

3.1 光刻技术介绍

光刻是利用光学曝光等方式将设计好的图形投射到衬底上的精细加工技术,是制造 各种规模的集成电路和微纳器件的主要方式。自 1947 年第一只晶体管问世和 20 世纪 60 年代集成电路发明以来,受益于光刻技术的不断进步,当前先进的超大规模集成电路 的加工能力已经实现了 5nm 线宽器件的量产,可在 1mm² 面积的芯片上集成数亿个晶 体管,这已非常接近微纳电子器件的物理极限尺寸,就其分辨率而言,已超出传统意义上 的"光学曝光"的极限。

3333

与传统的照相方式相似,光刻的主要过程是将事先制作在掩模板(类似于照相的底 片)上的图形通过曝光和显影转移到涂敷在硅等衬底材料的光刻胶上(类似于洗印的相 纸),然后再以光刻胶为阻挡层刻蚀其下方的衬底或薄膜材料等器件层,从而将设计好的 图形转移到器件层中。其基本的流程示意如图 3.1 所示。虽然,各种微纳器件通常都具 有三维结构,但完全可以将其分解成多个二维图形的叠加。因此,通过多次曝光和刻蚀 的反复流程,即可制造出精细的三维器件结构。例如,当前最先进的集成电路的制造过 程需要进行几十次到上百次的光刻。光刻技术是集成电路制造的核心与关键,也是我国 集成电路制造产业亟须攻克的核心技术堡垒和面临的最严峻挑战之一。



刻胶下方的器件层或衬底中继续转移



10.00

3.2 光学光刻技术

3.2.1 光学曝光原理与方式

光学曝光的原理是将事先设计好的图形通过光学方式投射到涂敷了光刻胶的衬底 或晶圆上。设计图形可以直接写入到衬底或晶圆上,这种方式称为直写式曝光,通常由 激光束或电子束的扫描运动配合工作台的移动来完成;更常见的方式是将设计图形事先 制作在掩模板上,然后利用光学投影或扫描的方式将其投射到晶圆或衬底上。

1. 掩模对准式曝光

掩模对准式曝光是早期发展起来的技术,如图 3.2(a)所示的接触式曝光,掩模板与 涂有光刻胶的晶圆直接硬接触,然后由紫外光源进行曝光。这种曝光方式比较简单,甚 至仅需一个汞灯和一个掩模板即可完成。但其缺点也是显而易见的,由于掩模板与晶圆 之间硬接触,很容易对掩模板造成损伤或由光刻胶黏附造成污染。如果将掩模板与光刻 胶表面以一个间隙(如几微米或十几微米)分开,即可克服接触式曝光的上述缺点,大大 延长掩模的寿命,如图 3.2(b)所示,这种曝光方式称为邻近式曝光。但这又带来另外一 个显见的问题——由于掩模板与光刻胶之间存在间隙,光源投射到光刻胶上的光强分布 受到掩模图形的衍射效应的影响,从而使曝光和显影后的图形尺寸与掩模图案发生偏 离。具体的光强分布依赖于图案形状和间隙大小,可由菲涅尔衍射来估算。曝光图形的 保真度与掩模间隙存在如下简单的关系:

$$k = k \sqrt{\lambda d} \tag{3-1}$$

式中,w 是在光刻胶上实际成像的尺寸和掩模板上设计图案的尺寸之差,k 是由工艺条件决定的经验参数,λ 是照明光源的波长,d 是掩模板与光刻胶表面的间隙。显然,为了 使曝光图形的尺寸与设计尺寸尽可能接近(即 w 越小越好),除了工艺参数 k 和光源波长



λ 之外,只能尽量减小掩模与晶圆表面的间隙 d,当 d 减小到 0 时,邻近式曝光成为硬接 触式曝光。

掩模对准式曝光机通常包括由光源和反射镜、透镜组成的照明系统、安置掩模板的 机构、固定晶圆的样品台、观察对准标记的显微镜等组成。光源通常使用汞灯,主要使用 其发光光谱中波长为 405nm 或 365nm 的紫外光。近年来,由于紫外发光二极管技术 (LED)的成熟,已有不少曝光机开始用紫外 LED 替代汞灯作为光源,具有成本低、寿命 长、结构紧凑等优点。除光源之外,照明系统还包括会聚和准直光学部分,将光源发出的 光尽可能高效地投射到掩模板和晶圆上。掩模架通常采用机械固定或真空吸附的方式 固定掩模板,可以安装几种不同尺寸的掩模板。安放晶圆的样品台也往往采用真空吸附 的方式,样品台需要具有精确移动和对准的能力,使多次曝光过程中不同层的图形可以 对准,因此显微镜观察系统也非常重要。有些曝光机具有双面对准的功能,在掩模架的 下方也有两个显微镜,可以读取掩模板和硅片反面的对准标记,进而实现双面对准。

掩模对准式曝光机结构简单,成本较低,虽然已不适用于大规模集成电路的制造,但 在对图形分辨率要求不高的工艺以及科研中依然有广泛的应用。例如,在微流体、微机 电(MEMS)等器件制造中依然可以应用,这类器件的结构尺寸远大于集成电路器件,对 图形分辨率要求不高,且很多制造工艺与标准的集成电路工艺不同,掩模对准式曝光机 适用于这类工艺开发和研究。设计良好的曝光机在硬接触曝光模式下可以达到 1μm 的 图形分辨率,若抽真空后硬接触则可达到 0.5μm 的分辨率,对准精度也可达到 1μm 的误 差之内。例如,德国 Suss 公司的 MA6 掩模对准式曝光机具有代表性且应用广泛,其曝 光分辨率和对准精度可达到上述性能。

2. 掩模投影式曝光

掩模投影式曝光在掩模板和晶圆之间加入透镜等光学成像系统,将掩模板上的图形 投影成像到晶圆表面,从而不再受掩模板和晶圆之间的间隙影响,解决了邻近式曝光中 光学成像受掩模-晶圆间隙影响而不一致的问题。其曝光模式如图 3.3(a)所示。图 3.3(b) 所示的是扫描投影式曝光,这种曝光机在光源中加入一个狭缝,部分遮挡住光源所发出 的光,然后使掩模板和晶圆同步运动,将掩模板上的图形逐步扫描投影到晶圆上。这种 方式可以避免投影式曝光容易受晶圆边缘衍射效应的影响,所能曝光的最小图形尺寸约 为 1μm。

根据投影光学设计的不同,投影式曝光有1:1投影和缩小式投影。1:1投影到晶圆上的图形尺寸与掩模板上的图形尺寸相同,但随着集成电路最小图形尺寸的迅速缩小,1:1投影的掩模板制作变得困难。缩小式投影在晶圆上的图形尺寸是掩模板上的图形尺寸的1/4、1/5或1/10,因此大大缓解了制作掩模板的困难。缩小式投影曝光将整个投影图形区域缩小,在大面积的硅晶圆上通过重复曝光形成多个同样的投影图形区域,每个投影图形区域可以包含一个或几个不同的芯片,从而在晶圆上逐步制作出芯片阵列。由于每次只曝光晶圆的一个区域,可以较方便地补偿晶圆表面平坦度或几何形状的改变。这种曝光方式自20世纪80年代以来就成为集成电路制造工业的一个主要的曝光方式。图 3.4 所示为步进/重复投影式曝光。



图 3.3 投影式曝光(a)和扫描投影式曝光(b)

3. 投影式曝光系统的光学分辨率

如图 3.3 所示,投影式曝光在掩模板和晶圆之间 加入了投影透镜,光源发出的光照射掩模板后经过投 影透镜成像到晶圆表面。直观地看,光源照射掩模板 存在衍射效应,透过掩模板后在其附近的光强分布取 决于掩模图案的衍射。可以用单缝衍射来简要说明这 一效应,如图 3.5 所示,一束光入射到一个狭缝之后在 缝后的屏幕上呈现明暗相间的条纹分布。在大学物理 中已经学过,单缝衍射的光强分布既可以用菲涅尔半 波带法进行半定量计算,也可以用矢量叠加法进行定 量计算。若图 3.5 中的缝宽为 *b*,入射光的波长为 λ, 则在屏幕上衍射明暗条纹的角分布满足以下关系:

