

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 應用於奈米微影之最佳化光學頭 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型  
計畫編號：NSC 95-2218-E-002-055-  
執行期間：95年08月01日至96年07月31日  
執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：李佳翰  
共同主持人：吳文中  
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：鄭逸偉、朱育成

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年10月28日

應用於奈米微影之最佳化光學頭

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫  
計畫編號：NSC 95-2218-E-002-055-  
執行期間：2006 年 08 月 01 日至 2007 年 07 月 31 日

計畫主持人：李佳翰  
共同主持人：吳文中  
計畫參與人員：鄭逸偉、朱育成

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

執行單位：台灣大學工程科學及海洋工程學系

中 華 民 國 96 年 10 月 28 日

# Fresnel Zone Plate 銀奈米結構應用於奈米微影之探討

鄭逸偉, 朱育成, 李佳翰

國立台灣大學 工程科學及海洋工程學系

10617 台北市羅斯福路四段一號

電話：+886-2-33665760, 傳真：+886-2-23929885, E-Mail：jjahan@ntu.edu.tw  
(NSC-95-2218-E-002-055)

摘要 --- 使用三維時域有限差分方法模擬 Fresnel zone plate 銀奈米結構，利用半導體製程製作設計元件及近場光學系統量測分析，用以探討表面電漿效應對於聚焦面光場強度之影響。

Keywords: *Fresnel zone plate, Plasmonics, Nanolithography,*

## 前言

在1998年，Dr. Thomas W. Ebbesen等人發現金屬薄膜上若存在週期性的孔洞時，會有異常的光穿透現象[1]，後續的研究者認為此現象與表面電漿(Surface Plasmon)相關[2-4]，表面電漿效應會受到入射光的角度、偏極化、表面結構等等之影響[5]，而Fresnel zone plate銀奈米結構的光場模擬分佈也被提出來分析[6]，利用表面電漿效應也可應用在設計奈米微影的系統[7-9]。在本文中，我們使用三維時域有限差分方法探討Fresnel zone plate銀奈米結構對於解析度之影響，並製作元件及使用近場光學實驗架構量測光場分佈。目的為設計並製作出能突破繞射極限的光學奈米結構，以期能達成奈米微影上之應用。

## 設計與模擬

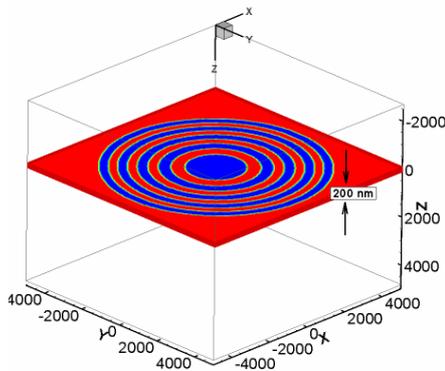
Fresnel zone plate 的設計公式如下所示[10]：

$$R_N = \sqrt{\left(r + \frac{N\lambda}{2}\right)^2 - r^2} \quad (1)$$

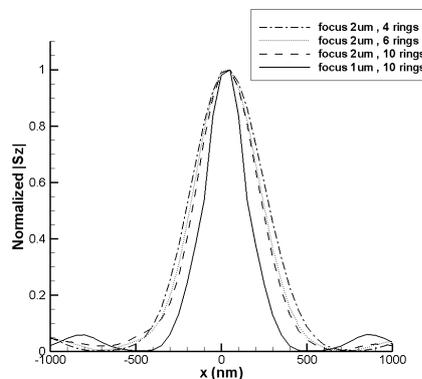
其中  $R_N$  為 Fresnel zone plate 的半徑， $r$  為聚焦長度， $N$  為圈數， $\lambda$  為波長。我們採用 Drude model 來描述銀在不同頻率  $f$  的介電常數[11]，如下式所示：

$$\varepsilon_D(\omega) = \varepsilon_D(\infty) - \frac{\omega_D^2}{\omega^2 + i\Gamma_D\omega} \quad (2)$$

其中  $\omega = 2\pi f$  且採用的參數為  $\varepsilon_D(\infty) = 2.36$ ， $\omega_D = 14013.933THz$  及  $\Gamma_D = 32.258THz$  [12]。我們使用時域有限差分方法及Uniaxial Perfectly Matched Layers吸收邊界來分析[13, 14]，模擬空間為  $10\mu m \times 10\mu m \times 7.5\mu m$ ，每一空間離散網格為  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 50nm$ ，時間離散受限於Courant condition  $\Delta t \leq \min\{\Delta x, \Delta y, \Delta z\}/(\sqrt{3}c)$ ，此處  $c$  為光速，因此我們取時間離散網格為  $\Delta t = 9.62 \times 10^{-17}sec$ ，並將時間次數設定為500次。圖一為根據式(1)所設計之Fresnel zone plate結構在時域有限差分方法的模擬空間示意圖，其中銀膜厚度為200nm，假設正向入射平面波由結構上方往正 $z$ 方向傳播，我們設計成像在Fresnel zone plate正下方  $1\mu m$  及  $2\mu m$  位置上。圖二為四個不同Fresnel zone plate之結構在  $y=0$  及  $z=0$  平面之  $x$  沿線的平均Normalized Poynting vector之  $z$  分量大小，對於聚焦在  $z=2\mu m$  之4, 6, 和10圈的Fresnel zone plate的全波半高寬分別為428nm, 422nm, 377nm，聚焦在  $z=1\mu m$  且10圈的Fresnel zone plate之全波半高寬為288nm。可以看出在具有10圈的Fresnel zone plate銀奈米結構能在  $z=1\mu m$  做出小於繞射極限之聚焦，在  $z=2\mu m$  也可以做出接近繞射極限之聚焦。



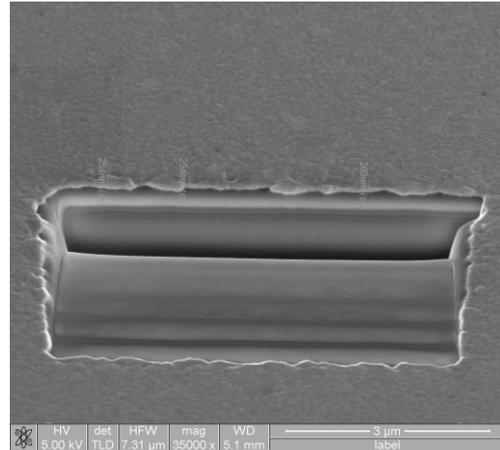
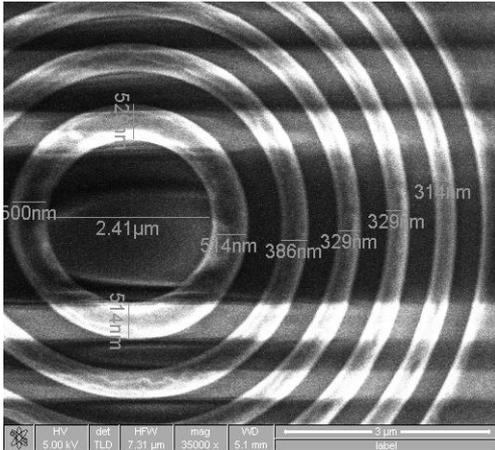
圖一、Fresnel zone plate 結構之示意圖，銀薄膜厚度為200nm，正向入射平面波由圖中結構上方往正 $z$ 方向傳播。圖中單位為nm。



圖二、聚焦在  $z=2\mu m$  位置之4, 6 和10 圈與聚焦在  $z=1\mu m$  位置之10 圈的Fresnel zone plate 的 Normalized Poynting vector 之  $z$  分量大小之比較。

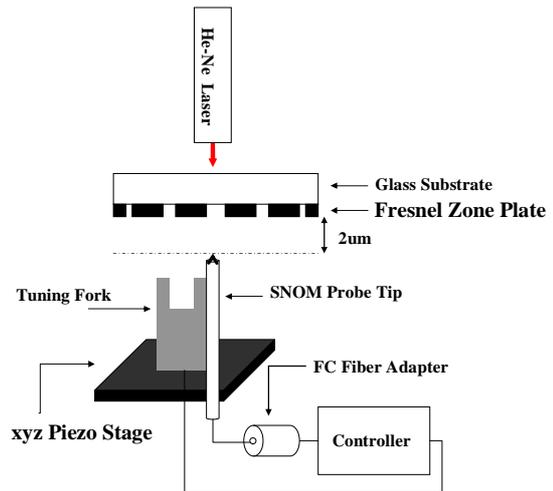
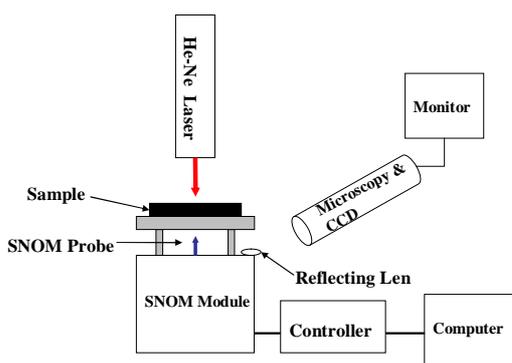
## 元件製作與實驗架構

