

# 聚焦电子束离子束用的低球差 塞普帖静电透镜的特性\*

屠聿善

(中国科学院电子学研究所)

## 提 要

塞普帖透镜作为低球差静电透镜,经实践证明是一种比较理想的结构。本文提供的在不同几何尺寸和电极电压下的计算结果,可供不同场合下选择使用的依据。

离子注入和离子分析中微离子束斑的获得,对大规模、超大规模集成电路的实现和表面分析技术的发展具有重要意义。可获得的微束斑直径和束流的大小与所采用的离子光学光路设计有关。聚焦离子束要用长焦距物镜,因此低球差静电透镜的设计乃是离子光学研究中的重要课题。同样对于用全静电聚焦电子束的电子光学仪器和电子束器件,低球差静电透镜的设计也是很重要的。迄今,作为低球差静电透镜,塞普帖的单电位不对称结构仍占重要地位<sup>[1,2]</sup>。但尚未见到关于这种透镜特性的较全面数据,因而影响其进一步推广使用。本文根据文献[3],用计算机求解静电透镜各参数,算出了该透镜在不同几何尺寸和电极电压下的像方、物方焦点位置、焦距、球差、色差系数等等,从而具备了进行光路设计的条件。高斯像面位置:

$$x_l = \frac{f_0 \cdot f_l}{x_0}, \quad (1)$$

式中  $x_l$  为高斯面离像方焦点的距离,  $x_0$  为物的位置离物方焦点的距离,  $f_0$ 、 $f_l$  为物方、像方焦距。高斯像几何放大率:

$$M = \frac{f_0}{x_0} = \frac{x_l}{f_l}. \quad (2)$$

角放大率:

$$M_\theta = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{V_l}{V_0}}, \quad (3)$$

式中  $V_0$ 、 $V_l$  为物方、像方的电位。高斯束斑直径:

$$d_g = M \cdot d_0, \quad (4)$$

式中  $d_0$  为电子、离子光学“物”的大小;一般为交叉点或用限制膜孔作为物孔时的直径。高斯面上球差模糊圆直径:

\* 1980年11月26日收到。

$$d_s = 2C_s\alpha^3, \tag{5}$$

式中  $C_s$  为球差系数,  $\alpha$  为电子束(或离子束)的张角. 高斯面上色差模糊圆直径:

$$d_c = C_c \frac{\Delta U + U_0}{U} \alpha, \tag{6}$$

式中  $\Delta U$  为电源电压波动值,  $U_0$  为电子热初速和由于电子束交叉形成的能量分散,  $C_c$  为色差系数. 考虑到透镜的球差、色差的影响, 在高斯像面上束斑直径为:

$$d^2 = d_g^2 + d_s^2 + d_c^2. \tag{7}$$

考虑透镜的球差, 并在要求的束径和一定的电子枪亮度下, 最大束流:

$$I = \frac{0.0885\pi^2 B d^{8/3}}{C_s^{2/3}}, \tag{8}$$

式中  $B$  为电子(或离子)枪亮度,  $d$  为束斑直径. 相应的最佳孔径角为:

$$\alpha_{最佳} = d^{1/3}(2C_s)^{-1/3}. \tag{9}$$

总之, 通过计算静电透镜的特性值, 可决定像面位置、束斑大小和最大束流.

用计算机求解静电透镜特性的方法简述如下:

首先根据电极几何形状用有限差分法解拉普拉斯方程

$$\nabla^2 U = 0, \tag{10}$$

求得轴上电位后, 再解傍轴轨迹方程

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{\phi''(z)}{2\phi(z)} \frac{dr}{dz} + \frac{\phi''(z)}{4\phi(z)} r = 0, \tag{11}$$

式中  $\phi(z)$ 、 $\phi'(z)$ 、 $\phi''(z)$  为轴上电位及其一阶、二阶导数. 以  $r = r_0, r'_0 = 0$  为初始条件, 分别从像方和物方平行入射, 求得主平面、焦点和焦距; 然后利用格拉度 (Glaser) 公式求得焦点上的球差、色差系数  $C_s$ 、 $C_c$ , 即:

$$C_s = \frac{1}{16\sqrt{\phi_0}} \int_{z_0}^{z_i} \phi^{-3/2} \left[ \frac{4}{5} \phi'''^2 + \frac{5\phi'^4}{24\phi^2} + \frac{14\phi'r'_a}{13\phi r_a} - \frac{3}{2} \phi'^2 \frac{r_a^{1/2}}{r_a'^2} \right] r_a^4 dz, \tag{12}$$

$$C_c = \frac{3}{8\sqrt{\phi_0}} \int_{z_0}^{z_i} \frac{\phi'^2}{\phi^{5/4}} r_a^2 dz, \tag{13}$$

透镜特性计算值与实测值的比较

参数比较	$V_2/V_1$	焦距 (mm)	球差系数 (mm)	色差系数 (mm)	$C_s/f$
计算	0	0.27	0.18	0.16	0.63
	0.32	25.7	393.7	71.3	15.3
	0.40	35.1	1405	93.7	40.1
	0.41	37.2	2912	105.3	75.2
实测	0.40	35	~1500		~42.8
	0.41	37	~3000		~80.5

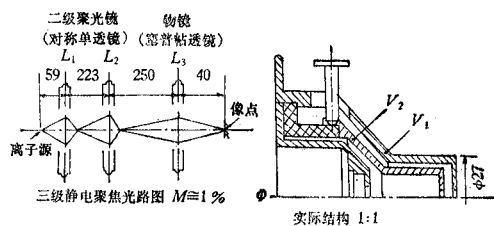


图1 塞普帖低球差透镜用于离子探针时的电子光学光路设计、实际结构以及计算值与实测的比较.