 $b\sin\theta = k\lambda(k = 1, 2, ...)$ (3-2) 式中, k 代表衍射条纹级数。衍射效应的存在使得衍 射屏上的光强分布与缝宽大大偏离, 若单缝由掩模板

上的图案代替,则在邻近式曝光中在光刻胶表面所成的像必然与掩模板上的图形发生偏 离,曝光分辨率受限,这可用图 3.6 更为清晰地说明。

可用 $b\sin\theta = k\lambda$ 中的单缝宽度 b 来代表曝光成像的极限能力,即成像的尺寸与掩模板上图形的尺寸完全一致,因此曝光的光学分辨率 R = b。此时对应的是衍射效应的中央主极大,取 $k = 1, 则 b \sin\theta = k\lambda$ 变为

$$R = b = \frac{\lambda}{\sin\theta} \tag{3-3}$$

图 3.4 步进/重复投影式曝光



第 3 章

光刻技术



其次,投影式曝光通过透镜将掩模板的衍射光会聚成像到晶圆表面,因此透镜可以将扩 散开的衍射光尽量会聚起来,其效应可以用图 3.7 来近似描述。透镜的会聚能力越强, 就能把衍射扩散的光强越多地会聚到晶圆表面,从而增强曝光效果。但由于衍射效应的 扩散性和透镜有限的孔径,透镜不并能将全部的衍射光强会聚到晶圆上,因此这里需要 引入数值孔径来定量表达透镜的收集和会聚衍射光的能力。



图 3.7 投影式曝光中掩模板的衍射效应和透镜的会聚作用

数值孔径(Numerical Aperture,NA)与透镜对光的会聚角 θ 和光传播空间介质的折射率n成正比,即

$$NA = n\sin\theta \tag{3-4}$$

将数值孔径代入式中,并考虑到具体工艺的影响,引入一个工艺参数因子 k₁,则投影式曝光的光学分辨率公式变为

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \tag{3-5}$$

可见,决定投影式曝光分辨率的因素包括工艺因子 k_1 、曝光波长 λ 和投影透镜的数值孔 径 NA。因此,提高光学分辨率的途径包括降低工艺因子 k_1 、缩短曝光波长和增加透镜 的数值孔径 NA。投影式曝光技术正是沿着这三条主要途径发展的。表 3.1 列出了当 $k_1 = 0.6$ 、NA=0.6 时,不同曝光波长的分辨率。可见,随着曝光波长的缩短,曝光分辨率 从 0.436 μ m 提高到 0.193 μ m。因此,光刻技术所用的曝光波长不断缩短,从紫外光到深 紫外光(Deep Ultro-Violet,DUV),再到极紫外光(EUV)、X 射线,再到电子束曝光,事实 上已经超出了光学曝光的范畴。

曝光波长名称	曝光波长/nm	数值孔径	曝光分辨率/µm
G 线	436	0.6	0.436
I 线	365	0.6	0.365
深紫外光	248	0.6	0.248
	193	0.6	0.193

表 3.1 曝光分辨率随曝光波长的变化(k₁=0.6)

下面介绍光刻技术中采用的曝光光源和波长的演化历程。汞灯是光刻技术早期开 始采用的曝光光源,汞灯的发射光谱较宽,包含很多尖锐的发光峰,如图 3.8(a)所示。其 中,波长 436nm 的峰称为 G 线,波长 365nm 的峰称为 I 线。对微米量级或更大线宽的光 刻工艺,G线曝光已足够。对微米以下线宽的曝光,需要用 I线曝光,正如表 3.1 所示。 当器件线宽低于 0.35μm 时,I 线曝光已无法胜任,此时需要更短的曝光波长。但是汞灯 光谱中更短波长的谱线的发光能量太低,无法满足曝光的能量需求。因此为满足深紫外 曝光需求,开发了相应的准分子激光器。其中,发光波长 248nm 的是采用氟化氪(KrF) 气体的准分子激光器,发光波长 193nm 的是采用氟化氩(ArF)气体的准分子激光器。这 两种激光器技术成熟,性能稳定,发射功率较高,足以满足大规模集成电路量产需求。波 长 248nm 的氟化氪激光器的相对功率最高,因此最先引入集成电路的生产,随后是 193nm 的氟化氩激光器。如图 3.8(b)所示,从 20 世纪 80 年代初的最小图形尺寸 3μm 的集成电路到 2004 年的最小图形尺寸 90nm 的集成电路,曝光波长也从 G 线到 I线,再 到深紫外光的 248nm 和 193nm。事实上,半导体制造和集成电路产业曾经投入研发了 波长 157nm 的氟分子(F₂)激光器,试图进一步缩短曝光波长以继续提高曝光分辨率。 但很快遇到难以解决的关键问题,包括光学透镜、掩模保护膜(pellicle)和光刻胶材料。 其主要原因在于上述关键部件所用的材料都对 157nm 波长的深紫外光有强烈的吸收,由 此开发能满足应用需求的材料和部件遇到了很大困难。加上 193nm 光源结合浸没式曝 光实现了 70nm 以下线宽的曝光,最终导致采用 157nm 波长光源的光刻技术未能应用在 集成电路量产中。

3.2.2 光刻的关键指标

特征尺寸(Critical Dimension,CD)是指在一个集成电路中或一个器件的内部结构中的最小尺寸,可以是线宽、间距或金属接触线的尺寸。特征尺寸代表一种光刻工艺的最

微加工技术工艺原理与实验



图 3.8 汞灯的发光谱(a)曝光分辨率基于曝光波长的演化历程(b)

大能力。在集成电路芯片中,常用两条金属线的间距,即半节距(half pitch)代表特征尺寸,而半节距又常用来指代技术节点,例如,22nm、14nm 等。相比之下,特征尺寸虽然代表了集成电路中的最小尺寸,但与集成器件的密集程度无关。光学曝光最难实现的是等间距或等周期的密集分布图形。因为密集分布的图形曝光时图形之间的光强分布相互影响,很难达到理想中的分辨率,这比曝光同尺寸的稀疏或孤立图形困难很多。而半节距同时包含了最小图形尺寸和密集程度,因此自 2001 年开始半导体工业界引入了"半节距"概念。分辨率是指可以曝光出来的特征尺寸,或者将晶圆上两个邻近的特征图形区分开的能力。通常表达为可分辨的且能保持一定容差的最小特征尺寸,集成电路制造中一个典型值是线宽分布标准偏差值的六倍不超过线宽的 10%。分辨率受到诸多因素的影响,如光源、光学系统、掩模板、衍射效应、光刻胶的灵敏度、掩模板与晶圆的对准精度、晶圆或掩模板的平坦度的不均匀性等。

焦深(Depth Of Focus, DOF): 在成像系统的光学焦点附近的能够使成像连续清晰的一个范围,类似于照相机的景深,如图 3.9 所示。焦深的数学表达式为

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2}$$
(3-6)

其中,k₂ 是与曝光系统和光刻工艺相关的常数,NA 是曝光系统的数值孔径,λ 是曝光波 长。可见,焦深与数值孔径的平方成反比,虽然提高数值孔径可以获得高分辨率,但这必 然导致焦深降低。在大规模集成电路制造中,焦深是一个非常重要的参数,其重要程度 甚至超过分辨率。尤其是硅晶圆的直径多在 8~12 英寸(1 英寸≈2.54 厘米),如此大的 尺寸无法做到晶圆绝对平整。加之多道制造工艺必然在晶圆表面形成高低起伏的电路 结构形貌。如果曝光系统焦深过小,则掩模板在晶圆表面成像只在极小的范围内清晰, 超出这一范围就散焦不再清晰,使得制造工艺精度无法保证。当然随着技术的不断进 步,尤其是硅晶圆表面平整化技术的发展,对曝光系统焦深的要求已不再如 20 世纪 90 年代初期时那样严苛,现代的曝光系统允许焦深小于 0.5μm。



