

# 以石英奈米錐狀陣列作為具抗反射性質之次波長結構

## Fabrication of Nanocone Subwavelength Antireflection Structures on Quartz Substrates

湯喻翔、黃茂榕、蘇健穎、蕭銘華

Yu-Hsiang Tang, Mao-Jung Huang, Jien-Yin Su, Ming-Hua Shiao

本研究結合自組裝奈米球微影 (self-assembled nanosphere lithography, SANL) 及感應耦合電漿離子蝕刻 (inductively coupled plasma reactive ion etching, ICP-RIE) 兩項技術，製作出具規模排列之錐狀陣列結構，可應用於光學系統之抗反射層。我們發展一種簡單的製程，成功地在石英玻璃基板上製作出次波長結構，期望能達到寬頻抗反射的效果，以增加入射光對石英玻璃的穿透率。實驗結果證實利用薄光阻格狀結構搭配震盪塗佈法，可以在石英玻璃上製備一單層且整齊排列之聚苯乙烯奈米球，並以此為遮罩進行乾式蝕刻。在乾式蝕刻方面，我們利用  $C_4F_8/He$  電漿對石英玻璃進行蝕刻，以聚苯乙烯奈米球為遮罩所得到的結構為一圓柱狀，藉由調整蝕刻製程參數，則可得到尖錐狀結構。實驗結果顯示最佳的次波長抗反射結構為高度 190 nm、直徑 108 nm、深寬比可達 1.81:1 之錐狀陣列，並使得波長 300–1000 nm 的入射光之有效反射率下降到 6.75%，達到寬頻抗反射的效果。

This study combined self-assembled nanosphere lithography (SANL) and inductively coupled plasma reactive ion etching (ICP-RIE) for fabricating orderly arranged nanocone arrays on a quartz substrate. We established a simple process for successfully fabricating subwavelength structure (SWS) on glass substrate, achieving broadband anti-reflection (AR) and increasing the transmittance of incident light across the quartz glass. This novel process arranged a monolayer of nanospheres onto  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  test specimen. In addition, we evaluated various etching times of ICP-RIE for producing SWS surfaces, which resulted in various specific surface areas for the quartz surfaces. Smoothly tapered SWS surfaces with a width of 108 nm and a height of 190 nm could be produced on quartz wafer. This fabricated SWS decreased the surface reflectance less than 6.75% in the visible light spectrum.

### 一、前言

近年來，抗反射 (anti-reflection, AR) 結構已經被普遍地應用於光學元件上，用以抑制多餘的反

射光，在許多元件應用中，並不希望這些反射光的存在，所以常需要加入抗反射層設計，用於提升光學系統的穿透率並大幅降低反射率。抗反射技術的應用很廣，舉凡需透過視窗螢幕讓眼睛接

收訊息的顯示產品或增加太陽能電池發電效率的光學元件都可以發現它的蹤跡<sup>(1)</sup>。因此，為了有效抑制光之反射率，各種抗反射製作技術紛紛被開發出來，目前抗反射製作技術分為兩種，包括光學鍍膜 (optical coatings or multilayered films) 與次波長結構 (subwavelength-structure, SWS)，然而以傳統鍍膜來達成抗反射功能，經常面臨製程成本太高或大面積生產困難等問題。除了傳統的乾式製程與濕式製程外，微奈米技術在此應用上也呈現了優異的效果，例如次波長結構 (SWS)、奈米多孔隙薄膜 (nano-porous film) 等，不同抗反射技術在文獻中也被廣泛探討<sup>(2)</sup>。

2001 年 Toyota 等人<sup>(3)</sup> 在矽質石英 (fused silica) 以由上而下 (top-down) 方式製作抗反射元件，使用電子束微影技術 (E-beam lithography) 定義金屬點陣列遮罩，並結合反應離子蝕刻技術 (reactive ion etching, RIE)，製備出具有次微米結構的錐狀陣列。量測結果顯示，抗反射結構表面的反射率在 400–800 nm 之波長範圍小於 0.5%。然而由於電子束微影技術製程耗時，不適用於製作大面積的抗反射結構，也限制其在光學元件的應用。

基於上述，本研究利用自組裝奈米球微影技術，可以迅速地獲得奈米週期性的圖案，避免其他複雜且昂貴的奈米顯影技術，較傳統製程具備有更好的成本優勢，再配合感應耦合電漿離子蝕刻技術，得到具規則排列之次微米錐狀陣列結構，以應用於抗反射元件之開發。自組裝奈米球微影技術具有低成本及規則排列圖案的特點，選用聚苯乙烯 (polystyrene) 奈米球作為自組裝反應的材料，能輕易定義出奈米等級的圖形陣列。此外藉由球體尺寸的選擇與堆積層數的控制，有效地改變圖案形狀及圖案尺寸。而感應耦合電漿離子蝕刻技術則具有高深寬比特性，同時應用範圍廣且具有技術成熟、半導體製程相容性高之特點。因此，在本研究中利用奈米錐狀優異的性質及能提供高深寬比的特性，作為抗反射元件的結構，預期可改善抗反射結構表面的反射率，使抗反射元件穿透率提升。

