

## 奈米銀粒子溶液激發表面電漿波特性之研究

陳子江，蘇文寬，林瑤冷

國防大學中正理工學院電機工程學系

### 摘 要

本文提出一種利用表面電漿共振特性偵測奈米銀粒子濃度的新方法。從高解析穿透式電子顯微鏡(HRTEM)和紫外-可見光(UV-VIS)光譜儀量測的數據分析得知，當我們以 Nd -YAG 脈衝雷射為光源，Sodium dodecyl sulfate (SDS)為界面活性劑時，可以用雷射削熔法製作出平均粒徑約為 5 nm 的奈米銀粒子，溶液的吸收光譜約在波長 405 nm 的位置呈現出表面電漿共振的吸收峰，同時吸收峰的強度隨銀粒子的相對濃度降低而減弱。由於奈米銀粒子與界面活性劑之水溶液的濃度變化會影響到激發表面電漿波的共振角度。經由量測玻璃稜鏡/銀膜/奈米銀粒子之 SDS 溶液所組成之“Kretschmann”表面電漿波激發組態的反射率對入射角的關係圖後發現，共振角的角度偏移量約為  $0.132^\circ$ ，透過理論的模擬與實驗量測的分析後，推知本文所使用最大濃度之奈米銀粒子溶液的介電常數為 1.8188，所對應奈米銀粒子溶液的折射率為 1.3486。

**關鍵字：**“Kretschmann”組態，雷射削熔法，表面電漿波

## The Study of the Characteristic of Ag Nanoparticles in Aqueous Solution on Surface Plasmon Wave

Tzu-Chiang Chen, Wen-Kuan Su, and Yao-Leng Lin

*Department of Electrical Engineering, Chung Cheng Institute of Technology,  
National Defense University*

### ABSTRACT

A new method to detect the concentration of Ag nano-particles in aqueous solution by surface plasma resonance (SPR) was developed. Nano-particles were produced by laser ablation method in which the silver was heated by Nd -YAG laser and ablated in Sodium dodecyl sulfate (SDS) solution. The average particle size is 5 nm characterized by HRTEM. UV-VI absorption spectrum shows surface plasma resonance absorption peak around 405 nm and its intensity reduced upon the decreasing of Ag particle concentration. The exciting angle of surface resonance plasma depends on the concentration of laser ablated Ag nano-particle in SDS solution. Using a surface plasma resonance sensor with “Kretschmann” configuration (prism/Ag/dielectric), the SPR angle decreased with the increasing of relative Ag nano-particle concentration. The SPR angle shifted about  $0.132^\circ$ . Compared with simulation results of theory, we estimate the dielectric constant of Ag nano-particle aqueous solution is 1.8166 and refraction index is 1.3486.

**Key Words:** Kretschmann configuration, laser ablation, surface plasmon wave

文稿收件日期 92.4.8; 文稿修正後接受日期 93.4.1.  
Manuscript received April 8, 2003; revised April 1, 2004.

## 一、前言

近年來由於各項電子產品的小型化，使得相關電子元件尺寸要求日趨縮小，因此奈米級材料的製作與應用已成為世界各國競相發展的目標，主要是因為在此細微尺度下材料所呈現的獨特性質，大幅提高其科學的應用範疇，例如奈米粒子對強化觸媒及光電元件的性能上[1-3]即具有絕佳的效果。金屬奈米微粒的製作方法約略區分為化學法和物理法兩類，主要的化學法是將金屬鹽類在還原劑溶液中還原成金屬微粒[4]。雷射削熔法(laser ablation method)則是物理法中的重要製程之一，也是本文奈米粒子的製作方法，較常見的做法是使用雷射切削置於界面活性劑溶液中的金屬靶材以形成金屬奈米粒子[1-11]，使用液態的界面活性劑溶液的原因主要在方便奈米微粒的形成並避免粒子的再復合以利保存。因此研究奈米粒子溶液的特性成為重要的一環。

表面電漿波化學感測器，是一種簡單、非接觸、非破壞性的感測器，對於介質光學特性的變化具有良好的鑑別能力，目前已被應用在有機溶液[12-17]及生化的檢測上[18-21]，非常適合用於研究含有金屬奈米微粒之溶液的光學特性。

