

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-50-58

УДК 535.016

Анализ морфологии поверхности буферных слоёв CdTe с помощью эллипсометрии и интерференционной профилометрии для создания методики контроля роста буферных слоёв

ВАСИЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ШВЕЦ^{1✉}, ДЕНИС ВИКТОРОВИЧ МАРИН²,
ЛАДА СЕРГЕЕВНА КУЗНЕЦОВА³, ИВАН АЛЕКСЕЕВИЧ АЗАРОВ⁴,
МАКСИМ ВИТАЛЬЕВИЧ ЯКУШЕВ⁵, СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ РЫХЛИЦКИЙ⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6}Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия

^{1, 2, 4}Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

¹basil5353@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6292-5362>

²marin@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1603-0709>

³lada.brz@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-7518-6990>

⁴azarov_ivan@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9571-2227>

⁵yakushev@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

⁶rhl@isp.nsc.ru

<http://orsid.org/0009-0009-1847-0653>

Аннотация

Предмет исследования. Альтернативная подложка для роста тройного соединения кадмий-ртуть-теллур, состоящая из кремния с нанесёнными на него слоями CdTe и ZnTe. **Цель работы.** Построение модели шероховатой поверхности плёнок CdTe для создания методики контроля качества растущих структур. **Метод.** В качестве методик измерения шероховатости необходимы неразрушающие методы, обладающие достаточным разрешением. Таким условиям удовлетворяют оптические методы исследований. В данной работе были использованы методы эллипсометрии и интерференционной профилометрии. **Основные результаты.** Исследована шероховатость плёнок CdTe методами эллипсометрии и интерференционной профилометрии. Показано, что эти два метода прекрасно дополняют друг друга и дают более полную картину профиля поверхности, чем каждый по отдельности. Построена двухмасштабная модель шероховатой поверхности буферных слоёв CdTe, которая представляет собой слабо волнистую поверхность с наложенным на неё мелкомасштабным рельефом. Показано, что на эллипсометрические измерения оказывает влияние именно мелкомасштабный рельеф. Это использовано для разработки методики контроля процесса эпитаксиального роста буферных слоёв. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты исследования шероховатости поверхности плёнок CdTe служат основой для разработки методов контроля параметров слоёв CdTe, пригодных для выращивания высококачественных фоточувствительных структур.

Ключевые слова: эллипсометрия, интерференционная профилометрия, поверхностный рельеф, кадмий-ртуть-теллур, кадмий теллур, альтернативная подложка

Благодарность: работа проводилась при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-797(13.1902.21.0024).

Ссылка для цитирования: Шве́ц В.А., Мари́н Д.В., Кузнецова Л.С., Аза́ров И.А., Якуше́в М.В., Рыхли́цкий С.В. Анализ морфологии поверхности буферных слоёв CdTe с помощью эллипсометрии и интерференционной профилометрии для создания методики контроля роста буферных слоёв // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 50–58. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-50-58>

Коды OCIS: 120.2130, 120.3180, 180.3170.

Surface morphology analysis of CdTe buffer layers using ellipsometry and interference profilometry to create a technique for monitoring the growth of buffer layers

VASILY ALEKSANDROVICH SHVETS¹✉, DENIS VIKTOROVICH MARIN²,
LADA SERGEEVNA KUZNETSOVA³, IVAN ALEKSEEVICH AZAROV⁴,
MAXIM VITALIEVICH YAKUSHEV⁵, SERGEY VLADIMIROVICH RYKHLITSKII⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6}Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

^{1, 2, 4}Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

¹basil5353@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-6292-5362>

²marin@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0003-1603-0709>

³lada.brz@mail.ru <https://orcid.org/0009-0009-7518-6990>

⁴azarov_ivan@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9571-2227>

⁵yakushev@isp.nsc.ru <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>

⁶rhl@isp.nsc.ru <http://orsid.org/0009-0009-1847-0653>

Abstract

The subject of study is an alternative substrate for the growth of a ternary compound mercury-cadmium-telluride consisting of silicon with CdTe and ZnTe layers deposited on it. **The aim of study** is the construction of a model of the rough surface of CdTe films to create a technique for quality control of growing structures. **Method.** Non-destructive methods with sufficient resolution are required as roughness measurement techniques. These conditions are satisfied by optical research methods. In this work, ellipsometry and interference profilometry were used. **Main results.** The roughness of CdTe films was studied using ellipsometry and interference profilometry. It is shown that these two methods perfectly complement each other and provide more complete picture of the profile surface than each one separately. A two-scale model of the rough surface of CdTe buffer layers representing a slightly wavy surface with a small-scale relief superimposed on it has been constructed. It is shown that it is the small-scale relief that affects the ellipsometric measurements. This was used to develop a technique for controlling the process of epitaxial growth of buffer layers. **Practical significance.** The results of studying the surface roughness of CdTe films obtained in this work serve as the basis for the development of methods for controlling the parameters of CdTe layers suitable for growing high-quality photosensitive structures.

