

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНОК ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ КРЕМНИЯ И ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ

А. Т. АКОБИРОВА¹⁾, В. И. ГОЛОВЧУК²⁾,
М. Г. ЛУКАШЕВИЧ²⁾, Н. С. СУЛТОНОВ¹⁾, Р. Б. ХАМРОКУЛОВ¹⁾

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

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

Методами атомно-силовой и растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа исследована морфология поверхности пленок теллурида кадмия, полученных на кремниевых подложках и подложках монокристаллического теллурида кадмия путем напыления в квазизамкнутом объеме. Показана возможность синтеза поликристаллических пленок с разным размером зерна и различной шероховатостью, изменяющимися в интервале от 2,5 до 5,0 мкм и от 34,1 до 87,5 нм соответственно. Обработка пленок бромбутиловым травителем приводит к изменению шероховатости поверхности до 17,9 нм. Элементный состав приповерхностного слоя пленки определялся методом рентгеноспектрального микроанализа, а структура – с помощью рентгеновского дифрактометра.

Ключевые слова: теллурид кадмия; подложка; пленка; шероховатость; атомно-силовая и растровая электронная микроскопии.

Благодарность. Работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Белорусским государственным университетом и Таджикским национальным университетом. Авторы выражают благодарность Л. В. Баран, С. В. Гусаковой и С. В. Злотскому за помощь при проведении измерений и обсуждение результатов.

Образец цитирования:

Акобиров А. Т., Головчук В. И., Лукашевич М. Г., Султонов Н. С., Хамрокулов Р. Б. 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.

For citation:

Akobirova A. T., Halauchyk V. I., Lukashevich M. G., Sultonov N. S., Hamroqulov R. B. 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.).

Авторы:

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

Виктория Ивановна Головчук – студентка физического факультета.

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

Низом Султонович Султонов – доктор физико-математических наук; профессор кафедры физической электроники физического факультета.

Раджабмурод Бадриддинович Хамрокулов – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры физической электроники физического факультета.

Authors:

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

aziza.akobirova@mail.ru

Victoryia Halauchyk, student at the faculty of physics.

golovchuk95@mail.ru

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

lukashevich@bsu.by

Nizom Sultonov, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of physical electronics, faculty of physics.

nisomsultonov@mail.ru

Rajabmurod Hamroqulov, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of physical electronics, faculty of physics.

h.rajabmurod@mail.ru

SURFACE MORPHOLOGY OF CADMIUM TELLURIDE FILMS PREPARED BY VACUUM SPUTTERING ON THE SILICON AND CADMIUM TELLURIDE SUBSTRATES

A. T. AKOBIROVA^a, V. I. HALAUCHYK^b,
M. G. LUKASHEVICH^b, N. S. SULTONOV^a, R. B. HAMROQULOV^a

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

^bBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus

Corresponding author: lukashevich@bsu.by

The results of atomic-force and scan electron microscopy of cadmium telluride films prepared on silicon and monocrystalline cadmium telluride substrates by means of sputtering in quasi-closed volume are presented. It is shown that mean grain size of the obtained films ranging in the interval 2.5–5.0 μm with roughness of the films changing in the range 34,1–87,5 nm. Etching of films bromine-butyl etchant results in improved surface morphology and roughness of the film reduces to 17.9 nm. The elemental composition of the film surface layer was determined by X-ray microanalysis and structure by X-ray diffractometer.

Key words: cadmium telluride; substrate; film; atomic-force and scan electron microscopy.

Acknowledgements. This work was performed in framework of Agreement on cooperation between the Belarusian State University and the Tajik National University. The authors are grateful to L. V. Baran, S. V. Gusakova, and S. V. Zlotzky for help in making the measurements and discussing the results.

