美國為電業自由化國家，紐約市交通局資料顯示，該局轄下路燈電費每度介於 0.120~0.169 美元，本次示範計畫係採最高電費計算，另外 LED 路燈每一年可省下之維護費用 35 美元，與明尼蘇達州運輸部所估計基礎相同，假設 LED 路燈之壽命為 5 萬小時，但紐約市因其物價及人工均較明尼蘇達州昂貴，因此維護費用估計較高，評估不同功率之 LED 路燈之還本週期如表 5.3-6 所示，可以發現若維持相同照明品質，LED 路燈相對於高壓鈉燈之還本週期高達 15 年以上，缺乏可行性，若要

將年限縮短，只能犧牲照明品質，選用較低功率之 LED 路燈，我國目前示範計畫針對高壓鈉燈多以此方式建置。

表 5.3-6 Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫
還本期間分析表

	Power (W)	Hours	Cost of Power (\$/kWh)	Equipment Price (\$)*	Annual Energy Cost (\$)	Maintenance Savings (\$)	Payback (Years)
LED Roadway Lighting	85.0	4,100	0.169	695.00	60.41	35	7.7
LSI Industries (Delivered) ²³	81.4	4,100	0.169	795.00	57.85	35	8.6
LSI Industries (Specified) ²⁴	134.9	4,100	0.169	795.00	93.47	35	14.4
Elumen	107.0	4,100	0.169	719.10	76.04	35	9.7
BetaLED	139.3	4,100	0.169	1,022.63	98.99	35	19.6

資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

在不同電費估算基礎下，紐約市交通局分別以每度 0.120 美元、0.150 美元、0.153 美元三種方式，其中 0.120 美元係離峰電價、0.150 美元為紐約當地之平均電價估算 LED 路燈之靜態回收週期 (simple payback periods, SPB)，紐約市交通局認為電價每提高 0.01 美元可縮短 LED 路燈之靜態回收週期約半年(如表 5.3-6 所示)。

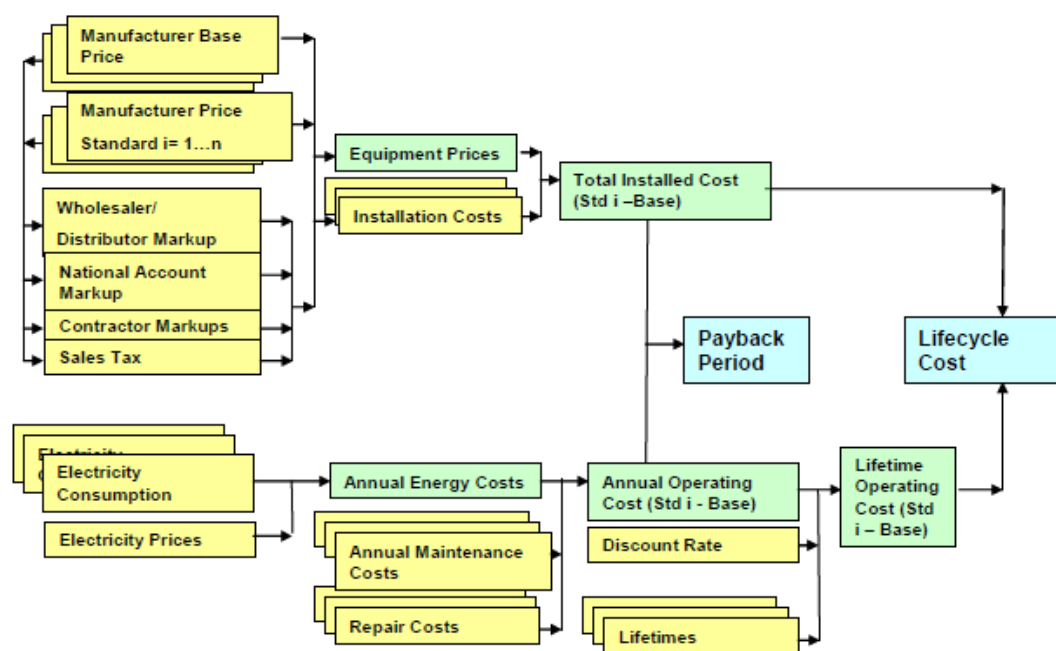
表 5.3-7 Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫不同電價
靜態之態回收週期

	Electricity Rate (\$/kWh)	SPB Period (years)	Electricity Rate (\$/kWh)	SPB Period (years)	Electricity Rate (\$/kWh)	SPB Period (years)	Electricity Rate (\$/kWh)	SPB Period (years)
LED Roadway Lighting	0.120	9.4	0.130	9.0	0.150	8.3	0.153	8.2
LSI Industries (Delivered)	0.120	10.5	0.130	10.1	0.150	9.3	0.153	9.2
LSI Industries (Specified)	0.120	16.1	0.130	15.7	0.150	15.0	0.153	14.9
Elumen	0.120	11.4	0.130	11.0	0.150	10.3	0.153	10.2
BetaLED	0.120	21.7	0.130	21.2	0.150	20.4	0.153	20.3

資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

紐約市交通局並採用另一種生命週期成本 (Life Cycle Cost, LCC) 評估方式進行評估，目前在世界各國經常被用來作為成本評估的主要方式，利用此一架構可以估算出加入或是更換某項新設備時，整個設備生命週期中所需要花費金額的多寡，並與傳統或是老舊設備所計算出來的數值相比，來評估新設備是否值得投資。

生命週期成本評估法為一種以實務取向為主的操作方法。生命週期成本方法在評估時係以現值(Present-Value)或年值(Annual-Value)的方法，來衡量系統在某設定期間所須之總成本。此一評估方法在計算系統之設計替代方案時，往往設定為擁有相同之目的，因而在決定方案時，係選取該評估期間生命週期成本(LCC)最低者。生命週期成本評估法尤其適於用來決定到底是選擇那些初期成本較高但在未來諸項成本都相對低的系統，在進行生命週期成本評估法時，投資者或決策者所需花費的總成本包含現在及未來在投資決策過程中不斷增加的成本，美國能源部建議生命週期成本包含設計、購買或租賃、建設、操作、維護、更新及最後的回收處理可得費用，必須納入評估年期、稅率、通貨膨脹率、折現率、所得稅率等，在評估時都採取相同的假設（如圖 5.3-5 所示）。



資料來源：LIFE-CYCLE COST AND PAYBACK PERIOD ANALYSIS DOE 2010

圖 5.3-5 生命週期成本評估法

紐約市交通局採用生命週期成本方式評估發現，在不同重貼現率水準，分別以每度電 0.120 及 0.169 美元，每一年可省下之維護費用仍以 35 美元為基礎、高壓鈉燈之壽命假設為 6,000 小時有 50%機會須更換，在 5.7 年為基期，考量初始成本與電力成本因素下，只有採用低功率 LED 路燈取代高壓鈉燈才具有可行之成本效益，其結論與還

本期間法相近(如表 5.3-7 所示)。

表 5.3-8 Franklin D. Roosevelt East River Drive 示範計畫不同電價之生命週期成本

	DR (0%)	DR (3%)	DR (7%)	DR (0%)	DR (3%)	DR (7%)
	\$0.120 / kWh			\$0.169 / kWh		
HPS	\$4,566	\$3,163	\$2,102	\$5,392	\$3,730	\$2,476
LED Roadway Lighting	\$3,468	\$2,628	\$1,977	\$3,896	\$2,923	\$2,171
LSI Industries – Delivered	\$3,425	\$2,618	\$2,008	\$3,836	\$2,900	\$2,194
LSI Industries - Specified	\$4,141	\$3,111	\$2,332	\$4,844	\$3,594	\$2,650
Elumen	\$3,744	\$2,824	\$2,115	\$4,284	\$3,194	\$2,359
BetaLED	\$4,519	\$3,460	\$2,635	\$5,211	\$3,942	\$2,952
HPS = High-pressure sodium.			N/A	= Not applicable.		
LCC = Life-cycle cost.			DR	= Discount rate.		

