

微米圓球之光子奈米噴流的數值分析與實驗量測

劉承揚¹、王永勛¹

¹ 淡江大學，機械與機電工程學系，新北市

cylu@mail.tku.edu.tw

摘要

本文主要研究探討微米圓球的光子奈米噴流現象。在理論方面，我們使用時域有限差分法來模擬奈米圓球的光子奈米噴流之光場分佈和光場強度的增益效果，並分析影響光子奈米噴流形成的參數。在實驗方面，我們自行設計和架設一套低照度的光學顯微鏡系統來量測由微米圓球所發出的背向散射光和光子奈米噴流的光場分佈，並與數值計算結果相互比對。在遠場光學系統中，若想要突破繞射極限而得到奈米級的影像則必須有效的收集和恢復消散波的光學資訊，本文的研究結果將有助於解決高科技產業中奈米等級的影像量測問題，例如線寬、微粒、光柵、甚至複雜幾何圖案之量測。

關鍵字：光子奈米噴流、微米圓球、繞射極限。

1. 前言

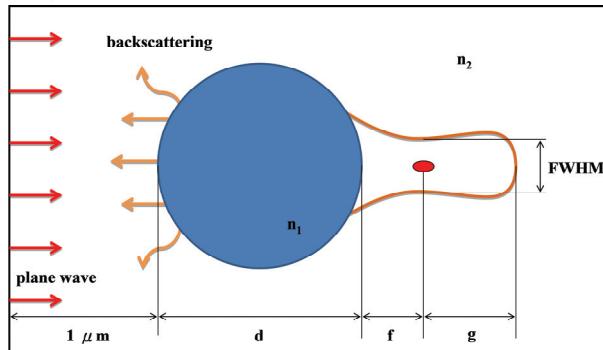
米氏散射理論發展至今已經超過一百年的歷史，該理論主要用來描述球形微粒的光散射情況，在特殊的幾何條件下，米氏理論提出Maxwell方程式的半解析解[1,2]。近年來，球形微粒的光子奈米噴流現象被發現[3]，當光波照射到微米級結構，例如微米圓球或微米圓柱，就會有光子奈米噴流的現象產生，此現象是在微米級結構的後方產生局部的高強度窄長形集中電場，其位置除了在靠近表面的地方還會向外部延伸出去。2004年，文獻指出可使用微米圓柱產生光子奈米噴流。2005年，文獻則提出微米圓球亦可產生此現象[4,5]。此後，大量的數值計算和實驗量測結果被提出，主要有兩個研究方向[3]。第一個方向為光子奈米噴流的相關參數與特性研究，例如圓球材料和背景折射率、圓球直徑、入射光波長和偏振特性等。第二個方向為光子奈米噴流的應用，例如應用於量測尺寸，量測光學影像，儲存光資訊等。想要直接觀察到光子奈米噴流現象是相當困難的，大多數的研究是使用線偏振可見光來當成入射光[7]，並使用聚焦光束來縮小光子奈米噴流的焦點大小[8]。爾後，學者使用各種更複雜的光源來研究入射光對光子奈米噴流的影響[9,10]。

本文使用數值分析和實驗量測來探討微米圓球的光子奈米噴流現象，在理論方面，我們使用時域有限差分法，在實驗方面，我們自行架設一套高靈敏度的光學顯微鏡系統，並針對直徑為3 μm、5 μm、8 μm的微米圓球進行光子奈米噴流現象的研究。

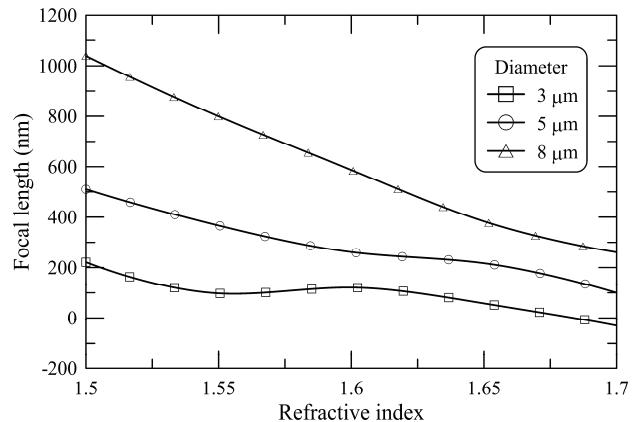
2. 數值分析

本研究採用時域有限差分法來模擬計算微米圓球之光子奈米噴流的光場分佈和聚焦情況[11]，時域有限差分法是將Maxwell方程式在時間及空間上離散化，在空間中形成網格式的分佈，可以進行連續疊代，以求得電磁場隨時間的變化與分佈，因此使用此方法可以詳細的計算光波在微米圓球內外的傳遞情況。

