

近場光碟的發展與應用

台灣大學物理系 鞠岱琦、林威志、蔡定平

一、前言：

一般的光學碟片記錄方式，是將光源經由透鏡聚焦後，照射於記錄層上，來進行光學讀取或寫入的工作，屬於一種遠場的光學存儲技術，其分辨率或解析度會受到繞射極限(Diffraction Limit)的限制[1]。依據 Ra leigh 公式，兩物體之間的距離必須大於或等於 $(1.22\lambda/2NA)$ 才能被清楚地分辨出來，其中 λ 為使用的光源波長，NA 則為透鏡的數值孔徑(Numerical apertue)，若要有效地縮小可辨識之記錄點尺寸以提升記錄密度，必須使用短波長的光源、高折射係數的介質、或是提高透鏡的 NA 值，但不論使用前述的任何一種方式，遠場的光學記錄方法都是會受到繞射極限的限制。

近場光學則是在遠小於工作波長的距離內作量測或記錄，具有不受繞射極限限制的優點，使用近場光學的方法來獲得高密度的表面記錄，是由美國貝爾實驗室的 Eric Betzig 首先於 1992 年，在鉛鈷多層膜上，利用光纖探針的奈米(100 - 20nm)孔穴，在極近的近場距離(<10nm)下，進行磁光(MO)讀寫記錄實驗，寫下記錄密度約是 45 Gbits/inch² 的超高記錄密度[2]。然而，使用光纖探針孔穴來進行寫入或讀出的方法在實際應用上存在著一些問題，例如：探針距離記錄層表面的高度需要極精密與正確的迴饋控制，讀寫資料的速率很慢，光纖探針的信號衰減極大(一般光源通過光纖探針的衰減量級約為 $10^{-6} \sim 10^{-3}$)，以及製作探針尖端的奈米孔穴良率和品質控制不易等。

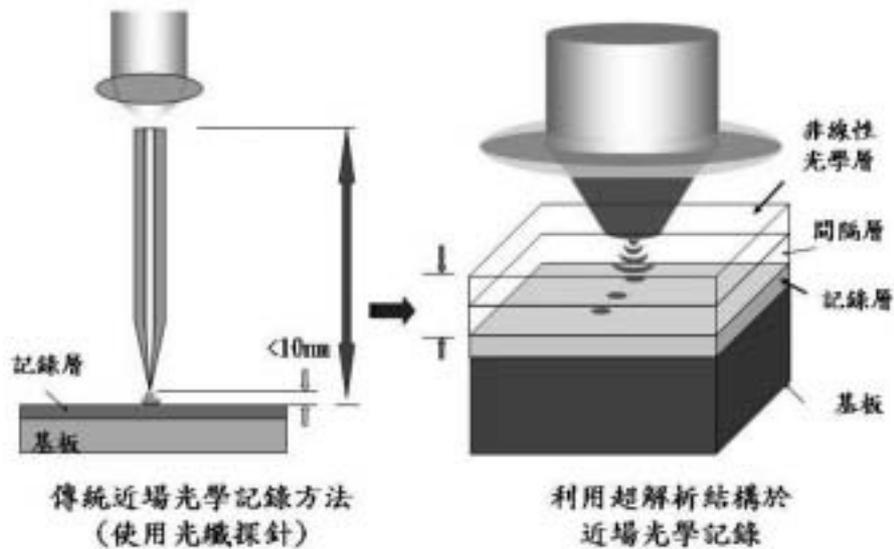
世界上第一間企圖將近場光學記錄技術，以近場光碟機的形式，進入實際商業應用產品中的公司是美國加州矽谷的 TeraStor 公司，他們以近場光學具有超高空間分辨率或解析度的優點，提出固態浸入式鏡頭[3] (Solid Immersion Lens, SIL)，作為讀寫頭的近場光碟機方法，以

改進讀寫速率過慢及光纖探針維護不易的缺點，但是最後仍有讀寫頭高度(約 50-100 nm)的控制不易，以及記錄層表面磨潤的問題難以克服等困難，已於 2000 年 4 月結束近場光碟機的開發與營運。