## 二、抗反射結構

### 1. 抗反射結構定義

在自然界中，當入射光穿過不同介質就會發生穿透與反射的現象。假設入射光垂直通過介質的話，就可定義出穿透率與反射率。在許多複雜的光學系統裡，如何降低反射率是十分重要的。自然界中有許多抗反射結構，其中仿生物概念「蛾眼 (moth eye)」表面具有尺寸小於波長的突起結構 (< 300 nm)，對於增加表面光學特性所產生之抗反射效果，可有效抑制反射率與增加界面間穿透率，且具有寬頻域波長及大視野範圍特性。

目前光學抗反射方法主要分為兩類：(1) 鍍膜技術 (anti-reflection coating, ARC)；(2) 次波長結構 (SWS)。這兩種方法皆有類似的原理，皆利用漸變折射率的概念，避免交界面因折射率差異過大形成高反射效應。但是，多層膜技術卻存在黏著性較差、熱匹配不佳以及多層膜堆疊穩定性不好等問題<sup>(4)</sup>。相較之下，次波長表面結構，比起傳統的鍍膜技術，具有更好的抗反射效果，像是抑制波長與角度範圍較寬、優異的疏水性及不受材料選擇限制等優點，同時在製作上亦不困難，具有相當高的發展性。

根據次波長表面結構之抗反射特性，當表面結構尺寸接近波長時，其光學繞射現象影響逐漸增加，如為減少繞射特性而設計之光學元件結構，改善方式為縮減結構間距 (其表面結構尺寸則小於波長約為 1/2 至 1/3 波長尺寸)，且增加結構深度 (次波長結構具備高深寬比特性)<sup>(5)</sup>。在材料選擇方面，次波長結構可在多種半導體基材的表面上製備，如矽 (Si)、砷化鎵 (GaAs)、銻化鎵 (GaSb) 及氮化鎵 (GaN) 等，可增加光學效率於光電元件產品之應用，包括太陽能電池、光偵測器及發光二極體。另一方面，以透明石英玻璃和高分子薄膜基材作為光電元件之應用，包括顯示器、投影光學設備、眼鏡及超透明玻璃。雖然石英玻璃的折射率 (1.43–1.47) 低於半導體材料，但經過空氣和玻璃之間光的不連續性，造成玻璃只有 92% 的穿透率，導致光學設備的性能降低<sup>(6)</sup>。因此，在一具有好幾組光學元件的光學系統中，能同時抑制反射率與增加穿透率，將變成重要的課題。

## 2. 抗反射結構製作方式

到目前為止，次波長結構已經藉由各種方法被製作在矽基板上，而目前常用於定義次微米尺度的微影技術，主要有由上而下 (top down) 與由下而上 (bottom up) 兩種不同的方式。由上而下的技術包括一般的光學微影 (photolithography)、電子束微影 (E-beam lithography)、干涉式微影 (interference lithography)、奈米壓印 (nanoimprint lithography) 等成像技術<sup>(7-10)</sup>。1973 年 P. B. Clapham、M. C. Hutley 兩人於 Nature 期刊首先發表製作仿自然界蛾眼結構，其製程利用全像干涉的方法在玻璃表面上塗佈光阻，以人工方式製作小於波長的圓錐形規則陣列，尺寸大小約為 200 nm 左右，表面圓錐型光阻陣列結構具有降低反射率的效果。1999 年 K. Hane 教授首先利用電子束微影及迅速原子束 (fast atom beam etching) 兩種方式製作週期性排列的二次波長結構陣列，此次波長結構形貌為錐狀、深度為 350 nm、週期性距離為 150 nm，反射率可以從原本矽基板的 57% 降低到 0.5%。

2008 年 Chia-Jen Ting 等人使用干涉式微影技術在聚對苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate, PET) 塑膠基板製作一次波長結構，尺寸大小高度約 150 nm、寬度與週期性距離約 230 nm，反射率在 400–700 nm 與 750–1800 nm 波段分別為 19.9% 與 45.5%。2003 年 Stephen Y. Chou 教授使用奈米轉印技術，成功地在矽基板上製作大面積奈米柱陣列結構，此二維的次波長抗反射結構為錐狀，深度約 520 nm、週期性距離約 200 nm，可見光的波段內平均反射率降至 5%。

由下而上的製程方法是一種利用原子或分子間規則排列定義圖案的製程，如分子自組裝技術 (molecular self assembly)、金屬奈米粒子技術 (metal nanoparticles)、陽極氧化鋁技術 (anodic aluminum oxide, AAO) 等<sup>(11-13)</sup>。2008 年 Wei-Lun Min 等人利用分子自組裝模板技術定義矽基板與玻璃基板之次波長結構，結構尺寸高度約 1.8  $\mu\text{m}$ 、寬度與週期性距離約 250 nm，量測矽基板與玻璃基板之反射率可以從原先 35% 降至 2.5% 與 4.5% 降至 0.5%。

