

In situ эллипсометрический мониторинг состава и температуры слоев HgCdTe в процессе их роста

© В.А. Швец^{1,2}, Д.В. Марин¹, И.А. Азаров¹, М.В. Якушев¹, С.В. Рыхлицкий¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: basi5353@mail.ru

Поступила в Редакцию 14 июля 2021 г.

В окончательной редакции 2 августа 2021 г.

Принята к публикации 2 августа 2021 г.

Разработана эллипсометрическая методика, позволяющая наблюдать за изменениями состава и температуры слоев кадмий–ртуть–теллур в процессе их выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Методика опробована для диагностики состава и температуры при выращивании слоев в режиме постоянной мощности нагревателя подложки и при ее резком изменении. Установлено, что падение мощности и последующее уменьшение температуры роста сопровождается также монотонным уменьшением состава. В случае постоянной мощности нагревателя наблюдается незначительное увеличение температуры образца при практически неизменном составе растущего слоя.

Ключевые слова: эллипсометрия, кадмий–ртуть–теллур, HgCdTe, состава, *in situ* контроль температуры, эпитаксиальный рост.

DOI: 10.21883/FTP.2021.12.51713.9714

1. Введение

Получение эпитаксиальных слоев тройного раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (КРТ) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) требует проведения непрерывного контроля параметров растущей структуры и условий ее выращивания. Одним из ключевых параметров, определяющих электрооптические свойства КРТ, является состав, т. е. x — доля CdTe в твердом растворе CdTe–HgTe. Для определения состава и его мониторинга в процессе роста широко применяется метод спектральной эллипсометрии [1–4]. Нами была разработана методика с использованием *in situ* лазерной эллипсометрии [5,6]. В основе этой методики лежит зависимость оптических постоянных КРТ от состава [7,8]. По счастливой случайности длина волны He–Ne-лазера, широко используемого в лазерных эллипсометрах, оказывается вблизи спектрального максимума этой зависимости, обеспечивая высокую чувствительность эллипсометрических измерений к составу. Разработанный для решения данной задачи высокостабильный эллипсометр, установленный на модуль эпитаксии КРТ, позволил добиться точности измерения состава в несколько тысячных долей величины x [9].

Другим параметром, определяющим условия роста и кристаллическое качество получаемых слоев, является температура. Даже незначительное отклонение температуры от оптимального значения может приводить к нарушениям кристаллической структуры: образованию прорастающих дефектов [10], расслоению фаз разного состава [11], развитию шероховатости на поверхности роста [6] и другим нежелательным последствиям. Контроль температуры в процессе роста является чрезвы-

чайно актуальной задачей в технологии МЛЭ КРТ, и этой проблеме уделяется пристальное внимание [12–18]. Помимо влияния на процессы эпитаксии неконтролируемое изменение температуры затрудняет прецизионное определение состава эллипсометрическим методом, так как приводит к изменениям оптических постоянных за счет термооптического эффекта, которые могут быть неправильно интерпретированы как изменение состава. Прямые измерения температуры подложки с помощью термодатчика крайне затруднительны. Трудности связаны с конструктивными особенностями технологических установок, не позволяющими обеспечить надежный тепловой контакт между спаем термодатчика и подложкой. Поэтому приходится использовать альтернативные методы, такие как термометрия края поглощения (band edge thermometry) [12–14], инфракрасная фурье-спектроскопия (FTIR) [16], низкотемпературная пирометрия [17]. Аппаратура, используемая в этих методах, предъявляет определенные требования к конструкции вакуумных установок, которые не всегда приемлемы.

Частично задача температурного контроля была решена нами с помощью спектральной эллипсометрии в работах [19,20], где представлены экспериментальные исследования и методические разработки, демонстрирующие возможность измерения температуры перед началом роста КРТ. Предложенные в этих работах методики основаны на температурных зависимостях эллипсометрических спектров буферного слоя CdTe. С началом эпитаксии КРТ задача интерпретации эллипсометрических спектров значительно усложняется, так как последние становятся зависимыми не только от температуры, но и от состава, а также непрерывно меняющейся толщины

растущего слоя КРТ. Вместе с тем именно на начальной стадии роста проблема контроля температуры стоит наиболее остро, так как при образовании слоя КРТ изменяется излучательная способность образца, нарушаются условия стационарного теплового баланса, что может привести к изменению температуры.

После того как толщина превысит глубину проникновения света, вклад в анализируемый отраженный свет от буферного слоя CdTe исчезает и измеряемые спектры зависят только от температуры и от состава КРТ. В отличие от метода лазерной эллипсометрии, при спектральных исследованиях таких слоев становится возможным разделение вкладов от состава и температуры, так как разные участки спектра имеют различную чувствительность к этим параметрам.

Цель данной работы заключается в изучении возможности независимого определения температуры и состава растущих слоев КРТ по результатам эллипсометрического мониторинга и разработке соответствующего алгоритма для интерпретации измеренных эллипсометрических спектров. Для этого были проведены эксперименты по выращиванию слоев КРТ в различных режимах при непрерывном измерении в процессе их роста спектров эллипсометрических параметров. Сравнение измеренных спектров со спектрами чувствительности эллипсометрических параметров к составу и температуре позволило решить поставленную задачу.

