

由图 3.2 可知,随着加速电压的增加,曝光直线的线宽逐渐减小。5kV 的电压时线宽为 300nm,圆孔直径为 300nm; 30kV 时线宽为 100nm,圆孔直径为 150nm 左右。随着加速电压的增加,电子束前向散射的范围减小;背散射高能电子进入衬底中的深度增加,导致重新回到抗蚀剂层中的背散射电子数目减小,从而使得邻近效应的影响大为减小,曝光图形的分辨率增加。

B. 束流对曝光结果的影响 (GST 衬底)

不同束流条件的曝光结果如图 3.3 所示。

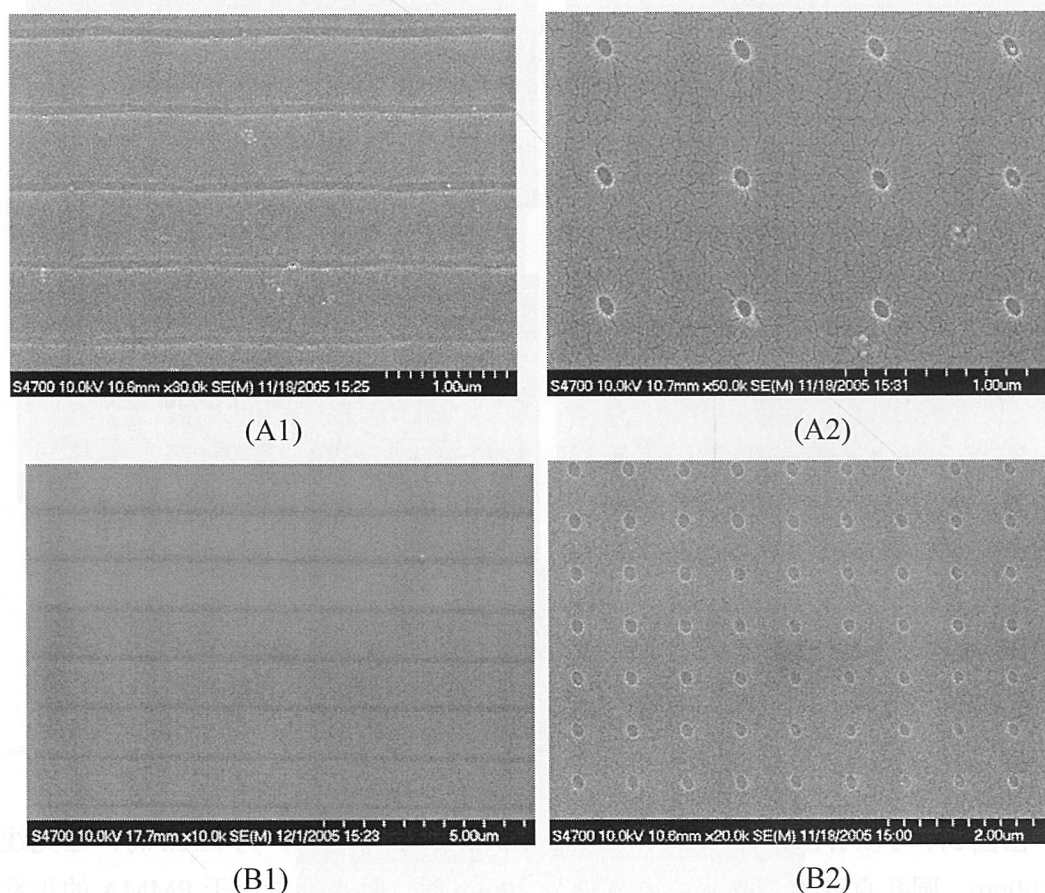


图 3.3 不同束流条件下的曝光结果

(束流值, A: 3.8pA; B: 12pA)

由图 3.3 可以看出,束流为 3.8pA 时,曝光直线的线宽为 90nm,圆孔直径为 90nm,当束流增加到 12pA 时,直线线宽为 200nm,圆孔直径为 180nm。束流 3.8pA 与 12pA 时的曝光结果相比较,线宽与直径的幅度增加近一倍小于加速电压不同时线宽与直径的变化幅度。当束流降低时,可以获得更小的束斑尺寸。为了获取最小尺寸的束斑,可以使加速电压尽量大同时使用适当的低束流值(束流的降低将影响图形的对比度,同时将影响图形的可观测性,这与曝光分辨率的提高是一对矛盾,需要权衡考虑)。对于 PMMA 抗蚀剂来说,根据使用的 SEM 以及灯丝类型的不同,其典型的束流值为 5~50pA。对于 W 灯丝而言,其束流值为: 5~10pA; 对于 LaB₆, 其束流值为:

10~20pA；对于场发射电镜而言，其束流值为：20~50pA。

C.不同工作距离对曝光结果的影响（GST 衬底）

工作距离不同时的曝光图形如图 3.4 所示。

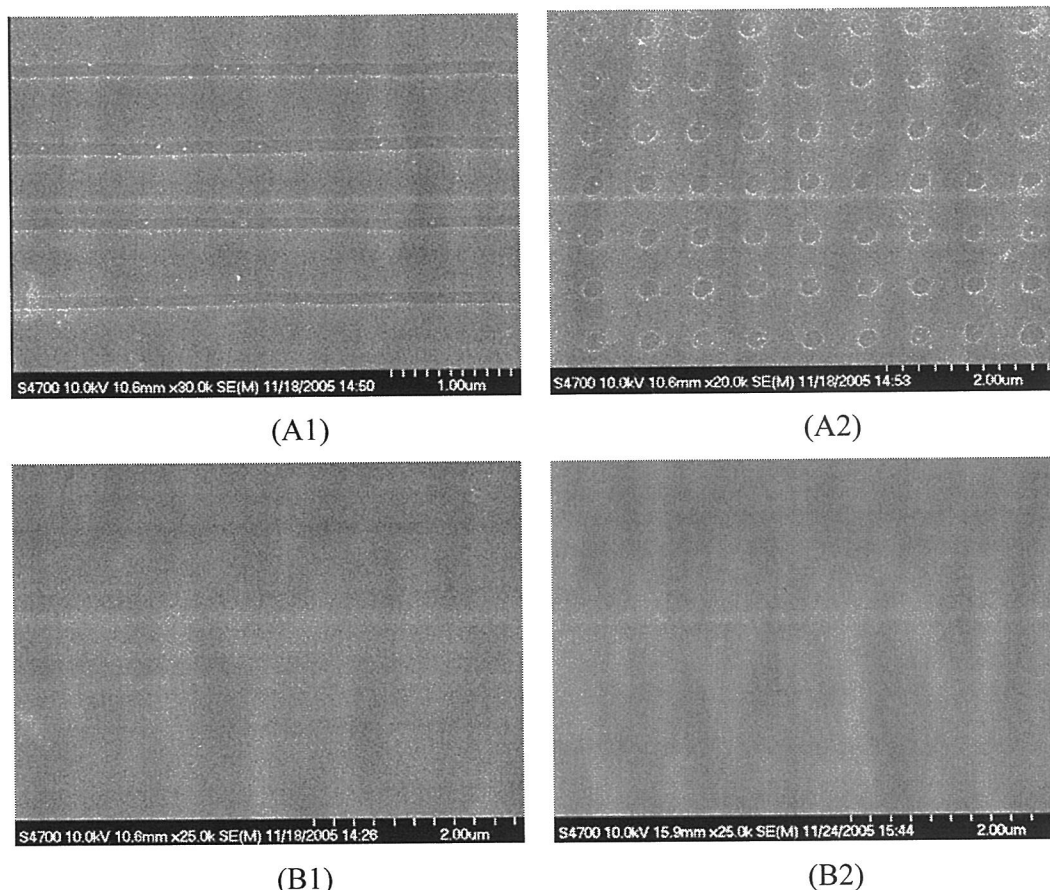


图 3.4 不同工作距离的曝光结果
(工作距离，A：5mm；B：20mm)

