

同軸式全像資訊儲存系統之理論模型

The Theoretical Model of the Collinear Holographic Data Storage System

鄭智元、余業緯、孫慶成

Chih-Yuan Cheng, Yeh-Wei Yu, Ching-Cherng Sun

全像資訊儲存技術俱備超高儲存容量與及二維資訊存取技術，而被視為最具潛力的下世代儲存技術。本研究藉由相位疊加法以及純量繞射理論建立了同軸式全像資訊儲存系統之理論模型，以此理論模型推導出之近軸近似解，可幫助我們掌握系統的物理特性，我們藉此提出最佳解決方案。本文首先探討參考光分布對點光源擴散響應以及位移選擇性的影響。接著在參考光加入相位調製，有利於使用較低功率的雷射光源以及系統微型化，並且減少點擴散響應半寬。藉此增加單一頁面內位元資訊，進而同步提升系統儲存容量與讀寫速度。

The holographic data storage possesses ultra-high capacity and two-dimensional access technology. It is regarded as the most promising storage technology in the next generation. Based on VOHIL and scalar diffraction theory, we construct the theoretical model of the collinear holographic data storage system. According to the theoretical model, we derive the paraxial solution, which can help us to grasp the physical characteristics and propose the best solution. First, we discuss the effects of the distribution of the reference patterns on the point spread function and the shift selectivity in this paper. Then, we add the phase modulation in the reference pattern. It facilitates the lower power of the laser light source and miniaturization of the system. What's more, it decreases the half width of the point spread function. By adding more bits within per page, we enhance the capacity and accessing speed synchronously.

一、前言

隨著全球雲端運算服務市場與大數據技術蓬勃發展，資訊儲存成為此趨勢下受惠最大的產業，然而通訊技術的穩定性隨著雲端運算服務快速發展受到考驗。2009年 Google 當機一個小時，殃及 14% 的用戶；同年美國社群網站 Facebook、Twitter 與 LiveJournal 也遭到駭客侵襲，全球超過三億用戶

受到影響；2012年初 Dropbox 的網站故障，導致用戶收到垃圾郵件。由於沒有人可以保證資訊儲存可以永久安全，更穩固的資訊備份無疑是所有雲端儲存業務的重要基石。而所有數位資料中，除了 30% 的活躍性資料外，70% 的非活躍性資料適於近線的方式進行存取，以達到最高經濟效益。此外還需要 100% 的離線資料備份以確保資料安全，由此可知近線儲存與離線備份技術的需求量最高可達

所有數據資料的 170%。

現今主流的近線儲存與離線備份技術為 LTO 磁帶技術，其特點為：(1) 公認為最經濟的儲存方式；(2) 此技術歷經 60 年的歷史考驗；(3) 存在多家讀寫機器與卡匣製造商。然而，LTO 磁帶資料庫具有以下致命缺點：(1) LTO 的 1×10^{-12} 誤碼率使其不適用於高品質資料庫儲存；(2) 每隔 3 至 5 年必須重新備份；(3) 無法抵抗環境濕度及電磁場；(4) 磁帶拉長、拉扯與絞帶等技術爭議；(5) 需要以空調設備控制氣候變因導致高耗能；(6) 循序讀取方式無法讓使用者快速獲得特定資料。

相較之下，藍光光碟 (Blu-ray disc) 俱備 (1) 能夠保存資料長達 50 年以上；(2) 能夠抵抗濕度、電磁場與讀取系統損毀等外部災害；(3) 隨機讀取特點使得資料搜尋時間遠勝過磁帶的循序讀取；(4) 相較之下更易於管理等優勢。因而更適用於被應用於金融、政府、軍事、核能、醫療等需要絕對資料安全性的機構。有鑒於此，SONY、Panasonic、Arxstor 及 Hit-Storage 近年皆推出 Blu-ray disc 作為儲存媒介的資料庫系統，Facebook 也於今年 (2014 年) 開始使用 Blu-ray 資料庫。然而，Blu-ray disc 只能用於資料庫，卻無法取代 LTO 磁帶技術在備份市場中之地位，主要原因在單位體積儲存容量與單位價格儲存容量無法與 LTO 磁帶技術抗衡。

而全像光學儲存技術對於現存的藍光光碟及 LTO 磁帶技術而言，是真正的殺手級近線儲存／離線備份技術，其除了俱備藍光光碟所擁有的四項優勢，還擁有超高傳輸速度、超高儲存容量、遠低於藍光光碟的單位價格儲存容量、更高的資料可靠度等優勢，使得全像光學儲存技術成為最有潛力的近線儲存／離線備份技術。

二、同軸式全像資訊儲存系統

同軸式全像資訊儲存系統的優點在於其架構簡單，容易微型化，並且易與現有 CD/DVD 光碟機整合，具有向下相容的特點^(1, 2)。圖 1 為同軸式全像資訊儲存系統架構，紀錄所使用的光源為綠光或是藍光雷射。記錄過程中，參考光和訊號光位於相同平面上，參考光位於外圍部分，訊號光位於中間部分，如圖 2(a) 所示⁽³⁾。參考光與訊號光圖形由空間光調製器 (spatial light modulator, SLM) 顯示。雷射光首先經由物鏡、針孔以及透鏡所組成擴束系統，使雷射光成為平行光束。在到達 SLM 調製後，產生訊號光和參考光分布，此時雷射光偏振方向為 TM 光，因此傳播後會穿透極化分光鏡 (polarized beam splitter, PBS)。接著通過四分之一波板 (quarter-wave plate, QWP) 後，雷射光偏振由