Fig.1 The electron-optical design and typical construction of Septier's electrostatic lens of small spherical aberration for use in an ion probe, and comparison of calculated values and measured values of its characteristics

上两式中  $r_a, r'_a$  是傍轴轨迹方程 (11) 的解, 其初始条件为  $r_0 = 0, r'_0 = 1; z_0$  为焦点位置;  $z_i$  为像方或物方等位空间所在位置。

图 1 为塞普帖低球差静电透镜在离子探针中应用的光路设计、实际结构<sup>[4]</sup>和用本文计算得的透镜特性与实测结果的比较。由图中的表可见, 当焦距  $f=37\text{mm}$  时, 焦点上的球差系数约为  $3000\text{mm}$ , 如果采用对称单透镜, 在相同的焦距下, 球差系数约达  $28000\text{mm}$ , 大很多倍。因而, 采用塞普帖不对称低球差透镜, 对减小束斑直径, 增大束流很有意义。

为了扩大塞普帖静电透镜的应用, 对不同的几何尺寸的透镜进行了全面计算, 计算时, 电压比都在一定范围内改变。透镜的主要几何尺寸分别用  $A、B、C、D、E、P、Q$  表示, 见图 2。不同透镜的特性都列在表中。另外为了直观其变化规律, 给出了一些相应的曲线。使用者可根据实际要求选择合适的几何尺寸。应指出: (1) 表中所给电极尺寸的单位为毫米, 根据电子光学缩尺原理, 对透镜各极电压和几何尺寸可按比例缩小或放大; (2) 表中的焦点位置值均以图 2 的坐标系统为基准, 原点在左边电极的左侧; (3) 表中所给  $C_s、C_c$  的数据是在焦点位置上的值。当实际成像高斯面位置不在像方焦点上时, 成像面上的球差、色差系数修正公式为<sup>[5]</sup>:

$$C'_s = C_s \left(\frac{l}{f_l}\right)^4, \quad C'_c = C_c \left(\frac{l}{f_l}\right)^2, \quad (14)$$

式中  $C_s、C_c$  为焦点上的值,  $C'_s、C'_c$  为像面上的实际值,  $l$  为当物距不为无穷远的像距, 以像方主平面位置作为坐标原点。

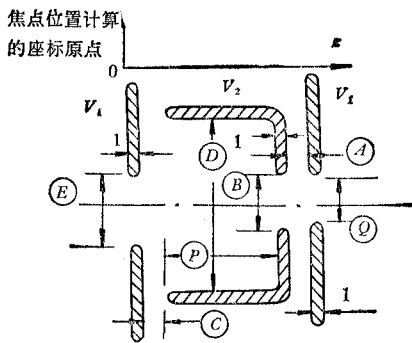


图 2 塞普帖静电透镜主要尺寸所用的符号说明  
(塞普帖透镜原始尺寸<sup>[8]</sup>:  $A=2, B=4, C=4,$   
 $D=12, E=6, P=16, Q=3$ )

Fig. 2 The symbols used to indicate the main dimensions of Septier's electrostatic lens. (the original dimensions of Septier's lens<sup>[8]</sup>:  $A=2, B=4, C=4,$   
 $D=12, E=6, P=16, Q=3$ )

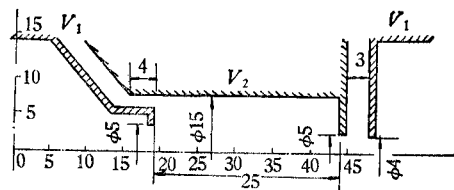


图 3 低球差塞普帖静电透镜改进型  
式一例及其主要电极尺寸

Fig.3 An improved type Septier's electrostatic lens and its main dimensions

最后就有关计算结果作几点讨论:

(1) 为了降低静电透镜球差系数, 在不同场合曾分别采用过扩展场透镜、指数场透镜和双曲场透镜。采用不对称结构降低球差也有不少人进行过研究<sup>[6,7]</sup>。但塞普帖提出的结构对获得长焦距物镜是比较理想的结构。在他的基础上仍可进一步改进, 例如图 3 所

示结构。其特性数据见表 24。

(2) 有关计算透镜特性所用程序的误差分析以及计算结果与实测结果的比较详见文献[3]。误差小于 5%。文献[8]给出的塞普帖透镜原始尺寸的焦距估计值约为 10mm, 最低球差系数  $C_s/f$  约为 2.5。现用本程序计算塞普帖透镜原始尺寸(见图 2), 作为物镜使用时, 如  $U_2/U_1$  为 0.14—0.15, 则  $C_s/f$  的最小值为 3.2, 焦距为 13.5mm。

(3) 由于篇幅所限, 本文只提供 23 种不同几何尺寸, 每种尺寸下电压比改变 17 种, 供参考。读者可根据对焦点位置和焦距的实际要求, 选择使用。

(4) 七十年代以来文献[9—11], 分别对双电位浸没透镜、对称和不对称单电位透镜以及三电极三电位透镜进行了计算, 并给出了图表, 给工程设计带来很大方便。本文提供了一种新类型的低球差静电透镜设计数据, 对获得大电流密度、细束斑的离子束和电子束有实用意义。

本项工作得到中国科学院仪器厂王理等同志的支持和帮助, 数值计算是在科学院计算所 111 机上进行的, 在此一并致谢。

符号说明:  $F$  为焦点位置, 坐标原点在左边电极左侧(见图 2);  $f$  为焦距;  $C_s$  为球差系数;  $C_c$  为色差系数;  $V_2$  为中间电极电压;  $V_1$  为边电极电压。

表 1 Tab.1(原尺寸)

表 2 Tab.2 ( $A=0.8$ )

电压比 $V_2/V_1$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	$F$	$f$	$F$	$f$				$F$	$f$	$F$	$f$			
0.1	21.7	11.0	15.8	3.61	56.31	22.22	5.14	21.8	10.1	16.8	3.41	56.1	16.0	5.55
0.15	25.2	13.6	13.6	5.47	44.48	45.82	3.27	25.6	13.9	14.8	5.10	44.4	45.2	3.19
0.2	28.0	14.2	10.9	7.94	55.37	43.32	3.91	28.3	14.0	12.3	7.28	49.7	40.6	3.55
0.25	30.8	15.9	7.48	11.5	104.1	45.42	6.54	30.6	15.5	9.1	10.3	102.8	43.8	6.63
0.3	34.2	18.6	3.28	16.3	225.1	52.22	12.1	34.1	18.0	5.2	15.1	233.1	49.3	12.95
0.35	38.4	22.3	-1.63	22.2	500.1	61.03	22.4	39.1	21.4	0.4	21	537.9	57.6	25.14
0.4	43.7	27.4	-7.51	27.4	1122.5	72.94	41.0	43.1	26.1	-5.2	26.1	1235	68.7	47.32
0.45	50.7	34.1	-14.4	34.2	2548.0	88.86	74.68	49.7	32.4	-13.3	32.5	2848	83.6	87.90
0.5	60.2	43.4	-24.2	43.4	5916.9	110.3	136	58.6	41.1	-21.6	41.2	6678	103.7	162.5
0.6	92.1	75.1	-57.1	75.0	36277	181.8	483	88.6	70.8	-62.4	71.1	41305	170.6	583.4
0.7	165.0	147.8	-130.4	148.0	305171	340.3	2065	157.0	138.9	-121	139.5	347330	318.4	2500.6
0.8	384.3	366.9	-350.2	367.5	4909360	801.7	13378	362	343.7	-328	346	5536700	746.1	16109.1
2.0	58.2	41.9	-22.7	41.8	4148	53.8	99.1	56.8	39.8	-19.6	39.6	4666	50.9	117.2
3.0	35.5	21.0	2.23	23.3	222.8	18.9	10.6	78.3	20.2	-4.3	23.5	229	17.9	11.34
4.0	29.2	17.8	9.95	18.8	87.39	13.1	4.91	29.4	17.5	11.5	17.5	86.5	12.9	4.94
5.0	25.2	19.9	13.4	15.2	146.7	17.4	7.36	25.4	21.2	14.6	14.1	169	20.5	7.97
6.0	21.2	29.3	15.3	13.0	401.9	94.8	13.74	21.2	29.6	16.3	12.1	414.2	3.35	13.99

