

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710055944.9

[43] 公开日 2008 年 2 月 6 日

[51] Int. Cl.

G02B 3/00 (2006.01)

G02B 3/14 (2006.01)

G21K 1/00 (2006.01)

G03F 7/00 (2006.01)

[22] 申请日 2007.8.9

[21] 申请号 200710055944.9

[71] 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 16 号

[72] 发明人 梁静秋 乐孜纯 黄鑫华 梁中翥

[74] 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所

代理人 赵炳仁

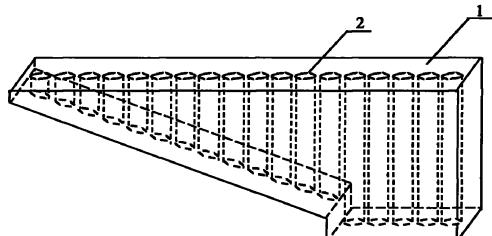
权利要求书 3 页 说明书 8 页 附图 2 页

[54] 发明名称

一种变焦距 X 射线组合透镜及其制作方法

[57] 摘要

本发明属于光学技术领域，涉及一种变焦距 X 射线组合透镜及其制作方法。该组合透镜包括透镜主体及透镜主体上间隔排列的空气腔，所述透镜主体材料为 PMMA；其制作方法是首先在起到支撑作用的单晶硅片表面依次制作聚酰亚胺、金属薄膜和光刻胶等所需层面；然后经过光刻，电铸，去胶，开窗口等步骤，完成光刻透镜主体时所使用的掩膜和光刻空气腔时所使用的掩膜的制备；最后，用制备好的掩膜进行两次 X 射线光刻，完成变焦距 X 射线组合透镜的制作。本发明具有聚焦效果好、散射小、X 射线辐射透过率高、工艺简单等优点。



1、一种变焦距 X 射线组合透镜，包括透镜主体（1）及透镜主体（1）上间隔排列的空气腔（2），其特征在于所述透镜主体（1）材料采用 PMMA。

2、根据权利要求 1 所述的变焦距 X 射线组合透镜，其特征在于所述透镜主体（1）为阶梯形，每个台阶内包含至少一个空气腔（2）。

3、根据权利要求 1 或 2 任意一项权利要求所述的变焦距 X 射线组合透镜，其特征在于所述空气腔（2）为双抛物柱面构成的柱形空腔，或者单抛物柱面与平面构成的柱形空腔，或者椭圆柱形空腔。

4、一种权利要求 1 所述的变焦距 X 射线组合透镜的制作方法，其特征在于包括下列步骤：

第一步，制备光刻透镜主体时所需的掩膜；

第二步，制备光刻空气腔时所需的掩膜；

第三步，利用第一步制备的掩膜制作透镜主体；

第四步，用第三步制作的透镜主体和第二步制备的掩膜制作空气腔。

5、根据权利要求 4 所述的变焦距 X 射线组合透镜的制作方法，其特征在于所述制备光刻透镜主体时所需的掩膜包括下列步骤：

（A）对单晶硅片进行清洁处理；

（B）在单晶硅片的一个表面自旋涂覆一层聚酰亚胺涂料；

（C）将涂覆聚酰亚胺的单晶硅片放在烘箱中固化；

（D）在固化后的聚酰亚胺表面生长一层金属作为第一种子层；

（E）在第一种子层上涂覆一层 PMMA，然后在 PMMA 表面生长一层金属作为第二种子层；

（F）在第二种子层上涂覆一层厚光刻胶；

（G）使用与透镜主体主视图形状相同的光刻版对光刻胶进行极紫外光刻，然后进行显影、坚膜；

（H）在（G）步完成的结构中于未被光刻胶覆盖的部分电铸金属层，作为软 X 射线光刻掩膜吸收体；

（I）去除阴影部分的光刻胶及光刻胶下面的第二种子层，得到光刻下一层 PMMA 所需

的金属掩膜；

(J) 用经过步骤(I)所完成的掩膜，对PMMA层进行正投影式软X射线曝光；

(K) 去除掩膜后，对PMMA层进行显影；

(L) 在(K)步完成的结构中于未被PMMA覆盖的部分电铸金属层；

(M) 采用无掩膜软X射线曝光方法去除之前未曝光的PMMA结构，并且去除PMMA下面的第一种子层；

(N) 对步骤(M)完成的结构的另一个表面进行光刻并腐蚀，即在单晶硅片上开出与透镜主体主视图形状相应的窗口。

6、根据权利要求4所述的变焦距X射线组合透镜的制作方法，其特征在于所述制备光刻空气腔时所需的掩膜包括下列步骤：

(O) 重复制备光刻透镜主体时所需掩膜中的(A)、(B)、(C)、(D)、(E)、(F)六个步骤；

(P) 使用与空气腔横截面形状互补的光刻版对步骤(O)中的厚光刻胶进行极紫外光光刻，然后进行显影、坚膜；

(Q) 在(P)步骤完成的结构中于未被光刻胶覆盖的部分电铸金属层，作为软X射线光刻掩膜吸收体，去掉阴影部分的厚光刻胶及其下的第二种子层，得到光刻下一层PMMA所需的金属掩膜；

