

激光直写邻近效应的校正*

杜惊雷 黄奇忠 姚 军 张怡霄 郭永康
(四川大学物理系, 成都 610064)

邱传凯

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家开放实验室, 成都 610209)

崔 铮

(Central Microstructure Facility, Rutherford Appleton Lab. Chilton, Didcot, OX11 0QX, UK)

摘 要 邻近效应是限制光刻系统分辨力的一个重要因素, 它也限制了激光直写在亚微米和亚半微米光刻中的应用。分析了激光直写邻近效应产生的原因, 指出它和电子束直写及投影光刻的区别, 提出了一种简便有效的邻近校正方法。实验表明, 通过光学邻近校正(OPC), 利用微米级激光直写系统, 制作出了 $0.6 \mu\text{m}$ 的实用光刻线条。

关键词 激光直写, 亚微米, 邻近效应, 光学邻近校正。

1 引 言

激光直写光刻系统在微光学元件和超大规模集成电路(VLSI)掩模的制作方面应用甚广^[1, 2], 与电子束直写系统相比, 它具有性能稳定、造价便宜、结构简单、使用方便等优点。然而, 由于激光直写的分辨力没有电子束直写高, 常用的激光直写设备可制作线条的特征尺寸在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 量级, 用于制作亚微米器件有一定困难。制约激光直写精度提高的一个重要因素就是直写过程中的邻近效应。因此, 为了提高激光直写系统的分辨能力, 扩大其在亚微米光刻中的应用范围, 增强其在衍射光学器件制作方面的优势, 邻近效应的校正研究是一个十分重要的课题。

针对激光直写光刻不同于投影光刻和电子束直写的特点, 本文提出用直写数据设计预补偿方法校正激光直写邻近效应, 该方法使用十分方便, 对光刻设备及工艺没有更高的要求。实验表明效果良好, 在微米级光刻系统上实现了亚微米光刻, 使利用微米级激光直写系统制作 $0.5 \mu\text{m}$ 特征尺寸的线条成为可能, 提高了激光直写系统的分辨力, 可以进一步发掘这种有较高性能价格比的光刻设备的潜力。

2 激光直写中的邻近效应分析

ISI-2802 型激光直写系统是中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验

* 国家自然科学基金、教育部博士点基金和中国科学院微细加工光学技术国家重点实验室资助项目。

收稿日期: 1998-04-15; 收到修改稿日期: 1998-06-01

室从加拿大 Intertech Systems Inc. 引进的, 该系统由直写光路(包括一台输出波长 442 nm 的 He-Cd 激光器、声光调制器、多面镜扫描器等)、视频观察和对准系统、定位和自动调焦系统及系统控制计算机等几个部分组成。激光直写的工作流程是:

- 1) 用计算机产生设计的微光学元件或待制作的 VLSI 掩模结构数据;
- 2) 将数据转换成直写系统控制数据, 由计算机控制高精度激光束在光刻胶上直接扫描曝光;
- 3) 经显影和刻蚀将设计图形传递到基片上。

在激光直写过程中, 由于直写激光束有一定的焦斑直径(激光波长为 442 nm, 物镜的数值孔径为 0.5, 焦斑直径约 $0.67 \mu\text{m}$), 因此该系统一般只能制作 $1 \mu\text{m}$ 以上的线条。若加工线条的特征尺寸小于 $1 \mu\text{m}$ 时, 则将出现明显的邻近畸变, 图 1 是激光直写邻近效应产生的示意图, 其中图 1(a) 显示了光刻图形的邻近畸变现象; 图 1(b) 是激光束扫描光斑分布示意图; 图 1(c) 显示了疏密线条调制深度的差异, 调制深度定义为 $(H_{\max} - H_{\min}) / (H_{\max} + H_{\min})$ 。由图可知, 激光直写邻近效应主要表现在四个方面:

- 1) 由于焦斑尺寸与光刻线条的尺寸相近, 导致扫描曝光分布不均匀, 光刻胶内生成的图形外边角圆化, 如图 1(a) 中 1 处所示;
- 2) 由于线条尾部曝光量的相对不足造成尾部缩短, 如图 1(a) 中 2 处所示;
- 3) 抗蚀剂图形的内边角处由于曝光量相对过剩而畸变, 如图 1(a) 中 3 处所示;
- 4) 密集线条的抗蚀剂浮雕的调制深度随线条间距减小而变小。