2. Экспериментальная установка и условия эксперимента

Синтез гетероструктур Si/ZnTe/CdTe/Hg_{1-x}Cd_xTe проводился в многокамерной установке с раздельным выращиванием буферных слоев и КРТ [21]. Рост слоев КРТ происходил вблизи температуры 170°С. Нагрев подложки осуществлялся с помощью теплового излучения от нагревателя, питающегося стабилизированным напряжением, которое регистрировалось в течение всего процесса роста. Косвенные данные о температуре получали от хромель-алюмелевой термопары, имеющей тепловой контакт с нагревателем. В процессе роста регистрировалось давление паров ртути, а также температура источников молекулярных пучков Te и Cd. Контроль выращивания всех слоев структуры (скорость роста, толщина, кристаллическое качество) осуществлялся с помощью лазерных эллипсометров, установленных на каждом модуле. Модуль эпитаксии КРТ был оснащен кроме того еще спектральным эллипсометром, предназначенным для решения задач термометрии.

Спектральный эллипсометр, работающий по статической фотометрической схеме [22], имел следующие характеристики: диапазон длин волн $\lambda = 350-1000$ нм; спектральное разрешение 3 нм; время измерения полного спектра 30 с. Для решения поставленной задачи важное значение имеет стабильность эллипсометрических измерений. В используемом приборе стабильность

параметра Ψ составляла $\pm 0.01^\circ$ в течение 1 ч работы, для Δ эта величина была в 2 раза больше. Пороговая чувствительность эллипсометрических углов Ψ и Δ (минимально обнаружимое изменение) равнялась 0.002° . В процессе измерений проводилось сканирование по спектру с шагом 1 нм.

Для исследований были выращены два тестовых слоя КРТ составов с $x = 0.24$ (образец 1) и 0.34 (образец 2). Заданное значение состава контролировалось измерениями параметра Ψ на лазерном эллипсометре [9], постоянство Ψ поддерживалось незначительной корректировкой потока Te. Образец 1 выращивался с изменением температурного режима. Для этого через 32 мин после начала роста, когда толщина слоя в несколько раз превышала глубину проникновения света в коротковолновой области спектра, напряжение на нагревателе подложки уменьшали на 17%. При этом показания термопары регистрировали начало монотонного снижения температуры, скорость которого медленно уменьшалась со временем. Тестовый образец 2 выращивали при постоянном напряжении нагревателя в стационарных условиях. В обоих случаях рост КРТ начинался после стабилизации температуры подложки на этапе ее предэпитаксиальной термической обработки. Мониторинг температуры на этом этапе проводился спектральным эллипсометром по методике, изложенной в [20].

3. Чувствительность эллипсометрических спектров к температуре и составу

Анализ эллипсометрических спектров тестового образца 1 показывает, что изменения эллипсометрических параметров, измеренных после переключения режима нагревателя, незначительны и не превышают 0.1° для Ψ и 0.2° для Δ . С учетом этого мы использовали разностную методику сравнения спектров, измеренных непосредственно перед переключением напряжения нагревателя (референтный спектр $\Psi_0(\lambda)$) и спустя определенный интервал времени t — спектр $\Psi_t(\lambda)$. На рис. 1 показаны разностные спектры параметра Ψ : $\delta\Psi(\lambda) = \Psi_t(\lambda) - \Psi_0(\lambda)$. Наиболее сильные изменения параметра Ψ наблюдаются вблизи критических точек E_1 и $E_1 + \Delta_1$ и проявляются в виде отчетливых пиков. Для КРТ данного состава это соответствует длинам волн 550 и 420 нм. Амплитуды пиков монотонно возрастают с увеличением времени между измерениями референтного и исследуемого спектров и имеют тенденцию к насыщению.

Все это указывает на связь представленных результатов с изменением температуры. Помимо температуры разностные спектры зависят также от изменения состава, которое тоже может происходить в процессе роста. Чтобы выделить вклад в $\delta\Psi$ каждой из этих

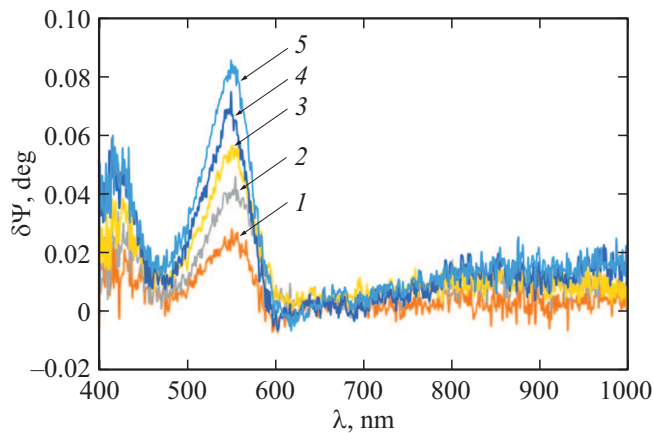


Рис. 1. Разностные спектры параметра Ψ , измеренные после падения напряжения на нагревателе подложки. Референтный спектр $\Psi_0(\lambda)$ измерен непосредственно перед скачком напряжения. Время измерения исследуемых спектров, отсчитанное от момента скачка напряжения, с: 1 — 800, 2 — 1200, 3 — 1600, 4 — 2000, 5 — 3350. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

