

固態照明技術發展

文・圖／楊志忠、李君浩、黃建璋、吳育任

一般簡稱的LED包括兩種類似功能但使用不同材料的發光器件；一為使用半導體材料的發光二極體（light-emitting diode），另一為使用有機高分子材料的發光元件（light-emitting device）。比起傳統發光源，這兩種器件因發光效率高、燈具設計變化大，將逐漸取代傳統光源，形成「固態照明」的發展趨勢，尤其以半導體材料製作的LED，因材料特性穩定、器件壽命長，將成為下一代人類照明及液晶顯示背光源之主流產品；至於以有機高分子材料製作的LED，目前雖材料壽命較短，但其平面發光特性可增加許多照明設計上的變化，也占有一定應用比例。LED相當省電，於節能減碳的社會需求中，更顯得重要。本校電資學院光電所內有多位教師從事相關研究，成果卓著。

發光器件技術發展最重要的工作是提升發光效率與降低製作成本。為此，研發工作可大致分為材料之製備、元件設計與製作、器件封裝等三方面。茲擇要敘述如下：

一、氮化鎵奈米柱生長及接合再生長技術（楊志忠教授）^[1,2]

在生長氮化鎵發光二極體結構時，考量製作成本及技術成熟度，目前最普遍使用的長晶基板為藍寶石。然因藍寶石基板與氮化鎵之晶格尺寸差距頗大，在藍寶石基板上生長氮化鎵時，為釋放應力，氮化鎵內會產生線性差排，這些線性差排可以由底部延伸至晶片表面，密度可高達每平方厘米100億條，係發光二極體效率不夠高之主要缺陷來源；為了降低線性差排之密度，遂發展氮化鎵奈米柱生長及接合再生長技術來製作發光二極體。

為了生長規則排列之奈米柱，我們先利用奈米壓印技術，製作數百奈米大小之孔洞模板，利用特別生長法，以此種模板生長氮化鎵即可得到如圖1(a)至1(c)所示之整齊奈米柱（掃描電子顯微

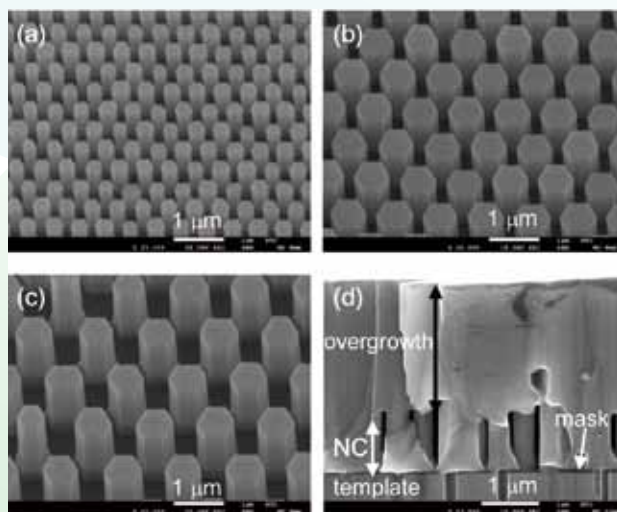


圖1 (a)-(c)：各種不同截面大小之氮化鎵奈米柱。(d)：接合再生長後之側面圖。

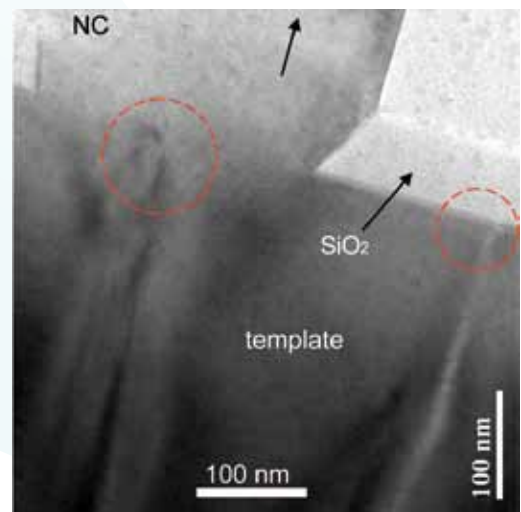


圖2：一根奈米柱之底部側面電子掃描圖，紅色圈部分顯示線性差排之盡頭或轉彎位置。

圖），然後再往上進行接合再生長，接合後的氮化鎵層之線性差排密度可降低100倍以上，低至每平方厘米約一千萬條，大幅提升氮化鎵晶體之品質。圖1(d)展示接合再生長後側向掃描電子顯微圖。

