

利用電致發光技術探討磷化鋁鎵銦發光二極體的載子遷移行為 並推測其在 Mini/Micro-LED 中可能的熱效應現象

study of the carrier dynamic behavior of AlGaInP LEDs using electroluminescence technology and speculation on its potential thermal effects in Mini/Micro-LEDs applications.

吳柏良

宋柏佑

黃炳誠

陳培鈞

西川和人

黃志豪

王逸平(通訊作者)

Bro-Laing Wu

Bo-You Sung

Bing-Cheng Huang

Pei-Chun Chen

Kazuto Nishikawa

Frank Huang

Yi-Ping Wang

明志科技大學電
子工程系

明志科技大學電
子工程系

明志科技大學電
子工程系

明志科技大學電
子工程系

TOPCON 業務經理

台灣電計國際股
份有限公司總經
理

明志科技大學電子
工程系助理教授

摘要

Mini/Micro-LED 全彩技術下，磷化鋁鎵銦(AlGaInP) 為其中的紅光材料，而該材料系統可依成份比例的變化使其能隙進行調控。發光二極體受電激發光時，其量子效率未能完全轉換為光子，且隨LED 小間距排列、顆數增加及微縮化，發生更多熱累積，致使熱效應成為廣泛關注的焦點。本研究透過EL 變溫實驗探討AlGaInP，首先進行300K 的電流相依實驗，再以2V 順向偏壓及0.1mA 輸入電流，觀察10K~300K 溫度依賴性並分析其躍遷訊號及半高寬的變化，並分析熱效應所造成的影響。研究結果顯示了AlGaInP 在變溫及變電流的實驗中，躍遷訊號具有紅移的現象，及半高寬隨溫度上升而增加，導致顯示裝置的效能降低，因此針對躍遷行為在變溫的反應結果探討，能做為未來Mini/Micro-LED顯示技術重要的顯示品質判斷依據。

關鍵詞：AlGaInP、熱效應、電致發光、發光二極體、載子動力學

Abstract

In the realm of Mini/Micro-LED full-color technology, AlGaInP plays a crucial role in emitting red light. As LEDs continue to shrink in size and increase in quantity, thermal effects have garnered significant attention. This research is centered on the temperature-dependent electroluminescence spectroscopy of AlGaInP, focusing on investigating thermal effects and carrier dynamics. During the experimental phase, a 2V forward bias and a 0.1mA current were applied to AlGaInP samples using a Keithley 2410 Source Meter, with varied current levels at room temperature (300K). Additionally, spectroscopic data was collected using an Ocean Optics device to study the impact of current and temperature at room temperature, changes within the temperature range of 10-300K, and variations in transition signals and half-widths with temperature. The study reveals that as the temperature increases from 10K to 300K, AlGaInP exhibits a redshift behavior in temperature-dependent experiments. These thermal effects significantly influence the light-emitting characteristics, including the purity of emitted light and material quality. The findings underscore the need to explore these thermal effects and transition behaviors for the future development of Mini/Micro-LED display technology.+

Keyword: AlGaInP、Thermal Effect、Electroluminescence (EL)、Light Emitting Diodes(LED)、Carrier Dynamics

吳柏良 宋柏佑 黃炳誠 陳培鈞 西川和人 黃志豪 王逸平
利用電致發光技術探討磷化鋁鎵銦發光二極體的載子遷移行為並推測其在 Mini/Micro-LED 中可能的熱效應現

一、前言

現今市面上較廣泛的顯示技術，以 LCD 與 OLED 佔多數，然而目前新穎的顯示技術比起人們為解決圖像呈現進而技術開發，更多的是源自客戶為追尋著更高的解析度以及鮮豔的顯示圖像所出現的技術需求，因此 Micro-LED 研發有其必要性，

而其研發的說服力是與 LCD 和 OLED 兩者比較後所帶來的。LCD 的電致液晶偏轉有背光源漏光的結構問題，OLED 使用有機材料導致老化時出現色彩不均現象，LCD 與 OLED 兩者的技術問題襯托出了 Micro-LED 的研發必要。

