

06

Изучение кристаллической структуры эпитаксиальных пленок $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20}$ на топологическом изоляторе Bi_2Te_3

© А.К. Кавеев¹, С.М. Сутурин¹, Н.С. Соколов¹, К.А. Кох^{2,3},
О.Е. Терещенко^{3,4}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁴ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: kaveev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 сентября 2017 г.

Методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии получены слои $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20}$ на подложках топологического изолятора Bi_2Te_3 и изучены условия их роста. Впервые продемонстрирована возможность выращивания эпитаксиальных слоев ферромагнетика на поверхности топологического изолятора. Полученные слои CoFeV имеют ОЦК-кристаллическую структуру с кристаллической плоскостью (111), параллельной плоскости (001) Bi_2Te_3 . Использование трехмерного картографирования в обратном пространстве картин дифракции быстрых электронов позволило определить эпитаксиальные соотношения пленки и подложки.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.05.45702.17043

В последнее время выраженный интерес в области спинтроники проявляется к топологическим изоляторам, характеризующимся уникальной электронной структурой поверхностных состояний [1]. Топологические изоляторы характеризуются запрещенной зоной в объеме и дираковским конусом проводящих спин-поляризованных состояний на поверхности, которые вследствие требования симметрии обращения времени оказываются топологически защищенными от внешних немагнитных воздействий. Изучение интерфейса ферромагне-

тик–топологический изолятор представляет интерес благодаря эффекту магнитной близости, выступающему в качестве фактора, нарушающего симметрию относительно инверсии времени поверхностных топологических состояний [2]. Этот эффект проявляется во влиянии обменного поля ферромагнетика на топологические состояния. Интересен и обратный эффект — влияние спин-поляризованного тока поверхностных состояний топологических изоляторов (ТИ) на магнитный порядок в ферромагнетике (ФМ). Идея взаимного управления поверхностными состояниями ТИ и намагниченностью ФМ перспективна в области создания таких систем, как спиновые транзисторы [3,4]. В настоящей работе в рамках изучения систем ферромагнетик–топологический изолятор начато исследование системы $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}/\text{Bi}_2\text{Te}_3(001)$. На первом этапе целью работы являлось создание эпитаксиальных слоев ферромагнетика $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ (далее CoFeB) на поверхности Bi_2Te_3 .

Слои CoFeB были выращены методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии (Surface, GmbH) с использованием эксимерного лазера. Чистая поверхность подложек топологического изолятора обеспечивалась сколом верхнего слоя материала с помощью скотча. Время загрузки образца составляло не более 5 min. В работе [5] была продемонстрирована стабильность поверхностей ТИ на основе соединения Bi_2Te_3 в течение длительного времени (более месяца) к окислению при экспозиции на воздухе. Тем не менее для дегидратации подложки отжигались в вакуумной камере (давление 10^{-8} mbar) при температуре 200°C в течение 30 min. Пленки CoFeB наносились на Bi_2Te_3 при температурах $200\text{--}400^\circ\text{C}$ как в вакууме (10^{-8} mbar), так и в атмосфере аргона (при давлении $2.5 \cdot 10^{-3}$ mbar). Толщина выращенных пленок до 10 nm. Регистрация картин дифракции быстрых электронов (ДБЭ) проводилась с помощью встроенного дифрактометра с энергией пучка 30 kV. С помощью разработанного авторами специального программного обеспечения [6] возможно построение трехмерной сборки картин ДБЭ в обратном пространстве для заданных направлений осей зоны. Компьютерная сборка набора измеренных картин ДБЭ в трехмерную картину в обратном пространстве осуществляется для различных значений углов поворота образца с заданным шагом. Далее проводится моделирование этой картины на основе имеющихся баз данных по дифрактометрии различных материалов. Данная методика позволяет определять кристаллическую структуру и пространственную ориентацию выращиваемых пленок. Морфология поверхности выращен-