生長奈米柱來降低線性差排密度之原理可由圖2來瞭解，此圖展示一根奈米柱從二氧化矽遮罩孔洞長出來之基部電子掃描結構。我們可以看到左邊有一條線性差排往上延伸，可是到了孔洞附近，突然返轉向下，無法進入上方之奈米柱。這種現象肇因於在洞口處形成壓縮性應力分布，當線性差排延伸接近洞口時，即受到應力影響而轉彎，無法往上進入奈米柱內，因此，只要洞口夠小，由其上長出的氮化鎵奈米柱內幾乎都不存在線性差排，然後進行接合再生長成連續層時，雖有些新線性差排產生，但整體密度明顯下降。我們用此種接合再生長氮化鎵層樣板上生長藍光發光二極體，所製作的發光二極體發光強度比使用傳統技術者高出一倍。

二、免用螢光粉之白光發光二極體（楊志忠教授）^[3,4]

目前製作白光發光二極體之方法，係於藍光發光二極體上鋪黃光螢光粉來轉換部分藍光成黃光，以混合成白光。為了提升效率並簡化製程，利用發光二極體基本材料結構（氮化鎵鎵/氮化鎵量子井）發光波段可涵蓋紅綠光之特性，製作全半導體免用螢光粉之白光發光二極體亦是值得發展的方向。為了有效率的產生紅綠光，氮化鎵鎵之鎵成份必須提高；一般長晶時，為了提高鎵成份，生長氮化鎵鎵時，溫度必須下降，但較低溫度生長之氮化鎵鎵晶體品質不好，形成兩難。

針對此問題，我們發展出一個預施應力之生長方法。理論上，因底層之氮化鎵原子晶格較小，於其上生長原子晶格較大之氮化鎵鎵時，鎵原子不容易附著，這種現象在較高溫生長的條件下尤其明顯，若在生長發光用之氮化鎵鎵/氮化鎵量子井前先生長一層低鎵成份之氮化鎵鎵，以此層來對其上之氮化鎵鎵層產生擴張性應力，在此情況下，往上生長發光用之氮化鎵鎵量子井層時，鎵原子就可以較容易附著，達成較高鎵成份之目標，即便在長晶溫度較高的情況下，所生長之氮化鎵鎵層之鎵成份都可增大。

我們利用這種長晶技術製作效率尚高之橙紅光發光二極體，也生長效率相當高之黃光量子井層。將三層黃光之發光量子井和一層之藍光量子井長在同一晶片上，製作發光二極體，結果可呈現效率相當高之白光。圖3顯示在不同注入電流下，此白光發光二極體之頻譜圖，我們可以看到藍光與黃光兩個頻譜峰。圖4顯示該元件之電流與電壓關係，其電阻值比一般發光二極體稍大，但這

