

## 半导体超晶格室在 InAs/GaInSb 量子阱拓扑边缘态的应变调控中取得新进展

半导体自旋电子学是下一代信息技术的重要前沿之一。二维拓扑绝缘体因其边界存在无耗散的自旋流，在半导体自旋运输器件和拓扑量子计算方面存在重要的应用前景，一直以来都受到人们广泛关注。但是迄今为止，可供人们实验研究的二维拓扑绝缘体材料仅有少数的几种（例如：HgTe/CdTe 和 InAs/GaSb 量子阱系统）。这些材料反转带隙小，实现量子自旋霍尔相的条件苛刻（液氦温区）。因此实现反转带隙大、实验上易操控的二维拓扑绝缘体，一直是人们追逐的梦想。中国科学院半导体研究所超晶格国家重点实验室常凯理论组和美国莱斯大学(北京大学)杜瑞瑞教授实验组合作，从实验和理论上证明在一类新的应变 InAs/GaInSb 量子阱中实现量子自旋霍尔绝缘体态。

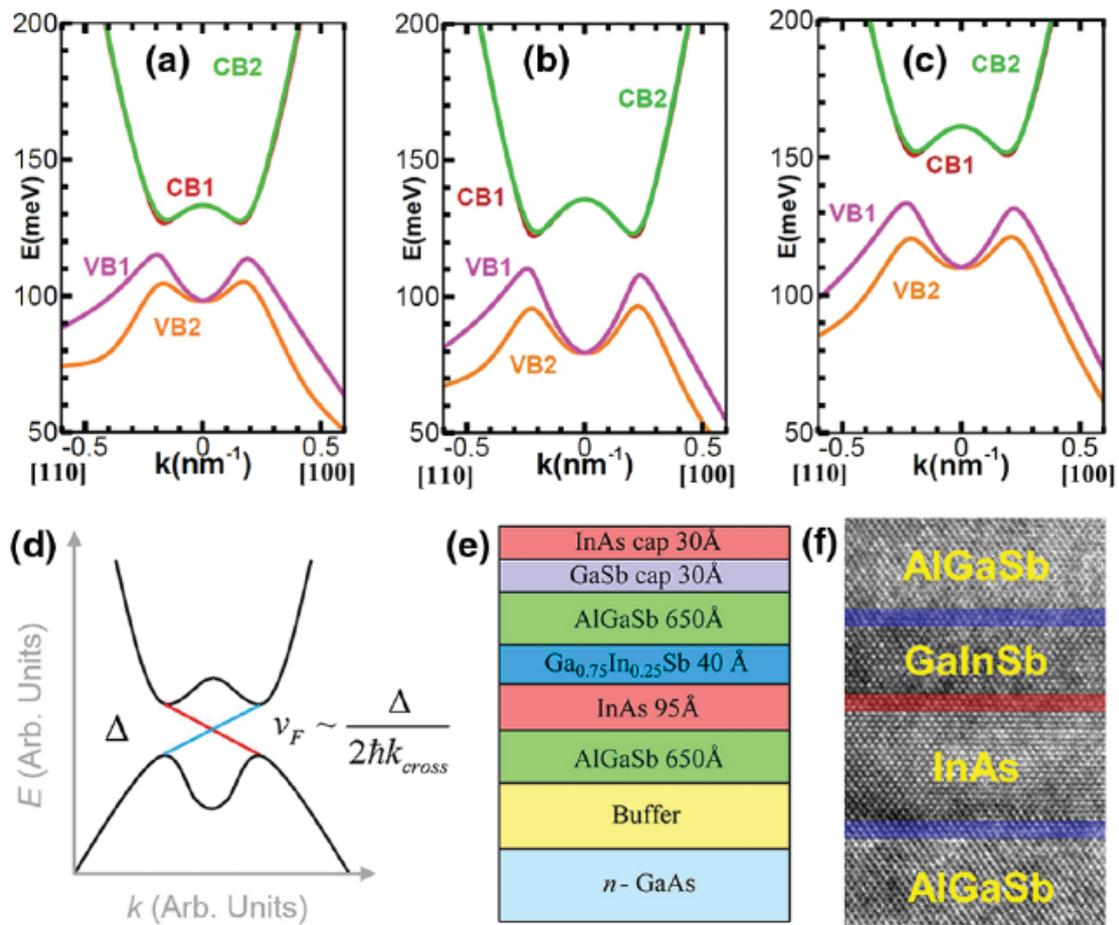


图 1：应变 InAs/GaInSb 量子阱计算的能带结构和晶片结构 [(a)-(c)]计算应变量子阱能带结构分别对应于量子阱结构 (a)InAs(8.7nm)/Ga<sub>0.80</sub>In<sub>0.20</sub>Sb(4nm), (b) InAs(9.0nm)/Ga<sub>0.75</sub>In<sub>0.25</sub>Sb(4nm). (c) InAs(8nm)/Ga<sub>0.68</sub>In<sub>0.32</sub>Sb(4nm), 图中 CB1, VB1 and CB2, VB2 标记的是不同自旋的子带; (d) InAs/GaInSb 量子自旋霍尔系统量子阱能带和边缘态能带色散示意图; (e) 实验上采用的应变 InAs(9.5nm) /Ga<sub>0.75</sub>In<sub>0.25</sub>Sb(4nm) 晶片结构; (f) 作为例子, 展示了应变 InAs/Ga<sub>0.68</sub>In<sub>0.32</sub>Sb 晶片结构的透射电子显微镜(TEM)照片, 图中标示红线和蓝线以方便眼睛看。

应变是调控半导体能带结构和物理性能最常用的方法之一。对于 InAs/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>Sb 超晶格结构来说, 通过将 GaSb (晶格常数约为 6.1 埃) 与 InSb (晶格常数约为 6.4 埃) 合金化来改

变其晶格大小来调控应变。由于应变，InAs 中的导带的能量向下移动， $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}$  中的价带能级劈裂为重空穴带和轻空穴带(见图 1(a)-(c))，其中重空穴带能级的能量高于原来 GaSb 中的价带顶。这样增强了导带价带的反交叉，而产生较大能隙量子自旋霍尔绝缘体。与无应变的反转能带结构 InAs/GaSb 体系相比，应变层 InAs/ $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}$  量子阱结构将更窄。这样由于电子和空穴波函数的重叠增加，导带-价带杂化诱导的能隙应该在这样较窄的量子阱结构中得到增强。半导体所超晶格室常凯研究组通过理论计算证明了这一点。图 1(a)-(c)是八带  $k,p$  模型自洽计算的应变 InAs/ $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}$  量子阱能带结构。计算结果表明：在应变 InAs/ $\text{Ga}_{0.68}\text{In}_{0.32}\text{Sb}$  量子阱中实现了大约 20meV 的杂化反转带隙(图 1(c))，该杂化能隙约为无应变反转带隙 InAs/GaSb 量子阱杂化能隙(约为 4meV)的 5 倍。图 1(d)-(f)是美国莱斯大学(北京大学)杜瑞瑞教授实验组所采用的样品结构和样品 TEM 图。他们通过输运测量，测量的反转带隙在 20meV 左右(具体测量值依赖于门电压控制)，实验与理论计算合理一致。该工作证明应变调控为量子自旋霍尔绝缘体将来的研究和可能的应用提供了新的手段和方向。文章发表在 Phys. Rev. Lett.上[L.-J. Du, T.-X. Li, W.-K. Lou, X.-J. Wu, X.-X. Liu, Z.-D. Han, C. Zhang, G. Sullivan, A. Ikhlassi, Kai Chang and Rui-Rui Du, Tuning edge states in strained-layer InAs/GaSb quantum spin Hall insulators, Phys. Rev. Lett. 119,056803 (2017) ]，以上研究得到了国家自然科学基金项目和科技部 973 项目的支持。

文章链接地址：<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.119.056803>