2001 年 K. Hane 教授又利用具有規律性的陽極氧化鋁技術，用轉印方式來定義矽基板表面上的

圖形結構，取代原先的電子束微影的昂貴製程，再用迅速原子束來蝕刻出次波長的結構，所製作出的抗反射結構具有週期性距離約 100 nm、深寬比約 12 左右，在可見光的波段內反射率可以從 40% 降低到 1.6% 左右。上述各項方式皆可定義次微米尺度圖形，技術上各有其長短，但是除了分子自組裝技術外，大致上皆需要使用昂貴的儀器，且製程耗時不易量產；而使用自組裝技術製作次波長結構，具有製程簡單、低成本、省時及再現性等優點。

## 三、實驗設計

次微米錐狀結構的抗反射機制如圖 1 所示，當光線射入含有錐狀結構之晶片時，由於結構產生的多平面，使得光線可在結構之間產生多次的反射、入射動作，而增加光的穿透效率。由文獻及實驗結果可得知反射率可從 30% 下降至 15%。另有文獻指出錐狀結構之反射率遠低於其他各種結構，且在越接近 90° 之入射光，更可顯示出錐狀結構之重要。

實驗的流程如圖 2 所示，主要分為自組裝微影與感應耦合電漿離子蝕刻兩部分，實驗過程如下所述。

本實驗使用之晶片為四吋石英玻璃基板，厚度為 500  $\mu\text{m}$ 。晶片使用前切割成 2 × 2  $\text{cm}^2$  的尺寸，並分別使用  $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2 = 4:1$  的清洗液、丙

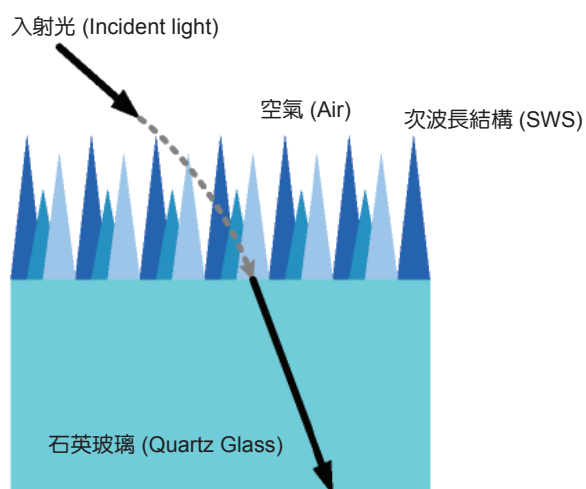


圖 1. 錐狀結構抗反射示意圖。

酮 (acetone) 及甲醇 (methyl alcohol)，以超音波震盪器震洗 1 hr、30 min、30 min。在三種清洗製程之間，使用去離子水沖洗 5 min，最後將晶片保存於甲醇中。本實驗採用美國 Polysciences 公司生產的 200 nm 的聚苯乙烯奈米球溶液，以及界面活性劑 Triton X-100。用甲醇與 Triton X-100 以 400:1 的比例混合成界面活性混合液，將聚苯乙烯 (polystyrene) 奈米球溶液與界面活性混合液以 1:48.2 之比例調配成震盪塗佈微影液。利用薄光阻的方式製作線寬 40  $\mu\text{m}$  的格狀結構，其線寬高度較奈米球直徑稍小，使得奈米球能規則排列於格狀結構中。利用滴管吸取調配好的奈米球微影液，並將晶片置於超音波震盪器之上，經由滴管將 1–1.5 mL 的奈米球微影液滴在晶片上，並使用超音波震盪器 (ultrasonic cleaner) 以 40 W 之功率震盪，使奈米球體均勻地排列在具有格狀結構的晶片上，如圖 2(a) 所示。

完成奈米球遮罩後，將塗佈好的晶片置於感應耦合電漿離子蝕刻機台內，並使用氧電漿，在定壓力 10 mTorr、氧氣流量 30 sccm、ICP 蝕刻功率 500 W 與 RF 蝕刻功率 100 W 之條件下，控制蝕刻時間 15 s，可縮減奈米球直徑大小為 180–140 nm，這將作為蝕刻圖案之遮罩。將縮球後的奈米球遮罩置於 ICP-RIE 機台內，使用  $\text{C}_4\text{F}_8/\text{He}$ : 12/84 sccm 二種氣體混合比例下，在定壓力 10 mTorr、基板冷卻溫度 5  $^\circ\text{C}$ 、ICP 蝕刻功率 1500 W 與 RF 蝕刻功率 120 W 之條件下，對未被奈米球覆蓋的石英玻璃進行蝕刻，實驗中設定不同的蝕刻時間，在完成蝕刻製程後即可形成具週期性排列的次微米錐狀結構陣列，如圖 2(b) 所示。研究的過程以 SEM 觀察每道製程所產生的表面形貌並探討實驗結果。隨後將晶片放入二氯甲烷 ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) 與丙酮中，去除奈米球，如圖 2(c) 所示。

