

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告  
以奈米壓印設計製作具光子晶體之高效能暨  
高指向性的發光二極體

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫  
計畫編號：NSC 97-2221-E-009-057-MY3  
執行期間：99年08月01日至 100年07月31日

執行單位：國立交通大學 電機與控制工程學系

計畫主持人：趙昌博 國立交通大學 電機與控制工程學系  
計畫參與人員：高永原 博士生 國立交通大學 電機與控制工程學系  
鄭濬煒 碩士生 國立交通大學 電機與控制工程學系

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

中 華 民 國 100 年 10 月 31 日

## 中文摘要

本計畫目標在於經由光子晶體(PCs)及側壁反射結構(Sidewall Reflectors)來增加有機多分子發光二極體(PLEDs)的取光效率。光子晶體及側壁反射結構兩者皆能將光波導向至有用方向及減少光反射所造成的耗損。光子晶體這種週期性的結構中，基本上是在二維或三維空間中，讓材料折射率(或介電常數)產生週期性變化的結構，這種結構模仿原子在固態晶體中的排列。所以，類似電子於固態晶體中的能帶結構，在光子晶體中就產生光子的能帶結構。為了精準地計算取光效率，我們利用 3D FDTD 方法及基因演算法來達成最佳化，根據有限時域差分法模擬軟體 FDTD Solution 之計算結果，不同角度之 sidewall reflectors 能增加 PLEDs 的取光效率。最後我們找到在側壁之角度為  $35^\circ$  的情況下，取光效率能增加最多。基於不同角度之 sidewall reflectors 搭配光子晶體結構，並藉由基因演算法來尋找最佳之晶格常數(Pitch)與半徑。而根據基因演算法之結果，我們的光子晶體其晶格常數為 PLED 光波長之 0.475 倍、半徑為晶格常數之 0.25 倍。最後，透過 FDTD 之精準計算，說明 PLED 具光子晶體及 sidewall reflectors 之取光效率從 20%增加至 26%。

關鍵字：多分子發光二極體、光子晶體、側壁結構、有限時域差分法

## Abstract

This research aims to achieve large extraction of light emission from polymer light emitting diodes (PLEDs) via optimizing photonic crystals (PCs) and sidewall angle reflectors. Both PCs and sidewall reflectors can be resulting in increasing light emission in useful directions and reducing reflection loss. The optimization is achieved through the optical modeling using a 3D finite-difference time-domain (FDTD) method and the intelligent numerical optimization technique, genetic algorithm (GA). The optimal design of PCs and sidewall angle reflectors are presented in details. To accurately predict light extraction of the PLED, the numerical simulation tool, the FDTD method is employed. Based on the FDTD simulation, the optimal sidewall angle which can increase maximum light extraction efficiency (LEE) in our designed PLED structure is  $35^\circ$ . With the optical modeling of optimal sidewall angle reflectors via FDTD completed and the next step is using GA optimization to seek optimal pitch and radius of photonic crystals. According to the GA optimal result, the ratio of pitch to wavelength is 0.475 times and the ratio of radius to pitch is 0.25 times. GA is a powerful tool to cope with a complicated optimization problem with multiple variables to optimize. The PLEDs with optimized PCs and angle of sidewall reflectors would increase extraction of light emission from 20% to 26% and the 3D FDTD calculation was conducted to explain this result.

**Keywords:** Polymer light emitting diode, photonic crystals, sidewall, finite-difference time-domain.

## 目錄

中文摘要 .....	I
Abstract .....	II
目錄 .....	III
一、前言 .....	1
二、研究目的.....	2
三、文獻探討.....	3
四、研究方法.....	4
4.1 PLED 之結構與取光效率定義.....	4
4.2 有限時域差分法.....	4
4.3 基因演算法之最佳化.....	5
4.4 製成 .....	6
五、結果與討論.....	7
六、參考文獻.....	8
七、圖.....	11
八、成果自評.....	20
附件一.....	21

## 一、前言

隨著網路與無線通訊技術的急遽發展，資訊化漸漸普及於個人。因此可攜式資訊產品如筆記型電腦、行動電話、數位相機等均快速發展與成長，而這些產品都均需仰賴液晶顯示器(Liquid Crystal Display, LCD)作為其顯示之重要裝置。為了提高這些可攜式產品的使用效能，如更長的使用時間、更便利於攜帶以及更好的表現能力，以符合消費者需求。除此之外，降低製造成本的考量亦為重要目標之一，故改良傳統背光模組之光學元件與光學效能是有需要的。一般顯示器由顯示器面板(LCD Plane)、偏光板(Polarizer)與背光模組(Backlight)所組成。而傳統顯示器之背光模組(如圖一)是由發光二極體 (LEDs)、導光板(Light Guide)、擴散板(Diffuser)及兩層稜鏡片(Prism Sheet)所組成，其中光源佔了影響顯示器品質好壞的最大因素，因而造就發光二極體(Light Emitting Diode;LED)的發展一日千里。因為發光二極體具有多項優點，例如體積小、壽命長、反應速度快、指向性高等等，其中白光二極體的應用更是代替日常生活的照明設備及顯示器的背光元件，它的商機無限，目前全球 LED 業者都視發光二極體為研發重點，更加上顯示器背光模組元件最需要的是亮度，這是所有發光二極體研究的一個重點，綜合以上所述，這些跡象都直接指出當發光材料選定後，LED 的光取出效率問題就變成最重要的討論重點。在增加 LED 發光效率方面，提出光子晶體(光子能隙結構晶體)的概念，在 1987 年首先由 Yablonovitch 及 John [1,2] 分別被提出之後，隨著實驗技術進步與精密儀器不斷提升，以及各種製作相關結構的製程技術發展不斷進步，光子晶體的實驗成果也更趨完整，光子晶體才受到注目。在 LED 表面上製作光子晶體結構，可以減少內部反射及向外散射的光，藉由改變不同材料間的折射率對比、晶格週期的比例和孔洞大小，改變光子能帶結構，尤其是光子能隙(Photonic Band Gap/PBG)的位置及大小。傳統實現方法是採用電子束微影術，搭配乾蝕刻方法，將發光頻段完全落在光能隙之中，使光場垂直地被耦合出去，但是高能電子或分子束，會在光子晶體層的表面造成懸鍵(Dangling Bonds)，惡化有效的電子電洞對輻射結合，光子取出效益會隨之下降，且成本高昂，因此採用奈米壓印技術製作光子晶體結構。此技術是 Y. Chou 博士於 1995 年在美國明尼蘇達大學奈米結構實驗室所開發[3,4]，是一種全新的奈米圖形複製技術，之所以能成為極受重視的研究領域，主要在於它製程簡易，同時具備高解析能力與高產出效率，而且所使用的模仁(Mold)重複使用性高，可大幅度降低製作奈米級微機電或微光電元件的成本，增加生產速度，以符合 LED 供應在各種產品上的需求。

