

抗反射层

光源透过掩模版到达光刻胶要经过曝光介质(真空、空气、浸没式光刻机所用液体等)与光刻胶上表面的界面及光刻胶下表面与衬底的界面,在界面处会发生反射现象。由于光刻胶吸收光的总能量等于入射光与衬底表面反射光的能量之和,反射光的存在会影响光刻胶曝光后的线宽、形貌,对集成电路光刻工艺会产生很大影响。

随着图形分辨率进入亚微米级,衬底的反射率对线宽及工艺窗口的负面影响日趋明显。例如,对于 248nm 深紫外光刻,140~200nm 线宽,衬底的反射如图 5-1(a)所示,硅衬底和光刻胶界面可以达到照明光的 50%左右,如果光刻工艺的能量宽裕度(Exposure Latitude, EL)在 $\pm 10\%$ 线宽的变化范围内为 25%,即 25%的能量变化可以造成 20%的线宽变化,那么 50%的衬底反射可以导致 40%的线宽变化,即 56~80nm,这大大超出了原本 $\pm 10\%$ 的线宽工艺窗口。所以,对所有需要制作图形的层次,如有源区、栅、通孔、金属线均需要采用抗反射层;对

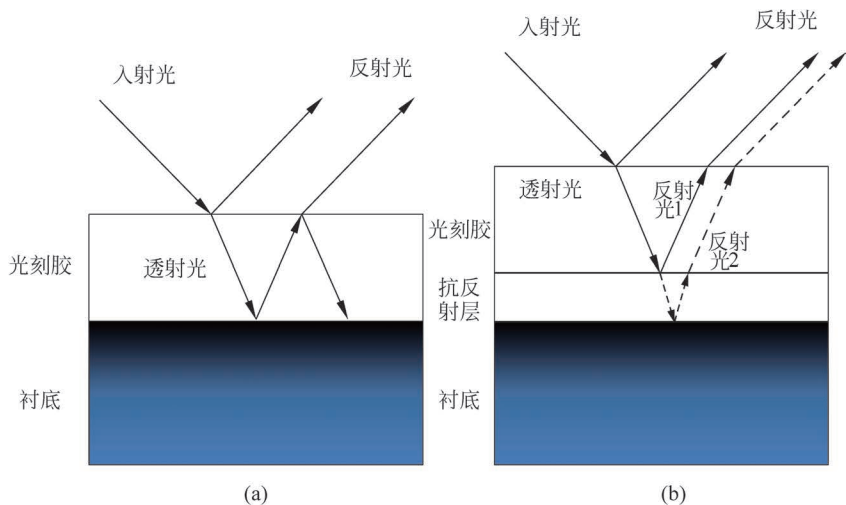


图 5-1 (a) 对于光刻胶和衬底单一界面存在照明光的反射示意图; (b) 在光刻胶和衬底界面之间添加一层介质薄膜(抗反射层),可以产生互相平行的两束反射光(“反射光 1”和“反射光 2”)示意图

于无须制作图形的层次,如离子注入层,当线宽达到 200nm 以下时一般也需要采用抗反射层,原因是能够做出较为准确的注入层边界。如图 5-1(b)所示,抗反射层可以通过产生在光刻胶和抗反射层之间界面的“反射光 1”和抗反射层和衬底之间界面的“反射光 2”,并且使得它们之间发生相消干涉(相位相差 180° 或者 $1/2$ 波长),以最大限度地抑制反射光。

衬底反射对光刻工艺的影响不只在能量方面,由于入射光和反射光还会发生干涉,这种干涉导致的直接结果主要有两种:驻波效应(Standing wave effect,曝光剂量在光刻胶厚度方向上的变化),如图 5-2 所示;摆线效应(Swing curve effect,相同曝光剂量下,光刻胶整体吸收的能量随光刻胶涂覆厚度的变化),如图 5-3 所示。驻波效应和摆线效应都会对线宽控制产生负面作用,并可以显著降低对焦深度和能量宽裕度。如今的光刻分辨率小于光源波长,对线宽的控制非常严格,这些问题的存在会严重影响工艺窗口。

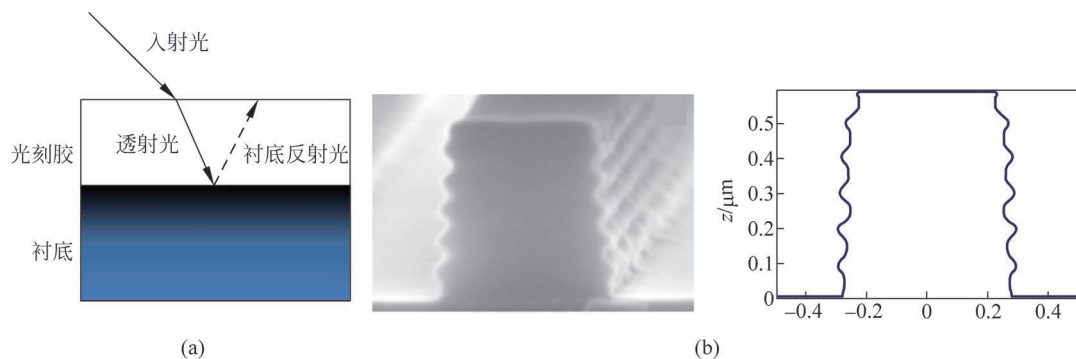


图 5-2 由于光刻胶衬底界面的反射光和透射光干涉导致光刻胶垂直形貌产生光驻波现象:(a)光刻胶和衬底界面的反射光示意图;(b)驻波的显微镜图和剖面仿真图^[1]

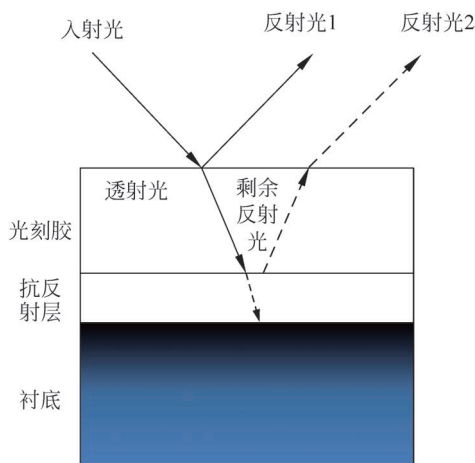


图 5-3 产生摆线效应的原理图(摆线效应是由光刻胶底部的剩余反射光穿过光刻胶与光刻胶上表面的反射光互相干涉形成出射能量随光刻胶厚度变化的效应)