針對上述的種種困難，日本工業技術研究院的富永淳二博士於 1998 年 10 月首次正式發表的超解析結構[4] (super-resolution near-field optical structure, super-RENS)近場光學碟片的新式近場光學記錄方法，則提供了一個創新的近場光學記錄方法。圖一為近場超解析結構光學碟片的結構示意圖，是利用一層奈米級厚度的非線性光學薄膜代替光纖探針，將通過薄膜的聚焦光點尺寸縮小至繞射極限以下，並利用另一層固定厚度的間隔層奈米薄膜以控制在近場的距離內進行光學讀寫作用。圖二是世界上最先發表出來的鈹薄膜近場超解析結構光碟片的結構示意圖，它是在 DVD 基板上依序鍍上 170 奈米的氮化矽(SiN)介質層、15 奈米的鈹(Sb)、20 奈米氮化矽[5] (SiN)、20 奈米的鍺鈹銻(GeSbTe)合金之相變化記錄層，及 20 奈米的氮化矽保護層。和一般的 DVD 光碟片相比，這一超解析結構光碟片僅僅多了一層近場光學作用層(15 奈米厚的鈹)以及近場間隔層(20 奈米厚的氮化矽)，而這兩層關鍵的奈米薄膜對聚焦光點的影響是極重要並值得探討與研究的。

二、超解析結構光碟片的穿透式近場光學研究：

為了研究超解析結構的非線性光學工作機制，筆者的研究群以具有超高空間解析度，不受繞射極限限制的近場光學顯微儀(near-field scanning optical microscope, NSOM)進行聚焦光點的量測，此 NSOM 是筆者實驗室自行發展與建立之非光學型輕敲模式(tapping mode)近場光學顯微儀，利用音叉(tuning fork)作迴饋感測之倒立式的近場光學顯微儀來進行靜態近場



圖一 利用超解析近場結構代替光纖探針的功能以進行光學記錄讀寫架構的示意圖

DVD基板	
氮化矽(SiN)	170nm
銻(Sb)	15nm
氮化矽(SiN)	20nm
銻銻銻(Ge ₂ Sb ₂ Te ₅)	15nm
氮化矽(SiN)	20nm

