

利用奈米壓印機台研究結構化金屬膜的異常穿透現象

Investigation of Extraordinary Transmission in Textured Metal Films Using Nano-Imprinting Machine

莊尚餘、陳學禮、郭珊珊

Shang-Yu Chuang, Hsuen-Li Chen, Shang-Shang Kuo

在本文中筆者提出一種奈米壓印的方式，稱之為奈米直印金屬技術，此技術能夠輕易的直接在金屬薄膜上定義各種圖形，包括連續波浪金屬膜或金屬矩陣洞列。利用奈米直印金屬技術製作出的週期性金屬薄膜結構，很適合用來研究表面電漿共振所引發的異常穿透現象。表面電漿共振使得入射光能夠從結構化金屬膜的一側穿過金屬耦合至另一側，因而大幅度在特定波段提高其穿透率。該技術因為能夠利用結構週期控制穿透光的工作波段，以及利用壓印壓力控制穿透光強度，是一個非常有潛力製作彩色濾光片並應用於各式光電元件的技術。

In this paper, we describe a thermal embossing imprint method, named as “nano-imprinting in metal” (NIM), for patterning metal films with a variety of profiles. Metal films exhibiting either perforated hole-arrays or corrugated structures with various surface morphologies can be fabricated rapidly. The SPR phenomenon allowed energy coupling to the other side of the textured metal film, causing a dramatic increase in the transmission. As a technique for readily controlling the working wavelength and transmittance, the NIM method has great potential for application in various optoelectronic devices.

一、簡介

近年來入射光與金屬表面自由電子產生共振的特殊現象－表面電漿共振 (surface plasmons resonance, SPR)，因為其特殊的光學現象，而廣泛的應用在物理、化學、材料、光學以及生物感測器上。其中在週期次波長的奈米結構上，會因為表面電漿共振而引發異常穿透現象 (extraordinary

transmission)，顯著地增加光穿透率，因此奈米結構引發的表面電漿共振在光電元件上被各國研究者深入的討論。一般而言，次於光波長的孔洞其穿透率會大幅度的被光學繞射極限 (diffraction limited) 所限制，請見公式 (1)：

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{D}{\lambda}\right)^4 \quad (1)$$

I_0 為入射光光強度、 I 為入射光穿透強度、 D 為孔洞直徑、 λ 為入射光波長。此種光學繞射極限顯示了一項遠場光學上的限制，當結構上的孔洞小於光波長時，其光穿透強度會隨著孔洞越小，呈現四次方反比的遞減，該繞射極限為限制許多奈米結構光穿透率的主因。

近年來的研究發現，將金屬薄膜製作出次波長孔洞結構時，其光穿透率會突破繞射極限，而在特定波段有異常的高穿透現象發生⁽¹⁻³⁾，雖然目前研究文獻中，表面電漿共振仍然沒有完全被釐清，但在所有文獻上都載明：異常穿透現象是來自於入射光與金屬的表面電漿波 (surface plasmons wave, SPW) 耦合成表面電漿共振，而金屬薄膜上的結構形狀、週期與大小皆為控制表面電漿共振的共振波段之重要因素。

表面電漿波是一種自由電子存在於金屬與非金屬介面的振盪行為，因為金屬與其鄰近的非金屬介電係數在介面上產生相對應的波向量 (k vector of surface plasmons wave, k_{sp})，當表面電漿波等於入射光的波向量時 (k vector of light, k_0)，即會引發表面電漿共振。不幸的是，根據表面電漿波的色散曲線，光波在空氣中的波向量 k_0 是永遠小於金屬的 k_{sp} ，故一般情形下，光照在金屬表面上無法產生此共振現象。一般已知利用幾種方式可以增加入射光的波向量，而其中利用結構來增強入射光波向量是最常被使用的方法之一。通常在結構上製作週期性的結構與表面電漿共振的關係，如下式 (2)：

$$k_{sp} = k_0 \sin\theta \pm mG_x \pm nG_y \quad (2)$$

入射光波向量 k_0 設定在 xy 平面上、 θ 為入射角度，故 $k_0 \sin\theta$ 是在 xy 平面的分量， G_x 與 G_y 是光柵 (grating) 的動量， m 、 n 為整數。這意味著對一個垂直入射光波打在次波長週期為 P 的金屬矩陣洞上 (hole array)，其表面電漿共振波段 λ_{max} 會近似於公式 (3)：

$$\lambda_{max} = \frac{P}{\sqrt{i^2 + j^2}} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_m \cdot \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (3)$$

此處的 i 與 j 為來自於週期性結構的散射階數 (scattering order)， ϵ_m 、 ϵ_d 分別為金屬與非金屬實數部分的介電係數 (real part of dielectric constants)。

最近異常穿透現象有更進一步的發現，除了金屬矩陣洞列會引發表面電漿共振的異常穿透現象之外，不需要孔洞的金屬結構也被發現有相同的高穿透率。當計算週期結構的連續金屬薄膜時，觀察到相似的異常光穿透率⁽⁴⁻⁸⁾，造成此現象的原因被認為是在金屬膜厚夠薄的情況下，金屬表面引發的表面電漿共振，因其入射光電磁波振幅大幅提高，而能夠穿過金屬膜，與另一面的金屬表面共振耦合，形成遠場穿透光，因此不需孔洞的週期性連續金屬膜之異常穿透現象已開始被研究團隊所注目。

