

大规模集成电路专用设备研讨暨学术 交流会部分论文选(下)

目 录

综 述

国外集成电路专用设备的发展.....	(1)
光学曝光的潜力与前景.....	(6)

光 刻 设 备

分步重复投影光刻物镜设计.....	(10)
微细光刻照明系统汞灯“弧闪”的初步研究.....	(16)
光刻机光学系统的质量要求和象质检验.....	(22)
投影光刻机自动调焦调平技术.....	(25)
光刻设备的使用以及新设备的调机和工艺试验.....	(31)

测 试 仪 器

掩模缺陷检测光学方法.....	(36)
自动掩模检查系统中微细缺陷探测的光学问题.....	(40)
双频激光测量系统在LSI光刻工艺设备中的应用.....	(45)
采用负载观测器的定位控制系统.....	(51)

其 它

静电在集成电路生产中的危害及消除.....	(54)
文摘.....	(57)
米信照登.....	(59)
附: JK—1 型接近式光刻机院级鉴定意见等.....	(60)
建议书.....	(63)

国外集成电路专用设备的发展

上海光学仪器工业公司 沈建森 机械部仪器仪表局 杨景福

一、引言

微电子技术的核心是集成电路和微型计算机,这是信息化社会的基础。国外的经验表明,微电子技术对国民经济和社会的发展将起到愈来愈重要的作用。据统计,目前微电子技术应用约有2500种之多,美国、日本等国民生产总值中有近60%与应用微电子技术密切相关^[1]。

集成电路生产的产量和产值又是衡量一个国家工业发达程度的标志。由产值和从业人数来看,我国集成电路工业处于落后状态。

众所周知,集成电路工业是一门技术高度密集的工业,是一门综合性很强的工业。它要依靠集成电路工艺装备和测试仪器(即专用设备),依靠基础材料才能搞上去,特别是专用设备在集成电路发展和生产中占有主要地位,在集成电路开发和生产中,一代装备产生一代工艺,一代工艺产生一代器件,一代器件产生一代电子整机^[2]。硅片直径的大型化和线宽的微细化对专用设备提出愈来愈高的要求。设备的更新周期从七十年代的4—5年,缩短到八十年代的2—3年。西方国家设备更新的投资每年达几十亿美元。因此,国外就有人说,集成电路的竞争,实际上就是设备的竞争。

二、专用设备的投资

1. 设备的高档化和大型化

以器件高集成化与高速化为目标的微细加工工艺取得了进展,是促进集成电路生产用的专用设备向高档化发展的主要原因。由

于硅片直径增大,从3英寸、4英寸向5英寸或6英寸发展,也促使设备向大型化发展。现在硅器件的64K存储器,已批量生产,设计规范采用 $3\mu\text{m}$ 左右的线宽。处于研制阶段的产品,现在能达到 $1\text{—}2\mu\text{m}$ 的设计规范,预计九十年代的集成电路批量生产线将使用 $2\mu\text{m}$ 以下的设计规范,研制阶段的器件线宽在 $0.5\mu\text{m}$ 以下,接近器件的工艺加工极限($0.1\mu\text{m}$)。器件的结构现在以横向集成为主,可以期望在九十年代把目前处于实验室研制的纵向集成的三维器件进入实用阶段。随着高集成化的发展,估计一九九〇年能生产1M的高集成度DMOS存储器。在九十年代可以生产出4M的DMOS存储器。作为真正高速化的方法,现在已开始开发GaAs集成电路等新器件。

实现器件高集成化与高速化主要依靠工艺和专用设备,工艺方面最重要的改进有:对图形形成进行革新,实现干法腐蚀,采用低温处理技术等。在专用设备上包括曝光、刻蚀方面等。其中曝光方面,对 $1\text{—}2\mu\text{m}$ 的规范的器件较多采用缩小分步重复光刻机;亚微米级的线宽,将主要采用扫描式电子束曝光机和X射线曝光机,目前正在研制中的离子束扫描曝光设备有可能进一步实现图形微细化,估计一九九〇年后,有一部分将进入实用阶段。刻蚀方面,干法刻蚀加工中,等离子刻蚀已较多地用于大规模集成电路生产中。估计反应离子束刻蚀等新方法有可能采用。在全干法加工的设想中,以全面运用离子束为目标,包括无膜选择离子注入和无膜刻蚀^[3]。

专用设备另一个发展方向,即采用组合设备*,从利用计算机控制的单机自动化向联机自动化方向发展。

2. 专用设备投资的提高

从集成电路专用设备投资动向中,可以看到专用设备的需要规模。以美国、日本为例,美国、日本、西欧等国家、地区,在专用设备上都进行每年达几十亿美元巨额投资,约占集成电路销售额的10%左右。七十年代后期以来增长得相当快,例如美国1978年比1977年增长67%,1979年比1978年又增长41%,日本1979年比1978年增长83.1%,1980年比1979年增长62.7%,美国1974年到1979年的六年中,设备投资18亿5千万美元,占集成电路销售额12%,日本在1973年至1982年十年中投资7538亿1500万日元,占23.2%。特别要提出,日本在1969年对设备的投资为5.28千万美元,占销售额的65%,1970年为7.32千万美元,占45%^[4]。这个时期正是日本从小硅片向大硅片转折时期。我国当前也处于转折时期。

3. 美、日几家大公司对专用设备的投资

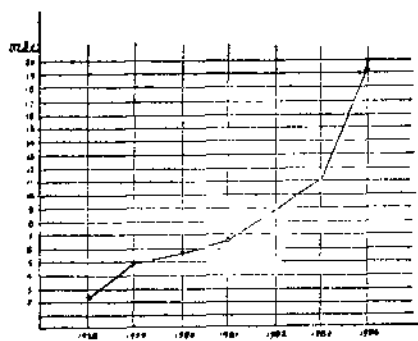
美国八家大公司(德克萨士、英特尔、莫托洛拉、国家半导体、仙童、西格尼蒂克斯、先进微器件、莫斯蒂克)对设备进行大量投资。1978年为4.25亿美元,1977年为6.93亿美元,1980年为9.05亿美元,这就是美国始终处于世界领先地位的原因所在。

日本九家半导体厂商(日电、日立、东芝、松下、三菱、富士通、冲电气、夏普、东京三洋)对专用设备投资1978年为2.24亿美元,1979年为4.9亿美元,1980年为5.85亿美元,1981年为6.48亿美元,1982年为9亿美元,1983年为11亿美元,预计1984年为9.07亿美元。这就是日本电子工业用较短的时间,在国际市场上立足并与美国电子产品抗衡的原因。(见表1)

4. 半导体专用设备投资增长的原因

*本期“光学曝光的潜力与前景”一文中有详细论述。

表1 日本九家半导体厂(日电、日立、东芝、松下、三菱、富士通、冲电气、夏普、东京三洋)对专用设备投资情况。



日本九家半导体厂商的半导体产值约占日本全国半导体总产值的90%。在过去四年间,总产值平均每年增长24%,而设备投资的平均年增长率较高,超过了40%。另外,每年产值与设备投资额的比例也逐年增长,如1978年为13%,1982年已上升到21%。

半导体设备的投资额增长率之所以超过产值增长率,其原因有以下三点:(1)半导体生产中集成电路的比例增大了;(2)由于集成电路的工艺革新,即为了提高集成度,促使设备向高档发展,并且设备的寿命缩短了;(3)厂商间的竞争日趋激化。集成电路在半导体器件总产值中所占的比例,1978年为49%,而1982年已提高到67%。作为设备高档化的影响,以曝光设备为例,从过去接触式光刻发展到现在的投影式光刻,设备价格约提高了一倍,而设备的处理能力却降低了一半左右。半导体的生产成本同批量生产的规模有关,批量生产规模越大,产品成本越低,因此各半导体厂商间进行的产品市场占有率竞争,最终必定会引起对设备投资的竞争。

由于设备投资额的平均增长率很高,超过了产值的增长率,因此设备投资对于增产所作的贡献的比例,近年来明显下降。

5. 进口专用设备与自力更生

专用设备是个协作配套性很强的门类,一个地区,一个国家不可能齐全。国外有人

认为集成电路设备工业是一个国际化的产业，因此，在国际环境许可的条件下，适当的引进是必要的，但是，立足点应该是自力更生，例如日本在1979年和1980年还有70%的关键设备依靠从美国进口，如计算机辅助设计设备、图形发生器、精压机、离子注入机、光刻机等，日本为了摆脱美国的技术封锁和控制，积极而稳定地发展设备工业，日本认为半导体工业要赶上美国，关键在于专用设备赶上美国。近几年来，日本在专用设备工业研制方面卓有成效（专用设备的自给率达70%），在集成电路工业方面卓有成效（见表2，表3）。由原来从美国进口设备，改变为向美国出口设备，如PLA系列的光刻机已向美国返销500台，新颖的MPA—500A型反射投影光刻机返销20台^[6]。日本走的道路是引进（技术、样机）——仿制——发展——外销的道路。

表2 日本主要集成电路专用设备中
国外产品所占比例(1982年)

进口比例	设备名称
50~70%	等离子化学汽相淀积设备 离子注入设备 离子束曝光设备
30~50%	分步重复式投影光刻机 常压化学汽相淀积设备 溅射设备 测试设备
10~30%	等离子刻蚀设备 反应性离子刻蚀设备 真空蒸镀设备 投影式光刻机
不到10%	接触式光刻机 低压化学汽相淀积设备 扩散炉 切割锯 芯片焊接设备 引线焊接设备 连续自动封装设备

表3 日本集成电路制造设备进口比率 单位：%

设备类别	1979年	1980年
硅片制造设备		
CZ单晶生长设备	20	10
硅片切割机	20	10
硅片研磨机	20	10
硅片表面抛光机	60	20
磨边机	30	

制版设备

分步重复照相机	100	
CAD系统	100	100
图形发生器	100	100
电子束曝光机	60	60
接触式复印机	100	100

硅片加工设备

涂胶、显影设备	60	50
光刻机	70	60
等离子刻蚀设备	50	30
外延设备	30	30
离子注入机	90	
金属化设备	40	50
化学气相淀积设备	40	20

组装设备

划片机	5	5
芯片焊接机	10	5
引线压焊机	5	5
封装设备	10	

测试·分析设备

环境试验设备	30	10
电性能测试设备	40	30
扫描电子显微镜	5	

三、专用设备的趋势和市场

1. 半导体专用设备的市场

在资本主义国家里，半导体生产主要集中在美、日、西欧各国，其他国家的比例很低。以集成电路为例，估计资本主义世界1982年的产值约为100亿美元，其中美国占55%，日本占30%，西欧占15%。联邦德国、英国、法国这三个国家的产值约占整个西欧的70%。半导体生产设备的市场规模与集成电路的生产规模成一定比例，美国是世界最大的市场，其次是日本、西欧。

1982年，由于经济不景气，半导体市场出现了世界性萧条，设备市场也处于较低的水平。但1983年，随美国经济状况的好转，半导体市场又出现了飞速发展的势头。估计1982~1986年，世界半导体设备市场将以每年增长25%的速度发展。

美国半导体设备市场大约占全世界的60%，其器件技术和加工技术历来处于世界领先的地位；在设备市场方面也同样居领先地位；在设备供应方面，有Perkin-Elmer、GCA、AM公司等世界性的供应厂商，这些厂商控制着世界的潮流。但是从美国厂商最近的生产发展情况和设备投资动向来看，它们的发展速度还不如日本（见表4、表5）。西欧半导体产业在技术和规模上都较落后，设备市场的规模也小。虽然西欧的飞利浦公司和西门子公司等综合性电气厂商早就开始从事半导体器件的生产，但德克萨斯(TI)等美商的产品比例很高，近年来，日本半导体厂商也相继在西欧设厂。在这种情况下，西欧的半导体设备主要依靠从美国进口，目前西欧政府已开始注重发展以半导体产业为主的尖端技术产业。但是从整个经济发展及其他方面来看，估计在半导体和半导体生产设备方面，西欧的发展速度与日、美相比还是较低的。

表4 美国半导体制造设备与测试仪器 (百万美元)

名 称	1983年	1986年
制 造 装 置	999.2	1,533
拉单晶装置(包括硅片加工)	42.4	84
图形发生器	59.6	85
复 印 装 置	627	957
清洗、烘烤等	36	70
光 刻	591	887
接近/接触	5	7
投 影	224	280
缩小投影	300	500
电 子 束	62	100
硅片处理系统	120	180
组 装 装 置	142	227
测 试 装 置	142.7	194
超声波检查装置	25.2	30
X射线检查装置	21.5	32
红外线检查装置	62.5	80
紫外线检查装置	3.4	4
激光检查装置	30.1	48
电子显微镜	13.7	15

表5 日本集成电路制造与测试仪器 (百万美元)

名 称	1983年
制 造 装 置	666.4
装配装置(包括封装等)	82.4
光刻装置(曝光、划片)	374.2
掩模制造装置	53.6
硅片处理装置(扩散炉腐蚀)	183.2
测 厚 仪	180
超声波清洗装置	140.6
焊接控制系统	238.7
测 试 仪 器	837.9
自动测试装置	187.5
零件测试装置	39.9
IC测试装置	118.4
印刷电路板测试装置	29.2
红外线检查装置	44
X射线检查装置	38.3

2. 光刻机现状与趋势

1982年世界上用在实际生产线上的光刻机如表6所示，该表所示的光刻设备总数约5400台，其中扫描投影光刻机为3000台，接

近/接触式为1800台,分步重复为500台、电子束和X射线束装置共约100台^[6]。

表6 1982年的光刻技术

设备技术	应用(μm)	极限(μm)	使用中占比例(%)
1. 接触式	> 5	0.5	33
2. 接近式	4	3	
3. 1:1反射扫描投影式	1.75~3	1.25	56
4. 缩小10倍分步重复式	1.5~3	1.0	
5. 缩小5倍分步重复式	1.5~3	1.25	9
6. 1:1分步重复式	1.5~3	1.25	
7. X射线光刻	0.75~1.5	0.5	2
8. 电子束光刻	0.75~3	0.5	

1990年光刻技术的预测见表7,总数将达14,000台。分步重复式占45%,计6,300台;接触/接近式占15%;电子束和X射线束的增长速度还是较慢。最主要可能是可能向分区扫描方式的装置发展,这种光刻技术的前途可能很好。

表7 1990年光刻技术的预测

设备技术	应用(μm)	线宽尺寸(μm)		使用中占比例(%)
1. 1:1反射扫描投影	双极型	1.25	2	25
2. 接触/接近式	接触器	10	20	15
3. 分步重复式	逻辑/MPU	1	3	45
4. 电子束、X射线束	样机 标准逻辑电路	0.8	2	4
5. 分区扫描光刻	存储器,MPU	0.8	1.25	11

专用设备可分为六大类(也有分为五大类)共约60多种。这些专用设备是发展IC的基础,而其中光学设备与光学测试仪器又是专用设备中至关重要的一部分,特别是制版、光刻及光学测试仪器三类。精密光学设备是LSI工艺设备中的重点,据统计,这三类光学设备占总设备品种的30—35%,数量上占总设备数量的50~60%,资金占总设备资金的30~40%^[7]。这在发展专用设备中是值得注意的事。

参考文献

1. “对发展上海集成电路工业若干建议” 吴仁等。
2. “集成电路专用设备国内外概况” 《电子与自动化》1984年第2期。
3. 《电子材料》(日刊)1983年11月别册P.38—42。
4. “试论大规模集成电路制造设备的引进” 马远良。
5. “国内外光刻机现状和将来” 《上海光机》1984年第1期
6. 《电子材料》(日刊)1983年3月号, P.79。
7. “对发展大规模集成电路制造用精密光学设备和测试仪器的一些看法” 沈建森等。
8. “日本半导体生产投资增长” 经济参考1984年3月8日

光学曝光的潜力与前景

上海冶金所

沈国雄

摘 要

当前,在生产线上,在许多现代技术应用中,人们仍然倾向于光学曝光。通过各种途径的改进,目前光学曝光系统已可实现 $0.5\mu\text{m}$ 左右线宽的曝光,一般认为特征线宽低于 $0.5\mu\text{m}$ 时,才需要应用非光学曝光装置。

为了进一步发挥光学曝光系统的潜力,有一种成本和效果较好的方法就是扫描投影和缩小分步重复投影两种技术的混合使用和互相匹配。这种混合曝光技术也可推广到接近式与投影式、分步重复投影与电子束直接曝光的混合匹配。

美国Ultratech公司采用1倍物镜构成的分步重复投影光刻机兼具投影和扫描两种形式的优点,是一种可应用在混合曝光工艺中理想的曝光系统。

一. 引 言

集成度迅速提高的因素是由于设计和工艺的改革,硅片和芯片尺寸的增大及特征尺寸的微细化等三个方面。特征尺寸的缩小将是彻底的改革。表1表明集成电路技术一直是沿着缩小集成电路中元件尺寸发展的。

表1 MOS动态存储器集成度与线宽的关系

年 份	特 征 线 宽	集 成 度
1969—1970	10 微米	1 K位
1972	6—8 微米	4 K位
1975	4—6 微米	16 K位
1979	3 微米	64 K位
1983	2 微米	256 K位
1984	1—1.5 微米	1 M位
1986	< 1 微米	4 M位

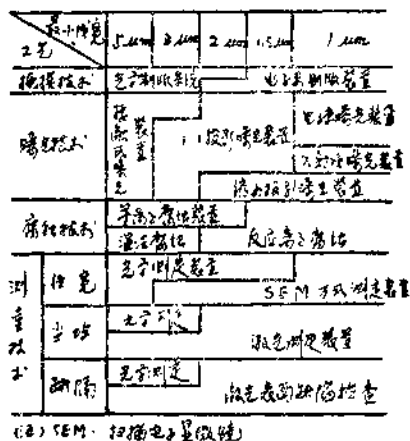


图1 微细加工技术的研究与相应设备的开发

实现器件尺寸缩小的微细加工技术已成为超大规模集成电路工艺的核心技术,对提高超大器件的贡献将占60%以上。据日本电子机械工业学会的统计,1977年微细加工设备即光刻机、干法腐蚀设备占工艺设备的33.3%,到1980年就增加到57.3%。

薄膜制造技术和超微细加工技术的组合已成为器件开发的关键。在超大规模集成电路生产工艺上今年是 $2\mu\text{m}$ 的时代,到八十年代末将进入亚微米时代,就实验室研究水平而言,今天横向尺寸 $0.1\mu\text{m}$,纵向尺寸 $10\text{\AA}$ 的超微细加工已成为可能。图1画出了微细加工技术的研究与相应设备的开发情

况^[1]。

二. 光学曝光的潜力

仅仅几年以前,一种普遍的看法认为,八十年代将是电子束直接在硅片上曝光的时代^[2]。不久,X射线曝光技术和设备也取得了很大的进展。例如在今年举行的美国 SEMICON/WEST 84' 展览会上,不仅有日立和Perkin—Elmer等公司展出的直接在硅片上曝光的电子束曝光机,Micronix的X射线曝光机也比去年展出的样机更接近实用。然而,事实是在生产线上,在许多现代技术的应用中,人们仍然倾向于光学曝光。这里所指的实际的现代技术典型的特征线宽是1.5—2 μ m范围,套准精度为0.5—0.75 μ m。

表2 各公司的256K DRAM设计规范

厂 家	设计 规范 (μ m)	单元 尺寸 (μ m ²)	芯 片 尺 寸 (mm ²)	备 注 (IEEE)
贝尔研究所	2.3	117	54.3	SSC82年10月
IBM公司	2.0	102.6	50	ISSCC84年2月
英特尔公司(CMOS)	1.5	70.4	98	ISSCC84年2月
奥托格拉	1.6	—	46.2	" "
Mostek	2.1	76.2	46.2	" "
国家半导体公司	2.0	70	35.7	" "
日 立(CMOS)	2.0	92.5	55	" "
日电公司	0.8	20	52.5	" "
东芝公司	1.5	76.8	46	" "
富 士 通	1.5	38.3	34.9	" "
日 电(NEC)	1.0	44	75.9	" "
三 菱	1.6	63.5	30.2	" "
通用研究所	1.5	35.3	30.8	" "
西门子公司	2.5	90	45	" "

光学曝光技术近几年来取得突飞猛进的进展。如分步重复曝光系统中的对准方式从初期的离轴全场对准改为通过透镜(TTL)方式进行芯片对准,即对每一个分步的视场(逐场)进行自动对准,消除硅片不平整和畸变的影响,提高了套刻的精度。另一重要改进是减小物镜的倍率,增加了视场的直径,从而增加一次曝光的芯片数,提高生产

率,并降低了掩模上缺陷的影响程度。如Optimetrix公司发展了5倍的物镜,产量由每小时加工30~50片5英寸硅片提高到每小时50~70片,而TRE公司的800SLR型分步重复投影光刻机采用5倍物镜后产量高达每小时90片。七十年代初以Perkin—Elmer公司为代表的1:1扫描投影光刻机经过不断改进,终于成为世界上应用量最大的投影光刻机。七十年代中期进入它的全盛时期。图2示出了光学曝光的发展趋势。

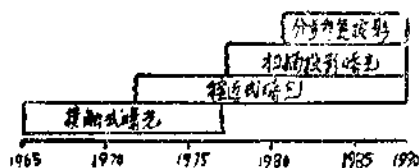


图2 光学曝光技术的趋势

表3列出了各种曝光系统的销售统计反映了这一趋势。从表中可看出近二年1:1扫描投影和缩小分步重复投影曝光系统的销售额增长迅猛。其中分步重复投影光刻机的增长更为突出。

表3 各种曝光系统的销售趋势 (百万美元)

	1981	1982	1983	1984	1985
接触/接近式	54	44	34	38	33
扫描投影式	187	140	164	258	307
分步重复投影式	158	124	166	283	510
电子束直接曝光	13	18	31	22	14
X射线曝光	0	0	3	4	10
总销售额	412	326	397	605	874
年增长率		-21	22	52	45

三. 混合曝光技术最大限度地发挥了光学曝光的潜力

在集成电路制备工艺中选取哪种曝光方式的设备要考虑到设备本身的特点。以往,接触式曝光设备的价格较便宜,所以普遍使用。但随着加工尺寸的微细化,掩模和晶片之间的尘埃含量降低产品的合格率及套刻精度

等,因此曝光方式转向了扫描投影式和分步重复投影式。这两种光学曝光各具优缺点。扫描投影生产量大(60~100片/小时),相对低的成本(约30万美元),可实用的极限尺寸是1.5~2 μm ,但是对硅片翘曲的补偿能力较差。分步重复投影曝光系统的生产量较低,(但也正在不断改进,目前可达60片/小时)实用的极限尺寸是1 μm ,由于每一芯片对准,可校正硅片的翘曲,价格在60万到80万美元。在亚微米时代到来之前,从分辨率、对准精度、生产量、占空系数、投资效率等因素出发,一种混合使用扫描投影和分步重复投影光刻机的趋势近年来正在逐步增长。

一种成本效果较好的方法,扫描投影和分步重复投影两种技术的混合使用和互相匹配^[3](Mix-and-Match Alignment或Hybrid Lithography)表4列出了超大规模集成电路生产线建设的必要投资额,而其中曝光系统所占投资的比重也愈来愈大^[4]。

表4 超大生产线必要投资额 (百万美元)

	1980	1985
净化厂房及辅助设备	7	12
硅片制造工艺设备	8	22
封装工艺设备	8	8
检查测试工艺设备	5	15
总 计	23	52

混合曝光的方法就是不太关键的光刻层用1:1扫描投影光刻,而关键的光刻层用分步重复投影光刻机。因此,近期的生产线应该具有许多台扫描投影机,而分步重复光刻机只需几台。分步重复与1:1扫描的比率将逐年增大,直到最后,在一条线上只剩几台1:1扫描投影用来在钝化层上开热压脚用。因此,混合曝光的总的动机是:(1)尽可能延长目前线上主要设备的使用时间;(2)慢慢地适时地增加新的主要设备;(3)通过改进关键光刻层所要求的分辨率和对准来改进

芯片性能、集成度和成品率。

光学曝光系统中的混合曝光的匹配除了上述组合外,还可以有1:1扫描投影和1:1分步重复曝光系统的组合,甚至接近式光刻机与扫描投影、缩小分步重复或1倍分步重复曝光系统中的任一种组合。混合曝光的概念也可推及电子束直接曝光和光学曝光系统的混合与匹配^[5]。

四.应用在混合曝光工艺中一种理想的分步重复投影光刻机

为了提高加工能力和降低掩模上缺陷的影响程度,不少初始生产10:1缩小分步重复投影光刻机的厂商后来发展了5:1的分步重复机。美国Ultratech公司采用1倍的物镜构成的分步重复投影光刻机兼具投影和扫描两种形式的优点,是一种可应用在混合曝光工艺中理想的曝光系统。该机在1982年年初推出以来,已渐露头角^[6],在Semicon/West 83'展览会上展出的Ultra Step 1000型分步重复投影光刻机,数值孔径 $\text{NA} = 0.315$,分辨率已提高到0.8~1.25 μm ,焦深5 μm 而售价只有42万美元,只有一般分步重复投影光刻机的一半左右^[7]。

Ultratech 1000型的最大特点是采用了由宽频带曝光光波而构成的1:1等倍投影曝光系统。使用的光源是一般常用的200瓦直流汞灯,在对位时,用100瓦空载。在曝光时,用500瓦起燃。这种设计比10:1或5:1缩小曝光系统性能优良。另一特点是实行了双视场瞄准的高精度TTL暗视场对准方式。确保了分辨率及套刻精度等分步重复光刻机的基本性能。下面从六个方面对该机略加介绍。

(1)分辨率 就光致抗蚀剂厚度的变化来说,与光致抗蚀剂相结合的光能量变化在宽频带曝光时可忽略不计。因此,它对硅片上的分辨率产生良好的影响。可获得极限分辨率为0.6 μm 。

(2) 套刻精度 由于采用TTL暗视场对准, 1:1投影光学系统, 所以提高了套刻精度。由于对准是以双视场瞄准进行的, 所以消除了前阶段的套刻误差。同时, 由于采用激光干涉测长系统仅移动所测量的几百微米偏移距离而进行曝光, 所以对对准标记总是保证清晰。

(3) 生产量 生产量取决于曝光图形的大小、硅片上的覆盖率及所采用的光致抗蚀剂的种类等各种不同条件。以前的分步重复光刻机的最大弱点是生产量问题。但在1000型上, 这一点已大有改进。直径为5英寸硅片, 生产量大致为60~70片/小时。

(4) 体积与占地面积 由于该装置采用了1:1光学系统, 所以整个光学系统的大小与10:1缩小透镜系统相比, 是相当地小了, 结果使整个装置体积减小。包括内装的电子计算机在内, 占地面积为 $1.2 \times 1.1 \text{ m}^2$, 高为1.4米, 是分步重复光刻机中最小的一类。对于昂贵的净化车间的投资来说, 优点是显而易见的。

(5) 环境温度条件 1:1投影透镜使用390nm到450nm之间曝光透镜设计, 同时由于光学系统是由足够的温度补偿结构的材料所构成, 对准方式是双视场瞄准的TTL方式, 所以可完全适应普通的集成电路生产线温度条件。在环境温度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的条件下, 可达到 $0.04 \mu\text{m}$ 的测量精度, 因此不再需要特殊的温度控制房间。

(6) 掩模板 图3示出了在掩模板上能够描绘出的成象图形的大小。用半径为16.3mm的圆周及距此圆的圆心5.5mm处用弦所包围的范围内能够描绘图形, 根据用户的要求可作如下选择: 若为正方形, 则最大图形为 $10 \times 10 \text{ mm}^2$; 若需长方形图形, 则最大图形为 $19.7 \times 7.5 \text{ mm}^2$ 。

