

# 激光全息法制备二维硅基图形衬底<sup>\*</sup>

王 钰 周志文 李 成 陈松岩 赖虹凯<sup>†</sup>

(厦门大学物理系 半导体光子学研究中心, 厦门 361005)

**摘要:** 理论上模拟了全息光刻法制备二维硅基图形阵列的光强分布和显影过程, 通过改变激光波长及入射光与样品表面的夹角即可得到不同周期的二维图形. 在此基础上, 采用三束光一次曝光和湿法腐蚀图形转移技术, 在 n 型 (100) 硅衬底上制备出了周期在亚微米量级的均匀二维图形阵列. 该方法适合大面积硅基图形阵列的制作.

**关键词:** 全息光刻法; 硅基; 图形衬底

**EEACC:** 4350; 4360B

**中图分类号:** TN26

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)05-0774-04

## 1 引言

自组装 Ge 量子点因其与 Si 材料兼容, 在光学和电学上表现出特有的性质, 成为制备 Si 基光电子和微电子器件重要的材料. 然而通常用自组装方法生长的量子点可控性差, 如何在 Si 基上实现量子点的可控和有序排列一直是人们关心的课题.

实现量子点排布的有序性, 较可行的方法是在预先准备好的图形衬底上进行自组装生长<sup>[1,2]</sup>. 传统的硅工艺技术对如此小尺度的图形制备已不能完全适用. 因此, 发展新型的制备可控小尺寸图形的方法成为人们关注的目标. 常规的光刻技术可以用来制备图形衬底, 但它很难达到纳米尺寸的量级<sup>[3]</sup>. 使用电子束光刻可以得到小而密的图形<sup>[4]</sup>, 但电子束光刻受到串行工作方式的限制, 不可能在集成电路中快速形成大到几百万个图形单元. 近年来发展的纳米印刷技术(nanoimprinting)也可用于制备图形衬底<sup>[5]</sup>, 它是采用电子束刻蚀制作的模板直接在样品表面的聚合物上并行产生大面积的纳米尺寸的图样. 另一种可行的方法是全息光刻方法<sup>[6]</sup>, 这种方法的优点在于它可以快速地制备大面积小尺寸的图形阵列, 并且具有较好的可控性.

本文采用了全息光刻法与湿法腐蚀图形转移技术制备了大面积二维硅基图形阵列, 对曝光的光强分布及显影过程中时间的影响进行了模拟, 得到最优显影时间. 使用 HOE(holographic optical element)系统<sup>[7]</sup>, 三束激光同时入射, 经一次曝光后形

成二维图形, 在 Si 基衬底上制备出排列有序的图形阵列.

## 2 全息法制备图形衬底的理论分析

### 2.1 曝光的光强分布

全息法实现图形阵列的基本原理是当几束相干光叠加时, 相干区域会形成干涉图案, 要形成二维图形则需要两束光多次曝光或多束相干光一次叠加. 实验中为提高图形的对比度, 我们采取三束光同时以相同的入射角  $\varphi$  从三个方向对称入射到记录介质上, 三束入射光  $B_1, B_2, B_3$  的分布如图 1(a) 所示. 干涉图案的瞬时光强分布可写为:

$$\begin{aligned} I &= (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3)(\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3)^* \\ &= |\mathbf{E}_{01}|^2 + |\mathbf{E}_{02}|^2 + |\mathbf{E}_{03}|^2 + \\ &2\mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{02} \cos\left(-1.5k_x \sin\varphi + \frac{\sqrt{3}}{2}k_y \sin\varphi\right) + \\ &2\mathbf{E}_{01} \cdot \mathbf{E}_{03} \cos\left(-1.5k_x \sin\varphi - \frac{\sqrt{3}}{2}k_y \sin\varphi\right) + \\ &2\mathbf{E}_{02} \cdot \mathbf{E}_{03} \cos(\sqrt{3}k_y \sin\varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $\mathbf{E}_{0n}$  代表第  $n$  束光的振幅和偏振方向;  $\mathbf{k}_n$  为波矢.