欲利用實驗來研究此種現象，第一要務是製作出週期性的連續金屬膜 (如：波浪狀金屬結構)，但此種連續波浪狀的結構在傳統的半導體製程中是手續繁複且難以控制的，通常是利用全像曝光 (holographic exposure) 的方式來製作。最近 Bai 的研究團隊使用雙次全像曝光 (double-exposure holographic) 的方式成功地製作出波浪狀結構⁽⁸⁾，並且利用實驗證明出結構有異常穿透現象的存在。但是無論如何，因為光阻在光感度上有非線性的特性 (nonlinearity)，使得全像曝光即使能夠製作出波浪狀結構，但若想進一步控制結構深度與結構形狀則較難達成。

在本研究中筆者利用奈米壓印技術 (nanoimprint technique)，提出一種利用熱壓的方式直接壓印出此種波浪狀金屬結構，稱為奈米直印金屬技術 (nanoimprinting in metal, NIM)。傳統的奈米壓印技術是在適合的壓印壓力與溫度下，使用物理壓印的機制來定義高分子的圖形，因此可以避開利用光學定義高分子所遇到的光學繞射極限問題⁽⁹⁻¹³⁾。可惜的是，由於奈米壓印技術大部分都侷限在定義高分子圖形，以至於後續還需蝕刻基板等手續，這使得製程的時間與成本都大幅提高。近年來有研究團隊利用極高壓力強壓金屬膜，用以直接定義金屬膜圖形，雖然這種方式能夠省略後續蝕刻等手續，但是高達數百 MPa 的超高壓力並不利於後續半導體製程，為其最致命的缺點⁽¹⁴⁾。後續的相關研究顯示，提高金屬膜厚度可以降低直壓金屬的壓力

⁽¹⁵⁾，但是過厚的金屬膜使得入射光都被結構吸收與反射掉，並不適合異常穿透的研究。

在本研究中我們採用一個很簡單的方式，不僅能夠大幅度降低直壓金屬的壓力至百分之一，而且能夠應用在定義薄金屬膜的技術。這項技術的便利性，使得探討各項波浪狀金屬膜的表面電漿共振行為變得可行。我們提出的奈米直印金屬技術，能夠利用壓力與模板形狀輕易的控制出金屬結構的深度與形狀。此種技術在製程上的優點是，利用特殊形狀的模板配合適合的壓力可以作出連續波浪狀金屬膜，以及非連續金屬的矩陣洞列。通常半導體技術製作矩陣洞列的方式是使用聚焦離子束微影 (focused ion beam lithography, FIB)、或是電子束微影 (electron beam lithography, EBL)，配合掀離製程 (lift-off) 來製作，而利用本文所述的奈米直印金屬技術，在適當的壓力下能夠直接的壓印出金屬矩陣洞列，而不需要上述繁複耗時且所費不貲的微影機台。一般奈米壓印技術壓印出來的圖形都是相反 (inverse) 於模版的形狀，奈米直印金屬技術不只可以壓印出相反於模版的金屬結構，控制壓力還可以壓印出不同深度的波浪狀金屬形狀也是其特點之一。在本文中我們利用奈米直印金屬技術製作出二維金屬矩陣洞列，以及不同深度的波浪狀連續金屬膜，並探討在結構尖端其表面電漿共振的特殊行為。

二、模擬與實驗步驟

1. 模板製作

模板是利用電子束微影在光阻上定義圖形，然後將矽基板作反應性離子蝕刻 (reactive-ion-etching, RIE)，利用高密度電漿反應式離子蝕刻 (high-density plasma reactive ion etching, HDP-RIE) 系統，搭配感應式耦合電漿源 (inductively coupled plasma, ICP) 來製作各種圖形的模板。使用高密度電漿反應性離子蝕刻時，可控制 RF 偏壓參數與蝕刻時間來控制模板的圖形。

2. 奈米直印金屬技術

圖 1 為奈米直印金屬技術示意圖，我們使用高分子 (polymer) 當作軟墊層 (soft pad layer)，例如：NEB-22 或 SU-8 (為高分子光阻的型號)，隨後利用熱蒸鍍 (thermal evaporator system) 的方式，在高分子上鍍上金屬膜，將模板利用奈米壓印機台對金屬／高分子的結構施加 2–16 MPa 的壓力，並加熱至 40–60 °C 的溫度環境下，壓印 2 分鐘，待冷卻後將模板拿起，即完成奈米直印金屬技術。

參見圖 1 所示，我們可以利用一維的光柵模板，使用雙次壓印的方式製作出二維的週期性金屬結構，所謂的雙次壓印就是壓印完第一次後，將模版旋轉 90 度後再壓印第二次，完成的二維金屬結

