

創新超高解析度全視野 X 光顯微術

Latest Advance in Ultrahigh Resolution Full-Field X-Ray Microscopy

胡宇光、陳譽升、林呈弘、楊士賢、陳慶國、王長海、董憲澤

Yeu-Kuang Hwu, Yu-Sheng Chen, Cheng-Hung Lin, Shih-Sian Yang, Ching-Kuo Chen, Chang-Hai Wang, Hsien-Tse Tung

利用奈米製程技術和與傳統光學概念巧妙結合，目前的 X 光顯微術已經步入奈米解析度時代。本文中將敘述了 X 光光學元件製程技術以及新一代高解析度 X 光顯微鏡的最新發展。文中將特別指出，目前世界上最高深寬比(超過 20) 的菲涅耳環板可以藉由我們所研發的電子束微影和微電鍍製程製造成超高解析度 X 光顯微鏡所需要之成像物鏡，利用同步輻射光源我們所建構的 X 光顯微鏡的空間解析度已經可以達到 20 nm 的目標，並將此具有超高空間和時間解析度以及高相位對比的硬 X 光顯微鏡發展成為解析奈米級三維結構的利器，將可為生物、奈米醫學以及材料科學提供新的研究機會。

Contemporary X-ray microscopy has evolved into the “Nano” age thanks to the development of advanced nano-device fabrication and elegant integration of traditional optic concepts. This article reviews the latest advance of fabrication of X-ray optic components and the next-generation ultrahigh resolution X-ray microscopy. Specifically, hard X-ray Fresnel zone plates with the highest aspect ratio in the world have been produced by e-beam lithography and micro scale electro-deposition. The state-of-the-art synchrotron X-ray based hard X-ray microscopes have demonstrated a resolution better than 20 nm. Ultrahigh spatial and temporal resolutions, combined with sufficient phase contrast make hard X-ray microscopes powerful tools to resolve three-dimensional structure at the nanoscale. This new characterization methodology opens new opportunities in multiple research fields such as biology, nanomedicine, and material sciences.

一、前言

X 光對物質超高的穿透力，使我們得以顯微觀察高於影像解析度 10^4 倍厚的樣品。尤其在需要研究三維立體的微觀組織時，高解析度 X 光顯微術將是最理想的成像工具。表 1 列出電子和 X 光顯微鏡所具有分析能力的特徵尺寸。目前軟 X 光顯

微技術擁有較佳的解析度，但卻沒有辦法觀察厚度大於單層厚度的細胞。而使用電子顯微，樣品需使用較複雜的準備程序，並且樣品的厚度也受到相當的限制。利用同步輻射光源的硬 X 光顯微術可以大幅放寬高解析度電子顯微鏡對觀測試片的嚴格要求，因此如果需要在更「真實」的環境下測試厚樣品，並獲得高解析度，硬 X 光顯微鏡可能是唯一

表 1.
不同類型顯微鏡的特徵尺寸。

Microscope	Specimen Thickness	Lateral Resolution	Temporal Resolution
TEM	~ 1 μm	~ 1 nm	
Soft X-Rays	~ 10 μm	~ 15 nm	
Hard X-Rays	~ 10 μm	~ 1 μm	~ 1 ms
Nano-TXM	~ 300 μm	~ 18 nm	~ 1 ms

的解決之道。為了在生物、物理、化學和材料研究領域取得奈米級的影像，優化硬 X 光顯微術的解析度成為一個很重要的目標。由於聚焦高能量 X 光之光學元件的製作十分困難，使得 X 光成像無法達到高空間解析度的要求⁽¹⁾。我們所採取的技術路線是借助傳統光學的概念，搭配奈米製程技術，來製備兩項高效率的 X 光光學元件：菲涅耳環板 (Fresnel zone plate, FZP) 與 Zernike 相位環 (phase ring)。

二、菲涅耳環板

在諸多全視野成像模式中，利用 FZP 為 X 光成像之光學元件可以提供高效率與低像差的諸多優點，因此成為首選。菲涅耳環板是由數目很多的同心圓環結構所構成的環欄狀光學元件，入射光藉由同心環欄的繞射而會聚，各環的半徑都必須符合一定條件，而環板的尺寸結構則隨著入射光的波長而變動。使用 FZP 的全場 X 光顯微鏡，其理想解析度可表示為 $\alpha\Delta r/m$ ，其中 Δr 為 FZP 最外圈 zone 的寬度， m 為繞射順序 (diffraction order)， α 由光學相差及波的同調性來決定⁽²⁾，所以較高的繞射順序，可以得到更高解析度⁽³⁻⁵⁾，而第一繞射順序 (first-order diffraction) 的解析度只能利用控制 Δr 來改變^(6, 7)，但不能因為要得到更小 Δr ，一直將厚度縮小，因為會導致效率不佳。同時，為了得到較高解析度之第一繞射影像，會提升試片上的 X 光光通量，而使得分析可以更快地進行，進而得到更好的時間解析度，降低時間對光束線的影響。這也表示試片的限制可以放寬，其可在不同的環境、使用鑲嵌材料、基底、厚試片，以及減少試片在空氣中的變化。

如果使用最外圈 zone 為 20 nm 之 FZP，在其合理效率的厚度下，其結構的深寬比 (aspect ratio)

