

洪元、肖健等教授的献身精神和所作出的贡献。他们“筚路蓝缕,以启山林”,为后人开拓了前进的道路,而他们自身却充当了铺路的石子。1993年,钱三强、张文裕、朱洪元教授均相继谢世。肖健教授已离开我们将近10年。今天回忆这一21年前的发现,也是我们对前辈师长的一个纪念!

南无钱、张、朱、肖!

“南无”在佛经中是光荣啊的意思,亦即光荣归于钱三强、张文裕、朱洪元和肖健教授!

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院原子能研究所云南站,物理,1-2(1972),57.
- [2] 恩格斯,马克思恩格斯选集,人民出版社,3(1972),83.

## 新兴的波前工程学<sup>1)</sup>

杨国桢 顾本源 张国庆 董碧珍

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

**摘要** 基于光学衍射原理而发展起来的新光学技术,应用于光学掩模设计,可制作逼近临界尺寸的微小元件和极高密度的集成电路芯片。波前工程学可能导致集成电路模板制作上的一场革命,其前景十分引人瞩目。

**关键词** 光学掩模,光刻蚀术,衍射光学,波前工程

**Abstract** New Optical techniques (called wavefront engineering) are being developed based on the basic principle of optical diffraction and applied to the design of photomask. They make it possible to fabricate the chips of the integrated circuit with critical-sized elements and extremely high integrated density. Wavefront engineering may lead to a revolution in the design and fabrication of photomasks used for the preparation of integrated circuits. It is expected that this field may have brilliant prospect in future.

**Key words** Photomask, photolithography, Diffractive optics, wavefront engineering

### 1 引言

物理学家总是被微小结构的魅力所倾倒而不断的追求研制愈来愈小尺寸的结构元件<sup>[1]</sup>。例如,如何使微型计算机制作的更加紧凑、袖珍化,以成为众多科学家孜孜不倦的攻克的目标。在当今的工艺水平之下,存储芯片的个别元件的临界尺寸小到500nm以下。在卫星抛物线天线反射接收机上所使用的微波晶体管,要求栅极尺寸小于 $1/4\mu\text{m}$ 。

微结构元件的制作,通常应用光刻蚀、腐蚀、沉积和插层生长等复杂的工艺技术。光刻蚀技术所依据的基本原理,几乎是维持了近一个世纪而一成不变,它是利用光来实现复制图案的一种技术。最初,这一技术是用于复制雕刻品和照片,随后用于制作印刷干板。早在60年代,就已经发现光刻蚀术是大量复制集成电路的理想技术。这项技术中,首先要设计出复制用的模板。早先时候,这种模板像一种手

1) 1994年8月9日收到

工制作的工艺品,但是从 80 年代早期后,模板更像是储存在计算机数据库中的一幅图案,然后将图案转换成光学掩模。典型的掩模是在熔融的石英板上覆盖一层不透光的材料,例如金属铬。透光的孔隙部分代表所设计的图案,然后利用掩模,如同幻灯片一样,通过投影仪,使覆盖在半导体“晶片”上的光敏聚合物层(抗蚀层)曝光,经过显影处理后,原始设计的图案转换和凝固到基片上,再经过腐蚀、离子注入或者沉积新材料到曝光层的基片上,再剥离残余的抗蚀层。这样经过一次次的重复类似的步骤,加工处理晶片,其加工处理的次数一般超过 20 遍,最后才制得用来制作现代集成电路的复杂的层状结构模板。

由于一片半导体芯片通常包含几百万个元件,要求同时一次印刷制作完毕,所以光刻蚀术(Photolithography)是制作复杂器件的行之有效的方法。然而,对制作的掩模的质量要求十分严格,要求尽量避免出现缺陷。由于在多道加工工序中,需要使用不同的掩模,这时候,准确的定位是至关重要的。例如,在一片  $22\text{mm} \times 15\text{mm}$  的芯片上制作每一  $500\text{nm}$  小的元件,模板的定位偏差为  $150\text{nm}$  时,就会导致产品的报废。因此,掩模计量学向人们提出了挑战,如何实现集成电路的高精度的加工制作? 尽管在这一领域中,科学家们经过近四分之一世纪的努力,已取得了令人瞩目的成就。然而由于 70 年代到 80 年代光学刻蚀术采用了更先进的技术,集成电路的制作取得了长足的进步。大约每三四年,芯片上集成元件的数目就增加四倍以上。由于电路元件变得小巧玲珑,使计算机更加小型和高效化,微电子学得到广泛应用。今日,普通一辆汽车所拥有的数据处理能力早已超过了 1969 年阿波罗航天飞机上所装配的器件功效。同时,制作它们的费用持续地降低,以至于游戏计算机已成为学童们的囊中宠物。

## 2 光刻蚀技术的物理限制

元件的尺寸是否能够不断地缩小下去呢?