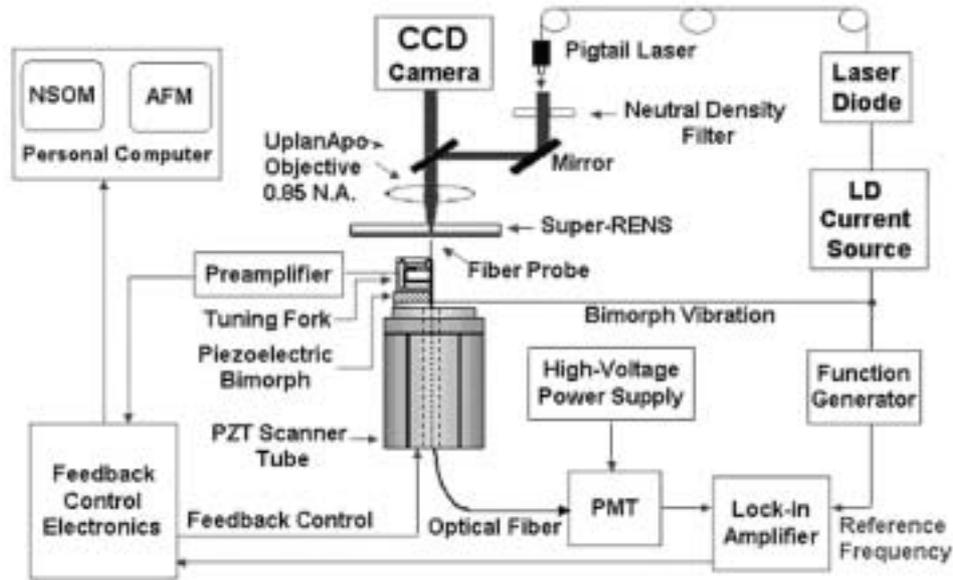
圖二 世界上最早發表出來之銻薄膜超解析近場光學結構的光碟片之結構層示意圖

光學的量測實驗[6, 7]。

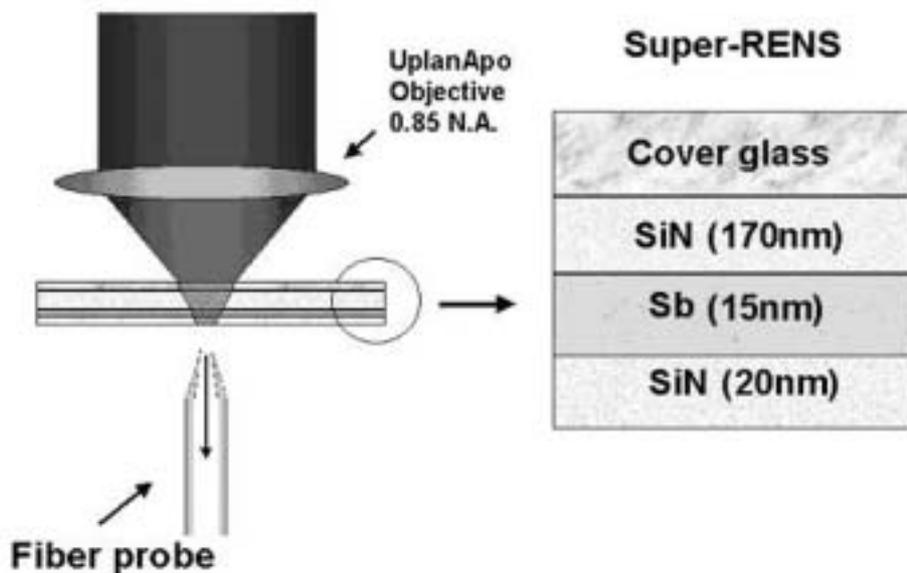
圖三是實驗設備的系統架構圖[8]，其中近場光學的光纖探針固定於石英音叉(tuning fork)的前端，受到驅動壓電陶瓷片作微小的振動，光纖探針作上下規則振動之輕敲模式的運動，石英音叉兩端電極之電壓差，與光纖探針和樣品間之作用力相關，可將電壓差的變化量傳送至迴饋控制系統(feedback control)，以維持光纖探針與樣品之間作用力的大小固定，藉由此迴饋控制訊號可以顯示樣品的表面形貌，即原子力顯微儀(Atomic Force Microscope, AFM)的影像。同時，可將光纖探針尖端的奈米孔穴所收取到的近場光學訊號，送到光電倍增管(PMT)放大，再經由鎖相放

大器(Lock-in Amplifier)輸出，來形成穿透式近場光學(NSOM)的顯微影像。另外，此一輕敲模式的近場光學顯微儀的光纖探針，在垂直於樣品表面方向 Z 軸上作規則性的簡諧振動，故可以兩台鎖相放大器來獲得其近場光強梯度(near-field intensity gradient)之影像[6, 7]，以研究近場光作用的性質。

圖四顯示穿透式近場量測超解析光學結構的示意圖，以波長 650 nm 的雷射二極體(Pigtail Laser Diode)經過一數值孔徑為 0.85 之 40 倍顯微物鏡，聚焦於超解析光學結構樣品上，當雷射光束穿透樣品並聚焦於樣品的近場光學作用層時，利用 AFM 之迴饋控制，使光纖探針的針尖與樣品的距離固定在近場的距離內，以進行近場光穿透訊息的量測。圖五(a)、(b)、(c)是在一片乾淨的玻璃蓋玻片樣品上，對 10 μ m X 10 μ m 範圍分別取得的表面形貌 (AFM topograph)，近場光強度影像 (near-field intensity image)，和近場光強梯度影像 (near-field intensity gradient image)，其中圖五(a)為玻璃蓋玻片之表面形貌，顯示玻璃蓋玻片之表面相當地平坦，表面的粗糙度均方根值(RMS)約為 0.3 nm，圖五(b)則顯示雷射光聚焦在玻璃上時，光點的半高全寬(FWHM)值約為 860nm，而由圖五(c)得知，在光強梯度影像方面，沒有量測到明顯的訊號，說明光穿透玻璃時是以行進波 (propagating wave) 的方式傳遞，在聚焦光穿透蓋玻片的過程中並未產生可量測之消散



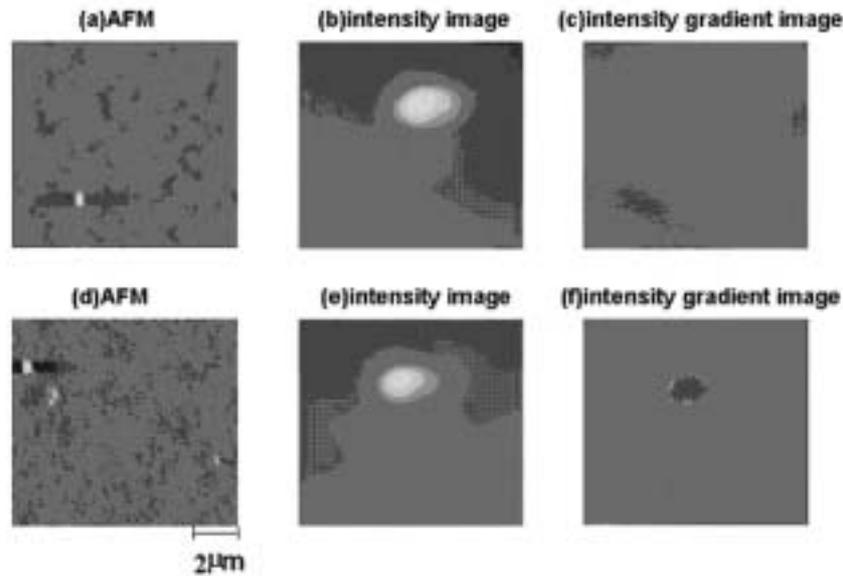
圖三 使用石英音叉來感測探針與樣品距離的輕敲式近場光學顯微鏡，量測近場超解析碟片結構的實驗架構圖