由图 3.4 可以看出，在 WD (Wrking Distance 工作距离) 为 5mm 时，曝光线宽为 100nm，圆孔直径为 200nm；当 WD 为 20mm 时，曝光剂量小于 PMMA 的正常曝光剂量，图形对比度很弱，没有完全曝光。这是由于随着工作距离的增加，电子束前向散射性增加，抗蚀剂表面的电子束能量密度降低，导致曝光图形分辨率降低，工作距离进一步增加后将使得抗蚀剂不能完全曝光，无法得到预期的图形结构。WD 会影响电子束束斑的尺寸、扫描电镜偏转线圈的线性度以及电镜放大倍数的设置。WD 的减小有助于提高电镜的图形分辨率，这也就意味着曝光分辨率的提高，在强磁性环境中工作时，较小的 WD 将更有助于降低外部磁场对电子束轨迹的影响。扫描电镜中，放大倍数通常被设置不同的数值范围，每个数值范围都由不同的控制电路来执行，当从一个数值范围变化到另一个数值范围的时候会产生瞬时的图形畸变，同时由于继电器操作的延迟会产生数据传输的延迟，这也将影响到曝光图形的精确性。较高的放大倍数可以提高相应操作部分的控制电路的信噪比，从而提高曝光系统的分辨率和操作

稳定性。

D.不同衬底材料对曝光结果的影响

衬底材料为 GST、SiN、W 的曝光工艺参数如表 3.5 所示，曝光结果如图 3.5 所示。

表 3.5 PMMA 在衬底 GST、SiN、W 上的曝光工艺参数

电压 (kV)	束流 (pA)	工作距离 (mm)	剂量 ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	灯丝电流 (μA)	显影 (min)	定影 (min)
30	5	5.4	150	76	1	1

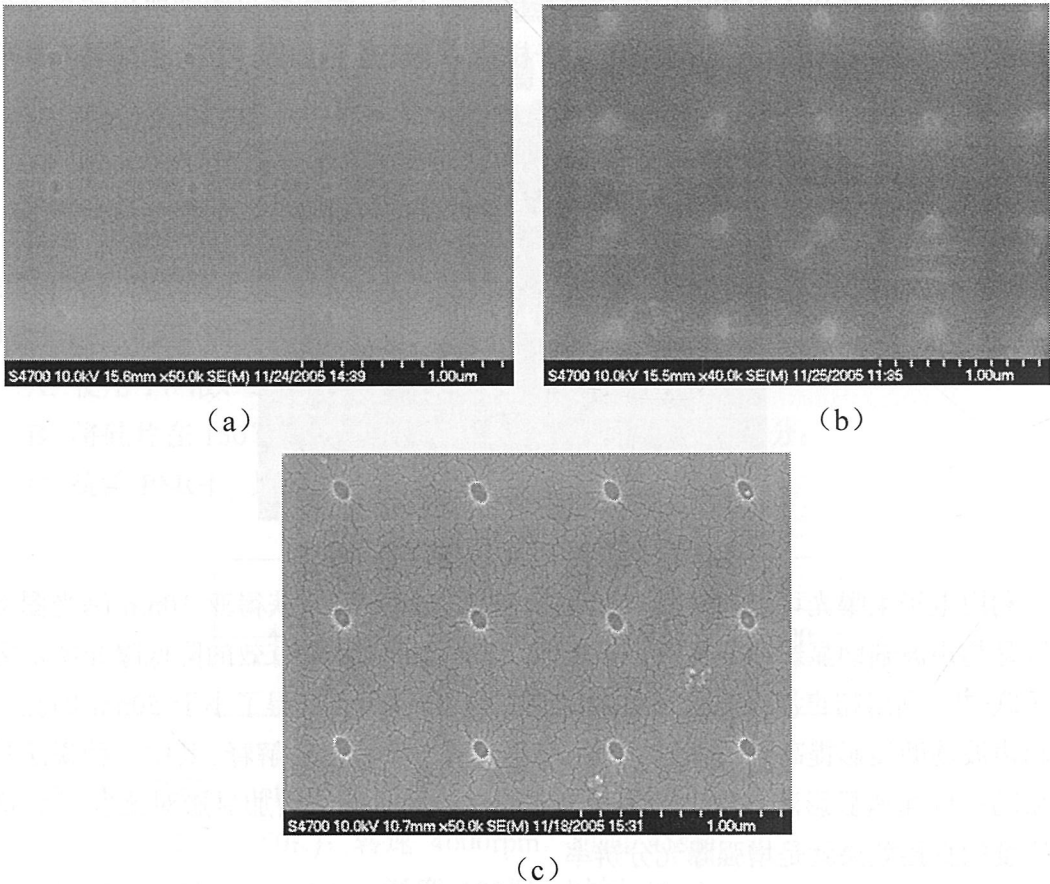


图 3.5 不同衬底材料的曝光结果
(a: SiN; b: GST; c: W)

由图 3.5 可知，在相同的曝光参数下，在 SiN 衬底上得到的图形孔径为 70nm；GST 上的图形孔径为 100nm；W 上的孔径为 120nm。电子在固体中的散射与入射电子的能量和基底材料的性质有关，材料的密度对背散射电子有很大的影响。SiN 的密度为 3.184，GST 的密度为：5.92~6.48（晶态与非晶态时不同），W 的密度为：19.15，密度的不同造成入射电子束在三种材料中的背散射电子数目也不同，随着密度的增加背散射电子数目也随之增加，重返抗蚀剂层中的电子数相应增加，导致邻近效应的增

大，曝光图形的分辨率降低。

E.低温与超声振动显影对曝光结果的影响

将 PMMA 显影液 (MIBK:IPA=1:3) 放入冰箱中冷却至 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，曝光样品的衬底材料为 GST，工艺参数如表 3.6 所示。

表 3.6 用于低温超声显影的样品曝光工艺参数

电压 (kV)	束流 (pA)	工作距离 (mm)	剂量 ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	灯丝电流 (μA)
30	5	5.4	150	76

样品曝光完成以后，将超声清洗设备调至弱超声档，快速的将显影液放入超声容器中，同时将样品放入显影液中弱超声振动显影 15s，然后将显影液取出超声容器，再显影 10s，最后定影 1min，用氮气吹干样品。曝光结果如图 3.6 所示（曝光图形为 40nm 的孔）。

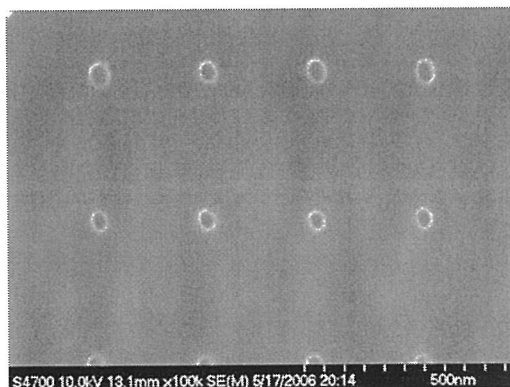


图 3.6 低温超声显影后的曝光图形

利用电子束曝光可以获得最小为 4nm 的曝光线条^[73]，获得亚 10nm 曝光图形的关键是超声波辅助显影和低强度的显影液，低温显影液可以有效的降低曝光图形之间的桥联^[74]。利用超声波低温显影技术我们在 GST 衬底上获得了小于 50nm 的孔。关于超声波辅助显影提高分辨率的机理至今仍没有一个圆满的解释。其中一种说法是超声振动可以加速显影液与抗蚀剂的混合，缩短显影时间，增加显影对比度^[75]。增加对比度的直接效果就是增强曝光分辨率。

3.2.4 双层抗蚀剂曝光工艺研究

在半导体工艺中，lift-off，如图 3.7 所示，是使用比较多的转移图形的方法。使用 lift-off 方法不会对材料本身造成任何的损伤。在有关 PMMA 的 lift-off 工艺中使用较多的是 PMMA/PMMA-MAA，但是这种组合在转移亚 100nm 的图形时会遇到问题。这是因为在分辨率逐渐增大的情况下，这种组合的底切不是很明显，会造成剥离的困难，为此需要使用其他的抗蚀剂组合。PMGI 是 MICROCHEM 公司专为 lift-off 工艺开发的一种抗蚀剂。180 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤后，它不溶于碱性化学试剂，以及多数有机溶剂和酸类溶剂，对电子束曝光也是不敏感的。这些特性使得它可以使用一些碱性显影液，而

不会对上层的 PMMA 抗蚀剂层造成损伤,因此很适合用作 lift-off 工艺的底层抗蚀剂 [76-77]。

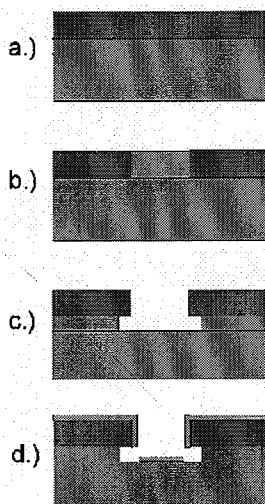


图 3.7 lift-off 工艺过程

在亚 100nm 的 lift-off 工艺中, PMGI 的厚度、PMMA 的厚度以及底切深度都将直接影响图形转移能否成功地进行。其中, PMGI、PMMA 的厚度可以由其浓度以及涂胶转速来决定, 底切深度可以控制 PMGI 的显影的时间来决定。具体工艺如下:

- A. 使用 1# 液、2# 液清洗硅片 (同前述);
- B. 将硅片在 150℃ 以上的烘箱中烘 1 个小时去除表面水分;
- C. 旋涂 PMGI, 具体工艺如 3.7 表所示;

表 3.7 PMGI 旋涂参数

样品编号	1	2	3
转速 (rpm)	1500	2500	3500
时间(sec)	45	45	45

- D. PMGI 烘烤: hotplate, 温度 180℃, 时间 15min;
- E. 旋涂 PMMA(950K): 转速 4000rpm, 时间 45sec;
- F. PMMA 烘烤: hotplate, 温度 180℃, 时间 15min;
- G. 曝光, 具体工艺如表 3.8 所示;

表 3.8 双层抗蚀剂曝光工艺参数

剂量 ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$)	加速电压 (kV)	束流 (pA)	灯丝电流 (μA)	工作距离 (mm)
180	30	8	76	5

- H. PMMA 显影: 显影液: MIBK:IPA=1:3, 显影时间 2min;
- I. PMGI 显影, 显影液: CD26, 时间 100sec;
- J. 用氮气将样品吹干;

K. 用氧气等离子去底膜 5sec;

L. 溅射 100nm 的 GST;

M. 丙酮浸泡 30min, 然后氮气吹干;

在溅射 GST 的时候, 其厚度需根据底层 PMGI 的厚度以及 PMMA 的厚度而决定 GST 的厚度, 图 3.8 是 PMGI 和 PMMA 旋涂厚度与转速的关系^[78]。由图中可以看出, 在 2500rpm 的转速下, PMGI 的厚度为 200nm; 在 4000rpm 的转下, PMMA 的厚度为 60nm。淀积材料的厚度一般不超过底层抗蚀剂厚度的三分之一, 否则将难以剥离以及对图形结构造成影响。

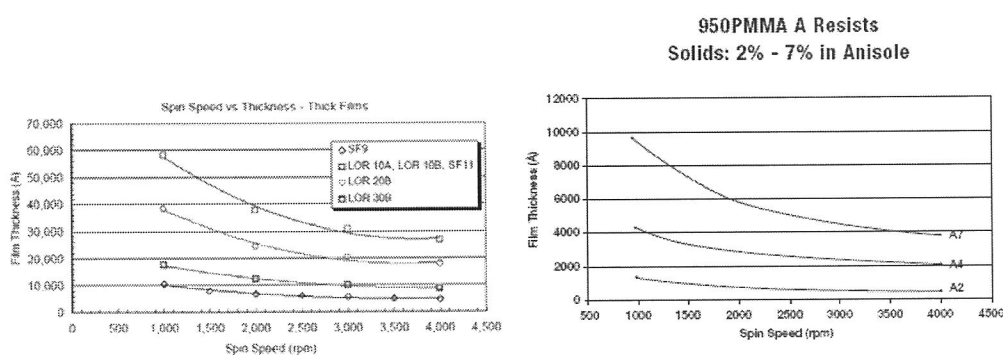


图 3.8 PMGI, PMMA 厚度与转速的关系^[78]

lift-off 最后结果如图 3.9 所示。由图中可以看出, 随着 PMGI 旋涂转速的降低, 其厚度在增加, 淀积图形的质量也逐渐变好。在转速 3000rpm 时, 淀积图形基本没有成形, 这是由于 3000rpm 是 PMGI 的厚度为 180nm, 当淀积 GST 时会造成膜层的粘联如图 3.9 所示, 在剥离的时候会使得淀积层脱落。随着 PMGI 厚度的增加, 这种粘联会逐渐减小, 当 PGMI 的厚度为 300nm 时, 淀积 100nm 的 GST 可以成功的剥离。