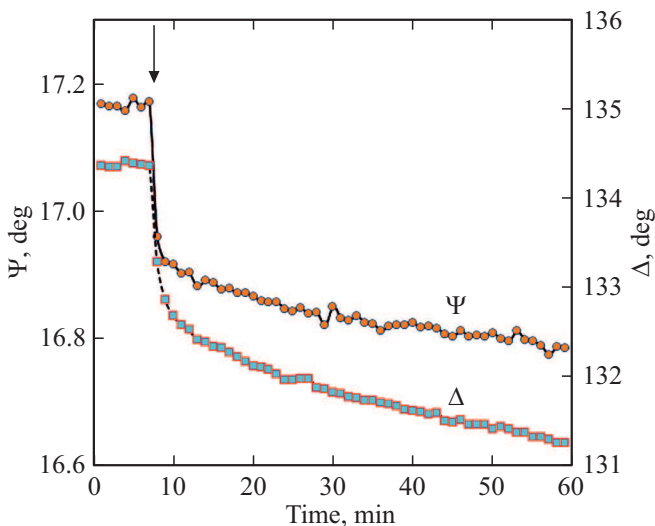


Рис. 2. Кинетика изменения эллипсометрических параметров Ψ и Δ выращенного образца КРТ в процессе его остывания в вакуумной камере. Момент прекращения роста отмечен вертикальной стрелкой.

составляющих, необходимо определить функции спектральной чувствительности параметра Ψ к изменению температуры, $\alpha_T(\lambda, x)$, и состава, $\alpha_x(\lambda, x)$. Чувствительность к составу легко рассчитать, воспользовавшись параметрической моделью оптических постоянных КРТ, представленной в работе [23]. Эта модель была получена интерполяцией экспериментальных данных, измеренных *in situ* при выращивании серии образцов различного состава. Она позволяет рассчитать аналитически спектры эллипсометрических параметров $\Psi(\lambda, x)$ и $\Delta(\lambda, x)$ для любого состава в интервале x от 0.2 до 0.4. Функ-

ция чувствительности определяется как производная $\alpha_x(\lambda, x) = d\Psi(\lambda, x)/dx$.

Гораздо сложнее оказалось определить чувствительность эллипсометрических спектров Ψ и Δ к температуре. С этой целью были проведены две серии температурных экспериментов: измерения *ex situ* эллипсометрических спектров вблизи комнатной температуры при термоциклировании и измерения *in situ* в процессе пассивного остывания выращенных образцов. Главная проблема, которая затрудняет изучение температурной зависимости оптических постоянных КРТ методом эллипсометрии, состоит в нестабильности поверхности после перекрытия молекулярного потока теллура.

На рис. 2 показана кинетика изменения эллипсометрических параметров на длине волны $\lambda = 500$ нм, которая наблюдается после прекращения роста — перекрытия молекулярного источника Те и одновременного отключения напряжения на нагревателе подложки. Давление паров ртути при этом остается без изменения. Обращает на себя внимание резкое, практически скачкообразное падение Ψ и Δ в первые секунды после прекращения роста.

Оно не связано с изменением температуры подложки — на это указывает более плавное изменение показаний термометра. Аналогичные скачки эллипсометрических параметров, которые происходили после перекрытия потока Те, изучались в работе [24]. Было установлено, что они связаны с комплексом различных поверхностных процессов: десорбцией адсорбированного слоя Те, образованием слоя CdTe и диффузией к поверхности атомов ртути из приповерхностной области.

Судя по релаксации скорости изменения Δ , поверхностные процессы активно продолжают в течение нескольких минут, и после их затухания наблюдается плавное уменьшение эллипсометрических параметров, связанное уже преимущественно с изменением температуры. Такая же оценка времени протекания поверхностных процессов следует и из данных работы [24]. По этой причине начальный участок процесса остывания не годится для определения температурной чувствительности параметров Ψ и Δ . Чтобы исключить или значительно уменьшить влияние поверхностных эффектов на определение величины $\alpha_T(\lambda, x)$, референтный спектр измерялся через 10 мин от момента начала остывания, а второй спектр — по прошествии еще 50 мин. По оценкам, основанным на смещении положения максимума в спектре $\Psi(\lambda)$ вблизи критической точки E_1 , изменение температуры на этом интервале составляло $\sim 40^\circ\text{C}$. На рис. 3 приведены измеренные таким образом разностные спектры $\delta\Psi$ для трех образцов различного состава: $x = 0.160, 0.235$ и 0.327 .

Для тех же самых образцов были выполнены аналогичные измерения *ex situ* при их многократных нагревах на 40°C относительно комнатной температуры. Результаты этих измерений также приведены на рис. 3. Для проведения экспериментов *ex situ* использовался малогабаритный нагреватель [19], который устанавливался

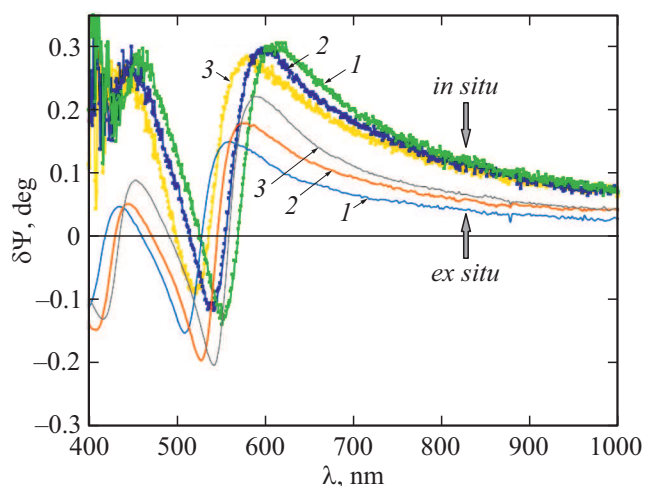


Рис. 3. Разностные спектры $\delta\Psi(\lambda)$ для образцов различного состава, измеренные *in situ* и *ex situ*. $x = 0.160$ (1), 0.235 (2), 0.327 (3).