至少近十年来对这一问题一直有疑义。各种物理原理上的限制已经给出了有力的警告,例如怀疑者们认为光刻蚀术无法制作小于  $1\mu\text{m}$  的元件,然而,现在花五个美元就能买到这种存储芯片。透镜设计师、抗腐蚀化学专家以及工程师们已经克服种种阻碍,取得了可观的成就。目前,由  $500\text{nm}$  尺寸大小的元件集成的芯片已经是地地道道的商品,制作商们可以提供高达  $350\text{nm}$  分辨率的光学刻蚀机器。但是,光刻蚀术的确存在着物理限制,这项技术中通常使用汞灯的 i-线,波长为  $365\text{nm}$ ,请问,能否用革新的光学技术,刻蚀出制作  $250\text{nm}$  或者  $100\text{nm}$  大小的元件集成的芯片的模板呢? 或者,还有什么新招来实现这一目的呢?

首先让我们了解一下典型的光刻蚀术所用的步进曝光机结构(见图 1)。它由以下几个部分组成:光源、均匀器、聚光器、位于物平面上载掩模的平台、精密修正的投影透镜以及放置半导体晶片用的载物台。半导体晶片上的每一个芯片,依顺序步进通过曝光区,光束以半角度为  $\theta$  的锥形状会聚到晶片的每一点上,成像透镜的数值孔径 NA (Numerical aperture) 定义为  $NA = \sin \theta$ ,根据 19 世纪的光学定律,用这样的系统投影成像的像素的最小尺寸是  $0.6 \lambda / NA$ ,也就是爱里斑 (Airy disc) 大小,  $\lambda$  是光波长,如果  $NA = 0.5$ ,  $\lambda = 365\text{nm}$ ,那么极限分辨率应是  $440\text{nm}$ ,更为重要的限制来自于景深(焦深)。对于这样的衍射受限成像系统,景深大约为  $\pm 0.5 \lambda / (NA)^2 = \pm 730\text{nm}$ 。由于光刻胶 (photoresist) 层厚度通常为  $1000\text{nm}$ ,并且芯片本身也不是很平整的,这样的景深似乎太短了。光刻胶材料的折射率以及熔蚀的复杂动力学过程会或多或少地补偿这一散焦后果,随着分辨率的提高,景深变短仍然是光学刻蚀术最为严重的限制,并且由此对数值孔径大小也设置了一个实际的限制。如果使用更短的波长的光,将允许用更低值的 NA,达到相同的分辨率,这样一来,景深变化了。KrF 激光器输出的  $248\text{nm}$  波长的光,和高压汞弧灯发出的  $257\text{nm}$  的光,都落在深紫外光区。使用这

种光源来印制 440nm 尺寸的元件,要采用  $NA = 0.34$ ,相应的景深是  $\pm 1080\text{nm}$ ,目前用光刻蚀术制作 500nm 元件的集成电路板时,可适用的光源是汞灯的 i-线和深紫外光。

纵然今日已有了这两种可用的光源,从发展的眼光看,下一步怎么办<sup>[2]</sup>?也许可采用更短的波长的光,例如使用 ArF 准分子激光器发射出 193nm 波长的光, $NA = 0.7$  的步进曝光样机已经加工制成了。但是,往更短的波长方向发展,同时追求更大的数值孔径的策略方针,将面临着巨大的困难,不只是存在可用的光学材料匮乏和难于找到对波长短于 200nm 有高透射率的光刻胶材料的问题。

