

石英光學低通濾波器設計分析

Analysis and Design of Quartz Optical Low-Pass Filter

黃國政、王必昌、廖俊境

Kuo-Cheng Huang, Bih-Chang Wang, Liang-Ching Liao

假色與 Moiré 條紋現象是一般高解析度數位相機常見的問題。當較高空間頻率的光束進入相機影像位元時，由影像位元所判讀的顏色會與真實物體顏色不同，故在高品質的數位影像系統中，經常使用雙折射之光學低通濾波器 (OLPF) 來消除 Moiré 假色條紋。在 CCD/CMOS 感知器上，目前以三明治結構之三層濾波片最為常用，其中兩層是單晶雙折射基材，主要是區隔垂直與水平的影像資料；另一層是相位波片，目的是將線偏振光轉成圓偏振光。如此一來，只要 CCD/CMOS 感知器接受到細線紋資訊，就會消除 Moiré 條紋以得到真實影像資料。另外，OLPF 通常需要加上一層 IR-cut 濾片，以消除因紅外線所產生的鬼影及疊色現象。本文針對鏡頭光圈 ($F/\#$) 及濾波片方位角的變化，以及不同層數濾波片設計，對系統 MTF 影響做詳細分析。

False colors and Moiré fringes are common problems with high-resolution digital cameras. Since the colors recognized by the camera are different from the actual ones as high spatial frequency light enters a pixel. Optical low-pass filters (OLPF) are used to eliminate color Moiré fringes in high-quality digital imaging systems. Nowadays, a three-layer filter is more popular and developed specifically in response to CCD/CMOS sensors. Two of the three layers are single-crystal substrates, which separate image data in horizontal and vertical directions. A phase plate, which converts linearly polarized light into circularly polarized light, has been sandwiched between these two substrates. That results in more accurate image data separation, as well as a facilitation of light reception by multiple pixels, and minimizes false colors due to finer line patterns input. In general, the optical low-pass filter is laminated together with an infrared-cut filter, which suppresses ghosts and colors overlapping caused by infrared light. This paper analyzes the contributions to MTF of optical system in detail for different $F/\#$, orientation of single-crystal substrates and different number of layers.

一、前言

光學低通濾波器 (optical low-pass filter, OLPF) 已廣泛用於高品質數位影像元件上，例如 CCD

(charge-coupled device) 或 CMOS 影像感知器，可減少影像上有 Moiré 假色條紋的形成。一般光學低通濾波器可由光學雙折射晶體薄板 (birefringent crystal plate) 或具有光柵 (grating) 的繞射光學元

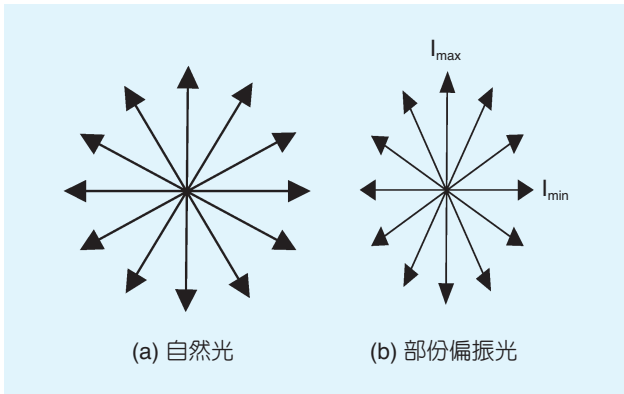


圖 1. 光的偏振。

件，或微透鏡陣列 (lenticular lenses) 所構成，Hayashi and Sugimoto⁽¹⁾ 曾經使用微透鏡陣列光學低通濾波器於 CCD 相機上，但因製程困難而少被引用。目前以具有雙折射效應的石英 (quartz) 晶體為最多。

依照空間訊號取樣理論，當接近 Nyquist 空間頻率取像時，常會發生影像扭曲，造成 Moiré 假色條紋的生成⁽²⁾，為了降低這種影像扭曲，影像的空間頻率必須低於 CCD 或 CMOS 元件的 Nyquist 空間取像頻率。雙折射晶體濾波器 (birefringent low-pass filter, BLF) 的操作方式是將光束分成兩道光，一為正常光束 (ordinary ray)，另一是非正常光束 (extraordinary ray)，用以移除較高空間頻率的影像⁽³⁾。一般 BLF 需要使用兩或三個偏極晶體將光分成 4 或 8 束，以使構成更有效率的高頻影像阻隔。由於 BLF 是由多的偏極薄片所疊合而成，使得 CCD 的尺寸欲小不易，故在西元 1956 年時，Kell⁽⁴⁾ 發明了光柵式光學低通濾波器 (GOLF)，不僅沒有 BLF 的缺點，功能亦可隨意由研究者改良。傳統低階 GOLF 雖然具有尺寸薄及價格低的優點，但其光柵影像易留在 CCD 上，為了改進此現象，研