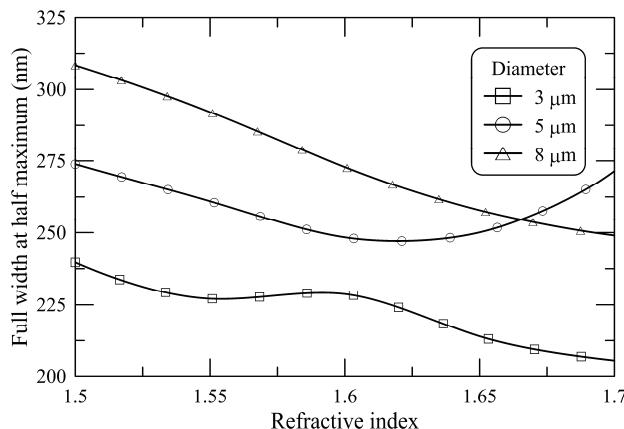
圖一為微米圓球的數值模型，計算空間的面積為8 μm × 7 μm，微米圓球放置於計算空間的中心位置(x, y) = (4 μm, 3.5 μm)，網格大小為 $\Delta x = \Delta y = 10$ nm，其中相關參數分別為：微米圓球直徑d和折射率n₁、周圍環境折射率n₂、微米圓球與光子奈米噴流焦點的距離f、光子奈米噴流的衰減長度g。圖二為光子奈米噴流聚焦點與微米圓球折射率的關係，當圓球折射率越高時，光子奈米噴流的聚焦點會往圓球的中心移動，也就是焦距會變短，而當圓球直徑越小時，其相對應的焦距也會較短。