为了解决这些问题,人们开始研究并制备能够消除衬底反射率的材料。经过近 40 年的发展,人们发明了能够吸收底部反射光的材料——抗反射层(Anti-Reflection Coating, ARC),不仅能够减轻驻波效应和摆线效应,而且能够提高曝光对比度。一般抗反射层分为无机抗反射层和有机抗反射层两种类型。

5.1 抗反射层和反射率控制

自 180nm 技术节点后发展起来的光学邻近效应修正 (Optical Proximity Correction, OPC) 大大加速了抗反射层的应用, 因为当初的 OPC 修正程序没有考虑底部反射率。另外, 在抗反射层提出之前, 光刻胶显影时底部与衬底黏附力不足, 经常会发生倒胶现象, 通过设计高黏附性的抗反射层便可有效解决这一问题。

用于衬底与光刻胶之间的抗反射层称为底部抗反射层 (Bottom Anti-Reflection Coating, BARC), 如图 5-1(b) 所示。用于光刻胶上表面的抗反射层称为顶部抗反射层 (Top Anti-Reflection Coating, TARC)。抗反射层通过产生两束互相平行的且相对相位差接近 180° 的光来互相抵消反射总能量。实践表明, 抗反射层的存在可以大大削弱光刻胶和衬底之间的反射, 使得光刻胶内部接收到的光仅来自照明。但抗反射层也不是完美的, 在涂覆有抗反射层的衬底上, 仍然存在剩余的反射光, 这些反射光会影响光刻胶的成像, 形成微弱的摆线效应, 也可以参见 10.4 节。光刻胶线宽摆幅的影响可由 Brunner 方程给出^[2]:

$$S = \sqrt[4]{R_b R_t} e^{-\alpha d} \quad (5.1)$$

式中: R_b 为抗反射层底部的反射率; R_t 为抗反射层顶部的反射率; α 为光刻胶吸光率, 可以表示为 $\lambda/(4\pi k)$, 其中 λ 为曝光用波长, k 为光刻胶复数折射率的虚部; d 为光刻胶厚度。

通常情况下可以通过反射率公式计算得出精确的结果, 即摆幅和相位随着垂直方向, 也即光刻胶的厚度方向上的变化。具体的反射率计算详细理论参见 11.1 节。

图 5-4(a) 描述了常见的膜系结构, 即硅衬底加上一层底部抗反射层和一层光刻胶。图 5-4(b) 展示了光刻胶底部界面的中反射率随着抗反射层的厚度变化。可以看到, 反射率曲线存在两个极小值, 又称为第一极小值和第二极小值, 分别对应抗反射层的两个厚度值 37nm 和 98.3nm, 其反射率极小值分别为 1.5% 和 1.1%。需要说明的是, 仿真中采用了波长 193nm、数值孔径 1.35 和部分相干因子 $0.9 \sim 0.7$ 的环形照明条件。也就是说, 照明光是斜入射的, 斜入射角为

$$\theta = \arcsin\left(\frac{(0.7 \sim 0.9) \times 1.35}{1.436}\right) = 41^\circ \sim 57.8^\circ \quad (5.2)$$

其中用到了浸没式光刻的介质——水的 1.436 折射率。所以, 取决于衬底反射率控制的要求和对衬底的刻蚀要求。由于衬底不一定是平整的, 如后段金属层, 或者前段对应鳍形晶体管的高低起伏, 采用第二极小值对应的抗反射层厚度是比较稳妥的, 但代价是需要通过等离子体刻蚀工艺将其打开。如果光刻胶厚度为 90nm, 抗反射层的厚度为 98.3nm, 而光刻胶和抗反射层同为差别不大的碳氢化合物, 其对等离子体刻蚀的阻挡能力相当。当使用光刻胶作为掩模打开抗反射层时, 光刻胶也消耗完。而通常采用存有图形的抗反射层作为掩模刻蚀衬底薄膜的效果不佳。所以, 这时需要采用其他方法, 如含硅的双层抗反射层 (连同光刻胶一共 3 层光刻薄膜, 其英文是 tri-layer): 先将光刻胶图形传递到较薄的含硅抗反射层 (含硅的抗反射层厚度通常为 $25 \sim 40\text{nm}$), 再通过此较硬的薄膜来刻蚀下面的第二层抗反射层, 厚度为 $100 \sim 200\text{nm}$, 用于填平较大的衬底起伏。含硅的薄膜在以氧气为主的等离子体刻蚀工艺中几乎无法被消耗, 因为硅遇到氧气生成二氧化硅, 无法随着刻蚀气体挥发, 也就无法被去除。而碳氢 (还可以有氧、氟、硫、氮等成分) 化合物遇到氧气都会变成气体在刻蚀腔中被去除。

下面来看看摆线效应。图 5-5(a) 和 (b) 分别对应在抗反射层厚度为 98.3nm 和 37nm 时,

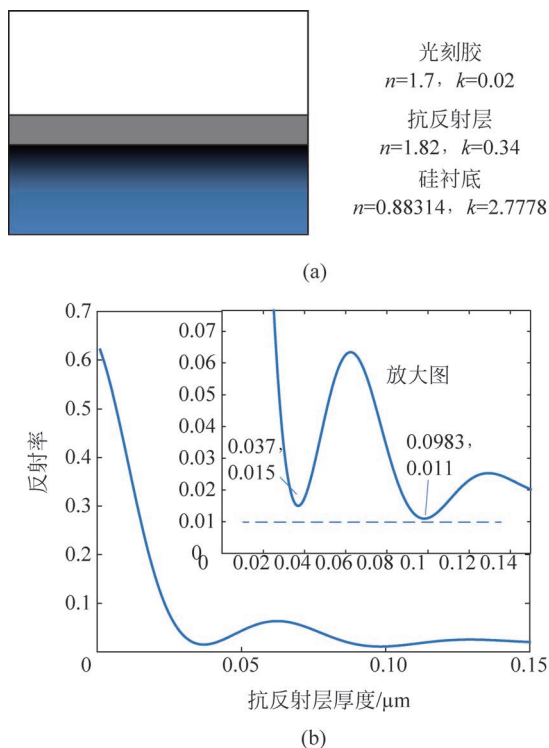


图 5-4 单层抗反射层光学结构示意图：(a) 折射率 n 和 k ；(b) 光刻胶和抗反射层界面的反射率随着抗反射层厚度的变化

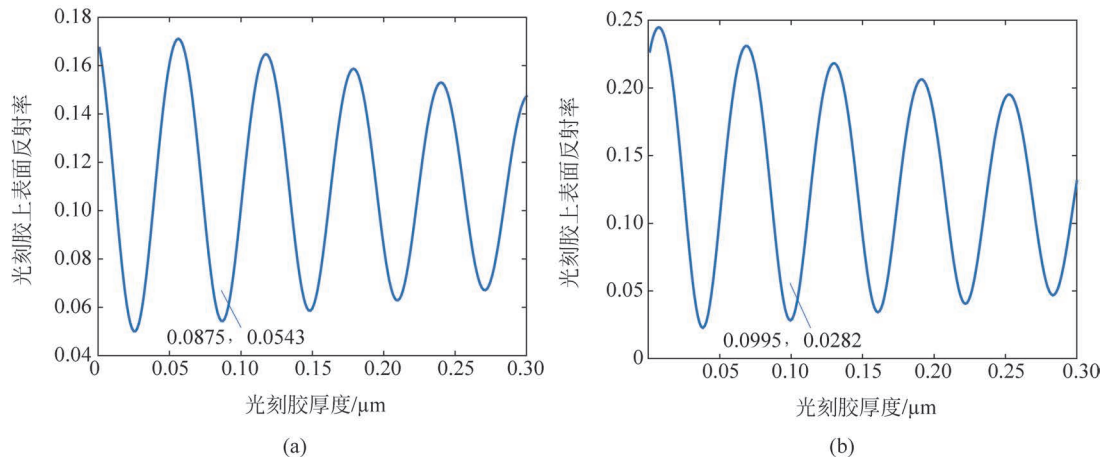


图 5-5 单层抗反射层的摆线(Swing curve)情况-光刻胶上表面反射率仿真结果：(a) 抗反射层厚度为 $0.0983\mu\text{m}$ ；(b) 抗反射层厚度为 $0.037\mu\text{m}$

由于衬底的剩余反射(1.1%和1.5%)导致的光刻胶上表面光的反射随着光刻胶厚度的变化。由于从光刻胶上表面的反射对应从光刻胶中逸出的总能量,因此除去一部分能量遗留在衬底中,其余的能量就会留在光刻胶中参与曝光。可以看到,摆幅随着光刻胶厚度的增加而逐步减小。这是因为光刻胶即便采用了化学放大型,仍然存在一定的吸收,我们仿真采用的是具有代表性的193nm水浸没式光刻胶,波长为193nm时 $k=0.02$ 。由于在整片硅片范围存在一定的高低起伏,摆线效应的摆幅会影响硅片范围的线宽均匀性,所以一般来说,光刻胶的厚度确定需要对应摆线的极小值位置。这样,如果硅片表面的高低起伏导致硅片上局部光刻胶厚度发

生变化,光刻胶上表面的反射率也会在小范围内变化,尽量减小对线宽的影响。图 5-5(a)显示对应抗反射层厚度为 98.3nm 的一个反射率极小位置的光刻胶厚度为 87.5nm,图 5-5(b)显示对应抗反射层厚度为 37nm 的一个反射率极小位置的光刻胶厚度为 99.5nm。第一种情况光刻胶厚度都比抗反射层厚度小,考虑到之后的刻蚀工艺,一般不可行。第二种情况是可行的。

BARC 可以用于高反射率衬底(如硅、铝)的反射率控制(在反射率曲线的第一极小值、第二极小值位置,底部反射率对 BARC 厚度的变化率最低),也可用于减小摆线效应、反射切口效应(Reflective notching)和驻波效应,还可以用作保形层和平坦化层。可通过 BARC 表面性质,使其与许多材料具有良好的相容性。

用于评价抗反射层性能的参数有光学参数(n 、 k)、等离子体刻蚀率、涂覆性质(平坦化或保形)、反射率、厚度、与光刻胶的相容性等。

大部分抗反射层是具有高吸光性(k 为 0.2~0.4)的有机聚合物或含有吸光性染料的有机聚合物。有的抗反射层可用显影液去除^[3],若抗反射层在显影液中的溶解度高于光刻胶,则会产生底部内切;若抗反射层不溶于显影液,则可以在去胶残留(Descum)阶段或干法刻蚀阶段去除。采用干法刻蚀去反射层十分有效,但也有一定的缺点:一方面需要抗反射层比较容易去除,所以工业界就开发了刻蚀速率较快的抗反射材料^[4],这样可以节省光刻胶的厚度。提高刻蚀速率对于平坦化的衬底是有好处的。另一方面,如果衬底起伏巨大,如鳍形晶体管的鳍和栅,在剪切层光刻一般可以采用三层光刻薄膜(Tri-layer)方法:采用平坦化底层抗反射层(又称为旋涂碳层,Spin-On Carbon,SOC)将待剪切一维图形填平,如图 5-6(a)~(f)所示;涂

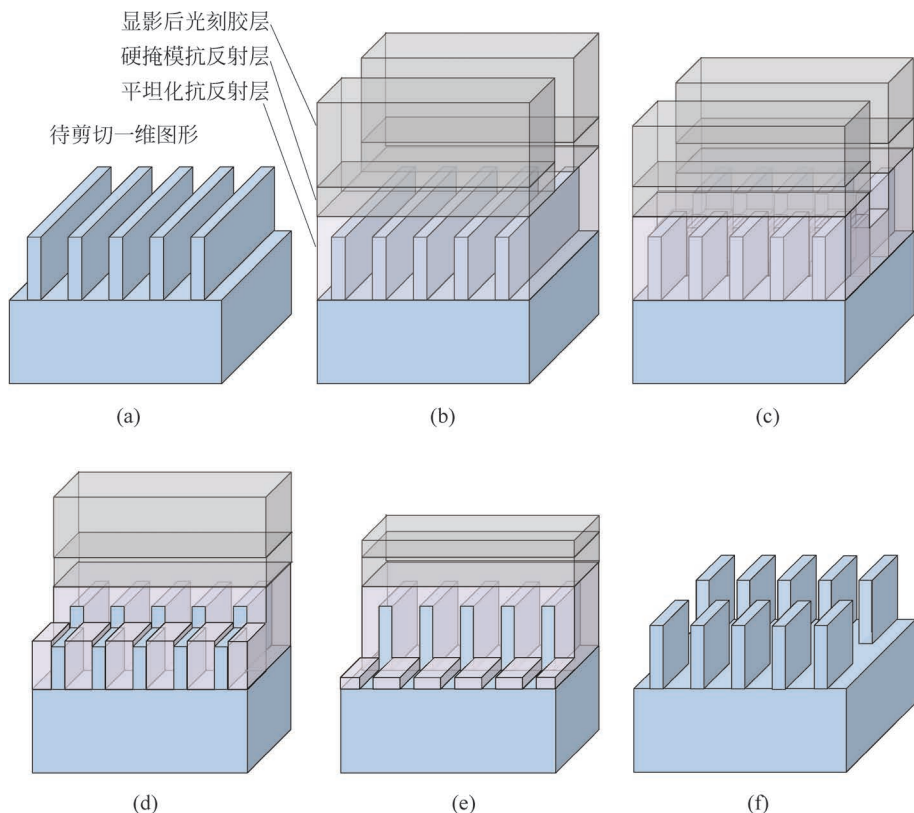


图 5-6 采用平坦化抗反射层对一维图形剪切的流程示意图:(a)待剪切一维图形立体构造;(b)三层光刻薄膜(Tri-layer)涂覆和光刻,硬掩模抗反射层刻蚀完成;(c)一维图形刻蚀开始;(d)一维图形刻蚀过程中(剖面图);(e)一维图形刻蚀完成(剖面图);(f)剩余抗反射层和光刻胶去除,刻蚀完成

覆硬掩模抗反射层,如含硅的抗反射层(Silicon containing BARC, Si-ARC),再在上面涂覆光刻胶;采用光刻工艺,在光刻胶层中通过曝光显影形成剪切掩模版图形;通过等离子体刻蚀将剪切图形传递到硬掩模层;通过硬掩模层(和剩余光刻胶层)将图形传递到含有平坦化抗反射层材料和一维图形的衬底。注意:此时平坦化抗反射层的刻蚀速率必须比待剪切一维图形材料慢,如图 5-6(d)所示,刻蚀过程中剩余的平坦化抗反射层的高度始终比一维图形高^[5]。如果此时平坦化抗反射层的刻蚀速率快于待剪切一维图形,那么剪切还没有完成,衬底就会因为平坦化抗反射层消耗殆尽而受到刻蚀损伤。

采用三层光刻薄膜的原因是衬底的高低起伏通常较大,如 100nm 或者 100nm 以上,若仅采用单层平坦化抗反射膜(厚度为 150~200nm),则会导致光刻胶的厚度受限于对焦深度而不够(通常水浸没式光刻胶的厚度为 70~110nm)用于完成整个刻蚀步骤。而三层中的中间一层通常是含硅的,便于采用氧气等离子体通过含硅层来刻蚀平坦化抗反射层。

采用三层光刻薄膜的原因还有反射率。由于浸没式光刻用到的数值孔径可达 1.35,普遍采用离轴入射照明光,离轴角 θ 在光瞳上可达 0.9,也就是在光刻胶中可达

$$\theta = \arcsin\left(\frac{0.9 \times 1.35}{1.7}\right) = 45.6^\circ \quad (5.3)$$

图 5-7(a)展示了如图 5-1 所示的单层抗反射层针对不同的入射角(光瞳)的反射率随着抗反射层厚度变化的函数。可见,随着照明光入射角 0.0~0.9 的变化(光瞳最大半径为 1.0),反射率曲线也跟着发生变化,其最小值从对应入射角为 0.0(垂直照明)的约 5.5%到对应入射角为 0.9 的 1%。这对光刻工艺控制衬底反射率是十分不利的。一般工艺,如 32/28nm 工艺,要求单层抗反射膜的反射率小于 2%。

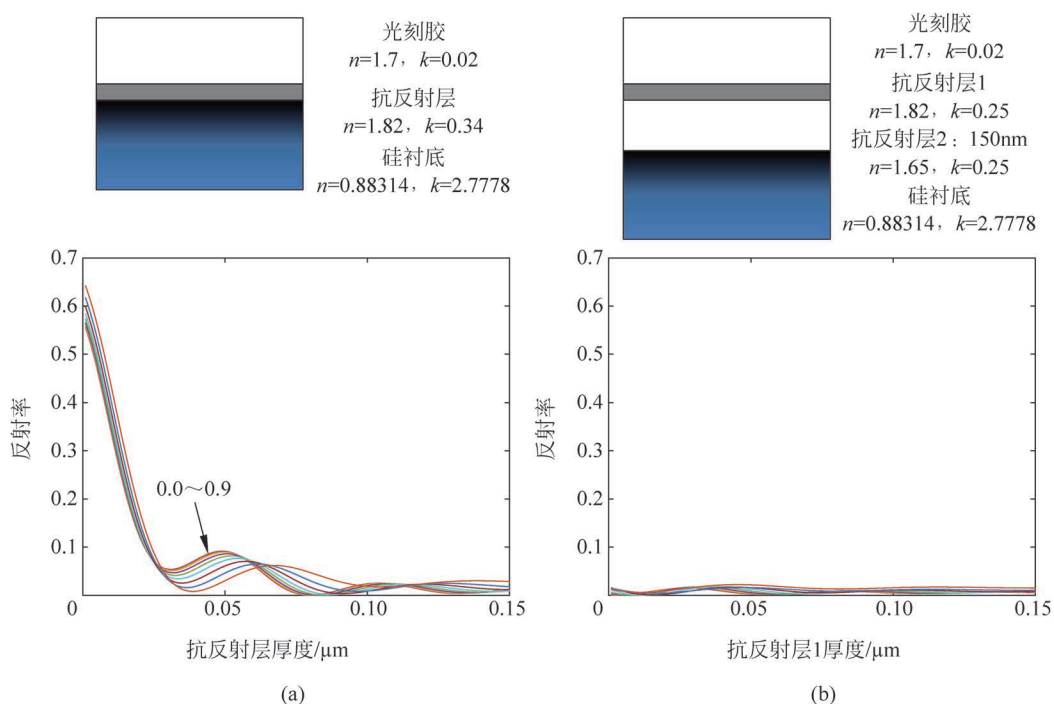


图 5-7 单层和双层抗反射层反射率随入射角变化(光瞳上 0.0~0.9)仿真结果:(a) 单层抗反射层;(b) 双层抗反射层,仿真采用 X/Y 偏振

采用三层光刻薄膜后,也就是采用了双层抗反射层,如图 5-7(b)所示,情况有了大的改观。当选择适合的抗反射层 1 的厚度后,所有角度的总反射率都可以控制在 2%以下(对于单

个角度,反射率可以控制在 0.4% 以下)。图 5-8 展示了采用美国应用材料公司生产的无机抗反射层薄膜的结果与图 5-5 中一样的单层抗反射层的结果对比^[6]。可见,在无机抗反射层厚度为 20~25nm 的地方,可以将所有角度入射照明光的反射率控制在 2% 以下(对于单个角度,反射率可以控制在 0.4% 以下)。

