

电子束光刻三维仿真研究

宋会英, 杨 瑞, 赵真玉

(中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院, 山东东营 257061)

摘 要: 本文利用 Monte Carlo 方法及优化的散射模型, 对电子束光刻中电子在抗蚀剂中的散射过程进行了模拟, 通过分层的方法, 对厚层抗蚀剂不同深度处的能量沉积密度进行了计算, 建立了电子束光刻厚层抗蚀剂的三维能量沉积模型. 根据建立的三维能量沉积模型, 采用重复增量扫描策略对正梯锥三维微结构进行了光刻仿真. 理论分析和仿真结果表明, 利用分层的三维能量沉积分布模型能更精确地实现电子束光刻的三维仿真.

关键词: 电子束光刻; 邻近效应; 曝光强度; 三维能量沉积模型

中图分类号: TP305.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 03-0617-03

Three-Dimensional Simulation Study on the Electron Beam Lithography

SONG Hui-ying, YANG Rui, ZHAO Zhen-yu

(College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum (East China), Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: The electron scattering process of electron beam lithography in the thick resist was simulated by the Monte Carlo method with the optimized electron scattering model, the energy deposition density at the different depths of thick resist was calculated by using of the stratified method, and the three dimensional energy deposition model of the thick resist in the electron beam lithography was established. According to the three dimensional energy deposition mode, we have simulated the exposure of a three dimensional micro-structure of trapezoidal pyramid by the overlapped increment scanning strategy. Theoretical analysis and the simulation results show that the three dimensional energy deposition model based on the stratified method can realize the three dimensional simulation of the electron beam lithography more accurately.

Key words: electron beam lithography; proximity effect; exposure intensity; three dimensional energy deposition model

1 引言

在微细加工技术中, 电子束光刻技术是目前最好的图形制作技术, 在实验室环境下, 已经能将电子束聚焦成 2nm 的束斑^[1], 它在微细加工和纳米器件的制备方面都呈现出重要的应用价值, 同时, 随着微机电系统 (Micro Electro Mechanical Systems, MEMS) 技术的发展, 它必将在三维微结构加工技术中发挥重要作用^[2]. 但是, 电子束光刻机价格昂贵, 实验费用高, 通过仿真技术研究, 可以减少实验次数、降低实验费用, 因此, 需要进行电子束光刻三维仿真技术研究.

MEMS 制造技术是 MEMS 技术的关键和基础, 是当前 MEMS 研究的重中之重. MEMS 技术发展要求制造真正的三维微结构. 要得到精确的三维图形, 需要对三维结构的产生机理及其邻近效应校正技术进行研究. 目前的电子束光刻及其邻近效应校正模型主要是针对集成电路掩模制造技术, 一般只在二维方向上进行建模. 二维模型通常采用在整个抗蚀剂厚度上取平均值的方法进行简化, 在抗蚀剂很薄的情况下, 这种简化引起的误

差很小, 可以忽略, 但随着三维微结构深宽比的增大, 要求采用较厚的抗蚀剂层, 沿着厚层抗蚀剂深度方向上的能量沉积密度变化较为显著, 如用二维模型进行简化, 就会引起较大的误差. 因此, 进行电子束光刻仿真技术研究, 必须考虑厚层抗蚀剂深度方向上能量沉积密度的变化, 建立三维能量沉积分布模型. 本文利用 Monte Carlo 方法和优化的电子散射模型^[3]对电子的散射过程进行仿真, 然后对沿着厚层抗蚀剂深度方向上的能量沉积密度进行分层计算. 对正梯锥三维微结构进行的光刻仿真结果表明利用分层的三维能量沉积分布模型能够更精确地实现电子束光刻的三维仿真.

2 电子束光刻能量沉积模型

当电子束在抗蚀剂表面的 Q 点入射时, 距离 Q 点为 r_1 的 P 点接收到的有效曝光剂量为 $E_1 = F(r_1)$, $F(r)$ 为曝光强度分布函数, 同时, 如果电子束在 P 点入射, 则在 Q 点接收到的有效曝光剂量为 $E_2 = F(r_1)$. 根据昂萨格倒易关系^[4]有 $E_1 = E_2$.

