

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 奈米材料披覆層之特性識別研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 98-2221-E-009-009-  
執行期間：98年08月01日至99年07月31日  
執行單位：國立交通大學機械工程學系(所)

計畫主持人：金大仁

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：張竣惟  
碩士班研究生-兼任助理人員：魏浩翔  
博士班研究生-兼任助理人員：王崧任

報告附件：國外研究心得報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 99 年 12 月 22 日

國科會專題計畫精簡報告

奈米材料披覆層之特性識別研究

計畫編號：NSC 98-2221-E-009-009-

執行期間：98 年08 月01 日至99 年07 月31 日

主持人：金大仁 教授

參與人員：王崧任、江宗鴻、魏浩翔、張峻惟

國立交通大學機械工程學系

## 中文摘要

本文研究奈米鍍膜對稱疊層矩形三明治平板的自由振動行為及自然頻率之特性，並利用其自然頻率識別平板中鍍膜材料的材料常數。首先以雷利-里茲法(Rayleigh-Ritz approach)與平板多層一階剪變形理論建立矩形平板的分析模型，並討論平板中不同材料對自然頻率與模態的影響。接著利用受材料常數變化的影響而有較大改變之自然頻率來進行平板鍍膜材料常數的識別。在材料常數的識別中，先以一組假設之材料常數來計算出振動系統的前幾個自然頻率預測值，根據所需的實際自然頻率與預測值的平方差總和可以建立出一頻率差異函數即識別系統參數所需的目標函數，利用一隨機多起始點廣域極小值的最佳化搜尋方法找出此目標函數最小值，即實際頻率與預測頻率差異最小，則此時所識別之材料常數及彈性支撐係數即為正確值。此法經實驗驗證，證明確實可行。

關鍵字：奈米材料，鍍膜，最佳化方法，振動

## Abstract

Free vibration of plates with coating materials on the top and bottom surfaces is studied via both the theoretical and experimental approach. In the theoretical study, the layer-wise linear displacement theory and the Rayleigh-Ritz method are used to construct the method for analyzing the free vibration of the plates. The

effects of coating material constants on the natural frequencies of the plates are investigated. The proposed method is then applied to the material constant identification of the plate with free edges using the natural frequencies that are sensitive to the variations of the coating material constants. Experiments were performed to measure the natural frequencies of the plates. In the identification process, trial material constants are used in the present method to predict the theoretical natural frequencies, a frequency discrepancy function is established to measure the sum of the squared differences between the experimental and theoretical natural frequencies, and a stochastic global minimization algorithm is used to search for the best estimates of the material constants by making the frequency discrepancy function a global minimum. Applications of the material constant identification technique are demonstrated by means of several examples.

Keywords: Sandwich, coating, free vibration, natural frequency, Rayleigh-Ritz method, identification, minimization method.

## 緣由與目的

近年來不少學者研究奈米材料的應用，例如在電漿顯示螢幕散佈銀鍍膜的奈米顆粒[1]，這些顆粒可達到自由調整對光的吸收，進而產生不同色彩的顯現效果。另外也有將奈米顆粒添加至樹脂之中，使此混合後的樹脂在抗拉強度、抗彎曲、耐熱性及疲勞耐性上獲得提升[2]。由此可知在奈米材料應用中，需要把奈

米顆粒平均分散於基材中，否則預期之特性無法有效發揮，更可能造成色彩失真或材料強度不均勻等情形，因此在成品的檢測方面便非常重要。現有對於奈米材料品質的檢測方式，最廣泛使用的為電子顯微系統，包括掃描式 scanning electron microscopy(SEM)[3]，掃描穿遂式 scanning tunneling microscopy(STM)[4]，穿透式 transmission electron microscopy(TEM)[3,5]等等。另有原子力顯微鏡 atomic force microscopy (AFM)[6,7]、X光 X-ray diffraction(XRD)[8,9]，X-ray photoelectron spectroscopy(XPS)[8]、超音波 ultrasonic spectroscopy[10]等。還有一些較特殊的方法如 laser-acoustics[11]。電子顯微鏡雖可明確看出試片表面之形狀及奈米顆粒的分布，但觀察一次的可視區域小且只能得知表面狀況，對於想要知道試片整體的情形很困難，且由於只能觀察並無法得知材料常數等特性，其中 TEM 也只能使用在導體試片上。原子力顯微鏡屬於接觸式的測量方式，是少數可以直接測量試片物理性質獲得材料常數的檢測方法，但在奈米尺度的檢測上其探針頭必須極小，因此對於大面積的試片檢測需要花費非常多的時間。X光分析儀器雖然可以得知試片的應變及完整組成分子甚至分子結構，但其試片尺寸受到儀器限制且無法精確得知試片之材料常數。超音波在檢測的應用很廣，原因在於其屬於快速的檢測法，且其檢測尺度範圍較廣，也可探知試品的深層組織情形，但在材料常數的識別上，仍只能作局部識別，故其功能尚有限。而 laser-acoustics 方法屬於高解析度且可得知材料之楊氏係數的檢測法，但其試片尺寸限制嚴格，材質需為均勻分布，在應用性上較難有所發揮。由上可知，目前少有能大範圍快速檢測不受試片尺寸限制之奈米材料的檢測方法。本文以奈米鍍膜平板的自然振動頻率搭配最佳化方法進行材料識別研究，將鍍膜材料常數設定為待識別變數，利用理論頻率與量測頻率的差值建立目標函數，可以識別出鍍膜材料的材料常數。

