

[Highlight]

doi: 10.3866/PKU.WHXB201604191

www.whxb.pku.edu.cn

## 旋转双层石墨烯光电器件

谭平恒

(中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

石墨烯是由单层碳原子按六方晶格排布构成的二维原子晶体, 碳原子的核外电子以 $sp^2$ 杂化成 $\sigma$ 键, 未参与杂化的 $p_z$ 轨道构成 $\pi$ 键。在能带上,  $\pi$ 键使石墨烯在费米面附近形成线性狄拉克锥形能带结构<sup>1</sup>, 这一晶格及能带结构使石墨烯的光生载流子可以在非常短的时间内产生和复合(分别 50 fs 及 10 ps 量级)<sup>2,3</sup>, 因此, 石墨烯在超快光电探测上有很大的潜力。目前, 基于单层石墨烯的光电探测器工作频率可达 40 GHz, 理论带宽可达 500 GHz<sup>4</sup>。然而, 单层石墨烯的吸光系数低(仅为约 2.3%)<sup>5</sup>, 波长选择性差, 导致单层石墨烯基光电探测器的关键指标——光电响应度较低, 给石墨烯光电探测的应用带来了挑战。

针对这一问题, 北京大学化学与分子工程学院刘忠范-彭海琳课题组研究人员首次将旋转双层石墨烯(twisted bilayer graphene)应用至光电探测中, 并与金属等离激元纳米结构结合, 成功将石墨烯基光电探测的光电响应度提升约 80 倍。相关工作近期发表在 *Nature Communications* 上<sup>6</sup>。

单层石墨烯可以逐层按 AB 方式堆垛而成多层石墨烯。两个单层或多层石墨烯还可以按不同层数和不同旋转角度进行堆垛, 组成旋转多层石墨烯。这些旋转多层石墨烯具有比其子系统(单层或多层石墨烯)更加丰富的物理性化学性质<sup>7-10</sup>, 为石墨烯的研究提供了无穷的可能性, 同时也对材料性能的设计和构造产生了很大的影响。旋转双层石墨烯是两个单层石墨烯以不同相对旋转角度进行堆垛形成的一类新的二维碳材料。不同于 AB 堆垛双层石墨烯的抛物线型能带结构, 旋转双层石墨烯保存了单层石墨烯的线性能带结构, 因而具有单层石墨烯的超快光电响应特性。更为特殊的是, 旋转双层石墨烯的态密度会出现范霍夫奇点, 正是这种特性使其具有了增强的光电相互作用, 并在光电探测方面具有较大的潜力。为了进一步探索这一特性, 刘忠范-彭海琳课题组的研究

人员采用化学气相沉积的方法, 在铜箔基底上成功合成了旋转双层石墨烯, 并利用高分辨率球差电镜以及显微拉曼光谱对材料进行了表征, 证明所合成的旋转双层石墨烯具有很高的晶体质量。为了解析能带结构, 他们与牛津大学的陈宇林教授课题组合作, 采用最新发展的高空间分辨率的角分辨光电子能谱(Micro-ARPES), 首次在铜箔基底上直接解析了旋转双层石墨烯的能带结构。该研究表明, 旋转双层石墨烯层间电子态的耦合, 使其狄拉克锥型能带相互交叠, 在交点处形成鞍点和微带隙(minigap), 并在能量态密度上表现为范霍夫奇点。进一步研究发现, 不同旋转角度的旋转双层石墨烯的范霍夫奇点出现在不同的能量位置上, 奇点的位置与双层石墨烯的旋转角度呈近似的线性关系。正是这一旋转角度依赖的能带性质, 导致了旋转双层石墨烯新奇的角度依赖的物理化学性质。

研究人员利用微纳加工技术构筑了基于旋转双层石墨烯的光电探测器件。旋转双层石墨烯在狄拉克点两侧(准价带与准导带上)分别具有两个范霍夫奇点, 这两个范霍夫奇点几乎呈对称分布。当入射光子能量与这两个奇点能量差符合时, 旋转双层石墨烯表现出增强的光电相互作用。这一增强的光电相互作用与双层石墨烯旋转角度密切相关, 主要表现为光化学反应活性<sup>10</sup>及光电响应的显著增强, 并具有明显的波长选择性。在 532 nm (2.33 eV)激光激发下, 旋转角为 13°的旋转双层石墨烯的光电流相比 7°的样品, 表现出 6–7 倍的增强。当入射光子能量降低为 1.96 eV (633 nm)时, 对应的旋转角度也相应减小, 这时奇点能量差在 1.96 eV 附近的旋转双层石墨烯(旋转角约 10.5°)表现出增强的光电响应。

除了自身表现出光电响应的增强, 旋转双层石墨烯还表现出优异的兼容性, 可以与其他增强手段结合, 实现进一步的光电增强。例如, 旋转

双层石墨烯与金属等离激元纳米结构结合, 可使光电流进一步增强 80 倍。这项工作表明, 旋转双层石墨烯具有空间旋转角度依赖的物理化学性质, 其特殊能带结构可能为石墨烯超快高敏光电探测提供新的解决方案。

## References

- (1) Bliokh, Y. P.; Freilikher, V.; Savel'ev, S.; Nori, F. *Phys. Rev. B* **2009**, *79*, 075123. doi: 10.1103/PhysRevB.79.075123
- (2) Tielrooij, K. J.; Piatkowski, L.; Massicotte, M.; Woessner, A.; Ma, Q.; Lee, Y.; Myhro, K. S.; Lau, C. N.; Jarillo-Herrero, P.; van Hulst, N. F.; Koppens, F. H. L. *Nat. Nanotechnol.* **2015**, *10*, 437. doi: 10.1038/NNANO.2015.54
- (3) Sun, D.; Wu, Z. K.; Divin, C.; Li, X. B.; Berger, C.; de Heer, W. A.; First, P. N.; Norris, T. B. *Phys. Rev. Lett.* **2008**, *101*, 157402. doi: 10.1103/PhysRevLett.101.157402
- (4) Xia, F. N.; Mueller, T.; Lin, Y. M.; Valdes-Garcia, A.; Avouris, P. *Nat. Nanotechnol.* **2009**, *4*, 839. doi: 10.1038/NNANO.2009.292
- (5) Nair, R. R.; Blake, P.; Grigorenko, A. N.; Novoselov, K. S.; Booth, T. J.; Stauber, T.; Peres, N. M. R.; Geim, A. K. *Science* **2008**, *320*, 1308. doi: 10.1126/science.1156965
- (6) Yin, J. B.; Wang, H.; Peng, H.; Tan, Z. J.; Liao, L.; Lin, L.; Sun, X.; Koh, A. L.; Chen, Y. L.; Peng, H. L.; Liu, Z. F. *Nat. Commun.* **2016**, *7*, 10699. doi: 10.1038/ncomms10699
- (7) Wu, J. B.; Zhang, X.; Ijas, M.; Han, W. P.; Qiao, X. F.; Li, X. L.; Jiang, D. S.; Ferrari, A. C.; Tan, P. H. *Nat. Commun.* **2016**, *5*, 5309. doi: 10.1038/ncomms6309
- (8) Wu, J. B.; Hu, Z. X.; Zhang, X.; Han, W. P.; Lu, Y.; Shi, W.; Qiao, X. F.; Ijas, M.; Milana, S.; Ji, W.; Ferrari, A. C.; Tan, P. H. *ACS Nano* **2015**, *9*, 7440. doi: 10.1021/acsnano.5b02502
- (9) Wu, J. B.; Zhang, X.; Tan, P. H.; Feng, Z. H.; Li, J. *Acta Phys. Sin.* **2013**, *62*, 157302. doi: 10.7498/aps.62.157302
- (10) Liao, L.; Wang, H.; Peng, H.; Yin, J. B.; Koh, A. L.; Chen, Y. L.; Xie, Q.; Peng, H. L.; Liu, Z. F. *Nano Lett.* **2015**, *15*, 5585. doi: 10.1021/acs.nanolett.5b02240