

第三章 間隔三合透鏡(The Air-Spaced Triplet)

間隔三合透鏡有時被歸類為 Cooke 三合透鏡。其具有足夠的自由度來設計一個無像散透鏡組。參照圖 3-1，對於一系列的三片薄透鏡組（注意到透鏡雖薄，區分的間隔仍然是可識別的），作為我們控制系統倍率以及設定 Petzval 總合，縱向色差，以及橫向色差為零的開始。讓我們一併假定第一與第三片透鏡的材質為相同，光圈位於第二透鏡，以及我們考慮的是一個遠離的物體。

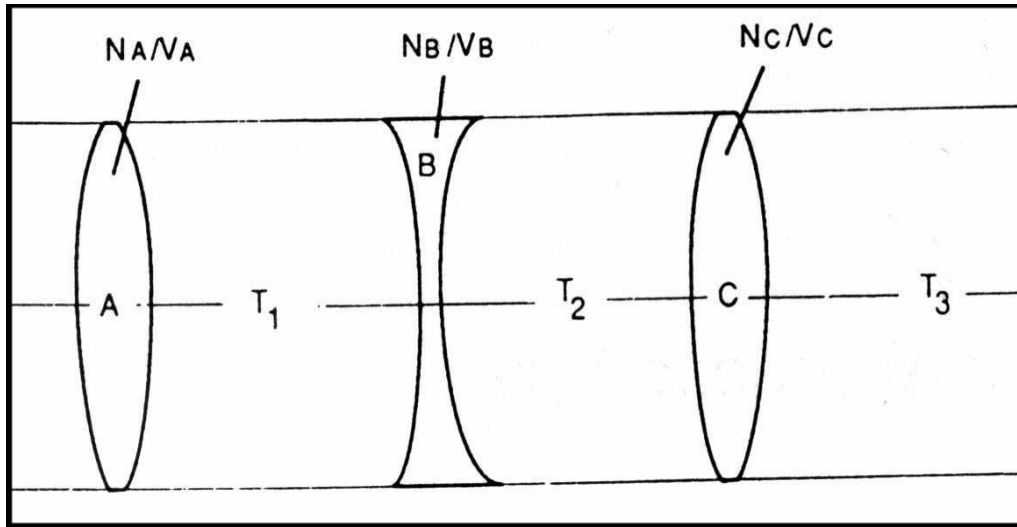


圖 3-1 三合透鏡

$F_a = 1/P_a$, 其中 P_a 為第一透鏡的倍率

$$TR = T_2/T_1$$

$$T_3 = \frac{[(F_a - T_1)F_b - (F_a - F_b - T_1)T_2]F_c}{(F_a - T_1)F_b + (F_a + F_b - T_1)(F_c - T_2)}$$

$X = T_3PTR$, 其中 P 為組合透鏡的倍率

$$P_b = \frac{1}{F_b} = -P_c N_b \frac{X+1}{N_a} \quad (2)$$

$$P_a = XP_c \quad (3)$$

$$P = P_a + P_b + P_c - T_1 P_a (P_b + P_c) - T_2 P_c (P_a + P_b) + T_1 T_2 P_a P_b P_c \quad (4)$$

$$P_c = \frac{1/X - [(X/TR^2 + 1)V_b N_a / (V_a N_b (X+1))]^{1/2}}{T_1} \quad (5)$$

