

使用 UV-C LED 達到安全、有效、高效率的病原體控制

■作者：Rich Miron

COVID-19 疫情已促使工程師考慮，將紫外線 (UV) 光用於消毒與滅菌產品中，以便將 SARS-CoV-2 (即引發 COVID-19 的病毒)「去活化」。傳統的消毒與滅菌產品使用低壓水銀蒸汽燈，發出指定 UV-A 頻譜的光來消除病原體。但 LED 可以提供更多優勢，包括更高的效率、更高的光輸出、更長的壽命以及較低的使用期成本。

UV-A LED 的製造方式相對簡單，只要將藍光 LED 調至接近可見光頻譜範圍即可，且已經用於工業固化應用中長達十多年。但是，SARS-CoV-2 去活化需要更高能量的 UV-C。

過去幾年來，市面上已推出不少商用的 UV-C LED 產品。然而，這類裝置無法立即替代傳統水銀蒸汽燈，因為在設計上仍有許多新挑戰。例如，為了確保消毒與衛生處理產品能正常運作，需要大量且嚴格控制的輻射通量。此外，UV-C LED 不但對細菌與病毒有危險性，也對人體有害，所以在設計

過程中務必要有足夠的保護措施。

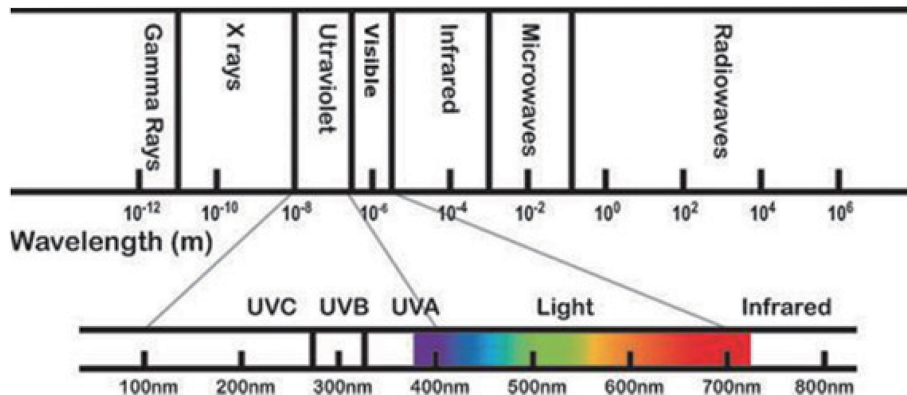
本文將簡要探討紫外線輻射的類型，及其在衛生處理和病原體控制層面發揮的作用。接著會說明使用 LED 作為輻射源的好處，以及相關的設計難題。然後會介紹克服這些難題的解決方案，包括使用 Luminus Devices、Vishay Semiconductor Opto Division 及 SETi/Seoul Viosys 等廠商的 UV LED 範例產品。

為何使用紫外線光來控制病原體？

紫外線輻射的電磁頻譜介於可見光與 X 光之間，而且包含短波長 (400 nm 至 100 nm) 光子及對應的高能量。輻射波長與頻率成反比，亦即波長越短，頻率就越高 (圖 1)。

依據紫外線輻射與生物材質的互動，已界定的紫外線光分為三種類型：UV-A(400 nm 至 315 nm)、UV-B (314 nm 至 280 nm) 以及 UV-C(279

圖 1：在電磁頻譜上，紫外線輻射落在可見光正下方，波長介於 100 nm 至 400 nm，而且還可再細分為 A、B、C 三種類型。



圖片來源：加拿大政府

nm 至 100 nm)。太陽會產生這三種類型的光，但人體會曝曬到的主要限於 UV-A，這是因為僅有少許 UV-B 會穿透地球的臭氧層，而 UV-C 則完全不能穿透。然而，有幾種人工方式可產生所有三種類型的紫外線光，例如水銀蒸汽燈與最新的 UV LED。

UV-C 輻射早在目前疫情發生之前，就是用來滅除病原

體的成熟技術。傳統產品採用水銀蒸汽燈作為紫外線來源。近期以 UV-C 對 SARS-CoV-2 的效果所進行的研究顯示，病毒的 RNA 傾向於吸收波長約介於 250 nm 至 280 nm 的紫外線光，而總劑量若達 17 J/m^2 ，即可將 99.9% 的病原體去活化。請注意，這種照射量並不會立刻殺死病毒，但的確會破壞其 RNA 並足以預防病毒複製，進而使其無害，同時又可限制人體的紫外線曝曬量。