激光直写的邻近效应与电子束光刻邻近效应和投影光刻中的光学邻近效应都有一定差异, 主要区别在于它们产生的机理不同。一般电子束直写系统的电子束波长都小于 0.01 nm , 其能量在 20 KeV 以上, 电子束曝光时, 抗蚀剂内发生的是辐射化学反应, 其散射、特别是基底的背散射是引发邻近效应的关键^[3]。投影光刻的邻近效应主要由成像过程中的高频信息的损失引起, 这种高频信息的丢失降低了光刻图形质量^[4]。激光直写的光源是 442 nm 的 He-Cd 激光, 其光子能量仅为 $E = hc/\lambda = 2.8 \text{ eV}$, 因此, 它曝光时, 抗蚀剂内发生的是光化学反应而不是辐射化学反应。它的背散射光也并不太严重, 引起激光直写邻近效应的主要原因是激光焦斑自身有一定尺寸(爱里斑分布), 这容易造成曝光量分布不均并导致抗蚀剂图形的畸变, 限制了直写光刻的分辨率(如图 1 所示)。由此可见, 激光直写邻近效应是不同于电子束直写和投影光刻的一个新问题。

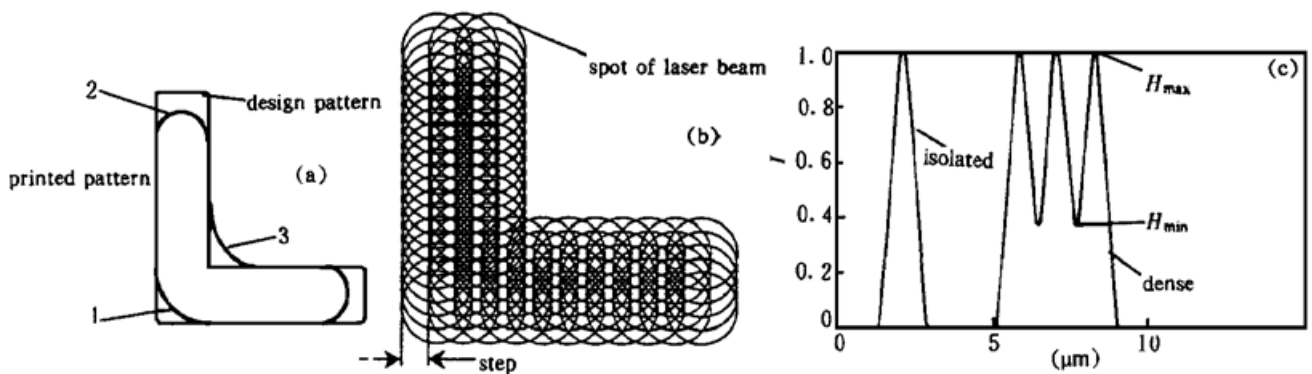


Fig. 1 Proximity effect in laser direct writing. (a) Phenomena, (b) Laser beam scanning spot distribution, I is normalized absorption energy density of corrosionresist, (c) Modulation depth

3 激光直写光学邻近效应方法的研究

电子束光刻的邻近校正通常采用减少背散射和控制曝光剂量予以实现, 投影光刻则采用波前加工手段之一的掩模优化技术来减少邻近畸变^[4]。由于激光直写不同于电子束光刻和投影光刻, 因此, 在抗蚀剂分辨率足够的情况下(例如, AZ1400 正性抗蚀剂的最小分辨尺寸可达 $0.3 \mu\text{m}$), 要想减少激光直写的邻近畸变则可采用以下方法:

- 1) 缩小激光束的焦斑尺寸和改善焦斑的光强分布;
- 2) 控制直写过程中的曝光量;
- 3) 抗蚀剂配套技术。

缩小激光束的焦斑尺寸和改善焦斑的光强分布是减少邻近畸变的最直接方法, 但它涉及到对光刻系统的修改, 在理论和应用方面都存在一些问题, 例如, 加大物镜的数值孔径会使焦深变短, 缩短激光波长要更新激光器和使用新的抗蚀剂等。控制直写过程的曝光量方法已经在电子束直写中采用以减少背散射, 在激光直写中控制曝光量也可调节因焦斑过大引起的曝光分布畸变现象, 但由于通常的激光直写系统无法实时调节扫描光束的能量, 因此不得不采用多次曝光方法, 使工艺复杂化。此外, 采用诸如反差增强层、多层抗蚀剂等技术也可相对减少邻近畸变现象, 提高直写抗蚀剂图形的质量, 当然用这些方法都相对增加了工艺方面的要求。

经综合考虑, 本文作者提出采用直写结构数据预补偿的邻近效应校正方法, 该方法对工艺无任何特殊要求, 只需选定适当的显影条件即可实现邻近效应校正, 是一种简单而有效的方法。