Введение

Благодаря оптимальному сочетанию электрических и оптических характеристик теллуриды кадмия являются одним из наиболее эффективных материалов для изготовления фотосопротивлений, счетчиков радиоактивных излучений, а пленочные гетероструктуры кремний – теллурид кадмия активно используются при производстве солнечных элементов [1–3]. Среди разнообразных методов получения пленок теллурида кадмия их синтез в квазизамкнутом объеме характеризуется низкой затратностью и возможностью получения пленок заданной толщины и площади на разных подложках. До сих пор структура пленок теллурида кадмия, полученных разными методами, изучалась преимущественно методом рентгеноструктурного анализа [4–6]. В настоящей работе представлены результаты исследования структурных характеристик пленок теллурида кадмия, полученных на кремниевых подложках разного структурного совершенства и подложках монокристаллического теллурида кадмия методом вакуумного напыления в квазизамкнутом объеме.

Методика эксперимента

Пленки теллурида кадмия были выращены методом вакуумного напыления в квазизамкнутом объеме на шлифованных и полированных кремниевых подложках и подложках монокристаллического теллурида кадмия, полученного методом Бриджмена. После резки пластины CdTe последовательно механически шлифовались и полировались, промывались в этиловом спирте и обрабатывались травителем бутиловый спирт – бром в соотношении 10 : 1. Толщина полученных пленок на всех подложках варьировалась в диапазоне 150–200 мкм.

Морфология поверхности пленок исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) при комнатной температуре в полуконтактном резонансном режиме на частоте 145 кГц прибором Solver P47 Pro (Россия). Использовались кантилеверы серии NSG01 с радиусом закругления 10 нм. Выбранная для характеристики величина параметра шероховатости поверхности R_a (далее – шероховатость) определялась как среднее арифметическое значение высоты микронеровностей, измеренное от средней плоскости профиля, определенной методом наименьших квадратов, в пределах заданной плоскости [7] с областью сканирования 20×20 мкм и проведенными не менее пяти раз измерениями на одном образце диаметром 5 мм. Элементный состав приповерхностного слоя определялся методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO-1455 VP (Германия) с областью микрозондирования около 5 мкм и погрешностью определения концентрации, не превышающей 10 %. Для определения структуры использовался рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV (Япония) с регистрацией отражения в геометрии Брегга – Брентано.

Для выяснения возможности управления морфологией поверхности выращенных пленок они подвергались травлению при комнатной температуре, которое проводилось в бромбутиловом травителе в течение не более чем 20 мин.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Трехмерные АСМ-изображения поверхности шлифованной и полированной подложек кремния и выращенных на них пленок теллурида кадмия представлены на рис. 1.