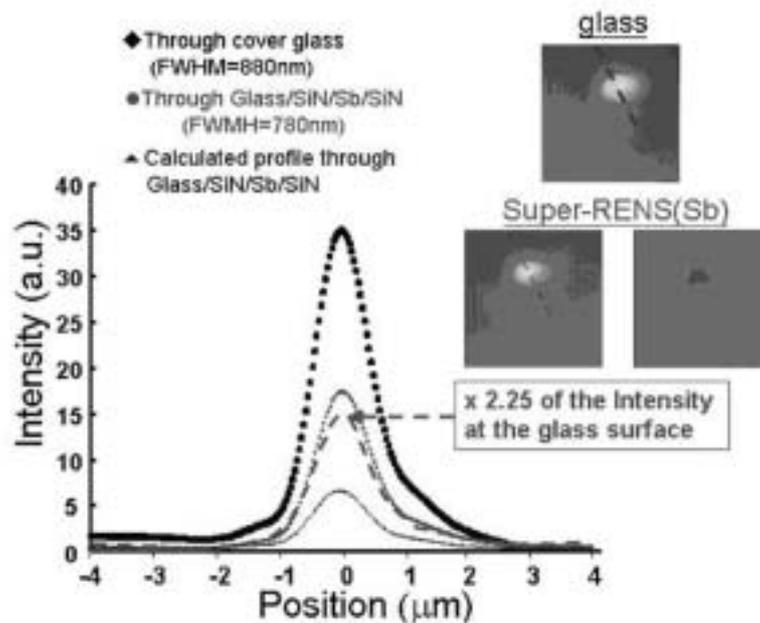
圖四 以光纖探針量測近場超解析光學結構之穿透光點的實驗架構示意圖，以及樣品的結構圖

波，所以整個量測區域對光行進方向之光強梯度量測值為零。而對於超解析結構樣品的實驗結果，則顯示在圖五(d)、(e)及(f)。其中圖五(d)為樣品的表面形貌，圖五(e)為其近場光強度影像，圖五(f)便是其近場光強梯度影像，由實驗結果顯示，鍍有超解析結構層的蓋玻片表面粗糙度的均方根值(RMS)在 $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ 的範圍內，約為 2.2 nm，圖五(e)則顯示聚焦光點的半高全寬值在經過超解析結構後，約為 780nm，而在

光強梯度影像的圖五(f)中有一個值得探討的現象，即在所量測的光點(其半高全寬為 780 nm)的區域內，以與圖五(c)中相同的量測靈敏度來量取其近場光強梯度影像時，會出現一寬度為 850 nm 的凹陷圓形平坦區域，且其位置正好對應近場光強度分佈中光點之位置，由此可知，當波長 650 nm 的雷射光穿過銻膜後會產生隨距離改變的場強，目前大家認為這是由於聚焦的雷射光在 Sb/SiN 的介面上，激發侷域性表



圖五 為聚焦光點之穿透式近場光學顯微(NSOM)量測結果(a)為玻璃蓋玻片樣品的 AFM 表面形貌、(b)為近場光強影像、(c)為近場光強梯度影像；與銻薄膜超解析近場光學結構樣品的 AFM 表面形貌(d)、近場光強影像(e)、近場光強梯度影像(f)。

