

МАТЕРИАЛТАНУ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
MATERIALS SCIENCEDOI 10.51885/1561-4212_2022_3_104
MPHTI 29.19.31**А.С. Жакыпов¹, Ж.К. Толепов¹, Г.А. Исмаилова¹, С.Л. Пешая¹, М.Н. Уалханова²**¹НИИЭТФ, НАО «Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби», г. Алматы, Казахстан

E-mail: szhakupovalibek@gmail.com

E-mail: mr.tolepov@mail.ru

E-mail: guzal_a81@mail.ru5

E-mail: svetik.mikhailova@gmail.com

²НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: Marjan_0309@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ НАНОРАЗМЕРНЫХ АМОΡФНЫХ ПЛЕНОК Ge₂Sb₂Te₅<Bi> ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ**ЛАЗЕРЛІК СӘУЛЕЛЕНДІРУ АСТЫНДАҒЫ НАНООЗДЕРЛІГІ АМОΡФТЫ Ge₂Sb₂Te₅<Bi> ҚАБЫҚШАЛАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫНДАҒЫ ӨЗГЕРІСТЕР****CHANGES IN THE STRUCTURE OF NANOSIZED AMORPHOUS Ge₂Sb₂Te₅<Bi> FILMS UNDER LASER IRRADIATION**

Аннотация. В работе приведены результаты исследований изменения структуры модифицированных примесью висмута наноразмерных аморфных пленок состава Ge₂Sb₂Te₅ (Ge₂Sb₂Te₅<Bi>) при лазерном облучении. Модифицированные пленки толщиной ~90 нм получались методом ионно-плазменного магнетронного ВЧ сораспыления поликристаллической мишени из Ge₂Sb₂Te₅ и висмута в атмосфере аргона. Состав пленок и аморфность их структуры контролировались методами энерго-дисперсионного анализа (EDX) на SEM Quanta 3D 200i и просвечивающей электронной микроскопии. Концентрация примеси висмута в пленках изменялась от 2,6 до 16,5 ат.%. Изменения в структуре аморфных пленок под действием лазерного облучения регистрировались *in situ* методом Рамановской спектроскопии. Показано, что в наноразмерных пленках Ge₂Sb₂Te₅ и Ge₂Sb₂Te₅<Bi>, содержащих примесь Bi до ~7 ат.%, при лазерном воздействии наблюдается переход их структуры из аморфного состояния в термодинамически устойчивое кристаллическое состояние с гексагональной структурой через промежуточное метастабильное кристаллическое состояние с кубической структурой. В пленках Ge₂Sb₂Te₅<Bi> с большей концентрацией Bi при лазерном облучении их структура переходит из аморфного состояния в кристаллическое со стабильной гексагональной структурой без промежуточного метастабильного состояния.

Ключевые слова: ионно-плазменное ВЧ распыление, примесная модификация, лазерное облучение, кристаллизация.

Аңдатпа. Бұл жұмыста лазерлік сәулелену кезінде висмутпен модификацияланған Ge₂Sb₂Te₅ (Ge₂Sb₂Te₅<Bi>) құрамды нанөлшемді аморфты қабықшалардың құрылымындағы өзгерістерді зерттеу нәтижелері берілген. Аргон атмосферасында Ge₂Sb₂Te₅ поликристалды нысанасы мен висмуттың ион-плазмалық магнетрон РЖ бірге шашырауы арқылы алынған ~90 нм қалыңдығы

әдісімен өзгертілген. Қабыршақтардың құрамы және олардың құрылымының аморфизмі SEM Quanta 3D 200i және трансмиссиялық электронды микроскопиядағы энергетикалық дисперсиялық талдау (EDX) арқылы бақыланды. Қабыршақтардағы висмут қоспасының концентрациясы 2,6-дан 16,5 ат.%-ға дейін өзгерді. Лазерлік сәулелену әсерінен аздаған аморфты қабықшалардағы өзгерістер Раман спектроскопиясы арқылы *in situ* тіркелді. Құрамында ~7 ат.% Bi қоспасы бар наноөлшемді $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ және $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle\text{Bi}\rangle$ пленкаларында лазерлік сәулелену кезінде олардың құрылымы аралық зат арқылы аморфты күйден термодинамикалық тұрақты кристалдық күйге ауысатыны көрсетілген текше құрылымы бар метатұрақты кристалдық күй. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle\text{Bi}\rangle$ қабыршақтарда жоғары Bi концентрациясы лазерлік сәулелену кезінде олардың құрылымы аморфты күйден аралық метатұрақты күйі жоқ тұрақты алтыбұрышты құрылымы бар кристалдық күйге дейін жасалады.

