

УДК 537.622

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА НЕЙТРОННО-ОБЛУЧЕННЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК CdTe

**А. Т. АКОБИРОВА¹⁾, Д. И. БРИНКЕВИЧ²⁾, С. А. ВАБИЩЕВИЧ³⁾,
Н. В. ВАБИЩЕВИЧ³⁾, В. И. ГОЛОВЧУК²⁾, М. Г. ЛУКАШЕВИЧ²⁾, Б. И. МАХСУДОВ¹⁾**

¹⁾Таджикский национальный университет, пр. Рудаки, 17, 734025, г. Душанбе, Таджикистан

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк, Беларусь

Методами индентирования и склерометрии исследованы прочностные свойства (микротвердость, трещиностойкость, эффективная энергия разрушения, микрохрупкость) эпитаксиальных пленок теллурида кадмия, выращенных на подложках из теллурида кадмия CdTe/CdTe и кремния CdTe/Si, и влияние на них облучения тепловыми

Образец цитирования:

Акобиров А. Т., Бринкевич Д. И., Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Головчук В. И., Лукашевич М. Г., Махсудов Б. И. Прочностные свойства нейтронно-облученных эпитаксиальных пленок CdTe // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 1. С. 73–79.

For citation:

Akobirova A. T., Brinkevich D. I., Vabishchevich S. A., Vabishchevich N. V., Halauchyk V. I., Lukashevich M. G., Mahsudov B. I. Solidity properties of neutron-irradiated CdTe epitaxial films. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 1. P. 73–79 (in Russ.).

Авторы:

Азиза Таишулатовна Акобиров – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры физической электроники физического факультета.

Дмитрий Иванович Бринкевич – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник кафедры полупроводников и наноэлектроники физического факультета.

Сергей Ананьевич Вабищевич – кандидат физико-математических наук; заведующий кафедрой физики радиотехнического факультета.

Наталья Вячеславовна Вабищевич – старший преподаватель кафедры физики радиотехнического факультета.

Виктория Ивановна Головчук – студентка физического факультета. Научный руководитель – М. Г. Лукашевич.

Михаил Григорьевич Лукашевич – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета.

Барот Исламович Махсудов – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой ядерной физики физического факультета.

Authors:

Aziza T. Akobirova, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of physical electronics, faculty of physics.

aziza.akobirova@mail.ru

Dmitry I. Brinkevich, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the department of semiconductor physics and nano-electronics, faculty of physics.

brinkevich@bsu.by

Sergey A. Vabishchevich, PhD (physics and mathematics); head of the department of physics, faculty of radio engineering.

vabser@tut.by

Natalia V. Vabishchevich, senior lecturer at the department of physics, faculty of radio engineering.

vabser@tut.by

Victoryia I. Halauchyk, student at the faculty of physics.

golovchuk95@mail.ru

Michail G. Lukashevich, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of semiconductors and nanoelectronic, faculty of physics.

lukashevich@bsu.by

Barot I. Mahsudov, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of nuclear physics, faculty of physics.

maksudov_barot@mail.ru

нейтронами. Показано, что рост микротвердости пленок при увеличении нагрузки обусловлен влиянием деформаций растяжения. Прочностные параметры (микротвердость H , трещиностойкость K_{Ic} , эффективная энергия разрушения γ) пленок CdTe/CdTe близки к аналогичным параметрам монокристаллического теллурида кадмия, а K_{Ic} и γ пленок CdTe/Si были в 3–8 раз ниже. Микротвердость пленок, выращенных на кремниевых подложках, возрастает при увеличении дозы тепловых нейтронов, а у пленок CdTe/CdTe, наоборот, снижается. Облучение нейтронами приводит также к увеличению до 2 раз трещиностойкости пленок CdTe/Si. Это обусловлено релаксацией упругих напряжений в приповерхностной области пленки при облучении нейтронами и формированием вторичных радиационных дефектов.

Ключевые слова: теллурид кадмия; подложка; пленка; нейтрон; индентирование; склерометрия.