首先採用標準四吋晶圓的玻璃基板 Pyrex7740，利用丙酮與甲醇將玻璃基板洗淨後，使用台灣大學奈米機電系統研究中心之光阻塗佈機(SUSS RC8 Spin Coater)，塗佈上光阻液 AZP4620，光阻厚度約2至3 $\mu$ m，接著軟烤2至3分鐘後，利用單面對準曝光機(Top Side EVG Aligner)曝光13秒後，放入顯影液(型號450)35秒，接著硬烤15分鐘，使用反應離子蝕刻機(SAMCO RIE-10N)將十字對準線轉移至玻璃基板上，再利用晶圓精密切割機(Dicing SAW)將四吋玻璃晶圓切割成0.9mm之正方形試片，接著利用丙酮與甲醇及超音波震洗機清洗光阻，再利用熱蒸鍍機(Thermal Evaporator)蒸鍍上厚度為3000 $\text{\AA}$ 之銀薄膜，蒸鍍時速率維持在0.3  $\text{\AA}/\text{sec}$ 左右，最後使用工業技術研究院的聚焦離子束(Focused Ion Beam, FEI Nova 200)在已完成之銀薄膜試片上刻寫Fresnel zone plate銀奈米結構，其結構的聚焦位置設計在銀薄膜下2 $\mu$ m處，圖三為製作結構之SEM影像圖，實際厚度量測約為2500  $\text{\AA}$ 至2600  $\text{\AA}$ ，如圖四所示。



圖三、Fresnel zone plate 銀奈米結構之 SEM 影像圖。 圖四、銀薄膜厚度之 SEM 影像圖。

我們利用近場光學量測系統進行 Fresnel zone plate 之光點量測，圖五為我們的實驗架構，圖六包含 xyz 方向的陶瓷壓電器及光學訊號傳輸的光纖探針(SNOM Probe tip)、石音音叉(tuning fork)等等。實驗進行的量測方式為一開始利用 CCD 尋找 Fresnel zone plate 實際的位置，並調整近場光學平台之 X、Y 軸，使其樣品與光纖探針在同一垂直線上，接著設定 SNOM 的 tapping mode 模式與音叉的共振頻率後將光纖探針接觸到試片之表面，即設定為高度的原點，接著調整掃描高度，可掃描各平面的光場分佈。所使用的光源為 He-Ne 雷射(633nm)，選用 NT-MDT 生產的光纖探針 MF003，其最小孔徑能達到 100nm，另外，石音音叉操作頻率約在 32kHz 左右。

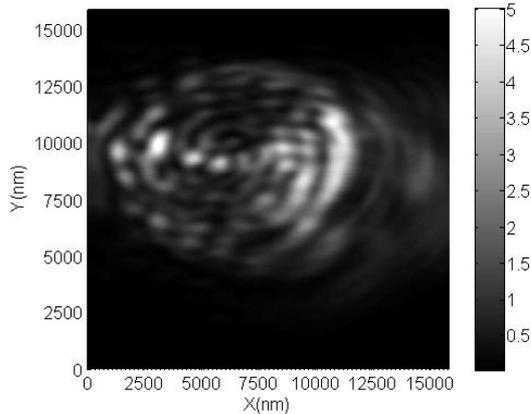


圖五、近場光學模組及實驗架構之示意圖。 圖六、石音音叉及光纖探針量測光強度之示意圖。

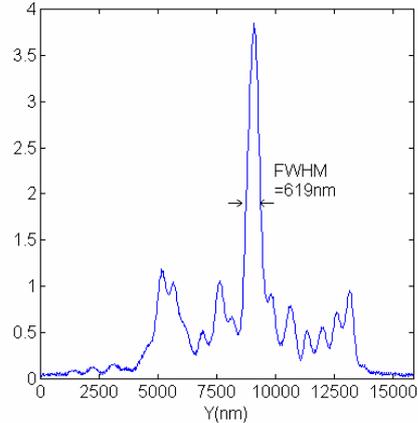
## 數據分析與討論

首先我們將設計出來的元件放置在樣品承載台上，利用 CCD 將樣品與光纖探針放在同一垂直線上方方便觀察，確認後開始作光場的掃描。光場分佈量測如圖七所示，我們發現在圖七的中間附近有聚焦亮點，但是在左、右半邊各有異常之亮點，我們認為異常亮點的原因可能來自於放置樣品時並不是維持在一個水平面的狀態下，而是有一個傾斜角的誤差存在，另外銀膜表面氧化的影響會造成量測的不確定因素，但就整體趨勢來看，結構的中心點附近仍然有聚焦亮點，之後針對圖七的中心附近亮點處取沿 y 軸切線作

