

科学家测定超高热导率半导体-砷化硼的载流子迁移率

中国科学院国家纳米科学中心研究员刘新风团队联合美国休斯顿大学包吉明团队、任志锋团队，在超高热导率半导体-立方砷化硼（c-BAs）单晶的载流子扩散动力学研究方面取得进展，为其在集成电路领域的应用提供重要的基础数据指导和帮助。相关研究成果发表在《科学》（Science）上。

随着芯片集成规模的进一步增大，热量管理成为制约芯片性能的重要因素。受到散热问题的困扰，不得不牺牲处理器的运算速度。2004年后，CPU的主频便止步于4GHz，只能通过增加核数来进一步提高整体的运算速度，而这一策略对于单线程的算法无效。2018年，具有超高热导率的半导体c-BAs的成功制备引起了科学家的兴趣，其样品实测最高室温热导率超过1000 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ，约为Si的十倍。c-BAs具有高的热导率以及超弱的电声耦合系数和带间散射，理论预测c-BAs同时具有颇高的电子迁移率（ $1400 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ）和空穴迁移率（ $2110 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ）

），这在半导体材料系统中颇为罕见，有望将其应用在集成电路领域来缓解散热困难并可实现更高的运算速度，因而通过实验来确认这种高热导率的半导体材料的载流子迁移率具有重要意义。

虽然c-BAs已被制备，但样品中广泛分布着不均匀的杂质与缺陷，对其迁移率的测量带来困难。一般可以通过霍尔效应，测定样品的载流子的迁移率，而电极的大小制约其空间分辨能力，并直接影响测试结果。2021年，利用霍尔效应测试的c-BAs单晶的迁移率报道结果仅为 $22 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，与理论预测结果相差甚远。具有更高的空间分辨能力的原位表征方法是确认c-BAs本征迁移率的关键。

通过大量的样品反复比较，科研团队确定了综合应用XRD、拉曼和带边荧光信号来判断样品纯度的方法，并挑选出具有锐利XRD衍射（ 0.02° ）窄拉曼线宽（ 0.6 波数）、接近0的拉曼本底、极微弱带边发光的高纯样品。进一步，科研团队自主搭建了超快载流子扩散显微成像系统。通过聚焦的泵浦光激发，广场的探测光探测，实时观测载流子的分布情况并追踪其传输过程，探测灵敏度达到 10^{-5} 量级，空间分辨能力达 23 nm 。利用该测量系统，研究比较了具有不同杂质浓度的c-BAs的载流子扩散速度，首次在高纯样品区域检测到其双极性迁移率约 $1550 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，这一测量结果与理论预测值（ $1680 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ）非常接近。通过高能量（ 3.1 eV ， 400 nm ）光子激发，研究还发现长达 20ps 的热载流子扩散过程，其迁移率大于 $3000 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。

立方砷化硼高的载流子和热载流子迁移速率以及超高的热导率，表明可广泛应用于光电器件、电子元件。该研究厘清了理论和实验之间存在的差异的具体原因，并为该材料的应用指明了方向。

研究工作得到中科院战略性先导科技专项（B类）、国家自然科学基金、国家重点研发计划与中科院仪器设备研制项目等的支持。

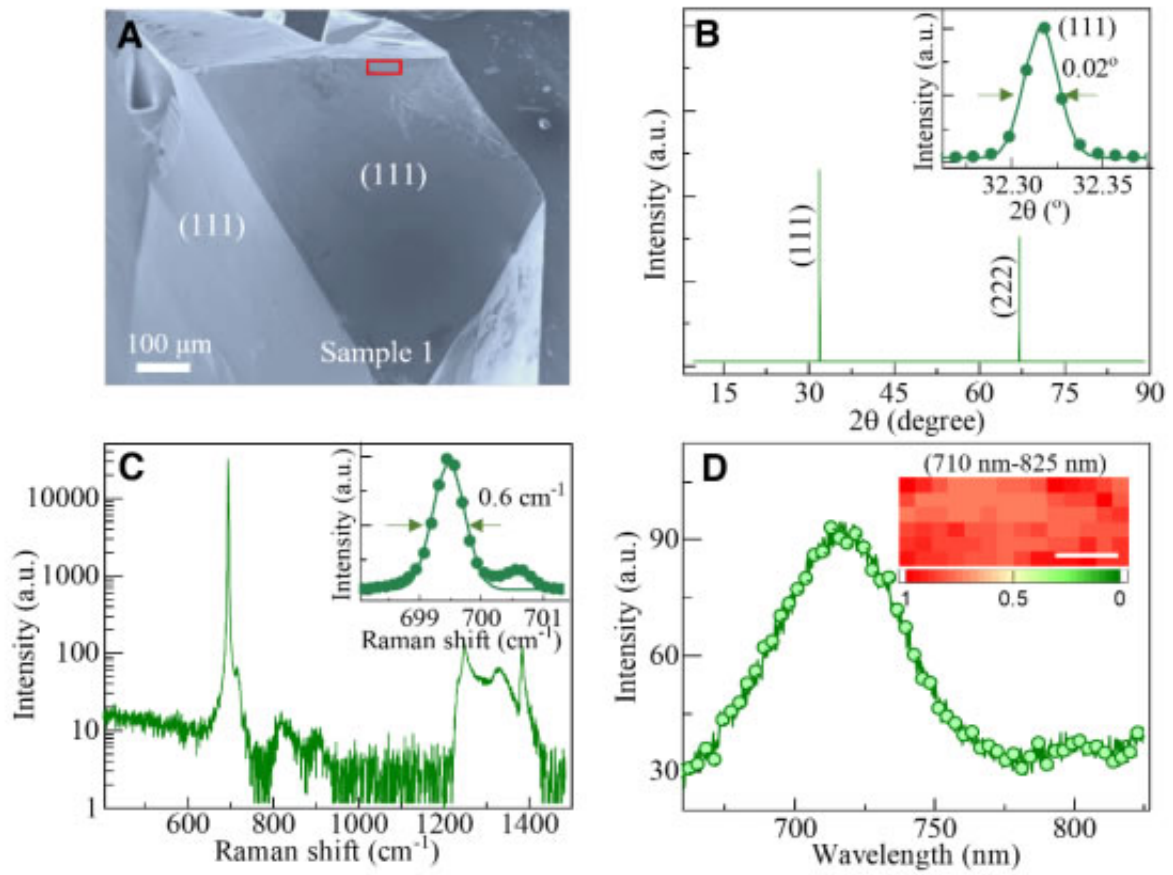


图1.c-BAs单晶的表征。(A) c-BAs单晶的扫描电镜照片；(B) 111面的X射线衍射；(C) 拉曼散射（激发波长532 nm）；(D) 极微弱的带边发光（激发波长593 nm）及荧光成像（插图，标尺为10微米）。

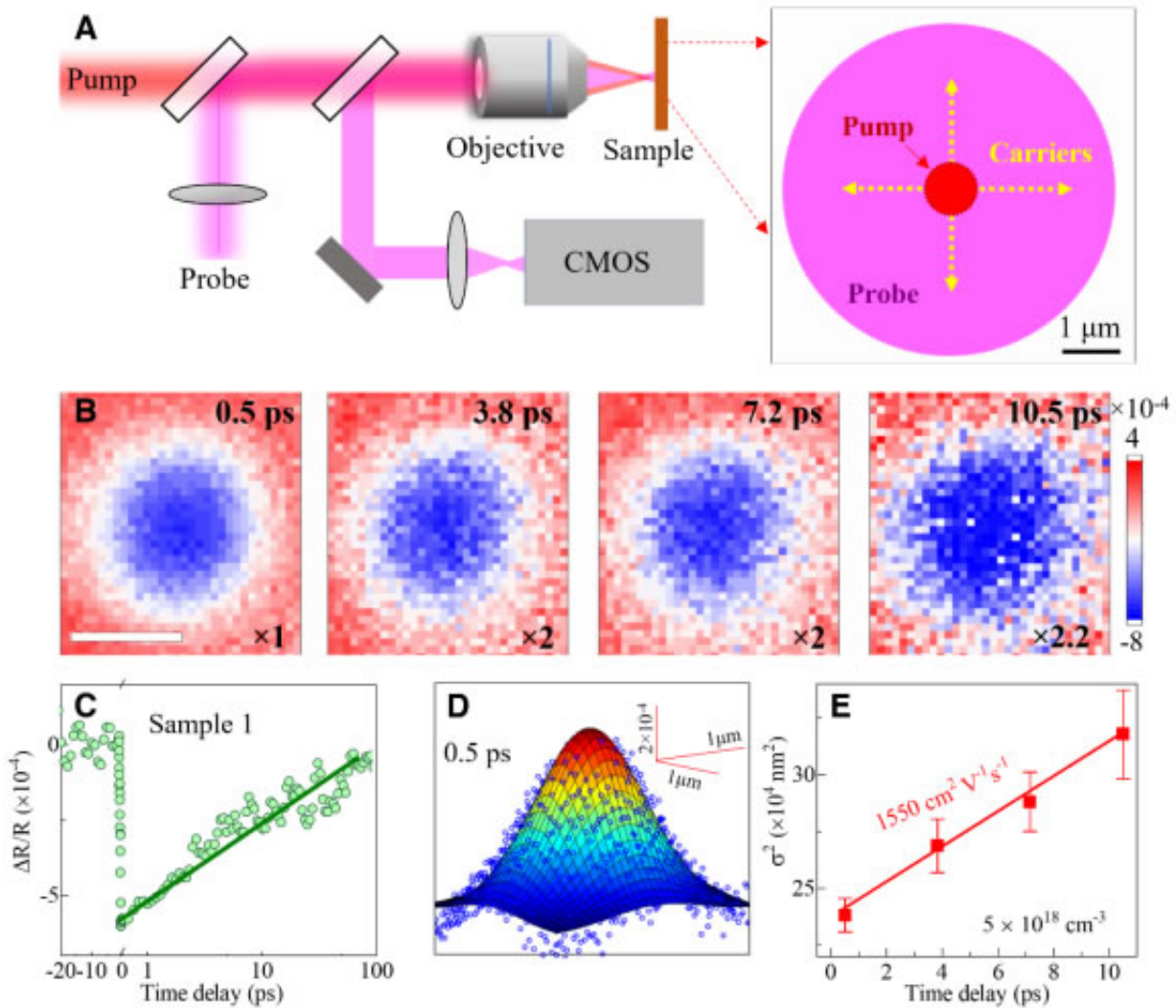


图2.瞬态反射显微成像和在c-BAs中的载流子扩散。(A) 实验装置示意图，激发波长为600 nm探测波长为800 nm；(B) 不同时刻的瞬态反射显微成像（标尺1微米）；(C) 典型的载流子动力学；(D) 0.5 ps的二维高斯拟合（E) 不同时刻的载流子分布方差随时间的演化及载流子迁移率，误差标尺代表95%置信拟合区间。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/184430.html>