約為 20，這對於奈米製程而言是個不小的挑戰，困難點在於微影製程的尺度及準直的物理極限。雖然製備的程度上不容易，但可以直接得到臨場 (real time)、實空間的影像，為其最大優勢。此應用在軟 X 光的應用已取得 15 nm 的解析度^(6, 8)，而在硬 X 光上卻還沒有達到類似的指標⁽⁹⁾。但是硬 X 光比起軟 X 光有幾個優勢，如高穿透性：在 8 keV 的能量下可達數百個 μm ，有助於試片的種類和準備過程，提供了靈活的彈性和便利性，同時也可獲得較大密度 (較重之元素)⁽¹⁰⁾ 之 2D 與 3D 影像。

若欲製作兼顧解析度與效率的 FZP，則不可避免的高深寬比的結構則需足夠的物理強度來支撐。在這樣的元件製備過程中，由於其他的微影技術方法，如極紫外光 (extreme UV)⁽¹¹⁾ 與 X 光微影^(12, 13) 等方法，都只能獲得效果較差之 FZP，因此目前使用電子束微影及微電鍍製程⁽¹⁴⁾ 是唯一經證實可以製作清晰的 FZP 圖形的製程方式。經過金的微電鍍製程，將所需的 FZP 鍍在一個透明的氮化矽薄膜上。

以 25 nm 的 FZP 之製備過程為例，我們首先要在 (100) 方向的矽基板上，以低壓化學氣相沉積法 (LPCVD) 鍍製約 1 μm 的氮化矽薄膜，將背面的矽基板使用氫氧化鉀溶液蝕刻掉，只留下透明的氮化矽薄膜，在正面上再鍍上 5 nm 的鉻，當作緩衝層 (buffer layer) 與 12 nm 的金，隨後以旋轉塗佈 (spin-coating) 的方式塗上光阻 PMMA A6 (polymethyl methacrylate)，再以 170 °C 加熱 15 分鐘，然後使用電子束微影系統 (Elionix ELS-7000) 在加速電壓 100 keV 下，用 10 pA 的電流來曝光。曝光完成後，使用異丙醇水溶液來進行顯影⁽¹⁴⁾，去除由電子束曝光的光阻，再以電化學沉積的方式來沉積金在已去除光阻的部分上，得到金的 FZP 圖形。更詳細的電鍍過程可參考文獻 11⁽¹¹⁾。

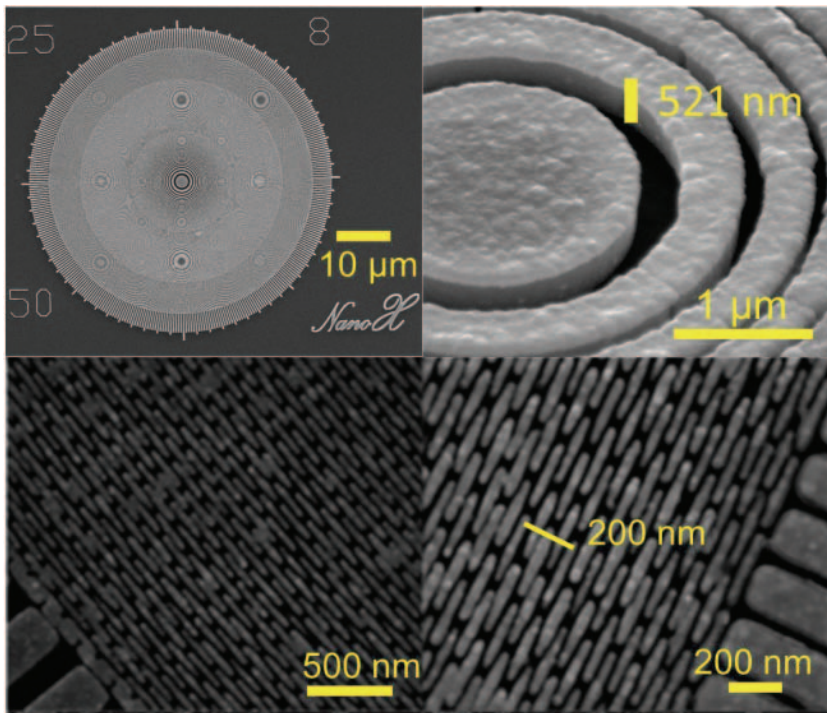


圖 1. 菲涅耳環板 (FZP) 的 SEM 圖像。

所完成的 FZP 最外層區域的寬度可為 20–45 nm，金吸收層的厚度為 450–700 nm；不同的 FZP 直徑的最佳聚焦能量為 8–12 keV 的光子，空間頻率寬達到 $35 \mu\text{m}^{-1}$ 。FZP 的效率取決於金的厚度，約為 1% 或 3%，皆小於 5% 的理論值。低於理論值的部分，可歸咎於細微的圖案不完善和電鍍所導致金的密度下降。如圖 1 中 SEM 圖所示，此 FZP 的直徑是 $50 \mu\text{m}$ ，最外層寬度是 25 nm，金的厚度是 500 nm，因此深寬比為 $500/25 = 20$ ，其精細結構可從 SEM 照片上之波紋圖案得到證明。

製備完成的 FZP，會以穿透式 X 光顯微鏡 (transmission X-ray microscope, TXM) 來進行效率以及空間解析度的測試。光束線分別為我國同步輻射研究中心 (NSRRC, Taiwan) 的光束線 01BL⁽¹⁵⁾，以及美國 Argonne 先進同步光子源 (APS, USA) 的光束線 32-ID^(7, 16)。圖 2(a) 顯示出光束線 32-ID 光學設備的布置：主要元件是一毛細管狀的聚光器，將 X 光聚焦到樣本上；一個針孔 (pinhole) 用以過濾高階的繞射光，beam stop 用以擋掉直通光；一個精密的樣本鏡臺；一個 FZP 物鏡；探測器 (薄 CsI 晶閃爍體和 CCD 板) 和 Zernike 相位環 (圖 2(b))。單色 X 光是由雙反射矽晶 (111) 單色器