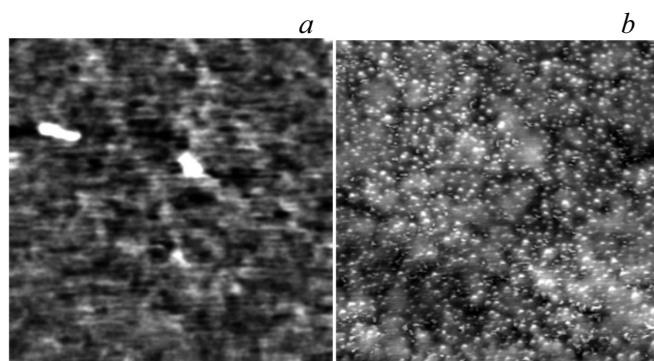


Рис. 1. *a* — картина АСМ ($800 \times 800 \times 2$ nm) подложки $\text{Bi}_2\text{Te}_3(001)$, *b* — картина АСМ ($800 \times 800 \times 7$ nm) нанесенного слоя CoFeV.

ных пленок исследовалась с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе производства НТ-МДТ (Зеленоград).

На рис. 1 представлена морфология поверхности слоя CoFeV (*b*), нанесенного на подложку Bi_2Te_3 (*a*). Из рисунка видно, что слой CoFeV сформирован из коалесцирующих островков, характерных для случаев эпитаксии металлов на гладких (например, полупроводниковых) подложках. Средняя шероховатость слоев $r_{ms} = 0.7$ nm.

На рис. 2 приведен результат трехмерного картографирования картин ДБЭ слоя CoFeV(111) и подложки Bi_2Te_3 с наложенными положениями дифракционных рефлексов, рассчитанных в результате моделирования. На частях *a* и *b* рисунка показаны картины ДБЭ для Bi_2Te_3 и CoFeV соответственно. Верхние части рис. 2, *a* и *b* отвечают одной и той же зоне обратного пространства — с направлением $[001]$ оси зоны для Bi_2Te_3 (имеющего гексагональную структуру) и направлением $[111]$ оси зоны для CoFeV. Нижние части рис. 2, *a* и *b* соответствуют проекциям картин обратного пространства на плоскость, параллельную нормали к поверхности пленки и подложки. На наблюдаемых картинах ДБЭ видны выраженные тяжи в комбинации с точечными рефлексами, что согласуется с умеренной гладкостью слоя CoFeV, показанного на картине АСМ (рис. 1, *b*). Результаты моделирования картин ДБЭ, отмеченные кружками на рис. 2, позволяют сделать вывод о том, что CoFeV в описываемом случае растет эпитаксиально и имеет ОЦК-кристаллическую структуру,

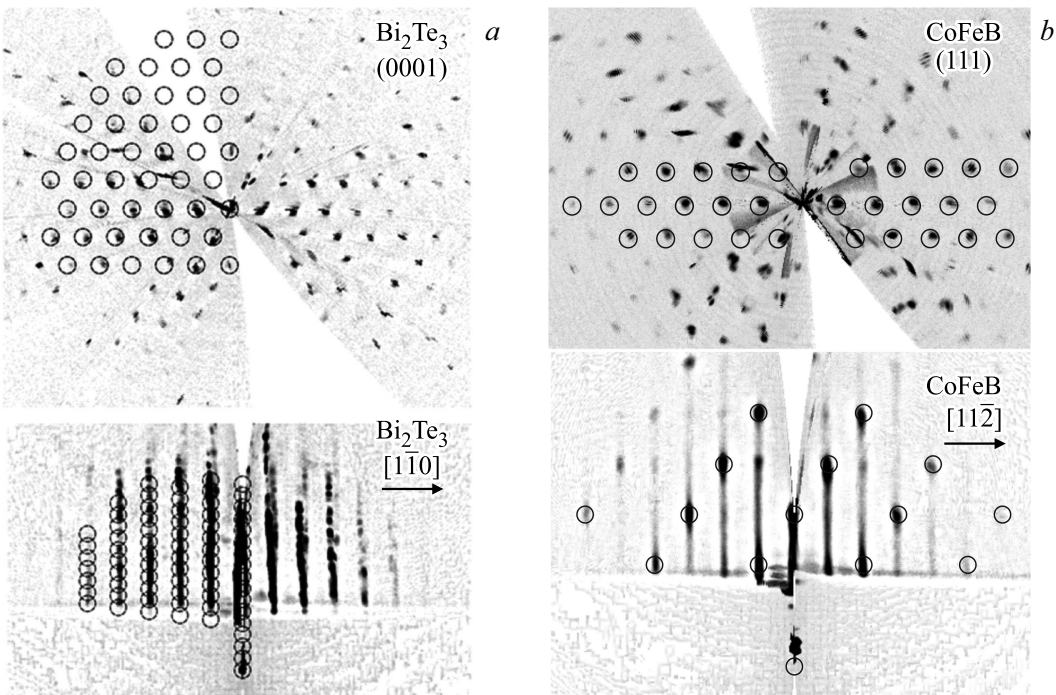


Рис. 2. Картины ДБЭ подложки Bi_2Te_3 в направлениях $[001]$ и $[\bar{1}\bar{1}0]$ осей зоны (a) и пленки CoFeB в направлениях $[111]$ и $[1\bar{1}0]$ осей зоны (b). Кругами обозначены результаты моделирования положений рефлексов.

ориентация кристаллографической оси $[111]$ которой перпендикулярна поверхности роста и совпадает с направлением $[001]$ подложки, в свою очередь лежащим перпендикулярно ее плоскости. Постоянную решетки CoFeV можно оценить как $a \approx 2.8-2.9 \text{ \AA}$. В плоскости роста направление $[11\bar{2}]$ CoFeV совпадает с направлением $[\bar{1}\bar{1}0]$ Bi_2Te_3 . Это отражает тот факт, что межатомное расстояние 4.395 \AA в направлении $[110]$ Bi_2Te_3 [7] близко к величине 4.019 \AA для межатомного расстояния в направлении $[\bar{1}\bar{1}0]$ CoFeV (эта величина вычислена в приближении средней величины 2.86 \AA в качестве постоянной решетки, характерной для материала CoFe, имеющего аналогичную кристаллическую структуру [8]). Методом меридионального магнитооптического эффекта Керра подтверждены ферромагнитные свойства выращенных слоев CoFeV. Показано, что ось легкого намагничивания лежит в плоскости образца, а анизотропия в этой плоскости практически отсутствует.

Таким образом, методом лазерной молекулярно-лучевой эпитаксии впервые выращен эпитаксиальный слой ФМ на основе CoFeV на поверхности ТИ Bi_2Te_3 , что открывает дальнейшие перспективы изучения и использования систем ФМ/ТИ в регистрации и управлении спин-поляризованным током.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-02-00729), а также Российского научного фонда в части создания и характеризации топологического изолятора (грант № 17-12-01047).

Список литературы

- [1] *Sánchez-Barriga J., Varykhalov A., Springholz G., Steiner H., Kirchschrager R., Bauer G., Caha O., Schierle E., Weschke E., Ünal A.A., Valencia S., Dunst M., Braun J., Ebert H., Minár J., Golias E., Yashina L.V., Ney A., Holý V., Rader O.* // Nature. Commun. 2016. V. 7. P. 10559.
- [2] *Sessi P., Biswas R.R., Bathon T., Storz O., Wilfert S., Barla A., Kokh K.A., Tereshchenko O.E., Fauth K., Bode M., Balatsky A.V.* // Nature Commun. 2016. V. 7. P. 12027.
- [3] *Vergniory M.G., Menshchikova T.V., Ereemeev S.V., Chulkov E.V.* // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. В. 4. С. 230–235.
- [4] *Hai P.N., Ohya S., Tanaka M., Barnes S.E., Maekawa S.* // Nature. 2009. V. 458. P. 489–492.

- [5] *Atuchin V.V., Golyashov V.A., Kokh K.A., Korolkov I.V., Kozhukhov A.S., Kruchinin V.N., Loshkarev I.D., Pokrovsky L.D., Prosvirin I.P., Romanyuk K.N., Tereshchenko O.E.* // *J. Solid State Chem.* 2016. V. 236. P. 203–208.
- [6] *Suturin S.M., Korovin A.M., Fedorov V.V., Valkovsky G.A., Tabuchi M., Sokolov N.S.* // *J. Appl. Cryst.* 2016. V. 49. P. 1532–1543.
- [7] *Feutelais Y., Legendre B., Rodier N., Agafonov V.* // *Mater. Res. Bull.* 1993. V. 28. P. 591–596.
- [8] *Bayliss P.* // *Can. Mineral.* 1990. V. 28. P. 751–755.