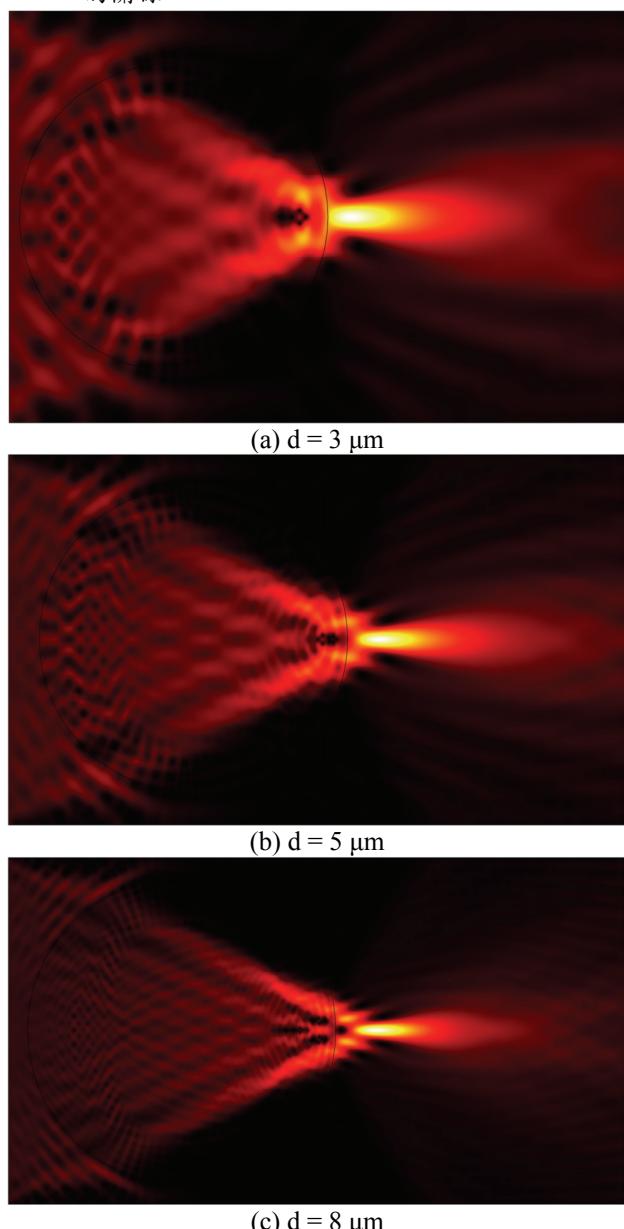
圖一 微米圓球的數值模型



圖二 光子奈米噴流焦距與微米圓球折射率的關係



圖三 光子奈米噴流聚焦點的半高全寬與圓球折射率的關係

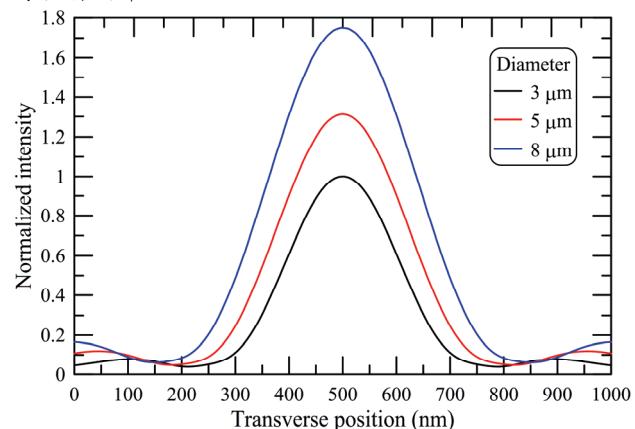


圖四 不同直徑微米圓球光子奈米噴流的能量分佈圖

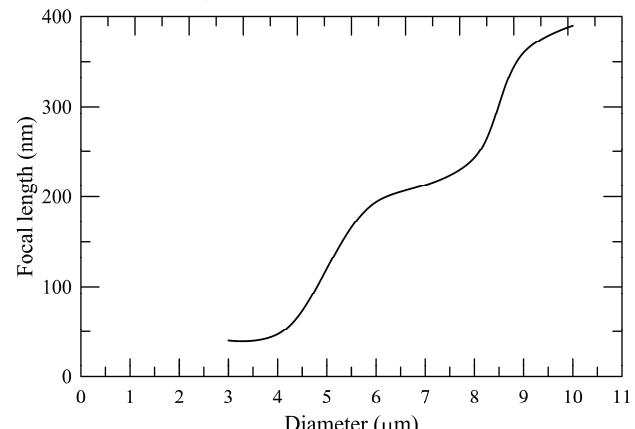
除了聚焦距離外，我們也探討微米圓球折射率對光子奈米噴流聚焦效果的影響，圖三為光子奈米噴流聚焦點的半高全寬(FWHM)與微米圓球折射率的關係，由圖中可看出當圓球折射率越高時，光子奈米噴流聚焦點的半高全寬越小，意即其聚焦效果越好，但其聚焦位置也越靠近圓球的中心。當 $n_1 = 1.5$ 時，直徑為3 μm、5 μm、8 μm的微米圓球聚焦點的半高全寬分別為239 nm、274 nm、308 nm。

圖四為在粒徑為3 μm、5 μm、8 μm的微米圓球光子奈米噴流的能量分佈圖，由能量分佈圖可以觀察到上述之物理現象與特性。圖五為光子奈米噴流的側剖圖，從此圖可以算出每種圓球直徑所造成光子奈米噴流的半高全寬，當圓球直徑越小時，其半高全寬越小，意即其聚焦效果越好，光學解析度越高。

接下來，我們探討微米圓球直徑變化對光子奈米噴流的影響，假設相關參數為 $d = 3 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 、 $n_1 = 1.5$ 、 $n_2 = 1.0$ 、入射波長為500 nm來進行計算。圖六為光子奈米噴流焦距與微米圓球的關係，由圖可知，在同一入射波長下，微米圓球的直徑越大，光子奈米噴流的焦距越長，當 $d = 3 \mu\text{m}$ 時， $f = 40 \text{ nm}$ ，當 $d = 10 \mu\text{m}$ 時， $f = 390 \text{ nm}$ 。本研究已經對微米圓球的光子奈米噴流進行完整的分析，包括折射率、焦距、粒徑大小、半高全寬等，妥善利用這些資訊在之後的光學實驗應有相當的幫助。