## 二、研究目的

顯示器背光模組設計與實現之重要性能指標為光使用效率(Light Extraction Efficiency)、均勻度(Uniformity)、輝度(Luminance)與色彩飽和度(Color Saturation)。為了提高這些光學效能，傳統背光模組之架構設計(如圖 1)包含導光板(LGP, Light Guide Plate)、稜鏡片(Prism Sheet)或 BEF(Brightness Enhancement Film)、擴散板(Diffuser)與反光板(Reflector)，自從發光二極體(LED)取代冷陰極管(CCFL)為下世代顯示器光源後，顯示器的發展邁向了一個新的里程碑。目前，發光二極體所遭遇到的問題，主要集中在電光轉換之效率不盡理想，故許多在世界上研究團隊都致力於解決這一個問題。在一般的發光二極體中，發光效率主要分為兩個部份，一部分為其內部電能轉換成光能之效率，即為所謂的內部量子效率(internal quantum efficiency)，其物理定義為單位體積單位時間 LED 在順偏壓下可產生的載子數；另一部份為 LED 內部轉換成的光子最後能脫離總體之效率，即外部量子效率(external quantum efficiency)，其物理定義為單位體積單位時間 LED 在順偏壓下產生的載子最後可向外界發出的光子數。為了提昇上述之電光轉換之效率，本計畫將在提升「內部量子效率(internal quantum efficiency)」的重點放在就在 p-n 接面(p-n junction)上，p-n 接面是 LED 主要的發光發熱位置，因此在本計畫中採用設計 p-n 接面上不同構量之量子井(Quantum Well; QW)的結構設計改變將近一步提升轉化效率；至於提升外部量子效率的重點就是在降低遮蔽、增加光透率或是強化光折射、反射的利用率，在這一部份本計畫將分為兩個方向進行，其一為將基板材料採用藍寶石(Sapphire, 三氧化二鋁)來增加反射，同時將基板表面設計成不同凹凸紋狀，藉此增加光反射後的散射角度，其二為利用光子晶體置於元件表面或置於材料折射率變化較大的層與層間，則有達到破壞全反射的功能，藉由設計孔紋造成不同週期之光子晶體，提升出光錐(extraction cone)，及光之光束模態(beam shaping)、場分佈(field profile)及光束指向性(directionality)等等設計效果。在製作奈米晶體部份，如何簡化製作流程、提高其生產效率，進而達到降低生產成本的目標也是本計畫著重的目的。本計畫採用奈米壓印技術(nanoimprint lithography)，此技術具有成本低、製程簡單、產量高的優勢。最重要的是，利用奈米壓印可以不受光源波長的限制，可以製作出解析度小於 100nm 以下的特徵圖案，這一點可以符合光子晶體對於尺寸的要求。

### 三、文獻探討

本計畫目標在於經由光子晶體及側壁反射結構來增加多分子發光二極體之取光效率，多分子發光二極體的優點在於低驅動電壓、高響應時間、高發光性、寬廣的可視角及低成本，所以在在大面積可撓式顯示器及照明燈扮演了非常重要的角色[5-8]。PLED 為有機與非有機材料所組成之電子元件，其組成之材料如有機發光層、有機電動注射層、金屬電極及透明氧化電極。但是 PLED 目前的發展，其全面效率尚未達到工業界之標準需求，所需要提升之性能在於 PLED 之功能性、操作機構及有機與非有機之製程方法。綜合以上所述，如果 PLED 要廣泛地應用在商品化，那提升其發光效率將會是一個重要的議題，若要應用在多樣化的顯示器上，低功率消耗及長生命周期也會是重要的考量。

近年來，一些提升取光效率的方法依序被提出來，如光子晶體及側壁反射結構等。Kim 等人[9]設計了一先進式平頂缺陷結構(mesa-hole)之 LED，其光輸出功率比市售的 LED 增加了 18%。Hui 等人[10]提出了利用雷射細微加工在 GaN-LED 晶片上製作傾斜式側壁結構，並在上面加了一層高反射性銀薄膜。Hung-Pin Shiao 等人[11]提出在 GaN-LED 底部增加一側壁結構及增加其表面粗糙度來提升取光效率。D. S. Kuo 等人[12]利用一個簡單的雷射刻劃方法在 GaN-LED 藍寶石基板上製作傾斜式側壁與光導結構來增加取光效率，他們發現光導結構能有效地增加垂直方向的光強度。Hyunsoo Kim 等人[13]利用總指向性(omni-directional)之側壁反射結構(sidewall reflectors)來增加 GaN-LED 的光輸出能量。Joonhee Lee 等人[14]提出具有二維光子晶體結構與角側壁結構之 GaN-LED，其能將光子導向至表面來提升效率。C. C. Yang 等人[15]利用不規則形狀的倒金字塔之側壁結構來提升 GaN-LED 的取光效率。另外，也有其他文獻利用環狀齒輪式側壁結構[16]與多邊形結構[17]來提升 LED 之取光效率。在上述文獻中，利用光子晶體結構來提升取光效率的優勢在於如果設計得當，能有效增加出光效率及減少光反射造成地損失。一般而言，光子晶體之參數在於設計中心距離與半徑，兩者之間與光波長有相互關係。文獻中[8,18]提及，一般光子晶體之 pitch 為光波長的 0.5 倍，而光子晶體的半徑為 pitch 的 0.25 或 0.3 倍。利用光子晶體提升發光二極體之發光效率，一直都是光子晶體團隊研究的目標。1999 年 M.Boroditsky 等人以光激發光的方式，成功地利用二維光子晶體增加發光二極體之發光效率[19]。2001 年 H. Y. Ryu 與 Y. H. Lee 等人發表了利用光子晶體提升砷化銦鎵量子點的發光效率[20]。同年 Alexei A. Erchak 等人加入光子晶體之結構後量測正面發光效率有提升效果 [21]。T. N. Oder 等人也在 2003 與 2004 分別量測與製作出氮化鎵系列的光子晶體發光二極體[22,23]。另外，也有利用不同技術製作出二維光子晶體於元件上[24,25]。

## 四、研究方法

### 4.1 PLED 之結構與取光效率定義

根據 Hyunsoo Kim[13],他們利用側壁反射結構來提升 GaN-LED 之光出效率,與一般市售 LED 能增加 18%。而 Joonhee Lee[14]除了在 GaN-LED 製作角側壁結構外,還在 GaN 表面加上二維光子晶體結構來提升效率。因此,我們的研究上將其專注應用在 PLED 上。我們設計的 PLED 也具有光子晶體與側壁反射結構,如圖 2a 所示,為一由玻璃基板、銦錫氧化物(ITO)電極層、有機注射層及金屬電極層所組成之多層結構, $\theta$  為其 sidewall 之角度。

而 PLED 之總外部發光效率  $\eta_{ex}$  通常定義為內部量子效率  $\eta_{in}$  與取光效率  $\eta_{ext}$  兩者之乘積[5],如方程式(1):

$$\eta_{ex} = \eta_{in} \eta_{ext} \quad (1)$$

由於光在 PLED 結構內反射及波導影響下,只有少數的光子能脫離內部結構而到達外部。事實上,我們 PLED 的取光效率只有 20%。值得注意的是內部量子效率  $\eta_{in}$  主要由多分子材料的物理特性以及結構上邊緣造成光反射與吸收來決定其能量(如圖 1a),所以光子晶體的設計對於  $\eta_{in}$  是沒有影響的。因此光子晶體最直接影響的是取光效率  $\eta_{ext}$ ,適當地設計光子晶體之參數能有效的增加取光效率  $\eta_{ext}$ ,而  $\eta_{ext}$  能透過 FDTD 的技巧來計算,並搭配基因演算法來找出光子晶體之最佳化參數。再來取光效率的定義[6]如方程式(2)所示:

$$\eta_{ext} = \eta_{slab} + \eta_{vertical} \quad (2)$$

$\eta_{slab}$  和  $\eta_{vertical}$  分別為偵測平板模式與垂直模式的光效率(如圖 2b),而我們是針對  $\eta_{vertical}$  之光效率透過基因演算法來作最佳化。

### 4.2 有限時域差分法

為了精準地預測 PLED 之取光效率,我們將利用有限時域差方法[26-29]來作計算。Kane S. Yee 和 Jei S. Chen[30]說明 FDTD 方法是用來求解馬克斯威爾方程式(Maxwell's equations),在時域方面,針對計算電磁場分布是非常有用的方法。方程式(3)為差分化之 Maxwell's equations:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \right|_{t=\left(n-\frac{1}{2}\right)\Delta t} &= \frac{\bar{E}^n - \bar{E}^{n-1}}{\Delta t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon} \bar{E}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \bar{H}^{n-\frac{1}{2}} \\ \left. \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right|_{t=n\Delta t} &= \frac{\bar{H}^{n+\frac{1}{2}} - \bar{H}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{E}^n \end{aligned} \quad (3)$$