### 三明治振動模型

一矩形對稱三明治平板長寬厚分別為  $a$ 、 $b$ 、 $h$  如圖 1 所示。其分層座標系統如圖 2 所示，其總直角座標系統的  $x$ - $y$  平面座落在平板的中心平面；而中心層區域座標的  $x_1$ - $y_1$  平面座落在中心層的中心平面；上下兩面層的區域座標其對應的  $x_k$ - $y_k$  ( $k=2,3$ ) 平面則分別位於上面層的最下面與下面層的最上面。假設此振動系統在  $z$  方向的變形量為  $w(x,y)$ ，根據一階剪變形理論，每一層的剪變形分別為  $\theta_1(x,y)$ 、 $\theta_2(x,y)$ 、 $\theta_3(x,y)$ ，則此平板最大應變能可表示為

$$U_p = \sum_{k=1}^3 \int_{V^{(k)}} \frac{1}{2} \sigma^{(k)} \varepsilon^{(k)} dV^{(k)} \quad (1)$$

其中應變  $\varepsilon^{(k)}$  與應力  $\sigma^{(k)}$  分別以矩陣形式表示為

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{(k)} \\ \varepsilon_y^{(k)} \\ \gamma_{yz}^{(k)} \\ \gamma_{xz}^{(k)} \\ \gamma_{xy}^{(k)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u^{(k)}}{\partial x} \\ \frac{\partial v^{(k)}}{\partial y} \\ \frac{\partial v^{(k)}}{\partial z} + \frac{\partial w^{(k)}}{\partial y} \\ \frac{\partial u^{(k)}}{\partial z} + \frac{\partial w^{(k)}}{\partial x} \\ \frac{\partial u^{(k)}}{\partial y} + \frac{\partial v^{(k)}}{\partial x} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^{(k)} \\ \sigma_y^{(k)} \\ \tau_{yz}^{(k)} \\ \tau_{xz}^{(k)} \\ \tau_{xy}^{(k)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1^{(k)} & Q_2^{(k)} & 0 & 0 & 0 \\ Q_2^{(k)} & Q_1^{(k)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_3^{(k)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_3^{(k)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{(k)} \\ \varepsilon_y^{(k)} \\ \gamma_{yz}^{(k)} \\ \gamma_{xz}^{(k)} \\ \gamma_{xy}^{(k)} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

其中  $Q_i^{(k)}$  為第  $k$  層的材料剛性係數可表示為

$$Q_1^{(k)} = \frac{E^{(k)}}{1-\nu^{(k)}}; Q_2^{(k)} = \frac{\nu^{(k)} E^{(k)}}{1-\nu^{(k)2}}; Q_3^{(k)} = G^{(k)} \quad (4)$$

其中  $E$  為楊氏模數(Young's module)； $\nu$  為波松比(Poisson's ratio)； $G$  為剪力模數(shear modulus)。由圖 2 可將平板的位移場表示成

$$\begin{aligned}
U^{(k)}(x, y, z, t) &= u^{(k)}(x, y, z) e^{i\omega t} \\
&= \left[ u_{loc}^{(k)}(x, y, z_1) + z_k \theta_x^{(k)}(x, y) \right] e^{i\omega t} \\
V^{(k)}(x, y, z, t) &= v^{(k)}(x, y, z) e^{i\omega t} \\
&= \left[ v_{loc}^{(k)}(x, y, z_1) + z_k \theta_y^{(k)}(x, y) \right] e^{i\omega t} \quad k=1, 2, 3 \\
W^{(k)}(x, y, z, t) &= w^{(k)}(x, y, z) e^{i\omega t} = w(x, y) e^{i\omega t}
\end{aligned} \quad (5)$$

當  $k=1$  即心層的中心面內位移為

$$u_{loc}^{(k)}(x, y, z_1) = u_0(x, y); v_{loc}^{(k)}(x, y, z_1) = v_0(x, y) \quad (6)$$

而在面層 ( $k=2, 3$ ) 則分別表示為

$$u_{loc}^{(2)}(x, y, z_1) = u^{(1)}\left(x, y, \frac{h_c}{2}\right); v_{loc}^{(2)}(x, y, z_1) = v^{(1)}\left(x, y, \frac{h_c}{2}\right) \quad (7)$$

$$u_{loc}^{(3)}(x, y, z_1) = u^{(1)}\left(x, y, \frac{-h_c}{2}\right); v_{loc}^{(3)}(x, y, z_1) = v^{(1)}\left(x, y, \frac{-h_c}{2}\right) \quad (8)$$

平板的最大動能可表示為

$$T_p = \sum_{k=1}^3 \frac{\rho^{(k)} \omega^2}{2} \int_0^a \int_0^b \int_{h_b^{(k)}}^{h_u^{(k)}} \left( u^{(k)^2} + v^{(k)^2} + w^{(k)^2} \right) dz dy dx \quad (9)$$

其中  $\omega$  為振動角頻率、 $\rho^{(k)}$  為第  $k$  層的材料比重； $h_l^{(k)}$  與  $h_u^{(k)}$  分別為第  $k$  層的最底面與最上面之總域  $z$  座標。

引入雷利-里茲法可將平板變形參數以正規化近似級數表示為

$$\begin{aligned}
w_0(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_{ij}^{(1)} \phi_i^{(1)}(\xi) \psi_j^{(1)}(\eta) \\
\theta_x^{(k)}(\xi, \eta) &= \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N C_{mn}^{(2k)} \phi_m^{(2k)}(\xi) \psi_n^{(2k)}(\eta) \quad k=1 \sim 3 \\
\theta_y^{(k)}(\xi, \eta) &= \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q C_{pq}^{(2k+1)} \phi_p^{(2k+1)}(\xi) \psi_q^{(2k+1)}(\eta)
\end{aligned} \quad (10)$$

其中  $C_{ij}$  為待定係數； $\phi_i$ 、 $\psi_j$  為特徵函數； $\xi$ 、 $\eta$  則分別為正規化座標，其與原座標關係為  $\xi = 2x/a - 1$ 、 $\eta = 2y/b - 1$ ，其座標原點在平板中心處。在此特徵函數選用勒讓德多項式 (Legendre's polynomials) 其各項為

$$\begin{aligned}
f_1(\xi) &= 1, \\
f_2(\xi) &= \xi,
\end{aligned} \quad (11)$$

and for  $n \geq 3$ ,

$$f_n(\xi) = [(2n-3)\xi \times f_{n-1}(\xi) - (n-2) \times f_{n-2}(\xi)] / (n-1)$$