Благодарность. Работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Белорусским государственным университетом и Таджикским национальным университетом от 03.05.2007 г.

SOLIDITY PROPERTIES OF NEUTRON-IRRADIATED CdTe EPITAXIAL FILMS

A. T. AKOBIROVA¹⁾, D. I. BRINKEVICH²⁾, S. A. VABISHCHEVICH³⁾,
N. V. VABISHCHEVICH³⁾, V. I. HALAUCHYK²⁾, M. G. LUKASHEVICH²⁾, B. I. MAHSUDOV¹⁾

^aTajik National University, 17 Rudaki Avenue, Dushanbe 734025, Tajikistan

^bBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^cPolotsk State University, 29 Blachina Street, Novopolotsk 211440, Belarus

Corresponding author: V. I. Halauchy (golovchuk95@mail.ru)

Investigations of solidity properties (microhardness, chapresist, distruction effective energy, microfragility) of CdTe thin films prepared on CdTe substrate CdTe/CdTe and silicon substrate CdTe/Si and influence of neutron-irradiation on these parameters have been carried out by means of indention and sclerometry methods. It was shown that microhardness increases with strength increasing because of strain deformation. Solidity properties of CdTe/CdTe films close to the bulk substrate, while K_{Ic} and γ for CdTe/Si films 3–8 times lower. It was observed that microhardness of CdTe/Si films increases with neutron doze increasing, while for CdTe/Si films – decreases.

Key words: cadmium telluride; substrate; film; neutron; indention; sclerometry.

Acknowledgements. The research has been carried out in the framework of bilateral cooperation between Belarusian State University and Tajik National University from 03.05.2007.

Введение

Пленки теллурида кадмия являются одним из базовых материалов для изготовления фотовольтаических приборов и датчиков ионизирующих излучений [1–4]. Эффективность таких приборов зависит от структурного совершенства пленок. Разработаны различные методы получения тонких пленок теллурида кадмия, среди которых синтез в квазизамкнутом объеме характеризуется дешевизной и возможностью получения пленок заданных толщины и площади на разных подложках. В последние годы опубликовано много работ, посвященных получению и исследованию оптических и электрических свойств пленок CdTe [4–10], однако прочностные свойства их изучены недостаточно. В настоящей работе представлены результаты исследований прочностных характеристик пленок теллурида кадмия, полученных на монокристаллических подложках кремния и теллурида кадмия методом вакуумного напыления в квазизамкнутом объеме.

Методика исследований

Выращивание пленок проводилось в вакууме при давлении не ниже 10^{-5} мм рт. ст. и температуре подложки $(220 \pm 10)^\circ\text{C}$. Для испарения монокристаллического теллурида кадмия с удельным сопротивлением $(1-5) \cdot 10^9$ Ом · см использовался ленточный танталовый испаритель. Толщина полученных пленок на всех подложках варьировалась в диапазоне 150–200 мкм, а их удельное сопротивление составляло $\sim 10^9 \dots 10^{10}$ Ом · см, что соответствует требованиям, предъявляемым к созданию дешевых детекторов ядерных излучений. Состав полученных пленок представлен в табл. 1, а детали синтеза приведены в [2].

Таблица 1

Элементный состав исследовавшихся пленок

Table 1

Composition of the films

Пленка/подложка	Cd, вес. %	Te, вес. %	Al, вес. %
CdTe/CdTe	48,1	51,6	0,3
CdTe/Si	50,44	48,74	0,82