Keywords: ellipsometry, interference profilometry, surface relief, mercury-cadmium-telluride, cadmium telluride, alternative substrate

Acknowledgment: the work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education, Grant № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024).

For citation: Shvets V.A., Marin D.V., Kuznetsova L.S., Azarov I.A., Yakushev M.V., Rykhlitskii S.V. Surface morphology analysis of CdTe buffer layers using ellipsometry and interference profilometry to create a technique for monitoring the growth of buffer layers [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. T. 91. № 2. С. 50–58. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-50-58>

OCIS codes: 120.2130, 120.3180, 180.3170.

ВВЕДЕНИЕ

Для изготовления инфракрасных фотоприёмных устройств как одиночных, так и матричных, одним из наиболее перспективных материалов является тройное соединение кадмий-ртуть-теллур (КРТ) [1]. Одним из методов получения данного материала является метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [2], позволяющий выращивать различные гетероэпитаксиальные структуры на подложках больших площадей. При этом к подложкам предъявляется ряд требований по химическому, оптическому и кристаллографическому согласованию с КРТ слоями. Исходя из этих требований наиболее подходящими подложками являются подложки из CdTe и $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$, причём последнюю, путём подбора стехиометрического параметра x можно идеально согласовать по латеральной постоянной решётки с КРТ. Однако использование этих подложек сдерживает их высокая цена и малый размер. Для решения описанных проблем в технологии МЛЭ применяются гибридные подложки из кремния с выращенными на них эпитаксиальными слоями ZnTe и CdTe толщиной несколько микрон, обеспечивающими согласование постоянной решётки со слоями КРТ [3].

Качество слоёв КРТ и их электрофизические свойства находятся в прямой зависимости от качества буферных слоёв CdTe. В первую очередь речь идёт о прорастающих V-дефектах, которые наследуются при последующем росте слоя КРТ. Наш опыт, а также данные зарубежных исследователей [4] показывают, что критерием, позволяющим сделать оценку пригодности буферного слоя для получения качественных слоёв КРТ, является его микрорельеф.

Известно, что дефекты роста приводят к появлению микрорельефа поверхности. В свою очередь, микрорельеф затрудняет миграцию атомов на поверхности и является одной из причин трёхмерного роста [4]. Метод эллипсометрии весьма чувствителен к поверхностному микрорельефу, поэтому такая взаимосвязь микрорельефа и качества слоёв открывает возможность его оценки, проводя мониторинг процесса роста и отслеживая динамику изменения шероховатости [5]. В связи с этим представляется критически важным исследование шероховатости выращиваемых

слоёв CdTe и разработка in situ и ex situ методов её контроля.

Целью данной работы является построение модели шероховатой поверхности плёнок CdTe для создания методики контроля качества растущих структур.

ШЕРОХОВАТОСТЬ И ЕЁ ХАРАКТЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

На рис. 1 схематически представлен в разрезе профиль поверхности шероховатого слоя CdTe. Для характеристики шероховатости мы используем отклонение высоты профиля слоя от его среднего значения $z(x, y)$, которое является случайной функцией и зависит от координат x, y в плоскости образца. Функцию $z(x, y)$ будем называть высотой шероховатости, её среднее значение по определению равно нулю. Под среднеквадратичной шероховатостью мы понимаем усреднённое по всей площади поверхности среднеквадратичное значение этой функции $h = (\langle z^2 \rangle)^{1/2}$.

Характерный размер в плоскости образца L определяется полушириной автокорреляционной функции (АКФ) $F(x, y) = \langle z(x', y')z(x' + x, y' + y) \rangle / h^2$, которая также усредняется по всей площади поверхности.