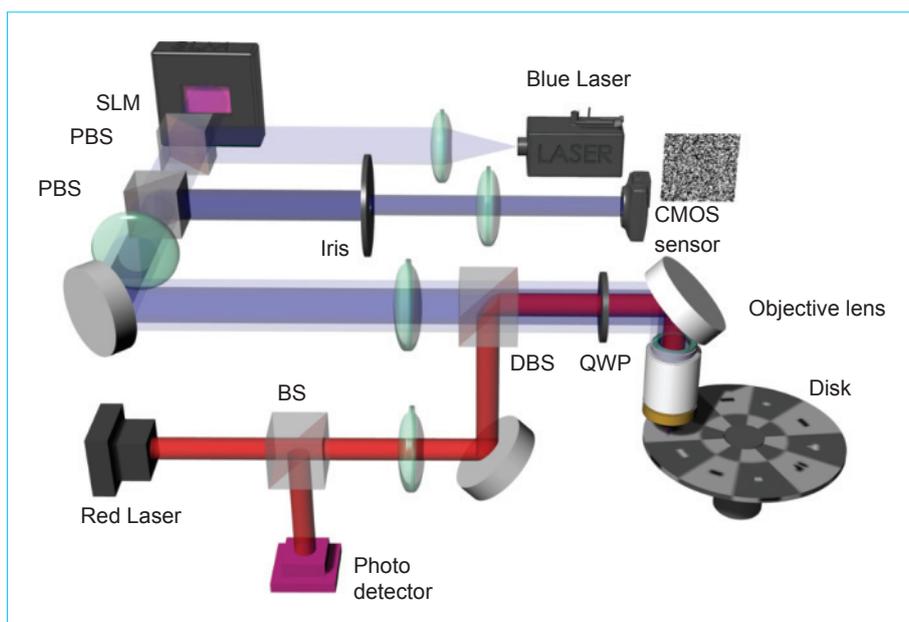


圖 1. 同軸式全像資訊儲存系統之光學架構。

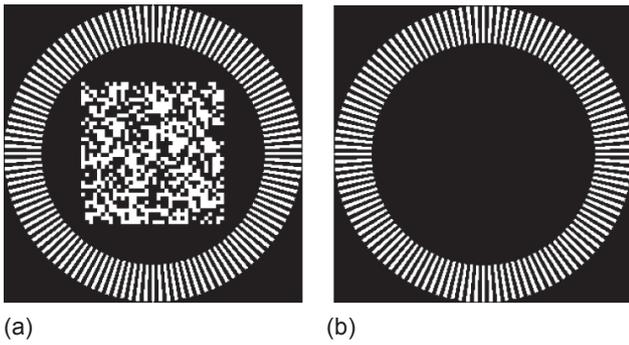


圖 2. (a) 紀錄時參考光與訊號光分布⁽³⁾, (b) 讀取時參考光分布。

TM 線偏振轉成圓偏振，最後再經由物鏡聚焦後於紀錄光碟上產干涉，而記錄干涉條紋。

在讀取過程中，SLM 只顯示參考光部分，如圖 2(b) 所示，雷射光偏振方向與記錄過程時相同。當雷射光入射到已記錄的光碟時，產生的繞射光經由光碟底部反射層反射，此時繞射光偏振為圓偏振，但偏振方向與入射到光碟片之前的參考光偏振方向正交。繞射光經過 QWP 後，偏振方向轉變成 TE 偏振，因此經過 PBS 後與原雷射光路分開，最後成像在偵測器上讀取繞射光。圖 1 中有一伺服系統，使用紅光雷射光源，經由分色分光鏡 (dichroic beam splitter, DBS) 反射後與紀錄和讀取時光路相同，而到達紀錄碟片上。利用反射伺服光束中的資訊，及時調整物鏡位置來對紀錄碟片做定位。

三、同軸式全像儲存系統理論模型

在進行同軸式全像儲存系統理論分析時，我們利用簡化的等效模型，來推導繞射光在測器的分布。記錄過程如圖 3(a)⁽⁴⁾，紀錄資訊的碟片放置於兩透鏡共焦面附近，焦面位置恰為碟片反射面。輸入面圖形由 SLM 控制，外圈部分為參考光，中間部分為訊號光，如圖 2(a) 所示。輸入面位於透鏡前焦面，經由透鏡聚焦在後焦面產生干涉，並利用碟片紀錄干涉條紋。

圖 3(b) 為讀取過程，在 SLM 只顯示外圍參考光，如圖 2(b) 所示。繞射光沿著原訊號光方向前進，在經過碟片底部反射層反射後，可等效成繞射光在光碟片內，通過兩倍碟片厚度的距離，經過透鏡後成像在偵測器上。此等效模型相當於一個 4-f 光學系統。