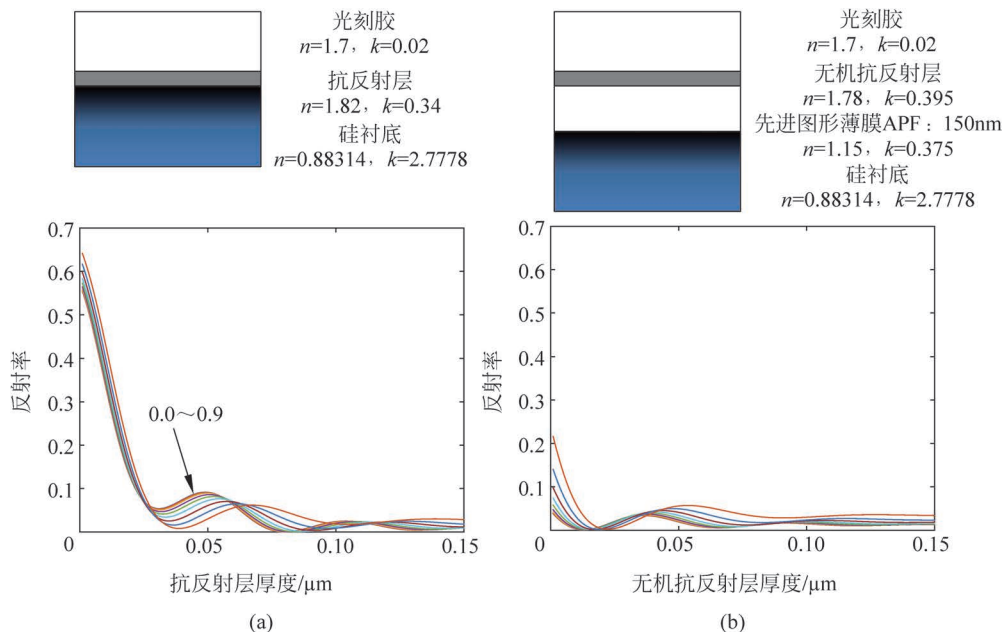


图 5-8 单层和双层无机抗反射层反射率随入射角变化(光瞳上 0.0~0.9)仿真结果:(a) 单层抗反射层;(b) 双层无机抗反射层,仿真采用 X/Y 偏振

5.2 抗反射层种类

大部分抗反射层是具有一定吸光性或含有吸光性成分的有机聚合物,可用于光刻胶与衬底之间,称为底部抗反射层,也可用于光刻胶表面,称为顶部抗反射层。

底部抗反射层是为了消除光刻胶底部和衬底界面上的反射光。它通过同时采取干涉相消(也就是通过使用合适的抗反射层厚度,使得光刻胶—抗反射层界面和抗反射层—衬底界面的反射光相位相差约 180°)和部分吸收的方法来抑制光刻胶底部的反射光。早在 1978 年,美国 RCA 公司就提出在光刻胶与衬底之间添加能够吸收照明光线的填隙材料^[7],到了 1982 年,美国惠普公司也提出了类似的方法^[8]。1995 年,IBM 公司将底部抗反射层进一步完善了^[9],参见 2.4 节。

底部抗反射层一般采用能够热交联的聚合物,在曝光前旋涂完后,经过热板加热烘焙交联,形成一层不再溶解于溶剂和显影液的材料,以便后续的光刻胶旋涂。底部抗反射层一般在光刻显影完成后需要通过干法等离子体刻蚀工艺用已经显影完成的光刻胶做掩模按照光刻胶的图形打开,以便后续的刻蚀工艺,如硅的刻蚀、多晶硅的刻蚀、二氧化硅的刻蚀、低介电常数材料(Low dielectric material 或 Low- k material)和金属材料的刻蚀等。所以打开底部抗反射层需要消耗光刻胶的厚度,需要采用更加厚的光刻胶,这一般会损失光刻的对比度,也就是能量宽容度,以及对焦深度等工艺窗口参数。所以工业界又产生了可以溶解于显影液的底部抗

反射层: 美国布鲁尔科学公司(Brewer Science)在1990年提出可以感光,并且可以与上面的光刻胶一起显影的底部抗反射层^[3,10],以及可以快速被刻蚀消耗的底部抗反射层^[4]。底部抗反射层在光刻工艺中的重要性越来越高。

随着光刻线宽的不断缩小和对线宽控制要求的不断提高,无机抗反射层由喷镀的方法沉积而成,与有机抗反射层不同,无机抗反射层可能留在器件上。典型的无机抗反射层包括氮氧化硅(SiON)、无定形碳(Amorphous Carbon, CA)、硅化钛、氮化钛等。

5.2.1 顶部抗反射层

1990年, Tanaka等首次提出顶部抗反射层的概念。TARC一般由全氟化物组成,如全氟辛酸(Per Fluoro Octanoic Acid, PFOA)、全氟辛磺酸(Per Fluoro Octane Sulphonate, PFOS),有些TARC由聚氟化烷基醚(Poly alkyl ether)、聚四氟乙烯(Poly Tetra Fluoro Ethylene, PTFE)等组成。顶部抗反射层主要用于有效减小光刻胶底部反射导致的反射光和光刻胶顶部的反射光干涉而形成顶部总反射光随着光刻胶厚度的变化的摆线效应(见5.1节)。摆线效应会影响光刻胶内部光的多少(由总照射光扣除从上表面出射的总光强)。如果硅片上存在光刻胶厚度的变化分布,如衬底图形密度不均一而导致的不平整,形成局部光刻胶厚度不均匀,这种厚度的分布变化会导致线宽的分布变化。这也是线宽均匀性的来源之一。

早期生产的顶部抗反射层源自溶剂成膜,所选溶剂不能与光刻胶有相互作用,且要在显影之前去除,一般选用氟氯化碳(Chloro Fluoro Carbon, CFC)类化合物。第一代248nm和193nm TARC用的是PFOS化合物,由于PFOS毒性高且可降解性差,如今已放弃使用。

顶部抗反射层除了基于其抗反射的功能能够改善线宽均匀性和改进工艺窗口,还有其他用途,如缺陷控制。因为其可以溶解于显影液,所以它可以将曝光过程中掉落的颗粒在显影过程中带走。20世纪90年代出现了首批商业化的水基TARC,可用常规显影液(0.26mol/L四甲基氢氧化铵)或水去除,并与第一批化学放大型光刻胶搭配使用,用于248nm(KrF)光刻技术。涂完光刻胶到曝光这段时间对线宽的控制十分重要,空气中的任何碱性分子(氨气、N-甲基吡咯烷酮等)均会对光刻胶形貌产生不良影响,在光刻胶上表面涂上一层TARC,可有效阻断空气中碱性分子与光刻胶的接触,从而避免这种影响。

