

Эффекты типа Ааронова–Бома в сопротивлении наноструктурированного графена

В. А. Волков, Ю. И. Латышев

ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, 125009, Москва, Россия

Открытие графена, электронные свойства которого определяются безмассовыми «дираковскими» фермионами, вызвало беспрецедентный интерес научного сообщества, причины которого проанализированы в популярном обзоре [1]. С другой стороны, это возродило интерес к исследованиям самого графита, состоящего из графеновых слоев. Активное исследование этого материала в последние годы позволило обнаружить в нем ряд необычных свойств, связываемых с дираковскими фермионами. На присутствие дираковских фермионов в графите указывают, в частности, результаты исследований методами фотоэмиссии с угловым разрешением [2], сканирующей туннельной спектроскопии [3] и инфракрасного отражения [4]. Совсем недавние рамановские измерения с участием одного из авторов доклада установили, что поверхность тонкого графита во многих случаях представляет собой высококачественную структуру графен-на-графите [5].

В докладе сообщается об исследовании магнитоосцилляций типа Ааронова–Бома (АБ) в сопротивлении наноперфорированных образцов нанотонкого графита и графена. Используемая геометрия была нестандартной для эффекта АБ. Напомним, что обычно для исследования эффекта в проводниках используют неодносвязные образцы, как правило, в форме кольца. Магнитное поле (B) управляет разностью фаз волновой функции электрона в двух плечах кольца, приводя к B -периодическим осцилляциям сопротивления образца с периодом, отвечающему прохождению кванта магнитного потока через площадь отверстия. Подобный эффект был несколько лет назад обнаружен и в магнитосопротивлении графеновых колец. Однако эффект был мал по сравнению с мезоскопическими флуктуациями сопротивления кольца и проявлялся лишь при субгелиевых температурах.

Исследовались образцы двух типов: структуры с колоннообразными дефектами, полученными с помощью облучения тяжелыми ионами [6], и структуры с единичным наноотверстием (диаметром до 40 нм), полученным травлением с помощью фокусированного ионного пучка. Это первое наблюдение эффекта АБ в образцах неколецовой геометрии. В структурах обоих типов особенностями эффекта были большая амплитуда и слабая чувствительность к температуре.

Предложено объяснение обнаруженного эффекта для образца графена с

единичным наноотверстием. Учтем, что ток переносится бесщелевыми дираковскими фермионами. Ранее [7,8] было предсказано, что вблизи произвольного линейного края графена должны существовать (даже без магнитного поля) краевые состояния таммовского типа («состояния Тамма–Дирака»), что является уникальной особенностью бесщелевых дираковских электронов. В докладе показано, что на краю отверстия должны существовать квазидискретные (без магнитного поля) или дискретные (в магнитном поле) краевые состояния этого типа, связанные с конечностью периметра отверстия. Электроны в таких состояниях имеют свойства, аналогичные электронам в кольце. Поэтому в такой системе некольцевой геометрии можно ожидать проявлений эффекта типа АБ. Приведенное объяснение применимо и к результатам, полученным на кристаллах тонкого графита, т.к. период АБ-осцилляций в рамках точности эксперимента не зависел от толщины графита, вплоть до толщин, соответствующих 1–2 слоям графена.

Обсуждены конкурирующие микроскопические механизмы, приводящие к магнитоосцилляциям сопротивления. Один из них связан с резонансным тунелированием дираковских фермионов через состояния Тамма–Дирака на краю отверстия. В этом случае слабая температурная зависимость амплитуды эффекта АБ обусловлена малой величиной периметра наноотверстия.

Литература

- [1] A. M. M. Pruisken, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 1297 (1988).
- [2] В. А. Волков. *Природа*, вып. **1**, 56-59 (2011).
- [3] S. Y. Zhou *et al.*, *Nature Phys.*, **2**, 595 (2007).
- [4] G. Li and Eva Y. Andrei, *Nature Phys.*, **3**, 623 (2007).
- [5] M. Orlita *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **100**, 136403 (2008).
- [6] C. Faugeras *et al.* *Phys. Rev. Lett.* **107**, 036807 (2011).
- [7] Ю. И. Латышев и др. *Письма в ЖЭТФ*, **90**, 526-530 (2009).
- [8] V. A. Volkov and I. V. Zagorodnev. *Journal of Physics: Conf. Ser.*, **193**, 012113 (2009).
- [9] В. А. Волков, И. В. Загороднев. *ФНТ*, **35**, 5 (2009).