

Структурные свойства тонких пленок кристаллического топологического изолятора $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}$ на $\text{Si}(111)$

© А.К. Кавеев¹, Д.Н. Бондаренко¹, О.Е. Терещенко²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: kaveev@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 19 апреля 2021 г.

Принята к публикации 19 апреля 2021 г.

Проведен подбор и оптимизация технологических параметров роста методом молекулярно-лучевой эпитаксии тонких слоев $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}$ толщиной до 300 нм, выращенных на поверхности $\text{Si}(111)$ при температурах 230–400 °С, изучена морфология поверхности полученных пленок, определены эпитаксиальные соотношения. Показано, что в зависимости от температуры роста морфология поверхности имеет вид от гладких островов микронного размера, имеющих на поверхности моноатомные ступени, до более узких террас.

Ключевые слова: кристаллический топологический изолятор, молекулярно-лучевая эпитаксия, дифракция быстрых электронов, атомно-силовая микроскопия, $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}$.

DOI: 10.21883/FTP.2021.08.51126.02

1. Введение

Новое научное направление, связанное с исследованием топологических изоляторов (ТИ), является динамично развивающейся областью в физике твердого тела [1]. Известен класс так называемых кристаллических ТИ на основе соединений типа $\text{Sn}_x\text{Te}_{1-x}$ и $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ (PST), в которых топологическая защищенность поверхностных состояний определяется кристаллической симметрией [2–5]. Помимо собственно роста на подложках ТИ [6,7], в настоящее время большая часть исследований свойств ТИ связана с объемными кристаллами и толстыми пленками. Получение тонких сплошных малодефектных пленок ТИ привлекательно с точки

зрения уменьшения шунтирующего влияния объема на поверхностную проводимость.

2. Полученные результаты и обсуждение

В зависимости от температуры нанесения пленки морфология поверхности выращенных на $\text{Si}(111)$ образцов различна. Измерения методом атомно-силовой микроскопии показали, что в рассматриваемых случаях имеет место режим роста Странского–Крастанова. Вместе с тем форма и размер возникающих объектов различны. При относительно низких температурах (230 °С)

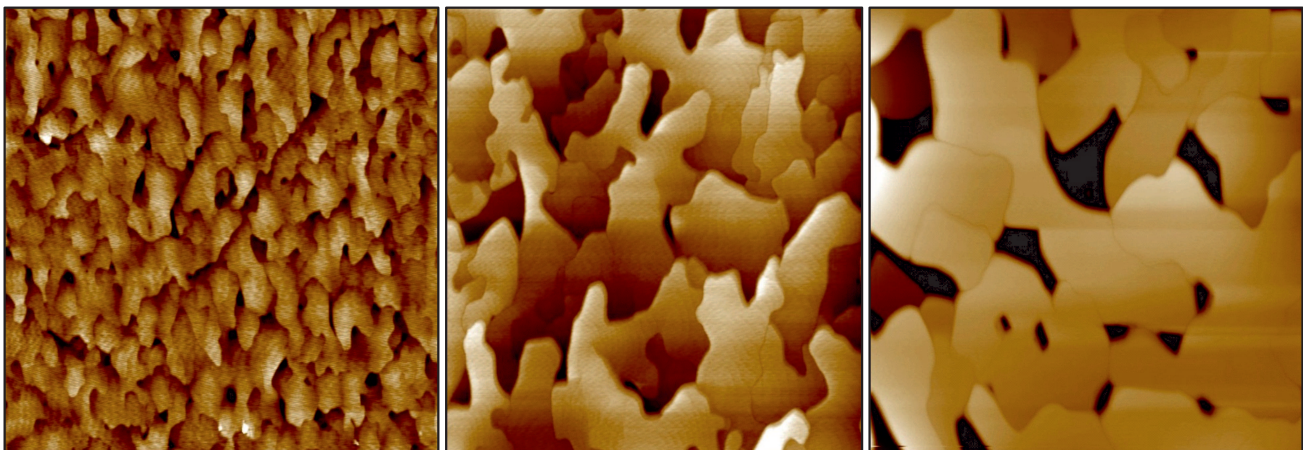


Рис. 1. Морфология поверхности пленки $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}/\text{Si}(111)$, нанесенной при температуре 230 °С (скан 6700 × 6700 × 15 нм, покрытие 300 нм (левая часть)), 300 °С (скан 6300 × 6300 × 40 нм, покрытие 300 нм (средняя часть)) и при температуре 350 °С (скан 5300 × 5300 × 160 нм, покрытие 300 нм (правая часть)).