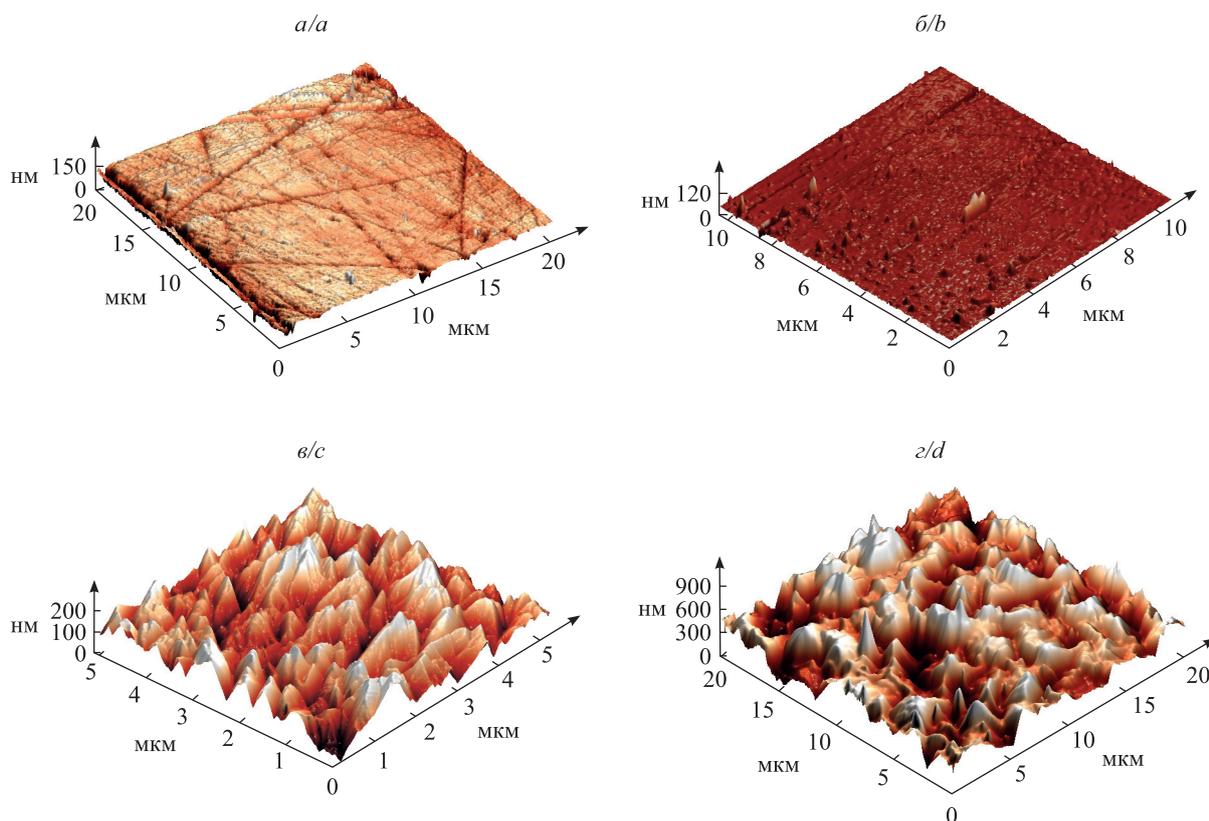


Рис. 1. Трехмерное АСМ-изображение поверхностей: шлифованной (а) и полированной (б) кремниевых подложек и выращенных на них пленок CdTe (в) и (г)

Fig. 1. Three-dimensional AFM image of the grinded (a) and polished (b) silicon substrates and of the CdTe films (c) and (d) grown on the substrates

На шлифованной подложке кремния (см. рис. 1, а) наблюдаются царапины глубиной до 140 нм, которые являются результатом резки и шлифовки. Средняя шероховатость поверхности шлифованной подложки кремния $R_a = 8,6$ нм. На АСМ-изображении выращенной на ней пленки теллурида кадмия (см. рис. 1, в) отчетливо наблюдаются кристаллиты с размером зерна в интервале от 2,0 до 2,5 мкм. Высота их достигает 300 нм, а средняя шероховатость поверхности полученной пленки $R_a = 34,1$ нм. Можно отметить и наличие на изображении впадин в виде темных пятен, оценка размера которых показывает, что они достигают до 1 мкм в длину и 0,2 мкм в ширину. Впадины могут представлять собой поры глубиной, достигающей 140 нм.

Полированная подложка кремния, как видно из рис. 1, б, не содержит царапин, и ее шероховатость $R_a = 2,7$ нм, что много меньше шероховатости шлифованной подложки. Выращенная на ней пленка имеет крупные кристаллиты, размер которых изменяется в диапазоне от 3,5 до 4,0 мкм. Тем не менее, в отличие от пленки на шлифованной поверхности, шероховатость пленки, выращенной на полированной поверхности кремния, значительно выросла и составляет $R_a = 87,5$ нм. Увеличилась также и величина максимального пика до 960 нм. Поры в виде пятен темного цвета на рис. 1, г, имеют значительно большую глубину, достигающую 500 нм, и их линейные размеры также несколько больше – до 1,5 мкм в длину и 0,4 мкм в ширину. Такое различие в морфологии поверхности выращенных пленок может быть связано с тем, что на более совершенной поверхности кремния легче происходит поверхностная миграция осаждаемых атомов. В результате этого вероятность зарождения центров кристаллизации и роста кристаллитов оказывается выше, что и обуславливает большие размер кристаллитов и шероховатость поверхности.