資料來源：Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Roadway Lighting Host Site: I-35W Bridge, Minneapolis, Minnesota

5.4 小結

以現有 LED 技術及對於至少維持現有照明品質之要求，LED 路燈成本效益能夠高於高壓鈉燈之生命期限，至少需達到 10 年以上(約 8 萬多小時)。按目前市面普遍宣稱 LED 燈泡可達 5~10 萬小時之壽命，再加上 LED 路燈故障率約為傳統燈具 5~10 倍，現階段 LED 路燈對於替代傳統高壓鈉燈之效益並不顯著，至於其他傳統燈具如水銀燈、低壓鈉燈等，效益則相對較明顯。

目前對於 LED 路燈與傳統道路照明進行效能分析時，多以小功率 LED 路燈與大功率之燈具(如高壓鈉燈)比較，忽略道路照明更需著眼之安全等議題。以生產製造而言，LED 路燈對環境所造成之衝擊，高於其他常見之燈具(如金屬複合燈、高壓鈉燈等)；但若加計使用階段，全生命週期內 LED 路燈對環境之衝擊則低於其他燈具。

此外，對於 LED 路燈生命週期之分析，係透過實驗並採用部分資料庫資料推估，非實際完整測試數據。因此，國內道路環境下 LED 全生命週期議題，後續應可進一步探討分析，以瞭解國內 LED 路燈與現有其他道路照明燈具節能減碳及成本效益之差異。

第六章 結論與建議

因應全球氣候變遷暖化情形日益明顯，當前世界各國無不積極發展綠色經濟，以尋求環境保護與經濟成長共生。我國行政院已於 97 年 6 月 5 日第 3095 次院會中通過「永續能源政策綱領」，揭櫫我國二氧化碳排放量於 2025 年要回到 2000 年的水準。98 年 12 月成立「節能減碳推動會」，督導落實「國家節能減碳總行動方案」，節能減碳為已成為目前重要施政政策之一。

經統計世界各國公共照明用電佔總發電量 10% 左右。以美國與中國大陸為例，道路照明佔總發電比例為 12% 及 16%，換算排碳量約為小客車 70%。而我國目前路燈總數約為 160 萬盞，其中近半數為水銀燈，經工研院估計，若全面將水銀燈替換成 LED 路燈，則約可節省 75% 能源消耗。

考量 LED 路燈與傳統路燈在光源特性、方向性、演色性、色溫、二次光學、燈桿高度、燈頭重量、維護方式及成本等部分，均有一定程度之差異，對道路照明設計將產生極大衝擊。爰此，本研究首先探討 LED 照明技術，並蒐集美國、日本、中國大陸等推動 LED 路燈政策情形，以及探討 LED 路燈未來發展趨勢，最後以生命週期觀點探討 LED 對於環境之衝擊及成本效益比較，主要結論與建議如后：

6.1 結論

1. 傳統路燈組成元件簡單，為單純電熱轉換、一次光學產品；LED 路燈則包含電機、電子、熱流、二次光學產品等，組成複雜且不同公司產品互不相容，複雜度較高且品質差異大，需具備專業之管理養護能力。
2. LED 技術快速成長，產品特性不斷改良，發光效率提升、成本降低與演色性已經大幅提升至具有實用階段與價值，使得 LED 路燈發展被寄予節能減碳與帶動產業之厚望，各先進國家紛紛投入相關研究，並皆以示範計畫進行實地驗證。

3. LED 路燈之配光分佈型態、流明維持率、光形、色偏、色溫、光譜、燈頭重量、燈桿間隔、用電密度等特性與傳統路燈有相當大差異，且光源指向性強，若應用於高(快)速公路或省道等路寬較大之道路，易造成佈光角不足，影響照明均勻度，不易符合現行規範之照度及明暗均勻度要求。
4. LED 過去多應用於指示或標誌應用領域，近年則逐漸擴展至照明領域。隨著各大廠商卯足全力致力研發下，LED 發光效率已逐漸提高，在高功率 LED 擴大應用下，成本也隨之下降。我國 LED 產業已發展出完整的體系，產量達到全球第一、產值達全球第二，未來應把握此優勢，積極應用 LED 技術創造更多環境與經濟之效益。
5. 國外對於 LED 路燈生命週期分析，主要係著重對於環境之影響，包含能源、空氣、水及各階段所產生之廢棄物。在生命週期的評估作業，目前最廣泛採用為 ISO 14040:2006 生命週期評估，ISO 14040 系列包含 ISO 14040 與 14044 兩標準。美國能源部及我國經濟部標準檢驗局均採用 ISO 14044 做為生命週期評估標準程序。
6. 美國能源部對於 LED 生命週期與其他燈具之比較，以能源耗用及整體環境影響評估結果顯示，LED 燈泡之效益預期於 2017 年之後將可大幅拉開距離，透過效能的提升、散熱座縮小，減少鋁原料使用、降低熱能及更有效率之光電轉換，至 2020 年 LED 燈泡可望較省電燈泡少 70% 的環境衝擊，也較 2012 年的 LED 燈泡少一半的環境衝擊。

6.2 建議

1. 由世界主要大國推動經驗來看，LED 路燈在未來已是潮流所趨。由於各國國情、技術能力、政府扮演角色、目的、發展方式均不相同，因此，推動 LED 路燈必須採循序漸進、因地制宜等原則予以推動，並考量技術成熟度、產業發展等策略因素，以確保能發揮 LED 路燈最大效益。
2. 建議公路主管機關透過推動 LED 路燈示範計畫並彙整國內外實施

經驗，研擬可行之維護制度，制訂相關管理養護手冊，並培訓管理養護人員，建立管理養護能力。

3. 由於目前 LED 路燈價格為傳統路燈 2~3 倍，為降低政府財政壓力，創造政府、產業、節能等三贏局面，經濟部以節能績效保證契約 (Energy Saving Performance Contract, ESPC) 提供經費補助，惟未考慮 LED 路燈整體光通量較傳統路燈低、相同路段必須建置數量較高、LED 路燈故障率較高、衍生線路與路燈基座需求之額外成本等因素。建議後續進行節能績效保證契約制度改善，將整體光通量與使用維護成本納入考量。
4. 目前交通部頒「交通工程手冊」第七章雖已將固態照明(LED 路燈或 OLED 路燈)列入，惟其相關特性並未納入。為因應未來可能之建置需求，建議針對不同路段、背景燈光及道路鋪面等因素，於交通部頒規範及所屬機關技術手冊研議增加或檢討相關規定如下：
 - (1)建議新增內容包括流明維持率(L90 及 L70)、色溫及色偏等三項特性。
 - (2)建議檢討內容包括輝度標準、配光分佈型態、平均照度、明暗均勻度及燈桿間隔等五項特性。
5. 針對交通部管轄國、省道 LED 路燈推動策略，建議以短中長期分階段進行，說明如下：
 - (1)短期
 - I. 目前 LED 路燈宣稱之節能效益多以水銀路燈或以小功率(125W)對比大功率(250W 或 400W)高壓鈉燈，道路照明除節能外，照明品質與用路人安全必須兼顧，在安全無虞情形下，建議公路主管機關應就全生命週期管理觀點，針對成本效益、用路安全及維護管理等議題進行試辦評估。
 - II. 由公路主管機關以示範計畫方式推動並進行相關研究，作為交通部頒規範或技術手冊修訂之參據。
 - (2)中期