套刻精度:集成电路和器件的制造过程需要多次光刻,这就要求每次曝光时都要与 晶圆或衬底上已制作好的图形精确对准,即套刻精度。套刻误差影响晶圆上不同图案之 间的布局宽容度。套刻精度受很多因素影响和控制,包括曝光机上移动工作台的步进、 扫描同步精度、镜头像差、温度控制等,对准标记的识别和读取精度以及制造工艺对对准 标记的影响也影响到套刻精度。现代的曝光机能够对硅晶圆的畸变进行补偿。

线宽均匀性:包括曝光区域内(intra-field)和曝光区域间(inter-field)的均匀性。曝 光区域内的线宽均匀性受掩模板线宽均匀性、扫描能量稳定性、照明均匀性、扫描同步精 度误差等影响。曝光区域间的线宽均匀性受到照明能量稳定性、晶圆上器件层的厚度均 匀性、晶圆表面平坦度等因素影响。

3.2.3 分辨率增强技术

1. 增加数值孔径

在 3.1.1 节中提到,由式(3-5)可见增加曝光系统中光学透镜的数值孔径能提高光学 分辨率,其主要原因在于大的数值孔径可以增强透镜对高阶衍射光的会聚能力。但是由 式(3-6)可见,焦深与数值孔径的平方成反比,因此大的数值孔径必然会使焦深急剧减小。 而焦深在曝光系统中的重要性甚至超过分辨率,因此不能单纯地增加数值孔径,而必须 第 3 章

光刻技

术

在焦深和分辨率之间取得平衡。表 3.2 对比了不同曝光波长的分辨率和焦深,在集成电 路普遍采用G线和I线曝光的早期,保证1µm的焦深非常重要。但前面也提到,随着集 成电路工艺的迅速发展,大尺寸硅晶圆的平坦度已大为提高,加上化学机械抛光工艺的 发展使经过多次工艺的晶圆表面的平坦度也非常高,这就降低了对曝光系统焦深的要 求。因此曝光系统的光学透镜的数值孔径可以不断提高,从20世纪80年代的约0.3提 高到了 21 世纪初的 0.85。但是大的数值孔径提高了透镜的设计和制造难度,光学透镜 的尺寸和重量变得非常大。例如,用于早期 I 线的光学透镜在 NA=0.35 时质量约为 14kg,但当 NA 提高到 0.63 时透镜的总质量已达半吨之巨。当数值孔径提高到 0.8 以 上时,还必须考虑光的极化(偏振)效应。对如此大的数值孔径,光波通过透镜后已不能 用标量波来近似描述,必须用矢量波来描述。光波从透镜出射后入射到光刻胶表面的入 射角大大提高,可超过光刻胶的布儒斯特角,即反射光中只包含S波,相当于光刻胶对入 射光不同的偏振分量有选择性地反射。其结果是导致入射光能量损失,降低光刻胶的成 像对比度。大学物理中讲过,光学材料的布儒斯特角取决于其折射率,因此要想通过增 加布儒斯特角来进一步提高透镜的数值孔径就必须增加光刻胶的折射率,这显然是很难 做到的。因此一个解决办法是将整个曝光系统都采用偏振光照明,这又必然增加系统的 复杂度。

曝光波长/nm	技术节点/nm	^b 焦深/µm	
	250	0.5~0.6	
248	180	0.45	
	130	0.35	
102	90	0.35	
195	65 0.25	0.25	
â102:	45	0.15	
1931	32	0.1	

表 3.2 不同曝光波长下的技术节点对焦深的需求

[°]此处的"i"指浸没式(immersion)曝光。

^b此处的焦深只针对前道(Front-end of line, FEOL)工艺, 对后道(Back-end of line, BEOL)工艺焦深可适当放宽。

2. 浸没式曝光

光学透镜的数值孔径的极限为 1(sinθ≤1),空气的折射率 n 约为 1,因此传统的光学 曝光系统的数值孔径无法大于 1。如图 3.10 所示将曝光透镜和光刻胶之间的介质由空 气改为水,例如 193nm 波长的光在水中的折射率为 1.44,这样就可以使数值孔径大于 1。 将光学透镜浸没在油等高折射率液体中来提高光学分辨率在显微镜中早有应用,但将这 一技术应用到光刻技术中并非易事。其主要技术难点在于步进扫描时曝光镜头在晶圆 表面高速移动,这使得镜头与晶圆之间的水溶液层会产生大量微气泡,严重影响光在水 中的传输性质。日本的 Nikon 公司和荷兰的 ASML 公司后来解决了相关问题,使用 193nm 光源结合浸没式曝光,在 2007 年就将集成电路制造技术节点提高到了 45nm,浸 没式曝光取得了很大的成功。



3. 多重曝光技术

我们知道,曝光同样尺寸的密集分布图形比稀疏或孤立图形难度大很多。集成电路 制造进入 32nm 技术节点时,用 193nm 波长的单次浸没式曝光已无法应对,为此开发了 二重曝光(double exposure)和多重曝光(multi-exposure)技术。二重曝光是将密集图形 分两次曝光,每次曝光的图形的间距是设计值的 2 倍,因此是相对稀疏的。将两次曝光 后的图形重叠,合成的图形就与原设计的一致。当然并不能将同一层光刻胶直接进行两 次曝光,那样会互相干扰和影响,每次曝光都必须用单独的光刻胶。二重曝光的实现方 式有多种,如图 3.11 所示,可以是每次曝光后就刻蚀,也可以在第一次曝光后将显影后 的光刻胶"冻结",然后重新涂胶进行第二次曝光和显影,最后一起刻蚀,此外还有一些其 他的方式,如自对准方式等。二重曝光对图形的对准精度要求非常高,要求两次曝光图 形的对准精度达到 1.5~3nm,甚至更高。荷兰 ASML 公司的 NXT: 1950i 浸没式曝光 系统在 2010 年就已实现了 2.5nm 的对准精度。沿用 193nm 波长的曝光光源对集成电 路工艺改动较小,加之当时极紫外曝光技术尚未成熟,因此半导体工业采用二重曝光直 至多重曝光,都继续使用 193nm 波长的浸没式曝光,并将技术节点推进到了 32nm 以下, 达到 20nm、14nm,193nm 波长的光刻技术显示了很强的技术潜力。

虽然光学曝光技术不断追求实现更高的曝光分辨率,但事实上在超大规模集成电路 的制造和生产中,只有少数几道曝光工艺需要用到最高的分辨率,因此集成电路制造工 艺的一个显著特点是高分辨率曝光和普通的较低分辨率的曝光技术混用。

4. 降低工艺因子 k1

光刻技术中除光学成像系统之外的其他的影响曝光分辨率的因素都归于 k₁,由 式(3-5)可见,降低 k₁ 也是提高曝光分辨率的途径之一。随着光刻技术的发展,k₁ 在过 去几十年中持续降低。传统上认为 k₁ 的理论极限在 0.25,但多重曝光技术的发展使 k₁ 因 子突破了理论极限。下面将要介绍的几种增强曝光分辨率的方式都可以认为是在降低 k₁。

1) 移相掩模技术

掩模板上两个相邻的图形曝光时在各自边缘处由于衍射效应会存在超出图形范围 的光强分布,通常情况下两个相邻图形边缘的光场是同相位的,这时就会发生相长干涉



效应,使两个相邻图形的中间区域的光强大大提高,严重降低光强对比度,使相邻图形难 以分辨。移相掩模技术的原理是通过改变两个相邻图形之一的透射光场的相位,使相邻 图形的透射光场产生180°的相位差,即反相,从而使原本的相长干涉变为相消干涉,使相 邻图形的中间区域的光强大大降低,从而提高对比度,改善曝光分辨率。基本原理如 图 3.12 所示。移相掩模还可以增加焦深。



