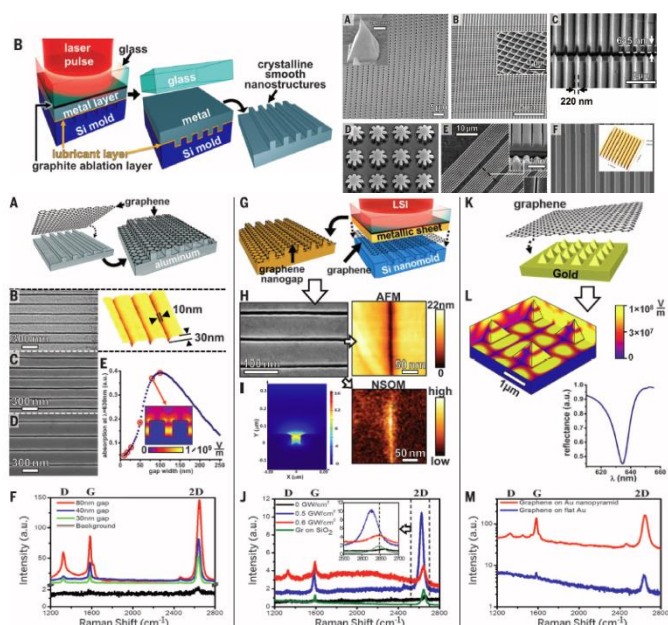


国外进展

超光滑三维金属晶体结构的纳米整形构建

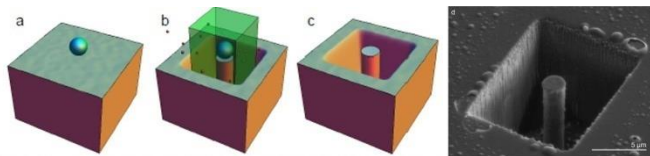
纳米尺度的金属结构及其应用不仅是材料科学研究的重要分支,在纳米等离子体、纳电子、生物传感等领域也备受关注。然而,具有高结构保真性与质量特征(超光滑表面、锐利的拐角、三维、高晶态)的纳米金属结构的大面积制造还具有极大挑战。纳米压印技术虽然也逐渐用于金属玻璃的加工,但由于纳米尺度位错爆发产生的塑性起伏、塑性尺寸效应以及晶粒尺寸效应,晶态金属的纳米压印还面临很多困难。最近,美国普渡工业工程学院的Gao等,发展了一种激光短脉冲压印技术(laser shock imprinting),这一技术利用激光脉冲,将晶态金属压入硅模板纳米结构中,加工制备了多种材料体系的纳米晶态金属。这一技术通过极快的形变速度来克服粗糙颗粒金属成型的局限性,可在常温下大气环境中进行,加工精度为10纳米左右。此技术可用于制备高宽比大于5的等离子体结构,具有大面积、高效率、高重复性、低成本等特点。在纳米等离子体光学、传感、机械增强与金属-石墨烯混合器件研究领域具有广泛的应用。相关研究成果发表在 *Sciences* 346 1352 (2014) 上。



激光脉冲压印 (LSI) 工艺过程 (左上), 加工的各种结构的SEM照片 (右上) 及金属-石墨烯结构与其光学特性 (下)