图 1^[2]为有效曝光剂量计算示意图,当电子束对区域 A 进行曝光时,在 P 接收到的有效曝光剂量为:

$$E_p = \int_S F(r) dS \quad (1)$$

其中 S 为曝光区域 A 的面积.若对 P 点附近($F(r)$ 曲面下)的多个区域进行曝光,在 P 点接收到的总有效曝光剂量应为各曝光剂量的累加和.

由以上分析可知,通过如下两个步骤,即可计算版图中任意一点 P 接收到的有效曝光剂量:

- ①移动 $F(r)$,使 P 为其中心点或坐标原点;
- ②用下式计算 P 点接收到的总有效曝光剂量^[4]:

$$E_p = \sum_{i=1}^n \int_{S_i} F(r) dS_i \quad (2)$$

其中, n 为以 P 点为中心, $F(r)$ 曲面内包含的曝光区域的数目.

在电子束三维光刻技术中,首先使用电子束光刻技术进行曝光,再用显影工序以选择性地去除曝光部分(正性抗蚀剂)或者未曝光部分(负性抗蚀剂),从而最终形成三维聚合物结构.在电子束光刻过程中需要考虑根据不同光刻深度用不同的剂量进行曝光,针对在光刻过程中扫描速率不能改变的电子束曝光机,可以采用重复增量扫描技术^[5].在重复增量扫描技术中,某点可能被多次曝光.图形深度不同的位置其曝光次数也不相同,接收到的总曝光剂量是该点多次曝光剂量之和再加上相邻点散射引起的曝光剂量,可表示为^[5]:

$$D_{\text{total}} = KD_d + \sum_{i=0}^n D_i \quad (3)$$

其中 K 为该点被曝光的总次数, D_d 为单次曝光剂量, n 为对该图形有影响的其它图形的曝光总次数, D_i 为第 i 个相邻图形曝光对该图形造成的散射剂量.

3 深度对电子束光刻产生能量沉积的影响

Monte Carlo 方法使用不同随机数反映随机过程的涨落现象,利用这种方法可以产生一个与电子行为相似的散射事件,能较准确地模拟电子在固体中的能量沉积分布.因此,通过 Monte Carlo 方法模拟电子在固体中的散射,是极其有效的方法^[6,7].在模拟数据的基础上,分析不同光刻条件对电子束能量沉积分布的影响,为电子束三维光刻技术中参数的确定提供理论基础,从而大大减少实验的次数.

为了建立电子束光刻的三维能量沉积模型,首先对整个厚层抗蚀剂进行电子束光刻的 Monte Carlo 模拟,然后对不同深度上的能量沉积密度进行计算,从而

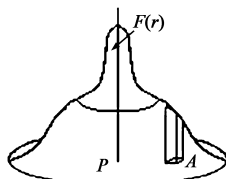


图1 有效曝光剂量计算示意图

比较不同深度上能量沉积密度的差异,最终建立电子束光刻的三维能量沉积分布模型.在模拟过程中,抗蚀剂 PMMA 的厚度为 1000nm,电子束能量为 30keV,束斑半径为 5nm.分别对厚层抗蚀剂不同深度上的能量沉积密度进行计算,图 2 为不同深度处的能量沉积密度分布,图中分别给出了抗蚀剂顶部、中间和底部厚度为 100nm 抗蚀剂层中的平均能量沉积密度.由图 2 可清晰得知,随着抗蚀剂深度的增加,电子束能量沉积密度分布的中间部分逐渐由高而陡向矮而缓变化,随着抗蚀剂深度的增加,这种变化更加明显.