Micro-LED 顯示是將 LED 微縮化至微米後，經巨量轉移陣列 RGB 實現全彩顯示，其仍保有 LED 本身低功耗、高亮度、響應時間快等優點。Micro-LED 的自發光特性解決了 LCD 的液晶漏光與 OLED 使用有機半導體，導致材料老化出現色彩不均勻的情況，因此 Micro-LED 也被認為是未來最具競爭力的直顯技術與最終解。[1][2]

LED 半導體廣泛應用了 III-V 族組成異質結構作為材料，常見的有涵蓋藍綠光的氮化鎵鎵 (InGaN)、橙紅光的磷化鋁鎵銦 (AlGaInP)。其中，AlGaInP 已運用於 Mini/Micro-LED 很長一段時間，AlGaInP 展現的高躍遷訊號及高效的光輸出功率並在寬發射波長範圍(560nm~670nm)的材料特性，在各領域上發揮許多潛力[3]。此外，也可進一步改變 AlGaInP 元素比值，調整其歐姆接觸及載子流濃度，並提高外部量子效率也是研究的熱點之一[4-5]。除了透過調整元素比值，改善發光效率外，因小間距排列及微縮化等 LED 的熱效應也相對受到了重視，目前也有許多研究著重於 LED 的熱效應研究及散熱系統，防止光波長位移與增加壽命[6-7]，反觀來看，為防止 LED 顯示品質受到影響，針對光學特性與散熱系統的設計有其重要與必要性。

在本研究中，將封裝 AlGaInP 的 LED 放置於低溫座，利用循環氦幫浦控制溫度，以電致發光(EL)光譜作為溫度及輸入電流的函數圖像，並透過光譜波長經普朗克常數轉換所得電子伏特，檢視載子躍遷程度和熱累積現象，根據函數變化解釋半高寬(FWHM)由於溫度升高及載子熱激活變化，觀察驅動電流的增加，隨著能帶填充效應與熱累積，也將

導致躍遷訊號有偏移情形。

二、背景知識

AlGaInP 是一種四元化合物材料，由鋁 (Aluminum)、鎵(Gallium)、銦(Indium)、磷(Phosphorus)四個元素組成，可應用於太陽能電池、Micro-LED 顯示等領域。而種種研究結果顯示出，應用 AlGaInP 所製造的光電元件，都展現了高效能的應用潛力[8-9]，例如可變形顯示器[10]和可拉伸主動矩陣無機發光 LED[11]、可見光通訊應用[12]等。

Micro-LED 顯示技術是將 RGB LED 微縮化後，進行像素矩陣排列實現圖像顯示，其中 LED 微縮化後的尺寸非常小，只有數十至數百微米。而 Micro-LED 顯示技術也繼承了 LED 本身的多項優點，並延伸出其顯示技術優勢，例如：低功耗、高對比、廣色域、壽命長等[13-14]。此外，Micro-LED 顯示技術的發光原理，是施加偏壓至 LED 自發光的方式，達到全彩的作用[15]。Micro-LED 技術在顯示市場中的巨大潛力，被廣泛採用至多項終端產品的顯示設計，其中針對在虛擬實境(VR)和擴增實境(AR)頭戴式顯示器，具有重要的應用價值，能夠提供 VR/AR 更高的解析度畫質及顯示效果。[16-17]

三、研究方法

這項研究使用的元件為 ROHM 的 SML-811UTT86(A)，此元件在絕對最大額定值 25°C 下功耗為 62 mW、順向電流為 25 mA、峰值順向電流為 100 mA、崩潰電壓為 5 V、工作溫度範圍在 -40°C 至 85°C，而在本研究中環境溫度範圍在 10 K-300 K、電流在 0.05 mA 至 20 mA、電壓則在 2 V，本次研究材料 AlGaInP 封裝於透明無色樹脂的紅色表面貼裝晶片 LED，尺寸為 (1.25 mm×1.2 mm×0.8 mm)，放置真空環境中，並使用 Ocean Optic QE65000 接收訊號，確保訊號準確聚焦在接收端上，在實驗設備中使用真空幫浦、低溫密封冷卻系統、冷卻水系統和低溫控制系統，設定實驗中的溫度控制。實驗階段包括將真空壓力降至 1.9e-4 mbar，鬆開以便接通低溫座管線上之閥門，透過電腦與 Ocean Optic QE65000 連接，利用軟體接收精確測量的光譜值，同時記錄了測量期間的低溫座內溫度、輸入電壓和電流數據。