为了保证在集成电路制作中的高成品率, 最近, 引人注目的是采用了胶片薄膜, 使掩模板的寿命可延长许多倍, 同时防止了

颗粒对曝光的影响。

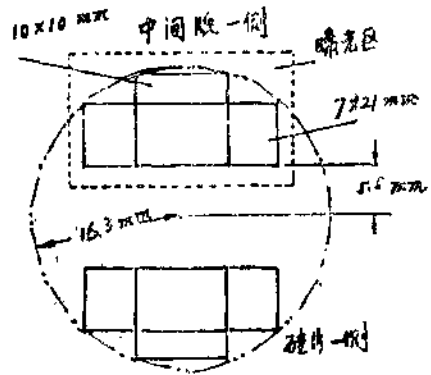


图3 成象图形的大小

参 考 文 献

- [1] 柴田 昭太郎 (日) 《电子材料》1984, Vol. 23, NO.3, P.22.
- [2] P.S.Burggraaf, Semiconductor International, 1982, NO.8, P.41.
- [3] H.L.Stover, N.E.David, T.H.Lewis, Solid State Technology, Vol.25, No.10, P.124 (1982).
- [4] P.S.Burggraaf, Semiconductor International, 1983, No.4, P.59.
- [5] J.P.Reekstin, J.H.Mc Coy, Solid State Technology Vol.24, No.8, P.68 (1981)
- [6] 小出 正倍 (日) 《电子材料》1983, Vol.22, NO.3, P.79.
- [7] 沈国雄 《电子与自动化》1984, No.2, P.14.

分步重复投影光刻物镜设计

科学院光电研究所 王效才

摘 要

本文从超大规模集成电路对投影光刻物镜的要求出发,讨论光刻物镜的高级象差校正及成象质量控制问题。为保证光刻物镜全视场的高分辨率要求。各种象差不能单纯以焦深和焦宽衡量,应考虑到它们相互间的符号和绝对值之差。光刻物镜的调制传递函数要求应以全视场焦深范围内 $MTF \geq 40\%$ 作为质量控制指标。最后以10倍光刻物镜设计结果为例,说明上述论点的可行性。

一、引 言

缩小投影光刻物镜是分步重复缩小投影光刻机的心脏部分。基于它的衍射极限成象质量和设计制造的困难,在半导体设备制造工业中,越来越被更多的光学技术人员所重视。超大规模集成电路对缩小投影光刻机的主要技术要求是高分辨率、高对准精度、高生产效率。若转变成对光刻物镜本身的设计要求,则高分辨率要求大的数值孔径,使用短波长曝光。高对准精度要求小的畸变,小的倍率误差和远心光路。高生产效率要求大的象场、大的数值孔径、高的透过率。

与上述要求相适应的投影光刻物镜,在国外以西德卡尔蔡司公司生产的No107782 ($NA=0.28$ 视场 $10 \times 10mm^2$ 、 $10\times$),No.107306 ($NA=0.2$,视场 $20 \times 20mm^2$ 、 $5\times$)为最著名,它已为美国的4800DSW (GCA公司)。800SLR (TRE公司)日本RA101(日立公司)等分步重复投影光刻机所采用^[1]。在此同时美国Tropel公司^[2]、IBM公司^[3]、日本的日本光学工业公司,东德耶那蔡司公司^[4]也均研制出多种投影光刻物镜。随着超大规模集成电路微细化程度的缩小,以及硅的微细加工已进入亚微米研究阶段,为

适应亚微米光刻技术的发展,近年来日本光学工业公司、卡尔蔡司公司、Cerec公司均研制了数值孔径更大的光刻物镜。当然亚微米的光学光刻能否实现还要靠光刻工艺的继续发展,新型抗蚀剂的出现。

我国这方面研究工作起步较晚。在微电子工业用光刻物镜的设计和制造方面,浙江大学^[5]、清华大学^[6]、福建光学技术研究所^[7]、上海光学仪器厂^[8]、1445所^[9]、长春光机所^[10]、科学院光电所^[11]都做过许多工作。我在长春光学精密机械学院学报83年No.3发表了“近双远心光刻物镜系列设计”一文。重点探讨双远心光刻物镜设计思想以及光刻物镜结构型式选择等。本文拟就光刻物镜的高级象差校正和象质评价方法作进一步讨论。

二、光刻物镜结构特点

投影光刻物镜是近年来出现的高性能特种镜头之一。所谓特殊是因为它不同于通常显微物镜和照相物镜。它的光学系统结构型式必须保证下述三个条件能够实现。

①在满足大孔径,大视场的光学性能要求下,能否控制高级象差产生和校正,提高光学系统的调制对比度,达到全视场范围内衍射极限成象质量。

②在满足高分辨率、高对比度基础上,能否减少畸变,实现象方远心光路,确保套刻精度要求。

③在满足小畸变、小象差,远心光路的前提下,能否解决对物镜极严格的加工装调公差要求。

当然能够满足光刻物镜的性能和技术指标的结构型式是多种的,解决办法也是很多。这方面工作前文^[11]已做过仔细分析。本文推荐的光学系统结构型式不同于双远心光刻物镜正、负、正、负光焦度分配方案。而是在离开双高斯物镜较大间隙位置,增加两个负组元,拉开双高斯物镜前后组之间距离,并在其间置入负组元,形成负、正、负、正光焦度分配方案,光学结构如图4,特点如下:

①两片分离负组元在前,它与一片负组元在前相比,在担负同样负光焦度情况下,变数增加,半径变平。与双高斯物镜构成反远距系统,加长了象方工作距离。控制远离程度,使轴外光束扩大,减小了进入双高斯物镜的视场角。

②拉开双高斯物镜前后组之间距离,置入负组元。主要目的是增加了校正 S_{II} 的变数,避免了两个凹面的过度弯曲造成的子午光束和弧矢光束的分布不平衡。使得子午象差在校正好情况下,弧矢象差也能得到较好的校正。

③光焦度后移,使照相物镜结构显微物镜化。把前组变成长焦距系统,作为校正象差光组,而后组承担主要光焦度。一方面导致象方远心光路的容易实现,另一方面对校正象差有利。

④增加光学系统总长,分裂正透镜片数,避免光束的骤烈发散或收敛。使得各组元光焦度分配均匀,降低高级象差的产生,尽量做到每面产生的象差绝对值最小。

⑤选用较低折射率玻璃,增加光学系统透过率。虽然高折射率玻璃对校正象差有

利,但短波部分透过率低。

三、高级象差校正

象差和结构参数是复杂的非线性关系。如何控制高级象差产生和校正是光学设计者很费力的事情。尽管电子计算机引入光学设计中来,出现了自动象差校正,代替了设计人员的烦琐劳动。但最终还不能替代人的积极思维。例如光学自动设计程序还完全是人工给象差目标值。这个值的给定主要是靠象差理论和设计者经验。在光刻物镜设计实践中。我们应用王之江教授提出的将球面本征象差看作球差和衍生二级象差等高级象差理论^[12]来讨论高级象差校正问题。找出规律性。王之江教授指出,对本征二级象差来说,都由轴外本征球差 S_I^{IV} 和高级球差 S_I^I 所引起的,见下式:

$$\text{高级彗差: } S_I^I = AS_I^I$$

$$\text{第一轴外彗差: } S_I^{II} = AS_I^{II}$$

$$\text{轴外场曲: } S_I^{III} = A^2S_I^{IV} + S_{II}^{III},$$

$$\text{第二轴外球差: } S_I^{IV} = 2A^2S_I^I$$

$$\text{第二轴外彗差: } S_I^{II} = 2A^3S_I^I$$

$$\text{轴外象散: } S_I^{III} = 2A^4S_I^I + A^2S_I^{II}$$

$$\text{轴外畸变: } S_V^{IV} = A^5S_I^I + A^3S_I^{II} + \frac{1}{2}S_{II}^{III},$$

$$\text{第一轴外球差: } S_I^{IV} = -S_{II}^{III} \cdot 4\left\{\frac{1}{2}(i-i') + u\right\} = C \cdot S_{II}^{III}$$

$$\text{高级球差: } S_I^I = B \cdot S_I^I$$

式中A光瞳位移量, B, C分别与结构参数有关的系数。对大孔径小视场带角标号“III”象差影响是主要的, 对大视场小孔径面言, 带角标号“IV”象差影响是主要的。高性能光刻物镜要求全视场范围内衍射极限成象质量, 两者均不能忽略。

分析上述公式看出。对各种高级象差的

校正根本问题是 S_I^I 和 S_I^{II} 的校正, 而 S_I^I 和 S_I^{II}

又分别与初级球差系数 S_I 、初级场曲系数 S_{II} 有关。总之, S_I 和 S_{II} 的降低或者控制一定数值则是探索高级象差校正和平衡的关键途径。

弧矢象差校正办法是控制轴上球差数量, 在校正初级象散 S_I^I 、初级彗差 S_I^{II} 的基础上, 使得各个视场轴外球差与轴上球差符号相同, 绝对值近似相等。由象差理论^[1, 2]可知:

$$\text{轴外彗差: } 2nuk_T = y^2 [3S_I^I \eta + (5S_I^{II} + 3S_I^{IV}) \eta^3]$$

$$2nuk_S = Z^2 [S_I^I \eta + S_I^{II} (S_I^I + S_I^{II}) \eta^3]$$

$$\begin{aligned} \text{“初级”轴外球差: } 2nu^2 LA_T &= y^2 [S_I^I + (5S_I^I + S_I^{II}) \eta^2] \\ 2nu^2 LA_S &= Z^2 [S_I^I + (S_I^I + S_I^{II}) \eta^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{象面弯曲: } 2nu^2 X_I &= \eta^2 (3S_I^I + S_I^{II}) \frac{1}{2} \eta^4 \\ &\quad (5S_I^I + S_I^{II}) \\ 2nu^2 X_S &= \eta^2 (S_I^I + S_I^{II}) \frac{1}{2} \eta^4 \\ &\quad (S_I^I + S_I^{II}) \end{aligned}$$

由公式看出影响子午和弧矢象差差异的主要原因是带角标“II”量, 如 $S_I^I, S_I^{II}, S_I^{IV}$ 。

这些量主要与 S_I^I 有关。故控制 S_I^I 的校正, 找出最合理的 S_I^I 值对同时校正子午和弧矢象差是较好办法。值得指出的是上述表达式, 都是单一球面推导出来的, 而光刻物镜是由许多折射面构成。因此我们首先选择那些对象差贡献大的特征折射面, 采用上述办法控制和校正象差。对 A 值很小, 象差贡献不大的折射面不一一去考虑。

四、象差控制指标

通常把满足瑞利极限的物镜, 叫做衍射极限成象质量物镜。投影光刻物镜属于此

类。因此在评价光刻物镜的各种象差时常以瑞利极限作为准则。实际在光学设计过程中发现, 尽管光学系统满足了瑞利极限, 但在采用光学传递函数精密评价成象质量时, 往往又达不到设计要求。因为传递函数评价是反映各种象差对成象质量影响的综合结果。假定几十种象差不考虑符号, 都以瑞利极限为衡量标准, 那么综合象点质量超过瑞利极限。

任何一个复杂光学系统, 若将所有象差都校正为零是不现实的。所以高性能镜头各种象差的残余量不仅要控制绝对值大小, 而且必须注意到各种象差相互间的符号和绝对值之差。在高性能光刻物镜设计中, 若实现衍射极限成象质量, 有几种象差平衡相当困难。轴外象差比轴上象差校正困难, 弧矢象差比子午象差平衡困难, 高级象差比初级象差控制困难, 非对称结构满足消除畸变和彗差困难。为了同时克服上述困难, 使各种象差的总弥散之和小于瑞利极限, 需探讨一个规律, 制定出一个合理的象差控制指标, 才能满足全视场衍射极限成象质量。

根据前节分析指出, 控制初级球差 S_I^I , 象面弯曲 S_{II} 的大小, 是校正高级象差的关键途径。而且这两种象差又是比较容易控制的。因此制定以球差为基本量, 提出其余各种象差与球差的绝对值之差和符号区别, 作为象差控制指标和设计目标值。指标如下:

①各个视场的子午轴外球差、弧矢轴外球差与轴上球差符号相同, 绝对值差小于 $\frac{1}{3}$ 焦深。

②各个视场的子午象面弯曲, 弧矢象面弯曲与轴上球差符号相同, 绝对值差小于 $\frac{1}{3}$ 焦深。

③近轴点彗差、各个视场的子午彗差、弧矢彗差绝对值和它们之间的差值不能超过 $\lambda/20$ 。

④畸变不允许有超过5级的高级量, 初高级量平衡后, 残余量应远小于由于偏心误差造成的切向畸变量。

⑤根据汞灯单色光谱辐射带宽,算出的各种象差的色变化,与主波长所有象差的绝对值之差不大于 $\frac{1}{3}$ 焦深。

应该指出的是,上述象差控制指标,只能是针对光刻物镜设计自定的参考指标。多次设计实践认为是可行的,所以作为设计经验提出。我们设计10倍分步重复投影用光刻物镜采取了该象差控制指标,设计结果见光学传递函数曲线图2。看出全部视场传递函数均小于理想镜头离焦 $\lambda/4$ 传递函数曲线。说明若满足提出的象差控制指标是可以达到全视场衍射极限成象质量的。

五、一个设计例子

我们为分步重复光刻机设计光刻物镜的光学参数为:倍率 $\Gamma=10$,数值孔径 $NA=0.28$,象场直径 $\phi=145$,光谱范围 $4358=50\text{Å}$ 象质要求:全视场直径上,光刻线条宽度 $1.25\mu\text{m}$ 时焦深范围内,调制传递函数 $MTF=0.4$ 。

图1,表示空间频率400对线/毫米,不同视场子午和弧矢MTF。

图2,表示不同视场,空间频率与MTF关系曲线。

图3,表示空间频率400对线/毫米,不同视场离焦量与MTF关系曲线。

图4,光学系统结构图

由图1指出,子午和弧矢象差已得到较好的平衡,弧矢象差优于子午象差,克服了双高斯改进型结构在子午象差校正好情况下弧矢象差校正困难的缺点。全视场范围内特征频率500对线/毫米时,调制传递函数 $MTF \geq 0.4$,已优于卡尔蔡司107782报道的400对线/毫米 $MTF=0.4$ 的指标^[13]。

图2示出各个视场,不同空间频率对应的传递函数曲线。均在理想镜头离焦量为 $\delta=\lambda/2\mu^2$ 传递函数曲线以内,证明本设计的光学系统已达到衍射极限成象质量。

图3看出 0.85ω 视场内,象面前后离焦

趋势一致。说明光学系统轴上和轴外象差校正一致。 0.5ω 视场以内能够满足调制传递函数 $MTF=0.4$ 要求的焦深范围还可增大。

图4看出,本光学系统保证了象方远心光路,同时工作距离较长 $l'>30\text{mm}$ 。这个优点,对整机布置,调焦、调平光路,满足轴上和轴外数值孔径一致,避免调焦过程引入倍率误差带来益处。

本文写作中,曾与林大健同志做过有益的讨论,特致谢意。

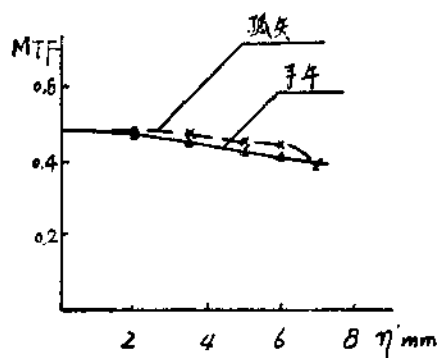


图1(a) 特征频率400对线/毫米同一焦面位置、不同视场子午和弧矢MTF

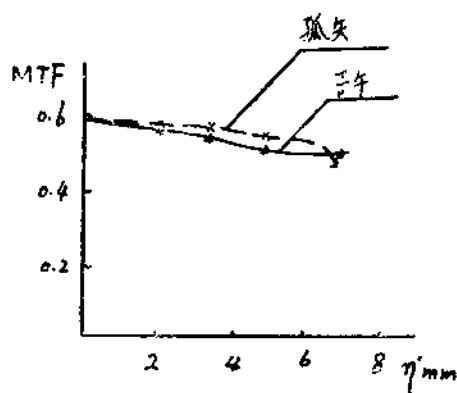


图1(b) 特征频率500对线/毫米,同一焦面位置,不同视场子午和弧矢MTF

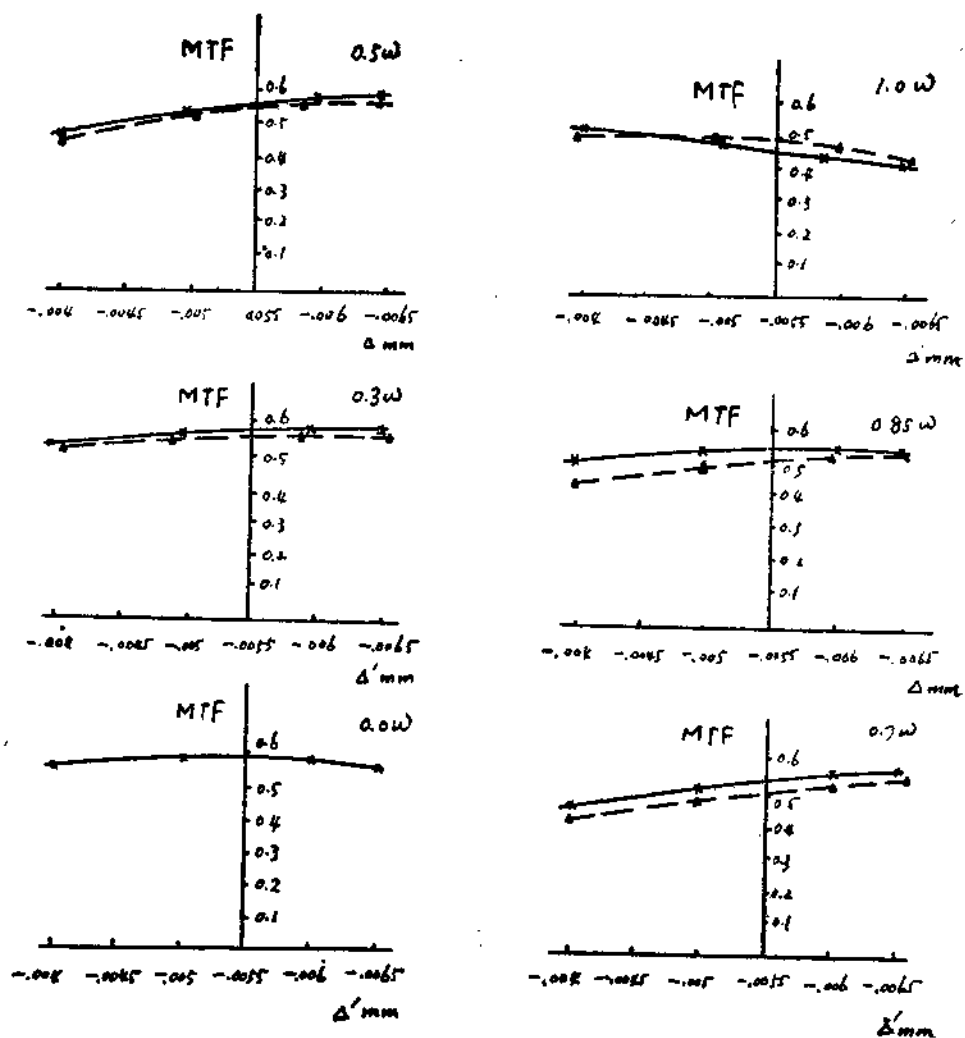


图8 特征频率为400对线/毫米,不同视场不同离焦位置子午和弧矢传递函数曲线

—x—x— 弧矢传递函数曲线
 +—+—+ 子午传递函数曲线

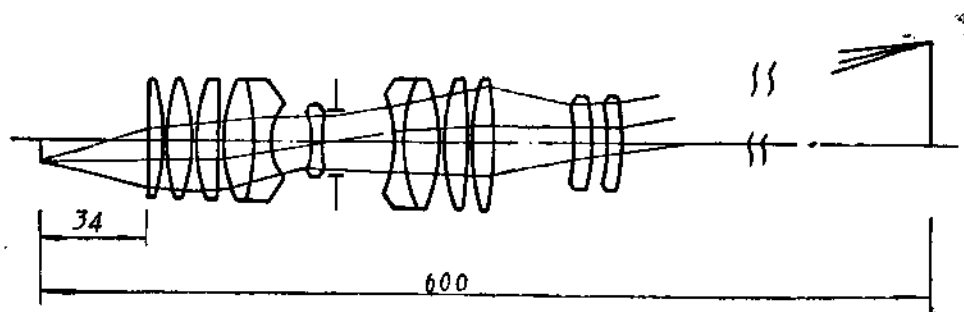


图4 10倍光刻物镜光学系统图

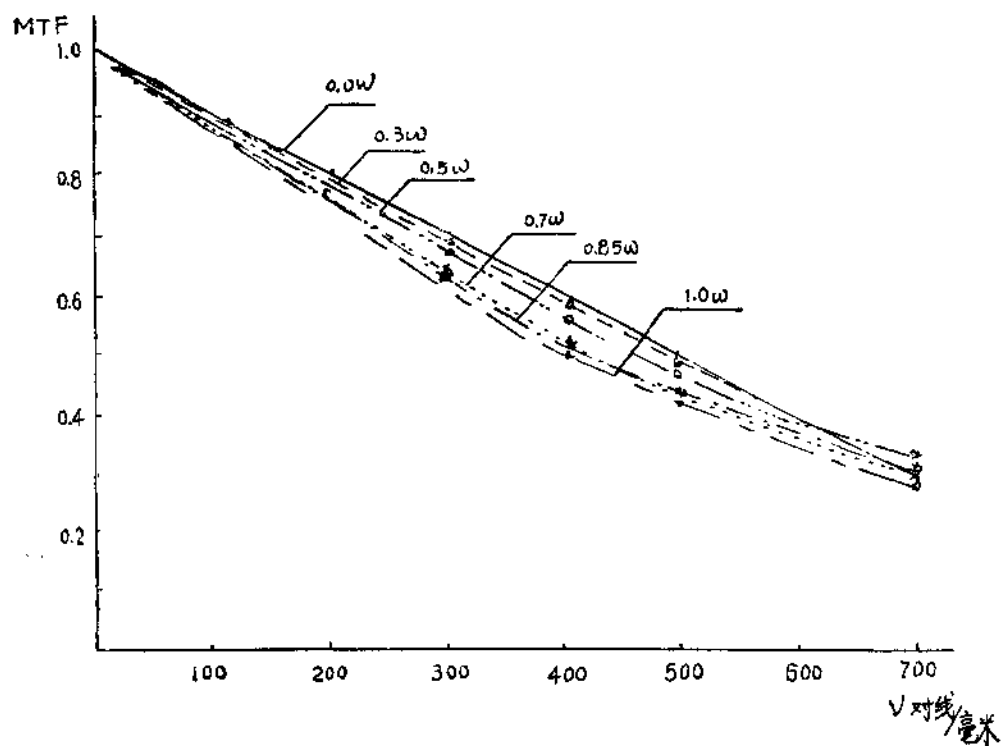


图 2(a) 不同视场子午方向传递函数曲线

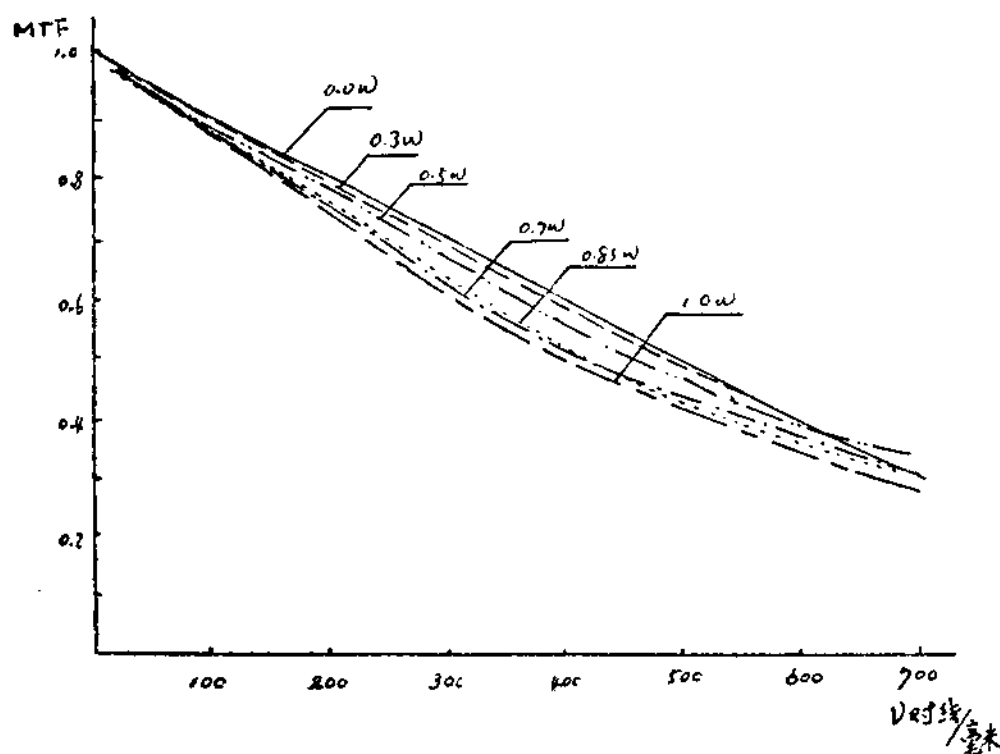


图 2(b) 不同视场弧矢方向传递函数曲线

微细光刻照明系统 汞灯“弧闪”的初步研究

——兼谈恒光强控制系统的设计原则

中国科学院光电技术研究所 周健 王传贤

摘 要

本文通过分析超高压短弧汞灯的固有特性及其与控制系统的关系,找出弧闪形成的外部条件和内部因素,尝试性地对弧内的机理作一探讨;在假设其它影响曝光动态重复精度的因素不变的条件下,定量分析弧闪对动态重复精度的影响程度。最终试图为设计恒光强控制系统提供可靠的、有实际意义的参考,从而通过某种有效的控制方式,使该系统在满足光强静态精度要求的同时,具有较高的动态重复精度。

概 述

以超高压短弧汞灯(以下简称汞灯)作为发光源,在大规模集成电路光刻设备的曝光系统中已用得十分普遍,其曝光能量的控制方式之一就是采用恒光强技术。据文献〔1〕、〔2〕、〔3〕报道,恒光强调节系统的光强静态精度已达 $\pm 1\%$ 。但在JK-1型光刻机系统^{〔1〕}的研制过程中发现存在光强的闪动——“弧闪”,其维持时间约33~55毫秒,基本上与国外商品报道中的参数一致。就一般曝光时间较长的恒光强控制系统而言,若光强静态精度满足要求,其曝光效果是令人满意的,重复曝光能量的偏差很小;但象DSW这样的系统,其曝光时间很短(0.2~0.4秒),即使系统的静态精度很高,弧闪的存在将使重复曝光能量的偏差增大,难以满足重复曝光能量一致的要求,对利用快速的分步重复曝光来提高生产率就失去意义,可见要获得良好的重复曝光效果,

就得提出曝光能量动态重复性的要求。影响动态重复性的因素很多,本文只就“弧闪”进行研究,并从两方面进行:其一是灯的固有特性与弧闪的关系,其二是控制系统与弧闪的关系。同时有必要考虑的节约能量而设置的“等待——曝光”模式对控制系统的影响。

一、汞灯的固有特性与弧闪的关系。

汞灯的发光机理及微观粒子运动十分复杂,为了研究的方便,我们把它作为“黑箱”来处理,只考虑它的外部特性。

1. 汞灯的静特性

通过200瓦和350瓦汞灯的大量实验发现,汞灯的外部特性——光强与电流之间、光强与电功率之间,电流与电压之间——表现为磁滞回线非线性(见图1),非线性的间隙是环境温度和时间的函数。冷却条件的改变引起间隙的明显变化,且功率越大,非线性越严重。实验时200瓦的是旧灯,350瓦的是新灯。