Түйін сөздер: ион-плазма РЖ шашырауы, қоспаларды өзгерту, лазерлік сәулелену, кристалдану.

Abstract. In this paper, the results of studies of changes in the structure of bismuth-modified nanosized amorphous films of composition $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle\text{Bi}\rangle$) under laser irradiation. Modified by the ~90 nm thickness method obtained by ion-plasma magnetron RF co-sputtering of a polycrystalline target of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ and bismuth in an argon atmosphere. The composition of the films and the amorphism of their structure were controlled by energy dispersive analysis (EDX) on a SEM Quanta 3D 200i and transmission electron microscopy. The bismuth impurity concentration in the films varied from 2.6 to 16.5 at.%. Changes in a small number of amorphous films under the action of laser irradiation were recorded *in situ* by Raman spectroscopy. It is shown that in nanosized $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ and $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle\text{Bi}\rangle$ films containing up to ~7 at.% Bi impurity, under laser irradiation, their structure undergoes a transition from an amorphous state to a thermodynamically stable crystalline state with a hexagonal structure through an intermediate metastable crystalline state with a cubic structure. In $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle\text{Bi}\rangle$ films with a higher Bi concentration under laser irradiation, their structure is made from an amorphous state to a crystalline state with a stable hexagonal structure without an intermediate metastable state.

Keywords: ion-plasma RF sputtering, impurity modification, laser irradiation, crystallization.

Введение Тонкие пленки халькогенидных полупроводников (ХП) системы Ge-Sb-Te (GST), в частности состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225), успешно применяются в последнее десятилетие в устройствах с фазовой памятью (Phase Change Memory или PCM) для записи, перезаписи и хранения информации [1-8].

Существуют также перспективы создания на их основе нового поколения ячеек энерго-независимой памяти произвольного доступа типа PC-RAM (Phase Change Random Access Memory). Ячейки с фазовой памятью с произвольным доступом считаются одними из наиболее подходящих кандидатов для устройств с энергонезависимой памятью следующего поколения благодаря своим преимуществам, таким как высокая плотность и скорость записи, низкое энергопотребление и хорошая термостойкость [1]. Процесс записи и стирания информации в халькогенидных материалах основан на сверхбыстром фазовом переходе между высокоомным аморфным (RESET) состоянием и низкоомным поликристаллическим (SET) состоянием в результате воздействия коротких импульсов напряжения или лазерного излучения [9-10]. Для улучшения параметров записи и хранения информации пленки GST подвергаются модифицированию примесью металла. Примесно-модифицированные халькогенидные полупроводниковые пленки интенсивно исследуются в последнее десятилетие.

Особое внимание заслуживает модифицирование халькогенидных пленок состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ изоморфной и изовалентной примесью металла. В этом случае легирование ХП осуществляется по механизму замещения и вносит наименьшие деформации в матрицу материала [11]. Исходя из этих критериев, наиболее перспективными примесями при модифицировании пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ являются висмут, олово, индий и серебро. При этом важно учитывать особенности трансформации в структуре при кристаллизации модифицированных пленок. Так, например, особенность трансформации структуры тонких пленок

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ под воздействием лазерного излучения [12], полученных термическим испарением в вакууме, заключается в переходе их структуры из аморфного состояния сначала в метастабильное кристаллическое состояние с кубической структурой, а затем в кристаллическое с гексагональной структурой, которое является термодинамически устойчивым. Особенности трансформации структуры модифицированных примесью металла пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ под воздействием лазерного облучения мало изучено. В работе [13] было установлено, что в процессе регистрации рамановских спектров аморфных пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, модифицированных висмутом методом магнетронного сораспыления, происходит кристаллизация их структуры. При этом были исследованы пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, модифицированные висмутом, только с концентрацией 6 и 12 ат. % с содержанием изолированных нанокластеров металла [14].

В данной работе исследована трансформация структуры пленок состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, модифицированных примесью висмута методом ионно-плазменного ВЧ сораспыления, под действием лазерного облучения.