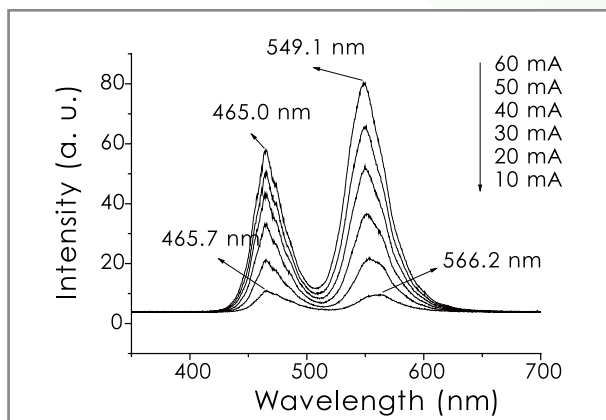


圖3：白光發光二極體在不同注入電流下之發光頻譜。

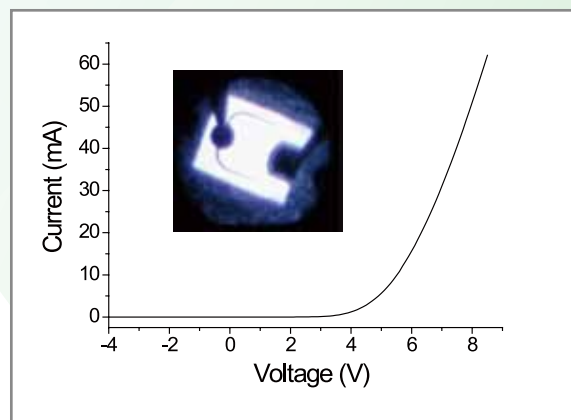


圖4：白光發光二極體之電流隨電壓變化曲線，插圖為點亮後發光二極體之照片。

可以經改善而降低；且圖4內之插圖顯示該元件點亮後之照片，展示了品質相當高之白光，在50毫安培之注入電流下，色溫可達5,600K，相當接近正午太陽光之色溫，同時色座標也相當接近白光之理想值，即為（0.33, 0.33）。

三、利用奈米結構提升半導體LED效率（黃建璋教授）^[5,6]

過去幾年，我們提出一製作GaN的發光二極體奈米柱結構方法，藉由鋪排單層的奈米球於半導體表面上，以及自然曝光顯影術定義奈米柱陣列，能在2吋的晶圓上讓奈米柱非常整齊均勻地合成。此一技術突破了過去製作均勻奈米柱需要以電子束微影術來定義長晶或蝕刻pattern之限制，而能以非常簡單且廉價的方式達到奈米柱陣列的製作，這使得奈米半導體技術向前跨出一大步。以下簡介如何以自然曝光顯影術提升半導體LED效率：

此一製程方式名為「奈米球微影」(nano-sphere lithography, NSL)技術，用來製作奈米級結構以改善氮化鎵發光二極體之光學輸出和指向性。透過調整奈米球溶液的濃度，進而改變奈米柱側壁反射層之填滿係數(Fill Factor)，控制電激放光之光輸出功率和發光二極體之發光場型(radiation profile)，達到較高的光收集效率及較佳的指向性；結果顯示在垂直元件表面方向上有較高的光輸出功率，發光場型也較為集中，表示製作於發光區域周圍的奈米柱側壁反射層能有效地提升指向性並改變發光場型的能力。同時我們也將元件的發光場型轉化為角度相關的頻譜(angular spectrum)以顯示在不同的歸一化頻率(normalized frequency)和衍射角度下之光學特性；結果顯示奈米柱側壁反射層結構展示局部性的週期性結構特性，因此我們可以將之視為局部性的光子晶體(photonic crystal)結構。較高的光萃取效率以及指向性也可以利用光子晶體的理論，例如耦合、衍射等效應予以解釋(圖5)。

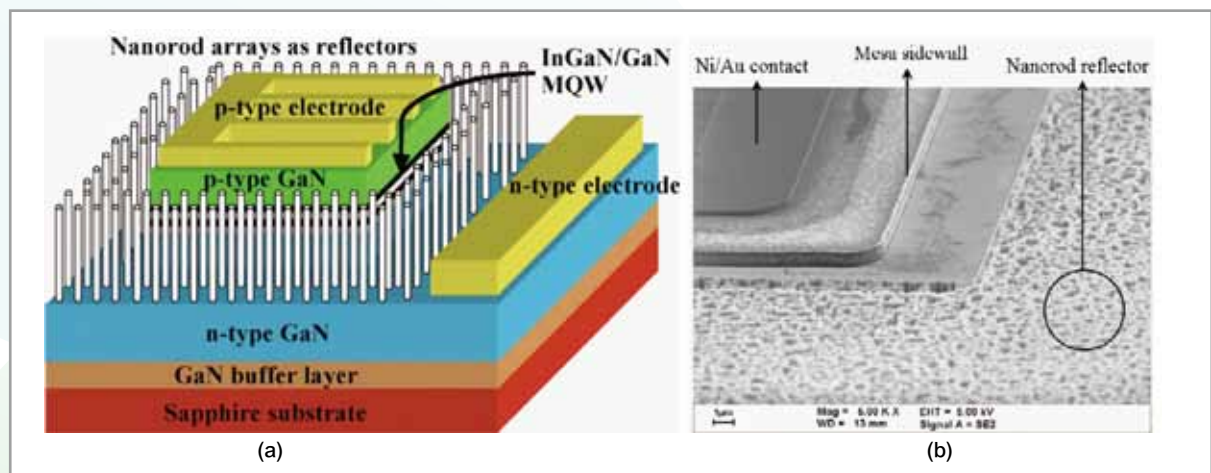


圖5：(a)具有奈米柱側壁反射層結構於發光區域周圍之發光二極體元件示意圖。(b)元件之掃描式電子顯微鏡（SEM）圖片，顯示發光區域與奈米柱側壁反射層結構之相對位置。

