

# 微纳米加工技术在纳米物理与器件研究中的应用\*

顾长志<sup>†</sup> 罗强 杨海方 金爱子 李俊杰 王宗利 王强  
徐鹏 全保刚 岳双林 黄阳 时成瑛

(中国科学院物理研究所凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

**摘要** 物质在纳米尺度下可能呈现出与体材料不同的物理特性,这正是纳米科技发展的基础之一.要想探索在纳米尺度下材料物理性质的变化规律及可能的应用领域,离不开相应的技术手段.微纳米加工技术作为当今高技术发展的重要技术领域之一,是实现功能人工纳米结构与器件微纳米化的基础.本文根据几个不同的应用领域,介绍了微纳米加工技术在纳米物理与器件研究领域的应用.

**关键词** 微纳米加工技术,人工纳米结构,纳米物理与器件

## Applications of micro/nanofabrication in nanoscale physics and devices

GU Chang-Zhi<sup>†</sup> LUO Qiang YANG Hai-Fang JIN Ai-Zi LI Jun-Jie WANG Zong-Li  
WANG Qiang XU Peng QUAN Bao-Gang YUE Shuang-Lin HUANG Yang SHI Cheng-Ying

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

**Abstract** Nanoscale materials exhibit novel physical properties different from macro systems, which has led to the rise of nanoscience and nanotechnology. It is necessary to develop appropriate methods to study the properties of such materials and their potential applications. Micro/nanofabrication technologies offer a controllable approach for patterning the structures and devices down to the nanometer scale, and are rapidly finding applications in many fields. We review some current examples in the research on nanoscale physics and devices.

**Keywords** micro/nanofabrication, artificial nanostructure, nanoscale physics and devices

## 1 引言

人们从理论和实验研究中发现,随着材料尺度的减小,由于表面效应、体积效应和量子尺寸效应的影响,材料的物理性能和采用该材料制作的器件特性等都可能表现出与宏观体材料和相关器件特性显著不同的特点.这些特异的物理性质具有广阔的实际应用和理论研究前景.材料和器件在纳米尺度的特殊性质主要由几个与量子效应、尺寸效应和边界效应等直接相关的特征物理尺度决定,如简并电子系统的费米波长(金属约在1 nm以下、半导体在几十nm左右)、高温超导体的相干尺度(1 nm或更

小)、磁交换作用耦合长度、电子的平均自由程、电子自旋退相干长度、激子扩散长度(100 nm)等.只要结构尺寸接近这些物理量的特征长度,材料的电子结构、输运、磁学、光学和热力学性质均会发生明显的变化.这些行为是纳米物理中科学发现的基础.但这些性能对微观结构的敏感性,使得无论在纳米物理科学问题研究还是在纳米器件发展应用中,对材料生长控制和微加工的精确程度都提出了极为苛刻的要求.所以,需要纳米、甚至原子层次的微纳米

\* 国家自然科学基金(批准号:50472073,50472071,60501014,90406024-1)资助项目

2005-10-17 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: czgu@aphy.iphys.ac.cn

加工技术,以探索材料与器件的新特性.可见,基础科学的研究发展往往需要技术科学提供强有力的支持,要想探索在纳米尺度下物质的变化规律、新的物理性质和器件功能及可能的应用领域,同样离不开相应的技术手段.微纳米加工技术作为当今高技术发展的重要领域之一,是实现功能结构与器件微纳米化的基础.借助微纳米加工技术,人们可以按照需求来设计、制备具有优异性能的纳米材料或纳米结构及器件与装置,发展探测和分析纳米尺度下的物理、化学和生物现象的方法和仪器,准确地表征纳米材料或纳米结构的物性,探索纳米尺度下物质运动的新规律和新现象,去发现现有知识水平未能理解和预测的现象和过程,发展新的纳米材料、功能器件直至技术.本文将根据几个不同应用领域,分类列举了微纳米加工技术在纳米物理与器件研究中的一些应用实例.

## 2 常用的微纳米加工技术

常规的微纳米加工技术一般包括曝光技术和图形转移技术.

曝光是微纳米加工中最为关键的技术.最早发展起来的曝光技术是光学曝光,其基本原理是:光线经光学系统照射到设计好的掩模上,将掩模图形投影到基片的抗蚀剂上,通过显影从而在抗蚀剂上获得所需要的图形,然后再经刻蚀或剥离工艺将图形转移到基片上.目前,紫外曝光的分辨率可以达到 $0.1\mu\text{m}$ 以下.在基础和应用物理研究中,光学曝光技术常被用来制作各种原型微器件和低维人工结构,用以揭示材料在低维度、小尺寸下的奇特性质,例如采用紫外光刻方法来制作微纳电子器件、左手材料和光子晶体、低维纳米材料的测量电极等,它是辅助研究低维材料的物理性质和器件特性的基本微加工技术手段.

电子束曝光(EBL)技术是利用电子束在有机聚合物薄膜上加工精细掩模图形的工艺技术.电子束曝光与普通光学曝光一样,都是在有机聚合物(抗蚀剂)薄膜上制作掩模图形.由于电子束的德布罗意波长小于 $0.01\text{nm}$ ,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,并能直接产生图形,线宽可以小于 $10\text{nm}$ <sup>[1]</sup>,它是用于加工纳米器件和纳米结构的主要方法,如低维人工量子结构的制作、周期性人工光学材料的加工、各种纳米电子器件的制造等.

此外,目前发展的适合纳米尺度的光刻技术还有:极紫外曝光(EUVL)技术、X射线光刻(XRL)及离子束光刻(IBM)等,尽管它们各具特色,但就其应用的广泛性来说,还不如上面介绍的紫外和电子束曝光技术那样普遍.

随着微电子技术的发展,在纳米加工技术上不断突破,一批新的加工技术相继被推出,如聚焦离子束加工技术等,在基础与应用物理研究方面的应用也非常广泛.

聚焦离子束(FIB)技术是在电场和磁场的作用下,将离子束束斑聚焦到纳米量级,通过偏转系统和加速系统控制离子束,实现微纳米图形的监测分析和纳米结构的无掩模加工.它用聚焦离子束代替了扫描电镜(SEM)及透射电镜(TEM)中质量较轻的电子束,使传统的显微分析观察和微加工技术的结合上有了新的突破.由于能在选定的微区进行刻蚀和沉积金属或者绝缘层,使得FIB技术在微纳米人工结构加工、材料分析、样品制备和微纳电子器件制作等领域有广泛应用.FIB技术的主要优点是以很高的精度实现复杂的微结构.目前,其加工的线宽已小于 $10\text{nm}$ ,深宽比可达到 $10:1$ ,但是微结构的尺寸受限于加工时间,较低的加工速度是FIB技术的主要缺点,另外在加工过程中引入的离子注入或污染等问题也是需要考虑的.

## 3 应用

### 3.1 电学领域的应用

纳米材料作为纳米科技发展的物质基础,引起了人们广泛的关注.要获知低维纳米材料的物性,过去通常是对一束或一堆样品进行测量,获得的是它们作为整体的性质,往往不能真实地反映这些低维材料的本征物性.现在,微纳米加工技术可以为我们提供切实有效的实验手段来准确地对单个低维纳米材料或纳米结构进行物性测量,从而获得它们的本征特性.

要表征单个低维纳米材料的电输运性质,可以通过聚焦离子束技术或电子束曝光技术方便准确地低维材料上制作微电极(图1).中国科学院物理研究所的龙云泽等人利用聚焦离子束辅助沉积技术制作铂电极,实现了对单个聚合物微球和纳米管电导的测量<sup>[2,3]</sup>,结合二维膜结构的电导、 $I-V$ 和磁阻测量结果,表明聚苯胺微球的电学性质主要取决于球间接触特性,他们还发现单根聚苯胺和聚吡咯纳

米管中的库仑相互作用非常强.此外,中国科学院物理研究所的马拥军等人利用 FIB 技术制作电极,研究了单根 ZnO 纳米线的直流电导<sup>[4]</sup>,结果表明其导电机理符合 Efros - Shklovskii 变程跳跃(VRH)模型.采用 FIB 制作低维纳米材料的电极,接触特性是人们所普遍关心的.冰岛纳米技术小组的 De Marzi 等人用多孔模板电沉积的方法制备了白金纳米线,并且用聚焦离子束来直写白金线与电极的接触点,以研究白金纳米线的输运特性<sup>[5]</sup>.对直径 70 nm 白金纳米线输运特性的测量结果表明,利用聚焦离子束直写形成的接触点具有低的接触电阻.因此,在研究一维纳米材料输运特性方面,FIB 技术是一种快速灵活的方法.

管在未来的纳电子材料与器件领域有着非常诱人的应用前景.而实现 BN 纳米管的掺杂,诱导其半导体特性,更是纳电子学领域应用的关键.中国科学院物理研究所的顾长志等人利用电子束光刻的微加工技术制作了如图 2(a)所示的测量输运性质的电极,研究了单根 F 掺杂 BN 纳米管的电导特性,发现 F 掺杂实现了 BN 纳米管从绝缘体向半导体的转变,5% 的 F 掺杂使 BN 纳米管的电导提高 3 个数量级以上[图 2(b)]<sup>[7]</sup>.

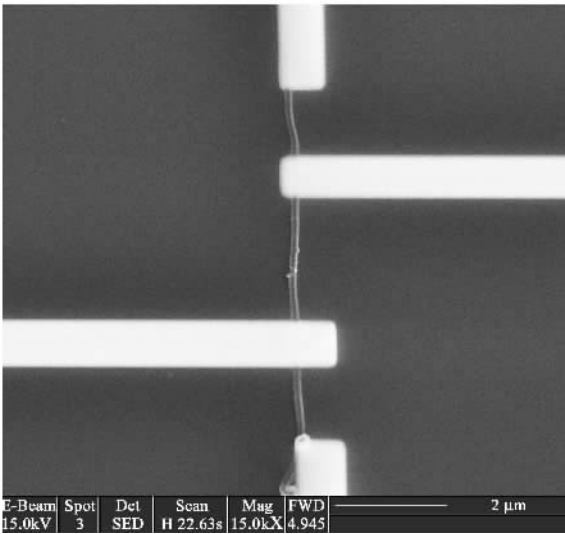


图 1 FIB 制作的单根纳米管电极

在探索碳纳米管作为未来纳米电子学基础的道路路上,由碳管组合形成的碳纳米管结器件也引起人们的关注.中国科学院物理研究所刘立伟等人采用电子束曝光制作电极,实现了完全由碳纳米管构成的晶体管,即由两根 p 型半导体单壁碳纳米管组成的“T”形的三端器件<sup>[6]</sup>.通过两根碳管结的电输运测量,观察到了一个由背底门电压控制的整流行为.而当没有施加门电压时, $I - V$  特征相对比较对称,整流效应消失.另外,在一定条件下,一根碳管可以作另一根碳管的局域门电压,起到控制另一根碳管电输运的作用.这一性质可以用来实现仅仅依赖于碳纳米管的晶体管和放大器.

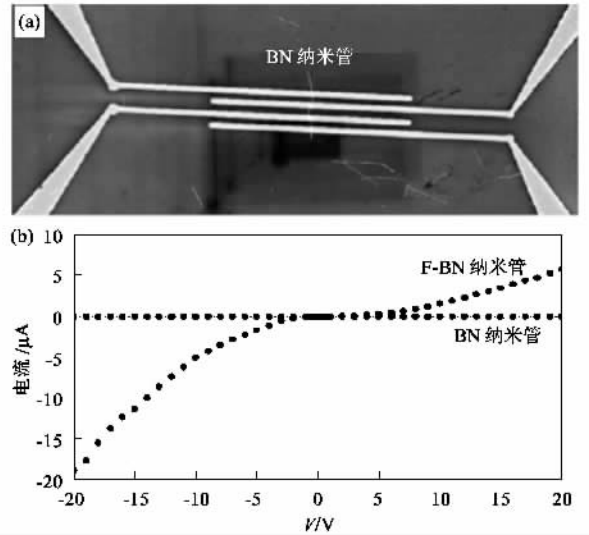


图 2 (a) 电子束光刻制作的单根 F 掺杂 BN 纳米管电极 (b) 单根 F 掺杂 BN 纳米管和纯 BN 纳米管的  $I - V$  特性对比

与碳纳米管的电子结构明显依赖于管径与螺旋度等因素不同,BN 纳米管表现出稳定一致的电学特性.结合考虑它的化学惰性和宽带隙特点,BN 纳米

除了上面的低维纳米材料的物性研究,微纳米加工技术在纳米器件制作方面也是不可缺少的重要技术手段.中国台湾的 S. - F. Hu 等人利用电子束曝光中的邻近效应在 Si 上制作了 20 nm 的点接触结构,并且对制作出的单电子晶体管的电学特性进行了表征<sup>[8]</sup>.中国科学院物理研究所的王宗利等人利用聚焦离子束技术在普通硅片上刻蚀出锥状深孔作为模版,通过热丝化学气相沉积的方法沉积金刚石,然后进行湿法腐蚀除去硅模版,从而得到形状完全可控的金刚石锥尖阵列(如图 3 所示),制作出场发射显示器件<sup>[9]</sup>.日本物质材料研究机构(NIMS)的 Terabe K 等人利用  $Ag_2S$  表面可以形成 Ag 的纳米突起,且该突起可以通过偏压控制实现长大和消失的原理,运用电子束曝光技术,制作出一个硫化银导线和一个铂导线以 1 nm 的间距进行交叉的原子级开关<sup>[10]</sup>.这种开关便于集成进实际的装置中,且消耗的电力只有半导体元件的百万分之一.美国 Harvard 大学的 Friedman 等人采用标准的光刻技术,通过低温平面工艺在玻璃衬底上将高性能的多纳米线晶体

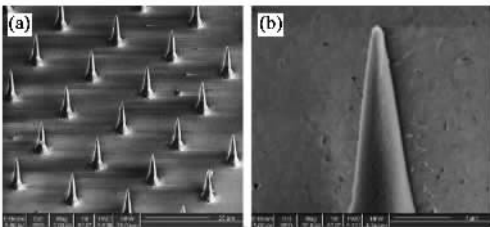


图3 (a) 聚焦离子束辅助制备的金刚石锥阵列 (b) 单个高长径比的金刚石锥

管集成为逻辑反相器和环形振荡器<sup>[11]</sup>,其环形振荡器的振荡频率高于硅衬底上制作的器件,达 10 MHz 以上,相应的延迟时间远小于有机半导体和非晶硅器件,仅为 14 ns.

在采用微纳加工技术研究纳米材料与器件的特性过程中,微纳加工技术本身也得到不断的发展与改进.我们知道,金属电极间的纳米级缝隙对于研究单个分子及金属纳米晶的电学性质是非常有用的,由于该缝隙一般要求在 1—5 nm 之间,所以传统的电子束直写及其他的曝光技术很难实现.英国格拉斯哥大学的 Steinmann 等人采用统计对准技术,在电子束直写系统上利用三次直写、金属镀膜及溶脱工艺实现了金属电极间纳米级缝隙的制作<sup>[12]</sup>,并对制作的缝隙宽度约为 1nm 的 Pt 电极  $I-V$  特性进行了测量,发现了明显的隧穿特性.这种方法不但可以实现所需要金属电极的制作,而且两电极端可以采用不同的金属材料.

### 3.2 光学领域的应用

近年来,二维光子晶体(PC)因其存在光子带隙而日益引起人们的兴趣,成为光学领域的研究热点.光子晶体的概念是从半导体材料推演而来的,高低折射率的材料交替排列形成周期性结构就可以产生类似于半导体中禁带的光子带隙.由于光子带隙的存在,频率落在光子带隙中的电磁波是禁止传播的.通过改变光子晶体的周期,就可以调制光子晶体对不同频率的光波产生能带效应.光子晶体具有重要的应用前景,如用光子晶体制作反射镜、天线、光开关、光放大、光波导、微腔、无阈值激光、光通信等方面.与传统的光器件相比,它有着非常大的优越性.光子晶体的结构单元尺寸较小,必须通过微纳加工技术来实现.中国科学院物理研究所的田洁等人,在 SOI 衬底上利用聚焦离子束和湿法腐蚀的方法制作了如图 4 所示的空气桥式二维光子晶体<sup>[13]</sup>.这种方法方便灵活,易于按照所需尺寸和图形制作 PC

器件.日本 Tokushima 大学的 Ye 等人利用电子束曝光及 ICP 刻蚀技术,在 Si(100)上成功地制作了圆

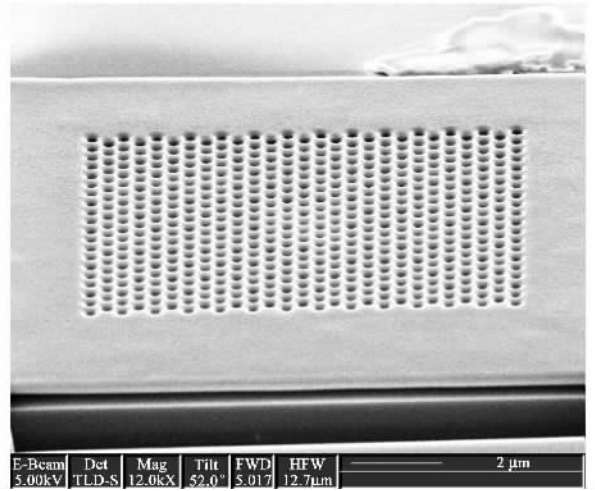


图4 聚焦离子束制作的空气桥式光子晶体

柱状蜂窝形的光子晶体,并在波长 1.5  $\mu\text{m}$  处测得了完全的光子带隙<sup>[14]</sup>.

三维光子晶体由于存在完全的三维光子带隙而日益引起人们的兴趣.美国加利福尼亚技术研究所的 Schilling 等人用光电化学方法和聚焦离子束技术相结合,用聚焦离子束在已经制备出一个方向光子晶体结构的多孔硅上制备了另外一个维度的光子晶体结构,形成六方格子正交结构的光子晶体<sup>[15]</sup>,光致发光数据显示的强关联也显示了被激发的量子点和腔体模式下的散射效应是不同的.美国麻省理工学院的 Gorishnyy 等人提出利用极超音速光子晶体来控制高频光子的发射和传播,他们采用干涉曝光制备高质量、单晶极超音速晶体的方法<sup>[16]</sup>,发现对超音速光子晶体的直接测量是可能的,并且伴随着布里渊光散射.

大家都知道,电磁波在常规材料中传播都遵循右手定则.而左手材料能使电磁波在其中的传播遵从左手定则,存在逆 Snell 效应、逆 Doppler 效应和逆 Cerenkov 辐射效应等特异性能,对相关理论和实验的研究可以丰富电动力学的内容,具有重要的科学意义.在应用领域,利用左手材料的负折射性质在微波波段可以制造高指向性天线、聚焦微波波束,用于电磁波隐身等;利用开口环形谐振器产生负磁导率的特性,可以对太赫兹电磁波进行折射,从而用于军事学、气象学、海洋学、医学等各领域,为国家安全提供可靠保障;在红外及可见光频率可以利用近场成像的方法采用左手材料得到亚波长分辨率的完美透

镜. 基于 Veselago 等人关于左手材料(具有负磁导率和负介电常数)的理论预言,人们对左手材料在微波波段的传输特性进行了大量的研究,但都没有考虑衬底对左手材料特性的影响. 中国科学院物理研究所的全宝刚等人通过光刻技术分别在石英和 FR-4 衬底上制作出左手材料(如图 5 所示),验证了负折射现象的存在,并测得了负折射率和左手频率随衬底介电常数变化的关系. 结果表明,衬底介电常数的增大会导致左手材料的左手频率向低频方向移动<sup>[17]</sup>. 在太赫兹及更高频率实现磁共振响应对太赫兹光学和太赫兹电磁波的应用有非常特别的重要性,异向性介质(包括左手材料和开口谐振器环)能够在天然磁性材料没有磁响应的频率实现磁共振响应,从而使负折射率的实现成为可能. 德国的 Linden 利用电子束光刻和金属薄膜蒸镀制作出线宽 90nm 的 LC 共振环<sup>[18]</sup>,他们采用不同极化方向的红外光对这种微结构进行垂直照射,证实了这种结构在 1 THz 具有磁响应.

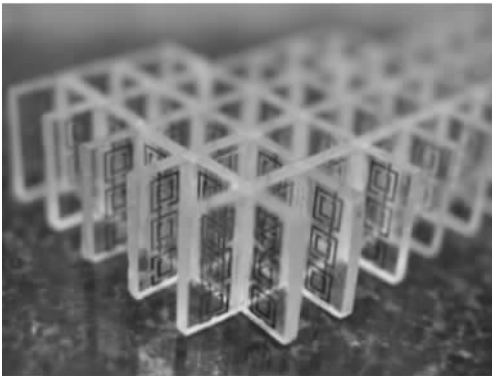


图 5 紫外光刻制作的微波波段左手材料

随着光纤通信速度的进一步提高,需要对数字信息进行高速的光学处理,这就要求高速的光学存储器来缓冲数据. 荷兰的 Hill 等人采用紫外曝光和反应离子刻蚀在 InP/InGaAsP 材料上制作了外径 16  $\mu\text{m}$  的微环激光器和波导结构<sup>[19]</sup>,由于两个微环激光器之间的耦合,两种光的传播状态可以根据输出光的能量不同区分开来,因而,这样的双稳态激光器具有数字信息存储功能. 美国 Cornell 大学的 Almeida 等人在 SOI 衬底上,利用电子束光刻技术制作了一个环型共振器和波导,形成对光的限制结构,实现了硅衬底上的快速全光开关与调制<sup>[20]</sup>,使用这一结构,对 25 pJ 的光脉冲,在 500 ps 内可实现 94% 的传播调制.

最近,理论工作预言了一种超级透镜,这种透镜

能够用于产生亚衍射极限的像. California 大学 Berkeley 分校的 Fang 等人通过沉积在石英衬底上的铬薄膜上应用聚焦离子束刻蚀一定的图案,以 PMMA 胶作为绝缘隔绝层,利用银作为天然的光学超级透镜,演示了亚衍射极限成像实验,像的分辨率为 60nm 半间距,或者六分之一光源波长. 这预示了一条令人兴奋的通往纳米尺度光学成像和超小光电器件的道路<sup>[21]</sup>.

此外,通过微加工技术对光学材料进行表面改性,获得增强的光学特性是微加工技术在光学领域应用的传统技术手段. 硅基发光材料,如非晶硅,多孔硅,硅/二氧化硅复合体等,因其与现代半导体工艺的兼容性,一直受到广泛的重视. 人们通过大量的研究证实了尺寸效应对其发光特性与机制的影响. 中国科学院物理研究所的王强等人采用氢等离子体刻蚀多孔硅的方法在表面形成硅纳米锥阵列(如图 6 所示),研究了其荧光特性,发现其荧光强度相对于刻蚀前明显提高<sup>[22]</sup>.

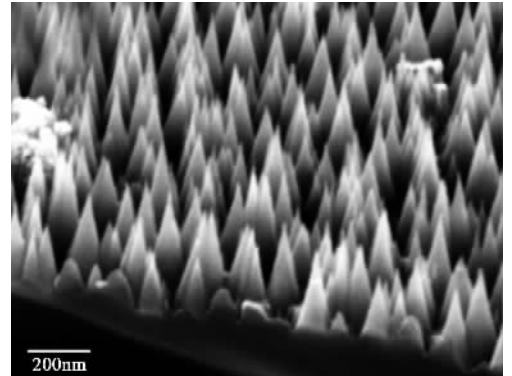


图 6 氢等离子体刻蚀后的多孔硅表面

### 3.3 磁学领域的应用

磁畴和畴壁在材料的磁学特性研究中起着核心作用,理解和控制磁畴对自旋电子学的很多技术应用来说是很重要的. 尽管理论方面的工作已经阐明了一些单个畴壁电阻的机制,但是许多实验却报道了与之矛盾的结果,甚至对畴壁电阻的符号都存在不统一的认识,单个畴壁会引起电阻增大还是减小的问题还悬而未决. 美国的 Tang 等人报道了一种利用一系列铁磁半导体研究畴壁的方法,这为自旋电子学提供了光明的前途. 实验使用的微器件由单晶 (Ga,Mn)As 外延层通过电子束曝光技术获得,在这种结构中存在的巨大的平面霍尔效应,能够直观、实时地观察单一磁畴壁沿多探针器件的传播. 他们在每个被研究的器件中应用稳定的和脉冲磁场来俘获

并且定位单个畴壁,可重复地获得高分辨率的沿着单个畴壁的磁致电阻的测量结果,并始终观察到畴壁的负本征电阻,电阻的大小受到通道宽度的调制<sup>[23]</sup>.日本 Saitoh 等人在热氧化的硅片上,利用电子束曝光技术制作了一个由  $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$  纳米线构成的半圆环结构及两个测量电极,然后使用高频交流电流直接观察到了铁磁纳米线中单个畴壁的动力学特征,从而准确地测定了一个畴壁的质量,结果表明,单磁畴壁具有  $6.6 \times 10^{-23}$  kg 的有限质量,而且一个畴壁要产生  $1 \mu\text{m}$  的位移只需  $10^9 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$  大的电流密度来诱导<sup>[24]</sup>.

到目前为止,人们研究了量子点与普通金属及超导体的耦合,但由于很难获得较高的量子点与磁性材料的耦合,所以对于量子点与磁性材料的近藤效应还没有实验报道.美国 Cornell 大学的 Pasupathy 等人利用电子束曝光技术及电迁移方法制作出纳米级缝隙的 Ni 电极结构,并将  $\text{C}_{60}$  分子嵌入该缝隙,通过对  $\text{C}_{60}$  分子与其相接触的铁磁 Ni 电极隧穿的测量,证明了  $\text{C}_{60}$  分子可以与 Ni 铁磁电极产生强耦合,从而表现出近藤效应,同时因为近藤效应的影响,在该体系中发现了非常大的负磁阻<sup>[25]</sup>.

研究自旋输运现象,例如各种磁电阻效应,是发展和应用磁电子学的基础.但由于在纳米阵列中,相邻结构之间存在双极相互作用,会对自旋反转产生干扰.为了排除这些干扰的影响,人们利用各种测量手段对单独的纳米结构进行研究,例如 SQUIDS、磁力显微镜、自旋极化扫描隧道显微镜等等.但是在结构中存在铁磁接触的时候,这些接触还是会影响到磁化反转的机制.德国 Duisburg - Essen 大学的 Leven 等人利用电子束光刻技术制作了一个单根钴纳米线和金做为接触电极的结构<sup>[26]</sup>.由于采用非磁性的金做电极,就可以用来研究单根钴纳米线的纯粹磁化反转行为.单根钴纳米线的磁化反转机制与纳米线的宽度有关.当宽度小于  $230\text{nm}$  时,磁化反转受钴的成核过程和磁畴的移动影响;当宽度大于  $3\mu\text{m}$  时,复杂的大量磁畴结构占主要影响;当宽度在  $230\text{nm}$  和  $3\mu\text{m}$  之间时,磁电阻效应出现了一个由于畴壁的移动所引起的“跃迁”的现象.美国 Florida International 大学 Khizroev 等人在沉积镍铁合金薄膜的基础上,利用聚焦离子束刻蚀制作了一个纳米紧缩结构,用来研究磁电阻效应<sup>[27]</sup>,使用这一结构,在  $100 \text{ Oe}$  的外加磁场条件下,得到 18% 的磁电阻.

### 3.4 其他领域的应用

除了上面介绍的电、光和磁学领域的应用,微纳米加工技术在物理学的其他领域和与物理学相关的交叉学科领域也具有非常广泛的应用.如在力学方面,用于研究单个一维纳米材料的力学性质. Fennimore 等人<sup>[28]</sup>通过电子束曝光等微纳米加工技术,用单根多壁碳纳米管作为转轴,制作出了纳机电旋转执行器,根据所施加的静电力和转子的旋转角度就可以计算出多壁碳纳米管的剪切模量. Williams 等人<sup>[29]</sup>同样是通过电子束曝光等微纳米加工技术,用多壁碳纳米管作为扭力弹簧,制作出了悬浮的纳米力学器件,通过原子力显微镜 (AFM) 的针尖触压连接在纳米管上的“小桨”使之扭转,根据所施加的力和扭转的角度,可以计算出碳纳米管的剪切模量.另外,用一维纳米材料制作悬臂结构,也可以表征他们的力学性质.在纳机电 (NEMS) 器件方面,英国剑桥大学的 Cha 等利用电子束光刻、金属薄膜沉积、去胶等工艺制备了由一根悬浮的多壁碳纳米管和一对自排列电极构成的纳机电开关/晶体管<sup>[30]</sup>.电测量显示,通过门电压改变影响悬浮碳纳米管和自排列电极之间的静电力,可以实现很好的开关特性,开启电压约为  $3.6 \text{ V}$ .在生物物理方面,利用聚焦离子束或电子束曝光等技术制作的生物大分子和 DNA 探测器,可以在生物活性环境下对样品的空间结构、动态变化、生化特性等进行直接研究,不需要对生物样品进行化学修饰、表面吸附、标定物插入等有可能影响样品环境的前期处理,具有多方面的优越性.

## 4 结束语

作为制作具有特异功能的微纳结构和器件的微纳米加工技术,它在物理学及其他学科的很多领域都有应用.随着微纳米加工技术自身的不断发展进步,以及该技术更多地应用于纳米物理与器件研究,必将拓展我们对微观物质世界的认知范围,提升我们对新现象、新规律的理解,促进纳米科学与技术的发展.

## 参 考 文 献

- [1] Vieu C, Carcenac F, Pépin A *et al.* Appl. Surf. Sci., 2000, 164: 111
- [2] Long Y, Chen Z, Ma Y *et al.* Appl. Phys. Lett., 2004, 84 (12): 2205
- [3] Long Y, Zhang L, Chen Z *et al.* Phys. Rev. B, 2005, 71 (16): 165412
- [4] Ma Y J, Zhang Z, Zhou F *et al.* Nanotechnology, 2005, 16: 746

[ 5 ] De Marzi G ,Iacopino D , Quinn A J *et al.* J. Appl. Phys. , 2004 ,96( 6 ) 3458

[ 6 ] Liu L W , Fang J H , Lu L *et al.* Phys. Rev. B ,2005 ,71 ( 15 ) :155424

[ 7 ] Tang C , Bando Y , Huang Y *et al.* J. Am. Chem. Soc. , 2005 ,127 :6552

[ 8 ] Hu S F , Sung C L , Huang K D *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2004 ,85( 17 ) :3893

[ 9 ] Wang Z ,Gu C ,Li J *et al.* Microelectronic Engineering. 2005 , 78 :353

[ 10 ] Terabe K , Hasegawa T , Nakayama T *et al.* Nature ,2005 , 433 :47

[ 11 ] Friedman R S ,McAlpine M C , Ricketts D S *et al.* Nature , 2005 ,434 :1085

[ 12 ] Steinmann P , Weaver J M R. Appl. Phys. Lett. ,2005 ,86 ( 6 ) :063104

[ 13 ] 田洁 ,韩守振 ,程丙英等. 物理学报 ,2005 ,54( 03 ) :1218

[ 14 ] Ye J Y , Matsuo S , Mizeikis V *et al.* J. Appl. Phys. ,2004 , 96( 11 ) :6934

[ 15 ] Schilling J , White J , Scherer A *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 ,86( 1 ) :011101

[ 16 ] Gorishnyy T ,Ullal C K ,Maldovan M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2005 ,94( 11 ) :115501

[ 17 ] Quan B G ,Li C ,Sui Q *et al.* Chin. Phys. Lett. ,2005 ,22 ( 5 ) :1243

[ 18 ] Linden S ,Enkrich C ,Wegener M *et al.* Science ,306 :1531

[ 19 ] Hill M T , Dorren H J S ,de Vries T *et al.* Nature ,2004 ,432 : 206

[ 20 ] Almeida V R , Barrios C A , Panepucci R R *et al.* Nature , 2004 ,431 :1081

[ 21 ] Fang N , Lee H , Sun C *et al.* Science ,2005 ,308 :534

[ 22 ] Wang Q ,Gu C Z , Li J J *et al.* J. Appl. Phys. ,2005 ,97 ( 9 ) :093501

[ 23 ] Tang H X , Masmanidis S , Kawakami R K *et al.* Nature , 2004 ,431 :52

[ 24 ] Saitoh E , Miyajima H , Yamaoka T *et al.* Nature ,2004 ,432 : 203

[ 25 ] Pasupathy A N , Bialczak R C , Martinek J *et al.* Science , 2004 ,306 :86

[ 26 ] Leven B , Dumpich G. Phys. Rev. B ,2005 ,71( 6 ) :064411

[ 27 ] Khizroev S , Hijazi Y , Chomko R *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2005 ,86( 4 ) :042502

[ 28 ] Fennimore A M , Yuzvinsky T D , Han W Q *et al.* Nature , 2003 ,424 :408

[ 29 ] Williams P A , Papadakis S J , Patel A M *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2005 ,82( 5 ) :805

[ 30 ] Cha S N , Jang J E , Choi Y *et al.* Appl. Phys. Lett. ,2005 , 86( 8 ) :083105



· 书评和书讯 ·

## 科学出版社物理类新书推荐

书 名	作(译)者	定价	出版日期	发行号
微分几何入门与广义相对论(上 第二版)	梁灿彬,周彬	¥59.00	2005年12月	0-2363
液晶物理与液晶显示	王新久	¥68.00	2005年12月	
量子信息物理原理	张永德	¥59.00	2005年12月	0-2347
相互作用的规范理论	戴元本	¥68.00	2005年6月	0-2148
计算物理学	马文淦	¥37.00	2005年5月	0-2147
计算电磁学要论	盛新庆	¥32.00	2005年3月	0-1900
窄禁带半导体物理学	褚君浩	¥120.00	2005年5月	0-2093
计算声学——声场的方程和波	李太宝	¥38.00	2005年1月	0-2016
半导体量子器件物理	傅英,陆卫	¥50.00	2005年1月	0-2004
现代声学理论基础	马大猷	¥48.00	2005年1月	0-1830
物理学家用微分几何(第二版)	侯伯元,侯伯宇	¥98.00	2005年3月	0-1976
数学物理方程及其近似方法	程建春	¥58.00	2005年2月	0-1952
准晶物理学	王仁卉	¥45.00	2004年8月	0-1802
非平衡凝固新型金属材料	陈光,傅恒志	¥42.00	2004年8月	0-2027
金属陶瓷薄膜及其在光电子技术中的应用	孙大明,孙兆奇	¥56.00	2004年7月	0-1942
软X射线射线与极紫外辐射的原理和应用	张杰	¥59.00	2003年9月	0-1682
现代压电学(上中下)	张福学	¥99.00	2003年5月	
拉曼布里渊散射——原理及应用	程光照	¥48.00	2003年5月	0-1301
应用力学对偶体系	钟万勰	¥42.00	2003年3月	0-1542
广义相对论和引力场理论	胡宁	¥15.00	2003年3月	0-1157

欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书. 如果您有出版意向,请和我们联系. 凡购书者均免邮费,请按以下方式和我们联系:

电 话:010-64017957 64033515 电子邮件:mlhukai@yahoo.com.cn 或 dpyan@cspg.net

通讯地址:北京东黄城根北街16号 科学出版社 邮政编码:100717 联系人:胡凯 鄢德平

欢迎访问科学出版社网址 <http://www.sciencep.com>