獲得，在 8 keV 的能量下，此光束線每秒可提供 2×10^{11} 個光子，此高亮度可以得到短時間曝光 (50 毫秒) 的即時影像⁽¹⁷⁾。

解析度可依靠拍攝 Siemens star 測試圖案或是由計算功率能譜 (power spectrum) (圖 2) 來決定^(7, 18)。大致上來說，在進行二維的傅立葉轉換之前，先將圖案訊號乘上梯度函數來消除 edge artifacts，然後將所得的頻率空間 (frequency space) 做積分，進而得到功率能譜。低頻率的部分主要由成像物件中大型結構所貢獻；而當訊號移至高頻率時，訊號的貢獻則主要來自較微小的結構。訊號最終會被背景雜訊覆蓋而消失，由所對應的截止頻率，即可換算其解析度。圖 3 為最外圈寬度，分別為 45、40、30、25 nm FZP 的測試圖案以及其功率能譜圖，可看出隨著最外圈寬度的下降，功率能譜對應的截止頻率也越高，代表其解析度更佳，以 25 nm FZP 為例，其最佳解析度可小於 20 nm。

三、Zernike 顯微術

因物質對硬 X 光的吸收通常較可見光微弱許多，所以傳統 X 光顯微術受弱吸收對比影響，會

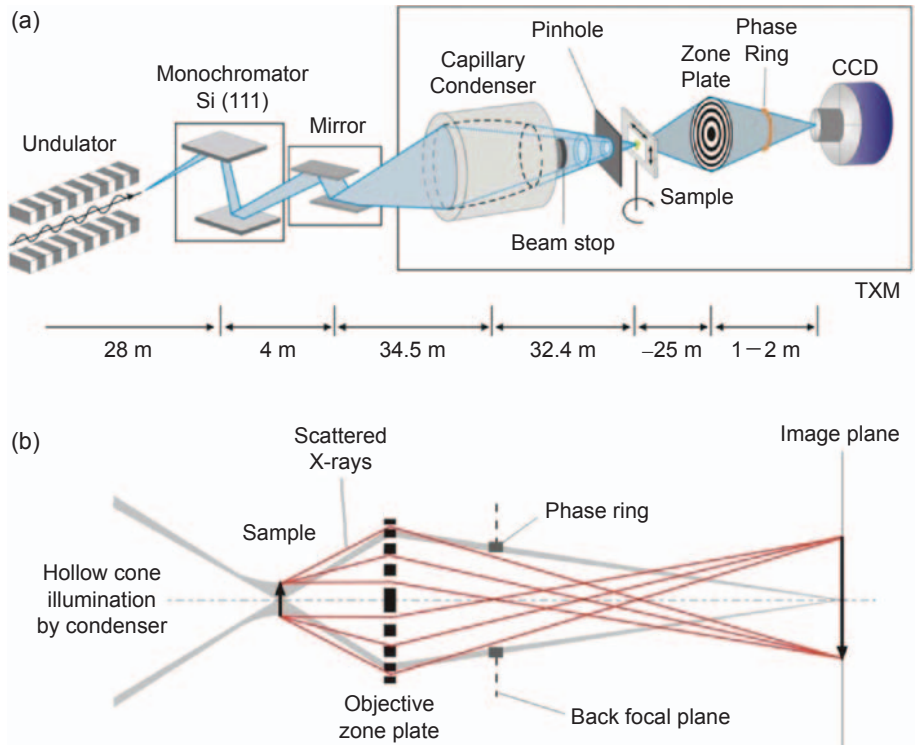


圖 2. APS 光束線 ID-32 同步輻射全視野式穿透式 X 光顯微鏡之略圖：(a) 光束線配置；(b) Zernike 顯微鏡的光學原理。

使影像品質變差，而 Zernike 對比原理透過採用相對相位轉移四分之一波長的散射波與非散射波，增強在不同樣本區域中散射波之間小相位差異的對比⁽¹⁹⁾，因此 X 光顯微術可藉由 Zernike 對比來得到改善^(20, 21)。目前 4 keV 與 9 keV 的 X 光可達到 60 nm 與 0.3 μm 解析度^(22, 23)，而 8 keV X 光可達 40–50 nm 解析度^(24, 25)。

近年來 8 keV X 光顯微術已達 30 nm 的解析度⁽⁷⁾，為較厚的生物醫學樣本成像的一項重要成果，而 Zernike 相位對比能否達到這個具有意義的里程碑？從我們的研究結果已確切證實了這個可行性。圖 4(a) 和 (b) 分別為是否有 Zernike 相位偏移的 Siemens star (180 nm 厚度的金) 之測試圖案。很明顯地，圖 3(b) 的對比度提高了，強度分布 (如圖 4(c)) 量化地顯示出對比度增加 3 倍以上。至於空間解析度，在圖 4(d) 中功率能譜分析 (power spectrum analysis, PSA) 顯示圖 4(a) 與 (b) 相似的解析度：29 nm 和 31 nm，因此 Zernike 對比度增強並不會犧牲空間解析度。

