



(19) 中華民國智慧財產局

(12) 發明說明書公開本

(11) 公開編號：TW 201546580 A

(43) 公開日：中華民國 104 (2015) 年 12 月 16 日

(21) 申請案號：103120660

(22) 申請日：中華民國 103 (2014) 年 06 月 13 日

(51) Int. Cl. :                    *G03H1/22 (2006.01)*                    *G03H1/26 (2006.01)*  
    *G03H1/16 (2006.01)*

(71) 申請人：國立臺灣大學 (中華民國) NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY (TW)

臺北市大安區羅斯福路 4 段 1 號

(72) 發明人：蔡定平 TSAI, DINPING (TW)；王智明 WANG, CHIH MING (TW)；陳威廷 CHEN, WEI TING (TW)；楊光宇 YANG, KUANG YU (TW)；黃耀緯 HUANG, YAO WEI (TW)

(74) 代理人：洪堯順；侯德銘

申請實體審查：有    申請專利範圍項數：10 項    圖式數：7    共 24 頁

(54) 名稱

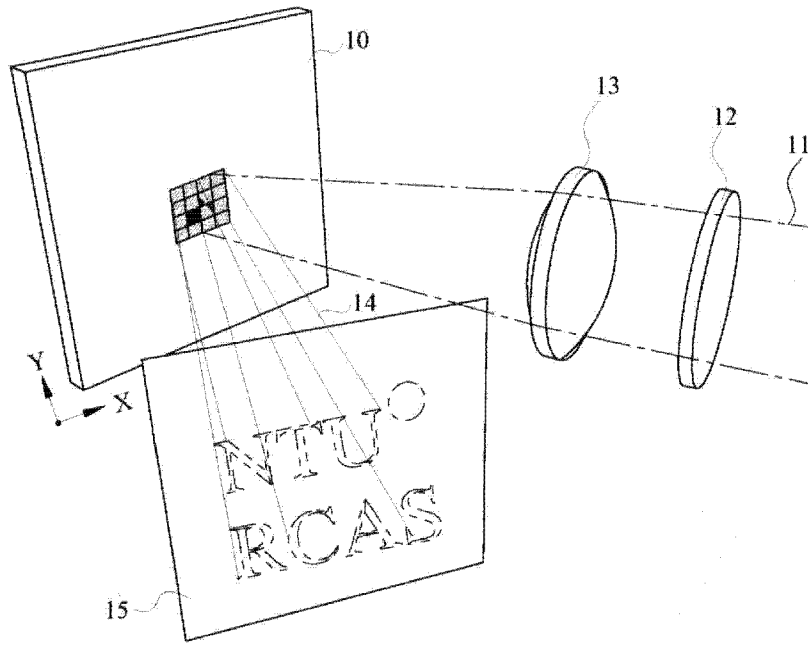
可由偏振調控重建影像的多光學維度超穎全像片

A MULTI-DIMENSIONAL META-HOLOGRAM WITH POLARIZATION-CONTROLLED IMAGES

(57) 摘要

本發明係提供一種可由偏振調控重建影像的多光學維度超穎全像片，係基於複數個奈米天線之超穎介面所設計。經由本發明之技術特徵，本發明可重建多重影像之全像片可重建出由偏振態調控的多重影像，並且達到 18% 的效率、操作頻寬約為 880nm 的寬頻特性並可操作於非同調光源、且有寬廣的入射角度變化的高容忍度。

The present invention provides a multi-dimensional meta-hologram with polarization-controlled images, which base on designing the shape and size of a plural of nano-antennas on metasurface. The hologram of reconstructing multi-image of the present invention exhibits broadband characteristic with a bandwidth of ~880 nm, efficiency of 18%, and excellent tolerance to variation of incident angle and light incoherence.



- 10 . . . 全像片
- 11 . . . 入射光
- 12 . . . 偏振器
- 13 . . . 聚焦透鏡
- 14 . . . 反射光
- 15 . . . 屏幕

第一圖

## 發明摘要

※ 申請案號： 103120660

※ 申請日：103. 6. 13

※IPC 分類：G03H1/22 (2006.01)

G03H1/26 (2006.01)

G03H1/6 (2006.01)

### 【發明名稱】(中文/英文)

可由偏振調控重建影像的多光學維度超穎全像片 / A multi-dimensional meta-hologram with polarization-controlled images

### 【中文】

本發明係提供一種可由偏振調控重建影像的多光學維度超穎全像片，係基於複數個奈米天線之超穎介面所設計。經由本發明之技術特徵，本發明可重建多重影像之全像片可重建出由偏振態調控的多重影像，並且達到18%的效率、操作頻寬約為880 nm的寬頻特性並可操作於非同調光源、且有寬廣的入射角度變化的高容忍度。

### 【英文】

The present invention provides a multi-dimensional meta-hologram with polarization-controlled images, which base on designing the shape and size of a plural of nano-antennas on metasurface. The hologram of reconstructing multi-image of the present invention exhibits broadband characteristic with a bandwidth of ~880 nm, efficiency of 18%, and excellent tolerance to variation of incident angle and light incoherence.

**【代表圖】**

**【本案指定代表圖】：**第（ 一 ）圖。

**【本代表圖之符號簡單說明】：**

- 10 全像片
- 11 入射光
- 12 偏振器
- 13 聚焦透鏡
- 14 反射光
- 15 屏幕

**【本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式】：**

無。

# 發明專利說明書

(本說明書格式、順序，請勿任意更動)

## 【發明名稱】(中文/英文)

可由偏振調控重建影像的多光學維度超穎全像片/ A multi-dimensional meta-hologram with polarization-controlled images

## 【技術領域】

【0001】 本發明係關於一種全像片，尤其係關於一種可重建多重影像且高效率之全像片。

## 【先前技術】

【0002】 全像片(Hologram)為一種可重建預先設計影像的光學裝置，全像片在我們的日常生活中有許多的應用，例如防偽包裝、防偽商標、禮品、飾品.....等。然而，全像片的應用仍受材料的限制，因此其工作範圍較小。另一方面，超穎材料以次波長結構建構，顯著延伸了折射率的可變範圍，比利用自然材料製作之光學裝置有更多功能與更廣的操作範圍。然而，目前大體積超穎材料之穿透式全像片在影像重建上有低效率的問題，因為光經過結構化的金屬層時產生相位累積致使大量的入射光不可避免地吸收。

【0003】 超穎材料分類為人工材料，擁有自然界中未見的性質。奈米製造科技的快速進步助長了構想及實現更好且更多功能光學裝置之研究。驅使這些努力背後的原因為組成超穎材料之材料能夠達到幾乎任意有效介電係數。因此，光學超穎材料具有比介電質(dielectric media)或聚合物優異幾個數量級的空間折射率對比。金屬是一種表現接近所有光學超穎材料的物質，因為金屬會因其承載的介電質以及微小的次波長金屬結構製成一個

能有效與電磁波耦合之大的電偶，而自然形成巨大的介電對比。的確，這些超穎材料的關鍵特徵(這裡提到的是電漿子超穎材料)是包含次波長金屬結構(通常是特定空間排列的奈米結構)，使得有效介質之使用讓金屬奈米結構的形狀與角度逼近其電磁反應之相位及振幅，並表現出頻譜共振。這樣的性質已於許多不同的光學裝置中以電漿子超穎材料製成之柱狀元件中發現。最近，一種以超穎材料製成，包含多層、次波長、金屬結構，並且操作於遠紅外光之相位全像裝置已被發表。以超穎材料製造多層金屬結構的裝置，在最初製造時有顯著的金屬吸收特性，且所產生的全像影像有低效率的問題。事實上，這不是特定光學應用上所發現的問題，而是所有電漿子超穎材料操作於光頻率時所必須面對的問題。