同理，將式 (15) 中的  $\phi_i$  與  $\xi$  分別以  $\psi_j$  和  $\eta$  代換即為  $\eta$  座標的特徵函數  $\psi_j$ 。此振動系統總勢能可表示為  $I = U - T$ ，對此總勢能相應於待定係數  $C_{ij}$  取一次變分可得特徵值方程式

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] \mathbf{C} = \mathbf{0} \quad (12)$$

其中  $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{M}$  分別為此振動系統的剛性矩陣與質量矩陣  $\mathbf{C}$  則為待定係數  $C_{ij}$  的向量表示。其組成元素如附錄 A 所示。將特徵函數式 (11) 帶入式 (12) 之特徵方程式中可計算出此振動系統的自然頻率與模態。當鍍膜材料常數為未知，先以預期材料常數帶入上述模型計算其對應之自然頻率，此材料常術與自然頻率的關係將被用來進行材料常術的反算如下節所述。

### 奈米鍍膜材料常數識別

由上節的計算方式可以找出受任意彈性支撐平板振動系統之自然頻率，利用實驗測得之自然頻率與猜測材料常數與支撐彈性係數計算出之預測自然頻率可建立出最小差異函數  $e(\mathbf{x})$ ，其數學形式如下所示為

$$\text{Minimize } e(\mathbf{x}) = (\boldsymbol{\omega}^*)^t (\boldsymbol{\omega}^*) \quad (13)$$

$$\text{Subject to } x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad (i=1 \sim m)$$

$$\omega_i^* = \frac{\omega_{pi} - \omega_{mi}}{\omega_{mi}}, \quad (i=1 \sim NF) \quad (14)$$

其中  $\mathbf{x} = [E^{(k)}, \nu^{(k)}]$  為設計變數，在此為鍍膜材料常數； $m$  為設計變數總數； $\omega_{pi}$  為前述方法計算出之預期頻率、 $\omega_{mi}$  為實驗頻率； $NF$  為選用頻率總數。因此  $e(\mathbf{x})$  即為實驗與預期頻率的平方差之正規化值；而  $x_i^L$  與  $x_i^U$  則分別為設計變數的合理最小值邊界與最大值邊界。

常見的極小值搜尋方法在識別問題中通常難以找到真正的總域極小值即真實材料常數與支撐彈性係數。因此，本文以一總域極小值搜尋方法輔以設計變數無因次化對目標函數進行設計變數的識別。首先以拉格蘭吉乘子 (Augmented Lagrange Multiplier) 將設計變數具邊界限制的目標函數式 (13) 轉換成無限制條件的目標函數

$$\bar{\Psi}(\bar{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\eta}, \gamma_p) = e(\bar{\mathbf{x}}) + \sum_{j=1}^m [\mu_j z_j + \gamma_p z_j^2 + \eta_j \phi_j + \gamma_p \phi_j^2] \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned} z_j &= \max \left[ g_j(\tilde{x}_j), \frac{-\mu_j}{2\gamma_p} \right] \\ g_j(\tilde{x}_j) &= \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^U \leq 0 \\ \phi_j &= \max \left[ H_j(\tilde{x}_j), \frac{-\eta_j}{2\gamma_p} \right] \\ H_j(\tilde{x}_j) &= \tilde{x}_j^L - \tilde{x}_j \leq 0 \quad (j=1 \sim m) \end{aligned} \quad (16)$$

$\mu_j$ 、 $\eta_j$ 、 $\gamma_p$  為拉格蘭吉乘子； $\max[* , *]$  為取中括號中最大值。修改後的設計變數  $\tilde{x}$  為

$$\tilde{x} = \left[ \frac{E^{(k)}}{\alpha_1}, \frac{v^{(k)}}{\alpha_2} \right] \quad (17)$$

其中  $\alpha_{ij}$  為無因次化參數。而此無因次化參數的選用重大影響了最佳化的搜尋方向與收斂速度。經驗而言，較好的變數範圍為大於 0 與小於 10 之間。值得一提的是，在預期頻率的計算中仍是以原始設計變數計算出式(15)中目標函數所需之自然頻率。而拉格蘭吉乘子在每次疊代過程中的變化為

$$\begin{aligned} \mu_j^{n+1} &= \mu_j^n + 2\gamma_p^n Z_j^n, \eta_j^{n+1} = \eta_j^n + 2\gamma_p^n \phi_j^n, (j=1 \sim m) \\ \gamma_p^{n+1} &= \begin{cases} \gamma_0 \gamma_p^n & \text{if } \gamma_p^n < \gamma_p^{\max} \\ \gamma_p^{\max} & \text{if } \gamma_p^n \geq \gamma_p^{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

其中  $n$  為當時的疊帶數； $\gamma_0$  為一選用常數； $\gamma_p^{\max}$  為  $\gamma_p$  的允許最大值。其中參數  $\mu_j^0$ 、 $\eta_j^0$ 、 $\gamma_p^0$ 、 $\gamma$ ，選定為

$$\mu_j^0 = 1.0, \eta_j^0 = 1.0, \gamma_p^0 = 0.4, \gamma_0 = 2.5, \gamma_p^{\max} = 100 \quad (19)$$

