

FIB 快速加工纳米孔点阵的新方法^{*}

陈雷明¹⁾ 李培刚¹⁾ 符秀丽¹⁾ 张海英^{1,2)} L.H.Li³⁾ 唐为华^{1)†}

¹⁾中国科学院物理研究所,北京凝聚态物理国家实验室,北京 100080)

²⁾北京师范大学物理系,北京 100875)

³⁾Department of Physics, University of Rhode Island, Kingston, RI02881, USA)

(2004 年 5 月 25 日收到, 2004 年 6 月 11 日收到修改稿)

纳米尺度的点阵在纳米器件和基础科学研究方面都具有非常重要的应用. 目前普遍采用的聚焦离子束和电子束曝光技术可以很方便的在衬底上加工纳米量级的微细结构, 但大面积的图形加工过程需要花费太多的机时. 介绍一种利用设计图形 BMP 文件的像素点阵和实际加工区域之间的匹配关系, 通过聚焦离子束加工获得所需要的纳米孔点阵的新方法. 采用这种方法可以在短时间内获得大面积的纳米点阵结构.

关键词: 聚焦离子束, 电子束曝光, 纳米孔点阵

PACC: 0700, 6146, 4180G

1. 引 言

纳米尺度的加工是纳米器件制作的关键. 目前, 聚焦离子束(focus ion beam, FIB)^[1-3]和电子束曝光(electron beam lithography, EBL)^[4-6]技术是纳米加工的重要手段, 最小图形尺寸已经达到 10 nm, 甚至更小. 利用这些技术可以比较容易地加工获得纳米量级的微细结构. 但是, 这些设备本身价格昂贵, 而且加工过程中非常耗时, 一般是用来加工一些很小面积的图形结构. 例如用 FIB 加工纳米孔点阵, 如果要加工的区域在几十甚至几百个微米的量级, 若采用通常的逐个打孔的方法, 则需要几十个小时甚至更长的时间. 纳米压印技术^[7-9]是最近几年发展起来的一种新的纳米加工技术, 可以像印刷一样大规模的复印纳米图形. 纳米压印技术虽然可以很简单地制作纳米孔点阵, 但是这种技术需要造价昂贵的模板, 一般的实验室不可能采用. 纳米孔点阵是一种有广泛用途的图形结构, 如金属薄膜上的纳米孔点阵具有特殊的电磁波反射与透射特性^[10-12]; 用作二维光子晶体^[13]; 也可以作为特殊纳米结构的生长模板^[14]等等. 因此, 如何有效地加工出几百甚至几千微米量级的纳米孔点阵或其他复杂结构, 就是一个非常有意义的课题.

目前, 制作纳米孔点阵常用的方法主要有两种: 一种是利用聚焦离子束直写系统直接在基片上进行打孔加工. 根据设计的需要逐个打出具有一定孔径和间距的纳米孔点阵; 另一种是在基片上涂一层光刻胶, 利用电子束曝光系统在光刻胶上曝出纳米孔点阵的图形, 显影之后进行等离子刻蚀形成纳米孔点阵. 虽然这两种方法都可以做出很好的纳米孔点阵, 但是他们的加工过程需要很多时间. 以 FIB 为例, 加工一个孔径为 200nm, 间距为 500nm, 面积为 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 左右的纳米孔点阵, 所需的时间要超过 10h. 本文介绍一种利用设计图形 BMP(bitmap)文件的像素点阵和实际加工区域之间的匹配关系, 通过聚焦离子束加工获得所需要的纳米孔点阵的新方法. 采用这种方法可以在短时间内获得大面积的纳米点阵结构.

2. 实 验

FIB 是一种极具潜力的纳米加工工具, 可用于离子束曝光, 刻蚀, 辅助沉积或注入掺杂等. 1975 年开发成功液态金属离子源(LMIS)^[15], 四年后 Seliger 等研制成功离子束直径 100nm, 束流 $1.5\text{A}/\text{cm}^2$ Ga⁺ 源 FIB 系统^[16]. 将 FIB 技术应用于固态微器件制作. 现在 FIB 技术已经广泛用于固态微器件制作过程和

^{*} 中国科学院百人计划和国家自然科学基金优秀创新研究群体项目(批准号: 60321001)资助的课题.

