

## Поиск краевых состояний на ступенях на поверхности $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ методами сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии

Н.И. Федотов<sup>1</sup>, С.В. Зайцев-Зотов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

В последнее время топологические изоляторы привлекают большой интерес благодаря своим необычным физическим свойствам и потенциальному применению в спинтронике [1]. В объеме трехмерные топологические изоляторы имеют запрещенную зону, которая на поверхности исчезает, что проявляется как наличие топологически защищенных поверхностных состояний. В случае  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  эти состояния образуют конус в  $k$ -пространстве, вершина которого (точка Дирака) лежит в запрещенной зоне объема. Вблизи точки Дирака спин поверхностных состояний связан с квазиимпульсом. Рассеяние электрона, принадлежащего поверхностному состоянию, назад требует переворота спина, что невозможно в отсутствие магнитных примесей. В свете вышесказанного интерес представляет взаимодействие топологически защищенных состояний с протяженными дефектами поверхности. Среди ожидаемых эффектов подавление интерференции электронов, падающих и отраженных от дефектов поверхности (в частности ступеней) [2]. Образование краевых состояний при приложении потенциального барьера вдоль ребра топологического изолятора обсуждается, например, в работе [3]. Кроме того, на краю ступени могут образовываться обычные (не топологически защищенные) состояния оборванных связей. Наиболее подходящими для исследования локальных особенностей поверхностных состояний вблизи протяженных дефектов являются сканирующие зондовые методы, в частности сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) и спектроскопия (СТС).

В данной работе представлены результаты детального исследования энергетического спектра поверхностных состояний топологического изолятора  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  вблизи ступеней методами СТМ и СТС [4]. Измерения проводились на двух группах выращенных в нашей лаборатории образцов: обычно получающиеся образцы  $n$ -типа (группа I) и образцы с уровнем химического потенциала вблизи точки Дирака (группа II) [5]. На образцах обеих групп вблизи ступеней наблюдается рост химического потенциала на величину порядка 150 мэВ, что соответствует положительному знаку заряда на ступенях (Рис. 1). Этот рост происходит на длине 10 – 20 нм. Величина сдвига коррелирует с высотой ступени и с характерной длиной сдвига. В то же время величины последней вопреки ожиданиям не различаются значительно для образцов разных групп.

Обнаруженный сдвиг уровня химического потенциала соответствует уменьшению работы выхода вблизи ступеней — явлению, хорошо известному для нормальных металлов [6]. Специфика топологических изоляторов проявляется в существенно больших характерных пространственных масштабах наблюдающегося сдвига, что связывается с меньшими значениями волновых векторов электронов, принадлежащих топологически защищенным поверхностным состояниям, по сравнению с импульсом Ферми в обычных металлах.

Сдвиг уровня химического потенциала сопровождается возрастанием туннельной проводимости вблизи точки Дирака поверхностных состояний также на образцах обеих групп (Рис. 2). Такой рост можно было бы трактовать как увеличение плотности состояний вблизи ступеней, однако следует помнить что дифференциальная туннельная проводимость лишь приблизительно пропорциональна локальной плотности состояний. Поскольку туннельный ток связан не только с плотностью состояний зонда и образца, а еще и с прозрачностью туннельного барьера, изменение этой прозрачности с приложенным к туннельному промежутку напряжением приводит к появлению дополнительного вклада в дифференциальную туннельную проводимость. Одним из следствий наличия такого вклада является различие туннельных спектров, измеряемых при разных значениях химического потенциала [7]. Это различие особенно существенно, если локальная плотность состояний мала, как например в точке Дирака. Расчет на основе простой одномерной квазиклассической модели показал, что по знаку описанный эффект совпадает с наблюдаемым в наших экспериментах и абсолютная величина также может быть того же порядка при разумных значениях параметров. Кроме того, различия в величине туннельной проводимости в точке Дирака образцов с разными уровнями легирования также могут быть описаны в рамках указанной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-02-0067716) и программ ОФН и Президиума РАН.

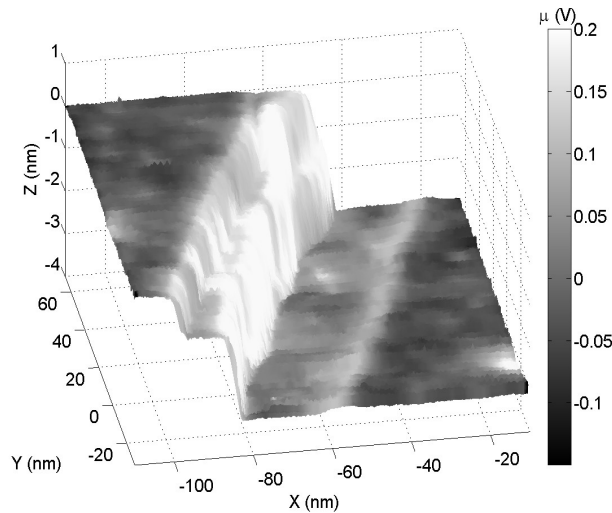


Рис. 1: Сдвиг химического потенциала вблизи ступеней на образце II группы

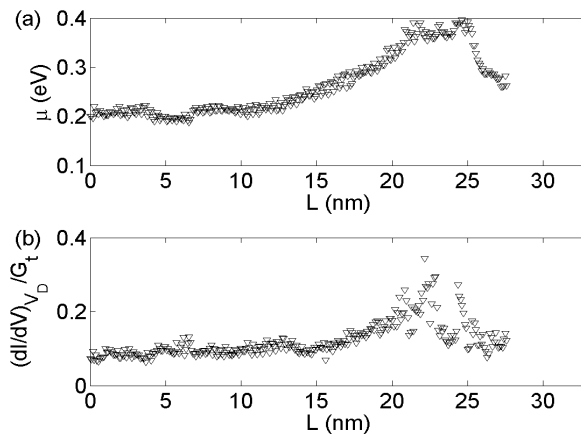


Рис. 2: Химический потенциал, отсчитанный от точки Дирака (a) и увеличение дифференциальной туннельной проводимости (b) вблизи ступени на образце I группы

### Литература

1. Topological Insulators: Fundamentals and Perspectives / Eds.: Frank Ortmann, Stephan Roche, Sergio O. Valenzuela, Laurens W. Molenkamp, 2015, Weinheim: Wiley, 432 с.
2. T. Zhang, P. Cheng, X. Chen, J. F. Jia, X. Ma, K. He, L. Wang, H. Zhang, X. Dai, Z. Fang, X. Xie, and Q. K. Xue // Phys. Rev. Lett. 2009, V. 103, 266803.
3. O. Deb, A. Soori and D. Sen // J. Phys.: Condens. Matter 2014, V. 26, 315009.
4. N.I. Fedotov, S.V. Zaitsev-Zotov // arXiv:1609:08911.
5. А.Ю. Дмитриев, Н.И. Федотов, В.Ф. Насретдинова, С.В. Зайцев-Зотов // Письма в ЖЭТФ 2014, Т. 100, С. 442.
6. R. Smoluchowski // Phys. Rev. 1941 V. 60, P. 661.
7. Н.И. Федотов, С.В. Зайцев-Зотов // Письма в ЖЭТФ 2016, в печати; arXiv:1609.08294.