

УДК 621.315.592

Исследование шероховатости поверхности подложек CdZnTe различными методами измерения нанометровой точности

И. Д. Бурлаков, И. А. Денисов, А. Л. Сизов, А. А. Силина, Н. А. Смирнова

Проведено сравнение результатов измерений среднеквадратичного отклонения профиля шероховатости (rms) поверхности подложек CdZnTe методами конфокальной микроскопии (КМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеновской рефлектометрии (РР). Установлено, что метод КМ дает большие значения rms , метод АСМ занимает промежуточное положение, а РР дает значения на порядок меньше остальных двух методов. Показано, что значения rms существенно различаются в КМ при использовании разных объективов. Обсуждаются возможные причины рассогласования полученных результатов.

PACS: 81.05.Dz; 68.35.Ct; 68.37.Ps, 61.05.cm

Ключевые слова: CdZnTe, подложка, шероховатость, конфокальная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, рентгеновская рефлектометрия.

Введение

Твердые тройные растворы $Cd_{1-x}Zn_xTe$ широко используются в качестве оптически прозрачных подложек при выращивании эпитаксиальных слоев (ЭС) тройных твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$, являющихся основным материалом для производства фотоэлектронных устройств инфракрасного (ИК) диапазона спектра [1—3]. В эпитаксиальных технологиях предъявляются жесткие требования к состоянию и качеству обработки поверхности подложек, морфология которых во многом определяет механизмы роста эпитаксиальных слоев на начальных стадиях и условия формирования дефектов структуры [4].

Необходимость контроля параметров шероховатости поверхности требует использования современных средств измерений, обладающих высокой точностью, воспроизводимостью и чувствительностью к микро- и нанонеоднородностям рельефа [5].

В настоящее время существует большое количество разнообразных средств измерения шероховатости поверхности, имеющих различные вариации и программные обеспечения. При этом при характеристике поверхности различными по физическому принципу средствами измерений могут наблюдаться расхождения в измеряемых параметрах морфологии поверхности. Источники несоответствия и неоднозначность получаемых результатов при сопоставлении различных методов связаны с физическими ограничениями методов и разными методиками выполнения измерений. Необходимо отметить, что в мировых стандартах отсутствует единый подход к оценке шероховатости поверхности, а требования ГОСТ распространяются только на контактные профилометры.

В настоящей работе приводится сравнение результатов измерений среднеквадратичного отклонения профиля шероховатости (rms) поверхности подложек CdZnTe методами конфокальной микроскопии (КМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ) и рентгеновской рефлектометрии (РР). Выбор данных средств измерения для исследований в рамках работы объясняется высоким разрешением приборов, а также их бесконтактным способом измерений (кроме контактного режима АСМ), что исключает вероятность повреждения исследуемого объекта в процессе измерения.

Параметр rms (root mean square) является наиболее часто используемым параметром измерения шероховатости поверхности и представляет собой среднеквадратичное значение ординат $z(x)$ на базовой длине l :

$$rms = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2(x) dx}.$$

Бурлаков Игорь Дмитриевич, заместитель директора по научной работе и инновациям.

Сизов Александр Леонидович, инженер-технолог.

ОАО «НПО «Орион».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

E-mail: orion@orion-ig.ru

Денисов Игорь Андреевич, заведующий лабораторией.

Смирнова Наталья Анатольевна, ст. научный сотрудник.

ОАО «ГИРЕДМЕТ».

Россия, 119017, Москва, Б. Толмачевский пер., 5, стр. 1.

Тел. (499) 981-30-10 (271). E-mail: lab27@giredmet.ru

Силина Александра Андреевна, аспирант.

МИТХТ им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119571, Москва, просп. Вернадского, 86.

Статья поступила в редакцию 12 августа 2014 г.

© Бурлаков И. Д., Сизов А. Л., Денисов И. А., Смирнова Н. А., Силина А. А., 2014

Шероховатость профиля измеряется последовательно по нескольким базовым длинам, которые в совокупности представляют длину оценки, т. е. общую длину пути по поверхности. Выбор базовой длины осуществляется в соответствии с предполагаемым рельефом и размером неоднородностей. Важную роль при анализе шероховатости поверхности методами КМ и АСМ играет фильтрация профиля, с помощью которой из первичного профиля подавлением длинноволновой компоненты выделяют профиль шероховатости.

Образцы и методы исследования

Исследования проводились на ориентированных в направлениях (111) и (211) пластинах CdZnTe, вырезанных из объемного кристалла, выращенного вертикальной направленной кристаллизацией методом Бриджмена, подробно описанным в работе [6]. Для придания необходимых геометрических параметров (плоскостности и параллельности сторон образца) после резки диском с внутренней режущей кромкой АВРК 60/80 пластины подвергались двухсторонней механической шлифовке абразивным порошком Al_2O_3 марки M10, а затем химико-механическому полированию (ХМП) бромсодержащим травильным раствором.