Материалы и методы исследования. Пленки состава $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, модифицированные висмутом ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5 <\text{Bi}>$), были получены методом ионно-плазменного высокочастотного (13,56 МГц) магнетронного сораспыления комбинированной мишени, состоящей из $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и Bi, при давлении $\sim 0,9$ Па в атмосфере аргона. При распылении использовались монокристаллическая мишень из $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (99,999 %) компании AcAlloys (США), магнетрон AngstromScience-50 (США) и ВЧ-генератор RFMN-300 (США). Чистота мишеней из Bi была не менее 99,999 %. Мощность высокочастотного разряда подбиралась таким образом, чтобы исходная структура пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5 <\text{Bi}>$ была аморфной и не содержала нанокластеров висмута.

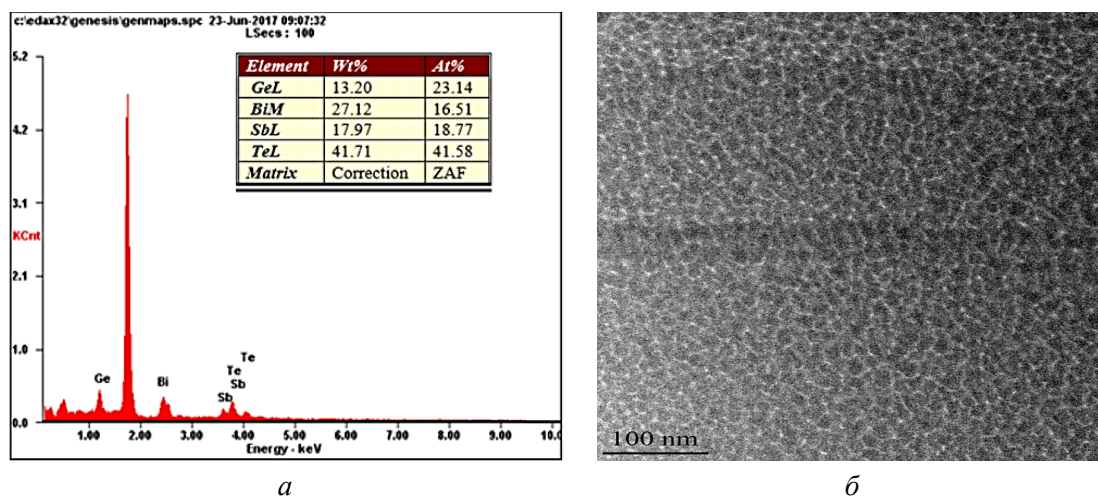


Рисунок 1. Энерго-дисперсионный спектр (а) и типичные ПЭМ изображения высокого разрешения структуры с разрешением 100 нм (б) пленок GST<16,5 ат.% Bi>

Пленки осаждались на подложки из кристаллического кремния (с-Si) и стекла. Состав пленок, их морфология и аморфность структуры (отсутствие нанокластеров висмута) контролировались методами энергодисперсионного анализа (EDX) на SEM Quanta 3D 200i. Концентрация примеси висмута в пленках достигала 16,5 ат. % (рис. 1). Толщина пленок определялись из анализа SEM-изображений сколов сэндвич-структур с-Si/пленка $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5 <\text{Bi}>$ и составляла ~ 90 нм.

Кристаллизация пленок осуществлялась под воздействием лазерного излучения с

одновременным контролем их структуры (in situ) методом Рамановской спектроскопии. Спектры регистрировались на спектрометре Solver Spectrum 600/600 в режиме отражения на 180° . В качестве источника возбуждения использовался He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633$ нм. Мощность лазерного излучения при регистрации спектров составляла 0,81 мВт, максимальное время воздействия достигало 10 минут. Диаметр облучаемого участка на пленке ~ 2 мкм. Величина погрешности регистрации частоты составляла ± 1 см $^{-1}$. Анализ спектров проводился с помощью программы OriginPRO 9.1. Сглаживание спектров осуществлялось по методу Савитского-Голея при использовании полинома второго порядка. Для анализа экспериментальных спектров проводили их разложение на минимальное количество составляющих гауссиан при достоверности не хуже 0,97.

Результаты и их обсуждения. На рис. 2 – 6 показаны рамановские спектры пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle\text{Bi}\rangle$. Отметим, что при воздействии лазерного облучения на пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle\text{Bi}\rangle$ в течение 0,5 мин изменений в их спектрах и, соответственно, в их структуре не наблюдалось. Спектры пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle\text{Bi}\rangle$ при лазерном воздействии до 0,5 мин имеют вид, характерный для аморфной структуры, (рис. 2, а – б, а) и характеризуются главным пиком при 148 см $^{-1}$ и плечом при 126 см $^{-1}$. При модифицировании пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ примесью висмута наблюдается существенное уширение спектров, связанное, по-видимому, с образованием частью атомов Bi химических соединений с Te и Sb [15,16]. После воздействия лазерным пучком на образец излучения лазера длительностью 5 минут в структуре пленок происходят фазовые трансформации и в рамановском спектре наблюдаются смещение главного пика из области 148 см $^{-1}$ в область 154 см $^{-1}$ и появление дополнительного пика при 72 см $^{-1}$, а положение плеча в области 126 см $^{-1}$ остается неизменным. Такой вид рамановского спектра характерен для метастабильной аморфно-кристаллической структуры пленок (рис. 2, б – б, б).

Наличие плеча, расположенного при 126 см $^{-1}$ на обоих спектрах, связано, по-видимому, с колебаниями гетерополярной связи в тетраэдрическом образовании типа GeTe и пирамидальном образовании Sb_2Te_3 . Пики, расположенные на 148 см $^{-1}$ и 154 см $^{-1}$, обусловлены колебаниями связей Sb–Sb в комплексе $(\text{Te}_2)\text{Sb}(\text{Te}_2)$, в котором атомы Sb соединены с четырьмя атомами Te [17].

Из рис. 2, в – б, в следует, что при 10 минутном облучении пленки лазером в рамановском спектре вместо плеча при 126 см $^{-1}$ появляется пик при 125 см $^{-1}$, связанный с появлением в структуре пленки гексагональной фазы [17].

Анализ спектров пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при лазерном облучении показывает, что их структура переходит из аморфного (рис. 2, а) в кристаллическое состояние с гексагональной структурой (рис. 2, в) через промежуточное кристаллическое состояние с кубической структурой (рис. 2, б), что характерно для пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ [17]. Такое изменение структуры при лазерном воздействии характерно и для пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle 2,6 \text{ ат. \% Bi} \rangle$.

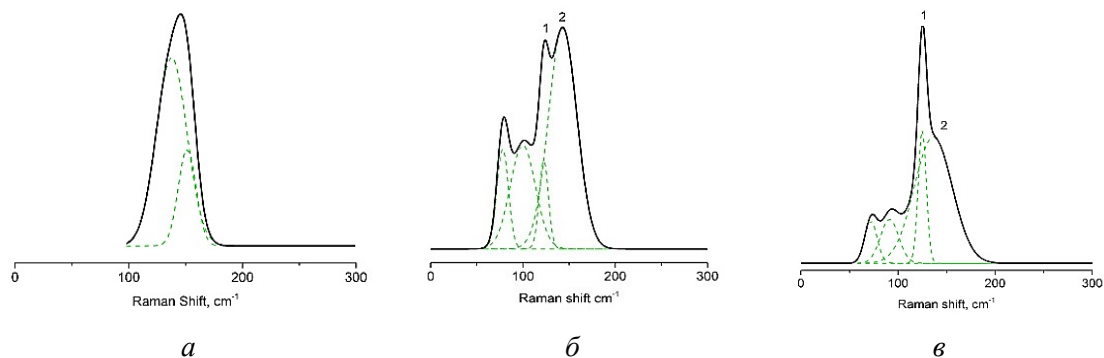


Рисунок 2. Рамановские спектры пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ при лазерном облучении разной длительности: *a* – 0,5 мин; *б* – 5 мин; *в* – 10 мин.