图2是用以说明激光直写邻近效应校正方法的样例, 图2(a) 是设计的直写曝光图形, 线条宽度为 $0.6 \mu\text{m}$, 图2(b) 是预补偿的直写曝光图形, 黑色线条代表直写时曝光的区域。为补偿外边角处曝光剂量的不足造成的圆化和线尾缩短现象, 在边角处扩大了直写曝光范围[如图2(b)中的1处小直尺形, 其数据可由计算机优化产生^[5]]。而内边角的畸变则通过减少其附近的直写曝光区域来实现[如图2(b)的2处所示]。此

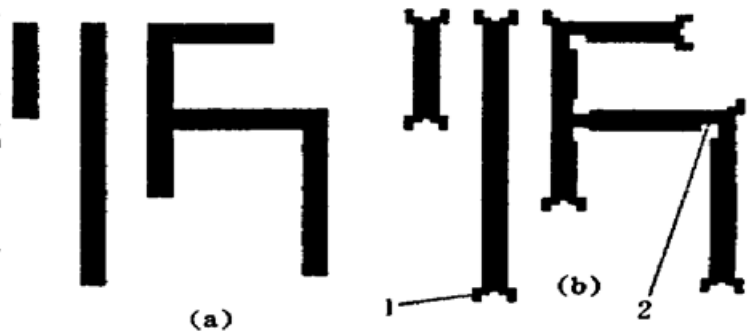


Fig. 2 (a) Design pattern, (b) Direct writing pattern

此外, 当加工的线条的特征尺寸在 $0.5 \mu\text{m}$ 以上时, 选择适当的显影条件即可满足密集线条调制深度的要求。此时, 由于激光束光点直径相对线条宽度来说不大, 抗蚀剂中的散射及基底的背散射引起的相邻线条的影响较弱, 线条的调制深度尚好, 因此, 疏密线条间的宽度基本一致而无需特别校正。

应该注意到, 上述校正方法与投影光刻的校正方法有一些区别, 投影光刻的邻近校正需要修改掩模, 在掩模上添加一些亚分辨的衬线, 由于这些衬线十分微细(衬线宽度约 $0.1 \mu\text{m}$ 左右), 给掩模设计和制作带来困难。而激光直写过程无需掩模, 因此设计简单, 其修改结构数据也是在计算机上完成的, 只要微细结构的特征尺寸不小于直写曝光步进, 即使优化的结构数据形状不很规范也不存在任何加工困难, 这是这种校正方法付诸实用时的优越性。

4 实验及分析

实验中直写数据的图形如图 2 所示, 设计线条宽度为 $0.6 \mu\text{m}$, 激光直写的曝光步进为 $0.1 \mu\text{m}$, 负片和正片的曝光剂量分别约为 $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 和 $90 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。图 3、图 4、图 5、图 6 分别是曝光、显影后的未校正的和校正后的对照图形。

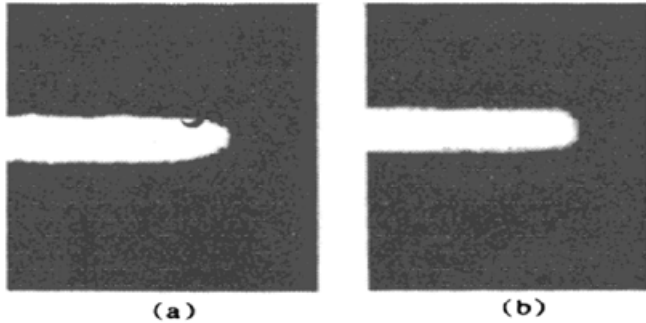


Fig. 3 Line end rounding, (a) Printed pattern before OPC, (b) Printed pattern after OPC

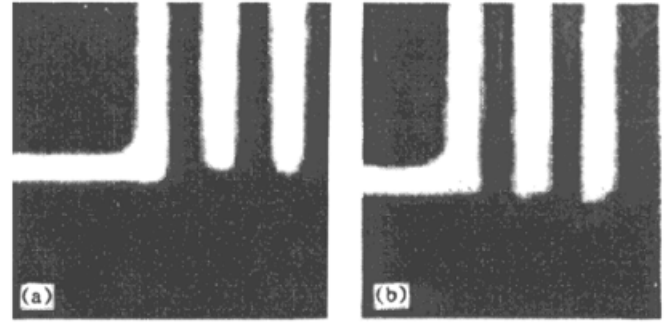


Fig. 4 Line end shortening, (a) Printed pattern before OPC, (b) Printed pattern after OPC

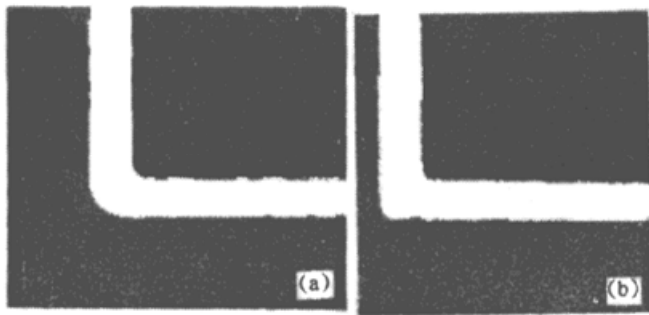


Fig. 5 Corner rounding, (a) Printed pattern before OPC, (b) Printed pattern after OPC