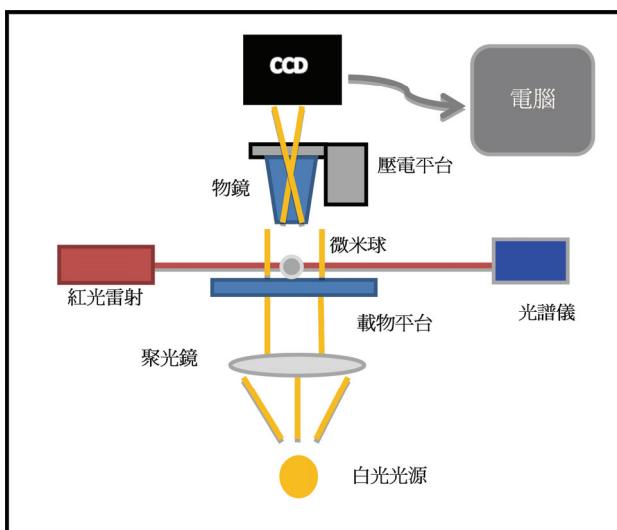
圖五 光子奈米噴流的側剖圖



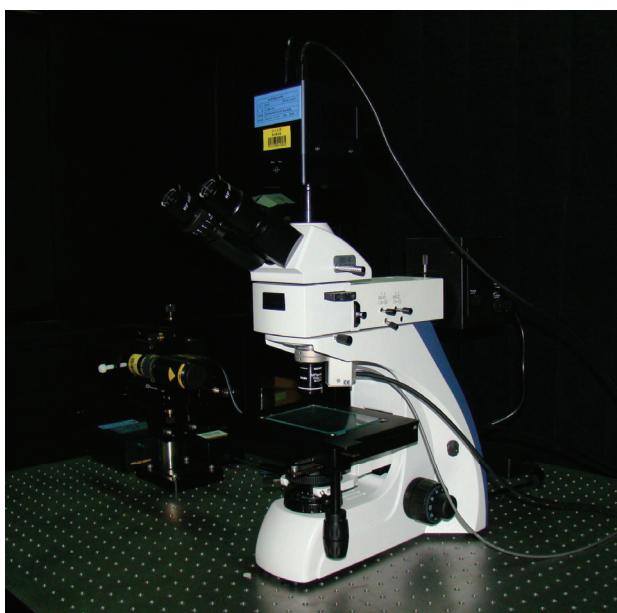
圖六 光子奈米噴流焦距與微米圓球直徑的關係

3. 實驗量測

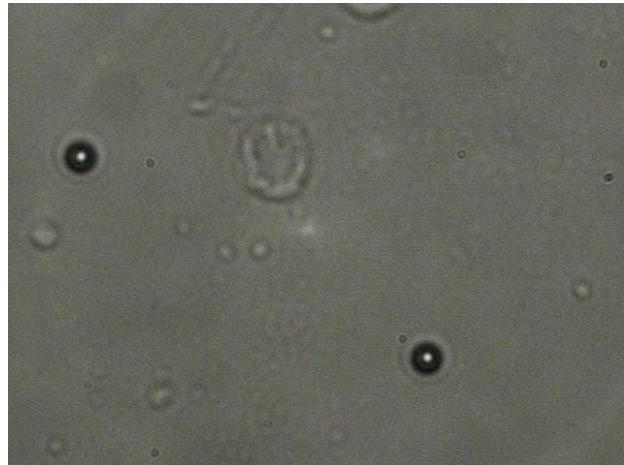
本研究自行架設多方向的高靈敏度光學量測系統來對直徑為 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的微米圓球進行光子奈米噴流的量測，其架構如圖七所示。因為光子奈米噴流的產生與入射光的方向有關，所以本研究希望能多方向來觀察光子奈米噴流現象。在光源方面，本系統採用雙光源，一為白光光源，另一為雷射光源，白光光源主要測試在多波長傳播時，對光子奈米噴流的影響，而雷射光源則是測試在強光能量下，不同偏振光波下光子奈米噴流的特性。在鏡組方面，則使用一個擴束透鏡將白光均勻的入射到微米圓球上，然後使用一個高數值孔徑的油浸潤物鏡收集光波資訊，最後再連接一個10-bit的低雜訊單色數位CCD攝影機以得到在垂直方向上的光子奈米噴流影像，實際的量測系統照片如圖八所示。



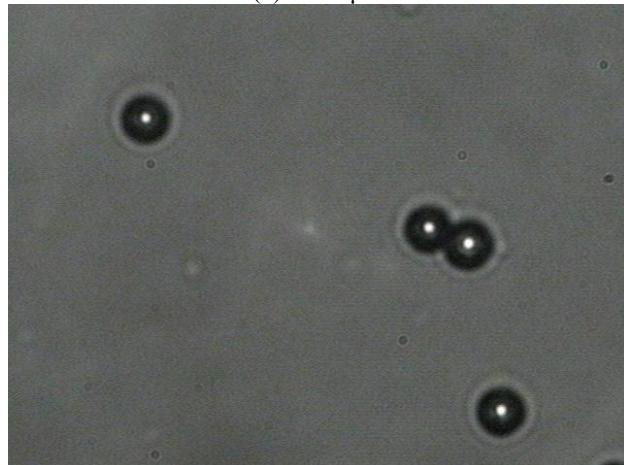
圖七 高靈敏度光學量測系統架構



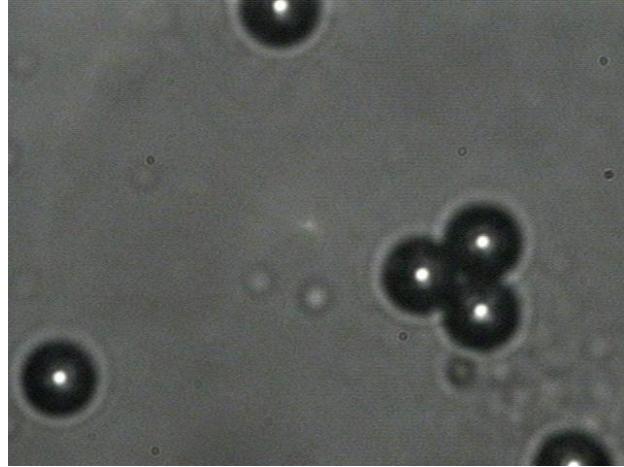
圖八 高靈敏度光學量測系統照片



(a) $d = 3\text{ }\mu\text{m}$



(b) $d = 5\text{ }\mu\text{m}$



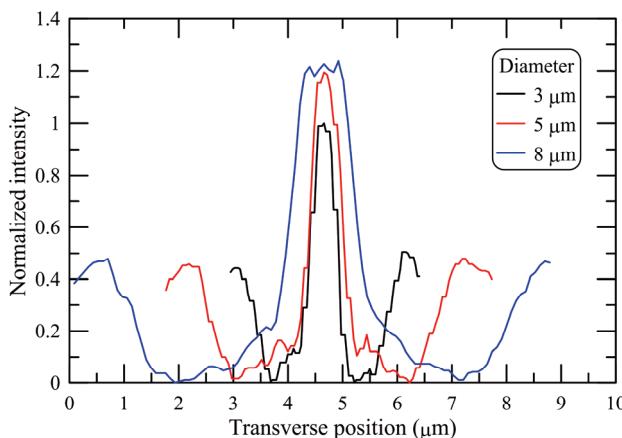
(c) $d = 8\text{ }\mu\text{m}$

圖九 不同直徑微米圓球光子奈米噴流的量測影像

在實驗方面，本研究使用直徑為 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 、 $8\text{ }\mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微米圓球來進行量測，先將微米圓球水溶液，利用超音波震盪器搭配攪拌子，使圓球均勻分散，之後利用垂直沉積法，使圓球均勻分散在載玻片上，並將其放置在培養皿內，降低其他粉塵污染的機會，等到其自然風乾，試片就製備完成。量測時利用光源照射試片，調整顯微鏡中的粗細節輪以及垂直軸壓電

平台來找到聚焦點，再最後利用CCD攝影機將影像拍攝下來，傳至電腦中利用量測程式計算出微米圓球的直徑以及光子奈米噴流的真實大小。

圖九為不同直徑微米圓球光子奈米噴流的量測影像，圖中黑灰色的圓形影像為微米圓球，而其中白色的圓形影像即為光子奈米噴流，從圖中可看出直徑越大其光子奈米噴流的集中光能量則越強。圖十為光子奈米噴流實驗量測的側剖圖，經計算過後可得直徑3 μm 、5 μm 、8 μm 微米圓球光子奈米噴流的半高全寬分別為317 nm、506 nm和1020 nm。由此實驗可見，微米圓球的光子奈米噴流會隨著圓球的直徑變化而改變，直徑越大所產生的光子奈米噴流集中度越高，但半高全寬也越大，此實驗結果與數值分析相當符合。



圖十 光子奈米噴流的實驗量測側剖圖

從數值計算和實驗量測可得知，影響光子奈米噴流形成的主要原因有圓球的直徑和折射率、入射光波長和偏振特性等。當圓球直徑為3 μm 和折射率為1.5時，其光子奈米噴流的半高全寬(317 nm)遠小於入射光波長。由於光子奈米噴流不是因為共振現象而產生的，所以使用微米圓球來進行光學聚焦成像時，其光學解析度可以突破繞射極限，也就是可以觀察到比一個光波長還小的物體，此研究結果極具有產業應用性。在未來研究方面，本研究團隊將發展三維數值計算模型，以期更瞭解光子奈米噴流的形成機制。在實驗方面，本研究團隊將使用各種不同光源來進行成像測試，包括各種偏振光源、平面波、球面波、高斯光源等，以期更瞭解光源對於光子奈米噴流的影響。另外，本研究團隊也將針對不同材料的微米圓球進行量測實驗，以瞭解不同材料對光子奈米噴流的影響[12]。

4. 結論

本研究主要透過理論計算之數值分析和實際之實驗量測來探討微米圓球的光子奈米噴流現象，在理論計算方面，本研究完整的分析微米圓球的各項尺寸參數對光子奈米噴流現象的影響。在實驗量測方面，本研究建立一套高靈敏度的光學顯微鏡系統，用以量測由試片表面上圓球所發出的散射光，藉以分辨奈米

級之結構。在可見光範圍內，光子奈米噴流提供了一個新的方法用以突破繞射極限而量測奈米級的物體，其最大優點是不會對觀察物造成破壞，也因此非常具有應用潛力，未來可以將其應用在偵測生物組織、病毒細胞、近場光學微影術、超高密度光學儲存等，極具發展性。

5. 謝

感謝國科會的計畫支持(NSC 101-2221-E-032-009)，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

1. G. Mie, "Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen," *Ann. Phys.*, vol. 25, pp. 377-445, 1907.
2. H. C. Van de Hulst, "Light Scattering by Small Particles," Dover, 1981.
3. A. Heifetz, S.-C. Kong, A. V. Sahakian, A. Taflove, and V. Backman, "Photonic nanojets," *J Comput Theor Nanosci*, vol. 6, pp. 1979-1992, 2009.
4. Z. Chen, A. Taflove, and V. Backman, "Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: a potential novel visible-light ultramicroscopy technique," *Opt. Express*, vol. 12, pp. 1214-1220, 2004.
5. X. Li, Z. Chen, A. Taflove, and V. Backman, "Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets," *Opt. Express*, vol. 13, pp. 526-533, 2005.
6. C. M. Ruiz and J. J. Simpson, "Detection of embedded ultra-subwavelength-thin dielectric features using elongated photonic nanojets," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 16805-16812, 2010.
7. P. Ferrand, J. Wenger, A. Devilez, M. Pianta, B. Stout, N. Bonod, E. Popov, and H. Rigneault, "Direct imaging of photonic nanojets," *Opt. Express*, vol. 16, pp. 6930-6940, 2008.
8. A. Devilez, N. Bonod, J. Wenger, D. Gérard, B. Stout, H. Rigneault, and E. Popov, "Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres," *Opt. Express*, vol. 17, pp. 2089-2094, 2009.
9. M. Kim, T. Scharf, S. Mühlig, C. Rockstuhl, and H. P. Herzig, "Engineering photonic nanojets," *Opt. Express*, vol. 19, pp. 10206-10220, 2011.
10. C. Kuang, Y. Liu, X. Hao, D. Luo, and X. Liu, "Creating attoliter detection volume by microsphere photonic nanojet and fluorescence depletion," *Opt. Commun.*, vol. 285, pp. 402-406, 2012.
11. A. Taflove, and S. C. Hagness, "Computational Electrodynamics: The Finite Difference Time Domain Method," Artech House, Boston, 1998.
12. A. Darafsheh, G. F. Walsh, L. Dal Negro, and V. N. Astratov, "Optical super-resolution by high-index liquid-immersed microspheres," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, pp. 141128, 2012.