### 【發明內容】

【0004】 由上述的問題，我們提出一種基於一種次種類超穎材料的相位全像片，稱為超穎介面，可在可見光範圍中形成更亮、效率更好的影像。超穎介面即為以不同尺寸、形狀之次波長金屬結構組成的二維超穎材料，可調變的電磁波範圍自微波、紅外線至可見光。光的相位與振幅皆可藉由調整超穎材料的幾何參數而調變，但只有相位調變對一高效率超穎全像片是有優異效果的，因為調變振幅通常會造成金屬的吸收，而造成繞射效率低。與依賴於不同空間折射率的傳統光學裝置相較，電漿子超穎介面有著比入射光波長小得多的厚度與像素大小或是單位元件。較薄的超穎介面能藉由調整二維金屬奈米結構陣列之大小及方位控制穿透光或反射光的相位，相對於三維多層超穎材料來說可降低金屬的吸收，且於應用上可避免反射式全像片在超穎材料塊材(bulk)內的光透射，因此超穎介面具有顯著的優點。將電漿子超穎介面用於全像術可免除習知利用乳膠或光聚合物作為紀錄介質之數位全像術之限制，而習知利用乳膠或光聚合物作為紀錄介質

之數位全像術通常非常限制影像重建之光源，需要單一波長的光源，因為金屬奈米結構在很寬的頻譜中具有調變入射波相位的能力。這裡提出的高效率全像片利用超穎介面作為相位調變器以產生反射式全像片，而不是光通過四層金屬結構而形成穿透影像。以電子束微影術或其他可用之微影術實質降低金屬結構的特徵尺寸，以使我們的裝置可操作於可見光範圍。

**【0005】** 因此，我們提出一種可重建多重影像之全像片，包含在預定平面上形成複數個光強度分佈的複數個奈米天線；其中，該複數個奈米天線之尺寸及形狀係依遞迴傅立葉演算法設計該複數個光強度分佈之一相位分布，使得該複數個光強度分布以不同偏振方向區分，並使該複數個光強度分布與零階反射點錯開。

**【0006】** 其中，前述在預定平面上形成的光強度分布，即為該全像片所重建出的影像。

**【0007】** 在本發明之一實施例中，該全像片包含 $100 \times 100$ 個像素，每個像素由 $6 \times 6$ 個奈米天線組成；該遞迴傅立葉演算法係設計4階純相位全像片，該些奈米天線係由一金屬構成且各自為十字形奈米柱。

**【0008】** 前段所述之金屬係選自於由金、銀、銅及鋁所組成的群組。

**【0009】** 在本發明之一實施例中，該複數個奈米天線依反射相位相差 $90^\circ$ 以選擇4種長度：60 nm、105 nm、125 nm及209 nm。

**【0010】** 經由本發明之技術特徵，本發明之可重建多重影像之全像片可重建出由偏振態調控的多重影像，並且達到18%的效率、操作頻寬約為880 nm的寬頻特性並可操作於非同調光源、且有寬廣的入射角度變化的高容忍度。

#### **【圖式簡單說明】**

## 【0011】

第一圖係為本發明實施例之超穎全像片在 $45^\circ$ 線偏振光照射下的示意圖。二影像之相位分佈「RCAS」與「NTU」係以電子束微影紀錄於超穎全像片上。以 $6 \times 6$ 不同大小的金十字奈米天線組成的像素，建構於濺鍍或蒸鍍 $50 \text{ nm}$ 厚氟化鎂間隔物之金鏡上。影像「RCAS」與「NTU」可分別利用x或y方向的線偏振光重建，光源可為寬頻光源且入射角度寬廣。

第二圖係為(a) 反射相位、反射率與金奈米柱長度的關係，金奈米柱週期性地排列於濺鍍或蒸鍍 $50 \text{ nm}$ 厚氟化鎂間隔物之 $250 \times 250 \text{ nm}^2$ 的單元金鏡上，波長為 $780 \text{ nm}$ 之光線垂直入射，偏極方向係沿奈米柱長的方向。選擇四種相位相差 $\pi/2$ 之長度的奈米柱( $L = 60、105、125$ 及 $209 \text{ nm}$ )以建構超穎全像片樣本的相位像素，(b) 超穎全像片樣本之SEM影像，並包含較高倍率之影像。比例尺為 $2 \mu\text{m}$ 。

第三圖係為反射振幅(a) 與相位分佈(b)以波長與奈米柱之長度表示的函數。

第四圖係為測量重建全像影像之設置示意圖。

第五圖係為利用 $780 \text{ nm}$ 雷射基於(a)x偏振，(b)  $45^\circ$ 偏振，以及(c) y偏振光，以入射角 $\theta = 15^\circ$ 所重建的影像；及在 $780 \text{ nm}$ 、 $45^\circ$ 偏振之二極體雷射光，於不同入射角度 $\theta$ 下之CCD影像。輸入光束的入射角分別為(d)  $15^\circ$ 、(e)  $20^\circ$ 、(f)  $25^\circ$ 、(g)  $30^\circ$ 、(h)  $35^\circ$ 以及(i)  $40^\circ$ 。

第六圖(a~e)係為超穎全像片利用一寬頻非同調光源，在頻譜為可見光至近紅外光範圍於入射角 $\theta = 15^\circ$ 所重建的影像。(a、b) 影像分別由x偏振及y偏振產生。(c、d、e) 係分別利用 $\lambda = 700 \pm 20 \text{ nm}$ 、 $600 \pm 20 \text{ nm}$ 與 $550 \pm 20 \text{ nm}$ 之帶通濾波器，以x偏振光照射下的影像。(f~h)係為利用雙重波長( $488 \text{ nm}$ 與 $640 \text{ nm}$ )雷射二極體系統於 $45^\circ$ 偏振、入射角度 $\theta$



=15°所重建之超穎全像片影像。二雷射光束系同軸照射於樣本之同一點上，波長488 nm與640 nm之雷射功率分別為0.1 mW與0.02 mW。由(f) 波長488 nm與640 nm之雷射光束、(g) 只有488 nm雷射、以及(h) 只有640 nm雷射產生之影像。

第七圖係為(a) 理論上計算以四種不同的奈米柱建構之全像片的效率，以波長之函數表示(陰影部分為880 nm的頻寬)；(b) 於入射光波長為780 nm、632.8 nm與405 nm時，超穎全像片效率與入射角 $\theta$ 之關係，效率定義為影像功率除以聚焦透鏡前雷射光束功率之比例。

### 【實施方式】

【0012】 本發明可重建多重影像之全像片係利用相位調變之超穎介面完成，於本發明說明書中，可能有不同的名稱，例如「全像片」、「超穎全像片」、「相位全像片」等，除非有特別說明，皆指本發明可由偏振調控重建影像的多光學維度超穎全像片。

