

## Стабильность поверхности (0001) топологического изолятора $\text{Bi}_2\text{Se}_3$

О. Е. Терещенко<sup>\*+1)</sup>, К. А. Кох<sup>°</sup>, В. В. Атучин<sup>\*</sup>, К. Н. Романюк<sup>\*+</sup>, С. В. Макаренко<sup>+</sup>, В. А. Голяшов<sup>+</sup>,  
А. С. Кожухов<sup>\*+</sup>, И. П. Просвирина<sup>∇</sup>, А. А. Шкляев<sup>\*+</sup>

<sup>\*</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>+</sup> Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>°</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского РАН, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>∇</sup> Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отд. РАН, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 9 августа 2011 г.

Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, атомно-силовой и сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии продемонстрирована инертность поверхности скола (0001) монокристаллического  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  к окислению: после месяца хранения образцов на воздухе на поверхности не образуется собственных оксидов висмута и селена. Получены атомно-гладкие поверхности макроскопических размеров ( $\sim 1 \text{ см}^2$ ) со средней квадратичной шероховатостью менее 0.1 нм и атомным разрешением структуры  $(1 \times 1)$ - $(0001) \text{ Bi}_2\text{Se}_3$ . Измерение туннельной проводимости выявило квазилинейную зависимость поверхностной плотности состояний от энергии в запрещенной зоне  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ .

Интерес к изучению поверхностей (0001) монокристаллов  $\text{V}_2\text{VI}_3$  связан с проявлением этими соединениями свойств топологических изоляторов (ТИ), открытых несколько лет назад [1]. Данные материалы являются изоляторами в объеме, в то время как их поверхность становится проводящей вследствие сильного спин-орбитального взаимодействия и возникновения спин-расщепленных поверхностных состояний с непрерывным спектром, образующим дираковский конус [2].

Соединение  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  кристаллизуется в ромбоэдрической структуре с пространственной группой  $D_{3d}^5$  ( $R\text{-}3m$ ). Для описания структуры  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  удобнее использовать не ромбоэдрическую, а гексагональную элементарную ячейку с параметрами  $a$  и  $c$  [3]. Эти соединения имеют выраженную слоистую структуру: в плоскости, перпендикулярной оси  $c$  (ось симметрии третьего порядка в гексагональной решетке), структуру можно представить в виде набора сложных слоев-квинтетов. Каждый квинтет состоит из пяти слоев, образуя последовательность  $\text{Se}(1)\text{-Bi-Se}(2)\text{-Bi-Se}(1)$ , в которой атомы последующего слоя располагаются над центрами треугольников, образованных атомами предыдущего слоя (рис. 1). Внутри квинтеслоя атомы имеют преимущественно ионно-ковалентную связь, тогда как между квинтетами преобладает сила Ван-дер-Ваальса [4]. Из-за наличия слоистой структуры кристалл  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  легко скалывается по плоскости (0001), разрушая слабые межслоевые связи Ван-дер-Ваальса между квинтетами.

Поскольку именно поверхность (0001) обладает уникальными металлическими свойствами, представляет интерес изучение структурных и электронных свойств этой поверхности, а также ее взаимодействия с окружающей средой. В случае материалов, обладающих слоистой структурой, таких, как графит и соединения дихалькогенидов переходных металлов, хорошо известно о стабильности и атомной гладкости поверхностей при сколе по межслоевым связям Ван-дер-Ваальса. В частности, на воздухе на поверхности таких соединений удавалось наблюдать атомные ряды с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) [5]. Из общих соображений можно предположить, что поверхность (0001)  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  также должна обладать стабильностью к окислению. Однако в работах [6, 7] было показано, что при экспозиции поверхности (0001)  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  на воздухе оксиды на ней образуются уже в течение первых часов, а после суток экспозиции вырастает слой собственных оксидов ( $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SeO}_2$ ,  $\text{TeO}_2$ ) толщиной 1 нм. Образование собственных оксидов на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  может являться причиной деградации свойств топологических поверхностных состояний [6]. К сожалению, в работах [6, 7] не приводится детального анализа структурного совершенства изучаемых поверхностей. В то же время хорошо известно, что инертность к окислению во многом зависит от степени дефектности поверхности (наличие вакансий, дефектов замещения, оборванных связей) [3]. Поскольку поверхность (0001) стабилизируется атомами Se с ковалентными связями, направленными внутрь квинтета, здесь, как и в случае дихалькогенидов, мож-

<sup>1)</sup> e-mail: teresh@thermo.isp.nsc.ru