利用電致發光技術探討磷化鋁鎵銻發光二極體的載子遷移行為並推測其在 Mini/Micro-LED 中可能的熱效應現

實驗步驟如下:

- (1) 光學系統校準：在實驗開始前，進行光學系統的校準。確保檢測設備 Ocean Optic QE65000，處於最佳狀態，校正光譜的基準，並確保訊號檢測正確。
- (2) 材料準備：準備 AlGaInP LED，確保 LED 外型完好。檢查並確認材料尺寸和特性。
- (3) 真空密封實驗：開啟真空密封的閥門，將材料置於真空環境中，以確保在真空下進行測量。
- (4) 真空環境建立：啟動真空系統，降低壓力以確保在真空環境中進行實驗。
- (5) 光學降光片：使用光學降光片（ND30和 ND70）來調整和減弱輸入光訊號，避免過強的光訊號對測量的干擾。
- (6) 冷卻系統：利用低溫密封冷卻系統，確保實驗室內溫度能夠在所需的低溫，以及利用冷卻系統中的循環氦對材料進行冷卻，讓實驗溫度可以達到穩定的低溫條件。
- (7) 光譜測量：使用 Ocean Optic QE65000進行光譜測量。記錄和分析接收的光譜值，包括光譜的強度和波長。
- (8) 數據記錄：在實驗過程中記錄實驗時的溫度、輸入電壓和電流數據，以便後續的分析和比較。
- (9) 實驗溫度控制：設定和維持實驗中所需的低溫控制。確保材料處於所需的溫度環境。
- (10) 實驗結束和數據分析：結束實驗後，對收集的光譜數據和溫度數據進行詳細的分析，以確定任何觀察到的效應和相關性。

四、實驗結果及分析

4.1 I-V 特性曲線

本研究以電致激發 AlGaInP，驅動電子與電洞進行輻射再複合並記錄其光譜，據官方提供的規格書可得知，此樣品最大工作電壓約落於 2 V，因此將 2 V 設為本研究的固定條件，且 2 V 偏壓時注入電流測得 20 mA。此外，透過 Keithley 2410 控制額定電流，以 0.1 mA、1 mA、3 mA、5 mA、7 mA、10 mA、15 mA、20 mA 進行比較，以便觀測躍遷訊號及半高寬在不同電流下的光學表現。

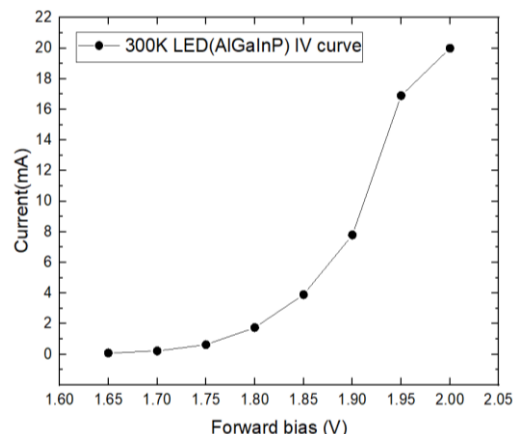


圖 1. AlGaInP 再300 K 常溫下的 I-V 特性曲線

4.2 變溫下與躍遷訊號的變化

圖(2)顯示了在10K~300K 的溫度範圍內，注入 0.1mA 驅動電流時躍遷訊號的變化，可以發現整體 EL 光譜呈現紅移現象，躍遷訊號的總差值為38 meV。300 K~77 K 降溫時可觀察到躍遷訊號的位移最為明顯。然而在77 K 後，隨溫度趨近絕對零度時，下降的躍遷訊號位移量開始逐漸減少，於77 K~10 K 逐漸恆定。此外，在 Micro-LED 應用時，同樣與 AlGaInP 應用於 Micro-LED 直顯的 InGaIn 藍光源，其躍遷變化不同的地方在於，並無10 K 時紅移轉為藍移隨後再次紅移的 S 型溫度依賴行為[18]。因此，針對 AlGaInP 與 InGaIn 兩者不同的材料系統，在 Mini/Micro-LED 直顯應用中，需考慮工作狀態造成的熱累積下，不同的發光波長偏移與半高寬變化。