金刚石光学结构的电子束刻蚀加工

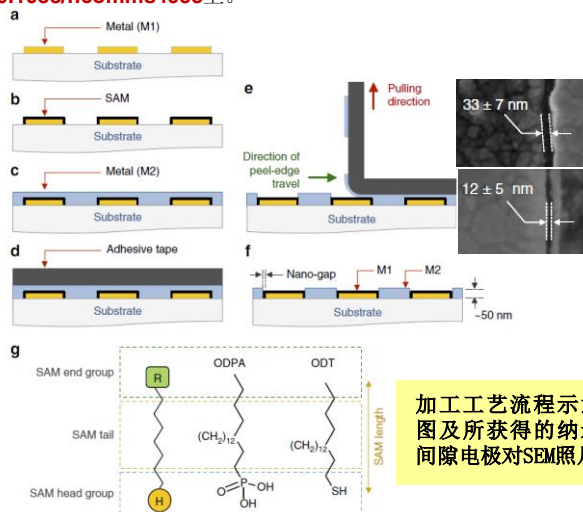
作为新的信息载体,以量子系统承载并传递信息的量子信息领域已成为当今的研究热点。金刚石中的丰富色心在室温下能够稳定发射单光子,为当前技术所青睐。但金刚石硬度高,目前常用离子轰击或高能激光烧灼进行结构加工,这往往会在材料中引入损伤与再沉积等缺陷,在半导体光学器件加工应用方面受到限制。最近,悉尼科技大学的Martin等,研究了以氧化物微结构作为掩模,以水蒸汽为辅助气体的金刚石材料的电子束刻蚀加工方法,制备了金刚石纳米柱以及多种三维微纳结构。拉曼光谱显示所加工的结构没有非晶化与石墨化现象。这些结果为金刚石光学器件的研究提供了新方法。相关研究成果发表在 *Scientific Reports* 4 5022 (2014) 上。



水气氛下电子束诱导刻蚀金刚石结构的加工示意图及微柱SEM图

亚15纳米非对称结构与器件的黏附光刻制备

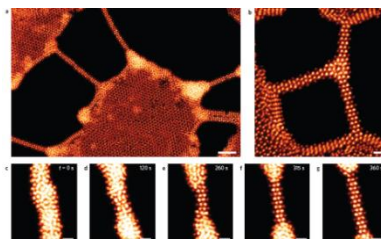
具有纳米尺度间隙的共面金属非对称纳米电极是纳米光子与电子器件的重要组成部分,目前这类结构的加工多采用电子束光刻相关的工艺。电子束光刻具有很高的分辨率,但是加工效率低,无法满足大面积快速低成本制备的需求。此外,加工衬底与材料也受限。最近,英国帝国理工物理系的Beesley等,发明了一种黏附光刻加工方法,即通过金属图形表面功能化处理,使之对接下来沉积的金属层的黏附性进行选区弱化,从而获得纳米尺度间隙的纳米电极的大面积快速加工。此方法的工艺过程包括衬底上金属层1的蒸发以及图形化,金属1结构表面烷基/羟基金属单层功能化处理,金属层2的沉积,剥离黏附层制备以及剥离(使金属1图案上的金属2全部剥离掉),获得金属2在衬底上的图案化牢固沉积。由于金属1与金属2处于同一平面,两者间的间距仅由共面自组装处理时金属1结构表面烷基/羟基金属单层的尺寸决定,如图所示。整个工艺过程极为简单,可在大气环境下进行,无需昂贵的设备。所制备的光电器件的高宽比可达100,000。相关研究结果发表在 *Nature Communications* 5 3933 (2014) | DOI: 10.1038/ncomms4933 上。



加工工艺流程示意图及所获得的纳米间隙电极对SEM照片

半导体过渡金属单层材料上自适应纳米线接触的聚焦电子束加工

在超微细电子器件研究中,目前,过渡金属二硫化物单层电子器件已研制成功。单层结构具有半导体的性质,但理论预测MX (M=Mo 或 W, X=S 或Se)纳米线为金属。虽然这类纳米线也能化学合成,但怎样将纳米线与单层器件集成起来,形成二维高密度电路,仍需解决许多技术问题。最近,美国田纳西州大学的Lin等,研究了通过电子束扫描刻蚀MoSe₂单层材料制备与母体材料相连的纳米线结构的方法。原位电学特性测试证实了所加工的纳米线具有金属性,并能与半导体单层母体形成自适应纳米接触。此外,所加工的纳米线具有极好的机械弹性与稳定性,在柔性器件与电路上具有潜在的应用。相关研究结果发表在 *Nature Nanotechnology* 9 436(2014) 上。

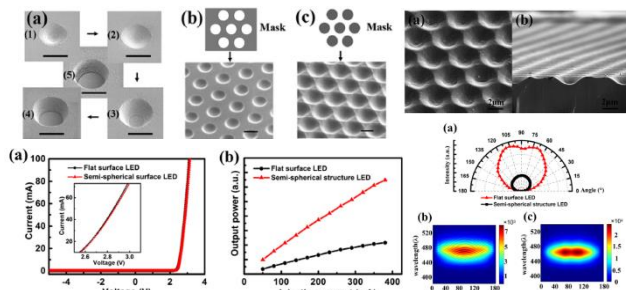


聚焦电子束扫描加工的半导体过渡金属单层材料上的纳米线结构

国内进展

三维半球结构的制备及其对GaN基LED光提取效率的影响

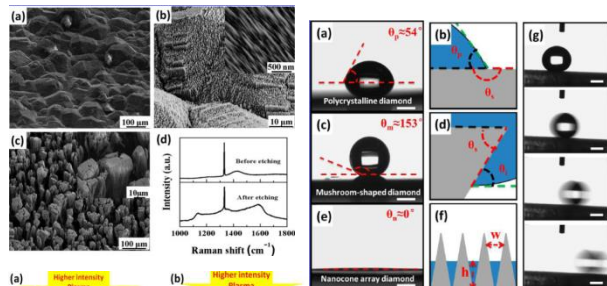
发光二极管具有广泛的应用，然而，怎样提高其外量子效率一直是人们研究的重点，也是其走向应用的瓶颈。理论计算表明，三维周期性微纳结构能非常有效的实现发光二极管的光提取增强，尤其是六边形蜂窝结构与半球结构。然而简单、高效、可重复、大面积、高占比比三维周期性微纳结构的制备技术目前还面临很多挑战。鉴于此，**中科院物理所微加工实验室的博士研究生尹红星等**，研究了一种基于欠曝光紫外光刻技术与离子束干法刻蚀相结合的有效制备半球结构的方法。作者首先在垂直LED芯片上表面的Ga_N层上旋涂正性光刻胶，在剂量不足的情况下，形成如图所示的光刻胶三维结构，之后通过等离子体干法刻蚀进行图形转移，在Ga_N层上形成周期性凹球结构。较之于上表面是平面Ga_N的垂直LED，其输出功率提高了200%。该工作发表在**Appl. Phys. Lett. 104 061113 (2014)**上，得到了科技部、国家自然科学基金委和中国科学院的项目资助。



(左上) 欠曝光工艺中曝光剂量对光刻胶图形的影响；(右上) GaN表面的三维半球结构；(左下) I-V特性对比；(右下) 角分辨光谱对比

金刚石薄膜浸润性的表面形貌调制

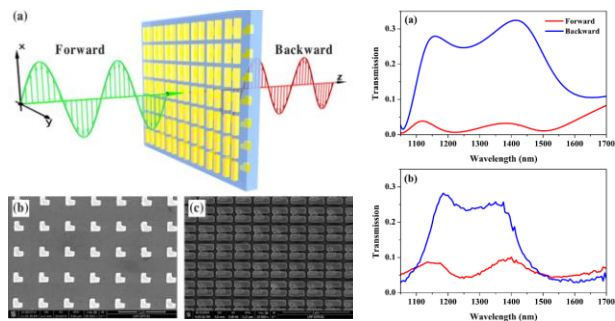
金刚石表面的浸润性在生物传感等领域有着潜在的应用。金刚石材料具有极高的硬度与极好的化学惰性，怎样使其具有从超疏水到超亲水的可调制性，近年来成为人们的研究热点，至今仍是个难题。鉴于此，**中科院物理所顾长志研究员课题组微加工实验室的博士生田士兵等与国家纳米中心的韩东研究员等**合作，通过调整无掩模等离子体干法刻蚀中等离子体的密度对表面形貌进行调制。在等离子体密度较高时，获得了锥状结构，而当密度较低时，获得了蘑菇状结构，如图所示。水浸润测试表明金刚石纳米锥结构具有极好的亲水性，而蘑菇状结构则具有极好的超疏水性。同时发现锥的密度与水滴的扩散速度紧密关联。该工作发表在**Langmuir 30 (2014) 12647**上，得到了科技部、国家自然科学基金委等项目资助。



多晶金刚石表面以及刻蚀加工的锥形与蘑菇状结构阵列(左上)；等离子体密度相关的加工原理(左下)；表面浸润性表征(右上)

超薄混合超材料中的线偏振光宽带二极管状非对称透射

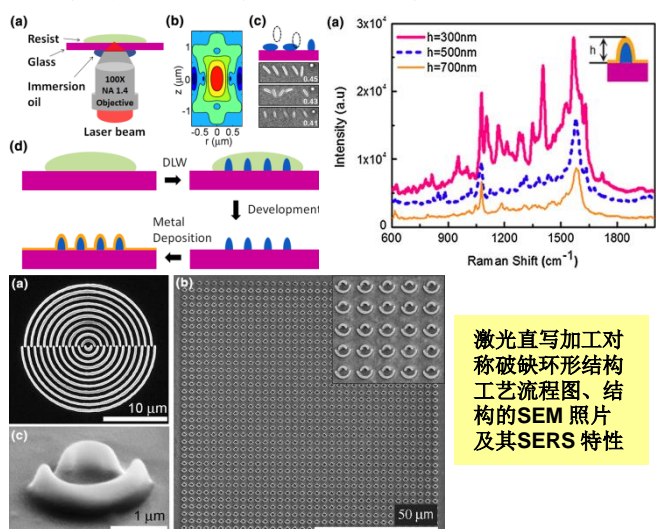
非对称透射效应是指光在媒质中正反传播方向上总透射的差异。与磁光、非线性以及具有时间依耐性的媒质不同，超材料中光的非对称透射传播具有互易性并能完全满足洛仑兹倒易理论，在光互联、信息处理、类二极管等领域的潜在应用，引起了人们极大的关注。最近，**南开大学田建国课题组与物理所微加工实验室合作**，设计并通过重复导电层沉积-电子束光刻-金属沉积-金属剥离-介电保护层生长等一系列工艺，构建了L-型颗粒与双纳米天线双层混合超材料。理论与实验测试结果表明，由于独立双层结构间的互补耦合使之具有较宽范围的二极管状非对称透射特性。该工作发表在**Appl. Phys. Lett. 105 (2014) 201103**上，得到了科技部、国家自然科学基金委等项目资助。



L-型颗粒与双纳米天线双层混合超材料中x-偏振光正反向传播示意图、结构的SEM照片及光学特性

对称破缺圆环的激光直写制备及其表面拉曼增强特性

基于双光子吸收光聚合化的激光冷加工技术利用飞秒激光作为光源，在光路中安置衰减器与快门来调节光的强度与曝光时间，通过样品台或光束的移动，使每一个微小的光聚合化区沿设定的路径移动，获得所需的三维光聚合结构，非常适合于各种表面与三维结构的加工。最近，**中科院物理所微加工实验室的博士生牟佳佳等与光学L01组的李家方研究员等**合作，利用激光直写设计制备了非对称环形聚合物结构，通过结构的高度(占空比)、宽度与曲率的调整并进行金属沉积表面金属化后，获得了极高的表面拉曼增强特性，为复杂三维表面等离激元结构的加工提供了实验借鉴。该工作发表在**Appl. Phys. B 117, 121 (2014)**上，得到了科技部、国家自然科学基金委和中国科学院的项目资助。



激光直写加工对称破缺环形结构工艺流程图、结构的SEM照片及其SERS特性