(R) 用经过步骤(Q)所完成的掩膜，对PMMA层进行正投影式软X射线曝光；

(S) 去除掩膜后，对PMMA层进行显影；

(T) 在(S)步骤完成的结构中于未被PMMA覆盖的部分电铸金属层，作为第二次X射线光刻掩膜吸收体；

(U) 采用无掩膜软X射线曝光去除之前未曝光的PMMA结构，并且去除PMMA下面的第一种子层；

(V) 对步骤(U)完成的结构的另一个表面进行光刻并腐蚀，即在单晶硅片上开出与空气腔横截面形状互补的窗口。

7、根据权利要求4所述的变焦距X射线组合透镜的制作方法，其特征在于所述制作透镜主体包括下列步骤：

(W) 对起到支撑作用的单晶硅片进行清洗；

(X) 在单晶硅片的一个表面涂覆一层设定厚度的PMMA，并固化；

(Y) 使用制备光刻透镜主体时所需掩膜中的步骤 (N) 制作完成的掩膜对 PMMA 进行 X 射线曝光、显影；

(Z) 将显影后的结构放入去离子水中漂洗，得到透镜主体结构。

8、根据权利要求 4 所述的变焦距 X 射线组合透镜的制作方法，其特征在于所述制作空腔包括下列步骤：

(A') 对制作透镜主体中的步骤 (Z) 完成的结构进行固定；

(B') 使用制备光刻空气腔时所需掩膜中的步骤 (V) 制作完成的掩膜对步骤 (A') 固定的结构的所需表面进行 X 射线曝光、显影；

(C') 将显影后的结构放入去离子水中漂洗，完成变焦距 X 射线组合透镜的制作。

一种变焦距 X 射线组合透镜及其制作方法

技术领域：

本发明属于光学技术领域，涉及一种微结构 X 射线光学元件，具体地说是一种变焦距 X 射线组合透镜及其制作方法。

背景技术：

X 射线组合透镜是 Snigirev 在 1996 年提出的一种新型微结构 X 射线光学元件，特别适用于高能 X 射线波段（5keV 以上）。自该器件提出以来，国外对它的研究一直非常活跃。目前，组合折射透镜已经证明有着巨大的优越性：它们可对高能 X 射线聚束、聚焦效率高、不需要折转光路、易于排列和操作、高温稳定性好且易冷却、可以消除球差等。近年来，基于 X 射线组合透镜聚焦和准直的各种应用研究非常活跃。比如硬 X 射线微探针、X 射线显微镜、X 射线断层扫描摄影、微 X 射线荧光光谱测定法（ μ -XRF）、化学微分析、微荧光和微 EXAFS 测量以及单色仪预备光束的准直等。这些都表明了 X 射线组合透镜的巨大应用潜力和广泛应用前景。

国际上与本发明最接近的设计结构是采用模压技术制成的 Al 材料抛物面形 X 射线变焦距组合透镜（A. Khounsary, et al., Proc. Of SPIE Vol. 4783(2002):49-54），该组合透镜由透镜主体及透镜主体上间隔排列的空气腔构成，相邻空气腔之间的间隙形成透镜单元；所述透镜主体主视图呈楔形结构，该楔形结构是由直角梯形和矩形组成，直角梯形的长底边与矩形的一个长边重合，直角梯形的直角边与矩形的一个宽边重合；所述空气腔为抛物面构成的柱形空腔。其制作方法是使用与所制作的结构互补的硬模在加热的 Al 上进行冲压，从而得到透镜的基本结构，然后将冷却的结构进行排列对准，再用两个平板将几个单元结构夹紧，选择合适的长度沿着对角方向进行切割，得到要求的变焦距 X 射线组合透镜。由于这种组合透镜使用了价格较低的 Al 材料，且采用模压技术得到抛物面形状，因而存在下述缺点：加工精度低，影响聚焦效果；相邻两空气腔的间隔较大，影响 X 射线辐射透过率；表面粗糙度偏高，使散射增大；工艺复杂。并且这种组合透镜由于空气腔的高度呈连续变化，因而只能实现连续变焦。目前国内关于 X 射线组合透镜的研究较少。