на предметном столике эллипсометра, а температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой. Многократные циклы нагрева и охлаждения образцов показали воспроизводимость спектров при релаксации образцов к комнатной температуре, что свидетельствует об отсутствии необратимых изменений на поверхности, которые могли бы быть вызваны повышением температуры. Сравнение кривых, полученных в этих экспериментах, с данными измерений *in situ* обнаруживает сдвиг по оси длин волн. Этот сдвиг ожидаем, он возникает из-за различия температурных диапазонов: 20–60°C для измерений *ex situ* и вблизи 150°C для измерений *in situ*.

На основании представленных результатов была смоделирована чувствительность эллипсометрических параметров к температуре для произвольного значения параметра состава x . За основу были взяты данные измерений *ex situ* как наиболее надежные. Зависимость чувствительности от состава на фиксированной длине волны определялась путем квадратичной аппроксимации величин $\delta\Psi_j$ ($j = 1, 2, 3$), измеренных для трех используемых образцов. Полученные таким образом функции $\delta\Psi$ были затем скорректированы на температуру роста путем их смещения в длинноволновую область. Сравнение положения экстремумов для кривых *ex situ* и *in situ* на рис. 3, можно видеть, что это смещение неоднородно и заметно возрастает с увеличением длины волны, что тоже было учтено в модели. Полученная в результате зависимость $\delta\Psi(\lambda, x)$, нормированная на 1°C, представляет собой параметрическую модель для расчета температурной чувствительности параметра Ψ : $\alpha_T(\lambda, x) = \delta\Psi(\lambda, x)/40^\circ\text{C}$. Она основана на экспериментально измеренных массивах $\delta\Psi(\lambda)$ для трех образцов различного состава и позволяет аналитически рассчитать $\alpha_T(\lambda, x)$ для КРТ любого состава. Аналогичным образом была получена параметрическая модель для температурной чувствительности параметра Δ .

4. Определение вариаций температуры и состава в процессе роста

На рис. 4 показаны чувствительности параметра Ψ к составу (нормирована на $\delta x = 0.001$) и к температуре (нормирована на 1°C), рассчитанные для состава с $x = 0.24$ по соответствующим параметрическим моделям. Кривые симметричны по форме, но между ними есть существенное различие. Кривая $\alpha_x(\lambda)$ постоянна по знаку, в то время как $\alpha_T(\lambda)$ является знакопеременной: вблизи критических точек E_1 и $E_1 + \Delta_1$ чувствительность к температуре отрицательна, а в оставшейся области спектра она положительна и, следовательно, рассматриваемые функции линейно независимы — состав и температура не могут взаимно компенсировать изменения спектра $\Psi(\lambda)$. Это имеет принципиальное значение для решения поставленной в данной работе задачи и указывает на возможность разделения вкладов от температуры и от состава в экспериментально измеренных спектрах параметра Ψ . В математическом смысле такая задача называется хорошо обусловленной задачей.

Сформулируем ее следующим образом. Пусть в некоторый момент в процессе выращивания слоя КРТ был измерен референтный спектр $\Psi_0(\lambda)$. Значения параметра состава на поверхности и температуры в этот момент обозначим x_0 и T_0 . Второй спектр $\Psi_t(\lambda)$, измеренный через некоторое время t , соответствует другим значениям температуры T и состава x , которые незначительно отличаются от исходных. Требуется определить изменения состава $\delta x = x - x_0$ и температуры $\delta T = T - T_0$ по разностному спектру $\delta\Psi(\lambda) = \Psi(\lambda) - \Psi_0(\lambda)$. Решение

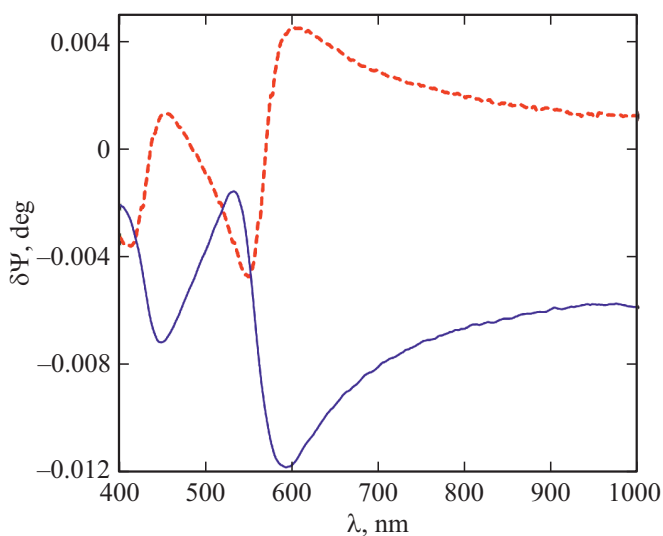


Рис. 4. Чувствительность параметра Ψ к составу $\alpha_x(\lambda)$ (сплошная линия) и к температуре $\alpha_T(\lambda)$ (штриховая) для КРТ состава с $x = 0.24$. Кривые нормированы: $\alpha_x(\lambda)$ на 0.001 изменения x , $\alpha_T(\lambda)$ — на 1°C.