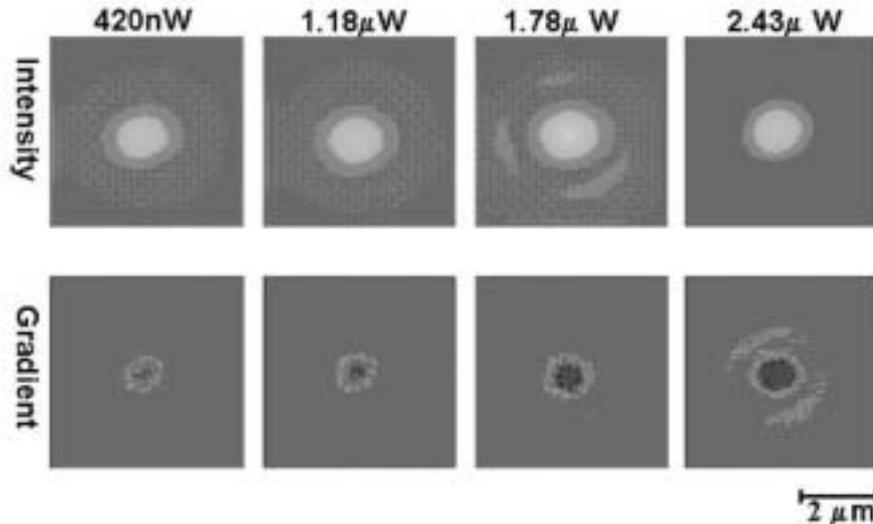


圖六 顯示參考玻璃蓋玻片基底()與銻薄膜超解析光學結構(●)的穿透光點近場光強分佈比較，最低的曲線(▲)為依照超解析光學結構作一般之線性穿透計算之光強分佈曲線，而虛線則為將計算出來之估計光強值乘上 2.25 後的分佈曲線。

面電漿子(localized surface plasmon)的增強場所引起的效應。

此外，如果分析玻璃及超解析近場光學結構樣品之近場光強的訊號，即圖五(b)與五(e)，可得到圖六之光強分佈圖，顯示在相同的雷射入射光功率下，玻璃片樣品的近場光強分佈曲

線()，與經過超解析結構樣品的近場光強分佈曲線(●)，以及依據超解析結構樣品的膜層結構與厚度計算出來的穿透光強分佈的曲線(▲)，實驗結果顯示，實際量測到的穿透光強度分佈比計算結果高出 2.25 倍以上，尤其在中央部份的增強效應比其他部份要強很多，這個



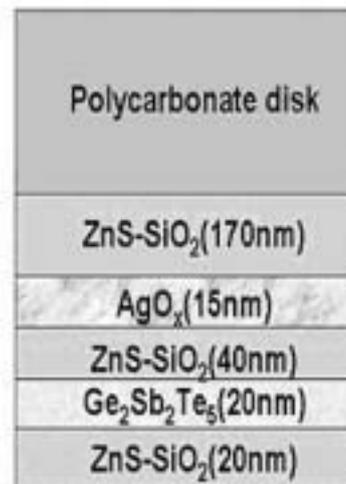
圖七 上排是聚焦光點經過超解析光學結構的近場光學穿透強度的影像，掃描範圍為 $5 \times 5 \mu\text{m}$ 。下排是近場光強梯度的影像，各列的雷射光功率分別為 0.42、1.18、1.78、及 $2.43 \mu\text{W}$ 。

結果間接證明了侷域表面電漿子引起的增強場效應。圖七則是以不同雷射功率穿透入射至超解析結構的近場光強影像（上排）與其對應之近場光強梯度影像（下排）的比較圖，實驗顯示被侷域表面電漿量子激發的範圍可以比聚焦光點還小，並可產生靜態且穩定的消散場，所以可藉由改變雷射功率控制激發侷域電漿場的範圍。

三、散射式超解析結構的發展：

在 1999 年年底，日本的產業技術融合研究所次世代光基盤研究小組首次發展出第二類以氧化銀(AgO_x)薄膜為主要作用層的超解析結構光碟片，此種超解析結構光碟片的組成是將主要作用層由銻(Sb)換為氧化銀(AgO_x)，結果發現具有比銻薄膜近場光碟片更好的穩定性及更高的載子雜訊比(carrier-to-noise ratio)，其結構的示意圖如圖八。