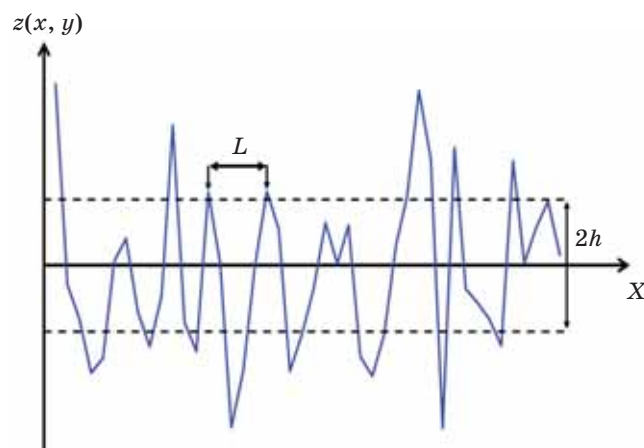


Рис. 1. Схематичное изображение профиля поверхности вдоль оси x для слоя CdTe. Координатная ось X соответствует уровню средней толщины слоя

Fig. 1. Schematic representation of the surface profile along the x axis for a CdTe layer. The X coordinate axis corresponds to the level of the average layer thickness

ОПТИЧЕСКАЯ ПРОФИЛОМЕТРИЯ–ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Оптический профилометр — это прибор для измерения шероховатости поверхности бесконтактным способом. Обычно в таком измерительном устройстве реализовано несколько оптических технологий, например, конфокальная профилометрия, интерферометрия и т.д. Нами был использован метод интерферометрии с когерентным сканированием (Coherent Scanning Interferometry (CSI)) [6].

Метод основан на регистрации интерференционных картин в белом свете при перемещении образца по вертикали. В каждой точке с помощью регулировки положения реперного зеркала в объективах достигается нулевая оптическая разность хода, при которой в интерференционной картине наблюдается абсолютный максимум интенсивности, регистрируемый объективом. Таким образом, если в некоторой точке образца наблюдается абсолютный максимум, то она находится в фокусе. При вертикальном сканировании все точки поверхности поочередно проходят через фокус. По последовательности полученных интерференционных картин с помощью алгоритма обработки определяются изменения интенсивности света в каждой точке поверхности в зависимости от её координаты. Программа вычисляет положение максимума интенсивности для каждой точки, после чего восстанавливается форма поверхности, то есть зависимость $z(x, y)$. Рассматривая $z(x, y)$

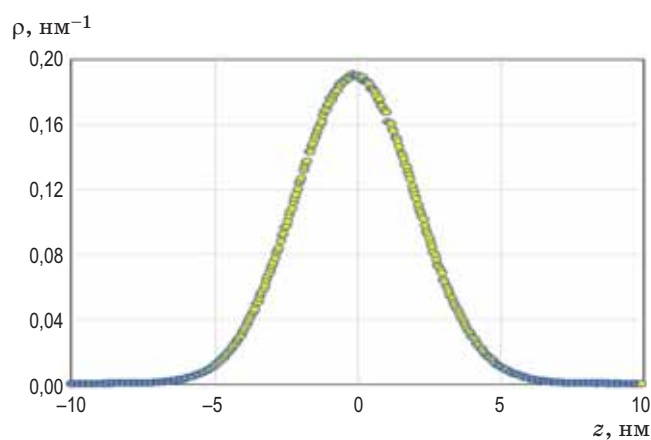


Рис. 2. Плотность распределения высоты шероховатости $\rho(z)$ для слоя CdTe

Fig. 2. Roughness height distribution density $\rho(z)$ for the CdTe layer

как случайную функцию двух переменных, можно вычислять статистические характеристики шероховатой поверхности. В качестве примера на рис. 2 показана плотность распределения высоты z для одного из образцов слоя CdTe, которая с высокой точностью описывается нормальным распределением. Сканирование проводилось в области с площадью 282×337 мкм². Нормальное распределение z означает однородность масштабов рельефа по всей области сканирования. В противном случае при наличии крупномасштабных дефектов поверхности (редко расположенных бугорков или ямок) наблюдалось бы искажение гауссовой кривой и нарушение симметрии в распределении.

ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ

Эллипсометрия основана на измерении отношения комплексных коэффициентов отражения света для p - и s -поляризаций [7]:

$$\frac{R_p}{R_s} = \operatorname{tg} \Psi e^{i\Delta},$$

где Ψ , Δ — измеряемые эллипсометрические параметры. Они чувствительны к поверхностному микрорельефу и позволяют рассчитывать статистические характеристики его размеров. Существует много подходов для количественного описания шероховатости и её влияния на эллипсометрические измерения. В наиболее известном методе эффективной среды поверхностная шероховатость представляется в виде однородного слоя, состоящего из смеси материала подложки и пустот, оптические постоянные которого вычисляются по модели Бруггемана [8]. При этом толщина слоя d_r соответствует характерному отклонению высоты шероховатости от среднего уровня. Латеральный размер шероховатости в этой модели не учитывается.

Более корректный подход к учёту шероховатости, на наш взгляд, описан в работах [9, 10], в которых рельеф представлен случайной функцией двух координат в плоскости образца и рассмотрена задача отражения плоской электромагнитной волны с учётом граничных условий на такой поверхности. В этой модели рельеф описывается двумя параметрами, введёнными выше, а именно — среднеква-

дратичным отклонением высоты профиля h и полушириной автокорреляционной функции L , которая соответствует характерному латеральному размеру шероховатости в плоскости образца. Такое рассмотрение возможно только при характерных размерах рельефа $h \ll L$, значения которых можно определить из эллипсометрических измерений с помощью прямых вычислений параметров ψ , Δ в зависимости от h , L и используя технику номограмм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ CdTe

Сравнение вышеописанных методов характеристики шероховатостей слоёв проводилось на образце CdTe/Si, который по данным сканирующей пространственной эллипсометрии имел большой диапазон изменения шероховатости. Распределение параметра Δ , который проявляет наиболее высокую чувствительность к рельефу поверхности, показано на вставке рис. 3. Центральная область распределения несколько смещена относительно центра образца; ей соответствует наиболее высокое значение Δ и гладкая поверхность (точка 2). При движении к левому или правому краю (точки 1 и 3, соответственно) значение Δ понижается, и шероховатость возрастает. На этом образце были выполнены сканирующие измерения обоими методами в одной и той же области по диаметру шайбы (область сканирования между точками 1–2–3 показана прямой на вставке). На рис. 3 изображена номограмма, рассчитанная по модели статистической шероховатости с наложенными на неё данными эллипсометрических измерений.

По этой номограмме были определены значения среднеквадратичной высоты шероховатости в разных точках. Максимальное значение $h = 30$ нм наблюдается на левом краю шайбы (точка 1). В центре области гладкой поверхности (точка 2) величина h уменьшается до 8 нм, а затем снова незначительно возрастает при смещении к правому краю шайбы (точка 3). Зависимость h от координаты x вдоль линии сканирования приведена на рис. 4. Для сравнения на рисунке приведена аналогичная зависимость толщины шероховатого слоя $d_T(x)$, рассчитанная для этих же измерений

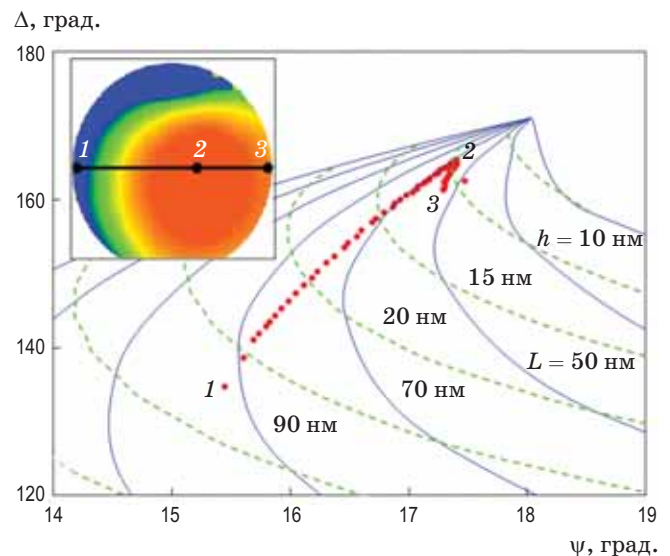


Рис. 3. Номограмма, представляющая зависимость эллипсометрических параметров от характерных размеров шероховатой поверхности. Сплошные линии соответствуют постоянным значениям L , пунктирные — постоянным значениям h , красные точки — экспериментальные данные. Значения L и h указаны возле соответствующих кривых. На вставке изображена топограмма распределения параметра Δ и линия, вдоль которой происходило сканирование

Fig. 3. Nomogram representing the dependence of ellipsometric angles on the characteristic parameters of a rough surface. Solid lines correspond to constant values L , dotted lines - to constant values h , red dots are experimental data. The L and h values are indicated next to the corresponding curves. The inset shows a topogram of Δ distribution and solid line, along which the scanning measurements occurred

по модели эффективной среды. Приведённые зависимости хорошо совпадают друг с другом, демонстрируя корректность обоих подходов.