因此，我們利用具有“Kretschmann”組態的表面電漿波感測器來測量自行製作的奈米銀粒子溶液中反射率對入射角的光譜，同時配合表面電漿波的理论模擬分析結果，測得溶液中所含奈米粒子的濃度。輔以高解析穿透式電子顯微鏡和紫外-可見光光譜儀的量測分析，將使我們對於奈米銀粒子溶液的特性有進一步的剖析。

## 二、理論

從光學的反射和折射定律可知，當光由光密介質入射至光疏介質時，若入射角大於全反射臨界角度 $\theta_c$ 時將產生全反射現象。當發生全反射時，入射光並非在光密介質中完全反射，仍有些許的光進入光疏介質之中，此種現象與量子力學中的穿隧效應一樣，以衰減波(evanescent wave)的形式由光密介質進入光疏介質，入射到光疏介質的光波，不僅光強度隨遠離界面的距離呈指數性的衰減，沿著界面傳播的波向量也隨入射角度的不同而改變。因此，在特定條件下，衰減波會與存在於金屬和電介質界面的表面電漿振盪產生耦合震盪，激發產生表面電漿波[22]。

在具有自由電子之介質中，電磁波傳播的色散關係式可表成，

$$\omega^2 = \omega_p^2 + \frac{c^2 k^2}{\epsilon} \quad (1)$$

其中 $\epsilon$ 為介電常數， $c$ 為光波在真空中之傳播速度， $\omega_p^2$ 為電漿頻率(plasma frequency)，

$$\omega_p^2 \equiv \frac{4\pi n e^2}{\epsilon m} \quad (2)$$

(2)式中 $n$ 為電子濃度， $e$ 和 $m$ 分別表示電子基本電荷量和電子質量。(1)式所描述出的電磁波為一橫向波，其傳播方向平行於界面。

金屬/電介質界面的表面電漿振盪波向量函數 $k_{sp}$ 可表為

$$k_{sp} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (3)$$

其中  $\lambda_0$  為入射光波之波長， $\epsilon_m$  及  $\epsilon_d$  分別為金屬及介電質的介電係數[23]。

而光波在介面傳播的水平波向量  $k_x$ ，如下式

$$k_x = k_0 n_p \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_p \sin \theta \quad (4)$$

其中  $k_0$  為光波在自由空間的波數 (wavenumber)， $\lambda_0$  為入射光波在自由空間的波長， $n_p$  為入射光所在物質的折射率 (從入射光所穿透物質的折射率順序為  $n_p \rightarrow n_m \rightarrow n_d$ )。因為表面電漿波是金屬和電介質介面的橫向電子氣振盪，且從(2)、(3)兩式可知，若入射光直接由空氣入射至金屬表面，不論入射角  $\theta$  為何， $k_{sp}$  始終大於  $k_x$ ，故無法產生耦合。因此為滿足激發產生表面電漿波的條件，除需使用 TM 模態之入射光外，藉由耦合器來提高入射光波的水平波向量，以便  $k_x$  與表面電漿震盪波向量  $k_{sp}$  相互匹配是必須的。常用的耦合元件有稜鏡及光柵等。Kretschmann 組態便是學者常用的激發表面電漿波組態之一，其結構由稜鏡/金屬膜/電介電等組成之三層介質反射系統(如圖1)[23-26]。從圖1可知，因為入射光在金屬膜與電介質的介面上激發表面電漿波時，入射光波的能量將被限制在介面上，所以我們可從介面反射光之反射率的變化中偵知金屬膜與電介質的介面上是否激發產生表面電漿波。