我們的演算法變成一個反覆的技巧。令 E 為一個非常小的數（我們反覆量的誤差）。然後：

給定 N_a, V_a, N_b, V_b, TR 的值，以及系統倍率 f

令 $T_1 = \frac{0.1}{f}$ ， $x=0.8$ 當作開始，

然後 $T_2 = T_1 \cdot TR_0$

DO 7 J=1, 10

從方程式 (5) 計算 P_c

從方程式 (2) 計算 P_b

從方程式 (3) 計算 P_a

從方程式 (1) 計算 T_3

從方程式 (4) 計算 P

$X_1 = T_3 PTR$

IF (ABS ($X_1 - X$) -E) 8, 8, 6

6 $X = X_1$

7 CONTINUE

8 $S = P / f$ $P_a = P_a / S$ $P_b = P_b / S$ $P_c = P_c / S$

$T_1 = T_1 S$ $T_3 = T_3 S$ $T_2 = T_1 TR$

這個演算法已被程式化在我的電腦中，而且例行地用在三合透鏡起始解（見附錄 J 的程式 TRIPLET）

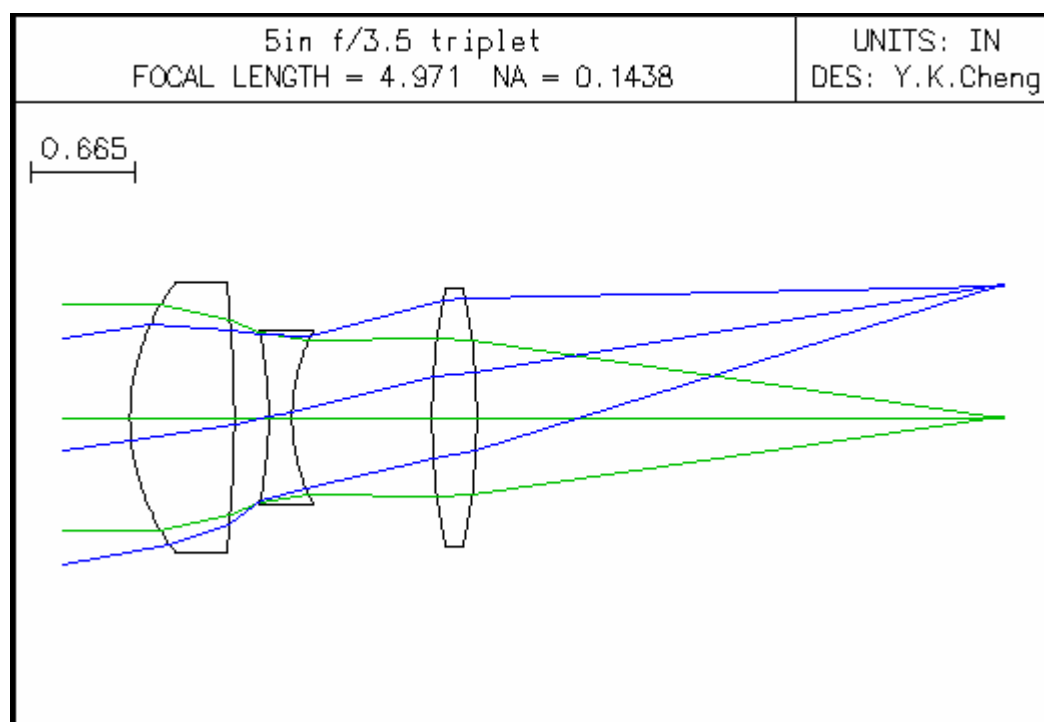
表 3-1 給了五個這樣的解， $F=100$ ，以及假定 $T_2 = T_1$ ($TR=1$)。

Pa	Pb	Pc	T1	T3	材質
0.02263	-0.04825	0.02569	11.892	88.107	Sk-16, F4
0.02088	-0.04913	0.02514	16.938	83.062	Plexiglas, polystyrene
0.03505	-0.07391	0.03703	5.3278	94.673	CaF2, quartz
0.01873	-0.05124	0.02490	24.788	75.212	Silicon, germanium
0.00938	-0.03295	0.04315	78.262	21.737	IRTRAN 2, IRTRAN 3