表 3 Tab.3 (A = 1.2)

表 4 Tab.4 (A = 2.8)

电压比 $V_2/V_1$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	F	f	F	f				F	f	F	f			
0.1	21.8	10.2	16.5	3.43	57.5	17.1	5.64	21.7	11.1	14.8	3.91	55.8	25.3	5.03
0.15	36.5	13.8	14.5	5.17	41.1	44.3	2.98	25.1	13.6	12.4	6.03	42.3	46.1	3.11
0.2	28.2	14.0	11.9	7.41	52.8	42	3.77	27.9	14.6	9.3	9.02	59.1	45.3	4.05
0.25	30.1	15.6	8.7	10.6	102.8	44.3	6.59	31.0	16.6	5.6	13.40	114.5	49.7	6.90
0.3	34.1	18.1	4.7	15.4	230	50.2	12.7	34.6	19.6	1.1	19.0	239.2	56.5	12.2
0.35	38.1	21.6	-0.9	21.3	525	58.5	24.3	39.1	23.7	-4.2	23.7	516.8	66.2	21.8
0.4	43.2	26.4	-5.9	26.4	1196	69.9	45.3	44.9	29.2	-10.4	29.3	1135	79.2	38.9
0.45	50	32.9	-13	32.9	2745	85.2	83.4	52.5	36.6	-18.3	36.6	2538	96.5	69.3
0.5	59	41.7	-22.5	41.8	6419	105.6	154	62.8	46.7	-28.8	46.7	5833	119	124.9
0.6	81	72.1	-53	72.2	39591	174	549	97.5	81.2	-63.9	81.2	35304	197.6	434.8
0.7	159	141.5	-123	142	332904	325	2352	176.8	160.3	-133	160.2	295070	370	1840.7
0.8	368	350.6	-334	352	5320300	762.6	15174	415	399	-381	398	4733000	872	11871.1
2.0	57.2	40.5	-20.6	40.3	4487	51.8	110.8	60.8	45.3	-27	45.2	4121	58.6	91.0
3.0	75.4	20.5	3.7	233	227	18.3	11.07	82.5	22.3	-0.5	23	239.3	20.6	10.73
4.0	29.4	17.6	11	17.9	87	12.9	4.94	29.4	18.5	8.1	20.8	103	14.2	5.57
5.0	25.4	20.8	14.2	14.4	160.7	19.6	7.73	25.2	20	12	16.9	144.5	17.5	7.23
6.0	21.3	29.5	16	12.3	410	98.3	13.9	21.2	28.6	14.2	14.5	375.7	87.3	13.1

表 5 Tab.5 (A = 3.2)

表 6 Tab.6 (B = 3)

电压比 $V_2/V_1$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	F	f	F	f				F	f	F	f			
0.1	21.7	11.25	14.3	4.07	51.9	27.4	4.61	21.2	10.1	17.1	2.92	57.4	17.0	5.68
0.15	25.0	13.5	11.7	6.4	48.8	48	3.61	25.2	12.8	15.2	4.52	34.4	40.8	2.69
0.2	27.9	14.8	8.5	9.62	62.0	46.5	4.19	34.4	13.1	12.8	6.61	49.4	38.8	3.77
0.25	31.5	17.0	4.6	14.6	120	51.3	7.06	30.3	14.6	9.7	9.52	105.9	41.6	7.25
0.3	34.7	20.1	0	19.8	246.8	58.4	12.3	33.3	17.1	5.9	13.7	233.5	48	13.7
0.35	39.4	24.4	-5.2	24.4	526	68.5	21.6	37.1	20.5	1.2	19.9	522.3	56.3	25.5
0.4	45.4	30.1	-11.6	30.1	1144	82.0	38.01	42.0	25.1	-4.4	25.1	1165	67.5	46.4
0.45	53.3	37.8	-19.9	37.8	2540	100	67.2	48.5	31.4	-11.5	31.4	2623	82.3	83.5
0.5	63.9	48.2	-30.8	48.2	5807	124	120.5	57.3	40.0	-20.6	40.0	6035	102.4	150.8
0.6	100	84	-67.1	84	34926	205	415.8	87.0	69.5	-50.9	69.6	36358	169	523.1
0.7	182	166	-149	166	291110	384	1753.7	155	137.2	-119	137.4	301350	317	2196
0.8	429	413	-396	412	4667600	904	11302	359	341.7	-324	342.3	4784300	747	14001
2.0	62	46.7	-28.9	46.7	4115	60.7	88.12	56.8	40.0	-20.5	40.0	3952	51	98.8
3.0	85	17.5	-1.6	23.2	247	21.3	14.11	73.1	20.3	3.5	23.5	210	18.1	10.3
4.0	29.4	18.8	7.2	21.7	99.9	14.2	5.31	12.8	17.5	10.7	18.0	81	12.6	4.63
5.0	25.2	19.9	11.3	17.7	142.8	16.8	7.18	25.3	20.2	14	14.5	146	18.5	7.23
6.0	21.2	28.3	13.6	15.2	358	79.6	12.7	21.2	29.5	15.8	12.5	410	95	13.9

表 7 Tab.7(B=5)

表 8 Tab.8(B=6)