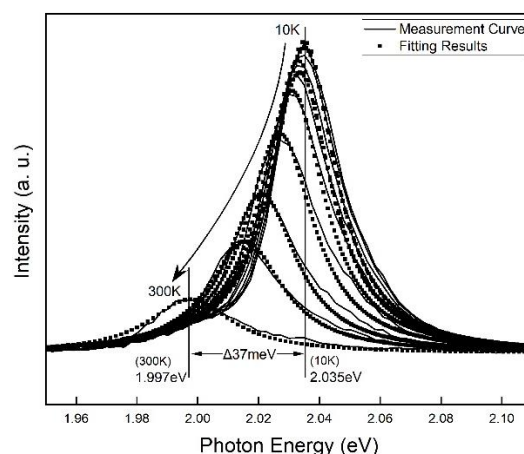


圖 2. AlGaInP 再10 K~300 K 變溫下躍遷訊號的變化，其施加偏壓與注入電流為2 V/0.1 mA

4.3 溫度對躍遷訊號的變化

利用電致發光技術探討磷化鋁鎵銻發光二極體的載子遷移行為並推測其在 Mini/Micro-LED 中可能的熱效應現

圖(3)表示溫度對 AlGaInP 躍遷訊號的變化，當溫度發生變化時，AlGaInP 的躍遷訊號會受到多種影響，這些影響包括能帶結構變化、載子遷移率變化以及載子濃度變化，可以在圖(3)看到10 K、300 K 下其躍遷訊號分別為2.035 eV、1.997 eV，300 K 及10 K 相差了 38 meV。當溫度上升時晶格熱振動隨之增加，即晶格中原子或離子在材料中的震動幅度，同時也影響了 AlGaInP 的能帶結構，干擾輻射再復合的情形，導致躍遷訊號降低。在半導體材料系統中，能帶結構的變化可能導致躍遷特性改變，也可能導致光在高溫環境下改變發光特性，如發光強度、波長等。

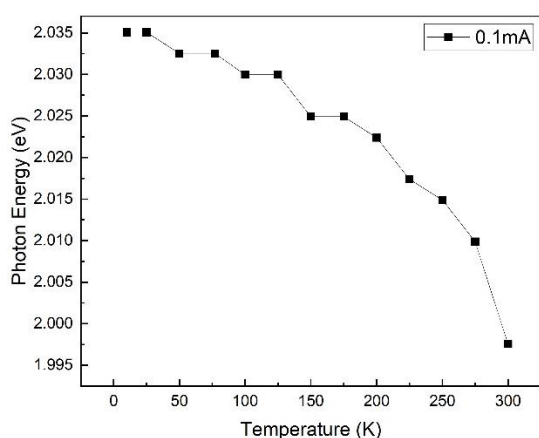


圖 3. AlGaInP 在10 K~300K 變溫下，對應光強度峰值的躍遷訊號變化，其施加偏壓與注入電流為2 V/0.1 mA

4.4溫度對半高寬的變化

圖(4)可以檢視出此材料在變溫實驗下半高寬寬度的改變，在10 K~225 K半高寬呈現每25 K增加0.49 meV的變化，而到275 K~300 K接近室溫時半高寬增加了約3 meV，明顯觀測出AlGaInP隨溫度上升半高寬更寬的情況[19]，在LED顯示技術中，由於LED陣列密度越高時，彼此之間熱輻射的影響會更加嚴重，使LED在長時間運作中，形成熱累積[20]導致溫度上升，同時高溫會對LED的性能和壽命造成負面影響，因此要確保LED的溫度保持在可控制的範圍內，並且透過選擇合適的均熱材料和散熱系統等方式實現。

