

第七章 設計案例

在這一章裡, 我們[針對二個設計案例作較詳細的說明, 一個是雷射共振腔設計, 另一個是中華衛星二號(ROCSAT-2)「紅色精靈」科學任務所用的光學鏡頭。設計時, 必須先界定設計目標。為了方便導引, 這裡的設計目標都是在光斑點大小(spot size)。

7-1 雷射共振腔設計 (Laser Cavity Design)

高斯光束試算表提供一個簡單互動模式設計平台來處理高斯光束。我們以一假想 Nd:YAG 雷射的共振腔設計作例子。整個任務是設計一個只有單橫模振盪的 YAG 棒 (YAG rod)。

YAG 棒是直徑 0.5mm, 長 5mm, 而共振腔包含兩個平面鏡及一個聚焦鏡, 其型號是 Melles Griot 01LQF005 如圖 7-1 所示。共振腔是一個近似半球幾何 (near hemispherical geometry)。真正的共振腔長度是要能夠讓 TEM_{00} 模(共振腔的本徵模 (eigenmode)是 TEM_{00})的光束寬度 (Spot size) 只有雷射棒直徑的 1/3。換言之, 我們的設計目標是在 YAG 末端(即面 2)的光束寬度大小為 0.5/3, 約為 0.16667mm。整個設計執行動作如下:

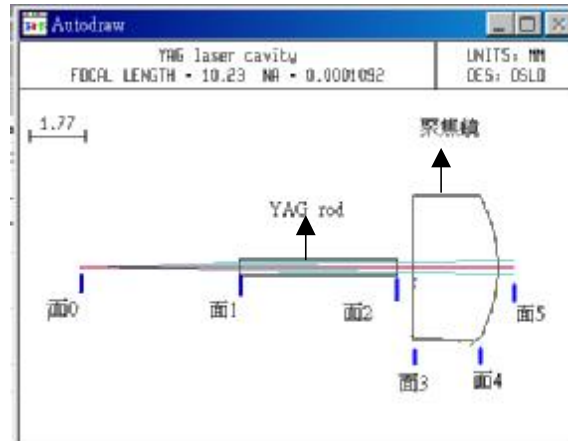


圖 7-1 Nd:YAG 雷射共振腔設計草樣圖

- 1、 進入系統「File>>New」令檔案名稱為「yagcavl.len」。接下來選擇鏡片型錄(catalog lens), 按「OK」免去對話框。當型錄資料庫視窗出現時, 用 MG_POS 型錄, 輸入 01LQF005, 如圖 7-2 所示。然後按下「OK」進入面數據試算表。

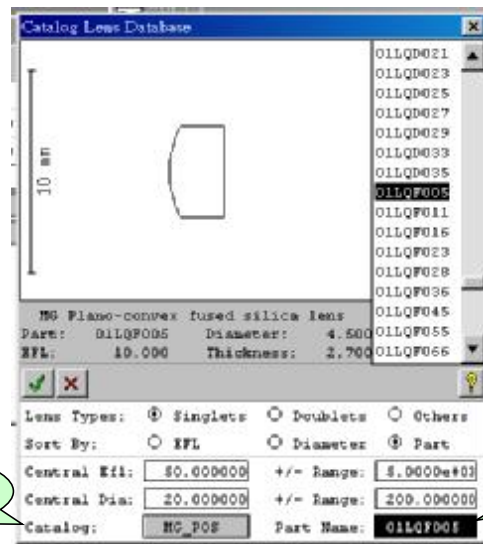
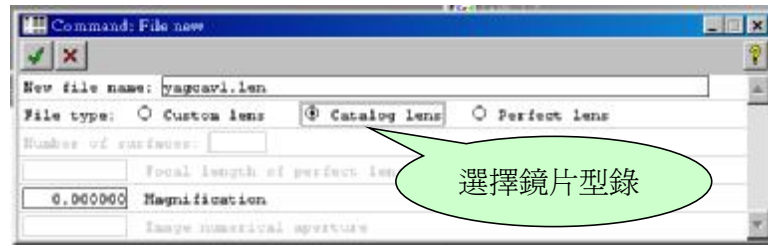
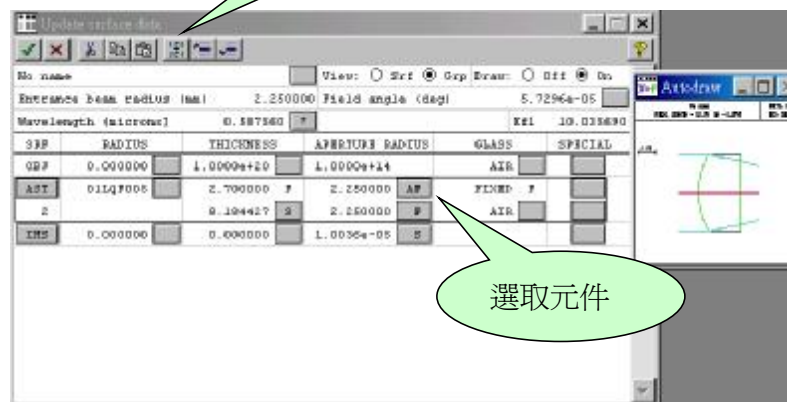


圖 7-2 型錄資料庫(catalog lens)視窗

- 2、透鏡一開始是放在系統後部。要反轉到前面, 按下「列鍵 1」(Row button 1) 去選擇元件, 然後使用在試算表工具列的反轉圖樣進入透鏡檔案, 見圖 7-3。



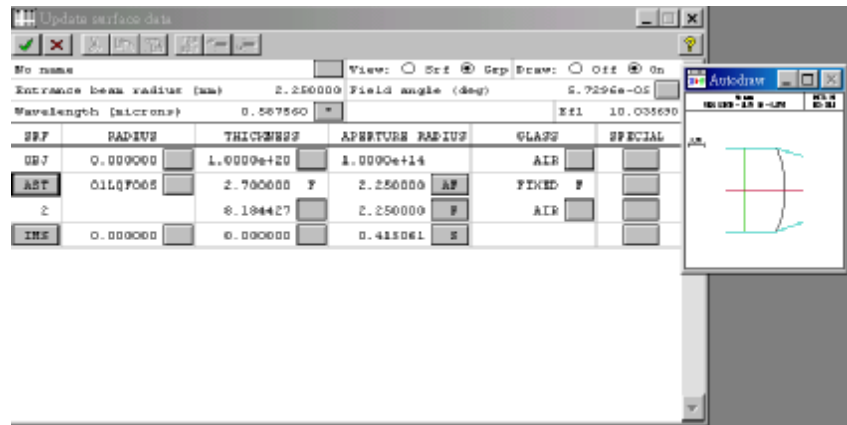


圖 7-3 反轉前後數據試算表

- 一旦進入, 在透鏡前輸入兩個鏡面作為 YAG 棒 (一個快速作法是按住鏡面 1 列鍵, 然後壓「SHIFT+SPACE BAR」兩次) 然後輸入棒的數據: 厚度 5.0, 孔徑 0.25。設鏡面 2 的厚度為 0.5 而入射光束半徑為 0.1。接下來是選擇玻璃, 因為 Nd:YAG 雷射的波長是 $1.064\mu\text{m}$, 所以首先確定波長是 $1.064\mu\text{m}$ (按下波長隔壁的選擇鈕去選擇)。然後在玻璃項 (glass field) 按下選項鍵 (options button), 從自動拉下選單 (pop-up menu) 中選擇「Direct», 並輸入名字「Nd-YAG», 然後再輸入折射率值 1.82, 步驟如圖 7-4。



圖 7-4 選擇鏡面 1 之玻璃種類方法

- 設物距 (object distance) 為 5mm, 而像距 (image distance) TH[4] 為 0.5mm, 物面 (object surface) 與像面 (image surface) 是鏡子, 但在此我們不需要設定它們為反射鏡面 (reflecting surface)。這是因為我們事實上是希望在這點上是高斯波前且其曲率半徑是固定下來。同樣地, 物空間的數值孔徑 (object numerical aperture) 或入射光束半徑, 也不必在這時設定, 因為它也是由高斯光束試算表 (Gaussian Spreadsheet) 來決定。當所有的數據都

(2001 年第一版; 僅供教學與研究參考, 請勿作商業用途。)

編者: 許阿娟、何承舫、張國輝、陳志隆

輸入後, 其面數據試算表應該出現如圖 7-5 所示:

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	5.000000	5.0000e-06	AIR	
AST	0.000000	5.000000	0.250000	ND-YAG	
2	0.000000	0.500000	0.250000	AIR	
3	01LQF005	2.700000	2.250000	FIXED	F
4		0.500000	2.250000	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	0.202322	S	

圖 7-5 鏡面厚度、孔徑等設定完成後之面數據試算表。

接下來的工作是去決定共振腔的 TEM_{00} 。這可以用下列指令作到「Calculate>>Gaussian Beam>>Interactive ABCD Analysis」這個方法是設在物面的波前之曲率半徑為鏡子的曲率半徑, 然後調整在物面上的光斑大小(稱為變動區(variable cell)), 直到在像面的波前之曲率半徑(稱為監視區(watch cell))等於另一面鏡子的曲率半徑。數據輸入見圖 7-6。在任何穩定曲面鏡共振腔(curved mirror cavity)中任何波前都可以用一個相同曲率半徑的鏡面來代替, 而不會改變其橫模結構。因為一個高斯光束其波前永遠是球面狀。

Figure 7-6 shows the 'Trace a Gaussian beam' dialog box. Annotations highlight the following values and actions:

- 變動值 (Variable Value):** Input 0.0197 for Spot size (w) and Waist ss (w0).
- 監視值 (Watch Value):** Input 0.0197 for Waist dist (z).
- 再按下 (Press Again):** The 'Print beam data in text window' button.

Solution I		Solution II	
Spot size (w) *	0.019700	0.019700	0.174917
Waist ss (w0) *	0.019700	0.019700	0.174917
Waist dist (z)	0.000000	0.000000	0.032696
Wvf radius (R)	0.000000	0.000000	2.4960e+05
Diverg. (rad)	0.017190	0.017190	0.001936
Rayleigh range	1.145884	1.145884	90.338473

圖 7-6 設定高斯光束(Gaussian beam)

- 打開數據試算表之後, 因為鏡面是平的, 所以在物面波前的曲率半徑欄輸入 0.0, 並輸入 0.1 當作光斑初始值同時在光束腰處(Waist s.s.)輸入 0.1。然後在改變變動區的值時, 觀察在監視區的最後曲率半徑。表 7-1 顯示所

輸入的連續的值:

Variable Cell	Watch Cell
0.1	11.012173
0.01	-902.043228
0.02	1.2916e04
0.015	-1.2744e03
0.0175	-2.2587e03
0.019	-6.4480e03
0.0195	-2.3166e04
0.0197	2.4960e05

表 7-1 變動值與監視值之關係表

在此時, 顯示值已經夠靠近我們所需的 TEM_{00} 狀態。接下來, 按下在文字視窗上的「Print beam data」鍵。如圖 7-7 所示, 我們可以看到面 2 的光斑

YAG 末端光束大小

SRF	SPOT SIZE	DIVERGENCE	WAVELENGTH	WAVELENGTH	WAVELENGTH	WAVELENGTH	WAVELENGTH	WAVELENGTH	WAVELENGTH
0	0.019700	0.009446	0.019700	--	--	--	--	--	1.145884
1	0.088188	0.009446	0.019700	-9.100000	-5.262610	-9.577950	2.085509		
2	0.134640	0.017190	0.019700	-7.747253	-14.408464	-7.916739	1.145884		
3	0.143149	0.011859	0.019700	-11.955473	-8.406463	-12.186270	1.661109		
4	0.174920	0.001936	0.174917	0.532696	-14.843750	1.5321e+04	90.338473		
5	0.174917	0.001936	0.174917	0.032696	2.4960e+05	2.4960e+05	90.338473		

圖 7-7 各鏡面高斯光束之數據

大小指的是在 YAG 棒末端的光斑大小, 其值為 0.1346mm, 而設計目標是 $0.5/3=0.16667\text{mm}$ 。顯然目前結果不符合設計目標。要增加光斑值的方法是把鏡面移離開些 (亦即移入穩定的邊緣)。改變物距為 5.1mm、物面上的光斑大小是 0.013mm, 則棒上光斑變成 0.205。如果設物距為 5.07, 則物面上光斑大小為 0.016, 而在 YAG 棒末端的光斑大小是 0.1662, 非常靠近設計目標。最後一步可以用腰距 (waist distance) 來移動鏡面。一旦決定了正確的共振腔距, 我們可以利用數據試算表上的「Plot beam spot sign」鍵來畫出整個光束的形狀, 結果參見圖 7-8。這個動作產生光束形狀是失真的, 原因是 z 尺度是整個系統的長度而 y 尺度是最大光斑大小。事實上, 它是真正近軸光束的繪圖, 在這個尺度下, 鏡面看起來都是直線。

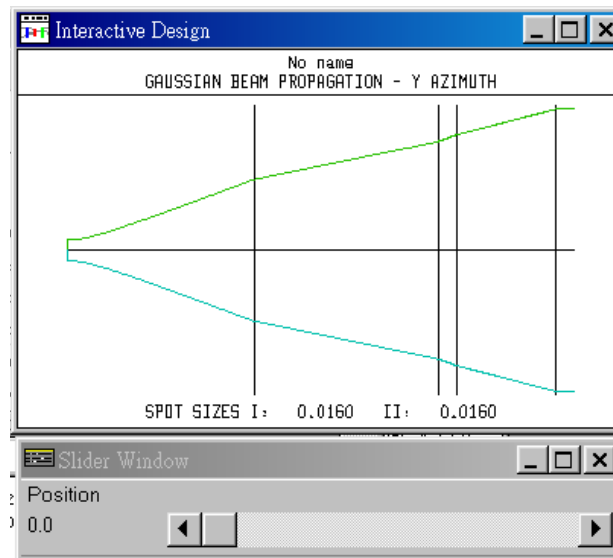


圖 7-8 光束形狀

把光束數據輸出到文字視窗上, 數據將如圖 7-9 所示:

YAG 末端光束大小

SRF	SPOT SIZE	DIFFERENCE	WAIST SIZE	WAIST DIST	INC RADIUS	RFR RADIUS	RAYLEIGH RC
0	0.016000	0.021164	0.016000	--	--	--	0.755872
1	0.108506	0.011630	0.016000	-9.227400	-5.182691	-9.432497	1.375687
2	0.166244	0.021164	0.016000	-7.817253	-14.360419	-7.890340	0.755872
3	0.176782	0.014601	0.016000	-12.056947	-8.385946	-12.156528	1.095735
4	0.216075	0.001567	0.216073	0.559750	-14.838308	3.3950e+04	137.851219
5	0.216073	0.001567	0.216073	0.059750	3.1804e+05	3.1804e+05	137.851219

圖 7-9 各鏡面光束大小數據

我們可以看到現在在 YAG 末端其光束大小為 0.166244, 很靠近我們原先設計目標。

7-2 中華衛星二號「紅色精靈」科學酬載 CCD 影像儀鏡頭

在這一節裡我們以中華衛星二號「紅色精靈」科學酬載 CCD 影像儀鏡頭之設計為另一個設計案例。整個鏡頭是個雙高斯鏡組(double Gauss), 外形參見圖 7-10, 7-11 及圖 7-12。由於鏡頭數超過 OSLO LT 可以使用的限制, 這個設計必須在 OSLO SIX 上才可以執行。

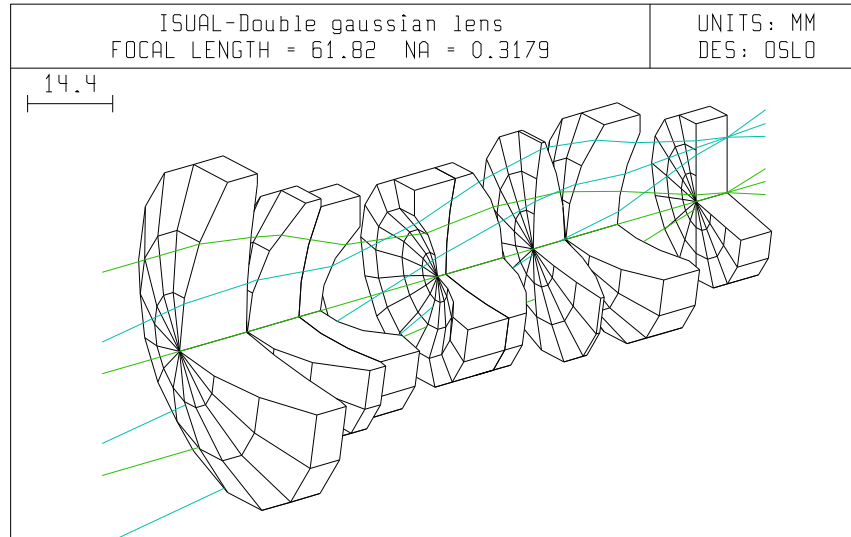


圖 7-10 三維鏡組結構圖

這個雙高斯鏡組是被使用在太空計畫的紅色精靈科學酬載中, 它主要作用為觀測位於遠處的向上高空閃電 (red sprite)。在設計上必須考慮到其外觀幾何 (鏡面大小、鏡組總長等) 是否與酬載衛星的機械結構互相匹配、高空向上閃電波長範圍、CCD pixel 對於成像品質的要求 (80% 的能量必須集中在直徑 40-micron 內) 以及太空中嚴苛的環境 (-20~40°C, 昇空時激烈的重力變化以及輻射對於鏡片的影響) 等等。這個鏡組包含 7 個鏡片以及 1 片的 fused silica window。另外一些基本要求以及整體的機械結構如圖 7-11 所示:

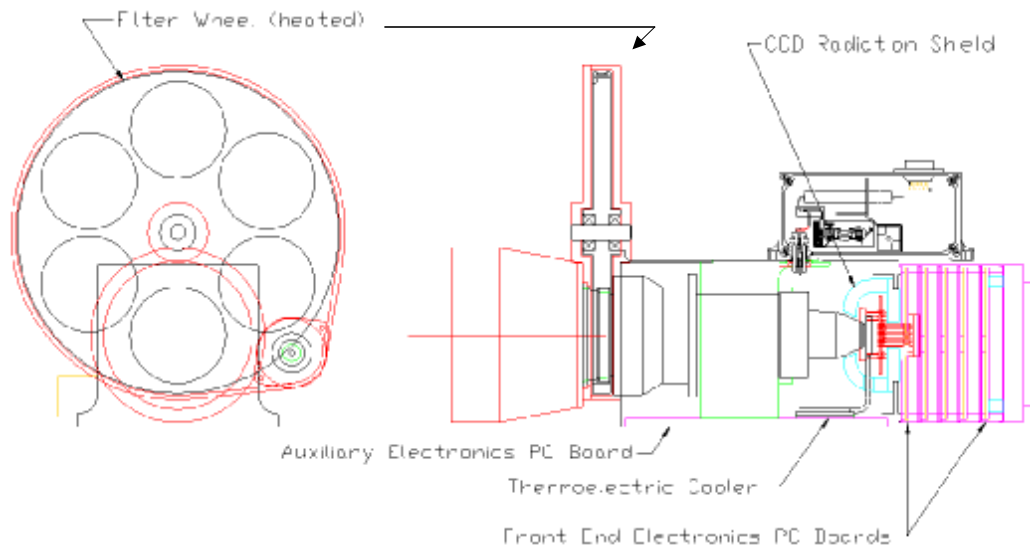


圖 7-11 CCD imager 大體外觀結構，內含一個有 6 個不同濾光片的轉輪。觀測時會先選定一個濾光片。

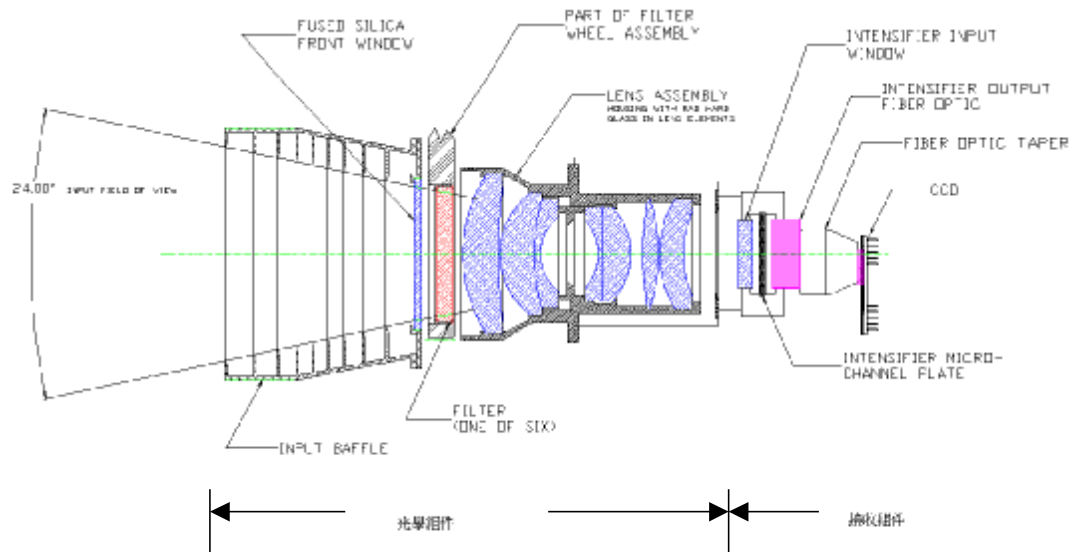


圖 7-12 內部鏡組配置與 CCD 位置

適用波長	全視角	焦距長	焦數 (f-number)	成像半徑
420nm-762nm	20±10degree	62.5mm±12.5mm	F/1.5 or faster	25mm

表 7-2 對透鏡組的基本要求

而我們在這個例子裡可以藉著輸入與分析, 更加的熟悉 OSLO 的界面與一般常用的影像分析技巧:

在這裡我們基本的設計目標是每一個成像點, 必須至少有 80% 的能量分佈是在 $40\mu\text{m}$ 的直徑範圍內。

1. 進入 OSLO 在主選單之中選擇 File > > New, 來開啓一個新的檔案, 接著在選單輸入新的檔名為 Dgauss.len., 選擇 custom lens, 並且輸入表面數 (number of surface) 為 15。最後按下 OK 鍵, 回到主視窗。
2. 現在, 我們必須要設定新的材質。因為在這一個案例中所使用到的玻璃材質「LAK9G15」和「SF8G07」是 OSLO 資料庫中所沒有的, 所以我們必須要自行來定義這些材質。首先在主選單上選擇 Option >> Up Glass Catalog, 在選單內選擇 Add glass to catalog, 並且分別輸入材質名稱「LAK9G15」和「SF8G07」以及依照圖 7-13 輸入選單中的個項數值, 參見圖 7-13 及圖 7-14。

所要設定之材質

折射係數之各項參數

熱膨脹係數

Coefficient	Parameter	Value
2.806179	Coefficient A0 or b1	Index 1
-0.013902	Coefficient A1 or b2	Index 2
0.018566	Coefficient A2 or b3	Index 3
0.000386	Coefficient A3 or c1	wavelength 1
-8.9860e-06	Coefficient A4 or c2	wavelength 2
1.0564e-06	Coefficient A5 or c3	wavelength 3

圖 7-13 LAK9G15 玻璃條件之建立

所要設定之材質

折射係數之各項參數

熱膨脹係數

Coefficient	Parameter	Value
2.775742	Coefficient A0 or b1	Index 1
-0.008916	Coefficient A1 or b2	Index 2
0.030721	Coefficient A2 or b3	Index 3
0.001273	Coefficient A3 or c1	wavelength 1
-2.8416e-03	Coefficient A4 or c2	wavelength 2
8.2695e-06	Coefficient A5 or c3	wavelength 3

圖 7-14 SF8G07 玻璃條件之建立

- 3 在輸入完成後, 按下 OK 鍵。回到主視窗, 打開面數據試算表, 開始輸入相關的數據。我們先設定此鏡組的視角範圍, 根據實際上的需求, 我們是要觀察遠處物體, 所以並不須要太大的視角(field angle), 10 度的視角(field angle)已經足夠。因此在「Field angle」的欄位內輸入 10。
- 4 再來要決定的是此鏡組的適用波長, 這是依據於我們所要觀測的物體來選擇的。這個鏡組在設計上要利用到濾光片 (filter) 來觀測六個不同的波段, 所以必須小心的設定其波長的適用範圍。按下波長欄位右側之星號, 依照下圖在試算表中依序輸入其指定的波長以及權重 (weight)。根據科學觀測需求 6 個不同波段如圖 7-15 所示。

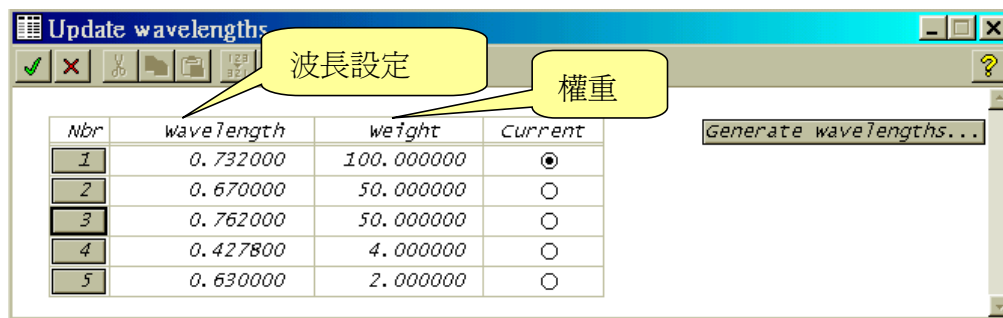


圖 7-15 波長極權重之設定

- 5 現在我們可以正式地來輸入此鏡組的面數據以及材質。其面數據如圖 7-16 所示。在輸入面數據或是進行設計的過程之中, 我們通常會開啓「Auto draw」(位於試算表的右上方), 以便瞭解目前鏡組的結構, 結果參見圖 7-17。
在輸入時, 我們不難發現此鏡組有一個近似左右對稱的外觀 (以孔徑闌(aperture stop), 即第 6 面, 為對稱中心) 這是雙高斯鏡組 (Double Gauss lens) 的特性, 利用左右對稱的鏡組來消除畸變 (distortion), 而其中由不同材質所組成的雙合透鏡 (doublet) 則是提供了修正色像差的作用。

Update surface data

ISUAL-Double gaussian lens view: ☐ Srf ☒ Grp Draw: ☐ Obj ☒ Srf

Entrance beam radius (mm) 19.650058 Field angle (deg) 10.000000

wavelength (microns) 0.732000 Cfg 1 of 1 Ef1 61.819217

Srf	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.7633e+19	AIR	
1	52.720000	13.000000	30.000000	LAK9G15	C
2	186.300000	0.200000	28.000000	AIR	
3	26.250000	10.000000	21.600000	LAK9G15	P
4	48.120000	4.200000	20.000000	SF8G07	C
5	16.540000	11.900000	14.000000	AIR	
AST	0.000000	10.800000	10.370000	AIR	A
7	-21.234000	1.700000	13.000000	SF8G07	P
8	91.420000	11.100000	18.000000	LAK9G15	P
9	-30.530000	5.806000	18.000000	AIR	
10	126.700000	6.200000	20.000000	LAK9G15	P
11	-53.270000	0.200000	20.000000	AIR	
12	30.660000	10.000000	20.000000	LAK9G15	P
13	33.070000	15.285000	16.500000	AIR	
14	0.000000	6.000000	15.000000	SILICA	C
15	0.000000	0.000000	15.000000	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	10.700000		

圖 7-16 鏡組的面數據

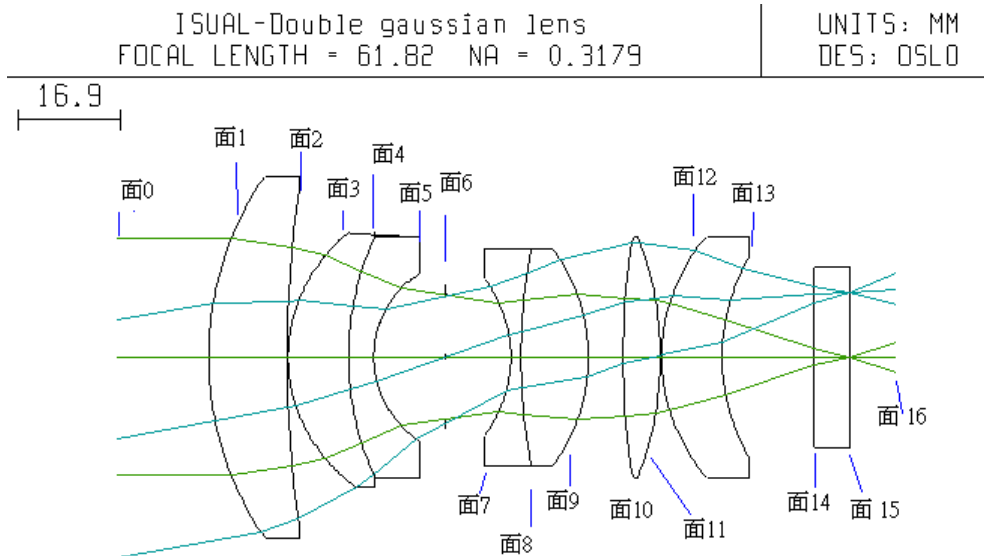


圖 7-17 二維的鏡組剖面圖

6. 在完成整個鏡組的輸入之後, 我們便可以使用 OSLO 中的分析工具如鏡組的基本幾何外觀、近軸參數等等來檢視此鏡組的成像品質與工作效能是否符合設計需求。作法是: 我們可以在主選單的工具列按下 Show 來加以選擇。以近軸參

數為例:

Show>>Paraxial Setup, 其近軸參數則會出現在 Text Window 中, 如圖 7-18 所示:

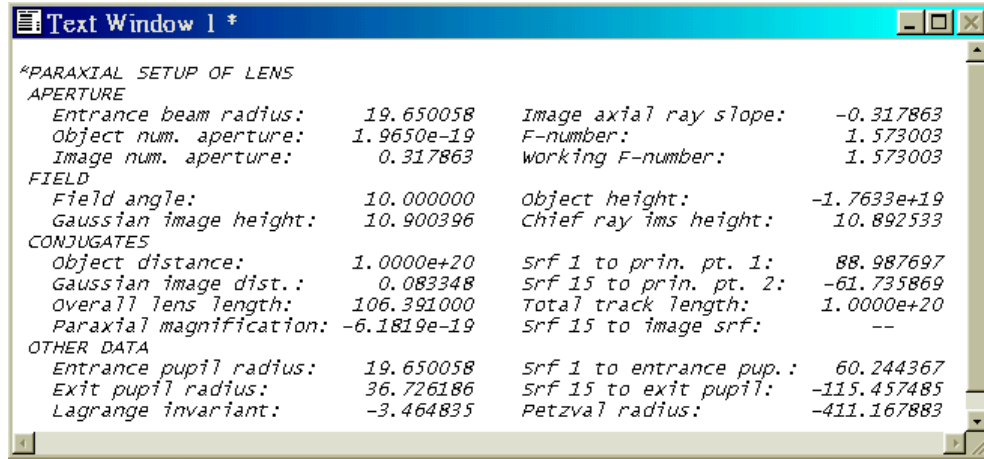


圖 7-18 近軸參數

因為在這個例子中, 由此鏡組接收的影像是成像在 CCD 之上, 所以其成像的斑點大小與能量分佈必須是 CCD 映像點 (pixels) 可以接受的範圍。而這裡的設計需求是每一個成像點 (spot size) 必須最少有 80% 的能量是分佈在 40-micron 的直徑裡。那現在我們可以從鏡組的斑點圖 (spot diagram) 與幾何能量分佈 (geometrical energy distribution) 來探討此鏡組的成像品質。當然, 最簡單的方式是按 Shift + F7 (或是工具列上的按鍵) 直接開啓「斑點圖分析報表」(Spot Diagram analysis) 來觀看各個視角的斑點圖與幾何能量分佈。如圖 7-19。

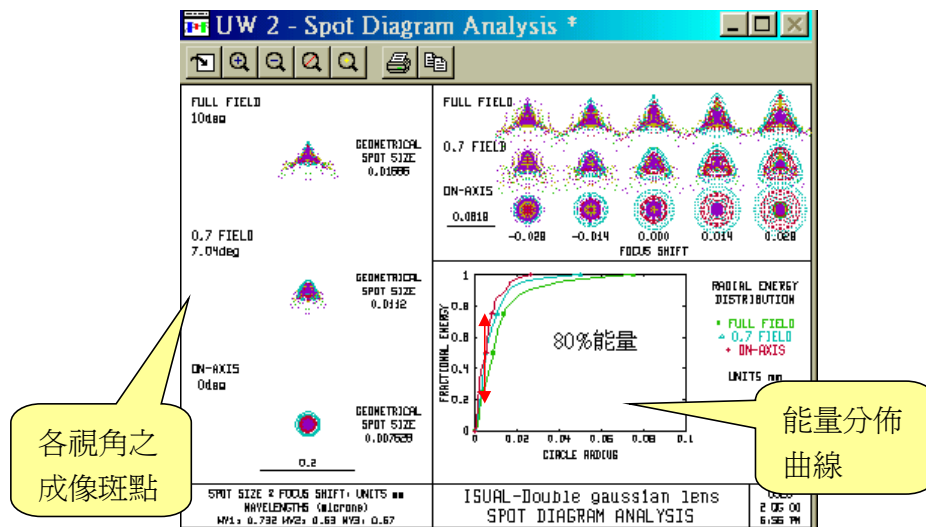


圖 7-19 斑點圖分析報表

從此圖看出各個視角(field angle)的幾何圖形與大小, 即使是在像散(astigmatism)與畸變(distortion)最嚴重的最大視角 10 度也大略集中於 0.2mm 的直徑範圍之內。至於位於各視角的幾何能量分佈也是符合於此鏡組的設計限制(粗略來看, 最大視角時 80% 的能量分佈在 0.02mm 的半徑(見圖 7-19 箭號所指位置, 相當於 40-micron 之內, 所以再最大視角時此徑組的影像品質是可以被接受的。而在比較小的視角當然也是可以接受的)。接下來則我們要介紹更詳細的分析:

- 我們先看光軸上的斑點圖, 在主選單上選擇 Calculate>>Display Spot Diagram, 按下試算表的 OK 鍵, 則會出現包含具有光斑幾何大小與繞射極限的斑點輸出圖形, 如圖 7-20 所示。由於光斑幾何大小是 0.007628 而繞射極限是 0.001403, 差了 7 倍, 表示目前我們不必擔心物理光學諸如干涉的影響, OSLO 目前所用的幾何式光束覓跡分析結果是可以用的。

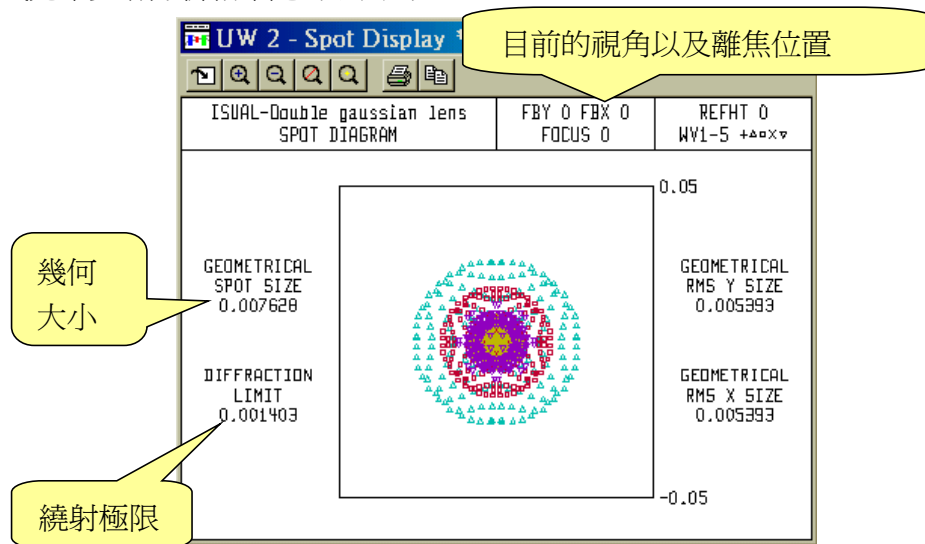


圖 7-20 斑點圖輸出圖形

- 至於離軸視角的斑點圖, 則必須重新設定斑點圖的輸出視角。我們可以在主選單上選擇 User>>Check Vignetting, 此時在主視窗左上方的指令(command)欄位會要求我們輸入視角(Enter field point), 在這裡的視角是指比例視角, 以系統之最大視角為 1(我們先前設定視角為 10 度, 參見圖 7-16), 以下類推。現在我們以最大視角為例子, 所以視角輸入 1。輸入後, 在 Text Window 會傳達一個已更改輸出視角的訊息。另外我們也可以在主選單中 Calculate>> Setup Object Point 的試算表中將 FBY 的值更改為 1, 以達到相同的效果, 見圖 7-21。接下來, 遵循第 7 點的步驟開啓斑點圖, 結果見圖 7-22。

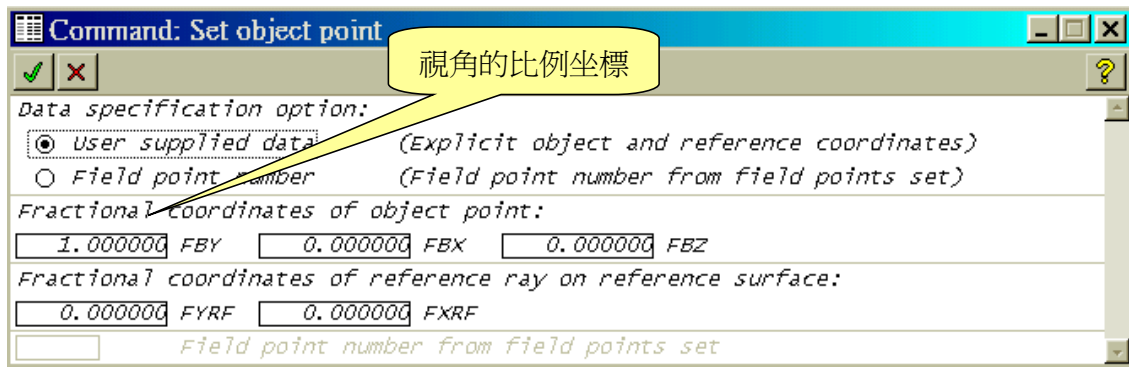


圖 7-21 物點設定

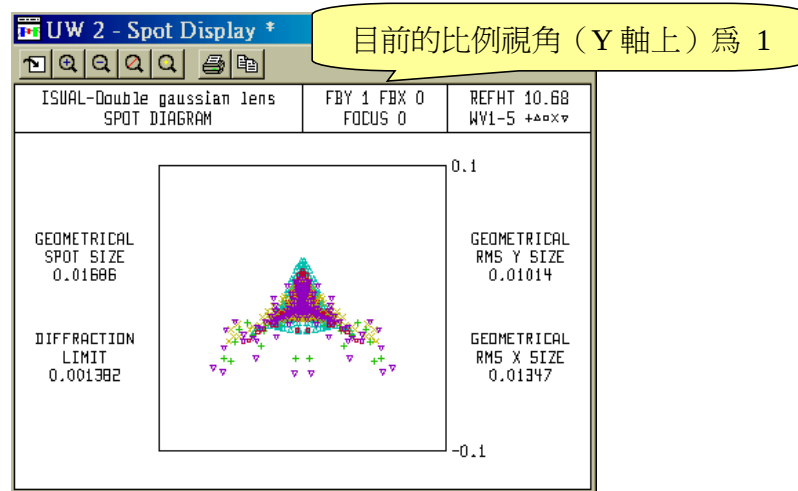


圖 7-22 離軸斑點圖

9. 同樣地, 我們也可以更仔細的檢查成像斑點的幾何能量分佈。在主選單上選擇 Calculate>>Energy Distribution>>Geometrical, 開啓其試算表。在此試算表中, 我們可以選擇畫出其能量的分佈 (plot radial energy distribution) 或是詳細的參數 (print radial energy distribution) 來互相對照, 見圖 7-23 及圖 7-24。因為先前的設定, 這個分析是位於最大比例視角 1。

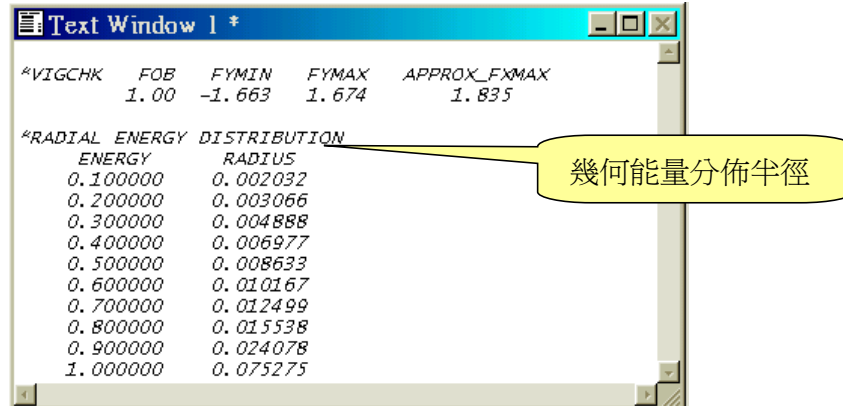


圖 7-23 能量分佈數據

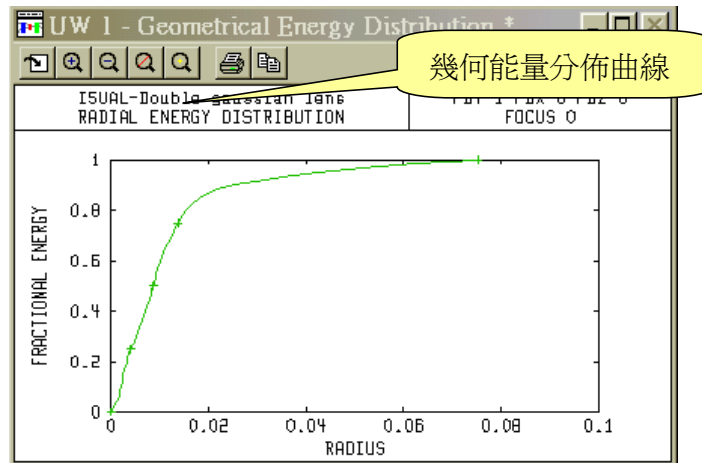


圖 7-24 能量分佈曲線

10. 在這裡我們就可以很清楚的知道能量的分佈情形,現在是最大視角 10 度,其成像斑點 80%的能量集中於半徑 0.015538mm (相當於直徑 31-micron) 的範圍內,因此我們可以確定這個鏡組是符合設計標準的。至於其他的視角的能量的分佈則可以利用第 8.點步驟來更改輸出圖形 / 數據的視角。
11. 接下來還有一些分析是值得我們去注意的。因為此鏡組必須適用於波長範圍 0.42-0.76 μm 之間(見表 7-2),而就我們所知不同的波長會有不同的成像點。所以當鏡組並非針對單一波長設計時,就必須考慮波長對成像或是焦點位移的影響。我們可以在主選單下選 User>>General Analysis>>Chromatic Focal Shift 來確定焦點位移,結果見圖 7-25。

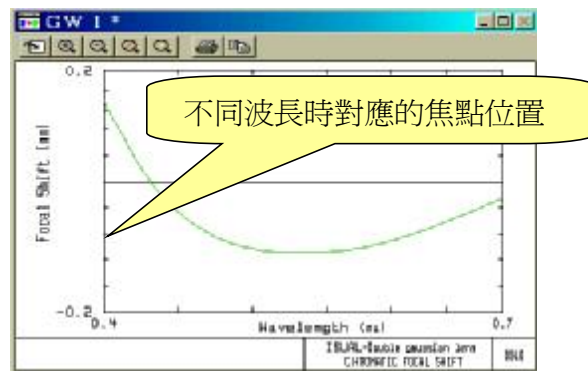


圖 7-25 焦點位移

12. 另外像是 MTF 成像品質的分析, 只要按下 shift + F5 就可以開啓, 結果參見圖 7-26。

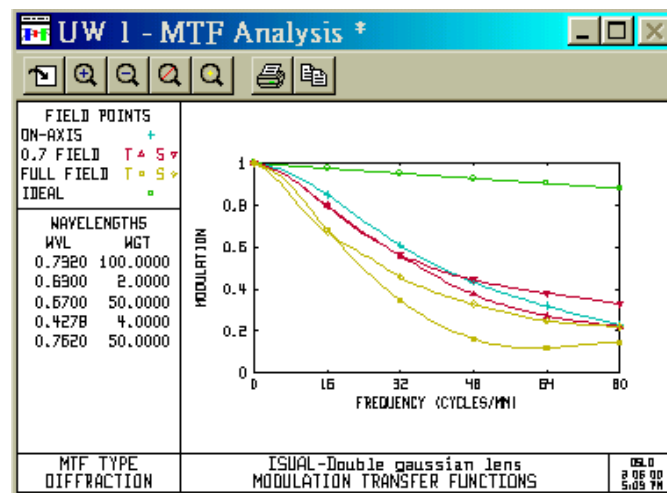


圖 7-26 MTF 分析結果

如果更進一步的想要改變分析時的最大空間頻率 (maximum frequency) 或是計算點數則可以利用 Calculate>>Report Graphics>>MTF Analysis 直接在「指令欄」內更改, 下圖 7-27 是將最大空間頻率更改為 50 的例子。

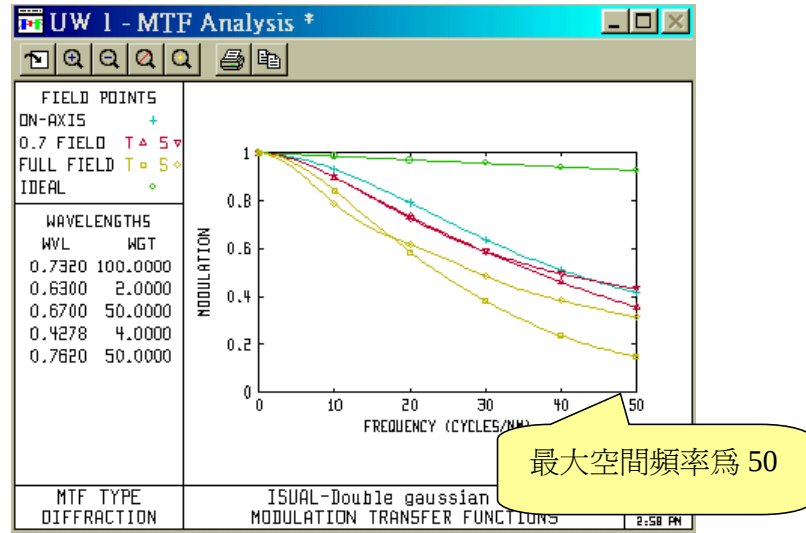


圖 7-27 最大空間頻率為 50 cycles/mm 所作 MTF 分佈

如果要得到數值上的分析則在 Calculate>>Optical Transfer Function 的試算表中點選「print function」以及輸入想要的空間頻率, 確定後即可在 Text window 中輸出, 見圖 7-28 及圖 7-29。

The figure shows a dialog box titled "Command: Calculate optical transfer function". It contains various options for calculating the optical transfer function. A yellow callout box points to the "Maximum frequency in lines/mm" field, which is set to 50, with the text "分析時最大的空間頻率".

Type of transfer function: ☒ Through-frequency ☐ Through-focus
 Chromatic option: ☐ Monochromatic ☒ Polychromatic
 Wavelength number:
 Calculation type: ☒ Print function ☐ Plot function
 Scan direction: ☒ Meridional ☐ Sagittal
 0.000000 Focus shift
 50 Maximum frequency in lines/mm
 0.000000 Frequency increment
 Through-focus spatial frequency
 Maximum focus shift
 Focus shift increment
 Points used to compute curve
 Number of focus positions used to compute curve
 Plot diffraction limit: ☐ Yes ☐ No

圖 7-28 更改 MTF 設定

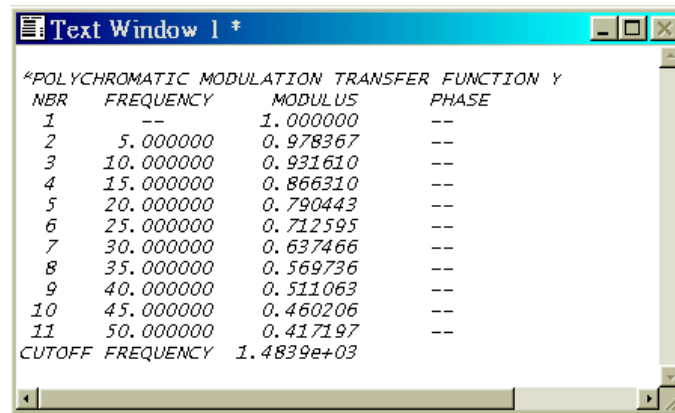


圖 7-29 MTF 的數值輸出

13. 最後, 還有像是球差(spherical aberration)、色像差(chromatic aberration)、畸變(distortion)等分析除了可以按 shift + F3 觀看之外, 我們也可以進入 Calculate>>Ray Analysis 的試算表中針對情況的不同, 指定各別分析(見圖 7-30), 以色像差為例, 點選「Lateral color」再決定橫軸大小即可(不輸入時 OSLO 會自動選擇), 結果見圖 7-31。

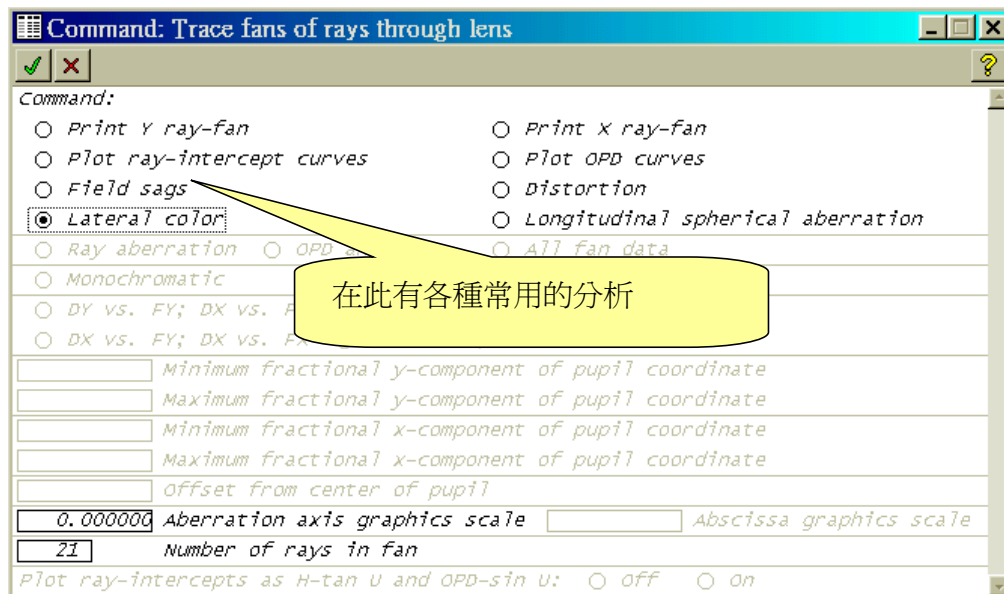


圖 7-30 常用分析選項

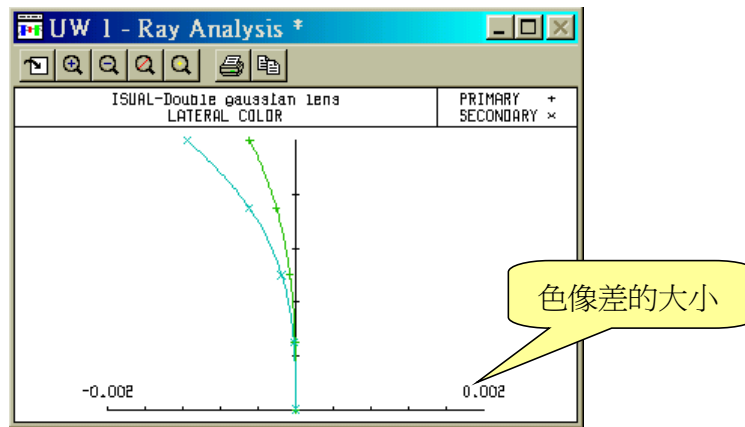


圖 7-31 色像差分析結果

參考文獻

1. 有關 TEM_{00} 的資料, 請參考 A.Yariv, "Optical Electronics in Modern Communication", (Oxford, New York, 1997) 或 J.D.Jackson, "Classical Electrodynamics", (John Willey & Sons, New York, 1999)。

習題

(7-1) 承習題 5-2, 刪除鏡面 3 及鏡面 4, 改成由透鏡目錄(hint: 點選「Edit>>Insert Catalog lens」)中插入「MG_POS」, 編號為「01LAL013」的雙透鏡(doublet), 並將場角更改為 10° , 並找出最佳的焦點位置來當作鏡面 5 的厚度(hint: 利用「Calculate>>Spot size analysis」的功能)。請觀察其斑點圖(場角 0° 及 10°)、光線分析報告圖及點擴散函數圖、

(7-2) 承習題 5-3, 將鏡面 3 與鏡面 5 的材質各改成 7.2 節中所提到之材質「LAK9G15」及「SF8G07」(hint: 可以直接使用「Glass」的精靈夾格中的「Catalog」選項), 並將系統更改為非聚焦模式(afocal mode)(hint: 按「F6」進入試算表作修改), 請將此系統的光線分析圖及斑點圖與之前系統的作比較。