分析，得到的結果如圖八所示，其全波半高寬約 619nm，所得到的聚焦點並沒有小於繞射極限，我們認為雷射光源未加 TM 極化片進而造成 TE 波的成分也影響在聚焦亮點上，另外實際銀薄膜厚度也與當初設計的厚度約有 50nm 的誤差存在，這都有可能影響光場在聚焦面上的分佈及聚焦亮點的大小。



圖七、樣品下 2 μm 之相對光場分佈。



圖八、如圖七中心光點沿 y 軸切線之相對光場分佈。

### 結論

我們利用三維時域有限差分方法對 Fresnel zone plate 銀奈米結構做模擬，並針對波長為 633nm 的光作分析，發現具有聚焦平面在銀薄膜下 1 μm 處的十圈 Fresnel zone plate 銀奈米結構能夠突破繞射極限，而聚焦平面在銀薄膜下 2 μm 處的結構也能夠有接近繞射極限的表現，適當的移動聚焦平面或改變環的大小能夠提升解析度。我們也製作 Fresnel zone plate 銀奈米結構並在近場光學實驗架構下量測，可以得到全波半高寬約 1 個波長左右的聚焦點。

### 參考文獻

- [1] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays," *Nature* **391**, pp. 667-669 (1998).
- [2] L. Martín-Moreno, F. J. García-Vidal, H. J. Lezec, A. Degiron, and T. W. Ebbesen, "Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations," *Phys. Rev. Lett.* **90**, 167401 (2003).
- [3] W. L. Barnes, W. A. Murray, J. Dintinger, E. Devaux, and T. W. Ebbesen, "Surface plasmon polaritons and their role in the enhanced transmission of light through periodic arrays of subwavelength holes in a metal film," *Phys. Rev. Lett.* **92**, 107401 (2004).
- [4] A. Degiron, H. J. Lezec, N. Yamamoto, and T. W. Ebbesen, "Optical transmission properties of a single subwavelength aperture in a real metal," *Opt. Comm.*, **239**, pp. 61-66(2004).
- [5] L.-B. Yu, D.-Z. Lin, Y.-C. Chen, Y.-C. Chang, K.-T. Huang, J.-W. Liaw, J.-T. Yeh, J.-M. Liu, C.-S. Yeh, and C.-K. Lee, "Physical origin of directional beaming emitted from a subwavelength slit," *Phys. Rev. B* **71**, 041405(R) (2005).
- [6] Y. Fu, W. Zhou, L. E. N. Lim, C. L. Du, and X. G. Luo, "Plasmonic microzone plate: Superfocusing at visible regime," *Appl. Phys. Lett.* **91**, 061124 (2007).
- [7] C. K. Lee, C. L. Lin, D. Z. Lin, T. D. Cheng, C. K. Chang, L. B. Yu, and C. S. Yeh, "Developing a nanowriter system: simulation and experimental set-up of a plasmonic-based lens design," *Mater. Sci. Forum* **505-507**, pp. 1-6 (2006).
- [8] Y. Inao, S. Nakasato, R. Kuroda, and M. Ohtsu, "Near-field lithography as prototype nano-fabrication tool," *Microelectron. Eng.* **84**, 705-710 (2007).
- [9] P. G. Kik, S. A. Maier, and H. A. Atwater, "Surface plasmons for nanofabrication," *Prof. of SPIE* **5347**, pp. 215-223 (2004).
- [10] F. L. Pedrotti, S. J. Leno, and S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, Prentice-Hall International (1993).
- [11] S. K. Gray and T. Kupka, "Propagation of light in metallic nanowire arrays: Finite-difference time-domain studies of silver cylinders," *Phys. Rev. B* **68**, 045415 (2003).
- [12] P. B. Johnson and R. W. Christy, "Optical Constants of the Noble Metals," *Phys. Rev. B* **6**, 4370 (1972).
- [13] A. Tavlove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain method*, Artech House (2005).
- [14] S. D. Gedney, "An anisotropic perfectly matched layer absorbing media for the truncation of FDTD lattices," *IEEE Trans. Antennas and Propag.* **44**, pp. 1630-1639 (1996).