На этом же рисунке приведены значения среднеквадратичной высоты, полученные по результатам измерений на профилометре. Область сканирования представляла собой кадр шириной 278 мкм и длиной 70 мм, равной диаметру образца. Этот кадр несёт в себе набор числовых значений $z(x, y)$, рассчитанных из анализа интерферограмм и отражающих размеры рельефа поверхности. Значения среднеквадратичной высоты для каждой точки на графике получались усреднением в окне размером 278×2 мкм². Сильный разброс полученных значений h усложняет восприятие

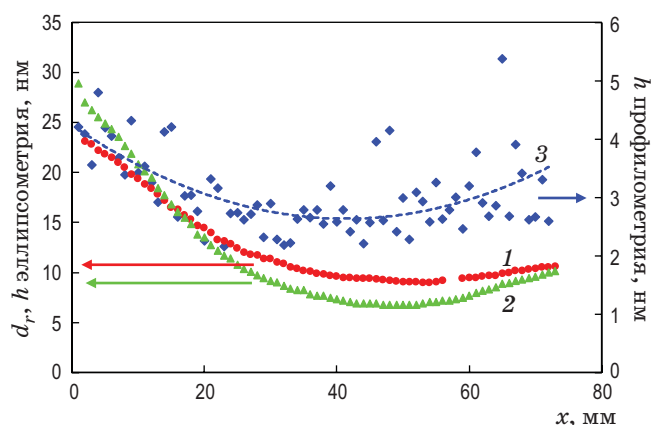


Рис. 4. Зависимости среднеквадратичных отклонений высот шероховатости от координаты вдоль диаметра слоя CdTe, определённые различными методами: 1 — h , расчёт согласно модели статистического описания рельефа по данным эллипсометрии, 2 — d_r , расчёт согласно модели эффективной среды по данным эллипсометрии, 3 — h по данным интерференционной профилометрии

Fig. 4. Dependences of root-mean-square deviations of roughness heights on coordinates along the diameter of the CdTe wafer, determined by various methods: 1 — h , calculation according to the model of statistical description of the relief using ellipsometry data, 2 — d_r , calculation according to the effective medium model using ellipsometry data, 3 — h according to interference profilometry data

результатов, поэтому на рисунке добавлена усреднённая линия.

Можно отметить, что зависимости $h(x)$, полученные из данных методов эллипсометрии и профилометрии, качественно совпадают, но численные значения параметров шероховатости отличаются в несколько раз. Это отличие связано с тем, что оба метода — эллипсометрия и интерференционная профилометрия являются опосредованными методами и используют разные физические принципы для определения параметров шероховатости. Кроме того, как видно из номограммы, эллипсометрия критически чувствительна к малым латеральным размерам рельефа до 100 нм, в то время как профилометрия оперирует латеральными размерами от нескольких сот нанометров и выше. Тем не менее, данные этих методов показывают, что наблюдается корреляция h несмотря на изменение масштаба шероховатости.

Из номограммы эллипсометрических параметров можно также определить корреляционную

длину L . При движении от края пластины (точка 1) к центру (точка 2) значение L слабо изменяется от 90 до 70 нм, в то время как значение h уменьшается в несколько раз. Подобное слабое изменение корреляционной длины вдоль линии сканирования наблюдается и по данным измерений на профилометре (рис. 5). Кроме того, характерный масштаб латеральных размеров рельефа, определённый этим методом, составляет порядка микрона, что на порядок превышает латеральные размеры, полученные из эллипсометрических измерений. Следует отметить практическую нечувствительность эллипсометрии к рельефу при его характерных размерах $L \approx 1$ мкм и $h \approx 3$ нм. Таким образом, методы эллипсометрии и интерференционной профилометрии чувствительны к разным масштабам рельефа и в этом смысле хорошо дополняют друг друга.