至此，受限制的極小值問題已轉變為一不受限制的最佳化問題。以多起始點總域極小值最佳化搜尋方法可求解不受限制的最佳化問題之總域極小值。其求解方式為將目標函數視為一質點在保守力場中運動的總势能，其最小值由此質點之運動方程式搜尋軌跡中獲得，欲識別的設計變數則為此目標函數最小值所對應的設計變數值。在式(17)中設計變數的最初始猜測值則由合理範圍中隨機選取。搜尋過程中，每一隨機起始點將會記錄下其搜尋軌跡中最小的區域極小值，利用貝氏分析方法(Bayesian argument)判斷出可能的總域極小值，當多隨機起始點搜尋到之可能的總域極小值在誤差容許範圍且機率大小滿足以下不等式時，可得總域極小值及其對應之設計變數，在此  $q^*$  為 0.99。

$$1 - \frac{[(n+1)!(2n-r)!]}{[(2n+1)!(n-r)!]} \geq q^* \quad (20)$$

### 奈米鍍膜材料的製作與測試

本文以環氧樹脂混合奈米二氧化矽為鍍膜材料(圖 3)，分別取適量比例混合後以 80°C 隔水加熱攪拌 180 分鐘(圖 4)，將此初步混合的溶液以超音波破碎機以 50 瓦總共 10 分鐘進行更進一步的奈米分子分散操作(圖 5)。以真空抽氣去除混合液中氣泡(圖 6)再加入適量硬化劑(圖 7)並攪拌 5 分鐘，再以真空抽氣去除溶液中的氣泡，將溶液注入模具或塗佈至基材上並做最後一次真空抽氣去除所有氣泡，最後放入烤箱加熱完成硬化(圖 8)，加熱過程為 45°C 4 小時、65°C 30 分鐘、85°C 30 分鐘 105°C 1 小時。

圖 9 為根據 ASTM-D638M 製作出之奈米材料標準試片，分別為二氧化矽含量重量百分比 1% 與 3%。以 MTS 材料拉伸試驗機測試(圖 10)其材料長數如表 1 所示。

### 鍍膜材料反求結果與討論

本文以 4 個不同的鍍膜平板模型進行奈米鍍膜材料識別，其結果如下：

#### A 平板

其基層材料為  $E=10\text{GPa}$ 、 $\nu=0.2143$ 、長 50cm、寬 10cm、厚 0.5mm、密度  $2180\text{kg/m}^3$  之矩形板；面層鍍膜為  $E=200\text{GPa}$ 、 $\nu=0.3$ 、密度  $7000\text{kg/m}^3$ 、厚 0.02mm。分別以第 6、7、10 與第 13、14、20 兩組自然頻率進行鍍膜材料的反算，其結果如表 2 所示。

#### B 平板

其基層材料為  $E=1\text{GPa}$ 、 $\nu=0.3$ 、長 50cm、寬 10cm、厚 0.5mm、密度  $265\text{kg/m}^3$  之矩形板；面層鍍膜為  $E=10\text{GPa}$ 、 $\nu=0.3$ 、密度  $2650\text{kg/m}^3$ 、厚 0.02mm。同樣以第 6、7、10 與第 13、14、20 兩組自然頻率進行鍍膜材料的反算，其結果如表 3 所示。

#### C 平板

其基層材料為  $E=2.4\text{GPa}$ 、 $\nu=0.3$ 、長 50cm、寬 10cm、厚 1mm、密度  $1200\text{kg/m}^3$  之矩形板；面

層鍍膜為  $E=2.994\text{GPa}$ 、 $\nu=0.362$ 、密度  $1113\text{kg/m}^3$ 、厚  $0.02\text{mm}$ 。同樣以第 6、7、10 與第 13、14、20 兩組自然頻率進行鍍膜材料的反算，其結果如表 4 所示。

#### D 平板

其基層材料與 C 平板相同；面層鍍膜為  $E=3.055\text{GPa}$ 、 $\nu=0.377$ 、密度  $1102\text{kg/m}^3$ 、厚  $0.02\text{mm}$ 。同樣以第 6、7、10 與第 13、14、20 兩組自然頻率進行鍍膜材料的反算，其結果如表 5 所示。

由以上例子可以發現，在任意材料常數的組合下，皆可反求出鍍膜材料的材料常數，而兩組自然頻率也都可以找到足夠接近的材料常數，其中自然頻率的選用以第 13、14、20 為較佳的選擇，其誤差百分比皆小於  $1e-2\%$ ；而以第 6、7、10 自然頻率反求之誤差百分比約在  $1.5e-2\sim 1.89\%$  之間。

最後實際製作一心層厚  $1\text{mm}$  的 PC 板，上下表面鍍上厚  $0.1\text{mm}$  的環氧樹脂混合重量百分比為  $1\%$  之奈米二氧化矽，平板長寬為  $153.9\text{mm}$  與  $143.2\text{mm}$ 。以自然振動頻率量測儀器(圖 11)測量此平板在邊界自由時之自然頻率，表 6 為其自然頻率，其中分析值為以材料拉深試驗測得材料常數計算所得之自然頻率。由於高頻自然頻率較不易精準量測，在此以第 6、7、10 個自然頻率對鍍膜材料進行材料常數的反求，其結果如表 7 所示，其中分析組為以拉深試驗測得材料常數計算出之自然頻率進行材料常數反求所得之結果。由結果顯示以三明治平板的自然頻率對鍍膜材料常數進行反算分析可以獲得足夠接近的鍍膜材料常數。

#### 結論

本研究建立一分析奈米鍍膜三明治平板振動的數學模式，並利用此模式探討鍍膜材料常數對自然頻率的影響，藉此找出有助於材料常數識别的自然頻率。另利用自然頻率建立一鍍膜材料常數識别的方法，這些對材料常數變化靈敏的自然頻率在結合廣域最佳化方法後可反算出奈米材料的材料常數  $E$  和  $\nu$ 。實驗方

面，本研究建立環氧樹脂與奈米顆粒(二氧化矽)混合的製作方法，並經由 ASTM 標準規範實驗測得其材料常數。最後，藉鏈擊振動試驗量測鍍膜三明治平板的自然頻率，並用量測的自然頻率及所提之方法來識別材料常數。比較用不同方式所找到的材料常數，結果顯示均相當吻合，差異在  $1.6\%$  以內。