发明内容：

本发明要解决的技术问题是提供一种加工精度高、相邻两空气腔的间隔小、表面粗糙度

低、制作工艺简单的变焦距 X 射线组合透镜及其制作方法。

本发明包括透镜主体及透镜主体上间隔排列的空气腔，所述透镜主体材料采用 PMMA。

作为本发明的一个改进是：所述透镜主体为阶梯形，每个台阶内包含至少一个空气腔。当透镜主体的每个台阶内都包含一个空气腔时，组合透镜可以连续变焦；当各台阶内包含的空气腔为两个以上时，组合透镜可实现离散变焦。

所述空气腔为双抛物柱面构成的柱形空腔，或者单抛物柱面与平面构成的柱形空腔，或者椭圆柱形空腔，或者其他可以使透镜单元实现聚焦的任意几何形状结构。

本发明变焦距 X 射线组合透镜的工作过程是：高能 X 射线从透镜主体中的高度最大的一端入射，沿透镜主体内空气腔的排列方向穿过，从透镜主体的另一端，即高度最小的一端射出。在高能 X 射线通过透镜主体内的空气腔时，若沿着空气腔的高度方向移动透镜组合，将使高能 X 射线经过不同个数的透镜单元，这些不同个数的透镜单元形成不同焦距的组合透镜，从而使得出射的高能 X 射线被聚焦的效果不一样。这样，光相当于经过一个焦距变化的透镜组，实现了变焦距的目的。

本发明变焦距 X 射线组合透镜的制作方法包括下列步骤：

第一步，制备光刻透镜主体时所需的掩膜；

第二步，制备光刻空气腔时所需的掩膜；

第三步，利用第一步制备的掩膜制备透镜主体；

第四步，用第三步制备的透镜主体和第二步制备的掩膜制备空气腔。

制备光刻透镜主体时所需的掩膜步骤如下：

(A) 对单晶硅片进行清洁处理；

(B) 在单晶硅片的一个表面自旋涂覆一层聚酰亚胺涂料，起到衬托金属吸收体的作用；

(C) 将涂覆聚酰亚胺的单晶硅片放在烘箱中固化；

(D) 在固化后的聚酰亚胺表面生长一层金属作为第一种子层；

(E) 在第一种子层上涂覆一层 PMMA (聚甲基丙烯酸甲酯)，然后在 PMMA 表面生长一层金属作为第二种子层；

(F) 在第二种子层上涂覆一层厚光刻胶；

(G) 使用与透镜主体主视图形状相同的光刻版对光刻胶进行极紫外光刻，然后进行显影、坚膜；

(H) 在 (G) 步完成的结构中于未被光刻胶覆盖的部分电铸金属层，作为软 X 射线光

刻掩膜吸收体；

(I) 去除阴影部分的光刻胶及光刻胶下面的第二种子层，得到光刻下一层 PMMA 所需的金属掩膜；

(J) 用经过步骤 (I) 所完成的掩膜，对 PMMA 层进行正投影式软 X 射线曝光；

(K) 去除掩膜后，对 PMMA 层进行显影；

(L) 在 (K) 步完成的结构中于未被 PMMA 覆盖的部分电铸金属层；

(M) 采用无掩膜软 X 射线曝光方法去除之前未曝光的 PMMA 结构，并且去除 PMMA 下面的第一种子层；

(N) 对步骤 (M) 完成的结构的另一个表面进行光刻并腐蚀，即在单晶硅片上开出与透镜主体主视图形状相应的窗口，则完成第一次 X 射线光刻掩膜的制作；

制备光刻空气腔时所需的掩膜步骤如下：

(O) 重复制备光刻透镜主体时所需掩膜中的 (A)、(B)、(C)、(D)、(E)、(F) 六个步骤；

(P) 使用与空气腔横截面形状互补的光刻版对步骤 (O) 中的厚光刻胶进行极紫外光光刻，然后进行显影、坚膜；

(Q) 在 (P) 步骤完成的结构中于未被光刻胶覆盖的部分电铸金属层，作为软 X 射线光刻掩膜吸收体，去掉阴影部分的厚光刻胶及其下的第二种子层，得到光刻下一层 PMMA 所需的金属掩膜；