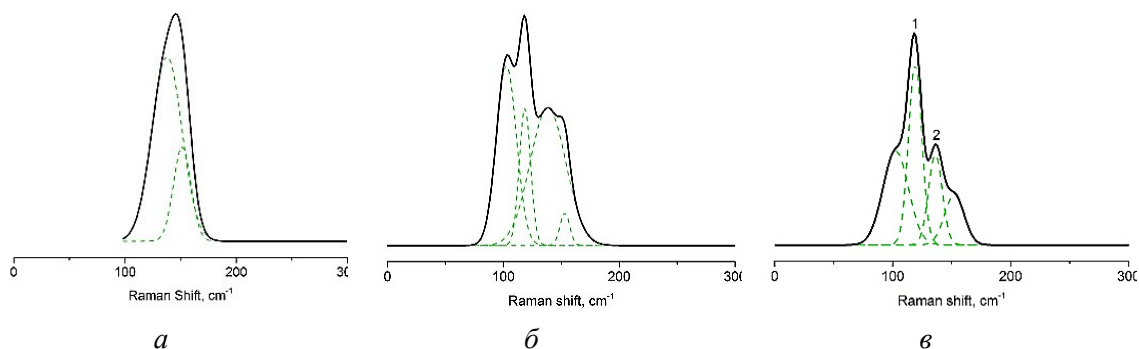


Рисунок 3. Рамановские спектры пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ <2,6 ат. % Вi> при лазерном облучении разной длительности: *a* – 0,5 мин; *б* – 5 мин; *в* – 10 мин.

Из рамановских спектров пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ <Bi> с концентрацией висмута равной 7,3 ат. % и с большей концентрацией следует, что при лазерном облучении их структура переходит из аморфного состояния в стабильное кристаллическое состояние с гексагональной структурой без промежуточного кристаллического состояния с кубической структурой, рис. 4-6.

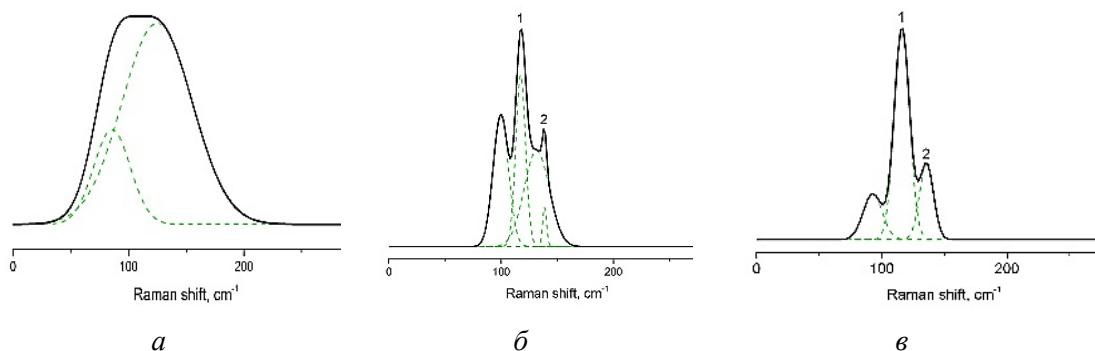


Рисунок 4. Рамановские спектры пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ <7,3 ат.% Вi> при лазерном облучении разной длительности: *a* – 0,5 мин; *б* – 5 мин; *в* – 10 мин.

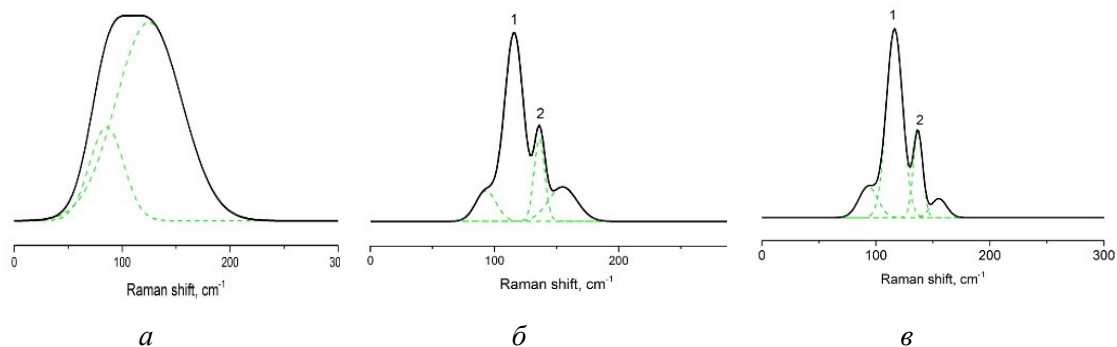


Рисунок 5. Рамановские спектры пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle 9,4 \text{ ат. \% Bi} \rangle$ при лазерном облучении разной длительности: *a* – 0,5 мин; *б* – 5 мин; *в* – 10 мин.

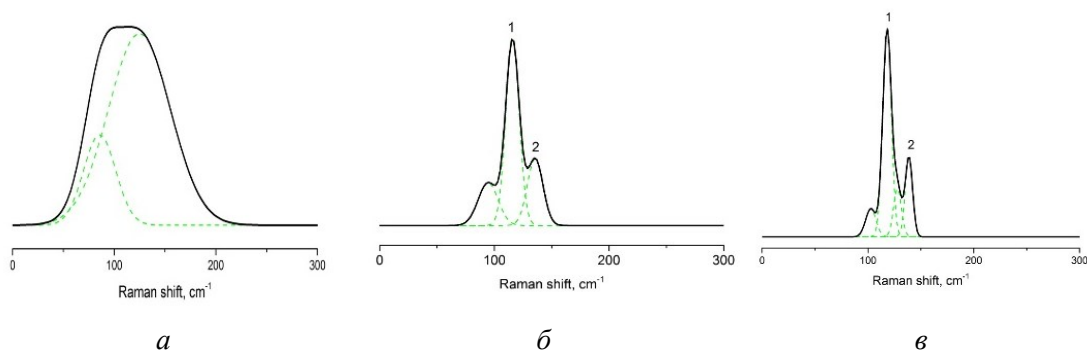


Рисунок 6. Рамановские спектры пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle 16,5 \text{ ат. \% Bi} \rangle$ при лазерном облучении разной длительности: *a* – 0,5 мин; *б* – 5 мин; *в* – 10 мин.

Таким образом, в пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ без примеси и в модифицированных примесью висмута с концентрацией, не превышающей ~ 7 ат. %, при переходе из аморфного состояния в поликристаллическое состояние наблюдаются два фазовых перехода. Однако в модифицированных пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle \text{Bi} \rangle$ с большей концентрацией Bi реализуется только один фазовый переход.

Заключение. Методом ионно-плазменного магнетронного ВЧ сораспыления мишени $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и висмута в атмосфере аргона получены наноразмерные аморфные пленки $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle \text{Bi} \rangle$ с толщиной ~ 90 нм. Концентрация примеси висмута в пленках достигала 16,5 ат. %. Было установлено, что полученные модифицированные пленки сплошные и имеют начальную аморфную структуру с ближним порядком, который достаточно четко просматривается на микрофотографиях с разрешением 100 нм

Изучена трансформация структуры пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle \text{Bi} \rangle$ под воздействием лазерного облучения с использованием *in situ* метода Рамановской спектроскопии. Показано, что в наноразмерных пленках $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle \text{Bi} \rangle$, содержащих примесь Bi до ~ 7 ат. %, при лазерном воздействии наблюдается переход их структуры из начального аморфного состояния в термодинамически устойчивое поликристаллическое состояние с гексагональной структурой через промежуточное метастабильное кристаллическое состояние с кубической структурой.

Однако в $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5\langle \text{Bi} \rangle$ с большей концентрацией Bi при воздействии лазерного облучения их структура переходит из аморфного состояния в поликристаллическое со

стабильной гексагональной структурой без промежуточного метастабильного состояния. Данные особенности фазового перехода из начального аморфного состояния в поликристаллическое состояние в модифицированных тонких пленках GST<Bi> с большей концентрацией связаны с особенностями встраивания примесных атомов висмута в матрицу пленки. По результатам энергодисперсионного анализа (EDX) можно предположить, что атомы висмута замещают атомы сурьмы.

Полученные результаты являются важными для дальнейшего изучения и создания устройств с оптической записью информации.

Благодарности: данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP14871061)