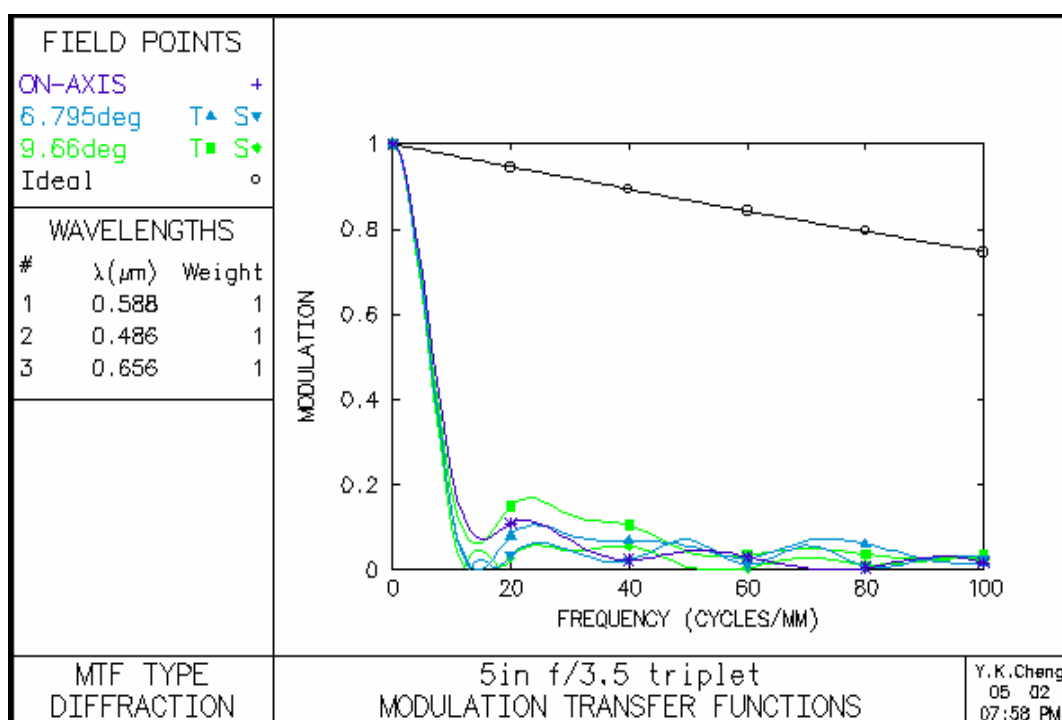
表 3-1 薄透鏡

最前面二個解是對於可見光範圍，接下來的是外光範圍，以及最後二個是波長 3.2~4.2 μm 的紅外光範圍。這個演算法對於像是鍍及硒化鋅的材質並無收斂，見 Vogel (1968)。