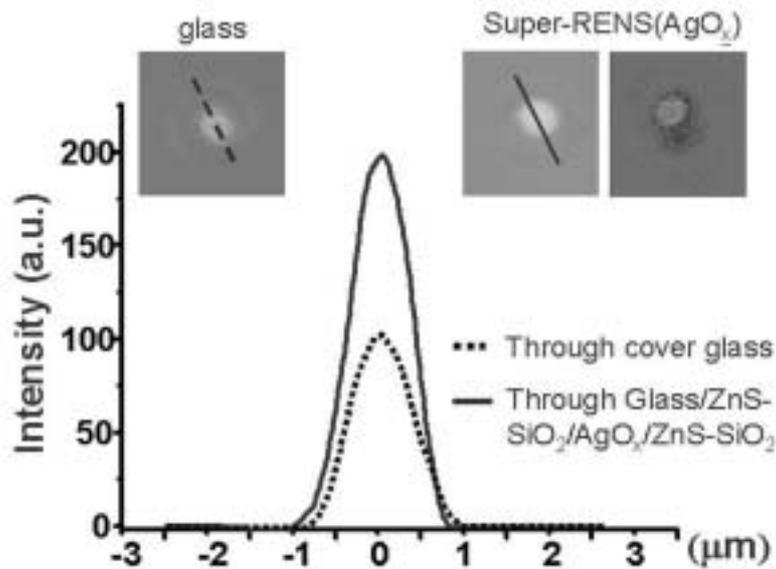
目前大家對氧化銀近場超解析結構之工作机制的瞭解是當雷射光聚焦於氧化銀作用層時，脈衝之雷射聚焦光點的光熱效應會使銀原子與氧原子暫時分離，但是由於膜層上下被硫化鋅-二氧化矽(ZnS-SiO_2)包覆，氧原子祇會分佈於銀原子四周而不擴散流失，且銀原子受到聚焦光照射後，產生極強的侷域性表面電漿子效應，使整個穿透光點的中央區域發生侷域性增強效應，傳導及耦合至近場距離內的相變化



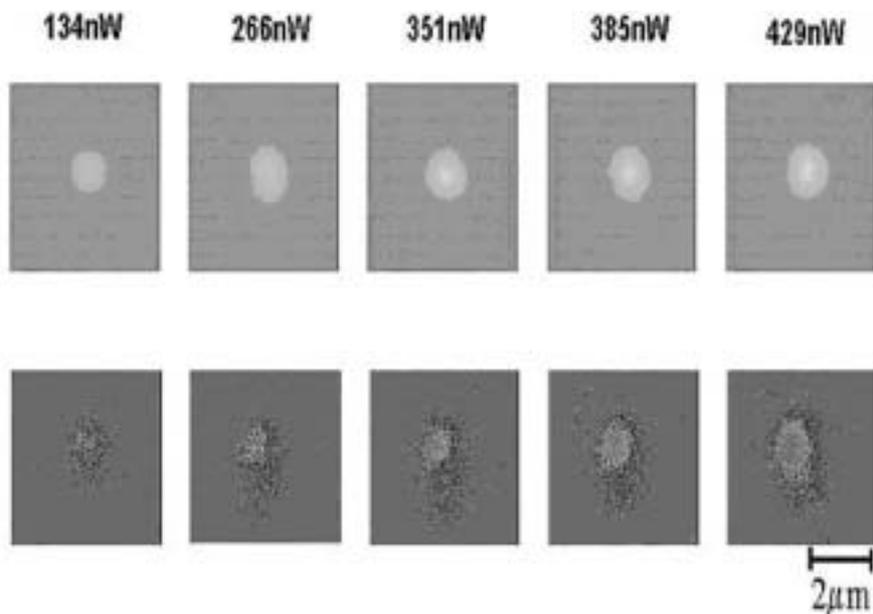
圖八 氧化銀超解析近場結構光碟片的各層示意圖。

記錄層，在記錄層上感應及誘導地寫下小於繞涉極限的光學記錄點，當雷射光離開後，銀與氧便會再度結合為初始狀態的氧化銀，且銀與氧的分離及再結合速度約在奈秒(ns)量級[9]，因此能應付光碟片的高速讀寫。

氧化銀超解析結構近場光學量測的實驗架構，與銻薄膜超解析結構的近場光學量測方式相同，實驗的架構如圖三及圖四。圖九是光點穿透氧化銀超解析結構與參考樣品之普通玻璃片的近場光強分佈[10]實驗結果的比較，顯示光點穿透氧化銀超解析結構的光強分佈比穿透透明蓋玻片玻璃的光強分佈還要強許多，這可



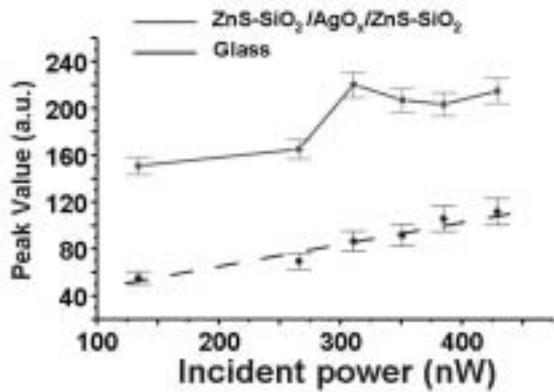
圖九 玻璃片蓋玻片樣品(虛線)與氧化銀薄膜超解析結構(實線)的穿透光點的近場光強分佈比較。



圖十 氧化銀超解析結構光碟片在不同入射光強度下的穿透光點近場光強影像(上排)，以及近場光強梯度影像(下排)的實驗量測結果。

能是由於氧化銀中析出的奈米銀粒子之特殊的增強散射效應所造成的。圖十則是不同的入射光強度下，氧化銀超解析結構的近場光強的影像(上排)與近場光強梯度影像(下排)。依據近場光強的影像(上排圖形)，穿透光點直徑大小均約在 950 nm~970 nm 之間，沒有太顯著的變化，但依照圖十一的結果，穿透光點的光強峰值 (peak intensity) 隨入射光強度的變化呈非線性增益 [10,11]，最高可達到入射光強的 2.8 倍，這

可能是由特殊的侷域增強散射效應所造成。而在圖十下排的梯度影像中，隨著入射光強度的增加，光點中央會漸漸出現一亮區，而且亮區範圍隨著入射光強度的增加變大，由於近場光強梯度影像相當於表面消散波分佈的影像，所以此現象表示，超解析結構表面會產生一個隨著入射雷射光強度變化而改變的消散場，而此消散波的產生正是因為薄膜表面之侷域表面電漿量子作用的緣故。除此之外，由觀察光強梯



圖十一 不同入射光強度下，氧化銀超解析結構的穿透光強峰值的實驗量測結果。

度影像的變化趨勢，可知中央較亮的區域其實是許多極小的亮點所組成，而這些小亮點的密度又與光的入射能量及動量有關，故氧化銀薄膜所產生的效應與侷域性的表面電漿量子效應密切相關。

另外，因為在不同製作環境下，銀和氧化合的比例並不固定，因此氧化銀不一定是在極穩定的狀態，而氧化銀超解析結構光碟片經過長時間放置或多次讀寫後，容易使超解析結構層產生變化。因此，筆者實驗室一直致力於開發新型超解析結構，以改善超解析結構近場光學光碟片的各項缺點，最近已發展出第三種材料的超解析近場光碟片，圖十二是筆者實驗室自行製作之三種不同材質的近場光碟片的照片，圖中左下方與右下方分別為銻與氧化銀薄膜之超解析結構近場光碟片，而上方則是以新開發的第三種材質與機制所製作出之近場光碟片。新開發之近場超解析結構比氧化銀結構更穩定，且不會因多次讀寫及環境改變而變質，由圖十三的實驗結果可知，其載子雜訊比在記錄點為 100 奈米時仍可達 35dB 以上，目前這方面的發展正在申請多項專利中。

四、未來相關的應用與發展：

日本工業技術研究院的富永淳二博士研究群利用超解析結構的侷域增強場效應，曾將銻薄膜超解析結構鋪在光阻上，利用波長為 650nm 的紅光，在光阻上寫入約 180nm 的線寬，此種近場光刻印(near-field photolithograph)的方法不僅能用作高速刻印技術，且只需使



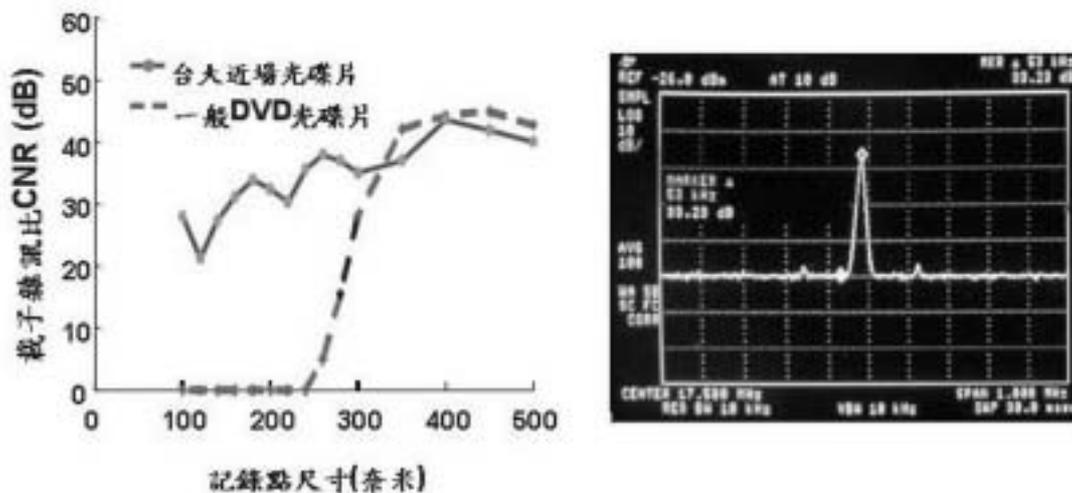
圖十二 以不同材質製作的三種近場光碟片，圖中左下方與右下方分別是銻與氧化銀奈米薄膜之超解析結構近場光碟片，而上方則是以新開發的第三種材質所製作出之新型近場光碟片。