(R) 用经过步骤 (Q) 所完成的掩膜，对 PMMA 层进行正投影式软 X 射线曝光；

(S) 去除掩膜后，对 PMMA 层进行显影；

(T) 在 (S) 步骤完成的结构中于未被 PMMA 覆盖的部分电铸金属层，作为第二次 X 射线光刻掩膜吸收体；

(U) 采用无掩膜软 X 射线曝光去除之前未曝光的 PMMA 结构，并且去除 PMMA 下面的第一种子层；

(V) 对步骤 (U) 完成的结构的另一个表面进行光刻并腐蚀，即在单晶硅片上开出与空气腔横截面形状互补的窗口，则完成第二次 X 射线光刻掩膜的制作；

制备透镜主体步骤如下：

(W) 对起到支撑作用的单晶硅片进行清洗；

(X) 在单晶硅片的一个表面涂覆一层设定厚度的 PMMA，并固化；

(Y) 使用制备光刻透镜主体时所需掩膜中的步骤 (N) 制作完成的掩膜对 PMMA 进行 X 射线曝光、显影；

(Z) 将显影后的结构放入去离子水中漂洗，得到透镜主体结构；

制备空气腔步骤如下：

(A') 对制作透镜主体中的步骤 (Z) 完成的结构进行固定；

(B') 使用制备光刻空气腔时所需掩膜中的步骤 (V) 制作完成的掩膜对步骤 (A') 固定的结构的所需表面进行 X 射线曝光、显影；

(C') 将显影后的结构放入去离子水中漂洗，则完成变焦距 X 射线组合透镜的制作。

本发明的优点是透镜采用了三维微加工制作技术，使组合透镜具有加工精度高、聚焦效果好，可加工多种几何形状和结构等优点；本发明表面粗糙度低，解决了因粗糙度偏高带来的散射大的问题；采用深层 X 射线光刻技术制作出的变焦距 X 射线聚焦组合透镜具有更高的结构高度和深宽比，解决了结构的高度尺寸小，并且相邻两空气腔的间隔较大，影响 X 射线辐射透过率的问题。此外，用深层 X 射线光刻技术，工艺简单，可以制作出一体化、一次性精密加工成型、不需要精密装调的变焦距 X 射线聚焦组合透镜。

附图说明：

图 1 是本发明变焦距 X 射线组合透镜结构示意图。图中，1 为透镜主体，2 为空气腔。

图 2 是本发明变焦距 X 射线组合透镜进一步改进的结构示意图。1 为透镜主体，2 为空气腔，4 为两空气腔间隙。W 为透镜主体 1 的宽， $L=L_1+L_2+L_3+L_4+L_5$ 为透镜主体 1 的长边， L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 分别为透镜主体 1 的台阶长度， $H=H_1+ H_2+ H_3+H_4+H_5$ 为透镜主体 1 的一个高， $H_1, H_1+H_2, H_1+H_2+H_3, H_1+H_2+H_3+H_4, H_1+H_2+H_3+H_4+H_5$ 分别为透镜主体 1 的台阶高度。组合透镜可变焦距为 nL ，其中 $n>1$ 。

图 3 是本发明制作过程第一次光刻的结构示意图。图中，5 为透镜主体 1 的上表面，6 为透镜主体 1 的下表面，W 也是每个台阶的宽， L_1 和 H_1 对应第一个台阶的长和高， L_2 和 H_1+H_2 对应第二个台阶的长和高， L_3 和 $H_1+H_2+H_3$ 对应第三个台阶的长和高， L_4 和 $H_1+H_2+H_3+H_4$ 对应第四个台阶的长和高， L_5 和 $H_1+H_2+H_3+H_4+H_5$ 对应第五个台阶的长和高。