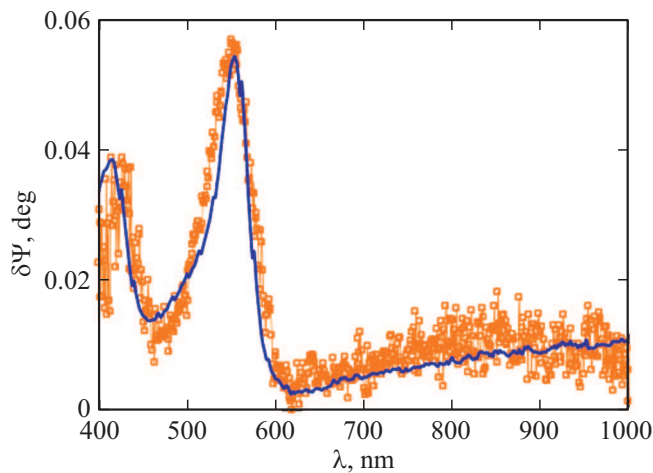


Рис. 5. Измеренный спектр $\delta\Psi$ (точки) и расчетная кривая, полученная для оптимизированных значений $\delta T = -8^\circ\text{C}$, $\delta x = -0.0035$ (сплошная линия).

такой задачи достигается минимизацией функционала

$$S_\Psi(\delta x, \delta T) = \sum_{\lambda} [\delta\Psi_m(\lambda) - \delta\Psi_c(\lambda, \delta x, \delta T)]^2, \quad (1)$$

где $\delta\Psi_m$ и $\delta\Psi_c$ — измеренные и рассчитанные значения разностных спектров параметра Ψ . В силу малости искомого величин расчетный спектр можно находить в линейном приближении по δx и δT . Тогда

$$\delta\Psi_c = \frac{\partial\Psi}{\partial T} \delta T + \frac{\partial\Psi}{\partial x} \delta x. \quad (2)$$

Фигурирующие в (2) частные производные по температуре и составу — это приведенные на рис. 4 функции чувствительности параметра Ψ .

На рис. 5 показан один из разностных спектров $\delta\Psi$ тестового образца 1 (измерен через 1600 с после измерения референтного) и расчетная кривая, полученная по формуле (2) для оптимальных значений $\delta T = -8^\circ\text{C}$, $\delta x = -0.0035$, обеспечивающих минимум функционала (1). Расчетная кривая достаточно хорошо согласуется с экспериментом. Этот пример показывает, что вместе с изменением температуры образца, которое происходит из-за понижения напряжения на нагревателе, наблюдается также изменение состава растущего слоя КРТ, и изменение обоих параметров можно отследить по эллипсометрическим спектрам. То обстоятельство, что при оптимизации помимо температуры должен меняться также и состав, становится очевидным, если учесть, что измеренный спектр $\delta\Psi(\lambda)$ положителен на всем спектральном интервале и не может быть описан одной только знакопеременной функцией $\alpha_T(\lambda)$.

Проведенная таким образом подгонка всех разностных спектров тестового образца 1 позволила получить зависимости изменения температуры и состава от времени роста, которые показаны на рис. 6. С течением времени наблюдаются падение величин δx , δT и тенденция

к их насыщению. Уменьшение параметра состава x связано, скорее всего, с непрерывным увеличением потока теллура, с помощью которого поддерживалось постоянство параметра Ψ . Однако нельзя исключить и непосредственное влияние температуры на кинетику роста. С падением температуры увеличивается концентрация ртути на поверхности [15], что может привести к смещению кинетического равновесия реакций в сторону уменьшения параметра состава.

Качественно полученные изменения температуры согласуются с показаниями термопары, регистрирующей температуру нагревателя. За время проведения эксперимента ее показания уменьшились на $\sim 1\text{ мВ}$, что соответствует 25°C . При этом постоянная времени для термопары оказывается меньше, чем для образца.

Похожие результаты получаются и из анализа разностных спектров параметра Δ . Следует, однако, отметить, что не всегда совместная минимизация функционала $S_\Psi(\delta x, \delta T)$ и аналогичного ему по построению функционала $S_\Delta(\delta x, \delta T)$ дают одинаковые решения для δx и δT . Причина заключается в том, что параметр Δ в значительно большей мере подвержен влиянию микрорельефа поверхности. Поэтому для анализа экспериментальных данных более предпочтительными являются спектры $\Psi(\lambda)$. Вторая причина расхождения результатов может быть связана с малым уходом угла падения за время между измерением референтного и исследуемого спектров. Включение в функционал (1) вариации угла $\delta\varphi$ в качестве добавочного подгоночного параметра действительно незначительно улучшает его сходимость, однако в большинстве случаев найденное значение $\delta\varphi$ лежит в интервале $\pm 0.01^\circ$.