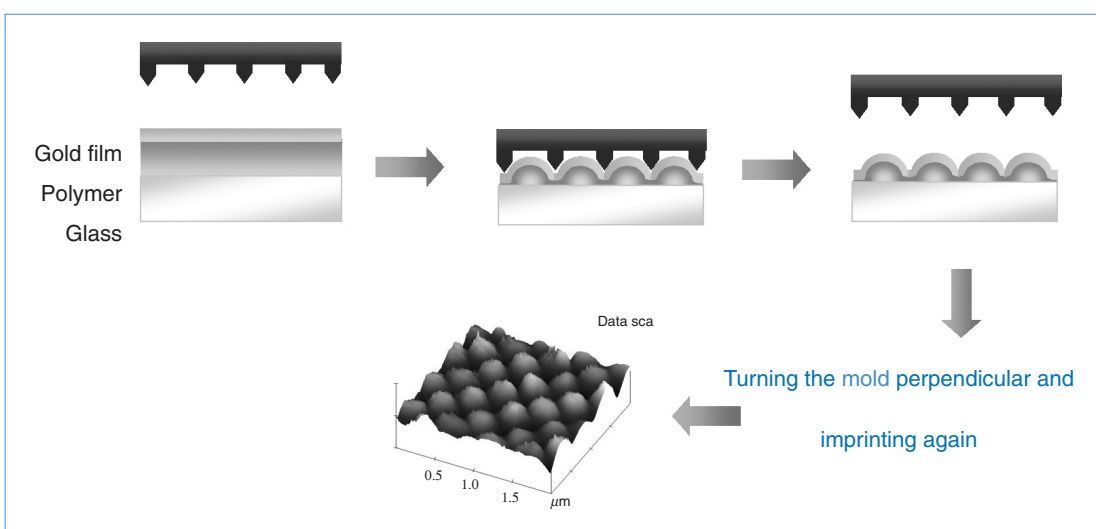


圖 1. 奈米直印金屬技術與雙次壓印示意圖。

構，如圖 1 原子力掃描顯微鏡所示。為了更進一步模擬光場在薄膜結構中發生表面電漿的情形，我們使用三維時域有限差分法 (finite-difference time domains, FDTD) 來分析結構，此種模擬系統能夠精準的分析隨時變的近場光分布情形。

三、結果與討論

1. 尖型模板的製作與奈米直印金屬技術

先前直壓單層金屬膜製程中，最大的缺點就是其過高的壓印壓力，為了克服這項問題，我們使用尖型模板來替代平板模板。尖型模板其頂端的壓力會較平板的大上許多，使其能夠以較低的壓力來完成壓印。我們是利用電子束微影及高密度電漿反應性離子蝕刻來完成這種尖型模板，而且可以藉由控制射頻線圈 (RF coil) 與偏壓 (RF-bias) 來掌控蝕刻出來的是尖型或是平板的模板，請見圖 2 所示之電子顯微鏡圖，(a) 為週期 400 nm 的平板模板，(b) 則是優化蝕刻條件後所作出的尖型模板 (週期為 400 nm)。這個高密度電漿反應式離子蝕刻搭配感應式耦合電漿源系統裡有一個加用射頻線圈與偏壓的腔體。前者 (RF coil) 可以產生高密度電漿，而後者 (RF-bias) 可以利用直流偏壓大小來控制離子轟擊的能量。為了蝕刻出尖型模板，使用 400 W 的 RF-bias power 增強對基板的離子轟擊能力。如 (圖 2(c)) 所示，也能夠利用高密度電漿化學氣相沉積系統 (HDP-CVD system)，應用自我複製法 (auto-cloning effect) 來製作出三角形模板。圖 2(d) 為利

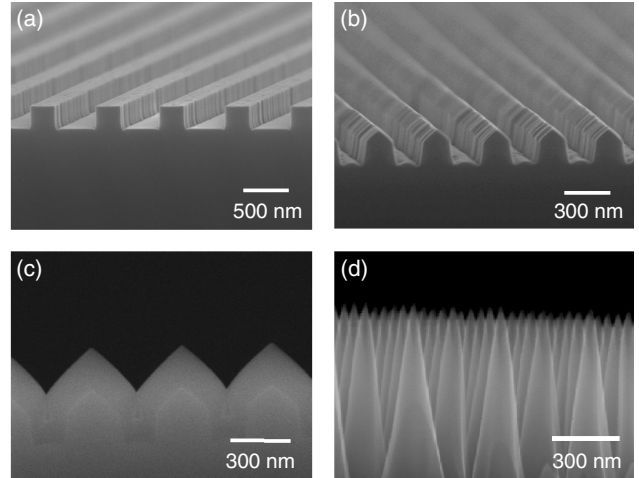


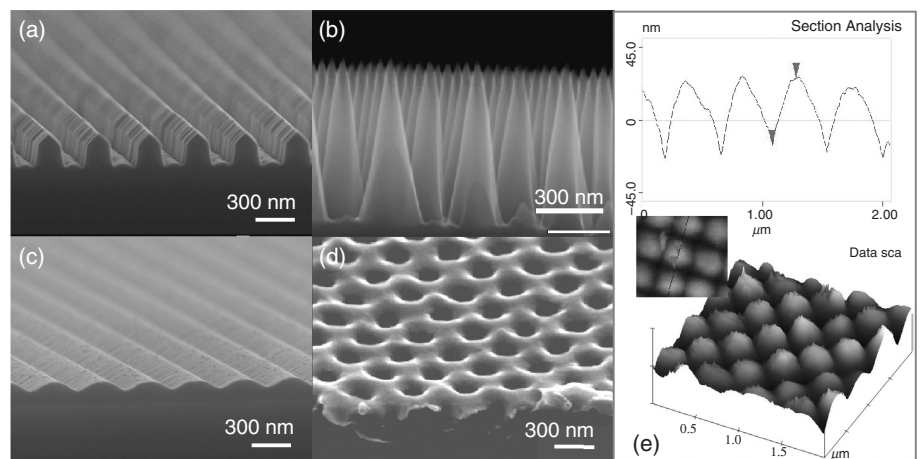
圖 2. 模板電子顯微鏡圖：(a) 平板模板，(b) 尖型模板，(c) 由自我複製技術製作模板，以及 (d) 高深寬比尖型模板。