Измерения микротвердости H методом индентирования проводились на приборе ПМТ-3 (Россия) по методике, описанной в [11]. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине α , равным 136° . Нагрузка P на индентор варьировалась в пределах 5–100 г. Длительность нагружения, статического действия нагрузки и ее снятия составляла по 10 с соответственно. Они выбирались с учетом явления ползучести в CdTe. Во избежание эффекта фотопластичности в CdTe исследования проводились в одинаковых условиях минимального освещения (в полутемноте). Для исключения влияния влаги измерения выполнялись в лаборатории при одинаковой влажности, которая контролировалась гигрометром ВИТ-1 (Россия). Глубина проникновения индентора варьировалась от 1,2 до 7,7 мкм в зависимости от нагрузки. При этом размер отпечатка составлял 8–55 мкм. Исследование прочностных свойств методом склерометрии с помощью прибора ПМТ-3 при комнатной температуре осуществлялось путем царапания ребром четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием согласно ГОСТ 9377-81. Нагрузка на индентор варьировалась в пределах 1–20 г, а скорость движения индентора для уменьшения связанной с вибрациями погрешности измерений – в диапазоне 40–120 мкм/с. Оценка погрешности измерений микротвердости показала, что она не превышает 10 % во всем интервале использованных нагрузок. Более подробно методика склерометрических измерений описана в работе [12].

Микрохрупкость Z определялась по стандартной методике [13] с погрешностью 5–8 %. Рассчитывались также коэффициент вязкости разрушения (трещиностойкость) K_{Ic} и эффективная энергия разрушения γ , оцениваемые по длине радиальной трещины согласно формулам [14]:

$$K_{Ic} = 0,016 \left(\frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{L^{\frac{3}{2}}}, \quad \gamma = \frac{K_{Ic}^2}{2E},$$

где E – модуль Юнга (для CdTe $E = 0,52 \cdot 10^{11}$ Па); L – длина трещины. Погрешность измерений K_{Ic} и γ составляла 8 %.

Для облучения использовался Pu – Be-источник (энергия нейтронов – от 0 до 10 МэВ). Для выделения тепловых нейтронов применялся специальный контейнер в парафиновом блоке. Парафин использовался для замедления быстрых нейтронов до уровня тепловых энергий. В целях установки источника нейтронов в требуемое пространственное положение применялся специальный подъемник, с помощью которого можно регулировать расстояние от дна бака для эффективного облучения образцов разной формы. Поток тепловых нейтронов определяли активационным методом. В качестве детектора применяли серебро и родий. Доза тепловых нейтронов варьировалась в диапазоне от $3,0 \cdot 10^8$ до $7,5 \cdot 10^8$ см⁻².

Результаты исследований и их обсуждение

Типичные микрофотографии отпечатков индентора на поверхности исходной монокристаллической подложки CdTe и пленок теллурида кадмия на подложках Si и CdTe приведены на рис. 1.

На исходных монокристаллических подложках теллурида кадмия форма отпечатков индентора близка к квадратной с небольшой бочковидностью (выпуклостью) отпечатка (см. рис. 1, а), что свидетельствует о наличии слабых деформаций растяжения. Наблюдаются коротенькие трещины, начиная с нагрузки 5 г. Материал неоднородный – на микрофотографии поверхности исходной монокристаллической пластины CdTe, обработанной травителем, которая использовалась в качестве подложки, зафиксированы темные сферические пятна, обусловленные ямками травления на микродефектах [15]. На статистическом распределении величин микротвердости наблюдались два максимума, соответствующие $H \sim 0,60$ ГПа и $H \sim 8,20$ ГПа, что также свидетельствует о наличии в материале областей с повышенным уровнем деформационных напряжений. Размеры этих областей, определенные по микрофотографиям (см. рис. 1, а),