Таким образом, установлено, что в процессе роста исследуемого образца наблюдается заметное изменение состава растущего слоя КРТ: $\delta x \approx 0.006$. Отметим, что на рассматриваемом интервале времени происходило слабое возрастание потока Те. Его величина изменялась в процессе роста оператором для поддержания постоянного значения параметра Ψ , измеряемого лазерным эллипсометром. Согласно приведенным на рис. 4 функциям чувствительности, изменение температуры на 1°C по своему действию на параметр Ψ на длине волны $\lambda = 632.8\text{ нм}$ эквивалентно изменению параметра состава x на 0.0004 . Поэтому поддержание Ψ на постоянном уровне возможно при одновременном и согласованном изменении температуры и состава, а использование параметра Ψ в качестве критерия для прецизионного контроля состава возможно только при условии стабильной температуры роста.

В связи с этим следует обратить внимание на длину волны, где кривая чувствительности $\alpha_T(\lambda)$ пересекает горизонтальную ось и обращается в нуль (для состава с $x = 0.24$ это длина волны $\lambda = 568\text{ нм}$). На данной длине волны параметр Ψ будет нечувствителен к малым вариациям температуры, при том что чувствительность к составу $\alpha_x(\lambda)$ по-прежнему остается высокой. Поэтому контроль состава по значению параметра Ψ на этой

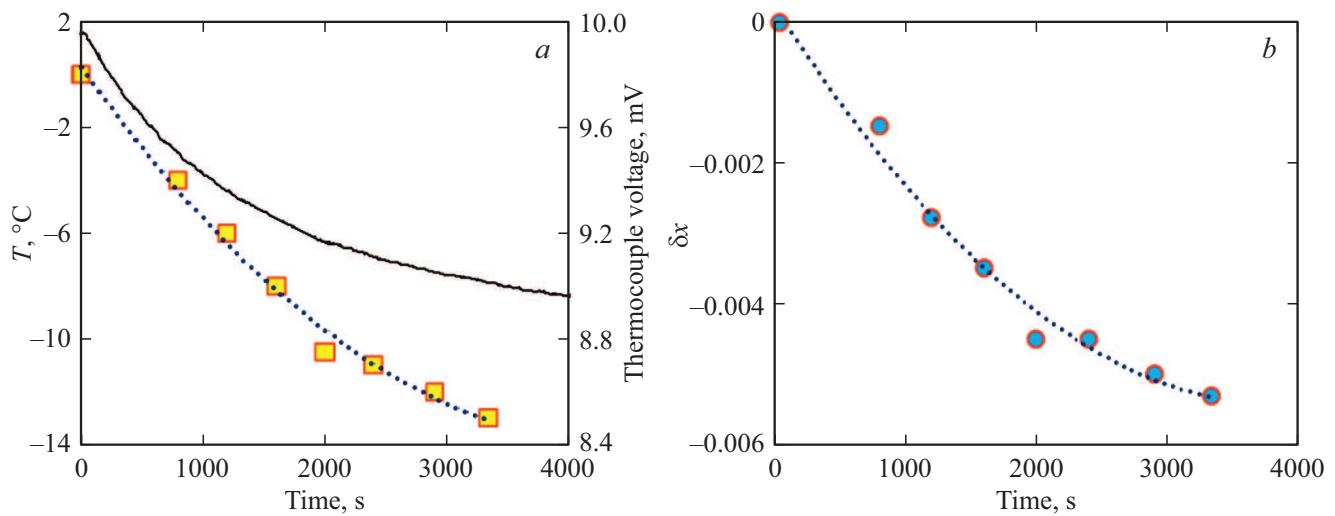


Рис. 6. Изменение температуры (а) и состава (b) в процессе роста тестового образца после понижения нагревателя. Точки — данные, полученные минимизацией функционала (1); точечные кривые — линии тренда для экспериментальных точек. а: сплошная линия — показания термопары.

длине волны позволит избавиться от неоднозначности при интерпретации экспериментальных данных.

При постоянной мощности нагревателя температура образца со временем должна стабилизироваться при условии, что его излучательная способность и окружающий фон остаются неизменными. С началом роста КРТ и с последующим формированием варизонного слоя происходит изменение излучательной и поглощательной способности образца, что ведет к нарушению теплового баланса. Действительно, в стационарном случае температура образца определяется из условия равенства поглощаемого и излучаемого радиационных потоков. Если пренебречь потоком тепла от окружающего фона, то на образец падает только излучение нагревателя, который с хорошей точностью можно представить абсолютно черным телом. В противоположность нагревателю образец имеет селективную излучательную способность, которая зависит от состава КРТ и от толщин буферного слоя CdTe и КРТ. Поскольку температура нагревателя выше температуры образца, то планковское распределение теплового потока, падающего на образец, смещено в более коротковолновую область по сравнению с распределением излучения от образца. Уменьшение состава КРТ увеличивает диапазон непрозрачности в инфракрасной области и увеличивает как поглощаемый, так и излучаемый потоки. Однако из-за разности температур нагревателя и образца излучение возрастет сильнее, что должно приводить к понижению равновесной температуры образца.

Вторая причина нарушения теплового равновесия связана с технологическими процедурами, изменяющими фоновый тепловой поток. Так, начало роста КРТ сопровождается открытием заслонки, экранирующей образец от разогретых молекулярных источников, что дает

дополнительный поток излучения на образец и может приводить к его разогреву.