#### 誌謝

感謝國科會補助本計畫之研究。

#### 附錄 A：矩陣 $\mathbf{K}$ 與矩陣 $\mathbf{M}$ 之組成元素：

特徵值方程式(12)可改寫為

$$\begin{pmatrix} K^{11} & K^{12} & K^{13} & K^{14} & K^{15} & K^{16} & K^{17} \\ & K^{22} & K^{23} & K^{24} & K^{25} & K^{26} & K^{27} \\ & & K^{33} & K^{34} & K^{35} & K^{36} & K^{37} \\ & & & K^{44} & K^{45} & 0 & 0 \\ \text{symmetric} & & & & K^{55} & 0 & 0 \\ & & & & & K^{66} & K^{67} \\ & & & & & & K^{77} \end{pmatrix} - \omega^2 \begin{pmatrix} M^{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & M^{22} & 0 & M^{24} & 0 & M^{26} & 0 \\ & & M^{33} & 0 & M^{35} & 0 & M^{37} \\ & & & M^{44} & 0 & 0 & 0 \\ \text{symmetric} & & & & M^{55} & 0 & 0 \\ & & & & & M^{66} & 0 \\ & & & & & & M^{77} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{ij}^{(1)} \\ C_{mm}^{(2)} \\ C_{pq}^{(3)} \\ C_{m'n'}^{(4)} \\ C_{p'q'}^{(5)} \\ C_{m''n''}^{(6)} \\ C_{p''q''}^{(7)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A1})$$

其中

$$\begin{aligned} [K^{11}]_{ij\bar{i}\bar{j}} &= 4 \times \left[ (A_3^c + 2A_3^f) E_{i\bar{i}}^{00} F_{j\bar{j}}^{11} / b^2 \right. \\ &\quad \left. + (A_3^c + 2A_3^f) E_{i\bar{i}}^{11} F_{j\bar{j}}^{00} / a^2 \right] \\ [K^{12}]_{ij\bar{m}\bar{n}} &= 2 \times A_3^c E_{im}^{10} F_{jn}^{00} / a \\ [K^{13}]_{ij\bar{p}\bar{q}} &= 2 \times A_3^c E_{ip}^{00} F_{jq}^{10} / b \\ [K^{14}]_{ij\bar{m}'\bar{n}'} &= 2 \times A_3^c E_{im'}^{10} F_{jn'}^{00} / a \\ [K^{15}]_{ij\bar{p}'\bar{q}'} &= 2 \times A_3^c E_{ip'}^{00} F_{jq'}^{10} / b \\ [K^{16}]_{ij\bar{m}''\bar{n}''} &= 2 \times A_3^c E_{im''}^{10} F_{jn''}^{00} / a \\ [K^{17}]_{ij\bar{p}''\bar{q}''} &= 2 \times A_3^c E_{ip''}^{00} F_{jq''}^{10} / b \\ [K^{22}]_{\bar{m}\bar{m}\bar{m}\bar{m}} &= A_3^c E_{\bar{m}\bar{m}}^{00} F_{\bar{m}\bar{m}}^{00} + (4D_1^c + 2A_1^f \times h_c^2) \times E_{\bar{m}\bar{m}}^{11} F_{\bar{m}\bar{m}}^{00} / a^2 \\ &\quad + (4D_3^c + 2A_3^f \times h_c^2) \times E_{\bar{m}\bar{m}}^{00} F_{\bar{m}\bar{m}}^{11} / b^2 \\ [K^{23}]_{\bar{m}\bar{n}\bar{p}\bar{q}} &= \left[ (4D_2^c + 2A_2^f \times h_c^2) E_{\bar{m}\bar{p}}^{10} F_{\bar{n}\bar{q}}^{01} \right. \\ &\quad \left. + (4D_3^c + 2A_3^f \times h_c^2) E_{\bar{m}\bar{p}}^{01} F_{\bar{n}\bar{q}}^{10} \right] / (ab) \\ [K^{24}]_{\bar{m}\bar{n}\bar{m}'\bar{n}'} &= 2h_c \times (B_1^f E_{\bar{m}\bar{m}'}^{11} F_{\bar{n}\bar{n}'}^{00} / a^2 + B_3^f E_{\bar{m}\bar{m}'}^{00} F_{\bar{n}\bar{n}'}^{11} / b^2) \\ [K^{25}]_{\bar{m}\bar{n}\bar{p}'\bar{q}'} &= 2h_c \times (B_2^f E_{\bar{m}\bar{p}'}^{10} F_{\bar{n}\bar{q}'}^{01} + B_3^f E_{\bar{m}\bar{p}'}^{01} F_{\bar{n}\bar{q}'}^{10}) / ab \end{aligned}$$

$$[K^{26}]_{mn m' n'} = 2h_c \times (B_1^f E_{mn}^{11} F_{m'n'}^{00} / a^2 + B_3^f E_{mn}^{00} F_{m'n'}^{11} / b^2)$$

$$[K^{27}]_{mn p' q'} = 2h_c \times (B_2^f E_{mp'}^{10} F_{nq'}^{01} + B_3^f E_{mp'}^{01} F_{nq'}^{10}) / ab$$

$$[K^{33}]_{pq \bar{p} \bar{q}} = A_3^c E_{pp}^{00} F_{q\bar{q}}^{00} + (4D_3^c + 2A_3^f \times h_c^2) E_{pp}^{11} F_{q\bar{q}}^{00} / a^2 \\ + (4D_1^c + 2A_1^f \times h_c^2) E_{pp}^{00} F_{q\bar{q}}^{11} / b^2$$

$$[K^{34}]_{pq m' n'} = 2h_c \times (B_3^f E_{pm'}^{10} F_{qn'}^{01} + B_2^f E_{pm'}^{01} F_{qn'}^{10}) / ab$$

$$[K^{35}]_{pq p' q'} = 2h_c \times (B_3^f E_{pp'}^{11} F_{qq'}^{00} / a^2 + B_1^f E_{pp'}^{00} F_{qq'}^{11} / b^2)$$