當訊號光 S 和參考光 R 經過透鏡到達碟片所產生干涉條紋，並記錄在碟片上，可以寫成

$$t_A \propto I = |S + R|^2 = |S|^2 + |R|^2 + SR^* + S^*R \quad (1)$$

t_A 為碟片紀錄完成後的振幅穿透率函數，正比於紀錄時干涉條紋的光強 I ，須特別注意的是，此條件成立必須是紀錄的碟片尚未達到飽和狀態或是過曝才成立。

當讀取光 P 照射紀錄完成光碟片時，繞射光光場可以寫成

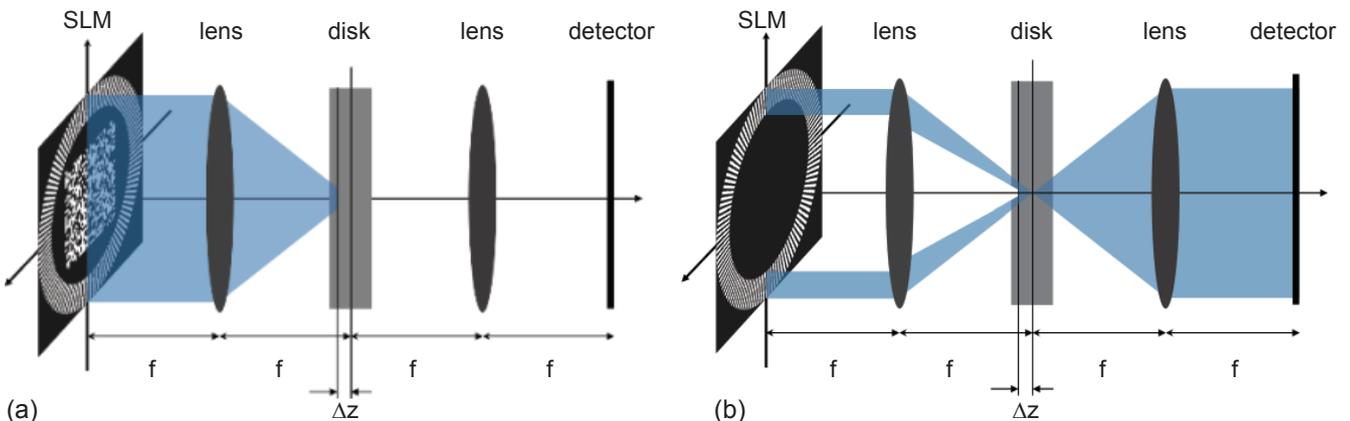


圖 3. (a) 紀錄時理論模型示意圖⁽⁴⁾, (b) 讀取時理論模型示意圖。

$$D = P(|S|^2 + |R|^2) + PSR^* + PS^*R \quad (2)$$

前兩項為 DC 項，成像後即為參考光部分，可用孔徑濾除；第三項為重建的訊號光，第四項為重建共軛訊號光，我們求第三項，即重建訊號光計算繞射光場分布。

我們利用相位疊加法 (volume hologram being an integrator of the lights emitted from elementary light sources, VOHIL)⁽⁵⁾ 計算體積全像的繞射光分布，如圖 3(a) 所示。所謂相位疊加法，即計算相位在偵測器上累加所得光場分布的結果，在此把有厚度的光碟片視為無窮多層位於不同深度 (Δz) 的薄紀錄碟片所組成。由等效模型可得到每一層薄紀錄碟片在讀取過程位於偵測器上的光場分布，則體積全像光碟片在偵測器的繞射光場，可視為每層薄光碟片所產生的繞射光在偵測器上彼此干涉的結果，因此偵測面上的光場分布為對每個深度 (Δz) 的繞射光在觀測面上的積分。繞射光場取絕對值平方，即得到相對繞射光強分布，文中相對繞射光強皆歸一化來表示。

由費涅爾繞射 (Fresnel diffraction)⁽⁶⁾ 理論可得知，在碟片上的參考光 U_{1R} 和訊號光 U_{1S} 光場分別可以寫成

$$U_{1R}(u, v, \Delta z) = \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\lambda f} \cdot F \left\{ U_R(x_0, y_0) \cdot e^{j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(x_0^2 + y_0^2)} \right\} \quad (3)$$

以及

$$U_{1S}(u, v, \Delta z) = \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\lambda f} \cdot F \left\{ U_S(x_0, y_0) \cdot e^{j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(x_0^2 + y_0^2)} \right\} \quad (4)$$

其中 $F\{\cdot\}$ 表示傅立葉轉換 (Fourier transformation) 運算， $U_R(x_0, y_0)$ 和 $U_S(x_0, y_0)$ 分別為參考光和訊

號光在 SLM 上的分布； λ 為雷射光源在紀錄光碟內的波長， f 為透鏡焦距。

當讀取光 P 照射紀錄完成光碟片時，繞射光場 D 形式如 (2) 式所示，取第三項要重建的訊號光部分，光柵的形式可寫成

$$G(u, v, \Delta z) = U_{1S}(u, v, \Delta z) \cdot U_{1R}^*(u, v, \Delta z) \quad (5)$$

當光碟片無位移時，重建光在碟片上，光場可寫成

$$D_{disc}(u, v, \Delta z) = U_{1P}(u, v, \Delta z) \cdot U_{1S}(u, v, \Delta z) \cdot U_{1R}^*(u, v, \Delta z) \quad (6)$$

上式中

$$U_{1P}(u, v, \Delta z) = \frac{e^{j\frac{\pi}{4}}}{\lambda f} \cdot F \left\{ U_P(x_0, y_0) \cdot e^{j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(x_0^2 + y_0^2)} \right\} \quad (7)$$

為讀取光在光碟片上光場分布， $U_P(x_0, y_0)$ 為讀取光在 SLM 的光場分布。一般而言，讀取光和參考光為相同型式，才可以還原出原始訊號光。

經由後半部的系統模型後，每一層薄碟片在偵測器上繞射光場可寫成

$$D_{det}(x'_0, y'_0, \Delta z) = \frac{j \cdot e^{-j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(x_0'^2 + y_0'^2)}}{(\lambda f)^2} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[U_S(-x'_0, -y'_0) \cdot e^{j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(x_0'^2 + y_0'^2)} \right] \\ * \left[U_R(x'_0, y'_0) \cdot e^{j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(x_0'^2 + y_0'^2)} \right]^* \\ * \left[U_P(-x'_0, -y'_0) \cdot e^{j\frac{\pi\Delta z}{\lambda f^2}(x_0'^2 + y_0'^2)} \right] \end{array} \right\} \quad (8)$$

上式中“*”為卷積 (convolution) 運算。最後根據相位疊加法的概念，將碟片上各層光柵 (Δz) 所產生的繞射光在偵測器上疊加，即得到總光場分布為

$$D_{\text{det}}(x'_0, y'_0) = \frac{j \cdot 2T}{(\lambda f)^2} \cdot \left\{ \iiint \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} U_S(-x'_0 + \xi_2, -y'_0 + \eta_2) \cdot U_R^*(\xi_2 - \xi_1, \eta_2 - \eta_1) \cdot \\ U_P(-\xi_1, -\eta_1) \cdot \sin c \left[\frac{2T}{\lambda f^2} (-x'_0 \xi_2 - y'_0 \eta_2 + \xi_2 \xi_1 + \eta_2 \eta_1) \right] \end{array} \right\} d\eta_1 d\eta_2 d\xi_1 d\xi_2 \right\} \quad (9)$$

上式中 T 為碟片紀錄層厚度。相位疊加的物理意義決定繞射強度分布，也就是每一層薄碟片所產生的繞射光到達偵測器上某一位置的相位是否同步。若相位同步，則產繞射光，反之，若所有相位完全抵消時，則沒有繞射光產生。

令 a 和 b 分別為讀取時碟片在 u 及 v 方向上之位移距離，因此 (5) 式光柵分布改寫成 $G(u - a, v - b, \Delta z)$ 。在位移後碟片的繞射光光場可寫成

$$D_{\text{disc}}(u, v, \Delta z) = U_{1P}(u, v, \Delta z) \cdot U_{1S}(u - a, v - b, \Delta z) \cdot U_{1R}^*(u - a, v - b, \Delta z) \quad (10)$$

四、位移選擇性

位移選擇性 (shift selectivity) 為當記錄完成後的碟片在讀取時位移一點距離，在偵測器上讀取繞射光分布情形⁽⁹⁾。位移選擇性影響紀錄碟片所可以記錄的頁數，表現愈佳，則可記錄更多頁數。