紫外線光的光源

傳統紫外線光的光源是水銀蒸汽燈，這是一種氣體放電裝置，當蒸汽金屬受到放電激發，光線就會從電漿發出。有些產品內含熔凝石英弧光管，會促使 UV-C 在波長 185 nm 下達到峰值發光（包括部分的 UV-A 與 UV-B 放射），以使用於消毒與滅菌用途（圖 2）。

圖 2：UV-C LED 發明之前，低壓水銀蒸汽燈是最實用的紫外線光源。



圖片來源：JKL Components

若與傳統白熾燈光源相比，水銀蒸汽燈的效率相對較高且壽命較長，但主要缺點在於，燈泡若在正常使用或棄置時破裂，會釋出有毒的水銀到環境中。

另一方面，UV-C LED 為消毒與滅菌應用帶來的關鍵優勢，與 LED 在一般照明應用帶來的優勢相

同，包括光效、較高的光輸出、較長的壽命以及較低的使用期成本。此外，雖然棄置 LED 時仍須小心，但 LED 不像水銀光源一樣對環境有害。

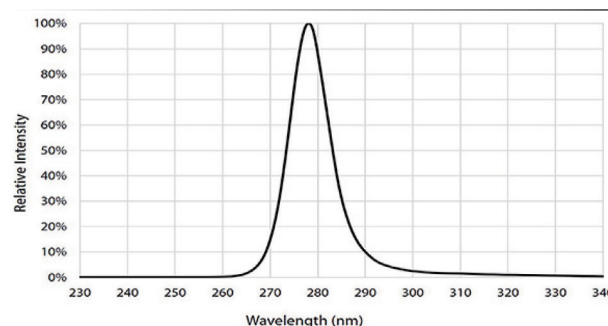
UV-C LED 以藍光 LED 技術為基礎打造。這類產品使用氮化鋁鎵 (AlGaIn) 基板作為平台，可達到比紅光 LED 更寬能隙（波長更短）的發光體。然而，UV-C LED 比起藍光 LED，效率較低且成本較高，主要是因為 UV-C 輻射無法穿透氮化鎵。因此，可以透出晶粒的 UV-C 發射光子相當少。

包括反射式 p 觸點金屬化、圖案化基板、紋理表面、微共振腔效應與體積成形在內的近期研發成果，現在都用於提升 UV LED 的光效，而商用產品現在更可提供合理的效能。但是，工程師應當知道，這些裝置展現的光效等級低於可見光 LED，而且擷取光子的複雜度更高，會讓成本上升。製造商的規格書一般都會避開光效數據，而是詳細說明指定驅動電流與電壓下的通量（單位 mW）。

UV-C LED 解決方案範例

市面上有幾款商用 UV-C LED，專為在最佳波長散發輻射而設計，以便將病原體去活化。舉例來說，Luminus Devices 的 XBT-3535-UV-A130-CC275-01 是在 277 nm 放射的 UV-C LED。此款 LED 產品可在 350 mA/5 V 至 7.5 V 的驅動電流／電壓下，提供 30 mW 至 55 mW 的通量（視所選分檔而定）（圖 3）。

圖 3：UV-C LED 在 100 nm 至 280 nm 的範圍內達到峰值發光。若要達到 SARS-CoV-2 去活化，理想的峰值介於 250 nm 至 280 nm。以此處所示的 Luminus Devices 的 XBT-3535-UV-A130-CC275-01 UV-C LED 為例，峰值出現在 277 nm。



圖片來源：Luminus Devices

Luminus Devices 的 XBT-3535-UV-A130-CC275-01 可由 Vishay Semiconductor 的 VLMU35CB20-275-120277 nm UV-C LED 取代。此元件是陶瓷結構 UV-C LED，具有石英窗，可延長產品壽命。此 LED 在 150 mA/6.5 V 的驅動電流／電壓下，可發出 14 mW 的輻射功率（圖 4）。