究人員紛紛採用較高階的 GOLF，但隨之而來的缺點如同微透鏡陣列一般，愈理想的光柵外形，製造困難度愈高。

新近，由於晶體雙面拋光技術的改良，使得早期 BLF 厚度與成本皆獲得改善，市面的 OLPF 仍舊以 BLF 型最為廣用，層數也提高到 5 層以上，使得 300 萬以上畫素的 CCD 或 CMOS 感測元件的 Moiré 假色條紋皆能因而改善。本文將對不同層數之 BLF 設計，以 CODE V 軟體模擬其系統 MTF 之變化。

使用不同光圈 ($F/\#$ 數) 的鏡頭系統，對同一 BLF 的濾波效果亦有差異，本研究嘗試使用不同 $F/\#$ 數之鏡頭系統對同一 BLF 作濾波比較。另外，多數 BLF 皆使用方位角 45 度之晶體薄片，本文將探討此晶體薄片方位角之設計對系統 MTF 的貢獻。

二、偏極化光學基礎理論

1. 光束偏極化 (Polarization) 理論

一般光源所發出來的光為自然光，自然光可以視為所有可能方位上振動的光波的總合，其中光在各方向上的振動大小與機率是相同的 (如圖 1(a))。自然光在傳播過程中，由於受到外界的影響，易造成各個振動方向上的強度不同，而使部分方向上的光強度較大，這種光可稱為部分偏振光 (如圖 1(b))。但如果光在傳播時，電磁場向量的大小與方向是有規率的變化，此光即為偏振光。

偏振光依照大小與方向的變化又可分為線偏振光、圓偏振光及橢圓偏振光 (如圖 2)⁽⁵⁾。在圖 1(b) 中，電磁場向量在垂直方向之較大強度以 I_{max} 表示；在水平方向之較小強度以 I_{min} 表示。當部分偏振光為線偏振光與自然光混成時，其完全偏振光的

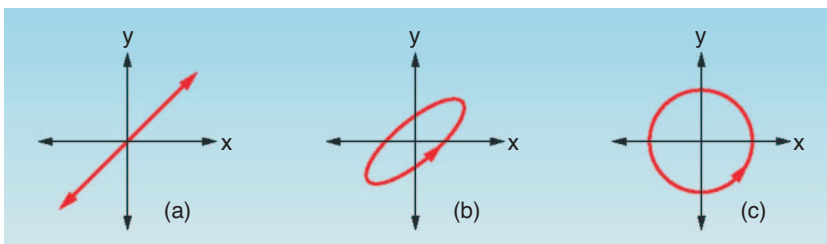


圖 2.

(a) 線偏振光、(b) 橢圓偏振光及 (c) 圓偏振光。

表 1.
常用的單軸晶體石英 (正) 與方解石 (負)。

方解石 (負晶體)			方解石 (負晶體)		
波長 (nm)	n_o	n_e	波長 (nm)	n_o	n_e
656.3	1.6544	1.4846	1946	1.52184	1.53004
589.3	1.6584	1.4864	589.3	1.54421	1.55335
486.1	1.6679	1.4908	340	1.56747	1.57737
404.7	1.6864	1.4969	185	1.65751	1.68988

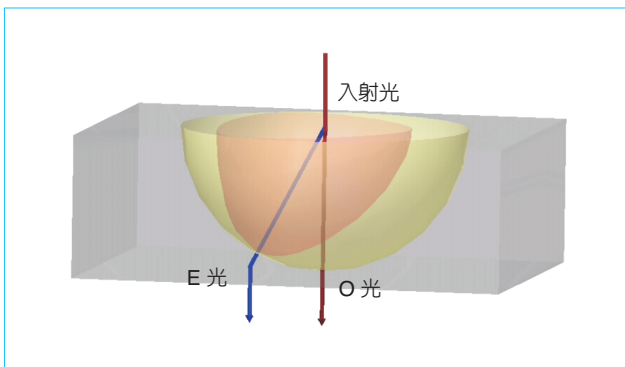


圖 3. 光的雙折射現象。

強度為 $I_p = I_{\max} - I_{\min}$ ，其在總強度 $I_{\max} + I_{\min}$ 中所占的比例為偏振度 P 即如式 1 所示，則自然光 $P = 0$ ，完全偏振光 $P = 1$ ，部份偏振光 $P < 1$ 。

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1)$$

產生偏振光的方式可使用自然光以布魯特斯角入射物體界面，則其反射光即為線偏振光，其反射比 R 與折射係數 n 之關係如式 2。

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (2)$$

另外，亦可使用人造偏振片來形成，如電氣石晶體，其利用晶體對不同偏振方向有不同的吸收比，將某一方向之外的偏振光吸收，留下的光束即為一線偏振光。由於上述兩種製造偏振光之折射或反射效率不佳，目前以使用雙折射晶體產生偏振光為主要的方法，原因是自然光可在雙折射晶體內輕易分解成兩道相互正交之線偏振光，加上消光比 (最小透射光/最大透射光) 又優於人造偏振片，故目前以雙折射晶體產生偏振光為最普遍。

2. 晶體偏振元件－波片

以一雙折射單軸晶體為例，光在晶體內傳播時，其折射光會因在晶體內傳遞速度不一樣 (如圖 3)，而分成兩道振動方向相互垂直之線偏極光，即正常光 O 光與非正常光 E 光。當晶體之 O 光的傳遞速度較 E 光的速度快時，此晶體為正單軸晶體；反之，則為負單軸晶體。常用的正負單軸晶體為石英與方解石 (如表 1)。

當光束以晶體光軸方向入射時，晶體內之 O 光與 E 光將會重疊在一起，但相位上有落差，此時，雙折射晶體的功用即為偏振光學技術上所謂之波片 (wave plate) 或相位延遲器。波片在光學低通濾波器是個基礎元件，通常是用來做光束初級的分光，可依其相位延遲量分成全波片、 $\lambda/2$ 波片及 $\lambda/4$ 波片。以光通過厚度為 d 的波片產生相應的相位差如下式：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda|n_o - n_e|d} \quad (3)$$

其中， δ 為相位差， λ 為光束波長， n_o 、 n_e 為晶體 O 光與 E 光之折射係數，而 d 是晶體厚度。通常波片用在 BLF 內，可有切換線偏振光與圓偏振光之功能。



圖 4. 假色與 Moiré 條紋。

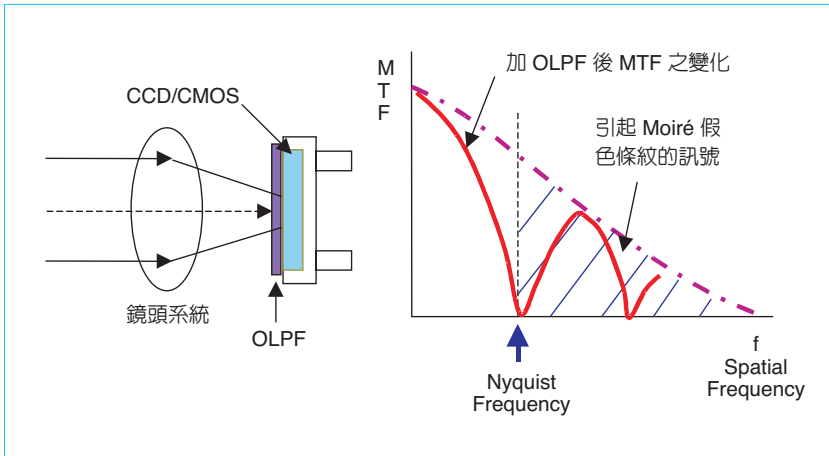


圖 5. 鏡頭系統加 OLPF 後之 MTF 變化。

製造波片最常用的材料為雲母，但由於雲母不易於整片上得到相同的消光比，故常選用石英波片。以 $\lambda/4$ 波片為例，對 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 之波長，所需厚度約為 0.017 mm 。

3. 光學低通濾波器 (OLPF)

當光束通過鏡頭系統投影在 CCD 或 CMOS 影像感知器上，若物像的空間頻率接近或大於感知器之電子取樣頻率 (Nyquist frequency) 時，將會在物像上產生 Moiré 假色條紋 (如圖 4)，故一般會在影像感知器前添加 OLPF，降低鏡頭系統取樣頻率之 MTF (如圖 5)，以消除 Moiré 條紋現象。

常見的 OLPF 有如前所述，一種是雙折射光學低通濾波器 (BLF)，另一種是光柵式光學低通濾波器 (GOLF)。當光束通過 BLF 或 GOLF 後，其光束將產生分光或繞射成 2-3 個光點 (如圖 6)。其中 GOLF 的光柵可有 2、4、8 等階數或外形的變化，以改良低通濾波效果，由圖 7 可知 GOLF 低通濾波

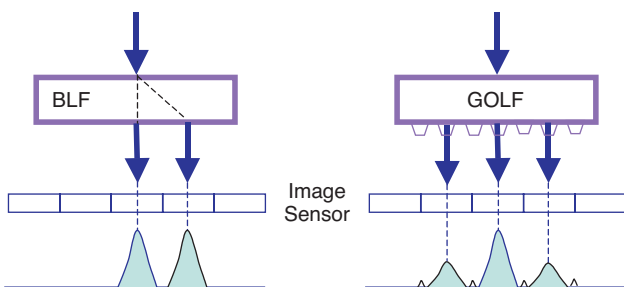


圖 6. 光通過 BLF 及 GOLF 之光束強度分布。

的能力優於 BLF，但因 GOLF 的製作較為複雜，故目前市面上的 CCD 或 CMOS 使用的 OLPF 以 BLF 為主，本文亦以石英 BLF 為設計與分析之主題。

三、雙折射光學低通濾波器的組成

1. 雙折射光學低通濾波器的結構

雙折射光學低通濾波器通常由一或多片之雙折射晶體薄片 (double refraction plate, DRP)、IR-cut 及 AR 鍍膜等所組成，或是以 Schott 公司之 BG39 或 BG40 等藍玻璃類之 IR-cut 濾光片取代 IR-cut 鍍膜 (如圖 8)。但這些元件中，僅有雙折射晶片 (DRP) 對光束空間頻率有濾通之效果。

早期低畫素 (30 k 以下) CCD/CMOS 之 BLF 中僅含有一片旋轉角 45 度之 DRP，但由於像質要求

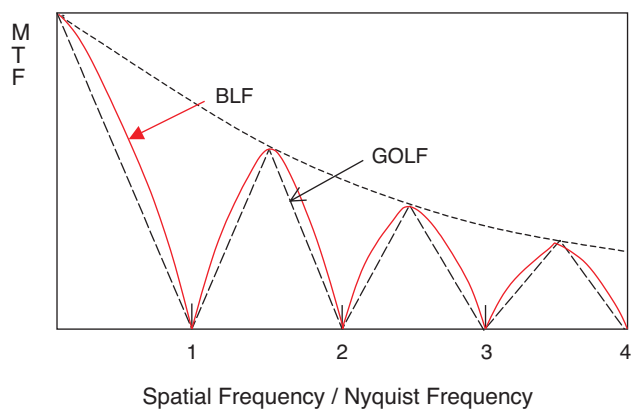


圖 7. 鏡頭系統 MTF 受 BLF 及 GOLF 之影響。

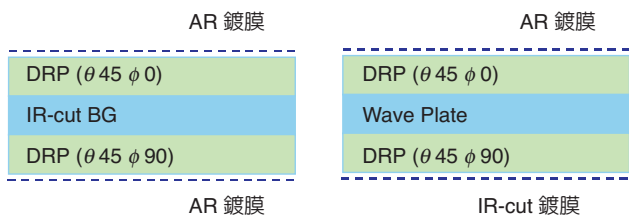


圖 8. 使用藍玻璃 (左) 及 IR-cut 鍍膜 (右) 設計之 BLF。

不高，其空間濾波效果已足夠，但隨著 1.3 M、2 M、3 M 及 4 M 畫素的 CCD/CMOS 產出，BLF 中的 DRP 已要求至少兩片且旋轉角須正交。新近，由於晶體薄片之雙平面拋光技術的精進，其厚度已可控制在 0.1–0.3 mm 左右，目前已有五層 DRP 以上之產品，但因考量產品的良率及成本，市面上的 BLF 產品多半是由兩片旋轉角正交之 DRP 及一片波片或任一旋轉角之 DRP 所組成 (如圖 9)。

DRP 的旋轉角設計主要是可以將 CCD/CMOS 在 X 與 Y 軸方向之 MTF 值均勻調降，減低 Moiré 條紋不對稱之效果。利用旋轉角正交的兩片 DRP，可避免因為裁切或組裝時所造成之 X、Y 兩方向 MTF 值調降之不均一 (如圖 10)，以避免在某個角度上的 Moiré 條紋相對明顯。

2. 雙折射光學低通濾波器的分光機構

當光束經通過一片 DRP，若光束的行進方向不與 DRP 之光軸平行，則將會發生雙折射效應，

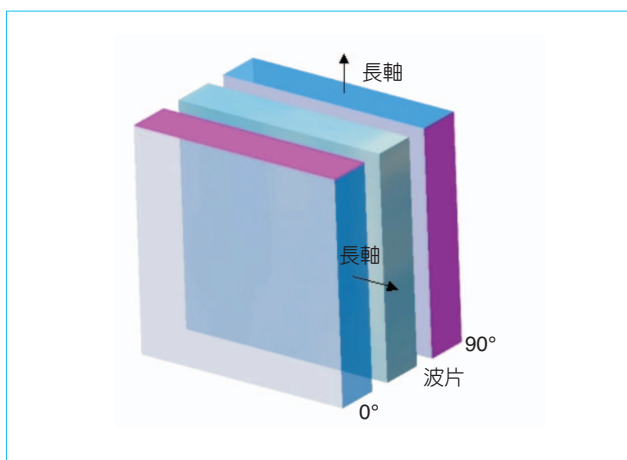


圖 9. 兩片旋轉角正交 DRP 及一片波片所組成之 BLF。

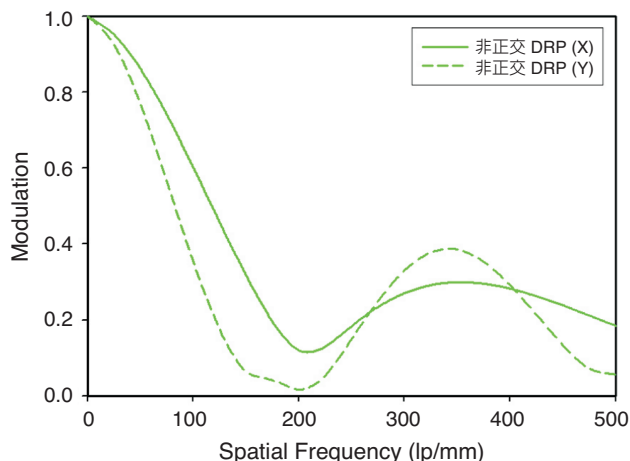


圖 10. 非正交 DRP 在 X、Y 軸之 MTF。

此光束被分成兩道距離為 d 的平行光 (如圖 11)，此兩道光通稱為正常光束及非正常光束，簡稱為 O 光與 E 光。

DRP 的方位角 (orientation angle, θ) 可決定 O 光與 E 光間的距離 d ，此距離可直接影響 MTF 的變化，其中方位角 θ 是指晶體裁切面與光軸間之夾角 (如圖 12)。除了 DRP 的方位角會影響 MTF 的變化外，其旋轉角 (擺放角) ϕ (如圖 12) 亦會影響 X 與 Y 軸方向 MTF 之分配。一片 DRP 可使光束於 CCD/CMOS 上形成兩個聚焦光點，此光點一般稱為分光點。同理，使用二或三片 DRP，將會使光束形成四或八個分光點 (如圖 13)，依據 Fourier 轉換原理，分光點的多寡與相對位置將直接影響 MTF 的調變值，如下文 MTF 的計算與分析。

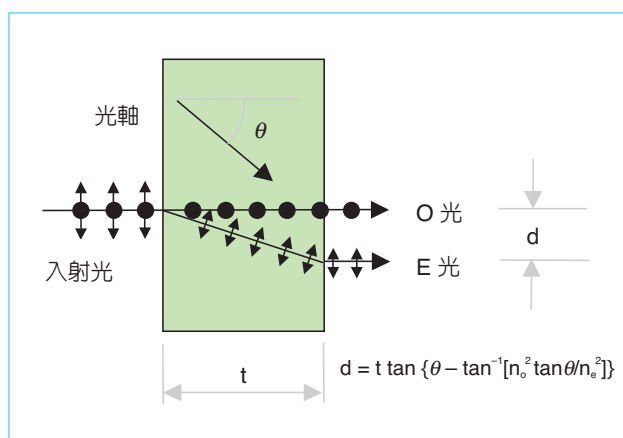


圖 11. 光束被分成兩道距離為 d 的平行光。

3. MTF 的計算與分析

光學鏡頭都具有一光學性能之特徵曲線，以此曲線代表光學鏡頭在各種空間頻率上的響應，響應的良否即為鏡頭解析能力。光學鏡頭的性能特徵曲線一般可稱為光學傳遞函數或 MTF (modulation transformation function) 值。BLF 之 MTF 計算可採分光點強度的 Fourier 轉換得之，例如一片 45° 方位角之 DRP 可將光束分成兩個分光點，其相對的位置如圖 11，光強度分布可表示為：

$$I(x) = \frac{1}{2} \left[\delta \left(x - \frac{d}{2} \right) + \delta \left(x + \frac{d}{2} \right) \right] \quad (4)$$

兩分光點間之最理想的距離為 CCD/CMOS 感知器的畫素間距 p ；亦即 $d = p$ 。(4) 式經由 Fourier 轉換可得到單片 DRP 之 MTF 為：

$$MTF_y(f) = 1 ; MTF_x = |\cos(\pi df)| \quad (5)$$

其中， f 為空間頻率。若使用兩片旋轉角相互正交之 DRP 當 OLPF，則其分光點為四個且強度各為 0.25，光強度可表為：

$$I(x) = 0.25 \left[\delta \left(x - \frac{d}{2} \right) \delta \left(y - \frac{d}{2} \right) + \delta \left(x + \frac{d}{2} \right) \delta \left(y - \frac{d}{2} \right) + \delta \left(x - \frac{d}{2} \right) \delta \left(y + \frac{d}{2} \right) + \delta \left(x + \frac{d}{2} \right) \delta \left(y + \frac{d}{2} \right) \right] \quad (6)$$

經由 Fourier 轉換可得到兩片 DRP 之 MTF 為：

$$MTF_x(f) = MTF_y(f) = |\cos(\pi df)| \quad (7)$$

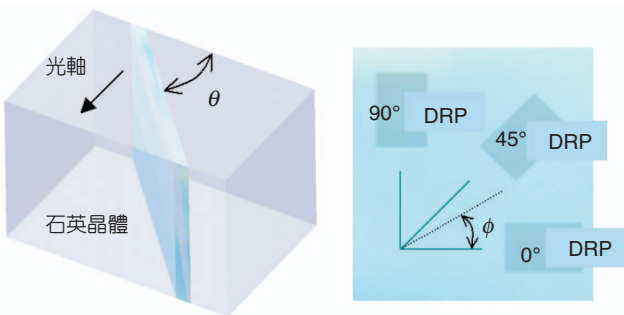


圖 12. DRP 之方位角 θ 與旋轉角 ϕ 。

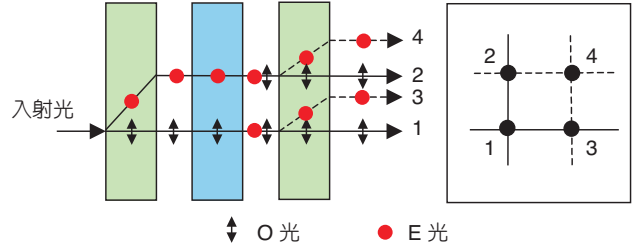


圖 13. 光束形成四分光點 (二片正交 DRP)。

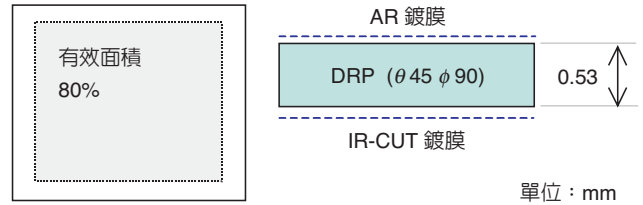


圖 14. 單片 45° DRP 設計。

四、光學低通濾波器的設計與分析

BLF 的設計主要在於晶體薄片數及厚度、方位角 θ 及旋轉角 ϕ 等值的決定。另外，AR 鍍膜及 IR-cut 的設置對 BLF 的濾波效果亦有影響。本文 OLPF 之設計採用 BLF 的方式，主要元件為 DRP、IR-cut 鍍膜或藍玻璃以及石英波片等，以下針對晶體薄片佈置、DRP 的方位角及鏡頭光圈 ($F/\#$ 數) 等參數對鏡頭系統之 MTF 的影響做詳細的分析。

1. DRP 的晶體薄片佈置與 MTF 之關係

單片 45° DRP 旋轉角為 0° 的設計 (圖 14)，由於沒有正交設計，且 $\phi = 0^\circ$ ，致使在 Y 軸上 MTF 並沒有調降，如圖 15，此種設計容易在 Y 軸方向有 Moiré 條紋生成。如果改用兩片旋轉角正交 DRP 設計 (圖 16)，則 MTF 同時於 X、Y 軸有調降功能，如此一來，BLF 不會因擺放位置的誤差，而在某一方向有較明顯的 Moiré 條紋。若進一步使用兩組旋轉角正交 DRP 設計 (圖 17)，將會使 Nyquist 頻率附近或較高空間頻率資訊濾除，但 BLF 之厚度會較前兩種設計為厚，且製程上亦較複雜。雖然使用多組正交之 DRP 組成之 BLF 較單片 DRP 者為優，但也降低系統整體的 MTF。

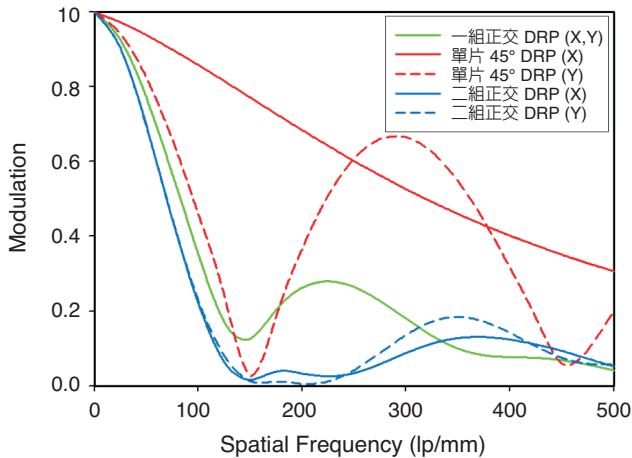


圖 15. 各式 BLF 設計之 MTF 值。

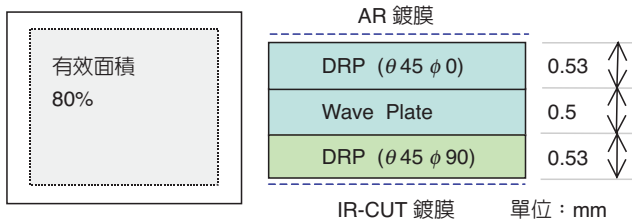


圖 16. 兩片旋轉角正交之 DRP 設計。

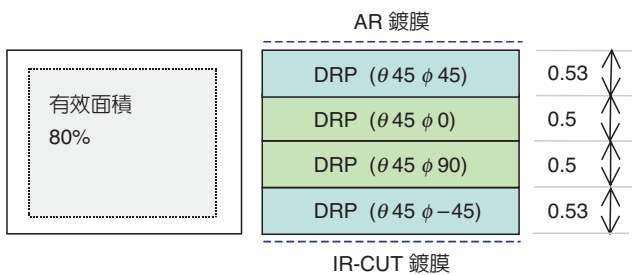


圖 17. 兩組旋轉角正交之 DRP 設計。

2. DRP 的方位角與 MTF 之關係

光線通過方位角 θ 之 DRP 時，若 DRP 厚度為 t (如圖 11)，則 O 光與 E 光在分光後之間距 d 可表示為：

$$d = t \tan \left[\theta - \tan^{-1} \left(\frac{n_o^2 \tan \theta}{n_e^2} \right) \right] \quad (8)$$

其中， n_o 與 n_e 為石英晶體 O 光與 E 光之折射係數。若將 (8) 式繪圖，以 θ 為橫軸， d/t 為縱軸，可得圖 18。

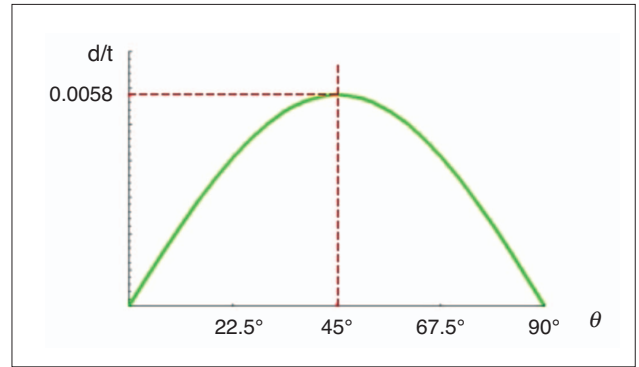


圖 18. DRP 之 d/t 與 θ 之關係。

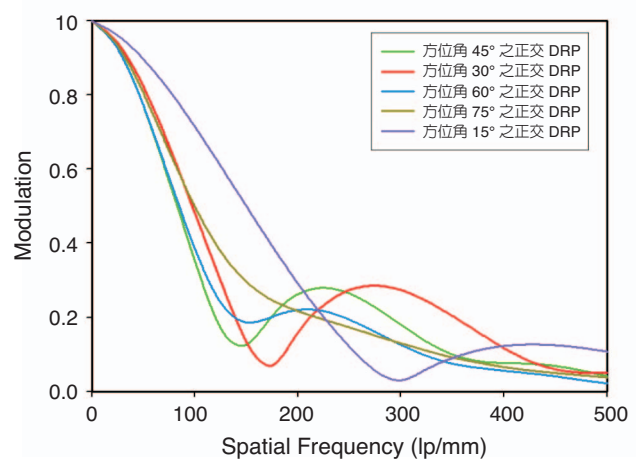


圖 19. 各式 DRP 方位角設計之 MTF 值。

由圖 18 可知， 45° 的 DRP 具有最大之 d/t 值 (約為 0.0058)，若取 CCD/CMOS 之畫素間距 p 為分光距離 d ，亦即 $d = p$ ，則 DRP 的厚度 t 與方位角 θ 可決定 Nyquist 頻率下之 MTF 值有極小值。

為求在最小的厚度 t 下有最大的分光間距 d ，實用上之 DRP 方位角設計通常取 45° ，但如果所設計出來之 DRP 厚度太薄，不利於研磨拋光，則才有可能改採其他較小的角度。觀察圖 19，超過 45° 的 DRP 較無法滿足 Nyquist 頻率下之 MTF 值有極小值之要求；小於 45° 的 DRP 雖然對 Moiré 條紋的抑制效果較好，但其在非 Nyquist 倍數頻率下之 MTF 值較低，且相同分光距離下，DRP 所需之厚度較大。