Полученные результаты позволяют представить модель поверхности плёнки CdTe в виде слабо волнистого рельефа с характерными латеральными размерами в плоскости образца $L \approx 1$ мкм и средним отклонением высоты порядка 3 нм, на которую накладывается мелко-масштабный рельеф. При этом размеры мелко-масштабного рельефа неоднородно распределены по поверхности образца, выбранного для данного исследования. На слоях CdTe, пригодных для эпитаксии КРТ, отклонение высо-

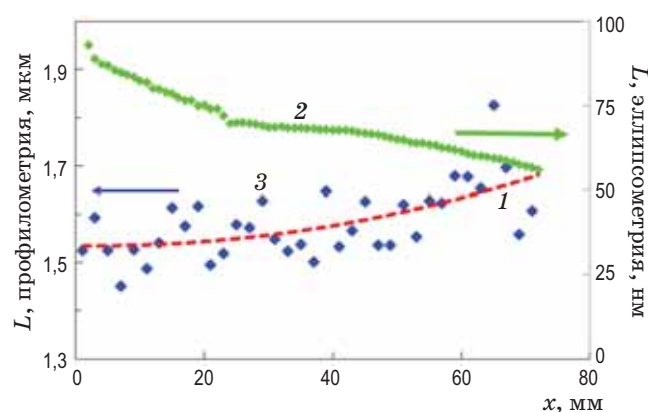


Рис. 5. Изменение корреляционной длины L вдоль линии сканирования 1-2-3 по данным профилометрии и эллипсометрии. Пунктир — усреднённая линия

Fig. 5. Change in correlation length L along scanning line 1-2-3 according to profilometry and ellipsometry data. The dotted line is the average line

ты мелкомасштабного рельефа уменьшается до нескольких нанометров, и при этом наблюдается однородное по пластине распределение размеров рельефа.

IN SITU КОНТРОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ CdTe В ПРОЦЕССЕ РОСТА

Чувствительность эллипсометрии к мелкомасштабному рельефу позволяет реализовать *in situ* контроль процесса выращивания слоёв CdTe. На рис. 6 показаны измеренные значения эллипсометрического параметра Δ от времени роста CdTe для двух образцов: CdTe221219 (кривая 1) и CdTe221201 (кривая 2). Несмотря на одинаковые условия роста этих образцов они демонстрировали различные законы изменения этого параметра во время их роста, что можно связать с влиянием неконтролируемых ростовых параметров.

Для образца CdTe221219 с относительно гладкой поверхностью значение дельта оставалось практически неизменным в течение всего процесса эпитаксии, демонстрируя тем самым стабильный рост плёнки. Для образца CdTe221201 в процессе его роста наблюда-

лось монотонное падение дельта на величину порядка $0,4^\circ$, которое было связано нами с развитием микрорельефа. Пост-ростовые измерения этого образца на профилометре, обнаружившие среднее значение $h = 16$ нм, подтвердили этот вывод.

При выращивании фоточувствительного слоя КРТ на шероховатых буферных слоях (подобных образцу CdTe221201) наблюдается, как правило, дальнейшее огрубление поверхности роста, высокая плотность V-дефектов, а плотность прорастающих дислокаций достигает 4×10^7 1/см². Наоборот, в процессе эпитаксии КРТ на «гладкой» подложке (аналогичной образцу CdTe221219) сохраняется высокое значение параметра Δ . При этом вырастают слои с хорошими характеристиками, с плотностью дислокаций на уровне $(2-5) \times 10^6$ 1/см², которые годятся для создания оптоэлектронных устройств. Критическим значением падения значений Δ в процессе роста слоёв CdTe, отделяющим пригодные для дальнейшей эпитаксии КРТ от непригодных, можно считать величину $0,5^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Морфология поверхности буферных слоёв CdTe играет исключительно важную роль при выращивании совершенных слоёв КРТ высокого структурного качества. Эллипсометрия является удобным инструментом для *in situ* контроля шероховатости поверхности, которая служит индикатором несовершенства растущих слоёв. Методами *ex situ* эллипсометрии и оптической интерференционной профилометрии была исследована морфология слоёв CdTe на кремнии. Каждый из этих методов оперирует в своих масштабах латеральных размеров шероховатости: эллипсометрия чувствительна к мелкомасштабному рельефу с размерами в плоскости образца порядка 100 нм и менее, в то время как латеральное разрешение профилометра ограничено несколькими долями микрометра. Тем не менее, как показали исследования, наблюдается статистическая корреляция между данными эллипсометрических измерений и интерференционной профилометрии. Опираясь на эти результаты, была построена двухмасштабная модель шероховатой поверхности буферных слоёв CdTe, которая представляет собой слабо