电压比 $V_2/V_1$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	F	f	F	f				F	f	F	f			
0.1	21.7	11.0	14.3	4.4	60.5	24.9	5.5	21.4	11.3	12.8	5.22	62	27.7	5.49
0.15	25.4	14.2	11.8	6.67	56.8	50.2	4.0	25.4	14.7	10	7.92	66.5	53.7	4.5
0.2	28.3	15.2	8.6	9.7	62.8	47.3	4.13	28.6	16.1	6.6	12	77.8	51.9	4.83
0.25	31.5	17.3	4.8	14.5	115.9	51.2	6.7	32.0	18.4	3.4	17.2	130	55.4	7.06
0.3	35.2	20.4	0.3	20	240	57.8	11.76	36.1	21.8	-2.2	21.8	258	62.5	11.86
0.35	39.8	24.5	-4.8	24.5	525	67.4	21.4	41.0	26.4	-7.6	26.4	553	72.8	20.9
0.4	45.7	30.1	-11.2	30.1	1171	80.5	38.9	47.4	32.4	-14.3	32.4	1223	86.8	37.7
0.45	53.5	37.5	-19.2	37.6	2661	97.9	71	55.7	40.4	-22.8	40.4	2768	105.4	68.5
0.5	63.8	47.7	-29.8	47.7	6196	121	130	66.9	51.4	-34.2	51.4	6446	130.6	194.5
0.6	99.0	82.5	-65.3	82.6	38243	199	463.5	104	88.8	-72.2	88.8	39916	214.3	449.5
0.7	179	162	-145	162	323490	372	1996	180	174	-158	174	339160	400	1949
0.8	417	402	-385	402	5219100	876	12982	447	432	-415	431.1	5495500	939	127536
2.0	60.8	45.0	-265	45	4537	58.5	100.8	62.8	47.4	-29.5	47.4	4841	62.2	102
3.0	36.2	22.2	0.1	23	249.1	20.5	11.22	36.6	23.1	-1.5	23.4	270.8	21.6	11.7
4.0	29.5	18.4	8.6	20.4	95.5	13.8	5.19	29.6	18.9	7.5	21.8	107.4	14.5	5.7
5.0	25.3	20.3	12.4	16.5	153.3	18.2	7.55	25.3	20.4	13.4	17.6	155.5	18.2	7.62
6.0	21.2	28.8	14.5	14.1	382.8	89.3	13.3	21.2	28.4	13.9	15.0	369	84.8	13

表 9 Tab.9(C=3)

表 10 Tab.10(C=5)

电压比 $V_2/V_1$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	F	f	F	f				F	f	F	f			
0.1	20.9	11.3	14.8	3.63	56.2	23.7	4.97	22.8	10.9	16.8	3.61	59.9	21.6	5.5
0.15	24.3	13.3	12.6	5.53	45.2	44.5	3.4	26.4	13.8	14.6	5.48	45.1	47.2	3.27
0.2	26.9	14.0	9.8	8.1	54.9	42.4	3.92	29.2	14.4	11.8	7.98	54.4	44.1	3.78
0.25	27.7	15.8	6.3	12.0	106	45.8	6.7	32.0	16.2	8.3	11.6	107	47.3	6.6
0.3	33.1	18.5	2.1	17.3	227	52.3	12.3	35.5	19.0	4.1	16.8	235	53.5	12.4
0.35	37.3	22.2	-2.7	22.2	501	61.2	22.7	39.8	22.8	-1	22.7	526	62.6	23.1
0.4	42.6	27.3	-8.6	27.3	1117	73.1	40.9	45.2	28.0	-7.1	28	1185	74.9	42.3
0.45	49.7	34.0	-16	34.1	2526	89.1	74.3	52.5	34.9	-14.7	34.9	2694	91.2	77.2
0.5	59.2	43.4	-25.8	43.4	5849	111	134.8	62.2	44.4	-24.7	44.5	6259	113	140.9
0.6	91.2	75.2	-38.2	75.2	35716	182.3	474.9	95	77.0	-58.1	77.1	38336	186	497.9
0.7	164	148	-130	148	299480	341	2023	169	151	-133	151.8	321850	349	2123
0.8	383	368	-351	367.5	4798800	802	13040	394	376	-359	377	5159300	821	13721
2.0	57.3	42.0	-23.9	42.0	4101	54.1	97.6	60.3	43.1	-22.9	43	4395	55.4	101.9
3.0	34.5	20.9	0.9	22.6	226.8	19.1	10.8	36.9	21.6	2.8	23.8	232	195	10.7
4.0	28.2	17.6	8.7	19.2	91.1	13.1	5.17	33.5	18.3	10.7	19.3	85.6	13.3	4.68
5.0	24.3	19.6	12.2	15.5	144	17.5	7.35	27.6	21.0	14.2	15.5	157.2	19.1	7.4
6.0	20.4	28.3	14.2	13.3	384	88.3	13.5	22.1	30.2	16.2	13.3	422	98.7	14

表 11 Tab.11 (C = 6)

表 12 Tab.12 (D = 10)

电压比 $V_2/V_1$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	$F$	$f$	$F$	$f$				$F$	$f$	$F$	$f$			
0.1	23.9	12.4	17.8	3.59	58.6	26.9	4.72	19.3	8.12	15.8	3.56	36.5	9.13	4.5
0.15	27.5	14.0	15.6	5.46	37.2	46.1	2.65	23.6	14.4	13.6	5.42	96.4	46.4	6.69
0.2	30.3	14.6	12.8	7.94	51.8	43.8	3.55	26.9	15.0	10.8	7.86	73.1	46.8	4.87
0.25	35.5	16.4	9.4	11.5	108	47.8	6.58	29.9	16.4	7.4	11.5	105	46.8	6.4
0.3	36.7	19.2	5.0	17.0	242	54.2	12.6	33.3	18.8	3.1	16.9	208	52.4	11.06
0.35	41.1	23.1	-0.1	22.8	548	63.4	23.7	37.5	22.3	-1.9	22.3	448	60.7	20.1
0.4	46.6	28.4	-6.3	28.3	1237	75.9	43.5	42.8	27.2	-7.7	27.2	1000	72.1	36.8
0.45	53.9	35.4	-14.1	35.3	2816	92.4	79.5	49.7	33.8	-15	33.8	2273	87.6	67.2
0.5	63.7	45.1	-24.2	45.0	6544	114.8	145	59.0	42.9	-24.6	42.9	5300	109	123.5
0.6	97	78.1	-58.1	78.0	40102	189.2	513	90.5	74.0	-56.6	74.1	32774	179	362.1
0.7	173	154	-133	153.7	336652	354	2186	162	145.8	-128	145.8	277340	334.8	1902
0.8	401	383	-363	381.6	5395390	832	14087	378	361	-344	361	4473500	788	12388
2.0	61.9	43.6	-22.4	43.7	4606	56.2	105.6	57.6	41.9	-23	41.8	3843	53.3	91.7
3.0	85.6	24.5	3.8	21.8	236.7	19.7	9.66	35	21.3	1.8	23.1	219.3	19.1	10.3
4.0	31.7	19.3	14.5	18.5	87.26	13.7	4.52	28.6	18.5	9.7	19.3	110.7	14.2	5.98
5.0	27.6	15.5	12.2	20.8	138.8	17.4	8.95	24.1	23.9	13.2	15.5	236	32.0	9.87
6.0	23.3	13.3	17.2	31.7	477.7	103	35.9	20	281	15.2	13.3	369	94.9	13.1