用變壓耦合電漿多晶矽蝕刻機 (TCP poly-silicon etcher) 蝕刻出的高深寬比尖型模板。

圖 3 為模板與其相對應壓印結果的電子顯微鏡圖。圖 3(a) 為柵欄狀的矽材質模板，其週期為 400 nm 且結構深度為 300 nm，經由利用 12 MPa 的奈米直印金屬技術壓印之後，即可得到一個週期同為 400 nm 的連續波浪狀金屬結構，此連續波浪狀結構在這樣的壓力下會製作出 110 nm 的金屬膜結構深度 (見圖 2(c))。由此可看出奈米金屬壓印後的光柵形狀並不是和模板呈對比的圖形，而是一個連續波浪狀的金屬結構，因為壓印在光阻上的金膜，則因為金膜底下的光阻軟化，而模板尖端把金膜壓印

圖 3.

電子顯微鏡圖：(a) 週期為 400 nm 的一維光柵模板，(b) 六方最密堆積排列的高深寬比模板，(c) 波浪狀連續金屬膜，(d) 利用奈米直印技術製作的金屬矩陣洞列，(e) 原子力顯微鏡圖：雙次壓印製作二維連續金屬膜結構。



下去，金膜下面因為被模板尖端擠壓，光阻開始往四面八方均勻的擴散，形成這種波浪狀的金膜圖形。相較於之前的波浪狀金屬結構，為了製作矩陣洞列的結構，圖 3(b) 為使用一個高深寬比的矩陣列模板 (週期 400 nm，深度 1100 nm)，這種比較深的模板在相同的壓力下 (12 MPa) 會將金屬膜穿破，而成為不連續的金屬矩陣列孔洞 (見圖 2(d))。雙次壓印技術：如果將圖 3(a) 所示的光柵狀模板 (其為一維結構) 壓印之後，將模板旋轉 90 度再作第二次的壓印，即可完成二維的壓印圖型 (請見圖 3(e))。

2. 壓印溫度的影響

普通壓印高分子層的奈米壓印微影，其壓印溫度會隨著高分子的玻璃轉移溫度 (T_g) 而有所不同，一般來說，是比起其 T_g 點高上 20–30 °C，使高分子轉變成熔融態，以方便模板對其塑形。在奈米直印金屬技術中，如果金屬膜下面鋪的高分子軟墊層為光阻 ($T_g = 105$ °C)，壓印的溫度如果比 T_g 高上 20–30 °C (130 °C)，則在壓印過程中光阻會穿破金膜而出，如圖 4(a) 所示，因此會得到一個相當糟糕的壓印圖形，電子顯微鏡拍攝顏色較深的地方為光阻穿出金膜而出的部分。這項原因是因為金膜僅有 45 nm 的厚度，而熔融態的光阻遭到模板尖端擠壓，如圖 4(b) 所示，由受力點向沒有受力的地方擴散。當溫度超過 T_g 點時光阻完全變成熔融態，雖然說易於壓印，但熔融態的光阻卻因為尖端施力在波浪狀的波谷，所以光阻被擠向波峰的地方，也因此從波峰處破膜而出。圖 4(b) 為在優化

壓印溫度 (60 °C) 後所壓印出最佳的壓印圖形。相同的，如果改用 SU8 光阻 ($T_g = 55$ °C) 作為金屬膜下面的軟墊層，則最佳的壓印溫度為 45 °C，較 T_g 點低 10 °C。

3. 連續金屬膜的異常穿透現象

為了要研究各種不同結構的異常穿透現象，我們利用光譜儀來量測穿透光頻譜，圖 5 為量測波浪狀連續金屬膜的光譜分析。首先量測膜厚為 45 nm 沒有作任何結構的金膜，如圖 5(a) 所示，觀察到其光穿透率只在 510 nm 的光波段有約 15% 的穿透率，這是來自於金本身材料的特徵穿透率 (intrinsic peak)，會隨著金屬膜厚度的不同而改變穿透強度。經過 12 MPa 壓印之後製作出 400 nm 週期的波浪狀連續金屬膜 (請見圖 3(c))，在 530 nm 與 680 nm 光波段上有一點穿透率的提昇，是來自於不同模態的表面電漿共振行為，我們經過計算各材料的介電係數，並導入表面電漿公式後得知：530 nm 是空氣/金屬介面的共振模態；670 nm 則為金屬/光阻介面上的模態。如此微弱的穿透光強度增幅，最主要的理由來自於金屬兩邊材料折射率的不匹配 (mismatch)，因為金屬膜在壓印成連續金屬膜之後，是屬於空氣/連續金屬膜/光阻的非對稱結構，因此導致金屬膜兩側不匹配的折射率造成兩邊的表面電漿共振模態不相同，當然無法由金屬膜的空氣/金屬這側傳遞至金屬/光阻那側。