Рассчитать результирующее изменение температуры, вызванное рассмотренными выше механизмами, представляет собой довольно сложную задачу с большим числом неизвестных параметров. Ответ на этот вопрос был получен нами экспериментально из анализа разностных спектров тестового образца 2, выращенного при стабилизированной температуре нагревателя. В измеренных на этом образце разностных спектрах так же, как и в спектрах образца 1, проявляется особенность вблизи критической точки E_1 , свидетельствующая об изменении температуры. Однако, в отличие от образца 1,

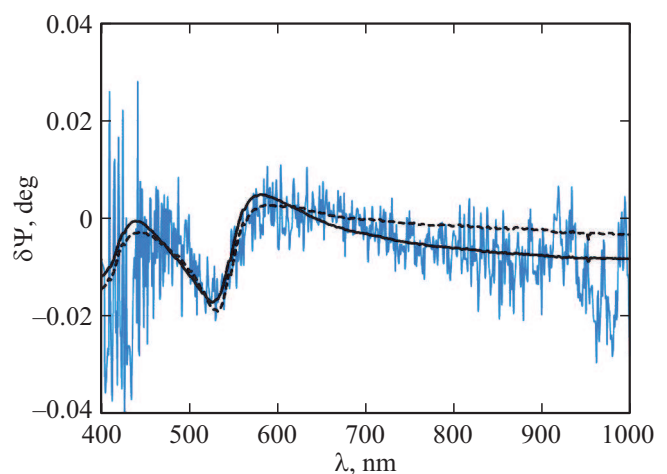


Рис. 7. Разностный спектр тестового образца 2 (зашумленная кривая) и его моделирование изменением температуры, состава и угла падения φ : пунктирная линия — $\delta T = 4^\circ\text{C}$, $\delta x = 0.001$, $\delta\varphi = 0$; сплошная кривая — $\delta T = 2.5^\circ\text{C}$, $\delta x = -0.0006$, $\delta\varphi = 0.01$.

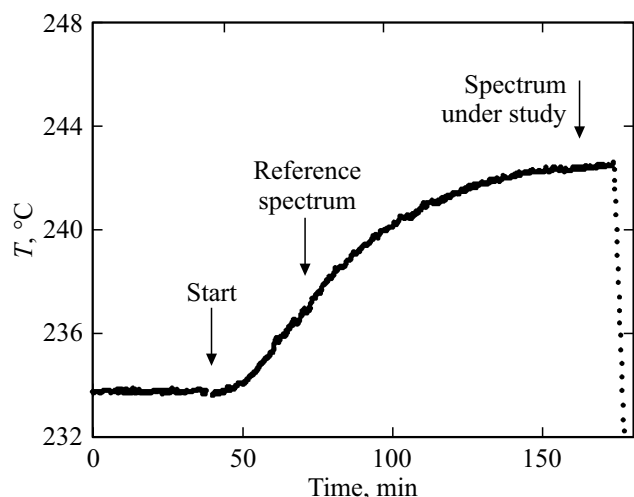


Рис. 8. Изменение температуры нагревателя в процессе выращивания слоя КРТ. Стрелками показаны моменты открытия источников (начало роста), а также моменты измерения референтного и исследуемого спектров.

наблюдается не максимум функции $\delta\Psi(\lambda)$, а минимум, который с течением времени проявляется все более отчетливо и соответствует повышению температуры.

На рис. 7 показан один из таких разностных спектров: референтный спектр $\Psi_0(\lambda)$ был измерен через 30 мин после начала роста, а исследуемый $\Psi_t(\lambda)$ — в конце роста, через 1.5 ч после измерения референтного. Моделирование проводилось для двух вариантов: с вариацией только температуры и состава при постоянном угле падения (пунктирная кривая) и с вариацией всех трех переменных: температуры, состава и угла падения (сплошная кривая). Во втором случае наблюдается лучшее совпадение с экспериментом. Следует отметить, что амплитуда изменения разностного спектра в этом эксперименте всего лишь в несколько раз превышает экспериментальный разброс. Поэтому полученные значения для состава лежат в пределах погрешности метода. Однако возрастание температуры на 2–4°C объективно следует из формы измеренного спектра и согласуется с динамикой температуры нагревателя, измеряемой термопарой, которая показана на рис. 8.

Незначительное повышение температуры обусловлено, по-видимому, тепловым излучением от молекулярных источников, которое проходит через образец из-за его прозрачности в ИК диапазоне. Таким образом, предложенная эллипсометрическая методика позволяет регистрировать малые изменения температуры, наблюдаемые в процессе роста.

5. Заключение

В работе рассмотрена проблема контроля температуры и состава в процессе выращивания слоев КРТ с использованием МЛЭ методом спектральной эллипсо-