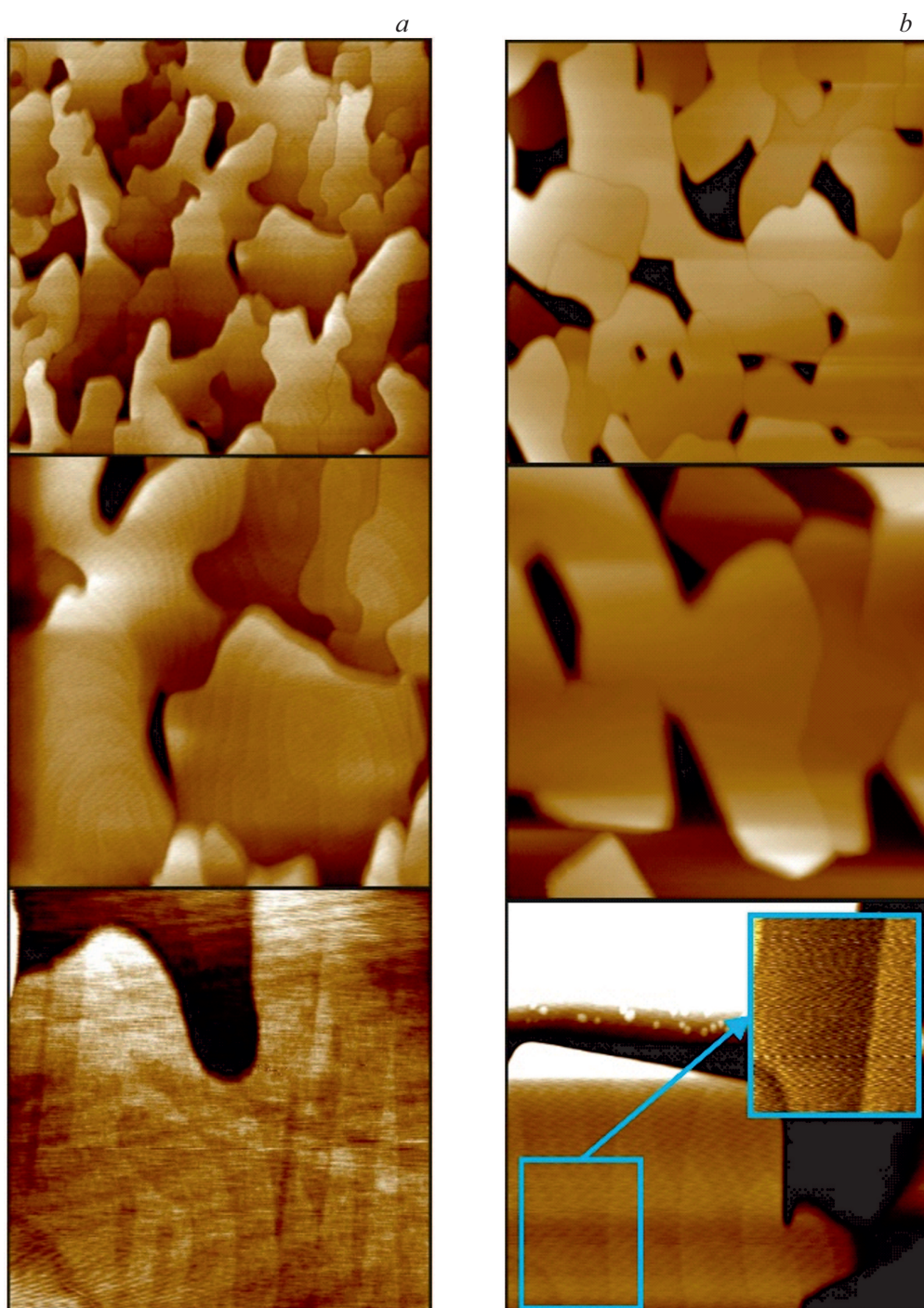


Рис. 2. Детальное сравнение морфологии поверхности пленок $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}/\text{Si}(111)$ толщиной 300 нм, нанесенных при температуре 300 (a) и 350°C (b). На нижней части рисунка (a) и на вставке в нижней части рисунка (b) — примеры моноатомных ступеней, разрешенных на отдельном острове. Размеры сканов: 6300 × 6300 × 40, 2700 × 2700 × 40 и 980 × 980 × 14 нм (a), и 5300 × 5300 × 150, 2300 × 2300 × 180 и 1500 × 1500 × 40 нм (b) соответственно.