光强分布的计算机模拟结果如图 1(b) 所示. 从图中可以看出只需要一次曝光就可以得到二维周期性的图案, 通过改变曝光光源的波长  $\lambda$  和样品表面与入射光束的夹角  $\varphi$  就可以对二维图形的周期长度方便地进行调节.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:60336010,60676027), 福建省人才创新基金(批准号:2004J021)和福建省工业科技重点(批准号:2006H0036)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: hklai@xmu.edu.cn

2006-08-18 收到, 2007-01-15 定稿

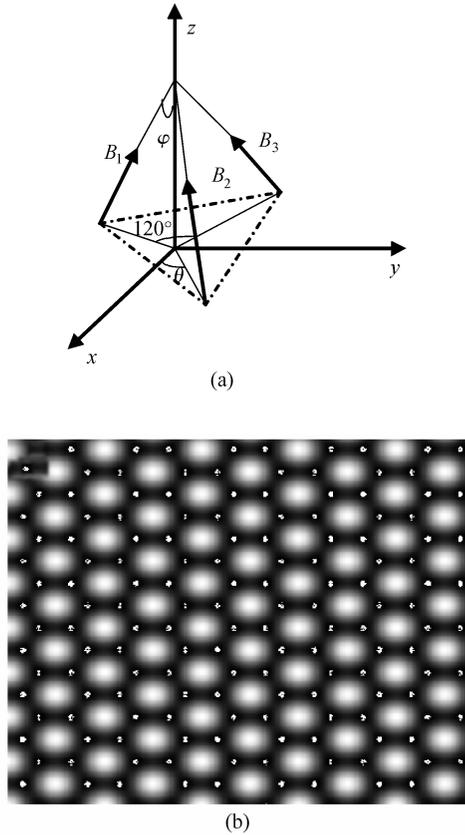


图 1 (a) 三束光入射到光刻胶表面示意图；(b) 光刻胶表面光强分布计算机模拟图

Fig.1 (a) Schematic of three-beam incidence on the photoresist; (b) Simulated light intensity distribution on the photoresist

### 2.2 显影时间的影响

光刻胶材料的特性是由曝光量  $E = It$  引起的厚度的变化来描述,已曝光和未曝光的区域以不同的速度被显影液侵蚀,若  $E$  很大且显影液浓度  $C_d$  足够稀,则对于在光刻胶中任意一点被除去量可近似由下式给出:

$$\Delta d \propto C_d T_d E$$

其中  $T_d$  为显影时间.假设曝光时间、显影时间、显影液浓度及温度给定,则某一点的腐蚀深度由该点的光强决定.利用以上条件,我们模拟了三束激光曝光,显影后所具有的图形.图 2 是经过三束激光一次曝光后,不同显影时间下模拟的光刻胶截面图,所用参数是激光器功率为 20mW,曝光时间 20s,室温下显影液为 1% 的 NaOH 溶液.模拟时不考虑显影液对光刻胶侧向的溶解及温度对显影过程的影响.从图 2 中可以看出,显影时间为 5s 时,光刻胶还没有显透,到达衬底;10s 时,已经到达衬底,但用来腐蚀的窗口较小,并且光刻胶的侧壁不陡峭;显影时间为 15s 的窗口相比 10s 时的扩大许多,并且

侧壁较为陡峭;显影时间为 20s 时,窗口扩大不明显,且时间越长会出现光刻胶倒塌或脱掉的问题.故实验中我们选取 15s 作为最佳的显影时间.

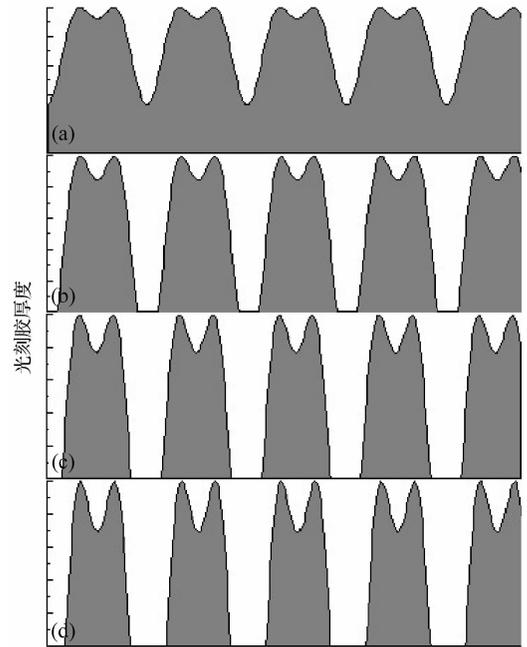


图 2 不同显影时间光刻胶的截面模拟图 (a)5s;(b)10s;(c)15s;(d)20s

Fig.2 Simulated photoresist profiles for different development times (a) 5s; (b) 10s; (c) 15s; (d) 20s

### 3 结果与讨论

以 n 型(100)单晶硅片( $\rho \approx 0.012 \sim 0.018 \Omega \cdot \text{cm}$ )为衬底材料,阵列图形制备工艺流程如下:(1)硅片经标准清洗后涂敷约  $0.5 \mu\text{m}$  厚正性光刻胶;(2)在 HOE 系统中采用三束激光一次曝光,并显影在光刻胶上得到图形阵列;(3)用湿法腐蚀的方法将光刻胶上的图形转移到硅衬底.光源采用固体蓝光激光器,波长为 457.9nm.曝光后室温下在 1% 的 NaOH 溶液中显影 15s,之后将硅片在  $130^\circ\text{C}$  的烘箱内坚膜 30min,在酸性腐蚀液(HF :  $\text{HNO}_3$  :  $\text{CH}_3\text{COOH} = 4 : 4 : 2$ )中腐蚀一定的时间,将图案转移到硅衬底上.图 3 为用丙酮脱胶后得到的光学显微镜下样品表面形貌照片,腐蚀时间分别为 10, 15, 20 和 25s.图形阵列的周期约为  $1 \mu\text{m}$ ,样品具有很好的均匀性及周期性.图 3(a)为腐蚀 10s 后的样品,已经出现了周期性良好且分布均匀的图形,但腐蚀深度较浅;图 3(b)与图 3(a)相比较,腐蚀 15s 后图形非常均匀,周期性良好并具有一定的深度;图 3(c)为腐蚀 20s 的样品,图形仍然具有一定的周期性,但是其边界已经由于钻蚀而变得不清晰,图案模

糊. 图 3(d) 为腐蚀时间 25s 时的样品, 由于在腐蚀过程中光刻胶已经部分脱落, 图形的周期性被破坏. 我们选择 15s 作为湿法腐蚀图形转移的优化腐蚀时间, 所得到的样品周期性图形阵列与模拟的光强分布结果相比, 周期、形状完全相同, 但由于显影时光刻胶的侧向溶解及图形转移过程中钻蚀的影响, 孔的尺寸会略大于模拟结果.

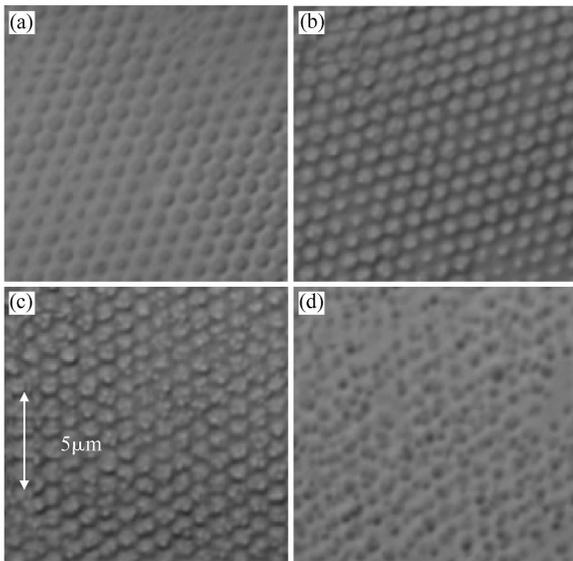


图 3 样品表面形貌的光学显微镜照片 (a) 10s; (b) 15s; (c) 20s; (d) 25s

Fig.3 Surface micrographs of the samples for different etching times (a) 10s; (b) 15s; (c) 20s; (d) 25s

通过改变曝光光源的波长  $\lambda$  和样品表面与入射光束的夹角  $\varphi$  可以对二维图形的周期长度方便地进行调节, 如用准分子激光器 (波长为 248nm) 替代固体蓝光激光器, 即可得到更小周期的二维图形阵列. 通过改变入射光的数目也可得到形状不同的二维图形. 本实验中使用正性光刻胶, 得到的是孔阵列, 如改用负性光刻胶, 则可以得到点状的图形阵列.

## 4 结论

在全息光刻法及湿法酸性腐蚀图形转移技术基础上, 采用 HOE 系统进行一次曝光, 并采用理论模拟得到的优化显影时间和酸性腐蚀时间在 n 型 (100) 单晶硅上制备出周期性好、大面积均匀的二维亚微米量级图形阵列. 该方法较之多次曝光法<sup>[8]</sup> 得到的图形对比度大, 图形陡度好, 且更加方便、快捷, 为实现大面积硅基图形阵列提供了一种可行的方法.

**致谢** 对在制备过程中提供了指导与帮助的李守教授等人表示衷心的感谢.

## 参考文献

- [ 1 ] Zhong Zhenyang, Halilovic A, Mühlberger M, et al. Ge island formation on stripe-patterned Si (001) substrates. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(3): 445
- [ 2 ] Zhong Zhenyang, Halilovic A, Fromherz T, et al. Two-dimensional periodic positioning of self-assembled Ge islands on prepatterned Si (001) substrates. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(26): 4479
- [ 3 ] Kamins T I, Williams R S. Lithographic positioning of self-assembled Ge islands on Si (001). *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 1201
- [ 4 ] Kim E S, Usami N, Shiraki Y, et al. Control of Ge dots in dimension and position by selective epitaxial growth and their optical properties. *Appl Phys Lett*, 1998, 72: 1617
- [ 5 ] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J, et al. Imprint lithography with 25-nanometer resolution. *Science*, 1996, 272: 85
- [ 6 ] Huang C J, Zhu X P, Li C, et al. Nanofabrication of grid-patterned substrate by holographic lithography. *J Cryst Growth*, 2002, 236(1): 141
- [ 7 ] Zhang Xiangsu, Liu Shou, Liu Ying, et al. Fabrication of large-area 3D photonic crystals using a holographic optical element. *Opt Lasers Eng*, 2006, 44: 903
- [ 8 ] Chen Xiaolan, Zaidi S H, Brueck S R J. Interferometric lithography of sub-micrometer sparse hole arrays for field-emission display applications. *J Vac Sci Technol B*, 1996, 14(5): 3339

## Preparation of Two-Dimensional Patterned Silicon Substrate by Holographic Lithography\*

Wang Yu, Zhou Zhiwen, Li Cheng, Chen Songyan, and Lai Hongkai<sup>†</sup>

(Semiconductor Photonics Research Center, Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** The light intensity distribution and development processes during the preparation of two-dimensional patterned silicon substrates by holographic lithography are simulated. Different periods can be achieved by varying the wavelength and the angle between the sample surface and the laser beams. Large-area uniform two-dimensional sub-micrometer patterned n-type doped (100) silicon substrate has been fabricated by single exposure with a triple beam and wet chemical etching. The method is suitable for fabricating array patterns on large silicon substrates.

**Key words:** holographic lithography; silicon substrate; patterned substrate

**EEACC:** 4350; 4360B

**Article ID:** 0253-4177(2007)05-0774-04

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60336010, 60676027), the Innovation Project for Young Scientific Researchers of Fujian Province (No. 2004J021), and the Key Project of Science and Technology of Fujian Province (No. 2006H0036)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: hklai@xmu.edu.cn

Received 18 August 2006, revised manuscript received 15 January 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics