[Highlight]

doi: 10.3866/PKU.WHXB201603302

www.whxb.pku.edu.cn

二维硼(硼烯)的成功实验获得

刘忠范

(北京大学化学与分子工程学院, 北京大学纳米化学研究中心, 北京 100871)

以石墨烯(graphene)为代表的新型二维晶体材料近年来逐渐兴起。二维材料性质各异, 且易于调控和集成, 其丰富多彩的电子态和物理效应为构筑新型的电子器件提供了新机遇。其中, 单元素二维材料由于结构简单、易于分析和调控、可以视为模型化的二维晶体系统。除了石墨烯之外, 人们已经成功地制备出了硅烯、锗烯、锡烯、黑磷等单元素二维材料, 但这些材料在空气中不能稳定存在, 应用面临困难。硼是元素周期表中的第5位元素, 其存在类似碳的 sp^2 杂化轨道, 具有短的共价键半径和多样化的价态, 这些性质有利于形成低维的硼同素异形体, 譬如硼纳米管、笼状结构、平面结构等。而平面结构的二维硼(也称硼烯, 即 borophene)可以视为这些低维结构的基本形态, 其存在的可能性一直受到理论

研究者的强烈关注。然而在实验上, 因为硼的高熔点、低蒸汽压, 有效热蒸发温度超过 2000 °C, 直接热蒸发非常困难。此前制备硼材料主要采取硼化物, 易于引入杂质和复杂反应过程。因此尽管理论上备受关注, 但二维硼(硼烯)是否真实存在? 实验上一直没有给出答案。

最近, *Nature Chemistry*刊出了中国科学院物理研究所/北京凝聚态国家实验室(筹)表面室吴克辉研究组的研究成果¹。他们利用超高真空分子束外延(MBE)直接进行单原子层构筑的方法, 在 Ag(111)衬底上获得了理论期待已久的单层硼烯。他们克服了硼难以蒸发的困难, 使用电子束加热自制高纯石墨坩埚, 实现了在超高真空中, 超高温度下直接热蒸发硼单质。通过扫描隧道显微镜(STM)研究发现了两种硼烯结构, 与理论上预言的

在 Ag(111) 衬底上利用 MBE 手段获得的单原子层厚度的硼烯岛

(a, d) 是 Ag(111) 上两种硼烯岛的扫描隧道显微镜图, (b, e) 是两种硼烯的高分辨扫描隧道显微镜图,

(c, f) 是两种硼烯的原子结构模型, 其特征是三角晶格中的周期排列的空洞。

具有不同周期孔的两种三角形晶格(β_{12} 相和 χ_3 相)相符。此外,他们还发现硼烯有相当稳定的抗氧化性,并且与衬底仅有较弱的相互作用,说明硼烯未来很有可能在器件上得到应用。

理论学界期待已久的硼烯在实验上合成成功,对将来可能的基于硼烯的应用提供了诱人的前景。硼烯结构中已经发现或者可能具备很多重要的特性。例如,体相的硼单质是半导体材料,而在理论上以及此研究都已经验证硼烯具有金属性,并且受到其三角晶格中的不同空位排列结构的调制,有可能实现多样化的电子性质。目前已有跟进的理论预言,认为本工作所发现的两种硼烯有可能会表现出明显的超导特性^{2,3}。另外,硼烯具有一定的抗氧化性,有助于克服二维材料易被氧化而不稳定的缺点。硼烯较短的键长也会使其具备较好的机械性能。

硼烯研究领域受到国际广泛关注和竞争。此前,美国橡树岭国家实验室的研究者曾于2015年12月在*Science*上刊出了针对相同体系的独立类似

工作⁴,但他们的论文投稿时间为2015年7月27日,相对要晚于本研究的投稿时间(7月17日)。该工作也报道了两种硼烯结构,其中一种与本工作相符,但另一种结构不符,有待后续研究进一步比较验证。目前有多个第三方发表的理论工作^{2,3,5}倾向支持本研究所发现的结果。

References

- (1) Feng, B. J.; Zhang, J.; Zhong, Q.; Li, W. B.; Li, S.; Li, H.; Meng, S.; Chen, L.; Wu, K. H. *Nat. Chem.* **2016**, doi: 10.1038/nchem.2491
- (2) Gao, M.; Li, Q. Z.; Yan, X. W.; Wang, J. arxiv.1602.02930
- (3) Penev, E. S.; Kutana, A.; Yakobson, B. I. *Nano Lett.* **2016**, doi: 10.1021/acs.nanolett.6b00070
- (4) Mannix, A. J.; Zhou, X. F.; Kiraly, B.; Wood, J. D.; Alducin, D.; Myers, B. D.; Liu, X. L.; Fisher, B. L.; Santiago, U.; Guest, J. R.; Yacaman, M. J.; Ponce, A.; Oganov, A. R.; Hersam, M. C.; Guisinger, N. P. *Science* **2015**, *350*, 1513. doi: 10.1126/science.aad1080
- (5) Zhang, Z.; Yao, Y.; Gao, G.; Yakobson, B. I. *Angew. Chem. Int. Edit.* **2015**, *54*, 13022. doi: 10.1002/anie.v54.44