图 3.12 移相掩模技术原理示意图

移相掩模有多种实现方式,例如,交替式、边沿式、无铬式、衰减式等,如图 3.13 所 示。总体而言,移相式掩模能提高曝光分辨率,改善曝光效果,但移相式掩模板制作方式 非常复杂,成本比传统的光学掩模板高出很多。移相层可以采用刻蚀或沉积的方式制作。无论采用哪种方式,都需要精确控制移相层的厚度,尽量消除移相误差。由于增加 了移相层的制作,移相掩模板产生缺陷的概率也高于传统的掩模板,且缺陷的成像特性 也不同。



2) 光学邻近效应校正

投影式曝光本质上受到衍射光学的限制,曝光过程中的衍射现象导致图形空间像的 部分高频分量(这里指物理光学中的空间频率)丢失,使成像清晰度受限,成像不能全部 重现掩模设计图形。如图 3.14 所示,实际曝光中会出现原本是方形的图形边缘变为圆 角,或使线端变短,这就是光学邻近效应(Optical Proximity Effect)。这种效应使得曝光 和显影后的图形发生失真,偏离原设计图案,因此必须校正光学邻近效应。一种典型的 办法是,有意修改设计的曝光图形的形状和尺寸,例如,对一些特定部位添加或删减一些 形状。这些添加或删减的部位的尺寸低于曝光分辨率,因此并不会实际出现在曝光和显 影的光刻胶中,但由于其衍射效应可以显著改变曝光光强的分布,从而使曝光、显影后的 图形尽可能地与原设计意图的形状接近或一致。

光学邻近效应依赖于具体的设计图形,必须有针对性地修改具体的图形才能充分校 正这种效应。在一个复杂的设计版图中往往存在多种不同类型的图形,因此对其精确分 析和校正是一件比较费力的工作。在计算机辅助技术的帮助下,现在可以利用分析模型 法,即用特定的计算光强分布的算法来精确分析所有的掩模图形,计算出光强分布的具 体情形,然后加以校正。还有一种办法是从理想光学成像的角度出发进行反向设计,得 益于当前强大的计算能力,现在用这种方法可以获得能够产生理想图像的掩模图形。其 设计出来的图形可能与实际图形存在巨大差异,甚至完全不同。

校正光学邻近效应所需要制造的掩模板也存在一些挑战,一个主要原因是需要添加 或删减很多尺寸低于曝光分辨率的图形。而用来制作掩模板的电子束曝光或激光直写



图 3.14 光学邻近效应所导致的图形畸变及校正方式示意图

曝光系统也受到各自分辨率和邻近效应的限制,因此制作这种掩模板的难度、成本和周 期仍然高于制造传统的掩模板。

3.2.4 光刻胶的类型和特性

光刻胶是一种形象的叫法,其英文名为 photoresist,也译为"光阻"或"抗蚀剂",其作 用就是作为抗刻蚀层保护晶圆表面不需要刻蚀的地方。光刻胶是一大类具有光敏化学 作用的高分子聚合物材料,其形态为胶体,可以均匀涂敷在晶圆表面。在曝光过程中光 刻胶被曝光的区域发生改性,因此可复制掩模板上的图形或与其相反的图形。根据光刻 胶复制图形的极性可分为正性光刻胶和负性光刻胶,正性光刻胶的曝光区域在显影液中 溶解掉,而负性光刻胶的曝光区域在显影液中不溶解,未曝光区域则被溶解,如图 3.15 所示。正性与负性光刻胶的光敏化学反应过程不同,正性光刻胶中聚合物的长链分子受 光照而截断为短链分子,这一过程称为断链。短链分子更容易溶解,因此正性光刻胶的 曝光区域在显影液中溶解。负性光刻胶聚合物中的短链分子受光照发生交联反应形成 长链分子,这一过程称为交联(cross linking)。长链分子密度较高,不容易溶解,因此负 性光刻胶的未曝光区域在显影液中溶解。

1. 光刻胶的主要成分

光刻胶在工业应用中已有上百年的历史,每种光刻胶都根据具体应用经过专门设 计,但所有光刻胶基本上都由四个主要部分组成:树脂型聚合物(resin)用作基体材料,是 光刻胶的主体,使光刻胶具有抗刻蚀能力;感光化合物(Photo-Active Compound,PAC) 控制光刻胶对特定波长的感光度,例如,在正性光刻胶中感光化合物在曝光前作为抑制 剂,降低光刻胶在显影液中的溶解速度,而曝光中会发生光化学反应,转而增加光刻胶在 显影液中的溶解速度;溶剂(solvent)使光刻胶保持液体状态便于涂覆,同时控制光刻胶 的机械性能,如基体黏滞性等;添加剂(additives)控制光刻胶的光吸收率或溶解度。



2. 光刻胶的性能指标

1) 灵敏度

灵敏度是指发生光化学反应所需的最低的曝光剂量,单位为 mJ/cm²。曝光剂量为 光强(单位面积的光功率)乘以曝光时间。正性光刻胶的灵敏度定义为通过显影将曝光 的光刻胶完全去除所需要的曝光剂量;负性光刻胶的灵敏度则定义为通过显影保留 50%以上胶厚所需的曝光剂量。

2) 对比度函数(对比度曲线)

对比度函数表示光刻胶区分掩模上亮区和暗区的能力。高对比度意味着曝光后的 光刻胶图形具有陡直的边壁和较大的图形深宽比。图 3.16 所示为对比度函数曲线,其 中,D₀ 是开启光化学反应所需的最低曝光剂量,D₁₀₀ 是光刻胶充分完成光化学反应所需 的最低曝光剂量。由曲线可见,其直线斜率越大,对比度越高;剂量差越小,对比度越高。 对于特定的光刻胶,这一对比度曲线并不固定,而是受到很多工艺条件(如显影过程、烘烤条 件、曝光波长以及晶圆表面反射率等)的影响。光刻工艺优化的任务之一就是通过调整工 艺参数,在获得最大的光刻胶对比度的同时将光刻的速度维持在合理可接受的范围内。



3) 分辨率

光刻胶的分辨率受到多种因素的影响,包括曝光系统的分辨率,显影条件与烘烤温度,以及光刻胶的厚度、分子质量和平均分布等。

4) 抗刻蚀比

在精确复制掩模图案后,光刻胶的主要作用是用作抗蚀剂将图案进一步转移到晶圆 或器件层中。等离子体干法刻蚀要求光刻胶有较强的抗腐蚀性,刻蚀光刻胶的速率与刻 蚀衬底或器件层的速率之比称为抗刻蚀比或选择比(selectivity)。在器件制造工艺中这 是一个重要参数,决定了需要多厚的胶层才能满足对衬底或器件层一定厚度的刻蚀。

5) 黏度

黏度表征液态光刻胶的可流动性,通常由光刻胶中的聚合物固体含量来控制。通过 调节聚合物固体浓度,同一种光刻胶可以具有不同的黏度。这在涂胶时控制胶层厚度很 有用,是一个重要的参数。

3. 几种典型光刻胶实例

1) 紫外曝光正性光刻胶

典型的 I 线紫外正性光刻胶,其感光化合物为重氮萘醌(diazonaphthoquinone),简称 DNQ。光刻胶的主体成分是酚醛树脂(novalak),是一种含有两个甲基和一个羟基的芳 香族环烃,其基本的环结构可以重复 5~200 次,易溶于水。在树脂中加入二甲苯和各种 醋酸盐溶剂可以调节光刻胶的黏度。曝光前,重氮萘醌的作用是阻止酚醛树脂溶于碱性 显影液,其对光刻胶的溶解速率可产生十倍以上的抑制效果,光刻胶几乎完全不溶;曝光 后重氮萘醌转化为一种羧酸(-COOH),光化学反应如图 3.17 所示。羧酸与酚醛树脂混 合物迅速吸收水,反应中放出的氮气也使光刻胶起泡沫,这两者均可以促进胶的溶解,溶 解过程中羧酸进一步分裂为水溶的胺,这些效应使光刻胶在碱性显影液中迅速溶解。这 种胶的优点是未曝光区域在显影液中溶解率极低,能够制作高精度图形。酚醛树脂耐化 学腐蚀性能极好,对后续的等离子体刻蚀是一种很好的掩模材料。这种光刻胶可形成的 最小图形线宽约为 0.35μm。