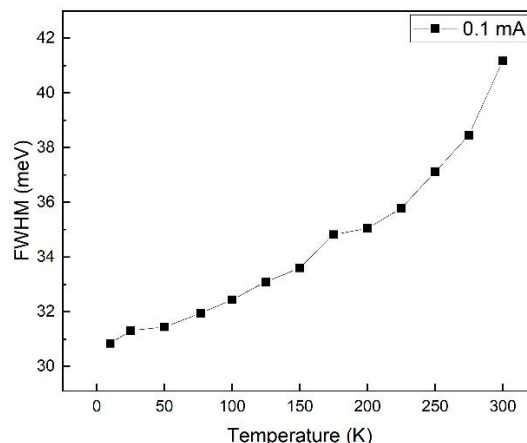


圖 4. AlGaInP 在10 K~300K 變溫下溫度對半高寬的變化，其施加偏壓與注入電流為2 V/0.1 mA

4.5 電流對強度的變化

透過4.1測得的 I-V 特性曲線，觀察到注入電流大小與光強度的相應變化，而圖(5)也顯示出了300 K 下電流對強度的影響，實驗中電流從0.1 mA 逐漸增加至20 mA，當輸入的電流越大，光強度也隨之增加，在導體中電子可以受到足夠能量以躍遷到激發態[21]，當提升輸入電流，更多的電子會達到激發態，透過發射光子回到基態，增加光的強度。

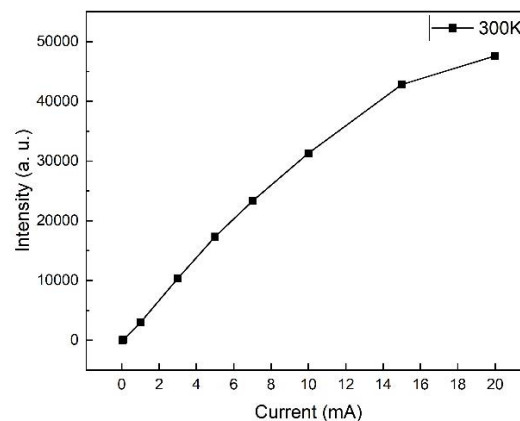


圖 5. AlGaInP 在 300 K 下電流對強度的變化，其施加偏壓為2 V

4.6 不同電流與躍遷訊號的變化

圖(6)為300 K溫度下注入不同電流時的情況。當驅動電流增加時，半導體中的載子(電子和電洞)濃度也相應提升。更高的驅動電流會產生更多的熱激發載子，這使得溫度進一步升高，導致載子之間的交互作用頻繁。熱與能隙之間的熱電效應導致躍遷所需能量減少，然而此情況如圖(4)，得知溫度的提高與半高寬成正比，色純度降低同時如圖(5)光強度增加，光強度卻也隨驅動電流提高有減緩上升的趨

吳柏良 宋柏佑 黃炳誠 陳培鈞 西川和人 黃志豪 王逸平
利用電致發光技術探討磷化鋁鎵銦發光二極體的載子遷移行為並推測其在 Mini/Micro-LED 中可能的熱效應現勢。