наблюдается образование террас (см. рис. 1 (левая часть), толщина пленки 300 нм). Средняя высота террас 2.5 нм (т.е. четыре постоянных решетки PST), средний латеральный размер 400–450 нм.

При повышении температуры до 300°C происходит укрупнение террас (рис. 1 (средняя часть)), с увеличе-

нием их среднего латерального размера до 1–1.3 мкм, средняя высота террасы 10–11 нм. При последующем увеличении температуры происходит дальнейшее укрупнение с переходом от террас к большим плоским островам, имеющим средний латеральный размер вплоть до 2 мкм и более (рис. 1 (правая часть)), что превос-

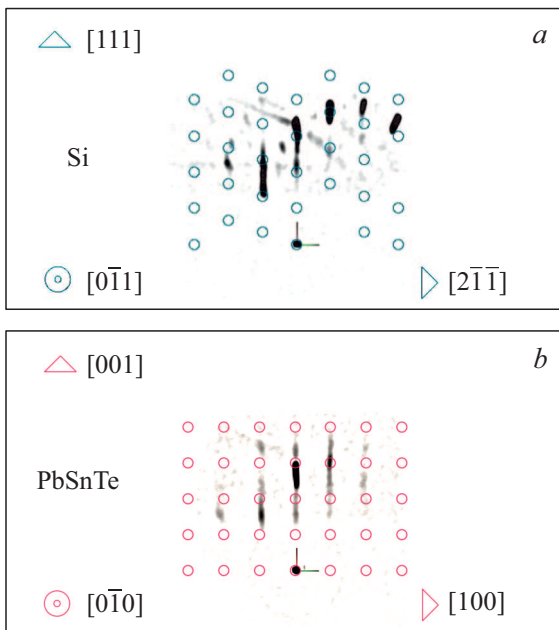


Рис. 3. Результат трехмерного картографирования картин дифракции быстрых электронов поверхности Si(111) (a) и $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}(001)$ (b).

ходит результаты по латеральным размерам островов для эпитаксиальных пленок ван-дер-ваальсовых ТИ на основе Vi_2Se_3 [8]. Острова имеют тенденцию к сращиванию при увеличении количества осаждаемого материала. Средняя высота острова 10–15 нм (т.е. 15–20 постоянных решеток PST). Подробно сравнение морфологии поверхности PST, выращенного при температурах 300 и 350°C, приведено на рис. 2. Видно, что поверхность террас и островов атомно-гладкая в обоих случаях, с признаками моноатомных ступеней. Прямые линии, различимые на нижней части рисунка (a), соответствуют выходам дислокаций по плоскостям скольжения $\{100\}$. Дальнейшее повышение температуры приводит к реиспарению материала с подложки. В частности, при температуре 375°C остается не более половины осажденного материала, а при температуре 400°C материал практически полностью реиспаряется с поверхности.

Наличие тонких тяжелей на картинах дифракции быстрых электронов (ДБЭ) подтверждает гладкость островов. Анализ картин ДБЭ путем трехмерного картографирования, т.е. компьютерной сборки картин ДБЭ, снятых при различных азимутальных углах (рис. 3) и сопоставление с результатами измерений рентгеновского дифракционного анализа (РДА) (приведены на рис. 4) позволили установить эпитаксиальные соотношения, которые справедливы во всем диапазоне ростовых температур: $(001) \text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te} \parallel (111) \text{Si}$, $[100] \text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te} \parallel [2\bar{1}\bar{1}] \text{Si}$ (рис. 5). Относительное рассогласование постоянных решеток вдоль данных латеральных осей составляет $\sim 4\%$, что, по-видимому, достаточно мало, чтобы обеспечить формирование протяженных латеральных объектов, разбитых, однако, на структурные домены. В [9]

показано, что при росте PST на поверхности Si(001) возможно формирование планарных слоев, что авторы работы связывают с избытком Sn, который химически пассивен к кремнию. В нашем случае причины могут быть аналогичны.

Прецизионное сравнение полученных данных РДА при температурах 230 и 350°C (рис. 4) показало незначительное смещение дифракционных максимумов в сторону меньших углов при повышении температуры, что говорит об увеличении постоянной решетки $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}$ в направлении, перпендикулярном плоскости роста, т.е.

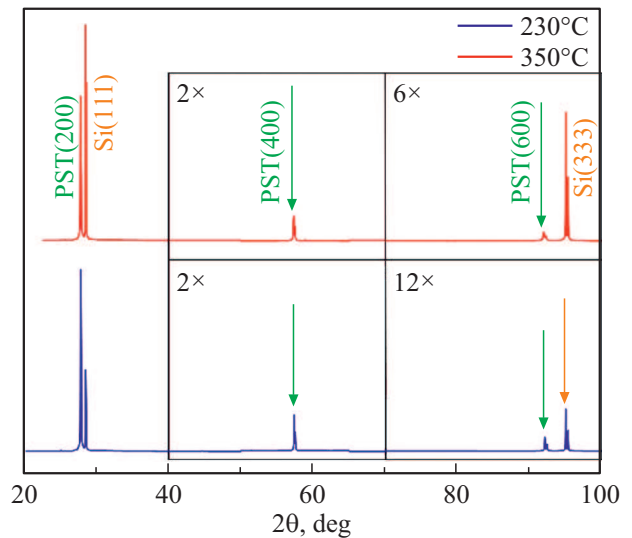


Рис. 4. Результаты измерений рентгеновского дифракционного анализа для двух образцов $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}(001)/\text{Si}(111)$, выращенных при температурах 230 и 350°C. Видны рефлексы, соответствующие отражению от плоскости (001) ТИ. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

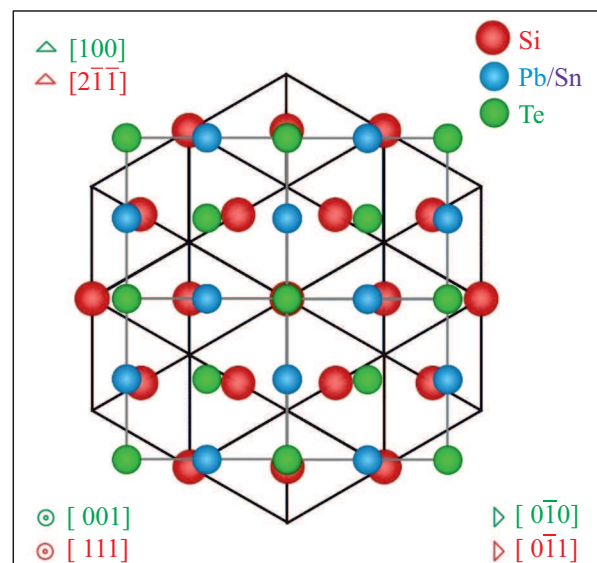


Рис. 5. Взаимное расположение интерфейсов $\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3}\text{Te}(001)/\text{Si}(111)$ в прямом пространстве.

о возможном изменении стехиометрического состава в сторону незначительного уменьшения относительного количества олова при повышении температуры (в ряде $Pb_{1-x}Sn_xTe$ постоянная решетки растет с уменьшением значения x).