經過透鏡成像後，可得到每一層薄碟片在偵測器上的繞射光場分布。最後，再利用相位疊加法的概念，可計算出紀錄碟片位移後在偵測器上的總光場為

$$D_{\text{det}}(x'_0, y'_0, a, b) = \frac{j \cdot 2T}{(\lambda f)^2} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{\lambda f} (a \cdot x'_0 + b \cdot y'_0)} \cdot \left\{ \iiint \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} U_S(-x'_0 + \xi_2, -y'_0 + \eta_2) \cdot U_R^*(\xi_2 - \xi_1, \eta_2 - \eta_1) \cdot U_P(-\xi_1, -\eta_1) \cdot \\ e^{j \frac{2\pi}{\lambda f} (a \cdot \xi_1 + b \cdot \eta_1)} \cdot \sin c \left[\frac{2T}{\lambda f^2} (-x'_0 \xi_2 - y'_0 \eta_2 + \xi_2 \xi_1 + \eta_2 \eta_1) \right] \end{array} \right\} d\eta_1 d\eta_2 d\xi_1 d\xi_2 \right\} \quad (11)$$

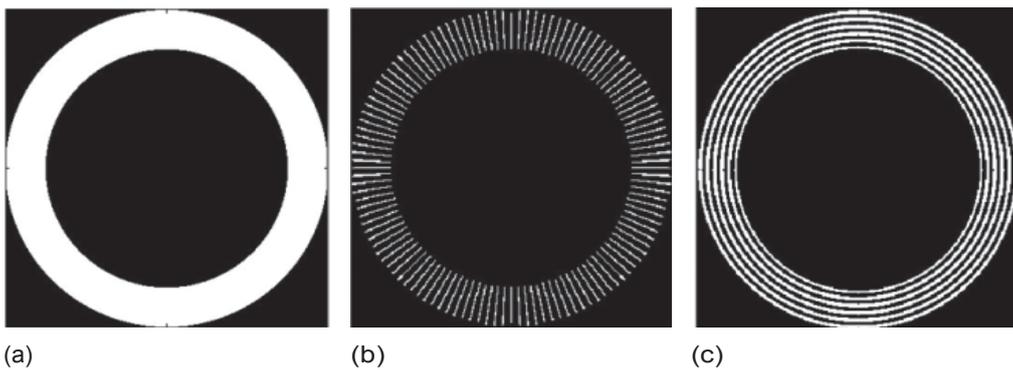


圖 4. 參考光圖形，(a) 圓環 (ring)、(b) 放射狀線段 (radial)、(c) 同心圓環 (multi-ring)。^(7,8)

當考慮訊號光為位於光軸上的點光源時，訊號光可以表示成 $U_S(x_0, y_0) = \delta(0, 0)$ ，可簡化為

$$D_{\text{det}}(0, 0, a, b) = \frac{j \cdot 2T}{(\lambda f)^2} \cdot \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} |U_R^*(-\xi_1, -\eta_1)|^2 \cdot e^{j \frac{2\pi}{\lambda f}(a \cdot \xi_1 + b \cdot \eta_1)} d\xi_1 d\eta_1 \right\} \quad (12)$$

由上式可得知，當輸入訊號光為光軸上的點光源時，其位移選擇性為參考光強度分布的傅氏轉換，因此不受到參考光相位分布影響。圖 4^(7, 8) 中三種參考光，分別為：(a) 圓環 (ring)、(b) 放射狀線段 (radial)、(c) 同心圓環 (multi-ring)，代入 (12) 式模擬系統位移選擇性。

令系統參數：透鏡焦距為 5 mm、雷射光源波長為 532 nm、紀錄碟片厚度為 0.6 mm、碟片折射率為 1.5；參考光內環與外環半徑比為 3：4。圖 5 為三種不同參考光在 x 方向之位移選擇性。由模擬結果可得知，此三種參考光之位移選擇性變化幅度不大，當碟片位移大約 $4.5 \mu\text{m}$ 時，其相對繞射光強降到 10^{-3} 。由於圖 4 中參考光圖形皆為圓對稱圖形，因此 y 方向的位移選擇性與 x 方向位移選擇性相同。

五、點擴散函數

點擴散函數 (point spread function, PSF) 為描述點光源經過成像系統後，影像的模糊情形。當點擴散函數範圍愈小時，意味著在紀錄資訊時每一個位元所需的像素愈少，也就是說同一頁內可以容納更多資訊，提高單頁儲存容量。同軸全像儲存系統的點擴散響應與參考光形式有關，因此針對不同參考光圖形，分析其點光源擴散響應。根據 (8) 式，當輸入訊號光為位於空間光調制器中心的點光源時，(9) 式可簡化成

$$D_{\text{det}}(x'_0, y'_0) = \frac{j \cdot 2T}{(\lambda f)^2} \cdot \left\{ \iint_{-\infty}^{\infty} \left\{ U_R^*(-x'_0 - \xi_1, -y'_0 - \eta_1) \cdot U_P(-\xi_1, -\eta_1) \right\} \cdot \sin c \left[\frac{2T}{\lambda f^2} (-x'_0{}^2 - y'_0{}^2 + x'_0 \xi_1 + y'_0 \eta_1) \right] \right\} d\xi_1 d\eta_1 \quad (13)$$

圖 6 為圖 4 中三種不同參考光在 x 方向的點擴散響應，圖中繞射光強度以對數表示。模擬結果顯示放射狀線段的參考光所對應的點光源擴散範圍為最小，圓環參考光擴散範圍最大。因為圖 4 中的參考光圖形皆為對稱圖形的參考光，因此在 y 軸上的