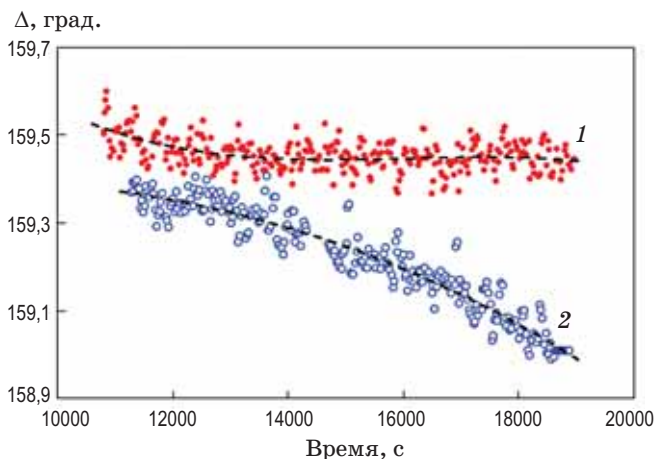


Рис. 6. Зависимости параметра Δ от времени роста на длине волны 633 нм для образцов CdTe221219 (кривая 1) и CdTe221201 (кривая 2), измеренные в процессе роста плёнки CdTe. Пунктиром показаны усреднённые линии экспериментальных данных

Fig. 6. Dependences of Δ on the growth time at a wavelength of 633 nm for samples CdTe221219 (curve 1) and CdTe221201 (curve 2), measured during the growth of the CdTe film. The dotted lines show the averaged lines of experimental data

волнистую поверхность с наложенным на неё мелкомасштабным рельефом.

Благодаря высокой чувствительности эллипсометрии к начальным стадиям развития мелкомасштабного рельефа разработана эл-

липсометрическая методика, позволяющая в реальном времени управлять процессом выращивания высококачественных слоёв CdTe, пригодных для дальнейшей эпитаксии на них плёнок КРТ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mercury Cadmium Telluride. Growth, properties and applications / Ed. by Capper P., Garland J. Singapore: Wiley, 2011. 556 p.
2. Сидоров Ю.Г., Дворецкий С.А., Варавин В.С., Михайлов Н.Н., Якушев М.В., Сабина И.В. Молекулярно-лучевая эпитаксия твердых растворов кадмий-ртуть-теллур на «альтернативных» подложках // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1092–1101.
3. Якушев М.В. Гетероэпитаксия ZnTe, CdTe и твердых растворов CdHgTe на подложках GaAs и Si // Дисс. докт. физ.-мат. наук. Новосибирск: Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, 2011. 251 с.
4. Garland J.W., Sivananthan S. Molecular-beam epitaxial growth of HgCdTe // Springer Handbook of Crystal Growth / Eds. Dhanaraj G., Byrappa K., Prasad V., Dudley M. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 1069 p.
5. Свиташев К.К., Швец В.А., Мардежов А.С., Дворецкий С.А., Сидоров Ю.Г., Варавин В.С. Эллипсометрия in situ при выращивании твердых растворов кадмий-ртуть-теллур методом МЛЭ // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 9. С. 110–120.
6. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 405 с.
7. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет / Перевод с англ. под ред. А. В. Ржанова, К.К. Свиташева. М.: Мир, 1981. 583 с.
8. Bruggeman, D.A.G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen // Annalen der Physik. 1935. V. 416 No 7 s. 636–664.
9. Антонов В.А., Пшеницын В.И. Отражение поляризованного света шероховатой поверхностью // Опт. и спектр. 1984. Т. 56. Вып. 1. С. 146–154.
10. Брагинский Л.С., Гилянский И.А., Свиташева С.Н. Отражение света шероховатой поверхностью: интерпретация эллипсометрических измерений // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293. № 5. С. 1097–1101.