表 13 Tab.13 (D = 14)

表 14 Tab.14 (D = 16)

电压比 $V_2/V_1$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	$F$	$f$	$F$	$f$				$F$	$f$	$F$	$f$			
0.1	23.6	12.2	15.7	3.71	33.5	40	2.75	24.7	11.2	15.6	3.83	16.8	40	1.5
0.15	26.3	12.5	13.5	5.63	28.5	40.6	2.28	27.1	11.8	13.4	5.78	27.7	38.4	2.34
0.2	28.8	13.7	10.7	8.23	54.4	42.1	3.97	29.2	13.3	10.6	8.45	62.2	41.5	4.67
0.25	31.7	15.8	7.3	12.1	118.8	46.7	7.52	32.4	15.6	7.2	12.3	139	47.1	8.9f
0.3	35.1	18.8	3.0	17.2	265	53.7	14.1	35.8	18.8	3.0	17.7	310	54.5	16.5
0.35	39.4	22.7	-1.9	22.7	592	63.2	26.1	40.3	22.9	-2	22.9	685	64.5	29.9
0.4	45	28.0	-8.0	28	1317	75.8	47.03	45.9	28.4	-8.2	28.4	1510	77.5	53.17
0.45	52.2	35.1	-15.7	35.2	2965	92.5	84.5	53.4	35.7	-16	35.7	3367	94.7	94.3
0.5	62.1	44.8	-25.9	44.9	6829	114	152.4	63.5	45.7	-26.4	45.7	7695	117.8	168.4
0.6	95.4	77.9	-59.6	78	41296	189	530.1	97.6	79.6	-61	79.8	45992	194	577
0.7	171.3	153.7	-136	153.9	343700	354	2236	175.4	157.3	-139	157.6	379700	363	2413
0.8	399	382	-365	382	5476200	833	14336	409	391	-374	392	6014600	853	15383
2.0	59.9	43.2	-23.8	43.1	4646	56.1	107.5	61	43.8	-24.2	43.7	5076	57.3	116
3.0	36.3	21.2	1.8	22.7	242	19.5	11.4	36.9	21.2	1.8	22.5	259.5	19.7	12.2
4.0	30	17.5	9.7	19	797	12.9	4.55	30.6	17.1	9.7	18.9	76.5	12.7	4.47
5.0	26.3	18.5	13.2	15.4	95.4	13.7	5.16	27.1	17.4	13.2	15.4	70.7	12.1	4.06
6.0	22.5	29	15.2	13.3	360	72.2	12.4	23.7	25.9	15.2	13.2	238.4	43.5	9.2

表 15 Tab.15( $E=4$ )表 16 Tab.16( $E=8$ )

电压比 $V_2/V_1$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	$F$	$f$	$F$	$f$				$F$	$f$	$F$	$f$			
0.1	21.2	10.2	15.8	3.62	53.6	16.1	5.25	22.3	12.4	15.76	3.62	55.8	30.8	4.50
0.15	24.8	13.9	13.5	5.5	55.2	46.0	3.97	25.6	13.3	13.53	5.5	38.3	45.2	2.88
0.2	27.6	14.4	10.8	8.0	59.1	43.1	4.10	28.3	14.1	10.76	8.02	53.3	43.3	3.78
0.25	25.8	16.1	7.3	11.8	106	45.9	6.58	31.3	16.0	7.30	11.8	110.6	47.4	6.91
0.3	33.8	18.7	3.1	17.1	220	51.9	11.76	34.8	18.8	3.04	17.0	245.5	53.9	13.06
0.35	38.0	22.4	-1.8	22.4	481	60.5	21.47	39.1	22.7	-1.98	22.6	551.2	63.2	24.3
0.4	43.3	27.3	-7.7	27.3	1069	72.1	39.16	44.6	28.0	-8.03	28.0	1240.4	75.7	44.3
0.45	50.2	34	-15.1	34.0	2412	87.8	70.94	51.9	35.0	-15.7	35.0	2817.9	92.3	80.5
0.5	59.5	43.1	-24.8	43.2	5582	109	129.51	61.7	44.6	-25.8	44.6	6543.5	114.7	146.7
0.6	91.0	74.4	-5.7	74.6	34055	179	457.73	94.9	77.6	-59.3	77.3	40082	189.1	516.5
0.7	162.9	146	-129	146.7	285160	335	1953.2	170.7	153.2	-134.6	152.1	336819	353.9	2198
0.8	378.6	361	-347.6	364	4562100	788	12637	398.9	381	-358.5	375	5406900	833.1	14191
2.0	56.8	41.2	-22.6	41.1	3845	53.0	93.3	60.5	43.7	-24.2	43.7	4782	56.4	109
3.0	34.2	21.1	1.8	23.2	270.2	19.5	12.8	36.9	21.4	1.78	23.4	240.8	19.4	11.25
4.0	27.4	19.0	12.4	19.2	214.1	16.3	11.3	27.6	17.4	9.70	19.2	61.6	12.1	3.54
5.0	21.9	27.4	13.2	15.5	635	79.3	23.2	27.3	17.7	13.2	15.5	55.1	11.7	3.11
6.0	18	24.7	15.2	13.2	459	91.2	18.6	24.2	22.6	15.2	13.3	115.4	24.2	5.10

表 17 Tab.17( $E=10$ )表 18 Tab.18( $P=10$ )

电压比 $V_2/V_1$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	$F$	$f$	$F$	$f$				$F$	$f$	$F$	$f$			
0.1	22.7	12.8	15.8	3.61	51.8	36.9	4.05	19.13	8.56	9.50	4.21	15.3	33.5	1.79
0.15	25.2	13.2	13.5	5.50	33.2	44.5	2.52	21.16	9.81	7.27	6.59	29.8	35.3	3.03
0.2	28.6	14.0	10.8	7.99	53.6	43.4	3.82	23.4	11.62	4.59	9.85	64.2	38.9	5.53
0.25	31.6	16.0	7.30	11.7	116.5	48.1	7.27	25.1	14.0	1.44	13.3	137.2	44.6	9.80
0.3	35.1	18.9	3.02	16.9	263.2	54.9	13.9	29.5	17.1	-3.25	17.1	296.0	52.0	17.3
0.35	39.5	22.9	-2.06	22.6	594.5	64.4	25.9	33.6	21.1	-6.72	21.1	637.7	61.6	30.2
0.4	45.2	28.3	-8.21	28.3	1340	77.2	46.1	39.1	26.4	-12.4	26.4	1383	74.2	52.3
0.45	52.6	35.5	-16.0	35.5	3046	94.3	85.8	46.2	33.5	-13.7	33.5	3047	90.7	91.0
0.5	62.7	45.3	-26.3	45.2	7073	117.2	156.0	55.9	43.1	-29.5	43.1	6906	112.8	160.4
0.6	96.6	79.1	-60.9	78.2	43336	193.4	548.1	88.7	75.6	-32.4	75.7	40838	186.1	539.9
0.7	174.2	156.5	-135.6	152.9	346436	362.1	2214	163.2	150.2	-137.3	150.3	335240	348.2	2232
0.8	407.6	389.3	-356.7	373.1	5854300	853.0	15039	387.5	374.4	-361.9	375	5296500	81.9	14146
2.0	61.9	44.7	-25.0	45.0	5365	57.8	120.0	53.7	41.2	-27.3	41.1	4555.5	54.9	110.5
3.0	37.7	21.6	1.77	23.9	271.2	19.7	12.56	30.8	19.1	-3.42	19.2	240.2	18.6	12.58
4.0	31.5	17.1	9.70	19.3	60.5	11.9	3.54	25.0	14.4	3.69	17.0	60.7	11.1	4.21
5.0	28.4	16.6	13.2	15.5	32.9	9.91	1.98	22.1	132.5	7.17	15.0	36.5	8.95	2.75
6.0	26.1	18.7	15.2	13.3	46.7	12.1	2.50	20.1	13.8	9.14	13.1	42.4	9.73	3.06



