

國立通大學

光電工程研究所

碩士論文

繞射/折射複合透鏡最佳  
單元組件研究



Study on optimum units of  
diffractive/refractive hybrid lens

研究生：李廷彥

指導教授：陸懋宏 教授

中華民國九十四年六月

繞射/折射複合透鏡最佳單元組件研究  
Study on optimum units of  
diffractive/refractive hybrid lens

研究生：李廷彥

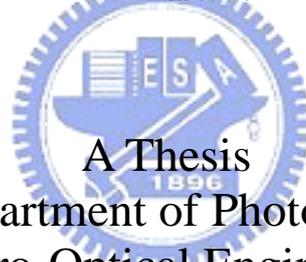
Student : Ting-Yen Lee

指導教授：陸懋宏

Advisor : Rrof. Mao-Hong Lu

國立交通大學光電工程研究所

碩士論文



A Thesis

Submitted to Department of Photonics & Institute of  
Electro-Optical Engineering  
College of Electrical Engineering and Computer Science  
National Chiao Tung University  
In Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master  
in  
Electro-Optical Engineering  
June 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年六月

# 繞射/折射複合透鏡最佳 單元組件研究

研究生:李廷彥

指導教授:陸懋宏

國立交通大學 光電工程研究所

## 摘要

在本論文中，研究了繞射/折射複合透鏡的最佳單元組件，並將此研究的結果應用到十倍光學變焦鏡頭。

繞射元件具有材質輕，容易複製及符合經濟效益的特點，它也具有一般折射透鏡的成像功能。結合繞射元件及折射元件的複合型透鏡，可以用來消除更多的像差，所以採用複合透鏡，可以減少系統所需的片數，使系統重量減輕。

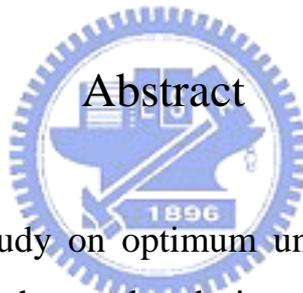
本論文即利用了光學軟體對單片式和雙片式的複合透鏡進行追跡，分析其光學特性，並建立了最佳化的組合單元。再利用所建立的複合元件應用到十倍光學變焦的鏡頭設計上，來觀察此最佳組合單元的結果實際應用到光學系統上的情形。

# Study on optimum units of diffractive/refractive hybrid lens

Student : Ting-Yen Lee    Advisor : Prof. Mao-Hong Lu

Institute of Electro-Optical Engineering

National Chiao-Tung University



## Abstract

In this thesis, we study on optimum units of diffractive/refractive hybrid lens and ,based on the results, design a 10X zoom lens which can be used in camera system.

The diffractive lens is characteristic of thinness, lightness and cost effective. The diffractive lens has the same imaging function as refractive lens. The hybrid lens which consists of diffractive element and refractive element can eliminate more aberrations, and will not increase the volume and weight.

We simulate and analysis the singlet and doublet of hybrid lenses. From the simulated results, we find optimum units of the hybrid lenses. Finally, based on the optimum units, we design a 10X zoom lens.

## 誌謝

兩年前，在經過大學的苦讀後，踏入了這個憧憬許久的校園。回想這兩年在交大接受的教育，不僅讓我學習到許多實用的知識，如何獨立思考和研究，更增廣了我的視野。

本篇論文的完成，要感謝許多的人。首先要感謝我的指導教授陸懋宏老師，感謝老師平時的教誨以及實驗和論文寫作上的指導，讓我能夠一步一腳印的完成本篇論文。感謝徐得銘學長在光學知識和軟體的使用上給了我許多實用的建議和指導。感謝陳建丞學長在課業上以及生活中給了我許多的幫助。另外實驗室施至柔學長、呂怡瑱學姊、陳慶勳學長、馮志華學長、盧俊瑋同學以及戴銘成同學，有了你們的幫忙，讓我可以順利的完成學業，也讓我在實驗室感受到互相幫助的重要。

感謝在中央物理的同學及學長姐，幫助我考上了交大，也帶給我大學和碩士生涯中許多的歡笑。液晶實驗室的向瑞傑、小伍和雷射診測實驗室的同學，也要謝謝你們時常陪伴我一起打球聊天，分擔我的喜怒哀樂。

還要感謝我的女朋友湘宜，在新竹的兩年，因為有妳的陪伴讓我的生命增添許多快樂及甜蜜的回憶。最後要感謝我的家人，感謝你們在背後的支持，讓我能夠安心無虞的完成學業。

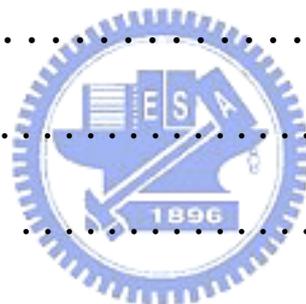
2005年7月 新竹交大

# 目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
圖目錄	vii
表目錄	x

第一章 緒論	1
第二章 繞射/折射複合元件基本理論	3
2.1 斯維特模型(Sweatt)	3
2.2 光柵與透鏡間的轉換	4
2.3 等效透鏡轉換成波帶結構	7
2.3.1 相位分佈函數	8
2.3.2 波帶轉換	10
第三章 繞射/折射複合透鏡最佳單元組件研究	15
3.1 消色差複合透鏡的設計	15
3.2 單片式複合透鏡最佳單元組件設計	20

3.3 雙片式複合透鏡最佳單元組件設計·····	29
第四章 十倍光學變焦系統分析及設計·····	35
4.1 引言·····	35
4.2 兩群透鏡光學變焦系統·····	35
4.2.1 符號定義·····	36
4.2.2 對於有限物距的兩群透鏡光學系統·····	37
4.3 四群鏡組的十倍光學變焦系統·····	38
第五章 繞射/折射複合元件應用在十倍光學變焦鏡鏡	
組的設計·····	42
5.1 引言·····	42
5.2 初始架構·····	42
5.3 將繞射/折射複合元件應用在系統上·····	46
5.3.1 複合元件用於第一群透鏡·····	47
5.3.2 複合元件用於第二群透鏡·····	53
5.3.3 複合元件用於第三群透鏡·····	59
5.3.4 複合元件用於第四群透鏡·····	64
5.4 與其它設計的比較·····	77
5.4.1 與專利 USP6457494 的比較·····	77
5.4.2 與交通交通大學光電所碩士論文的比較···	79



第六章 結論與展望·····	82
參考文獻·····	84



# 圖目錄

圖 2.1 (A)光線通過一繞射元件等效透鏡的情況，元件置於一彎曲基片上。 (B)放大示意圖。·····	5
圖 2.2 等效透鏡所對應的繞射元件結構·····	8
圖 2.3 光線平行入射等效透鏡光路圖·····	9
圖 2.4 第 N 個波帶結構圖·····	11
圖 2.5 巨觀下基面的弛垂量·····	12
圖 2.6 波帶結構·····	12
圖 2.7 角度示意圖·····	13
圖 3.1 繞射/折射複合透鏡的消色差特性·····	18
圖 3.2 雙合鏡(BK7、SF11)的二次譜圖·····	19
圖 3.3 消色差複合透鏡(pmma)的二次譜圖·····	20
圖 3.4 Zemax 中愛里斑的設定·····	21
圖 3.5 Zemax 中 MTF 繞射極限的設定·····	22
圖 3.6 F 數為 3.5 時的 2D 結構圖·····	23
圖 3.7 F 數為 3.5 時的 Spot Diagram·····	23
圖 3.8 F 數為 3.5 時的 MTF·····	24
圖 3.9 F 數為 3.5 時的增加高視場角權重的 MTF·····	24
圖 3.10 光學系統之愛里斑(Airy Disk)·····	25
圖 3.11 兩片式複合透鏡在 F 數為 3.5 時的結構圖·····	29
圖 3.12 兩片式複合透鏡在 F 數為 3.5 時的光斑圖·····	30
圖 3.13 兩片式複合透鏡在 F 數為 3.5 時的 MTF·····	30
圖 3.14 兩片式複合透鏡 F#為 3.5 時的增加高視場角權重時的 MTF·····	31
圖 4.1 符號定義圖·····	36
圖 4.2 兩群透鏡之有限物距變焦系統·····	38
圖 4.3 第一與第四群固定，第二與第三為組合透鏡的變焦系統·····	39
圖 4.4 四群透鏡變焦軌跡圖，第一、四群固定不動，變倍比 10:1， $F_1=39.7435$ 、 $F_2=-7.50043$ 、 $F_3=14.3799$ 、 $F_4=55.3522$ ·····	41
圖 5.1 專利 USP61574942 薄透鏡光線追跡圖·····	43
圖 5.2 薄透鏡光線追跡圖·····	45
圖 5.3 設計時所欲到的問題·····	47
圖 5.4 傳統照相機與數位相機光學系統 MTF 的比較·····	47
圖 5.5 第一群鏡組的結構圖·····	48
圖 5.6 第一群鏡組的 MTF·····	48
圖 5.7 第一群鏡組的光斑圖·····	49

圖 5.8 將第一群帶入後的廣角組態結構圖	49
圖 5.9 將第一群帶入後的中間組態結構圖	50
圖 5.10 將第一群帶入後的廣角組態 MTF	50
圖 5.11 將第一群帶入後的廣角組態光斑圖	50
圖 5.12 第一群帶入並優化後各組態的光斑圖(由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)	51
圖 5.13 第一群帶入並優化後各組態的 MTF	52
圖 5.14 第二群負透鏡結構圖	53
圖 5.15(a) 第二群負透鏡光斑圖	54
圖 5.15(b) 第二群負透鏡 MTF	54
圖 5.16 第二群負透鏡帶入後廣角組態的結構圖	55
圖 5.17(a) 第二群負透鏡帶入後的光斑圖	55
圖 5.17(b) 第二群負透鏡帶入後的 MTF	56
圖 5.18 第二群負透鏡帶入並優化後廣角組態的結構圖	57
圖 5.19 第二群負透鏡帶入並優化後各組態的光斑圖	57
圖 5.20 第二群負透鏡帶入並優化後各組態的 MTF	58
圖 5.21 第三群透鏡帶入到系統後廣角組態的結構圖	59
圖 5.22 第三群透鏡帶入到系統後各個組態的 MTF	60
圖 5.23 第三群透鏡帶入到系統後各個組態的光斑圖 (由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)	61
圖 5.24 光學軟體優化時評價函數的演算方向	62
圖 5.25 第三群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的 MTF	63
圖 5.26 第三群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的光斑圖(由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)	64
圖 5.27 第四群透鏡帶入到系統後廣角組態結構圖	65
圖 5.28 第四群透鏡帶入到系統各個組態的光斑圖(由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)	65
圖 5.29 第四群透鏡帶入到系統後各個組態的 MTF	66
圖 5.30 第四群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的結構圖(由上到下依序為望遠、中間、廣角組態)	67
圖 5.31 第四群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的 MTF	68
圖 5.32 第四群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的光斑圖(由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)	69
圖 5.33 第四群透鏡帶入到系統並優化後各組態的場曲/畸變圖	70
圖 5.34 第四群透鏡帶入到系統並優化後各組態的網格畸變圖	72
圖 5.35 第四群透鏡帶入到系統並優化後各組態的二次譜圖	73
圖 5.36 系統各繞射面的輪廓示意圖	76
圖 5.37 專利 USP6157494 廣角組態結構圖	77

- 圖 5.38 各組態設計結果與專利 USP6157494 的 MTF 曲線比較圖，  
左圖為設計結果，右圖為專利簡單優化結果。……………78
- 圖 5.39 交通大學碩士論文中 10 倍變焦系統廣角組態的結構圖 ……………79
- 圖 5.38 各組態設計結果與交通大學論文結果的 MTF 曲線比較圖，  
左圖為設計結果，右圖為專利簡單優化結果。……………80



# 表目錄

表 3.1 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的最佳單元組件表格	26
表 3.2 單片式複合透鏡(焦距為 12mm)的最佳單元組件表格	26
表 3.3 F 數為 3.5 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	27
表 3.4 F 數為 2.8 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	27
表 3.5 F 數為 2.3 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	28
表 3.6 F 數為 2.0 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	28
表 3.7 F 數為 1.8 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	28
表 3.8 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的最佳單元組件表格	31
表 3.9 兩片式複合透鏡(焦距為 12mm)的最佳單元組件表格	32
表 3.10 F 數為 3.5 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	32
表 3.11 F 數為 2.8 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	33
表 3.12 F 數為 2.3 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	33
表 3.13 F 數為 2.0 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	34
表 3.14 F 數為 1.8 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數	34
表 5.1 專利 USP61574942 系統參數值 單位(mm)	44
表 5.2 系統參數值 單位(mm)	46
表 5.3 最終系統的設計規格	74
表 5.4 系統透鏡所使用的材料	74
表 5.5 系統各個曲面的參數	75

# 第一章 緒論

繞射元件(或全像元件)是基於光的波動理論，利用光的干涉原理進行計算和分析。雖然繞射元件和傳統光學元件採用不同的方法進行設計和計算，但兩種光學元件都可以執行類似的功能。因此，一個合理的推論是兩種元件應該能用相同的方法來描述。

在 1988 年，斯渥森(Swanson)和維得卡姆(Veldkamp)等人利用繞射光學元件(diffractive optical element, DOE)的色散特性校正單透鏡的軸上色差和球差，研製了新型的繞射/折射複合光學元件(diffractive/refractive optical element, D/ROE)，展示了 D/ROE 用於光學成像的巨大潛力和優勢。90 年代末期，東芝的奈米切削加工機的實用化，以及超精密加工技術與微影技術(lithography)的進步，研究人員已經可以製作幾乎與理論值相同的繞射光學元件，並開始大量應用在各領域。到了 2000 年初，日本 canon 公司開發「multi-layer diffractive optical lens」，成功的將繞射光學鏡片應用於數位相機鏡組上。因此，越來越多的光學研究人員開始進行 D/ROE 在光學成像領域的應用研究。

繞射/折射複合光學元件在設計，製造和分析方面的迅速發展，已使得它成為在許多光學系統中用來代替傳統折射元件。由於繞射元

件具有體積小，重量輕和一些獨特的性能，把繞射元件和傳統的折射和反射元件結合起來以達到預期的特殊功能。採用此方法設計後，可以利用單一透射元件，在元件表面製成繞射元件，從而使系統大大減化，也更易於製造。採用複合元件，可以用來形成消色差，消熱差和矯正球差，或是設計成多焦點的結構。

由於繞射/折射複合光學元件的廣泛應用，在本論文中，嘗試對 D/ROE 的最佳組合單元的研究做出一個整理，建立一個 D/ROE 在使用上的最佳規格，以方便在光學系統設計上做一個參考。最後應用到 10 倍光學變焦鏡頭設計的結果上，可以看到有了最佳化組合的設計後，不但在繞/折射複合元件的應用上帶來了許多的便利，而且可以在設計上提供一個好的初始解，以提高了設計的品質。

## 第二章 繞射/折射複合元件基本理論

繞射光學元件(Diffraction Optical Element, DOE)可看成是全像光學元件(Holographic Optical Element, HOE)作成多階相位型式，因此繞射效率高。1977年，斯維特模型(Sweatt Model)將全像光學元件(HOE)視為普通薄透鏡來進行模擬，把全像光學元件和繞射光學元件等效於折射率無限大的薄透鏡，採用此種薄透鏡模型，可直接運用幾何光學的光線追跡方法對繞射元件做追跡來求得此元件的光學特性，所以在本論文中，使用光學透鏡設計軟體(ZEMAX)對包含繞射及折射的元件來進行設計模擬。



### 2.1 斯維特模型(Sweatt Model)

將一薄的繞射元件考慮為“簡約”透鏡，此透鏡之折射率趨近於無窮大，其曲率和厚度趨近於零，而使元件的光焦度保持為一有限值，此即為斯維特模型(Sweatt Model)。

例如一孔徑為 20mm，焦距為 100mm 的 Fresnel 透鏡，等價於一平凸透鏡。由高斯光學可知平凸透鏡的的焦距可表示成：

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \frac{1}{r} \quad (2.1)$$

對於一平凸透鏡的厚度，孔鏡和曲率半徑之間有如下關係：

$$h^2 - 2rh + \frac{1}{4}D^2 = 0 \quad (2.2)$$

其中  $h, D$  和  $r$  分別是平凸透鏡的厚度，孔鏡和曲率半徑。當  $h$  甚小時，(2.2)式可寫成：

$$h = \frac{D^2}{8r} \quad (2.3)$$

如果折射率  $n = 10000$ ，由(2.1)式可得：

$$r = (n - 1)f' = (10000 - 1) \times 100 \approx 10^6 \text{ mm}$$

由(2.3)式可得：

$$h = \frac{20^2}{8 \times 10^6} = 50 \times 10^{-6} \text{ mm} = 50 \text{ nm}$$

對於光波長為  $500 \text{ nm}$ ，透鏡厚度只有  $\frac{\lambda}{10}$ 。從上面計算，可看出 Fresnel 透鏡的等價透鏡，其折射率 ( $n = 10^4$ ) 趨近於無窮大，曲率 ( $C = r^{-1} = 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$ ) 和厚度 ( $h = 50 \text{ nm}$ ) 趨近於零，但焦距 ( $f' = 100 \text{ mm}$ ) 或光焦度 ( $f'^{-1}$ ) 保持有限。這完全符合斯維特模型。

## 2.2 光柵與透鏡間的轉換：

光柵週期等價於透鏡兩面間光程差為一個波長的距離。光柵週期可表示成：

$$p = \frac{\lambda}{\frac{d(OPD)}{ds}} = \frac{\lambda}{(n-1)\left(\frac{dt}{ds}\right)} \quad (2.4)$$

其中  $t$  是透鏡厚度， $S$  是表面切向座標和  $n$  是透鏡折射率。

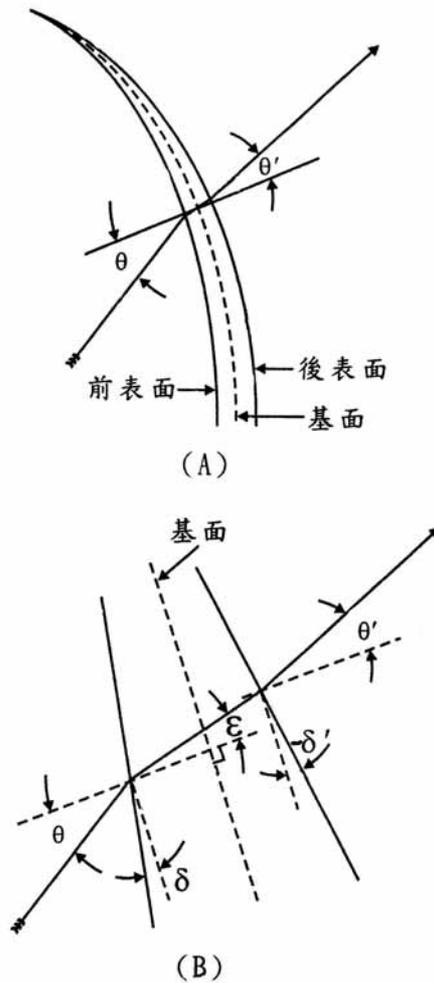


圖 2.1 (A)光線通過一繞射元件等效透鏡的情況，元件置於一彎曲基片上。(B)放大示意圖。

圖 2.1 為一繞射光柵的等效透鏡，其中光線的傾斜角度  $\theta$ 、 $\epsilon$  和  $\theta'$  都是相對於基面局部法線的夾角。透鏡表面切線相對於基面的傾斜角為  $\delta$  和  $\delta'$  (由切線反時針為正)。折射方程可寫成：

$$\begin{aligned} n \sin(\epsilon + \delta) &= \sin(\theta + \delta) \\ n \sin(\epsilon + \delta') &= \sin(\theta' + \delta') \end{aligned} \tag{2.5}$$

在上面方程式中右方的最大值為 “1”，而折射率  $n \gg 1$ ，故  $\epsilon + \delta$

和  $\varepsilon + \delta'$  將十分小，可表示成  $|\varepsilon + \delta| < \frac{1}{n}$  和  $|\varepsilon + \delta'| < \frac{1}{n}$ 。由於透鏡的表面

十分貼近於基面， $\delta$  和  $\delta'$  十分小，故  $\varepsilon$  和  $\varepsilon'$  也十分小，在小角度近

似下，(2.5)式可寫成：

$$\begin{aligned} n(\varepsilon + \delta) &\cong \sin \theta + \delta \cos \theta \\ n(\varepsilon + \delta') &\cong \sin \theta' + \delta' \cos \theta' \end{aligned} \quad (2.6)$$

(2.6)式中消去  $\varepsilon$ ，可得：

$$(n - \cos \theta)\delta - (n - \cos \theta')\delta' = \sin \theta - \sin \theta' \quad (2.7)$$

對於  $\theta < \frac{\pi}{2}$  和  $n > 10^4$ ， $n - \cos \theta \cong n - \cos \theta' \cong n - 1$  (2.7)式

可近似為

$$(n - 1)(\delta - \delta') = \sin \theta - \sin \theta' \quad (2.8)$$

其精度為  $\frac{1}{n}$  (= 0.01%)

由幾何可知， $\frac{dt}{ds} = \tan(\delta - \delta')$ 。在  $|\delta|$  和  $|\delta'|$  甚小時， $\frac{dt}{ds} \cong \delta - \delta'$ ，(2.8)

式可寫成：

$$(n - 1) \frac{dt}{ds} = \sin \theta - \sin \theta' \quad (2.9)$$

繞射方程為：

$$m\lambda\xi(s) = \sin \theta - \sin \theta' \quad (2.10)$$

式中  $m$  是繞射級數， $\xi$  是光柵空間頻率(線數/mm)， $\xi = \frac{1}{p}$ ， $p$  為光柵

週期，由(2.9)和(2.10)式可得：

$$m\lambda\xi(s) = (n - 1) \frac{dt(s)}{ds} \quad (2.11)$$

此式與(2.4)是完全一致。

如果上述模型有效，必須要使得軸向和非軸向光束具有相同的光柵週期。這要求穿過透鏡的方程隨入射角無顯著變化，對於垂直入射，光程  $OPL_N = nt$ ， $t$  為透鏡厚度。對於極端傾斜入射的情形，掠射 (grazing) 所行的光程為  $OPL_G = nt \sec \alpha$ ， $\alpha$  為掠射在透鏡中的折射角。根據 Snell's 律， $n \sin \alpha = \sin \frac{\pi}{2} = 1$ ， $\sin \alpha = \frac{1}{n}$ 。對於  $n$  值甚大時， $\sec \alpha \cong 1 + \frac{1}{2n^2}$ ，對於掠射和垂直入射， $OPL$  的差為：

$$\Delta(OPD) \cong OPL_G - OPL_N \cong \frac{t}{2n} \quad (2.12)$$

對於前面例中， $n = 10^4$  和  $t = \frac{\lambda}{10}$ ，上式光程之差為：

$$\Delta(OPL) \cong \frac{\lambda}{2} \times 10^{-5}$$



### 2.3 等效透鏡轉換成波帶結構：

在前面的敘述中，我們可以用一等效透鏡來代替繞射元件，在折射率非常大時，等效透鏡的厚度將十分薄(遠小於波長)並具有與繞射元件相同的光學演示。對於這樣的等效透鏡，我們可以用傳統的光學追跡法，進行設計和優化。當我們求得一薄的最佳化的非球面的等效透鏡後，我們還必須把此等效透鏡還原成具有表面浮雕結構的繞射元件，即所謂波帶結構(Kinoform)，如圖 2.2 所示。

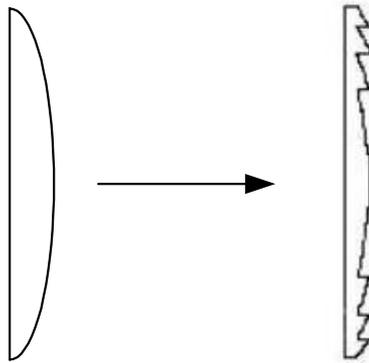


圖 2.2 等效透鏡所對應的繞射元件結構

### 2.3.1 相位分佈函數：

為了使透鏡的厚度波帶化，首先必須求得等效透鏡的相位分佈函數。為了獲得光通過透鏡上各點相位的變化，我們必須計算光線在透鏡上任一點入射，經透鏡後產生的光程差(*OPD*)。這裡所謂的光程差是指光線在有和沒有等效透鏡時光程的差。對於一軸向對稱的光學系統，光程差可表示成光線入射至有效透鏡高度的函數，這裡高度是指入射點相對於光軸的距離。

一光線由折射率為  $n_0$  的界質以入射角  $\theta_0$  入射至折射率為無窮大的薄透鏡，折射角  $\theta_1$  可由折射率求得：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_0$$

當  $n_1$  趨於無窮大時， $\theta_1$  趨於 0。這意謂著，不論入射角  $\theta_0$  為何值，光線在薄透鏡中總是沿著入射點處面法線傳播。圖 2.3 為光線平行入射至繞射等效透鏡的光路圖。

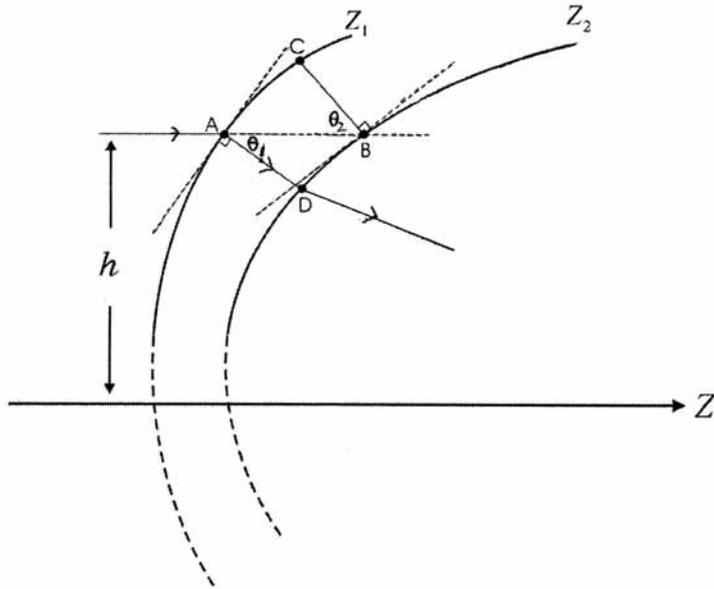


圖 2.3 光線平行入射等效透鏡光路圖

入射點  $A$  的高度為  $h$ ，繞射元件所造成的光程差為  $(n_D - 1) \overline{AD}$ ，這裡假設入射介質為空氣，故  $n_0 = 1$ 。等效透鏡折射率為  $n_1 = n_D$ ，等效透鏡的光程差為  $(n_D - 1) \overline{AD}$ 。 $\overline{AD}$  為  $A$  點沿法線至薄透鏡第二面的長度，可計算如下：

$$\overline{AD} \cong \overline{AB} \cos \theta_1 \quad (2.13)$$

其中  $\overline{AB}$  為高度  $h$  處等效透鏡的厚度。由於在薄透鏡近似下， $A$  和  $B$  點處的法線接近平行，故

$$\theta_1 \cong \theta_2 \quad (2.14)$$

$\overline{AB}$  與  $B$  點法線的夾角  $\theta_2$  可由下式求得：

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[ \frac{dZ_2(h)}{dh} \right] \quad (2.15)$$

光程差作為  $h$  的函數可表示成：

$$OPD = (n_D - 1)[Z_2(h) - Z_1(h)] \cos \left[ \tan^{-1} \left( \frac{dZ_2(h)}{dh} \right) \right] \quad (2.16)$$

相位與光程差之間有如下關係：

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} OPD \quad (2.17)$$

由(2.16)和(2.17)式，用數值方法相位函數可以用多項式表示成：

$$\phi(h) = P_2 h^2 + P_4 h^4 + P_6 h^6 + P_8 h^8 + \dots \quad (2.18)$$

### 2.3.2 波帶轉換：

圖 2.3 顯示了繞射元件所對應的有效透鏡，它由兩非球面形成。

光線通過此透鏡所產生的相位分布由(2.18)式表示。利用此相位分布，就可以使有效透鏡轉換成繞射元件的波帶結構。繞射元件的基面就是有效透鏡的第二非球面，此非球面可由其弛垂(*sag*)函數來表示：

$$Sag(h) = \frac{Ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)C^2 h^2}} + A_4 h^4 + A_6 h^6 + A_{10} h^{10} + \dots \quad (2.19)$$

我們利用(2.18)和(2.19)式來轉換每一波帶的結構。首先求出第  $N$  個波帶的內邊界高度  $h_i(N)$  和外邊界高度  $h_o(N)$ ，如圖 2.4 所示，其中虛線為繞射透鏡的基面，實線為波帶結構，它與基面相交高度