四、半導體LED特性模擬與設計（吳育任教授）^[7.8]

發光二極體元件的結構設計，一直是改善元件效率的研究重點，從元件的熱效應、電極結構設計和電流散布、電子電洞對在量子井內部擴散和散射、複合發光和非複合發光機制的相互競爭、

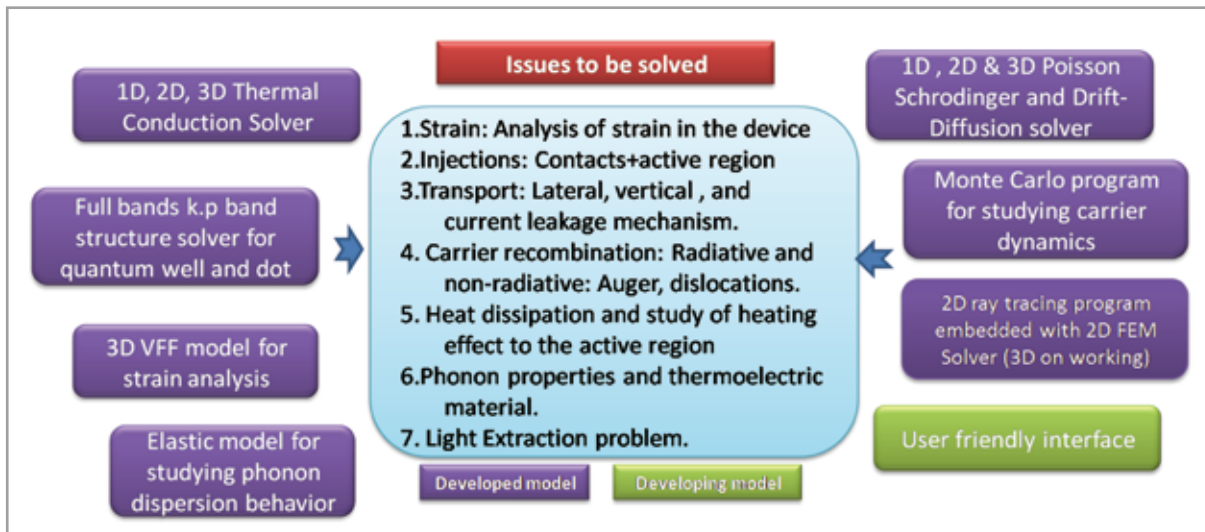


圖6：目前光電半導體元件分析實驗室所發展之分析軟體。

高功率下的效率衰減效應和到發光後的光取出效率等等問題，一直是發光二極體的研究重點，而模擬設計分析更是尋找這些問題相當重要的手段。吳育任教授實驗室有別於一般使用商用軟體，長期專注在發展光電元件分析軟體的研發和撰寫，這幾年來已發展出不少有用的分析工具，並開始和其他實驗室與業界合作，針對不同的LED元件結構設計進行分析，成果豐碩並得到軟體驗證校正的機會：

1. 在LED元件內部，電流的散布、電荷的累積、電極形狀的設計、壓電效應、元件內部應力釋放、能帶的變化加上散熱問題，一直是研究LED元件重要的課題，為此，我們發展了多維度的分析軟體，如圖6所示，從1D到3D利用有限元素法來解不同尺度的問題，並可同時解Poisson方程式、K.p薛丁格方程式、Drift-Diffusion方程式、應立方程式和熱導等方程式。如此，我們可同時針對不同尺度幾何結構的問題，分析元件內部電流的擴散分布、能帶變化、熱效應、量子侷限效應的影響（圖7）。
2. 微觀模擬計算載子在主動層的動態行為：使用Monte Carlo統計模擬的方式模擬電子電洞在元件內部自由傳播的行為，讓虛擬載子在元件內部運動，來統計載子受到不同的缺陷、銕叢集、界面不平整所造成的傳播、散射、複合發光和非複合發光的現象，以進一步評估內部量子效應；這方法能從微觀的角度來觀察載子行為，比一般單純用軟體解巨觀的行為更能夠觀察到更細的現象。
3. 蒙地卡羅法（Monte Carlo）分析光子的傳播行為：利用Monte Carlo的方式來分析光子在不同介面的折射、反射和吸收的行為，可以正確的評估光取出的效率、表面粗糙化和微結構對出光的影響。