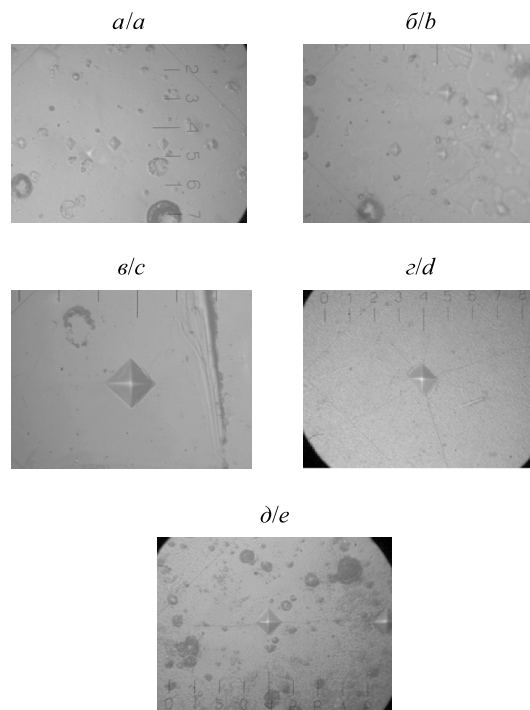


Рис. 1. Микрофотографии поверхности с отпечатками индентора на монокристаллической подложке CdTe (а), пленках теллурида кадмия на подложках CdTe (б, в) и Si (г, д), облученных тепловыми нейтронами дозами $3,0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (б, г) и $7,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (в, д) соответственно.

Поверхности, представленные на фото а, б, д, обрабатывались травителем, имеющим состав бутиловый спирт – бром в соотношении 10 : 1

Fig. 1. Microphotographs of a surface with imprints of an indenter of a singlecrystal CdTe substrate (a) and cadmium telluride films irradiated with thermal neutrons at doses of $3.0 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (b, d) and $7.3 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (c, e) on CdTe (b, c) and Si (d, e) substrates. The surfaces shown in photos a, b, e were treated by butyl alcohol – bromine etchant in a ratio of 10 : 1

изменяются от 2–5 до 20–30 мкм. Особенно ярко неоднородности в виде скачков микротвердости наблюдаются при малых нагрузках, равных 5–10 г, когда размеры отпечатка сравнимы с размерами включений. Такие распределения величин микротвердости с двумя максимумами отмечались ранее в монокристаллах полупроводников с различными микродефектами [15; 16]. Значения $H \sim 0,60 \text{ ГПа}$ соответствуют кубической модификации CdTe с преимущественной кристаллографической ориентацией (111) [17]. Более высокие значения $H \sim 8,20 \text{ ГПа}$, вероятнее всего, обусловлены микродефектами и формирующимися вокруг них деформационными полями.

Зависимость микротвердости от нагрузки $H(P)$ исходной монокристаллической подложки CdTe представлена на рис. 2 (кривая 1). На подложке не наблюдается характерного для полупроводниковых монокристаллов приповерхностного упрочнения, поскольку микротвердость слабо растет при увеличении нагрузки. Указанная особенность, скорее всего, обусловлена влиянием деформаций растяжения, наиболее заметным при малых нагрузках. Эти упругие напряжения растягивают отпечаток, сформировавшийся при индентировании, что приводит к увеличению его диагонали и, соответственно, к заниженным значениям микротвердости при измерении методом индентирования с использованием малых нагрузок.

Структуры монокристаллических подложек CdTe и выращенных на них пленок теллурида кадмия схожи. На микрофотографиях пленок CdTe/CdTe (см. рис. 1, а) наблюдались такие же микродефекты (см. рис. 1, б), как и на монокристаллических подложках. Поверхность пленки даже без травления и обработки выглядит как блочная – в виде пластин произвольной формы. Но есть и включения, по внешнему виду напоминающие аналогичные включения в монокристаллических подложках теллурида кадмия. Отпечатки индентора в пленке CdTe четкие. Трещины малые, и если развиваются, то по границам блоков. Неоднородности в виде скачков микротвердости наблюдаются при малых (5–10 г) нагрузках (как и в монокристаллах). Величина микротвердости была ниже, чем в монокристаллах CdTe (рис. 2, кривые 1 и 4). Трещиностойкость K_{Ic} и эффективная энергия разрушения γ пленок CdTe/CdTe близки к аналогичным параметрам монокристаллического теллурида кадмия (табл. 2).