我們進一步在波浪狀連續金屬膜結構上旋塗折射率匹配層 (index match layer)，也就是旋塗與金膜

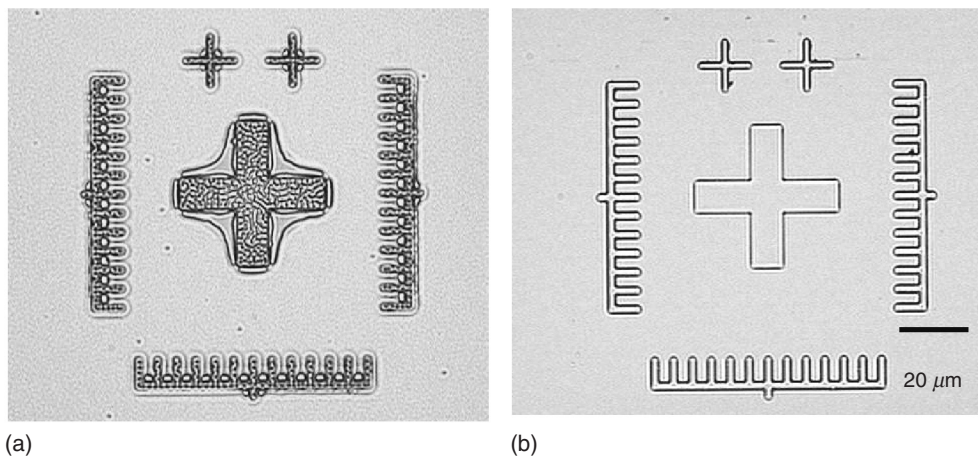
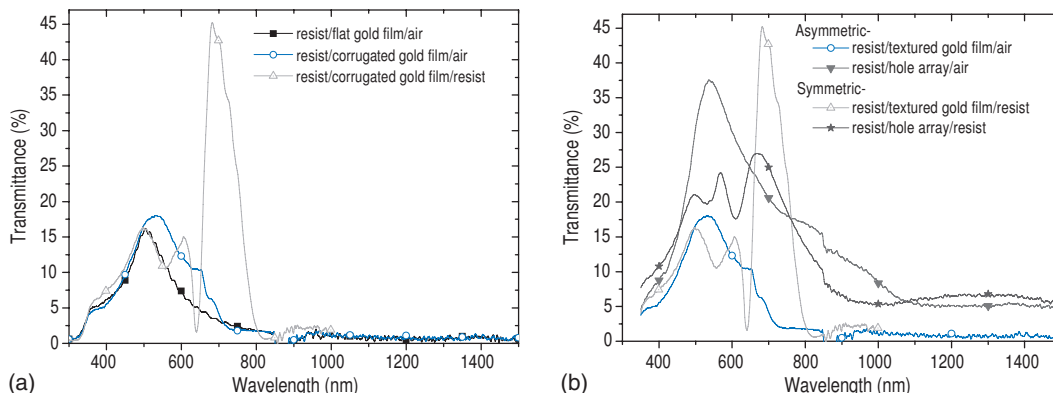


圖 4. 光學顯微鏡圖：不同溫度下所壓印出的金屬圖形，(a) 130 °C 與 (b) 60 °C。

圖 5.
(a) 45 nm 波浪狀連續金屬膜透光譜圖，(b) 波浪狀連續金屬膜與金屬矩陣洞列透光譜圖比較。



底下相同的光阻材料，使得結構成為光阻／連續金屬膜／光阻這樣的對稱性結構。圖 5(a) 中的綠線，在 680 nm 處有很明顯的表面電漿共振穿透波峰出現，且穿透率高達 45%。相較於之前的非對稱結構，在旋塗上折射率匹配層的對稱結構中可以明顯地觀察到表面電漿共振現象。此結果有足夠的證據支持波浪狀連續金屬膜高穿透率的原因是來自於匹配的表面電漿共振。經過公式計算後，折射率匹配的連續金屬膜在 650 nm 波段所增強的穿透率來自於光阻／金屬的共振模態。

4. 金屬矩陣洞列的異常穿透現象

圖 3 的結果顯示，利用奈米直印金屬技術在深寬比的模板上能夠製作出週期 400 nm 的矩陣洞列金屬膜，圖 3(d) 為非連續金屬膜的結構。我們也將奈米直印金屬所作出來的矩陣洞列作光譜分析於圖 5(b)，並將連續金屬膜與金屬矩陣洞列在上匹配層前後的光譜圖放置在一起作穿透率比較。

當結構壓印完成後，還處於非對稱結構的金屬矩陣洞列 (空氣／金屬矩陣洞列／光阻) 已經可以觀察到在波段 530 nm 之穿透率大幅度提高至 38% (褐色線)，而相同的折射率不匹配的情況下，連續金屬膜 (紅線) 僅有 17% 的穿透率。首先，無論是矩陣洞列還是連續金屬膜，在 530 nm 的光穿透率，都因為 510 nm 金屬本身的特徵穿透率 (約 15%) 而提高。有關於矩陣洞列在折射率不匹配的情況下，卻有相較於連續金屬膜更加明顯的異常穿透現象，我們認為原因是連續金屬膜的結構並不像矩陣洞列一樣是有穿孔的，矩陣洞列在空氣／金屬的表面電漿共振可以沿著孔洞傳遞至另一側，而連