3. 鏡頭之 F/# 數與 MTF 之關係

以光學設計而言，鏡頭之 $F/\#$ 數對 BLF 並沒有影響，因為 BLF 之 MTF 值在 CCD/CMOS 的

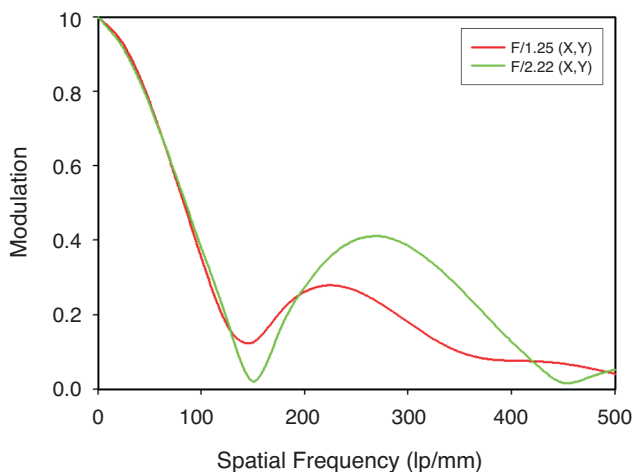


圖 20. 不同 $F/\#$ 鏡頭對相同 BLF 設計之 MTF。

Nyquist 倍數頻率下才有極小值產生，但由於 $F/\#$ 數較小時，邊緣光束並非以垂直方向入射 BLF，加上 BLF 具有一定的厚度，使得 Nyquist 頻率會和設計值有稍許差異，如圖 20， $F/2.22$ 與 $F/1.25$ 的鏡頭使用相同正交之 DRP，其 MTF 極小值並不一致，且相應的空間頻率略有差異。一般對於較小 $F/\#$ 數的鏡頭，可將波片或 BG39 薄片等對於 CCD/CMOS 的 Nyquist 頻率並不影響之薄片厚度降低，如此以來，相同的 DRP 設計可用於不同 $F/\#$ 數的鏡頭。

五、結論

雙折射式的光學低通濾波器 (BLF) 已普遍運用於 CCD/CMOS 等影像感測元件上，其 DRP 石英薄片設計不但可決定 BLF 對 Moiré 條紋的抑制結果，亦可影響整個 BLF 成本。本研究針對鏡頭之 $F/\#$ 數、DRP 之方位角及 BLF 佈置等做分析，可得以下結果：

1. 為了抑制 BLF 之 Moiré 條紋有方向性的生成，BLF 的設計至少應具有一組旋轉角正交之 DRP。當然，若使用兩組或以上旋轉角正交之 DRP，如 $(-45^\circ, 45^\circ)$ 及 $(0^\circ, 90^\circ)$ 兩組，其效果更好。
2. 相同 BLF 設計，使用於不同 $F/\#$ 數之鏡頭時，為保有相同的濾波效果，可減少 BLF 的厚度以

利使用於 $F/\#$ 數較小的鏡頭上。

3. BLF 中所使用之 DRP，可依製作方便及成本考量調整其方位角 (裁切角) θ ，但超過 45° 的 DRP 無法滿足 Nyquist 頻率下之 MTF 值有極小值之要求，故一般調整建議在 $30^\circ - 45^\circ$ 之間。

雖然 BLF 空間濾波設計重點都放在 DRP 的配置上，但整個 BLF 的品質良否應包含光束波長 IR-cut 的濾波效果，例如使用 BG39、BG40 等藍玻璃取代傳統之 IR-cut 鍍膜技術。當然，亦須考慮加入 BG39 或 BG40 等薄片後對系統 MTF 下降之影響。

參考文獻

1. K. Hayashi and M. Sugimoto, *Telev. Jpn.*, **20**, 303 (1965).
2. A. Nordbryhn, *Proc. SPIE*, **476**, 116 (1983).
3. O. Yoshida, S. Tagawa, and M. Achiba, *J. Inst. Telev. Eng. Jpn.*, **38**, 249 (1984).
4. R.D. Kell, *U.S. Patent 2733291* (1956).
5. R. E. Fischer and T.-G. Biljana, *Optical System Design*, McGraw-Hill, 388 (2001).

- 黃國政先生為國立台灣大學機械工程博士，現任國科會精密儀器發展中心工程師。
- 王必昌先生為國立成功大學航太工程博士，現任國科會精密儀器發展中心副研究員。
- 廖偉境先生為國立台灣大學機械工程碩士，現任國科會精密儀器發展中心助理研究員。
- Kuo-Cheng Huang received his Ph.D. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an engineer at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Bih-Chang Wang received his Ph.D. in aeronautics and astronautics engineering from National Cheng-Kung University. He is currently an associate researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.
- Liang-Ching Liao received his M.S. in mechanical engineering from National Taiwan University. He is currently an assistant researcher at Precision Instrument Development Center, National Science Council.