【0013】 本發明實施例之超穎全像片的樣本由6×6的十字奈米天線像素所組成，而該十字奈米天線有16種不同形狀做相位調變以得到偏振控制的雙重影像。本發明實施例以電子束微影製造所設計出4相位十字奈米天線。而藉由超穎全像片之相位增加，效率更能夠進一步提升，換句話說，利用更多不同長度的金奈米柱設計更多相位，能進一步增進全像片的效率。

【0014】 本發明實施例使用金作為製作超穎介面之奈米天線的例示，然本發明領域中具有通常知識者皆知，本發明中之奈米天線係利用金屬特性以作動。因此，該奈米天線可由任意金屬構成，較佳為金、銀、銅、或鋁。

## 實施例一 全像片之設計與製造

【0015】 本發明之全像片係於超穎介面以等寬、等高但不等長的金屬奈米柱建構而成。藉由金屬柱上進行光偏振上的局部表面電漿(localized surface plasmon, LSP)共振選擇性，同時在同個超穎介面編碼二個全像片，二影像以相互垂直偏振的入射光重建。

【0016】 第一圖顯示本實施例之超穎全像片10基於45°線偏振光照射的設置示意圖，入射光11經由偏振器12及聚焦透鏡13照射到全像片10上並反射出反射光14，反射光14於屏幕15上重建出全像影像「NTU」及「RCAS」。我們利用電腦產生全像片(computer-generated hologram, CGH)方法的原理設計超穎介面。超穎介面上的基本構件是不同長度的奈米柱，但同樣是50 nm厚與60 nm寬(於第二a圖顯示)，並設置於具有50 nm厚的氟化鎂(MgF<sub>2</sub>)之130 nm厚的金鏡上。每一奈米柱就是一個奈米天線，且其長軸與入射波偏振方向同向，在強烈的LSP共振下，經由奈米天線與金鏡上反平行電流震盪，產生反射電磁波劇烈的相位調變，而反射波的相位可獨立地基於奈米柱的長度以設計。我們以時域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)模擬計算週期性金奈米柱的相位調變與反射係數，結果如第二a圖所示，係基於垂直入射 $\lambda = 780 \text{ nm}$ 、偏振方向為沿著奈米柱之長軸的一平面波，其柱長的函數。其中每一奈米柱佔 $250 \times 250 \text{ nm}^2$ 之正方形面積(於第二a圖中顯示)。以反射係數與相位分布作為奈米柱長度與波長之函數如第三圖。長度約為110 nm的奈米柱的LSP共振在 $\lambda = 780 \text{ nm}$ 。從相位調變曲線中可看到，我們依據反射相位相差90°選擇4個長度值( $L = 60 \text{ nm}$ 、105 nm、125 nm以及209 nm)，設計一種4級相位電漿子超穎全像片。當全像影像經由不同尺寸的金屬棒(bar)以相位調變逐像素地重建，尺寸的不同也造成了非預期的振幅調變。在考慮金的歐姆損失的情況下，4種選擇的奈米柱之平均反射係數約在80%，是本案全像影像具有高效率的原因。

【0017】 我們以「NTU」及「RCAS」影像利用遞迴傅立葉法得到相位分布。將相位分布以相位像素數位化，每一像素佔整個區域的 $1500 \times 1500 \text{ nm}^2$ ，以 $6 \times 6$ 固定長度的金奈米柱建構而成，該長度約為特定影像之二維超穎介面所需相位。為使全像片以垂直偏振的入射波重建影像，二影像的像素陣列相互轉 $90^\circ$ 。不同影像像素之空間重疊形成 $6 \times 6$ 奈米十字(第二b圖)。在超穎全像片上分布有16種不同的奈米十字像素，因為每一影像4種不同長度金奈米柱而有16種組合。該超穎全像片以標準電子束微影製作，由 $100 \times 100$ 像素組成。第二b圖顯示製造出的全像片其中一小區域的掃描式電子顯微鏡(SEM)影像。詳細設計及製造過程如下：

【0018】 電腦產生全像片(computer generated hologram, CGH)之相位分佈利用一遞迴傅立葉演算法(iterative Fourier-transform algorithm, IFTA)設計，考慮4階純相位全像片。我們限制全像片為 $100 \times 100$ 的正方形像素。相位分佈得到兩個影像：x偏振的「NTU」與y偏振的「RCAS」，皆與繞射圖形中央位置錯開，以避開零階反射點。利用金奈米柱偏振依賴的共振性質，我們選擇4個不同長度的金奈米柱以實現每一影像獨立的4階相位全像片，二組奈米柱相互垂直地設置形成十字形，如第二b圖所示。每一像素有 $6 \times 6$ 個完全相同的十字並且共有16種不同的像素。入射光複雜的振幅分佈設定為單一振幅，且重建平面的複雜振幅分佈之模數設為想要的影像。

【0019】 為達到快速收斂，我們在想要的影像之IFTA的第一個遞迴中利用一連續且任意的相位分佈，並同樣用於100個遞迴。在設計的CGH之最後一個相位分佈係為連續的。在製造階段中，依據其奈米柱的長度60 nm、105 nm、125 nm及209 nm，分別將 $[0, \pi/2]$ 、 $[\pi/2, \pi]$ 、 $[\pi, 3\pi/2]$ 及 $[3\pi/2, 2\pi]$ 之連續的相位模數範圍指定為0、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 及 $3\pi/2$ 。在FDTD模擬中考慮如第二a圖中每一像素的模數。例如，由60 nm奈米柱所組成的像素的模數，其反射率為93.9%，相位為 $-0.006\pi$ 。

【0020】 這裡所提出的全像片元件單元，計算其反射光振幅與相位並以一波長與奈米柱長度 $L$ 之函數表示，分別如第三a、b圖所示。元件單元由50 nm厚的金奈米柱與帶有作為間隔物之50 nm厚氟化鎂( $\text{MgF}_2$ )之130 nm厚金鏡耦合。在x軸與y軸上元件單元的週期皆為250 nm。奈米柱的寬固定於60 nm。為做出4階超穎全像片，我們選擇四種不同的相位分佈，不同的相位依據奈米柱的長度 $L = 60$ 、105、125與209 nm。

【0021】 接著超穎全像片樣本以標準電子束微影術製造。在石英晶圓上濺鍍3 nm厚的金薄膜作為黏著層。接著熱蒸鍍另一層127 nm厚的金，以使金鏡的總厚度為130 nm，然後沈積50 nm厚的 $\text{MgF}_2$ 膜，作為介電層。樣本再覆上200 nm厚的PMMA-495K層與一薄Spacer層，Spacer層係於暴露於電子束時量測靜電問題。隨後，利用電子束微影系統(Elionix ELS-7000)，以100 keV之加速電壓及30 pA之電流定義面積為 $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ 之十字形超穎介面。在電子束暴露之後，樣本以去離子水潤洗以去除Spacer，然後於混合顯影液：甲基異丁基酮(methyl isobutyl ketone, MIBK)：異丙醇(isopropyl alcohol, IPA)=1:3之溶液中成長60秒。當光阻完全被剔除後，以電子束蒸鍍50 nm厚的金膜。超穎全像片最後浸於丙酮中12小時，沒有圖形的區域以超音波清洗機清洗。

## 實施例二 全像片之量測

【0022】 第四圖係為光學量測的架構圖，以量測所製造超穎全像片的特性。我們使用數種光源以量測該電漿子超穎全像片的特性，包含不同波長的雷射二極體(780、640、632.8、488、以及405 nm)、以及有/無加濾光器的燈泡(lamp)進行測試，詳細方法如下：