最後利用週期性次波長結構以結合抗反射與疏水的特性，經過不同蝕刻時間的次波長錐狀結構試片以及平面試片，使用液珠接觸角量測儀 (water contact angle) 以量測此次波長結構陣列之疏水效果，透過加強光電元件的表面疏水性將可使元件具有自我清潔的能力，將會更具有吸引力。另外，對於以上述方法製作的次波長結構表面進行紫外光—

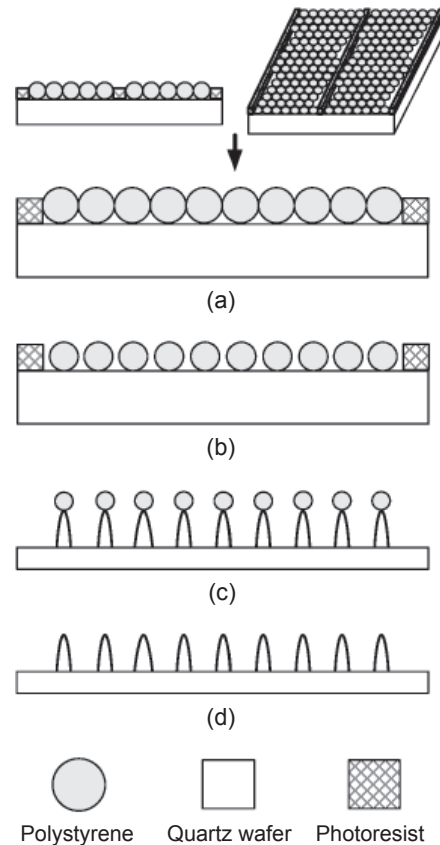


圖 2. 次波長錐狀陣列之製程示意圖：(a) 結合薄光阻製作格狀結構及震盪塗佈法排列奈米球，(b) 使用氧電漿進行奈米球縮球，(c) 感應耦合電漿離子蝕刻技術，(d) 去除奈米球。

可見光—近紅外光光譜儀 (ultraviolet-visible-near infrared spectrophotometer) 以量測此次微米結構陣列之反射率與穿透率，量測波長範圍為 300–1300 nm，證明該表面具有抗反射效果，且可改善光學元件穿透率。

## 四、實驗結果

### 1. 次波長錐狀陣列成形製作

#### (1) 自組裝奈米球微影技術

本實驗發現，結合薄光阻製作格狀結構及震盪塗佈法後，可得到趨近規則排列的奈米球陣列，而單層奈米球最密堆積之面積約為  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ ，塗佈結果如圖 3(a) 所示。

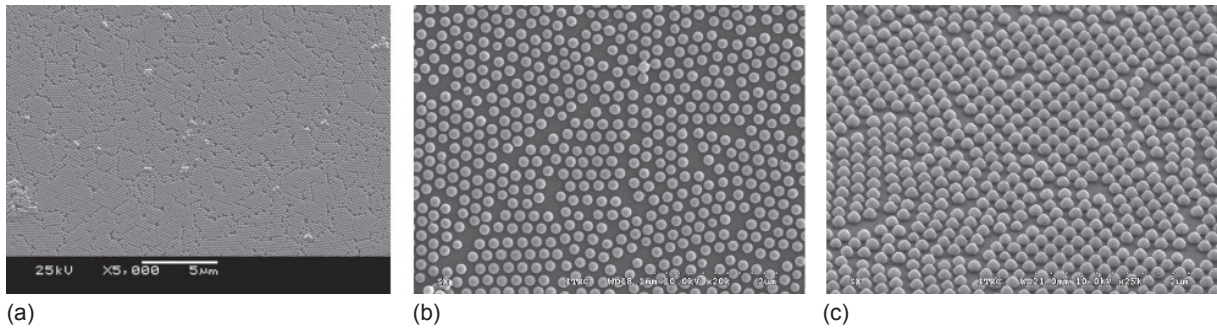


圖 3. (a) 結合薄光阻製作格狀結構及震盪塗佈法排列奈米球之 SEM 圖；(b) 及 (c) 分別為奈米球經氧電漿縮減直徑後之 SEM 俯視及斜視圖。

## (2) 感應耦合電漿離子蝕刻製程

圖 3(b) 與圖 3(c) 分別為奈米球經 ICP-RIE 蝕刻機以氧電漿縮減直徑後之俯視及斜視圖。圖 3(b) 為使用氧電漿蝕刻 15 s 後，奈米球直徑由 200 nm 縮減為 150 nm。從圖 3(c) 斜視圖中發現，奈米球經氧電漿蝕刻後，除了奈米球直徑已從原先的 200 nm 縮減至約 150 nm 之外，並可發現上層奈米球與下層奈米球的外形已呈現上窄下寬之現象，表示下層奈米球因上層奈米球之遮蔽效應導致蝕刻速率略慢。