Zernike 相位環位於 (圖 2(b)) 聚光器的共軛平面 (接近物鏡區板後之聚焦平面)，其結構為金的圓

形環鍍在氮化矽膜上，而其厚度需可使入射光束的相位偏移 $3\pi/2$ 。其中的原因是對於弱散射，相位透射率的函數是 $\exp(i\Omega) \approx 1 + i\Omega$ ，其大小為 1，一個相位偏移 $3\pi/2$ 的入射光會使相位因數變成 $\approx -i + i\Omega$ ，大小 $\approx 1 - 2\Omega$ ，使物體的圖像較暗，且較清晰。這比起偏移 $\pi/2$ ，相位因數變成 $\approx i + i\Omega$ ，大小 $\approx 1 + 2\Omega$ ，較明亮的物體之圖像要好。事實上，除了考慮單純的相位因素外，X 光吸收效果也存在，且會和偏移 $\pi/2$ 的效果互相抵消，但是偏移 $3\pi/2$ 則會增強這個效果。

儀器的校準是非常重要的，利用「勃氏鏡」⁽²⁶⁾ (Betrand lens，一個有限解析度的 FZP)，以非散射環形光來定義相位環的位置；而勃氏鏡會將聚光器共軛平面上的光聚焦在探測器上，所有的聚光器會以相位對比來做最佳調整，這表示環型光會縮小，照明面積 $\approx 10\%$ 的 FZP 面積，因此大多數散射的 X 射線不會為相位環所影響，並且能夠產生相位對比。

我們研究的主要目標是為了取得最高的空間解析度，所以特別需要仔細分析像差與人為誤差。為了評估金厚度的相關影響，測試在 8 keV 光束

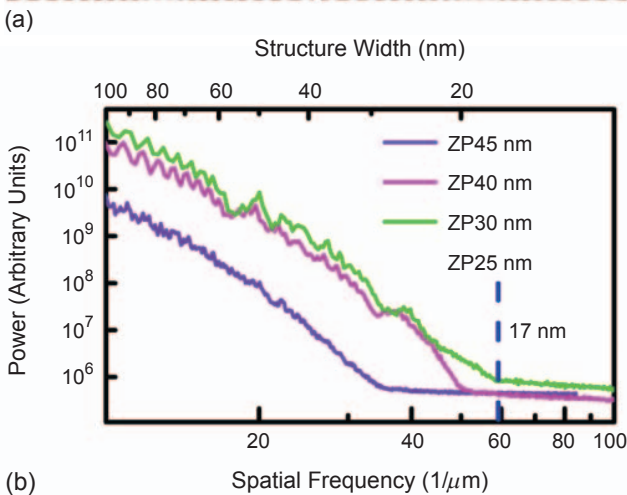
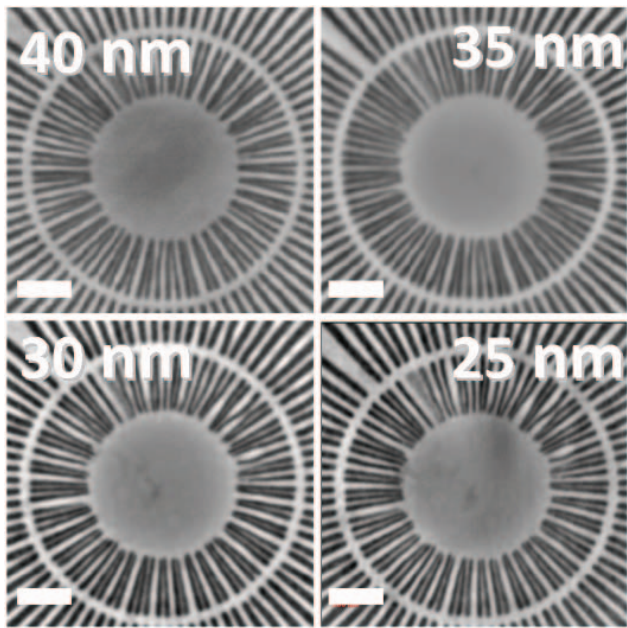


圖 3. 最外層寬度為 45、40、30、25 nm FZP 的測試圖案，(a) 功率能譜分析，(b) 顯示這些圖案的截止頻率，以及其對應的解析度。其中 25 nm FZP 達到小於 20 nm 的解析度。

下三個相位環的厚度為 2.5 μm 、2.6 μm (最佳) 與 2.7 μm ，寬度和直徑則相同，分別為 4.5 μm 和 68 μm 。2.5 μm 和 2.7 μm 相位環產生的對比度非常有限，如圖 4 所示，由於相位像差，而導致外部圖像區域的強烈差異對比。

藉由影像的功率能譜分析 (power spectrum analysis, PSA)，以圖元乘以圖元的 Hanning window function 來避免邊緣效應影響，再將圖像的二維傅立葉轉換平方後，對其方位角做積分，由此來評估

厚度效應對影像的影響。由此所產生的功率能譜分析曲線顯示，非最佳厚度下的截止頻率都較差，即解析度較差。功率能譜分析顯示相位環的直徑大小也會引起像差。另一方面，通過微調入射光的光子能量，也可以改善解析度，而我們使用這組光學元件測試所得到的最佳值為 7.95 keV。