$E$ 、 $H$ 、 $n$ 、 $\mu$ 、 $\sigma$ 、 $\varepsilon$  分別為電場、磁場、時間間隔、導磁率、導電率及介電常數。在  $\sigma=0$  之條件下,方程式(4)和(5)分別為計算電場值與磁場值。 $x$ 、 $y$ 、和  $z$  表示為三軸方向,而  $i$ 、 $j$  和  $k$  分別為三軸之分量。圖 3 為說明 FDTD 模擬時的流程,第一個方塊代表初始電場、磁場,以及波源與傳播介質參數的設定,此時  $T=0$ 。接著更新解析區域電場,完成之後檢查是否滿足我們預設的終止條件,若否,則令  $T=\Delta t$  後再重複更新電場、磁場一次,直到滿足終止條件後整個

程式才跳出迴圈，並結束。

$$E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = E_x|_{i+\frac{1}{2},j,k}^n - \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta z} \left[ H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_y|_{i+\frac{1}{2},j,k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right] + \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i+\frac{1}{2},j,k} \Delta y} \left[ H_z|_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} - H_z|_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

$$H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n+1} = H_x|_{i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} \left[ E_y|_{i,j+\frac{1}{2},k+1}^n - E_y|_{i,j+\frac{1}{2},k}^n \right] - \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} \left[ E_z|_{i,j+1,k+\frac{1}{2}}^n - E_z|_{i,j,k+\frac{1}{2}}^n \right] \quad (5)$$

FDTD 的計算，須將空間電場磁場作離散的取樣，並以差分來近似微分，因此單胞分割的愈小準確度就會愈高。但若無限制地將單胞尺寸縮小，不但電腦記憶體容量負荷不了、運算時間過長，也容易造成其他問題，因此如何選取適當大小的單胞便成為十分重要的議題。一般來講，我們會選擇解析問題中所需處理最短波長的 1/10 來當作單胞的邊長，以可見光 400nm~700nm 範圍來講，即為 40nm。可是由於光在介電材料中波長會變短，且散射體結構細緻度也有所影響。而時間間隔(time step)的大小也同樣影響著 FDTD 的準確度。根據 Courant 穩定條件：

$$C\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (6)$$

上式 C 為光的傳播速度， $\Delta t$  代表時間間隔，若單胞尺寸  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$ ，上式簡化成  $\Delta t \leq \frac{\Delta}{c\sqrt{3}}$ 。其物理意義可簡單地視為：單位時間間隔的信號傳播距離，不可大於單胞內最大長度。也因此，若今天我們使用的是二維的 FDTD，則時間間隔  $\Delta t$  必須小於等於  $\frac{\Delta}{c\sqrt{2}}$ 。若超過此一數值，FDTD 將無法得到穩定收斂的數值解。因此，FDTD 的穩定條件為：

$$\Delta t \leq \frac{\Delta}{c\sqrt{\text{dim}}} \quad (7)$$

dim 為 FDTD 的維度。

在使用 FDTD 軟體模擬時，計算具有側壁反射結構有機發光二極體之取光效率，主要步驟可分為：(1)建立具側壁反射結構之 PLED 模型；(2)定義出 FDTD 模擬區域，其中包括設定 perfectly matched layer (PML) 邊界條件；(3)設定模擬光源，這裡所使用的光源為 dipole source，其波長為 530nm；(4)設定 monitor 於 PLED 模型之周圍來計算光能量。根據模擬不同 sidewall 角度之 PLED，來找出能增加最大取光效率之最佳角度。

#### 4.3 基因演算法之最佳化

在設計光子晶體中，我們使用基因演算法(GA)來做最佳化。基因演算是模仿自然界物競天擇、適者生存的方法，利用染色體、適應能力、基因交換及基因

突變等規則性之自然演算過程來取得最佳解。在 GA 最佳化中，我們利用 Matlab 來跟 FDTD 軟體作連結，其流程如圖 4。首先在 FDTD 軟體裡建構具光子晶體之 PLED 模型，再來隨機產生一個由個體集合所構成之初始群組，並利用染色體集合  $\{\Lambda, r\}$  來做配對。其中將  $\Lambda$  定義為光子晶體的中心距離， $r$  定義為光子晶體結構的半徑，這兩者即為我們要設計之變數。而每完成一次完整的遺傳演算法運算可能要做多個世代(Generation)，端視個別問題難易而定。為了要汰弱留強，就要設定一評定好壞的標準，稱此為適應性函數(Fitness function)，所以我們將取光效率定義為適應性函數，並標示為  $E(\Lambda)$ 。接著下一步計算是否滿足條件，若不滿足則將子代  $\{\Lambda, r\}$  作突變(Mutation)，交配(Crossover)產生新的世代，並重新計算直到滿足條件為止。

#### 4.4 製程

具光子晶體之 PLED 的製程步驟：第一步先針對 ITO 玻璃基板做蝕刻的動作，我們先清洗 ITO 玻璃基板，再來貼上負光阻並以 UV 光曝光、顯影，最後再蝕刻出我們要的圖案來當作陽極，如圖 5a 所示。第二步利用熱壓式奈米壓印法在 ITO 層上製作光子晶體結構，如圖 5b 所示。第三步將約 40 nm 厚的 PEDOT (poly(3,4-ethylene dioxy thiophene))作為電洞傳導層，以旋轉塗布的方式成模在 ITO 玻璃基板上，如圖 5c 所示。第四步我們將有機聚合物 Ir(mppy)<sub>3</sub> (Tris[2-(p-tolyl)pyridine]iridium(III))作為發光材料，其發光波長約為 530 nm。同樣利用旋轉塗布的方式成模在 PEDOT 層上，其厚度約為 62 nm，如圖 5d 所示。最後將 1000 nm 厚的鋁蒸鍍在聚合物層上，用來當作陰極，如圖 5e 所示。在本計畫中所利用之熱壓式奈米壓印技術為普林斯頓大學 Stephen Chou 教授的概念，也是目前發展較久的技術，是將轉鑄模板置於一旋塗過高分子的基材上，將模版直接壓入高分子薄膜同時加溫加壓，待高分子材料充填模具的微結構中，再降溫、脫模，完成壓印工作。而壓印所需之模具製作流程如圖 6，首先在矽基板上利用旋轉塗布的方式塗抹一層 Polymethyl methacrylate (PMMA)。第二步使用電子束(E-beam)曝光系統來製作圖層後，再利用熱蒸鍍法沈積一層金屬鉻(Chromium)，接著利用 Lift-off 方法去除殘留的 PMMA。最後利用乾蝕刻的方式，製作出我們需要的模具。從掃描式電子顯微鏡下觀測到，模具之 Pitch 約在 250nm，而半徑約為 70nm，如圖 7 所示。

## 五、結果與討論

我們經由光子晶體及側壁反射結構來增加PLED的取光效率。光子晶體及側壁反射結構兩者皆能將光波導向至有用方向及減少光反射所造成的耗損，進而增加表面之取光效率。模擬不同sidewall角度支取光效率結果如圖8a所示，我們發現在角度為 $35^\circ$ 時有最好的取光效率，其能提升至21.7%。再來針對不同sidewall角度搭配上光子晶體，並利用基因演算法來找出最佳化之中心距離與半徑。圖9-10為基因演算法之適應性函數所計算出的結果，圖9c說明在第29世代有最好的取光效率，其值為26%。並根據Matlab計算所得到光子晶體參數為 $\{\Lambda, r\} = \{252\text{nm}, 63\text{nm}\}$ ，一般光子晶體之pitch與光波長( $\lambda$ )的關係為 $0.5\lambda$ ，而光子晶體的半徑與pitch的關係為 $0.25\sim 0.3\Lambda$ 。而我們GA所模擬的結果顯示，光子晶體之pitch為 $0.475\lambda$ ，半徑為 $0.25\Lambda$ (如圖8b)。