[†] E-mail: whtang@aphy.iphy.ac.cn

基础科学研究. FIB 的刻蚀和沉积功能已经成为电路失效分析,掩模板修复,TEM 样品制备等实际工作的常规手段. Matsui 和 Ochiai 综述了有关 FIB 在离子束曝光,刻蚀,辅助沉积或注入掺杂等在固态微器件制作方面的应用^[17].

本文的实验是在 FEI 公司生产的 DB235 聚焦离子束刻蚀沉积系统上完成的. 该系统是一个双束配置,同时具有电子束和离子束. 电子束主要用作扫描电镜观看样品,离子束用来加工样品. 电子束的分辨率为 2nm(20kV),离子束分辨率为 7nm. 样品台可以根据实际需要移动(x, y, z),旋转(φ)和倾斜(t). 同时该系统还加装 EDX 能谱分析器可原位分析样品材料成分的深度分布. 系统配备四种加工气体,用于金属增强刻蚀(MEE),绝缘增强刻蚀(IEE),金属沉积(MD),绝缘沉积(ID). 沉积材料为白金(Pt)和二氧化硅(SiO_2).

通常 FIB 有两种加工模式:1)当所做的结构比较简单时,利用系统软件控制界面上的画图工具做出简单图形,然后离子束按照设定的尺寸图形进行加工. 2)当所做的结构比较复杂时,事先将要做的复杂结构做成黑白单色 BMP 格式图形文件,然后将 BMP 格式图形文件读入加工窗口,离子束只在黑白单色图形的黑色部分加工,在给定的窗口内加工出设计好的图形结构.

我们仔细研究了 FIB 根据 BMP 格式图形文件的工作特性,利用设计图形 BMP 文件的像素点阵和实际加工区域之间的匹配关系进行纳米孔点阵加工,极大地节省了加工时间. 可以在很短的时间里加工出大面积纳米孔点阵. 实验所加工的对象是厚约为 100nm 的 Pt 薄膜.

以下是实验过程:首先我们做出一个 BMP 格式的黑白单色图形如图 1 所示,它的大小为 444×417 (pixel). 利用软件工具将之转换成 FIB 所能识别的 STR(stream)格式. 利用 FIB 的 BMP 图形加工模式在 Pt 薄膜上进行加工,在放大倍数 M (magnification) = 8000 的情况下加工 120s 左右后,获得的结构与原图完全一致是一个连续的结构,如图 2 所示.

图 3 给出在 $M = 800$ 的情况下加工 15min 左右后获得结构的 SEM 照片,我们发现离子束加工区域不再是连续的图形,而是出现均匀的纳米孔点阵.

在图 1 中的箭头指示区域的大小为 16 个像素,所加工的实际区域为 $160\mu\text{m} \times 140\mu\text{m}$ 左右的矩形. 由图 3 可以看到,加工后所对应的箭头指示区域有