用一般的半導體雷射光源即可製作極小的線寬結構，因此能有效的降低奈米刻印技術(Nanolithograph)的成本。此外，日本的研究群亦於 2001 年發表，利用氧化銀超解析結構的非線性增益效果，來製作光子電晶體(photonic transistor)的初步構想與實驗結果[12]，使純光學式運算或光子電腦的發展邁進一大步。

五、結語：

利用近場超解析結構製作近場光碟片的方法，與目前使用短波長藍光半導體雷射光源來提升光碟片容量的方法比較，近場光碟片不需找尋因短波長作用而減少光碟片生命期(lifetime)的各項材料，且近場光碟片所提升的記錄容量，比其他方法高一個數量級以上。另外，近場光碟片在成本方面，僅增加兩層奈米量級的薄膜，不須對目前使用的光碟機或光源作大幅更動，其經濟價值及市場競爭力相對提高許多。

台灣大學物理研究所的近場光碟研究群是世界上少數具有近場光碟片製作能力的實驗室，目前仍在積極地就近場光碟片的組成結構、材料及物性在進行各式製作與測試的研究；另一方面，也針對各種會產生侷域性增強效應的奈米材料與結構進行近場光學作用的研究。同時亦與日本通產省工業技術研究院之先



圖十三 以新開發之材質製作出之近場光碟片的載子雜訊比量測結果，左邊是當記錄點為 100nm 直徑時的頻譜分析儀的載子雜訊比量測值，目前最高可達 35dB 以上，見右圖。

進工業科學與技術中心(AIST)的先進光學技術實驗室(LAO-TECH)合作，冀望共同就近場光碟片的製作與發展一起努力，相信不久的將來定能將光碟片產業推進至一個全新的世代—即超高記錄密度的近場光碟片世代。

參考文獻

- [1] M. Born, E. Wolf. Principles of optics, Oxford: Pergamon, 81 (1959).
- [2] E. Betzig, P. L. Finn, J. S. Weiner, Appl. Phys. Lett. **60**, 2484 (1992).
- [3] B. D. Terris, H. J. Mamin, D. Rugar, W. R. Studenmund, and G. S. Kino, Appl. Phys. Lett. **68**, 141 (1996).
- [4] J. Tominaga, T. Nakano and N. Atoda, "Super-resolution structure for optical data storage by near-field optics", *SPIE Proc.* **3467**, 282(1998).
- [5] Junji Tominaga, Hiroshi Fuji, Akira Sato, Takashi Nakano, Toshio Fukuda, and Nobufumi Atoda, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2 **37**, L1323 (1998).
- [6] D. P. Tsai, C. W. Yang, S. Z. Lo and H. E. Jackson: Appl. Phys. Lett. **75**, 1039 (1999).
- [7] D. P. Tsai and Y. Y. Lu, Appl. Phys. Lett. **73**, 2724 (1998).
- [8] D. P. Tsai, W. C. Lin, Appl. Phys. Lett. **77**, 1413 (2000).
- [9] Toshio Fukuda, Dorothea Büchel, Shunichiro Shinbori, Junji Tominaga, Nobufumi Atoda, Din Ping Tsai, and Wei Chi Lin, J. Appl. Phys. **89**, 6139 (2001).
- [10] Wei-Chih Liu, Cheng-Yen Wen, Kuei-Hsien Chen, Wei Chih Lin, and Din Ping Tsai, Appl. Phys. Lett. **78**, 685 (2001).
- [11] W.C. Liu, **D. P. Tsai**, "Optical tunneling effect of surface plasmon polaritons and localized surface plasmon resonance," Phys. Review B **65**, 155423 (2002).
- [12] J. Tominaga, C. Mihalcea, D. Büchel, H. Fukuda, T. Nakano, N. Atoda, H. Fuji, and T. Kikukawa, Appl. Phys. Lett. **78**, 2417(2001).