本計畫已完成經由光子晶體(PCs)及側壁反射結構(Sidewall Reflectors)來增加有機多分子發光二極體(PLEDs)的取光效率。而根據模擬結果，也找出在sidewall角度為 $35^\circ$ 所增加的取光效率為最大。此外，我們已完成了利用基因演算法找到光子晶體最佳之pitch與半徑，我們的光子晶體其pitch為PLED光波長之0.475倍、半徑為pitch之0.25倍。最後，透過FDTD模擬證實PLED具光子晶體及sidewall reflectors之取光效率能從20%增加至26%。

## 六、参考文献

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics," *Phys. Rev.Lett.* 58, 2059 (1987).
- [2] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices," *Phys. Rev. Lett.* 58, 2486 (1987).
- [3] N. Masaki, Y. Takashi, S. Kenji and H. Yoshihiko, "Fabrication of multi-layered nano-channels by reversal imprint lithography," *Microelectronic Engineering*, 61-62, 657-663 (2002).
- [4] H.Yoshihiko, H. Sato shi, I. Satoshi, K. Michio and T.Yoshio, "Nano-Imprint Lithography Using Replicated Mold by Ni Electroforming," *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 41, 6B, 4186-4189 (2002).
- [5] M. Fujita, S. Takahashi, T. Asano, Y. Tanaka, K. Kou-noike, M. Yamaguchi, J. Nakanishi, W. Stumpf and S. Noda, "Controlled spontaneous emission phenomena in semiconductor slabs with a two-dimensional photonic bandgap," *Journal of Optics A: Pure and Appl. Optics* 8, 4, S131-S138 (2006).
- [6] M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, "Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals," *Science* 308, 5726, 1296-1298 (2005).
- [7] Y. R. Do, Y. C. Kim, Y. W. Song and Y. H. Lee, "Enhanced light extraction efficiency from organic light emitting diodes by insertion of a two-dimensional photonic crystal structure," *Journal of Applied Physics* 96, 7629-7636 (2004).
- [8] Y.-J. Lee, S.-H. Kim, J. Huh, G.-H. Kim, Y.-H. Lee, S.-H. Cho, Y. C. Kim and Y. R. Do, "A high extraction- efficiency nanopatterned organic light-emitting diode," *Applied Physics Letters* 82: 3779-3781 (2003).
- [9] H. Kim, K.-K. Kim and S.-N. Lee, "Enhanced light extraction in GaN-based light emitting diodes fabricated with increased mesa sidewalls," *Journal of The Electrochemical Society* 157, 2, H170-H173 (2010).
- [10] K.N. Hui, K.S. Hui, H. Lee, D.-H. Hwang and Y.-G. Son, "Enhanced light output of angled sidewall light-emitting diodes with reflective silver films," *Journal of Thin Solid Films* 519, 2504-2507 (2011).
- [11] H.-P. Shiao, C.-Y. Wang, M.-L. Wu and C.-H. Chiu, "Enhancing the brightness of GaN light-emitting diodes by manipulating the illumination direction in the photoelectrochemical process," *IEEE Photonics Technology Letters* 22, 22, 1653-1655 (2010).
- [12] D. S. Kuo, S. J. Chang, C. F. Shen, T. C. Ko, T. K. Ko and S. J. Hon, "Nitride-based LEDs with oblique sidewalls and a light guiding structure," *Semicond. Sci. Technol.* 25, 055010 (2010).

- [13] H. Kim, K. H. Baik, J. Cho, K.-K. Kim, S.-N. Lee, C. Sone, Y. Park and T.-Y. Seong, "Enhanced light output of GaN-based light-emitting diodes by using omni-directional sidewall reflectors," *IEEE Photonics Technology Letters* 19, 19, 1562-1564 (2007).
- [14] J. Lee, S. Ahn, S. Kim, D.-U. Kim, H. Jeon, S.-J. Lee and J. H. Baek, "GaN light-emitting diode with monolithically integrated photonic crystals and angled sidewall deflectors for efficient surface emission," *Applied Physics Letters* 94, 1-3 (2008).
- [15] C.-C. Yang, C.-F. Lin, H.-C. Liu, C.-M. Lin, R.-H. Jiang, K.-T. Chen and J.-F. Chien, "Higher light-extraction efficiency of Nitride-based light-emitting diodes with hexagonal inverted pyramids structures," *Journal of The Electrochemical Society* 156, 5, H316-H319 (2009).
- [16] C.-S. Wu, T.-C. Liang, H. Kuan and W.-C. Cheng, "Output power enhancement of GaN-based light-emitting diodes using circular-gear structure," *Japanese Journal of Applied Physics* 50, 032101 (2011).
- [17] X. H. Wang, P. T. Lai and H. W. Choi, "The contribution of sidewall light extraction to efficiencies of polygonal LEDs shaped with laser micromachining," *Journal of Applied Physics* 108, 023110 (2010).
- [18] H. Ichikawa and T. Babaa, "Efficiency enhancement in a light-emitting diode with a two-dimensional surface grating photonic crystal," *Applied Physics Letters* 84, 4, 457-459 (2004).
- [19] M. Boroditsky et. al. "Light extraction from optically pumped light-emitting diode by thin-slab photonic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, 75, 1036-1038 (1999).
- [20] H. Y. Ryu and Y. H. Lee et. al. "Over 30-fold enhancement of light extraction from free-standing photonic crystal slabs with InGaAs quantum dots at low temperature," *Appl. Phys. Lett.*, 79, 3573-3575 (2001).
- [21] Alexei A. Erchak et. al. "Enhanced coupling to vertical radiation using a two-dimensional photonic crystal in a semiconductor light-emitting diode," *Appl. Phys. Lett.*, 78, 563-565 (2001).
- [22] T. N. Oder et. al. "III-nitride photonic crystals" *Appl. Phys. Lett.*, 83, 1231-1233 (2003).
- [23] T. N. Oder et. al. "III-nitride blue and ultraviolet photonic crystal light emitting diodes" *Appl. Phys. Lett.*, 84, 466-468 (2004).
- [24] Kenji ORTIA et. al. "High-extraction-efficiency blue light-emitting diode using extended-pith photonic crystal," *Jpn. J. Phys. Lett.*, 43, 5809-5813 (2004).
- [25] Chi-O CHO et. al. "Photonic Crystal Slab Waveguides Fabricated by Combination of Holography and Photolithography," *Jpn. J. Phys. Lett.*, 43, 1384-1387 (2004).

- [26] S. Noda, "Full three-dimensional photonic band-gap crystals at near infrared wavelengths," *Science* 289, 604–606 (2000).
- [27] A. Taflove and S. C. Hagness, "Computational Electrodynamics: the finite-difference time-domain method," Artech House, Norwood, MA, 2nd (2000).
- [28] W. J. Choi, Q.-H. Park, D. Kim, H. Jeon, C. Sone and Y. Park, "FDTD simulation for light extraction in a GaNbased LED," *Journal of Korean Physical Society* 49, 877–880 (2006).
- [29] D. H. Kim, C. O. Cho, Y. G. Roh, H. Jeon, Y. S. Park, J. Cho, J. S. Im, C. Sone, Y. Park, W. J. Choi and Q. H. Park, "Enhanced light extraction from GaN-based light-emitting diodes with holographical generated two-dimensional photonic crystal patterns," *Applied Physics Letters* 87, 203508 (2005).
- [30] Kane S. Yee and Jei S. Chen, "The finite-difference time-domain (FDTD) and the finite-volume time-domain (FVTD) methods in solving maxwell's equations," *IEEE Trans. Antennas Propag.* 45, 3, 354-363 (1997).