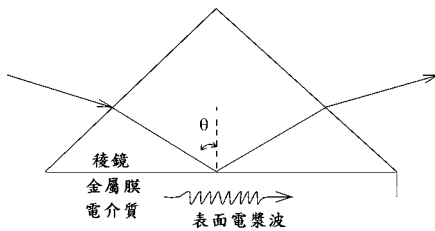


圖1.利用“Kretschmann”組態激發表面電漿波示意圖。

光波在多層介質的反射率可經由Fresnel公式來推導[24,27]，當有三層介質時，實驗中所量測到的反射率可表示成(5)式，

$$R_{123}(\theta) = |r_{123}(\theta)|^2 = \left| \frac{r_{12}(\theta) + r_{23}(\theta)e^{i2k_{z2}(\theta)d_2}}{1 + r_{12}(\theta)r_{23}(\theta)e^{i2k_{z2}(\theta)d_2}} \right|^2 \quad (5)$$

$$r_{12}(\theta) = \frac{\epsilon_2 k_{z1}(\theta) - \epsilon_1 k_{z2}(\theta)}{\epsilon_2 k_{z1}(\theta) + \epsilon_1 k_{z2}(\theta)} \quad (6)$$

$$r_{23}(\theta) = \frac{\epsilon_3 k_{z2}(\theta) - \epsilon_2 k_{z3}(\theta)}{\epsilon_3 k_{z2}(\theta) + \epsilon_2 k_{z3}(\theta)} \quad (7)$$

其中(6)式的  $r_{12}$  及(7) 式的  $r_{23}$  說明在(5)式中 1-2 及 2-3 層的反射係數。總反射率  $R_{123}(\theta)$  就等於總反射係數  $r_{123}(\theta)$  的絕對值平方， $k_{zi}$  為光波在介面傳播的垂直波向量，

$$k_z(\theta) = \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda_0} n_p - k_x^2(\theta)} \quad (8)$$

$R_{123}(\theta)$  為入射角  $\theta$  的函數，因此藉由量測通過Kretschman 組態時光波反射率隨入射角變化的情形，觀測出光波激發產生表面電漿波的現象。反射率  $R_{123}$  亦是各層物質介電常數  $\epsilon$  的函數，所以我們可藉由反射率與表面電漿波共振角的對應關係，推得待測介質介電常數的變化。

### 三、實驗與模擬

本實驗所用的銀奈米粒子是以雷射削熔法製得，實驗設置請參考圖2。所用雷射為Nd-YAG 脈衝雷射 (Quantel Brilliant, Q-switched Nd-YAG laser)，波長為1064 nm，脈衝寬度(pulse duration) 5 ns，頻率20 Hz，照射至銀錠的雷射光點截面積約 $0.6\text{ mm}^2$ ，雷射脈衝功率350 mJ/pulse，界面活性劑採用2g的 sodium dodecyl sulfate ( $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OSO}_3\text{Na}$ ; SDS)粉末溶入100 ml去離子水，形成0.07M濃度的界面活性劑水溶液，圓柱形的銀錠 (Gredmann, 純度 99.995 %) 體積約為 $3\text{ mm}\times 6\text{ mm}^2$ 。

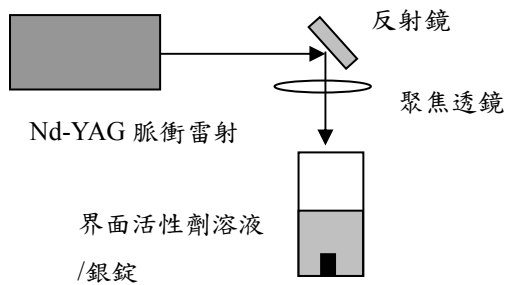


圖2.雷射削熔法製作奈米銀粒子之示意圖。

奈米銀粒子的SDS溶液吸收的光譜量測，是使用光譜儀 (Hitachi U4001 Spectrometer)，測量光波波長範圍在350~600 nm之間。並以高解析穿透式電子顯微鏡 (Philip MC-200)觀察奈米銀粒子的粒徑大小，觀測樣品的製作過程是先將待測溶液滴在一鍍有碳膜的銅網上，為免水蒸汽或溶劑影響顯微鏡觀測，樣品在置入顯微鏡真空腔體前已經在溫度 $200^\circ\text{C}$ 的乾燥室加熱乾燥，再使用高解析穿透式電子顯微鏡觀測並拍攝照片。

圖3為表面電漿波感測器示意圖，其中裝置在電腦控制的旋轉平台(Unice, 06CTS-2)上的“Kretschmann”組態(結構為BK7稜鏡/銀膜

/SDS溶液)、光源(採用氦氖雷射光源，CW Radiation Inc.)、銀膜(係利用Balzers真空蒸鍍系統(BA510)蒸鍍在稜鏡底部，利用石英監控器監控蒸鍍厚度，所得銀膜厚度約56 nm)和待測溶液(由一容積約1毫升的樣品容器承裝，鍍有銀膜的稜鏡則緊貼在樣品容器完全接觸樣品溶液)等組成。在每個樣品量測後均以去離子水沖洗樣品容器三次，以避免影響下一個樣品的濃度。

量測的樣品共5個，其中編號Ag100和Ag000分別代表用雷射照射銀錠10 min.後所製得的銀奈米粒子SDS溶液和未含銀奈米粒子的SDS溶液，其濃度分別定義為1與0；而以不同體積比例(Ag100:Ag000)混合配製成的水溶液則分別以編號 Ag075(3:1)、Ag050(2:2)、Ag025(1:3)表之，其相對濃度分別為0.75，0.5，0.25含銀奈米粒子的SDS溶液。

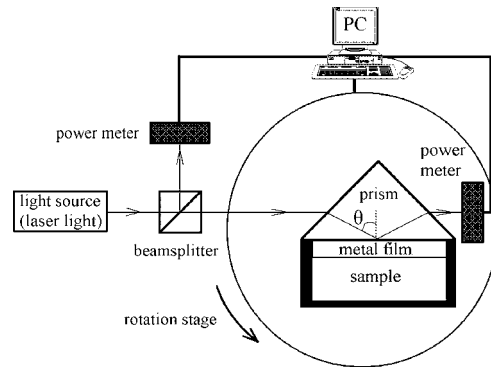


圖3.表面電漿波感測器示意圖。

在計算機模擬部份，我們的做法是將(5)式寫成Matlab程式，進行反射率對入射角變化的模擬。模擬時入射光的波長、稜鏡介電常數、銀膜介電常數等參數分別是實驗中所使用的He-Ne雷射波長及所購稜鏡、銀錠物質

的介電常數( $\lambda_0=632.8 \text{ nm}$ 、 $\epsilon_p$ (即 $\epsilon_1$ )=2.28、 $\epsilon_m$ (即 $\epsilon_2$ )=-18+0.47i)。

#### 四、結果與討論

在整個銀奈米粒子的製程中，我們觀察到利用波長為1064nm的脈衝雷射光照射至浸泡SDS溶液的銀錠後，由於局部的銀晶體表面，瞬間受到強度甚大之雷射光照射，將使的銀原子鍵結受到破壞或變形，致使銀原子有機會以微粒形式脫離晶體結構而進入周圍的溶液。於是銀錠表面隨著照射時間的增加逐漸失去光澤。存在於溶液中銀粒子因為介面活性劑的阻隔，減少了彼此碰撞、復合或與其他物質起化學反應的機率，故粒徑相當微小且分布均勻。奈米銀粒子加入後，溶液的顏色也由透明轉為黃褐色，顯示溶液的光學特性產生了變化差異。

圖4為不同濃度之奈米銀粒子SDS溶液的UV-VIS吸收光譜圖，其中橫座標為波長，縱座標為吸收率，符號“■”、“▲”、“●”、“★”則分別代表Ag100、Ag075、Ag050、Ag025等四個樣品的吸收光譜圖。各光譜都呈現近似Lorentz曲線方程式的吸收峰，經由精確附合分析後得知各光譜皆在405 nm附近出現一吸收峰。Kondow的及其研究群將此吸收現象歸因於奈米銀粒子的表面電漿波共振吸收[8-9]。此一金屬奈米粒子的表面電漿共振吸收可利用米氏理論(Mie theory)加以說明；當均勻分佈在溶劑中不相互反應(non-interacting)的金屬微粒在外加電場作用時，會使金屬微粒表面產生一誘發電場，因此系統總電場可表為入射的外加電場與誘發電場的總和：

$$\vec{E}(z, r, \theta) = E_0 \vec{e}_z + \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1 r_1^3}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1 r_1^3} \times E_0 (2 \cos(\theta) \vec{e}_r + \sin(\theta) \vec{e}_\theta) \quad (9)$$

其中 $\epsilon_1$ 及 $\epsilon_2$ 分別為金屬微粒與溶劑的介電常數， $r_1$ 是金屬微粒的半徑。從(9)式可知，當

$\epsilon_2 = -2\epsilon_1 r^3$  時誘發電場將趨於無限大，同

時由於誘發電場具有 $r^{-3}$ 的關係，故此極強的誘發電場僅在具有介電常數為負值的金屬微粒的表面形成。又由於是外加電場與金屬微粒表面的自由電子氣之集體運動的耦合振盪所產生的共振現象，被稱為表面電漿共振。所以當入射光的波長與金屬微粒的表面電漿共振波長一致時，入射光能量將被吸收形成吸收峰[28-30]。另外，我們也發現吸收峰的強度隨樣品中奈米銀粒子的含量減少而降低，半高寬度則反增。這些特徵指出奈米銀粒子相對濃度與吸收峰的強度及半高寬有關[9]。

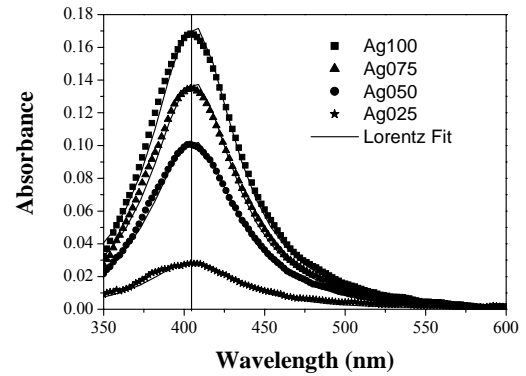
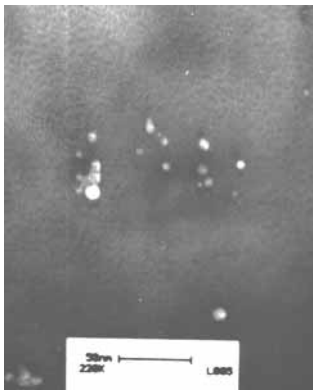


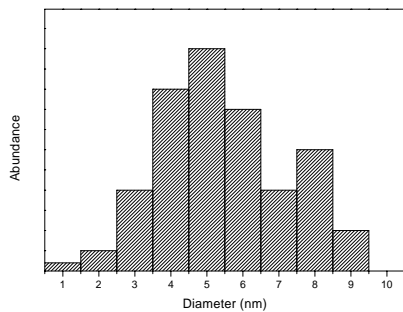
圖 4.不同濃度之奈米銀粒子的 SDS 溶液的 UV 吸收光譜圖。

我們將 SDS 溶液之奈米銀粒子淬取出來，且依實驗步驟製成觀測樣本置於電子顯微鏡中觀察，得到如圖5(a)之照片。照片中出現的灰色斑點即為奈米銀粒子。分析並計算圖5(a)中銀粒子的粒徑大小及分佈，繪於圖5(b)。圖5(a)和(b)指出溶液中之銀粒子的平均粒徑約5 nm [10-11]。而藉由平均粒徑及量測

銀錠在經Nd-YAG脈衝雷射削熔10分鐘前後的重量變化關係，可推估所產生的銀奈米粒子濃度約為 $1.57 \times 10^{-7}$ 。



(a)



(b)

圖5.(a)奈米銀粒子TEM照片;(b)奈米銀粒子粒徑大小分佈。

使用表面電漿波化學感測器量測變化濃度之樣品的反射率對入射角的關係圖如圖6，其中橫座標為入射角，縱座標為反射率，且光譜已經歸一化，Ag000、Ag025、Ag050、Ag075、Ag100五個代表不同相對濃度的樣品，這五個樣品的SPW光譜圖則分別以“□”、“○”、“△”、“☆”、“◇”的符號代表之。從圖6我們可以發現所有光譜圖皆呈現一SPW的吸收谷，共振角約在 $71.156 \sim 71.288^\circ$ 之間。不含有奈米銀粒子Ag000(“□”)與含有

奈米銀粒子Ag100(“◇”)的SDS溶液兩者之共振角度約變化 $0.132^\circ$ ，顯示加入微量的銀奈米粒子至SDS溶液後會影響溶液的介電常數。當SDS溶液的相對濃度改變時(Ag025“○”、Ag050“△”、AG075“☆”)，共振角的位置則隨銀粒子相對濃度增加而減少，強度的變化量則不明顯。為了進一步解析光譜的對應參數關係，我們也利用式(5)的三層反系統的反射率公式來拟合圖6中的各光譜(參考圖中線圖部分)。經由模擬和實驗光譜二者的拟合結果得知Ag000、Ag025、Ag050、Ag075、Ag100等五個樣品的介電常數依序約為1.8209、1.8204、1.8198、1.8193、1.8188。

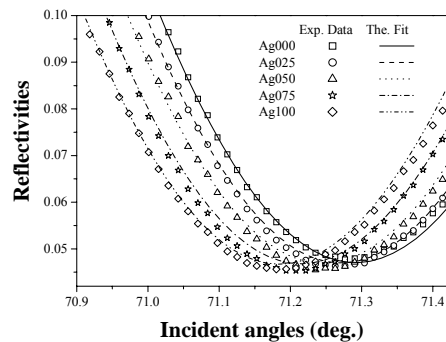


圖6.不同相對濃度之奈米銀粒子的SDS溶液的SPW模擬和實驗光譜圖。

我們將銀奈米粒子的SDS溶液之相對濃度對介電常數的關係繪於圖7，其中縱軸為介電常數值，水平軸為入射角，符號“+”表示SDS溶液之介電常數值。由圖7得知SPW共振角度會隨著銀奈米粒子濃度變化呈現一線性的變化關係(圖中實線部份， $\epsilon = 1.81878 - 0.0022c$ )，此對應關係可用來偵測銀奈米粒子的相對濃度。同理我們可以利用已知濃度之奈米粒子溶液為基準，來量測未知溶液之濃度。至此我們已更獲得許多有關奈米銀粒子溶液的

光學特性，並成功利用SPW化學感測器來辨識SDS溶液中微量銀奈米粒子的濃度變化。

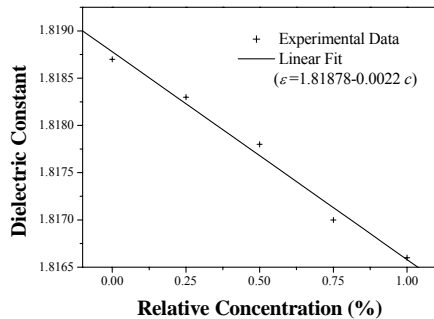


圖 7. 銀奈米粒子的 SDS 溶液之相對濃度對介電常數的關係圖。

## 五、結論

綜合上述實驗結果，我們發現利用波長 1064nm(350mJ/pulse) 的 Nd-YAG 脈衝雷射，0.07M 的 SDS 水溶液為界面活性劑，所製得奈米銀粒子平均粒徑約 5 nm，UV-VIS 吸收光譜的奈米銀粒子的特性吸收峰約在 405 nm，吸收強度隨奈米銀粒子相對濃度減少而降低。而透過 BK7 稜鏡 / 銀膜組成的 “Kretschmann” 組態表面電漿波感測器測量出溶液與金屬膜介面所產生表面電漿波光譜之共振吸收角會隨銀粒子相對濃度增加而由 71.288 度變小為 71.156 度，而銀奈米粒子之 SDS 溶液的介電常數則約由 1.8209 變化至 1.8188。此結果可推廣至各種奈米粒子濃度量測，亦可作為設計奈米粒子之即時監測系統的依據。

## 六、誌謝

本文係受國科會研究計畫編號 NSC-91-2115-E-014-003 與 NSC-90-2112-M-145-004 支助而得以順利完成，謹此致謝；同時對於中科院五所光電組、中正理工學院超快雷射實驗室及電顯實驗室分別在銀

膜鍍製、銀奈米粒子製備及 HRTEM 照像上的支援協助，本文作者謹致上深忱的謝意。

## 參考文獻

- [1] Chen, Y. H., and Yeh, C. S. “Laser Ablation Method: Use of Surfactants to Form the Dispersed Ag Nanoparticles,” *Colloids and Surfaces A*, Vol. 197, Issues 1-3, pp. 133-139, 2002.
- [2] Dolgaev, S. I., Simakin, A. V., Voronov, V. V., Shafeev, G. A., and Bozon-Verduraz, F., “Nanoparticles Produced by Laser Ablation of Solids in Liquid Environment,” *Applied Surface Science*, Vol. 186, Issues 1-4, pp. 546-551, 2002.
- [3] Simakin, A. V., Voronov, V. V., Shafeev, G. A., Brayner, R., and Bozon-Verduraz, F., “Nanodisks of Au and Ag Produced by Laser Ablation in Liquid Environment,” *Chem. Phys. Letters*, Vol. 348, Issues 3-4, pp. 182-186, 2001.
- [4] 郭清癸，黃俊傑，牟中原，“金屬奈米粒子的製造”，*物理雙月刊*，第二十三卷，第六期，第 614-624 頁，民國 90 年。
- [5] Quintana, M., Haro-Poniatowski, E., Morales, J., and Batina, N., “Synthesis of Selenium Nanoparticles by Pulsed Laser Ablation,” *Applied Surface Science*, Vol. 195, Issues 1-4, pp. 175-186, 2002.
- [6] Lyon, L. A., Musick, M. D., Smith, P. C., Reiss, B. D., Pena, D. J., and Natan, M. J., “Surface Plasmon Resonance of Colloidal Au-Modified Gold Films,” *Sensors and Actuators B*, Vol. 54, Issues 1-2,

- pp.118-124, 1999.
- [7] Yeh, M. S., Yang, Y. S., Lee, Y. P., Lee, H.F., Yeh, Y. H., and Yeh, C. S., "Formation and Characteristics of Cu Colloids from CuO Powder by Laser Ablation in 2-Propanol," *J. Phys. Chem.* Vol. 103, No. 33, pp. 6851-6857, 1999.
- [8] Mafune, F., Kohno, J. Y., Takeda, Y., and Kondow, T., "Structure and Stability of Silver Nanoparticles in Aqueous Solution Produced By Laser Ablation," *J. Phys. Chem.*, Vol. 104, No. 35, pp. 9111-9117, 2000
- [9] Mafune, F., Kohno, J. Y., Takeda, Y., and Kondow, T., "Formation and Size Control of Silver Nanoparticles by Laser Ablation in Aqueous Solution," *J. Phys. Chem.*, Vol. 104, No. 39, pp. 8333-8337, 2000
- [10] Mafune, F., Kohno, J. Y., Takeda, Y., and Kondow, T., "Formation of Gold Nanoparticles by Laser Ablation in Aqueous Solution of Surfactant," *J. Phys. Chem.*, Vol. 105, No. 22, pp. 5114-5120, 2001.
- [11] Mafune, F., Kohno, J. Y., Takeda, Y., and Kondow, T., "Dissociation and Aggregation of Gold Nanoparticles under Laser Irradiation," *J. Phys. Chem.*, Vol. 105, No. 38, pp. 9050-9056, 2001.
- [12] Homola, J., Yee, S. S., and Gauglitz, G., "Surface Plasmon Resonance Sensors: Review," *Sensors and Actuators B*, Vol. 54, Issues 1-2, pp. 3-15, 1999.
- [13] Cheng, Y. C., Su, W. K., and Liou, J. H., "Application of a Liquid Sensor Based on Surface Plasma Wave Excitation to Distinguish Methyl Alcohol from Ethyl Alcohol," *Opt. Eng.*, Vol. 39, No. 1, pp. 311-314, 2000.
- [14] Cheng, Y. C., Su, W. K., Lee, C. M., Chang, L. B., Liou, J. H., Shen, J. M., and Soong, T. W., "Design and Measurement of Dielectric Sensor Based on Surface Plasmon Excitation," *Applied Surface Science*, Vol. 136, No. 3, pp. 260-267, 1998.
- [15] Johnston, K. S., Yee, S. S., and Booksh, K. S., "Calibration of Surface Plasmon Resonance Refractometers Using Locally Weighted Parametric Regression," *Anal. Chem.*, Vol. 69, No. 10, pp. 1844-1851, 1997
- [16] Furuki, M., Kameoka, J., Craighead, H., G., and Isaacson, M. S., "Surface Plasmon Resonance Sensors Utilizing Microfabricated Channels," *Sensors and Actuators B*, Vol. 79, No. 1, pp. 63-69, 2001.
- [17] Matsubara, K., Kawata, S., and Minami, S., "Optical Chemical Sensor Based on Surface Plasmon Measurement," *Appl. Opt.*, Vol. 27, No. 6, pp. 1160-1163, 1988.
- [18] Matsubara, K., Kawata, S., and Minami, S., "Multilayer System for a High-Precision Surface Plasmon Resonance Sensor," *Optics Letters*, Vol. 15, No. 1, pp. 75-77, 1990.