【0023】 光源401、線偏振器402(寬頻偏振器，型號為#68-750，

Edmund公司)與 $\lambda/4$ 延遲器403，寬頻濾波器404(THORLABS公司)、第一聚焦透鏡405 (焦距100.0 mm)以及該超穎全像片410樣本置於一直線上，該全像片410樣本固定於一旋轉台以調整入射角 $\theta$ 。為收集所投影的影像，使用直徑52.0 mm的第二聚焦透鏡406 (焦距為50.0 mm)以及相機407(sCMOS pco.edge)固定於中央位於樣本旋轉台的軸之一旋轉臂，使得相機407可隨不同入射角調整，並由顯示器408觀看影像。為確認超穎全像片之寬頻工作性質，我們使用了一系列不同波長(780、640、632.8、488、405 nm)的雷射作為光源去重建超穎全像片之影像。另外，為驗證超穎全像片可於非同調光源下操作，亦使用雷射驅動光源(LDLS EQ-99FC from ENERGETIQ)耦合進一光纖。本實驗用於作為非同調光源係為白光光源EQ-99FC。EQ-99FC光源具有一980 nm雷射直接加熱氬電漿至產生寬頻光源的高溫。與鎢絲燈或弧光燈相較，EQ-99FC因為有較小的發射角度而有較大的亮度。

**【0024】** 利用780 nm雷射二極體在x軸、 $45^\circ$ 以及y軸偏振的 $\theta = 15^\circ$ 入射光下，超穎全像片的遠場繞射影像如第五a~c圖所示。雷射光束的偏振方向自x方向轉至y方向時，投影的圖案漸漸自「NTU」轉變為「RCAS」，且兩個未重疊圖案的強度之上升及下降係依據偏振角度在x方向與y方向上的量，與我們當初的設計吻合。測量到的偏極對比約為18，係為字母「NTU」與「RCAS」在x偏極光照射下平均強度之比例，印證了我們裝置的偏極選擇性能力。此外，收集影像中第一階繞射圖形影像，可去除同個顯示屏幕右上角的零階繞射點，可將本裝置視為高效率的反射式超影全像片。我們利用效率定義式：效率= $P_{\text{NTU}}/P_{\text{laser}}$ ，其中 $P_{\text{NTU}}$ 為第一階「NTU」影像的平均光功率(聚焦透鏡406前所量測)， $P_{\text{laser}}$ 為x偏振入射光的平均光功率(聚焦透鏡405前所量測)。我們經由置放一透鏡以聚焦影像局部的光線至一光電二極體，以量測第一階「NTU」影像之功率。在780 nm雷射二極體於入射角 $\theta = 15^\circ$ 的情況下量測到18%的繞射功率。

【0025】 所製造的超穎全像片在鎢絲燈未偏極化光的照射之下，拍攝到的光學影像中，全像片之每一像素呈現出不同的顏色。像素尺寸 $1.5 \mu\text{m} \times 1.5 \mu\text{m}$ 。以 $780 \text{ nm}$ 、 $45^\circ$ 偏極之二極體雷射照射下之CCD影像如第五d~i圖所示。在不同的入射光角度下可清楚看到重建的「NTU」與「RCAS」影像。在第五d~i圖有利用聚焦透鏡所拍攝的影像中，可看到在入射光角度大時會有像差的現象。

【0026】 此全像片設計為操作於波長為 $780 \text{ nm}$ 的全像片，我們也利用一寬頻非同調光源量測其功能，因為LSP共振通常表現出寬頻的性質。的確，影像「NTU」與「RCAS」可利用一寬頻非同調光源(LDLS EQ-99FC，ENERGETIQ)經由一聚焦透鏡(74-UV，ocean optics公司)耦合入一多模光纖(纖核直徑為 $1 \text{ mm}$  之P1000-2-VIS-NIR，ocean optics公司)而重建出。第六a與六b圖顯示由CCD攝影機(sCMOS pco.edge)分別在x偏振與y偏振的非同調光源照射下所拍攝的「NTU」與「RCAS」影像，並利用 $\gamma = 0.7$ 作伽瑪校正(Gamma correction)以達到最佳視覺清晰度。不像由同調雷射光所產生的影像，重建出的字母沒有斑點，但因為寬頻光源所引起的色散，使得投射出的圖形較模糊。第六c~e圖為利用波長分別為 $\lambda = 700 \pm 20 \text{ nm}$ 、 $600 \pm 20 \text{ nm}$ 與 $550 \pm 20 \text{ nm}$ 之帶通濾波器所得到的影像，以量測特定波長所重建出的影像。由 $550 \pm 20 \text{ nm}$ 帶通濾波器所得到的影像如第六e圖所示，因其波長較短，金吸收損失較高而有最低的效率。儘管如此，此超穎全像片之寬頻功能仍清楚展現。

【0027】 我們也利用雙波長雷射二極體系統( $488 \text{ nm}$ 與 $640 \text{ nm}$ )進行影像重建，可在不用重新調整光學架構即可利用不同波長的光進行影像重建。第六f圖係為經由同軸雷射光束( $\lambda = 488 \text{ nm}$ 與 $\lambda = 640 \text{ nm}$ )同樣約 $45^\circ$ 線偏振，同時重建「NTU」與「RCAS」影像。 $488 \text{ nm}$ 與 $640 \text{ nm}$ 雷射二極體的功率分別衰減至 $0.1 \text{ mW}$ 與 $0.02 \text{ mW}$ 。可清楚看到 $488 \text{ nm}$ 的藍色圖形位置接近

右上角的第零階繞射點，並且較波長為640 nm的紅色圖形要小。此外，以488 nm雷射所重建出圖形的功率顯著的低，因為這個頻段有較強的金吸收損耗。第六g與六h圖顯示影像分別以488 nm與640 nm雷射重建。

**【0028】** 以波長的函數計算以四種不同尺寸奈米柱建構的全像片之效率(見第七a圖)，最大波長達 $\lambda = 780$  nm。效率的數值定義為重建影像的強度除以影像平面上的總強度。全像片之光譜範圍以效率降低至最大值之一半時定義，光譜範圍約涵蓋880 nm，自640 nm至1520 nm。光譜範圍取決於奈米柱的直徑，奈米柱的直徑係引起全像片之振幅與相位調變。原則上，效率會隨著相位階層的數目與反射振幅而提升。因為我們的超穎全像片為反射式，與穿透式全像片相較，避免了光在金屬內部穿透阻抗不匹配的問題，我們可以實驗發現在金的高損失頻譜範圍( $\lambda < 600$  nm)內，重建影像之振幅與相位調變皆微弱。

**【0029】** 我們接著研究關於入射光角度之全像片效率的函數。我們利用 $\lambda = 780$  nm、632.8 nm 與405 nm三種雷射二極體，以不同入射角 $\theta$ 測量全像片的效率，結果如第七b圖。因為此超穎全像片係設計操作於780 nm，因此在測得的所有入射角度中，780 nm雷射所得到的效率皆為最高。在15°入射角時，效率範圍從780 nm的18%降至632.8 nm的約10%，而未測量的405 nm係因其有顯著的金屬損耗。隨著入射角度的增加，780 nm及632.8 nm之效率皆有下降的趨勢，而405 nm仍維持約為0.1%的低影像功率。值得注意的是，波長為780 nm與632.8 nm之光源在45°入射角時，影像功率僅分別降至8.5%與5.1%。

**【0030】** 相較於先前的電漿子超穎材料研究，我們利用反射光重建影像的超穎全像片有更高的效率—相較於其他理論及實驗上所得的<1%的效率，我們最高效率可達到18%的效率。依據我們數值上與理論上的計算(第七a、b圖)，我們的超穎全像片也有頻寬約為880 nm的寬頻特性。此外，相

較於利用介電材料例如Si奈米天線、SiO<sub>2</sub>次波長結構奈米碳管之全像片，我們的超穎全像片在斜向非同調光源下亦顯示高效率與優異的偏振對比。

【0031】 綜上所述，相較於目前利用超穎材料所做出的全像片來說，我們提出一種具有顯著高功率的電漿子超穎全像片。具有製造簡單、低金屬吸收、工作頻寬範圍大、以及入射角度變化與非同調光之高容忍度等等優點。

### 【符號說明】

#### 【0032】

- 10 全像片
- 11 入射光
- 12 偏振器
- 13 聚焦透鏡
- 14 反射光
- 15 屏幕
- 401 光源
- 402 線偏振器
- 403  $\lambda/4$ 延遲器
- 404 寬頻濾波器
- 405 第一聚焦透鏡
- 406 第二聚焦透鏡
- 407 相機
- 408 顯示器
- 410 全像片

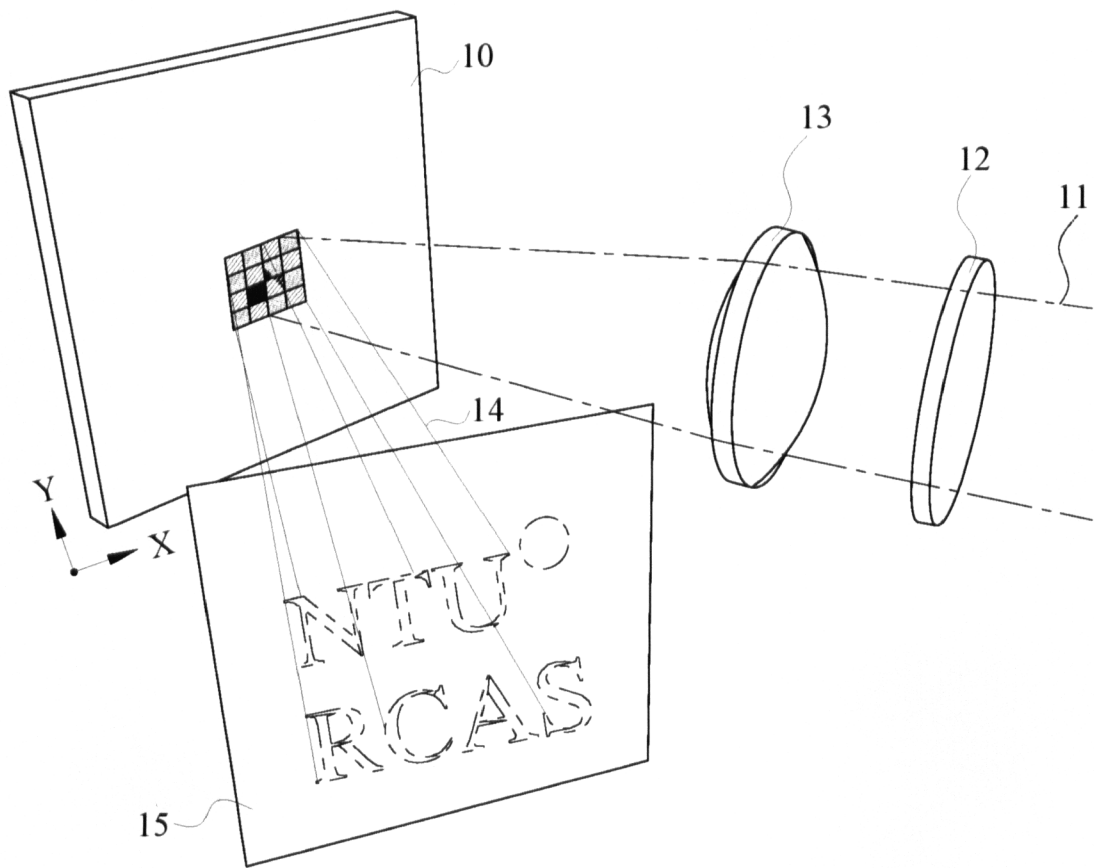


## 申請專利範圍

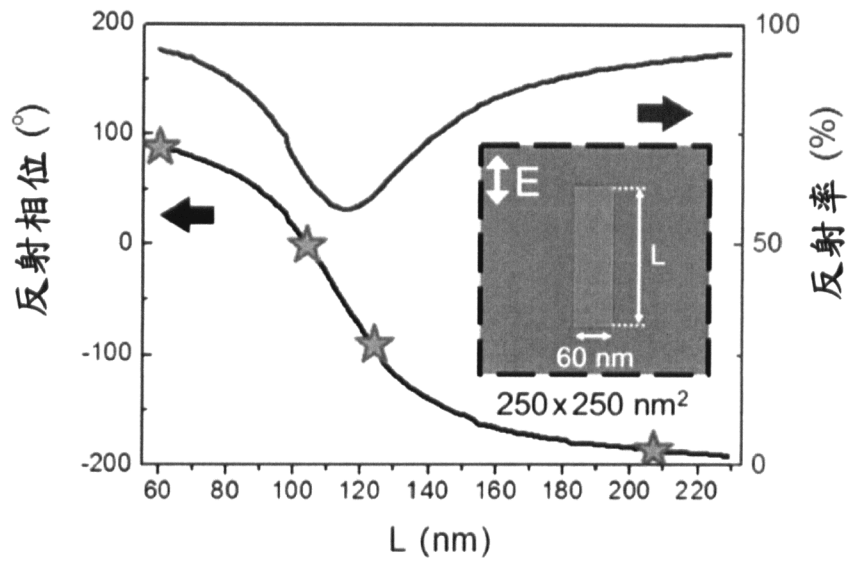
1. 一種可由偏振調控重建影像的多光學維度超穎全像片，包含在預定平面上形成複數個光強度分佈的複數個奈米天線；  
其中，該複數個奈米天線之尺寸及形狀係依遞迴傅立葉演算法設計該複數個光強度分佈之一相位分布，使得該複數個光強度分布以不同偏振方向區分，並使該複數個光強度分佈與零階反射點錯開。
2. 如申請專利範圍第1項所述之多光學維度超穎全像片，其中該遞迴傅立葉演算法係設計4階純相位全像片。
3. 如申請專利範圍第1項所述之多光學維度超穎全像片，其中該些奈米天線係由一金屬構成。
4. 如申請專利範圍第3項所述之多光學維度超穎全像片，其中該金屬係為選自於由金、銀、銅及鋁所組成的群組。
5. 如申請專利範圍第1項所述之多光學維度超穎全像片，其中各該奈米天線係設計為十字形奈米柱。
6. 如申請專利範圍第5項所述之多光學維度超穎全像片，其中該複數個奈米天線依反射相位相差 $90^\circ$ 以選擇4種長度。
7. 如申請專利範圍第6項所述之多光學維度超穎全像片，其中該複數個奈米天線之長度為60 nm、105 nm、125 nm及209 nm。
8. 如申請專利範圍第1項所述之多光學維度超穎全像片，其中該全像片在預定平面上形成二光強度分布。
9. 如申請專利範圍第1項所述之多光學維度超穎全像片，其中該全像片包含 $100 \times 100$ 個像素，每個像素由 $6 \times 6$ 個奈米天線組成。

10. 如申請專利範圍第1項所述之多光學維度超穎全像片，其中該奈米天線以250 nm之週期設置，奈米天線之寬為60 nm。

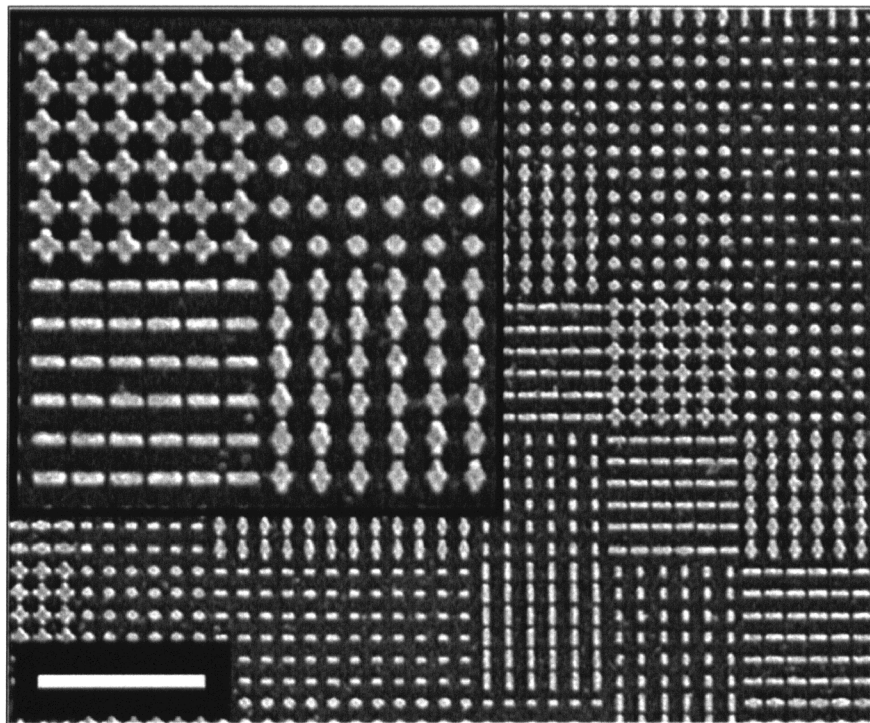
圖式



第一圖

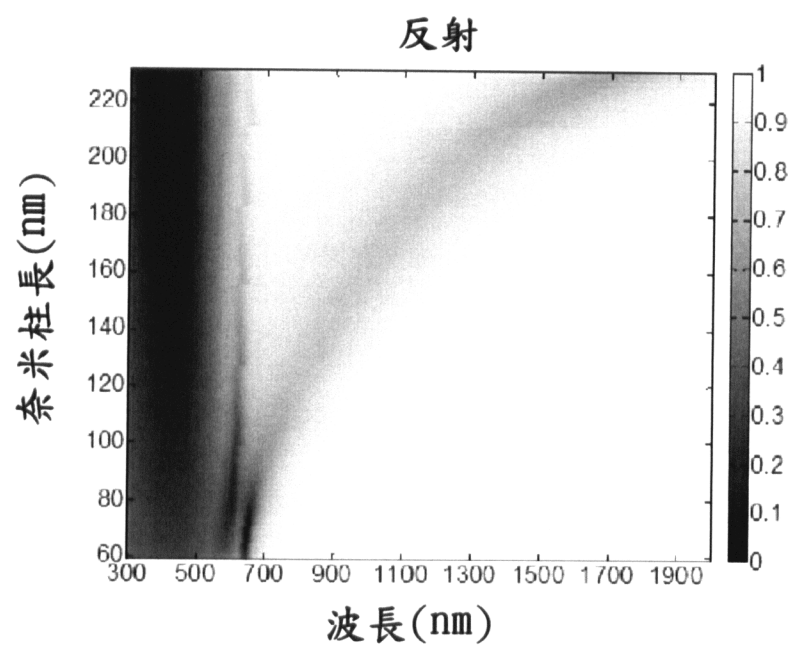


(a)

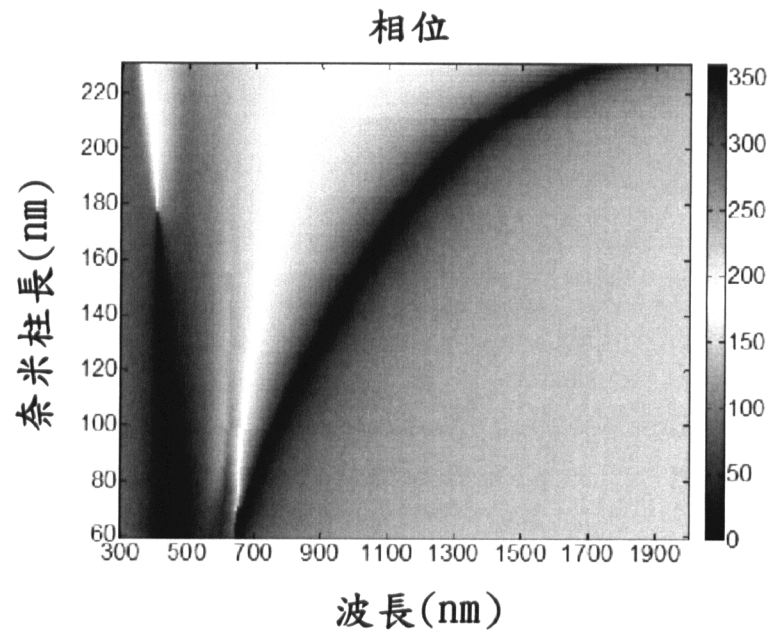


(b)