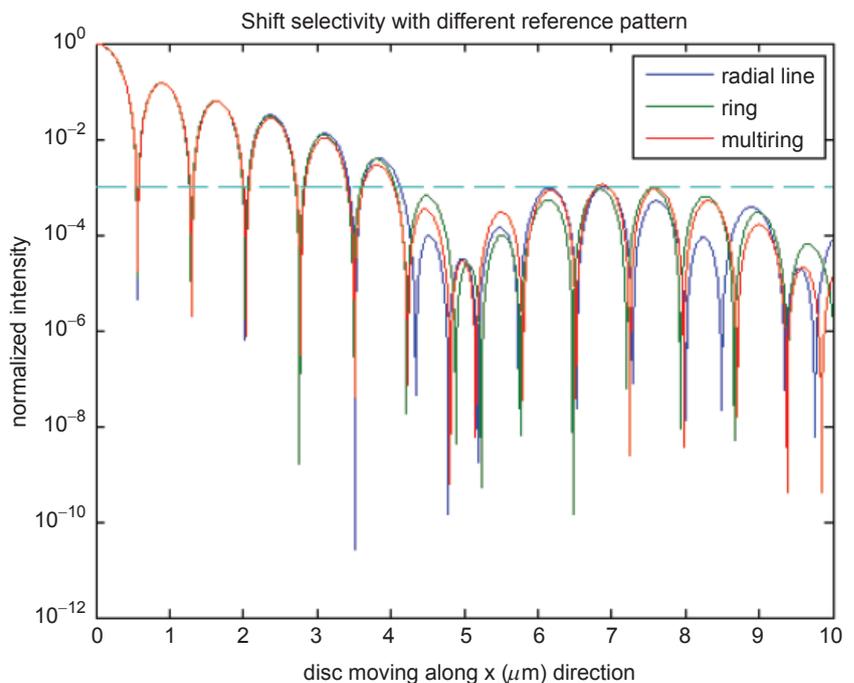


圖 5. 不同參考光之位移選擇性，其中繞射光強度以對數表示。

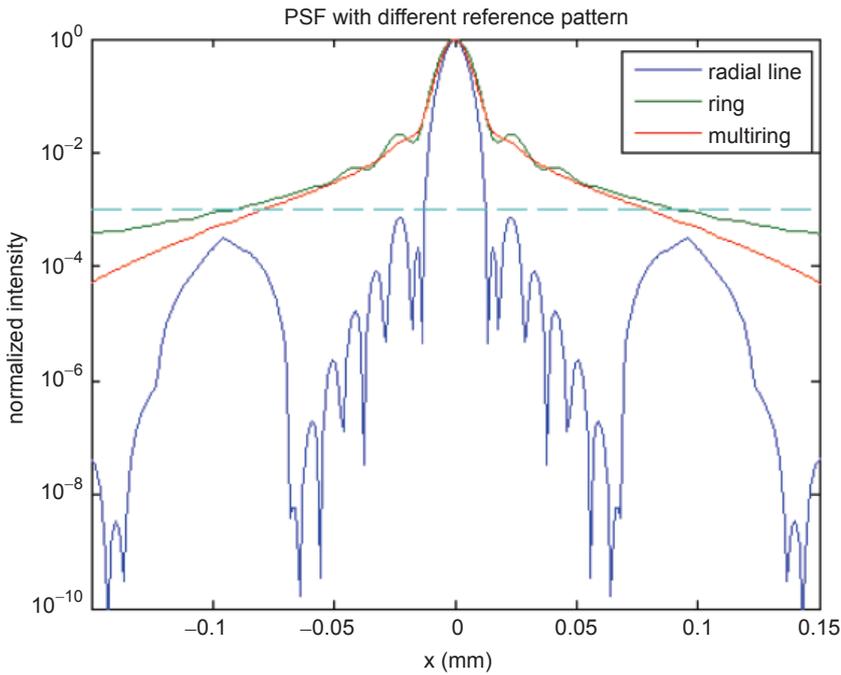


圖 6. 三種不同參考光之點光源擴散響應，繞射光強度以對數表示。

點光源擴散響應分布與圖 6 相同。以相對繞射光強度 10^{-3} 為基準，表 1 列出圖 4 三種參考光之點光源擴散範圍的半寬。

由上述分析可得知，當參考光為放射狀線段時，點擴散函數表現最佳，而圖 4 中三種參考光位移選擇性的表現則是幾乎相同。雖然以放射狀線段為參考光的點擴散函數範圍最小，但是其參考光發光面積亦為最小，只有圓環參考光的 20% 發光面積，降低了繞射光的絕對光強度。雖然可以直接增加雷射光源的功率，但是高功率雷射光不利於儲存系統微型化以及耗損過多能量。因此若要兼顧繞射