Измерения шероховатости поверхности подложек проводились с использованием следующих средства измерения: оптические профилометры Sensofar PL μ 2300 и Sensofar PL μ NEOX, сочетающие в себе конфокальный и интерферометрический методы измерения; атомно-силовые микроскопы NT-MDT Ntegra Maximus и Solver P47H; рентгеновский дифрактометр Bede Scientific Ltd. D1 System.

Принцип работы конфокального микроскопа основан на измерении фокусного расстояния до поверхности исследуемого объекта при сканировании его по высоте. Отличие от обычных оптических микроскопов заключается в наличии двух дополнительных апертур, одна из которых расположена напротив источника света, а другая — напротив детектора, что позволяет ограничивать поток фонового рассеянного света из плоскостей, не лежащих в плоскости фокусировки. Точечные апертуры увеличивают оптическое разрешение и контраст изображения. Для построения изображения всей поверхности образец последовательно сканируется по площади в двух направлениях, поскольку поле зрения ограничено размером светового пятна.

Метод АСМ позволяет получать изображения непроводящих поверхностей с разрешением, достигающим атомарного уровня. В основе принципа действия атомно-силового микроскопа лежит силовое взаимодействие между поверхностью исследуемого образца и зондом, состоящим из нано-

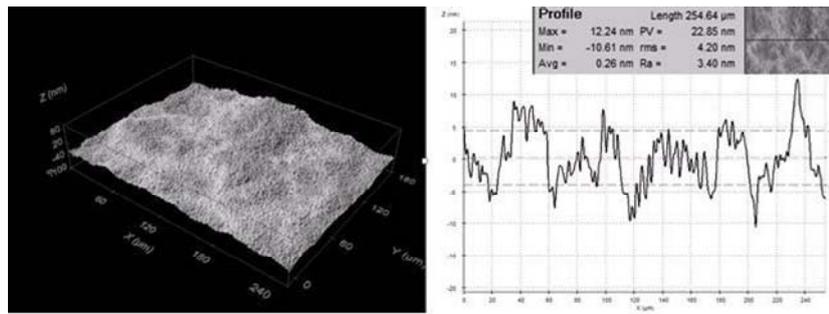
размерной иглы, присоединенной к упругой консоли — кантилеверу. Под воздействием сил притяжения и отталкивания между зондом и образцом кантилевер изгибается, что регистрируется с помощью лазера. При последовательном перемещении иглы в двух направлениях происходит регистрация рельефа поверхности.

Основная идея измерения шероховатости методом РР заключается в измерении интенсивности отражения рентгеновских лучей от неровностей рельефа поверхности исследуемого объекта в интервале малых углов (вблизи полного внешнего отражения). В основном для оценки шероховатости поверхности используются два варианта, а именно, измерение угловой зависимости интенсивности зеркальной компоненты отраженного излучения и измерение углового распределения рассеянной компоненты рентгеновского излучения.

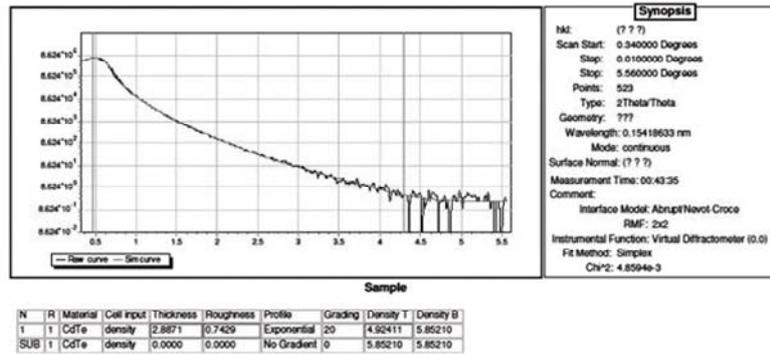
Экспериментальные результаты и их обсуждение

Типичные картины измерений параметров шероховатости подложек CdZnTe в центральной точке поверхности методами КМ, РР и АСМ показаны на рис. 1.