七、圖

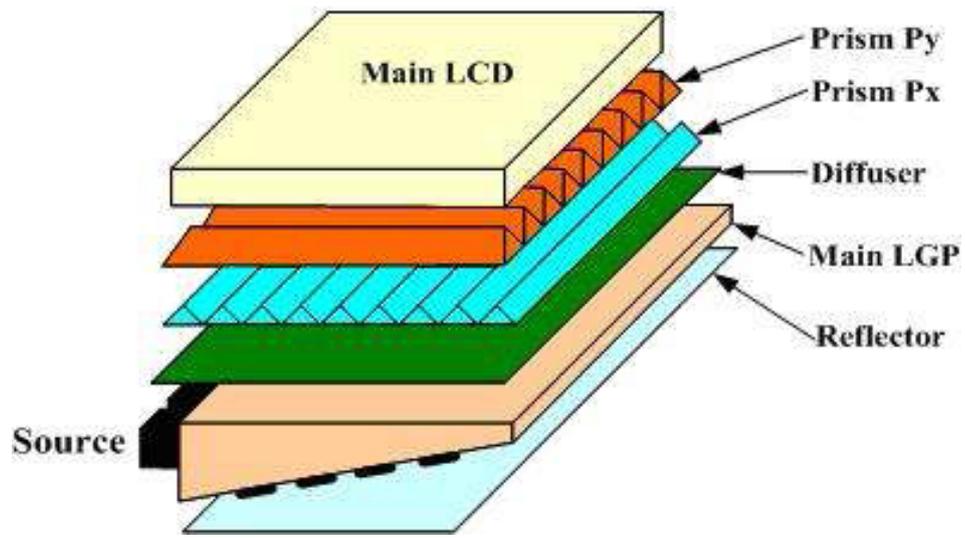
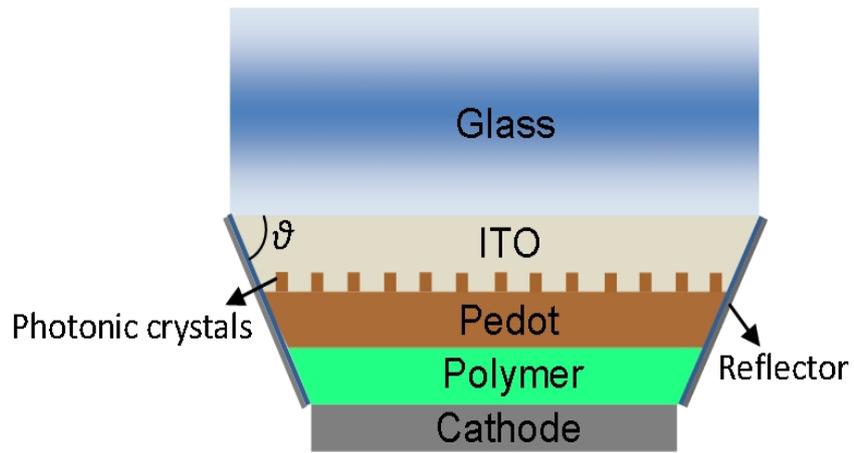
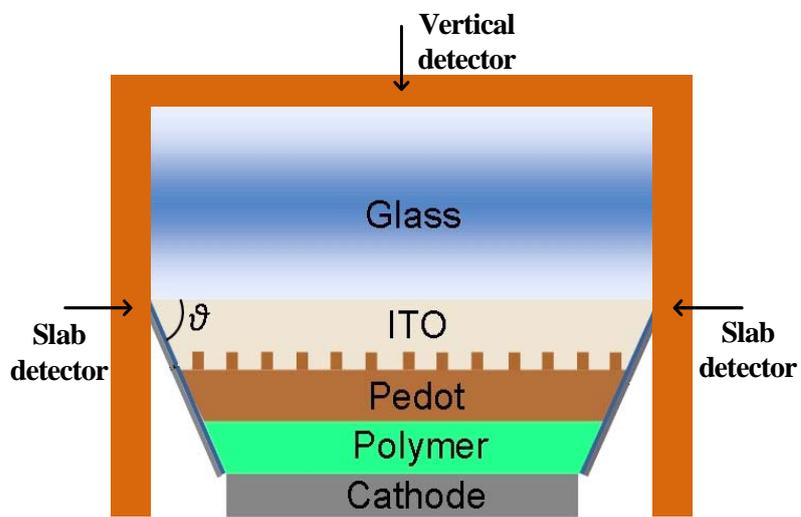


圖 1、傳統顯示器之背光模組架構圖。



(a)



(b)