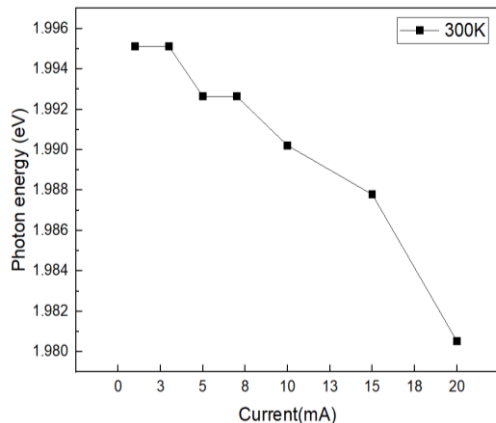


圖 6. AlGaInP 在 300 K 下電流對躍遷訊號的變化，其施加偏壓為 2 V

4.7 電流對半高寬的變化

從圖(7)在持續提高驅動電流下，半高寬和驅動電流的曲線呈線性增加，但並沒有遞增的情況發生。驅動電流的提高導致電子電洞交互頻繁，其複合過程所釋放的部分能量將轉為熱輻射並散失，進一步引起溫度上升，同時可以發現到以半高寬變化呈現的圖(7)與圖(4)，具有相似的變化趨勢。在顯示應用方面，更高的驅動電流使得光強度的相應提升，卻伴隨交互頻繁的複合過程所產生的熱輻射，其溫度的上升導致半高寬相應的增加，進而對顯示面板的色純度表現造成影響。

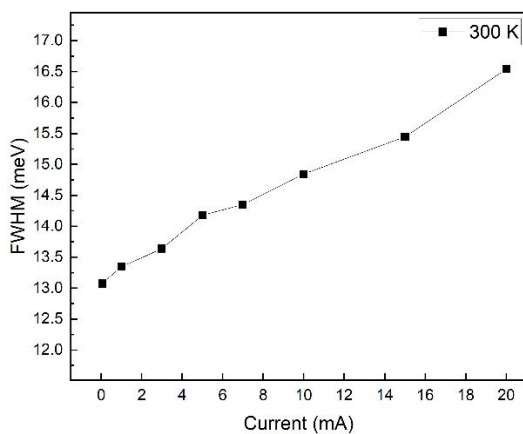


圖 7. AlGaInP 在 300 K 下電流對半高寬的變化，其施加偏壓與注入電流為 2 V/0.1 mA

五、結論與未來展望

為探討 AlGaInP 發光二極體的載子遷移行為，以及推測 Micro-LED 可能的熱效應現象，進行了應用於 Micro-LED 顯示技術中，所使用的紅光材料 AlGaInP。而 AlGaInP 的終端產品之一 Micro-LED 顯

示面板在解析度、亮度、壽命、反應速度及色域等方面優越的表現，被視為未來直顯技術的有力競爭者。但由於 LED 微縮化與小間距排列使熱累積情況加劇，導致發光效率與壽命受到影響並減少，因此針對 AlGaInP 的載子遷移以及熱效應研究，進而推論 AlGaInP 微縮化後可能出現的情況。

本研究利用 AlGaInP 在各種環境溫度和不同輸入電流下的變化，可以發現電流從 15 mA 提升至 20 mA 的過程中數據有明顯的變化，躍遷訊號發生偏移，半高寬發生變寬的現象，隨著溫度從 0 K 到 300 K 時躍遷訊號也逐漸變小，並出現紅移現象及半高寬寬度增加的情形，透過本次的結果，比對過去相關研究，證實了 AlGaInP 在升溫時會發生紅移，躍遷訊號的大小會使光強度及半高寬有所改變。

透過研究觀察到，為了獲得更高的發光強度，可能導致 AlGaInP 材料溫度升高，對發光顏色的純度和材料品質產生嚴重影響。這一點對於 AlGaInP 材料在 Mini/Micro-LED 全彩化的應用至關重要，尤其是在高亮度需求下。

AlGaInP 材料已經在高亮度 LED 領域取得顯著的成就，但仍然有一些挑戰和問題，可著手改善其材料系統，未來可以運用不同摻雜比值的 AlGaInP 來進行熱效應及載子動力的實驗，將溫度及電流的範圍擴大，觀察在兩者條件下發生的光學特性變化。其實驗結果也有助於 Mini/Micro-LED 克服在技術上的種種挑戰。

六、誌謝

感謝本研究得到中華民國國家科學技術委員會資助，計畫編號為 NSTC 112-2222-E-131-002。以及感謝東京大學竹谷純一教授在 LED 自發光應用趨勢的建議與看法。

七、參考文獻

1. Anwar A.R et al (2022), "Recent Progress in Micro-LED-Based Display Technologies." Laser Photonics, Vol.16, No.6, pp.1-20.
2. Li J.J, et al (2018), "Comparison and research progress of flat panel display technology." Chinese Optics, Vol.11, No.5, pp.695-710.
3. Davies J. I. et al (1992), "Visible emitting materials in the AlGaInP system by MOVPE." IEE Co

利用電致發光技術探討磷化鋁鎵銻發光二極體的載子遷移行為並推測其在 Mini/Micro-LED 中可能的熱效應現

- lloquium on III-V Compound Semiconductor Materials Growth, pp.1-4.
4. Gao L. C. et al (2010), "Study of P type doping in AlGaInP cladding layer of High brightness red LED." *Advances in Optoelectronics and Micro/nano-optics*, Guangzhou, China, pp.1-4.
 5. 紀剛 (2001), 「Mg 在 InGaAlP 及 GaP 材料中的摻雜行為」, 中國半導體學報, 第22卷, 第6期, 頁729-732。
 6. Tao X. H. et al (2012), "A New Noncontact Method for the Prediction of Both Internal Thermal Resistance and Junction Temperature of White Light-Emitting Diodes." *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.27, No.4, pp.2184-2192.
 7. Liou B. H. et al (2012), "Improvement of thermal management of high-power GaN-based light-emitting diodes." *Microelectronics Reliability*, Vol.52, No.5, pp.861-865.
 8. Sun Y. K. et al (2021), "2.0 - 2.2 eV AlGaInP solar cells grown by molecular beam epitaxy." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.219, pp.1-6.
 9. Horng R. H. et al (2018), "Fabrication and Study on Red Light Micro-LED Displays" *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, Vol.6, pp.1064-1069.
 10. Park S. I. et al (2009), "Printed Assemblies of Inorganic Light-Emitting Diodes for Deformable and Semitransparent Displays" *Science*, Vol.325, No.5943, pp.977-981.
 11. Choi M. W. et al (2017), "Stretchable Active Matrix Inorganic Light-Emitting Diode Display Enabled Overlay-Aligned Roll-Transfer Printing." *Advanced Functional Materials*, Vol.27, No.11, pp.1-10.
 12. Jonathan J. D. et al (2010), "High-Speed Visible Light Communications Using Individual Pixels in a Micro Light-emitting diode array." *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.22, No.18, pp.1346-1348.
 13. Gou F. W. et al (2019), "Angular color shift of micro-LED displays." *Optics Express*, Vol.27, No.12, pp.A746-A757.
 14. Virey E. H. et al (2018), "Status and Prospects of Micro-LED Displays." *SID Symposium Digest of Technical Papers*, Vol.49, No.1, pp.593-596.
 15. Liu Z. J. et al (2020), "Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology." *Light: Science & Applications*, Vol.9, No.83, pp.1-23.
 16. Xiong J. H. et al (2021), "Augmented reality and virtual reality displays:emerging technologies and future perspectives." *Light: Science & Applications*, Vol.10, No.216, pp.1-30.
 17. Li P. I. et al (2022), "Full-color micro-display by heterogeneous integration of InGaN blue/green dual-wavelength and AlGaInP red LEDs." *Optics Express*, Vol.30, No.13, pp.23499-23510.
 18. Lee J. C. et al (2023), "Temperature and current dependences of electroluminescence from InGaN/GaN multiple quantum wells." *Journal of Crystal Growth*, Vol.310, No.23, pp.5143-5146.
 19. Chen K. et al (2013), "Estimating the average junction temperature of AlGaInP LED arrays by spectral analysis." *Microelectronics Reliability*, Vol.53, No.5, pp.701-705.
 20. Huang C. F. et al (2014), "Research on efficiency droop mechanism and improvement in AlGaInP Ultra-High-Brightness LEDs using the transient measurement method." *Solid-State Electronics*, Vol.93, pp.15-20.
 21. Lin S. Y. et al (2006), "Synthesis and Photophysical Properties of Phosphorescent Osmium (II) Complexes" *Master's Thesis Institute of Applied Chemistry National Chiao Tung University*, pp.5.