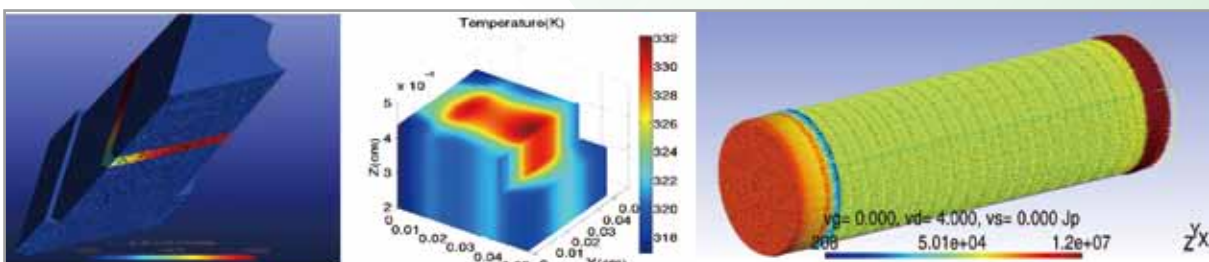


圖7：利用三維分析軟體來分別分析光複合區域、元件溫度分析、和奈米柱元件內部電流分析。

目前實驗室的分析軟體皆已經發展測試完成，同時這些軟體以套件的方式提供許多合作的實驗室使用、驗證和修改，亦同時累積不少研究成果陸續發表，期待以後能有機會以我們的分析軟體服務更多研究人員。

五、有機高分子LED（李君浩教授）^[9,10]

有機高分子LED因具備廣視角、低耗電、自發光、可撓性、放光頻譜寬廣及製造流程短等優點，並可製作於可撓式基板上及適用大尺寸製程，因此就技術層面而言，有機高分子LED為最具競爭優勢的固態照明技術之一。該類元件係製作於玻璃基版上使用透明之氧化銦錫電極，於陽極上製作約數十至百奈米之單層或多層有機薄膜，最後製作具高反射率之金屬陰極。元件驅動時，由電極施加電壓，當電流通過有機發光層時，電子電洞對復合而放光。其發光原理與半導體LED類似，但是所用之材料並非半導體，而為具備一定導電度之有機材料薄膜。有機分子間多以非晶形式堆疊，因此對於基版沒有選擇性，而可以製作於任意的基版上。相較於半導體材料，有機材料之導電度甚低，因此驅動電壓較高。

要組合成一個白光，基本上需要兩種色光：藍光及黃光，但是這樣組合出來的白光演色性不佳，作為照明時會使物件顯色失真。為了提升演色性，需要三色（紅、綠、藍）或更多色（紅、黃、綠、藍）光源。在有機高分子LED中，發光層係由主體材料與發光體材料所組成，欲產生具備高演色性之白光有機發光二極體，需要至少三種之發光體及一主體材料於發光層中，使得在材料選擇上的複雜度增加。然而，並非所有的發光體可以摻雜於同一主體材料中，因此，有可能會使用到二到三個主體材料，複雜度更高。另外，為了達到高效率、高演色性及延長壽命，元件設計也扮演重要的角色，如主體材料及摻雜物的組合、摻雜物的濃度、阻擋層的插入，都會對元件結構造成極大之影響。

圖8為實驗室製作之白光元件隨著驅動電壓變化之頻譜。在此元件中，我們使用三個發光體材料及一個主體材料構成發光層。紅綠藍發光體及主體材料分別為：tris(2-phenyl-1-quinoline)iridium(III) Ir(phq)₃、tris(phenylpyridine)iridium (Ir(ppy)₃)、iridium(III)bis[(4,6-difluorophenyl)-pyridinato-*N,C*²]picolate (FIrpic) 及N,N'-dicarbazolyl-3,5-benzene (mCP)。其中，綠色及紅色發光體材料係摻雜於同一區，而藍光發光體摻雜於另一區，其間以一個阻隔層隔絕，以提升頻譜之穩定。一般而言，有機高分子LED係製作於玻璃基版上，光透過平面之玻璃基版發出。然而，當光由光密介質（玻璃基版）進入光疏介質（空氣）時，會發生全反射，使得部分的光被侷限於玻璃基版中。因此可以用一些非平面結構，導引玻璃基版內部的光，貢獻到外部出光。圖9為

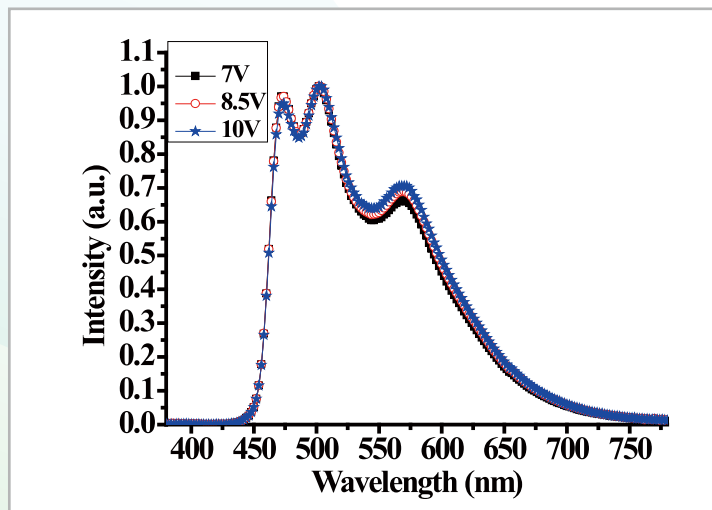


圖8：不同驅動電壓下之白光有機高分子LED之發光頻譜。



0°

30°

圖9：不同視角下貼附微透鏡陣列膜之白光有機高分子LED。

實驗室所製作之白光元件，於其上貼附微透鏡陣列膜（鋪設於發光區的右上方），這些微透鏡可大幅增進出光。在不同的視角（0度及30度）觀察，都有明顯的促進效果。

結語

臺大在LED相關研究已達世界水準，部分甚至領先全球，而固態照明在全球溫室效應與石化能源逐漸枯竭的威脅下，顯得格外重要。我們將繼續努力，不僅為地球環保貢獻力量，也為我國綠色產業發展提供支援。

（本專題策畫／材料系莊東漢教授&電機系林茂昭教授&植微系林長平教授）

參考文獻：

- [1] T. Y. Tang, W. Y. Shiao, C. H. Lin, K. C. Shen, J. J. Huang, S. Y. Ting, T. C. Liu, C. C. Yang, C. L. Yao, J. H. Yeh, T. C. Hsu, W. C. Chen, and L. C. Chen, "Coalescence Overgrowth of GaN nanocolumns on sapphire with patterned metalorganic vapor phase epitaxy," *J. Applied Physics*, Vol. 105, p. 023501, 2009.
- [2] Y. S. Chen, W. Y. Shiao, T. Y. Tang, W. M. Chang, C. H. Liao, C. H. Lin, K. C. Shen, C. C. Yang, M. C. Hsu, J. H. Yeh, and T. C. Hsu, "Threading dislocation evolution in patterned GaN nanocolumn growth and coalescence overgrowth," *J. Applied Physics*, Vol. 106, p. 023521, 2009.
- [3] C. F. Huang, T. Y. Tang, J. J. Huang, and C. C. Yang, "Phosphor-free white-light light-emitting diode of weakly carrier-density-dependent spectrum with prestrained growth of InGaN/GaN quantum wells," *Applied Physics Letters*, Vol. 90, p. 151122, 2007.
- [4] C. F. Lu, C. F. Huang, Y. S. Chen, W. Y. Shiao, C. Y. Chen, Y. C. Lu, and C. C. Yang, "Phosphor-free monolithic white-light LED," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 15, pp. 1210~1217, 2009. (invited)
- [5] L. Y. Chen, Y. Y. Huang, C. H. Chang, Y. H. Sun, Y. W. Cheng, M. Y. Ke, C. P. Chen, and J. J. Huang, "High performance InGaN/GaN nanorod light emitting diode arrays fabricated by nanosphere lithography and chemical mechanical polishing processes," *Optics Express*, Vol. 18, pp. 7664-7669, 2010.
- [6] Y. W. Cheng, K. M. Pan, C. Y. Wang, H. H. Chen, M. Y. Ke, C. P. Chen, M. Y. Hsieh, H. M. Wu, L. H. Peng, and J. J. Huang, "Enhanced light collection of GaN light emitting devices by redirecting the lateral emission using nanorod reflectors," *Nanotechnology*, Vol. 20, p. 035202, Jan. 2009.
- [7] P. Y. Dang and Y. R. Wu, "Optical polarization anisotropy of tensile strained InGaN/AlInN quantum wells for TM mode lasers," *J. Applied Physics*, Vol. 108, p. 083108, 2010.
- [8] H. H. Huang and Y. R. Wu, "Light emission polarization properties of semipolar InGaN/GaN quantum well," *J. Applied Physics*, Vol. 107, p. 053112, 2010.
- [9] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes," *Applied Physics Letters*, Vol. 51, p. 913, 1987.
- [10] C. H. Hsiao, S. W. Liu, C. T. Chen, and J. H. Lee, "Emitting layer thickness dependence of color stability in phosphorescent organic light-emitting devices," *Organic Electronics*, Vol. 11, p. 1500, 2010.

楊志忠小檔案

1976年畢業於臺大電機系，1984年獲美國伊利諾大學香檳分校電機博士。1984至1993年任教於美國賓州州立大學電機系，1990年升為副教授並獲永久聘書。1993年回國任教於臺大光電工程研究所及電機系，並於2001-2007年擔任光電所所長。楊教授研究領域包括有機金屬氮相沉積、分子束磊晶、發光二極體和太陽能電池設計及製作、表面電漿子、生物醫學光電等。已發表超過250篇期刊論文以及500篇國際研討會文章，包括70次以上於國際研討會上之邀請演講。為美國光學學會之Fellow。



李君浩小檔案

李君浩副教授分別於1994年及2000年畢業於臺大電機系及電機所，2000至2003年進入銓寶科技服務，2003年回臺大任教迄今。主要研究課題為顯示照明技術，尤其專注於有機電激發光元件。其他還包括：提升有機電激發光元件之壽命及效率、探討有機電激發光元件之光電特性、有機電激發光元件設計及製作、提升顯示元件之對比度、及照明用白光有機電機發光元件等。近年方向為：（1）製作高效率及長壽命之有機電激發光元件，應用於顯示技術及光源；（2）垂直式整合反射式液晶顯示器及有機電激發光元件，製作全環境下之高對比度顯示元件；（3）發展有機電子及光電元件，應用於能源科技及射頻識別；（4）整合式微小化有機及無機混成元件，用於生物晶片之感測。



黃建璋小檔案

分別於1994年與1996年畢業於臺大電機系和光電所，2002年取得美國伊利諾大學香檳校區電機博士學位。2002到2004年間在加州WJ communications擔任staff scientist，工作內容包括通信用高速電子電路元件製作及特性。2004年回臺在奇景光電工作，不久回到臺大電機系及光電所任教。目前研究著重於固態照明及太陽能電池的相關元件製作與分析，其實驗室大量運用奈米結構增進LED的發光效率及製作奈米柱LED，另外，也進行氧化鋅薄膜電晶體的製作，近期專注於將氧化鋅奈米光源運用於生醫光電研究。黃教授是中華民國裴陶榮譽學會的會員，於2008年獲國科會吳大猷獎及優秀青年電機工程師獎。



吳育任小檔案

1998年畢業於臺大物理系，2000年自臺大電信所電波組畢業，2006年取得取得美國密西根大學博士學位，2007年回國擔任臺大光電工程研究所助理教授。其研究的領域為奈米光電元件之分析設計，發光二極體和太陽能電池之研究，高功率微波及奈米線電晶體之設計，以及熱電性材料之應用設計。著重在元件物理之研究，並發展各種適當之數值分析軟體對光電子元件之特性進行分析。