表 1. 圖 4 中三種參考光之點光源擴散半寬。

reference pattern	radial	ring	multi-ring
half width (μm)	12.6	91.1	79.2

光強、減少點擴散範圍以及能量耗損，可以在參考光部分增加相位調製 (phase modulation, PM) 來達成。

圖 7 為含有相位調製的同軸式全像儲存系統架構，含有相位調製之架構由日本 SONY 公司所提出⁽¹⁰⁾，其架構中加入一組延遲透鏡 (relay lens)，目

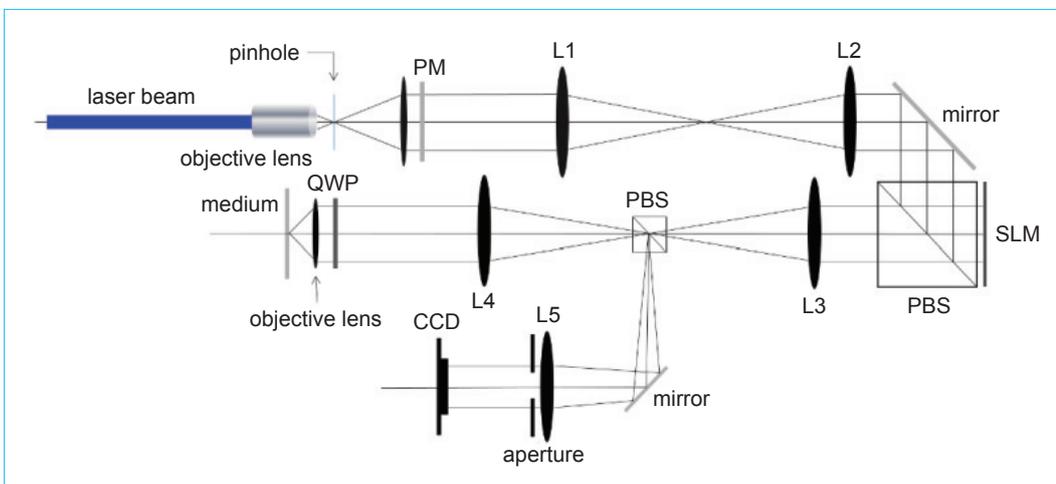


圖 7. 含有相位調製之同軸全像儲存系統架構。

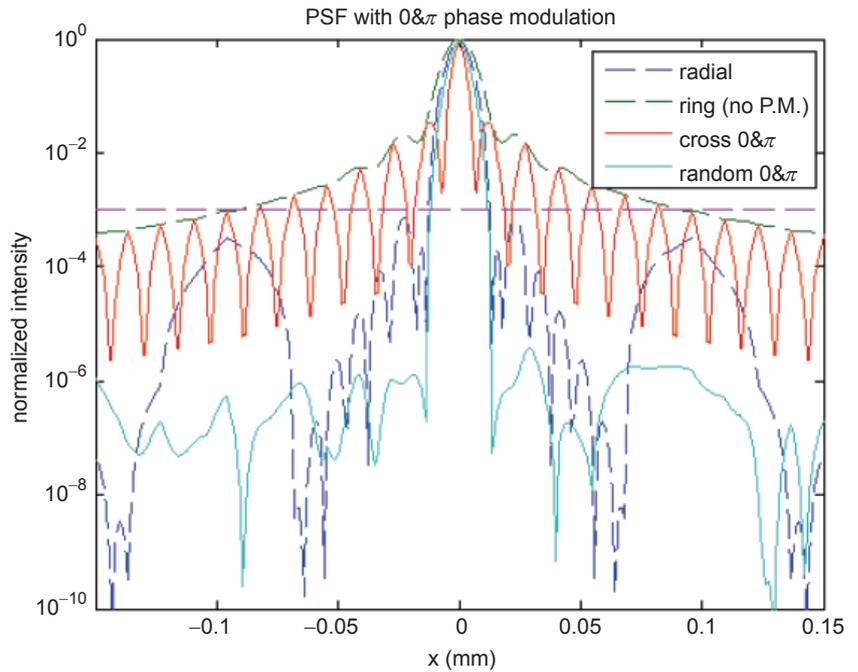


圖 8. 圓環參考光加入 0、 π 分布相位調製之點光源擴散響應。

的在於增加相位調製光罩 (phase mask, PM)，使用 0、 π 隨機分布進行相位調製。加入相位調製的系統理論模型，亦可等效成一組 4-f 系統，並且在輸入面參考光部分增加相位調製。因此整個系統的理論模型還是可以等效成一組 4-f 系統，並且在輸入面增加了相位調製。

下列分析不同的純相位調製下點擴散函數的表現，調製方式為 (1) 0、 π 相位交叉分布 (cross 0& π)；(2) 0、 π 相位隨機分布 (random 0& π)⁽¹¹⁾；(3) 放射狀線段調製 (radial line)；(4) 完全不調製。代入 (9) 式模擬點擴散函數，模擬結果如圖 8 所示，顯示 SONY 所提出的 0、 π 隨機分布做相位調製時俱備最佳點光源擴散響應，甚至優於純強度調製中最佳的放射狀線段。0、 π 相位交叉分布之點光源擴散響應據有最佳的第一零點，然而，其側葉卻非常強，整體包絡線為未加入相位調製的圓環參考光之點光源擴散響應，其原因是點光源擴散響應為參考光和讀取光捲積 (convolution) 運算得到的結果。當兩者相對位移恰好為偶數個像素，其重疊部分相位相同而產生建設性干涉，使之相對光強度在極大值，因此未加入相位調製的點光源擴散分布，是加入 0、 π 交叉分布的點光源擴散分布之包絡線，表 2 列出其點光源擴散之半寬。

表 2. 不同 0/ π 相位調製之點光源擴散半寬。

reference pattern	random 0 & π	cross 0 & π	radial line	ring (no PM)
half width (μm)	11.8	82.7	12.6	91.1

除了可利用相位調製板做相位調製外，我們也加入透鏡做相位調製來模擬點擴散函數。圖 9 為三種不同形式的透鏡相位調製，分別是 (a) 環狀透鏡 (ring)、(b) 放射狀透鏡 (radial) 與 (c) 透鏡陣列 (lens array)⁽¹²⁾。三種透鏡相位調製的透鏡焦距皆為 3.5 mm。

模擬結果如圖 10 所示，表 3 列出不同透鏡的相位調製之點光源擴散半寬，其中利用透鏡陣列作相位調製，其點光源擴散半寬最佳，優於所有技術。這意味著不需要減少參考光的面積也可以降低點擴散響應的範圍，亦可降低雷射光源的功率。

六、繞射光訊雜比

為了針對不同參考光的相位調製的二維訊號輸入與輸出進行模擬比較，我們計算繞射光訊雜比

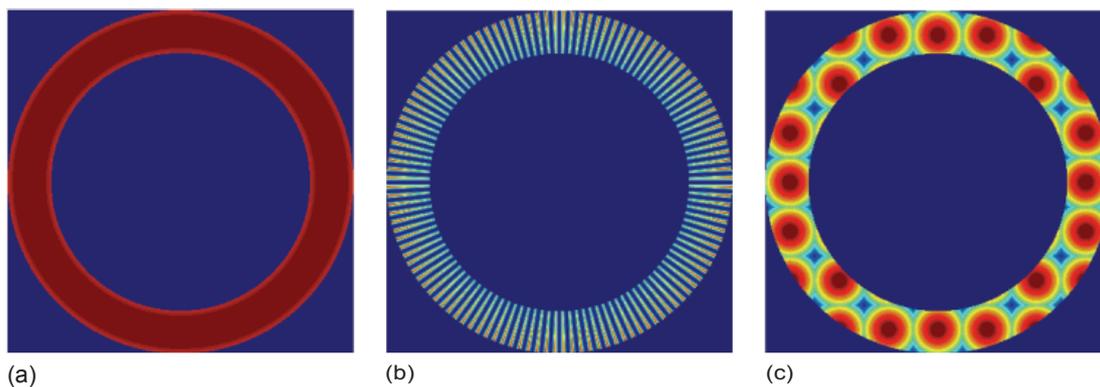


圖 9. 透鏡相位調製，(a) 環狀透鏡 (ring)、(b) 放射狀透鏡 (radial) 與 (c) 透鏡陣列 (lens array)。(12)

(Signal-to-noise ratio, 簡稱 SNR) 作為判斷準則。其中訊雜比公式為⁽¹³⁾

$$SNR = \frac{(m_1 - m_0)}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2}} \quad (14)$$

我們模擬單頁訊號的繞射結果，模擬使用的系統參數為：光源波長 532 nm、碟片折射率 1.5、碟片厚度 0.6 mm、物鏡焦距 5 mm、參考光外圍大小 (SLM 邊界大小) 為 4.4 mm × 4.4 mm。單頁訊號光 25 × 25 個位元，訊號光範圍大小為 0.342 mm × 0.342 mm，其中 1 和 0 出現機率相同，並以隨機

reference pattern	ring lens	radial lens	lens array	radial line	ring (no PM)
half width (μm)	37.5	25.0	8.73	12.6	91.1