2) 负性光刻胶

在半导体工艺早期,直到 20 世纪 70 年代中期,负性光刻胶都居于主导地位。其基 底树脂是一种聚异戊二烯的天然橡胶,溶剂采用二甲苯,感光剂是一种经过曝光释放出 氮气的光敏剂。经过曝光感光剂产生的自由基在橡胶分子间产生交联反应,使光刻胶变 得不可溶。但在显影过程中负性光刻胶会吸收显影液产生膨胀(swelling),使位置接近 的线条可能发生粘连,导致难以实现高分辨率的工艺。负性光刻胶一般不适合制作尺寸 小于 2μm 的线条,而且在空气中很容易被氧化。

3) 化学放大胶

20世纪90年代集成电路制造技术节点推进到 0.25μm,主要是为满足 256Mb 的 DRAM存储芯片需求。基于准分子激光器的深紫外曝光机开发成功,激光波长为 248nm和193nm。然而 I 线光刻胶在深紫外光波长具有强烈的光吸收,曝光时光线从光 刻胶顶部向底部传播过程中被光刻胶迅速吸收,到达光刻胶底部的光强不足以使其充分



曝光,显影后光刻胶的断面呈梯形,无法曝光满足集成电路制造需求的1µm 厚的光刻胶。 满足深紫外曝光需求的是一种新的化学放大光刻胶。化学放大光刻胶含有一种光酸产 生剂(Photo Acid Generator,PAG),光酸产生剂在深紫外光照射下分解产生少量光酸分 子,然后在后烘过程中会诱发级联反应产生更多的光酸,一个光酸分子在后烘过程中可 以诱发产生 800~1200 个光酸分子。大量的光酸分子催化光刻胶被曝光部分的去保护 反应,使其变为可溶(正性光刻胶)或不可溶(负性光刻胶)。主要的化学反应是在后烘过 程中发生的,产生初始的光酸只需要很低的曝光剂量,因此化学放大胶具有很高的灵敏 度。同时化学放大胶的对比度、分辨率和抗刻蚀性能也都非常好。但由于其依赖光酸, 如果环境中含有碱性成分,则容易对光刻胶的顶部渗透并中和一些光酸,导致顶部局部 线宽变大,因此化学放大胶易被空气污染,在空气中稳定性不好。

3.3 其他的光学曝光技术

3.3.1 极紫外曝光

如前所述, 缩短曝光光源的波长是获得高分辨率的主要途径之一。采用波长 248nm (KrF)和 193nm(ArF)的准分子激光器作为光源, 辅以分辨率增强技术并结合浸没式曝 光, 集成电路工业将曝光图形的技术节点推进到了 22nm, 这一进展使得波长 157nm 的 光源未能实现产业化。而进一步提高曝光分辨率, 推进技术节点, 工业界直接采用了极 紫外曝光(EUV)技术。极紫外技术采用波长 13.4nm 的激光等离子体光源, ASML 公司 经过长期研发终于使这一技术实现产业化, 使集成电路产业的技术节点进入了 7nm 和 5nm 时代, 且台积电采用 EUV 技术的更先进工艺的研发也比较顺利。

极紫外光的产生方式与传统的气体放电灯和激光器不同,其采用激光束加热锡液滴

微加工技术工艺原理与实验

或其他元素至电离态,这些元素在激发后会产生软 X 射线辐射,如图 3.18 所示。其中 13.4nm 是一个峰值波长,因此极紫外曝光采用了这一波长。极紫外光源本身是一个异 常复杂的装置,在极紫外曝光技术发展过程中,提高光源的发光功率以达到满足集成电 路量产需求是一个核心任务。经过长期努力,ASML 的极紫外光源功率从 2010 年 10W 的水平提高到了 2017 年 250W 的水平,最终使曝光能力达到了每小时不低于 120 片 12 英寸的硅晶圆,满足了量产需求。



极紫外光波长可被几乎所有材料吸收,传统的折射光学成像系统完全不适用,因此 极紫外曝光系统的光学成像部分,包括掩模板,全部采用反射式。其投影光学部分由几 个反射镜构成,由于极紫外光在几乎所有材料表面的反射率都很低,因此反射镜必须镀 上抗反射层。抗反射层采用多层交替薄膜,即布拉格反射镜,每层膜的光学厚度为极紫 外光波长的 1/2。实际制作的钼-硅反射镜的峰值反射率约为 68%。除采用常规的光学 分辨率增强技术之外,极紫外曝光要在真空中进行(空气对极紫外光波长也有很强的吸 收作用)。极紫外曝光系统异常复杂和昂贵,目前只有 ASML 一家公司能够提供可用于 集成电路量产的设备。例如,其 NEX: 3400B 具有功率 250W 的光源,每小时能曝光至少 120 片硅晶圆。设备单价超过 1 亿美元,且由于 ASML 产能有限,只有台积电等极少数企业 能采购并使用极紫外曝光机。图 3.19 为 ASML 公司的极紫外光刻机的构造示意图。



图 3.19 ASML 公司的极紫外光刻机的构造示意图

3.3.2 X射线曝光

极紫外光的波长非常接近于 X 射线,X 射线覆盖的波段范围从伽马射线到波长约 10nm 的软 X 射线,由于其波长更短,理论上用 X 射线作为曝光光源可以获得更小尺寸 的曝光图形。但 X 射线曝光受到一系列因素的影响:首先,X 射线在几乎所有材料中的 折射率都约为 1,这就难以使用折射光学对 X 射线会聚和成像;其次,X 射线能穿透大部 分物质,很难制作出来类似极紫外曝光系统中的反射镜,反射光学也难以用在 X 射线曝 光系统中。这两点使得 X 射线曝光系统只能使用邻近式曝光;最后,X 射线曝光的掩模 板采用透射式,其原理为低原子序数的材料 X 射线的透过率高,高原子序数材料的 X 射 线透过率低,利用 X 射线透过率的不同来制作掩模板。如图 3.20 所示,基底材料采用硅 或氮化硅等材料,其对 X 射线的透射率不低于 25%;掩模材料采用金、Pt、钨等,这些材 料对 X 射线的吸收率要大于 90%。最终能够使用的 X 射线的波长取决于掩模板的基底 材料和掩模材料,其波长限制在 0.4~2nm。



X 射线掩模板的制作难度较大,例如,若采用 1nm 波长的 X 射线,使用硅作为掩模 基底材料,则其厚度为 1~2μm。由于只能采用 1:1 的邻近式曝光,因此掩模板的整体 尺寸与晶圆相当,这就需要制作出来大面积的薄膜,其机械强度很差。同时掩模板与晶 圆表面的间隙需要精确地控制在大约 10μm,这要求晶圆具有极高的平坦度,因此整个工 艺难度非常大。

X射线曝光的另一个问题在于:虽然其波长非常短,理论上应该能得到更小尺寸的 曝光图形,但事实上X射线曝光在实验室条件下获得的最小图形尺寸在 30nm 左右,这 甚至还不如 193nm 波长的浸没式曝光。其主要原因在于:首先,X射线曝光采用邻近式 曝光,掩模板与晶圆表面必须保持一定的间隙,例如,若波长为 1nm,间隙为 10µm,根据 曝光分辨率的公式 *R* = *k* √*λd*,假设工艺参数 *k* = 1,则分辨率也只有 100nm。其次,X 射 线透过掩模板后存在衍射效应,使透光区与未透光区缺少明确的界限,实际的曝光宽度 取决于光刻胶的曝光阈值。使用相干性好的X射线光源时衍射效应尤其显著,这就需要 在设计掩模图形时对其尺寸进行严格的校正,以补偿衍射效应造成的光强分布畸变。最 后,X 射线会在光刻胶中激发光电子和俄歇电子,当X 射线穿透光刻胶照射到衬底上时 也会产生二次电子,这些光电子和二次电子对光刻胶有曝光作用,其各向同性散射会进 一步扩大X 射线曝光的范围,降低所能获得的曝光分辨率。这在短波长的X 射线中尤其 显著。这几个因素加上传统的光学曝光技术的迅速进步,使 X 射线曝光未能获得集成电 路量产应用。但因 X 射线极强的穿透性,在厚胶曝光中有其独特的优势和应用,具体将 在下面详述。 第 3 章

