

半导体所等在半导体材料“异构外延”研究中获进展

半导体产业经过长期发展，已进入“后摩尔时代”，“超越摩尔定律”迎来了高潮，未来半导体产业的发展需跳出原有框架寻求新的路径。面对这些机遇和挑战，宽禁带先进半导体等基础材料的制备也在孕育突破，新材料、新工艺和异构集成等将成为后摩尔时代的重要技术路线（图1）。

近期，中国科学院半导体研究所照明研发中心与北京大学、北京石墨烯研究院、北卡大学的科研团队合作，实现了石墨烯玻璃晶圆氮化物“异构外延”突破，证实了氮化物外延摆脱衬底限制的可能性，为不同半导体材料之间的异构集成提供了新思路。研究人员提出一种纳米柱辅助的范德华外延方法，利用金属有机化学气相沉积（MOCVD），首次在玻璃衬底上成功外延出连续平整的准单晶氮化镓（GaN）薄膜，并制备出蓝光发光二极管（LED）。

研究人员在非晶玻璃衬底上插入石墨烯层，为后续氮化物的生长提供外延取向关系。在生长初期通过石墨烯层有效引导氮化物的晶格排列，避免了非晶衬底上氮化物生长通常呈现的、杂乱无序的多晶结构。同时，纳米柱缓冲层的引入，解决了石墨烯表面氮化物晶粒堆积的问题，通过三维-二维的生长模式切换，先纵向生长垂直的纳米柱再诱导其横向合并，成功实现了连续而平整的氮化镓薄膜（图2）。

由于没有衬底晶格的影响，在非晶衬底上外延氮化物为研究范德华外延理论机制提供了一个良好的平台，研究人员通过第一性原理（DFT）计算及相应的TEM实验结果，证实了石墨烯晶格可以很好地诱导界面处氮化物的晶格排列，形成一致的c轴面外取向及三种不同的面内取向，且石墨烯/氮化物异质界面为典型的范德华界面（图3）。研究人员在这种准单晶的氮化镓薄膜上进一步生长了蓝光LED，其内量子效率达到48.67%。借助石墨烯/氮化物界面处弱的范德华相互作用，研究人员将生长的外延结构大面积、机械剥离至2inch聚合物衬底，完成了柔性LED样品的制备。

该研究实现了“异构外延”概念，证实了异构衬底实现半导体材料外延的可行性，为扩大半导体材料外延衬底选择范围及后摩尔时代半导体异构集成、功能融合开辟了道路。相关研究成果以《石墨烯玻璃晶圆准单晶氮化物薄膜的范德华外延》（Van der Waals Epitaxy of Nearly Single-Crystalline Nitride Films on Amorphous Graphene-Glass Wafer）为题，于7月31日在线发表于《科学进展》（Science Advances）（DOI: 10.1126/sciadv.abf5011）。研究工作获得国家自然科学基金委、科学技术部国家重点研发计划资助项目、半导体所青年人才项目的支持。

此外，该方法同样适用于高In组分氮化物材料的制备，研究人员通过界面应力调控，采用石墨烯作为晶格透明层（lattice-transparent layer），建立应力释放的生长前端，部分克服氮化物晶格中铟并入难的问题，在高In组分氮化物材料外延领域取得进展。与传统制备方法比较，InGaN薄膜的In组分提高30.7%（图4-5）。该工作提出了一种具有普适性意义的提高族氮化物In组分并入的方法，为拓展氮化物在全彩显示、全光谱健康光源、热电能源器件等领域的应用开辟了新思路。高In组分氮化物外延相关研究结果以《石墨烯-纳米柱增强的准范德华外延来实现高铟组分氮化物薄膜》（Graphene-Nanorod Enhanced Quasi-Van Der Waals Epitaxy for High Indium Composition Nitride Films）为题，于3月31日在线发表在Small（DOI: 10.1002/smll.202100098）上。研究工作获得国家自然科学基金委、科学技术部国家重点研发计划、半导体所青年人才项目的支持。



图1 异构外延为后摩尔时代多种半导体异构集成、多功能融合开辟了新途径

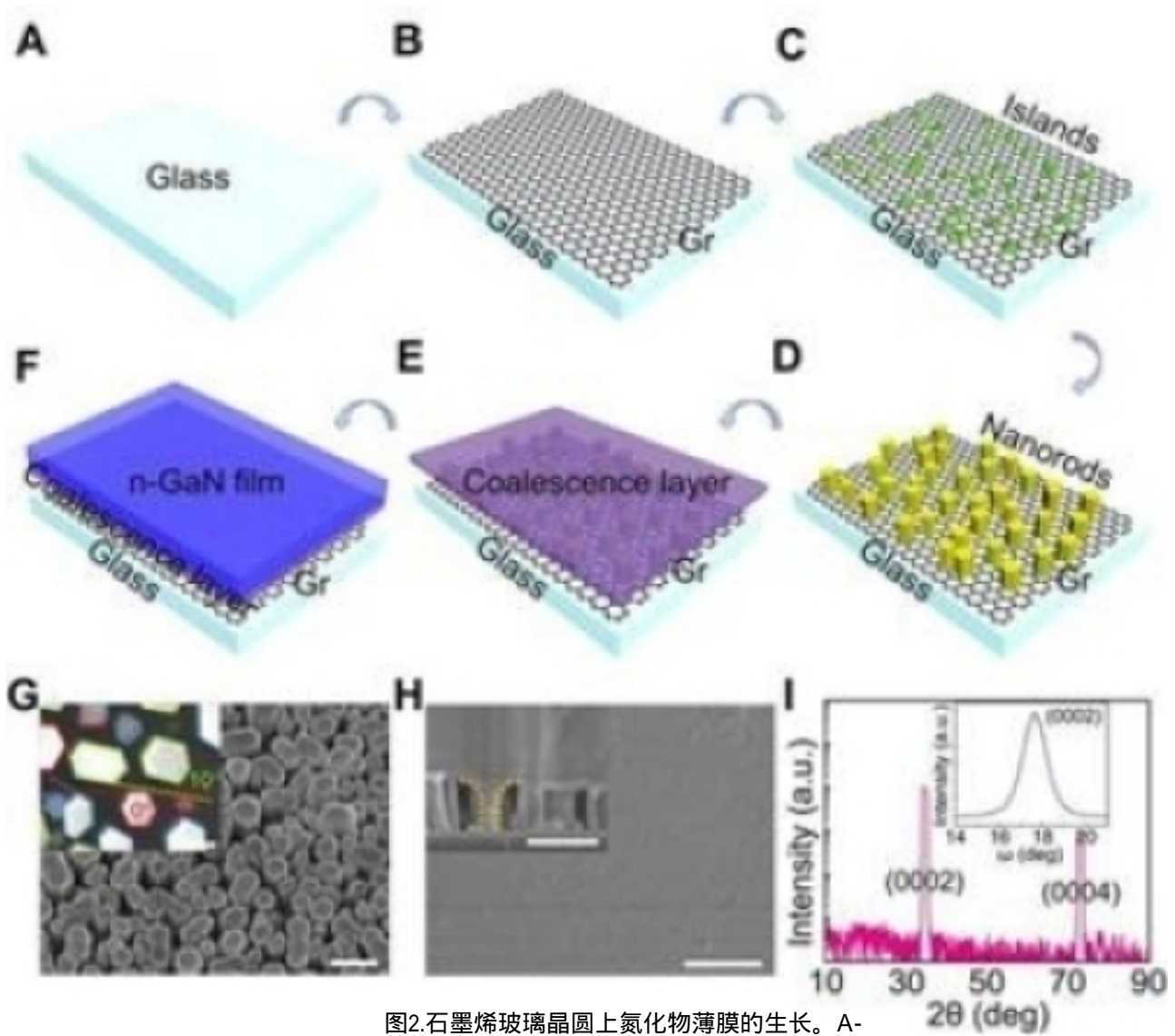


图2.石墨烯玻璃晶圆上氮化物薄膜的生长。A-F.生长过程示意图；G.纳米柱SEM图；H.GaN薄膜SEM图；I.GaN薄膜XRD表征

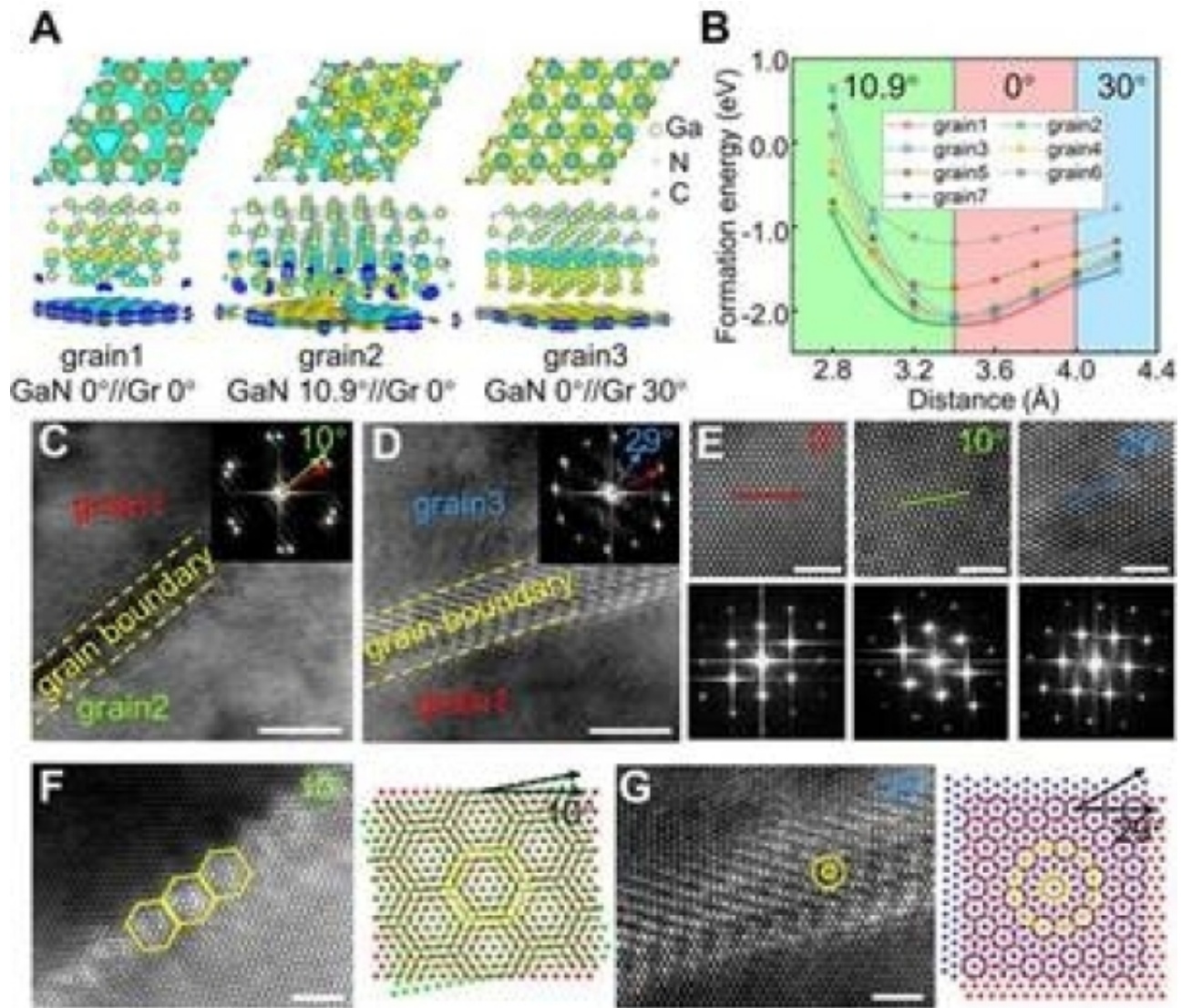


图3.石墨烯玻璃晶圆上氮化物薄膜的面内取向研究。A.石墨烯上氮化物三种不同面内取向配置的原子模型；B.石墨烯上氮化物不同面内取向的形成能；C-D.GaN薄膜10°及29°晶界；E.GaN薄膜每个晶粒内部高分辨TEM图；F-G.GaN薄膜晶界处的摩尔纹

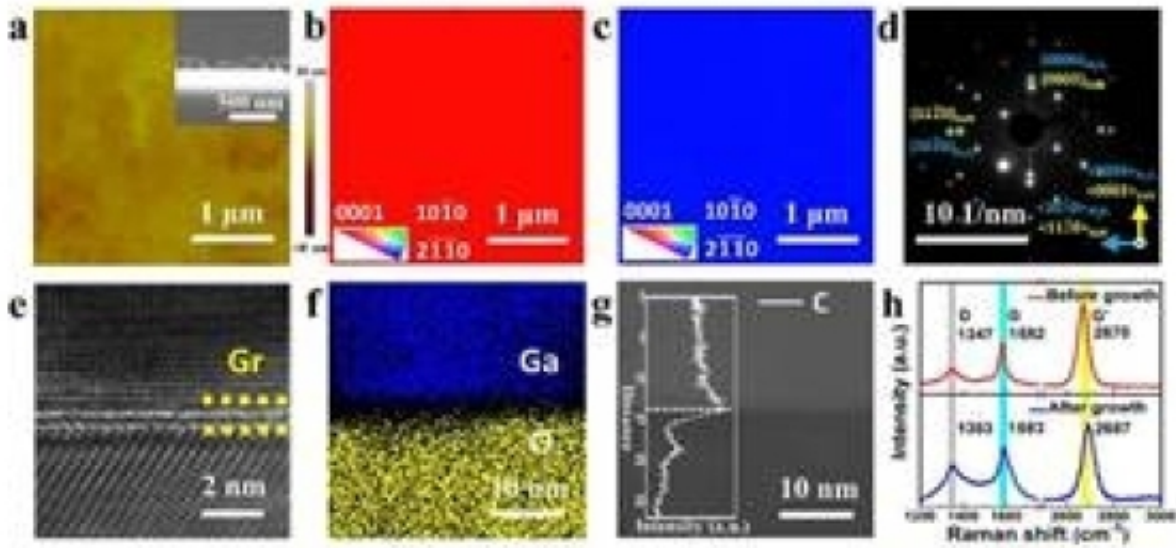


图4.石墨烯-纳米柱辅助的GaN薄膜材料及界面表征。a.AFM及截面SEM；b.面外EBSD；c.面内EBSD；d.界面的SAED；e.界面的HRTEM；f.界面的EDS；g.界面的HAADF STEM；h.生长前后石墨烯Raman对比

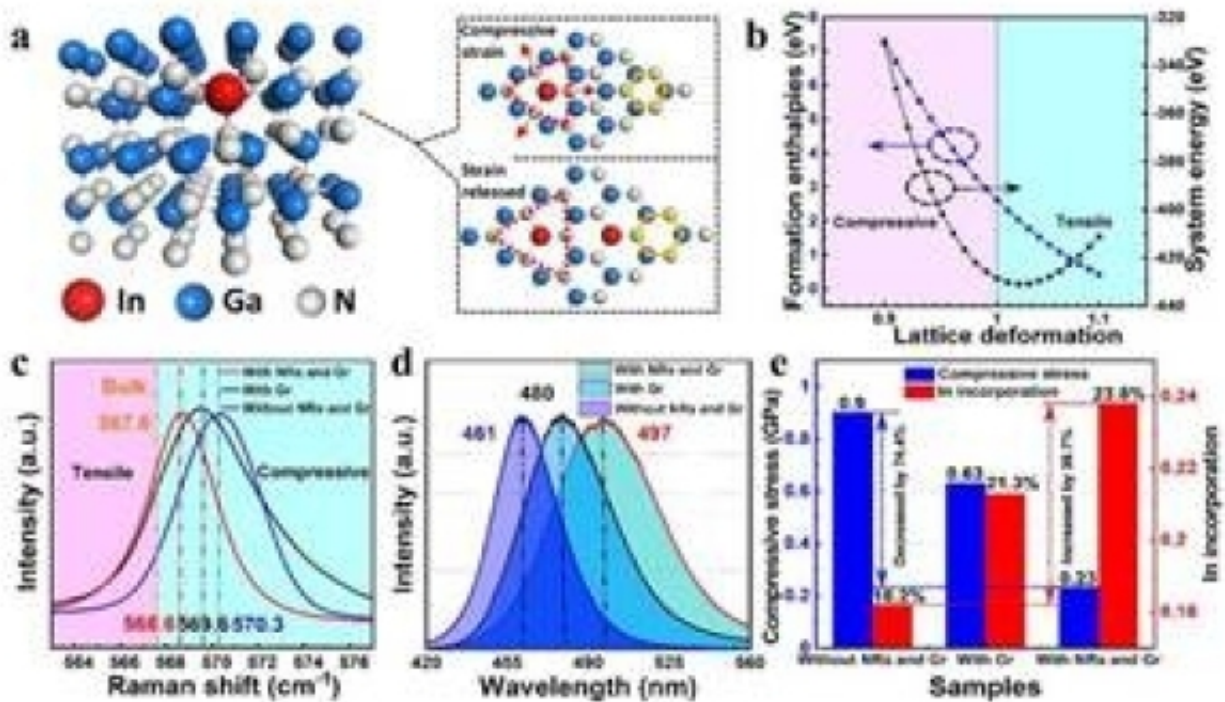


图5.石墨烯纳米柱辅助的InGaN薄膜，In并入理论机制及应力调控结果。a.In原子并入过程原子结构模型图；b.不同应力状态下In并入的DFT计算；c.GaN薄膜应力对比；d.InGaN薄膜的PL对比；e.应力调控及In组分提升结果

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/172321.html>