圖 5 的結果為一近似純相位物體 (nearly phase object) 的聚苯乙烯 (C_8H_8)_n 粒子在 8 keV 的光束下所得的影像。其折射率為 $n = 1 - \delta - i\beta$ ，而 $\delta = 3.88 \times 10^{-6}$ 、 $\beta = 5.58 \times 10^{-9}$ 。圖 5(a) 至 (c) (在焦點、或稍微失焦) 為吸收對比的圖像，只能看出邊緣對比度稍微增強，而 Zernike 圖像 (圖 5(d)) 顯示對比度增強兩倍。圖 6 為 EMT (小鼠乳腺癌) 細胞的影像。圖 6(b) 與 (c) 顯示兩個相位對比影像，但是相位環的寬度不同，厚度及直徑相同。由此可以判斷相位環的最適合寬度為 4.5 μm ，圖 6(c) 為最佳圖像，而其餘都比較模糊。圖 6(d) 從功率能譜分析，也證實了這一結論。在圖 7 中這種相位對比影響甚至更強。在圖中顯示 EMT 細胞的影像，以及細胞所吞噬之金奈米粒子。

Zernike 相位環還可以消除其他影響吸收問題的因素，如球面像差⁽²⁷⁾、同步加速器光源產生的雜訊⁽²⁸⁾ 等。但是，Zernike 相位對比也並不是對所有樣本都具有提高影像品質能力。對於厚 (幾個 μm) 的樣品，在稍低於或高於聚焦平面範圍的 X 光吸收，可能會導致相位偏移，而減少吸收的對比。對於面積較大的樣品，因為 shading off 效應，它會減少物體中心的對比度⁽²⁹⁾，它也會產生光環效應，影響樣品的形貌分析。儘管 Zernike 相位對比可能有這些潛在問題，能夠達到 30 nm 的解析度仍是一個顯著的進展，Zernike 相位環對比度的提升是在 30 nm 解析度的條件下測得的，因此可以推測，類似的對比增強效應，即使在更優的解析度下仍然適用。

四、結論

我們利用先進的奈米製程方法成功地製備出最外圈寬度為 25 nm 和深寬比達到 20 的非涅耳環板。在全視野 X 光顯微鏡下，得到優於 20 nm 解

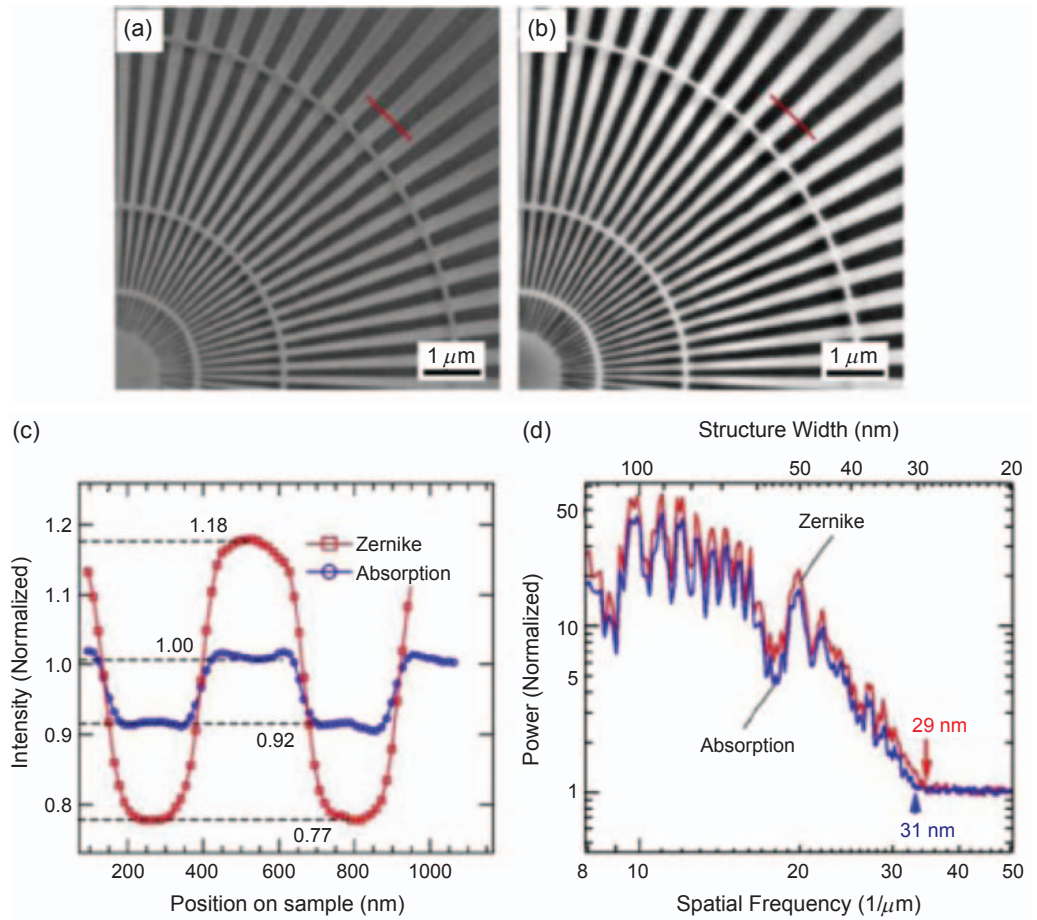


圖 4. 180 nm 厚金測試圖案的硬 X 光顯微影像由於吸收 (a) 和 Zernike (b) 相位對比, (c) 沿著 (a) 和 (b) 紅線的強度分布, (d) 功率能譜分析的空間解析度。