$$[K^{36}]_{pq m' n'} = 2h_c \times (B_3^f E_{pm'}^{10} F_{qn'}^{01} + B_2^f E_{pm'}^{01} F_{qn'}^{10}) / ab$$

$$[K^{37}]_{pq p' q'} = 2h_c \times (B_3^f E_{pp'}^{11} F_{qq'}^{00} / a^2 + B_1^f E_{pp'}^{00} F_{qq'}^{11} / b^2)$$

$$[K^{44}]_{m' n' \bar{m} \bar{n}} = A_3^f E_{m'n'}^{00} F_{\bar{m}\bar{n}}^{00} \\ + 4 \times (D_1^f E_{m'\bar{m}}^{11} F_{n'\bar{n}}^{00} / a^2 + D_3^f E_{m'\bar{m}}^{00} F_{n'\bar{n}}^{11} / b^2)$$

$$[K^{45}]_{m' n' p' q'} = 4 \times (D_2^f E_{m'p'}^{10} F_{n'q'}^{01} + D_3^f E_{m'p'}^{01} F_{n'q'}^{10}) / (ab)$$

$$[K^{55}]_{p' q' \bar{p} \bar{q}} = A_3^f E_{p'\bar{p}}^{00} F_{q'\bar{q}}^{00} \\ + 4 \times (D_3^f E_{p'\bar{p}}^{11} F_{q'\bar{q}}^{00} / a^2 + D_1^f E_{p'\bar{p}}^{00} F_{q'\bar{q}}^{11} / b^2)$$

$$[K^{66}]_{m' n' \bar{m} \bar{n}} = A_3^f E_{m'n'}^{00} F_{\bar{m}\bar{n}}^{00} \\ + 4 \times (D_1^f E_{m'\bar{m}}^{11} F_{n'\bar{n}}^{00} / a^2 + D_3^f E_{m'\bar{m}}^{00} F_{n'\bar{n}}^{11} / b^2)$$

$$[K^{67}]_{m' n' p' q'} = 4 \times (D_2^f E_{m'p'}^{10} F_{n'q'}^{01} + D_3^f E_{m'p'}^{01} F_{n'q'}^{10}) / ab$$

$$[K^{77}]_{p' q' \bar{p} \bar{q}} = A_3^f E_{p'\bar{p}}^{00} F_{q'\bar{q}}^{00} \\ + 4 \times (D_3^f E_{p'\bar{p}}^{11} F_{q'\bar{q}}^{00} / a^2 + D_1^f E_{p'\bar{p}}^{00} F_{q'\bar{q}}^{11} / b^2)$$

$$[M^{11}]_{ij \bar{i} \bar{j}} = (\rho_c h_c + 2\rho_f h_f) E_{ii}^{00} F_{\bar{j}\bar{j}}^{00}$$

$$[M^{22}]_{mn \bar{m} \bar{n}} = (\rho_c h_c^3 / 12 + \rho_f h_c^2 h_f / 2) E_{m\bar{m}}^{00} F_{n\bar{n}}^{00}$$

$$[M^{24}]_{mn m' n'} = \rho_f h_c h_f^2 \times E_{mn}^{00} F_{m'n'}^{00} / 4$$

$$[M^{26}]_{mn m' n'} = \rho_f h_c h_f^2 \times E_{mn}^{00} F_{m'n'}^{00} / 4$$

$$[M^{33}]_{pq \bar{p} \bar{q}} = (\rho_c h_c^3 / 12 + \rho_f h_c^2 h_f / 2) E_{pp}^{00} F_{q\bar{q}}^{00}$$

$$[M^{35}]_{pq p' q'} = \rho_f h_c h_f^2 \times E_{pp}^{00} F_{qq'}^{00} / 4$$

$$[M^{37}]_{pq p' q'} = \rho_f h_c h_f^2 \times E_{pp}^{00} F_{qq'}^{00} / 4$$

$$[M^{44}]_{m' n' \bar{m} \bar{n}} = \rho_f h_f^3 \times E_{m'n'}^{00} F_{\bar{m}\bar{n}}^{00} / 3$$

$$[M^{55}]_{p' q' \bar{p} \bar{q}} = \rho_f h_f^3 \times E_{p'\bar{p}}^{00} F_{q'\bar{q}}^{00} / 3$$

$$[M^{66}]_{m' n' \bar{m} \bar{n}} = \rho_f h_f^3 \times E_{m'n'}^{00} F_{\bar{m}\bar{n}}^{00} / 3$$

$$[M^{77}]_{p' q' \bar{p} \bar{q}} = \rho_f h_f^3 \times E_{p'\bar{p}}^{00} F_{q'\bar{q}}^{00} / 3$$

而

$$E_{im}^{rs} = \int_{-1}^1 \left[ \frac{d^r \phi_i(\xi)}{d\xi^r} \frac{d^s \phi_m(\xi)}{d\xi^s} \right] d\xi$$

$$F_{jn}^{rs} = \int_{-1}^1 \left[ \frac{d^r \varphi_j(\eta)}{d\eta^r} \frac{d^s \varphi_n(\eta)}{d\eta^s} \right] d\eta$$

(A3)

$r, s = 0, 1; i, j, \bar{i}, \bar{j}, i', j', \bar{i}', \bar{j}' = 1, 2, 3, \dots, I, J$

$m, n, \bar{m}, \bar{n}, m', n', \bar{m}', \bar{n}', m'', n'', \bar{m}'', \bar{n}'' = 1, 2, 3, \dots, M, N$

$p, q, \bar{p}, \bar{q}, p', q', \bar{p}', \bar{q}', p'', q'', \bar{p}'', \bar{q}'' = 1, 2, 3, \dots, P, Q$

其中面內拉伸勁度矩陣  $A_i^c = Q_i^{(1)} h_c$ ,

$A_i^f = Q_i^{(2)} h_f = Q_i^{(3)} h_f$ ; 耦合勁度矩陣

$B_i^f = \frac{Q_i^{(2)}}{2} h_f^2 = \frac{Q_i^{(3)}}{2} h_f^2$ ; 彎曲勁度矩陣

$D_i^c = \frac{Q_i^{(1)}}{12} h_c^3, D_i^f = \frac{Q_i^{(2)}}{3} h_f^3 = \frac{Q_i^{(3)}}{3} h_f^3.$