表 3. 不同透鏡相位調製之點光源擴散半寬。

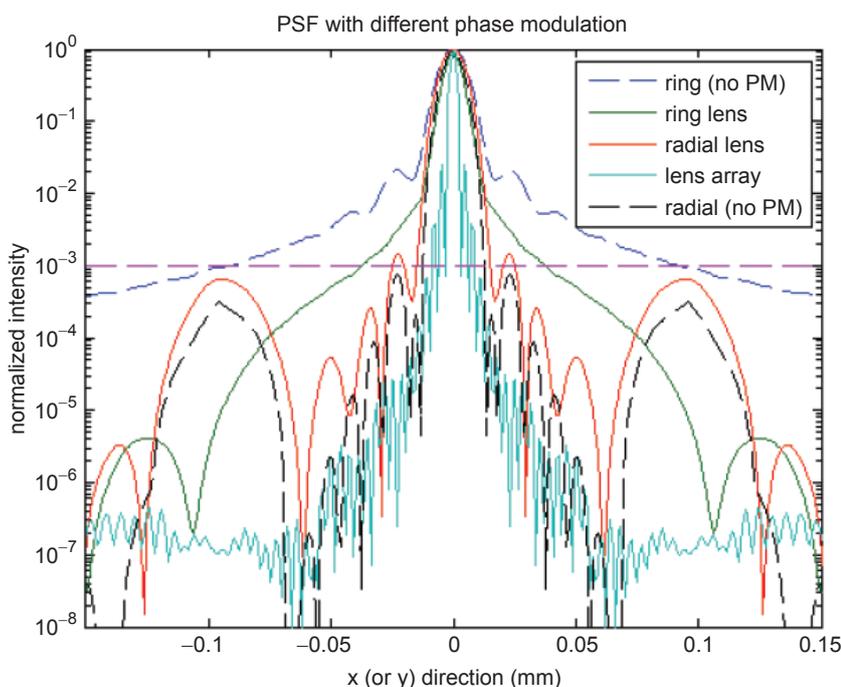
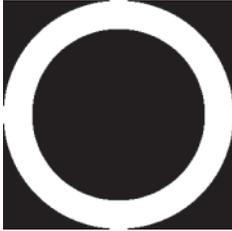
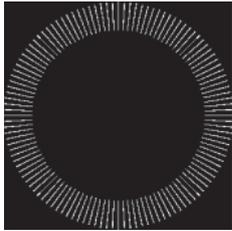
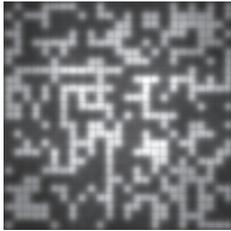
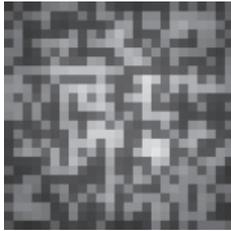
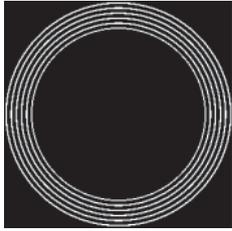
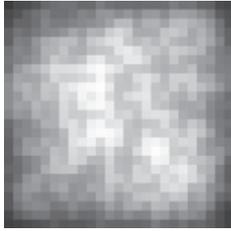


圖 10. 不同透鏡相位調製之點擴散響應。

表 4(a).

以圖 4 的三種參考光，經系統記錄讀取後繞射光分布情形。

	參考光圖形	繞射光分布	偵測器讀取灰階值
(a)			
(b)			
(c)			

分布，如圖 11 所示。假設 SLM 輸入的影像和偵測器讀取到繞射的影像解析度相同，並且畫素大小一比一吻合。使用純強度調製做為參考光調製時其模擬繞射光結果如表 4(a) 所示，由模擬結果可算得標準差 σ_0 、 σ_1 以及平均值 m_0 、 m_1 ，以此算出各模擬結果之訊雜比，如表 4(b) 所示，放射狀線段參考光的訊雜比值最大，繞射光結果亦最清晰，意味著訊號判讀出現錯誤機率最低。

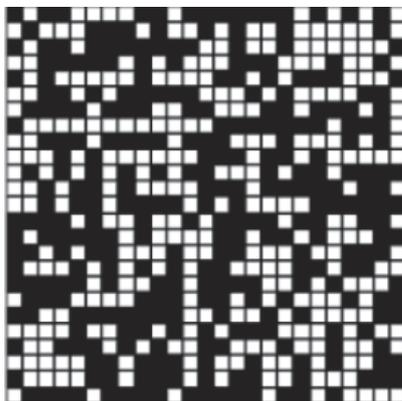


圖 11. 單頁訊號光示意圖。

接著分析引入相位調製之系統表現，調製方式分別為：(a) 無相位調製，(b) 0 、 π 相位隨機分布，(c) 環狀透鏡 (ring lens)，(d) 放射狀透鏡 (radial lens)，(e) 透鏡陣列 (lens array) 時。表 5(a) 顯示各種不同相位調製之繞射光分布，表 5(b) 為圓環參考光加入不同相位調製後繞射光的訊雜比，其中透鏡陣列之參考光技術所獲得之繞射光分布為最清晰，訊雜比最高。藉由提升訊雜比，可以進一步縮小單位元訊號的尺寸，使得單一頁面可容納更多的資訊，增加儲存容量與傳輸速率。

表 4(b). 表 4(a) 中繞射光之訊雜比。

	m_0	σ_0	SNR
	m_1	σ_1	
(a)	0.600	0.148	0.456
	0.698	0.159	
(b)	0.297	0.077	2.291
	0.618	0.117	
(c)	0.613	0.160	0.423
	0.714	0.175	