俟經濟部檢討修訂 CNS15233 產品標準及交通部部屬相關機關試辦計畫完成後，且商用產品 LED 路燈之整體光電轉換效率大

於 150(lm/W)時(美國能源部建議值)，並於用路人安全無虞情況下，考量於適當路段選擇部分數量路燈進行換裝。

(3)長期

當低色溫商用產品 LED 路燈之光電轉換效率大於 300(lm/W)，且每流明價格與傳統路燈差距 30%以內時，則可考量進行全面換裝。

6. 國內目前仍欠缺 LED 路燈生命週期效益評估相關研究，建議未來可以國內道路、氣候等條件，進行國內 LED 路燈與其他燈具生命週期之分析比較。

參考文獻

1. "What is LED Lighting: Technology Overview and Introduction" Steve Den Baars Professor of Materials Solid-State Lighting and Energy Center (SSLEC) Materials and ECE Departments University of California, Santa Barbara, 2010.
2. Blue, Green & White LEDs and Blue Laser Diodes , Shuji Nakamura Solid-State Lighting and Energy Center (SSLEC) Materials and ECE Departments University of California, Santa Barbara, 2010.
3. LED 路燈市場發展趨勢與展望，工業技術研究院產業經濟與趨勢研究中心，民國 100 年。
4. City of Los Angeles Bureau of Street Lighting LED Equipment Evaluation Pilot Project - Phase I City of Los Angeles Bureau of Street Lighting LED Equipment Evaluation Pilot Project - Phase I, 2010.
5. NEEA Study: Technology and Market Assessment of Networked Outdoor Lighting Controls , Northwest Energy Efficiency Alliance, July, 2011.
6. Demonstration Assessment of Light-Emitting Diode (LED) Street Lighting Host Site: Lija Loop, Portland, Oregon , Final Report prepared in support of the U.S. DOE Solid State Lighting Technology Demonstration GATEWAY Program, 2011.
7. LED Street Light Research Project Remaking Cities Institute Pittsburgh, Pennsylvania September 2011 LED Street Light Research Project Remaking Cities Institute Pittsburgh, Pennsylvania September 2011 。
8. Challenges on Solid-State Lighting Offline Driver Design , 2010 Global LED Lighting Tech Summit Dec 2nd, 2010.
9. LED Lifetimes and Maintenancece , Ken Siderius, BSc, MIES, LC, LG.
10. NVLAP lab code 500070-0 , The Cree Durham Technology Center, 2011.
11. IES TM-21-11 Overview, History and Q&A Session IES TM-21-11

- Overview, History and Q&A Session , EPA ENERGY STAR Lamp Round Table San Diego, CA – October 24th , 2011.
12. Design-in guide Xitanium LED Programmable Drivers (75W & 150W) for outdoor use Version 2.0 , Philips Lumileds 2011.
 13. LED Lighting Half-Baked or Ready for Prime Time? Presented By: Michael Stiller, LEED AP, IESNA Principal Designer, Michael Stiller Design, 2012.
 14. High Power White LED Technology for Solid State Lighting Paul S. Martin, Philips Lumileds 2011.
 15. Are LEDs an efficient light source for high mast lighting? Johann Schleritzko, BEKAS 2012.
 16. MILITARY HANDBOOK
 17. ELECTRONIC RELIABILITY DESIGN HANDBOOK, MIL-HDBK-338B .
 18. Led-based Public Lighting System Reliability for a Reduced Impact on Environment and Energy Consumption , Dipartimento di Elettrotecnica ed Elettronica, Politecnico di Bari, Via Orabona 4, 70100 Bari, Italy.
 19. LED 道路照明技術與挑戰 , 工業技術研究院 , 民國 99 年 12 月 。
 20. IESNA LM-80-08 and TM-21-11 , Mark Hodapp, CRESenior , Philips Lumileds 。
 21. LED 元件與模組一般壽命試驗標準草案 , LED 照明標準及品質研發聯盟 , 民國 99 年 。
 22. Reliable LED Power White Paper , Dave Cooper, November 2011.
 23. LED Lighting Standards Update , Kuan Yew Cheong CREE , 5th Aug 2011 。
 24. Solid-State Lighting Research and Development: Multi-Year Program Plan , Lighting Research and Development Building Technologies Program , Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy, April 2012.
 25. LED LUMINAIRE LIFETIME: Recommendations for Testing and

Reporting , Solid-State Lighting Product Quality Initiative , Next Generation Lighting Industry Alliance with the U. S. Department of Energy , SECOND EDITION JUNE 2011.

26. Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap , Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy, August 2012.
27. Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap , Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy, August 2010.
28. An energy efficient pedestrian aware Smart Street Lighting system , University Linz, Linz, Austria, 2011.
29. The Performance, Design and Cost Benefits of Power LEDs in Street Lighting , Philips Lumileds.
30. Life Cycle Assessment of Illuminants A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps Executive Summary , OSRAM Opto Semiconductors GmbH Innovations Management Regensburg Germany, 2010.
31. 全臺設置 LED 路燈技術規範，工業技術研究院 綠能與環境研究所，民國 102 年 1 月。
32. Light Guide Techniques Using LED Lamps Application Brief I-003 , <http://www.agilent.com/semiconductors>, 2011.
33. Optical Calculations for SSL Applications , IESNA Lighting Handbook, 9th edition, 2012.
34. Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies , Mascaro Center for Sustainable Innovation, University of Pittsburgh.
35. Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part I: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent, and LED Lamps , Solid-State Lighting Program Building Technologies Program Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy, February 2012 Updated

August 2012.

36. Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 2: LED Manufacturing and Performance , Solid-State Lighting Program Building Technologies Program Office of Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy, February 2012 Updated August 2012.
37. ISO. (2006). Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework, <http://www.iso.org/>.

附錄 1

計畫摘要

交通部門協助推動LED路燈照明策略初探

計畫摘要

一、研究緣起與目的

行政院為使我國得於 10 年內發展成為能源產業大國，並引領臺灣社會邁入低碳化與產業高值化目標，已於 98 年 4 月 23 日宣布啟動「綠色能源產業旭升方案」，積極推動我國具有良好產業基礎及躍升能量的綠色能源產業，包括太陽光電、LED 光電照明、風力發電、生質燃料、氫能與燃料電池、能源資通訊、電動車輛等 7 項產業為發展主軸，其中在 LED 照明方面，已設定在 2015 年成為全球最大 LED 光源及模組供應國，產值達到新台幣 5,400 億元之國家目標。另行政院已於 100 年 12 月核定「擴大設置 LED 路燈節能專案計畫」，同意在中央特別統籌分配稅款項下匡列支應新臺幣 20 億元，並在明(101)年度汰換 25 萬盞水銀路燈。

我國路燈半數以上仍為水銀路燈，其發光效率僅 35 lm/W，且有汞污染之問題，不符合目前環保、節能之訴求。目前經濟部能源局透過擴大公共建設應用 LED 照明產品方式，推動 LED 路燈應用示範計畫，97 至 100 年累計推動 2.1 萬盞以上之水銀路燈汰換為 LED 路燈，節能可達 60%，每年可節省道路照明用電約 1,034 萬度。惟我國路燈約有 40%左右為高壓鈉燈，其發光效率目前仍略優於 LED 路燈，價格僅為 LED 路燈之 30%，且其產品十分成熟，各道路主管機關已有多年使用經驗，為目前最受歡迎之選項。

道路照明主要係提供交通安全、方向識別、減少事故及行人安全等 4 項服務，服務範疇主要包括高快速公路、一般市區道路、山區道路及人行道等 4 種主要道路型態，上開各種道路型態所需之照明需求各有差異。由於 LED 路燈與傳統路燈在光源特性、方向性、演色性、色溫、二次光學、燈桿高度、燈頭重量、維護方式及成本等部分，均有一定程度之差異，因此將對道路照明設計產生極大衝擊，世界各先進國家如美國、日本等，目前均仍以示範建置方式，累積相關經驗。如美國目前暫定 LED 路燈效率必須達到 150 lm/W，日本國土交通省開始於高快速公路進行示範建置，以作為未來全面建置之參考。

為配合暨因應經濟部未來之 LED 路燈汰換計畫，交通部門必須在兼顧交通安全、節能減碳及照明設備維護保管等目標下，預為研擬相關配合推動作法與配套措施。本研究案除將蒐集探討世界先進國家 LED 路燈最新發展趨勢及推動機制與策略外，並將彙整探討我國目前示範建置成果及使用維護經驗，另將初步研析國內主要道路型態建置 LED 路燈之適用性，以及其成本效益與節能減碳效果，以作為後續交通部門與經濟部門合作發展 LED 路燈建置政策與策略之參考依據。

二、研究範圍與內容

本研究將針對國內外 LED 路燈最新發展趨勢及推動機制與策略進行探討研析，並初步研析國內建置 LED 路燈之適用性，以及其成本效益與節能減碳效果。本年度主要研究範圍與構面包括：