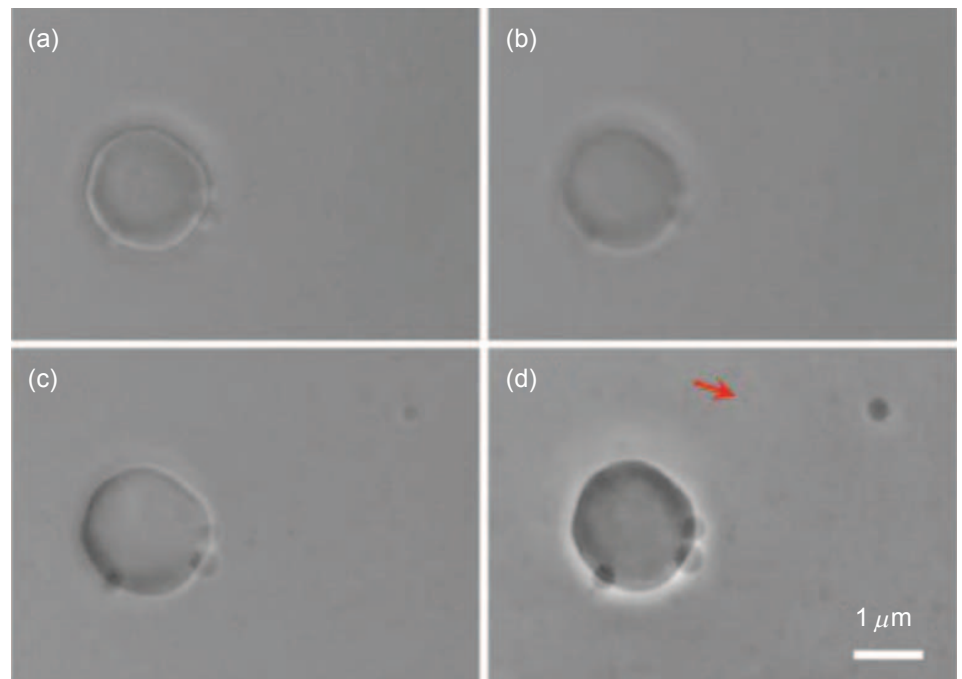


圖 5. 聚苯乙烯顆粒的圖像：(a)–(c) 吸收對比圖, (b) 在焦點, (a)、(c) 焦點前、後 20 微米, (d) Zernike 相位對比圖與箭頭標記一個 100 nm 的粒子對比的圖像。

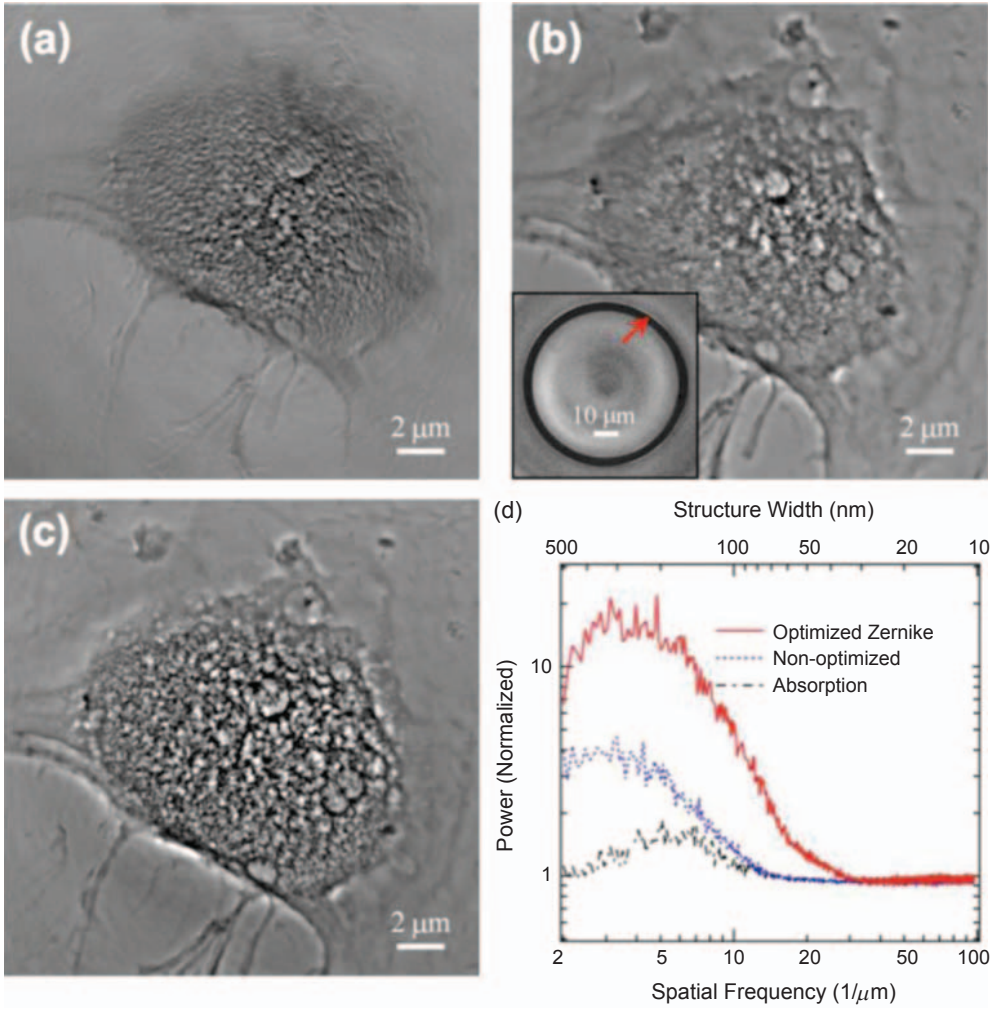


圖 6.

