

# 超高像素密度的矽基液晶相位式調制器的發展近況

楊宙圃、吳楓穎、王珮心、陳皇銘

## 1.簡介：

純相位式矽基液晶空間光調製器(liquid crystal on silicon-spatial light modulator, LCoS-SLM)是一個動態繞射光學元件(diffractive optical element, DOE)，它可以廣泛使用於各種光子應用如：可切換的 P-S 極化裝置、可調變的鏡子或光柵、和使用於對準技術中可重構的 q-plates 等。由於它可以直接藉由電腦軟體的操作，即時地操縱光的變化，更被廣泛地應用於如立體全像顯示、雷射材料加工、影像或生物光子學的調適光學、通訊應用中的光束轉向、以及全光計算技術上。

具有高幀率的高解析度驅動端的 LCoS-SLM 面板已經被各大公司開發，如 Meadowlark Optics (MLO)、Holoeye Photonics (HEP)等。然而大於  $\sim 7000$  PPI 的 LCoS IC 背板，有驅動電壓需低於 5 伏的實體限制。若欲實現快速之高像素密度(PPI)的 LCoS 面板，則必需要在低驅動電壓下，能達到較短的液晶響應時間的特性。其次、當接收器的偵測時間很接近 LCoS 的波動頻率時，相位穩定度(即時間波動，又稱為靜態 flicker)亦將會影響應用。在先前的研究文獻中指出，類比式的 LCoS 比較適用於相位式調變，因為它比數位式的 LCoS 有較好的相位穩定度。然而、當像素的尺寸不斷縮減時，類比式 LCoS 的儲存容量也會下降，並會隨著時間的推移，導致低頻週期性的波動。因此與數位式 LCoS 相比，類比式 LCoS 同樣很難達到超高像素密度(大於 4000 PPI)又具有相位穩定度的產品。

再者、超高像素密度的 LCoS 不只有相位 flicker 的問題，還有空間形變的現象，其中也包含了均勻度誤差(精確度)和 pixel-level 干擾效應(準確度)。近期許多光子應用中，需要較高的空間頻率或較小的 pitch 大小來達到較高的影像解析度或較大的繞射角度。韓國電子通信研究院(Electronics and Telecommunications Research Institute, ETRI) 在 2019 年，提出了製作於玻璃基板 pitch 為 1.0 微米的 SLM。同時 Isomae 等人，也提出了 1.0 微米像素間距(pixel pitch)的晶格狀介電壁結構的方法，來避免視場干擾效應(fields-of-view, FoV)。然而，其相關的挑戰在於較低的填充因子(fill factor)和較長的響應時間。由於小像素間距的 IC 背板，其最大驅動電壓值大幅降低至 2V，也限制了液晶響應時間。因此，一些過去的研究文獻便採用軟體補償方法，提出新穎的電腦全像術(computer generated hologram, CGH)來改善影像品質；或是利用複雜的光學工具，來遮蔽零階的漏光。以軟體改善方法需要額外的電腦全像術演算時間，特別在超高解析度或立體影像圖案將花費更多的演算時間。而以硬體改善方法也會導致笨重和昂貴的光學系統。另一方面，一些商業化的 LCoS 已採用 12 位元或 16 位元的驅動韌體方案來補償不均勻性，這也造成了驅動端面板輸入時鐘頻率的額外負擔。

因此，本實驗室提出一個優化 LCoS 方式，以較低的 cell-gap-to-pitch 比(d/p)來降低空間形變現象。在無須額外複雜的光學系統、保持電腦全像術演算時間和輸入時鐘頻

率不變的條件下，本實驗室所開發 2K1K LCoS 的性能優於商業化的 LCoS。所使用的 2K1K LCoS (~4000 PPI) IC 背板，乃採用 Jasper Display Corporation (JDC) 的反射式 IC 背板。其 pitch 大小為 6.4 微米。一系列針對不同需求的 LCoS 面板如：(1) 完整解決方案 (turn-key solution, TKS) 命名為 PCU-3-02-TKS，其可在 7.11 毫秒 (120 Hz) 的操作下，擁有較高的相位準確度與~8%的零階光損失值。(2) PCU-3-02-HS 來實現目前全世界最快的純相位式 LCOS-SLM 面板，其在 45 °C 時的響應時間小於 1 毫秒。(3) 針對壓低相位波動 (phase flicker)，我們提出 PCU-3-02-LTF，其相位 flicker 可小於  $0.02\pi$ ，同時擁有較快的響應時間，比現有商業化的 LCoS 快了 3 到 4 倍。這一系列的 LCoS-SLM，大幅刷新現有的 LCoS 技術門檻，使各種不同的光子應用都有最適合的 SLM 面板可使用。

## 2. LCoS 相位調變的評估量測

### 2.1. 相位線性度和精確度

以 633 奈米的雷射量測，並利用空間濾波器擴束以及用透鏡來準直括束。光電探測器是 TCS-3404 (TAOS) 或是 ET-2040 (EOT)，用來測量每個灰階值的光強度。偏振干涉儀 (polarization interferometer, PIF) 的設置為偏振片和檢偏片 ( $\chi=90^\circ$ ) 相對於液晶的配向方向為  $\psi=45^\circ$ 。使用下列的方程式，量測的灰階對於強度的曲線可用於轉換成灰階對相位的曲線：

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2 \chi - \sin 2\phi \sin 2(\phi - \chi) \sin^2 \left( \frac{\delta}{2} \right)$$

其中  $I/I_0$  是歸一化強度， $\chi$  是起偏片和檢偏片的角度， $\psi$  是液晶配向和起偏片的夾角， $\delta$  是相位延遲。平均相位準確度誤差 (average phase accuracy error, APAE%) 和方均根 (root-mean-square, RMS) 方法可以應用來評估所有灰階的相位線性度：

$$\text{APAE\%} : \frac{\sum_{GL=0}^{GL=255} \left( \frac{|\delta_m(\text{LUT}(GL)) - \delta_i(GL)|}{\delta_{\max} - \delta_{\min}} \right)}{256}$$

$$\text{RMS} : \sqrt{\frac{\sum_{GL=0}^{GL=255} (\delta_m(\text{LUT}(GL)) - \delta_i(GL))^2}{256}}$$

其中  $\delta_m$  是量測的相位值， $\delta_i$  是理想的線性相位值， $\delta_{\max}$  是在 255 灰階和 0 灰階之間的最大相位調變值， $\delta_{\min}$  是在 255 灰階和 0 灰階之間的最小相位調變值。相位精確度採用偏振干涉儀 (PIF) 設置量測，評估 LCoS 在不同位置下 ( $N=15$ ) 的相位調變曲線，我們採用 256 (8 位元) 個灰階的平均標準差 (mean standard deviation, mSTD) 來評估未經補償的相位精確度，其被定義為：

$$\text{mSTD}(x, y) = \frac{\sum_{GL=0}^{GL=255} \sqrt{\frac{\sum_{mxy=1}^{mxy=\max} (\delta_{mxy}(\text{LUT}_{\text{global}}(GL), x, y) - \overline{\delta_{mxy}(\text{LUT}_{\text{global}}(GL), x, y)})^2}{\text{Total } mxy}}}{256}$$

其中  $\delta$  是根據 LUT 在不同灰階下的相位量測， $x$  和  $y$  意指整個量測面板的特定面積。光電探測器是使用 TCS-3404，及一個紅光直徑約 0.9 毫米。2K1K 面板的主動區分別

為 12.5×7.1 毫米。

## 2.2. 相位準確度和零階光的 CGH 影像投影

相位準確度是以未放入檢偏片的繞射光柵方法為基礎，並且調整準直入射光的極化方向( $\psi=0^\circ$ )。根據不同的空間頻率(spatial frequency, SF)可以將 CGH 的相位圖案應用來評估 pixel-level 的變形現象 (例如，週期(P)=2(1+1)像素/光柵的 2K1K 面板，其對應於(SF)每毫米 76.0 條線(lp/mm))和光柵方向。水平(horizontal, H-grating)或垂直(vertical, V-grating)方向的二元光柵的定義是以二元光柵電極跟液晶配向層的方向平行或垂直。相位調變的像素是直接源自於強度的比例，其 0 灰階下第 0 條繞射效率的強度是為 100%，如方程式(7)所示。在此我們也量測了零階的漏光強當 CGH 圖案寫入 LCoS-SLM 並與 0 灰階 100%反射率的未調變圖案做比較。藉由功率計(LP1 從 Sanwa)對每個圖案的測量，光柵的繞射效率或 CGH 的零階強度都可以獲得，零階光強的解析解表示可以用相位偏移來導出：

$$I_{0\text{-order}}(\text{GL}) = \frac{1}{2}[1 + \cos(\delta(\text{GL}))]$$

其中  $I_{0\text{-order}}(\text{GL})$  是每個繞射圖案灰階值歸一化的零階光強。

## 2.3. 相位穩定度和液晶切換速度

時間波動同樣使用偏振干涉儀的設置來測量。將光電探測器 ET-2040(從 EOT)連接到高解析度的示波器 TDS3034B(從 Tektronix)。針對每個灰階每隔幾微秒獲取一次數據。為了定量評估相位 flicker，除了用全域 LUT 量測的相偏移、平均峰對峰值(P-P%)和 mSTDs 外，還包含了每個相位階數的最小跟最大相位數。全部的相位階數(灰階：0-255)包含了在總相位調變  $2\pi$  中不同的 flicker 影響下(峰對峰)，具有代表性的平均峰對峰值和 mSTD，並使用三個標準偏差值(STD：最大值、量測值、最小值)。液晶切換速度的量測設置和相位穩定度量測的設置一樣，但它在高電壓幀( $V_w$ )和低電壓幀( $V_b$ )之間切換(動態 flicker)來測量在操作溫度下 10-90%的上升(rising time,  $T_r$ )和下降時間(decay time,  $T_d$ )。相位穩定度意指在一個設定的時間周期內每個灰階幀的維持度，而此被需要用來記錄強度波動，透過方程式將其轉換成相位波動(靜態 flicker)。

## 3. 結果與討論

要一次達到相位線性度(RMS 小於  $0.02\pi$ )、精確度(mSTD 小於  $0.04\pi$ )、準確度(pixel-level APAE 小於 9%，其在 76.0 lp/mm 以上)、穩定度(峰對峰值小於 3.0%)和高切換速度(小於 8 毫秒或 120 赫茲)並不容易。在 3.1 節中將介紹具有均衡相位性能的 SLM，可以在 120 赫茲和高空間解析度(大於 4000 PPI)下驅動之完整解決方案。其次，在全像視覺顯示中，由於需要較高速(higher speed, HS)的 SLM 來避免動態 flicker(影像模糊)而不是靜態 flicker(時間波動)，也就是 LCoS 的波動頻率只要大於人眼(或偵測器)的響應頻率即可。3.2 節中將詳述如何達到快速響應的 HS-SLM 方法。然而，當需要有很低時間波動(low temporal fluctuation, LTF) 而不是切換速度的應用，

例如波長選擇開關(wavelength selective switch, WSS)，在 3.3 節中，我們將呈如何實現具有低相位波動響應的 LTF-LCoS。

### 3.1. 完整解決方案(Turn-key Solution, TKS)的 LCoS-SLM

Pixel-level 干擾效應的相位誤差可以藉由與理想偏離的二元光柵來量化，此二元光柵與不期望的邊緣場和反轉傾斜效應有關。我們在二階光柵上做了一些改變，固定二元光柵的其中一階為零灰階，此時沒有相位延遲，然而在其它的灰階值會改變(灰階：1~255)。因此我們用相位調變測量 pixel-level。如圖 1 所示，對於同樣的 IC 背板(p=6.4 微米)、3 個不同 cell gap (d 約 3.8、約 2.4 和約 1.82 微米)的 LCoS-SLM 有三個不同的 pixel-level 相位準確度結果。

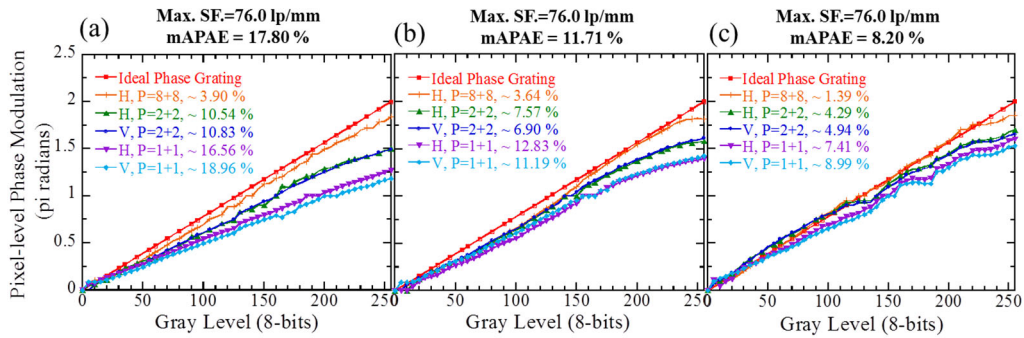


圖 1\*. LCoS-SLM 在不同空間頻率(週期=1+1、2+2、8+8)及光柵方向(H 和 V 光柵)的相位調變：(a)2KSRK (d/p ~0.59)、(b)LETO (d/p ~0.38)、和(c) PCU-3-02-TKS (d/p ~0.28)

對於最大的空間頻率: 2KSRK、LETO 和 TKS 的水平光柵 mAPAE%誤差，分別為 16.56、12.83 和 7.41%。在我們最新的 PCU-3-02-TKS LCoS 面板中，很明顯得到了較低的 pixel-level mAPAE%誤差，意味著較高的相位準確度。在二維(V+H)微小像素陣列的 LCoS 中，垂直光柵的干擾現象不只導致了邊緣場效應，由於液晶分子的反轉傾斜效應因素，也引發了較強的不對稱形變。對於最大的空間頻率: 2KSRK、LETO 和 TKS 垂直光柵的 pixel-level mAPAE%誤差分別為 18.96、11.19 和 8.99%。PCU-3-02-TKS 在水平與垂直光柵都有最小的誤差，意即擁有較高的相位準確度。

透過將每個灰階幀保持一段時間來量化時間波動(相位穩定度)的向位誤差，來記錄 flicker 的偏差，從而量化相位調變的 RMS 響應(相位線性度)。為了有意義的去討論時間波動，使用相同的特定 IC 背板、相同的操作溫度(約 35°C)及光量測設備(雷射和光電探測器)來進行量測。對於總  $2\pi$  相位調變的 2KSRK、LETO 和 TKS，其平均的峰對峰值(P-to-P)分別為 5.0%、3.3%和 2.6%，液晶響應時間(response time, RT)分別為 26.44、25.88 和 7.11 毫秒，還有上升時間  $T_r$  分別為 10.04、7.48 和 2.64 毫秒，如下表所示。簡而言之，PCU-3-02-TKS 達到了跟 LETO 一樣的相位穩定度性能，卻將近有 4 倍快的響應時間，及更低的零階光損失。



表 1. PCU-3-02-TKS 和商業版 2KSRK、LETO 的比較

LCOS-SLM ( $V_w, V_b$ )	Linearity	Spatially Anamorphic Phenomenon			Temporal Fluctuations	
	1. RMS 2. APAE%	Precision (mSTD)	Accuracy (mAPAE%)	CGH Imaging (0-order%)	RT=Tr+Td (10%-90%)	Stability (mSTD, P-P)
JDC 2KSRK (4.43, 0.84)	0.03 $\pi$ 0.96 %	0.03 $\pi$	17.80 %	17.43 %	10.04+16.40 = 26.44 ms	mSTD: 0.05 $\pi$ P-P: 5.0 %
HEP LETO	0.04 $\pi$ 1.37 %	0.04 $\pi$	11.71 %	11.45 %	7.48+18.40 = 25.88 ms	mSTD: 0.03 $\pi$ P-P: 3.3 %
NCTU TKS (2.10, 0.70)	0.01 $\pi$ 0.36 %	0.04 $\pi$	8.20 %	8.25 %	2.62+4.49 = 7.11 ms	mSTD: 0.03 $\pi$ P-P: 2.6 %

LCoS 空間形變現象不只包含了均勻度偏差(相位精確度)還有 pixel-level 干擾效應(相位準確度)。我們前面的研究已經討論了如何測量和確定相位精確度的個別影響因素。尤其相位平移的線性化影響了投影的 CGH 影像結果。一般而言，在理想的純相位調變( $2\pi$  弧度和  $\psi=0^\circ$ )中，編碼 CGH 的 kinoform 到 LCoS 中的零階光應該為零。然而在大多數情況下，當使用 SLM 時會存在零階光的損耗。為了評估 CGH 的每個相位特徵的零階光損失，基於由純量繞射理論推導的 Fresnel (近場)繞射方程式來計算 NCTU-LOGO 目標振幅影像的 CGH 相位圖案(即 kinoform)，如圖 2 所示。對線性校準過的 LCoS 面板進行 NCTU-LOGO 全像重建影像。為了利用 CGH 碼的移位定理來評估，將繞射圖案和零階光損失分離開來。TKS 的相位精確度的相位 mSTD 值為  $0.04\pi$  ( $\lambda/50$ )。它們的 pixel-level mean-APAE 值分別為 8.2% (mAPAE：在最小值空間頻率約為 50%時水平和垂直光柵的 mAPAE% 誤差)。在 CGH 投影的例子中，PCU-3-02-TKS 的零階光損失值為 8.3%，為目前最小零階光損失的 SLM。

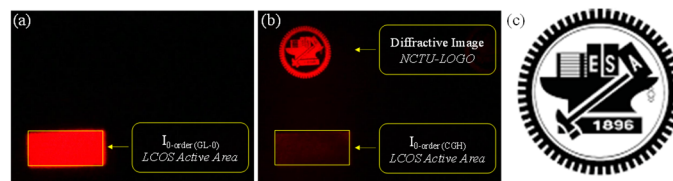


圖 2\*. 在(a)零灰階幀、(b)“NCTU-LOGO”的 CGH 相位圖案、和(c)“NCTU-LOGO”

在此，我們亦發現零階光損失與 LCoS 中液晶層的相位調變有直接相關。在被計算的 CGH 相位圖案中，水平和垂直光柵的比例由 Matlab 做分析來確認 pixel-level 液晶干擾效應。對於整個灰階值來說(灰階-0 到 255)，水平與垂直光柵比例的使用大約為 1:1。因此，CGH 影像的零階光損失，可以用相位準確度(pixel-level mAPAE% 值)來表示，因為該值是從最大空間頻率時的 mAPAE 值測量得出。所以特別是當 LUT 校正後達到一定的相位線性度 (全部幀的 APAE 小於 1.5%)及相位精確度的 mSTD% 值控制於  $0.04\pi$  的條件下，我們發現 pixel-level 相位準確度是全像影像零階光損失的

主要原因。在此，我們所提出的完整解決方案的 LCoS-SLM 對於光子應用有相當大的優勢，尤其是在不犧牲操作溫度、相位深度、輸入幀率、電腦計算時間和光引擎尺寸的條件下使用。

### 3.2. 較高速 (Higher Speed, HS)的 LCoS-SLM

上節所描述的 TKS LCoS-SLM 在 35°C 的操作下可以達到約 7 毫秒的高速切換。但有很多的相位調變應用，是需要快速的響應(2-4 毫秒)或甚至是次毫秒響應(約 1 毫秒，較低的動態 flicker)的空間光相位調製。為了達到快速響應，PCU-3-02-HS LCOS 可以在較高的驅動電壓( $V_w=5.0$ 、 $V_b=1.53V$ ) 在 35 °C 下操作，得到上升和下降時間分別為 0.32 毫秒和 1.93 毫秒(約 3.43 毫秒)的全相位( $2\pi$ )調變。此外，我們利用熱控制系統 (Arroyo Instruments TECSource 5240)來增加 LCoS 面板的操作溫度並控制在 45 °C。在此溫度的操作下，上升和下降時間分別為 0.16 毫秒和 0.71 毫秒，此結果為目前世界上第一個最快的全相位調變的面板，其響應時間小於 1 毫秒。較快的響應和較高的驅動電壓使時間波動的平均峰對峰值從 2.6% 提高到 8.3%。在最大空間頻率 (76.0 lp/mm) 下，二元相位光柵的靜態相位 flicker 將減少繞射調變效率從 40.1% 到 30.7%。然而與 TKS 相比，它的線性度、精確度和準確度的值並沒有不同。全像影像的零階光損失也可以低於 10%。優於商業化的 SLM (2KSRK 和 LETO)雖然這些面板有較低的 flicker 響應。因此，時間波動問題跟全像顯示沒有關聯，而是由於波動頻率高於人眼的響應時間。次毫秒響應的純相位( $2\pi$ ) LCoS 可以更拓寬 SLM 的應用。

### 3.3. 較低的时间波動(Lower Temporal Fluctuation, LTF)的 LCoS-SLM

TKS LCoS-SLM 在低驅動電壓下可以達到較低的时间波動(lower temporal fluctuation，平均峰對峰值約 3.0%)，以及比商業化的數位 LCoS (2KSRK 和第一代的 LETO)快約四倍的響應時間。但針對需要比較高的相位穩定度的應用(平均峰對峰值在 2.0% 下)，如商業化類比式 LCoS (Hamamatsu Photonic; HMP) 的產品相似。HEP 公司在 2019 年發表了第二代 LETO 數位 LCoS 系列(LETO-NIR-08)，其在 635 奈米波段下操作，可以達到 2.0% 的相位 flicker。然而比起第一代的 LETO，它的響應時間卻從 27 毫秒增加到 40 毫秒。為了得到更低的相位 flicker，我們發展出 PCU-3-02-LTF。在低趨動電壓下，LTF 的上升和下降時間分別為 4.84 毫秒和 4.88 毫秒，與 TKS-LCoS 相比，LTF-LCoS 的響應時間從 7.11 毫秒增加到 9.72 毫秒，但其平均峰對峰值和相位 flicker 的 mSTD 值分別從約 3.0% 下降到約 2.0%，以及從  $0.03\pi$  降低到  $0.02\pi$ 。PCU-3-02-LTF 和商業化 LCoS 相比，擁有相同的相位穩定度，但有將近 4 倍的快速響應。

## 4. 總結

空間形變現象和時間波動的相位特徵，在快速響應和更高的解析度的 LCoS-SLM 是重要的議題，使用在光子應用上也被廣泛的討論。這項研究揭示了能夠抑制液晶

pixel-level 干擾效應的關鍵 LCoS cell 設計和數位驅動方案，使其能夠在無需犧牲操作溫度、相位深度、相位線性度、液晶反應時間、CGH 的計算時間、pixel-clock 頻率(解析度和幀率)和沒有任何的複雜光學系統要求下，具有更高的相位準確度和優化的相位 flicker 的純相位 LCoS。此外、LCoS 面板的零階光損耗可歸因於相位準確度，在本研究中可由控制高相位線性度和精確度的參數而得知。

使用高雙折射率液晶混合物不只可以減小 cell gap 以加快液晶的響應時間和抑制邊緣場效應，還可以減少 $\Delta V_{2\pi}$ 的最小值來優化相位 flicker。較高 FoM 值的 LC 混合物可以在較低的驅動電壓下達到更高速的切換速度。即使在操作電壓的限制下，使用 LUT (Look-up-table) 對於線性化相位調變方案是有幫助的，它可以幫助液晶展示了最小的相位深度( $2\pi$ )的線性需求。此外、驅動語法與數位硬體驅動的限制也是在選擇液晶材料前必須考慮的。

\*本文節錄自 “Characterization of the spatially anamorphic phenomenon and temporal fluctuations in high-speed, ultra-high pixels-per-inch liquid crystal on silicon phase modulator”

Jhou-Pu Yang, Feng-Ying Wu, Pei-Sin Wang, and Huang-Ming Philip Chen\*

完整文獻發表於 Optics Express Vol. 27, No. 22, 32168-32183 (October 28, 2019)