- (1) 蒐集探討世界先進國家 LED 路燈最新發展趨勢及推動機制與策略
- (2) 探討我國目前示範建置成果及使用維護經驗，以及初步研析其成本效益與節能減碳效果。
- (3) 提出我國國、省道推動 LED 路燈初步建議。

三、研究成果

本年度主要工作項目與執行成果包括：

1. 文獻蒐集回顧

本研究整理美國、日本、中國大陸等國家推動 LED 路燈具體做法，辦理情形如表 1 所示。我國 LED 路燈主要係由能源局以經費補助縣市政府設置，2011 年止 LED 路燈累積裝置量為 3.2 萬盞左右。自 2012 年起能源局以節能績效保證專案(ESCO)方式擴大辦理，推動 3 項 LED 路燈相關計畫，2012 年 LED 路燈累積裝置量達 5 萬盞以上，2014 年將有機會成長至 39.3 萬盞。

表 1 美國、日本、中國大陸政府 LED 路燈推動策略比較表

項目	美國	日本	中國大陸
發展目的	建立產業	節能減碳	建立產業 節能減碳
主導部會	能源部	國土交通省	中央集體領導(包括科技部、工信部、交通部、財政部等 13 個部會)
優勢	重要關鍵技術掌握 (調光技術、大功率 LED 技術)	重要關鍵技術掌握 (磊晶與螢光粉)	政府創造超大內需
關鍵計畫	次世代照明計畫	21 世紀光計畫	十一五計畫
執行方式	按部就班	按部就班	跳躍式
標準制定	政府、民間	民間聯盟	政府
示範建置	地方政府與民間	中央政府	中央政府監督、地方政府執行
建置區域	都市街道、運輸場站	都市街道 運輸場站 高速公路	逐步擴大設置
建置範圍	小區域	小區域	大區域

資料來源：本研究整理

2. LED 照明技術初析

LED 效率包含提升四大課題：驅動電路、LED 元件本身、散熱效率以及燈具和光學四部分轉換效率，其中以 LED 元件本身所面臨課題最大。LED 商用產品光電轉換效率必須提昇至 150lm/W 方可和目前道路最廣泛使用之高壓鈉燈競爭。

目前白光 LED 兩種主要技術分類為利用螢光粉進行配光、使用多顆不同顏色之 LED 晶粒，透過調光技術與晶粒排列產生白光，分別由日本 NICHIA 公司與美國 Cree 公司所主導發展，其中於大功率之路燈照明方面，利用調光技術與多晶粒排列產生白光之技術較為看好。

LED 路燈照明技術發展，目前面臨發光效率不如預期、驅動電源故障、結構與電路設計過度複雜、燈具散熱不良等問題使其可靠度偏低。目前可從材料選擇與結構設計、磊晶與製程技術及封裝等三個技術方向分別進行改良，如更換基板材質、改良相關製程技術以提高取光率、更換高熱傳係數材質等，但衍生包括成本提高、智慧財產權限制、生產速

度減慢等新問題須克服。

3. LED 路燈發展趨勢

在相同照度下以 LED 路燈取代水銀路燈可節能至少 50% 以上，在節能減碳上係屬值得推動之綠能產品。至於以 LED 路燈取代較高瓦數（200W 以上）高壓燈或低壓鈉燈，以其目前發光效率來看，在節能方面未必有明顯優勢，如取代低瓦數的高壓鈉燈及低壓鈉燈，因其發光效率僅 60~70 lm/w，以目前 LED 路燈產品光效普遍已達 80~90 lm/w，仍有其汰換的節能效益。

由於 LED 仍屬於發展中，產品標準欠完善，此狀況衍生出 LED 照明產品的諸多問題，如品質不穩定、性能差異大，散熱設計及環境因素造成壽命降低、不良的光學設計影響照明品質等，這是生產業者本身需嚴格把關之課題。對於使用單位而言，後續維管上亦必須定期抽測，以確保 LED 路燈品質、節能、長壽命之特點。整體而言，LED 路燈推動注意事項包括：模組化、規格化、價格平民化等面向，這也是未來 LED 道路照明產品要廣泛應用之關鍵。

4. LED 路燈生命週期與實際案例探討

以現有 LED 技術及對於至少維持現有照明品質之要求，LED 路燈成本效益能夠高於高壓鈉燈之生命期限，至少需達到 10 年以上（約 8 萬多小時）。按目前市面普遍宣稱 LED 燈泡可達 5~10 萬小時之壽命，再加上 LED 路燈故障率約為傳統燈具 5~10 倍，現階段 LED 路燈對於替代傳統高壓鈉燈之效益並不顯著，至於其他傳統燈具如水銀燈、低壓鈉燈等，效益則相對較明顯。

目前對於 LED 路燈與傳統道路照明進行效能分析時，多以小功率 LED 路燈與大功率之燈具（如高壓鈉燈）比較，忽略道路照明更需著眼之安全等議題。以生產製造而言，LED 路燈對環境所造成之衝擊，高於其他常見之燈具（如金屬複合燈、高壓鈉燈等）；但若加計使用階段，全生命週期內 LED 路燈對環境之衝擊則低於其他燈具。

對於 LED 路燈生命週期之分析，國外目前係透過實驗並採用部份資料庫資料推估，非實際完整測試數據。因此，國內道路環境下 LED 全生命週期議題，後續應可進一步探討分析，以瞭解國內 LED 路燈與現有其他道路照明燈具節能減碳之差異。

四、結論

1. LED 技術快速成長，產品特性不斷改良，發光效率提升、成本降低與演色性已經大幅提升至具有實用階段與價值，使得 LED 路燈發展被寄予節能減碳與帶動產業之厚望，各先進國家紛紛投入相關研究，並皆以示範計畫進行實地驗證。
2. LED 路燈之配光分佈型態、流明維持率、光形、色偏、色溫、光譜、燈頭重量、燈桿間隔、用電密度等特性與傳統路燈有相當大差異，且光源指向性強，若應用於高(快)速公路或省道等路寬較大之道路，易造成佈光角不足，影響照明均勻度，不易符合現行規範之照度及明暗均勻度要求。
3. LED 過去多應用於指示或標誌應用領域，近年則逐漸擴展至照明領域。面對傳統價格低廉且發光效率高之光源（如高壓鈉燈），要全面推展 LED 照明，如何提昇 LED 發光效率與及降低成本之課題，成為 LED 技術發展之兩大挑戰。
4. 傳統路燈組成元件簡單，為單純電熱轉換、一次光學產品；LED 路燈則包含電機、電子、熱流、二次光學產品等，組成複雜且不同公司產品互不相容，複雜度較高且品質差異大，需具備專業之管理養護能力。
5. 伴隨發光效率提高及高功率 LED 擴大應用下，成本也隨之下降，宣示 LED 照明時代已經來臨。我國 LED 產業已發展出完整的體系，產量達到全球第一、產值達全球第二，未來應把握此優勢，積極應用 LED 技術創造更多環境與經濟之效益。
6. 國外對於 LED 路燈生命週期分析，主要係著重對於環境之影響，包含能源、空氣、水及各階段所產生之廢棄物。在生命週期的評估作業，目前最廣泛採用為 ISO 14040:2006 生命週期評估，ISO 14040 系列包含 ISO 14040 與 14044 兩標準。美國能源部及我國經濟部標準檢驗局均採用 ISO 14044 做為生命週期評估標準程序。
7. 美國能源部對於 LED 生命週期與其他燈具之比較，以能源耗用及整體環境影響評估結果顯示，LED 燈泡之效益預期於 2017 年之後將可大幅拉開距離，透過效能的提升、散熱座縮小，減少鋁原料使用、

降低熱能及更有效率之光電轉換，至 2020 年 LED 燈泡可望較省電燈泡少 70%的環境衝擊，也較 2012 年的 LED 燈泡少一半的環境衝擊。

五、建議

1. 由世界主要大國推動經驗來看，LED 路燈在未來已是潮流所趨。由於各國國情、技術能力、政府扮演角色、目的、發展方式均不相同，因此，推動 LED 路燈必須採循序漸進、因地制宜等原則予以推動，並考量技術成熟度、產業發展等策略因素，以確保能發揮 LED 路燈最大效益。
2. 建議公路主管機關透過推動 LED 路燈示範計畫並彙整國內外實施經驗，研擬可行之維護制度，制訂相關管理養護手冊，並培訓管理養護人員，建立管理養護能力。
3. 由於目前 LED 路燈價格為傳統路燈 2~3 倍，為降低政府財政壓力，創造政府、產業、節能等三贏局面，經濟部以節能績效保證契約（Energy Saving Performance Contract, ESPC）提供經費補助，惟未考慮 LED 路燈整體光通量較傳統路燈低、相同路段必須建置數量較高、LED 路燈故障率較高、衍生線路與路燈基座需求之額外成本等因素。建議後續進行節能績效保證契約制度改善，將整體光通量與使用維護成本納入考量。
4. 目前交通部頒「交通工程手冊」第七章雖已將固態照明(LED 路燈或 OLED 路燈)列入，惟其相關特性並未納入。為因應未來可能之建置需求，建議針對不同路段、背景燈光及道路鋪面等因素，於交通部頒規範及所屬機關技術手冊研議增加或檢討相關規定如下：
 - (1) 建議新增內容包括流明維持率(L90 及 L70)、色溫及色偏等三項特性。
 - (2) 建議檢討內容包括輝度標準、配光分佈型態、平均照度、明暗均勻度及燈桿間隔等五項特性。

5. 針對交通部管轄國、省道 LED 路燈推動策略，建議以短中長期分階段進行，說明如下：

(1) 短期

- I. 目前 LED 路燈宣稱之節能效益多以水銀路燈或以小功率(125W)對比大功率(250W 或 400W)高壓鈉燈，道路照明除節能外，照明品質與用路人安全必須兼顧，在安全無虞情形下，建議公路主管機關應就全生命周期管理觀點，針對成本效益、用路安全及維護管理等議題進行試辦評估。
- II. 由公路主管機關以示範計畫方式推動並進行相關研究，作為交通部頒規範或技術手冊修訂之參據。

(2) 中期

俟經濟部檢討修訂 CNS15233 產品標準及交通部部屬相關機關試辦計畫完成後，且商用產品 LED 路燈之整體光電轉換效率大於 150(lm/W)時(美國能源部建議值)，並於用路人安全無虞情況下，考量於適當路段選擇部分數量路燈進行換裝。

(3) 長期

當低色溫商用產品 LED 路燈之光電轉換效率大於 300(lm/W)，且每流明價格與傳統路燈差距 30%以內時，則可考量進行全面換裝。

6. 國內目前仍欠缺 LED 路燈生命週期效益評估相關研究，建議未來可以國內道路、氣候等條件，進行國內 LED 路燈與其他運具生命週期之分析比較。

附錄 2

簡報資料



簡報大綱

- ▶ 主要先進國家LED路燈推動政策
- ▶ LED照明技術初析
- ▶ LED路燈可靠性分析
- ▶ LED照明生命週期評估
- ▶ 結論與建議

美國固態照明推動架構



2

主要先進國家LED路燈推動政策-美國

- 2005年通過「Energy Policy Act of 2005」促進固態照明產業的發展。
- 美國能源部從2004~2012年，每年提撥5,000 萬美元支持「次世代照明計畫」，(Next-generation Lighting Initiative, NGLI)。
- 主要以目前道路照明廣泛使用的高壓鈉燈 (HPS) 和LED 路燈作分析比較。復甦與再投資法案 (ARRA) 通過後，已有多達30 個左右的城市將提出對ARRA 經費的申請協助，規劃路燈LED 化工程。

3

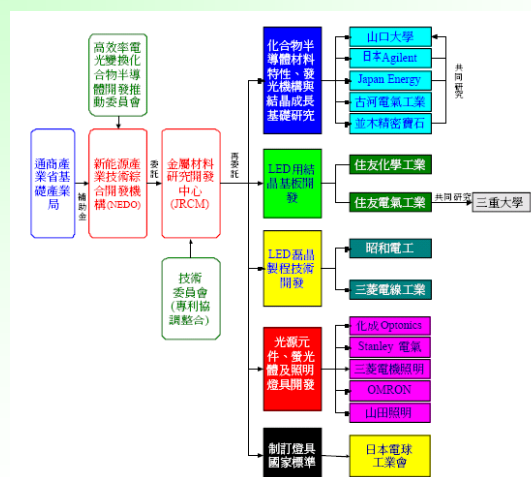
主要先進國家LED路燈推動政策-美國

● 美國分析未來高效能照明設備研發趨勢

- 1. 高發光效率
- 2. 提高使用光源的使用壽命
- 3. 有效壽命期內之光束衰減率低
- 4. 朝高演色性的光源發展相對演色性評價係數 (Ra, 或CRI) ≥ 80
- 5. 色溫的多樣性，依據環境及使用需求自低色溫 (2800K) 至高色溫 (7500K) 多元發展
- 6. 發光穩定性高，低閃爍
- 7. 受電壓變動影響輕微
- 8. 合理而高效率的照明品質應且兼顧環保與節能策略

4

主要國家LED路燈推動政策-日本



主要國家LED路燈推動政策-日本

- 日本「21 世紀光計畫」（高效率電光變換化合物半導體開發計畫），自1998 年開始，為期5 年的整合性計畫
- 日本21世紀光計畫結束之後，由日本電球工業會(JEL)、日本照明學會(JIES)、日本照明委員會(Japan's Commission on Illumination, JCIE)、日本照明器具工業會(JIL)四大團體在2004年成立日本LED照明推進協議會(Japan LED Association , JLED)

主要國家LED路燈推動政策-大陸

- 2003年6月啟動國家半導體照明工程
- 2006年2月提出國家中長期科學技術發展規劃綱要
- 由科技部、工信部、財政部、交通部等13個部會組成發展委員會，主要任務係支持地方政府全力投入LED 照明建置。
- 2008年中共正式提出十一.五計畫項下「SSL重點計畫-十城萬盞」半導體照明示範計畫

主要國家LED路燈推動政策-大陸

● 十城萬盞計畫

- 自2009年開始為所謂試點階段，於20個試點城市建置100萬盞LED公共照明燈具以及LED零組件國產比例60%，達成年節約電力2.2億度目標。
- 2010~2012年為示範階段，將擴增至50個試點城市、200萬盞LED公共照明燈具、LED零組件國產比例70%並達成年節約電力10億度目標。
- 最後進入全面推廣階段，SSL占全國通用照明30%以上、節約電力1400億度以及百萬人就業並成為世界SSL前三強(目前為日本、美國、韓國與中華民國)

● LED照明推廣順序

- 運輸場站(地鐵、機場、停車場)→火車車廂→加油站→隧道→一般道路至通用照明

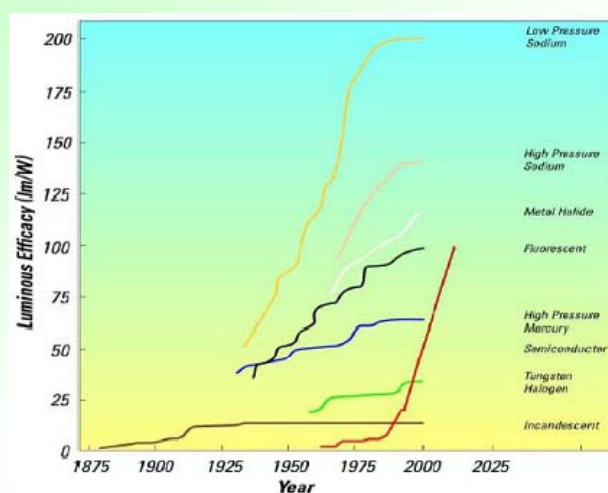
主要國家LED路燈推動政策-大陸



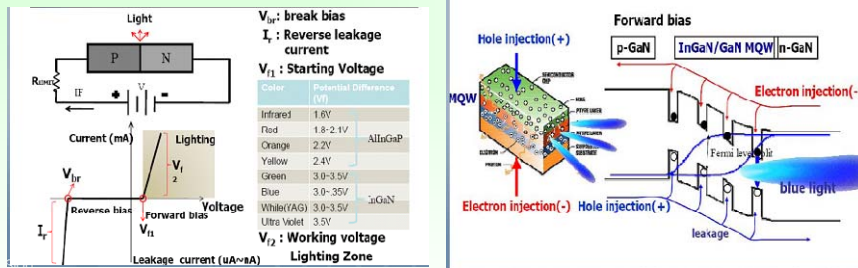
主要國家LED路燈推動政策-大陸

- ▶ 中國大陸發改委LED路燈推動最重要的四大因素：
 - 環保、節能減碳
 - 電價上漲
 - LED 路燈效率提升、價格下降
 - 扶持各地方政府大力發展之LED產業
- ▶ 中國大陸的LED路燈推動，利用EMC (Energy Management Contract)，即合同能源管理，仿照目前我國所推動之節能績效保證契約 (Energy Saving Performance Contract, ESPC)