метрии. На основании измеренной температурной зависимости эллипсометрических спектров КРТ и установленной ранее их зависимости от состава была разработана численная методика количественной обработки экспериментальных спектров, которая позволила разделить вклады от температуры и от состава и независимо определить изменения этих параметров, происходящие в процессе роста. Эксперименты, проведенные на специально выращенных эталонных образцах, показали, что пороговая чувствительность данной методики составляет единицы градусов Цельсия для изменения температуры и несколько тысячных долей изменения параметра состава x . С помощью разработанной методики установлено, что при выращивании слоя КРТ в условиях стабильного режима нагревателя подложки наблюдается незначительное повышение температуры образца, которое можно объяснить влиянием теплового потока от молекулярных источников.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.J. Bevan, L.A. Almeida, W.M. Duncan, H.D. Shih. *J. Electron. Mater.*, **26** (6), 502 (1997).
- [2] B. Johs, C. Herzinger, J.H. Dinan, A. Cornfeld, J.D. Benson, D. Doctor, G. Olson, I. Ferguson, M. Pelczynski, P. Ghow, C.H. Kuo, S. Johnson. *Thin Sol. Films*, **313–314**, 490 (1998).
- [3] D. Edwall, J. Phillips, D. Lee, J. Arias. *J. Electron. Mater.*, **30** (6), 643 (2001).
- [4] T.J. De Lion, G.L. Olson, J.A. Roth, J.E. Jensen, A.T. Hunter, M.D. Jack, S.L. Bailey. *J. Electron. Mater.*, **31** (7), 688 (2002).
- [5] K.K. Svitashov, S.A. Dvoretzky, Yu.G. Sidorov, V.A. Shvets, A.S. Mardezhov, I.E. Nis, V.S. Varavin, V. Liberman, V.G. Remesnik. *Cryst. Res. Technol.*, **29** (7), 931 (1994).
- [6] К.К. Свиташев, В.А. Швец, А.С. Мардежов, С.А. Дворецкий, Ю.Г. Сидоров, В.С. Варавин. *ЖТФ*, **65** (9), 110 (1995).
- [7] H. Arvin, D.E. Aspnes. *J. Vac. Sci. Technol. A*, **2** (3), 1316 (1984).
- [8] L. Viña, C. Umbach, M. Cardona, L. Vodopyanov. *Phys. Rev. B*, **29** (12), 6752 (1984).
- [9] В.А. Швец, И.А. Азаров, Е.В. Спесивцев, С.В. Рыхлицкий, М.В. Якушев, Д.В. Марин, Н.Н. Михайлов, В.Д. Кузьмин, В.Г. Ремесник, С.А. Дворецкий. *ПТЭ*, № 6, 87 (2016).
- [10] I.V. Sabinina, A.K. Gutakovsky, Y.G. Sidorov, A. Latyshev. *J. Cryst. Growth*, **274**, 339 (2005).
- [11] П.А. Бахтин, В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, А.Ф. Кравченко, А.В. Латышев, Н.Н. Михайлов, И.В. Сабинина, Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев. *Автометрия*, № 2, 83 (2002).
- [12] G.L. Olson, J.A. Roth, P.D. Brewer, R.D. Rajavel, D.M. Jamba, J.E. Jensen, B. Johs, *J. Electron. Mater.*, **28** (6), 749 (1999).
- [13] J.A. Roth, T.J. De Lyon, M.E. Adel. In: *Proc. 1993 Fall Meeting of the Materials Research Society* (Boston, MA, USA) v. 324, p. 353.
- [14] T.J. de Lyon, J.A. Roth, D.H. Chow. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **15**, 329 (1997).

- [15] T.J. De Lyon, R.D. Rajavel, J.A. Roth, J.E. Jensen. In: *Handbook of Infrared Detection Technologies*, ed. by M. Henini and M. Razegh (Elsevier Science, 2002) p. 309.
- [16] M. Daraselia, C.H. Grein, R. Rujirawat B. Yang, S. Sivnanthan, F. Aqariden, H.D. Shih. *J. Electron. Mater.*, **28**, 743(1999).
- [17] И.А. Азаров, В.А. Швец, С.А. Дулин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, Д.Г. Икусов, И.Н. Ужаков, С.В. Рыхлицкий. *Автометрия*, **53** (6), 111 (2017).
- [18] R. Schlereth, J. Hajer, L. Furst, S. Schreyeck, H. Buhmann, L.W. Molenkamp. *J. Cryst. Growth*, **537**, 125602 (2020).
- [19] В.А. Швец, И.А. Азаров, Д.В. Марин, М.В. Якушев, С.В. Рыхлицкий. *ФТП*, **53** (1), 137 (2019).
- [20] D.V. Marin, V.A. Shvets, I.A. Azarov, M.V. Yakushev, S.V. Rykhliitskii. *Infrared Phys. Technol.*, **116**, 103793 (2021).
- [21] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабина. *ФТП*, **35** (9), 1092 (2001).
- [22] Е.В. Спесивцев, С.В. Рыхлицкий, В.А. Швец. *Автометрия*, **47** (5), 5 (2011).
- [23] В.А. Швец, Д.В. Марин, В.Г. Ремесник, И.А. Азаров, М.В. Якушев, С.В. Рыхлицкий. *Опт. и спектр.*, **128** (12), 1815 (2020).
- [24] А.А. Бабенко, Д.В. Брунев, Ю.Г. Сидоров, В.А. Швец, М.В. Якушев. *Неорг. матер.*, **44** (4), 431 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

In situ ellipsometric monitoring of composition and temperature of HgCdTe layers during their growth

V.A. Shvets^{1,2}, D.V. Marin¹, I.A. Azarov¹,
M.V. Yakushev¹, S.V. Rykhliitskii¹

¹ Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract An ellipsometric technique has been developed which makes it possible to observe changes in the composition and temperature of cadmium-mercury-tellurium layers during their growing by molecular beam epitaxy. The technique was tested for diagnostics the variations of the composition and the temperature during layer growth in the mode of constant power of the substrate heater and with its sharp change. It was found that the drop in power and a following decrease in the growth temperature were also accompanied by a monotonic decrease in the composition. In the case of a constant heater power, a slight increase in the sample temperature was observed with an almost unchanged composition of the growing layer.