中国科学院物理研究所
微加工实验室

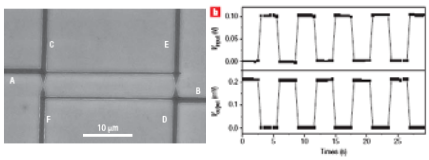
微加工简报

2008年 第1期

国内进展

全金属纳米结构的逻辑电路

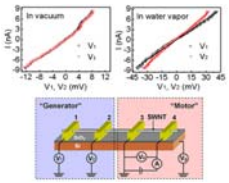
自旋极化电流与天然存在的磁畴壁间的角动量交换打开了磁与电之间联系的新通道。不需要外加磁场，仅用电流来操纵材料的磁化状态，克服了磁场难以屏蔽的困难，为自旋逻辑器件高度集成和信号高可靠性处理提供了可能。**中国科学院物理研究所微加工实验室顾长志研究员领导的小组与表面物理国家重点实验室夏钶研究员领导的课题组合作**，通过铁磁金属因瓦合金纳米点接触结构的设计和纳米加工，在认真研究电流驱动畴壁与纳米点接触电阻关系的基础上，设计并制作出基于畴壁运动的逻辑"非门"电路。这种逻辑电路在室温条件下直接用电信号驱动，并且使用电信号探测，具有集成度高、成本低、兼容性好和低功耗的特点，能够在磁性材料的居里温度以下正常工作（600℃），并与现今的CMOS平面工艺完全兼容。由于电路以全金属结构实现，能够获得比现今的半导体电路更高的载流子密度和更细的线宽，为新型高密度纳米电路的研制奠定了基础。相关工作发表**Nature Nanotechnology 3(2008)97**上。该工作得到国家自然科学基金委、中国科学院和科技部的资助。



全金属逻辑非门电路及输入与输出特性

单壁碳纳米管：纳米发电机与纳米泵

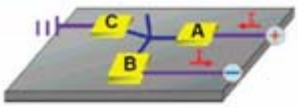
单壁碳纳米管的管径约1.5 nm左右，是一种非常理想的纳米通道。但在实验研究方面，难度非常大。目前主要利用大量的碳纳米管宏观样品进行研究，无法与理论计算的单根碳纳米管的结果相互验证比较。**国家纳米科学中心孙连峰研究小组等与中科院物理研究所微加工实验室合作**，通过构建单根单壁碳纳米管多端器件，巧妙地采用了一种新型的四电极测量方法，首次对"内腔含水的"单根单壁碳纳米管进行了研究。他们证明：水进入到碳纳米管内腔后，纳米管上的电流／电压能够驱动管内的水分子流动，水流动速度与电流的大小呈线性关系（纳米泵）。同时，水的流动会在碳管中产生一个电动势（发电机）。这种水分子的定向运动使碳管中载流子产生定向运动。当载流子积累到一定程度后，载流子的定向运动达到平衡，此时就建立起了稳定的电动势。 这种一根开口的单壁碳纳米管可以被用作'电动马达'和'发电机'；将在纳米流体学中获得重要的应用。该成果发表在**Advanced Materials 20（2008）1**上。



器件的连接方式和测量结果

可提高灵敏度以及区别信号与噪音的多端纳米传感器

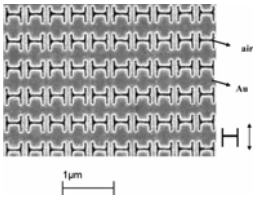
在各种各样的纳米传感器中，基于电性能的纳米传感器响应快，灵敏度高，直观易操作，特别具有吸引力。但基于电性能的纳米传感器受到环境，杂质等的影响，容易产生较大的噪音。在这种情况下，如何区分信号与噪音就成为发展高性能纳米传感器需要解决的关键问题之一。**国家纳米科学中心孙连峰研究员领导的研究小组与中科院物理研究所微加工实验室合作**，通过多端纳米器件的研究，成功地找到了一种克服这个难题的一种有效途径。他们利用化学气相沉积（CVD）方法，成功制备出大量的ZnO四角结构。利用电子束直写技术，在单分散的ZnO四角结构与衬底相接触的三个端点上沉积金属电极，从而形成一种三端电性能器件。和以往基于纳米线/纳米管的两端纳米器件相比，这种多端器件可以对一个外界信号同时测量出两个电压信号响应。这些电压响应曲线之间可以相互比较：如果每个电压响应曲线都对信号做出了相应的响应，那么可以判断这个信号是真的信号。反之，如果一个响应信号没有同时在两个响应曲线上做出同步的反映，那么这个信号就可以判断为噪音。从而可以相当准确地判断信号的真伪。显示出了多端器件在区分信号与噪音方面的优势。 该成果发表在**Nano Letters 8（2008）652**上。



ZnO四角结构器件示意图

H型周期金属结构阵列对近红外波段光的增强透过

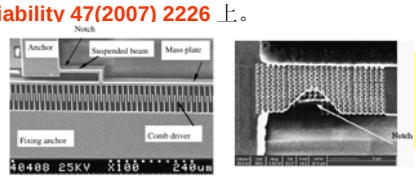
周期性的亚波长金属结构阵列对光的透过有增强作用，而这种增强透过主要依赖于两个因素：形状和周期。因此，形状共振也被用来解释圆孔及方孔阵列在光透过增强中的差异，而图形的几何形状的复杂化可能导致形状共振特性的复杂化。**中国科学院物理研究所孙梅等人与微加工实验室合作**，利用**电子束曝光及反应离子刻蚀技术**在厚度为120nm的金膜上加工了不同线宽及不同周期的H型金属阵列结构，并对其在近红外波段的光透过特性进行了实验和理论方面的研究。对于宽度为120nm、周期为1.1μm的H型阵列，在波长为1.6μm附近发现了高达16.3％的增强透过，而且与以往的圆孔阵列不同，随着H型结构线宽的变化透过峰的位置发生变化，得到了H型的金属结构阵列与其形状个性异性相一致的极化效应，并证明了局域表面等离激元对增强透过的贡献。该成果发表在 **Phys. Lett. A, 365(2007) 510**上。



加工得到的H型金属结构阵列

微结构和微器件中的形变分析

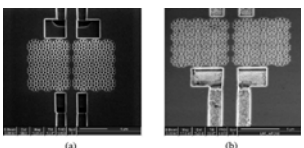
微结构和微器件的力学行为引起了材料和力学研究者的兴趣。要理解这些力学行为的规律，必须发展具有微/纳米灵敏度和分辨率的形变测量技术。**清华大学的谢惠民教授等人与中科院物理所微加工实验室合作**，发展了一种微标记识别方法用于测量微结构的形变。他们利用**聚焦离子束**在MEMS器件的悬臂梁上刻蚀微标记阵列，在电子显微镜中观察器件运动过程中微标记阵列的图像，通过数字图像关联方法就可获得微结构和微器件中的形变信息。该成果发表在**Microelectronics Reliability 47(2007) 2226** 上。



MEMS器件和利用FIB在悬臂梁端部制作的微标记阵列

FIB加工光子器件的光学性能

聚焦离子束是材料微加工方面的一项重要技术，应用非常广泛。但是该技术也有其局限性，如表面Ga污染和再沉积等，通常人们用湿法腐蚀牺牲层或高温退火等方法解决该问题，但对光子晶体都不很适合。**中科院物理研究所光物理实验室李志远研究组的陶海华等人与微加工实验室合作**，发现了一种对用FIB加工的样品进行低温后期处理的方法，可以很好的改善FIB加工的光子晶体的污染问题，提高其光学性能。该成果发表在**J. Vac. Sci. Technol. B 25 (5) (2007) 1609**上。

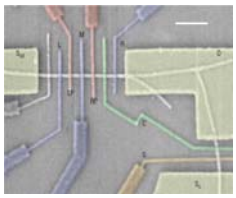


FIB加工的光子晶体结构

国外进展

基于Ge/Si异质结构纳米线、具有集成电荷传感器的双量子点

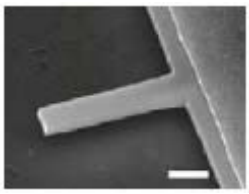
固态量子比特是要控制近邻半导体量子点中的电子自旋耦合。过去多数实验都是利用III-V族半导体材料来制作量子点，然而电子自旋相干性会受到原子核自旋相互作用的限制。对于Ge/Si纳米线，由于它们中大量原子核自旋为零，因而非常适合克服这一限制。**美国哈佛大学的YONGJIE HU**等人利用化学方法合成Ge/Si异质结构纳米线，通过**电子束曝光**等方法制作了双量子点器件，通过调制门电极电压可以控制量子点间的耦合，利用近邻的一个纳米线量子点与之形成电容耦合可以读出其电荷状态。这样的双量子点和集成电荷传感器可以作为基本结构单元形成一个固态量子比特，不会受到原子核自旋的影响。该成果发表在**Nature Nanotechnology 2(2007) 622**上。



Ge/Si纳米线双量子点和集成电荷传感器的SEM照片

利用可调的关联压电反应构造多功能纳米机电系统

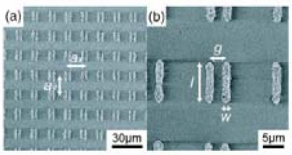
近年来，纳米尺度的器件已经迅速的发展，但是压电特性还没有被系统的应用到纳米电动机械系统器件中，**美国加利福尼亚技术研究所的Sotiris C**等人将GaAs悬臂梁嵌入到二极管中构成了纳米电动机械系统，并对其压电特性进行了测量。测量结果显示了可以通过改变压电器件损耗层的宽度来控制压电反应效率，也可以通过电压诱导来控制共振频率，这种结构可以有效的提高材料的电学和机械特性。该成果发表在**Science 317（2007）780上**。



具有悬臂梁的压电纳米机电系统

远红外人工超材料的磁致磁响应

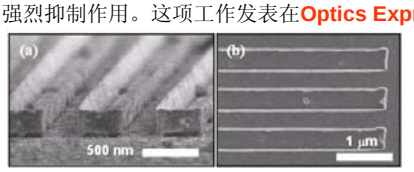
具有特殊光学特性的人工超材料结构是当前物理科学研究前沿的一大热点。最近，**日本物理化学研究所的Atsushi Ishikawa**等人利用双光子激发金属银离子发生光还原反应，制备出金属银人工超材料结构。该人工超材料由长宽分别为10、1.5微米的银线条结构组成，两两成对的线条间距4微米，以15微米的周期排布在石英衬底表面。通过探测侧入射到具有这种结构的样品表面的远红外电磁波的光谱，证实了这种人工超材料在18THz处存在着磁致磁响应。这项工作发表在**Appl. Phys. Lett (2007) 91 1131118**上。



利用双光子激发金属银离子发生光还原反应制备的金属银超材料

垂直金属钠米结构中的等离激元抑制

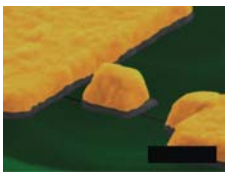
近年来，金属表面等离激元的相关研究非常引人瞩目。**韩国先进科学与技术研究所的Jin-Kyu Yang**等人利用电子束曝光、热蒸发镀膜、溶脱及氩离子刻蚀技术，制备了一种垂直站立的金属条形阵列结构，并通过该结构证实在特定的入射偏振光下，当金属条间距与金属在光频的趋肤深度相当时，在样品表面垂直于金属条的电场分量对等离激元的激发的强烈抑制作用。这项工作发表在**Optics Express 16(2008)1951**上。



金属条型结构的SEM照片

单壁碳纳米管对扭转应变的机电响应

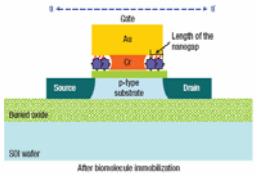
理论预言纳米管中产生应变会影响其能带结构，对于多壁碳纳米管，扭转应变对其电输运性质的影响已经得到了实验的证实。单壁碳纳米管具有独特的电子、机械和机电性能，非常适合制作高性能的纳米电子学器件。**美国北卡罗来纳大学的ADAM R. HALL**等人利用**电子束曝光**方法制作出单壁碳纳米管的纳机电器件，通过调节背栅电压驱动支撑于单壁碳纳米管上的金属转子偏转，从而使纳米管产生扭转应变，同时测量其电输运性质的变化。所表征的单壁碳纳米管对扭转应变呈现两种类型的机电响应，对于金属性的和部分半导体性的纳米管，扭转应变会产生或增大带隙，对于其余半导体性纳米管，扭转应变使得带隙减小。该成果发表在**Nature Nanotechnology 2(2007) 413**上。



单壁碳纳米管扭转纳机电器件

可控电介质的场效应晶体管用于生物探测

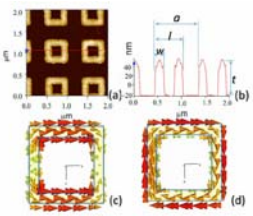
近年来场效应晶体管经常被用于生物探测，但是其灵敏性经常受到限制，**韩国电子工程和计算科学大学的Hyungsoon Im**等人**利用光刻**等工艺构造了一种可以调节电介质的场效应晶体管，这种晶体管对于链霉素和维生素H的混合溶液探测具有很高的灵敏度。该成果发表在**Nature nanotechnology 2（2007）430**上。



可控电介质场效应晶体管的截面示意图

单层闭口环振荡器结构在近红外波段的负折射现象

利用多层的开口金属环型谐振器结构在微波频段实现具有负折射特性的人工超材料的研究现在已经基本成熟，但在高频波段，由于结构的尺寸限制，不可能制备类似的材料。最近，**美国加州劳伦斯伯克利国家实验室的Zhao Hao**等人，利用**电子束曝光**技术和电镀、溶脱以及离子溅射刻蚀方法，在氮化硅衬底上制备出一系列厚73nm，线宽100nm，边长500nm，周期900nm的金正方形闭口金属环阵列。通过对材料反射、透射谱的表征，证实了该材料在150THz的远红外频段观察到了强烈的电磁振荡。这项工作表明，在高频波段，金属环形振荡器所产生的电磁感应与在微波波段的多层开口金属环型谐振器的原理有很大区别。这项工作发表在**Appl. Phys. Lett 91 (2007) 253119**上。



制备的正方形闭口金属金环形阵列的AFM照片、所提出的金属环电磁振荡机制