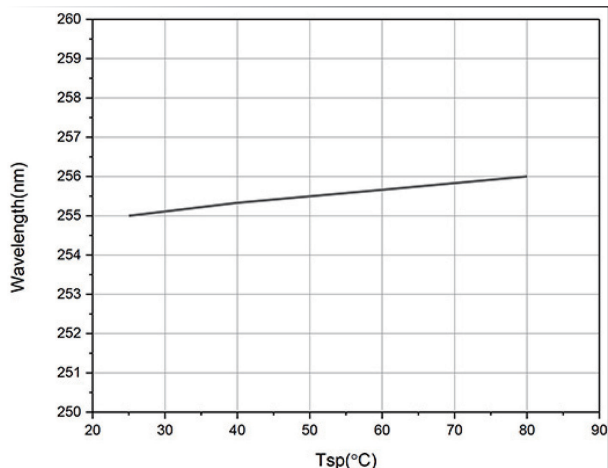
圖 4：Vishay 的 277 nm UV-C LED 安裝在陶瓷主體中，具備石英窗，可延長使用壽命。LED 的尺寸為 3.45 x 3.45 x 1.78 mm。



圖片來源：Vishay

SETi/Seoul Viosys 針對其零件提供 CUD5GF1B。此款 LED 是 255 nm 發光體，安裝在陶瓷封裝內以進行表面黏著放置，且具有低熱阻。此裝置在 200 mA/7.5 V 的驅動電流／電壓下，可發出 7 mW 的輻射功率。此 LED 在溫升下的發光波長變動極小：在 50°C 的晶粒溫度範圍內，與 255 nm 峰值輸出相比，只有 1 nm 的變動。對需要嚴密控制輸出的裝置來說，這是相當重要的考量，以確保有

圖 5：SETi/Seoul Viosys 的 CUD5GF1B UV-C LED 在 50°C 的晶粒溫度範圍內，與 255 nm 峰值輸出相比，只有 1 nm 的變動。



圖片來源：SETi/Seoul Viosys

良好的病毒去活化效果（圖 5）。

使用 UV-C LED 進行設計

每種 LED 都有各自的設計難題，因此嘗試對原本就以水銀蒸汽燈光源而設計的產品，進行調整來配合 UV-C LED 的作法並不切實際。因此，若要在消毒或滅菌應用中以 UV-C LED 取代水銀蒸汽燈，並非單純改掉光源就可以解決的。

挑選消毒或滅菌用的 UV-C LED 時，設計流程首先應當決定需要使用 UV-C 光照的區域，以及在輻射照射區內將目標病原體去活化所需的輻射通量（即「照度」，單位 W/m²）。

舉例來說，試想一種可對空調管道導入的空氣進行消毒的應用。依據上述的 17 J/m² 需求，若要在 0.25 m² 的面積內，在大約五秒內將氣流中所有病毒去活化，系統須具備約 4 W/m² 的照度（總功率為 1 W）。

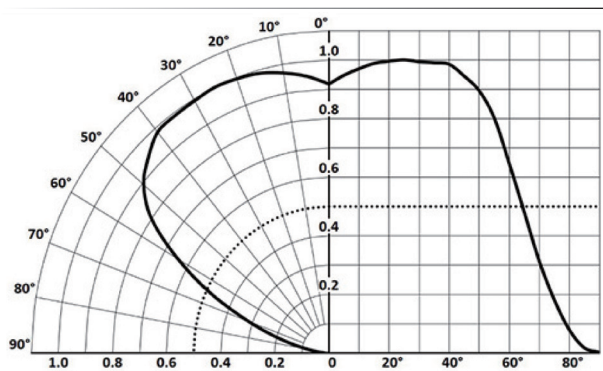
計算出所需照度後，工程師就可決定達到此照度的方式。根據經驗法則，首先考慮每個 LED 的輻射通量，並將總照度除以該通量，即可得出元件篩選清單上各個產品所需的 LED 數量。

這種約略計算方式是簡化算法，因為尚未考量通量的分配方式。有兩個因素會決定輻射通量如何撞擊目標表面。第一個是 LED 至物件的距離；第二個是 LED 的「光束角度」。

若將 LED 視為點狀光源，其照度會依照平方反比定律而減少。例如，離發光點的距離為 1 cm，照度為 10 mW/cm²，在 10 cm 遠時，照度會降至 0.1 mW/cm²。然而，此計算方法是假設 LED 會朝各個方向均勻發光，但事實並非如此。相反的，LED 的主光學元件會將輻射通量導向特定方向。製造商通常會將 LED 的光束角度列於規格書中，此角度的定義是：在原點任一側達到 50% 峰值照度時的角度。