图 4 是本发明凹面透镜单元结构示意图。图中，3 为透镜单元。

图 5 是本发明制作透镜主体所用光刻版结构示意图。

图 6 是本发明制作透镜单元结构（即空气腔）所用光刻版结构示意图。

具体实施方式：

如图 1 所示，本发明 X 射线变焦距组合透镜包括透镜主体 1 及透镜主体 1 上间隔排列的

空气腔 2。相邻空气腔 2 之间的间隙形成一个凹透镜，即透镜单元 3。所有透镜单元 3 一起构成了透镜组。

如图 2 所示，本发明 X 射线变焦距组合透镜进一步改进的结构是：在透镜主体 1 上刻有一排空气腔 2，相邻空气腔 2 有一定间隙，所有空气腔 2 为双抛物柱面结构，其截面为一对相对的抛物线组成的图形，或者单抛物柱面结构，其截面为抛物线，或者椭圆柱面结构，其截面为椭圆，或者其他可以实现聚焦的任意几何形状结构。这样，相邻空气腔 2 与它们之间的间隙一起就形成一个凹透镜，即透镜单元 3。所有透镜单元 3 一起构成了透镜组。通过在长方体在高度方向上选取适当的不同高度，这些不同的高度间隔合适的长度，逐级递减形成台阶状结构构成透镜主体 1（如图 3 所示）。也就是说，透镜主体 1 是由高度逐级递减的长方体依次排列形成的，每个长方体作为一个台阶，每个长方体宽度相等，等于透镜主体 1 的宽度。相邻两个长方体在由宽和高组成的面上重合，在其中一个长和宽组成的面上对齐。所有长方体均在一个长和宽组成的面上对齐，在另一个长和宽组成的面上形成台阶状。

在透镜主体 1 的每个台阶内透镜单元 3 构成的透镜组合的焦距相等，在不同高度的台阶内的透镜单元 3 个数可以相等或不等。由于每个台阶高度不同，使不同台阶内的透镜单元 3 高度也就是空气腔 2 的高度不同，从而使得不同台阶构成的组合透镜焦距不同。上述组合透镜可变焦距的尺寸大于透镜主体的长度。该透镜可以连续变焦也可以离散变焦。

如图 1 所示，本发明变焦距 X 射线组合透镜包括透镜主体 1、空气腔 2。透镜主体 1 可选用 PMMA（聚甲基丙烯酸甲酯）。透镜主体 1 的可变焦距尺寸大于透镜主体 1 的长度 L，可选择 5cm~5m 的尺寸变化范围。

如图 3 所示，本发明变焦距 X 射线组合透镜的透镜主体 1 是在长方体的一侧形成台阶构成的。每个台阶的宽度均为 W， L_1 和 H_1 对应第一个台阶的长和高， L_2 和 H_1+H_2 对应第二个台阶的长和高， L_3 和 $H_1+H_2+H_3$ 对应第三个台阶的长和高， L_4 和 $H_1+H_2+H_3+H_4$ 对应第四个台阶的长和高， L_5 和 $H_1+H_2+H_3+H_4+H_5$ 对应第五个台阶的长和高。在透镜主体 1 的上表面 5 与下表面 6 之间，开有纵向的与上下表面垂直的一组空气腔 2。每个空气腔 2 之间是等距的。相邻两个空气腔 2 之间存在间隙 4，使相邻的两个空气腔 2 形成凹面型透镜单元 3，如图 4 所示，这些透镜单元 3 构成组合透镜。在不同台阶内的组合透镜焦距是变化的，也就是说在透镜主体 1 的不同台阶内组合透镜焦距是变化的。

该透镜主体的长度 L 取 0.5mm~20cm 范围，宽度 W 取 2μm~3cm 范围，高度 $H=H_1+H_2+H_3+H_4+H_5$ 取 1mm~10mm 范围。透镜单元 3 个数在 20~1000 范围内，双抛物面曲率半径取 1μm~1cm 范围。台阶的个数不限，每个台阶的长度和高度根据需要在透镜主体的限定范围

内任意选取，每个台阶内透镜单元的个数也根据需要从 1 到 1000 任意选取。从而可以实现连续变焦或离散变焦。

本发明的制作工艺过程为：首先在起到支撑作用的单晶硅片表面依次制作聚酰亚胺、金属薄膜和光刻胶等所需层面，经过光刻，电铸，去胶，开窗口等步骤，完成两次 X 射线光刻所需掩膜的制作。第一次的制作是为了得到光刻透镜主体时所使用的掩膜，第二次的制作是为了得到光刻空气腔时所使用的掩膜；其次，在硅片表面制备 X 射线光刻胶，再用制备好的掩膜进行两次 X 射线光刻，第一次光刻是为了得到透镜主体结构，第二次光刻是在透镜主体上形成空气腔结构，从而在主体上形成透镜单元的结构，最终完成 X 射线变焦距组合透镜的制作。

本发明的具体制作过程如下：

第一步，制备光刻透镜主体 1 时所需的掩膜。

(A) 硅衬底采用 (100) 或 (110) 或 (111) 晶面的单晶硅片，衬底清洁处理步骤为：

1).以甲苯、丙酮、乙醇等去除油污等有机物；

2).用王水煮沸去除金属离子；

3).用去离子水超声清洗，无水乙醇脱水后烘干；

(B) 在单晶硅片的一个表面自旋涂覆一层厚度在 2—30 微米之间的聚酰亚胺涂料；

(C) 将涂覆聚酰亚胺的单晶硅片放在烘箱中固化，聚酰亚胺涂料固化条件与厚度有关，升温时采用梯度升温法，到达最高温度后持续适当时间后缓慢降到室温，以保证聚酰亚胺充分固化同时不发生脆裂；