圖 2、(a) 具光子晶體及側壁反射結構之 PLED；(b) 發光效率偵測系統。

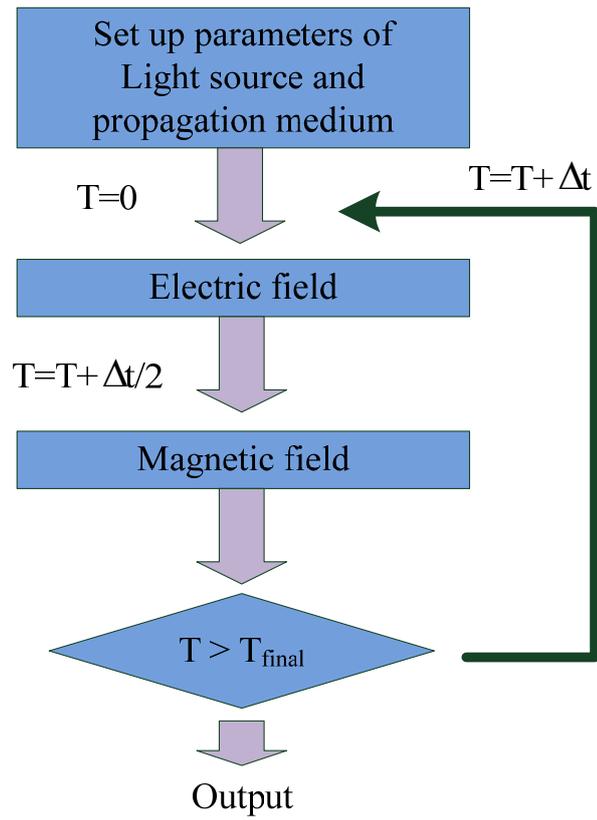


圖 3、FDTD 流程圖。

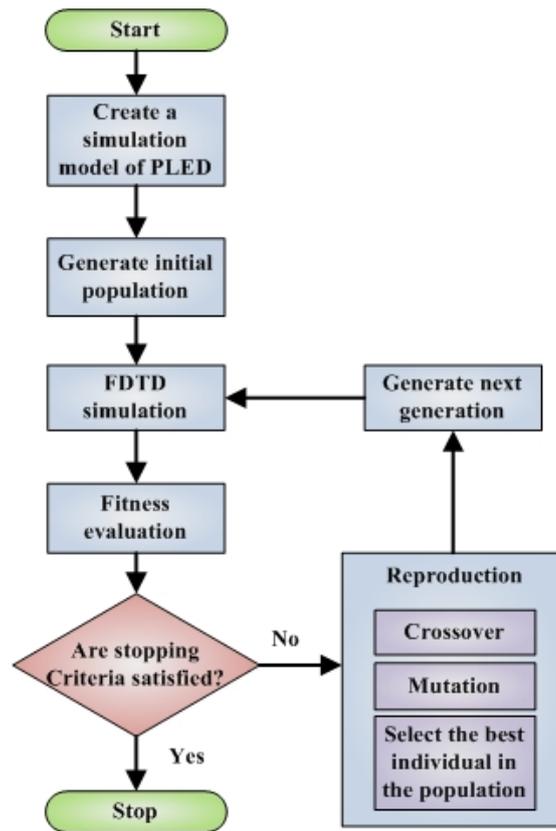


圖 4、基因演算法流程圖。

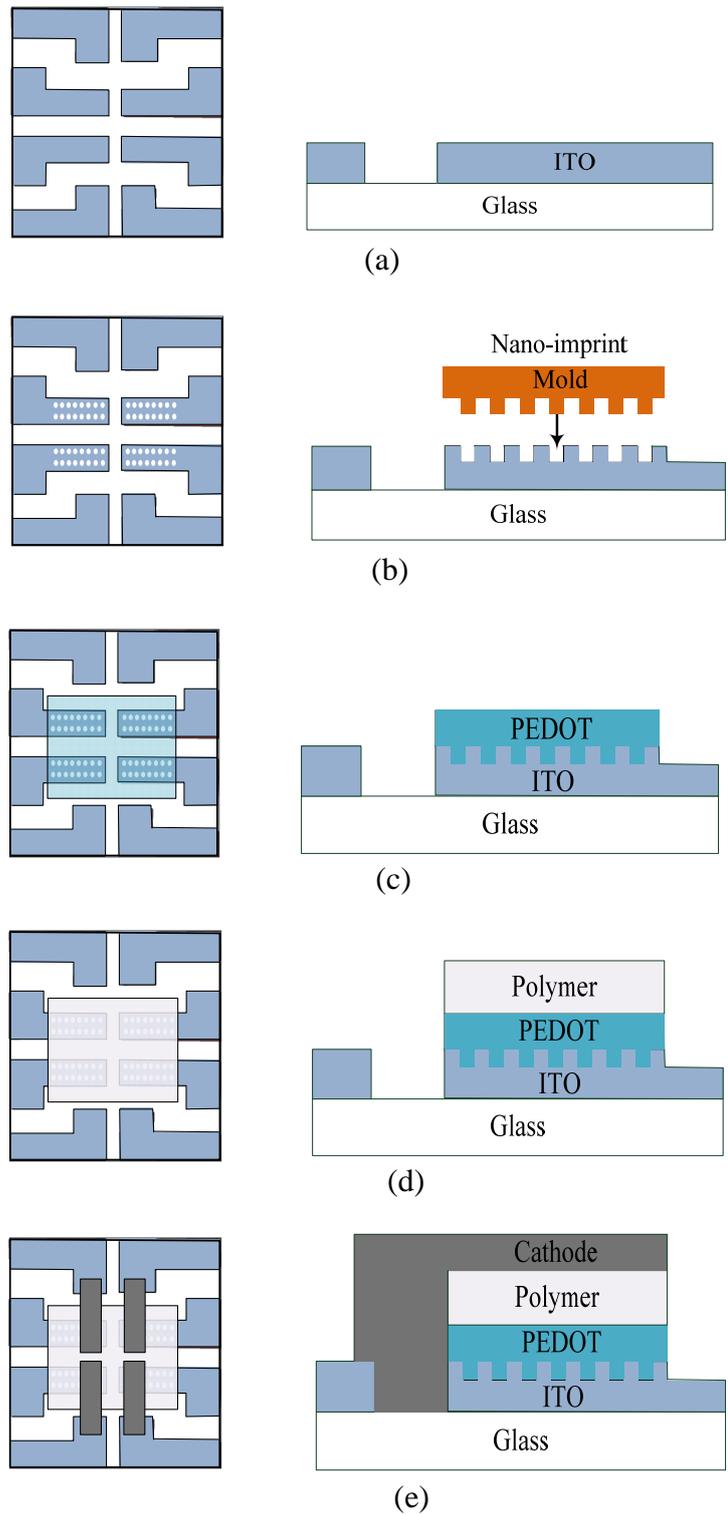


圖 5、(a)圖樣化之 ITO 玻璃基板；(b) 利用奈米壓印製作光子晶體；(c)圖樣化 ITO 上塗佈 PEDOT 示意圖；(d)在 PEDOT 上塗佈有機層示意圖；(e)蒸鍍鋁電極後之示意圖。