上述 Luminus Devices、Vishay 與 SETi/Seoul Viosys 的 UV-C LED 產品光束角度分別是 130、120 與 125 度。圖 6 顯示 Luminus Devices 的 XBT-3535-UV-A130-CC275-01 LED 輻射場型。在此圖

圖 6：根據 Luminus Devices 的 XBT-3535-UV-A130-CC275-01 UV-C LED 的輻射場型，虛線表示達到 50% 峰值照度的位置，即可依此定義光束角度 (65 + 65 度)。



圖片來源：Luminus Devices

中，虛線表示達到 50% 峰值照度的位置。如此即可定義光束角度 (65 + 65 度)。

決定光束角度的關鍵特性在於 LED 晶粒對主要光學元件大小的比例。因此，若要產生更窄的光束，需要使用更小的發光體或更大的光學元件 (或在兩者之間取得平衡)。設計取舍準則是：晶粒越小，發光量越低；而較大的光學元件則更難製造，導致價格上升，進而限制了光束角度的控制能力。

商用 LED 通常會隨附原廠裝配的主光學元件，因此設計工程師無法決定晶粒／光學元件的比例。因此，審查篩選後產品的光束角度相當重要，因為不同供應商的兩個裝置即便有同樣的輸出，卻可能有相當不同的輻射場型。

雖然 LED 與受照射物件之間的距離以及光束角

度，是判定輻射場型時很好的初步指引，但造成差異的因素有很多。例如，單一製造商的 LED 光線場型，若輸出與光束角度在理論上是相同的，在強度與品質上可能有相當的差異，視主光學元件的設計而定。確定實際照度圖的唯一方式，就是對篩選後產品的輸出進行測試。

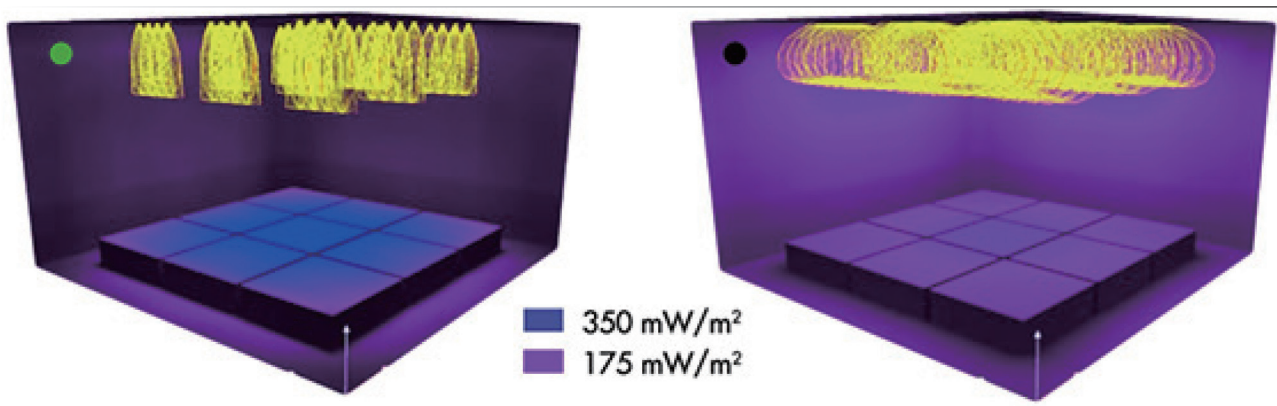
有了 LED 輸出、LED 與待消毒項目放置平面間的距離、光束角度，以及實際的輻射數據，工程師便可以計算需要多少個 LED 及其放置方式，以便在使用區域上產生所需照度。

挑選 LED 時的最終決定，其實就是在成本、效率和複雜度之間權衡。UV-C LED 的價格較貴，所以可以採用一種方式：使用少量高功率裝置，而非大量低功率裝置。這種方式的優點是，LED 元件成本可能較低，且驅動器的複雜度會降低。但缺點在於，功率越高的裝置會因為光效低，而要求更優異的熱管理，以便維持較長的壽命 (高溫會大幅減少 LED 的壽命)。也因此需要更大的散熱片，會導致預期的成本節省效益減少一部份。