EMT 細胞圖像：(a) 吸收和 (c) Zernike 對比使用最佳的相位環；(b) 使用略窄的相位環；(d) 功率能譜分析證實，使用寬度最佳的環，確實產生的結果最好。

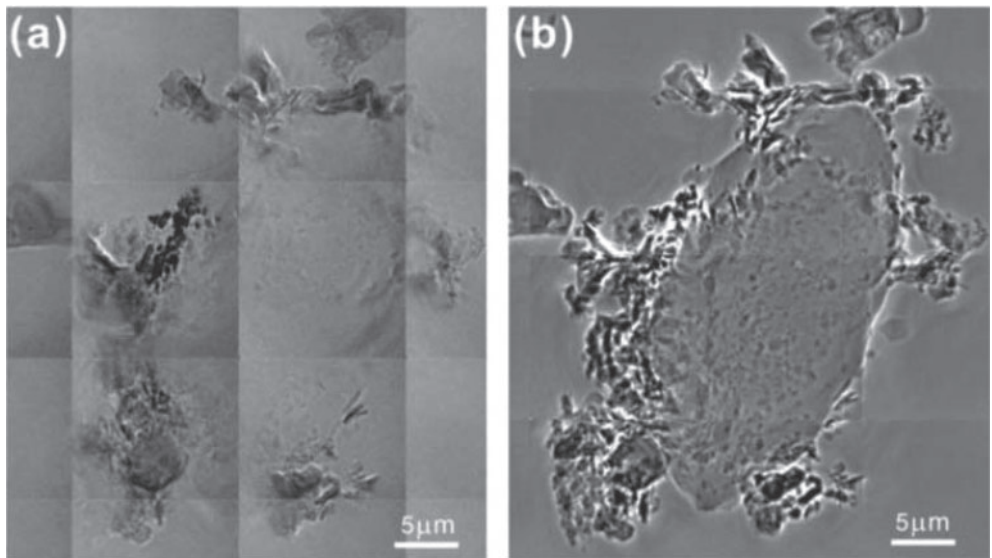


圖 7.

EMT 細胞的影像，其中分布有共同培養的金奈米粒子採用不同的對比模式：(a) 吸收對比；(b) Zernike 對比。

析度和高效率，並搭配後聚焦平面的 Zernike 相位環，可以進一步增強對比度，使對厚生物樣本的進行 3D 影像之空間解析度得到極大提升。這也見證了同步輻射硬 X 光顯微術已經快速地發展成一個成熟的成像技術，而隨著此一技術的廣泛使用，將會有許多有價值的研究成果即將陸續出現。未來的研究規劃，包括優化奈米製程的參數、提高最終產品的良率，以及挑戰硬 X 光顯微術解析度的極限，以期獲得解析度優於 15 nm 的下一代超高解析度硬 X 光顯微鏡。