АВТОРЫ

Василий Александрович Швец — доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; доцент, Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 7103160418, <https://orcid.org/0000-0002-6292-5362>, Basil5353@mail.ru

Денис Викторович Марин — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; старший преподаватель, Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 35554154800, <https://orcid.org/0000-0003-1603-0709>, marin@isp.nsc.ru

REFERENCES

1. Mercury Cadmium Telluride. Growth, properties and applications / Ed. by Capper P., Garland J. Singapore: Wiley, 2011. 556 p.
2. Sidorov Yu.G., Dvoretzky S.A., Varavin V.S., Mikhailov N.N., Yakushev M.V., Sabinina I.V. Molecular-beam epitaxy of Mercury–Cadmium–Telluride solid solutions on alternative substrates // Semiconductors. 2001. V. 35. № 9. P. 1045–1053.
3. Yakushev M.V. Heteroepitaxy of ZnTe, CdTe and CdHgTe solid solutions on GaAs and Si substrates [in Russian] // Doctoral dissertation (Physics and Mathematics). Novosibirsk, Rzhannov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of RAS, 2011, 251 p.
4. Garland J.W., Sivananthan S. Molecular-beam epitaxial growth of HgCdTe // Springer Handbook of Crystal Growth / Eds. Dhanaraj G., Byrappa K., Prasad V., Dudley M. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 1069 p.
5. Svitashov K.K., Shvets V.A., Mardezhov A.S., Dvoretzky S.A., Sidorov Yu.G., Varavin V.S. In situ ellipsometry during the growth of mercury-cadmium-telluride solid solutions by MBE [in Russian] // Journ. of Technical Physics. 1995. V. 65. № 9. P. 110–120.
6. Guzhov V.I., Illych C.P. Computer interferometry [in Russian] // Novosibirsk: NGTU Publ., 2003. 405 p.
7. Azzam R.M.A., Bashara N.M. Ellipsometry and polarized light. New York, London: North-Holland Publishing Company-Amsterdam, 1977. 529 p.
8. Bruggeman D.A.G. Calculation of various physical constants of heterogeneous substances. I. Dielectric constants and conductivities of mixed bodies made of isotropic substances [in German] // Annals of Physics. 1935. V. 416. № 7. P. 636–664.
9. Antonov V.A., Pshenitsyn V.I. Reflection of polarized light by a rough surface [in Russian] // Optics and Spectroscopy. 1984. V. 56. № 1. P. 146–154.
10. Braginsky L.S., Gilinskii I.A., Svitashova S.N. Reflection of light by a rough surface: interpretation of ellipsometric measurements [in Russian] // Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1987. V. 293. № 5. P. 1097–1101.

AUTHORS

Vasily A. Shvets — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Leading researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Docent, Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 7103160418, <https://orcid.org/0000-0002-6292-5362>, Basil5353@mail.ru

Denis V. Marin — PhD in Physics and Mathematics, Researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Senior Lecturer, Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 35554154800, <https://orcid.org/0000-0003-1603-0709>, marin@isp.nsc.ru

Лада Сергеевна Кузнецова — лаборант, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; студент, Новосибирский государственный технический университет, 630090, Новосибирск, Россия; <https://orcid.org/0009-0009-7518-6990>, lada.brz@mail.ru

Иван Алексеевич Азаров — ведущий инженер, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; научный сотрудник, Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 36640252300, <https://orcid.org/0000-0001-9571-2227>, azarov_ivan@mail.ru

Максим Витальевич Якушев — доктор физ.-мат. наук, зам. директора по научной работе, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 35363240800, <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>, yakushev@isp.nsc.ru

Сергей Владимирович Рыхлицкий — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6506532849, <https://orcid.org/0009-0009-1847-0653>, rhl@isp.nsc.ru

Lada S. Kuznetsova — Laboratory Assistant, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Student, Novosibirsk State Technical University, 630090, Novosibirsk, Russia; <https://orcid.org/0009-0009-7518-6990>, lada.brz@mail.ru

Ivan A. Azarov — Lead Engineer, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Researcher, Novosibirsk State University, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 36640252300, <https://orcid.org/0000-0001-9571-2227>, azarov_ivan@mail.ru

Maksim V. Yakushev — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Deputy Director for Scientific Work, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 35363240800, <https://orcid.org/0000-0002-9910-2028>, yakushev@isp.nsc.ru

Sergey V. Rykhlietskii — PhD, Senior Researcher, Institute of Semiconductor Physics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6506532849, <https://orcid.org/0009-0009-1847-0653>, rhl@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 05.10.2023
Одобрена после рецензирования 20.11.2023
Принята к печати 29.12.2023

The article was submitted to the editorial office 05.10.2023
Approved after review 20.11.2023
Accepted for publication 29.12.2023