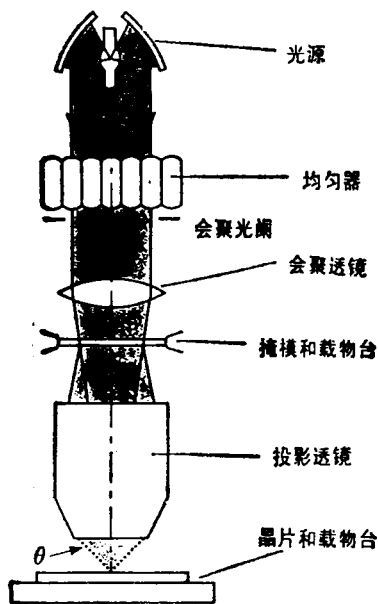


图 1 光刻蚀术所使用的步进曝光机构造示意图

经过 20 年来的努力和花费近几亿美元的资金,人们致力于开拓这一领域和期盼着革命性变革的工艺技术问世。然而,绝大多数的努力和进展都需要一台同步辐射加速器和电子储存环来产生 X-射线光源。在未来的一年左右的时间之内,新的掩模工艺,新的步进曝光机准直系统以及新的光刻胶材料等等全部都必须经过实际验证,表明它们是否足够可靠的和在生产中经济上是否合算的。大约到 1996 年左右,成批生产的 256 M bit 的动力学随机存取储

存器才能问世。

半导体工业宁愿接受渐变式的解决光刻蚀术进一步发展所面临的若干选择方案,但是要求做出某些让步,所有新的成像方式的设想,根本上有别于采用在掩模上简单的绘制图案这一传统的方式。这样一来,实现一个掩模的设计以产生所要求的抗腐蚀结构本身也许立刻成为一个非凡之举。

### 3 新型的相移掩模板

对光学成像过程的研究,是历史悠久、源远流长的。详细说起来,还是十分复杂的。光刻蚀术中所使用的光是部分相干和部分非相干的光,这使的成像过程变得更加复杂,涉及到振幅和强度这二者在传播中出现非线性过程。抗腐蚀反应过程也是很复杂的,是非定域和非线性的。明显的提高分辨率而又不缩短景深的一个方法是应用相消干涉来增加衬度比。为了产生所需要的干涉图案像,要求以具体设计和制作特殊的相移型的掩模板<sup>[3]</sup>。

传统的掩模与简单的相移掩模之间鲜明不同的对比表示在图 2 中。光波通过传统的掩模[图 2(a)],在每一狭缝上光波场的相位是相同的,经过衍射和空间滤波消除掉空间频率的高频分量之后,拓宽光场振幅均匀分布范围<sup>[4]</sup>。在晶片上,电场的振幅分布部分重叠,由于光波还保持一定程度的相干性,产生相长干涉。光刻胶的感光程度是取决于光的辐照度变化而不是振幅的变化,相长干涉的结果是在原先两条亮线之间(称作间距)的暗线的中央部分的辐照度比这两个狭缝各自分别所产生的辐照度之和还要大得多。这种不想要的亮度区的出现,降低了分辨率,使相邻的二狭缝的像汇合一起,分辨不清了。

新型的“交错狭缝”相移掩模[见图 2(b)],也称作 Levenson-Shibuya 掩模,是在一对狭缝之中的一个上,涂一薄层透明介质,使该处的光波场的相位移动  $180^\circ$ 。这样做的后果是光波场的振幅交错的取正、负值,当光波在这样的光