Список литературы

1. Burr G.W., Breitwisch M.J, Franceschini M. Phase change memory technology// J. Vac. Sci. Technol. –2010. – Vol. 28. – P. 223–262.
2. M. Nardone, M. Simon, I.V. Karpov, V.G. Karpov Electrical conduction in chalcogenide glasses of phase change memory // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 112(071101). – P. 1–20.
3. J.Y. Raty, W. Zhang, J. Luckas, Ch. Chen, R. Mazzarello, Ch. Bichara, M. Wuttig. Aging mechanisms in amorphous phase-change materials // Nat Communications. – 2015. – Vol. 6. – P. 7467.
4. Zhang, W. et al. Density-functional theory guided advances in phase-change materials and memories // MRS Bulletin. – 2015. – Vol. 40. – P. 856–865.
5. M. Schumacher, H. Weber, P. Jóvári, Yo. Tsuchiya, G. Tristan, A. Youngs, I. Kaban, R. Mazzarello. Structural, electronic and kinetic properties of the phase-change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ in the liquid state // Scientific Reports. – Vol. 6. – №.1. – P. 27434.
6. X. Sun, M. Ehrhardt, A. Lotnyk, P. Lorenz, E. Thelander, J. W. Gerlach, T. Smausz, U. Decker, B. Rauschenbach. Crystallization of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films by nano- and femtosecond single laser pulse irradiation // Sci. Rep. – 2016. – Vol. 6. – P. 28246.
7. P. Guo, A. M. Sarangan and I. Agha A Review of Germanium-Antimony-Telluride Phase Change Materials for Non-Volatile Memories and Optical Modulators // Appl. Sci. – 2019. – Vol. 9. – P. 530-556
8. A.M. Mio, S.M.S. Privitera, V. Bragaglia, F. Arciprete, S. Cecchi, G. Litrico, C. Persch, R. Calarco and E. Rimini Role of interfaces on the stability and electrical properties of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ crystalline structures // Sci Rep. – 2017. – Vol. 7. – P. 2616
9. S.R. Ovshinsky Reversible Electrical Switching Phenomena in Disordered Structures // Phys. Rev. Lett. –1968. – Vol. 21(20). – P. 1450–1453.
10. A.V. Kolobov, M. Krbal, P. Fons, J. Tominaga, T. Uruga Distortion-triggered loss of long-range order in solids with bonding energy hierarchy // Nature Chemistry. – 2011. – Vol. 3. – P. 311–316.
11. A.V. Kolobov, P. Fons, J. A. Tominaga, Thermal amorphization of crystallized chalcogenide glasses and phase-change alloys // Phys. Status Solidi B. – 2014. – Vol 251. – P. 1297 - 1308.
12. A.P. Avachev, S.P. Vikhrov, N.V. Vishnyakov, S.A. Kozyukhin Phase transitions in thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ chalcogenide films according to Raman spectroscopy data // Semiconductors. – 2012. – Vol. 46. – P. 591 - 594.
13. С.А. Дюсембаев, О.Ю. Приходько, Ж.К. Топалов, Н.Ж. Алмасов, С.Я. Максимова, К.Д. Турманова Влияние примеси висмута на структуру и электронные свойства наноразмерных пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ // Сборник трудов Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (AMS), 4-7 июля Санкт-Петербург, Россия. –2016. – С. 357.
14. Dyussebayev S., Prikhodko O., Sazonov A., Tolepov Zh., Almasov N., Maksimova S., Guseinov N., Kozyukhin S. Phase transition “glass-crystal” and switching effect in nanoscaled $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films modified by bismuth impurity // 13th Inter. Conf. “NON-CRYSTALLINE MATERIALS” (NCM-13). 24-29 jul, Canada, Halifax. –2016. – P. 65.
15. Richter W., Koi-Iler H., Becker C.R. Raman and Far-Infrared Investigation of Phonons in the Rhombohedra1 V2-VI3 Compounds Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_2 and $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ ($0 < x < 1$), $(\text{Bi}_y\text{Sb}_{1-y})_2\text{Te}_3$ ($0 < y < 1$) // Phys. Stat. Sol. (B). –1977.– V.6. – №1. – P. 619-621.
16. Shahil K.M., Hossain M.Z., Goyal V., Balandin A.A. Micro-Raman Spectroscopy of Mechanically Exfoliated Few-Quintuple Layers of Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 and Sb_2Te_3 // Materials J. Appl. Phys. – 2012.–Vol.111. – P. 054305.

17. Avachev A.P., Vikhrov S.P., Vishnyakov N.V., Kozyukhin S.A. Phase transitions in thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ chalcogenide films according to Raman spectroscopy data // *Semiconductors*. – 2012. – Vol. 46. – P.591-594.

References

1. Burr G.W., Breitwisch M.J., Franceschini M. Phase change memory technology // *J. Vac. Sci. Technol.* –2010. – Vol. 28. – P. 223–262.
 2. M. Nardone, M. Simon, I.V. Karpov, V.G. Karpov Electrical conduction in chalcogenide glasses of phase change memory // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 112(071101). – P. 1–20.
 3. J.Y. Raty, W. Zhang, J. Luckas, Ch. Chen, R. Mazzarello, Ch. Bichara, M. Wuttig. Aging mechanisms in amorphous phase-change materials // *Nat Communications*. – 2015. – Vol. 6. – P. 7467.
 4. Zhang, W. et al. Density-functional theory guided advances in phase-change materials and memories // *MRS Bulletin*. – 2015. – Vol. 40. – P. 856–865.
 5. M. Schumacher, H. Weber, P. Jóvári, Yo. Tsuchiya, G. Tristan, A. Youngs, I. Kaban, R. Mazzarello. Structural, electronic and kinetic properties of the phase-change material $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ in the liquid state // *Scientific Reports*. – Vol. 6. – №.1. – P. 27434.
 6. X. Sun, M. Ehrhardt, A. Lotnyk, P. Lorenz, E. Thelander, J. W. Gerlach, T. Smausz, U. Decker, B. Rauschenbach. Crystallization of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films by nano- and femtosecond single laser pulse irradiation // *Sci. Rep.* – 2016. – Vol. 6. – P. 28246;
 7. P. Guo, A. M. Sarangan and I. Agha A Review of Germanium-Antimony-Telluride Phase Change Materials for Non-Volatile Memories and Optical Modulators // *Appl. Sci.* – 2019. – Vol. 9. – P. 530-556
 8. A.M. Mio, S.M.S. Privitera, V. Bragaglia, F. Arciprete, S. Cecchi, G. Litrico, C. Persch, R. Calarco and E. Rimini Role of interfaces on the stability and electrical properties of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ crystalline structures // *Sci Rep.* – 2017. – Vol. 7. – P. 2616
 9. S.R. Ovshinsky Reversible Electrical Switching Phenomena in Disordered Structures // *Phys. Rev. Lett.* –1968. – Vol. 21(20). – P. 1450–1453.
 10. A.V. Kolobov, M. Krbal, P. Fons, J. Tominaga, T. Uruga Distortion-triggered loss of long-range order in solids with bonding energy hierarchy // *Nature Chemistry*. – 2011. – Vol. 3. – P. 311–316.
 11. A.V. Kolobov, P. Fons, J. A. Tominaga, Thermal amorphization of crystallized chalcogenide glasses and phase-change alloys // *Phys. Status Solidi B*. – 2014. – Vol 251. – P. 1297 - 1308.
 12. A.P. Avachev, S.P. Vikhrov, N.V. Vishnyakov, S.A. Kozyukhin Phase transitions in thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ chalcogenide films according to Raman spectroscopy data // *Semiconductors*. – 2012. – Vol. 46. – P. 591-594.
 13. S.A. Dyusembaev, O.Yu. Prikhodko, Zh.K. Tolepov, N.Zh. Almasov, S.Ya. Maksimova, K.D. Turmanova Effect of bismuth impurity on the structure and electronic properties of nanosized $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films // *Proceedings of the International Conference "Amorphous and Microcrystalline Semiconductors" (AMS)*, July 4-7 St. Petersburg, Russia. – 2016. – C. 357.
 14. Dyusembayev S., Prikhodko O., Sazonov A., Tolepov Zh., Almasov N., Maksimova S., Guseinov N., Kozyukhin S. Phase transition “glass-crystal” and switching effect in nanoscaled $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ films modified by bismuth impurity // 13th Inter. Conf. “NON-CRYSTALLINE MATERIALS” (NCM-13). 24-29 jul, Canada, Halifax. –2016. – P. 65.
 15. Richter W., Koi-Iler H., Becker C.R. Raman and Far-Infrared Investigation of Phonons in the Rhombohedra1 V2-VI3 Compounds Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_2 and $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ ($0 < x < 1$), $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ ($0 < y < 1$) // *Phys. Stat. Sol. (B)*. – 1977. – V.6. – №1. – P. 619-621.
 16. Shahil K.M., Hossain M.Z., Goyal V., Balandin A.A. Micro-Raman Spectroscopy of Mechanically Exfoliated Few-Quintuple Layers of $\text{Bi}_2(\text{Te}_3)$, $\text{Bi}_2(\text{Se}_3)$ and $\text{Sb}_2(\text{Te}_3)$ // *Materials J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol.111. – P. 054305.
 17. Avachev A.P., Vikhrov S.P., Vishnyakov N.V., Kozyukhin S.A. Phase transitions in thin $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ chalcogenide films according to Raman spectroscopy data // *Semiconductors*. –2012. – Vol. 46. – P.591-594.
-
-