## 參考文獻

1. Gordon JA, Ziolkowski RW, Colors generated by tunable plasmon resonances and their potential application to ambiently illuminated color displays., *Solid State Communications*, v 146, May 2008, p 228-238
2. Chisholm N, Mahfuz H, Rangari VK, Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites., *Composite Structures*, v 67, Jan 2005, p 115-124
3. Ramay HRR, Zhang M, Biphasic calcium phosphate nanocomposite porous scaffolds for load-bearing bone tissue engineering., *Biomaterials*, v 25, Sep 2004, p 5171-5180
4. Weigelt S, Busse C, Petersen L, et al., Chiral switching by spontaneous conformational change in adsorbed organic molecules., *Nature Materials*, v 5, Feb 2006, p 112-117
5. Jena PK, Brocchi EA, Solorzano IG, et al., Identification of a third phase in Cu-Al2O3 nanocomposites prepared by chemical routes.,

*Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, v 371, Apr 25 2004, p 72-78

6. Yoshimura T, Shiraishi H, Yamamoto J, Correlation of Nano Edge Roughness in Resist Patterns with Base Polymers., *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, v 32, 1993, p 6065-6070
7. Gueta R, Barlam D, Shneck RZ, Measurement of the mechanical properties of isolated tectorial membrane using atomic force microscopy., *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, v 103, Oct 3 2006, p 14790-14795
8. Zhou ZF, Bello I, Lei MK, Synthesis and characterization of boron carbon nitride films by radio frequency magnetron sputtering., *Surface and Coatings Technology*, v 128, 2000, p 334-340
9. Baumbach T, Lubbert D, Gailhanou M, Strain relaxation in surface nano-structures studied by X-ray diffraction methods., *Materials Science and Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology*, v 69, 2000, p 392-396
10. Babick F, Hinze F, Ripperger S, Dependence of ultrasonic attenuation on the material properties., *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, v 172, Oct 25 2000, p 33-46
11. Schneider D, Siemroth P, Schulke T, Quality control of ultra-thin and super-hard coatings by laser-acoustics., *Surface and Coatings Technology*, v 153, 2002, p 252-260

表 1 奈米鍍膜材料常數

奈米顆粒含量	$E$ (GPa)	$\nu$
1%	2.994	0.362
3%	3.055	0.377

表 2 材料常數反求(平板 A)

	$E_f$ (GPa)	$\nu_f$
正確值	200	0.3
反求值(6、7、10)	199.956 (2.20e-2%)	0.301388 (0.46%)
反求值(13、14、20)	199.997 (1.50e-3%)	0.300015 (5e-3%)

表 3 材料常數反求(平板 B)

	$E_f$ (GPa)	$\nu_f$
正確值	10	0.3
反求值(6、7、10)	9.99613 (3.87e-2%)	0.299875 (4.17e-2%)
反求值(13、14、20)	10.0001 (1e-3%)	0.300008 (2.67e-3%)

表 4 材料常數反求(平板 C)

	$E_f$ (GPa)	$\nu_f$
正確值	2.994	0.362
反求值(6、7、10)	2.99328 (2.40e-2%)	0.361356 (0.18%)
反求值(13、14、20)	2.99396 (1.34e-3%)	0.362019 (5.25e-3%)

表 5 材料常數反求(平板 B)

	$E_f$ (GPa)	$\nu_f$
正確值	3.055	0.377
反求值(6、7、10)	3.04516 (0.32%)	0.370016 (1.89%)
反求值(13、14、20)	3.05498 (6.55e-4%)	0.377037 (9.81e-3%)

表 6 二氧化矽鍍膜 PC 平板自然頻率

自然頻率	實驗值	分析值	誤差(%)
4	49	52.18	-6.09
5	77	74.68	3.11
6	99	98.66	0.34
7	130	132.14	-1.62
8		139.33	
9	217	224.78	-3.46
10	249	248.59	0.16

表 7 二氧化矽鍍膜材料常數反算結果

	$E_f$ (GPa)	$\nu_f$
正確值	2.994	0.362
反求值(分析)	2.98002 (0.47%)	0.366529 (1.24%)
反求值(實驗)	3.0149 (0.70%)	0.367625 (1.55%)