Таким образом, при выращивании на кремниевых подложках методом напыления в квазизамкнутом объеме пленок теллурида кадмия толщиной, значительно превышающей шероховатость поверхности

подложки, получаемая пленка не наследует морфологию поверхности подложки. Различие по морфологии поверхности пленок на разных подложках (выбранный параметр шероховатости, высота пика или глубина поры) более чем в два раза может быть связано не только с условиями зарождения и роста пленки, но и с нестабильностью параметров синтеза в реакторе с квазизамкнутым объемом, наиболее важными среди которых могут быть флуктуации давления, температуры и потоков обоих видов атомов в реакторе.

Трехмерное АСМ-изображение поверхности подложки теллурида кадмия и выращенной на ней пленки приведено на рис. 2. Шероховатость подложки теллурида кадмия $R_a = 15,7$ нм, что намного превышает шероховатость кремниевых подложек, а шероховатость выращенной на ней пленки почти в два раза больше, чем у подложки, и составляет $R_a = 23$ нм. Однако, несмотря на то что шероховатость подложки теллурида кадмия значительно больше, чем у обеих подложек кремния, шероховатость выращенной на ней пленки меньше, чем у пленок на кремниевых подложках, – $R_a = 34$ нм и $R_a = 87$ нм соответственно. На рис. 2, а, можно видеть и значительное число конусообразных пиков на поверхности подложки теллурида кадмия, достигающих в высоту до 90 нм, с диаметром у основания от 50 до 250 нм.

Изображение АСМ-микроскопа поверхности пленки теллурида кадмия, выращенной на подложке из того же материала, показано на рис. 2, б. В отличие от пленок на кремниевой подложке на ней кристаллиты визуально не наблюдаются. Как отмечалось выше, шероховатость ее поверхности значительно меньше и на ней имеются несколько пиков высотой до 87,2 нм, что близко к высоте пиков на подложке. На пленке теллурида кадмия (см. рис. 2, б) также можно видеть достаточно большие дефекты в виде темных пятен диаметром до 4 мкм. Существенное различие в морфологии поверхностей пленок CdTe на подложках из кремния и теллурида кадмия в первую очередь может быть связано с согласованием постоянной решетки подложки теллурида кадмия и зарождающейся пленки. При этом возможно доминирование процессов эпитаксиального наращивания. Так, согласно модели Странски – Крастанова [8] в этом случае сначала образуется первый монослой, а последующий рост происходит в виде островков на поверхности первого монослоя. В результате формируется не монокристаллическая, а поликристаллическая пленка с меньшими размером зерен и шероховатостью поверхности.