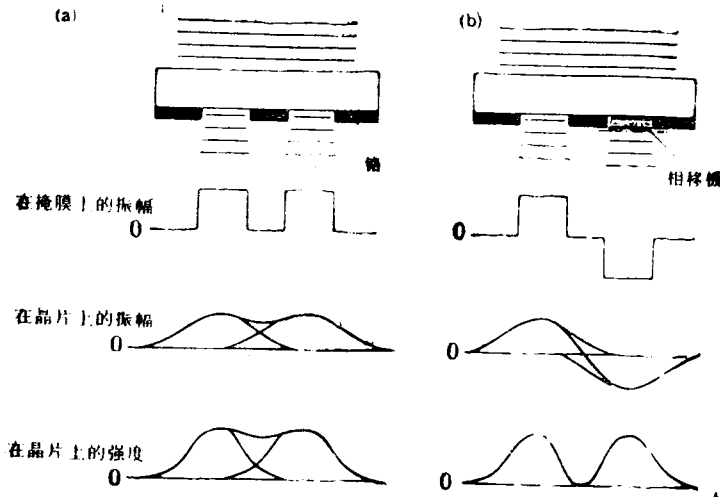


图2 传统的掩模与相移型掩模的比较  
(a) 传统的掩模; (b) 相移掩模

学系统中传播时,振幅分布仍然保持被拓宽.但是,现在每一条暗线的一边光波振幅为正的,而另一边是负的,两者叠加,产生相消干涉.在晶片上,每一条暗线中总有某一点,其光场为零.相消干涉结果提高了分辨率,其提高程度依赖于光波的部分相干性,典型的增强倍数在1.4

和3之间.

随着具有反向相位的狭缝间距的减小,负值振幅对总的振幅的贡献增加了.叠加的结果是幅照度为零的区域变宽了.当整个像都变暗时,就到达了相移掩模板分辨率的物理极限了.

由于相消干涉成像在物理上不要求是一幅正确的聚焦像,因此采用这种成像方式,景深也得到重大改善.实际改善程度依赖于光波的部分相干性程度.在完全理想的相干光下,对于暗线像,可能有无限长的景深.交错狭缝相移掩模的分辨率通常比传统的透射掩模板高50%,相移的像的衬度比也更大.图3给出了各种不同特征尺寸下,采用传统的透射掩模板和相移掩模板两者情形下,所产生的像的性能比较.图中每张保护膜图案上都标示出预期的最细的线和间距.在 $0.3\mu\text{m}$ 特征尺寸下应用相移掩模板成像的质量要比在 $0.4\mu\text{m}$ 的特征尺寸下采用传统的透射掩模板成像还清晰得多<sup>[4]</sup>.

### 3.1 相移掩模板的设计

相移掩模成像时,每条暗线的出现对应于光波有一相位移动.但是,在掩模上某一地方相位一旦发生变化时,通常会改变其他别处相位的原先的正确选择值.对于复杂的线路,例如不透明的“T”型线路,在相位值的选择上会引起冲突.要解决这类问题,类似于求解

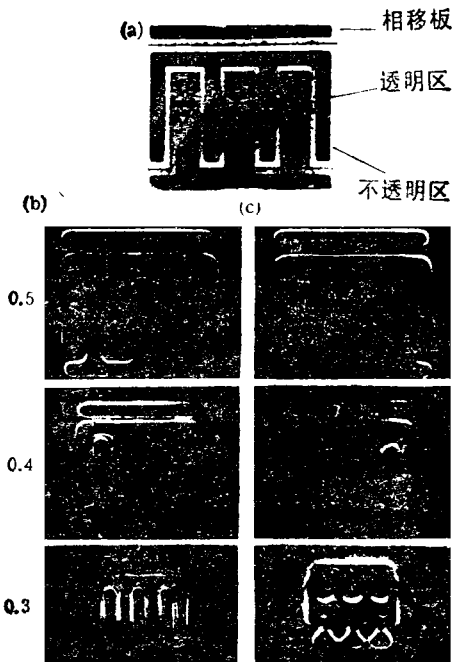


图3 传统的透射掩模板与相移掩模板成像性能的比较  
(a) 传统透射掩模结构; (b) 应用相移掩模板成像;  
(c) 应用传统的透射掩模板成像

自旋玻璃系统的基态，或者物理学家们所熟悉的其他类似的问题。到目前为止，实现相移掩模板的设计的普遍的有效算法尚未见报道。

由于交错相移狭缝式的掩模的设计和加工的难度相当大，因而激发人们去努力寻找较容易的可行的方法。例如，应用成像过程中相消干涉效应来达到这一目的。虽然目前已经提出各种设计方案，但是其中绝大多数只是比传统的透射掩模略有改进。这些设计的掩模的若干结构以及相应的成像后的振幅分布示于图4中。图4(a)表示传统的透射掩模，而图4(b)~(f)是相移掩模设计。图4(b)是交错狭缝相移掩模，也称作“强”相移掩模设计。使用杜邦(Du Pont)的光学掩模板，在掩模基片上刻蚀一深度  $0.5\lambda / (n - 1)$  ( $n$  表示基片的折射率)，由此产生  $180^\circ$  的相移。当然，相移和无相移的