使用氧電漿進行奈米球縮球製程後，以聚苯乙烯奈米球作為石英玻璃的蝕刻遮罩，進行蝕刻的製程中，可有效地將蝕刻圖案轉移至石英玻璃。圖 4(a) 至圖 4(g) 分別為蝕刻時間 30 至 180 秒的實驗

結果。由圖 4(a) 可知，當蝕刻時間為 30 秒時，得到直徑約為 188 nm 之石英圓柱陣列，蝕刻深度大約 187 nm，已能夠形成柱體形狀，並且保有奈米球原有的外形，但柱體形貌並不完整。當蝕刻時間增加至 60 秒時，得到直徑約為 171 nm 之石英錐狀陣列，蝕刻深度大約 220 nm，此時上層奈米球與下層石英玻璃的外形還能保持為柱狀，但柱體與柱體間的距離增加，這表示聚苯乙烯奈米球的邊緣已遭到侵蝕，使得石英玻璃上層柱體變的較細。

由圖 4(d) 中得知，在蝕刻時間達到 120 秒時，得到直徑約為 109 nm 之石英錐狀陣列，蝕刻深度大約 198 nm，此時上層奈米球與下層氮化矽的外形已呈現上窄下寬之現象，形貌已符合實驗設計之錐狀陣列結構，並且由 SEM 圖中發現蝕刻深

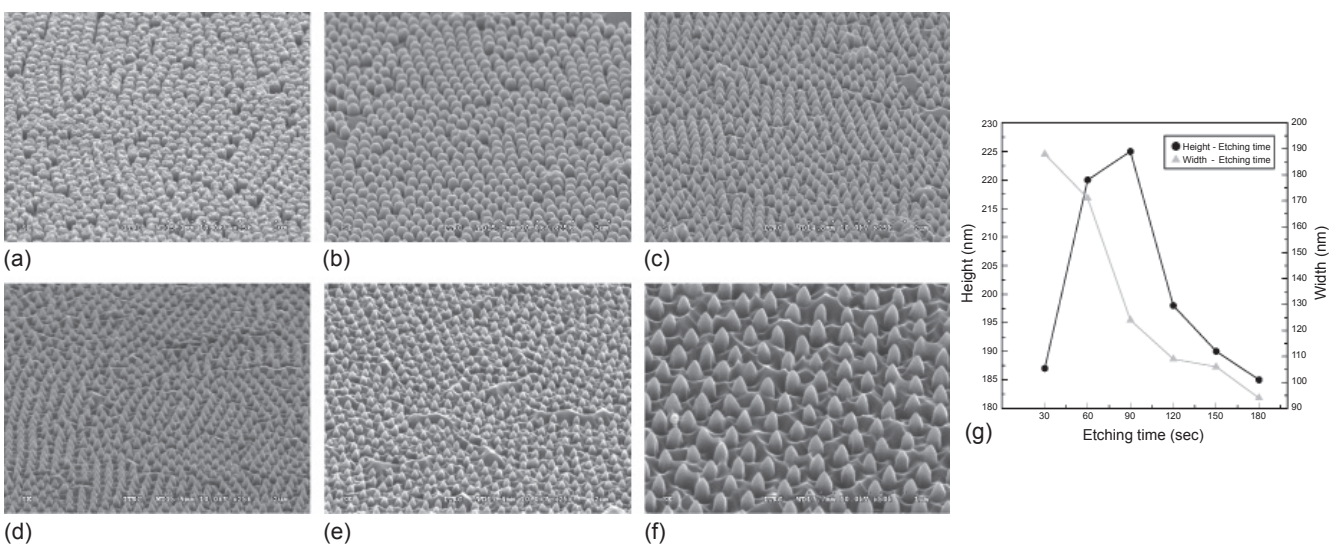


圖 4. 不同 RIE 蝕刻時間以及去除奈米球後之次波長抗反射結構電子顯微鏡圖：(a) 30 秒，(b) 60 秒，(c) 90 秒，(d) 120 秒，(e) 150 秒，(f) 180 秒；(g) 不同 RIE 蝕刻時間下，蝕刻深度與結構線寬之對應曲線圖。

度開始遞減，原因為蝕刻選擇比不足與奈米球蝕刻遮罩不夠抵擋電漿蝕刻。當蝕刻時間為 180 秒時，得到直徑約為 94 nm 之石英錐狀陣列，蝕刻深度大約 185 nm，從圖中觀察錐狀結構間距已明顯擴大，且發現底層粗糙度不佳。

從實驗結果 SEM 圖中發現，隨著蝕刻時間增加，結構表面形貌由類柱狀結構變為類拋物狀結構，最後成為圓錐狀結構。圖 4(g) 為不同 RIE 蝕刻時間下，蝕刻深度與結構線寬之對應曲線圖。圖 5(a) 及圖 5(b) 分別為石英玻璃經  $C_4F_8/He$  電漿蝕刻後，形成錐狀陣列結構之 AFM 俯視及階高圖。