表 19 Tab.19 (P = 12)

表 20 Tab.20 (P = 14)

电压比 $V_2/V_1$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	F	f	F	f				F	f	F	f			
0.1	20.3	9.86	11.7	3.89	18.94	36.3	1.92	21.2	11.0	17.7	3.71	38.4	35.2	3.49
0.15	22.6	10.7	9.42	5.93	28.2	37.8	2.63	24.0	12.0	11.5	5.65	30.7	40.3	2.56
0.2	24.9	12.3	6.67	8.88	54.9	40.0	4.48	26.5	13.2	8.73	8.36	52.5	41.3	3.99
0.25	27.7	14.5	3.64	13.2	119.1	45.0	8.20	29.3	15.2	5.31	12.5	110	45.7	7.24
0.3	31.0	17.5	-0.51	17.3	261.5	52.0	14.9	32.7	18.1	1.25	17.5	2418	52.4	13.37
0.35	35.2	21.5	-5.10	21.5	573.5	61.5	26.7	36.9	22.0	-3.52	21.9	536	61.6	24.4
0.4	40.6	26.7	-10.8	26.7	1262	73.9	47.3	42.2	27.1	-9.33	27.2	1192	73.8	44.0
0.45	47.7	33.7	-18.8	33.7	2817	90.2	83.7	49.4	34.0	-16.8	34.1	2685	90.1	78.9
0.5	57.3	43.2	-27.9	43.2	6449	112.2	149.4	58.9	43.5	-25.6	43.5	6192	111.9	142.4
0.6	89.8	75.5	-60.8	75.6	38708	185.0	512.5	91.4	75.7	-59.4	75.8	37564	184.5	496.2
0.7	104	149.6	-135.2	149.8	320890	346.2	2144	165.4	149.6	-133	149.7	313550	345	2096
0.8	387	372.6	-358	372.9	5103900	814.5	13699	387.8	372	-356	372.3	5009700	81.4	13466
2.0	45.4	41.6	-25.9	41.5	4411	54.8	106.1	57.1	42.5	-24.7	41.9	4312	54.8	102.5
3.0	32.4	19.8	-1.78	20.0	232	18.7	11.8	34.1	20.5	-0.05	21.3	229	18.9	11.2
4.0	26.5	15.4	5.68	18.2	64.8	11.6	4.20	27.9	16.6	7.69	18.9	72.4	12.2	4.36
5.0	23.4	14.9	9.19	15.3	53.6	10.5	3.60	24.5	17.0	11.2	15.4	82.5	12.7	4.85
6.0	20.9	17.5	11.2	13.2	88.2	16.5	5.03	21.2	24.6	13.2	13.3	230.7	49.2	9.39

表 21 Tab.21 (Q = 2)

表 22 Tab.22 (Q = 4)

电压比 $V_2/V_1$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像 方		物 方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	F	f	F	f				F	f	F	f			
0.1	21.9	10.67	16.01	3.5	59.4	21.2	5.57	21.7	10.56	15.5	3.79	58.7	20.1	5.56
0.15	25.2	13.4	13.9	5.2	40.0	44.6	2.99	25.3	13.8	13.1	5.8	51.4	46.7	3.73
0.2	27.8	13.8	11.4	7.6	51.2	41.9	3.71	28.2	14.7	10.1	8.7	63.0	45.9	4.29
0.25	30.6	15.4	8.12	10.9	96.6	44.2	6.26	33.6	16.7	6.37	12.8	117.6	49.3	7.06
0.3	33.8	18.0	4.21	15.6	211.5	49.9	11.76	34.9	19.6	1.86	18.5	250.8	55.9	12.7
0.35	37.8	21.5	-0.52	21.3	477.1	58.3	22.2	39.3	23.6	-3.35	23.6	550.6	65.6	23.4
0.4	42.9	26.3	-6.15	26.3	1084	69.5	41.2	45.1	29.0	-9.6	29.1	1219	78.4	42.1
0.45	49.6	32.7	-13.2	32.7	2491	84.6	76.1	52.6	36.2	-17.6	36.4	2734	95.5	75.5
0.5	58.6	41.5	-22.5	41.5	5851	104.9	140.9	62.7	46.2	-28.1	46.5	6271	118.4	135.8
0.6	89.0	71.7	-53.3	71.6	36645	172.9	511.2	96.9	80.1	-63.2	80.8	37424	194.2	467.5
0.7	158.3	140.8	-122.5	140.3	314830	324	2235	174.5	157.4	-142.6	159.7	304290	359.8	1932
0.8	367.2	349.6	-329.7	347.2	519230	767	14850	405.3	388.0	-381	397.7	4637500	829	11952
2.0	55.5	38.6	-19.0	38.7	4480	49.9	115.9	62.3	46.8	-27.8	46.2	4384	60.2	93.8
3.0	34.5	19.3	1.77	22.5	221	17.4	11.45	36.9	23.2	-1.1	23.5	255.8	21.2	11.0
4.0	28.8	16.6	11.8	16.3	70.2	11.8	4.24	29.8	19.3	7.52	22.1	120.2	15.1	6.23
5.0	25.2	18.9	14.9	12.9	115.4	14.8	6.11	25.3	21.9	11.5	18.2	188.9	22.6	8.64
6.0	21.2	29.2	16.6	58.8	394.4	93.9	13.52	21.2	29.3	13.7	15.8	398.9	95.2	13.6