作為最佳化的開始，當修正透鏡來解決球差，慧差及像散時固定倍率以及元件間隔是方便的。接下來，加厚元件以及改變所有參數。

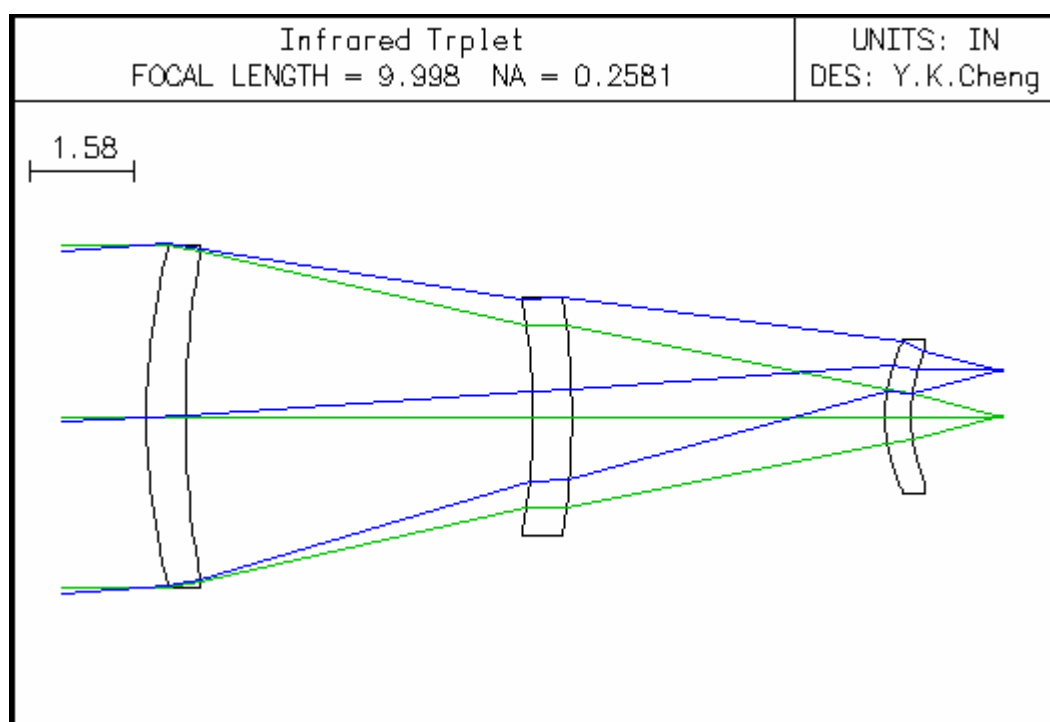


(a)

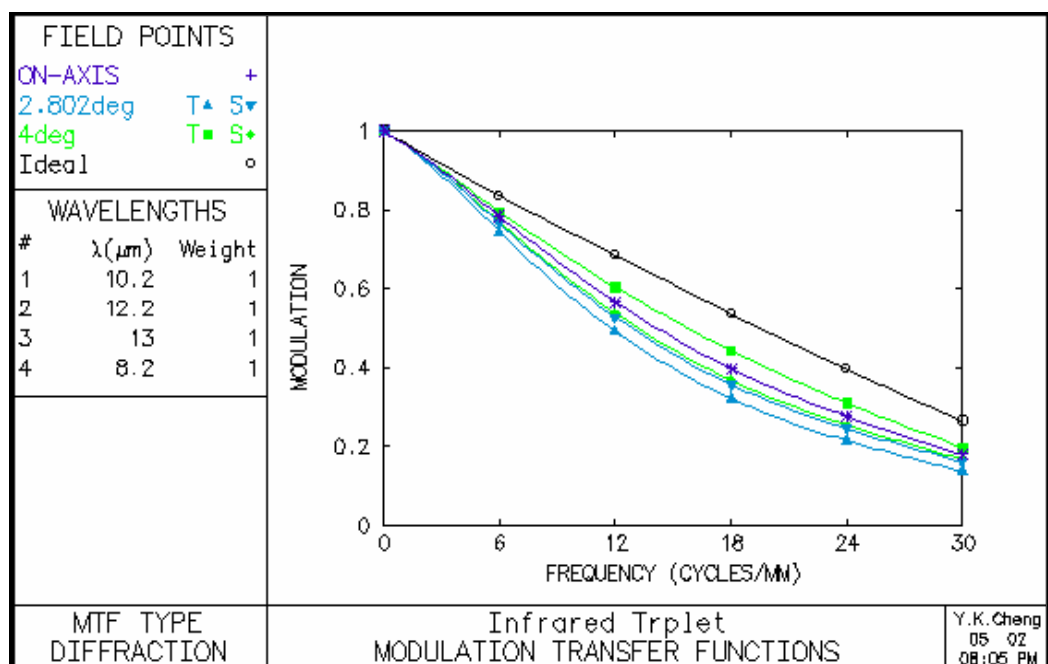


(b)

圖 3-2 (a) $f/3.5$ 三合透鏡 (b) 系統 MTF



(a)



(b)