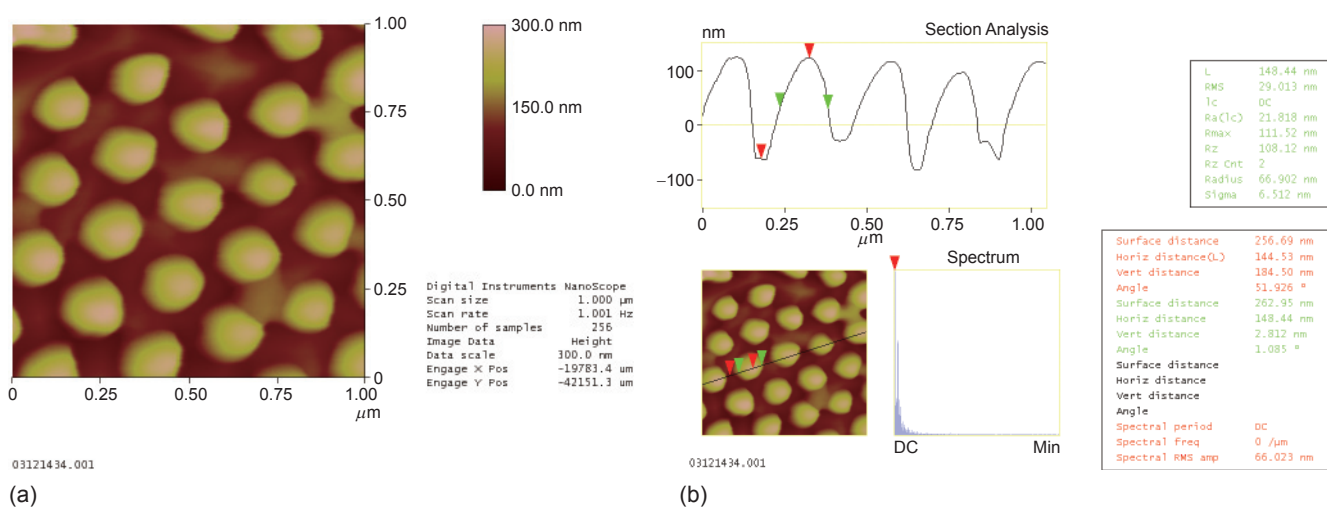


圖 5. (a) 及 (b) 分別為石英玻璃經  $C_4F_8/He$  電漿蝕刻後，形成錐狀陣列結構之 AFM 俯視及階高圖。

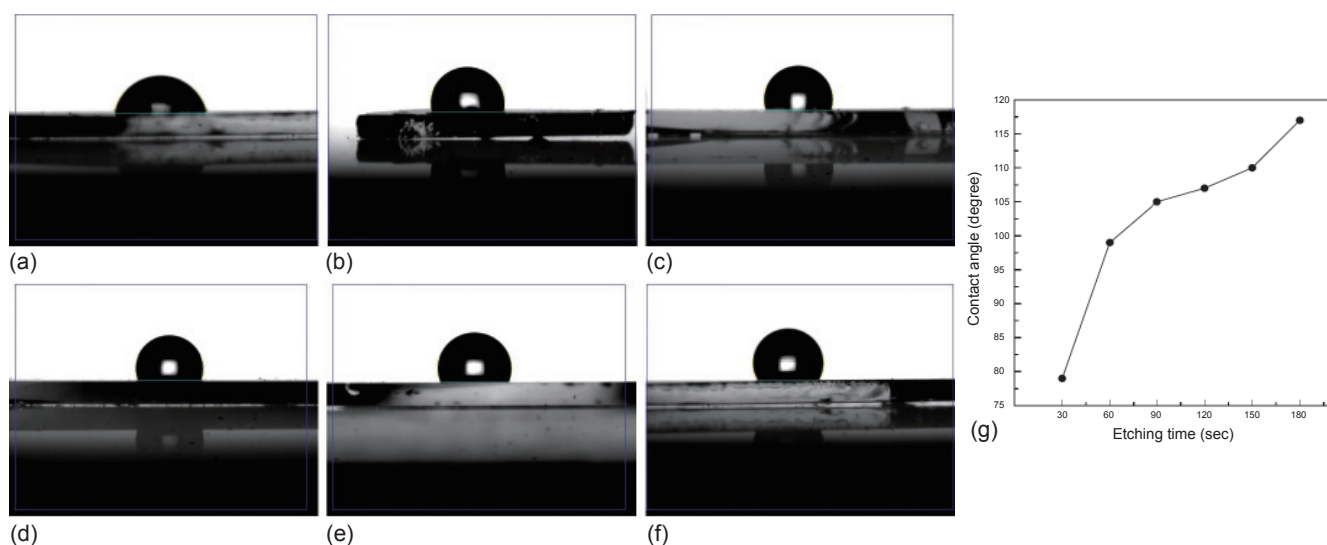


圖 6. 不同 RIE 蝕刻時間下及去除奈米球後之接觸角量測圖：(a) 30 秒，(b) 60 秒，(c) 90 秒，(d) 120 秒，(e) 150 秒，(f) 180 秒；(g) 不同 RIE 蝕刻時間下，液珠接觸角之對應線圖。

實驗結果如圖所示，錐狀結構高度約為 185 nm，寬度約為 148 nm，因此錐狀結構的深寬比可達 1.25:1，證明本實驗以電漿蝕刻控制蝕刻時間來製作次波長結構是可行的。

## 2. 次波長錐狀陣列接觸角量測

將製作完成之次波長錐狀陣列結構進行接觸角量測，此結構具有高比表面積特性，可提升液珠於石英玻璃基板之疏水效果。如圖 6(a) 至圖 6(g) 所示為不同 RIE 蝕刻時間下及去除奈米球後之液珠接觸角量測圖。由實驗結果發現，當蝕刻時間

為 30 秒時，接觸角為  $78^\circ$ ；當蝕刻時間增加為 90 秒時，接觸角為  $105^\circ$ ；當蝕刻時間增加為 180 秒時，接觸角為  $117^\circ$ 。經由以上量測結果，如圖 6(g) 所示，顯示蝕刻時間增加，其液珠接觸角也隨之增加，驗證錐狀柱體確實能提供大表面積的特性，作為石英玻璃的結構，可均勻分散液珠來提高石英玻璃接觸角。

### 3. 次波長錐狀陣列反射率與穿透率量測

將製作完成之次波長錐狀陣列結構進行反射率與穿透率量測，此次波長結構外觀形貌為圓錐狀，依據不同蝕刻時間變化，產生不同間距及深寬比之圓錐狀陣列結構，並且探討此抗反射結構對反射率與穿透率之變化情形。圖 7(a) 與圖 7(b) 所示為反射率及穿透率量測結果，圓錐狀結構之間距與深寬比分別為未蝕刻之平面試片：10 秒 (65 nm 與 0.99)、20 秒 (85 nm 與 1.29)、30 秒 (125 nm 與 2)、60 秒 (175 nm 與 1.79) 及 150 秒 (220 nm 與 1.81)，在波長 300–1800 nm 範圍中，發現具有次波長結構的石英基板在波長 400 nm 處之反射率，可以從原本石英基板的 9.5% 降低到 6.75%，印證了具有次波長結構的表面能夠降低原先基板的反射率。而穿透率可以從原本石英基板的 92% 增加到 94%。

實驗結果顯示，抗反射效果隨著石英基板表面次波長結構深度變深而更趨明顯，相對可得到的反射率就會越低，穿透率也就增加。意即當材料表面具有小於波長的突起結構，能夠在空氣與表面結構之間產生有效的梯度折射率 (gradation of refractive index)，可以抑制反射並且減低光的散射。本實驗中，最佳的  $C_4F_8/He$  蝕刻時間為 150 秒，所製作出的奈米錐狀陣列次波長結構抗反射層使波長 300–700 nm 的平均反射率下降到 6.75%。相較於未蝕刻前之石英玻璃，奈米錐陣列次波長結構抗反射層可以降低短波長 300–700 nm 的反射率。經過以上比較結果，可以證明我們所設計的石英奈米錐狀結構具有高度可調性的抗反射奈米錐狀陣列，的確可以提升抗反射的能力。

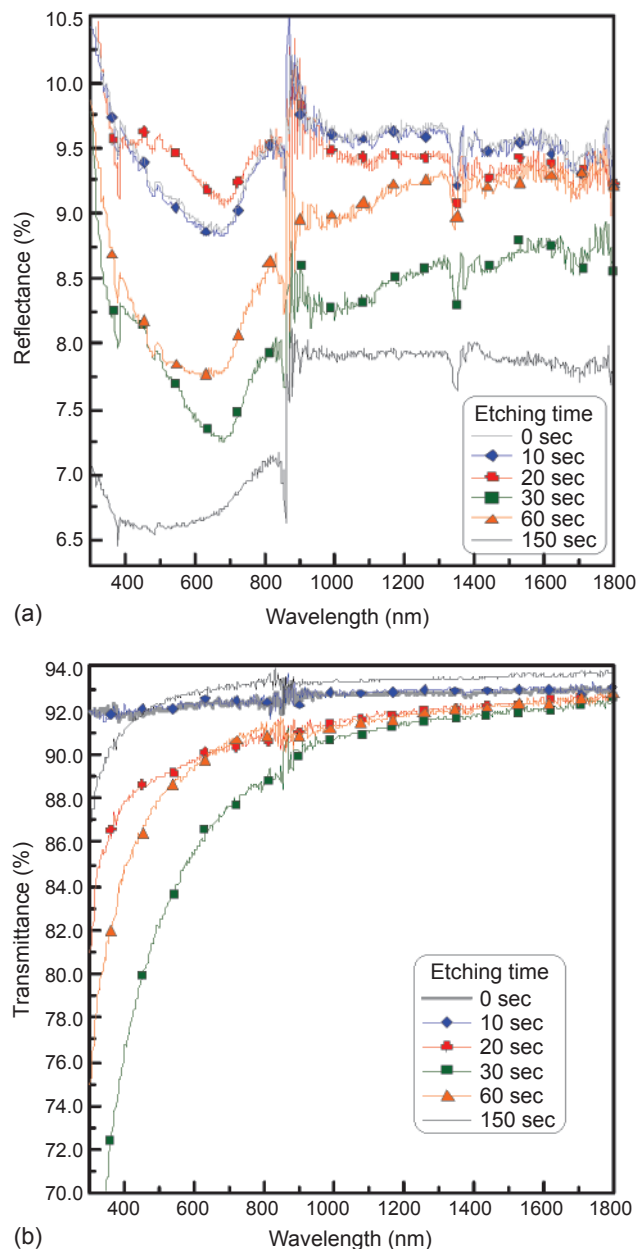


圖 7. 不同深寬比的次波長結構在不同波長範圍的光譜圖：(a) 反射率，(b) 穿透率。

## 五、結論

本文已成功結合「自組裝奈米球微影」及「感應耦合電漿離子蝕刻」技術，製作出具規模排列之次波長錐狀陣列結構，由實驗過程與結果方面來探討，茲簡述如下：

(1) 利用本研究所發展的震盪塗佈法結合薄光阻製

作格狀結構的微影方式，可於  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  的試片獲得趨近完美排列的單層奈米球。

- (2) 在感應耦合電漿離子蝕刻中，利用  $\text{C}_4\text{F}_8/\text{He}$  電漿對石英玻璃進行蝕刻，可製作出尖錐狀結構高度為 190 nm、直徑線寬為 108 nm、深寬比可達 1.81:1 之錐狀陣列。
- (3) 將製作完成之次波長錐狀陣列結構進行接觸角量測，當蝕刻時間為 180 秒時，其接觸角為  $117^\circ$ ，驗證錐狀柱體確實能提供大表面積的特性，作為石英玻璃的結構，可提高液珠於石英玻璃接觸角。
- (4) 本研究中，最佳的  $\text{C}_4\text{F}_8/\text{He}$  蝕刻時間為 150 秒，所製作出的奈米錐狀陣列次波長結構抗反射層使反射率下降到 6.75%，反射率值較尚未蝕刻的值約小了 2.75%，印證了具有次波長結構的表面能夠降低原先基板的反射率。

## 參考文獻

1. K. Hadobas, S. Kirsch, A. Carl, M. Acet, and E. F. Wassermann, *Nanotechnology*, **11**, 161 (2000).
2. 丁嘉仁, 許沁如, 聶雅玉, 張哲璋, *機械工業雜誌*, **282**, 71 (2006).
3. H. Toyota, K. Takahara, M. Okano, T. Yotsuya, and H. Kikuta, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L747 (2001).
4. Y. Kanamori, M. Sasaki, and K. Hane, *Optics Letters*, **24** (20), 1422 (1999).
5. 黃衍春, *機械工業雜誌*, **25**, 156 (2005).
6. C. H. Y. Koo, D. K. Yi, S. J. Yoo, and D.-Y. Kim, *Advanced Materials*, **16**, 274 (2004).
7. L. R. Harriott, *proceedings of the IEEE*, **89** (3), 366 (2001).
8. D. S. Kim, S. C. Hohng, V. Malyarchuk, Y. C. Yoon, Y. H. Ahn, K. J. Yee, J. W. Park, J. Kim, Q. H. Park, and C. Lienau, *Physical Review Letters*, **91**, 143901 (2003).
9. Y. Kanamori, H. Kikuta, and K. Hane, *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (Part 2, No. 7B), L735-L737 (2000).
10. K. Kintaka, J. Nishii, A. Mizutani, H. Kikuta, and H. Nakano, *Opt. Lett.*, **26** (21), 1642 (2001).
11. W.-L. Min, B. Jiang, and P. Jiang, *Adv. Mater.*, **20** (20), 3914 (2008).
12. Y. H. Kang, S. S. Oh, Y.-S. Kim, and C.-G. Choi, *Microelectron. Eng.*, **87** (2), 125 (2010).
13. T. Yanagishita, K. Nishio, and H. Masuda, *Applied Physics Express*, **1**, 067004 (2008).



湯喻翔先生為國立台灣師範大學機電科技所碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心助理研究員。

Yu-Hsiang Tang received his M.S. in mechatronic engineering from National Taiwan Normal University. He is currently an assistant researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



黃茂榕先生為國立中山大學機械與機電工程學系博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Mao-Jung Huang received his Ph.D. in mechanical & electro-mechanical engineering from National Sun Yat-sen University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蘇健穎先生為國立交通大學博士候選人，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

James Su is a Ph.D. candidate at National Chiao Tung University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蕭銘華先生為國立中興大學材料科學與工程學系博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心研究員兼奈微米加工製作廠廠長。

Ming-Hua Shiao received his Ph.D. in materials science and engineering from National Chung Hsing University. He is currently a researcher and division manager of Nano/MEMS Shop at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.