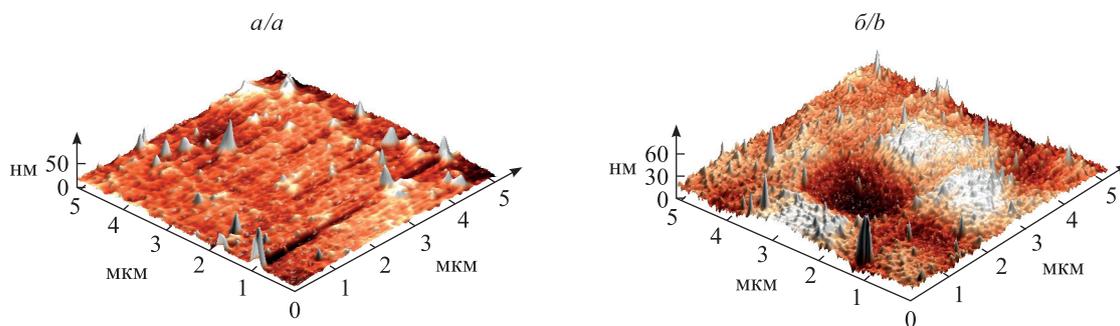


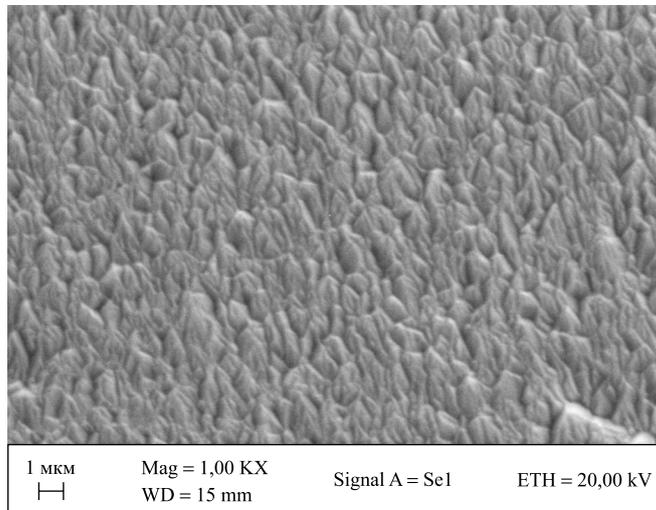
Рис. 2. Трехмерное изображение АСМ-поверхности подложки CdTe (а) и выращенной на ней пленки CdTe (б)

Fig. 2. Three-dimensional AFM image of the CdTe substrate (a) and of the grown CdTe film (b)

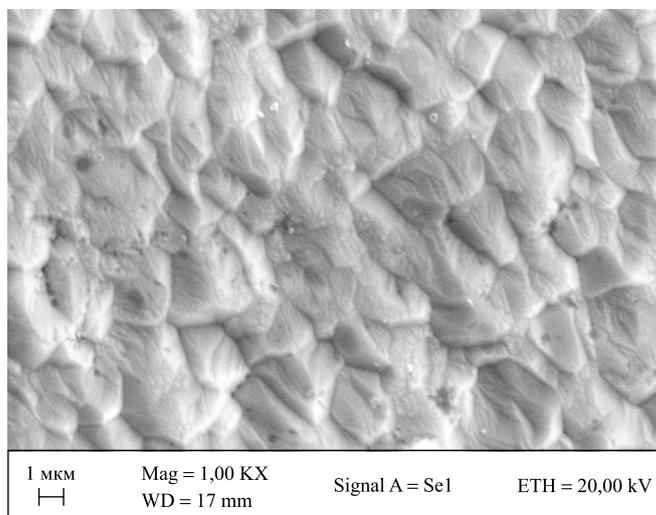
РЭМ-изображения поверхности пленок теллурида кадмия, полученных на шлифованной и полированной подложках кремния, показаны на рис. 3, а, б, соответственно, а на рис. 3, в, – изображение пленки, полученной на подложке из теллурида кадмия. Так же как и на АСМ-изображениях пленок на кремниевых подложках, на них хорошо видны крупные кристаллиты, и, кроме того, на рис. 3, б, отчетливо видны ступеньки роста кристаллов. Таким образом, наблюдается достаточно хорошая корреляция АСМ- и РЭМ-изображений поверхностей пленок теллурида кадмия, выращенных на полированной и шлифованной поверхностях кремния.

Корреляция изображений АСМ и РЭМ наблюдается и для пленок, выращенных на подложках из теллурида кадмия. Сравнивая рис. 2, б, и рис. 3, в, можно видеть отсутствие кристаллитов на обоих изображениях. Следует отметить и наличие на поверхности пленки крупных дефектов диаметром до 2 мкм, которые, возможно, могут быть связаны с наличием похожих дефектов на поверхности подложки и по порядку величины согласуются с АСМ-данными (см. рис. 2, б).

a/a



б/б



в/с

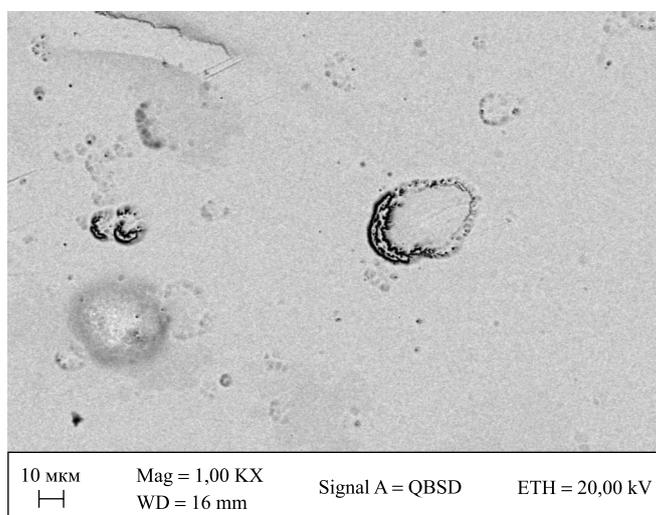


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности пленки CdTe на шлифованной (а), полированной (б) подложках кремния, а также CdTe (в)
Fig. 3. REM image of the CdTe film surface on the grinded (a) and polished (b) silicon substrates and on the CdTe substrate (c)

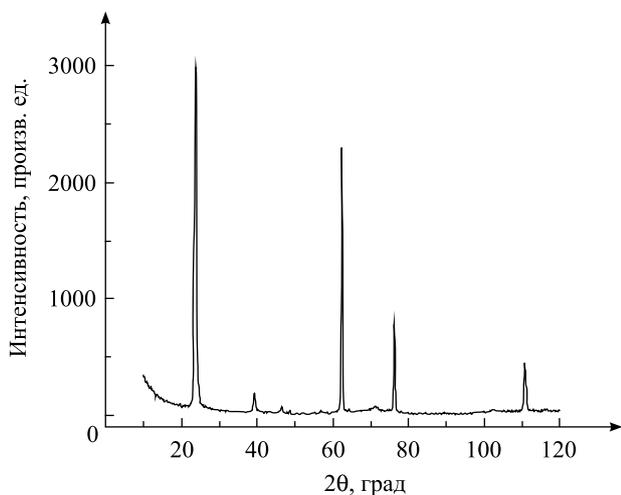


Рис. 4. Рентгенограмма пленки CdTe на подложке из этого же материала (2θ – угол между плоскостью пленки и рентгеновским излучением)

Fig. 4. X-ray pattern of the CdTe film on the substrate of the same material (2θ – angle between the plane of the film and X-rays)

Проведенный рентгеноструктурный анализ также показал, что выращиваемые методом напыления в квазизамкнутом объеме пленки теллурида кадмия на разных подложках имеют поликристаллическую структуру. Рентгенограмма пленки на подложке из CdTe представлена на рис. 4.

Анализ композиционного состава пленок на кремниевой подложке показал, что он приблизительно одинаков и составляет: Te – 48,75 ат. %, Cd – 50,44 ат. %. Кроме того, исследуемые пленки содержали 0,82 ат. % алюминия. Композиционный состав пленок на подложке из теллурида кадмия незначительно отличается: Te – 51 ат. %, Cd – 48,1 ат. %, также Al – 0,3 ат. %. Присутствие алюминия связано с его введением для определения проводимости, а другие элементы являются остаточными неконтролируемыми технологическими примесями.

Необходимо отметить, что обработка пленок бромбутиловым травителем приводила к существенному уменьшению шероховатости. Согласно [9] растворение выступов шероховатостей происходит быстрее, чем впадин, вследствие лучших условий подвода травителя к месту реакции и от-

вода продуктов растворения за счет большего наличия в диффузионном слое вблизи них конвективной диффузии. Действительно, при травлении пленки теллурида кадмия на кремниевой подложке средняя шероховатость изменялась от $R_a = 87,5$ нм до $R_a = 17,9$ нм, а высота наивысшего отдельного пика до травления и после него составляла 960 и 125 нм соответственно. Можно отметить также и то, что при травлении наблюдалось отшелушивание значительного числа пленок CdTe от кремниевой подложки, что свидетельствует о слабой адгезии между кремниевой подложкой и выращенной на ней пленкой теллурида кадмия.

Заключение

Анализ АСМ- и РЭМ-изображений поверхности пленок теллурида кадмия, полученных на кремниевых подложках и подложках теллурида кадмия, а также рентгеноструктурный анализ позволяют заключить, что методом напыления в квазизамкнутом объеме возможно получение поликристаллических пленок с разной морфологией поверхности, а именно пленок с размером зерна в интервале от 2,5 до 5,0 мкм и шероховатостью от 34,1 до 87,5 нм на кремниевой подложке и пленок с меньшей шероховатостью – до 23 нм – на подложке теллурида кадмия. Элементный состав пленок, выращенных на подложке кремния, включает: Cd – 50,44 ат. %, Te – 48,75 ат. %, Al – до 0,82 ат. %, а у пленок на подложке теллурида кадмия в композиционном составе преобладают: Te – 51,0 ат. %, Cd – 48,1 ат. %, Al – 0,3 ат. %. Обработка пленок бромбутиловым травителем позволяет до пяти раз уменьшить шероховатость поверхности.

Библиографические ссылки

1. Бовина Л. А. Физика соединений АПВVI. М., 1986.
2. Воронков Э. Н., Варганов С. В., Шалимова К. В. Пленочный фотоэлектрический элемент на основе CdTe // Вопр. спец. электроники. 1984. Сер. 11, вып. 2. С. 50–53.
3. Хамрокулов Р. Б. Структура и электрические свойства пленок CdTe // Вестн. Тадж. нац. ун-та. Сер. естеств. наук. 2011. Т. 70, № 6. С. 26–31.
4. Ронасси А. А., Галейша А. Н., Жуковский К. Б. и др. Структура и фотоэлектрические свойства пленок CdTe, полученных методом электрохимического осаждения // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2011. № 1. С. 24–27.
5. Майоров В. А. Электрофизические и морфологические свойства пленок CdTe, синтезированных методом молекулярного напыления // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44, вып. 5. С. 590–593.
6. Султонов Н. С., Акобиров А. Т., Хамрокулов Р. Б. и др. Исследование структуры пленок CdTe, полученных в квазизамкнутом объеме на различных подложках // Вестн. Тадж. нац. ун-та. Сер. естеств. наук. 2013. № 2. С. 91–95.
7. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н. Новгород, 2004.
8. Щука А. А. Нанoeлектроника. М., 2007.
9. Луфт В. Д., Перевоицков В. А., Возилова Л. Н. и др. Физико-химические методы обработки полупроводников / под ред. В. Д. Луфт. М., 1982.

References

1. Bovina L. A. [Physics of compounds AIBVI]. Moscow, 1986.
2. Voronkov E. N., Varganov S. V., Shalimov K. V. [The film photovoltaic cell based on CdTe]. *Vopr. spets. elektroniki*. 1984. Ser. 11, issue 2. P. 50–53 (in Russ.).
3. Khamrokulov R. B. [Structure and electrical properties of CdTe films]. *Vestnik Tadjikskogo natsional'nogo univ. Ser. estestv. nauk*. 2011. Vol. 70, No. 6. P. 26–31 (in Russ.).
4. Ronassi A. A., Haleisha A. N., Zhukousky K. B., et al. Structure and photoelectrical properties of CdTe films produced by electrochemical deposition. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2011. No. 1. P. 24–27 (in Russ.).
5. Mayorov V. A. [Electro and morphological properties of the films of CdTe, synthesized by the method of molecular layering]. *Fiz. tekhn. poluprovodn.* 2010. Vol. 44, issue 5. P. 590–593 (in Russ.).
6. Sultonov N. S., Akobirova A. T., Khamrokulov R. B., et al. Structure CdTe films obtained by vacuum deposition in quasiclosed volume on various substrates. *Vestnik Tadjikskogo natsional'nogo univ. Ser. estestv. nauk*. 2013. No. 2. P. 91–95 (in Russ.).
7. Mironov V. L. [Introduction in skaning microscopy]. Nizhny Novgorod, 2004 (in Russ.).
8. Schuka A. A. [Nanoelectronics]. Moscow, 2007 (in Russ.).
9. Luft V. D., Perevoshchikov V. A., Vozmilova L. N., et al. [Physical and chemical methods of processing semiconductor]. Moscow, 1982 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 08.12.2016.
Received by editorial board 08.12.2016.