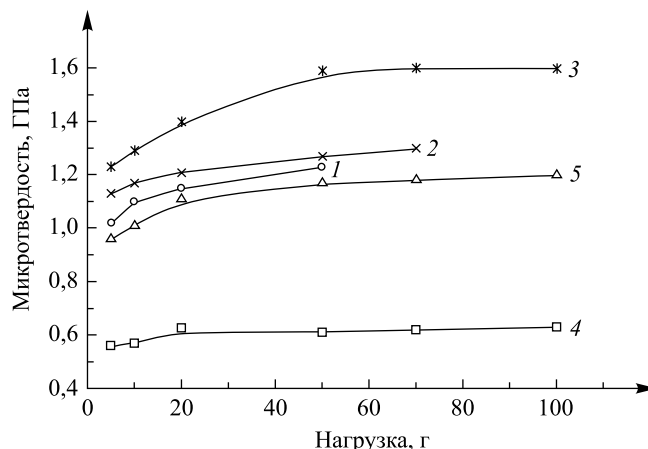


Рис. 2. Зависимости от нагрузки микротвердости, измеренной методом индентирования, исходной монокристаллической подложки CdTe (1) и пленок теллурида кадмия на подложках Si (2, 3) и CdTe (4, 5), облученных тепловыми нейтронами дозами $3,0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (2, 4) и $7,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (3, 5) соответственно

Fig. 2. The load dependence of the microhardness of the virgin singlecrystal CdTe substrate measured by the denting method (1) and cadmium telluride films irradiated by thermal neutrons at doses of $3.0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (2, 4) and $7.3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ (3, 5) on Si (2, 3) and CdTe (4, 5) substrates

Таблица 2

Трещиностойкость K_{Ic} , эффективная энергия разрушения γ и микрохрупкость Z пленок и монокристаллов CdTe при нагрузке 50 г

Table 2

Crack resistance K_{Ic} , effective energy of destruction γ and micro-brittleness Z of CdTe films and single crystals at a load of 50 g

Характеристика пленки	Монокристалл CdTe	CdTe/CdTe	CdTe/Si	CdTe/Si облученный, доза облучения равна $7,3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$
$K_{Ic}, 10^4 \text{ Па} \cdot \text{м}^{1/2}$	142,0	106,0	16,8	40,4
$\gamma, \text{ Па} \cdot \text{м}$	18,9	10,6	0,27	1,53
Z	2,1	2,2	2,5	2,5

На пленках, полученных на кремниевой подложке, картина несколько иная. Поскольку на кремнии формируются поликристаллические пленки теллурида кадмия с размером зерна от 2,5 до 5,0 мкм [2], поверхность их матовая. Текстуру поверхности можно характеризовать как направленную, рыхлую, сетчатую (см. рис. 1, з). Отпечатки индентора четкие, практически не искаженные. Но трещины очень длинные и прямые – от 30 мкм при нагрузке, равной 10 г, и до 210 мкм – при 50 г. В случае нагрузки, составляющей 100 г, пленка вообще раскололась и отслоилась. Все это свидетельствует о слабой адгезии к кремниевой подложке и низкой трещиностойкости пленки. Величина микротвердости была выше, чем в монокристаллах CdTe (см. рис. 2, кривые 1 и 2). Отметим, что измерения микротвердости методом склерометрии ($H^{\text{скл}}$) дают более высокие (примерно на 20 % больше) значения, чем величина H . Так, величина $H^{\text{скл}}$ составляла 1,47 ГПа при нагрузке, равной 5 г, и 1,2 ГПа – при 10 г. Это обусловлено тем, что при склерометрии влияние на измерения растягивающих упругих напряжений незначительно, в то время как при индентировании они приводят к заниженным значениям микротвердости. Трещиностойкость K_{Ic} и эффективная энергия разрушения γ пленок CdTe на кремниевой подложке существенно (в 3–8 раз) ниже аналогичных параметров монокристаллического теллурида кадмия (см. табл. 2). В то же время их микрохрупкость была несколько выше, чем у пленок CdTe/Si и монокристаллов теллурида кадмия (см. табл. 2). Однако эти различия были близки к погрешности измерений.