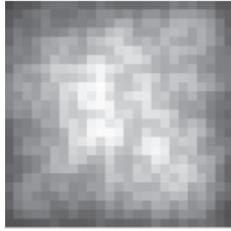
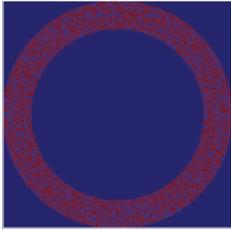
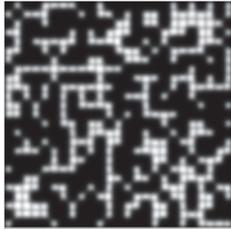
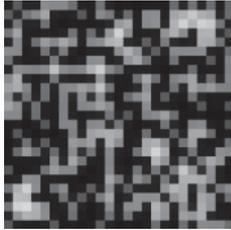
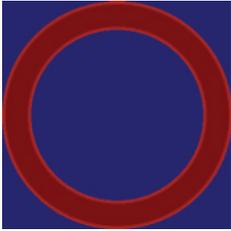
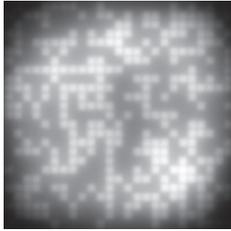
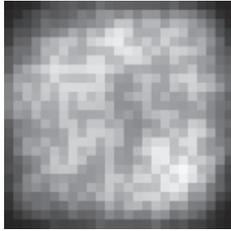
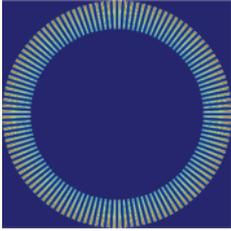
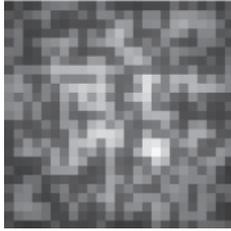
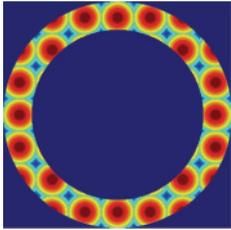
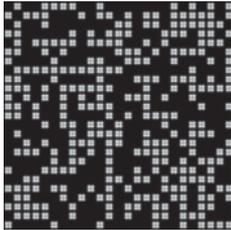
	相位調製分布	繞射光分布	偵測器讀取灰階值
(a)	 (No PM)		
(b)			
(c)			
(d)			
(e)			

表 5(a).

各種不同相位調製經系統記錄讀取後繞射光分布情形。

七、結論

全像儲存技術存取方式為單次存取一整頁二維的位元資訊，對相同規格的碟片而言，其理論上儲存容量與存取速率遠大於磁帶技術以及藍光光碟的點對點存取方式。我們以相位疊加法與純量繞射理論為基礎，建立了同軸式全像儲存系統之理論模

型，進而掌握整個系統的物理特性。藉由此理論模型，首先獲得系統的位移選擇性為參考光強度分布之傅氏轉換。接著，分別以公式推導與模擬分析證明了參考光分布為點光源擴散響應之關鍵因子。當參考光為單純強度調製時，雖然放射狀線段參考光擁有較佳的點擴散響應，但是發光面積太小，需要較強雷射光源才可以達到相同繞射光強，不利於儲

表 5(b). 表 5(a) 中參考光加入相位調製繞射光之統計數值。

	m_0	σ_0	SNR
	m_1	σ_1	
(a)	0.600	0.148	0.456
	0.698	0.159	
(b)	7.74×10^{-2}	0.025	5.151
	0.609	0.108	
(c)	0.544	0.184	0.413
	0.662	0.217	
(d)	0.345	0.091	1.595
	0.591	0.125	
(e)	1.08×10^{-3}	5.27×10^{-4}	63.169
	0.572	9.02×10^{-3}	

存系統微型化。因此我們提出在圓環參考光內加入相位調製，充分利用整個參考光的發光面積，使光源可使用較低功率的雷射。模擬結果顯示，當相位調製為透鏡陣列相位調製時，可達到最佳之點光源擴散函數，其所產生之繞射訊號訊雜比遠高於所有現存技術，意味著我們能在單頁內放入更多的位元資訊，進而同步增加儲存容量與提升存取速度。

致謝

感謝行政院科技部對於本計畫 (計畫編號 NSC 101-2221-E-008-085-MY3) 的支持，使得本研究計畫得以順利進行，特此致謝。

參考文獻

1. H. Horimai, X. Tan, and J. Li, *Appl. Opt.*, **44**, 2575 (2005).
2. H. Horimai and X. Tan, *Opt. Rev.*, **12**, 90 (2005).
3. 鄭智元, 利用相位調製改良同軸式體積全像儲存系統 (2008).
4. 謝舒菁, 同軸式體積全像儲存系統之研究與改良 (2007).
5. C. C. Sun, *Opt. Eng.*, **42**, 1184 (2003).
6. J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd eds. (2002).

7. T. Shimura, S. Ichimura, R. Fujimura, K. Kuroda, X. Tan, and H. Horimai, *Opt. Lett.*, **31**, 1208 (2006).
8. C. C. Sun, Y. W. Yu, S. C. Hsieh, T. C. Teng, and M. F. Tsai, *Opt. Express*, **15**, 18111 (2007).
9. Y. W. Yu, T. C. Teng, S. C. Hsieh, C. Y. Cheng, and C. C. Sun, *Opt. Commun.*, **283**, 3895 (2010).
10. K. Tanaka, M. Hara, K. Tokuyama, K. Hirooka, K. Ishioka, A. Fukumoto, and K. Watanabe, *Opt. Express* **15**, 16196 (2007).
11. Y. W. Yu, C. Y. Cheng, S. C. Hsieh, T. C. Teng, and C. C. Sun, *Opt. Eng.*, **48**, 020501 (2009).
12. Y. W. Yu, C. Y. Cheng, and C. C. Sun, *Opt. Lett.*, **35**, 1130 (2010).
13. H. Horimai and X. Tan, *Appl. Opt.*, **45**, 910 (2006).



鄭智元先生現為國立中央大學光電科學與工程系博士班生。

Chih-Yuan Cheng is currently a Ph.D. student in the Department of Optics and Photonics at National Central University.



余業緯先生為國立中央大學光電科學博士，現任國立中央大學光電科學與工程學系博士後研究員。

Yeh-Wei Yu received his Ph.D. in optical science from National Central University. He is currently a postdoctoral fellow in the Department of Optics and Photonics at National Central University.



孫慶成先生為國立中央大學光電科學博士，現任國立中央大學光電科學與工程學系教授。

Ching-Cherng Sun received his Ph.D. in optical science from National Central University. He is currently a professor in the Department of Optics and Photonics at National Central University.