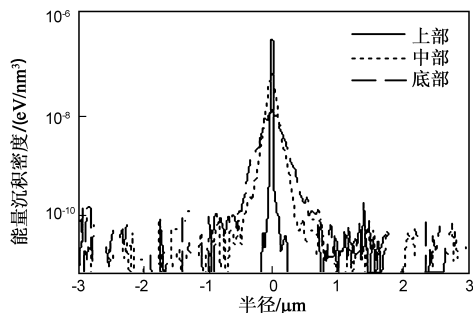


图2 电子束能量沉积分布与深度关系图

邻近效应产生的根本原因是电子在抗蚀剂和衬底中遭受散射,改变了电子原有的运动方向^[8,9].由图 2 可以得出,随着抗蚀剂深度不断增加,靠近入射点中心部分的能量沉积密度逐渐减弱,而远离入射点中心部分的能量沉积密度逐渐增强.因此,随着厚层抗蚀剂深度的增加,产生的邻近效应越来越显著.

由于随着厚层抗蚀剂深度的增加其不同深度上能量沉积密度的扩散程度差别较大,因此,二维能量沉积模型采用平均值简化的方法无法精确地表达厚层抗蚀剂曝光后实际的能量沉积分布.鉴于此,构建三维能量沉积分布模型首先要对厚层抗蚀剂进行分层,由于在每一薄层中深度方向上的能量沉积密度变化很小,所以,在每一层上可采用求平均值的方法分别计算其能量沉积密度分布.

图 3 是采用电子束能量为 30keV,束斑半径为 5nm,在厚度为 1200nm 的 PMMA 上对某一栅形结构进行光刻后所产生的能量沉积分布,图 3 中 A 、 B 、 C 分别为抗蚀剂顶部、中部和底部,厚度为 100nm 抗蚀剂中的平均能量沉积密度分布,图 3 中 D 为整个抗蚀剂层应用二维能量沉积模型获得的能量沉积密度分布,由图 3 中 A 、 B 、 C 可知,随着厚层抗蚀剂深度的增加,其能量沉积分布的扩散程度越来越明显,这就导致了经光刻、显影后得到的栅型结构之间的邻近效应随抗蚀剂深度的增加而明显增强,这样制备的三维结构将与所期望得到的三维结构间有较大误差,甚至多个图形连接到一起,从而无法获得需要的三维结构.图 3 中 D 所示的由二维能量

沉积模型获得的能量沉积分布可知,采用通常的平均值简化的二维能量沉积分布模型丢失了许多信息,造成了计算结果与光刻产生的实际能量沉积分布之间的较大误差.所以,通过分层计算的方式建立的三维模型能更准确地模拟电子束三维光刻生成的微结构.

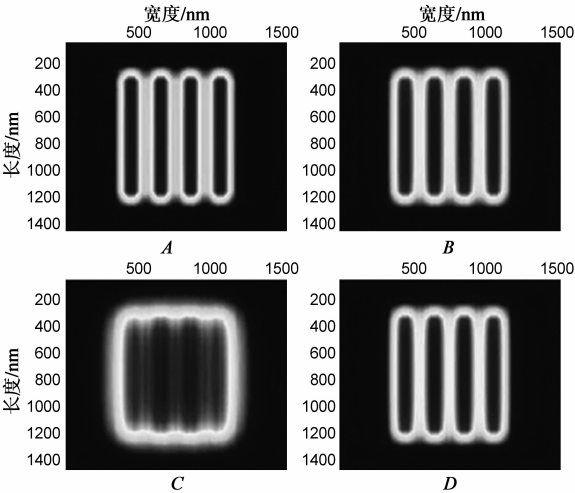


图3 厚层抗蚀剂曝光后的能量沉积分布

4 重复增量扫描策略

在利用现有的电子束曝光机图形发生器进行三维加工时,需要对曲面图形进行复杂的数据分割^[5].考虑到加工三维结构降低数据传输的时间需要,需结合三维曝光模型和曝光图形的特殊结构,从软件和策略上提高电子束曝光机的性能,避免复杂的硬件优化.

以曝光一个正梯锥为例,如图 4 所示,如果需要曝光得到一个简单的正梯锥,可以借助重复增量扫描策略,对于抗蚀剂中正梯锥的表层正方形部分,先对其进行如图的划分,从中央开始,依次对划分出的多个正方形进行扫描,这样最中间部分的小正方形扫描了多次,而最外层的正方形边缘只扫描了 1 次,某一位置接收到的电子剂量由电子束扫描同一位置的总时间来确定.

同理,重复增量扫描策略还可以用于圆锥、圆形曲面的曝光,具有类似曲面轮廓的图形在重复增量扫描策略下,无需进行复杂的分割,这样就避免了数据量过大的问题,从而大大降低了数据的传输量,减少了总曝光时间并且提高了曝光效率^[5].

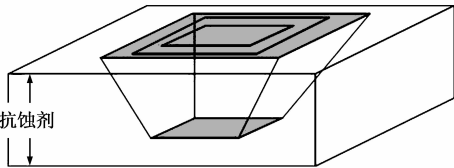


图4 重复增量扫描策略示意图

5 实验与仿真结果

利用 SDS-3 电子束曝光机,对厚度为 570nm 的正性

光致抗蚀剂 S-1805 进行了光刻实验,曝光的正方形的边长依次为 7 μm 、11 μm 、15 μm 、19 μm 、23 μm 、27 μm 、31 μm ,电子束加速电压为 20kV,单次曝光剂量为 5 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$.在 7%的 NaOH 溶液中显影 50s,得到的三维图形如图 5 所示.各级对应的深度分别为 38nm、91nm、165nm、266nm、366nm、456nm、543nm.

图 6 为利用重复增量扫描策略和分层的三维能量沉积分布模型,与实验相同的参数下获得的计算机仿真结果,仿真结果与实验结果的平均深度误差和平均宽度误差均小于 10%.另外,仿真结果还表明,如果继续增加重复曝光次数,各曝光级别之间的界限不断减弱,最终成为一个连续曲面,这为利用现有电子束曝光系统实现三维曲面加工技术的研究奠定了基础.

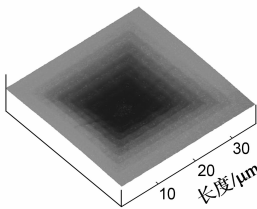


图5 正梯锥光刻实验结果

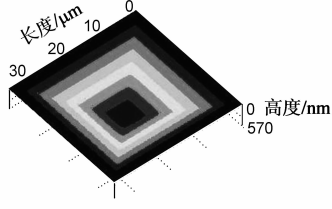


图6 正梯锥光刻仿真结果

6 结论

本文采用 Monte Carlo 模拟和分层方法计算了电子束光刻在厚层抗蚀剂中的能量沉积分布,计算结果表明,随着厚层抗蚀剂深度的增加,电子束入射点附近的能量沉积密度呈现出由高而陡向矮而缓的变化趋势,即随着抗蚀剂深度的不断增加,其抗蚀剂深度上能量沉积分布的扩散程度越来越大,这表明三维微结构的邻近效应随抗蚀剂深度的不断增加越来越明显.根据模拟结果得到的电子束光刻厚层抗蚀剂中能量沉积分布的变化规律和数据,建立了更精确的分层的电子束光刻仿真三维能量沉积分布模型.利用重复增量扫描策略,采用分层的三维能量沉积分布模型获得了与实验较为接近的三维微结构的仿真结果,另外,分层的三维能量沉积分布模型的建立也为三维微结构的邻近效应校正奠定了基础.

作者简介:

宋会英 女,1968 年 12 月出生于山东省利津县.博士.现为中国石油大学(华东)计算机与通信工程学院副教授、硕士生导师.主要从事电子束光刻、邻近效应校正及其仿真技术研究.
E-mail: songhuiying@upc.edu.cn

杨 瑞 男,1984 年 10 月出生于山东省博兴县.研究生.主要从事电子束光刻仿真技术、高性能计算研究.
E-mail: yangrui10718@163.com

- [8] Gradshteyn I S, Ryzhik I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 4th Edition. New York: Academic Press, 1965.
- [9] Chen Shuxuan, Chen Baixiao, Zhang Shouhong. Study of location based on T-R and T/R-R mode in bistatic radar[A]. CIE '06. International Conference on radar [C]. Shanghai: IEEE, 2006. 1 - 5.
- [10] 陈伯孝, 张守宏. 稀布阵综合脉冲孔径雷达一种新的测距方法[J]. 电子学报, 1997, 25(12): 116 - 118.
Chen Baixiao, Zhang Shouhong. A new method of distance measurement for sparse-array Synthetic Impulse and Aperture Radar[J]. Acta Eletronica Sinica, 1997, 25(12): 116 - 118. (in Chinese)
- [11] 陈伯孝, 张守宏. 稀布阵综合脉冲孔径雷达低距离副瓣与距离高分辨技术[J]. 电子学报, 1998, 26(9): 29 - 33.

- Chen Baixiao, Zhang Shouhong. Low-range-sidelobe and high-range-resolution techniques for sparse-array synthetic impulse and aperture radar[J]. Acta Eletronica Sinica, 1998, 26(9): 29 - 33. (in Chinese)
- [12] Antonio Maio. Design principles of MIMO radar detectors[J]. IEEE Transactions On AES, 2007, 43(3): 886 - 898.

作者简介:

肖文书 男, 1977 年生于湖南省沅江市, 高级工程师, 2006 年 6 月于南京大学无线电物理系获理学博士学位, 现供职于南京电子技术研究所, 承担国家重点国防预研课题一项, 主要研究方向为: 雷达系统设计、雷达系统理论、雷达信号处理等.

E-mail: simon_shawnju@163.com

(上接第 619 页)

参考文献:

- [1] 罗均, 谢少荣, 龚振邦. 面向 MEMS 的微细加工技术[J]. 电加工与磨具, 2001, (5): 1 - 6.
- [2] Daniel M Koller, Andreas Hohenau, et al. Three-dimensional SU-8 sub-micrometer structuring by electron beam lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2008, (85): 1639 - 1641.
- [3] 宋会英, 张玉林, 等. 电子束曝光中电子散射模型的优化[J]. 微细加工技术, 2005, (3): 14 - 19.
SONG Hui-ying, Zhang Yu-lin, et al. Optimization of the electron scattering model in electron beam lithography[J]. Microfabrication Technology, 2005, (3): 14-19. (in Chinese)
- [4] T H P Chang. Proximity effect in electron-beam lithography [J]. J Vac Sci Technol., 1975, 12(6): 1271 - 1275.
- [5] 郝慧娟, 张玉林, 等. 电子束重复增量扫描生成三维结构的研究[J]. 半导体学报, 2006, 27(7): 1326 - 1330. HAO Hui-juan, Zhang Yu-lin, et al. Three dimensional fabrication by electron beam lithography using over lapped increment scanning [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(7): 1326 -

1330. (in Chinese)
- [6] 任黎明, 陈宝钦. 电子束曝光高斯分布束斑的 Monte Carlo 模拟[J]. 微细加工技术, 2001, (3): 60-62.
Ren Li-ming, Chen Bao-qin. Monte Carlo simulation of gauss distribution beam spot in electron beam lithography[J]. Microfabrication Technology, 2001, (3): 60-62. (in Chinese)
- [7] Maurizio Dapor. Monte Carlo simulation of the interaction of electrons with supported and unsupported thin films[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B, 2003, 202: 155 - 160.
- [8] C N B Udalgama, A A Bettiol, et al. A Monte Carlo study of the extent of proximity effects in e-beam and p-beam writing of PMMA[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 260: 384 - 389.
- [9] 宋会英, 张玉林, 于肇贤, 郝慧娟. 电子束光刻的快速邻近效应校正[J]. 微细加工技术, 2007, (3): 1-5.
SONG Hui-ying, Zhang Yu-lin, et al. Fast correction of proximity effect in electron beam lithography [J]. Microfabrication Technology, 2007, (3): 1 - 5. (in Chinese)