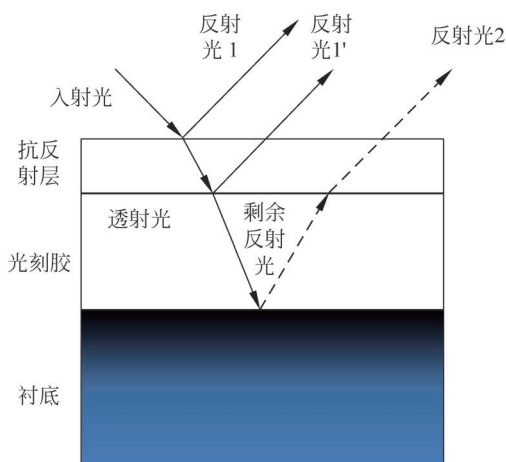


图 5-9 顶部抗反射层抑制顶部反射干涉原理示意图

顶部反射光和光刻胶底部的反射光或者剩余反射光发生干涉会导致摆线效应,摆线效应会导致线宽受到光刻胶厚度在硅片上分布的影响。由于干涉涉及两束光,如果去掉一束光,就不会出现干涉,也不会出现摆线效应。顶部抗反射层就是这样的一种结构。图5-9展示了通过调整顶部抗反射层的厚度,使得顶部抗反射层顶部的“反射光1”及其底部的“反射光1'”相位相反,再通过调整其折射率,使得上述两束光的振幅相同。根据反射率公式和干涉原理,理想的顶部抗反射层的厚度为

$$d = \frac{m\lambda}{4n_{\text{TARC}}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (5.4)$$

折射率为

$$n_{\text{TARC}} = \sqrt{n_{\text{光刻胶}} n_{\text{空气或水}}} \quad (5.5)$$

式中： $n_{\text{空气或水}}$ 取决于像空间的介质材料。一般来说，像空间的介质有空气、水（193nm 浸没式光刻）、真空（极紫外，跟空气差不多）。

5.2.2 底部抗反射层

底部抗反射层的原理与顶部抗反射层相同，如图 5-1(b)所示，即通过增加一层介质（抗反射层）来消除光刻胶和衬底界面上的反射光。这层抗反射层的厚度和折射率理想值的确定与顶部抗反射层相同。可以利用式(5.4)和式(5.5)。只不过是将其中的材料更换，如下：

$$d = \frac{m\lambda}{4n_{\text{BARC}}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (5.6)$$

$$n_{\text{BARC}} = \sqrt{n_{\text{光刻胶}} n_{\text{衬底}}} \quad (5.7)$$

需要说明的是，实际上由于所有材料或多或少地存在吸收，即折射率存在虚部（ $k \neq 0$ ），式(5.4)～式(5.7)都不是完全准确的，只能够大致估算，实际的厚度和折射率需要通过仿真计算获得，如图 5-4～图 5-8 所示。具体公式参见 11.1 节。根据其中的反射率和反射率递推（多层膜）公式来确定 d 和 n 值。