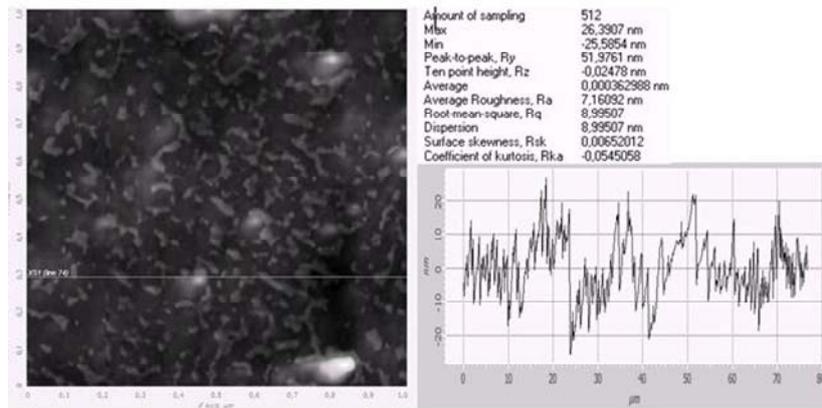
На рис. 2 представлены усредненные для каждого метода результаты измерения среднеквадратичного отклонения профиля подложек CdZnTe после одинаковых условий обработки и полученные с использованием различных средств измерения. Из диаграммы видно, что метод КМ дает большие значения параметра *rms*, метод АСМ занимает промежуточное положение, а РР дает значения на порядок меньшие остальных двух методов. Расхождения в результатах полученных различными по физическому принципу методами может быть вполне объяснимо вследствие различной природы взаимодействия оптического, рентгеновского излучения и АСМ зонда с исследуемым образцом. Оптические методы могут преувеличивать значение шероховатости из-за множественного рассеяния света на плоскостях, не лежащих в плоскости фокусировки. Рентгеновский метод, наоборот, занижает значения шероховатости. Авторы работы [7] объяснили это тем, что отдельные пики с высотами большими определенной перестают отражать рентгеновское излучение. В методе АСМ получаемый в результате профиль представляет собой сочетание форм образца и иглы зонда, что также может занижать значения шероховатости. Поэтому ни один из методов нельзя считать эталонным и необходимо учитывать, каким методом были измерены параметры шероховатости. При этом сравнение результатов измерений, полученных с помощью разных методов, следует осуществлять с осторожностью, учитывая их особенности.



a



b



c

Рис. 1. Типичные картины измерений параметров шероховатости поверхности методами КМ (а), РР (б) и АСМ (в)

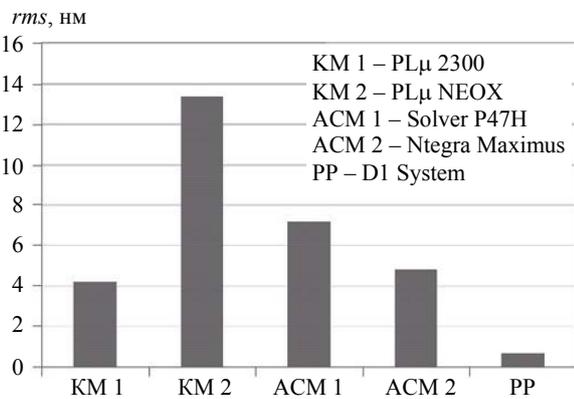


Рис. 2. Сравнение результатов измерений шероховатости подложек CdZnTe, полученных различными средствами измерений

Кроме того, значения параметров шероховатости могут существенно различаться и в рамках одного метода. Так, например, в методе конфокальной микроскопии (Sensofar Рµ 2300) при использовании различных объективов (разное увеличение, рабочее расстояние) значения параметров шероховатости поверхности могут сильно меняться, что проиллюстрировано в таблице.

Таблица

Сравнение измерений параметра rms методом КМ с использованием различных объективов

Тип объектива	Увеличение объектива	Рабочее расстояние, мм	Числовая апертура (NA)	Длина измерения, мкм	rms , нм
EPI	10X	17,3	0,30	800	49,7
	20X	24,0	0,45	400	18,9
	50X	17,0	0,80	250	4,3
	100X	6,5	0,90	125	2,8
SLWD	20X	4,5	0,35	400	47,2
	50X	1,0	0,45	250	30,2
	100X	1,0	0,70	125	15,5

Базовая длина для всех измерений составляла 80 мкм. Расхождение значений параметров шероховатости между объективами EPI (эпиобъектив предназначен для работы в отраженном свете по методу темного поля) и SLWD (объектив «super long working distance» — эпиобъектив с увеличенным рабочим расстоянием) объясняется различными рабочими расстояниями. С увеличением рабочего расстояния конфокальных микроскопов числовая апертура обычно уменьшается, что приводит к уменьшению латерального разрешения и разрешения по глубине. Объективы EPI имеют более высокую воспроизводимость и идеальны для измерения плоских образцов. SLWD объективы с более низкими значениями числовой апертуры используются, в основном, при возможности физического соприкосновения с исследуемым объектом.