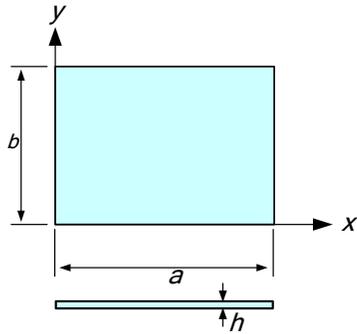


圖 1 平板振動系統模型

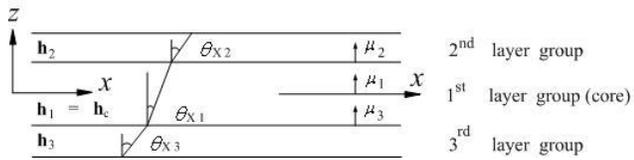


圖 2 分層座標系統示意圖



圖 3 環氧樹脂與奈米二氧化矽

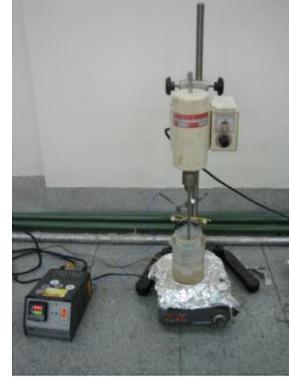


圖 4 隔水加熱攪拌



圖 5 超音波破碎機顆粒分散



圖 6 真空抽氣



圖 7 添加硬化劑

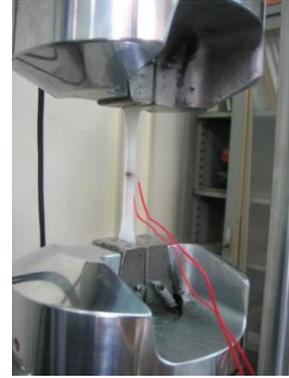


圖 10 材料拉伸試驗



圖 8 加熱成型

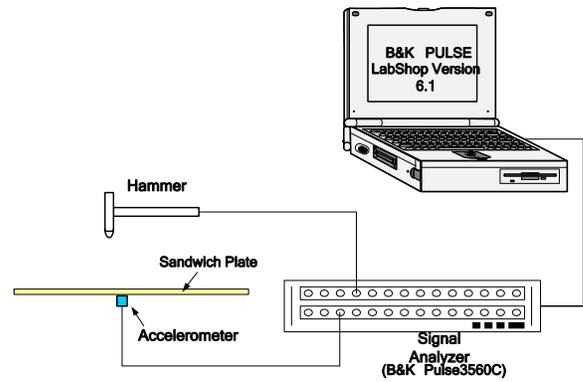


圖 11 自然振動頻率量測實驗之儀器配置圖



圖 9 奈米材料標準試片

# 赴國外出差或研習心得報告

## Energy Sustainable and Development (ESD 2010) 國際會議報告

### 一、源起

近年因石油的短缺、價格高漲及對環境生態造成的污染等所引起的經濟及環保問題,已深受各國政府的重視。很多國家亦已積極推動新能源或綠色能源的研發,冀能在不久的將來有更多石化能源被新的或綠色能源所取替。亞洲各國的產官學研在推動新能源或綠色能源的研發上亦不遺餘力,並積極舉辦與能源相關的國際研討會,提供一平台給這方面的學者專家互相交流研發心得與成果,以激發新的研究方法、創意或技術。本次會議便基於此目標而由亞洲理工學院負責舉辦,會議主題是能源的維繫與新能源的開發,地點在泰國清邁,會期為2010年6月2-4日。

### 二、赴會經過

本人在6月1日從台北搭機直飛泰國清邁,住進會場所在地的旅館後便向大會報到,晚上參加大會安排的歡迎酒會。在酒會中碰到不少朋友及台灣來的代表,彼此有相當愉快的交談。

### 三、會議心得

大會在6月2日早上九點正式開始,首先由 Dr. Subin Pinkayan 作 Hydropower Development in GMS 專題演講,介紹湄公河區域的水力發電現況與未來發展,目前正需要建立完善的電網,以供應附近區域所需要的電力。然後由 Professor Salfur Rahman 以 The Smart Grid Needs a Smart Utility 為題介紹智慧型電網的設計及應用,並指出安全智慧型電網的重要性及需要訂定完善的規範。最後由 Dr. Ludovic Lacrosse 作 Rural Energy for Sustainable Development in the Mekong Region: A particular case of Vietnam 專題演講,介紹湄公河偏遠區域的電力供應問題,指出小型分散式發電機,特別是小型太陽能及風力發電設備,極適合此地區的需求。專題演講後,便進行分組論文發表與研討,所探討的主題如下:

1. Energy access
2. Rural and urban energy issues
3. Renewable energy for sustainable development
4. Clean Development Mechanism (CDM) and sustainable development
5. Emerging and advanced energy technologies
6. Biomass, biofuels and biogas
7. Micro hydro development and applications
8. Wind power

9. Solar thermal and photovoltaics
10. Energy infrastructures and the environment
11. Energy policies for sustainable development
12. Energy conservation and energy efficiency
13. Building sector energy use
14. Industrial sector energy use and options
15. Transportation sector energy use
16. Energy and environment
17. Greenhouse gas mitigation and climate change issue
18. Geopolitical sustainability issues and strategies
19. Energy efficiency and rationale use of energy
20. Trans-boundary power exchange (cross-border power issues)
21. Regional power interconnection and trading arrangement.
22. Power systems interconnections
23. Distributed generation and sustainable development
24. Power system design and operation
25. Power system optimization, planning and analysis
26. Power system dynamics
27. Power demand-side management
28. Energy trade for sustainable development
29. Smart grids and active distribution networks

本人此次所發表的論文是有關研發一複合材料三明治葉片,此葉片可用於小型風力發電機中,其特性是質輕、強度大、效率高。本研究用理論和實驗方法探討複合材料三明治葉片的材料性質、變形及強度,所獲結果深受與會者肯定。本次會議有很多東南亞國家的學者專家出席,這是本人以往參加國際會議所少見。會中認識不少當地的朋友,亦為此次開會的另一種收穫。

#### 四、建議

東南亞各國目前正積極發展經濟,對能源需求甚殷,特別是比較偏遠和落後的地區,極需要建立小型及分散式的發電設施,以發展其農業經濟。我國產、研、學方面目前亦都積極研發綠色能源,若能多與這些國家交流,參加她們舉辦的會議,將可更多瞭解她們在這方面的發展與需求,並可藉此增進彼此的關係及合作。

#### 五、攜回資料

大會手冊一本及論文光碟片一片。

#### 六、誌謝

感謝國科會的經費支持,使本人能有機會參加此會議,並獲益良多。

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2010/12/22

國科會補助計畫	計畫名稱: 奈米材料披覆層之特性識別研究
	計畫主持人: 金大仁
	計畫編號: 98-2221-E-009-009- 學門領域: 結構與振動
無研發成果推廣資料	

98 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：金大仁		計畫編號：98-2221-E-009-009-					
計畫名稱：奈米材料披覆層之特性識別研究							
成果項目		量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）	
		實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數（含實際已達成數）	本計畫實際貢獻百分比			
國內	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	2	2	100%	人次	
		博士生	1	1	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	2	2	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>參加 ACCM-7 第七屆亞澳複合材料會議榮獲 Best Student Poster 獎</p>
--	--

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	



## 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）