- [19] Suzuki, M., Nakashima, Y., and Mori, Y., "SPR Immunosensor Integrated Two Miniature Enzyme Sensors," *Sensors and Actuator B*, Vol. 54, Issues 1-2, pp. 176-181, 1999.
- [20] Kabashin, A. V., and Nikitin, P. I., "Surface Plasmon Resonance Interferometer for Bio- and Chemical-Sensors," *Optics Communications*, Vol. 150, Issues 1-6, pp. 5-8, 1998
- [21] Wink, T., Zuilen, S. J. V., Bult, A., and Bennekon, W. P. V., "Liposome-Mediated Enhancement of the Sensitivity in Immunoassays of Proteins and Peptides in Surface Plasmon Resonance Spectrometry," *Analyze Chem.*, Vol. 70, No. 5, pp. 827-832, 1998.
- [22] Otto, A., "Excitation of Nonradiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection," *Zeitschrift fur physic*, Vol. 216, No. 4, pp. 398-410, 1968.
- [23] Kreschmann E., and Raether, H., "Radiative Decay of Non-Radiative Surface Plasmons Excited by Light," *Z. Naturforsch*, Vol. 23, No.12, pp. 2135-2136, 1968.
- [24] Kreschmann, E., "The Determination of the Optical Constants of Materials by Excitation of Surface Plasmons," *Z. Phys.*, Vol. 241, No. 4, pp. 313-324, 1971.
- [25] 蘇文寬, 李正民, 鄭益昌, 張連璧, 劉建宏, 許志民, "表面電漿波能量吸收光譜對金膜厚度變化的 Kretschmann 組態及化學偵測器之特性研究", *中正嶺學報*, 第二十七卷, 第一期, 第 91-97 頁, 民國 87 年。
- [26] Cheng, Y. C., Su, W. K., and Liou, J. H., "Application of a Liquid Sensor Based on Surface Plasma Wave Excitation to Distinguish Methyl Alcohol from Ethyl Alcohol," *Optic Engineering*, Vol. 39, No. 1, pp. 311-314, 2000.
- [27] Liao, C. H., Lee, C. M., Cheng, Y. T., Shyu, J. S., Su, W. K., "Resonant Properties of Long-Range Surface Plasmons in an Arbitrary Multilayer Structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, No. 10, pp. 5938-5944, 1999.
- [28] Ung, T., Liz-Marzan, L. M., and Mulvaney, P., "Gold Nanoparticle thin films," *Colloids and Surfaces A*, Vol. 202, Issues 2-3, pp. 119-126, 2002.
- [29] Link, S., and El-Sayed, M. A., "Spectral properties and relaxation dynamics of surface plasmon electronic oscillations in gold and silver nanodots and nanorods," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 103, No. 40, pp. 8410-8426, 1999.
- [30] 王俊凱, "奈米結構的電磁共振現象", *工業材料*, 第 190 期, 第 124-132 頁, 民國 91 年。