圖 3-3 (a) 紅外三合透鏡 (b) 系統 MTF

將第一個解最佳化產生如圖 3-2 所表示的設計。其為 $f/3.5$ 且設計來投影 24*36mm 底片。EFL=5。設計的資料給定在表 3-2 中。

SRF	RADIUS		THICKNESS		APERTURE RADIUS		GLASS	
OBJ	0.000000		1.0000e+20		1.7021e+19		AIR	
AST	0.000000		-0.831000		0.715000	A	AIR	
2	1.436100		0.663000		0.860000		SK16	C
3	-8.341300		0.217000		0.860000		AIR	
4	-2.793700		0.150000		0.550000		F4	C
5	1.232300		0.890000		0.550000		AIR	
6	4.027400		0.282000		0.825000		SK16	C
7	-4.095900		3.354127	S	0.825000		AIR	
IMS	0.000000		0.000000		0.846214	S		

表 3-2 $f/3.5$ 三合透鏡

前端透鏡頂點到像的距離是 5.595 (為了測量上的方便, 被後二個半徑應該被設為互相相等)。為了減少 Petzval 總和, 在設定這類型時, 前端與後端元件用高折射率冠, 中央元件為低折射火石 (Sharma, 1982)。畸變=0.6%。

在 Vogel 規定的一些小改變以及一個最佳化過程之後, 我們得到一個紅外透鏡 (8~14 μm) 的解, 表示在圖 3-3。資料給定在表 3-3。

SRF	RADIUS		THICKNESS		APERTURE RADIUS		GLASS	
OBJ	0.000000		1.0000e+20		6.9927e+18		AIR	
AST	10.195000		0.590000		2.580000	A	GERMANIUM	
2	13.600800		5.250000		2.500000		AIR	
3	-10.325000		0.590000		1.740000		ZNSE	
4	-11.457900		4.735000		1.800000		AIR	
5	2.575100		0.392000		1.170000		GERMANIUM	P
6	2.486700		1.308375	S	1.000000		AIR	
IMS	0.000000		0.000000		0.699096	S		