Тепловые нейтроны по-разному влияют на прочностные характеристики пленок теллурида кадмия на разных подложках. Микротвердость пленок, выращенных на кремниевых подложках, возрастает

при увеличении дозы тепловых нейтронов (см. рис. 2, кривые 2 и 3), а у пленок на монокристаллическом CdTe, наоборот, снижается (см. рис. 2, кривые 4 и 5). Отметим также, что облучение нейтронами приводит к увеличению до 2 раз трещиностойкости пленок CdTe/Si. При облучении пленок теллурида кадмия тепловыми нейтронами имеет место радиационный захват нейтронов ядрами Cd. Кадмий – хороший поглотитель тепловых нейтронов, поскольку сечение захвата естественной смеси изотопов составляет 2450 б [18]. Наиболее эффективно захватывает нейтроны изотоп кадмия ^{113}Cd – его сечение захвата на порядок выше, чем у естественной смеси [18]. При захвате нейтрона этим изотопом протекает ядерная реакция (n, γ). Сопровождающее этот процесс γ -излучение может модифицировать свойства приповерхностных слоев выращенных пленок теллурида кадмия. Другие, стабильные изотопы кадмия (^{106}Cd , ^{114}Cd , ^{116}Cd) имеют сечение захвата на четыре порядка ниже [18], однако при захвате ими нейтрона формируются β -радиоактивные изотопы, распад которых приводит к образованию примесных атомов In и в меньшей степени – Sn, способных модифицировать свойства пленок CdTe. Облучение сопровождается выбиванием атомов из узлов кристаллической решетки и формированием первичных радиационных дефектов – междоузельных атомов и вакансий, способных мигрировать по кристаллу и формировать так называемые вторичные радиационные дефекты, которые приводят к изменению микроструктуры кристалла. Скопления вторичных радиационных дефектов, образующиеся при γ -облучении поликристаллов, обычно способствуют их упрочнению [19; 20], что и наблюдалось нами на поликристаллических пленках теллурида кадмия, выращенных на кремниевых подложках. В случае пленок CdTe на монокристаллических подложках теллурида кадмия снижение микротвердости может быть обусловлено релаксацией упругих напряжений в приповерхностной области пленки при облучении нейтронами.

Заключение

Таким образом, микротвердость пленок CdTe растет при увеличении нагрузки, что обусловлено влиянием деформаций растяжения. Прочностные параметры (микротвердость H , трещиностойкость K_{Ic} , эффективная энергия разрушения γ) пленок CdTe/CdTe близки к аналогичным параметрам монокристаллического теллурида кадмия, а K_{Ic} и γ пленок CdTe/Si были в 3–8 раз ниже. Микротвердость пленок, выращенных на кремниевых подложках, возрастает при увеличении дозы тепловых нейтронов, а у пленок CdTe/CdTe, наоборот, снижается. Показано, что облучение нейтронами приводит к увеличению до 2 раз трещиностойкости пленок CdTe/Si. Это обусловлено релаксацией упругих напряжений в приповерхностной области пленки при облучении нейтронами и формированием вторичных радиационных дефектов.

Библиографические ссылки

1. Клевков Ю. В., Колосов С. А., Медведев С. А. и др. Электрические и фотоэлектрические свойства текстурированных поликристаллов CdTe // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35, вып. 10. С. 1192–1196.
2. Акобиров А. Т., Головчук В. И., Лукашевич М. Г. и др. Морфология поверхности пленок теллурида кадмия, полученных методом вакуумного напыления на подложках из кремния и теллурида кадмия // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 2. С. 69–75.
3. Нуриев И. Р., Мехрабова М. А., Назаров А. М. и др. Рост, структура и морфология поверхности эпитаксиальных пленок CdTe // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51, вып. 1. С. 36–39.
4. Бабенцов В., Сизов Ф., Franc J. и др. Атомно-силовая микроскопия и фотолюминесценция наноструктурированного CdTe // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, вып. 9. С. 1210–1214.
5. Курило И. В., Ильчук Г. А., Лукашук С. В. и др. Морфология, элементный состав и механические свойства поликристаллических слоев теллурида кадмия // Физика и техника полупроводников. 2011. Т. 45, вып. 12. С. 1591–1598.
6. Майоров В. А., Яфясов А. М., Божевольнов В. Б. и др. Электрофизические и морфологические свойства пленок CdTe, синтезированных методом молекулярного напыления // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44, вып. 5. С. 590–593.
7. Брус В. В., Солован М. Н., Майструк Э. В. и др. Особенности оптических и электрических свойств поликристаллических пленок CdTe, изготовленных методом термического испарения // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, вып. 10. С. 1886–1890.
8. Беляев А. П., Рубец В. П., Калинин И. П. Формирование ориентированных пленок теллурида кадмия на аморфной подложке в резко неравновесных условиях // Журн. техн. физики. 2001. Т. 71, вып. 4. С. 133–135.
9. Медведев С. А., Клевков Ю. В., Колосов С. А. и др. Фотопроводимость крупнозернистых поликристаллов CdTe // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36, вып. 8. С. 937–940.
10. Беляев А. П., Рубец В. П., Калинин И. П. Начальные стадии образования эпитаксиальных пленок соединений A^2B^6 в резко неравновесных условиях на подложке слюды-мусковита // Физика твердого тела. 1997. Т. 39, вып. 2. С. 382–386.
11. Бринкевич Д. И., Вабищевич Н. В., Вабищевич С. А. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев GaP // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С: Фундам. науки. 2010. № 9. С. 92–97.
12. Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Янковский Ю. Н. и др. Склерометрический метод измерения микротвердости пленок фоторезиста на кремнии // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7, № 1. С. 77–84. DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-77-84.
13. Концевой Ю. А., Литвинов Ю. М., Фаттахов Э. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982.

14. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. М. : Наука, 1989.
15. Brinkevich D. I., Vabishchevich N. V., Prosolovich V. S. Micromechanical properties of GaP <Dy> epilayers // *Inorg. Mater.* 2012. Vol. 48, issue 8. P. 768–772. DOI: 10.1134/S0020168512070047.
16. Brinkevich D. I., Prosolovich V. S., Vabishchevich S. A., et al. Influence of background impurities on the formation of stacking faults in silicon wafers // *Russ. Microelectron.* 2006. Vol. 35, issue 2. P. 94–97. DOI: 10.1134/S1063739706020053.
17. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ : справочник / под ред. З. С. Медведева [и др.]. М. : Наука, 1979.
18. Физико-химические свойства элементов : справочник / под ред. Г. В. Самсонова. Киев : Наукова думка, 1965.
19. Реутов В. Ф. О вкладе нанокластеров в радиационное упрочнение металлов // *Физика металлов и металловедение.* 2003. Т. 96, № 6. С. 92–99.
20. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. Подавление радиационного упрочнения в кремнии, легированном германием // *Физика и химия обработки материалов.* 2006. № 4. С. 12–14.

References

1. Klevkov Y. V., Kolosov S. A., Medvedev S. A., et al. [Electrical and photoelectric properties of textured polycrystals of CdTe]. *Fiz. tekhn. poluprovodn.* [Semiconductors]. 2001. Vol. 35, issue 10. P. 1192–1196 (in Russ.).
2. Akobirova A. T., Halauchyk V. I., Lukashevich M. G., et al. Surface morphology of cadmium telluride films prepared by vacuum sputtering on the silicon and cadmium telluride substrates. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 2. P. 69–75 (in Russ.).
3. Nuriyev I. R., Mekhrabova M. A., Nazarov A. M., et al. [Growth, structure and morphology of the surface of epitaxial CdTe films]. *Fiz. tekhn. poluprovodn.* [Semiconductors]. 2017. Vol. 51, issue 1. P. 36–39 (in Russ.).
4. Babentsov V., Sizov F., Franc J., et al. [Atomic force microscopy and photoluminescence of nanostructured CdTe]. *Fiz. tekhn. poluprovodn.* [Semiconductors]. 2013. Vol. 47, issue 9. P. 1210–1214 (in Russ.).
5. Kurilo I. V., Ilchuk G. A., Lukashuk S. V., et al. [Morphology, element composition and mechanical properties of polycrystalline layers of cadmium telluride]. *Fiz. tekhn. poluprovodn.* [Semiconductors]. 2011. Vol. 45, issue 12. P. 1591–1598 (in Russ.).
6. Mayorov V. A., Yafyasov A. M., Bozhevolnov V. B., et al. [Electrophysical and morphological properties of CdTe films synthesized by the molecular layering method]. *Fiz. tekhn. poluprovodn.* [Semiconductors]. 2010. Vol. 44, issue 5. P. 590–593 (in Russ.).
7. Brus V. V., Solovan M. N., Mastruk E. V., et al. [Peculiarities of the optical and electrical properties of polycrystalline CdTe films produced by the method of thermal evaporation]. *Fiz. tverd. tela* [Physics of the Solid State]. 2014. Vol. 56, issue 10. P. 1886–1890 (in Russ.).
8. Belyaev A. P., Rubets V. P., Kalinkin I. P. [Formation of oriented films of cadmium telluride on an amorphous substrate in sharply nonequilibrium conditions]. *Zh. tekhn. fiz.* [Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics]. 2001. Vol. 71, issue 4. P. 133–135 (in Russ.).
9. Medvedev S. A., Klevkov Y. V., Kolosov S. A., et al. [Photoconductivity of coarse-grained polycrystals of CdTe]. *Fiz. tekhn. poluprovodn.* [Semiconductors]. 2002. Vol. 36, issue 8. P. 937–940 (in Russ.).
10. Belyaev A. P., Rubets V. P., Kalinkin I. P. [The initial stages of the formation of epitaxial films of compounds A^2B^6 in sharply nonequilibrium conditions on a mica-muscovite substrate]. *Fiz. tverd. tela* [Physics of the Solid State]. 1997. Vol. 39, issue 2. P. 382–386 (in Russ.).
11. Brinkevich D. I., Vabishchevich N. V., Vabishchevich S. A. [Physicomechanical properties of GaP epitaxial layers]. *Vestnik Polotskogo Univ. Ser. C: Fundamental'nye nauki.* 2010. No. 9. P. 92–97 (in Russ.).
12. Brinkevich D. I., Prosolovich V. S., Yankovsky Y. N., et al. [Measurement of microhardness of photoresist films on silicon by the scratching method]. *Devices methods measurements.* 2016. Vol. 7, No. 1. P. 77–84 (in Russ.). DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-77-84.
13. Kontsevoi Y. A., Litvinov Y. M., Fattakhov E. A. [Plasticity and strength of semiconductor materials and structures]. Moscow : Radio i svyaz', 1982 (in Russ.).
14. Kolesnikov Y. V., Morozov E. M. [Mechanics of contact destruction]. Moscow : Nauka, 1989 (in Russ.).
15. Brinkevich D. I., Vabishchevich N. V., Prosolovich V. S. Micromechanical properties of GaP <Dy> epilayers. *Inorg. Mater.* 2012. Vol. 48, issue 8. P. 768–772. DOI: 10.1134/S0020168512070047.
16. Brinkevich D. I., Prosolovich V. S., Vabishchevich S. A., et al. Influence of background impurities on the formation of stacking faults in silicon wafers. *Russ. Microelectron.* 2006. Vol. 35, issue 2. P. 94–97. DOI: 10.1134/S1063739706020053.
17. Medvedeva Z. S., Novoselova A. V., Lazarev V. B. (eds). [Physical and chemical properties of semiconductor substances] : reference book. Moscow : Nauka, 1979 (in Russ.).
18. Samsonov G. V. (ed.). [Physical and chemical properties of elements] : reference book. Kiev : Naukova dumka, 1965 (in Russ.).
19. Reutov V. F. [About the contribution of nanoclusters to the radiation hardening of metals]. *Fiz. met. met.* [Phys. met. met.]. 2003. Vol. 96, No. 6. P. 92–99 (in Russ.).
20. Vabishchevich S. A., Vabishchevich N. V., Brinkevich D. I. [Suppression of radiation hardening in silicon doped with germanium]. *Fiz. khim. obrab. materialov* [Inorg. Mater.: Appl. Res. Phys. Chem. Mater. Treat.]. 2006. No. 4. P. 12–14 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 24.10.2017.
Received by editorial board 24.10.2017.