狭缝的折射率并非完全相同，要做修正。图4(c)代表“缺陷”的相边缘掩模设计，在相位转变处通过相消干涉，在像上形成暗线。这种设计只要求一步成像，但是，相消干涉的结果产生了很宽的不透明区。图4(d)表示相移-开关(shifter-shutter)式掩模设计。两个相位转变边缘区十分接近，只产生单条暗线。当曝光和聚焦情况改变时，只会引起像的线宽微小变化。图4(e)是凸缘相移器(rimshifter)掩模，它使相移后的光波在不透明的边缘处其振幅更陡地下降，使得亮线和暗线之间的转变区变窄。图4(f)表示衰减式相移或者“漏铬”掩模，它利用部分透光材料代替不透明材料，同时产生  $180^\circ$  相移。这种设计大大提高了亮线和暗线之间的转变锐度，但是却使所有的原先暗区受到部分曝光。

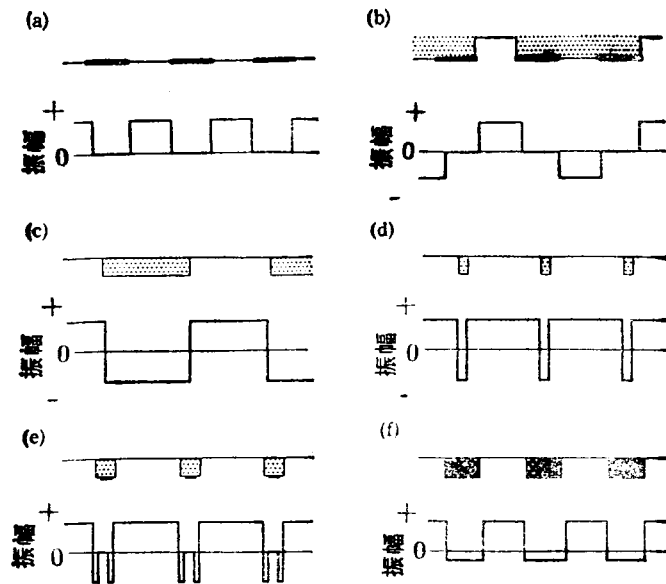


图4 相移掩模的结构和成像的振幅分布

(a) 透射掩模；(b) 交错狭缝相移掩模；(c) “缺陷”的相边缘掩模设计；(d) 相移-开关式的掩模；  
(e) 凸缘相移型掩模；(f) 衰减式相移掩模[浓厚的黑色区代表不透光的材料，虚线阴影区为相移  $180^\circ$ ，  
图(f)中类似砖块阴影区代表透过率小于1的材料并且同时产生  $180^\circ$  相移]

上述的设计只是理想的模型，实际的线路图决不只是由单一暗线和线间距组成的，而是要复杂得多。采用不同的相移掩模设计，可以使单个孤立的宽亮线的像亮度得到增强。日本的日立公司的 Terasawa 及其合作者首先设计出一种相移掩模板[见图5(a)]<sup>[4]</sup>，实现了这一

目的。每条宽线区伴随着两个相移“外伸叉架”(outriggers)，叉架的宽度很窄，本身不会印刻到感光胶上。这种设计的结果是使宽线条的中央区的衍射图案抵消了，转变区变窄以及亮度峰值增大。接触孔(contact holes)是在集成电路中常常遇到的另一种零部件，一般利用掩

模上的方形孔径，经由斑点尺寸略小于爱里斑的圆形亮光投影成像的。由于光波是在二维方向上产生衍射，这种光斑的景深特别短。但是，罗彻斯特大学的 Durnin 和 Eberly<sup>[5]</sup> 已经提出如何利用相移环，在环绕这个斑点周围产生一“非衍射”（nondiffracting）光束，采用类似于图 5(a) 的二维的外伸叉架，能够逼近这一目标。采用图 5(b) 所示的凸缘相移掩模设计接触孔图样，也能实现这一目的。这样设计的掩模板，使分辨率提高了大约 50% 左右，同时，景深增加了 2 倍。

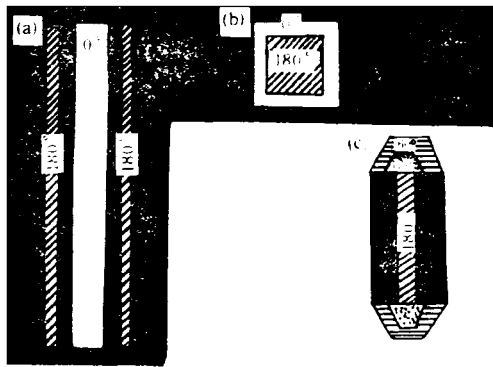


图 5 对于孤立的宽亮线和接触孔像的相移掩模板的设计

(a) 孤立的宽亮线；(b) 接触孔；(c) 多级相位转变设计

### 3.2 相移掩模板的加工制作

将成千上万个元件集成于一体，设计成掩模图案，再制成可实际运转的线路图是一项富有挑战性的工作，尤其是对于复杂的和不甚规则的逻辑线路图制作，更是一项艰难的工作。集成电路的基本布局导致了强相移掩模有一重大的缺点，那就是在相位每发生  $180^\circ$  转变时必然出现一边界，这样一来，相位转变区总是对应于窄的黑线，而并不管它是否对应于真正所要求的不透明区，这就造成了短路或者其它的异常情况出现。图 5(c) 示出一对不透明线跨越在相位  $0-180^\circ$  跃变区上。消除这些不想要的线条的一个方法是，对光刻胶进行两次曝光，第一次应用高分辨率的相移掩模；第二次应用一片特殊制造的阻挡式的掩模，来保护所需要的线路，同时擦掉不需要的跨接连线<sup>[6]</sup>。尽管应用

这种工艺已加工出简单的电路，但是，对于制作更复杂的器件来讲，要求应用双倍数目的掩模和多次曝光步骤，这是很不实际的。如果希望只使用一个掩模同时消除掉这些不想要的跨桥线，就必须采用多等级水平的相位掩模设计，如图 5(d) 所示。

尽管早在 80 年代早期，美国的工程科学家们就已经对相移掩模设计做出了开创性的研究，然而全部关键性的进展和将新的概念赋之于实践方面，几乎全被日本的科学家们所囊括。1990 年，元件尺寸小到  $0.17\mu\text{m}$  的实验性电路已见报道<sup>[7]</sup>。图 6 示出应用扫描电镜所拍摄的日本日立公司制作的一个 256M bit 的动力学随机存取存储器的单元结构像。图 6(a) 为一完整单元，图 6(b) 给出栅极层像，它是利用汞灯的 i-线 ( $365\text{nm}$  波长) 光和相移掩模技术

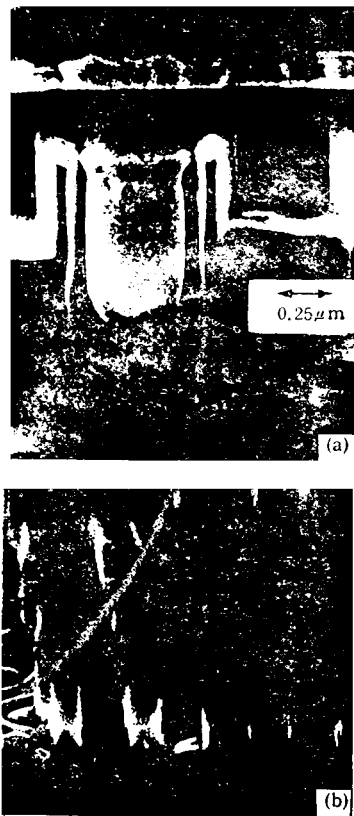


图 6 256M bit 的动力学随机存取存储器的扫描电镜下显微图  
(a) 完整单元结构像；(b) 栅极层（应用光刻蚀技术成像最小元件尺寸是  $250\text{nm}$ ）

制作成的图样。应用光刻蚀技术制成的“字线”(word-line)的元件的临界尺寸是250nm。

用于生产的光学掩模必须保证完全无任何印迹缺陷,所以要求小心翼翼地检查和修复透射掩模图案上的微小瑕疵。通常使用聚焦的离子束或者激光束,在反应氧氛中进行局部沉积碳或其他不透明的材料来修复掩模。为了去掉不透明的斑点缺陷,使它变成可透光,可借助脉冲激光来烧融它们,但是,还没有人能够真正的知道,如何去发现和鉴别相移型掩模中的缺陷所在,或者如何去修复它们。对于相移掩模,前述的修复手段似乎已超出了目前的工艺水平。

### 3.3 照明系统的设计和改进行

提高分辨率和扩展加工窗口(指可使用的聚焦和曝光范围)的重要环节之一是如何想方设法地改善制作掩模时所使用的照明系统。要求照明光束均匀分布,同时有良好的会聚性能。标志步进曝光机的照明系统的性能优劣的一个判据是投射到掩模平面上光波的均匀分布的程

度。一般地讲,要求均匀度优于2%。为了保证均匀化后的照明光能够顺利地透过成像透镜,然后再被掩模图样所衍射,通常设计会聚系统中的光阑尺寸小于投影透镜,其缩小比例因子 $\sigma$ 一般为50%—70%。当掩模安放在系统的目镜平面上时,光波经过衍射,在透镜的光瞳上会出现额外的光束,这是衍射光学的基本原理所导致的。

对于传统的步进曝光成像系统,应用含精细线间距图样的透射掩模时,经过投影系统,在透镜的光瞳上,其光强分布如图7(a)所示。零级衍射光是半径为 $\sigma \cdot NA$ 大小的圆斑,而第 $+n$ 级和 $-n$ 级衍射光也将形成类似的光斑,其位置相对于原点有个位移,偏移角度是 $\pm n(\lambda/p)$ , $p$ 是掩模衍射光栅的栅线距。至少有零级, $+1$ 级和 $-1$ 级这三束光会透过光瞳并且成像在半导体的晶片上。如果,栅线距小到一个数值, $p \sim M\lambda/NA$ ( $M$ 是投影透镜的放大率),那么第 $\pm 1$ 级的衍射光斑的很大一部分将落在透镜光瞳的外面,相应的圆斑变成残缺不

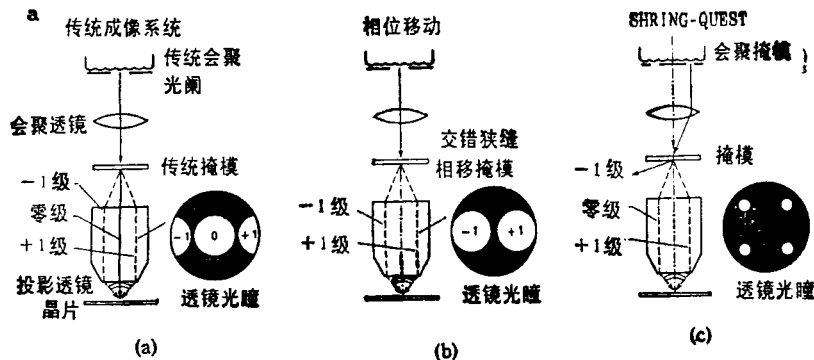


图7 用于光刻蚀术中步进曝光系统的各种改进设计  
(a) 传统的步进曝光机; (b) 应用交错狭缝相移掩模; (c) 传统的透射掩模和旁轴照明系统

全了。这样一来,使像的质量大大降低了。由此可见,在这样的系统中,最小的极限栅线只能达到 $p/M \sim \lambda/NA$ 。

对于交错狭缝相移式掩模,成像过程见图7(b)。在其透镜的光瞳平面上,零级的非衍射光完全被抑制掉,而且 $\pm 1$ 级的衍射光偏离原点的偏移角为 $\pm \lambda/2p$ 。因此,当掩模的栅线距为 $p \sim M\lambda/NA(2 - \sigma)$ 时,仍然可以实现光

的全透射和高衬度比。这样一来,它比起传统的透射掩模来其栅线距的极限值可放宽达50%之多<sup>[3]</sup>,一般取 $0.2 < \sigma < 0.5$ 。

应用传统的透射掩模时,如果采用适当的最佳化的旁轴照明系统,也能够达到提高分辨率和拉长景深的目的,其性能可与交错狭缝相移掩模系统相媲美。图7(c)描绘这种旁轴照明系统结构示意图<sup>[4]</sup>。会聚光经投射后,在投

影透镜的光瞳平面上形成四个光斑，它们的中心位置等距的偏离原点，分布在四个象限之内。随着光栅的栅线距的减小，诸第一级衍射光束中之一，很快地移出透镜孔径而消失了，但是其他剩下的一级衍射光，将继续透射并通过系统而成像到晶片上，从而提高了分辨率，同时增加了景深。不幸的是，当掩模上精细结构线的取向为 $45^\circ$ 时，这种照明系统导致很差的分辨率。

#### 4 结束语

当电路元件的尺寸比波长还短时，不论应用什么样的光学成像技术，光学掩模的设计是一项十分复杂而艰巨的任务。应用优化处理算法，例如应用模拟退火 (simulated annealing) 算法来设计掩模图案，使经过投影后能够得到一幅最逼近给定目标函数的像。目前，对于简单的图案，已经能够实现这种优化设计，但是离实用要求还相去甚远，有效的优化设计程序要求计算速度快和精度高。当模拟设计面积大于几个 $\mu\text{m}^2$ 时，现有的光学和保护膜层模拟设计用的程序软件包的计算速度显的太慢了。此外，为了实现精确的实际设计，还必须输入各种正确的有关的系统参数，例如透镜的剩余像差、严格的照明几何、抗蚀层的显影过程参数等等，目前几乎是不可能办到的。

随着逼近光学刻蚀术的最终极限，从电

路设计到加工整个过程都必须进行优化处理。这对设计者的素质修养要求很高，要善于吸取和应用所有相关的信息。由于在掩模加工过程中，涉及到部分相干光成像，抗蚀层的显影动力学过程以及电路的运转等许多非线性相互作用的复杂性，大概需要求助于计算机“专家”系统来指导设计工作，以便顺利地穿越充满陷阱和机遇二者并存的迷宫<sup>[9]</sup>。

向光刻蚀技术最终的极限进行冲刺，无疑是一项令人激动的挑战事业。新兴的波前工程学应运而生，它将要求不同领域内专家，如光学物理、电子学、材料科学、化学、器件物理学等领域协同努力，期望不久的将来，实现这一冲刺。

#### 参 考 文 献

- [1] R. P. Feynman, *J. Micromechanical Syst.*, **1** (1990), 60.
- [2] D. W. Johneson, C. W. Mack, *Proc. SPIE*, **1674** (1992), 486.
- [3] M. D. Levenson, N. S. Viswanatham, R. A. Simpson, *IEEE Trans. Electron. Devices*, **29**(1982), 1826.
- [4] T. Terasawa, N. Hasegawa, T. Tanaka, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8**, (1990), 1300.
- [5] J. Durnin, J. J. Micelli Jr, J. H. Eberly, *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1499.
- [6] K. Inokuchi, T. Saito, H. Jinbo, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**(1991), 3318.
- [7] N. Hasegawa, T. Tanaka, A. Imai, et al., *51st Annu. Mtg. Jpn. Soc. Appl. Phys. in Abstr.*, **2**(1990), 493.
- [8] N. Shiraishi, S. Hirokawa, Y. Takeuchi, et al., *Proc. SPIE*, **1674**(1992), 741.
- [9] M. D. Levenson, *Phys. Today*, **46-7**(1993), 28.

### 1995年第3期《物理》要目预告

X射线激光研究的进展概述(张杰);  
中子散射与1994年诺贝尔物理奖(孙向东);  
信息新技术进展和信息高速公路(侯自强);  
 $\beta\text{-C}_3\text{N}_4$ ——一种新型的超硬材料(辛火平);  
多孔硅发光机理的新探索(俞鸣人等);  
散斑计量技术——走向工程实用化的技术  
(姜力军等);  
全息印刷——21世纪的印刷术(斐文);

现代精密测量中的压电生物传感器(习岗等);  
生命科学中的物理问题讲座第九讲 生物光子的相干性(沈恂);  
薄膜物理及其应用讲座第二讲 高温超导隧道结技术及其应用(杨乾声);  
国立西南联合大学物理系——抗战时期中国物理学界的一支奇葩(上)(沈克琦)。