二次光學元件導入設計

除了增加 LED 數量及／或提升 LED 功率外，有個替代方案是考慮使用二次光學元件。這類元件能讓 LED 的 UV-C 輸出達到準直照射 (即產生強度相同的平行光束)，能有效消除任何光束角效應。

圖 7：相較於具有相同 LED 輸出，但使用 (非準直) 一次光學元件的系統，使用二次光學元件的 UV-C 輻射準直照射 (左) 可增加目標區域的照度。



圖片來源：LEDiL

理論上，透過準直照射，整個目標平面上的照度應可達到均勻（不受 LED 排列影響），而且應該能以更少的 LED 達到指定的照度，因為輸出的浪費變少了。又或者，與沒有二次光學元件的設計相比，能以同樣數量的 LED 達到更高的照度（ 350 mW/m^2 對比 175 mW/m^2 ）（圖 7）。

實際上，具備二次光學元件的照度無法達到均勻值，因為即便是最好產品的準直照射，也會因為繞射而有所瑕疵（雖然 LED 越小，準直照射的效果越好）。此外，若與不含二次光學元件的類似設計相比，通常需要對 LED 與二次光學元件進行長時間的定位實驗，才能確保以較少的元件取得所需的照度。

請注意，UV-C LED 二次光學元件的製造材質與可見光 LED 採用的材質有所不同。常見的解決方案是射出成形的矽零件，其反射 UV-C 波長的效果不但良好，而且還可生產出複雜的透鏡設計。鋁質反射器也可用於 UV-C 的準直照射。使用二次光學元件時，需考慮的取捨問題是成本的節省，亦即在使用較少 LED 及設計更複雜視準儀這兩方面，進行成本比較。

安全注意事項

雖然紫外線輻射無法深入穿透人體的皮膚，但卻會被人體吸收，而且會造成曬傷等短期傷害，以及皺紋與皮膚提前老化等長期損傷。在極端情況下，曝曬紫外線會引發皮膚癌。紫外線光對眼睛特別危險，會破壞視網膜與角膜。紫外線輻射與空氣互動也可能產生臭氧，而高濃度的臭氧則對健康有害。

考慮到這些危害，能限制 UV-C 光線曝曬量，而且不讓使用者直接注視 LED，才算優良的產品設計實務。因為 UV-C 並非可見光，所以挑選刻意加入一些可見藍光輻射的 LED，也是不錯的作法。如此一來，就可在 UV-C LED 開啓時清楚識別。

尤其對於 SARS-CoV-2 而言，在 HVAC 裝置中納入滅菌功能，就可迅速將空氣傳播的病毒去活化，同時不讓人接觸到 UV-C。另外，目前已經在研究，要將 LED 裝入燈具中，以非常低量且對人體無

害的 UV-C 照射在表面上，長期下來，就可以提供足夠的照射，將桌面、椅子、地板與門把等任何表面上的病毒去活化。

結論

UV-C 輻射可在消毒與滅菌產品中用來將 SARS-CoV-2 等病原體去活化。然而，常見的 UV-C 人工來源是水銀蒸汽燈，其中含有重金屬，因此棄置時會造成一些難題。UV-C LED 可提供更高效率且壽命更長的替代方案，不僅沒有棄置時的問題，而且市面上已經出現不少 UV-C LED，其照射峰值所在的波長相當適合對病原體進行去活化。

然而，這些 LED 並非可立即取代的產品，需要嚴謹的設計才能發揮最大優勢。如前所述，設計人員必須從使用表面所需的照度開始，然後回推計算所需的 UV-C LED 數量並決定其排列方式，以達到需求的照度。設計人員還必須決定，是否要倚賴 LED 的一次光學元件來產生均勻的照度；或者是否要採用二次光學元件，讓 UV-C 輸出達到準直照射，以產生最佳的輻射場型，同時，還要考量複雜度增加對成本的影響。

關於作者：

Steven Keeping 是 Digi-Key Electronics 的文章作者之一。他在英國伯恩斯大學取得應用物理系的英國國家高級文憑，且在英國布萊頓大學取得工程榮譽學士學位，接著便在 Eurotherm 與 BOC 擔任電子製造工程師長達七年。過去二十年來，Steven 陸續擔任科技記者、編輯與出版人。Steven 在 2006 年成為獨立記者，專精的領域包括 RF、LED 與電源管理。CTA