(D) 在固化后的聚酰亚胺表面蒸镀一层金作为第一种子层；

(E) 在第一种子层上涂覆一层 PMMA，然后在 PMMA 表面蒸镀一层金作为第二种子层。这里 PMMA 采用自旋涂敷或滴胶等方式进行涂胶；

(F) 在第二种子层上涂覆一层厚光刻胶，厚光刻胶可选用 novolac-DNQ 光刻胶等；

(G) 使用如图 5 所示的光刻版（阴影部分不透光）对光刻胶进行极紫外光刻、显影、坚膜，得到与如图 5 所示的结构（阴影部分为光刻胶）；

(H) 在 (G) 步完成的结构中于未被光刻胶覆盖的部分电铸金，作为软 X 射线光刻掩膜吸收体。电铸阴极种子层材料可选用金等金属材料；

(I) 去除阴影部分的光刻胶及光刻胶下面的第二种子层，得到光刻下一层 PMMA 所需的金掩膜。用丙酮或专用去胶剂去除厚光刻胶，用干法刻蚀或湿法腐蚀去除光刻胶下面的金

属层；

- (J) 用经过步骤(I)所完成的金掩膜，对PMMA层进行正投影式软X射线曝光；
- (K) 去除光刻PMMA的金掩膜及第二种子层后，对PMMA层进行显影。显影采用25°C的GG显影系统；
- (L) 在(K)步完成的结构中于未被PMMA覆盖的部分电铸金层；
- (M) 采用无掩膜软X射线曝光方法光刻、显影去除之前未曝光的PMMA，并且用干法刻蚀或湿法腐蚀去除PMMA下面的第一种子层。无掩膜软X射线曝光的曝光条件与有掩膜曝光的曝光条件相同；
- (N) 对步骤(M)完成的结构的另一个表面进行光刻并腐蚀，即用湿法腐蚀或干法刻蚀在单晶硅片上开出窗口，则完成第一次X射线光刻掩膜的制作。

第二步，制备光刻空气腔时所需的掩膜。

- (O) 重复(A)、(B)、(C)、(D)、(E)、(F)六个步骤；
- (P) 使用如图6所示的光刻版（阴影部分为不透光）对步骤(O)中的厚光刻胶进行极紫外光光刻、显影、坚膜，得到与图6相同的结构（阴影部分为光刻胶）；
- (Q) 在(P)步完成的结构中于未被光刻胶覆盖的部分电铸金层，作为软X射线光刻掩膜吸收体，电铸阴极种子层材料可选用金等金属材料。用丙酮或专用去胶剂去除阴影部分的厚光刻胶，用干法刻蚀或湿法腐蚀去除光刻胶下面的第二种子层，得到光刻下一层PMMA的金掩膜；
- (R) 用经过步骤(Q)所完成的掩膜，对PMMA层进行正投影式软X射线曝光；
- (S) 去除光刻PMMA的金掩膜及第二种子层后，对PMMA层进行显影。显影采用25°C的GG显影系统；
- (T) 在(S)步完成的结构中于未被PMMA覆盖的部分电铸金，作为第二次X射线光刻掩膜吸收体；
- (U) 采用无掩膜软X射线曝光方法光刻、显影去除之前未曝光的PMMA，并且用干法刻蚀或湿法腐蚀去除PMMA下面的第一种子层。无掩膜软X射线曝光的曝光条件与有掩膜曝光的曝光条件相同；
- (V) 对步骤(U)完成的结构的另一个表面进行光刻并腐蚀，即用湿法腐蚀或干法刻蚀在单晶硅片上开出窗口，则完成第二次X射线光刻掩膜的制作。