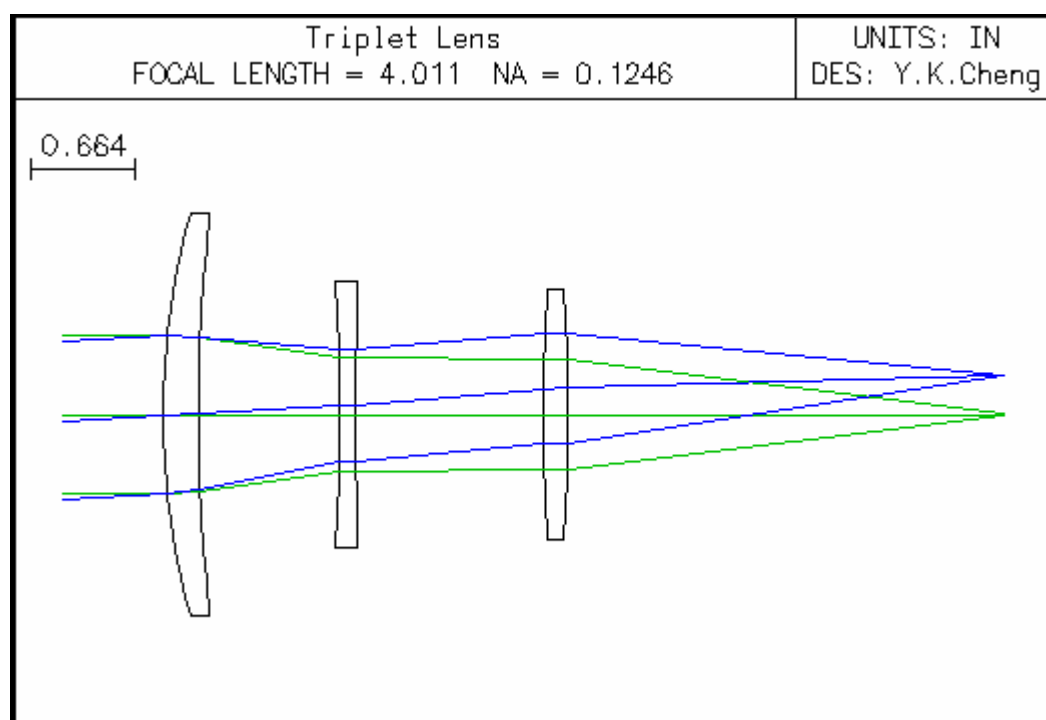
表 3-3 紅外三合透鏡

入射瞳孔與第一鏡面相接觸。這是 $f/2$ 且具有焦距長 10 以及視場 8° 。第一鏡面到像距為 12.865。畸變=0.2%。

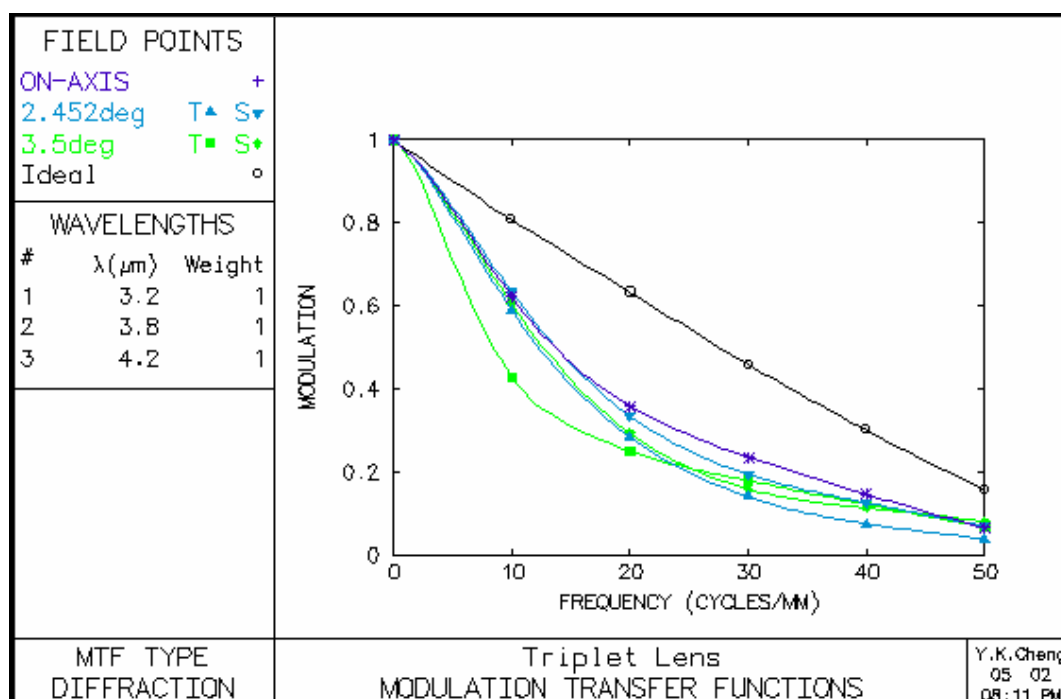
注意到後端透鏡實際上是負透鏡且作用為一個場平面鏡是有趣的。考慮到長波長, 這透鏡幾乎就是繞射極限。

圖 3-4 是第 4 個解最佳化的結果, EFL=4 吋。表 3-4 給定透鏡規範。這個透鏡是 $f/4$ 具有視場 7° 。第一鏡面到像距為 5.338。注意到在圖像中孔徑光圈在透鏡後方。在一些應用上, 這可以成為一個優勢, 但它也導致前端元件變大。畸變少於 0.2% 而且是針孔畸變。

在圖 3-5 表示一個等效焦距長 50 吋, $f/8$ 三合透鏡覆蓋了一個 2.25*2.25 (對角線長 3.18) 底片版。它被設計來用為業餘天文學家的照像術。畸變是可忽略的。

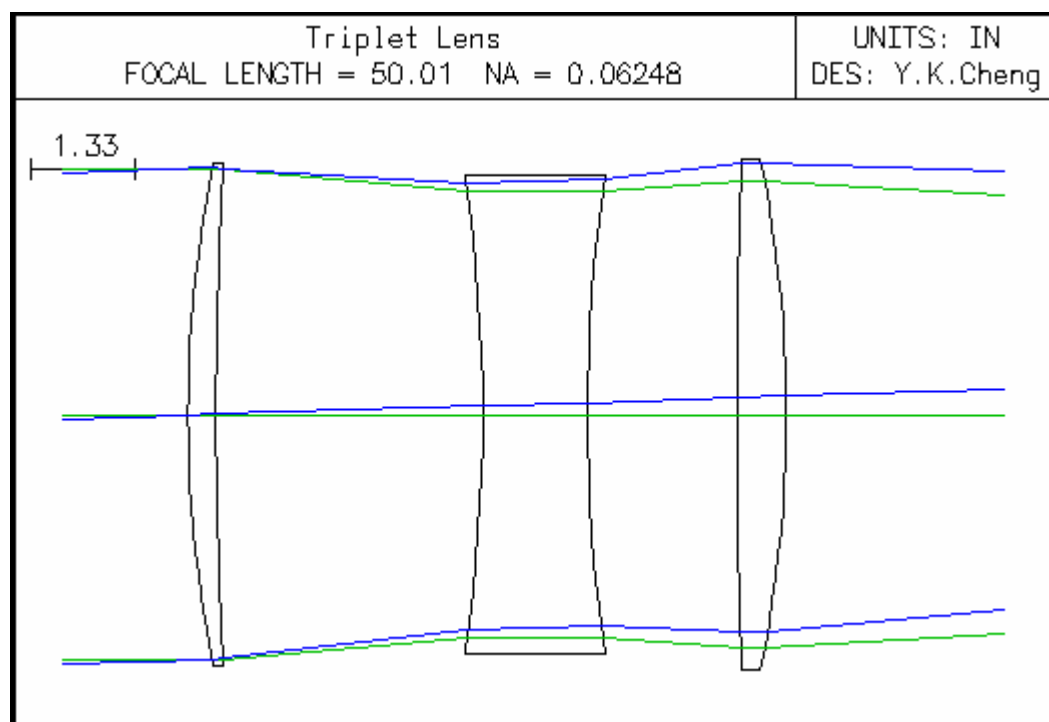


(a)