光刻技术

3.3.3 激光扫描无掩模曝光

激光扫描无掩模曝光也称激光直写曝光,即通过激光束与载有样品的工作台的相对 运动使激光束直接对光刻胶曝光。这种方式不需要单独制作掩模板,在集成电路掩模板 制作成本高昂的情况下,激光直写式曝光在科研中应用非常方便。海德堡公司的激光直 写曝光机具有代表性,可以产生最小尺寸 0.5µm 的图形,图 3.21 为其照片。激光直写式 曝光的劣势在于其速度远低于投影式曝光,因此无法应用到大批量集成电路的生产中, 但激光直写式曝光在光学掩模板的制作上应用十分广泛。此外,激光直写式曝光在一些 对图形尺寸和分辨率要求不高的制造工艺中,例如,微机电、微光学器件、平板显示行业 的液晶面板等制造中也有广泛应用。



图 3.21 海德堡公司的激光直写式曝光机照片

3.3.4 反射镜阵列无掩模曝光

这种曝光方式基于用微机电技术制作的微型反射镜阵列,每个微反射镜的面积约为 几十平方微米,通过电极可以单独控制其偏转角度,进而改变其对光的反射能力。阵列 中的每个微反射镜用作一个反射光的单独像素,整个阵列可以反射出不同的图形,如 图 3.22 所示。美国德州仪器公司生产的微反射镜阵列器件广泛应用在各种投影显示系



统中,例如,电影院的放映设备,又称作数字镜器件(Digital Lens Device,DLD)。近年来, 基于这种微反射镜阵列的无掩模曝光机技术逐渐成熟并开始商用,可以制作出最小尺寸 约 1μm 的器件。相比激光扫描无掩模曝光,这种微反射镜阵列反射的图像可以一次投 射到像平面上,其曝光速度远高于激光扫描曝光方式。此外,其反射的图像还可以通 过透镜系统大大缩小,其缩小倍率可低于 1/200,因此其能实现小于 100nm 的曝光 图形。

3.3.5 LIGA 技术

LIGA 技术是 20 世纪 80 年代德国的 Karlsruhe 核技术研究所首先提出并研发的, LIGA 是德文 Lithographi (LI) Galvanoformung (G) Abformung (A)的缩写,分别代表 (深度 X 射线)光刻、电铸成型和塑料铸模。将这三者结合,可以制造非常精细的三维结 构。前面介绍的 X 射线曝光所使用的 X 射线波长对 LIGA 技术仍然太长,LIGA 普遍使 用波长小于 1nm、光子能量大于 20 keV 的硬 X 射线,这只能由同步辐射光源产生。而且 所产生的 X 射线发散角通常在 1mrad 以下,具有高度的平行性,因此适用于超深结构的 曝光。例如,采用 0.2~0.3nm 波长的 X 射线一次就能对 500µm 厚的 PMMA 完成曝 光。LIGA 的工艺流程如图 3.23 所示。



X 射线通过掩模板对光刻胶(聚合物材料涂层,PMMA)曝光,显影后得到图形结构; 然后进行金属电铸填充满微结构,之后去除分离掉光刻胶,即可得到金属微结构。此结 构用来作为下一步注塑的模具,如图 3.23 所示,注入塑料或其他材料,成型后脱模即可 完成微结构的复制。用这种方式可以制作出深宽比大于 100 的微结构,高度可达几百微 米,而横向尺寸在亚微米量级。LIGA 技术可以制作硅工艺无法实现的立体金属微结构, 作为塑料、陶瓷元件的成型模具,其主要应用领域在微机械、微型传感器和执行器、微光 学元件等。但近些年随着深硅刻蚀技术的快速发展,同样深宽比的微结构也可用硅材料 实现,X 射线 LIGA 技术的应用领域受到挤压。

3.4 非光学光刻技术

电子束曝光

电子束能够用于光刻技术主要基于两个原因:

(1) 某些高分子聚合物对电子束敏感因而可以用来制造曝光图形;

(2) 电子因其波粒二象性具有极短的德布罗意波长,电子束因而具有类似光波的效应,但由于其波长极短,电子光学具有极高的分辨率。

聚焦电子束最早在 20 世纪初就开始以阴极射线的方式在显像管中用于显示用途, 后来电子束用在透射和扫描电子显微镜中,将显微技术的分辨率推进到了原子尺度,远 远超出光学显微镜的极限能力。究其根本,在于电子具有极短的波长。在量子力学中讲 到,实物粒子具有波粒二象性,其波长λ可由下式计算:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{2mc^2 E_{\mu}}} = \frac{1.226}{\sqrt{V}} (\text{nm})$$
(3-7)

10.00

式中,h 是普朗克常数,p 是粒子的动量,m 是粒子的质量,c 是真空光速,E_k 是粒子的动能,V 是以电子伏特(eV)为单位的粒子能量,由此公式计算出来的粒子波长的单位是纳米(nm)。如果电子的能量为100eV,则由此公式计算出来的电子波长只有0.12nm。如果提高电子能量,则其波长更短,可以比光学波段短4个数量级以上。透射电子显微镜能够直接观察到原子尺度正是因为电子极短的波长使其具有极高的分辨率。对电子束光刻来说,其波长远小于曝光图形的尺寸,因此可以忽略类似于传统光学曝光中的影响图形分辨率的衍射效应。限制电子束曝光分辨率的是各种电子像差、电子束中电子之间的库仑作用和电子在光刻胶(电子抗蚀剂)中的散射效应。

电子束曝光技术最初起源于电子显微镜中高能电子辐照引起的碳污染现象的发现。 电子束曝光技术的发展历史已超过 60 年,利用现代的电子束曝光设备和特殊的光刻胶 能够制作出纳米尺度的精细结构,并以其灵活性在微纳米科学研究中得到了极其广泛的 应用。然而电子束曝光技术始终未能在超大规模集成电路的量产中得到直接应用,主要 原因是其曝光效率远低于光学曝光的效率。但是电子束曝光是制作光学掩模的主要工 具之一,并且是制作极紫外曝光的掩模图形的唯一选择。 1. 电子光学原理简介

电子在电磁场中运动时其速度与方向的变化依赖于电磁场的分布,在某些特殊分布 的电磁场中运动时电子的运动轨迹和规律与几何光学有类似之处,故称为电子光学。与 光在不同折射率的介质中传播时发生折射相似,通过控制电磁场的分布也可以控制电子 的速度和方向,进而使电子束产生折射效应。电子在三维电场中的运动方程为

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{r}(x,y,z)}{\partial t^2} = \frac{e}{m} \boldsymbol{E}(x,y,z)$$
(3-8)

式中,**r**(*x*,*y*,*z*)是电子的空间位置坐标,*t*是时间,*e*是电子电量,*m*是电子质量,**E**(*x*,*y*,*z*)是电场强度矢量。如果电场分布是轴对称的,那么用轴坐标代替直角坐标,可将上述电子的运动方程简化为

$$r'' = \frac{(1+r'^2)}{2V(r,z)} \left[\frac{\partial}{\partial r} V(r,z) - r' \frac{\partial}{\partial z} V(r,z) \right], \quad r'' = \frac{\mathrm{d}^2 r}{\mathrm{d}z^2}; \quad r' = \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z} \tag{3-9}$$

式中,*V*(*r*,*z*)是空间电位分布,是径向坐标*r*和轴向坐标*z*的函数。由上述方程可以得到电子透镜的焦距的公式:

$$\frac{1}{f_i} = \frac{1}{4\sqrt{V_i}} \int \frac{V''(z)}{\sqrt{V(Z)}}, \quad V''(z) = \frac{d^2 V(z)}{dz^2}$$
(3-10)