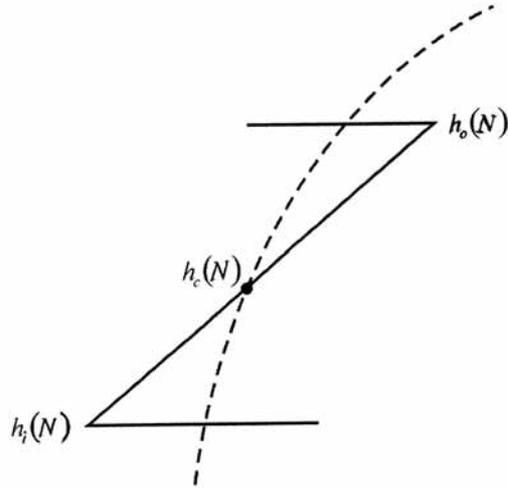


圖 2.4 第 N 個波帶結構圖

為  $h_c(N)$ 。  $h_i(N)$  和  $h_o(N)$  的位置相對於  $h_c(N)$  具有相差  $\pi$ 。由 (2.18) 式可得第 N 個波帶的  $h_i(N)$  和  $h_o(N)$  下列方程：

$$2\pi(N - 0.5) = P_2 h_i^2(N) + P_4 h_i^4(N) + P_6 h_i^6(N) + P_8 h_i^8(N) + \dots \quad (2.20)$$

$$2\pi(N + 0.5) = P_2 h_o^2(N) + P_4 h_o^4(N) + P_6 h_o^6(N) + P_8 h_o^8(N) + \dots \quad (2.21)$$

假設所設定的元件表面最小取樣間距高度為  $H_d$ ，則第 N 個波帶的實

際取樣間距  $\delta(N)$  可以計算如下：

$$m = \text{fix} \left[ \frac{h_o(N) - h_i(N)}{H_d} \right] + 1 \quad (2.22)$$

$$\delta(N) = \frac{h_o(N) - h_i(N)}{m} \quad (2.23)$$

其中  $m$  為第 N 個波帶的取樣點數， $\text{fix} [ ]$  為去除小數後的整數。第 N

個波帶每一取樣點的高度  $h_l(N)$  為：

$$\begin{aligned} h_l(N) &= h_i(N) + (l-1)\delta(N) \\ l &= 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad (2.24)$$

在求出第  $N$  個波帶中每一取樣點高度  $h_i(N)$  後，即可由(2.19)式

求得第  $N$  波帶基面上各取樣點的弛垂為：

$$\begin{aligned}
 Z_s(l, N) &= \text{Sag}(l, N) \\
 &= \frac{Ch_l^2(N)}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)C^2 h_l^2(N)}} + A_4 h_l^4(N) + A_6 h_l^6(N) + A_{10} h_l^8(N) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$

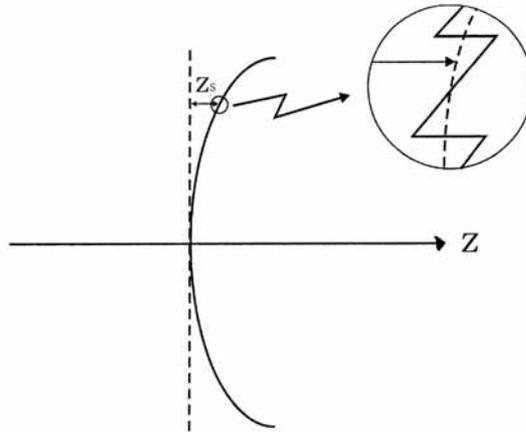


圖 2.5 巨觀下基面的弛垂量

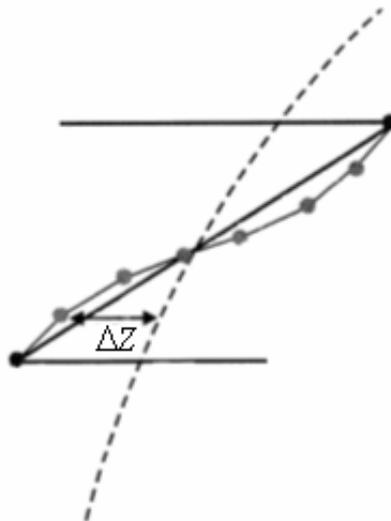


圖 2.6 波帶結構

基面的弛垂曲面如圖 2.5 所示。下面我們將計算基面上微結構對

應於各取樣點的厚度  $\Delta Z$ ，這裡  $\Delta Z$  是相對於基面的偏移量，如圖 2.6 所示。為此，我們首先計算基面法線和光軸的夾角  $\alpha$ ，如圖 2.7 所示，其表示式為：

$$\alpha(l, N) = \tan^{-1} \left[ \frac{dZ_s(l, N)}{dh_t(N)} \right] \quad (2.26)$$

其中  $(l, N)$  表示第  $N$  波帶第  $l$  個取樣點。

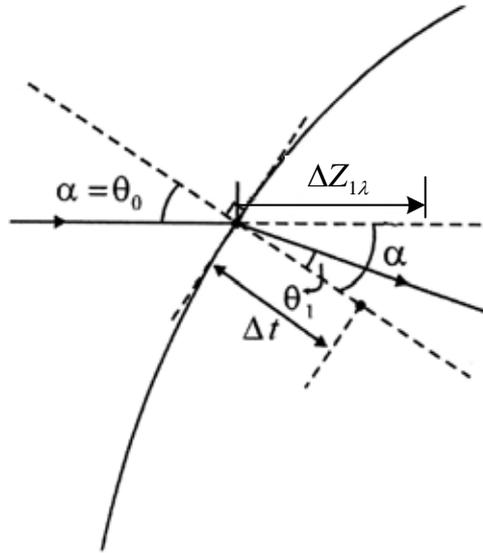


圖 2.7 角度示意圖

下面我們將計算光線在繞射元件中產生一個波長光程差所對應的厚度。在等效透鏡的計算中，採用了 *Sweatt* 模型，即等效透鏡具有非常大的折射率，從而使透鏡類似於薄膜。在實際形成波帶結構時，必須採用真實材料的折射率，折射光線也不再沿法線傳播，其折射角必須由折射率求得。由圖 2.7 可看出對應於一個波長的厚度為：

$$\Delta t(l, N) = \frac{\lambda}{n_0 \cos \theta_0 - n_1 \cos \theta_1} \quad (2.27)$$

其中  $n_0$  為空氣的折射率， $n_1$  為材料的折射率， $\theta_0$  為入射角， $\theta_1$  為折射角。  $\Delta t$  對應的平行光軸長度為：

$$\Delta Z_{1\lambda}(l, N) = \frac{\Delta t(l, N)}{\cos[\alpha(l, N)]} \quad (2.28)$$

第  $N$  波帶第  $l$  取樣點微結構相對基面的偏移量為：

$$\Delta Z(l, N) = \Delta Z_{1\lambda}(l, N) \times \left[ \frac{\phi(h_l(N))}{2\pi} - N \right] \quad (2.29)$$

元件的實際外形為基面加上波帶微結構，可表示成：

$$Z(l, N) = Z_s(l, N) + \Delta Z(l, N) \quad (2.30)$$

如此就可以將 DOE 轉換成 Kinoform 的結構。



# 第三章 繞射/折射複合透鏡最佳單元組件研究

## 3.1 消色差複合透鏡的設計

光學材料的折射率隨著波長而變化稱為色散(dispersion)，而因色散所引起的光學成像缺陷稱為色差(chromatic aberration)。折射型單透鏡通常都有著嚴重的色差，所以在光學系統中通常不單獨使用單片透鏡，而是根據光學材料在特定波長下的色散特點，使用雙膠合或三片透鏡，經過適當分配光焦度使兩種或三種波長下的焦距一致而實現消色差。

所謂縱向色差(或主軸向色差)是指透鏡焦距隨波長的變化，在可見光範圍定義為：

$$LA'_c = f'(\lambda_F) - f'(\lambda_c) \quad (3.1)$$

其中  $\lambda_F=486.1\text{nm}$  為藍光和  $\lambda_c=656.3\text{nm}$  為紅光。為了描述材料的色散特性我們引進 Abbe 指數，它定義為：

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_c} \quad (3.2)$$

其中 d 代表  $\lambda_d=587.6\text{nm}$ (氬的 d 線，為黃光)。由幾何光學得知薄透鏡光焦度隨波長的變化與 Abbe 指數之間有如下關係：

$$\Delta\phi(\lambda) = \phi(\lambda_F) - \phi(\lambda_C) = \frac{\phi(\lambda_d)}{V_d} \quad (3.3)$$

其中  $\phi(\lambda) = \frac{1}{f'(\lambda)}$ ，這裡所有波長的指定都是對可見光波長範圍而言。

如果討論不同的波段，或在紅外範圍，則上述波長都必須重新選擇。

為了減少透鏡的色差，通常在全折射型的透鏡的設計中，採用不同材

質的兩個折射透鏡相互貼合，形成一雙合鏡。兩組成的透鏡滿足下列

方程式：

$$\phi_1 + \phi_2 = \phi \quad \text{或} \quad \frac{\phi_1}{\phi} + \frac{\phi_2}{\phi} = 1 \quad (3.4a)$$

$$\frac{1}{V_1} \frac{\phi_1}{\phi} + \frac{1}{V_2} \frac{\phi_2}{\phi} = 0 \quad (3.4b)$$

其中  $\phi_1$  和  $\phi_2$  是兩組成透鏡的光焦度，它們所對應Abbe指數分別是  $V_1$  和  $V_2$ ， $\phi$  是雙合鏡的總光焦度。例如用BK7 ( $V_d=64.17$ ) 和SF11 ( $V_d=25.76$ )

兩種玻璃材料構成一消色散的雙合鏡，焦距為 100mm，由(3.4)式可

求得  $\phi_{BK7} = 0.0167 \text{ mm}^{-1}$  和  $\phi_{SF11} = -0.0167 \text{ mm}^{-1}$ 。這樣所形成的雙合鏡將滿

足  $LA'_c = f'(\lambda_F) - f'(\lambda_c) = 0$ 。但是它並未完全消除色差，也就是說，即

使波長  $\lambda_F$  和  $\lambda_c$  具有相同的焦距，其他波長依然具有不同焦距，這種

剩餘像差稱為二次譜(secondary spectrum)，它可由  $\lambda_F$  或  $\lambda_c$  的焦點與

$\lambda_d$  的焦點間的距離來描述：

$$SAC = f(\lambda_F) - f(\lambda_d) = f' \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1} \quad (3.5)$$

其中  $p$  為相對部份色散(relative partial dispersion)：

$$p = \frac{n_F - n_d}{n_F - n_c} \quad (3.6)$$

在上面的例中，可求得二次譜 SAC=0.013nm，此值對於大多數的成像應用是可以接受的。

從上面的討論可以看到，對於全折射型消色差透鏡，通常需要兩種不同的材料組成雙合鏡。由於材料的 Abbe 指數為一正值，在雙合鏡中一正透鏡需要耦合一負透鏡，從而造成組成的正透鏡比組合後透鏡具有更大的光焦度。

繞射透鏡提供了另一種消色差的方法。基於Fresnel波帶概念設計的Fresnel繞射透鏡的焦距在近軸近似下( $r_m \ll f_0/m$ )可表示為：

$$f_0 = \frac{n_i r_m^2}{2m\lambda_0} \quad (3.7)$$

其中  $r_m$  是第  $m$  波帶的半徑， $f_0$  是對應於設計波長  $\lambda_0$  的焦距和  $n_i$  是像空間的折射率。由上式可推得對於任一波長  $\lambda$  的焦距為：

$$f(\lambda) = \frac{1}{\phi(\lambda)} = f_0 \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (3.8)$$

類似於折射透鏡，由(3.3)和(3.8)式，可定義一個繞射透鏡的有效 Abbe 指數：

$$V_{de} = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_c} \quad (3.9)$$

在可見光範圍 $V_{de}=-3.452$ 。這裡要特別注意， $V_{de}$ 僅僅是所討論波段的波長函數，而與透鏡材料無關。 $V_{de}$ 為負值意味著長波長的焦距比短波長的焦距短，這與折射型透鏡正好相反。

利用(3.4)式設計由BK7折射透鏡和繞射透鏡形成的消色差雙合鏡，總焦距為100mm。從而求得折射透鏡的光焦度 $\phi_r = 0.0095\text{mm}^{-1}$ 和繞射透鏡的光焦度 $\phi_d = 0.0005\text{mm}^{-1}$ 。

利用繞射元件與折射透鏡複合消色差，不需要第二種材料，繞射透鏡直接製作在折射透鏡上，如圖3.1所示，這是採用複合元件的一個顯著優點。

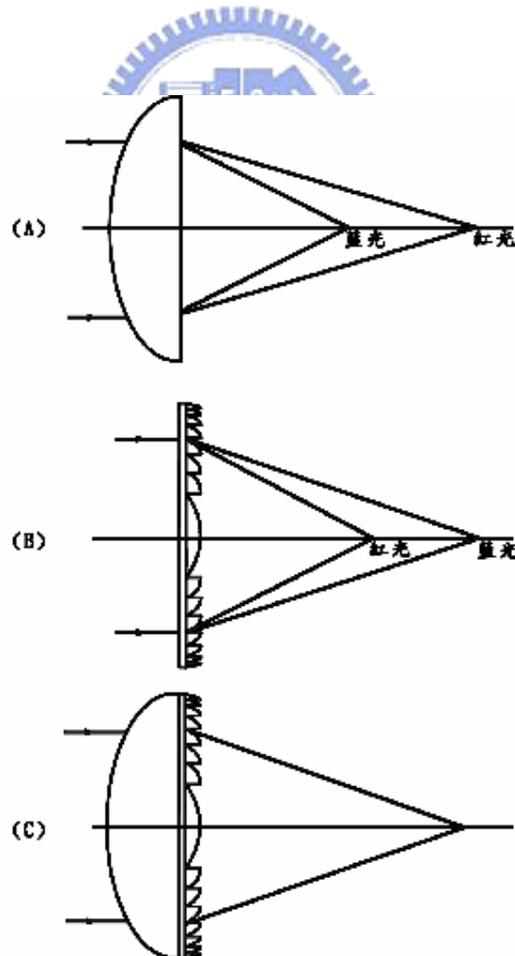


圖 3.1 繞射/折射複合透鏡的消色差特性

複合透鏡的另一個優點是折射和繞射透鏡都是正光焦度，它們都比總光焦度小，這樣可使得複合元件的表面曲率比全折射型雙合鏡的表面曲率來得小，這對於減小其他像差，如球差，都是十分有益的。

消色差的複合透鏡也存在二次譜。繞射透鏡的相對部份色散定義為：

$$p_d = \frac{\lambda_F - \lambda_d}{\lambda_F - \lambda_c} \quad (3.10)$$

由(3.5)式即可求得消色差複合鏡的二次譜，通常消色差複合鏡的二次譜要比全折射型消色差雙合鏡大。在上面計算的BK7消色差複合鏡二次譜 SAC=-0.166mm，這與BK7/SF11消色差雙合鏡的二次譜0.013mm相比，大了一個量級，在圖 3.2 及圖 3.3 中可以看到利用光學軟體 Zemax 實際模擬的雙合鏡及複合透鏡的二次譜圖，也顯示著相同的結果。但在紅外波段，消色差複合鏡的二次譜與折射型消色差雙合鏡二次譜具有相同的量級。

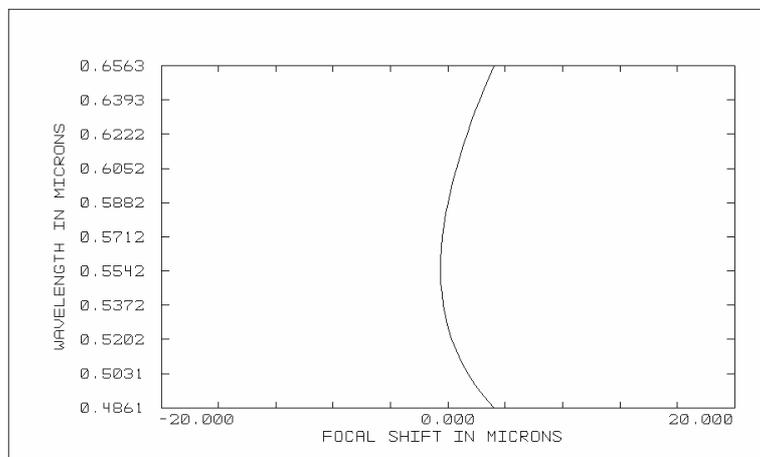


圖 3.2 雙合鏡(BK7、SF11)的二次譜圖

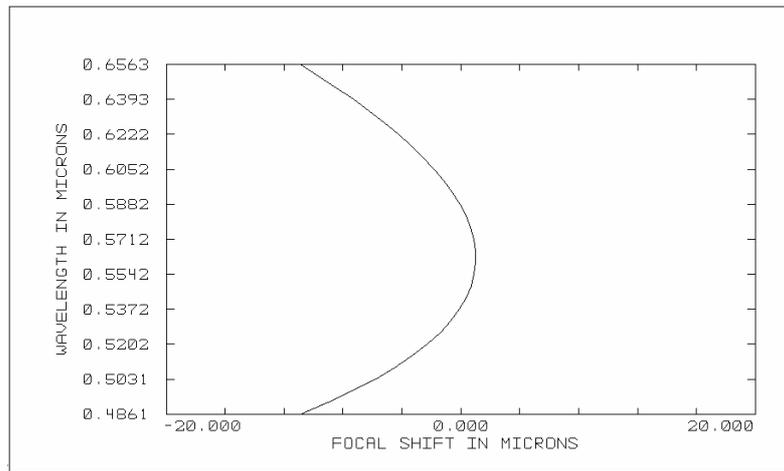


圖 3.3 消色差複合透鏡(pmma)的二次譜圖

另一個限制消色差複合鏡成像品質的剩餘像差是球色差 (sphero-chromatism)。球色差是球差隨波長的變化。雖然在全折射型消色差雙合鏡也存在球色差，由於繞射透鏡具有大得多的色散特性，使得消色差複合鏡中球色差較為嚴重。球色差是複合鏡不適合用於低 F 數透鏡的重要原因。



### 3.2 單片式複合透鏡最佳單元組件設計

在了解複合透鏡的消色差特性之後，我將試著找出對於不同的 F 數，單片式複合透鏡最佳化組合的結果。因為 F 數將直接影響著接收

訊號端的輻照度， $F = \frac{f(\text{focal length})}{D(\text{diameter})}$ 。由 F 數的定義中，可以看

到 F 數越小，輻照度就越高。所以我將分別針對 F 數=3.5、2.8、2.3、2.0、1.8 找出最佳的複合解。

首先探討如何判斷是否為最佳解，判斷的依據有兩個，一是利用

光斑圖(Spot diagram)來判斷，理想的光斑是無限小的一點，但在實際光學系統中是不可能達成的，而光斑將會達到某極限(稱繞射極限)，在這種情況下光斑大小稱為愛里斑(Airy Disk)，所以如果設計出來的光斑在愛里斑的大小之內，那麼就可以判斷為在繞射極限內的解，也就可以判定為最佳解。在程式設計上，可以利用 Zemax 來計算愛里斑，如圖 3.4 所示，在設定之後即可在左下角看到愛里斑的值。

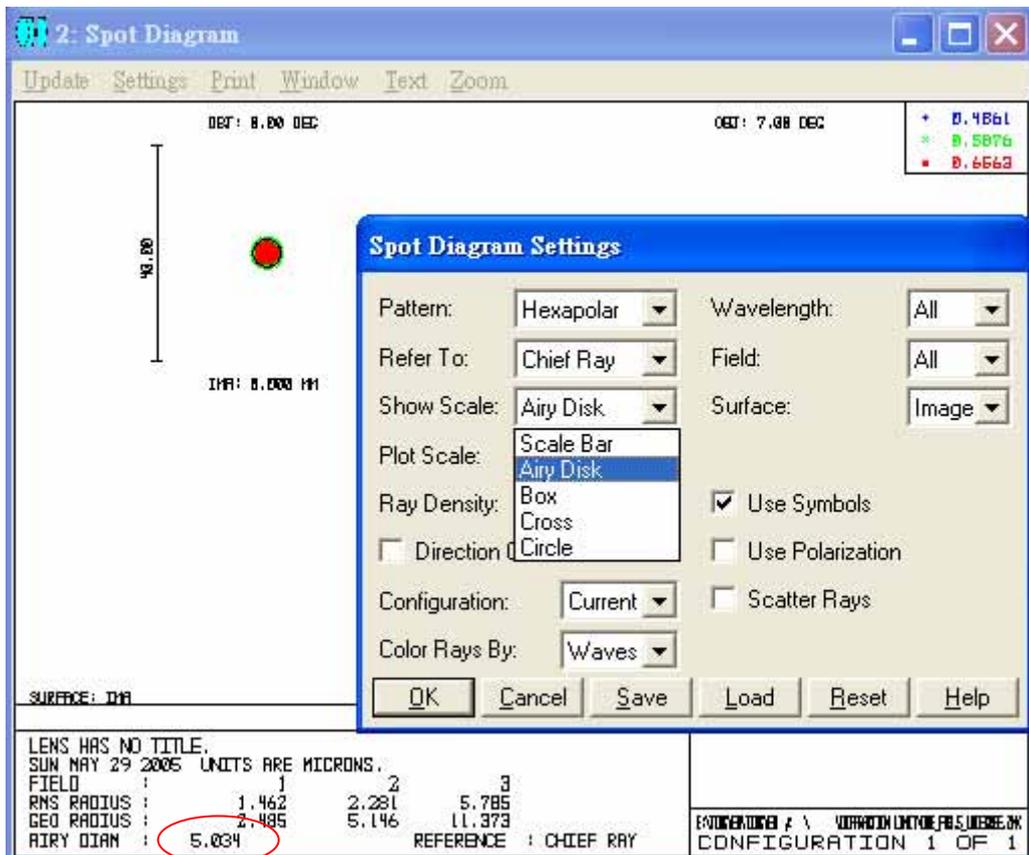


圖 3.4 Zemax 中愛里斑的設定

另一判斷方法是利用調制傳遞函數 (Modulation Transfer Function, MTF)，MTF 是光學系統成像品質好壞的重要指標之一。它

的定義為像對比度與物對比度之比，由  $MTF(\nu)$  的分佈情況，便可反映出某一光學成像系統的品質。當空間頻率  $\nu$  逐漸增大時， $MTF$  值會愈來愈小，表示光柵空間頻率越高的像的對比度越來越低。通常會訂一個標準，如  $MTF$  值小於 0.2 時，光學系統已經就很難以解析這樣的對比度，其所對應的空間頻率  $\nu$  便稱為此光學成像系統的解析度極限。而在 Zemax 中也可以計算出繞射極限的  $MTF$ ，如圖 3.5 所示。

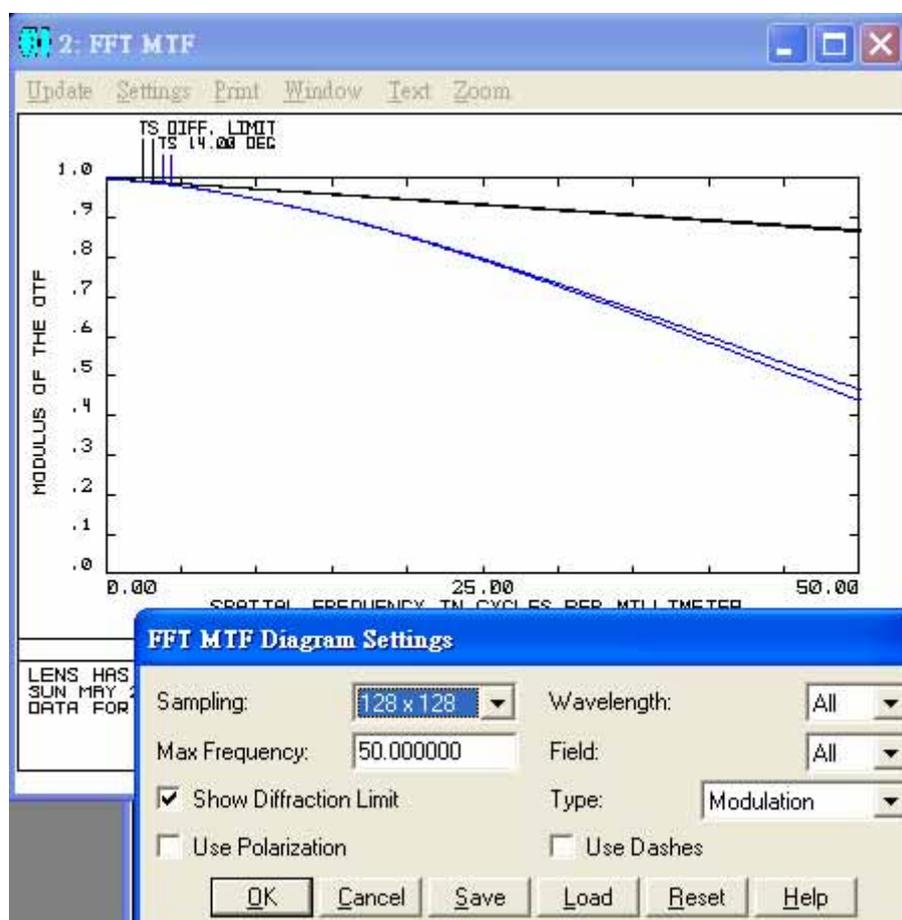


圖 3.5 Zemax 中  $MTF$  繞射極限的設定

有了這兩個判據之後，接著就開始針對  $F$  數為 3.5 的複合透鏡來做設計，採用的材質為 PMMA，而其中一面加上了繞射面，焦距為 6mm，

孔徑大小為 1.7143mm，複合鏡的厚度約為 2mm，最後的設計結果如圖

3.6~圖 3.8 所示：

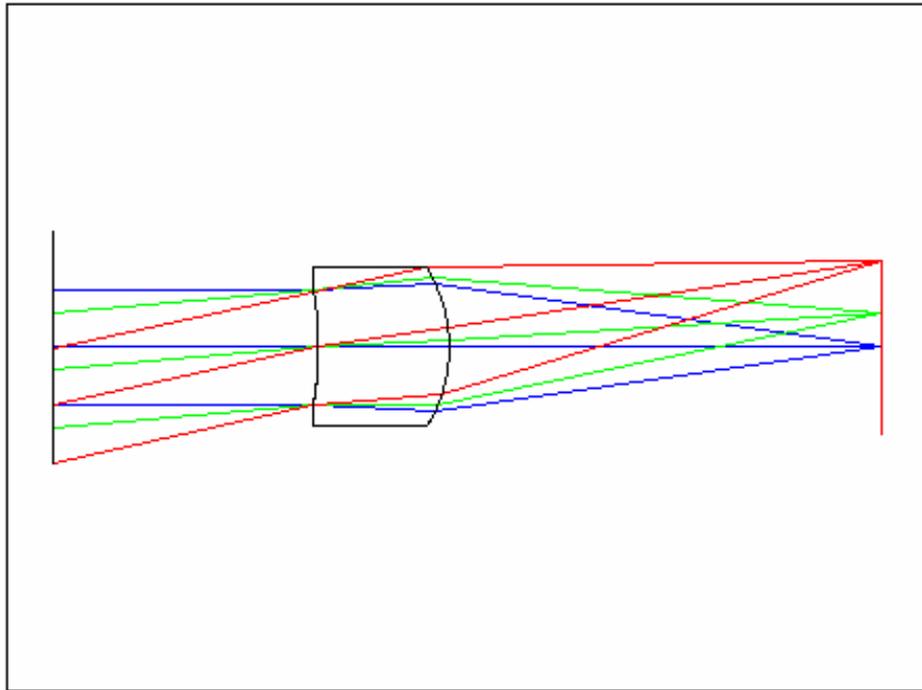


圖 3.6 F 數為 3.5 時的 2D 結構圖

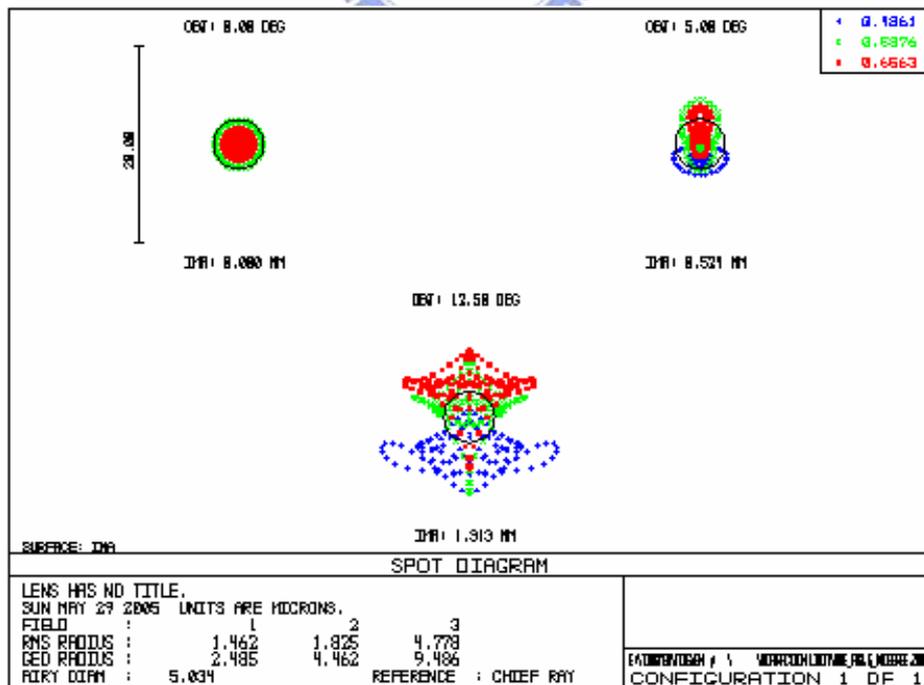


圖 3.7 F 數為 3.5 時的光斑圖

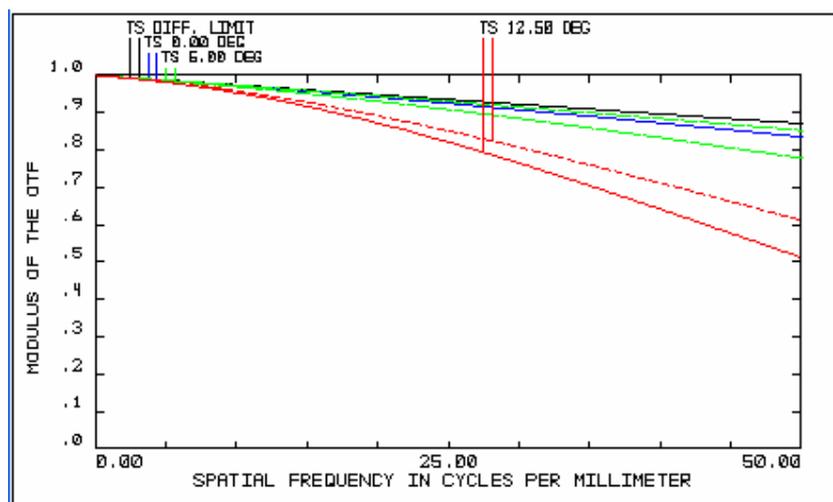


圖 3.8 F 數為 3.5 時的 MTF

由圖 3.7 中可以看到半視場角約在 12.5 度時，均方根半徑(RMS Radius)都在愛里斑均方根半徑  $5.034 \mu\text{m}$  以內，所以以光斑圖來做為標準的時候，F 數為 3.5 時所能達到最佳的結果約在半視場角 12.5 度以內。在圖 3.8 中，可以看到當半視場角超過 16 度時，MTF 在空間頻率  $50 \text{ lps/mm}$  時，就會低於 0.2，則光學系統就很難分辨此對比度。如果增加高視場角的權重(weight)，則 MTF 在空間頻率  $50 \text{ lps/mm}$  時高於 0.2 的半視場角就可以提高到 20 度，如圖 3.9 所示。

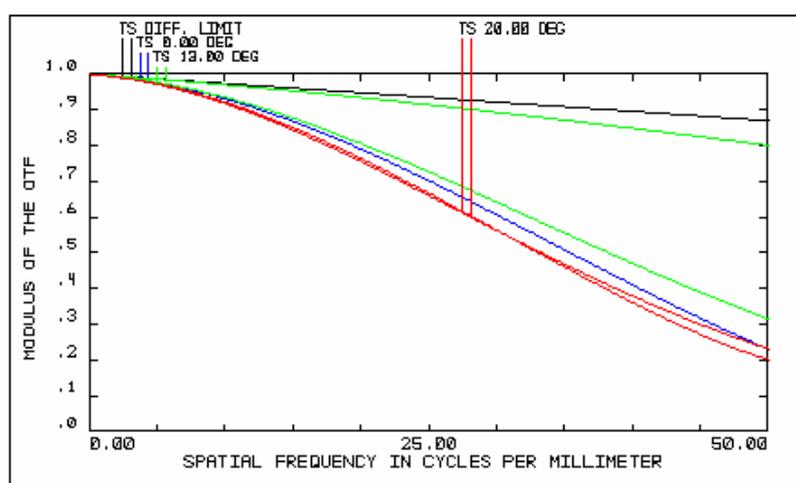


圖 3.9 F 數為 3.5 時的增加高視場角權重的 MTF

如此可以整理出在 F 數為 3.5 時的最佳解表格。

類似於 F 數為 3.5 的情況，用同樣的方法整理出 F 數為 2.8、2.3、2.0、1.8 的最佳解表格。為了要減小 F 數，則在焦距不變條件下，必須增加孔徑的大小，由圖 3.10 可以看到愛里斑的半徑可以表示成：

$$R = \ell' \alpha \quad (3.11)$$

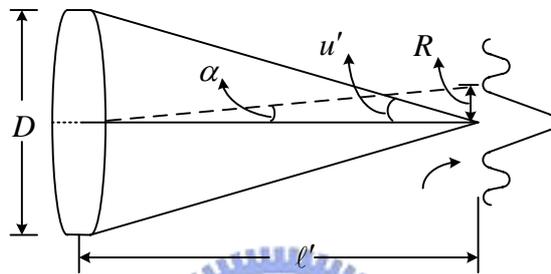


圖 3.10 光學系統之愛里斑(Airy Disk)

由 Rayleigh 準則可以得到(3.12)式

$$\alpha = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (3.12)$$

將(3.12)式帶入到(3.11)式可以得到

$$R = 1.22\lambda_p F \quad (3.13)$$

其中(3.13)式中  $\lambda_p$  是主波長，如此我們可以從(3.13)式中得知當 F 數減小的時候，愛里斑也將跟著減小，這代表著成像的光斑將比較難比愛里班小。隨著孔徑的增加，將引進更多的雜散光，成像品質也會跟著降低，所以越小的 F 數將越難達到繞射極限，在以後的設計上也顯示著相同的結果。最後整理出在焦距為 6mm 時，各個 F 數的最佳解，

列於表格表(3.1)。

單片式複合透鏡(焦距為 6mm)					
F 數	3.5	2.8	2.3	2	1.8
孔徑(mm)	1.7143	2.143	2.6087	3	3.3333
RMS spot size 在繞射極限內的半視場角	12.5°	9°	7°	6°	4°
MTF>0.2 時的半視場角	20°	18°	17°	16.5°	15.5°

表 3.1 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的最佳單元組件表格

表(3.2)為焦距為 12mm 時的最佳解。由 F 數公式可以知道，因為焦距增加到兩倍，所以孔徑值也必須增加到兩倍，如此在繞射極限內以及 MTF>0.2 的角度都將降低一些。

單片式複合透鏡(焦距 12mm)					
F 數	3.5	2.8	2.3	2	1.8
孔徑(mm)	3.4286	4.286	5.2174	6	6.6666
RMS spot size 在繞射極限內的半視場角度	10°	7.5°	6°	5°	3°
MTF>0.2 時的半視場角度	18.5°	17°	15°	14.5°	13°

表 3.2 單片式複合透鏡(焦距為 12mm)的最佳單元組件表格

我們可以看到當孔徑值越大的時候，均方根光斑半徑在繞射極限內的半視場角以及  $MTF > 0.2$  時的半視場角都會降低，而當孔徑超過 6mm 時，半視場角更降到只有 5 度以內，所以接下來將設計一兩片式的複合透徑。

F#=3.5				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-6.497	DOE	1.7143	-17.159
2	-6.496	PMMA	1.7143	4.198
3	-2.3		1.7143	-4.62E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-0.0279	-1.04E-02	-7.00E-03	1.09E-02
2	-0.01822	-1.17E-02	-6.70E-03	1.09E-02
3	-0.0494	1.26E-02	-4.80E-03	7.00E-04

表 3.3 F 數為 3.5 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

F#=2.8				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-11.134	DOE	2.143	14.779
2	-11.132	PMMA	2.143	9.177
3	-2.584		2.143	-3.24E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-0.0138	-3.88E-03	-2.24E-03	1.52E-03
2	-0.0143	-3.93E-03	-2.25E-03	1.52E-03
3	-0.0242	2.63E-03	-6.46E-04	2.60E-05

表 3.4 F 數為 2.8 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

F#=2.3				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-22.103	DOE	2.6087	-101.06
2	-22.095	PMMA	2.6087	-77.949
3	-2.809		2.6087	-1.45E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-0.012	-1.90E-03	-1.70E-03	6.52E-04
2	-0.0117	-1.97E-03	-1.69E-03	6.53E-04
3	-0.008	2.00E-04	2.50E-05	-1.90E-05

表 3.5 F 數為 2.3 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

F#=2.0				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-1.84E+04	DOE	3	1.24E+09
2	-1.43E+04	PMMA	3	-5.93E+08
3	-3.059		3	-2.10E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-0.00964	-6.91E-04	-7.80E-05	-1.90E-05
2	-0.00964	-6.92E-04	-7.80E-05	-1.90E-05
3	-0.00838	1.42E-04	-1.50E-05	-5.00E-06

表 3.6 F 數為 2.0 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

F#=1.8				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-1.78E+03	DOE	3.333	6.37E+05
2	-1.73E+03	PMMA	3.333	5.59E+05
3	-3.056		3.333	-2.17E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-0.006937	-1.50E-03	-1.10E-04	1.00E-04
2	-0.006937	-1.50E-03	-1.11E-04	1.00E-04
3	-0.006276	7.77E-04	1.79E-04	-1.80E-04

表 3.7 F 數為 1.8 單片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

表(3.3~7)中的非球面係數可以由第二章中(2.19)式計算出和弛垂函數的關係。

### 3.3 雙片式複合透鏡最佳單元設計

由於單片式的複合透鏡在孔徑比較大的時候，達到繞射極限內的半視場角太小。下面我們來將增加一片玻璃材質，希望能夠以增加一表面來增加在孔徑比較大時達到繞射極限的角度。

一開始也是針對 F 數為 3.5 來做設計，設計的焦距仍為 6mm，孔徑大小為 1.7143mm，材料第一片為玻璃 SF1，厚度約為 1.8mm，第二片為塑膠材料 Pmma，厚度約為 2mm，繞射面加在最後一面之上。圖

3.11~13 為設計之結果：

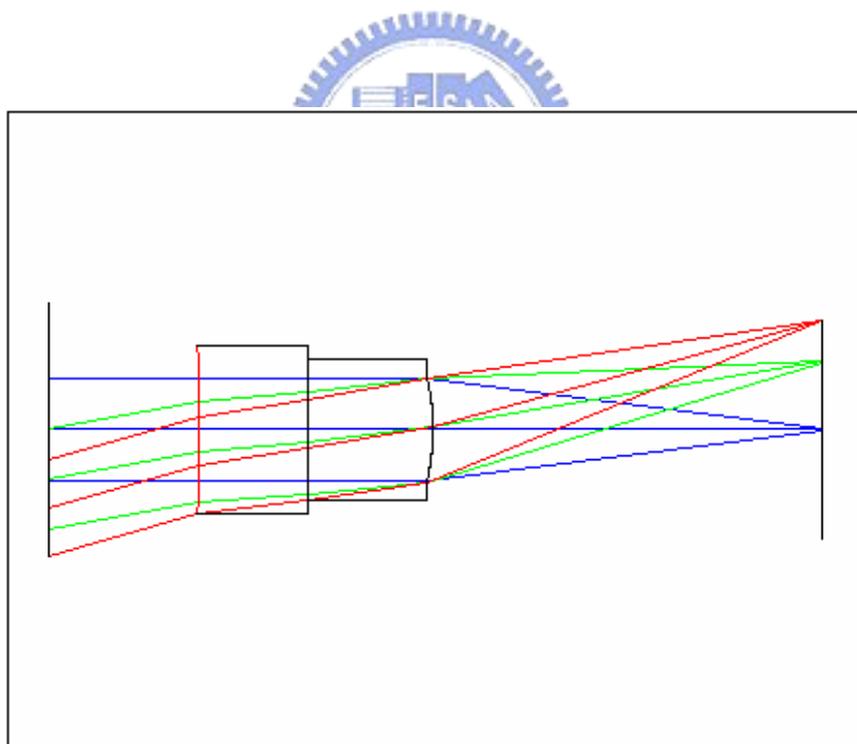


圖 3.11 兩片式複合透鏡在 F 數為 3.5 時的結構圖

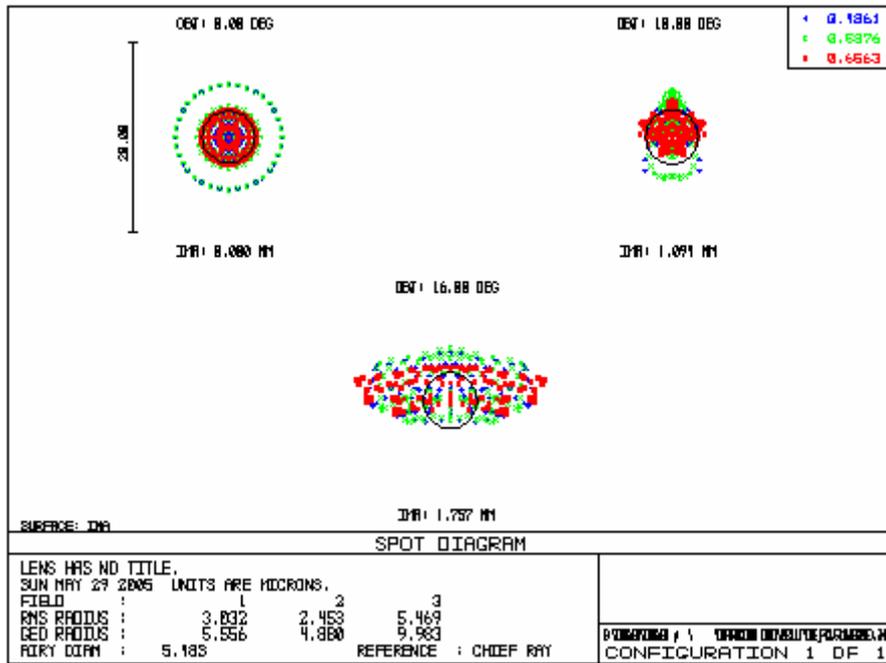


圖 3.12 兩片式複合透鏡在 F 數為 3.5 時的光斑圖

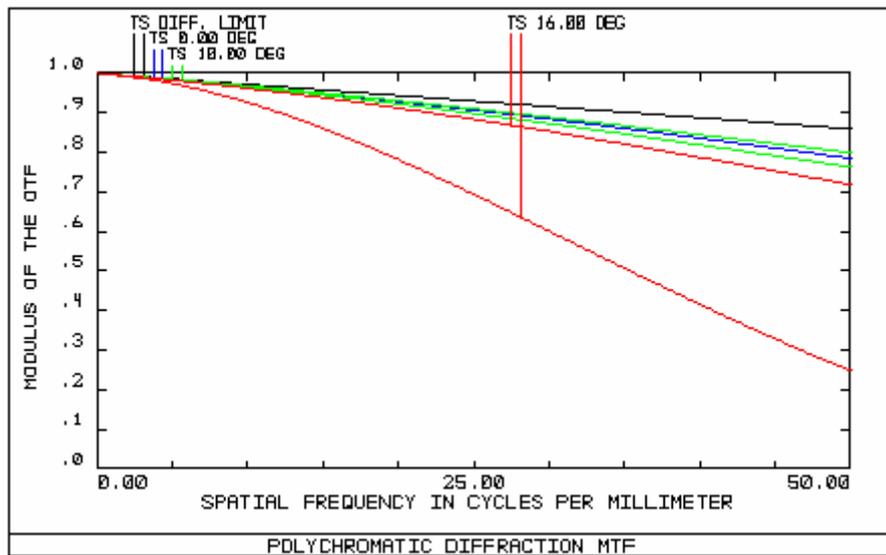


圖 3.13 兩片式複合透鏡在 F 數為 3.5 時的 MTF

由圖(3.12)中可以看到半視場角約在 16 度時，RMS Radius 都在愛里斑以內。以光斑圖來做為標準的時候，F 數為 3.5 時所能達到最佳結果約在半視場角 16 度以內。在圖 3.13 中，可以看到當半視場角超過 16 度時，MTF 在空間頻率 50 line pair/mm 時，就會低於 0.2。如果

增加高視場角的權重，則 MTF 在空間頻率 50 line pair/mm 時高於 0.2 的半視場角就可以提高到 26 度，如圖 3.14 所示。

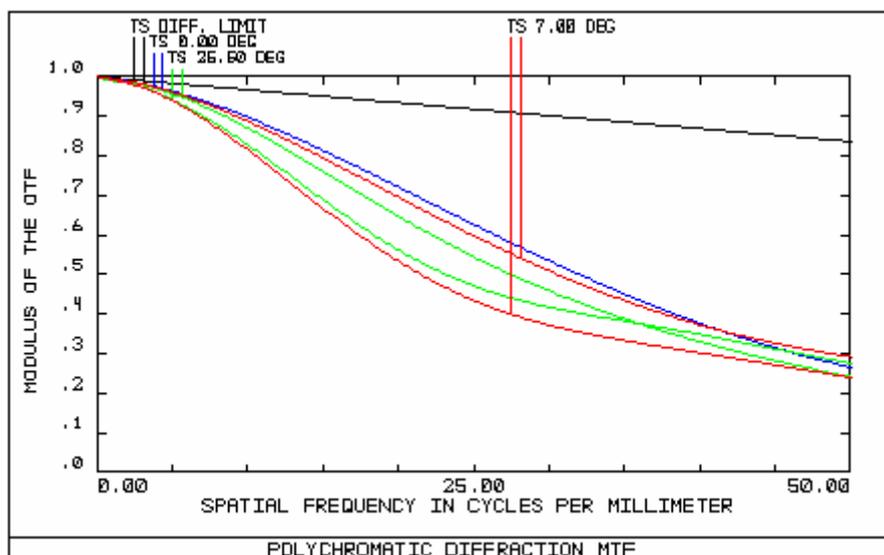
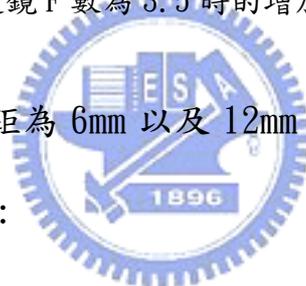


圖 3.14 兩片式複合透鏡 F 數為 3.5 時的增加高視場角權重時的 MTF

接著我也分別整理出焦距為 6mm 以及 12mm 時，和不同 F 數的情況，列於表(3.8)和(3.9)中：



兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)					
F 數	3.5	2.8	2.3	2	1.8
孔徑(mm)	1.7143	2.143	2.6087	3	3.3333
RMS spot size 在繞射極限內的半視場角度	16°	13°	11°	8°	5.5°
MTF>0.2 時的半視場角度	25.5°	23.5°	20°	19°	18.5°

表 3.8 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的最佳單元組件表格

兩片式複合透鏡(焦距為 12mm)					
F 數	3.5	2.8	2.3	2	1.8
孔徑(mm)	3.4286	4.286	5.2174	6	6.6666
RMS spot size 在繞射極限內 的半視場角度	15°	12.5°	10°	7.5°	5°
MTF>0.2 時的半視場角度	24°	23°	18.5°	17°	16°

表 3.9 兩片式複合透鏡(焦距為 12mm)的最佳單元組件表格

我們可以看到在孔徑變大時，達到繞射極限的半視場角度會隨之減小，但半視場角度要比單片複合透鏡要大。而表(3.1~2)和表(3.8~9)整理的數據，將在本論文第五章中應用到數位像機 10 倍光學變焦鏡頭設計之中。

F#=3.5				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-18.735	SF1	1.7143	-4.63E+09
2	-5.2477	PMMA	1.7143	-5.73E+09
3	3.615	DOE	1.7143	1.72E+00
4	-3.614		1.7143	1.71E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-4.80E-03	-4.07E-03	2.44E-03	-5.21E-03
2	-5.40E-03	-2.26E-01	2.32E-01	-7.33E-03
3	1.73E-03	3.64E-03	1.53E-03	-1.90E-04
4	1.71E-03	3.59E-03	1.54E-03	-1.94E-04

表 3.10 F 數為 3.5 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

F#=2.8				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-12.149	SF1	2.143	-6.60E+12
2	-3.383	PMMA	2.143	-5.60E+12
3	-3.383	DOE	2.143	1.86E+00
4	-3.83		2.143	1.92E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-6.73E-03	1.12E-03	-8.33E-04	1.88E-04
2	-1.83E-02	1.49E-02	-9.84E-03	1.28E-03
3	3.36E-04	1.12E-03	1.77E-03	5.20E-05
4	4.81E-03	1.14E-03	1.87E-04	5.20E-05

表 3.11 F 數為 2.8 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

F#=2.3				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-8.19	SF1	2.6087	1.45E+13
2	-2.4	PMMA	2.6087	1.49E+13
3	-4.049	DOE	2.6087	2.05E+00
4	-4.048		2.6087	1.76E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-5.90E-03	1.36E-03	-6.49E-04	1.00E-04
2	-1.45E-02	1.10E-02	-4.49E-03	7.66E-04
3	-1.43E-04	3.16E-04	3.21E-04	1.95E-04
4	-1.28E-03	3.16E-04	3.19E-04	1.87E-04

表 3.12 F 數為 2.3 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

F#=2.0				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-7.46	SF1	3	-2.87E+13
2	-2.27	PMMA	3	-1.39E+14
3	-4.18	DOE	3	1.95E+00
4	-4.187		3	1.81E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-6.16E-03	2.42E-03	-9.27E-04	1.25E-04
2	-2.44E-02	2.18E-02	-8.14E-03	1.36E-03
3	-4.74E-04	3.78E-04	1.93E-04	6.50E-05
4	-6.96E-03	3.26E-04	1.96E-04	6.20E-05

表 3.13 F 數為 2.0 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

F#=1.8				
曲面	Radius	Glass	Diameter	K
1	-7.42	SF1	3.333	-1.11E+15
2	-2.24	PMMA	3.333	-1.36E+14
3	-4.25	DOE	3.333	2.14E+00
4	-4.24		3.333	2.12E+00

曲面	A4	A6	A8	A10
1	-5.91E-03	3.30E-03	-1.16E-03	1.41E-04
2	-2.69E-02	2.90E-02	-9.83E-03	1.26E-03
3	-7.88E-04	1.23E-04	1.70E-04	4.20E-04
4	-7.89E-04	1.10E-04	1.72E-04	4.30E-04

表 3.14 F 數為 1.8 兩片式複合透鏡(焦距為 6mm)的系統參數

表(3.10~14)中的非球面係數可以由第二章中(2.19)式計算出和弛垂函數的關係。

## 第四章 十倍光學變焦系統分析及設計

### 4.1 引言：

變焦光學系統是指利用系統中若干鏡組的移動，使系統焦距產生改變，焦距改變使物像之間倍率產生變化。變焦系統在變焦過程中，焦距在一定範圍內以不同的速度不間斷的進行改變，能像和物體位置不變的情況下，獲得連續變焦，產生畫面縮放的效果。此畫面縮放的效果，在使用上帶來了許多的便利，目前已普遍使用在數位相機、照相手機、攝影機等許多光學系統上。因此，變焦系統的設計是現代光學系統中一個重要課題。



### 4.2 兩群透鏡光學變焦系統：

變焦光學系統的高斯設計，是利用薄透鏡以及近軸公式，依據系統規格要求，安排合適的鏡組數目與各鏡組焦距，並求解變焦時各鏡組間距，以及合理的滑動鏡組軌跡曲線。在設計上，先針對結構較簡單的兩群透鏡的光學系統來做分析。而在之後不論三群或四群的變焦系統，都可以將其中兩群視為組合鏡組，利用組合鏡組中的兩群透鏡移動來達到變焦的結果，所以在論文中先分析兩群透鏡的光學系統，再將此兩群視為組合透鏡應用到十倍光學變焦系統中。

## 4.2.1 符號定義：

首先對相關公式的符號依如下定義(見圖 4.1)：

- (1) 光線自左向右。
- (2) 在鏡片左邊，距離為負，在鏡片右邊，距離為正，所以  $l$  為負、 $l'$  為正。
- (3)  $u$  與  $u'$  是光線分別在物空間和像空間與光軸的夾角，光軸往光線方向，順時針角度銳角為正，逆時針角度銳角為負。圖中  $u$  為負、 $u'$  為正。
- (4)  $h$  是光線在透鏡上的高度，在透鏡上方取正、下方取負；同理，對於物高和像高而言，在光軸上方取正值、下方則取負值。
- (5)  $n_1$ 、 $n_2$  與  $n_3$  分別為物空間、透鏡本身與像空間的折射率。
- (6)  $\Phi$  與  $F$  分別為透鏡的光焦度與焦距。
- (7) 匯聚系統的焦距為正，發散系統之焦距為負。
- (8) 曲率中心在曲面之右方為正，在其左方為負。

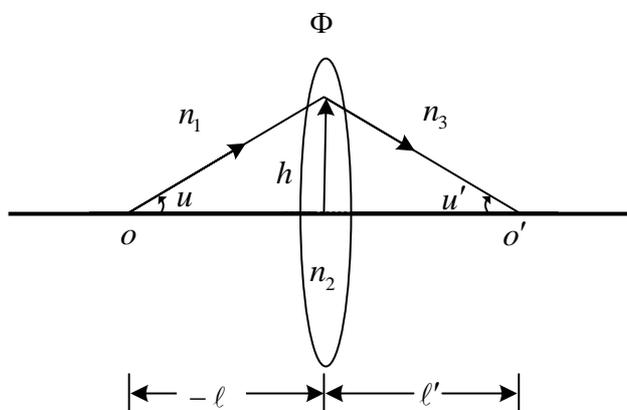


圖 4.1 符號定義圖

探討薄透鏡之透鏡方程 Gauss 公式如下(假設  $n_1=n_3=1$ )：

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \phi = \frac{1}{F} \quad (4.1)$$

而橫向放大率  $M$  定義為

$$M = \frac{l'}{l} \quad (4.2)$$

由(4.1)式和(4.2)式，可得

$$l' = (1-M)F, \quad l = \left(\frac{1}{M} - 1\right)F \quad (4.3)$$

透鏡的物像距離為

$$T = l' - l = \left(2 - M - \frac{1}{M}\right)F \quad (4.4)$$

#### 4.2.2 對於有限物距的兩群透鏡光學系統

如圖 4.2 所示，變焦時物像距離必須保持定值，相關公式如下：

$$l_1 = \left(\frac{1}{M_1} - 1\right)F_1 \quad (4.5)$$

$$l'_1 = (1 - M_1)F_1 \quad (4.6)$$

$$l_2 = \left(\frac{1}{M_2} - 1\right)F_2 \quad (4.7)$$

$$l'_2 = (1 - M_2)F_2 \quad (4.8)$$

$$d_1 = l'_1 - l_2 \quad (4.9)$$

$$T_{12} = l'_2 - l_1 + d_1 = \left(2 - M_1 - \frac{1}{M_1}\right)F_1 + \left(2 - M_2 - \frac{1}{M_2}\right)F_2 \quad (4.10)$$

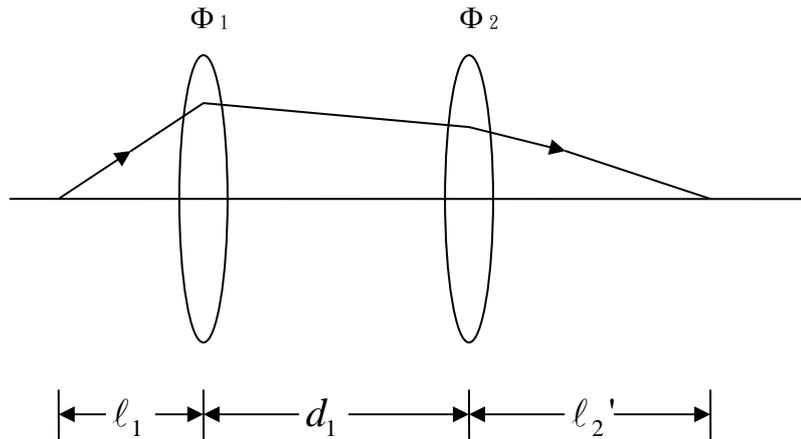


圖 4.2 兩群透鏡之有限物距變焦系統

其中  $T_{12}$  為物像距離， $F_1$  與  $F_2$  為透鏡 1 與透鏡 2 之焦距，此為已知固定不動， $M_1$  與  $M_2$  分別為透鏡 1 與透鏡 2 的放大倍率，此為變動之值。當變焦時，改變  $l_1$  代入(4.5)式可得  $M_1$ ，再將其代入(4.10)式可得  $M_2$ ，最後將所得的這些值代入(4.6)至(4.9)式，即可計算得出所要的相關係數值如  $d_1$  與  $l_2'$ 。

### 4.3 四群鏡組的十倍光學變焦系統

在本論文中，設計了一個由四群透鏡(正負正正)所組成的光學變焦系統。在設計中如果沒有加上一些限制條件，系統會存在許多組解，所以在設計上，加上了一限制條件，此限制條件為第一群和第四群為固定鏡組，組合鏡組由第二和第三群所構成，以下將探討此系統結構。

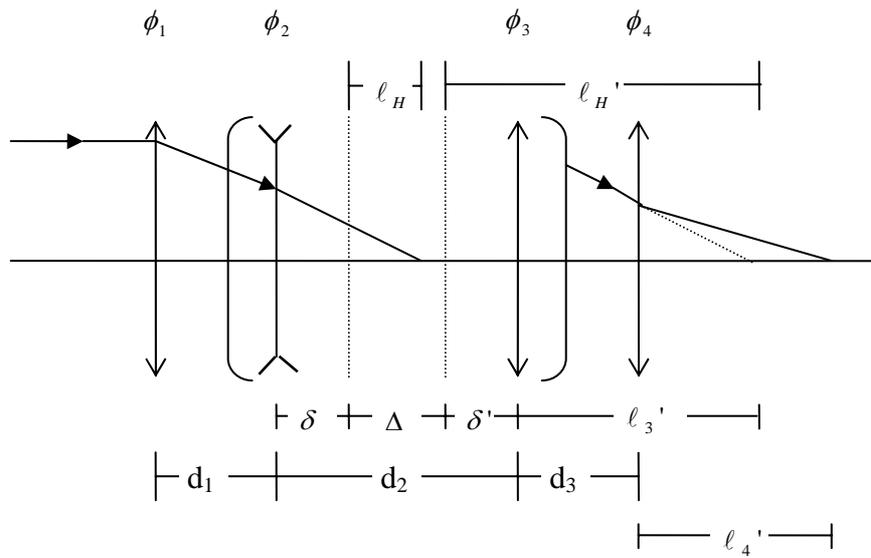


圖 4.3 第一與第四群固定，第二與第三為組合透鏡的變焦系統

如圖 4.3 所示，系統的物像距離  $T_{23}$  為：

$$\begin{aligned}
 T_{23} &= \left(2 - M_2 - \frac{1}{M_2}\right)F_2 + \left(2 - M_3 - \frac{1}{M_3}\right)F_3 \\
 &= \left(2 - M_{23} - \frac{1}{M_{23}}\right)F_{23} + \Delta
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

(4.11) 式中  $M_{23}$  為第二群和第三群組合透鏡的放大率，而系統的其他參數逐一列在下列式子中。

第二群透鏡到組合鏡組第一主平面的距離：

$$\delta = \frac{\phi_3 d_2}{\phi_{23}}
 \tag{4.12}$$

組合鏡組第二主平面到第三群透鏡的距離：

$$\delta' = -\frac{\phi_2 d_2}{\phi_{23}}
 \tag{4.13}$$

組合鏡組兩主平面間的距離：

$$\Delta = d_2 + \delta' - \delta = -\frac{\phi_2 \phi_3 d_2^2}{\phi_{23}} \quad (4.14)$$

第一群透鏡到組合鏡組第一主平面的距離：

$$D_1 = d_1 + \delta = \ell_1' - \ell_H \quad (4.15)$$

組合鏡組的物距：

$$\ell_H = \left(\frac{1}{M_{23}} - 1\right)F_{23} = \ell_1' - D_1 \quad (4.16)$$

組合鏡組的像距：

$$\ell_H' = (1 - M_{23})F_{23} = \ell_3' - \delta' \quad (4.17)$$

系統的焦距：

$$F = F_1 M_{23} M_4 \quad (4.18)$$

第四群鏡組的放大倍率：

$$M_4 = \frac{\ell_4'}{\ell_3'} \quad (4.19)$$

其中系統的物像距( $T_{23}$ )及第四群透鏡的放大率( $M_4$ )為給定系統的

$\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$ 、 $\phi_4$ 後就可以得到的值。將(4.14)式帶入到(4.11)式，可以得到：

$$T_{23} = \left(2 - M_{23} - \frac{1}{M_{23}}\right)F_{23} - \frac{\phi_2\phi_3d_2^2}{\phi_{23}} \quad (4.20)$$

$$\phi_{23} = \phi_2 + \phi_3 - d_2\phi_2\phi_3 \quad (4.21)$$

系統在變焦時， $M_{23}$ 改變， $d_2$ 可由下列式子得到：

$$d_2 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

其中

$$\begin{aligned} a &= \phi_2\phi_3 \\ b &= -T_{23}\phi_2\phi_3 \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$c = T_{23}(\phi_2 + \phi_3) - \left(2 - M_{23} - \frac{1}{M_{23}}\right)$$

在知道 $d_2$ 後，再由(4.15~17)式，可以計算出 $D_1$ 、 $d_1$ ，而由於第一群和第四群是固定的，所以 $d_1 + d_2 + d_3$ 是固定值，所以知道 $d_1$ 、 $d_2$ 後，就可以知道 $d_3$ 的值。圖(4.4)為一模擬的軌跡圖形。

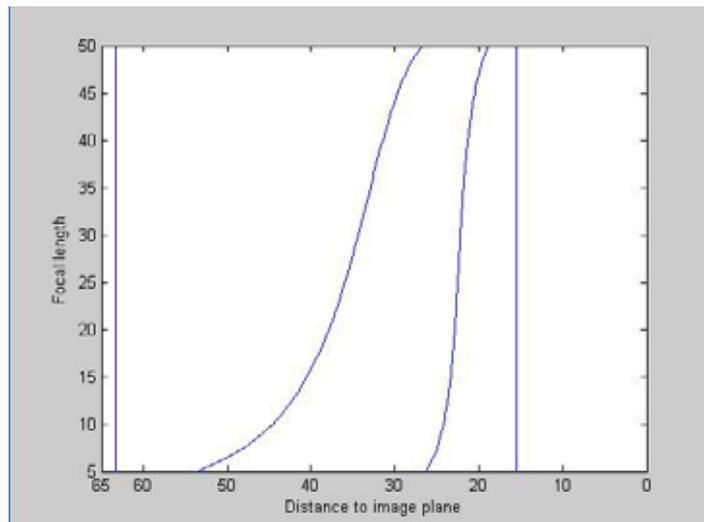


圖 4.4 四群透鏡變焦軌跡圖，第一、四群固定不動，變倍比 10:1， $F_1=39.7435\text{mm}$ 、 $F_2=-7.50043\text{mm}$ 、 $F_3=14.3799\text{mm}$ 、 $F_4=55.3522\text{mm}$

# 第五章 繞射/折射複合元件應用在十倍 光學變焦鏡組的設計

## 5.1 引言：

由上一章節的描述，可以知道光學變焦的理論，接下來本章節將利用第三章中所建立的繞射/折射複合元件最佳化的結果，應用到數位相機的 10 倍光學變焦鏡頭的設計，來觀察複合元件應用到光學系統中是否可以達到之前最佳化所達到的結果。而在數位相機和傳統相機的比較上，數位相機需要較小的 F 數，較短的焦距和較長的後焦距，這些在設計的時候必須要注意到。



## 5.2 初始架構：

採用上一章最後一範例的理論模擬，來設計一個使用在數位相機系統的 10 倍光學變焦鏡組，最大的視場角約為 50 度，焦距為 5.048mm~50mm，F 數為 2.8~3.6，感測器端採用 1/4 吋的 CCD。期望能夠在第三章的基礎上設計出一個比市面上所使用的片數較少且系統複雜度較小及重量較輕的鏡組。由於光學鏡頭高斯結構的安排是光學系統設計的基礎，高斯設計的好壞，往往直接影響系統的成像品質。由於四群 10 倍光學變焦系統存在著許多組的解，所以一開始，

我參考了美國專利 USP9157494 的系統參數值。

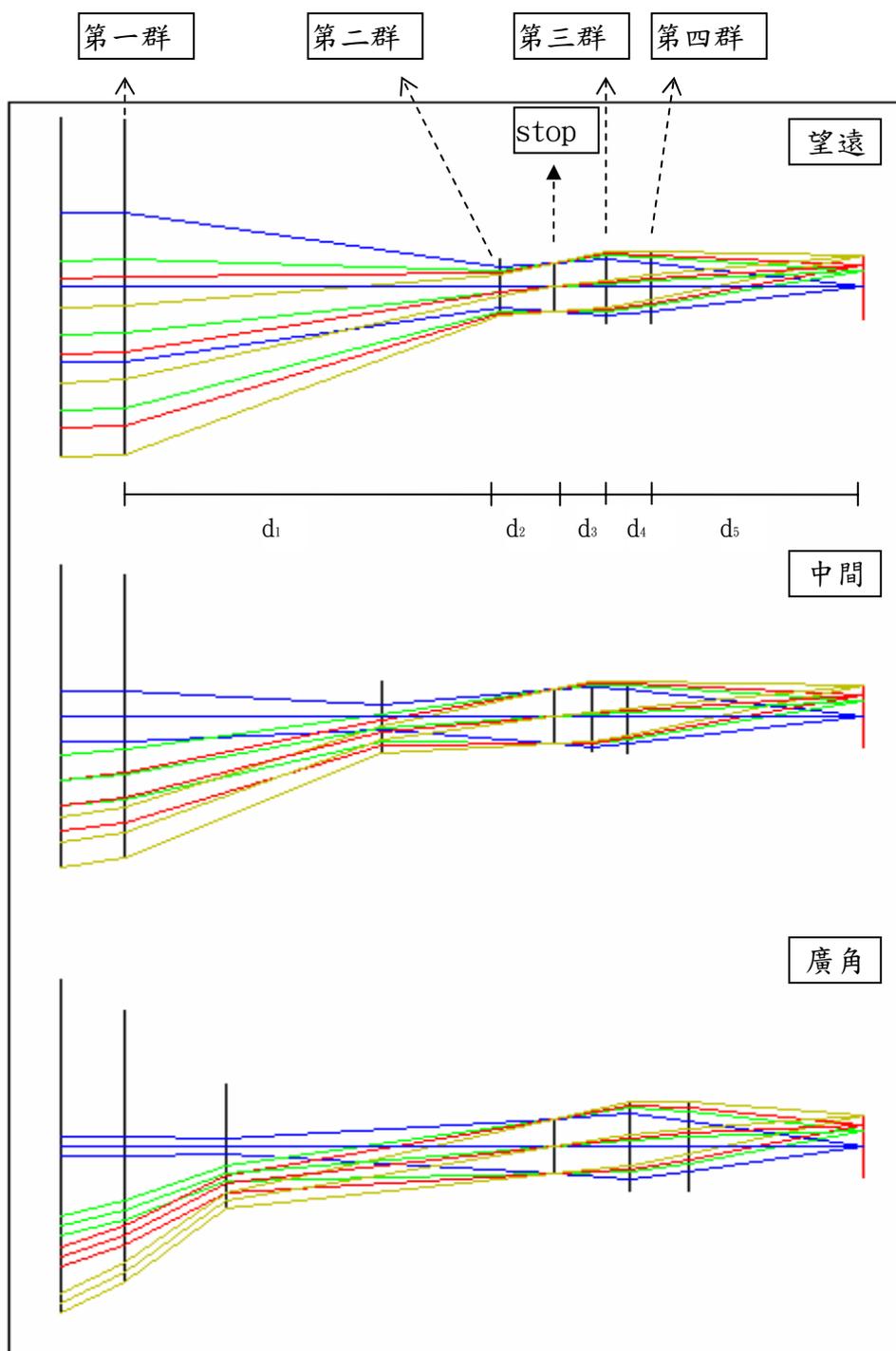


圖 5.1 專利 USP61574942 薄透鏡光線追跡圖

	EFL	$f_{G1}$	$f_{G2}$	$f_{G3}$	$f_{G4}$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
廣角	5.048	39.7435	-7.50043	14.3799	55.3522	7.753	25.057	5.752	4.44	13.483
中間	17					19.674	13.136	2.77	2.808	18.096
望遠	50					28.651	4.159	3.867	3.437	16.371

表 5.1 專利 USP61574942 系統參數值 單位(mm)

在此專利中，和第四章中一樣是採用四群(正負正正)的架構，但在專利中是滑動第二、三、四群，並固定第一群及光闌的方式，和我在第四章中分析的架構並不完全相同。在理論上可以發現如此架構會產生多種變化的滑動軌跡，這不利於我們分析系統的初始架構，所以我僅參考了其中第一至第四群的焦距，以及系統各個組態的焦距，來做為本論文系統中各群透鏡焦距的初始值。接著再利用第四章中的理論，固定第一和第四群透鏡以及光闌的位置，用第二第三群透鏡來做為變焦鏡組，如此可以得到系統的初始值，將初始值帶入到光學軟體 Zemax 中並優化後，得到如表 5.2 之值。薄透鏡光線追跡圖如圖 5.2 所示。其中因為第四群已經改變為固定鏡組，所以在表 5.2 中  $d_5$  的值是固定的。

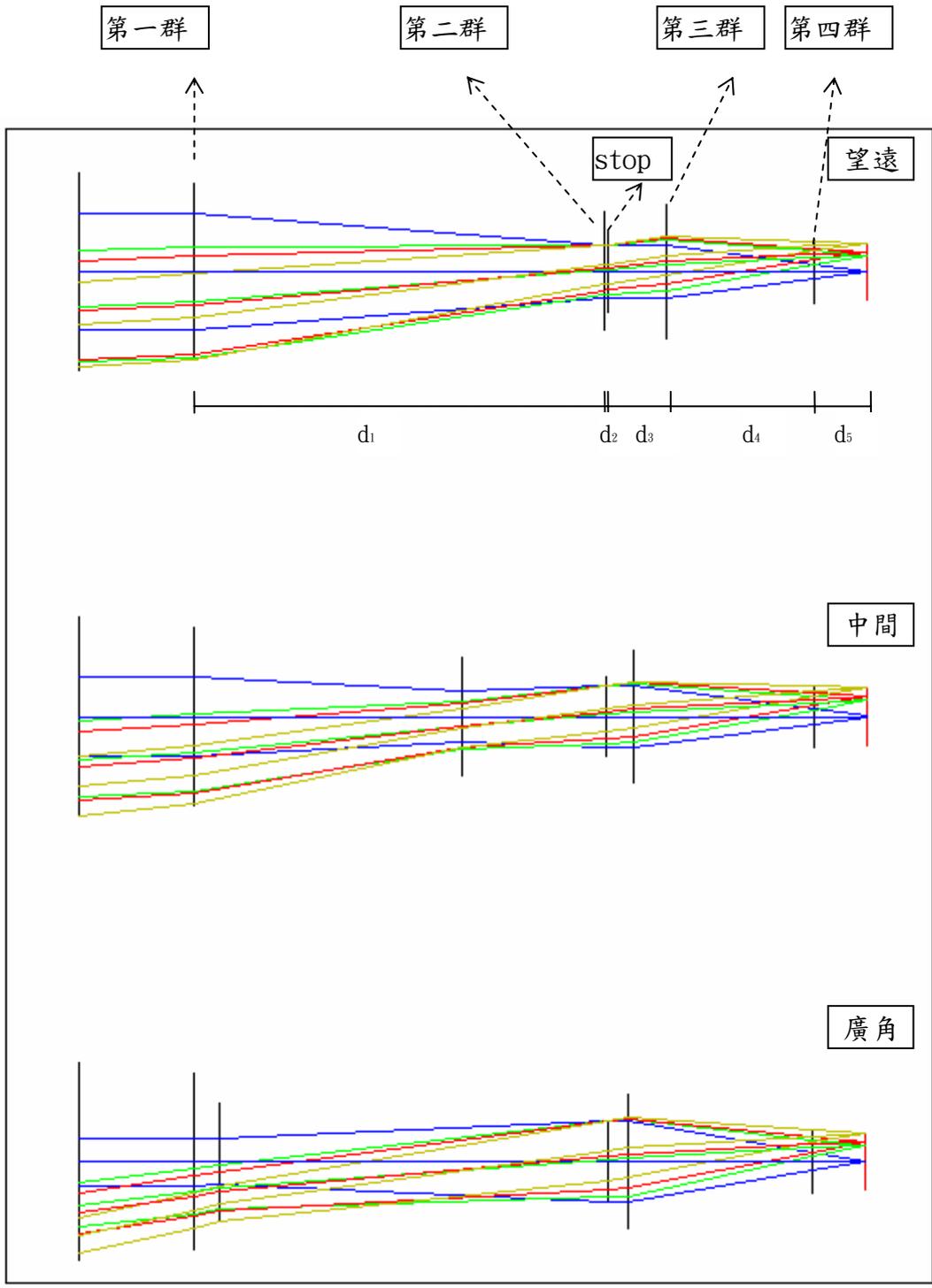


圖 5.2 薄透鏡光線追跡圖

	EFL	$f_{G1}$	$f_{G2}$	$f_{G3}$	$f_{G4}$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$
廣角	5.048	39.7435	-7.50043	14.3799	55.3522	10.319	22.607	9.573	0.215	15.529
中間	17					18.039	14.888	0.823	8.985	
望遠	50					28.227	4.699	3.529	6.258	

表 5.2 系統參數值 單位(mm)

### 5.3 將繞射/折射複合元件應用在系統上：

有了 10 倍變焦光學系統的基本架構後，接下來我將從第一群開始，把之前設計的結果逐一應用到這個系統中。在初始架構上，因為每一群都是由單一薄透鏡所組成，薄透鏡視為理想透鏡，如果規格上符合的話，將用前面所設計的繞射極限複合元件取代單一群的鏡組，以達到前述由薄透鏡所設計出來的結果。但在實際應用上，遇到了一些困難，其中從薄透鏡光線追跡圖中，可以看到第一群以及第二群的收光角度過大，已經超過了前面設計的理想複合元件的角度，而且在第二群中，可以發現收光後需要很大的偏折，這就需要高折射率的材料，否則無法達到系統所需的條件。此外從圖 5.3 中可以看到第一群的孔徑值很大，造成 F 數太小，也超過了前面設計所能達到理想複合元件的規格。

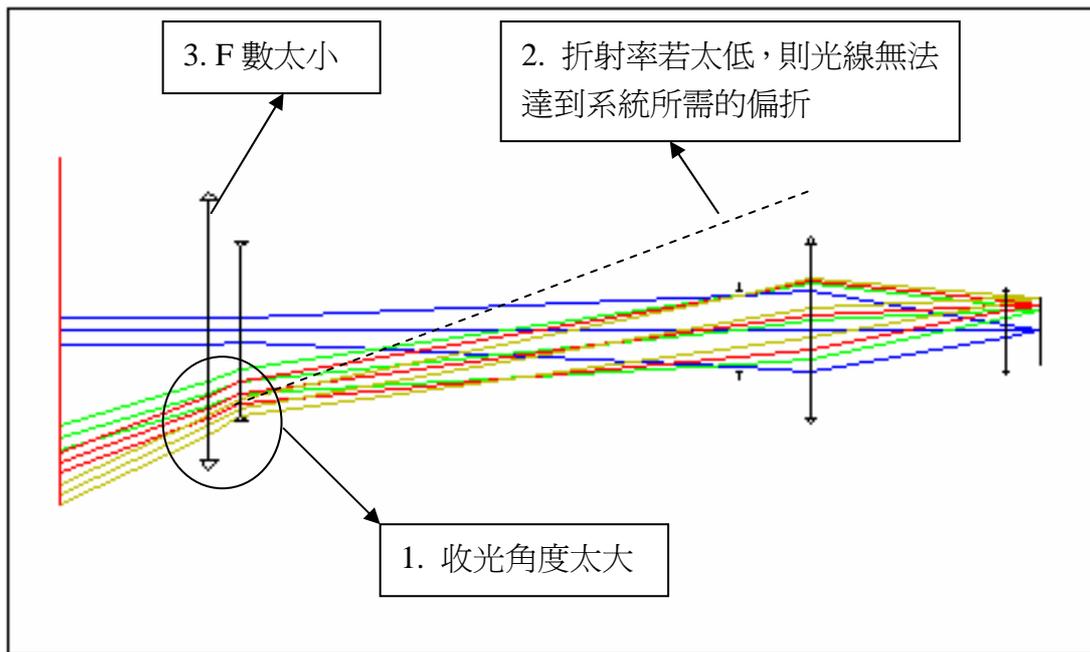


圖 5.3 設計時所遭遇到的問題

### 5.3.1 複合元件用於第一群透鏡：

在將複合元件應用到初始系統之前，我先加入一低通濾波片，它的作用是提高系統成像整體分辨率把無貢獻的高頻部分過濾掉，使光學系統的調制傳遞函數曲線(MTF)呈現出如圖 5.4 所示的狀態。低通濾波片通常用兩片石英晶體制成，第一片晶體的表面鍍有光學增透膜用來降低入射光能量的損耗，第二片晶體的表面鍍有紅外濾光膜，以減小紅外輻射對光電探測元件的影響。數位相機系統也由於需要放置濾波片，所以需要較長的後焦。

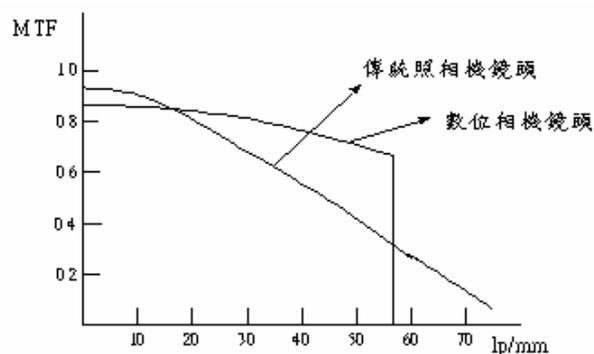


圖 5.4 傳統照相機與數位相機光學系統 MTF 的比較

接著來看第一群透鏡組，因為要負責收光，而且必須將光線偏折至離光軸越近越好，但因為有了上述的問題，所以可以發現如果僅用 PMMA 來做為複合元件的材質，是無法達到系統的需求。利用第三章所設計兩片式的複合元件，也無法達到系統的規格，所以在開始的設計上，將前面雙片式的複合元件中的玻璃材質 SF1(Index 1.71736 Abbe 29.51)換成 SCHOT 公司所生產的 LASF35(Index 2.02 Abbe 29.1)，而重新設計後的鏡組結果示於圖(5.5~7)：

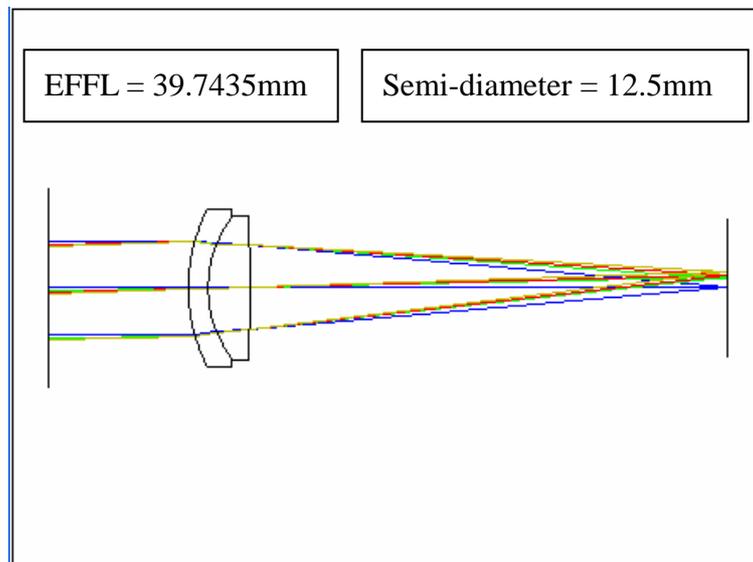


圖 5.5 第一群鏡組的結構圖

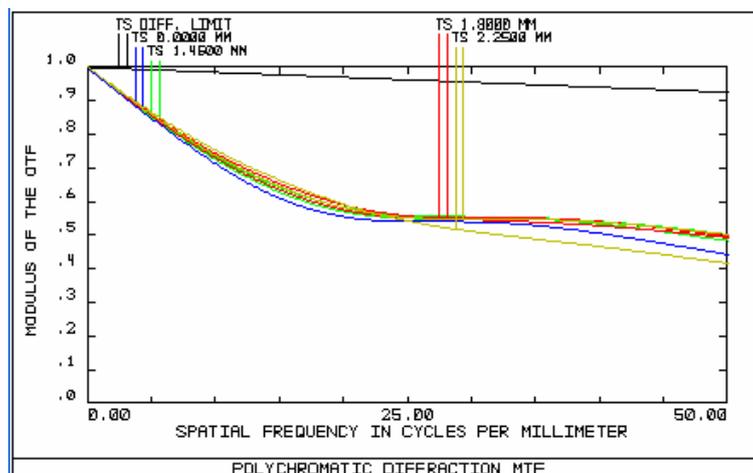


圖 5.6 第一群鏡組的 MTF

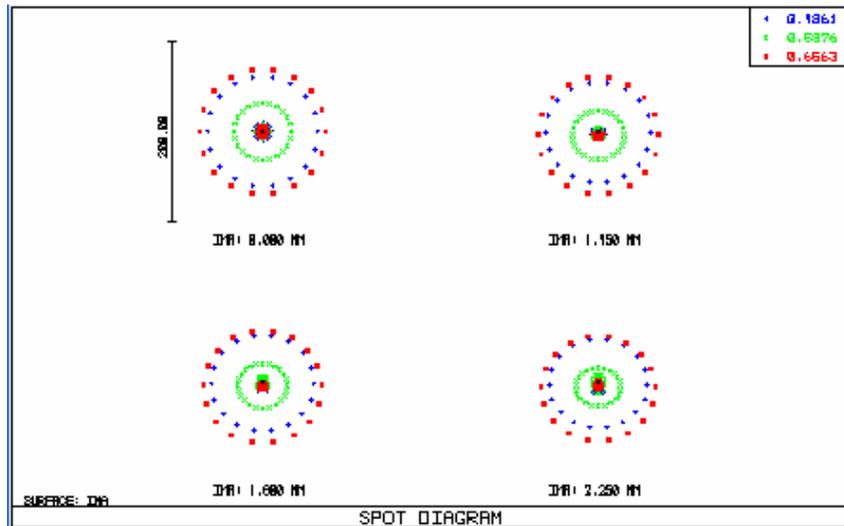


圖 5.7 第一群鏡組的光斑圖

由結果中可以看到雖然開始結果還算不錯，但因為 F 數太小，所以無法達到繞射極限。但可以嘗試先將光線收進所需的角度的內，再利用後面幾群相互間的互補來消像差。接著我將把第一群帶入到初始系統，來觀察其結果：

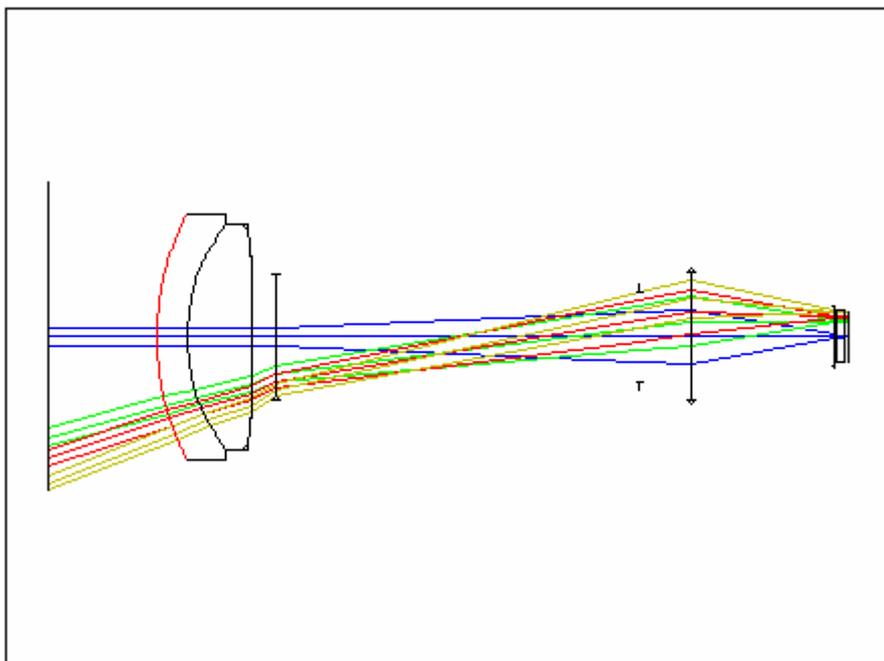


圖 5.8 將第一群帶入後的廣角組態結構圖

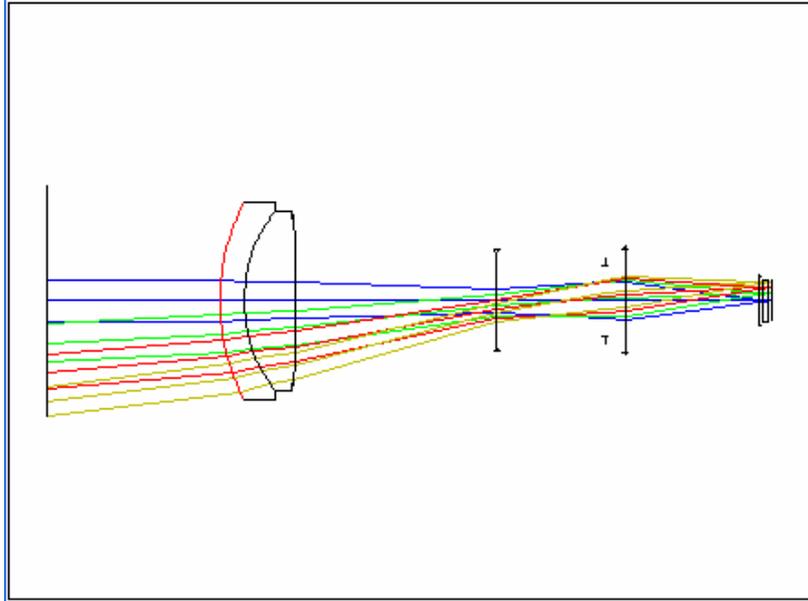


圖 5.9 將第一群帶入後的中間組態結構圖

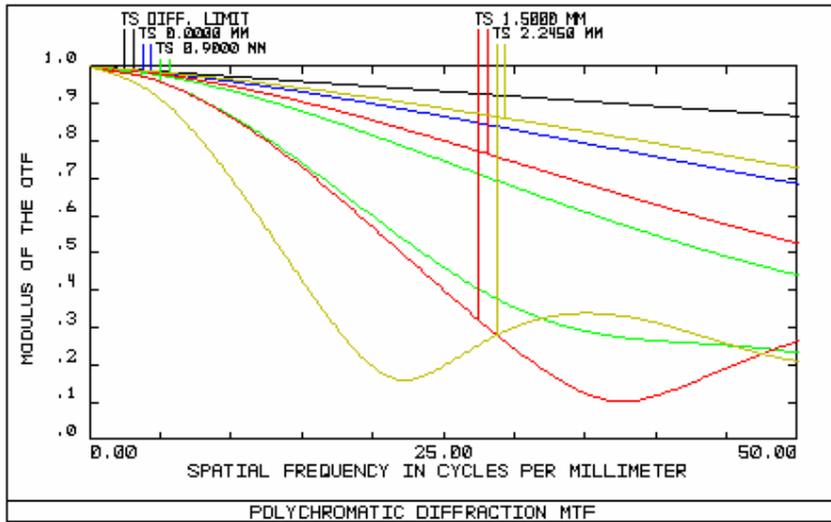


圖 5.10 將第一群帶入後的廣角組態 MTF

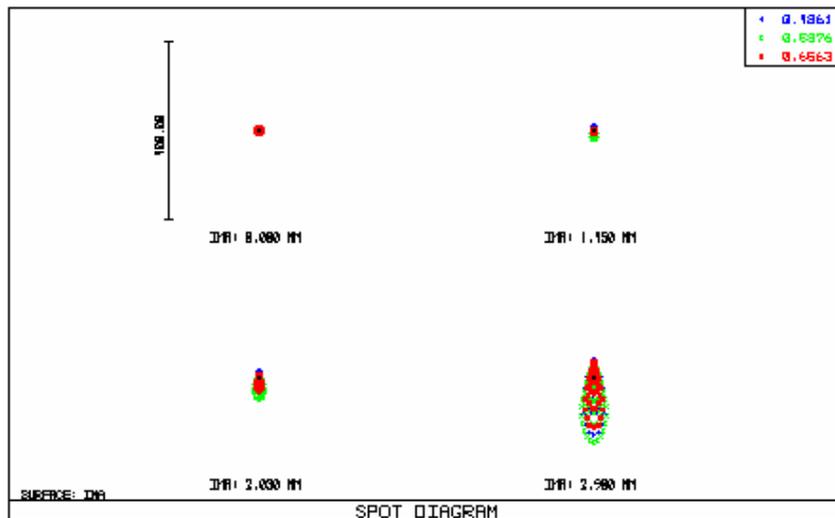


圖 5.11 將第一群帶入後的廣角組態光斑圖

在圖 5.9 中，可以看到第一群用了高折射率的材料後，可以將光線收進離光軸較近的位置，進而減輕第二群負透鏡使光線偏折的負擔，這樣第二群就不需要用到高折射率的材料。但從圖 5.10 及圖 5.11 中，發現在高視場角的時候，成像結果並非太好，推論應為初始的設計並沒有完全符合系統的規格，這其中包括了光線經過第一群透鏡時，偏折的角度並沒有如圖 5.2 中的系統那麼多，也因此造成了第三群的收光角度較圖 5.2 中的系統增加，而在中間及望遠組態的時候，高視場角的成像結果也並不如原來的架構好。為了改善第一群在這個系統上的結果，利用 Zemax 對於高視場角進行了優化，而優化後的結果如圖

(5.12~13)所示：

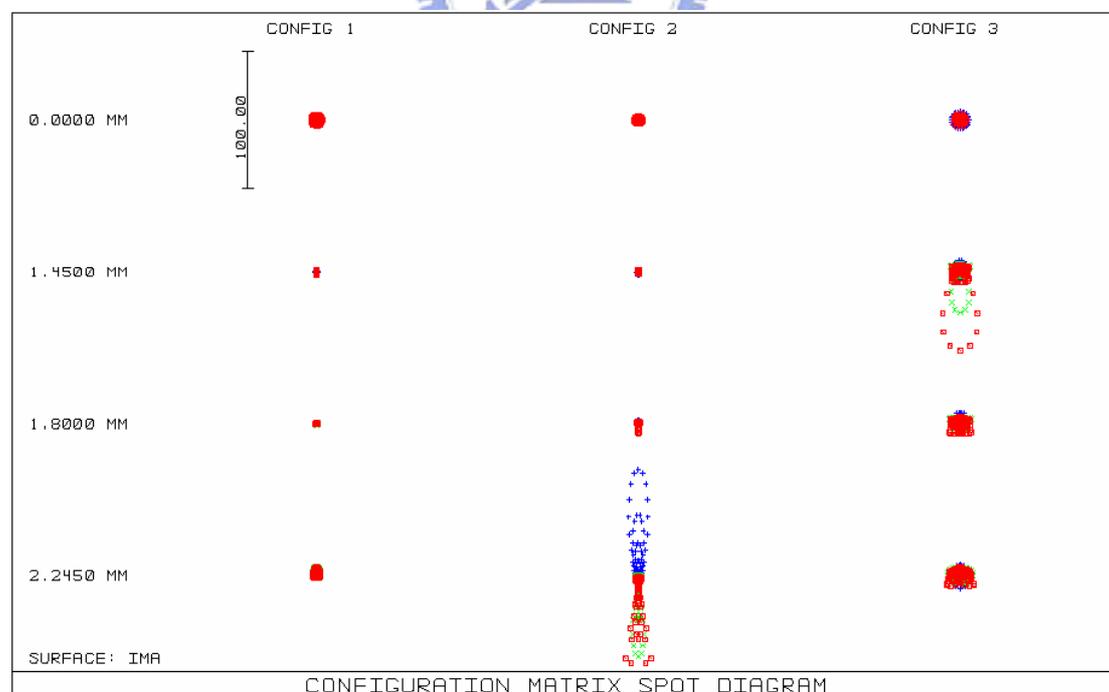


圖 5.12 第一群帶入並優化後各組態的光斑圖(由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)

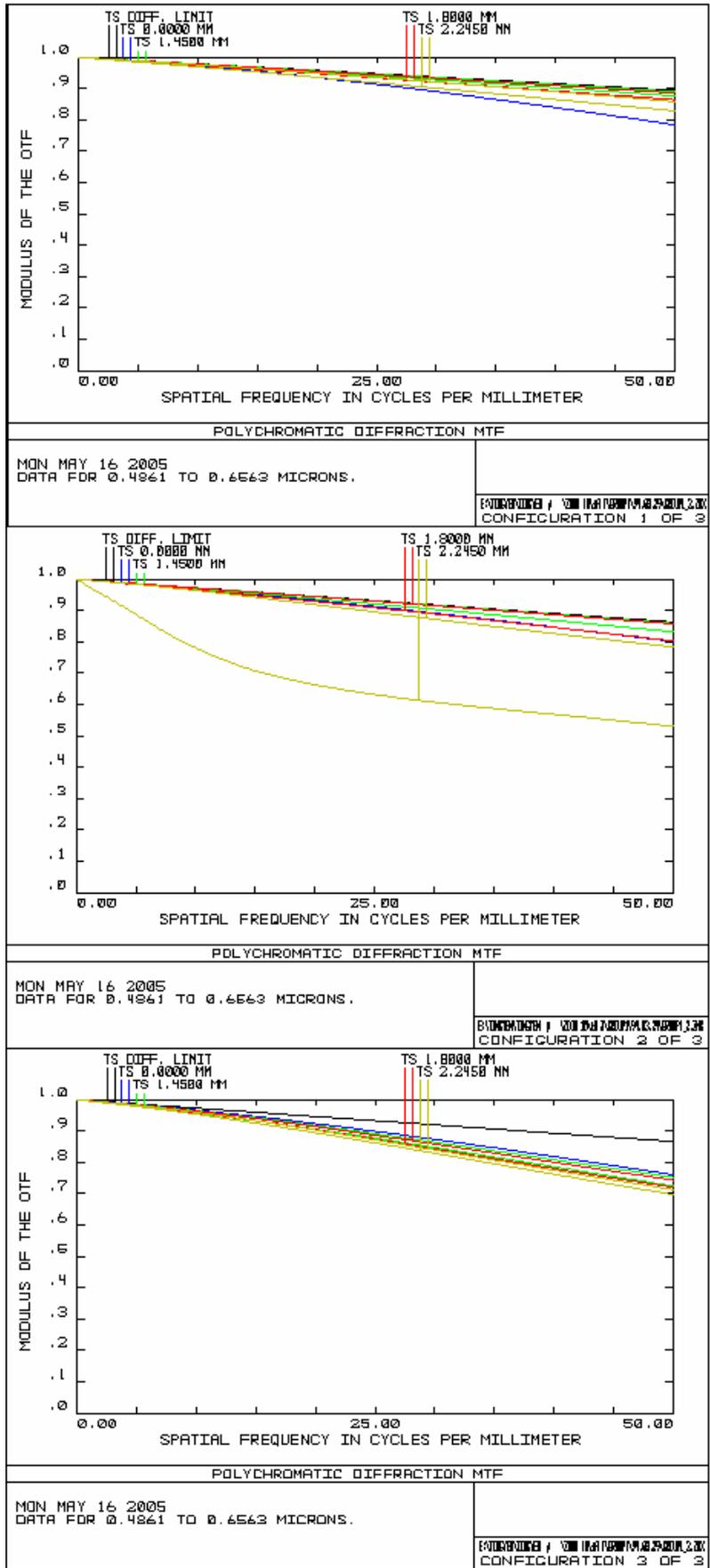


圖 5.13 第一群帶入並優化後各組態的 MTF

在圖 5.12 及圖 5.13 中可以看到優化後各個組態的成像品質都還算不錯，就以此結果做為基礎，然後將第二群負透鏡組用於系統上。

### 5.3.2 複合元件用於第二群透鏡：

由於前面複合元件的設計，沒有針對負透鏡組來做設計，所以在必須先針對光焦度為負的複合透鏡來做設計，下面來設計了一個孔徑值為 14.34mm，焦距為-7.5mm 之透鏡，材料仍然利用 PMMA，設計結果示於圖(5.14)。

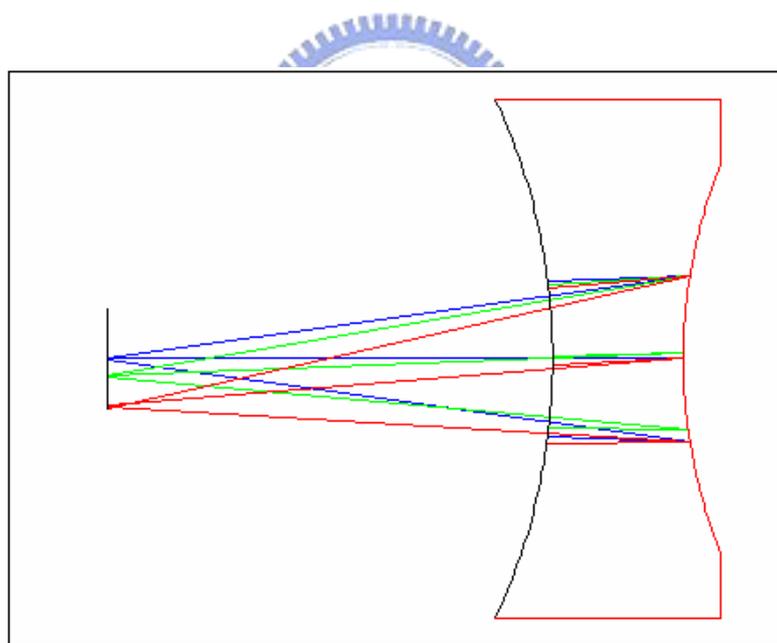


圖 5.14 第二群負透鏡結構圖

在圖 5.14 及圖 5.15 中，相似第一群透鏡的情況因為孔徑較大，焦距較小而造成 F 數太小，在視場角較大時造成成像品質的下降，但成像結果仍然是可以接受的。

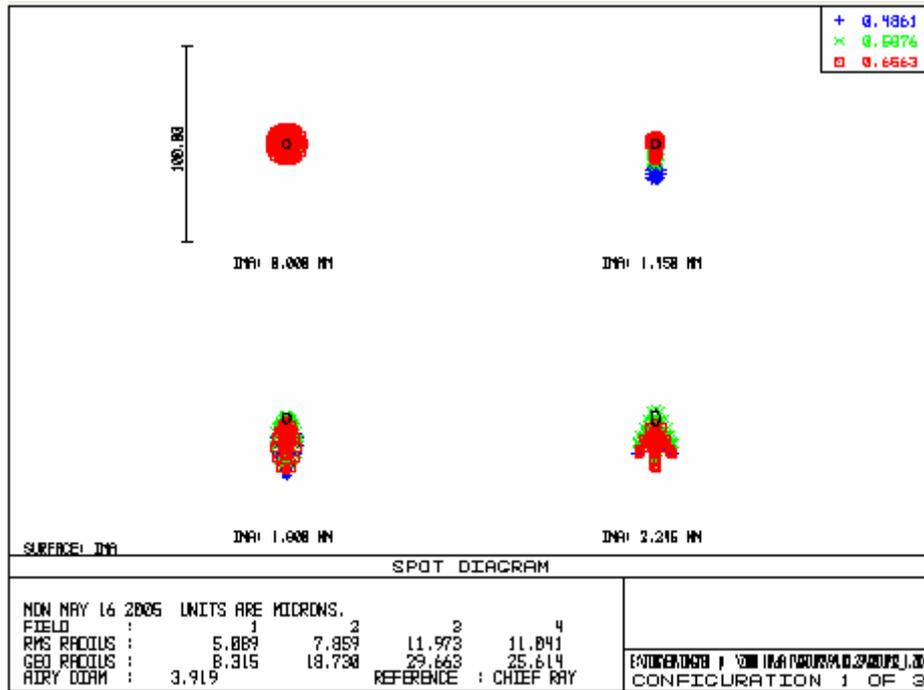


圖 5.15(a) 第二群負透鏡光斑圖

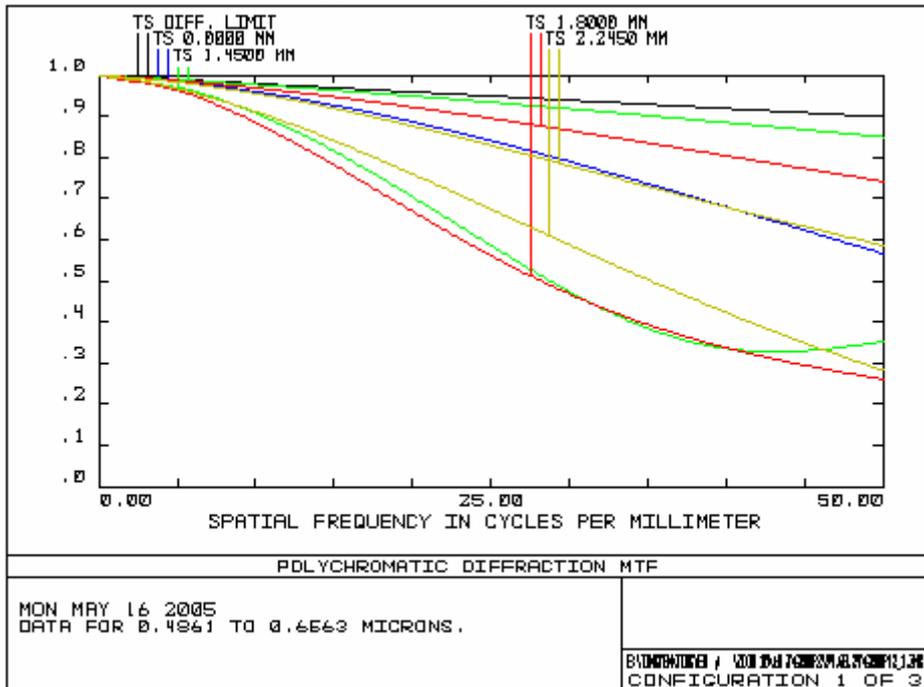


圖 5.15(b) 第二群負透鏡 MTF

將此結果帶入到系統中，結果示於圖(5.16~17)。

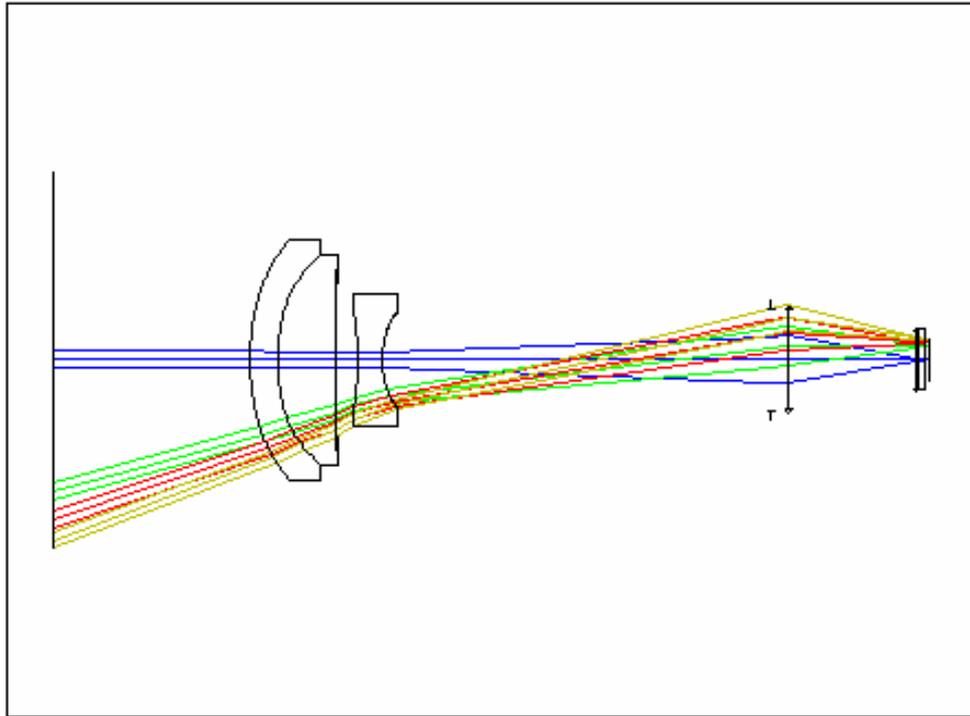


圖 5.16 第二群負透鏡帶入後廣角組態的結構圖

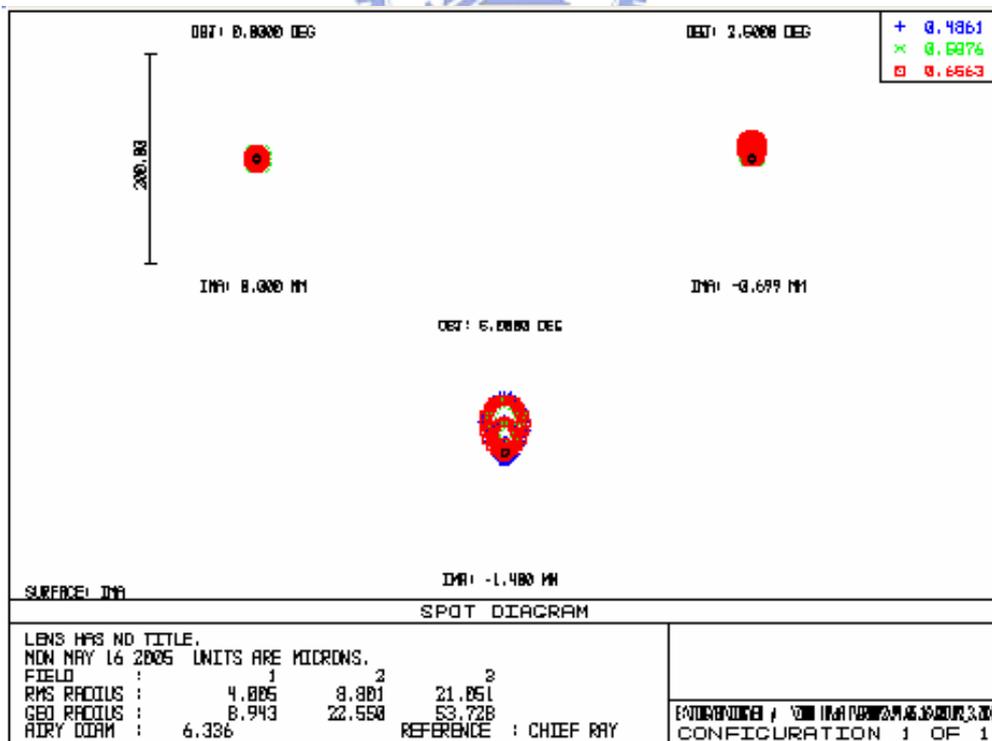


圖 5.17(a) 第二群負透鏡帶入後的光斑圖

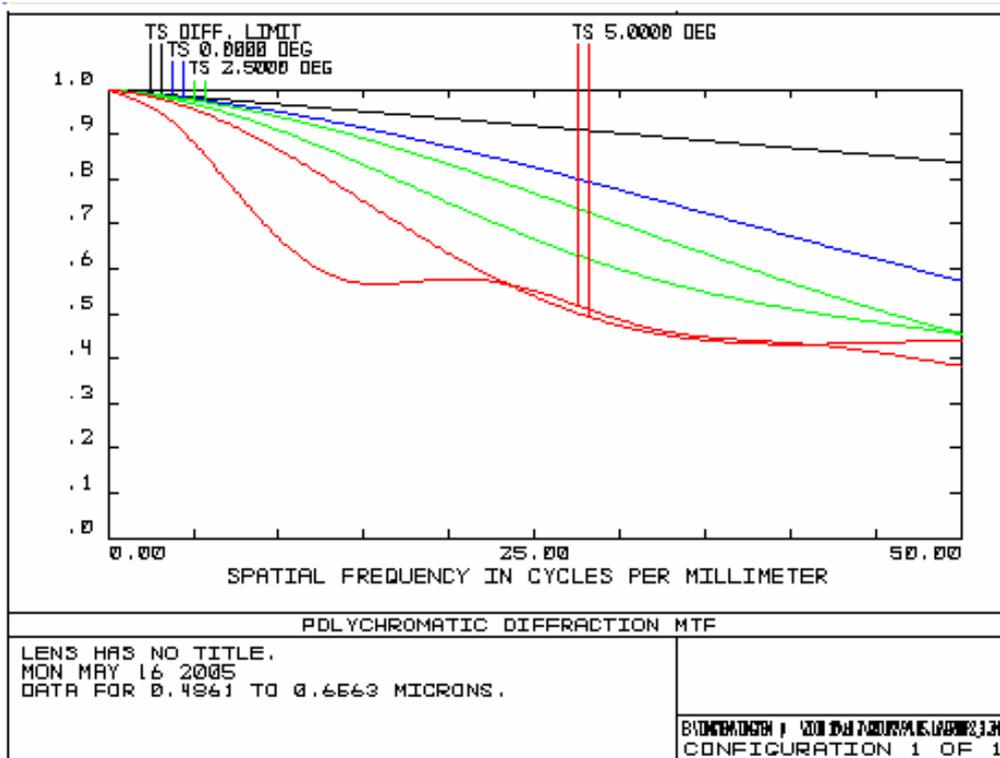


圖 5.17(b) 第二群負透鏡帶入後的 MTF

由圖 5.17 中可以發現在光線平行入射時，系統的光斑圖和 MTF 都可以有不錯的結果，但隨著視場角的增加，成像的品質就越來越不好，這和之前在複合透鏡設計時的結果是一致的。此外，這個負透鏡，在光線的路徑上，也並沒有完全和圖 5.8 的系統一樣。所以相似於第一群的方法，利用光學軟體 Zemax 來優化，讓光線入射到第三群的角度能夠減小，讓整個系統可以達到最佳的結果且利於以後的設計，其優化後的結果示於圖(5.18~20)。

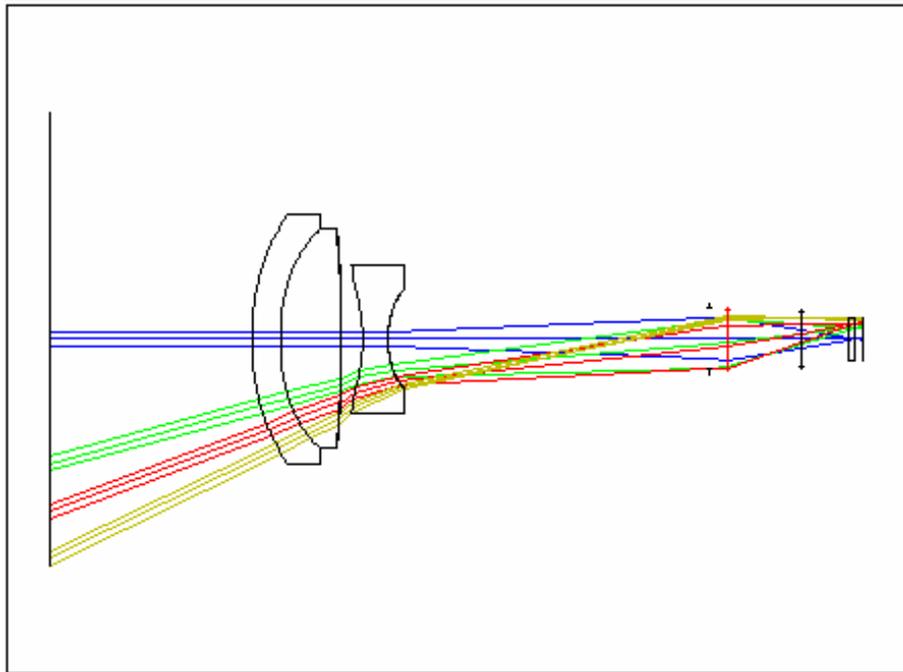


圖 5.18 第二群負透鏡帶入並優化後廣角組態的結構圖

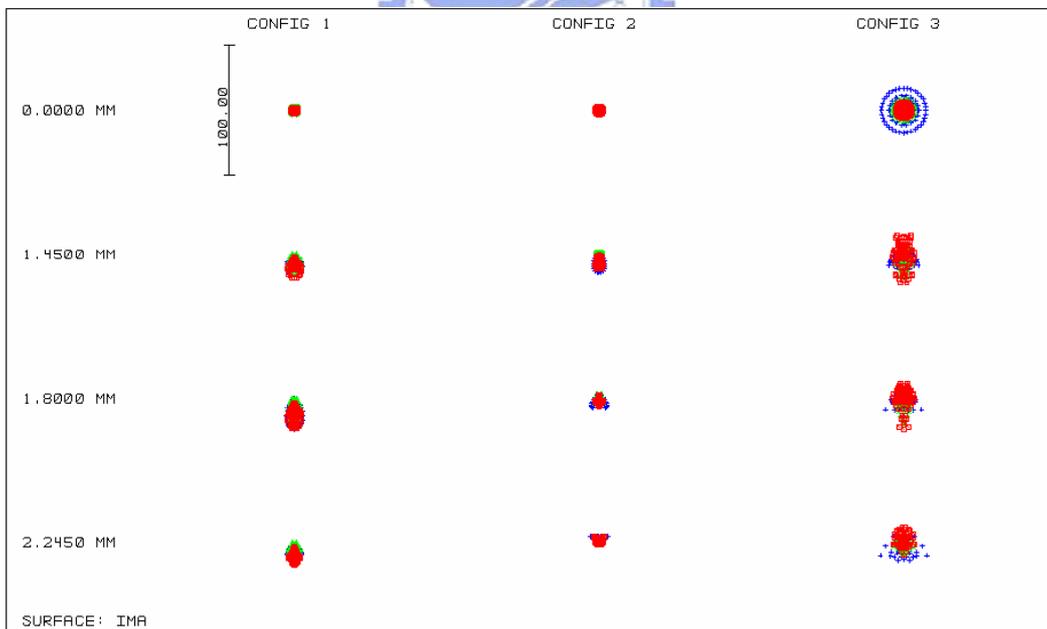


圖 5.19 第二群負透鏡帶入並優化後各組態的光斑圖

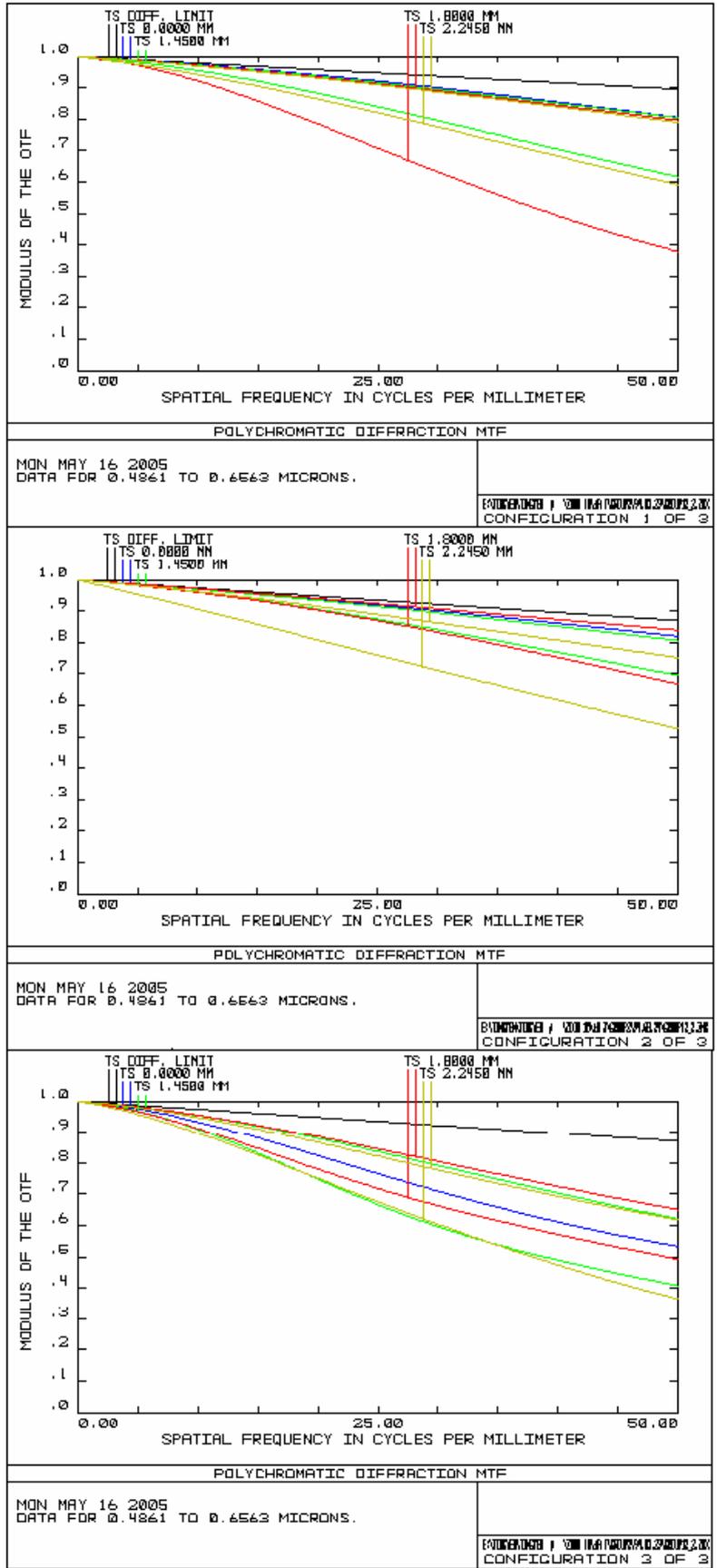


圖 5.20 第二群負透鏡帶入並優化後各組態的 MTF

由圖 5.18，可以看到在優化過後，光線入射到第三群的角度已經減小了許多，在圖 5.19 中看到光斑都在  $100\ \mu\text{m}$  以內。由圖 5.20 發現 MTF 在空間頻率為  $50\ \text{lps}/\text{mm}$  時都有在 0.3 之上。

### 5.3.3 複合元件用於第三群透鏡：

在前兩群透鏡組合成功引入到 10 倍變焦光學系統後，從圖 5.18 中可以看到第三群透鏡組的規格(焦距約為 15mm，孔徑約為 6mm，最大入射半視場角度約為 10 度)大致上都符合於本論文第三章中的設計，不需要再像前兩群重新設計。下面，我將直接利用前面所建立出來的規格及程式到第三群中，來驗證所建立出來的規格是否真的可以應用到光學系統之中，結果示於圖(5.21~23)。

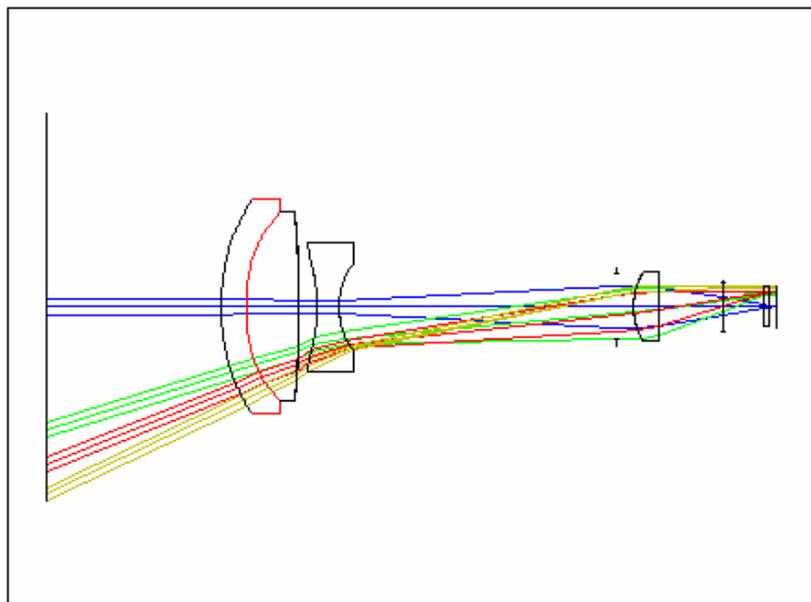


圖 5.21 第三群透鏡帶入到系統後廣角組態的結構圖

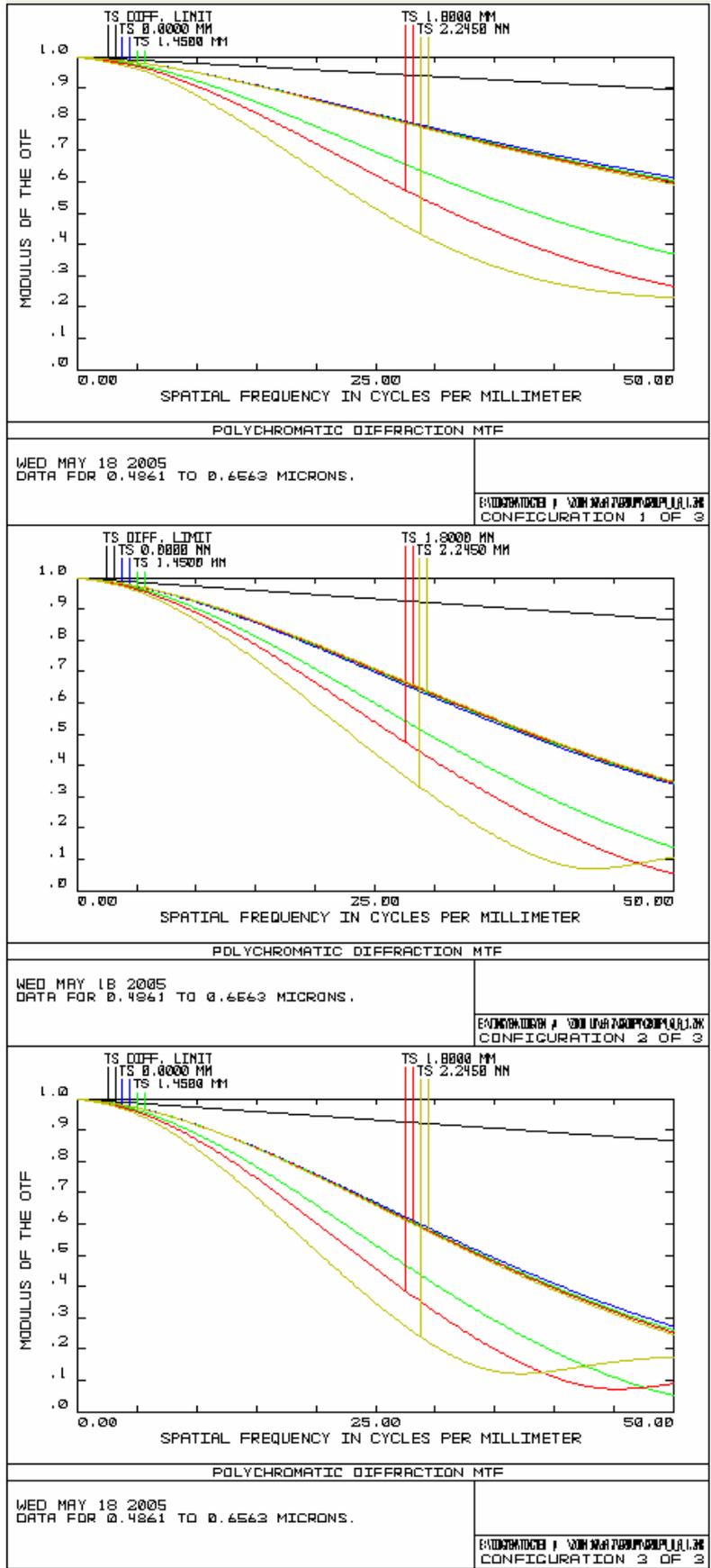


圖 5.22 第三群透鏡帶入到系統後各個組態的 MTF

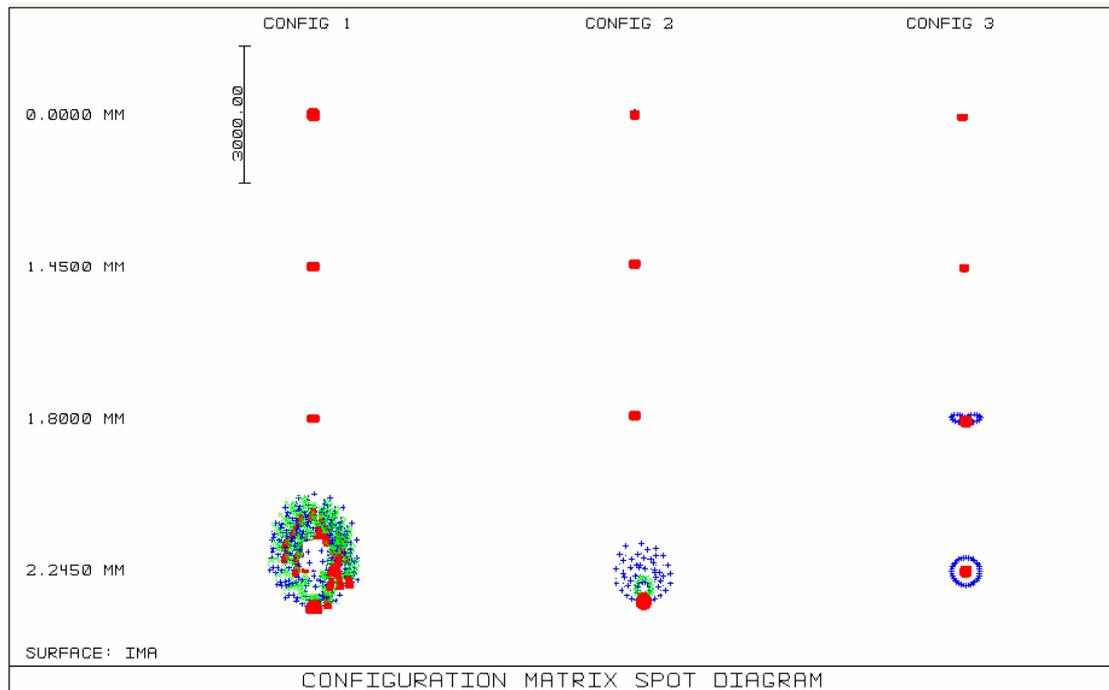


圖 5.23 第三群透鏡帶入到系統後各個組態的光斑圖（由左到右依序為廣角、中間、望遠組態）

圖 5.21 可以看到，光線基本上符合圖 5.18 的光路，這顯示了此規格可以符合需求。從圖 5.23 的光斑圖卻發現在最大視場角的结果並非太好，圖 5.22 也顯示著同樣的情況。這些情況在前兩群的设计中都可以發現到，所以我們可以發現即使有了之前所设计的最佳化的规格表，仍然需要利用光学軟體的優化功能，才能夠使整個系統達到最佳的解，而先前的工作則是可以提供給我們一個好的起始解。

光学軟體優化時所採用的演算法是找出指定評價函數(merit function)的最小值，而評價函數是表示一個光学系統如何接近一組指定目標的數值。在 Zemax 中使用一系列各自代表系統的不同約束條件或目標的運算元，運算元表示的目標有焦距、放大率、光斑……等，

而評價函數與列表中每一運算元實際值與目標值之差的加權平方的平方根成正比，表示為：

$$MF^2 = \frac{\sum W_i(V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad (5.1)$$

用這種方法定義評價函數，理想值為零。系統優化會從評價函數高往評價函數低移動。由圖 5.24 中可以看到，當我們初始的系統架構在 y 點時，最終結果會落到局部最小值(Local minima)C 點，從 z 點出發的話，會落到局部最小值 B 點，但如果從 x 點出發的話，則可以找到真正的最小值 A 點。可以看出初始架構的好壞，會直接影響著最終設計的结果。

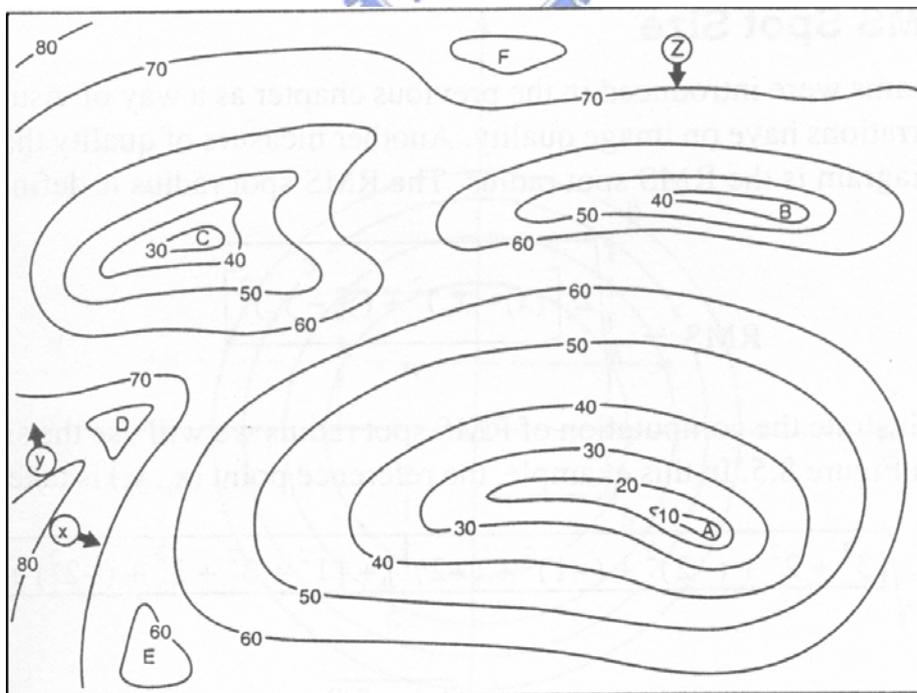


圖 5.24 光學軟體優化時評價函數的演算方向

接下來來觀察系統優化後的情形：

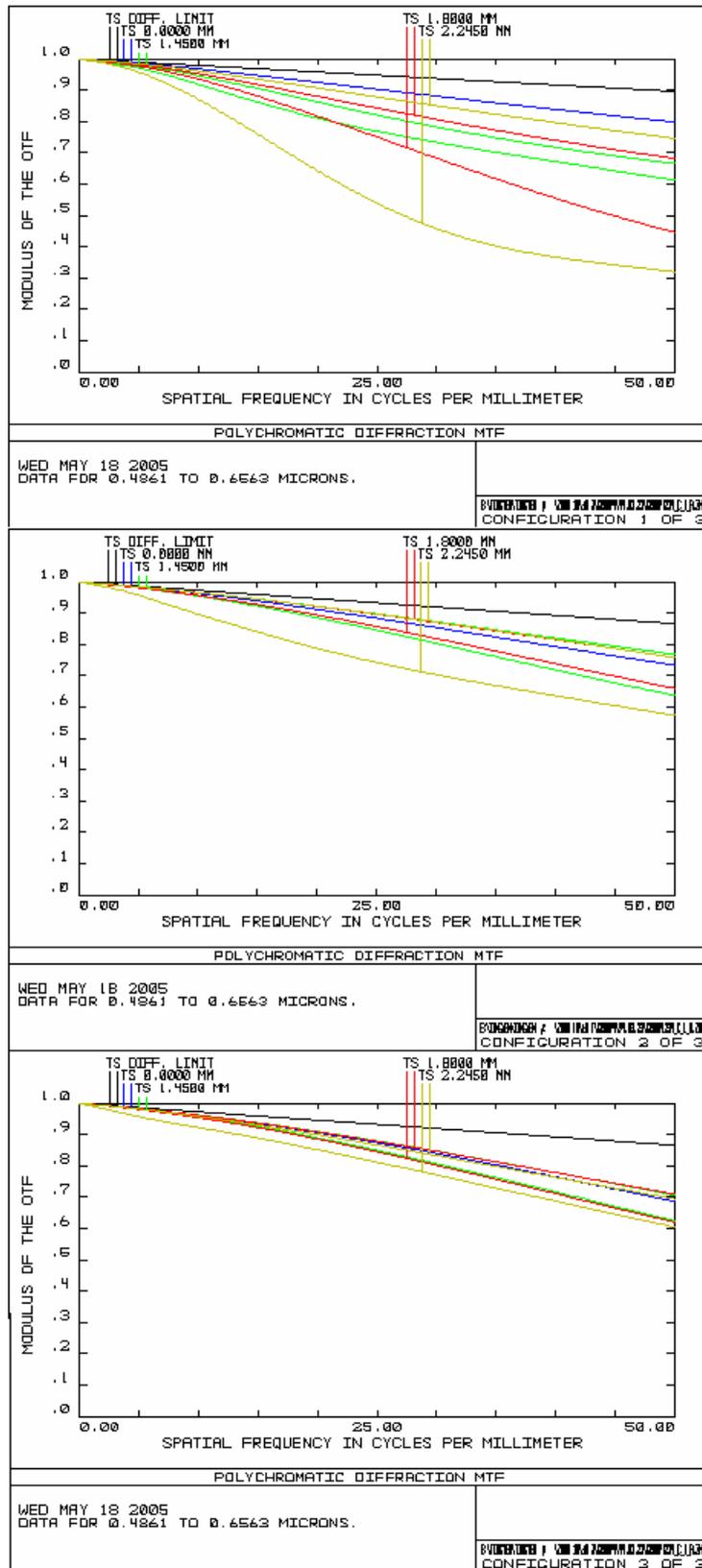


圖 5.25 第三群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的 MTF

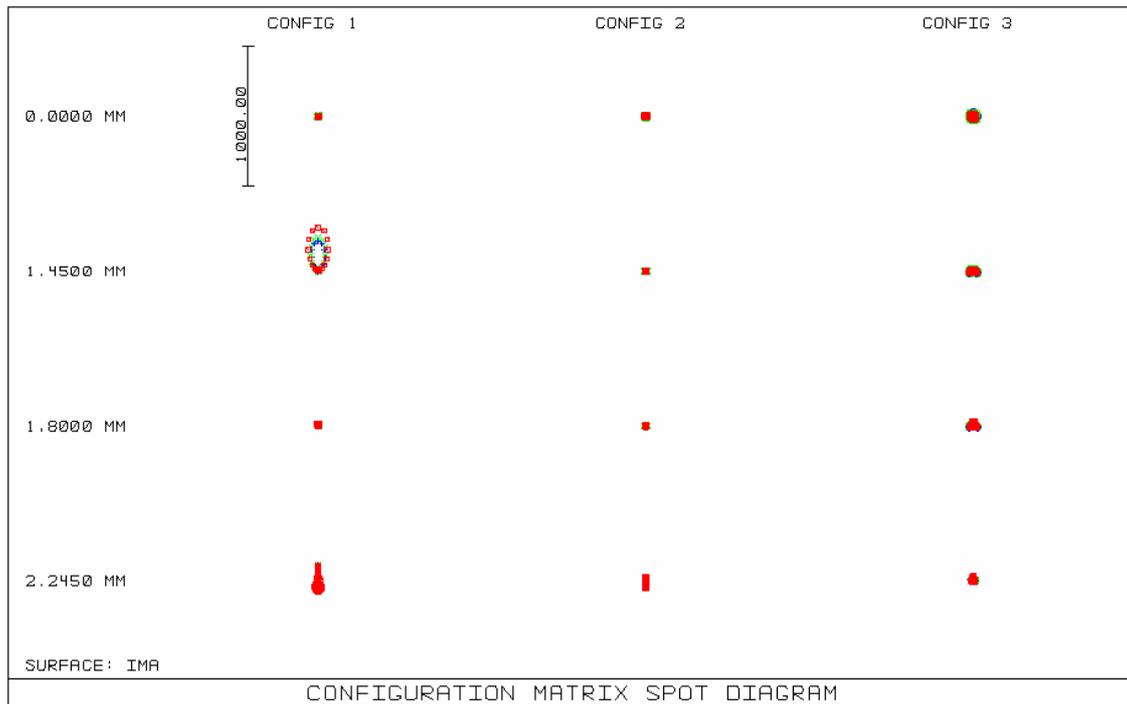


圖 5.26 第三群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的光斑圖(由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)

和圖 5.22 比較可以看到光斑圖中顯示的比例已由 3000 減為 1000，代表優化後光斑尺寸減小，成像結果變好。圖 5.25 可以看到 MTF 在優化後也有明顯得提升。

#### 5.3.4 複合元件用於第四群透鏡：

最後，我將第四群透鏡引入到 10 倍光學變焦系統中，步驟皆和前三群時一樣，得到的結果示於圖(5.27~35)。

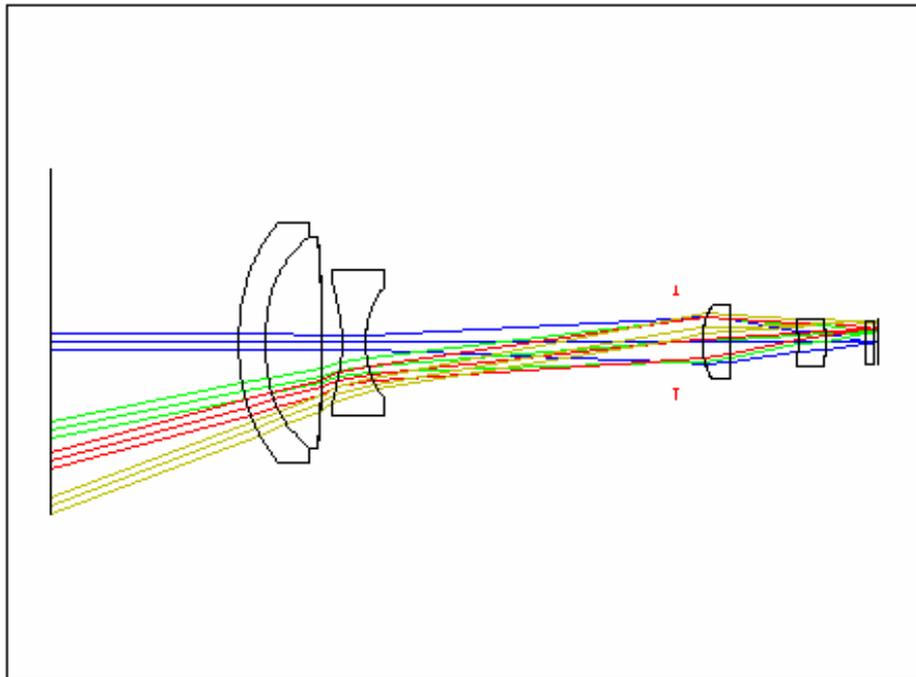


圖 5.27 第四群透鏡帶入到系統後廣角組態結構圖

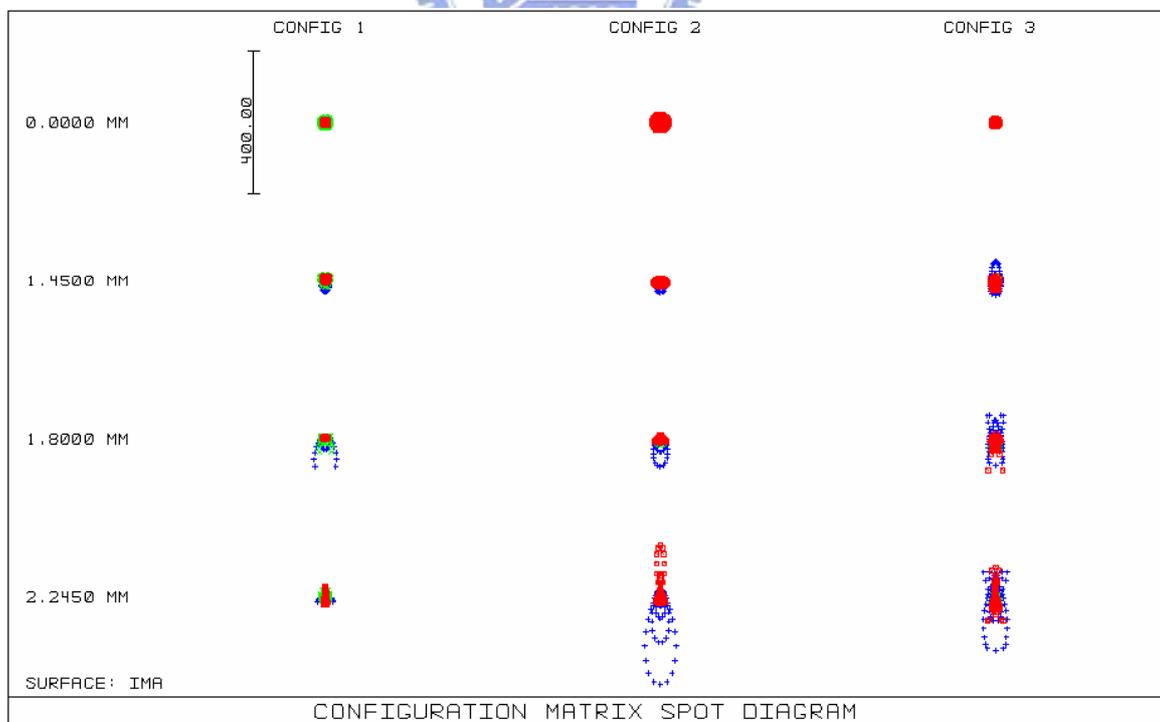


圖 5.28 第四群透鏡帶入到系統各個組態的光斑圖(由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)

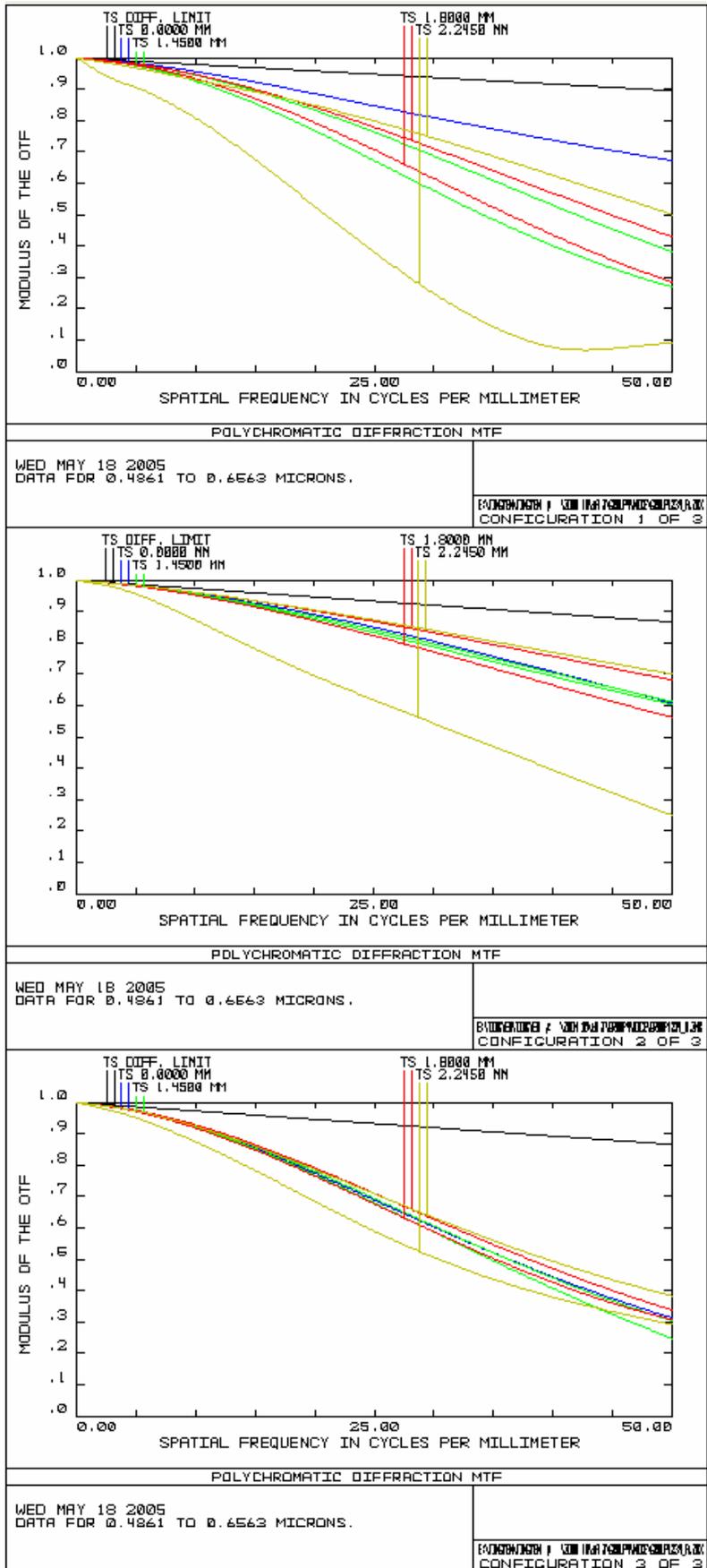


圖 5.29 第四群透鏡帶入到系統後各個組態的 MTF

優化後的結果示於圖(5.30~35)。

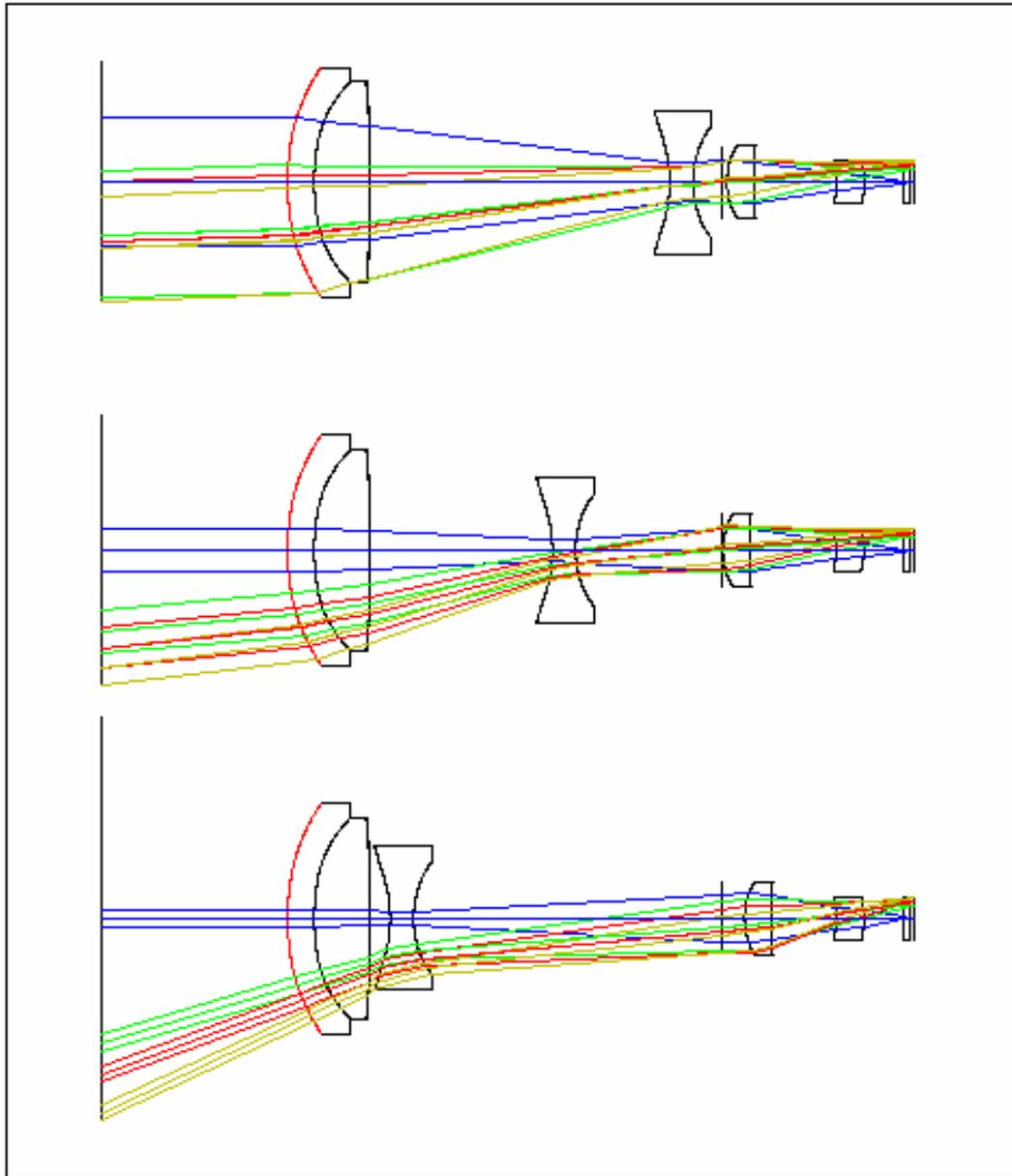


圖 5.30 第四群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的結構圖(由上到下依序為望遠、中間、廣角組態)

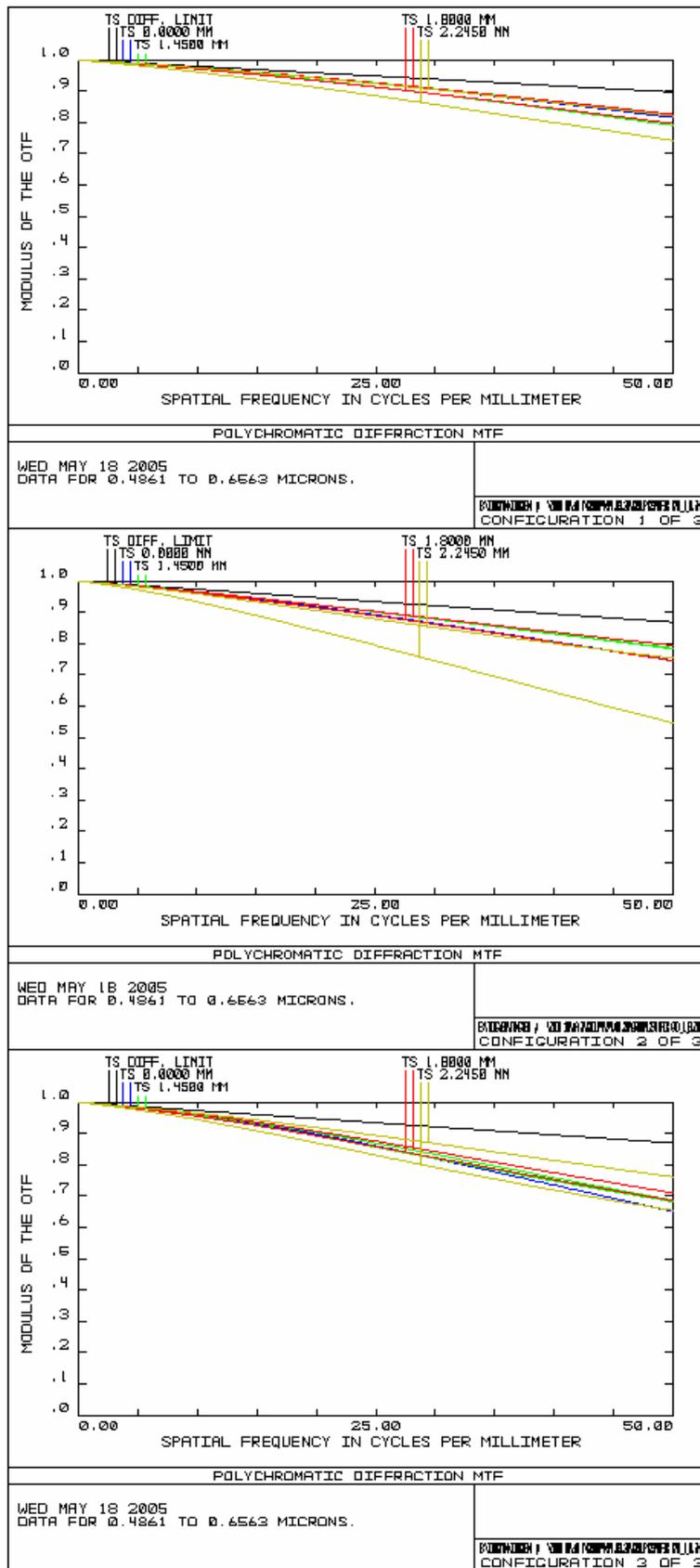


圖 5.31 第四群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的 MTF

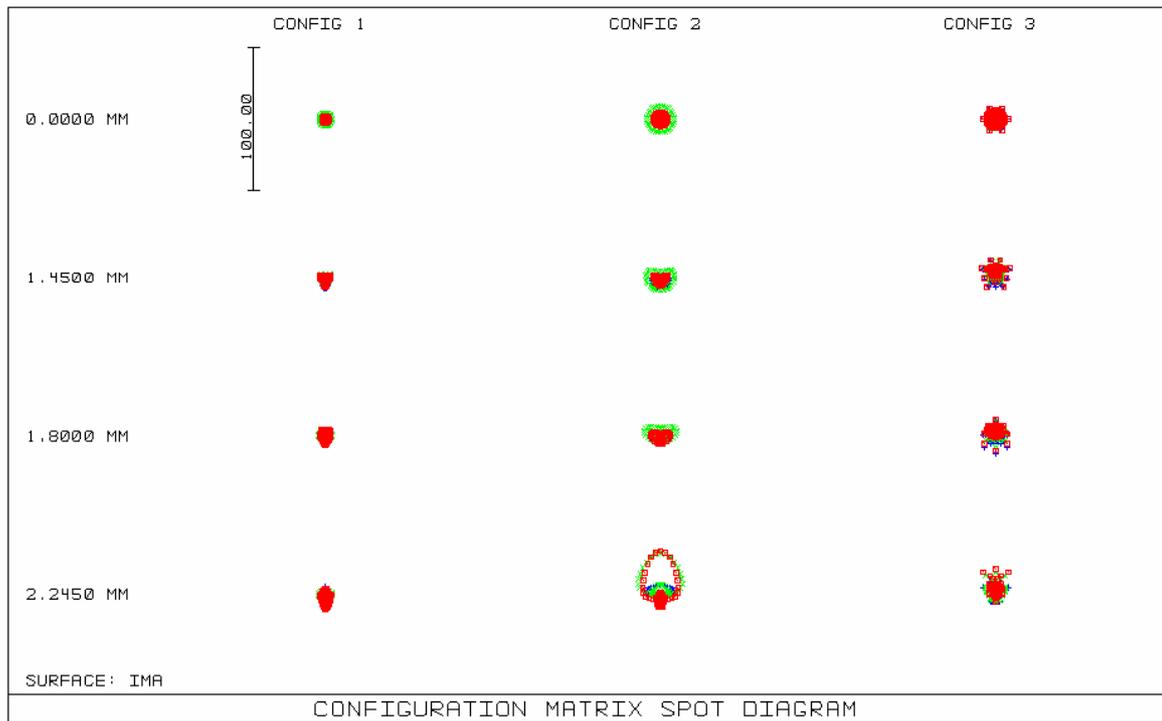
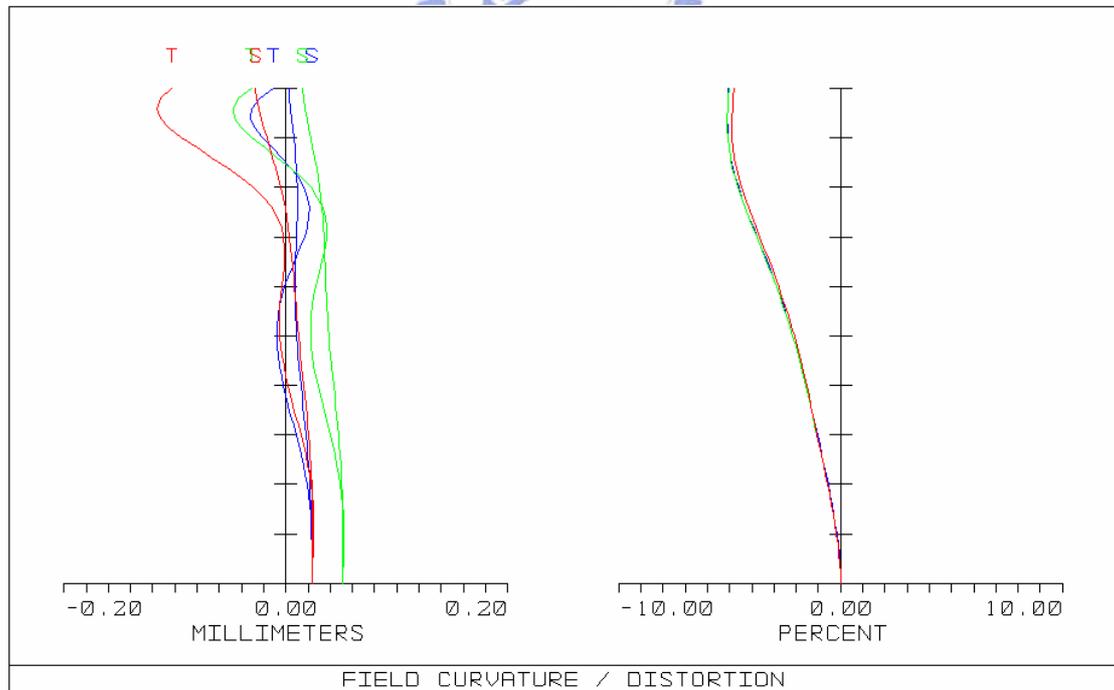
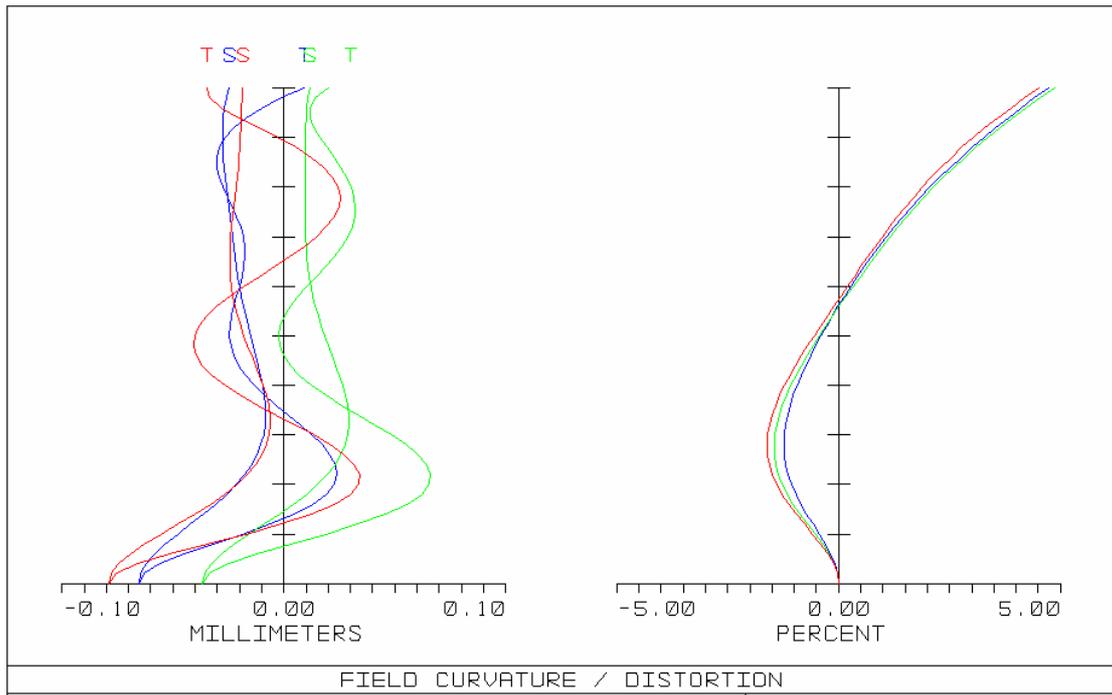


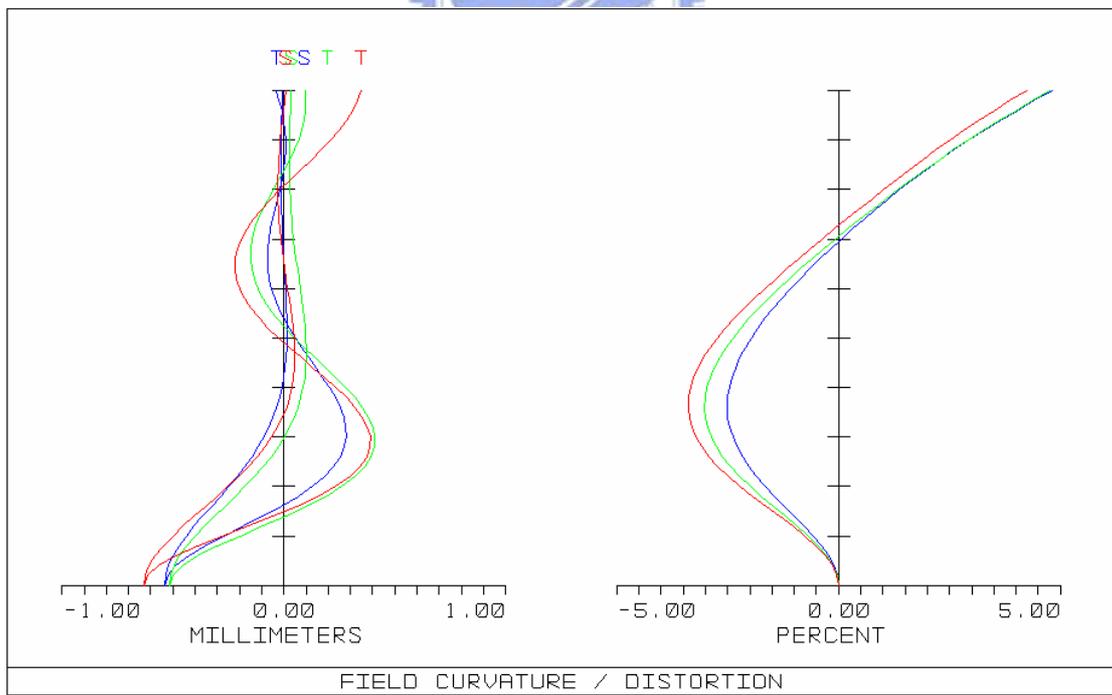
圖 5.32 第四群透鏡帶入到系統並優化後各個組態的光斑圖(由左到右依序為廣角、中間、望遠組態)



(a) 廣角組態

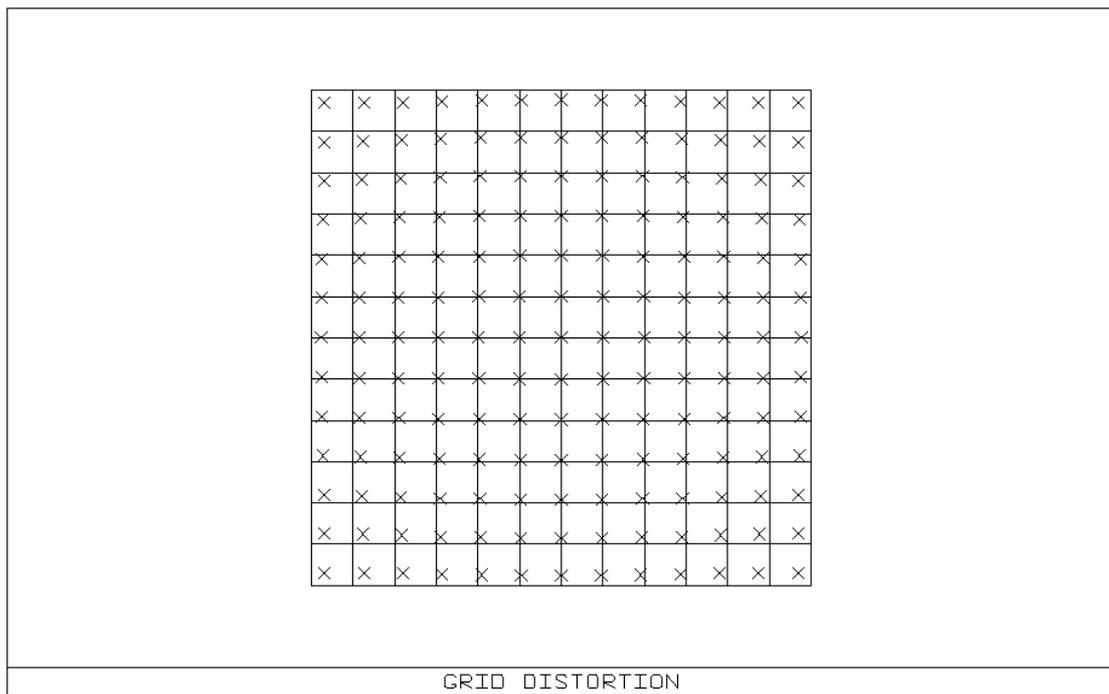


(b) 中間組態

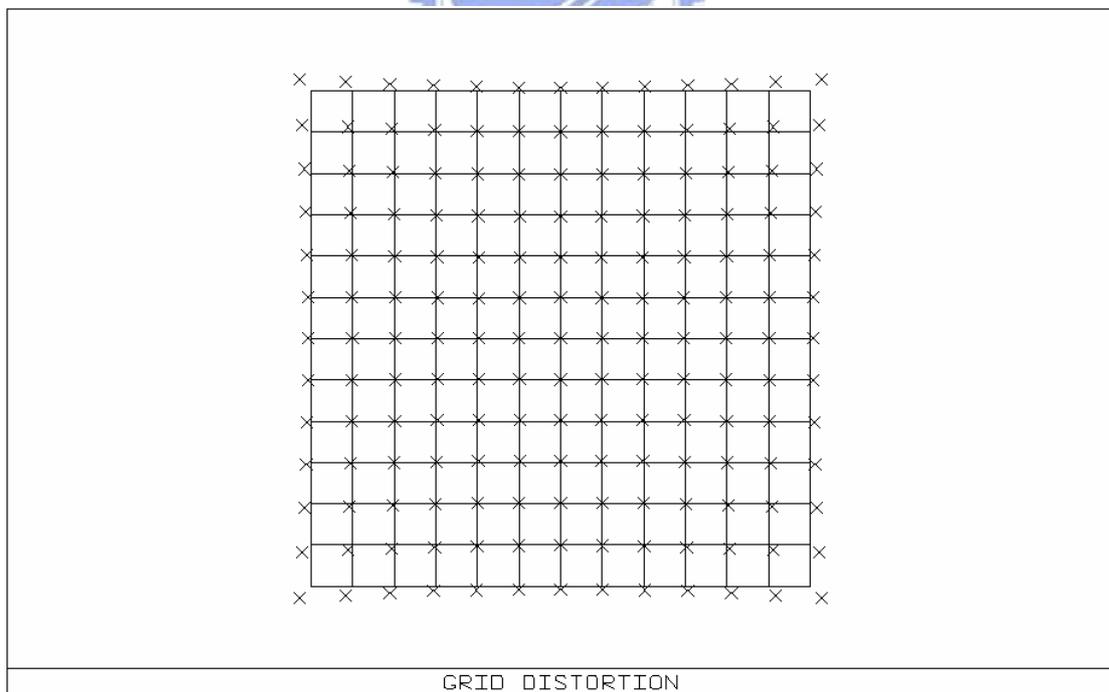


(c) 望遠組態

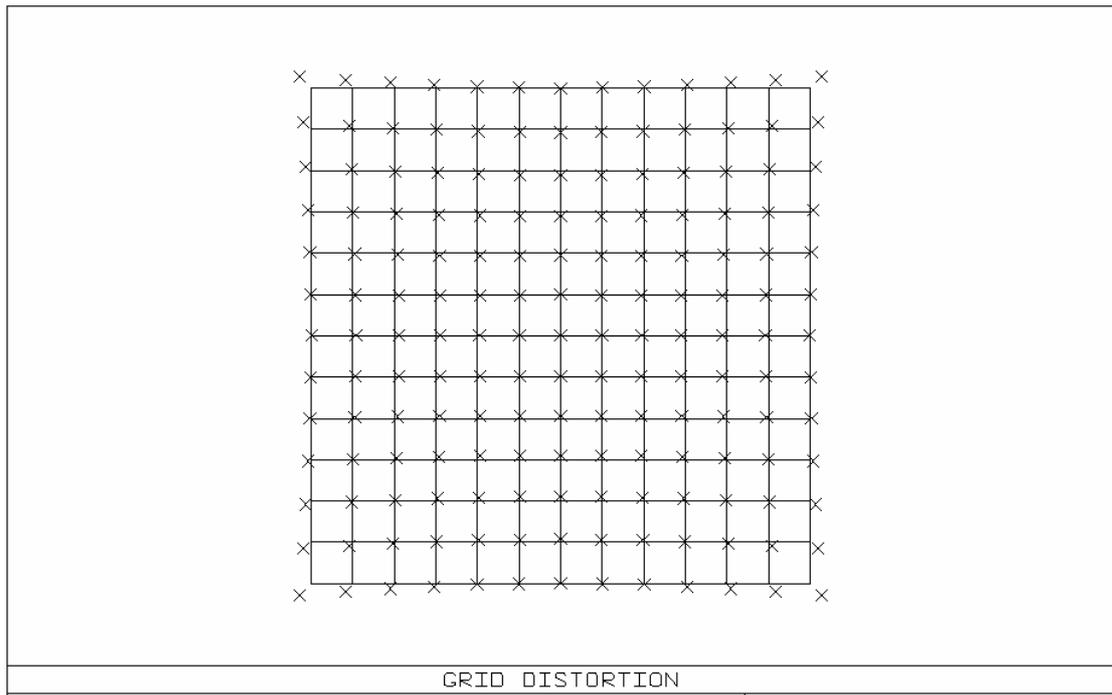
圖 5.33 第四群透鏡帶入到系統並優化後各組態的場曲/畸變圖



(a) 廣角組態

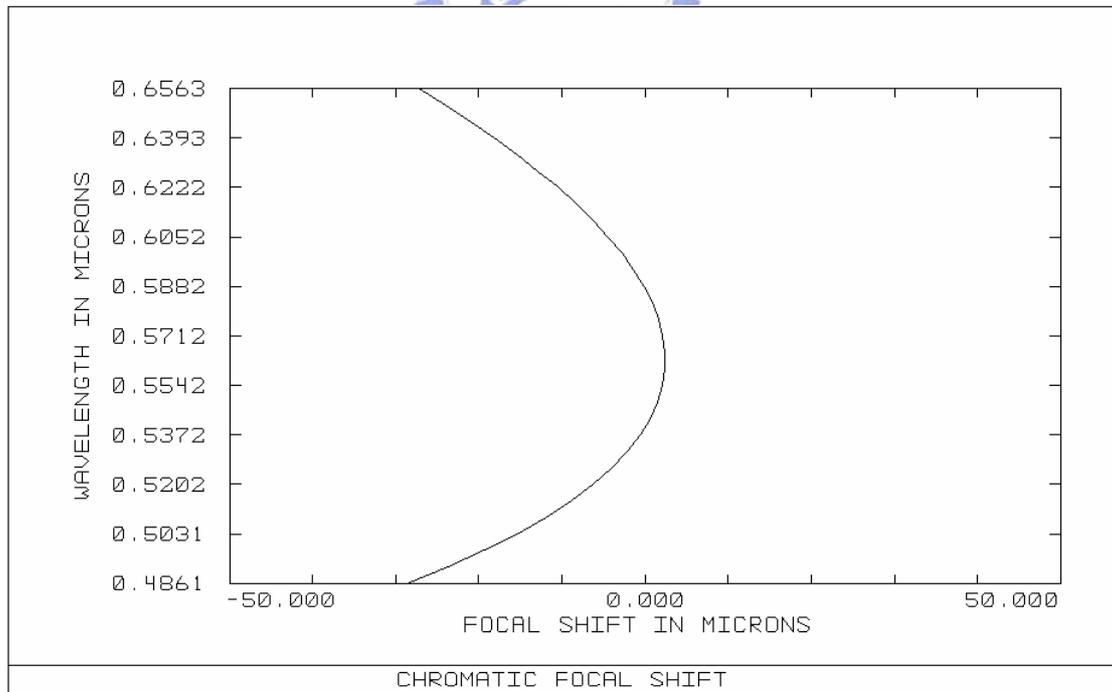


(b) 中間組態

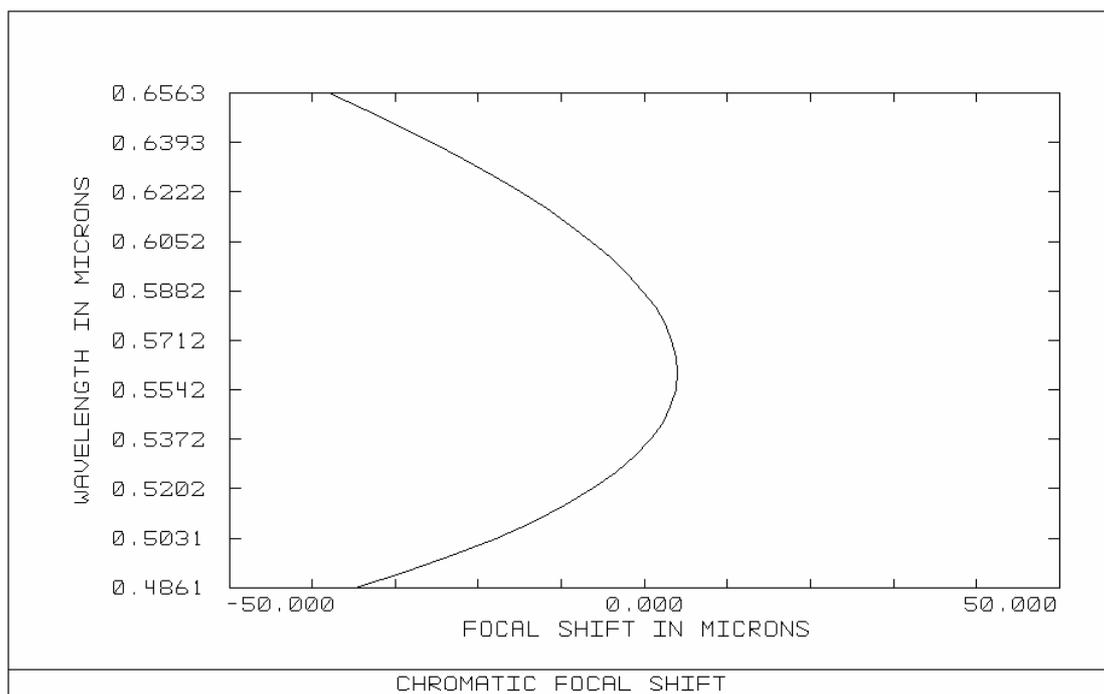


望遠組態

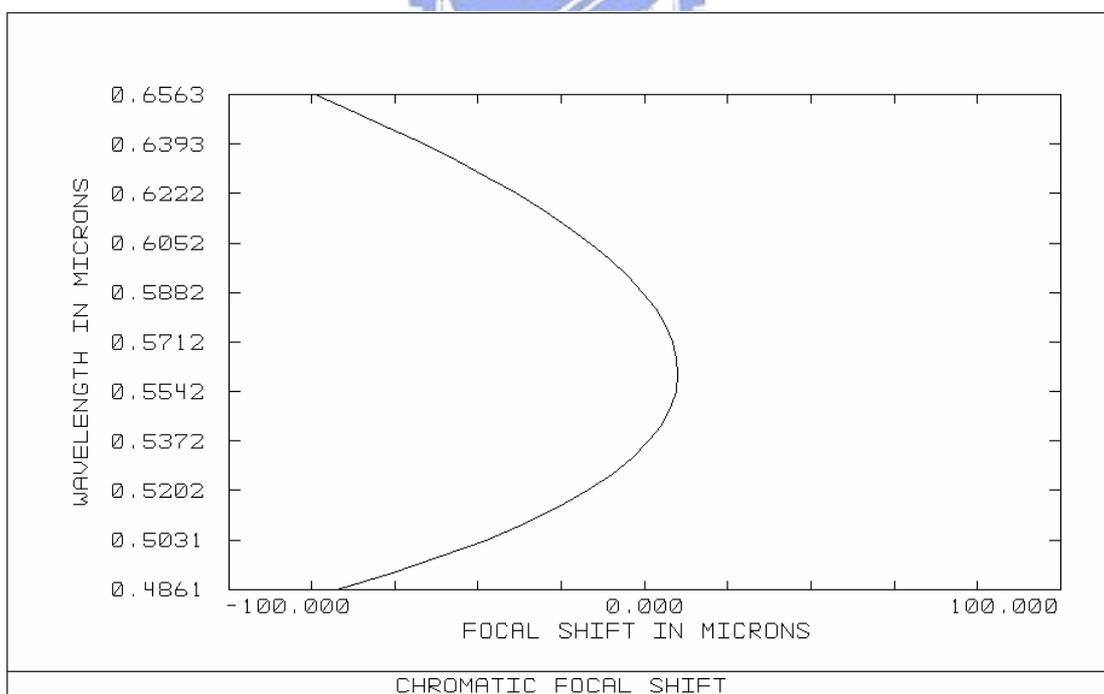
圖 5.34 第四群透鏡帶入到系統並優化後各組態的網格畸變圖



(a) 廣角組態



(b) 中間組態



(c) 望遠組態

圖 5.35 第四群透鏡帶入到系統並優化後各組態的二次譜圖

圖 5.30 至圖 5.35 即為本論文複合元件應用到 10 倍光學變焦系統的最後結果。在過程中，成功的利用 5 片鏡片，一片玻璃(LASF35)四片塑膠(PMMA)，而其中包含了 4 面的繞射面，設計了 10 倍光學變焦系統。我們可以看到各組態的光斑都在  $100\mu\text{m}$  以內，而 MTF 在空間頻率在  $50\text{ lps}$  時都有在 0.6 之上，由各組態的像差圖可以看到各組態的畸變都在  $\pm 5\%$  以內，而二次譜圖中也可以看到各組態都已經達到消色差的功能，而最終整個系統的規格整理在表(5.3~5)中。

焦距長	5.048mm~50mm
Sensor 尺寸	1/4" CCD
F number	F/2.8~F/3.6
波段	486nm~656nm
畸變	$\approx \pm 5\%$
總長度	$\approx 68\text{mm}$
FOV	$\approx 50^\circ$

表 5.3 最終系統的設計規格

鏡片	材料名	Nd	Vd
1	LASF35	2.02	29.51
2	PMMA	1.49	57.44
3	PMMA	1.49	57.44
4	PMMA	1.49	57.44
5	PMMA	1.49	57.44

表 5.4 系統透鏡所使用的材料

曲面	Radius	Glass	Semi-Diameter	K
1	28.482	LASF35	12.5	-2.9975
2	26.066	PMMA	11	2.5751
3	-4012.99	DOE	11	-3.08E+49
4	-401.299		11	-4.10E+04
5	-16.8	DOE	7.82	29.279
6	-16.83	PMMA	7.82	0.00009
7	9.22		5.98	0.00001
8	Infinity	STOP	3.857	
9	8.068	PMMA	4	0.00003
10	-25.864	DOE	4	-31.92
11	-25.901		4	-1.0002
12	-6.55	DOE	2.314	-8.9461
13	-6.359	PMMA	2.314	-9.9262
14	-5.75		2.378	-5.2158

曲面	A4	A6	A8	A10
1	0.000044	2.40E-07	-2.48E-09	5.52E-12
2	0.000061	8.13E-07	-6.58E-09	4.23E-12
3	-0.000016	-4.13E-07	3.78E-09	-7.05E-12
4	-0.000036	4.03E-08	-5.58E-11	4.20E-12
5	-0.1793	4.93E-03	-1.04E-03	7.43E-07
6	-0.00417	1.70E-05	-2.07E-07	9.23E-10
7	-0.00785	1.50E-05	1.39E-07	-3.45E-09
8				
9	6.00E-06	2.40E-05	-2.78E-07	8.04E-08
10	-0.5787	6.50E-02	2.42E-03	-3.99E-04
11	0.000565	2.70E-05	-2.00E-06	2.22E-07
12	0.000116	0.000174	0.000029	-0.000003
13	0.000235	0.000269	-0.000014	0.000002
14	0.001145	0.000319	-0.000022	0.000003

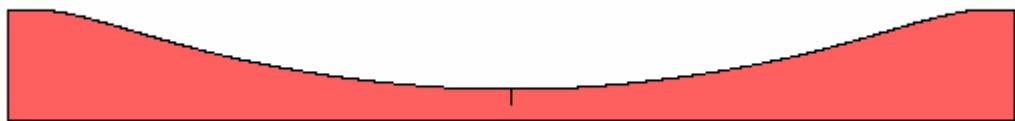
表 5.5 系統各個曲面的參數

表 5.5 中的非球面係數可以由第二章中(2.19)式計算出和弛垂函數的關係。

另外將各繞射面的數據，利用 DIFFSYS 軟體，轉換出繞射面的輪廓示意圖，如圖 5.36 所示。



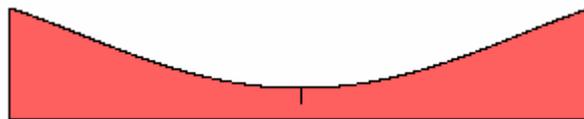
(a) 第 3 面



(b) 第 5 面



(c) 第 10 面



(d) 第 12 面

圖 5.36 系統各繞射面的輪廓示意圖

在整個從第一群至第四群的逐一應用複合元件的過程中，我們可以發現如果繞射/折射元件最佳單元組件的整理表格可以符合系統的規格，那麼在應用上將會起到很大的作用。但是複合元件在高視場角的成像品質將會讓複合元件的使用受到許多的限制，例如本論文中 10 倍光學變焦系統中的第一群，為收光的群組，角度很大，必須利用到高折射率的玻璃透鏡。

## 5.4 與其它設計的比較：

### 5.4.1 與專利 USP6457494 的比較

接下來我將模擬結果與參考專利 USP6157494 的系統，將這兩個系統針對 MTF 曲線進行比較，以驗證此論文所設計的结果，並不會因為加入繞射元件並減少使用片數而影響效能。在比較前先對專利的系統做簡單的介紹，圖 5.37 為專利 USP6157494 廣角組態結構圖，此系統共使用了 10 片鏡片，六種材料，材料的折射率在 1.51~1.85 之間，所以系統使用了不少高折射率玻璃。圖 5.37 為本論文各組態設計結果與專利 USP6157494 系統的 MTF 曲線比較圖。左圖為設計結果，右圖為專利簡單優化的結果。

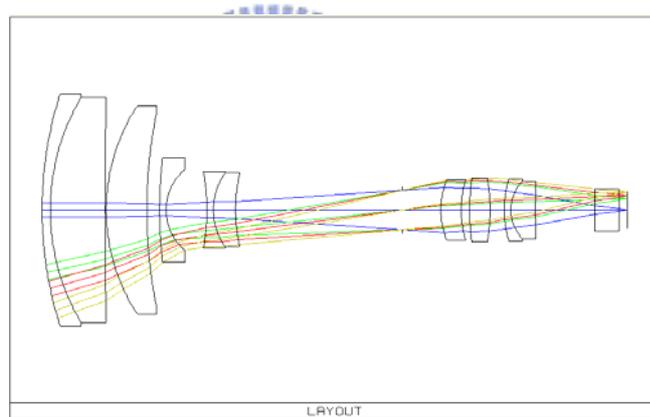
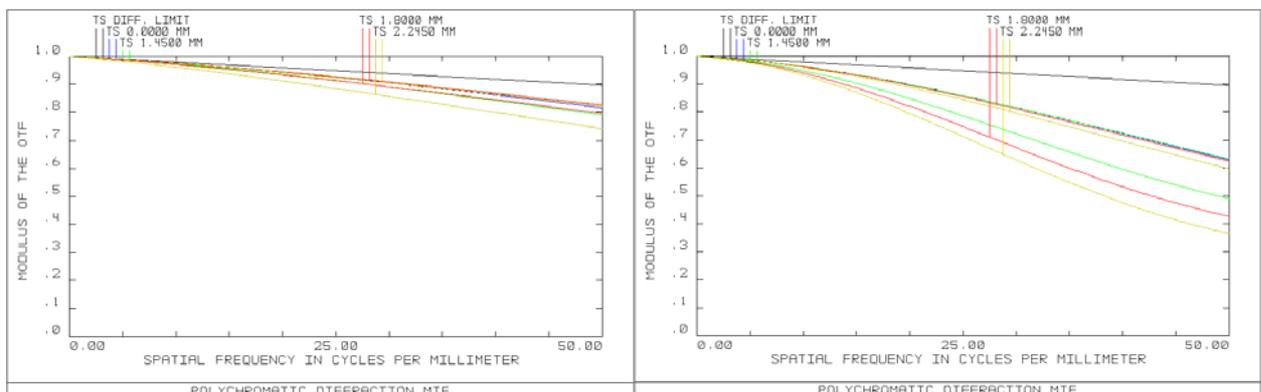
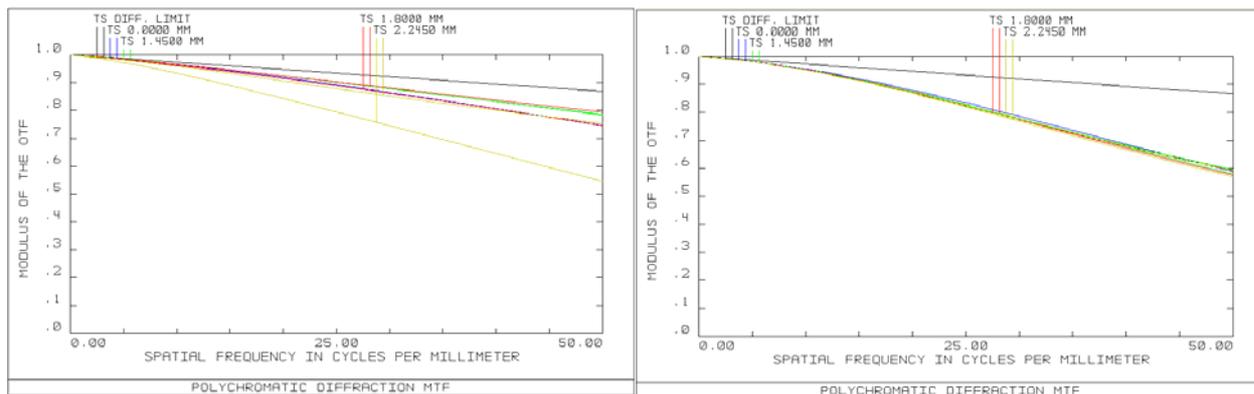


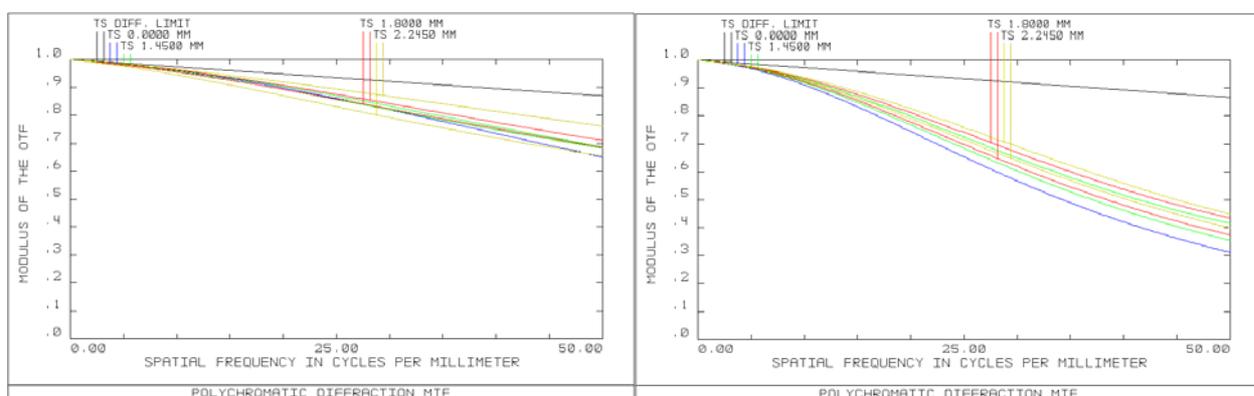
圖 5.37 專利 USP6157494 廣角組態結構圖



(a) 廣角組態



(b) 中間組態



(c) 望遠組態

圖 5.38 各組態設計結果與專利 USP6157494 的 MTF 曲線比較圖，  
左圖為設計結果，右圖為專利簡單優化結果。

由圖 5.38 可發現，本論文模擬結果與專利系統比較，各組態的 MTF 值，在空間頻率  $50\text{ lps/mm}$  時均在 0.3 以上。但鏡片數卻由專利的 10 片，縮減為 5 片，不但可以將成本降低，也可以將重量減輕，所以複合元件的功能在這邊就可以很明顯的看出。而且專利中移動的群組是二、三、四群，這在機械結構上比較複雜，而本論文僅移動兩群，結構較為簡單，組裝也較為容易。

## 5.4.2 與國立交通大學光電所碩士論文的比較

接下來，我將再與交通大學光電所 92 碩士論文“採用繞射/折射複合透鏡之 10 倍光學變焦系統的設計”來做比較。這篇論文中，一樣採用了繞射/折射複合透鏡，也都參考了專利 USP6157494 但在最後設計的結果上，因為採用的設計方法不同而有很大的差異。

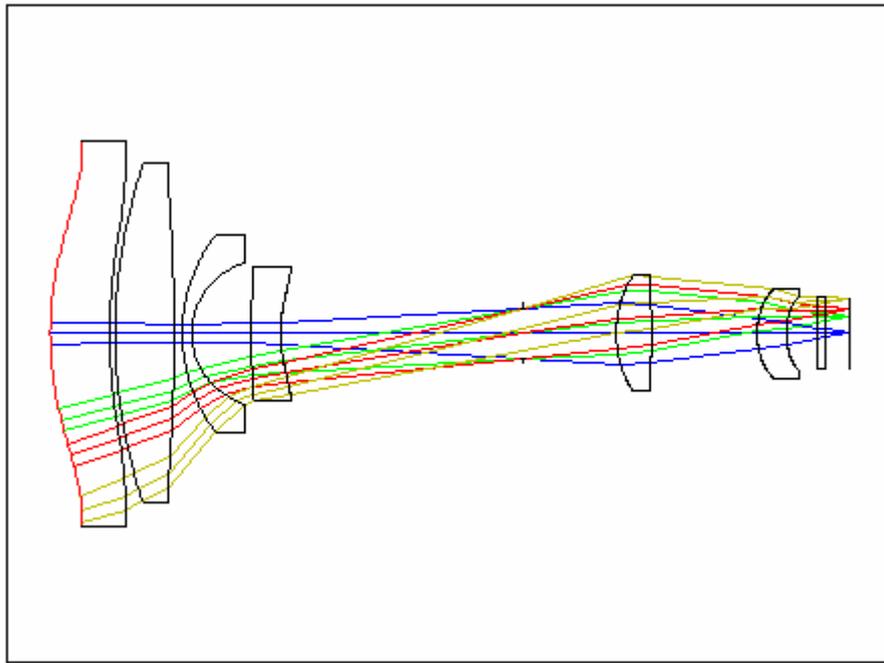
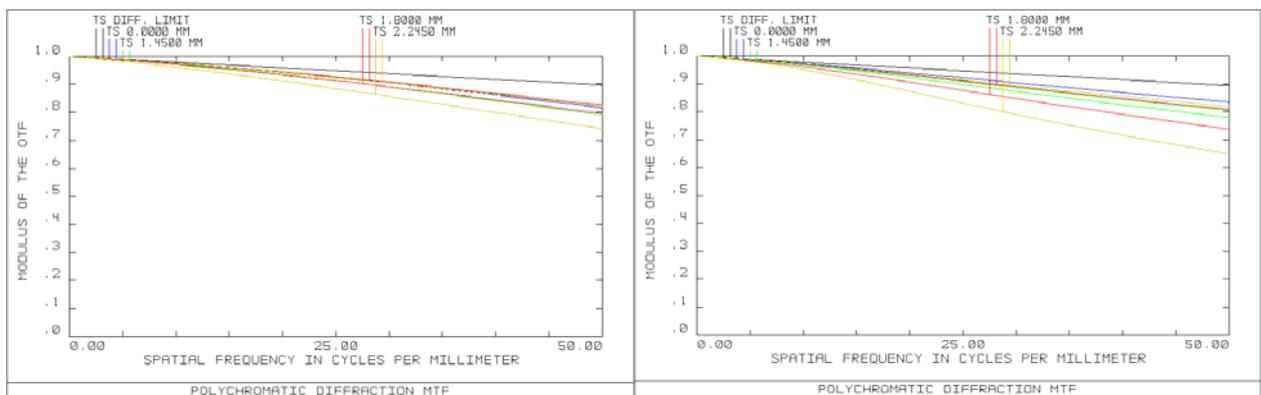
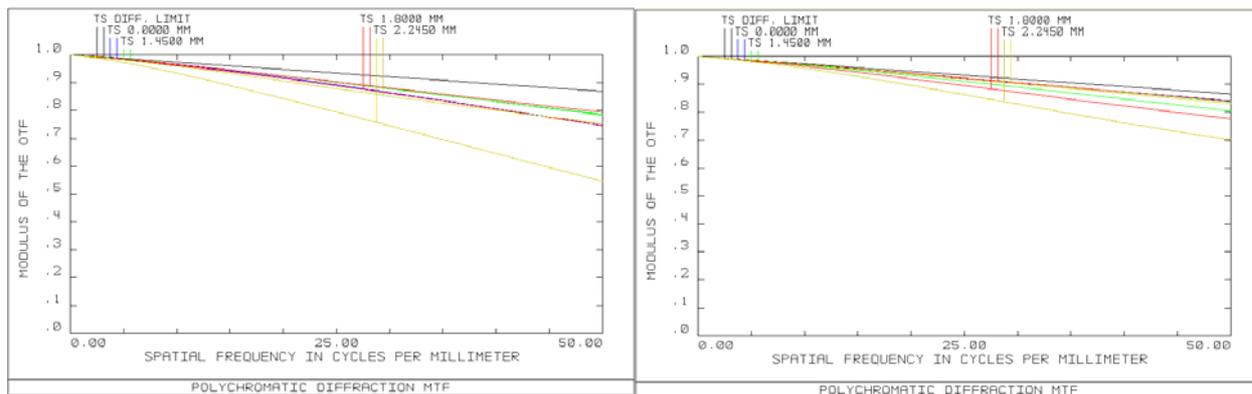


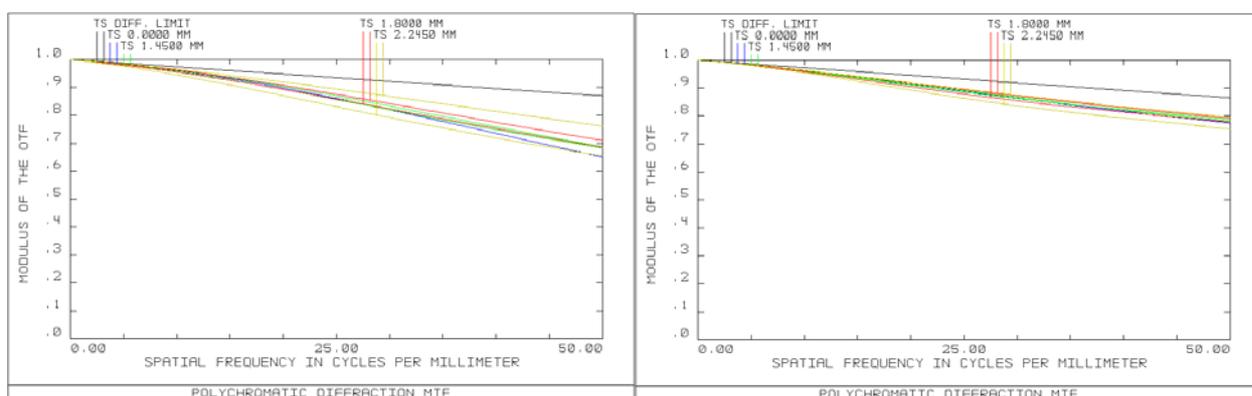
圖 5.39 交通大學碩士論文中 10 倍變焦系統廣角組態的結構圖



(a) 廣角組態



(b) 中間組態



(c) 望遠組態

圖 5.40 各組態設計結果與交通大學論文結果的 MTF 曲線比較圖，左圖為設計結果，右圖為交通大學論文結果。

此論文與本論文在結構上，總長度都約為 68mm，畸變也都約為 5%，在消色差的結果上也都差不多。在圖 5.39 中可以看到，此論文共用了六片鏡片，折射率在 1.49~1.75 之間。本論文僅用到了 5 片鏡片，較少了一片，但因為其中用到了一片高折射率的玻璃，所以成本上並不一定佔有優勢。而此論文在設計上是根據專利 USP6157494 的架構來作修改，依然是移動第二、三、四群透鏡組，這在機械結構上

較本論文的设计複雜。本論文中，是利用整理出來的複合透鏡最佳單元組件來引入到光學系統上，所以雖然都有參考專利 USP6157494 的數據，但在最後的結構上會有很大的不同，因此在本論文中提供了另外一種將複合元件應用到光學系統上的方法。



## 第六章 結論與展望

近年來，為了符合市場的需求，許多的光學系統都朝著輕巧以及小型化的方向發展。為了符合這些要求，在設計上必須盡量減少光學鏡片的使用量，系統的厚度也必須要減少。繞射元件具有一些折射元件無法比擬的優點，利用繞射/折射複合元件可以只使用單一透鏡就達成消色差的結果，比傳統純折射元件至少需要兩片以上的鏡片要來的好，且成本更低廉。由於其具有相當大的功能性，經過元件表面輪廓的精心設計，已達到預期的光波波面，從而實現在成像系統上的應用。所以，繞射/折射複合元件具備了可減少系統鏡片的使用量的強大優勢。



在本論文中，對於繞射/折射複合元件最佳單元組件研究做出了一個整理，方便了後面在 10 倍光學變焦系統上的設計，成功的利用五片鏡片達到了系統的要求。除了 10 倍光學變焦系統上的應用範例，我們也可以將繞射/折射複合元件應用到其他如攝影機、投影機……等系統上。另外在結果中也可以看到單片式或兩片式的複合元件在高視場角時，成像品質將會降低許多，這點在往後的設計上是需要特別注意的。

從 1870 年 Fresnel 波帶片的發明，到 1960 年出現複合透鏡，再

到 2000 年初，日本 canon 公司成功將繞射光學鏡片應用到像機鏡組上，可以看到繞射光學元件的迅速發展。在未來複合光學元件的應用將是相當廣泛的，例如雷射系統，紅外成像與感測系統，繞射光學系統，以及如變焦鏡頭設計的傳統光學設計領域等方面。因此在可預見的將來，結合繞射/折射的光學元件的光學系統會更加蓬勃發展。



## 參考文獻

1. 徐得銘, “繞射/折射複合光學元件設計與模擬” 2001 年, 交通大學光電所碩士論文
2. 葉茂勳, “變焦鏡頭高斯光學之設計與分析” 1997 年, 交通大學光電所博士論文
3. 呂怡瑱, “採用繞射/折射複合透鏡之 10 倍光學變焦鏡組的設計” 2004 年, 交通大學光電所碩士論文
4. 林明宗, “可見光波段複合式(繞射/折射)光學元件的製作與研究” 1997 年, 交通大學光電所碩士論文
5. Sweatt W. C., ”Describing holographic and optical elements as lenses” Appl. Opt., 16 (1977), 1701-1704
6. W. C. Sweatt, “Mathematical equivalence between a holographic optical element and an ultra-high index lens” J. Opt. Soc. Am., 69 (1979), 486-487
7. Tetsuo Nagata, Hachioji, “ZOOM LENS SYSTEM USING A DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT AND IMAGE PICKUP DEVICE USING THE SAME” United States Patent, Num:6,157,494(2000)
8. 王俊勛, “繞射/折射複合型變焦鏡組之設計與量測” 2003 年, 交通大學光電所碩士論文
9. Swanson G. I., Veldkamp W. B., “Infrared applications of diffractive optical elements” Proc. SPIE, 22 (1988), 885
10. Stone T, George N. “Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats” Appl. Opt., 1988, 27(14):2962
11. N. Davidson, A. A. Friesem, E. Hasman, “Analytic design of hybrid diffractive refractive achromats” Appl. Opt., 32 (1993), 4770-4774
12. Mark M. Meyers, Hamlin, “Hybrid refractive/diffractive achromatic camera lens and camera using such” United States Patent, Num:5,581,405(1996)
13. 陸懋宏, 幾何光學, 交大光電所。
14. Warren J. Smith, “Modern Optical Engineering”, 3<sup>rd</sup> edition, McGraw-Hill, New York, 2000.
15. Carmina Lindono, Peter P. Clark, “Modeling diffraction efficiency effects when designing hybrid diffractive lens systems” Appl. Opt., 31 (1992), 2248-2252
16. ZEMAX User’s Guide, Version 10.0