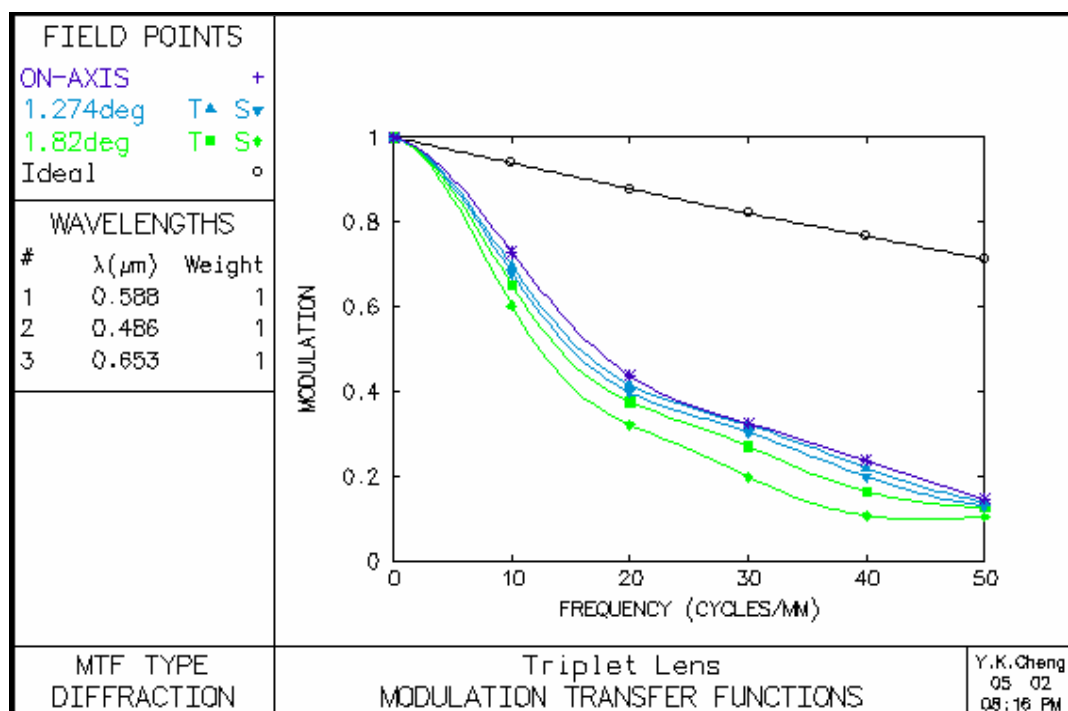


(b)

圖 3-4 (a) 三合透鏡 (b) 系統 MTF



(a)



(b)

圖 3-4 (a) 三合透鏡 (b) 系統 MTF

注意到不像圖 3-2 的三合透鏡，孔徑光圈是在透鏡前方，而且中央元件非常厚。為了作為實用的裝置，這個元件需要再薄一些。透鏡的規範表示在表 3-5。

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS
OBJ	0.000000	1.0000e+20	6.1163e+18	AIR
1	0.000000	-12.069000	0.500000	AIR
AST	4.832800	0.222000	1.280000	SILICON
3	10.819800	0.898000	1.280000	AIR
4	-11.100300	0.100000	0.845000	GERMANIUM
5	25.385800	1.192000	0.845000	AIR
6	12.182000	0.152000	0.800000	SILICON
7	-16.342400	2.774000	0.800000	AIR
IMS	0.000000	0.000000	0.246789	S

表 3-4 三合透鏡

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS
OBJ	0.000000	1.0000e+20	3.1776e+18	AIR
1	0.000000	0.321000	3.125000	AIR
AST	15.926500	0.357000	3.195000	SK16
3	56.819900	3.389000	3.195000	AIR
4	-19.850300	1.332000	3.000000	LF5
5	20.908300	1.902000	3.040000	AIR
6	87.765200	0.620000	3.250000	SK16
7	-16.117700	47.236787	3.250000	AIR
IMS	0.000000	0.000000	1.589188	S

表 3-5 三合透鏡

第一鏡面到像距是 54.810。所限制的像差是縱向第二色差。這接近 0.7mm。

參考文獻

- Ackroyd, M. D. (1968) . Wide angle triplets, U.S. Patent 3418040.
- Ackroyd, M. D. (1969) . Triplet type projection lens, U.S. Patent 3443864.
- Arai, Y. (1980) . Achromatic objective lens, U.S. Patent 4190324.
- Conrad, L. H. (1972) . Three element microphotographic objective lens, U.S. Patents 3640606 and 3640607.
- Kingslake, R. (1968) . Triplet covering a wide field, U.S. Patent 3418039.
- Kobayashi, K. (1969) . Ultra-achromatic fluorite silica triplet, U.S. Patent 3486805.
- Sharma, K. D. (1982) . Utility of low index high dispersion glasses for Cook triplet design, Appl., 21:1320.
- Sharma, K. D., and Gopal, S. V. (1982) . Significance of selection of Petzval curvature in triplet design, Appl. Opt., 21:4439.
- Stephens, R. E. (1948) . The design of triplet anastigmat lenses, JOSA, 38:1032.
- Tronnier, E. (1965) . Three lens photographic objective, U.S. Patent 3176582.
- Vogel, T. (1968) . Infrared optical system, U.S. Patent 3363962.