第三步，制备透镜主体。

(W) 硅衬底采用(100)或(110)或(111)晶面的单晶硅片，衬底清洁处理步骤为：

- 1).以甲苯、丙酮、乙醇等去除油污等有机物；
- 2).用王水煮沸去除金属离子；
- 3).用去离子水超声清洗，无水乙醇脱水后烘干；

(X) 单晶硅片的一个表面涂覆设定厚度的PMMA，并固化。硅片表面的PMMA采用自旋涂敷或滴胶等方式进行涂胶；

(Y) 使用步骤(N)制作的掩膜对PMMA进行X射线曝光、显影，显影采用25°C的GG显影系统；

(Z) 将显影后的结构放入去离子水中漂洗，得到透镜主体结构。

第四步，制备空气腔。

(A') 对步骤(Z)完成的结构进行固定；

(B') 使用步骤(V)制作完成的掩膜对步骤(A')固定的透镜主体1上表面6进行X射线曝光、显影，显影采用25°C的GG显影系统；

(C') 将显影后的结构放入去离子水中漂洗，则完成一种变焦距X射线组合透镜的制作。

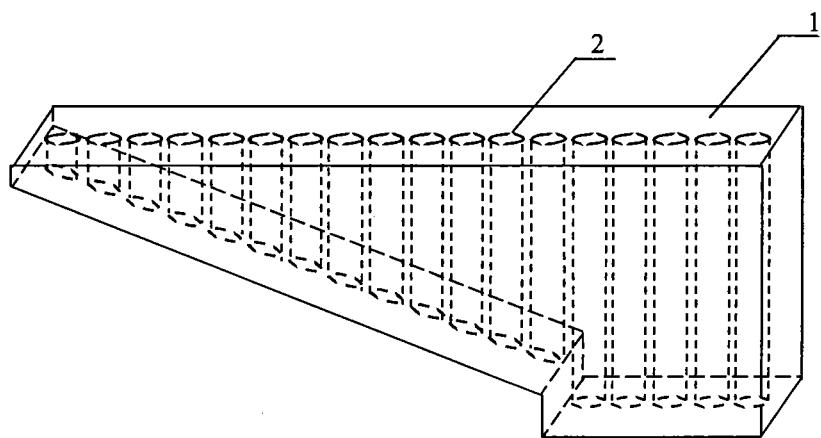


图 1

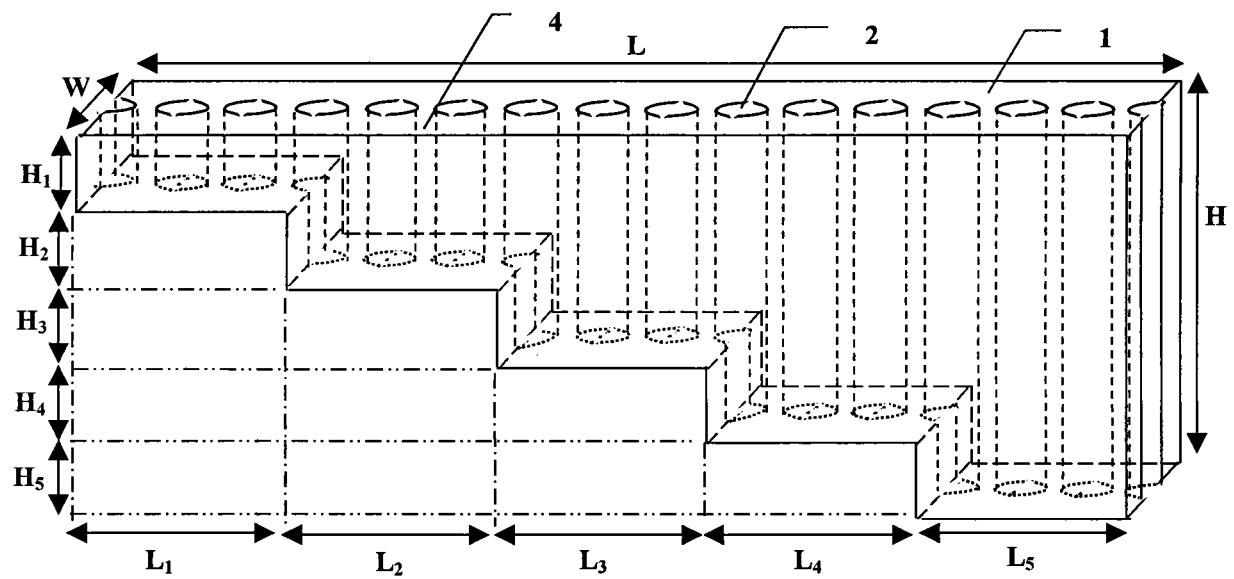


图 2

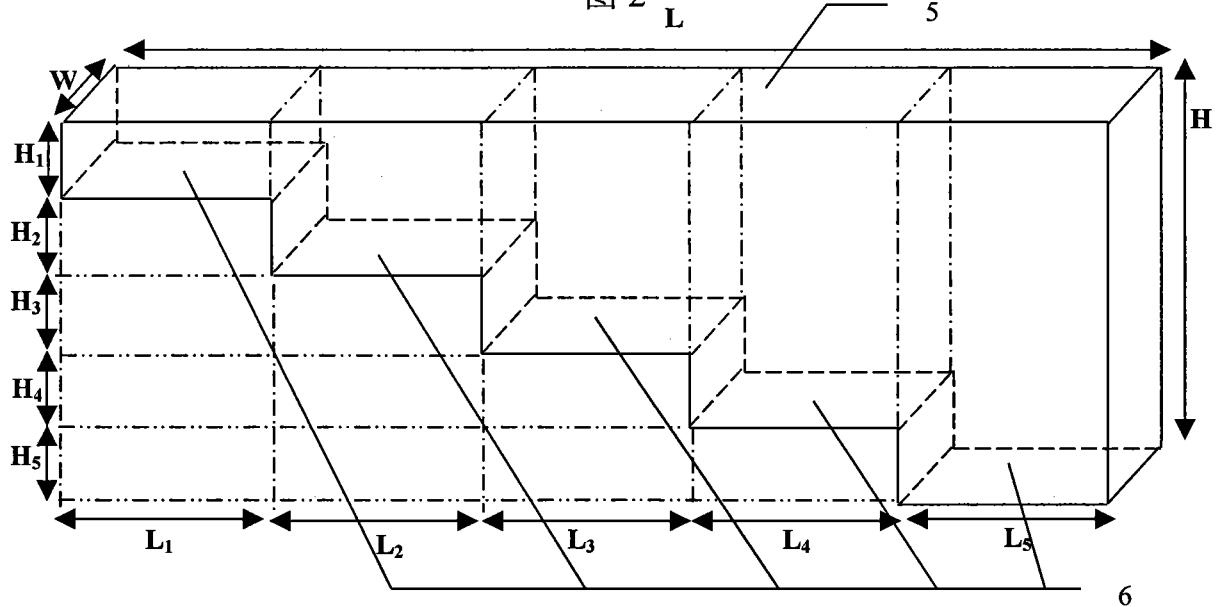


图 3

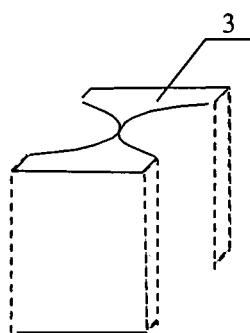


图 4

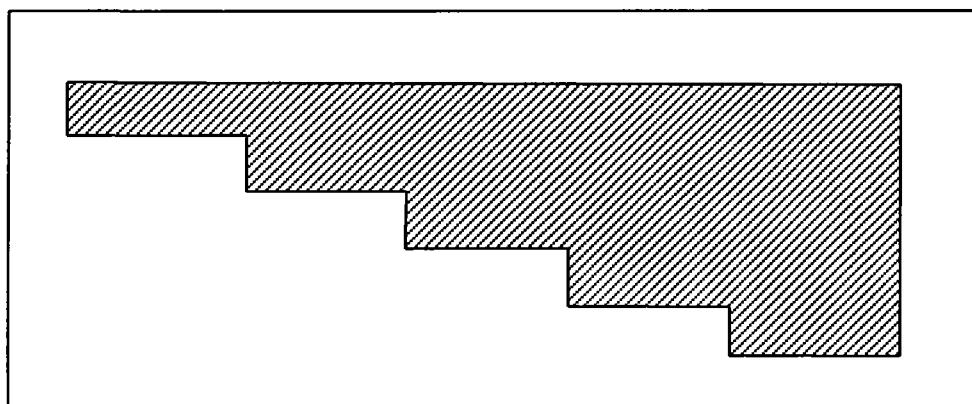


图 5

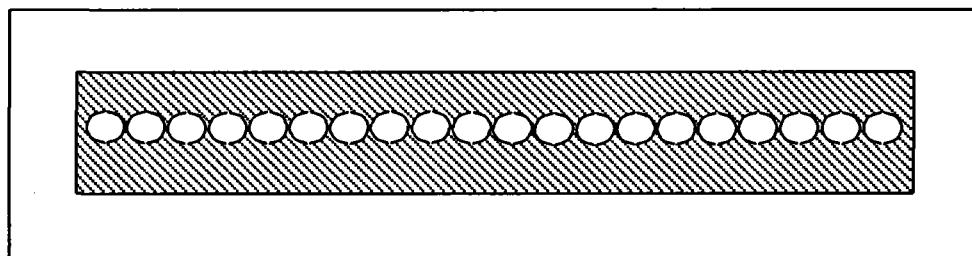


图 6