因此,电子透镜的聚焦能力与轴向电位分布的二阶导数成正比,或者与电场强度分 布的一阶导数成正比。这说明只有变化的电磁场才对电子束在具有透镜作用,均匀分布 的电磁场并无此作用。电场与磁场均可用作电子透镜,例如,一个中间存在缝隙的圆筒 电极即可产生电子透镜作用,如图 3.24 所示是圆筒 A 和 B 的沿着长度方向的剖面图,在 A 和 B 上加电压,用三维仿真可获得电位的空间分布状态,可见电位的分布并不均匀,其 等位面的形状类似于光学镜面的曲面。而一束发散的电子束在圆筒 A 的左端入射时,经 过 A 与 B 之间的缝隙,电子束的轨迹与光线通过光学透镜时向光轴方向的会聚状态非常 相似。对电子束来说这是由其受到轴向的电场力导致的,因此圆筒电极具有电子透镜的 作用。电子在磁场中运动时受到洛伦兹力的作用,具有轴向旋转对称的磁场对电子束也 具有透镜作用,如图 3.25 所示。相比之下,增强静电透镜的会聚能力需要提高电极间隙 的电场变化,电位差过大时容易击穿,保持绝缘比较困难。而提高磁场透镜的会聚能力 需要的大电流,且大电流产生的热量容易通过冷却而散掉。因此电子束曝光系统较多采 用磁透镜来聚焦电子束,且磁透镜的像差也比静电透镜的小。



图 3.24 圆筒电极中的空间电位分布和发散电子束的运动轨迹



图 3.25 通电线圈产生的具有电子透镜作用的磁场

在电子透镜中,旋转轴对称的电场和磁场对电子具有聚焦作用,对场中的高斯束可 以理想成像。但在实际中难以实现电场和磁场的轴对称,也难以获得初速度相等的发射 电子束,这导致不能理想成像,无法将物平面上任意点发射出来的电子都聚焦到同一平 面的相应点上,这种像与物的差异即为电子像差,与光学透镜存在像差类似。电子光学 像差限制了会聚电子束所能形成的最小束斑尺寸,其最小束斑直径为

$$d = \sqrt{d_g^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2}$$
(3-11)

式中,无像差束斑直径: $d_g = \frac{d_v}{M} (d_v)$ 为电子经阴极透镜聚焦后形成的交叉截面半径— 虚源, M 为透镜缩小倍率); 球差: $d_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3 (C_s)$ 为球差系数, α 为电子束会聚角); 色 差: $d_c = C_c \alpha \frac{\Delta V}{V} (C_c)$ 为色差系数, ΔV 为电子束能量分散, V为电子束能量); 衍射像差: $d_d = 0.6 \frac{\lambda}{\alpha} (\lambda)$ 为电子波长, $\lambda = \frac{1.2}{\sqrt{V}}$, 单位为 nm)。

电子束的球差和色差是主要像差,因此电子透镜的设计需要考虑这些因素。此外, 由上述公式可见,电子束的能量分散程度影响电子色差,而电子束的能量分散与具体产 生电子束的方式有关,因此电子束源的选择要考虑其对电子色差的影响。电子像差直接 依赖于电磁场的空间分布,但并不能任意改变电磁场的分布,因此电子像差的校正不能 像光学像差的校正那样通过改变透镜的折射面曲率或形状来部分完成。上述电子像差 都是相对电子束的光轴而言的,而使电子束偏转扫描时还会产生偏转像差,即像散和场 曲,如图 3.26 所示。这些像差使电子束的尺寸和形状产生畸变,影响曝光质量。

除了这些等效的光学像差之外,若电子束的空间密度较高,由于电子之间的库仑排 斥力作用会产生空间电荷效应,所以会使电子束直径增大,聚焦变差,降低分辨率。这一 由空间电荷效应导致的像差是光学系统所没有的。要减弱这种效应,一个直观的方式是 降低电子束的空间电荷密度,即减小束流。但减小电子束流会直接减弱曝光作用,因此 通常通过提高电子束能量而不是减小电子束流的方法来控制空间电荷效应。



2. 电子束曝光系统(含曝光方式)

电子束曝光系统通常包含 3 个大的基本功能模块:电子枪、聚光透镜和物镜偏转器, 以及很多其他的辅助功能组件。图 3.27 是一个电子束曝光系统的简要示意图。

(1) 电子枪。电子枪是产生电子束的源,通常由发射电子的阴极和对发射的电子聚 束的阴极透镜组成,如图 3.28 所示。由阴极发射的电子经过阴极透镜聚焦后形成一个 交叉截面,这个交叉截面作为后面电子光学系统的等效源,或称虚源(virtual source),如 图 3.29 所示。电子透镜并不是直接把电子阴极成像到像平面上,而是把这个虚源成像 到像平面上。



有两种发射电子的阴极:热阴极(thermionic cathode)和场发射阴极(field emission cathode)。热阴极是把钨丝或六硼化镧(LaB₆)加热到 2000~3000K 的高温,电子的动能可以直接克服阴极材料的表面势垒(即功函数)而逸出其表面,在外加电场作用下形成电子束。阴极透镜再对其聚束即可作为后续电子光学系统的电子束。场发射阴极则是将阴极材料加工成极细的尖端,尖端直径不足 500nm。加上外加电压即可在尖端形成强电



图 3.29 热阴极和场发射阴极产生的电子束虚源示意图

场,电场强度可达 10⁸ V/m。在如此强的电场下,阴极表面的电子可以通过隧穿作用直接 逸出表面形成发射的电子束。这种电子阴极是由尖端强电场和电子隧穿作用共同实现 的,在室温下即可工作而不需要加热,因此又称冷阴极。由于冷阴极的表面积极小因此 并不需要阴极透镜会聚电子束。冷阴极必须工作在极高的真空环境中。表 3.3 对比了 热阴极和场发射阴极的主要特征和性能参数。

近年来又发展了一种热场发射阴极,这种阴极将传统的场发射阴极加热,在高温下 减少了气体原子在阴极表面的吸附,提高了冷阴极工作的稳定性。这种热场发射阴极在 电子束曝光系统中的应用越来越广泛。

	工作原理	材料	亮度(B)($A/cm^2/Sr$)	能带宽度(eV)	灯丝温度	真空度(Torr)
热阴极 高	高温电子发射	W	$\sim 10^{5}$	$2 \sim 3$	\sim 3000K	$10^{-5} \sim 10^{-6}$
		LaB_6	$\sim 10^{6}$	2~3	2000~3000K	$10^{-7} \sim 10^{-8}$
场发射阴极	高场电子隧穿	W	$10^9 \sim 10^{10}$	0.2~0.5	室温	$< 10^{-8}$

表 3.3 热阴极和场发射阴极对比

(2) 电子枪准直系统(gun alignment): 对电子枪发射的电子束准直,消除加工或装 配误差所带来的电子束的偏移。

(3)聚光透镜(condenser lens):类似光学曝光系统中光源的聚光透镜,将电子枪发射的电子最大程度地到达曝光表面。

(4) 电子束快门(beam blanker): 开关电子束,使电子束只在需要时到达曝光表面。

(5) 变焦透镜(zoom lens):调制电子束焦平面位置和动态聚焦。

(6) 消像散器(stigmator): 校正电子束的形状。

(7) 孔径(aperture): 限制电子束张角,调节束流。

(8) 投影透镜:聚焦和缩小电子束,形成最终到达曝光表面的电子束斑。

(9)物镜偏转器(deflector):控制电子束的偏转和扫描。

电子束曝光系统除了这些电子光学主体部分外,还包括束流检测、反射电子检测、工

作台、真空系统、图形发生器、高压电源等其他重要的组成部分。

电子束曝光系统主要采用电子束直写方式,即通过电子束和工作台的相对移动,使 电子束直接对光刻胶曝光并产生设计的图形。由于电子束偏转的范围有限,一般只有几 百微米到几毫米,通常将曝光图形划分成许多小区域(field),又称曝光写场,电子束只在 每个曝光写场内扫描曝光,然后通过工作台的移动使曝光写场拼接起来,最终完成对整 个曝光图形的扫描。如图 3.30 所示。拼接必然产生误差,通常为 30~60nm,如果曝光 图形尺寸与拼接误差接近,则必然影响到曝光图形的精度,所以在设计时需要注意。



电子束曝光系统的曝光方式有矢量扫描(vector scan)曝光和光栅扫描(raster scan) 曝光两种,如图 3.31 所示。矢量扫描方式是电子束仅在需要曝光的区域扫描,在不需要 曝光的区域则关断束流,并做矢量位移,将电子束移到需要扫描的下一个区域的起点然 后开始该区域的扫描。矢量扫描的分辨率高,但是速度较慢。光栅扫描方式不需要电子 束做矢量位移,而是在整个图形区域扫描,在需要曝光的位置打开电子束流进行曝光,在 不需要曝光的位置关断电子束流。光栅扫描的速度快,但是分辨率低。矢量扫描比光栅 扫描方式效率高很多,但光栅扫描的逻辑设计比较简单。矢量扫描的电子束的束斑为圆 形,束斑内的电流分布为高斯函数分布,因此又称为高斯束。图 3.32 所示为电子束的束 斑尺寸(spot size)和扫描步距(beam step size)。矢量扫描的频率取决于电子束流、曝光 剂量和单步扫描面积,如下所示:



图 3.31 矢量扫描(左)和光栅扫描(右)

第 3 章

光刻技

术

$$F(MHz) = \frac{I_{b}}{dose \times bbs^{2}}$$
(3-12)

式中,F是扫描频率,单位是 MHz; I_b 是电子束流,单位是 nA; dose 是曝光剂量,单位 是 μ C/cm²; bbs 是扫描步距,单位是 μ m。矢量扫描的频率一般为 25~50MHz,光栅扫 描的频率可达 500MHz。



3. 电子束光刻精度的影响因素

影响电子束曝光精度的因素除了上述的电子光学的各种像差之外,还有一个重要的 因素,就是电子入射到抗蚀剂中发生的各种散射效应。入射电子与抗蚀剂中的原子发生 弹性散射改变飞行方向,但不损失能量;在两次弹性散射之间,电子与抗蚀剂中的电子发 生非弹性散射而损失能量,这部分能量转移给抗蚀剂的电子。电子与固体中的原子和电 子碰撞是一个随机过程,其散射方向也是随机的,因此形成散乱的电子轨迹。电子散射 过程所损失的能量转移给了抗蚀剂,使得电子能量在抗蚀剂中的分布大于电子束曝光的 图形,相当于入射电子束被展宽,这种散射称为电子的前向散射(forward scattering)。此 外,电子穿过抗蚀剂到达衬底时,还会在衬底表面反射,这部分反射的电子重新回到抗蚀 剂中,这部分电子称为背散射(back scattering)电子。除了这些散射之外,电子在抗蚀剂 中损失的能量还会激发其二次电子。多数二次电子都是能量介于 2~50eV 的低能电子, 因其是抗蚀剂的化学反应的主要部分。但也有少量二次电子具有高达 1000eV 以上的能 量,这部分电子可以扩散一定的距离进一步产生低能二次电子。低能二次电子的扩散范 围直径约 10nm,这从根本上限制了电子束的分辨率。可以用蒙特卡洛方法(Monte Carlo method)来计算模拟电子的散射轨迹。图 3.33 所示为电子在抗蚀剂和衬底界面处 的散射过程和用蒙特卡洛方法模拟的电子散射轨迹。

4. 电子束邻近效应及其校正

由于电子在抗蚀剂和衬底中受到散射而偏离原来的入射方向,如果两个图形比较靠近,则由电子散射形成的曝光能量分布延伸到相邻的图形区域中,曝光图形发生畸变,分



图 3.33 电子在抗蚀剂和衬底界面处的散射过程和用蒙特卡洛方法模拟的电子散射轨迹

辨率降低,这就是电子束邻近效应。在同一图形内部,电子的散射也会导致曝光能量分 布偏离原图形,图形边缘处的曝光能量低于图形中间的能量。因此,电子束邻近效应会 同时出现在图形之间(intershape)和图形内部(intrashape)。图 3.34 显示了这两种典型 的电子束邻近效应。电子束曝光的邻近效应与图形的疏密程度存在直接关系,这与光学 邻近效应有相似之处,但其根源不同。



图 3.34 电子束邻近效应示意图和实物图

校正电子束曝光的邻近效应主要有三种方法:剂量校正、图形尺寸校正和背景曝光 补偿。

剂量校正是普遍应用的方法,其效果也比较好。该方法的原理是想办法使所有曝光 图形都得到均匀一致的曝光能量。产生邻近效应的根源是电子束的散射导致曝光能量 分布发生偏离,那么人为改变曝光能量的分布就有可能纠正这一偏差。这一方法建立在 计算电子束曝光能量分布的基础上,首先给一个初始的曝光剂量,然后计算所有曝光图 形的能量分布,包括电子散射所导致的邻近效应。第一次计算的结果必然是能量分布发 第 3 章

光刻技术

微加工技术工艺原理与实验

生畸变,接下来就可以根据计算的能量分布结果调整各处曝光剂量的分配,然后继续计算。通过这样的反复计算迭代,直到两次相邻计算的能量分布差值达到了允许范围,则 计算完成,得到了自洽解。用这种方式纠正邻近效应时,若曝光图形总量非常大,则会产 生巨大的计算量。当然这种方法是比较精确的。为了提高效率,减少计算量,可以对图 形划分一定的区域,然后根据计算的能量分布决定各区域的曝光剂量。真正实施时要用 软件来完成,校正邻近效应的软件是电子束曝光系统的重要组成部分。图 3.35 是剂量 校正的示意图。

图形尺寸校正方法通过人为改变图形尺寸来补偿电子散射造成的图形畸变,这与光 学邻近效应校正相似。例如,在图形密集处适当缩小每个图形的尺寸,以补偿局部曝光 能量过高;在图形稀疏处适当增大图形尺寸;在图形尖角处改变图形的形状。如图 3.36 所示。这种方法适用的范围有限,主要原因是图形尺寸的变化不能小于像素尺寸(电子 束斑尺寸)或扫描步距。



背景曝光补偿方法不需要计算曝光能量分布和改变图形尺寸或形状,而是两次曝光 极性相反的同一组图形,这样刚好使各自的能量分布畸变相互平衡掉。这种方法不需要 用专门的软件来计算,只需要将原曝光图形极性反转再次曝光即可。这种方法适用于光 栅扫描方式,但背景曝光补偿会降低曝光图形的对比度。

图 3.37 所示为一个曝光器件未校正过电子束邻近效应的照片和经过校正之后的照 片,图形的边缘处变化明显。电子束邻近效应的校正非常重要,否则很多图形根本就无 法准确地制作出来。



图 3.37 未经校正的曝光图案(左)和经过校正的曝光图案(右)(中山大学光电材料与技术国家重 点实验室供图)

电子束曝光的优缺点:电子束曝光所能制作的线条极限尺寸约为10nm或稍低,这 是深紫外曝光所难以达到的。电子束曝光绝大多数情况下采用直写方式,不需要制造掩 模,因此其灵活性和便利性大大提高。由于电子束可以精确快速控制,因此电子束曝光 可在小面积晶圆或样品表面进行。而且电子束在不平整表面的连续聚焦能力强,因此其 焦深也比较大。但是电子束曝光采用扫描直写方式,必须扫描完整的晶圆,与光学曝光 相比其曝光速率太低。电子束的散射和邻近效应也将其极限分辨率限制在约10nm,曝 光更小的尺寸比较困难。由于电子束必须在高真空环境下运动,因此设备结构复杂,造 价昂贵。这是电子束曝光的缺点。根据电子束曝光自身固有的优缺点,其应用主要在一 些对大规模生产无需求的场景,例如,制造高精度的光学曝光掩模板,或者在科学研究中 制造普通光学曝光难以实现的微纳米结构。 第 3 章

光刻技术