第 27 卷 第 9 期
2006 年 9 月

半 导 体 学 报
CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS

Vol. 27 No. 9
Sep. ,2006

高质量二维光子晶体结构刻蚀掩膜版的制作方法*

杜 伟[1,†] 许兴胜[1] 韩伟华[2] 王春霞[1] 张 杨[2] 杨富华[2] 陈弘达[1]

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)
(2 中国科学院半导体研究所 半导体集成技术工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 结合制作光子晶体结构的具体要求,研究了电子束曝光得到的电子束胶上(GaAs 衬底)随实验条件变化的图形. 结果表明,胶的厚度、曝光剂量、显影/定影时间等参数对图形的质量有重要影响. 通过合理优化这些参数,我们得到了高质量的掩膜图形.

关键词: 光子晶体; 电子束曝光; PMMA 掩膜
PACC: 4270Q
中图分类号: TN305.7 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-4177(2006)09-1640-05

1 引言

近些年来光子晶体成为人们的研究热点之一[1]. 由于光子晶体中光子禁带的存在,使得某些特定频率的光不能通过,这种特性可以用于实现多种具有优异特性的光电子器件,如光子晶体激光器、光子晶体大角度弯曲波导等. 高质量光子晶体的制作是决定光子晶体能否实现应用的关键. 二维平板结构光子晶体是目前研究的重要方向之一. 二维平板结构的光子晶体是指在平面内利用光子晶体的带隙特性对光进行控制,在垂直于平面的方向上利用高折射率波导层将光限制在其内[2]. 在某些特定的领域中其功能完全可以代替三维光子晶体,而加工又相对简单得多. 现阶段,制作二维光子晶体的一种重要加工方法就是曝光同干法刻蚀相结合. 加工小尺寸的(晶格常数在百纳米量级)光子晶体,常规光学曝光的分辨率是不够的,需要应用纳米级的曝光工艺技术,然后再进行干法刻蚀. 电子束曝光(electron-beam lithography, EBL)技术是通常定义光子晶体图形的曝光方法. 由于电子束的德布罗意波长小于 0.01nm,因此 EBL 技术不受衍射效应的影响,可获得极高的分辨率和焦深. 电子束曝光能直接产生图形,线宽可以小于 10nm,它是用于加工纳米器件结构的主要方法[6]. 在工艺流程中,第一步的掩膜层制作(即将图形转移到胶层上)是至关重要的. 掩膜层上图形质量的好坏,将决定最终刻蚀的结果. 本文比较了在不同的实验条件下得到的掩膜层上的图形,总结出了能够获得高质量电子束曝光图形的实验参数.

2 电子束曝光工艺流程及结果分析

电子束曝光主要工艺可分为匀胶、曝光、显影和定影等几个步骤. 下面对影响光子晶体图形质量的主要因素以及结果分别进行说明.

2.1 匀胶

电子束曝光大多使用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate)作为掩膜胶,一般称之为 PMMA 胶. 该胶在存放和使用时都是按一定的浓度溶解在有机溶剂中. 实验中我们使用的是 Süss 80T2 型匀胶机,转速、时间都可以自行设定. 同种胶在不同的转速下形成胶层的厚度是不一样的,每种胶都有一个厚度随转速变化的曲线图,见图 1.

从图 1 中可以看出, PMMA 浓度为 7%的 C7 胶的厚度随转速变化很明显,而浓度为 2%的 C2 胶的厚度则随转速变化不大. 实验时尽可能地选择曲线较平稳、变化较小的区间,这样得到的实际胶层的厚度和图中的数值最为接近. 例如选用 C7 或 C4 胶时,匀胶转速尽量选择在 3000～4000r/min. 需要说明的是,胶层越薄,曝光的分辨率越高,但是在刻蚀的时候抗刻蚀能力就比较差. 反之胶层越厚,其抗刻蚀能力越强,但是分辨率就要下降. 因此过薄或者过厚的胶都是不合适的,要根据所需要的图形的细致程度和刻蚀条件来选择合适的胶厚度.

半导体材料的大小对电胶的均匀性有很大的影响. 由于离心力的作用,材料边缘胶的厚度和中间部

*国家自然科学基金资助项目(批准号:60345008,60377011,60537010)
†通信作者. Email:duwei@red.semi.ac.cn

2006-03-08 收到,2006-05-16 定稿
© 2006 中国电子学会

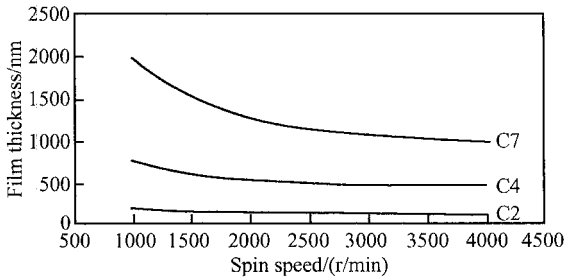


图 1　不同浓度的 PMMA 胶的匀胶曲线(PMMA 数据单, MicroChem 公司提供)

Fig. 1　PMMA data sheet from MicroChem Corp.

分的差别很大. 当材料面积很小时,胶面就会很不均匀,这将严重影响曝光图形的质量. 因此,可以直接用整片进行甩胶工作,之后再解理,边缘不均匀的部分舍弃不用,这样能够得到有平整胶层的小尺寸实验样片.

匀胶过程完成后需要烘烤使溶剂蒸发,仅留下 PMMA 胶在材料表面. 将材料放置在热板上,180 ℃下烘烤 10～50min 左右.

2.2　电子束曝光剂量

在实验中我们使用的是 Raith150 型电子束曝光机. 曝光图形可以通过机器配套的软件直接进行设计. 操作过程中,首先要调整机器的状态. 其中最重要的环节是调焦以及调像散. 调焦是在垂直于样品平面的方向上进行聚焦,调像散是使平行于样品平面的两个方向聚焦一致. 曝光的参数如曝光位置和剂量等可以用配套的计算机程序设定. 其中,曝光剂量是一个很重要的参数. 要想使最终的曝光图形与设计图形的尺寸、形状都保持一致,必须选取合适的曝光剂量.

电子束在打到样品表面时会发生散射,包括正向散射和背散射两种. 如果选取的剂量过大,电子的背散射就会很强,导致侧壁的下端也部分被曝光,形成倾斜的正梯形形状,如图 2(a) 所示,这会使刻蚀后的图形尺寸扩张. 反之,剂量不足,电子的正向散射和背散射强度不够,侧壁下端未能完全曝光,就会形成倒梯形形状,如图 2(b) 所示,造成刻蚀后图形尺寸缩小. 只有选取合适的剂量,才能形成陡直的侧壁,如图 3(c) 所示,这样才能得到与设计尺寸相一致的图形.

电子束能量密度随空间的变化可用双高斯函数拟合[4],其形式如(1) 式所示:

$$f(r) = \frac{1}{(1+\eta)\pi}\left\{\frac{1}{\alpha^2}\exp\left[-\left(\frac{r}{\alpha}\right)^2\right] + \frac{\eta}{\beta^2}\exp\left[-\left(\frac{r}{\beta}\right)^2\right]\right\} \tag{1}$$

其中　r 是空间位置矢量; f 是电子束的能量密度; α 代表正向散射范围; β 代表背散射范围; η 是背散射

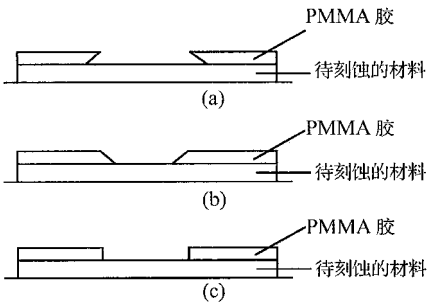


图 2　不同曝光剂量下 PMMA 胶的曝光情况　(a) 剂量偏大; (b) 剂量偏小; (c) 剂量合适

Fig. 2　Exposure status of PMMA with different doses (a) High dose; (b) Low dose; (c) Normal dose

与正向散射能量之比. 拟合的结果可以看出电子束能量密度的空间分布,由此可以计算出合适的曝光剂量.

实验中使用不同的剂量对同一图形进行曝光,在衬底为 GaAs 材料,加速电压为 10kV,光阑孔径为 30μm 的不变条件下,获得了一系列的实验结果. 我们的设计尺寸为晶格常数 V_1 = 3.000μm,圆孔直径 Da1 = 1.8μm. 标准剂量为 100μC/cm^2. 图 3 是相同显影/定影时间、不同剂量下 PMMA 胶上的图形. 在使用的剂量小于 1.21 倍标准剂量时,得到的曝光图形的尺寸比设计尺寸都偏小. 大于 1.21 倍时,尺寸都偏大. 只有在使用 1.21 倍标准剂量时,才得到同设计图形尺寸几乎完全一致的图形.

一般来说,衬底不同,胶膜厚度不同的情况下,曝光剂量也不相同. 需要分别做实验确定各自合适的曝光剂量.

2.3　写场调节

在图形曝光的时候,由于电子束的偏转场(写场) 很小,一般不超过 1000μm ×1000μm(通常我们都使用 100μm ×100μm),因此,曝光图形是由许多个写场拼接而成的,如图 4 所示[3]. 当电子束完成一个写场的扫描之后,工作台就会按照程序指令将下一个写场移动到电子束扫描的范围内. 这时为了保证大图形(单个图形面积大于一个写场) 拼接的质量,写场的拼接精度十分重要. 特别是像较长的直波导这样的图形,如果拼接精度不够,会造成很大的损耗,严重影响测试结果.

由于工作台的移动存在误差,移动的距离越长误差就越大. 因此要尽可能在离曝光位置近的地方做写场对准. 图 5 给出了关于写场拼接的两张图片. 其中(a) 是在离曝光位置相对较远的地方进行写场对准得到的结果,(b) 是调整到离曝光位置相对较近的地方进行写场对准得到的结果. 可以看出,调整之后的写场拼接精度有了很大的改进. 理论上误差

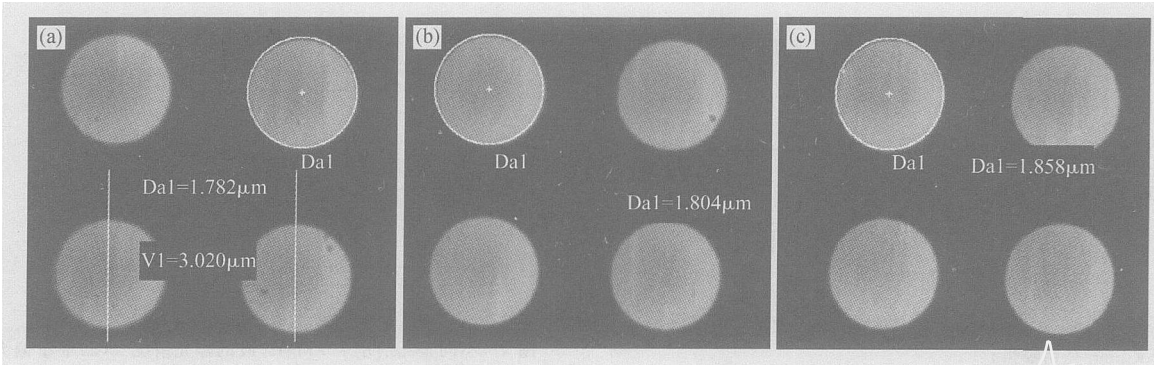


图 3 不同剂量下 PMMA 胶上的图形(GaAs 衬底) (a) 1.1 倍标准剂量;(b) 1.21 倍标准剂量;(c) 1.5 倍标准剂量

Fig. 3 PMMA patterns with different doses on GaAs substrate (a) Dose = 1.1;(b) Dose = 1.21;(c) Dose = 1.5

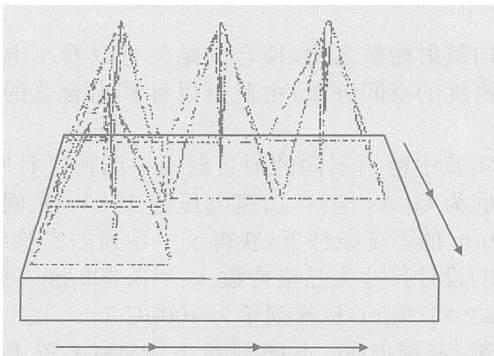


图 4 电子束曝光过程中的写场拼接[3]

Fig. 4 Writing field alignment in EBL process[3]

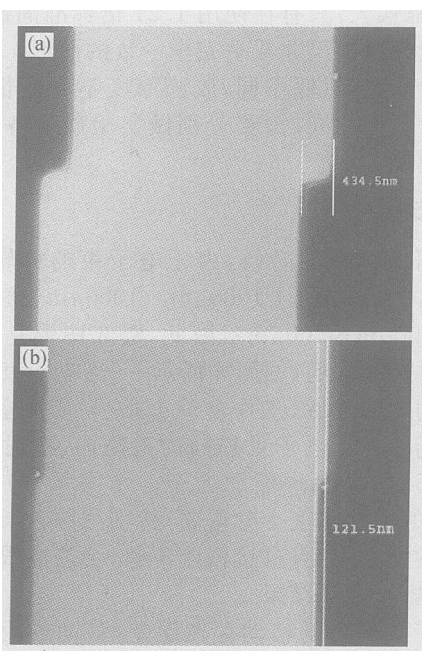


图 5 写场的拼接 (a) 调整前;(b) 调整后

Fig. 5 Writing field alignment (a) Before adjustment;(b) After adjustment

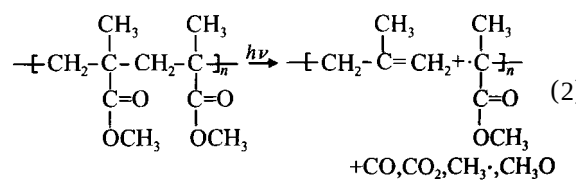
可以达到 60nm 以下.

虽然可以通过使用较大面积的写场来减少拼接的次数,但是面积大的写场电子束偏转的角度也大,曝光的精度就会相应降低.因此写场并不是越大越好,要根据图形的形状和精度要求来选择合适的写场尺寸.

2.4 显影、定影

曝光完成后进行显影、定影.显影、定影过程中时间的把握很重要.过显影或显影不足都会对图形质量造成破坏.实验中我们使用 PMMA950K C4 胶,显影液为 MIBK 与 IPA 的混合液,定影液为 IPA.

PMMA 胶在吸收了电子束的能量后发生化学反应分解成为可溶于显影/定影液的物质,其化学反应的方程式如下[5]:



(2)

图 6 中给出了几种显影、定影后的结果.图 6(a)所示的图形由于显影时间过长造成了图形边缘模糊,甚至有的孔边缘扩张使得邻近的孔壁相连.图 6(b)中的图形显影不足,因而出现圆环结构,这是由于未能将图形完全显影而造成的.图 6(c)所示为合适的显影结果,圆孔边缘清晰均匀,没有孔壁相连的情况.

对于不同种类的胶,显影/定影时间一般也不一样.显影/定影液的配比,显影/定影时间等都可以根据不同的需要进行适当的调节.

显影、定影之后要后烘,以烘干残余的定影液,另外还可以起到坚膜的作用.实验中我们在 90 ℃下烘干 4～10min.之后,就可以进行干法刻蚀.

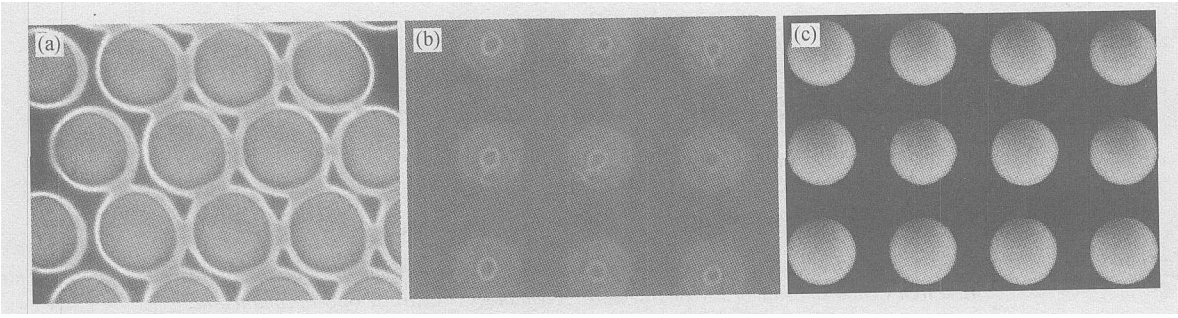


图 6　几种不同的显影结果　(a) 过显影; (b) 显影不足; (c) 合适的显影

Fig. 6　Different PMMA patterns after development　(a) Over developed; (b) Less developed; (c) Normal development

2.5　刻蚀结果

根据上面的分析,我们使用胶面均匀的 GaAs 衬底样片,采用 1.21 倍标准曝光剂量以及合适的显影、定影时间,在得到电子束曝光图形后进行了刻蚀. 结果如图 7 中所示.

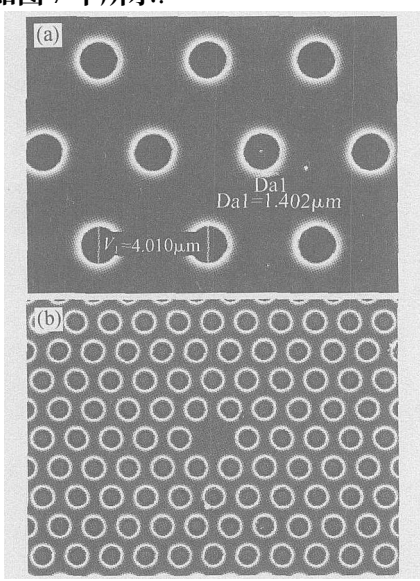


图 7　刻蚀后样品上的图形　(a) 三角晶格; (b) 微腔结构

Fig. 7　Photonic crystal structures on GaAs substrates (a) Triangle lattice; (b) Cavity structure

我们设计的尺寸为晶格常数 $V_1 = 4.0\mu m$,圆孔直径 Da1 = 1.4μm. 从图 7(a) 中可以看出,实际得到的图形尺寸和设计尺寸很接近,图 7(b) 中的微腔图形也和版图中设计的图形相符合. 说明用前述参数制作的掩膜是完全符合要求的,保证了图形的良好转移.

3　结论

制作掩膜胶图形是光子晶体微加工的关键工艺. 我们通过采用适当的匀胶方法,选取合适的曝光剂量,显影/定影时间和调节写场拼接精度等方法获得了高质量的电子束曝光图形. 刻蚀后的结果表明,所采用的实验参数是合适的,保证了图形的高精度转移. 此外,曝光剂量、显影/定影和干法刻蚀各步工艺间都有一定的联系,在实验中适时调节各步实验参数,可以实现高质量的图形转移.

致谢　感谢刘剑老师阅读手稿并提出有益的建议.

参考文献

[1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Phys Rev Lett, 1987, 58: 2059

[2] Painter O, Lee R K, Scherer A, et al. Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser. Science, 1999, 284: 1819

[3] Han Weihua, Fan Zhongchao, Yang Fuhua. Application of nanofabrication to optoelectronics. Physics, 2006, 35: 51 (in Chinese) [韩伟华,樊中朝,杨富华. 微纳加工技术在光电子领域的应用. 物理, 2006, 35: 51]

[4] Cui Zheng. Micro-nanofabrication technologies and applications. Beijing: Higher Education Press, 2005 (in Chinese) [崔铮. 微纳米加工技术及其应用. 北京:高等教育出版社, 2005]

[5] Madou M J. Fundamentals of microfabrication. CRC Press, 2001

[6] Gu Changzhi, Luo Qiang, Yang Haifang, et al. Application of micro/nanofabrication in nanoscale physics and devices. Physics, 2006, 35, 40 (in Chinese) [顾长志,罗强,杨海方,等. 微纳米加工技术在纳米物理与器件研究中的应用. 物理, 2006, 35: 40]

Fabrication of a High Quality Etching Mask for Two-Dimensional Photonic Crystal Structures*

Du Wei[1,†], Xu Xingsheng[1], Han Weihua[2], Wang Chunxia[1], Zhang Yang[2], Yang Fuhua[2], and Chen Hongda[1]

(1 *Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100083, *China*)
(2 *Research Center of Semiconductor Integrated Technology, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The influence of different fabrication parameters on polymethyl methacrylate (PMMA) etching mask for two-dimensional photonic crystal structures are studied. The results show that high quality PMMA etching mask can be realized by optimizing parameters such as PMMA thickness, electron beam exposure dose, developing time, and fixation time.

Key words: photonic crystal; electron-beam lithography; PMMA mask
PACC: 4270Q
Article ID: 0253-4177(2006)09-1640-05

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60345008, 60377011, 60537010)
† Corresponding author. Email: duwei@red.semi.ac.cn

Received 8 March 2006, revised manuscript received 16 May 2006 © 2006 Chinese Institute of Electronics