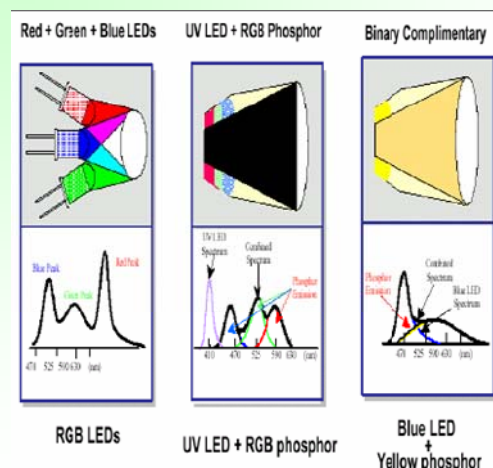
光源技術發展



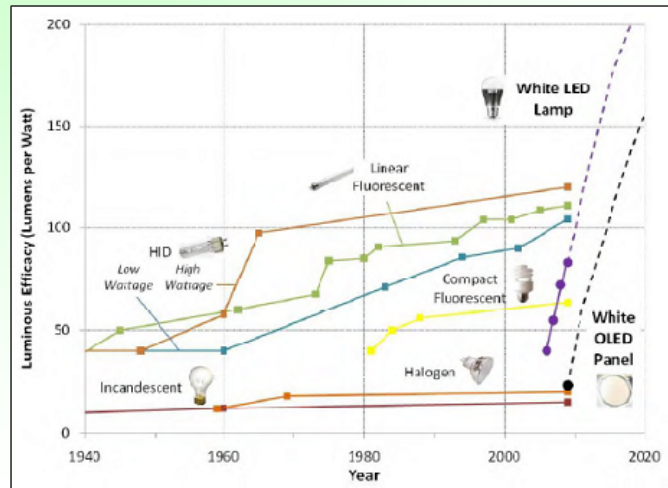
LED發光技術原理



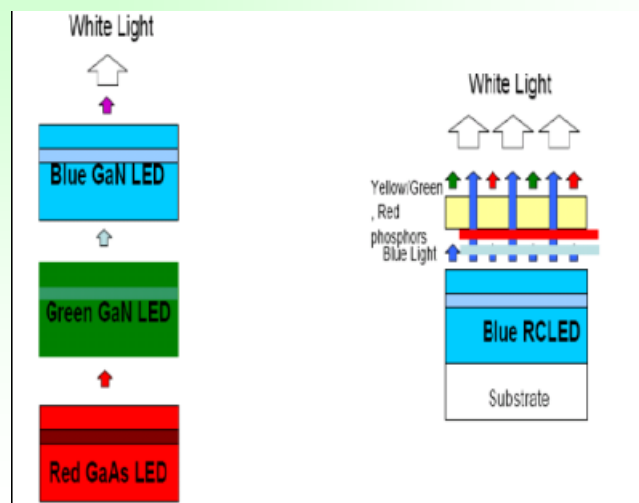
白光LED調色原理



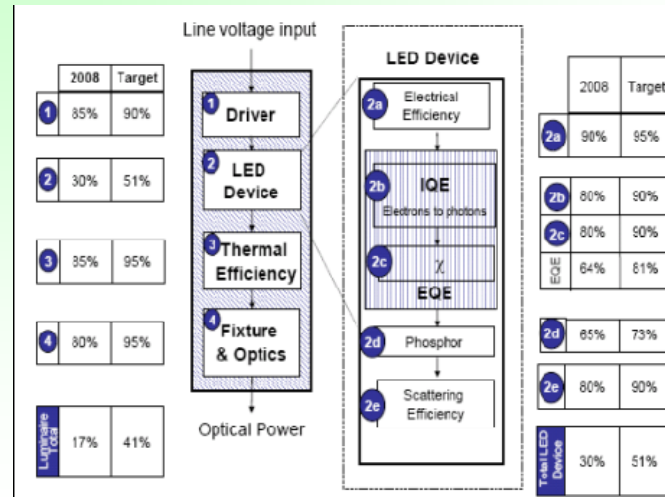
光源效率趨勢



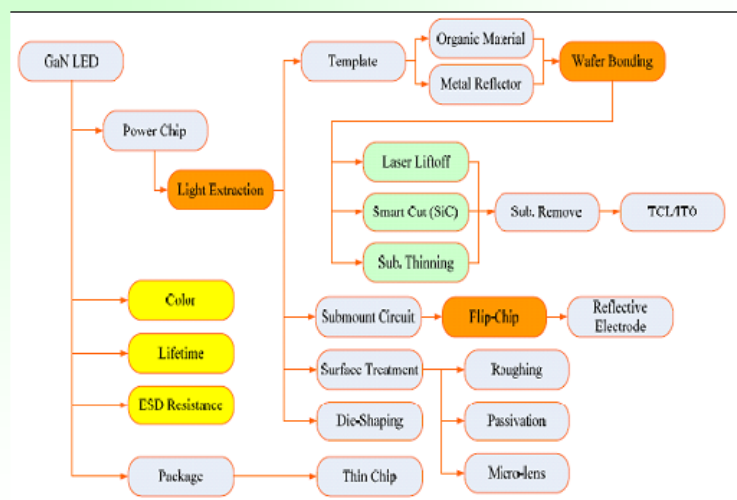
LED白光產生方式: 螢光粉與三色LED配光



螢光粉配光之LED效率分析



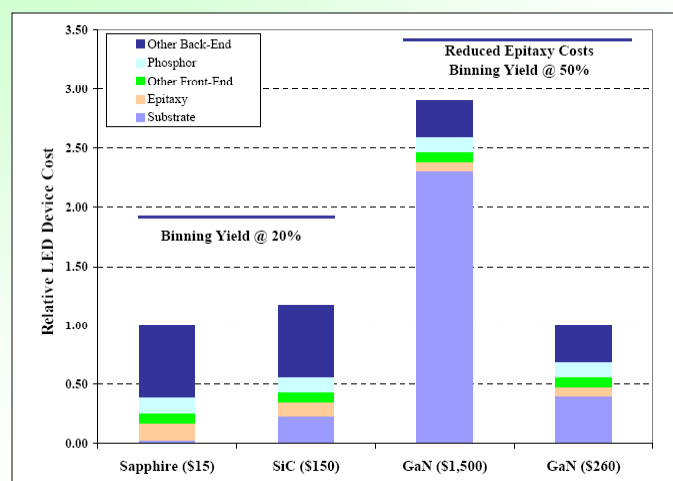
LED效率與穩定性提升技術(1)



LED效率與穩定性提升技術(2)

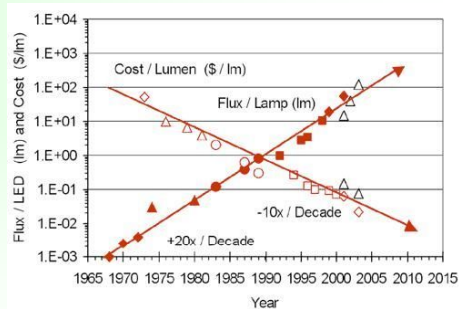
- 提升LED晶片的發光效率與可靠度，目前係以結構設計與材料選擇、磊晶與製程以及封裝等三個面向進行
- 由材料之選擇、製程技術、封裝技術等3個技術層次著手，雖可改善LED照明目前面對的部分技術問題，但所衍生之成本增加問題仍有待解決。

不同基板材質LED成本分析

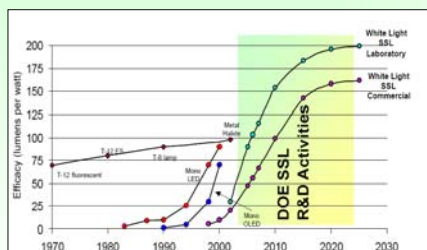


海茲定律 (Haitz LAW)

- Philips Lumileds Lighting公司的Roland Haitz於2003年歸納出LED界的摩爾定律 (Moore LAW) —海茲定律 (Haitz LAW)
- LED約每18~24個月可提升一倍的亮度，以此定理推估10年內LED亮度可以再提升20倍，而成本將可降低90%，達到可完全取代現有照明技術之目標。

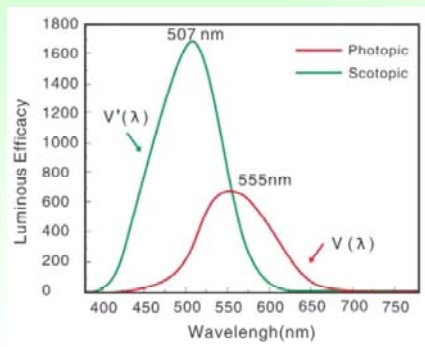


不同色溫之LED效率預測



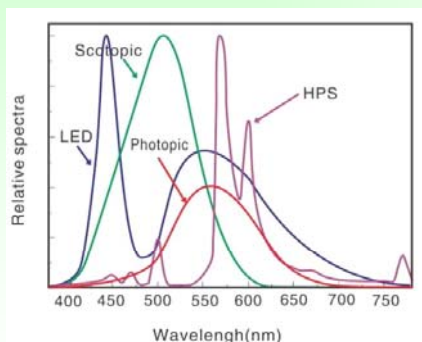
- 美國能源部 (Department of Energy DOE) 於2007年研究顯示2010年LED路燈之實驗室產品可達到150 lm/W，趕上高壓鈉燈，但實際商用產品光源效率仍僅約90~100 lm/W，必須到2015年，LED照明商用產品才可達到150 lm/W，對照現今白光LED發展，實驗室進度明顯超越預估發展期程，商用產品之發展期程則略為落後

明暗視覺關聯



- 國際照明委員會定義中間視覺係以暗視覺/明視覺比值S/P (Scotopic/Photopic Ratio)的參數表示，用來衡量光源頻譜對於柱狀細胞的刺激比較。其依據柱狀細胞對藍、綠波段的敏感度較高，因此當光源含有較多的藍、綠光波段時（通常指色溫較高的光源），光源會有較高的暗/明視覺比值

明暗視覺關聯



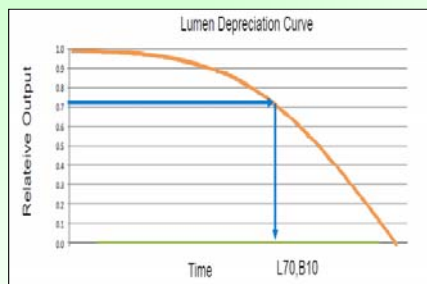
- 台灣照明委員會（CIE-Taiwan）認為人眼將光源調整至中間視覺區，則維持相同之視覺功能，白光LED路燈較高壓鈉燈可降低三成的功率

LED路燈可靠性分析



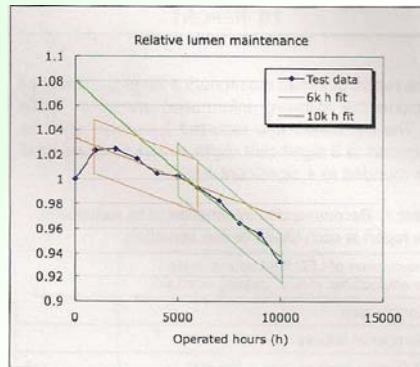
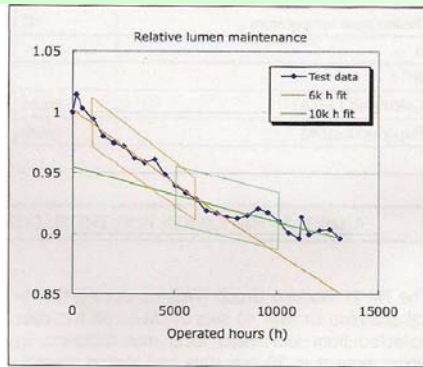
- 目前LED路燈壽命預估最常被引用係美國能源之星 (ENERGY STAR®) 認證
- ENERGY STAR® 標誌 (如圖4.2-2所示) 是由美國環保署 (Environmental Protection Agency, EPA) 和美國能源部 (Department of Energy, DOE) 共同創建，旨在保證所列管產品的能效符合法規要求並可獲得政府相關補助。相關節能產品必須通過EPA所認可的認證機構 (EPA-recognized CB) 審核，並根據特定條件完成認可測試 (Qualification Testing)，才能使用能源之星標誌並獲取相關補助。

LED路燈可靠性分析



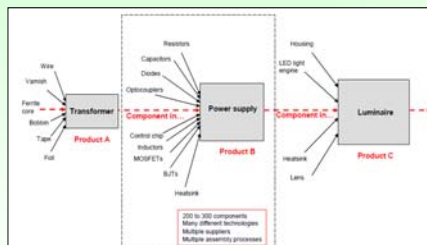
- 能源之星提出了LED燈具的驗證方式，其內容中表示若要取得其LED燈具的認證須在可靠度上須檢附Lumen Maintenance Life相關資料，即為LED的壽命由功率數下降至一定門檻所經過的時數來決定。而其檢驗方式係依照北美照明委員會所制定之IESNA Testing Procedures Committee, IESNA IES LM-80-08 Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources
- LED光源認證中最重要的流明維持率數值需要LED製造商，依照IESNA LM-80-08所規定的測試方法提出LED元件 (Package/Array/Module) 至少6,000小時的驗證資料，LED製造商再依IESNA TM-21-11的方式進行燈具流明維持的推估

Lumen Maintenance Life Projection- TM21-11



以元件觀點分析LED路燈系統

- LED路燈系統，包含變壓配電(Transformer)、電源供應器(Power supply)、LED照明系統(Luminaire)三個次系統，根據日本國土交通省21世紀光計畫分析LED路燈示範計畫經驗，電源供應器故障率較LED照明系統高出10~20%。



LED路燈可靠度預估 - 壽命預估法 (Prediction)

- ▶ 目前多採用MIL HDBK 217 進行分析，分為零件計數法與零件應力法
- ▶ 零件計數法(Part count)：裝備可靠度為一般性零件數目、品質水準與應用環境的函數，裝備中的零件並按一定的原則分為數個等級
- ▶ 零件應力法(Part stress)：係系統與裝備研發工作進入後期之細部設計階段之後，大部分的設計均已完成，而且可以獲得包括零件應力的詳細BOM (Bill of Material，材料零件清單)，則可以使用應力分析法預估系統裝備的可靠度。

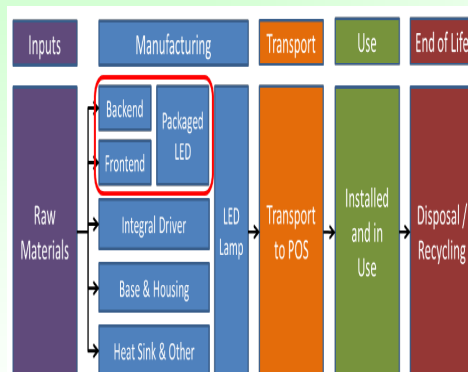
LED路燈可靠度預估 - 壽命實測法 (Demonstration)

- ▶ 利用加速模型(Acceleration model)，求出加速因子(Acceleration factor)並提供實際樣品利用環境試驗模擬機將樣品實測以求得產品壽命。加速試驗乃對於產品施予較嚴苛之應力，使其在短時間內發生失效，以利分析產品品質及推估產品之可靠度。
- ▶ 產品施予較正常使用環境的嚴苛應力，而使產品在短時間內發生失效的行為，同時觀察其失效狀況，得知應力與壽命之關係，進而推估得知產品於正常使用下的平均壽命與失效分佈，壽命實測法是在物理與時間上，加速產品的劣化速度，以較短的時間試驗。

LED路燈可靠度預估 - 市場回饋法 (Field return)

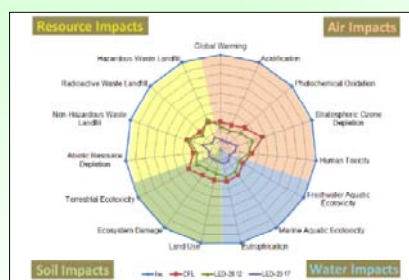
- ▶ 市場回饋法 (Field return)，係於蒐集產品使用者在市場上所使用的狀況，優點為結果等於真實壽命，缺點為時間與成本更長、市場使用狀況難取得
- ▶ 美國能源部在LED LUMINAIRE LIFETIME: Recommendations for Testing and Reporting 中建議與類似裝備法 (Similar Equipment Method) 及類似複雜性法 (Similar Complexity Method) 相整合。

LED照明生命週期評估 (美國能源部)



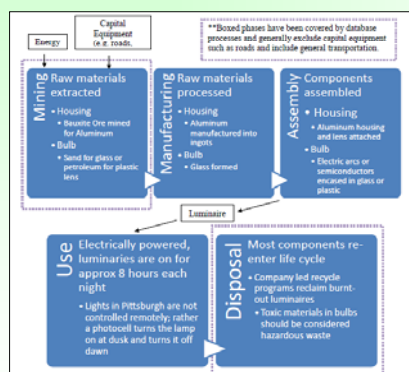
- ▶ 美國能源部在全生命週期所設定的LED光源，以目前最普及的藍寶石基板上磊晶氮化鎵藍光LED，燈罩塗布黃磷螢光粉的類型為分析目標。其所有的統計分析，皆未計入回收的考量，亦即假設所有產品都來自於全新的原物料。

LED照明生命週期評估結果（美國能源部）



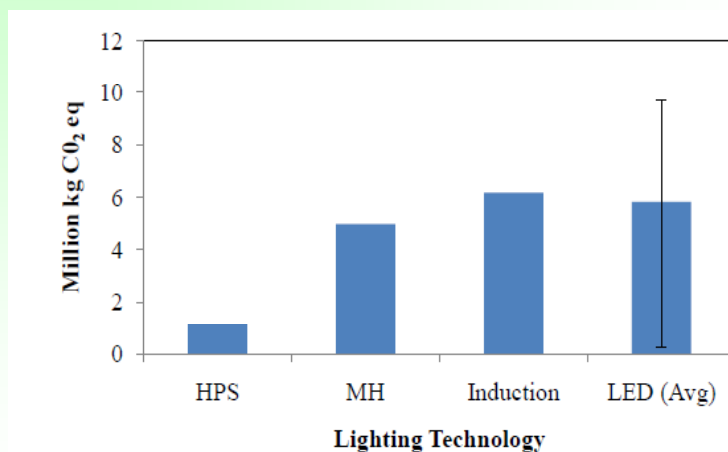
- 美國能源部進行全生命週期為每種光源提供相同照度的情形下，全生命週期（含原料取得、生產、運送、安裝使用、廢棄處理等）所需的能耗進行比較在空氣、土地、水、自然資源等4大類的環境影響評
- 氣體放電燈具與2012年LED燈具的環境影響程度相近，前者在14個項目中都微幅高於後者，唯獨有害廢棄物這項相反，肇因於LED燈具所用的wafer中鉛製程及鉛散熱座產生的環境危害。

LED照明生命週期評估（Mascaro Center）

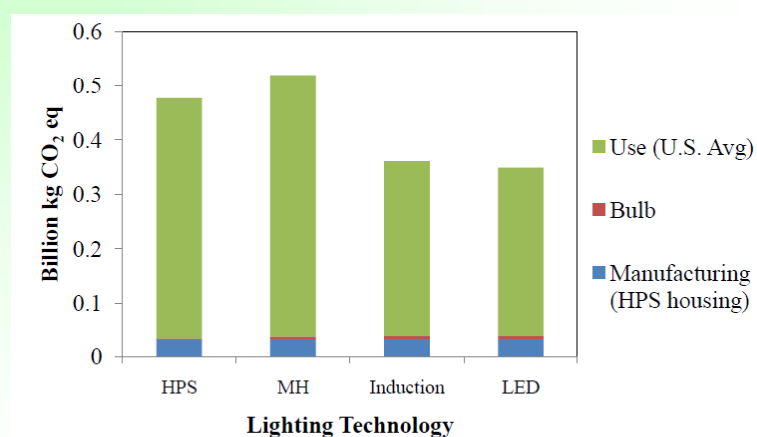


- Step 1：詳細描述產品生命週期內所產生廢棄物或使用的物料，建立相關特徵因子。
- Step 2：評估產品所產生廢棄物或使用的物料對於環境的影響，一般稱為環境評估步驟。
- 特徵因子建立階段，Mascaro Center參考美國環保署所建立的生命週期衝擊評估方法，應用化學物質與其他環境衝擊減輕與評估工具TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts)進行LED路燈之特徵因子建立。
- 環境評估步驟上，Mascaro Center係採用SimaPro進行生命週期評估，將TRACI所得到之特徵因子輸入SimaPro進行分析。

LED照明生命週期評估 (Mascaro Center) 製造階段



LED照明生命週期評估 (Mascaro Center)



重要結論(1/2)

◆ LED 照明現況

- LED照明特性不斷改良，發光效率提升、成本降低與演色性已經大幅提升至具有實用階段與價值
- 包括美國、日本及歐洲國家目前投入LED燈具相關研究，並皆以示範計畫進行實地驗證

◆ LED路燈照明特性

- LED路燈之配光分佈型態、流明維持率、光形、色偏、色溫、光譜、燈頭重量、燈桿間隔、用電密度等特性與傳統路燈不同
- LED路燈若應用於高(快)速公路或省道等路寬較大之道路，易造成佈光角不足，影響照明均勻度，不易符合現行規範之照度及明暗均勻度要求。

36

重要結論(2/2)

◆ LED路燈之效益

- 預期於2017年之後將可大幅拉開距離，透過效能的提升、散熱座縮小，減少鋁原料使用、降低熱能及更有效率之光電轉換，至2020年LED燈泡可望較省電燈泡少70%的環境衝擊，也較2012年的LED燈泡少一半的環境衝擊。

◆ LED 未來發展策略

- 伴隨發光效率提高及高功率LED 擴大應用下，成本也隨之下降，宣示LED 照明時代已經來臨。我國LED 產業已發展出完整的體系，產量達到全球第一、產值達全球第二，未來應把握此優勢，積極應用LED技術創造更多環境與經濟之效益。

37

未來建議(1/2)

◆ 未來政策建議

- 由世界主要大國推動經驗來看，LED路燈在未來已是潮流所趨。由於各國國情、技術能力、政府扮演角色、目的、發展方式均不相同，因此，推動LED路燈必須採循序漸進、因地制宜等原則予以推動，並考量技術成熟度、產業發展等策略因素，以確保能發揮LED路燈最大效益。
- 建議公路主管機關透過推動LED路燈示範計畫並彙整國內外實施經驗，研擬可行之維護制度，制訂相關管理養護手冊，並培訓管理養護人員，建立管理養護能力。

38

未來建議(2/2)

◆ 日後道路主管單位優先進行研究下列議題

- 目前交通部頒「交通工程手冊」第七章雖已將固態照明(LED路燈或OLED路燈)列入，惟其相關特性並未納入。為因應未來可能之建置需求，建議針對不同路段、背景燈光及道路鋪面等因素。
- 建議公路主管機關應就全生命周期管理觀點，針對成本效益、用路安全及維護管理等議題進行試辦評估。

39



簡報結束
恭請裁示



低碳永續 珍愛地球
綠色運輸 呵護家園