表 23 Tab.23 ( $Q=7$ )

表 24 Tab.24 图 3 所示改进型结构

电压比 $V_2/V_1$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$	像方		物方		$C_s$	$C_c$	$C_s/f$
	$F$	$f$	$F$	$f$				$F$	$f$	$F$	$f$			
0.1	21.74	10.31	14.8	4.35	56.78	17.68	5.51	42.05	10.96	37.31	4.58	50.70	11.94	4.62
0.15	25.63	14.5	11.8	6.89	62.4	47.1	4.32	47.46	18.26	34.45	6.99	136.5	57.56	7.47
0.2	28.89	16.0	8.12	10.8	82.3	51.3	5.13	51.48	19.36	30.89	10.18	106.1	59.6	5.48
0.25	32.4	18.4	3.60	16.5	152.4	56.9	8.27	55.32	21.08	26.42	14.86	149.4	60.26	7.08
0.3	36.5	21.7	-1.54	21.9	310.6	64.6	14.3	59.67	24.20	20.91	22.26	281.8	66.6	11.64
0.35	41.6	26.2	-7.44	26.8	649.7	75.2	24.8	64.96	28.69	14.54	28.63	592.2	77.09	20.64
0.4	48.0	32.2	-14.7	33.3	1367	89.0	42.5	71.68	34.85	7.04	34.95	1295.4	91.63	37.17
0.45	56.3	40.1	-29.3	41.9	2899	106.7	72.3	80.45	43.22	-2.34	43.40	2903.7	111.2	67.18
0.5	67.3	50.8	-36.2	53.7	6256	129.6	123.2	92.25	54.70	-14.64	54.99	6691.3	137.7	122.3
0.6	103.5	86.2	-77.5	94.3	32170	200.4	373.1	132.0	94.01	-55.42	94.80	40539	225.7	431.22
0.7	181	163.0	-171.3	187.6	211440	337.6	1297	222.2	183.9	-147.6	186.4	3359200	419.5	18266.4
0.8	390.8	371.6	-453.7	469.6	2247600	655	6049	450.3	385.2	-386.3	385.2	5234000	930.5	13587.7
2.0	75.8	63.5	-39.0	56.01	6850	86.2	107.8	90.30	53.65	-12.50	53.12	4813.6	68.42	89.72
3.0	40.3	29.4	-8.02	27.6	395.5	271.9	13.47	61.22	27.55	19.05	30.19	304.9	24.78	11.07
4.0	30.9	22.6	1.4	25.3	203.6	18.9	9.03	52.63	24.40	24.28	25.07	183.1	19.19	7.50
5.0	25.5	24.8	6.74	25.5	278.6	33.3	11.26	46.16	34.58	33.82	20.13	524.8	73.38	15.18
6.0	21.2	29.4	9.86	23.0	408.0	87.7	13.8	40.22	43.8	42.7	15.31	683.2	81.31	15.60

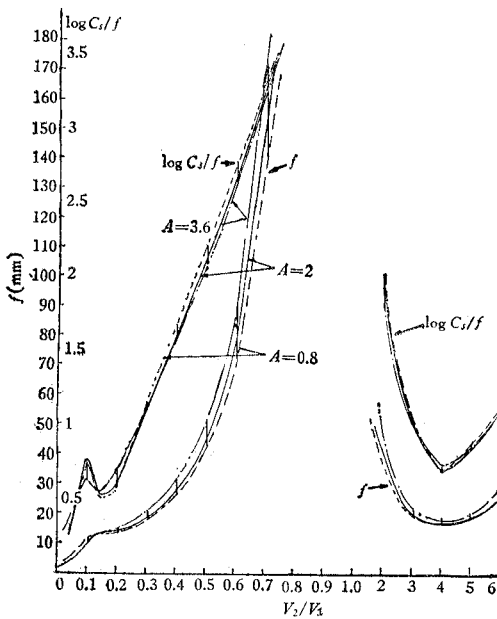


图 4 塞普帖低球差单透镜改变中间电极与右边电极间距离时特性的变化

Fig.4. The change in the characteristics of lens versus the distance between the middle electrode and the right electrode of Septier's lens

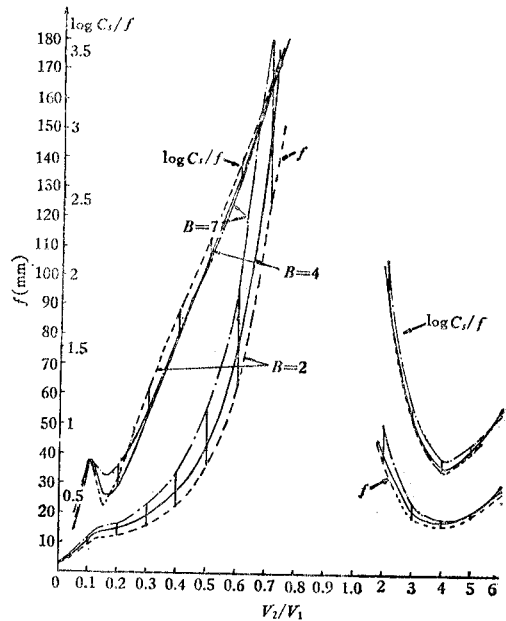


图 5 塞普帖低球差单透镜改变中间电极的右面孔径时,特性的变化

Fig.5 The change in the characteristics of lens versus the aperture of the middle electrode of Septier's lens

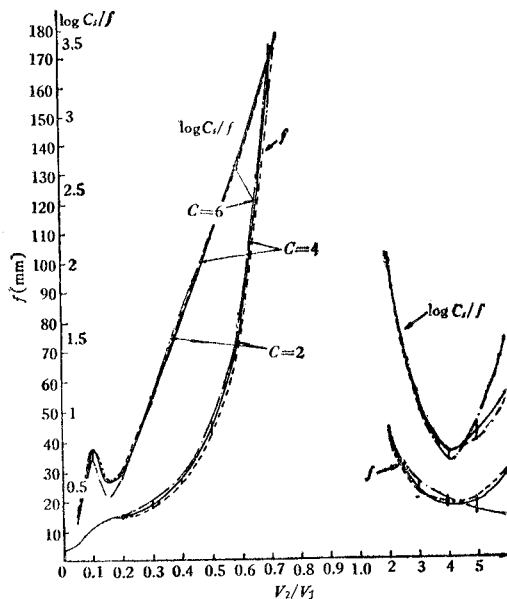


图 6 塞普帖低球差单透镜改变左边电极与中间电极间距离时特性的变化  
 Fig. 6 The change in the characteristics of lens versus the distance between the left electrode and the middle electrode of Septier's lens