第二圖

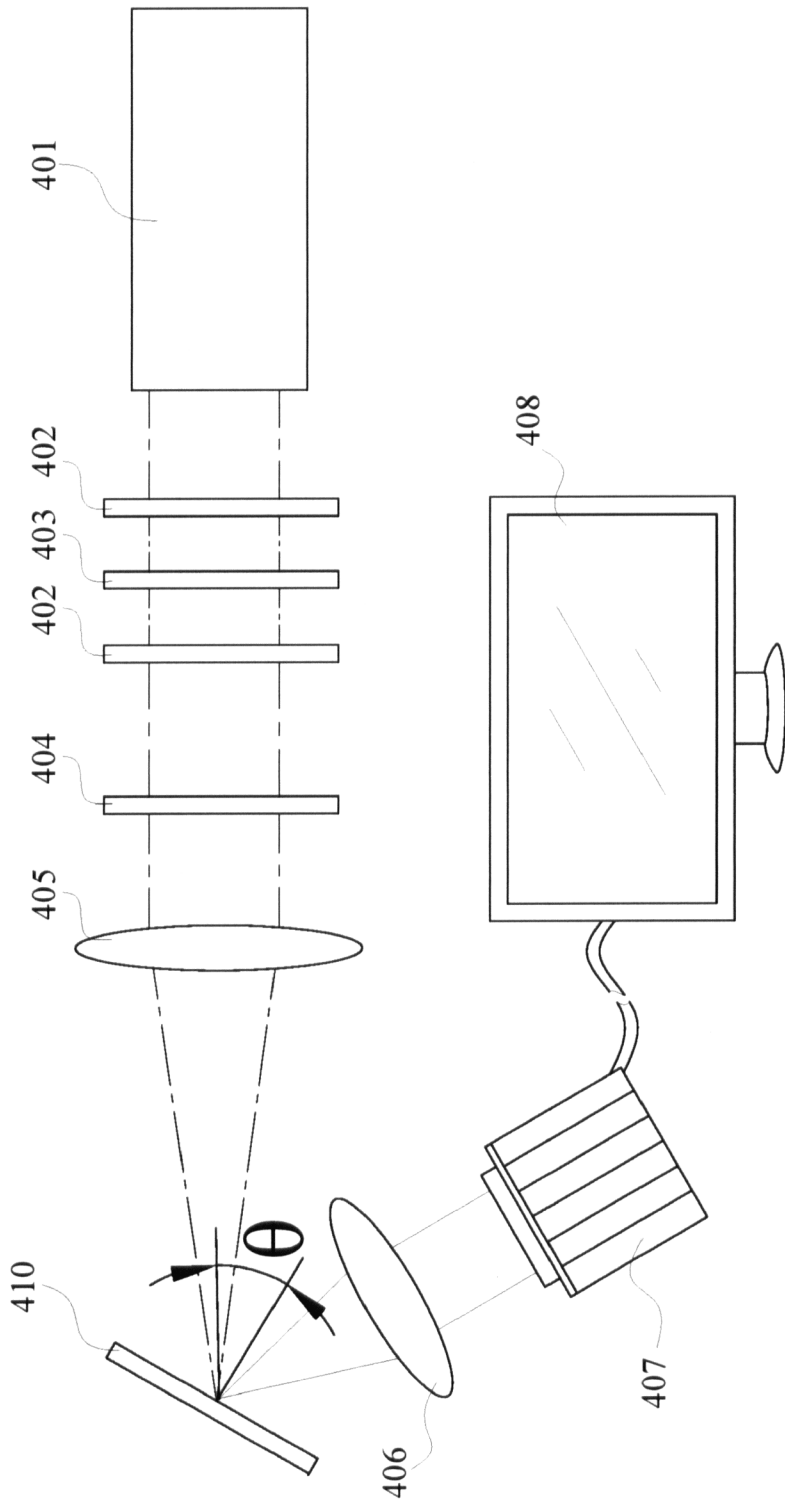


(a)

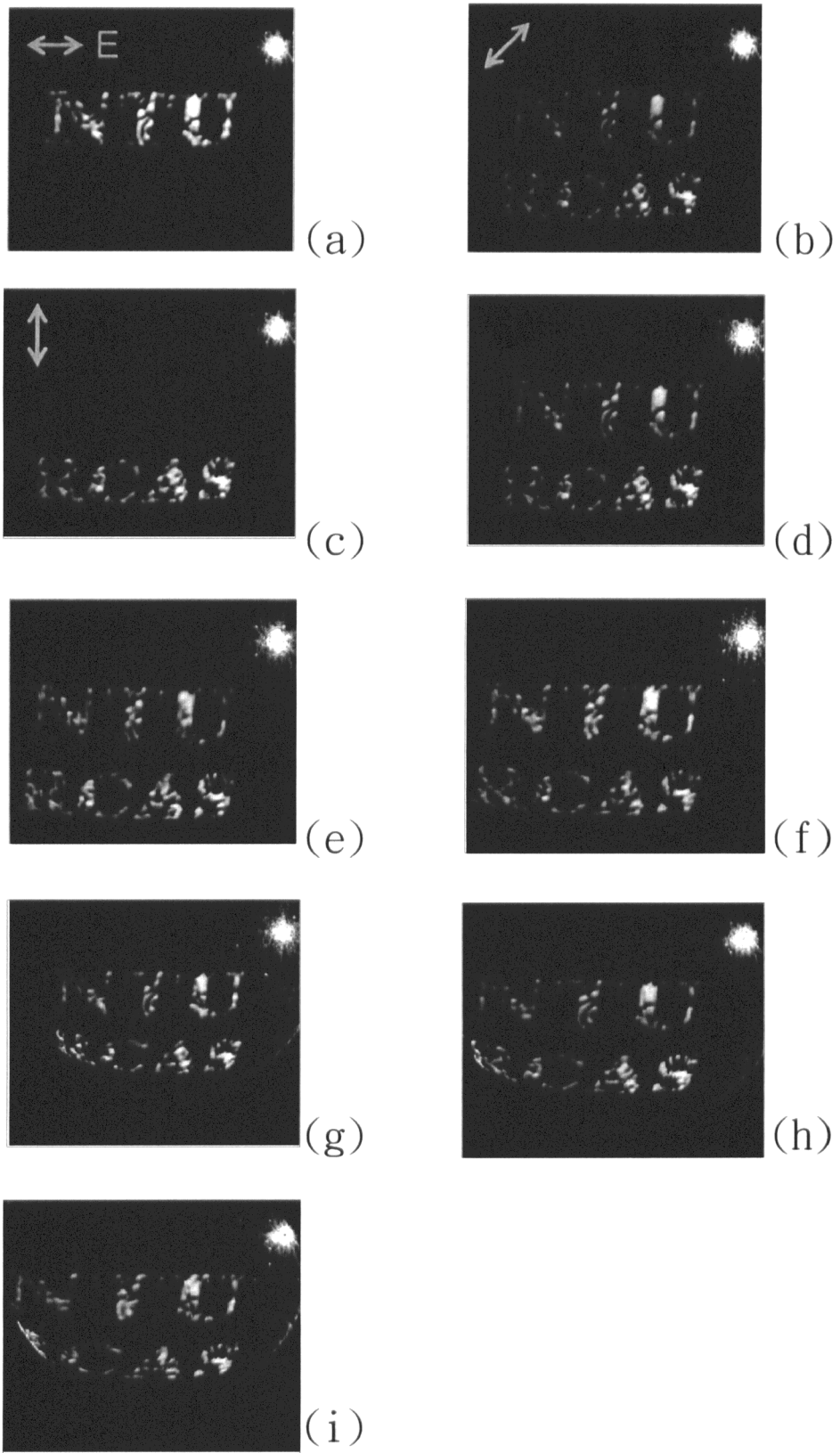


(b)

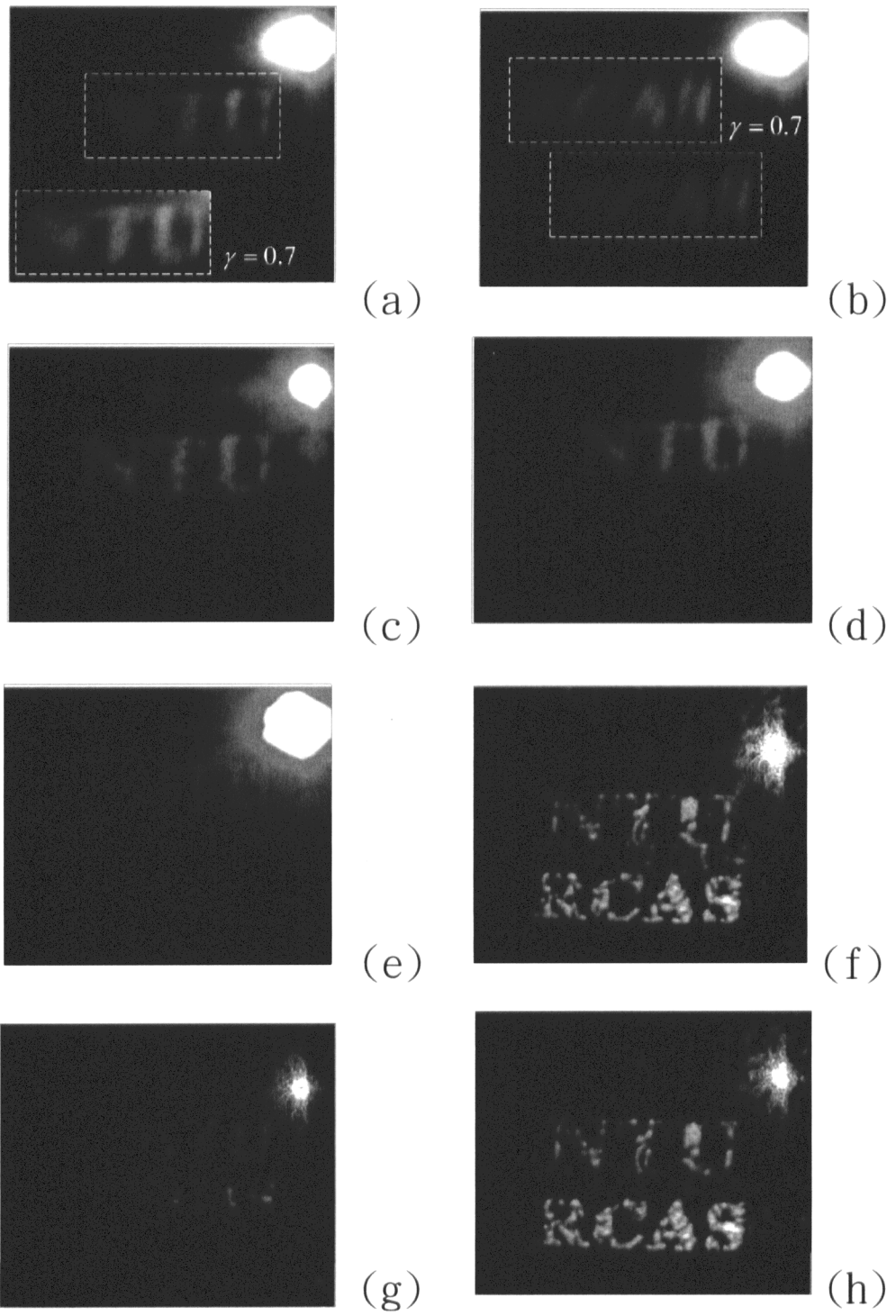
第三圖



第四圖

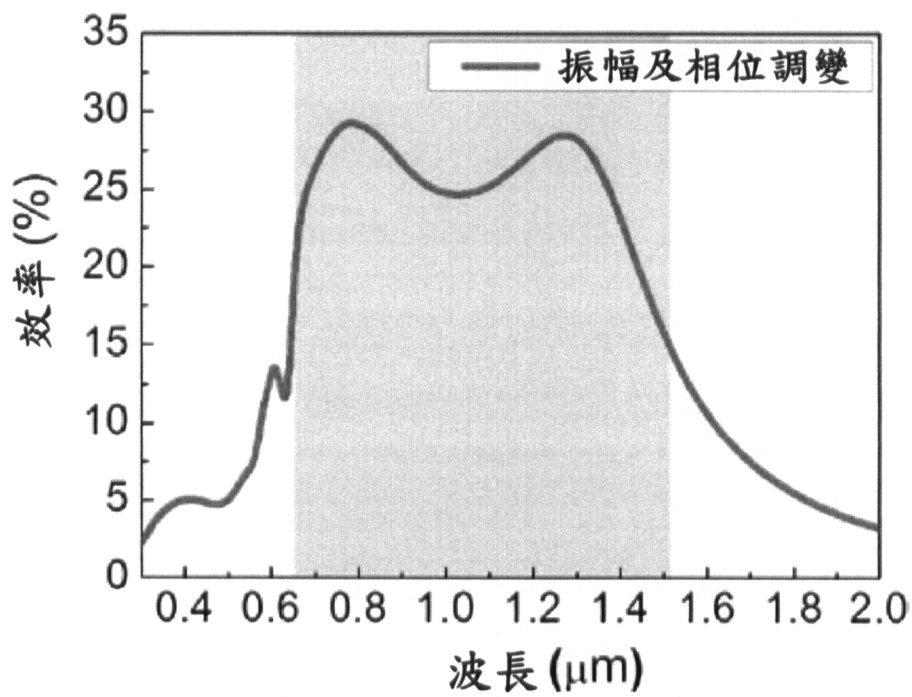


第五圖

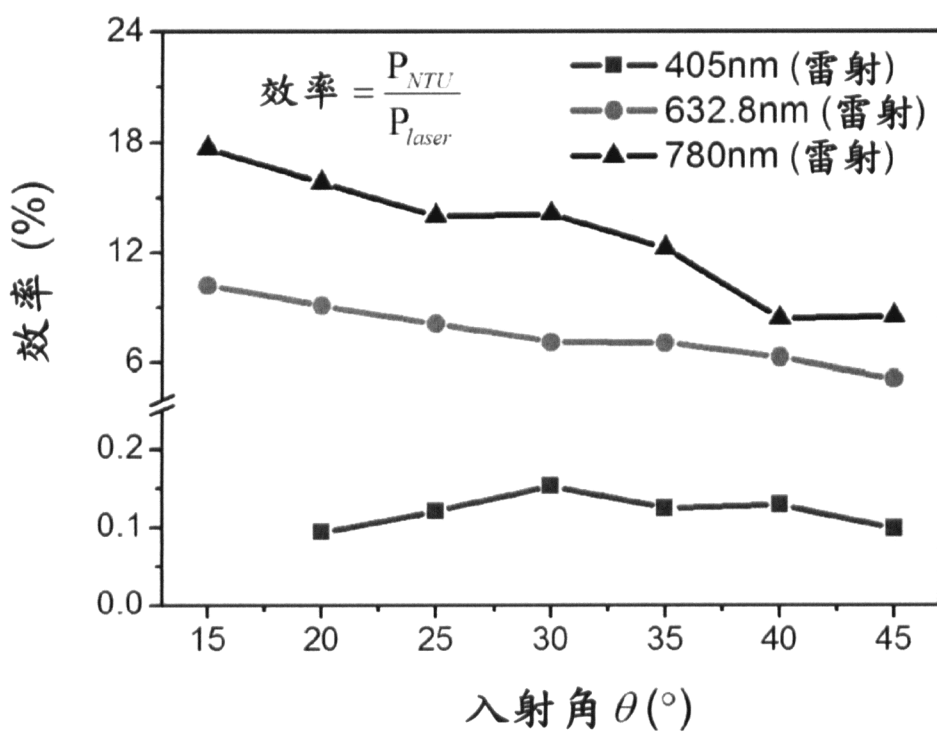


第六圖





第七A圖



第七B圖