續金屬膜如果金屬膜介面折射率不匹配的話，表面電漿波會被金屬擋住，無法傳遞至另一面。

隨後將此兩種結構都旋塗上折射率匹配層，使其皆成為光阻／金屬／光阻的對稱結構，可以看到週期為 400 nm 矩陣洞列所引發表面電漿共振的波段為 680 nm，光穿透率為 27%。這個結論並不是說在金屬矩陣洞列上旋塗了折射率匹配層後，反而光穿透率會從 38% 降至 27%，之前我們強調在 530 nm 處的空气／金屬表面電漿共振強度有一部分是被 510 nm 的材料特徵穿透率所拉高的，扣除掉此項並修正穿透率後，金屬矩陣洞列旋塗上折射率匹配層僅提高 3% 的穿透率，這代表著表面電漿波因為可以延著孔洞傳遞至金屬另一側，所以折射率匹配層對於穿透光強度影響不大。另外，也觀察到在 680 nm 波段上結構為連續金屬膜 (綠線) 明顯比矩陣洞列 (藍線) 擁有窄且強的穿透波峰。

5. 時域有限差分法模擬結構光場分布

我們使用時域有限差分法來模擬光場在結構內分布的情形，這有助於進一步釐清光波在波浪狀連續金屬膜是如何將入射光由金屬的一側傳遞至另一側。時域有限差分法是隨時變的計算電磁波遭遇到每一個介面並解其邊界條件，它可以將結構中隨時變的光強度分布圖顯示出來，因此可由時域有限差分法的圖中分析光是如何從波浪狀金屬膜中穿透的機制。

如圖 6 所示，我們分析膜厚 45 nm、週期為 400 nm，且對稱結構下的波浪狀連續金屬膜，因為由實驗得知其表面電漿共振波段為 680 nm，模擬入射光設定光波長為 680 nm，並且將光源設定在結構上方 1 μm 的位置。圖 6(a) 為模擬光場經過膜厚

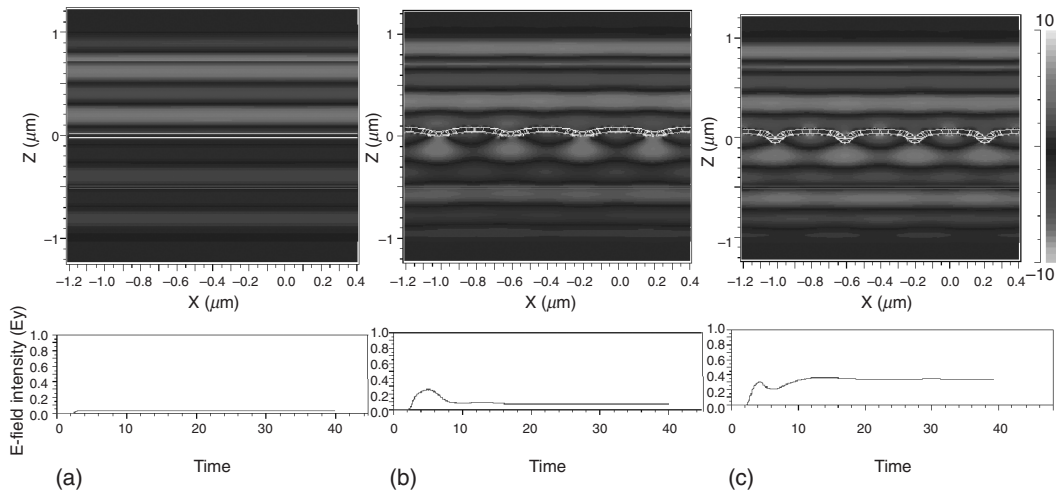


圖 6. 時域有限差分法模擬結果，(a) 45 nm 平金膜，(b) 結構深度為 40 nm 的波浪狀連續金屬膜，(c) 結構深度為 90 nm 的波浪狀連續金屬膜。

為 45 nm 的平板金膜，因為 680 nm 已經遠離了金本身材料的特徵穿透波段 (510 nm)，因此大部分的光都被反射或被金給吸收掉，可看到光強度經過金薄膜後大幅度減弱，電場強度幾乎趨近於零。相同的分析方式，在圖 6(b) 中設計了週期為 400 nm 且結構深度較淺 (40 nm) 的波浪狀金膜，明顯的可以看到光場開始集中在波浪狀的尖端，並穿透過金屬膜的進場光分布情形。由結構下方的偵測器所測得的電場強度，顯示穿透光強度明顯的提高至 15%。更進一步設計較深的金膜結構，見圖 6(c) 所示，深度至 90 nm 處結構會有更多的光集中至波浪狀金屬膜的尖端，引致更高的光強度穿透過 45 nm 金膜後再耦合成遠場光。偵測器顯示約 40% 的光能夠在這個連續波浪狀金膜中穿透過去。該模擬結果導向一件重要的現象，對於連續週期性的金屬膜而言，結構深度越深，光集中在尖端的強度越強，會有越高的穿透率。

