

# Транспортные свойства топологических изоляторов $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ и $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$ с p–n переходом

В.А. Голяшов<sup>1, 3\*</sup>, К.А. Кох<sup>2, 3</sup>, О.Е. Терещенко<sup>1, 3</sup>

1 Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090.

2 Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090.

3 Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090.

\*vladimirgolyashov@gmail.com

На основании равновесной фазовой диаграммы и условий роста в модифицированном методе Бриджмена был предсказан и реализован встроенный p–n-переход в соединениях  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , механизм формирования которого связан с эффектом сегрегации компонентов в процессе кристаллизации. Изменяя соотношение Bi(Sb)/Te в растворе-расплаве удалось получить p–n-переход в кристаллах с начальными составами расплавов  $\text{Bi}_{1,9}\text{Te}_{3,1}$  и  $\text{Bi}_{1,34}\text{Sb}_{0,66}\text{Te}_3$ . Вблизи p–n-перехода наблюдалось наличие нескольких типов носителей. При этом в n-области кристалла  $\text{Bi}_{1,9}\text{Te}_{3,1}$  холловская подвижность электронов достигала  $\sim 70000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  при концентрации  $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Обнаружено, что на поверхности (0001) как в p-, так и n-областях кристаллов формируется изгиб зон вниз, что может приводить к формированию двумерного электронного газа.

## Введение

В последнее время активно изучаются материалы с сильным спин-орбитальным взаимодействием. Так, у ряда соединений  $\text{V}_2\text{VI}_3$  и, в частности,  $\text{Bi}_2\text{Sb}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , были обнаружены свойства трехмерных топологических изоляторов (ТИ). В объеме эти материалы являются узкозонными полупроводниками с  $E_g \sim 150\text{--}200 \text{ мэВ}$ , но на их поверхности (0001) в запрещенной зоне существуют металлические поверхностные состояния с законом дисперсии, образующим конус Дирака. Поскольку носители заряда на таких поверхностных состояниях поляризованы по спину, то ТИ оказываются интересны в плане изучения в них спин-зависимых явлений и возможности их применения в устройствах спинтроники. Однако высокая концентрация свободных носителей в объеме, обусловленная большой плотностью дефектов кристаллической структуры, и, как следствие, закрепление уровня Ферми в разрешенных зонах и сильное шунтирующее действие объема не позволяют выделить поверхностные состояния в транспортных измерениях. В данной работе для решения этой проблемы рассматривается возможность управления уровнем Ферми в объеме и на поверхности ТИ путем создания p–n-перехода в объеме ТИ.

Так, известно, что тип проводимости  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  определяется наличием антиструктурных дефектов  $\text{Bi}_{\text{Te}}$  (p-тип) и  $\text{Te}_{\text{Bi}}$  (n-тип), и кристаллы, выращенные из

расплавов с содержанием  $\text{Te} > 63\%$  всегда имеют электронную проводимость, а меньше  $60\%$  — дырочную проводимость. На основании равновесной фазовой диаграммы и условий роста кристаллов  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  из нестехиометричных расплавов ( $60\text{--}63\%$  Te) модифицированным вертикальным методом Бриджмена можно реализовать p–n-переход в направлении роста кристалла, механизм формирования которого связан с эффектом сегрегации компонентов в процессе роста и изменения состава ростового расплава [1].

В работе изучались кристаллы, выращенные модифицированным вертикальным методом Бриджмена из расплавов со стехиометрическими составами  $\text{Bi}_{1,9}\text{Te}_{3,1}$  и  $\text{Bi}_{1,34}\text{Sb}_{0,66}\text{Te}_3$ . Были исследованы проводимость и эффект Холла в образцах, взятых в различных частях кристаллов вдоль оси роста. Также методом фотоэмиссии с угловым разрешением (ARPES) исследована электронная структура поверхности (0001) в различных областях кристаллов.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1(а) показаны распределения величин термоэдс и коэффициента Холла, измеренные вдоль оси роста кристалла  $\text{Bi}_{1,9}\text{Te}_{3,1}$ . Смена знаков коэффициента термо-ЭДС и постоянной Холла с положительных на отрицательные на расстоянии  $\sim 40 \text{ мм}$  от начала кристалла указывают на смену типа проводимости с дырочной на электронную. При этом,