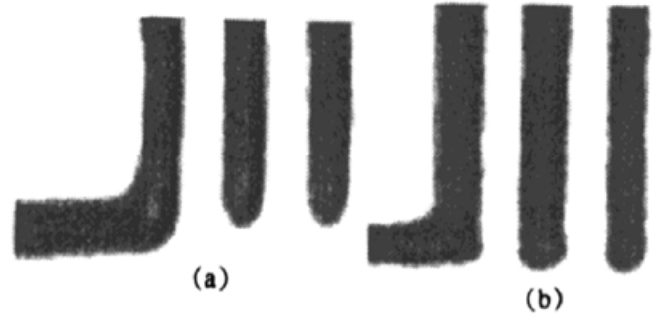


Fig. 6 (a) Bright field printed pattern before OPC, (b) Bright field printed pattern after OPC

图 3 显示的是校正前后的线尾圆化情况, 可以看出, 校正前线尾圆化比较严重, 校正后的这种畸变现象已基本消除。图 4(a) 显示了校正前线尾缩短效应, 设计时两个线条的长度与直尺线条长度一致, 但邻近效应使两个线条长度明显变短。图 4(b) 是校正后的光刻图样, 显然, 线尾缩短已得到了很好校正。图 5 是内外边角畸变现象校正前后图样的对比, 从图中可以看出, 用这种方法校正此现象十分有效, 大大减少了边角畸变。图 6 是激光直写的负片校正前后的图样, 其校正方法与正片校正方法基本相同, 图中显示校正后邻近畸变现象得到了控制, 说明该方法对校正负片和正片的激光直写邻近效应同样有效。

从上述实验结果来看, 采用直写数据预补偿方法可有效地减少激光直写邻近畸变, 其中对孤立线条的校正比对存在相邻线条的影响的密集线条的校正效果要略好些, 这说明若线条的特征尺寸进一步减少时, 邻近校正时将不得不仔细考虑相邻线条曝光量分布的影响。

结 论 在深入分析激光直写邻近效应和电子束直写邻近效应、投影光刻光学邻近效应产生机理的差别的基础上, 提出采用直写数据设计预补偿方法实现激光直写邻近效应的校正, 实验表明其校正效果良好。与投影光刻和电子束直写不同, 这种方法使用十分简单且不加重光刻工艺负担。该方法的提出, 可充分发掘现有激光直写设备的潜力并扩展其应用范围, 为

在微米级系统上实现亚微米及半亚微米光刻(即利用 ISI-2802 型激光直写系统制作 $0.5 \mu\text{m}$ 以下特征尺寸的线条)奠定了良好基础,使利用该系统制作亚微米衍射光学元件成为可能。

参 考 文 献

- [1] Langlois P. DOE fabricated by laser writing and other technique. *Proc. SPIE*, 1992, **1751**: 2~ 12
- [2] 郭履容, 郭永康. 微光学的发展现状及展望. *光子学报*, 1994, **23**(Z2): 43~ 52
- [3] 顾振军, 孙 猛. 抗蚀剂及微细加工技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1989. 156~ 157
- [4] Levenson M D. Extending the lifetime of optical lithography technology with wavefront engineering. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, **33**(12B): 6765~ 6773
- [5] Babin S. Measuring the proximity effects in laser pattern generation. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(9): 2508~ 2512

Optical Proximity Correction in Laser Direct Writing

Du Jinglei Huang Qizhong Yao Jun Zhang Yixiao Guo Yongkang
(Physics Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

Qiu Chuankai

(State Key Lab. of Optical Technology on Microfabrication, Institute of Optics and Electronics,
The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

Cui Zheng

(Central Microstructure Facility, Rutherford Appleton Lab. Chilton, Didcot, OX11 0QX, UK)

(Received 15 April 1998; revised 1 June 1998)

Abstract Proximity effect is an important factor which limits optical lithography resolution, and it also limits the applications of laser direct writing system in submicron and half-submicron optical lithography. The production mechanism of proximity effect in laser direct writing is analyzed, its differences with projection optical lithography and electron beam lithography pointed out, and a convenient and effective optical proximity correction (OPC) method presented. The experimental results show that the feature size of 0.6 micron can be got by using OPC method in ISI-2802 laser direct write system.

Key words laser direct writing, submicron, proximity effect, optical proximity correction.