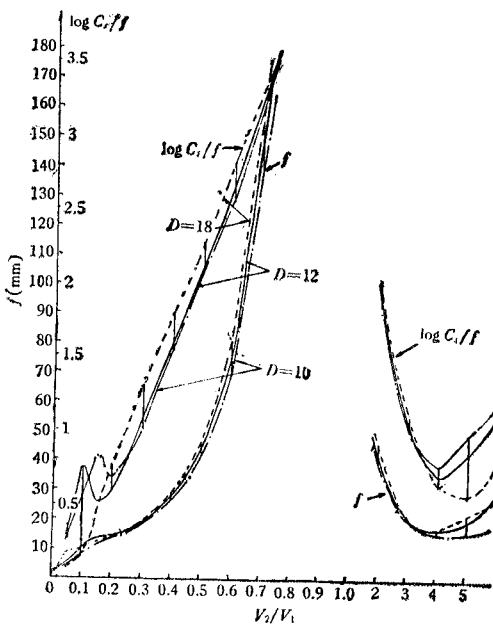


图 7 塞普帖低球差单透镜改变中间电极的大孔径时特性的变化  
 Fig. 7 The change in the characteristics of lens versus the left aperture of the middle electrode of Septier's lens

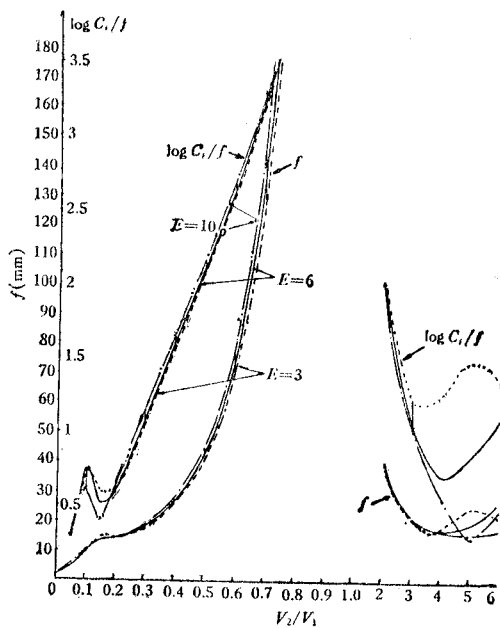


图 8 塞普帖低球差单透镜改变右边电极的孔径时特性的变化  
 Fig. 8 The change in the characteristics of lens versus the aperture of the right electrode of Septier's lens

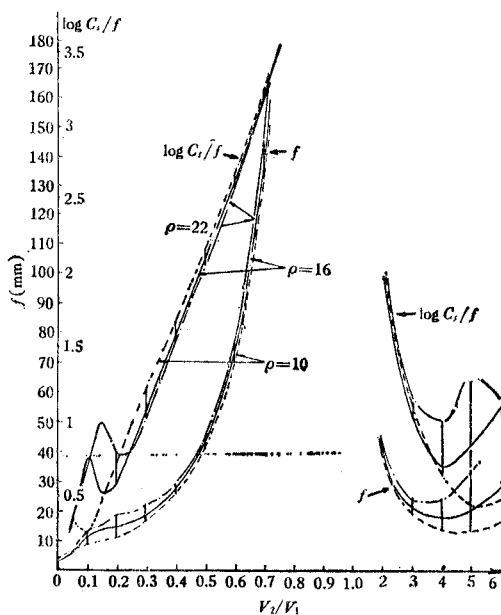


图 9 塞普帖低球差单透镜改变中间电极的长度时特性的变化  
 Fig. 9 The change in the characteristics of lens versus the length of the middle electrode of Septier's lens

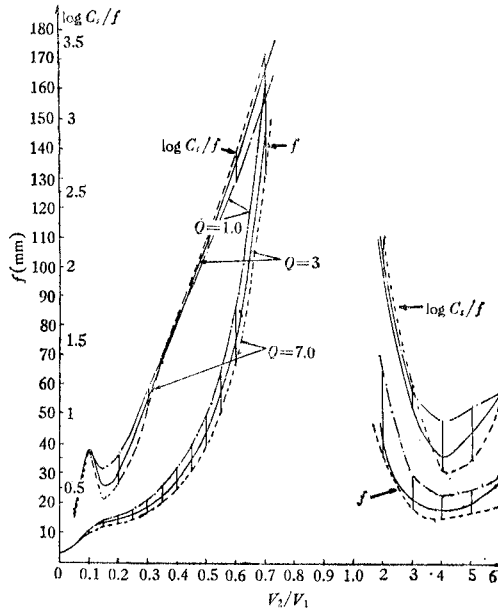


图 10 塞普帖低球差单透镜改变左边电极的孔径时特性的变化

Fig. 10 The change in the characteristics of lens versus the aperture of the left electrode of Septier's lens

### 参 考 文 献

- [ 1 ] A. Septier, *CERN Report*, 1960, No. 60—39.
- [ 2 ] H. Liebl, *Inst. Phys. Conf.*, Ser. No. 38(C), 1978, Chapter 6, p. 266.
- [ 3 ] 屠聿善、敖超、蔡金荣, 光电技术, 1980年, 2/3期, 第138页.
- [ 4 ] LT-1 离子探针, 中国科学仪器厂鉴定材料, 1978.
- [ 5 ] 黄蓝友, 科学仪器资料汇编 1, 中国科学仪器厂, 1977年, 第51页.
- [ 6 ] R. Seeliger, *Optik*, 4(1948), 258.
- [ 7 ] K. J. Hanszen, *Z. Naturf.*, 13a(1958), 409.
- [ 8 ] P. Grivet, *Electron Optics*, Pergamon Press, London, 1965.
- [ 9 ] F. H. Read and A. Dums, *J. Phys. E., Sci. Instrument*, 4(1971), 948; 5(1972), 150.
- [ 10 ] A. B. J. El-karch and J. C. J. El-karch, *Electron Beam Lenses and Optics*, Vol. 1, 2, Academic Press, London, 1970.
- [ 11 ] A. B. J. El-karch, *IEEE Trans. on ED*, ED-19(1972), 1075.

## THE PHYSICAL CHARACTERISTICS OF A SMALL SPHERICAL ABERRATION SEPTIER'S ELECTROSTATIC LENS FOR ELECTRON OR ION BEAM FOCUSING

Tu Li-shan

(Institute of Electronics, Academia Sinica)

As a small spherical aberration electrostatic lens Septier's lens has been proved to be an almost ideal structure by a number of experiments. This paper provides a method of calculating all the physical characteristics of Septier's electrostatic lens. It also provides the calculated results at various geometric sizes and voltages; they are useful for making correct choice under different conditions.