底部抗反射层主要有有机 BARC 和无机 BARC 两种类型。

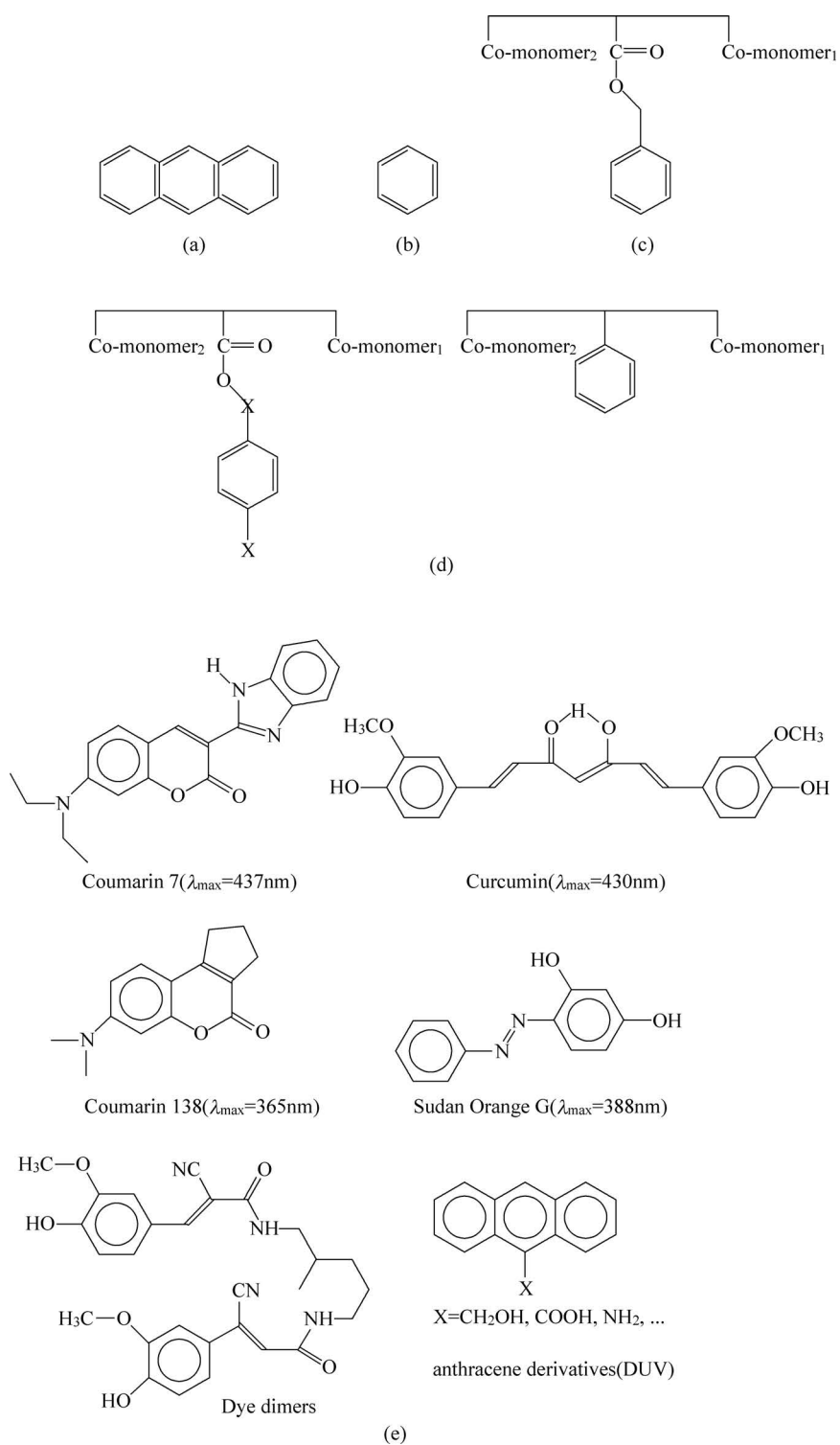
1. 有机底部抗反射层

有机 BARC 的设计路径主要有两类：一是将染料通过化学手段接于聚合物主链上；二是将染料单体与 BARC 聚合物物理混合。BARC 还含有一定量的交联位点，以发生热交联反应，烘焙后的 BARC 还要有一定的可溶性，因此，在设计的时候要控制交联位点的数量。另外，对于 248nm 和 193nm BARC，还要在聚合物主链上引入容易刻蚀单体，以提高 BARC 的刻蚀速率。物理混合的方法存在一个缺点，在烘焙阶段染料会发生升华，因此，要选用分子量较大的染料，否则就要使用接枝的方法。

芳香族化合物在 193nm 下会发生 $\pi-\pi^*$ （ π 能级到 π 能级的激发态）跃迁，对 193nm 波长有很大的吸收，故拥有优异的消光系数，是设计 BARC 的最佳发色团，很容易满足 BARC 反射率曲线上的第一极小值和第二极小值条件；不过，芳香族化合物在 248nm 波长下吸收峰较弱，第一极小值反射率较难实现，而在 365nm 波长下吸收更弱，几乎难以实现第一极小值反射率。

用于设计 193nm 和 248nm 有机 BARC 的芳香族化合物主要基于两类，如图 5-10^[11]：多苯环结构的蒽[见图 5-10(a)]和单苯环结构的苯[见图 5-10(b)]。图 5-10(c)和图 5-10(d)分别展示了 248nm 和 193nm 有机 BARC 基本结构，图 5-10(e)为较常用的单体染料及相应的最大吸收波长。

还有一种 BARC 设计思路，将 BARC 设计成可溶于显影液的材料，这样一来，BARC 可在光刻胶显影阶段去除，这类 BARC 主要应用于注入层，因为等离子体刻蚀工艺在注入层可能会将 BARC 材料打入衬底中，对器件造成损害，且成本较高，用显影液代替离子刻蚀去除 BARC 可有效避免器件损坏。显影时，要在恰当的时机终止，否则会造成底部站脚或底部内切^[3]。这类 BARC 在设计时一般要有一定的光敏感性（Photo Sensitive BARC, PS BARC），在曝光区可溶，在非曝光区不溶，与光刻胶相匹配，才可产生垂直的 BARC 墙^[12]。不过，这相当于要求制作一支可以在软烘步骤至少部分交联的光刻胶，而且此光刻胶还需要与涂覆在其之上的光刻胶在光学邻近效应上匹配，这在设计上、合成上有较大的难度。

图 5-10 组成底部抗反射层的一些材料结构图^[11]

2. 无机底部抗反射层

无机 BARC 是一层用物理或化学方法沉积的无机薄膜,与有机 BARC 相反,无机 BARC

可能最终留在器件里,或者在刻蚀阶段去除。典型的无机 BARC 包括氮氧化硅、无定形碳^[6]、氮化钛等,要根据反射衬底的性质选择无机 BARC。以氮氧化硅为例,其在 248nm 和 193nm 波长下吸光性较好, $n \approx 1.8 \sim 2.0$, $k \geq 0.4$,一般选用其反射率曲线的第一极小值。

无机 BARC 通常通过化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition,CVD)的方法沉积而成,可通过调整薄膜的组分和厚度来调节其折射率 n/k 值。

5.3 有机、无机底部抗反射层对比

与无机抗反射层相比,有机抗反射层的最大优点是旋涂工艺简单,设备成本低廉,刻蚀后易去除;缺点是材料质地均匀性较差,刻蚀后的线宽偏差较大,这对抗反射层刻蚀工艺的优化不利。在硬掩模普遍使用的今天,即便是底部抗反射层内部都掺入了硅,这样也可以起到硬掩模的作用。一般来说,对于前段有源区线条和栅极线条,人们还是倾向于使用无定型碳,或者美国应用材料公司的先进图形薄膜(Advanced Patterning Film,APF)来主导干法刻蚀,用于刻出更加平滑和均匀的线条。

5.4 底部抗反射层与光刻胶相互作用

一般来说,抗反射层与光刻胶之间的相互作用在于表面张力匹配和酸碱平衡。表面张力系数的匹配主要体现在正显影和负显影工艺上。正显影工艺中曝过光的区域被洗去,没有曝光的区域留下,所以抗反射层只要保持其原有的疏水性,黏结没有曝光的光刻胶就可以了。但是,对于在 14nm 逻辑工艺开始大量引入的负显影工艺,由于曝光前后光刻胶的表面张力变化显著,曝过光的区域变得亲水,而且根据负显影的原理,曝过光的区域需要留下来。这样,如果底部抗反射层还是保留其疏水性,就会产生光刻胶剥离。解决的方法之一是在抗反射层中添加酸致脱基团,使得酸存在的情况下,抗反射层的表面可以通过接收从光刻胶中扩散出来的氢离子(H^+)催化反应生成羧基($COOH$)或羟基(OH),形成较为亲水的表面,以匹配光刻胶在曝光后的极性变化,提高光刻胶与衬底的黏附性,增强抗图形倒塌性能。

另一种较为常见的情况是酸碱平衡。若抗反射层的酸度不够,或者其中含有较多氮分子(TiN 、 $Si_xO_yN_z$ 等),则会导致光刻胶中的光酸渗透到抗反射层中,使得光刻胶底部因缺少光酸而形成站脚。从光学的角度出发,我们可以减弱站脚现象。其原理主要是 BARC 和光刻胶界面处的反射光发生了相位变化而产生了站脚。一般来说,在反射率极小值对应的抗反射层厚度处让抗反射层变薄,随着反射光的逐渐增加,反射光的相位也会逐渐靠近入射光的相位,形成相干相长,造成光刻胶底部光强增加,这对减小站脚可以起到一定的作用。相反,如果加厚抗反射层,则会增加站脚。具体值需要通过仿真计算获得,并且需要在硅片上验证。

5.5 含硅的抗反射层(SiARC)

在底部抗反射层中添加硅的原理是为了协调日益缩小的光刻工艺对焦深度(14nm 节点,60nm)和进入鳍形晶体管技术节点以来,不断增加的衬底高低起伏(50~100nm)和高深宽比沟壑的挑战。含硅的抗反射层(硅质量分数一般为 30%~40%)可以用氧气等离子体以极高的选择比(如 30:0)来刻蚀很厚的(150~200nm)平坦化型底部抗反射层,又称为旋涂碳层

(Spin On Carbon, SOC), 而光刻胶由于对焦深度日益缩小厚度变得只有 60~90nm, 只需要将图像传递到厚度仅有 30~40nm 的含硅底部抗反射层中。SOC 材料一般是丙烯酸酯类型, 包括大量芳香族分子, 其碳质量分数大于 80%, 用于增强刻蚀阻挡能力^[5]。

含硅的底部抗反射层一般包括发色团(起到 BARC 的作用)、交联剂、含硅的成分。对光刻来说, 其性价比高。但是其去除比较麻烦, 一般使用单独的湿法槽, 或者采用全干法去除, 如 CF_4 气体。一般含硅的抗反射层的三层光刻薄膜去除可以先用溶剂将剩余的光刻胶去除, 再使用 CF_4 气体将含硅层去除, 最后使用氧气等离子体将 SOC 去除。

5.6 用于极紫外光刻的底部增感层

由于极紫外的波长比 193nm 短得多, 同样的能量会导致少了十几倍的光子吸收, 光子个数急剧减少的结果是散粒噪声的明显增大(参见 4.6 节)。如何增加对极紫外光子的吸收是提高极紫外光刻胶性能, 尤其是线宽粗糙度/线边粗糙度的唯一途径。通过添加底部增感层(Bottom sensitizer layer, 或者叫作 Under Layer, UL), 2009 年美国布鲁尔科学公司(Brewer Science, Inc)和英特尔公司(Intel Corporation)合作报告了通过研究添加有交联剂的丙烯酸酯类和聚羟基苯乙烯类聚合物的增感层(通过增加对极紫外光子的吸收)对极紫外光刻工艺的影响, 获得了改善的线宽粗糙度-线边粗糙度的结果。而且, 通过添加光致产酸剂, 还可以提高吸收光的灵敏度^[13]。2014 年, 美国 AZ 公司通过设计一个电子缓冲器(Buffer)来降低底部增感层对极紫外光子吸收后电子的能量涨落, 减小能量涨落导致的散粒噪声, 如图 5-11 所示。他们发现, 通过这样的方法, 极紫外光刻胶的灵敏度可以改进 30%, 散粒噪声可以改进 13.4%^[14]。

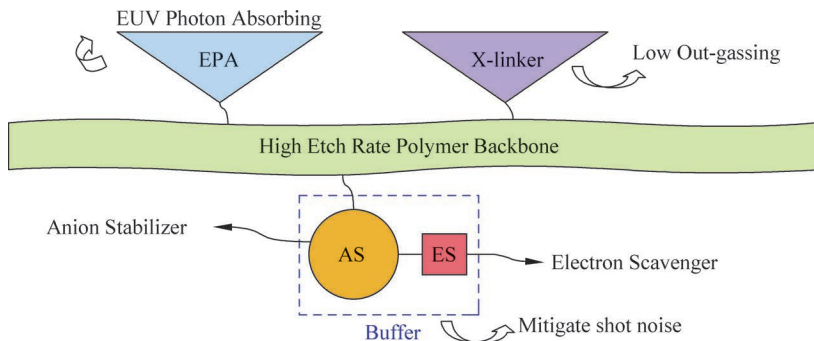


图 5-11 美国 AZ 公司设计的极紫外光刻胶的底部增感层概念图^[14]

参考文献

- [1] Stefan Partel, Markus Mayer, Kristian Motzek. In-situ measurement and characterization of photoresist during development. SPIE newsroom, 2012.
- [2] Brunner T A. Optimization of optical properties of resist processes. Proc. SPIE 1466, 1991:297.
- [3] Washburn C, Guerrero A, Mercado R, et al. Process Development for Developer-Soluble Bottom Anti-Reflective Coatings (BARCs). Interface 2006, 2006.
- [4] Neef C J, Krishnamurthy V, Nagatkina M, et al. New BARC Materials for the 65-nm Node in 193-nm Lithography. Proc. SPIE 5376, 2004:684.
- [5] Makoto Nakajima, Takahiro Sakaguchi, Keisuke Hashimoto, et al. Design and Development of Next

- Generation Bottom Anti-Reflective Coatings for 45nm Process with Hyper NA Lithography. Proc. SPIE 6153, 61532L, 2006.
- [6] Marc J. van der Reijden, Maaikje Op de Beeck, Erik Sleenckx, et al. High and Hyper NA Immersion Lithography using Advanced Patterning Film APFTM. IEEE SEMI Adv. Semiconduct. Manufact. Conf. 39, 2006.
- [7] DiPiazza J J. Nonreflecting photoresist process. US4102683, 1978.
- [8] Chen M, Trutna Jr. W R, Watts M P C, et al. Multilayer photoresist process using an absorbant dye. US4362809, 1982.
- [9] Dichiaro R R, Fahey J T, Jones P E, et al. Mid and deep-UV antireflection coatings and methods for use thereof. US5401614, 1995.
- [10] Arnold J W, Brewer T L, Punyakumleard S. Anti-reflective coating. US4910122, 1990.
- [11] Uzodinma Okoroanyanwu. Chemistry and Lithography. SPIE Press, 2011.
- [12] Joyce Lowes, Victor Pham, Jim Meador, et al. Advantages of BARC and photoresist matching for 193-nm photosensitive BARC applications. Proc. SPIE 7639, 76390K, 2010.
- [13] Hao Xu, James M. Blackwell, Todd R. Younkin, et al. Underlayer designs to enhance the performance of EUV resists. Proc. SPIE 7273, 72731J, 2009.
- [14] Jin Li, Ide Yasuaki, Shigemasa Nakasugi, et al. A Chemical Underlayer Approach to Mitigate Shot Noise in EUV Contact Hole Patterning. Proc. SPIE 9051, 905117, 2014.

思考题

1. 抗反射层有哪几种类型?
2. 顶部抗反射层主要用来解决什么问题?
3. 有机抗反射层的主要成分是什么?
4. 抗反射层通过怎样的原理来减小在各界面的反射率?
5. 无机抗反射层有哪些?
6. 抗反射层的厚度是怎样确定的?
7. 抗反射层的折射率需要满足怎样的要求?
8. 光刻工艺中,通过什么方法将显影后光刻胶中的图形转移到抗反射层中?
9. 极紫外的底部增感层的作用是什么?