Отличия значений шероховатости в пределах одного типа объективов, но имеющих разные увеличения объясняется различием в оптическом разрешении и в размерах поля зрения. Поэтому при выборе объектива важно учитывать периодичность формы рельефа образца и размер неоднородностей. Низкие значения числовых апертур, как правило, не подходят для анализа шероховатости. Например, при измерении шероховатости подложек CdZnTe после операции ХМП ($rms = 2 \div 20$ нм) методом КМ (Sensofar P μ 2300) наиболее подходящим с точки зрения получения корректной информации о нанорельефе поверхности является объектив EPI 50X.

Поскольку параметр rms позволяет оценить среднюю шероховатость поверхности, но не дает представление о форме неровностей, то безусловным достоинством методов КМ и АСМ является возможность трехмерной реконструкции поверхности, которая позволяет наглядно исследовать морфологию после различных видов обработки. Недостатком АСМ при контактном режиме измерения является возможность повреждения поверхности в процессе работы, а в бесконтактном режиме метод крайне чувствителен к внешним шумам.

Таким образом, при контроле параметров шероховатости подложек для эпитаксиального наращивания важно учитывать, с помощью какого прибора оценивается микрорельеф поверхности, а также саму методику проведения измерений (выбор базовой длины, длины оценки, характеристик объектива и параметров используемой фильтрации изображения).

Заключение

Проведено сравнение результатов измерений среднеквадратичного отклонения профиля шероховатости поверхности подложек CdZnTe методами КМ, АСМ и РР. Различие в полученных параметрах шероховатости объясняется разной физической природой этих методов. Таким образом, сравнение параметров шероховатости, полученных с использованием различных средств измерения, возможно осуществлять лишь с учетом их особенностей и ограничений.

Одновременно установлено, что в рамках одного конкретного метода (КМ) наблюдаются расхождения в измерениях, что может быть связано с использованием различных объективов. Поэтому важно выбирать параметры объектива в соответствии с его конкретным применением. Так, например, при измерении шероховатости подложек CdZnTe после операции ХМП ($rms = 2 \div 20$ нм) методом КМ (Sensofar P μ 2300) наиболее подходящим является объектив EPI 50X.

Показано, что наиболее предпочтительными методами исследования качества поверхности являются КМ и АСМ, которые, помимо измерения параметров шероховатости, позволяют проводить трехмерную визуализацию поверхности, что является наглядной демонстрацией особенностей ее обработки. При этом необходимо отметить быстрое действие этих методов и легкость интерпретации результатов измерений.

Литература

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. — М.: Физматкнига, 2005.
2. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.
3. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика, 2011. № 3. С. 82.
4. Zhao J., Chang Y., Badano G., et al. // J. Electron. Mater. 2004. V. 33. No. 8. P. 881.
5. Лич Р. Физические основы измерений нанометровой точности. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012.
6. Шматов Н. И., Смирнова Н. А., Белов А. Г. и др. // Материалы электронной техники. 2006. № 3. С. 28.
7. Грибков Б. А. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, 2006.

The surface roughness investigation of CdZnTe substrates by different measuring methods of nanometer accuracy

I. D. Burlakov¹, I. A. Denisov², A. L. Sizov¹, A. A. Silina³ and N. A. Smirnova²

¹Orion R&P Association
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²GIREDMET, Inc.
5/1 Bolshoy Tolmatchevsky al., Moscow, 119017, Russia
E-mail: lab27@giredmet.ru

³M. V. Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies
86 Vernadsky av., Moscow, 119571, Russia

Received August 12, 2014

The root mean square (rms) values comparison of CdZnTe substrate surface obtained by confocal microscopy (CM), atomic force microscopy (AFM) and X-ray reflectometry (XRR) has been made. It has been found that CM gives largest rms parameter values, AFM occupies an intermediate position, and values, obtained by XRR, give an order of magnitude smaller than the other two methods. It has been shown that rms values significantly differ with the use of various objectives in CM. Possible reasons of results disagreement have been discussed.

PACS: 81.05.Dz; 68.35.Ct; 68.37.Ps, 61.05.cm

Keywords: CdZnTe, substrate, roughness, confocal microscopy, atomic-force microscopy, X-ray reflectometry.

References

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniга, Moscow, 2005) [in Russian].
2. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 47 (2011).
3. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 82 (2011).
4. J. Zhao, Y. Chang, G. Badano, et al., *J. Electron. Mater.* **33**, 881 (2004).
5. R. Lich, *Physical Foundation of Measurements with Nanometer Accuracy* (Izd. Dom “Интеллект”, Dolgoprudny, 2012) [in Russian].
6. N. I. Shmatov, N. A. Smirnova, A. G. Belov, et al., *Materialy Elektronnoi Tekhniki*, No. 3, 28 (2006).
7. B. A. Gribkov, Candidate’s Dissertation in Mathematics and Physics (Institute of Microstructures Physics, RAS; Nizhny Novgorod, 2006).