6. 結構深度增強異常穿透現象

為了利用實驗證明連續金屬膜在越深的結構有

較強的穿透率，製作相同週期而不同結構深度的連續金屬膜成為此研究的關鍵。使用全像曝光 (holographic exposure) 的方式控制結構深度是很困難且繁複的，因為光阻本身的非線性靈敏度會造成製程上的難度。奈米直印金屬技術在這裡提供了一個方便的製程，只要使用較高的壓力，即可輕易的製作出較深的結構深度。如圖 7 所示為電子顯微鏡圖，我們將壓印壓力由 2 MPa 提升到 16 MPa，相對應製作出的波浪狀結構深度也會隨之加深，從 20 nm 加深至 130 nm。可以利用此方式製作較深 (或是稱為較小的尖端曲率半徑) 的結構，直接證明結構深度與表面電漿共振強度的明顯關係。

圖 7 針對各個相同 45 nm 膜厚、400 nm 週期卻不同結構深度的波浪狀連續金膜量測其光穿透率，我們鎖定量測 550 nm – 1000 nm 的光波段，可以明顯的看到隨著壓印的壓力越大 (2.5 MPa – 16 MPa)，光穿透率也隨之提升 (3% – 50%)。為了釐清此穿透強度增幅不是因為壓印導致金屬膜變薄所致，則分析在 510 nm 與 800 nm – 1000 nm 這些不屬於表面電漿共振頻率的波段，隨著壓印的壓力變

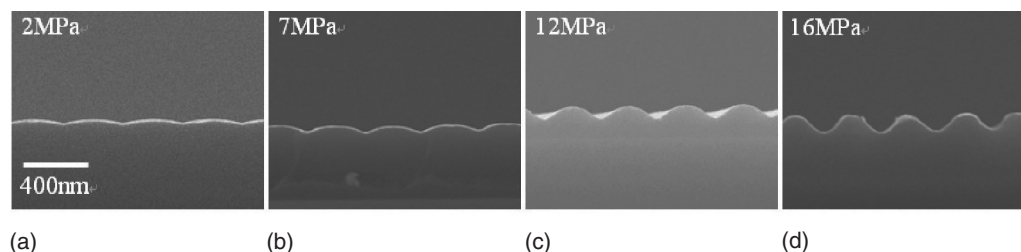


圖 7. 不同壓印壓力控制波浪狀連續金屬膜的結構深度：(a) 2 MPa、(b) 7 MPa、(c) 12 MPa 與 (d) 16 MPa。

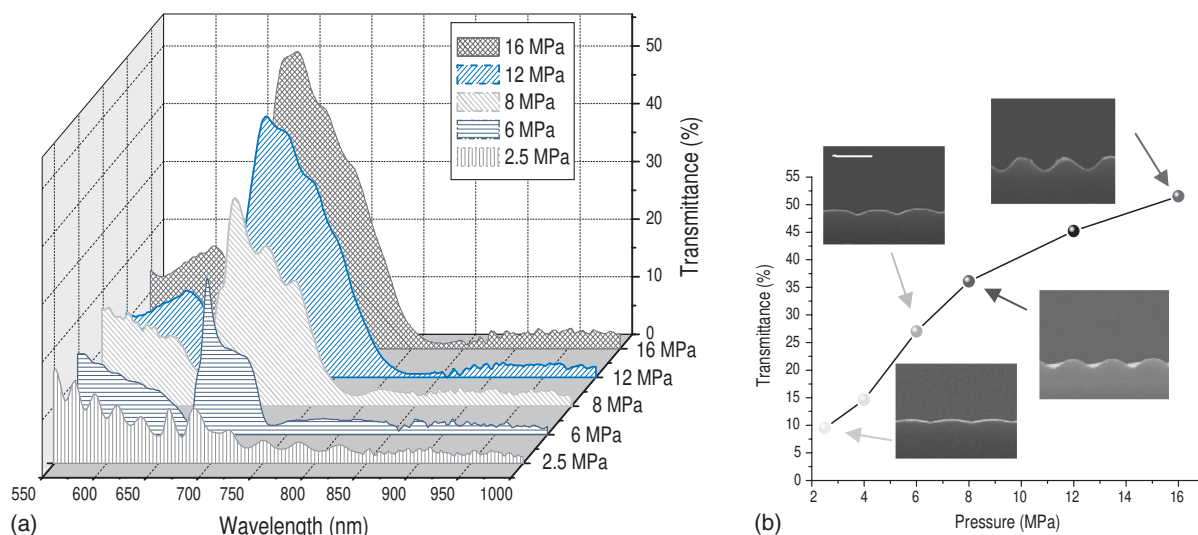


圖 8. 不同結構深度波浪狀連續金屬膜的穿透光譜圖比較：(a) 壓印壓力由 2 MPa 升高至 16 MPa，(b) 在 680 nm 波段，波浪狀連續金屬膜深度與穿透率關係。

大，穿透率並沒有明顯的改變。由研究結果顯示，壓印後的金膜並沒有造成厚度上的改變。前述 510 nm 為金的特徵穿透頻率，會隨著金屬膜厚度而有不同的穿透率，故此結果強烈的支持壓印造成的穿透率上升不是來自於金膜變薄，而完全來自於表面電漿共振被增幅的結果。

奈米直印金屬技術是一個相當有潛力製作彩色濾光片的製程，不需要像傳統利用鍍多層膜結構的方式，利用破壞性干涉方式製作的彩色濾光片，除了要注意各層材料的折射率，在鍍膜時需要精準地控制每一層的膜厚⁽¹⁶⁾。利用奈米直印技術製作的彩色濾光片，主要是因為利用表面電漿共振來控制其穿透光的工作波段，還附加了能夠利用深度來控制光穿透強度。只要選用適合的模板週期，調整所需的壓印壓力就可以製作出理想的光穿透波段與強度。因為是利用週期性金屬結構來提高入射光的波向量，使其能夠與金屬的表面電漿波耦合，所以波浪狀金屬膜也能夠應用在表面電漿為基礎的生物感測器上 (SPR-based biosensors)。該技術也能夠應用在各種光電元件上，利用表面電漿共振現象提高元件的外部量子效率 (external quantum efficiency, EQE)。

四、結論

本文所述之壓印技術稱為「奈米直印金屬技術」，其用來直接定義各種金屬圖形。為了降低直接壓印金屬所需的極高壓力，我們在金屬膜底下墊了一層高分子軟墊，這能夠使壓印壓力降至傳統壓印方式的百分之一。奈米直印金屬技術可以利用不同形狀的模板，配合不同的壓印壓力來控制其壓印的圖形，包括連續波浪金屬膜與金屬矩陣洞列。利用控制金屬圖案的技術，可用來研究表面電漿共振對於異常穿透效率的影響，發現在連續金屬膜的部分，穿透率的影像來自於金膜結構尖端的曲率半徑。若曲率半徑越小 (結構越尖)，表面電漿共振在尖端的強度則會特別強，進而使得穿透強度提高。當入射光電場集中在金屬膜尖端的一側，將會傳遞到另一側的介面上，結構有匹配折射率的對稱性結構時，就引發遠場的異常穿透現象。因為連續波浪狀結構是利用表面電漿共振增幅其穿透率，而又和結構週期深度有關，故奈米直印金屬技術是一個極具潛力製作彩色濾光片的技術，不需像傳統使用多層膜結構製作的彩色濾光片。此技術也能夠應用在各種光電元件上，利用表面電漿共振現象提高元件的外部量子效率。

參考文獻

1. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, *Nature*, **391**, 667 (2005).
 2. W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, *Nature*, **424**, 824 (2003).
 3. H. W. Gao, J. Henzie, and T. W. Odom, *Nano Lett.*, **6**, 2104 (2006).
 4. N. Bonod, S. Enoch, L. Li, E. Popov, and M. Neviere, *Opt. Express*, **11**, 482 (2003).
 5. I. Avrutsky, Y. Zhao, and V. Kochergin, *Opt. Lett.*, **25**, 595 (2005).
 6. Z. M. Zhu and T. G. Brown, *J. Opt. Soc. Am. A*, **17**, 1798 (2000).
 7. S. Wedge, I. R. Hooper, I. Sage, and W. L. Barnes, *Phys. Rev. B*, **69**, 245418 (2004).
 8. B. F. Bai, L. F. Li, and L. J. Zeng, *Opt. Lett.*, **30**, 2360 (2005).
 9. M. T. Li, L. Chen, and S. Y. Chou, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3322 (2001).
 10. D. H. Kim, W. J. Chin, S. S. Lee, S. W. Ahn, and K. D. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 071120 (2006).
 11. T. Martensson, P. Carlberg, M. Borgstrom, L. Montelius, W. Seifert, and L. Samuelson, *Nano Lett.*, **4**, 699 (2004).
 12. B. C. Okerberg, C. L. Soles, J. F. Douglas, H. W. Ro, A. Karim, and D. R. Hines, *Macromolecules*, **40**, 2968 (2007).
 13. V. Reboud, N. Kehagias, M. Zelsmann, C. Schuster, M. Fink, F. Reuther, G. Gruetzner, and C. M. Sotomayor Torres, *Opt. Express*, **15**, 7190 (2007).
 14. H. Yoshihiko, U. Toshihiko, K. Tomohiro, and M. Takashi, *SPIE-Int. Soc. Opt. Eng.*, **74**, 5220 (2003).
 15. M. C. Cheng, C. K. Sung, and W. H. Wang, *J. Materials Processing Tech.*, **191**, 326 (2007).
 16. H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters*, Institute of Physics (2001).
-
- 莊尚餘先生為國立清華大學原子科學碩士，現為國立台灣大學材料科學與工程學研究所博士班學生。
 - 陳學禮先生為國立台灣大學光電工程博士，現任國立台灣大學材料科學與工程學研究所副教授。
 - 郭珊珊小姐為國立台灣大學材料科學與工程學碩士，現任台灣積體電路股份有限公司工程師。
 - Shang-Yu Chuang received his M.S. in nuclear science from National Tsing Hua University. He is currently a Ph.D. student in the Institute of Materials Science and Engineering at National Taiwan University.
 - Hsuen-Li Chen received his Ph.D. in photonics and optoelectronics from National Taiwan University. He is currently an associate professor in the Institute of Materials Science and Engineering at National Taiwan University.
 - Shang-Shang Kuo received her M.S. in materials science and engineering from National Taiwan University. She is currently an engineer at Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited.