

# 半导体所半导体激子-声子耦合研究取得进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/19782.html>

**本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！**

中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室研究员张俊团队在半导体的激子-声子耦合的研究方面取得了系列进展。

多声子过程是探索半导体材料中电子-声子耦合的典型光物理过程。尽管已有研究报道强激子-声子耦合作用的材料（如II-VI半导体硫化镉，碲化锌等）中的多声子过程，但如何从光谱中直接区别高阶拉曼散射和声子参与的热荧光过程仍有争议。通过改变激发光能量与不同的电子态共振，张俊团队在锰掺杂的氧化锌（ZnO）纳米线中观察到高达10阶的拉曼散射过程和11阶声子参与的热荧光过程。研究发现，高阶拉曼散射的强度随阶数呈现指数分布，而热荧光的强度分布可通过共振因子修正的泊松分布来拟合，二者光谱的频率和线宽也表现出差异，且可以较好地由跃迁模型来解释。该研究为探究多声子参与的激发态电子弛豫过程提供了范例。相关成果以《锰掺杂氧化锌纳米线的多声子过程》（Multiphonon Process in Mn-Doped ZnO Nanowires）为题，在线发表在Nano Letters上。

张俊团队在双钙钛矿中观察到自陷态激子介导的高阶拉曼散射。在“软”极性晶格中，由于强电子-声子耦合，激发的电子-空穴对被晶格形势捕获，形成自陷激子（STE）。理论上已预测STE参与的高

阶拉曼散射，但少有实验报道，尤其是具有高效白光发射的双钙钛矿 $\text{Cs}_2\text{Ag}_{0.4}\text{Na}_{0.6}\text{InCl}_6$ 。4 K下，研究通过共振激发在 $\text{Cs}_2\text{Ag}_{0.4}\text{Na}_{0.6}\text{InCl}_6$

中观察到高达12阶的高阶拉曼模式。研究提出由STE介导的高阶拉曼散射的物理图像，可很好地阐释频率和线宽与阶数的线性相关性。随着温度升高，电子-声子耦合的降低归因于高阶散射过程动量守恒的破坏和STE的退局域化。该工作对双钙钛矿中自陷态激子-声子相互作用的理解和激发态衰变过程的研究具有重要意义。相关成果以《卤化物双钙钛矿中自陷激子介导的高阶拉曼散射》（High-order Raman scattering mediated by self-trapped exciton in halide double perovskite）为题，在线发表在Physical Review B

上。华中科技大学科研人员为本研究提供了高质量样品。该工作得到北京计算科学中心科研人员的帮助。

电子-声子耦合对调控声子态具有重要作用。激光冷却技术在原子热运动和分子振动、转动的冷却和调控方面已取得了重要进展。固体中，原子密度达到 $10^{23}/\text{cm}^3$

，热能以原子集体振动（即声子）的形式储存在晶格中。声子辅助的上转换荧光可将低能的激发光转换为高能的荧光发射，并伴随声子湮灭，因此可实现整个样品的冷却。单个声子模式的冷却对基于声子的量子调控技术具有重要意义。1975年诺贝尔奖得主David Wineland和Hans Georg

Dehmelt提出可分辨边带拉曼冷却，1978年David Wineland在实验中实现了束缚离子的振动态的边带拉曼冷却。可分辨是指电子（或激子）能级的线宽小于声子频率，在吸收声子发生上转换发光的过程中，可以选择性地使某个声子被湮灭（或产生），而不影响其他声子的布居。边带拉曼冷却技术广泛应用于微腔光力体系，对光力谐振子的声学振动进行冷却和放大（加热），实现量子相干态和压缩态的制备等。继2016年在碲化锌（ZnTe）纳米带中利用激子-声子耦合首次实现了对单个光学声子的冷却后，张俊团队首次将单个光学声子模式的冷却推广至二维范德华（vdW）半导体。二维vdW材料由于维度降低、静电屏蔽效应等，表现出强的激子-声子耦合，其中过渡金属二硫族化合物由于谷偏振、自旋-轨道耦合等提供了多种调控维度，是探讨电子-声子耦合的理想平台。

研究通过改变激发光能

量或者变温调节激子能量的方法，来调节入射

光（ $w_0$ ）和激子（ $w_{\text{exciton}}$ ）之间的失谐 $D = w_0 - w_{\text{exciton}}$

情况。当激发光相对激子能量从蓝失谐（ $D > 0$ ）变化到红失谐（ $D < 0$ ）时，拉曼散射的能流方从Stokes散射大于anti-Stokes散射（即产生声子>吸收声子）变为Stokes散射小于anti-Stokes散射（即产生声子<吸收声子），表明可实现声子的加热和冷却。红失谐情况下，改变激发光功率，实现了少数层 $\text{WS}_2$

中单个光学声子模式的净冷却。该成果打开了激光冷却和控制范德华半导体中的单个光学声子的可能性，同时，拉曼冷却机制为突破反斯托克斯荧光上转换激光制冷机制对极高荧光量子效率要求的限制来实现宏观样品的新型光学制冷提供了新思路。相关成果以《范德华半导体中晶格振动的激光冷却》（Laser Cooling of a Lattice Vibration in van der Waals Semiconductor）为题，在线发表在Nano Letters上。

研究工作得到国家重点研发计划、国家自然科学基金、中科院“创新交叉团队”项目、中科院战略性先导科技专项的支持。

论文链接：[1](#)、[2](#)、[3](#)

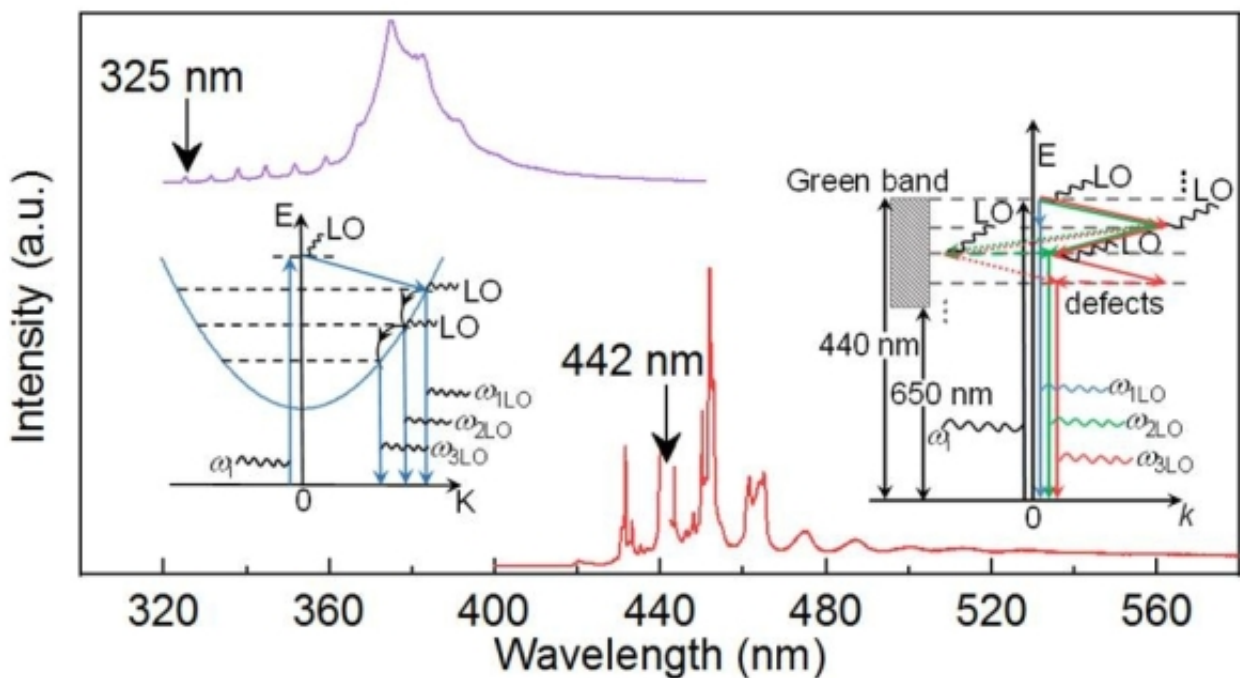


图1. ZnO纳米线中的高阶拉曼散射和热荧光光谱，以及相应的跃迁模型。

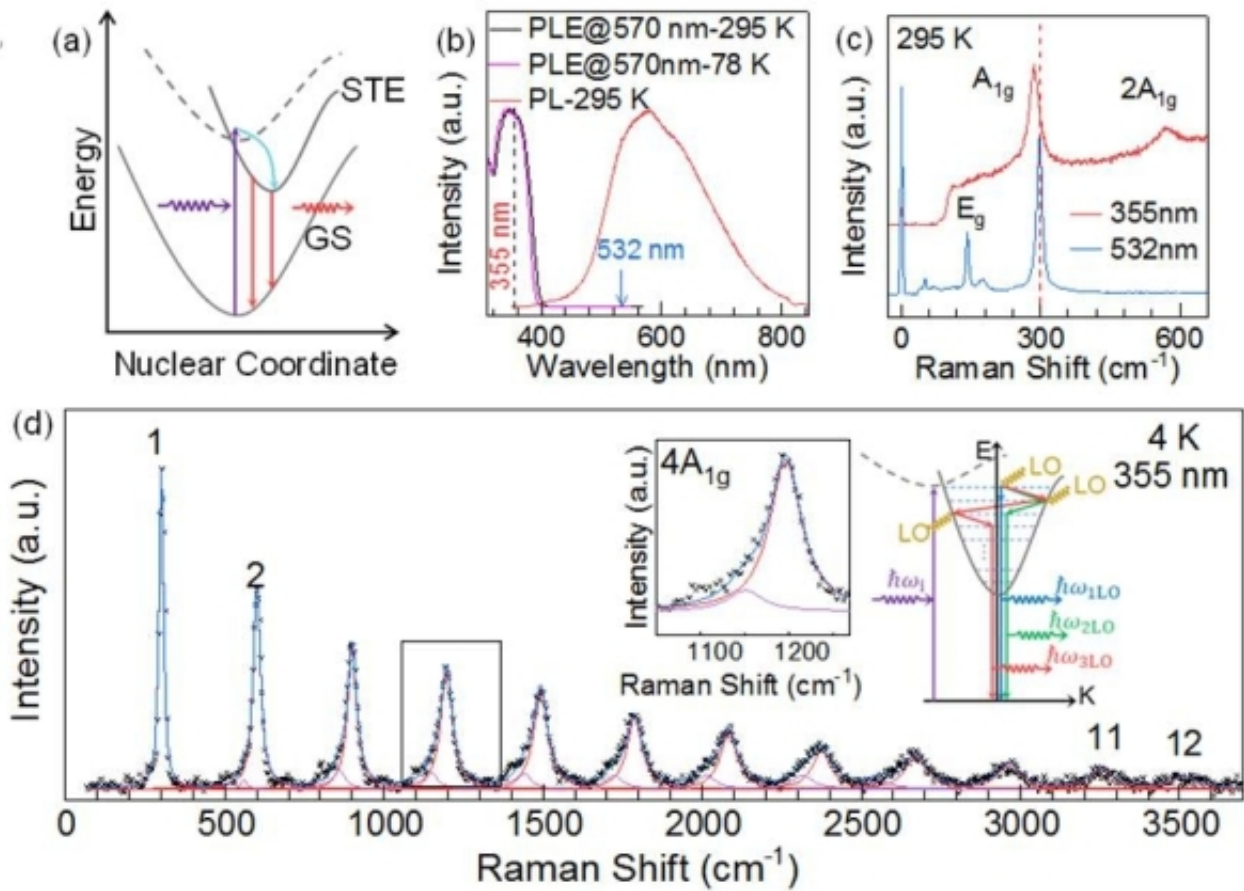


图2. 双钙

钛矿中的自限态调

制的高阶拉曼散射过程。(a) 自陷

激子形成原理，(b)  $\text{Cs}_2\text{Ag}_{0.4}\text{Na}_{0.6}\text{InCl}_6$

的荧光和光致荧光激发谱，(c)  $\text{Cs}_2\text{Ag}_{0.4}\text{Na}_{0.6}\text{InCl}_6$ 的拉曼光谱，(d) 4 K下，355 nm激发下的共振拉曼光谱。

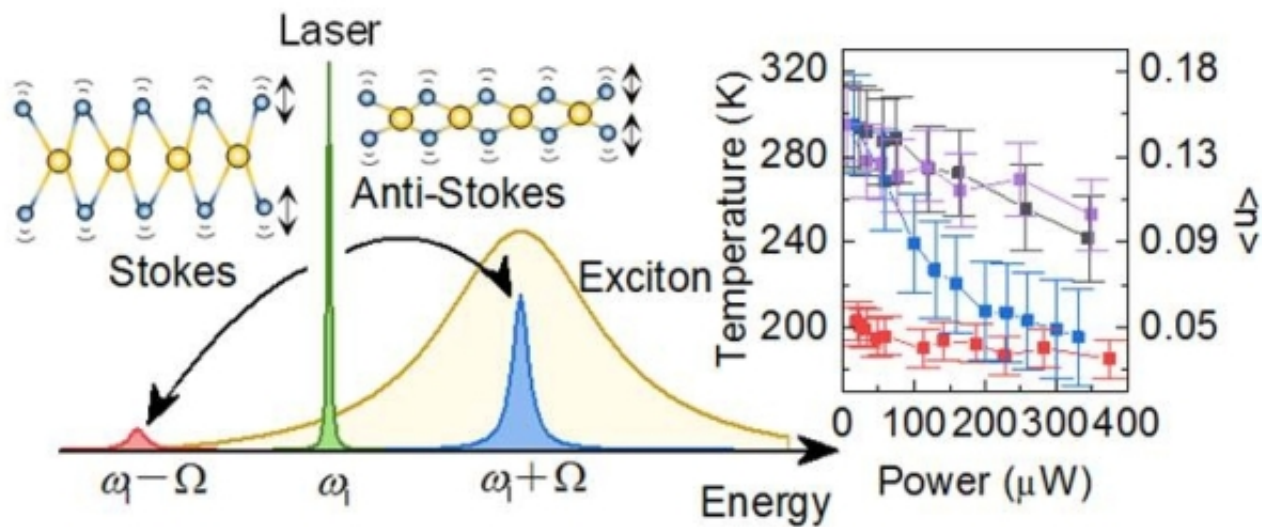


图3.二硫化钨 ( $\text{WS}_2$ ) 中的光学声子的冷却原理图及实验得到的激发光功率依赖的声子温度和占据数。

研究团队单位：半导体研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发