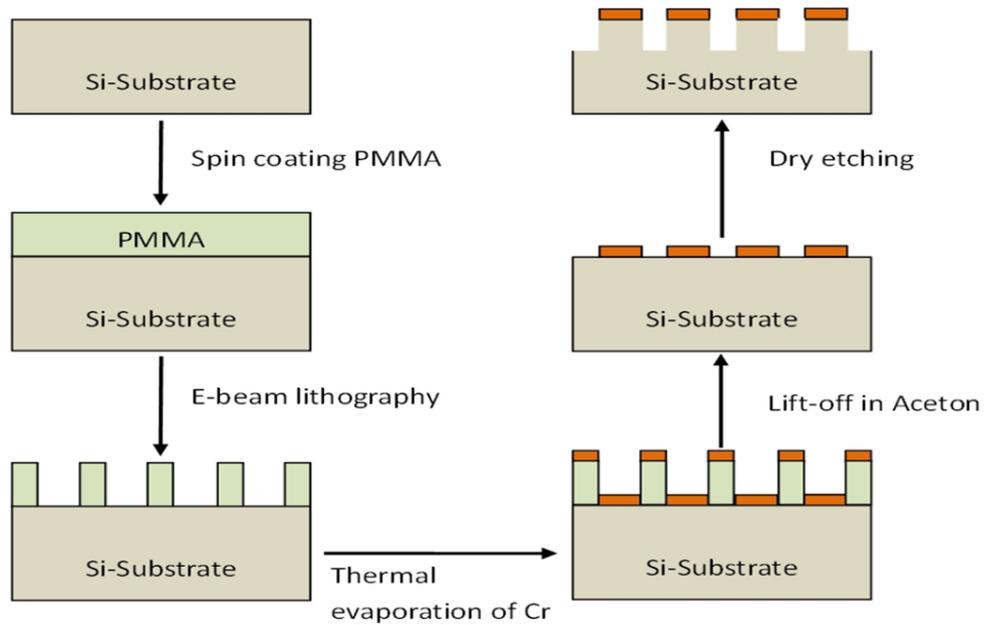


圖 6、模具製作流程。

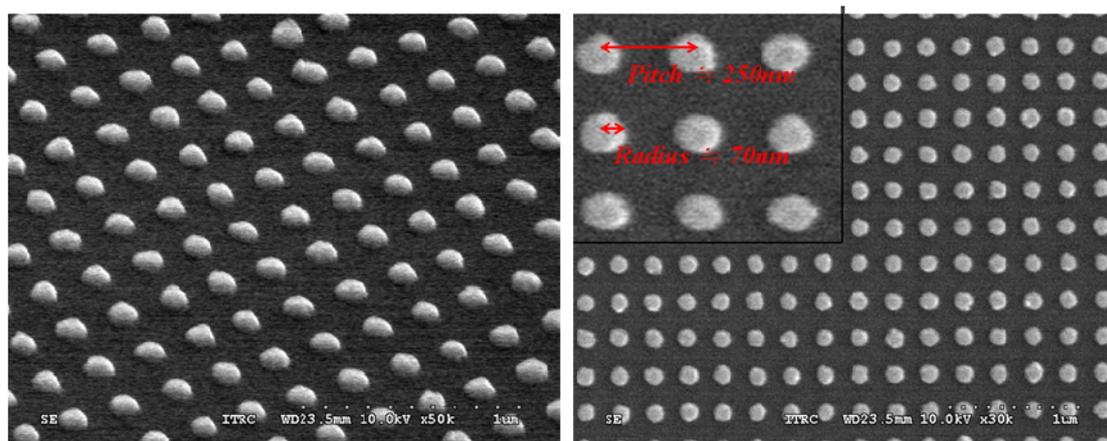
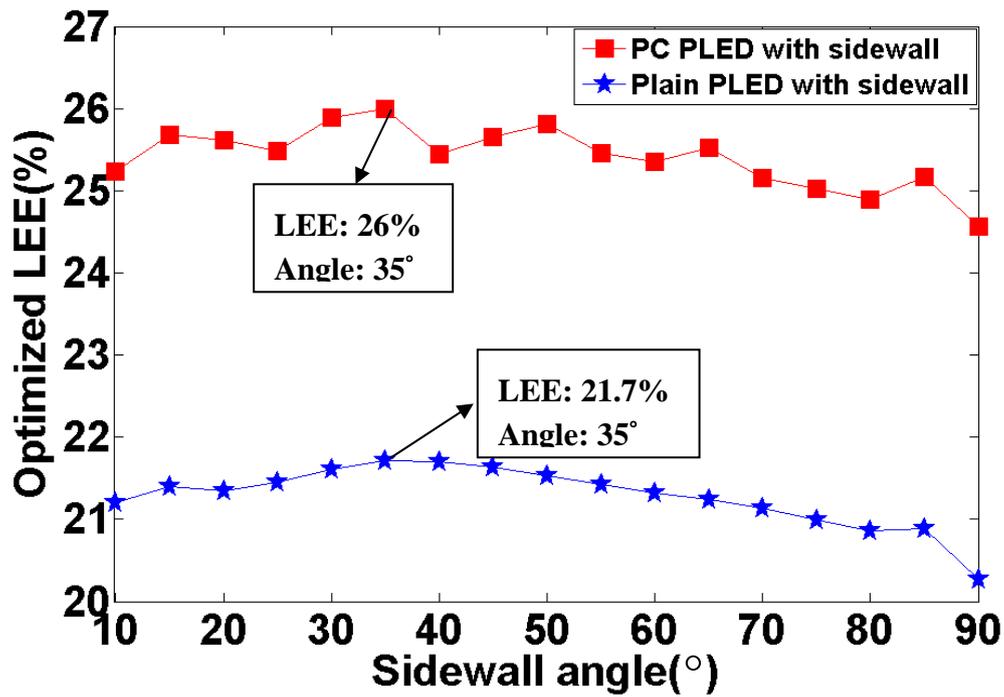
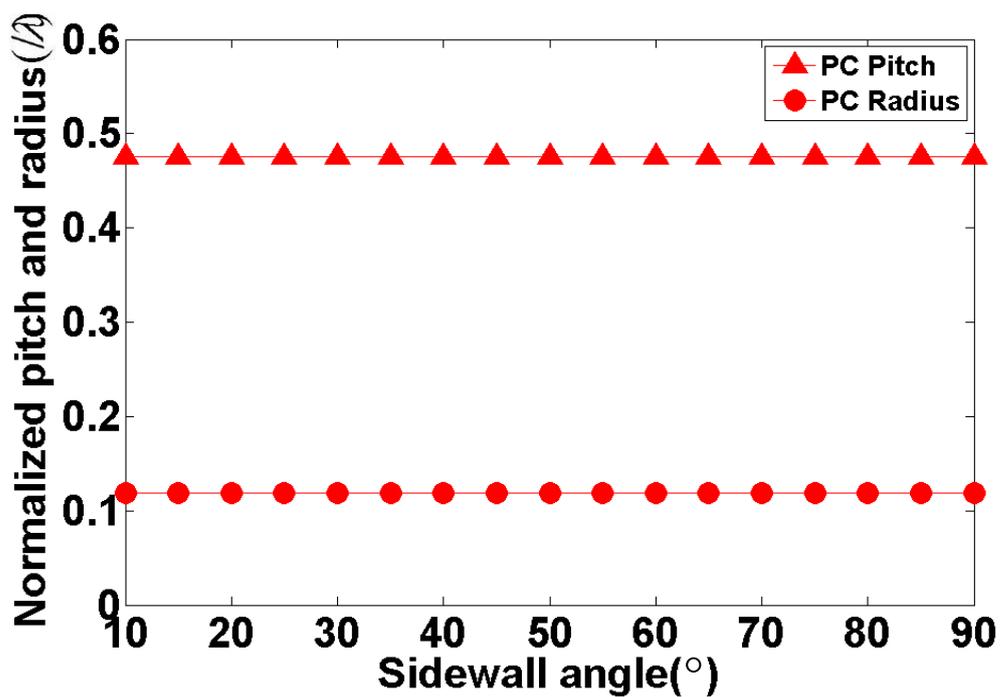


圖 7、模具之 SEM 圖。



(a)



(b)

圖 8、(a)PLED 具側壁反射結構之取光效率及 PLED 具光子晶體與側壁反射結構之取光效率模擬圖；(b)最佳化之波長跟中心距離與半徑之關係。

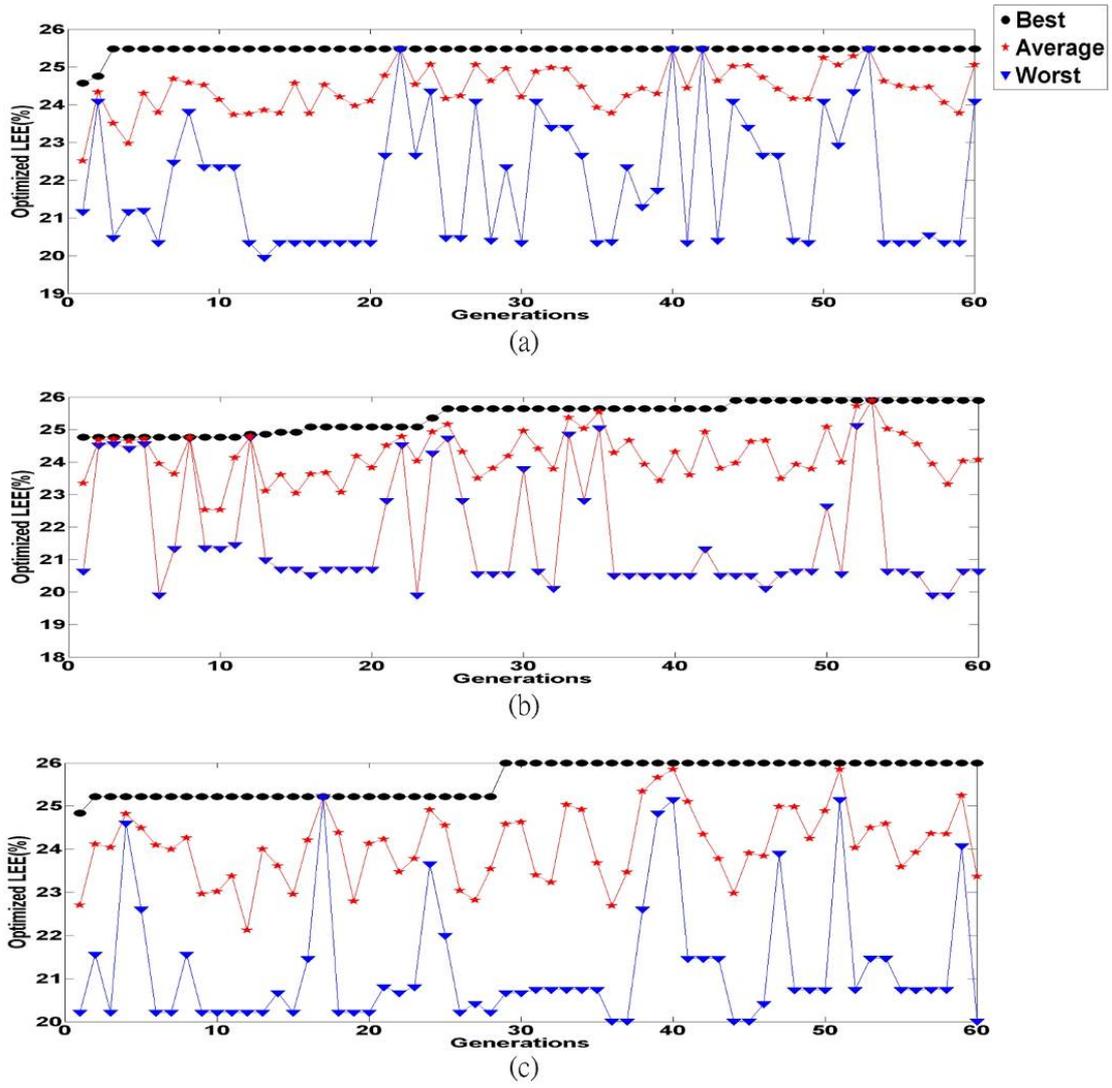


圖 9、計算適應性函數針對不同 sidewall 角度(a) 25°; (b) 30°; (c) 35°。

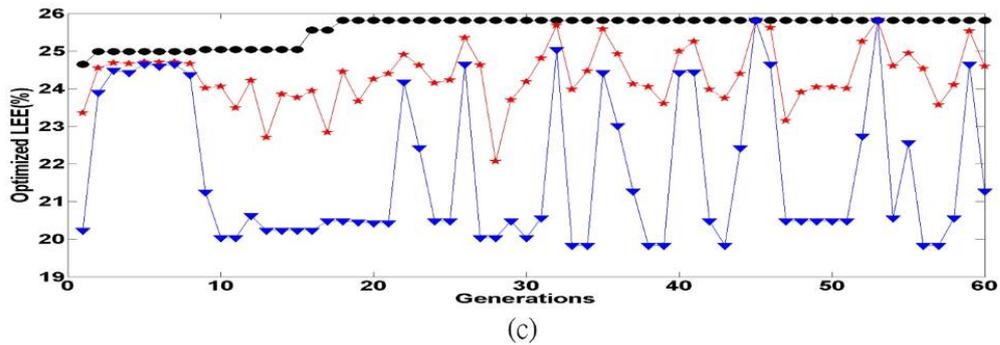
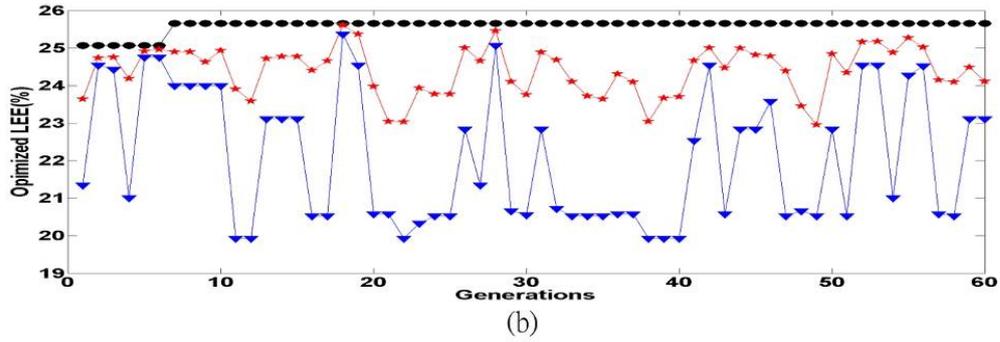
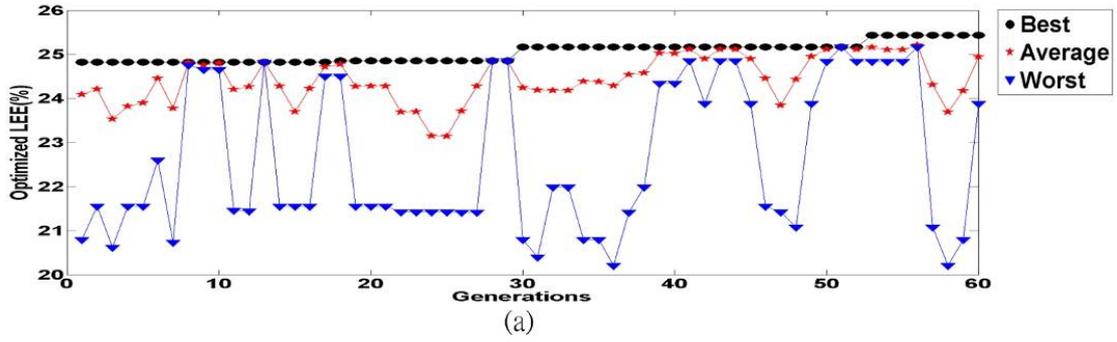


圖 10、計算適應性函數針對不同 sidewall 角度(a) 40°; (b) 45°; (c) 50°。

## 八、成果自評

### 8.1 計畫成果自評之子計畫(二)

本計畫使用 FDTD Solutions 模擬軟體，成功找出提升 PLED 取光效率之 sidewall reflectors 的最佳化角度。並以不同 sidewall 角度搭配光子晶體透過基因演算法模擬計算來達到最佳化，模擬結果顯示具光子晶體結構之 PLED 在 sidewall 35° 角能增加最大之取光效率。一般而言，光子晶體的晶格常數為光波長的 0.5 倍、其半徑為晶格常數的 0.25~0.3 倍。而我們的 PLED 其波長為 530nm，經由基因演算法所求得之光子晶體晶格常數及半徑為 252nm 與 63nm，所以我們的光子晶體晶格常數為波長的 0.475 倍、半徑為晶格常數的 0.25 倍，此結果與一般光子晶體之參數是相近的。而奈米壓印所需之模具，我們利用電子束曝光系統來製作並完成。最後在奈米壓印的部分，由於機台溫度不足，無法成功壓印出具光子晶體結構之 PLED。

### 8.2 論文發表

本子計畫二--以奈米壓印設計製作具光子晶體之高效能暨高指向性的發光二極體已投稿兩篇學術論文，其中一篇研討會論文，一篇期刊論文。

以下為學術研討會論文：

- [1] Che-Hung Tsai, and Paul C.-P. Chao, "Optimal design of ITO/organic photonic crystals in polymer light-emitting diodes with sidewall reflectors for high efficiency," ASME Information Storage and Processing Systems Conference (2011).

以下為學術期刊論文：

- [1] Che-Hung Tsai, Lun-De Liao, Yi-Shiun Luo, Paul C.-P. Chao, En-Chen Chen, Hsin-Fei Meng, Wei-Dar Chen, Shir-Kuan Lin, and Chin-Teng Lin, "Optimal design and fabrication of ITO/organic photonic crystals in polymer light-emitting diodes using a focused ion beam," Journal Microelectronic Engineering, Vol.87, Issue 5-8 (2010).

## 可供推廣之研發成果資料表

可申請專利

可技術移轉

日期：100年10月31日

<p><b>國科會補助計畫</b></p>	<p>計畫名稱：以奈米壓印設計製作具光子晶體之高效能暨高指向性的發光二極體 計畫主持人：趙昌博 計畫編號：NSC 97-2221-E-009-057-MY3 學門領域：機械工程技術</p>
<p><b>技術/創作名稱</b></p>	<p>具最佳化結構之高效能有機發光二極體</p>
<p><b>發明人/創作人</b></p>	<p>趙昌博</p>
<p><b>技術說明</b></p>	<p>中文： 利用基因演算法將光子晶體的排列方式來找出最佳的周期及半徑，並且搭配最佳化之側壁反射結構角度來增加整體的取光效率。而有機發光二極體的好處在於低驅動電壓、寬視角，甚至可應用在可撓式面板上。</p> <p>英文： Genetic Algorithm is employed to search the optimal photonic crystal period and radius. We also used optimal angle of sidewall reflectors to enhance the light extract efficiency of PLEDs. PLEDs have advantages such as a low driving voltage and wide viewing angle. Even, they can be used for flexible displays.</p>
<p><b>可利用之產業 及 可開發之產品</b></p>	<p>可利用之產業：光電產業。 可開發之產品：高效能省電發光二極體、可撓式 PLED 面板及光感測器。</p>
<p><b>技術特點</b></p>	<p>可針對不同製程或結構之 PLED，並利用基因演算法作光子晶體與側壁反射參數最佳化以提升其取光效率</p>
<p><b>推廣及運用的價值</b></p>	<p>本計畫之研發成果可與光電領域作整合，亦可與面板產業及光感測器之產品作一合作。</p>