參考文獻

1. Y. T. Chen, T. N. Lo, C. W. Chiu, C. J. Liu, S. R. Wu, S. T. Jeng, C. C. Yang, J. Shiue, C. H. Chen, Y. Hwu, G. C. Yin, H. M. Lin, J. H. Je, and G. Margaritondo, *J. Synch. Radiat.*, **15**, 170 (2008).
2. D. Attwood, *Soft X-Rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications*, Cambridge University Press (1999).
3. S. Rehbein, S. Heim, P. Guttmann, S. Werner, and G. Schneider, *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 110801 (2009).
4. G. C. Yin, Y. F. Song, M. T. Tang, F. R. Chen, K. S. Liang, F. W. Diewer, M. Feser, W. Yun, and H. P. D. Shieh, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 221122 (2006).
5. J. Yi, Y. S. Chu, Y. T. Chen, T. Y. Chen, Y. Hwu, and G. Margaritondo, *J. Phys. D* (in press).
6. W. Chao, B. D. Harteneck, J. A. Liddle, E. H. Anderson, and D. T. Attwood, *Nature*, **435**, 1210 (2005).
7. Y. T. Chen, T. N. Lo, Y. S. Chu, J. Yi, C. J. Liu, J. Y. Wang, C. L. Wang, C. W. Chiu, T. E. Hua, Y. Hwu, Q. Shen, G. C. Yin, K. S. Liang, H. M. Lin, J. H. Je, and G. Margaritondo, *Nanotechnology*, **19**, 395302 (2008).
8. W. Chao, J. Kim, S. Rekawa, P. Fischer, and E. H. Anderson, *Optics Express*, **17**, 17669 (2009).
9. Y. T. Chen, T. Y. Chen, J. Yi, Y. S. Chu, W. K. Lee, C. L. Wang, I. M. Kempson, Y. Hwu, V. Gajdosik, and G. Margaritondo, *Opt. Lett.*, **36**, 1269 (2011).
10. B. L. Henke, E. M. Gullikson, J. C. Davis, *Atomic Data and Nuclear Data Table*, **54**, 181 (1993).
11. S. S. Sarkar, H. H. Solak, J. Raabe, C. David, and J. F. van der Veen, *Microelectronic Engineering*, **87**, 854 (2010).
12. L. Liu, G. Liu, Y. Xiong, J. Chen, W. Li, and Y. Tian, *Microsyst. Technol.*, **16**, 1315 (2010).
13. R. Divan, D. C. Mancini, N. Moldovan, B. Lai, L. Assoufid, Q. Leonard, and F. Cerrina, *SPIE*, **4783**, 82 (2002).
14. T. N. Lo, Y. T. Chen, C. W. Chiu, C. J. Liu, S. R. Wu, I. K. Lin, C. I. Su, W. D. Chang, Y. Hwu, B. Y. Shew, C. C. Chiang, J. H. Je, and G. Margaritondo, *J. Phys. D.: Appl Phys.*, **40**, 3172 (2007).
15. Y. F. Song, C. H. Chang, C. Y. Liu, S. H. Chang, U. S. Jeng, Y. H. Lai, D. G. Liu, S. C. Chung, K. L. Tsang, G. C. Yin, J. F. Lee, H. S. Sheu, M. T. Tang, C. S. Hwang, Y. K. Hwu, and K. S. Liang, *J. Synchrotron Radiat.*, **14**, 320 (2007).
16. Q. Shen, W. K. Lee, K. Fezzaa, Y. S. Chu, F. De Carlo, P. Jemian, J. Ilavsky, M. Erdmann, and G. G. Long, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **582**, 77 (2007).
17. Y. S. Chu, J. M. Yi, F. De Carlo, Q. Shen, Wah-Keat Lee, H. J. Wu, C. L. Wang, J. Y. Wang, C. J. Liu, C. H. Wang, S. R. Wu, C. C. Chien, Y. Hwu, A. Tkachuk, W. Yun, M. Feser, K. S. Liang, C. S. Yang, and J. H. Je, G. Margaritondo, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 103119 (2008).
18. S. S. Vogt, et al., *Journal of Structural Biolog.*, **132**, 123 (2000).
19. F. Zernike, *Science*, **121**, 345 (1955).
20. D. Rudolph, G. Schmahl, and B. Niemann, *Modern Microscopies Techniques and Applications*, 59 (1990).
21. H. S. Youn and S. W. Jung, *J. Microsc.*, **223**, 53 (2006).
22. U. Neuhäusler, G. Schneider, W. Ludwig, M. A. Meyer, E. Zschech, and D. Hambach, *J. Phys. D*, **36**, A79 (2003).
23. H. Yokosuka, N. Watanabe, T. Ohigashi, Y. Yoshida, S. Maeda, S. Aoki, Y. Suzuki, A. Takeuchi, and H. Takano, *J. Synchrotron Radiat.*, **9**, 179 (2002).
24. A. Tkachuk, F. Diewer, H. Cui, M. Feser, S. Wang, and W. Yun, *Z. Kristallogr.*, **222**, 650 (2007).
25. Y. S. Chu, J. M. Yi, F. De Carlo, Q. Shen, W. K. Lee, H. J. Wu, C. L. Wang, J. Y. Wang, C. J. Liu, C. H. Wang, S. R. Wu, C. C. Chien, Y. Hwu, A. Tkachuk, W. Yun, M. Feser, K. S. Liang, C. S. Yang, J. H. Je, and G. Margaritondo, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 103119 (2008).
26. D. B. Murphy, *Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging* (2001).
27. A. G. Michette, *Optical Systems for Soft X-rays*, Plenum Press (1986).
28. D. L. White, O. R. Wood, II, J. E. Bjorkholm, S. Spector, A. A. MacDowell, and B. LaFontaine, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**, 1930 (1995).
29. A. H. Bennet, H. Jupnik, H. Osterberder, and O. W. Richards, *Phase Microscopy*, Wiley (1951).



胡宇光先生為美國威斯康星大學物理博士，現任中央研究院物理研究所研究員。

Yeu-Kuang Hwu received his Ph.D in physics from University of Wisconsin Madison. He is currently a research fellow at the Institute of Physics, Academia Sinica.



陳譽生先生為國立中央大學機械工程博士，現任中央研究院物理研究所博士後研究員。

Yu-Sheng Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from National Central University. He is currently a Postdoctoral Researcher in the Institute of Physics at Academia Sinica.



林呈泓先生為國立清華大學材料科學與工程碩士，現任中央研究院物理研究所研究助理。

Cheng-Hung Lin received his Master degree in material science and engineering from National Tsing Hua University. He is currently a Research Assistant in the Institute of Physics at Academia Sinica.



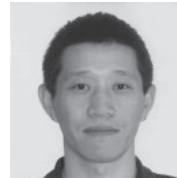
楊士賢先生現為國立台灣海洋大學光電科學研究所碩士班學生。

Mr. Shih-Sian Yang is currently a Master degree student in the Institute of Optoelectronic Sciences of at National Taiwan Ocean University.



陳慶國先生現為國立台灣海洋大學光電科學研究所碩士班學生。

Mr. Ching-kuo chen is currently a Master degree student in the Institute of Optoelectronic Sciences of at National Taiwan Ocean University.



王長海先生為德國美因茨大學化學博士，現任中央研究院物理研究所博士後研究員。

Chang-Hai Wang received his Ph.D in chemistry from University of Mainz (Germany). He is currently a postdoc research fellow at the Institute of Physics, Academia Sinica.



董憲澤先生為國立成功大學材料科學及工程博士，現任中央研究院物理研究所博士後研究員。

Hsien-Tse Tung received his Ph.D. in materials science and engineering from National Cheng Kung University. He is currently a Postdoctoral Researcher in the Institute of Physics at Academia Sinica.