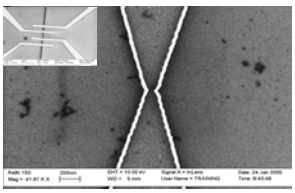
中国科学院物理研究所
微加工实验室

微加工简报

2006年 第1期

国内进展

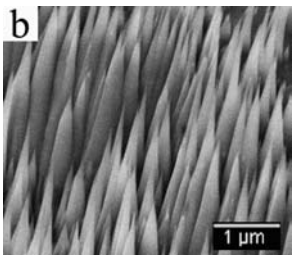
磁性纳米点接触的电阻与温度关系



电子束光刻制作的纳米点接触结构及四电极测试系统

在自旋电子学领域中，自旋极化电流通过磁性金属制作的纳米点接触、纳米线等紧缩结构可以用来实现自旋注入。这种方法可以摆脱外加磁场的限制，降低能量损耗。但这种自旋传输行为与温度的关系还没有被广泛的研究。最近，中国科学院物理研究所微加工实验室的徐鹏博士等人与表面物理国家重点实验室的夏柯研究员合作，利用电子束光刻技术制作了因瓦合金的纳米点接触结构，并且在10K到300K的温度范围内测量了纳米结构的电流电压特性。结果表明当温度低于50k的情况下，电流电压曲线呈现出非线性和不对称的现象。这是由于点接触结构使磁畴的畴壁被束缚在点接触的位置，当自旋极化电流通过时自旋电子受到了畴壁散射的结果。该成果发表在Applied Physics Letters，88（2006）033108上。该工作得到国家973项目和国家纳米科学中心的支持。

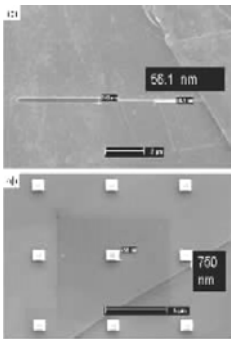
纳米硅锥阵列的场发射特性



高长径比纳米硅锥阵列

如何获得具有高的长径比、低的功函数和良好导电性的场发射体，一直是真空电子学领域所关心的重要问题。最近，中科院物理所微加工实验室的王强博士等人与电镜实验室的马拥军博士及表面实验室的白雪冬副研究员合作，采用无掩模等离子体刻蚀技术，在多孔硅衬体上制备出长径比高、取向性一致和分布均匀的纳米硅锥阵列。场发射测试结果表明，这种具有碳涂敷层的纳米硅锥阵列具有优异的场电子发射性能。该研究结果发表在NANOTECHNOLOGY 16（2005）2919上。该工作得到国家自然科学基金委、973项目和国家纳米科学中心的资助。

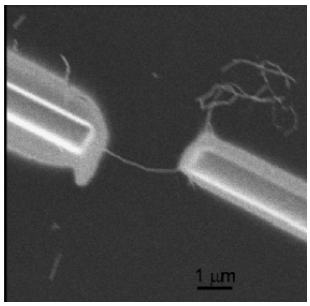
人工裁剪制备石墨纳米结构



石墨纳米结构

对小尺度石墨片的研究，是研究碳纳米管的一个重要途径。目前制备的石墨图型的最小尺寸只能达到微米量级，其输运性质的量子效应不明显。最近，中科院物理所极端条件实验室吕力小组的刘首鹏等人与微加工实验室合作，采用FIB与EBL相结合的微加工方法裁剪高定向热解石墨，制备出纳米尺寸的石墨条. 发现用聚焦离子束刻蚀高定向热解石墨，可以得到边缘整齐程度在几十纳米的石墨条，用电子束曝光和反应离子刻蚀的工艺，可以得到最小尺寸为50纳米的石墨图型，为进一步的相关石墨纳米结构特性与器件研究奠定了基础。该成果发表在“物理学报”54（2005）4251上。

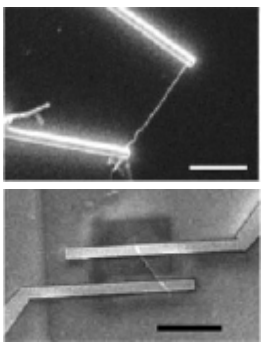
单根氮掺杂的多壁碳管制作的场效应晶体管



基于单根氮掺杂碳纳米管器件的SEM照片

通过掺杂改变纳米管的电学性质是纳米科技研究的一个重要方面。先前虽然围绕氮掺杂的多壁碳管的电学和热学性质进行了很多理论分析和实验研究，但在常温和低温下直接对单根氮掺杂碳管进行电输运的测量较少报道。中国科学院化学所的XiaoKai等人利用FIB微加工技术，在氧化了的硅衬底上制作了基于单根氮掺杂多壁碳纳米管的场效应晶体管，并对其在不同温度下的电学性质进行了测量。结果表明氮掺杂的碳纳米管具有n型半导体特性，电子输运主要是通过热激发以及电子隧穿0.2eV的肖特基势垒实现的。改成果发表在JACS，127（2005）8614上。

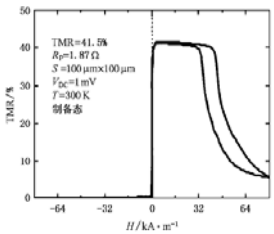
氧化镓纳米线的合成及电性质研究



利用FIB和EBL在单根氧化嫁纳米线上制作地电极

β-Ga2O3是一种重要的宽禁带半导体材料，在光电子器件、气体传感器件方面有广阔的应用前景。目前报道了不少合成一维氧化镓纳米结构的方法，但对其电性质的研究还很有限。中科院物理研究所微加工实验室的黄阳等人利用水蒸气与金属镓反应制备了具有高长径比（直径在10－40nm）的氧化镓纳米线，然后利用电子束光刻和离子束辅助沉积等微加工技术制作了单根氧化镓纳米线气敏元件，并对其气敏特性进行了研究。研究表明氧化镓纳米线可以和Au/Ti电极形成良好的欧姆接触，室温大气环境下，其电导在1（Ω·m）-1的数量级，当吸附了NH3或NO2分子后，其电导会强烈的增加或减小，具有很高地灵敏度和快速响应。该成果发表在J.Phys.Chem.B 110(2006),796上。该工作得到国家纳米科学中心资助。

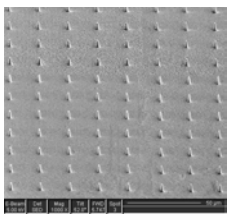
高磁电阻磁性隧道结的几种微制备方法研究



室温下TMR随外加磁场的变化

目前，对磁性隧道结中各种物理效应的研究备受关注。中科院物理所磁学实验室韩秀峰小组的李飞飞等人利用微加工实验室的条件，采用金属掩模法和光刻技术结合离子束刻蚀法，制备性能优化的磁性隧道结。采用$Co_{75}Fe_{25}$合金膜作为磁性隧道结的上下铁磁电极，厚度为25nm左右的Cu膜作为导电极，利用金属掩模法直接获得了室温TMR30－48％，RS为20－50％Kum²的磁性隧道结。该成果发表在“物理学报”54（2005）3831上。

高长径比金刚石锥阵列的场发射特性



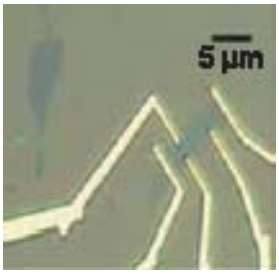
金刚石锥场发射阵列

金刚石锥阵列具有优异的物理特性和特定的几何结构，在场发射及显示器件方面具有广阔的应用前景。目前制作的金刚石锥阵列在锥体形状的不一致性及阵列密度的不可控性严重影响了其在场发射方面的应用。最近，中科院物理研究所微加工实验室的王宗利博士利用聚焦离子束（FIB）刻蚀技术在普通硅片上刻蚀出锥状深孔阵列作为模板，通过热丝化学气相沉积金刚石方法得到了高长径比的、尖端曲率半径小于100nm的、密度完全可控的金刚石锥阵列。研究表明所制备的金刚石锥阵列具有了非常小的场屏蔽因子和明显增强的场发射特性，能够非常好地满足场发射器件和扫描探针系统的应用要求。该成果发表在Science and Technology of Advanced Materials 6（2005）799-803 上。

国 外 进 展

二维石墨片中的量子霍尔效应

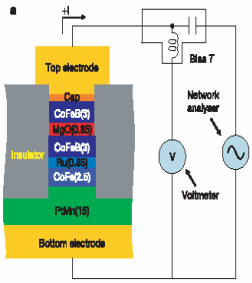
二维石墨片是现实中的理想二维系统。虽然理论早已预言了特殊的半整数量子霍尔效应,以及由二维石墨层能带结构的异常拓扑结构导致的量子波函数非零Berry相的存在，但先前一直未得到实验上的证实。美国哥伦比亚大学Yuanbo Zhang等人利用微机械提取加工工艺得到了高迁移率的单层石墨层，利用电子束光刻制备了二维石墨层金属电极，进行了磁致输运的实验研究。观察到了电子以及空穴的半整数量子霍尔效应，同时磁致震荡验证了这些实验与Berry相之间的联系。此成果发表在Nature, 438 (2005) 201上。



电子束光刻制备的二维石墨层器件的光学显微像

磁隧道结中的自旋-扭矩二极管效应

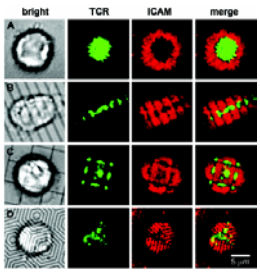
人们期望通过操控电子的自旋来获得传统电子器件所没有的新功能。其中一个对源于电子自旋自由度而产生的效应研究实例是对在纳米磁体自旋矩上施加自旋-偏振电流所导致的扭矩的研究。日本NIST的A. A. Tulapurkar等利用电子束光刻以及离子束刻蚀制作了一个纳米磁通道结并研究了其特性。结果显示在外加一定磁场的情况下，对纳米结施加一个小的射频交变电流，当频率与自旋-转矩效应产生的自旋振荡发生共振时，可以在器件两端产生可测量的直流电压。这一行为与传统半导体二极管有显著差别，它可能成为在通讯电路中制作纳米级射频探测器的基础。此结果发表在Nature, 438(2005)339上。



磁隧道结器件的剖面以及测量装置

通过几何重构免疫神经突触改变TCR的信号发生

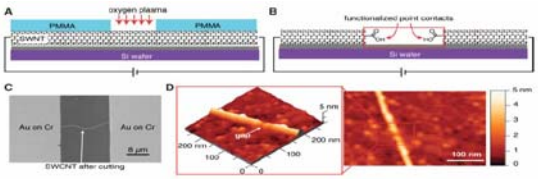
免疫神经突触是一种cell-cell结，是由信号发射和接受分子所构成的大尺度的空间图案，目前其形成及功能仍是一个谜。美国加尼福利亚大学的Kaspar D. Mossman等人利用基底支撑的双层膜以及电子束光刻制备出多种纳米结构来对免疫神经突触的形成过程施加几何约束，并对由此得到的不同图案神经突触进行分析。结果揭示了T细胞受体（TCR）的径向位置与信号活性之间的因果联系，被机械束缚于神经突触外围区域的TCR团簇表现出更持久的信号发射，这证实了神经突触中TCR的空间迁移代表了一种信号传导机制。该成果发表在SCIENCE，310（2005）1191上。



神经突触随基底上的几何约束而改变

用导电分子连接单壁碳纳米管中的裂缝

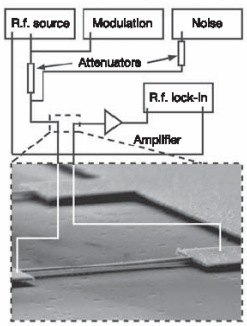
分子与金属电极之间的结合情况不明了是分子电子学面临的最大挑战之一。美国Columbia大学的Xuefeng Guo等人采用电子束曝光和氧等离子体刻蚀单壁碳纳米管形成间隔小于10 nm的、两侧由羧酸终止的裂缝，将分子通过共价键连接在单壁碳纳米管的裂缝间，形成了非常牢固的接触。这种方法可用于多种分子的电学性质测量。另外，他们还发现这样的单分子桥的电导会随着pH值的变化而转变。该成果发表在Science 311 (2006), 356上。



电子束曝光和氧等离子体在单壁碳纳米管中切割出裂缝

双稳态纳米机械震荡器中相干信号放大

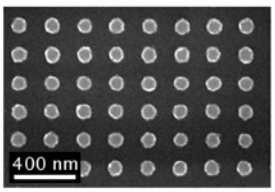
随机共振是指在一个噪声系统中加入噪声导致响应信号产生相干放大。作为相干信号放大的机理，随机共振在纳米尺度的系统中也应当被观察到。美国Boston大学的Robert L. Badzey等人利用电子束曝光和干法刻蚀的方法在单晶硅上制作两端固定的纳米机械横梁，它在射频电源的驱动下产生横向震荡，调制信号的引入使得横梁在双稳态间可控的转换，加入噪声后观察到了信号强度明显放大。纳米机械系统中的随机共振可能具有实现高速可控的纳米机械存储器单元的功能，并将为探索宏观量子相干和隧穿铺平道路。该成果发表在Nature, 437 (2005), 995上。



双稳态纳米机械震荡器的结构及测试电路

磁性纳米圆盘中单畴态到涡旋态的转变

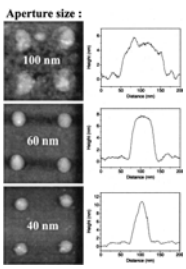
磁性纳米结构在自旋电子学器件中有着广阔应用前景，其中研究最多的结构是磁性圆盘。在很小的圆盘中，剩磁为单畴态；而在较大的圆盘中，剩磁为涡旋态。过去的研究发现单畴的磁矩方向是直接或者通过涡旋态间接发生正负转变的。英国Imperial College London的A.V.Jausovec等人采用电子束曝光和热蒸发的方法在硅衬底上制作了直径为97 nm的坡莫合金圆盘阵列这些圆盘的基态为单畴态，通过磁光克尔效应研究发现，单畴态并不稳定，会逐渐衰变为涡旋态。该成果发表在Appl. Phys. Lett. 88 (2006), 052501上。



电子束曝光和热蒸发制作的坡莫合金圆盘阵列

1.55μm光致发光特性的InAs/InP 量子点阵列

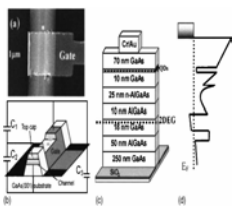
控制纳米结构材料的精确度已成为一种非常有挑战性的工作。人们利用分子束外延或化学束外延方法制作了InAs/InP 量子点，但这种方法制作的量子点沿［1－1 0］晶向会有一定的拉长。最近，法国的J. M. Benoit等人将电子束曝光及金属有机气相外延方法相结合，制作出了直径为40-100nm的InAs/InP 量子点阵列，发现该方法可以很好的控制量子点的尺寸及密度，且所得量子点的尺寸及高度波动很小，并在电信通信波段1.55μm波长处有高效的光致发光效应。该成果发表在Appl. Phys. Lett. 88（2006）041113上。



InAs/InP量子点AFM照片

一维GaAs沟道耦合的InAs量子点存储器件

利量子点存储器件主要包括存储电子的量子点层以及邻近量子点区域用于探测电子的沟道组成。过去人们对Si的量子点存储器件研究的较多，但是对InAs量子点存储器件的研究则较少。日本北海道大学的Devarai Nataraj 等人利用电子束曝光等方法制作了以InAs为量子点层，以多层GaAs及$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$为沟道的量子点存储器件。实时测量显示该器件的写入／去除态在20K时可以实现5分钟的辨别。该成果发表在Appl. Phys. Lett. 87（2005）223120上。



量子点存储结构