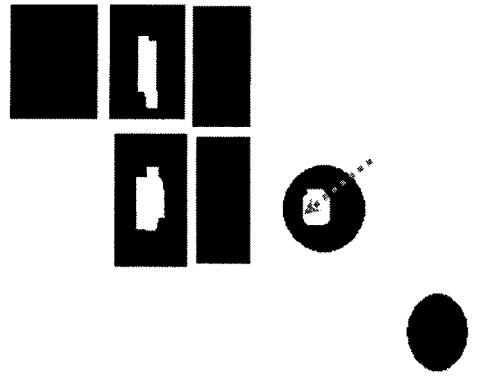


图 1 设计图形

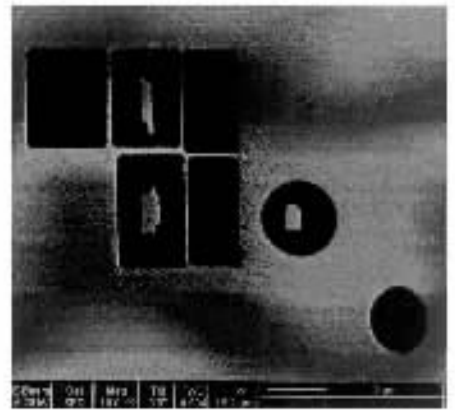


图 2 $M = 8000$ 时 FIB 加工获得的连续结构

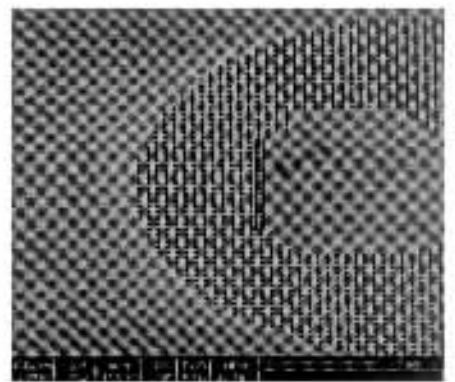


图 3 $M = 800$ 时 FIB 加工获得的点阵结构

16 个纳米孔,正好等于它相应的像素数. 纳米孔的间距约为 400nm,纳米孔的直径约为 150nm.

那么为什么连续的图形却被加工成为分离的纳米孔点阵了呢?为了找到产生这种现象的原因,我们改变一些条件,进行一系列的加工之后,获得以下的实验结果.

1) 当保持其他条件不变而仅仅延长加工时间 t 时, 纳米孔的直径 D 相应增加, 而间距 H 和数目 N 保持不变(如图 4 和图 5 所示). 在图 4 中的纳米孔点阵的加工条件是离子束束流 $I = 300\text{pA}$, 放大倍数 $M = 800$, 加工时间为 $t = 10\text{min}$. 图 5 中的条件是 $I = 300\text{pA}$, $M = 800$, $t = 20\text{min}$, 由两图的对比可以看出, 两图中纳米孔的间距均为约 400nm , 区别在于纳米孔的直径不同, 加工时间长的纳米孔直径大. 图 4 中的纳米孔直径约为 100nm , 图 5 中的纳米孔直径约为 150nm .

2) 当改变放大倍数而保持其他条件不变时, 只有加工的区域和纳米孔的间距相应变化(如图 5 和图 6 所示). 图 5 和图 6 中纳米孔的加工条件均为 $I = 300\text{pA}$, $t = 20\text{min}$, 但是加工时的放大倍数分别为 $M = 800$ 和 $M = 350$. 图 5 中的纳米孔间距约为 400nm , 图 6 中的纳米孔间距约为 800nm .



图 4 300pA , $M = 800$, $t = 10\text{min}$

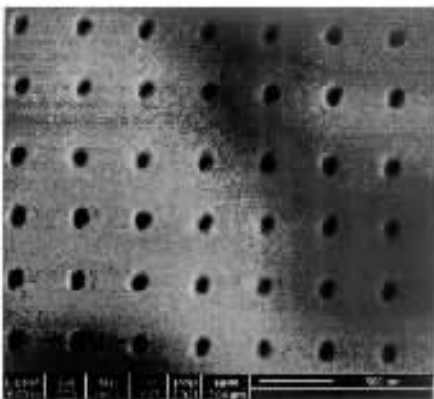


图 5 300pA , $M = 800$, $t = 20\text{min}$

一样, 只是加工时所用的图形不一样, 图形的像素数不一样, 获得的纳米孔的数目和间距都发生了变化.

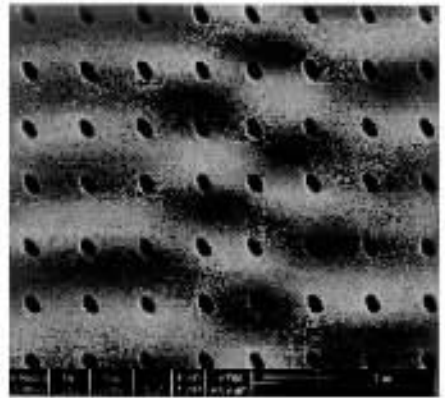


图 6 300pA , $M = 350$, $t = 20\text{min}$

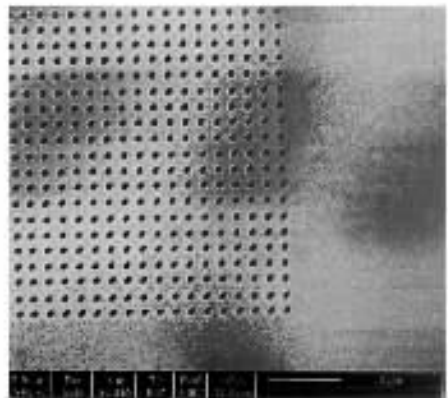


图 7 300pA , $M = 350$, $t = 20\text{min}$

3. 结果和分析

由此我们可以得到下面一些结论.

1) 纳米孔的直径由加工时间来决定, 在相同的加工条件下, 加工时间越长, 纳米孔的直径越大;

2) 纳米孔的间距由加工时的放大倍数和图形的像素数来决定, 在相同的图形和其他加工条件相同的情况下, 放大倍数越小, 纳米孔的间距越大;

3) 纳米孔的总数由总的加工像素数来决定, 即纳米孔的数量等于所作 BMP 图形中黑色部分的像素总数;

4) 纳米孔的形状可以由离子束像散来控制, 当无像散时小孔为圆形, 有像散时小孔为椭圆形.

经过多方面的分析我们认为可以这样来解释:

3) 当改变加工图形的像素数而保持其他条件不变时, 只有纳米孔的数目和间距相应变化(如图 6 和图 7 所示). 图 6 和图 7 中的纳米孔点阵加工条件都

计算机将 BMP 图形转化成 STR 文件的过程是将 BMP 图形看作一个二维点阵(即分辨率),对每一点的坐标和工作状态进行纪录(white = idle, black = work),最后生成计算机所能识别的 STR 纪录文件并用此文件来驱动控制聚焦离子束的工作.所以当聚焦离子束进行 BMP 图形加工时是按照一定的分辨率(点阵)来加工的,图形的像素数也就是离子束的分辨率.每一个像素代表离子束打击的一个点,也就是说 FIB 是将 BMP 图形作为一个点阵来进行加工而不是作为一个连续的图形来加工.其加工过程就好像是将这个点阵投影到加工区域上,经过一段时间的打击之后,每个点都成为一个纳米孔,并随着加工时间的增加而增加.当总的加工区域足够小时,如果每两个孔之间的间隔小于两直径之和,就能形成连续的区域;当总的加工区域很大时,如果每两个孔之间的间隔大于两相邻孔直径之和,就形成分离的纳米孔点阵.图 8 是我们加工的一个大面积纳米孔点阵的局部照片.

由此分析结果我们可以深刻的理解 FIB 的 BMP 图形加工模式,从而可以利用这种加工模式来进行许多新颖而方便的大规模图形的加工.例如将离子束的像散调整为纵向较大而横向较小,即离子束斑的形状为细长的椭圆形,加工一定时间后纳米孔逐渐增大,当相邻纳米孔的纵向直径之和超过纵向纳米孔间距时,所有的点在纵向连接起来形成连续的条纹,而横向上的纳米孔直径之和小于横向纳米孔间距,所以在同样的时间里在横向形成分离的纳米孔,最后整个图形就成为一系列纵向的纳米线阵列,如图 9 所示.这种纳米线阵列具有高度的取向性,其长度基本上可以随意控制,纳米线的宽度可以由横向的像素数,加工的时间和放大倍数来调节.而加工所需要的时间仅仅约 5—30min(根据薄膜材料的不同而变化).

当然,我们提出的这种方法也存在一些缺点,如只能加工圆形或椭圆形的纳米孔,对于矩形的小孔

则无能为力.但是无论如何,这种方法拓宽了 FIB 加工的器件类型,大量节省了加工时间,为方便快速制作复杂的纳米器件提供了很好的技术支持.

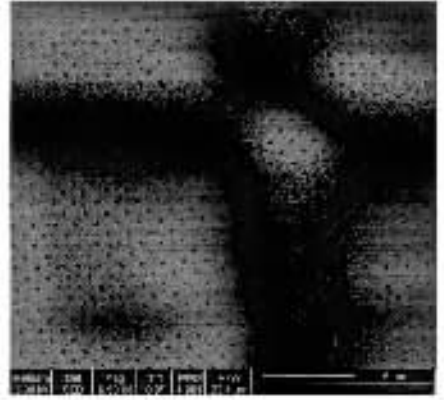


图 8 大面积纳米孔点阵的局部 SEM 照片

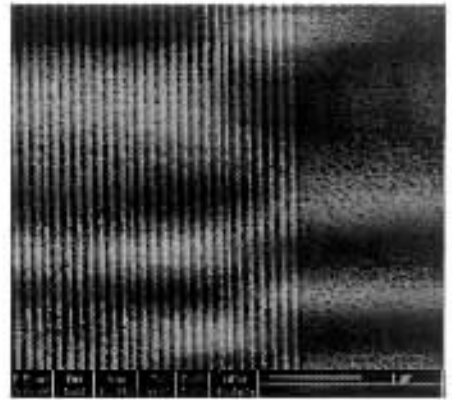


图 9 加工获得的纳米线阵列的 SEM 照片

4. 结 论

利用设计图形 BMP 文件的像素点阵和实际加工区域之间的匹配关系,通过聚焦离子束加工获得所需要的纳米孔点阵的新方法.采用这种方法可以在短时间内获得大面积的纳米点阵结构.

- [1] Kenji G 1996 *Microelectronic Engineering* **32** 159
- [2] Davies S T and Khamsehpour B 1996 *Vacuum* **47** 455
- [3] Walker J F, Moore D F and Whitney J T 1996 *Microelectronic Engineering* **30** 517
- [4] Notargiacomo A, Giovine E, Evangelisti F, Foglietti V and Leoni R 2002 *Materials Science and Engineering C* **19** 185
- [5] Mohamed H 1999 *III-Vs Review* **12** 18

- [6] Bauch L, Böttcher M and Jagdhold U 1995 *Microelectronic Engineering* **27** 371
- [7] Martin C, Ressler L and Peyrade J P 2003 *Physica E* **17** 523
- [8] Alkaiji M M, Jayatissa W and Konijn M 2004 *Current Applied Physics* **4** 111
- [9] Chou S Y, Krauss P R and Renstrom P J 1996 *J. Vac. Sci. Technol. B* **14** 4129

- [10] Ghaemi H F , Thio T , Grupp D E , Ebbesen T W and Lezec H J 1998 *Phys. Rev. B* **58** 6779
- [11] Krishnan A , Thio T , Kim T J , Lezec H J , Ebbesen T W , Wolff P A , Pendry J , Martin-Moreno L and Garcia-Vidal F J 2001 *Optics Communications* **200** 1
- [12] Martin-Moreno L , Garcia-Vidal F J , Lezec H J , Pellerin K M , Thio T , Pendry J B and Ebbesen T W 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1114
- [13] Oder T N , Shakya J , Lin J Y and Jiang H X 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 1231
- [14] Dwir B , Leifer K and Kapon E 2003 *Phys. Rev. B* **67** 075302 – 1
- [15] Krohn V E and Ringo G P 1975 *Appl. Phys. Lett.* **27** 479
- [16] Seliger R L *et al* 1979 *J. Appl. Phys.* **34** 310
- [17] Matsui S and Ochiai Y 1996 *Nanotechnology* **7** 247

Fast fabrication of large-area nanopore arrays by FIB^{*}

Chen Lei-Ming¹⁾ Li Pei-Gang¹⁾ Fu Xiu-Li¹⁾ Zhang Hai-Ying^{1 2)} L. H. Li³⁾ Tang Wei-Hua^{1)†}

¹⁾(Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China)

²⁾(Department of Physics , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China)

³⁾(Department of Physics , University of Rhode Island , Kingston , RI02881 , USA)

(Received 25 May 2004 ; revised manuscript received 11 June 2004)

Abstract

Fabrication of nanopore arrays is of great importance in nanodevices manufacture and basic scientific research. Focused ion beam (FIB) and electron beam lithography (EBL) have been widely used for fabrication of nanostructures. However , it takes very long time to fabricate nanostructure patterns of large area. In this paper we report a novel fast fabrication method for nanopore arrays of large area by FIB. Each pixel of predesigned BMP file is regarded as a fabrication dot. By matching the pixel of the presigned BMP pattern with the required fabrication area , nanopore arrays of large area can be fabricated in a very short time.

Keywords : focused ion beam , electron beam lithography , nanopore array

PACC : 0700 , 6146 , 4180G

* Project supported by the " 100 Talents Project " of the Chinese Academy of Sciences , and the National Natural science Foundation of China (Grant No. 60321001).

† E-mail : whtang@aphy. iphy. ac. cn