Для исследования влияния небольших девиаций постоянной решетки подложки был проведен отдельный эксперимент по нанесению $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te$ на поверхность Si(111) с использованием буферного слоя CaF_2 . Известно [10], что данный материал имеет идентичную кремнию кристаллическую решетку типа флюорита, близкую кремнию постоянную решетки (5.46 Å) и при нанесении на кремний наследует ориентацию основных кристаллографических осей. Также известно [11], что флюоритовые подложки, такие как CaF_2 , SrF_2 и BaF_2 , используются для эпитаксиального роста соединений $A_{IV}B_{VI}$. Анализ картин ДБЭ позволил определить эпитаксиальные соотношения для этого случая: $(111)Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te \parallel (111)Si$, $[\bar{1}\bar{2}1]Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te \parallel [2\bar{1}\bar{1}]Si$. Как видно, эти соотношения иные, чем в случае непосредственного роста на кремнии. Подобное изменение взаимной ориентации пленки и подложки можно отнести к тому, что постоянная решетки CaF_2 больше таковой у кремния, и рассогласование с $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te$ (17%) уже достаточно большое, чтобы от режима роста Странского–Крастанова (характерного, например, для известного случая роста $Pb_{1-x}Sn_xTe/BaF_2(111)$ [11]) перейти к режиму роста Вольмера–Вебера.

3. Заключение

В работе получены тонкие пленки $Pb_{1-x}Sn_xTe$ на поверхности Si(111), обладающие достаточно хорошей сплошностью. На поверхности наблюдались моноатомные ступени. Полученный результат демонстрирует возможность создания методом МЛЭ тонких пленок $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te$, обладающих достаточно хорошей сплошностью, и позволяет перейти к дальнейшему изучению электрофизических свойств этих пленок.

Финансирование работы

Работа поддержана грантом РФФИ № 21-52-12024 ННИО_а, и выполнена с использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] C. Kane. *Nature Physics*, **4**, 348 (2008).
- [2] T.H. Hsieh, H. Lin, J. Liu, W. Duan, A. Bansil, L. Fu. *Nature Commun.*, **3**, 982 (2012).

- [3] T. Liang, S. Kushwaha, J. Kim, Q. Gibson, J. Lin, N. Kioussis, R.J. Cava, N.P. Ong. *Sci. Advances*, **3** (5), e1602510 (2017).
- [4] Б. Волков, Л. Рябова, Л. Хохлов. *Успехи физ. наук*, **172** (8), 875 (2002).
- [5] S.-Y. Xu, C. Liu, N. Alidoust, M. Neupane, D. Qian, I. Belopolski, J.D. Denlinger, Y.J. Wang, H. Lin, L.A. Wray, G. Landolt, B. Slomski, J.H. Dil, A. Marcinkova, E. Morosan, Q. Gibson, R. Sankar, F.C. Chou, R.J. Cava, A. Bansil, M.Z. Hasan. *Nature Commun.*, **3**, 1192 (2012).
- [6] A.K. Kaveev, V.A. Golyashov, A.E. Klimov, F. Schwierr, S.M. Sutorin, A.S. Tarasov, O.E. Tereshchenko. *Mater. Chem. and Phys.*, **240**, 122134 (2020).
- [7] A.K. Kaveev, S.M. Sutorin, N.S. Sokolov, K.A. Kokh, O.E. Tereshchenko. *Techn. Phys. Lett.*, **44** (3), 184 (2018).
- [8] L.A. Walsh, Ch.L. Hinkle. *Appl. Materials Today*, **9**, 504 (2017).
- [9] C. Boschetti, I. Bandeira, H. Closs, A. Ueta, P. Rappl, P. Mottisuke, E. Abramof. *Infr. Phys. Technol.*, **42**, 91 (2001).
- [10] A.K. Cheetham, B.E.F. Fender, M.J. Cooper. *J. Phys. C*, **4**, 3107 (1971).
- [11] G. Springholz. In: *Molecular beam epitaxy*, ed. by M. Henini (Oxford, Elsevier, 2013) chap. 13, с. 263.

Редактор Г.А. Оганесян

Structural characterization of the $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te$ crystalline topological insulator thin films grown on Si(111)

A.K. Kaveev¹, D.N. Bondarenko¹, O.E. Tereshchenko²

¹ Ioffe Institute,

194921 St. Petersburg, Russia

² Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract In this work, the selection and optimization of technological growth parameters of thin $Pb_{0.7}Sn_{0.3}Te$ layers up to 300 nm thick, grown on the Si(111) surface at temperatures of 230–400 °C by the method of molecular beam epitaxy was carried out. The surface morphology of the films was studied, and the epitaxial relations were determined. It was shown that, depending on the growth temperature, the surface morphology ranges from relatively narrow terraces to smooth micrometer-sized islands with monoatomic steps on their surface.