

Контроль состава гетероэпитаксиальных слоев $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$ методом спектральной эллипсометрии

© М.В. Якушев^{*,†}, В.А. Швец^{*,+}, И.А. Азаров^{*}, С.В. Рыхлицкий^{*},
Ю.Г. Сидоров^{*}, Е.В. Спесивцев^{*}, Т.С. Шамирзаев^{*}

^{*} Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

[†] Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 27 апреля 2009 г. Принята к печати 4 мая 2009 г.)

Представлен программно-аппаратный комплекс на основе спектрального эллипсометра, интегрированного в установку молекулярно-лучевой эпитаксии, предназначенный для контроля состава твердого раствора $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$ при малых значениях z . Рассмотрены методические особенности определения состава растущих слоев из спектров эллипсометрических параметров. Разработана методика определения состава по краю поглощения, которая позволяет с точностью 1.2% измерять этот параметр. Рассмотрены проблемы, решение которых позволит повысить разрешение по составу. В частности, для этого требуется поддержание стабильной температуры в процессе роста.

1. Введение

Тройное полупроводниковое соединение кадмий–ртуть–теллур (CdHgTe , КРТ) с переменной шириной запрещенной зоны широко используется для создания фотодетекторов, работающих в инфракрасной (ИК) области спектра. Объемный материал на основе КРТ в значительной степени непригоден для современных поколений фотовольтаических и МДП устройств из-за структурных дефектов, включая малоугловые границы и области высокой концентрации дислокаций. Эпитаксиальные методы выращивания КРТ в отличие от объемных позволяют создавать слои большой площади ($\sim 100 \text{ см}^2$), а также многослойные структуры со сложными профилями состава и профилями легирования по глубине полупроводника, необходимые для достижения высоких рабочих характеристик фотодетекторов.

Все эпитаксиальные методы связаны общей проблемой — потребностью в дешевых подложках большой площади, которые структурно, химически, оптически и механически согласованы с полупроводниками на основе Hg [1]. До настоящего времени не найдено подложки, которая бы удовлетворяла одновременно всем требованиям. Подложки из CdTe и тройных соединений на его основе, в первую очередь CdZnTe (КЦТ), согласованы по всем параметрам с КРТ и позволяют выращивать эпитаксиальные слои с предельными характеристиками. Однако ограниченный размер, проблемы чистоты, преципитация теллура, неоднородность состава по площади и высокая цена (60–500\$ за 1 см^2) делают невозможным использование согласованных подложек в массовом производстве и при создании широкоформатных матриц фотодетекторов.

Перспективный подход для получения дешевых подложек — применение гибридных или так называемых „альтернативных“ подложек. Они представляют собой

многослойные структуры из буферных слоев, служащих для согласования параметров решеток, нанесенные на пластину кремния. В качестве буферного слоя наносится пленка CdZnTe толщиной несколько микрон, полученная неравновесным методом выращивания. Благодаря изменению параметра решетки КЦТ от 6.481 до 6.102 \AA при изменении мольной доли ZnTe „ z “ от 0 до 1 становится возможным приводить в соответствие параметр решетки слоя $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$ с параметром решетки активного слоя КРТ любого состава. Например, при составе $z = 0.04$ параметры решеток $\text{Cd}_{0.2}\text{Hg}_{0.8}\text{Te}$ и $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ совпадают. Поэтому эпитаксия КРТ на КЦТ соответствующих составов может происходить без образования дислокаций несоответствия на гетеропереходе КРТ–КЦТ и обеспечивать наиболее высокое структурное совершенство слоев КРТ.

Ключевым моментом в технологии синтеза полупроводниковых материалов и структур является постановка методов контроля их параметров. Особый интерес в связи с этим представляют оптические методы и, в частности, метод эллипсометрии как наиболее информативный [2]. При выращивании буферных слоев КЦТ состав твердого раствора необходимо определять и поддерживать с высокой степенью точности и оперативности. Причин для этого несколько. Во-первых, отклонение от требуемого состава даже на величину 0.005 мольной доли приводит к появлению дислокаций несоответствия и снижению структурного совершенства слоев КРТ. Во-вторых, с повышением мольной доли цинка в пленках возможно разделение фаз с разным содержанием ZnTe и CdTe , что связано с узкой областью гомогенности для взаимной растворимости этих веществ. Опыт показывает, что при фиксированных параметрах технологического режима состав может меняться в процессе роста, и необходима их корректировка в реальном времени, чтобы компенсировать эти изменения.

[†] E-mail: yakushev@isp.nsc.ru

Разработанный ранее метод контроля состава КРТ на основе лазерной эллипсометрии [3] успешно используется при росте эпитаксиальных пленок и структур [4,5]. В основе этого контроля лежит сильная зависимость оптических постоянных КРТ от состава на длине волны HeNe-лазера ($\lambda = 632.8$ нм). Благодаря этому угол ψ изменяется на величину около 10° при переходе от HgTe к CdTe, обеспечивая пороговую чувствительность по составу $\delta x \approx 0.001$. К сожалению, для КЦТ такой метод контроля состава неприменим из-за малого оптического контраста для бинарных соединений CdTe и ZnTe и связанной с этим слабой чувствительностью к составу z . В результате пороговая чувствительность оказывается на порядок ниже того, что реализовано для КРТ.

В такой ситуации существенного повышения чувствительности можно добиться только при переходе к другим областям спектра. Наибольший интерес в этой связи представляют области длин волн вблизи критических точек $E_1, E_1 + \Delta_1$ (300–400 нм), а также вблизи края поглощения (~ 850 нм). Таким образом, для контроля состава КЦТ необходимо использовать спектральную эллипсометрию. Авторы работы [6] уже анализировали возможности спектральной эллипсометрии для решения поставленной задачи. Однако попытка экспериментальной реализации *in situ* контроля встретила серьезные экспериментальные трудности. В данной работе представлены результаты по разработке методического обеспечения и экспериментальные данные по измерению *in situ* состава КЦТ на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), оснащенной спектральным эллипсометром.

2. Экспериментальная установка и методика эксперимента

Слои КЦТ выращивались на подложках Si(310) на установке МЛЭ „Обь-М“ [7] по стандартной технологии, описанной в работе [8]. Скорость роста во всех случаях составляла 2.2 ± 0.2 мкм/ч. Спектральный эллипсометр был собран на базе статической схемы [9] и адаптирован к установке роста. Измерения проводились в спектральном диапазоне 300–1000 нм, с разрешением 3 нм, шаг сканирования по длине волны составлял 2 нм. Для ввода и вывода оптического излучения на камере были установлены ультрафиолетовые окна, которые предварительно отжигались для удаления двойного лучепреломления. Измерение эллипсометрических параметров проводится путем сравнения интенсивностей отраженного света для двух взаимно ортогональных поляризаций [10]. Такая схема устойчива к флуктуациям интенсивности света, что позволяет повысить отношение сигнал/шум и чувствительность измерений. Это крайне актуально для установки МЛЭ, так как для предотвращения запыления оптических окон световой поток приходится диафрагмировать, ослабляя тем самым его интенсивность.

Для мониторинга процесса роста в режиме реального времени было разработано программное обеспечение, которое позволяло с заданным временным интервалом измерять и записывать спектры эллипсометрических углов и рассчитывать для них характерные параметры вблизи критических точек $E_1, E_1 + \Delta_1$ и положение края поглощения.

Для установления степени корреляции критических точек спектра с составом z в выращенных структурах по спектрам фотолюминесценции (ФЛ) определялся состав. Измерения спектров ФЛ проводились при температуре 77 К, при возбуждении He-Ne-лазером (632.8 нм) с мощностью 10 мВт. ФЛ анализировалась двойным дифракционным монохроматором СДЛ-1 и регистрировалась фотоэлектронным умножителем (ФЭУ-83) с фотокатодом типа S-1, который охлаждался парами жидкого азота. ФЭУ работал в режиме счета фотонов.

Измерения спектров ФЛ проводились в одной точке на каждом образце.

Содержание ZnTe в составе образца определялось по интерполяционной формуле:

$$Z_{ZnTe} = \{I_{\max}(Cd_{1-z}Zn_zTe) - I_{\max}(CdTe)\} / \{I_{\max}(ZnTe) - I_{\max}(CdTe)\},$$

где Z_{ZnTe} — молярная доля ZnTe в образцах, $1 - z$ — молярная доля CdTe; $I_{\max}(Cd_{1-z}Zn_zTe)$ — длина волны для максимума спектральной фотолюминесценции в CdZnTe; $I_{\max}(CdTe)$ — длина волны для максимума спектральной фотолюминесценции в CdTe; $I_{\max}(ZnTe)$ — длина волны для максимума спектральной фотолюминесценции в ZnTe.

3. Результаты измерений и обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости углов ψ и Δ от длины волны света λ для гетероструктуры CdTe/Si(310)

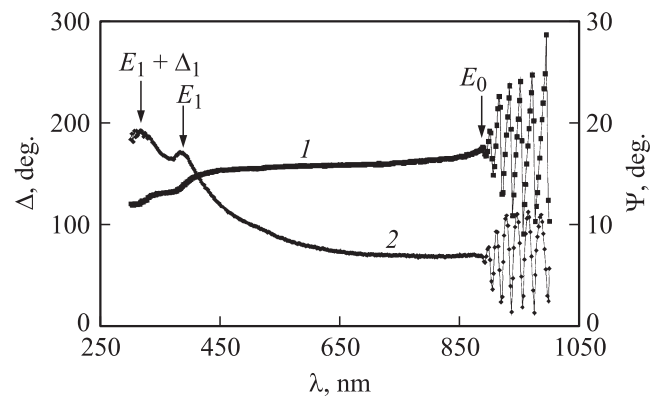


Рис. 1. Зависимости эллипсометрических углов ψ и Δ от длины волны света λ для гетероструктуры CdTe/Si(310) с толщиной слоя теллурида кадмия 6 мкм: 1 — зависимость угла Δ , 2 — зависимость угла ψ .

с толщиной слоя теллурида кадмия порядка 6 мкм. Для слоев КЦТ с составом, близким к CdTe ($z \approx 0$), наблюдаются похожие зависимости. Спектры имеют характерные особенности в области критических точек плотности состояний E_1 и $E_1 + \Delta_1$ — максимумы для $\Psi(\lambda)$ и максимумы для производной $d\Delta/d\lambda$. В длинноволновой области спектра при длинах волн, превышающих пороговое значение λ_0 для края поглощения, наблюдаются интерференционные осцилляции. Начало осцилляций соответствует критической точке E_0 . В области спектра вблизи критических точек обнаруживается наиболее сильная зависимость оптических свойств от состава, поэтому они представляют наибольший интерес для разработки методом контроля состава.

Измеренные спектры были детально проанализированы вблизи критических точек E_1 и E_0 , так как здесь воспроизводимость измерений существенно лучше, чем в области $E_1 + \Delta_1$. Вблизи E_1 зависимости $\Psi(\lambda)$ аппроксимировали квадратичной функцией и в реальном времени рассчитывали значение эллипсометрического параметра в максимуме Ψ_{\max} , а также положение этого максимума по шкале длин волн λ_{\max} . В качестве критерия для вычисления края поглощения λ_0 было использовано начало интерференционных осцилляций, которое определяли по поведению вторых производных в спектрах $\Psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$. На рис. 2 показаны измеренные

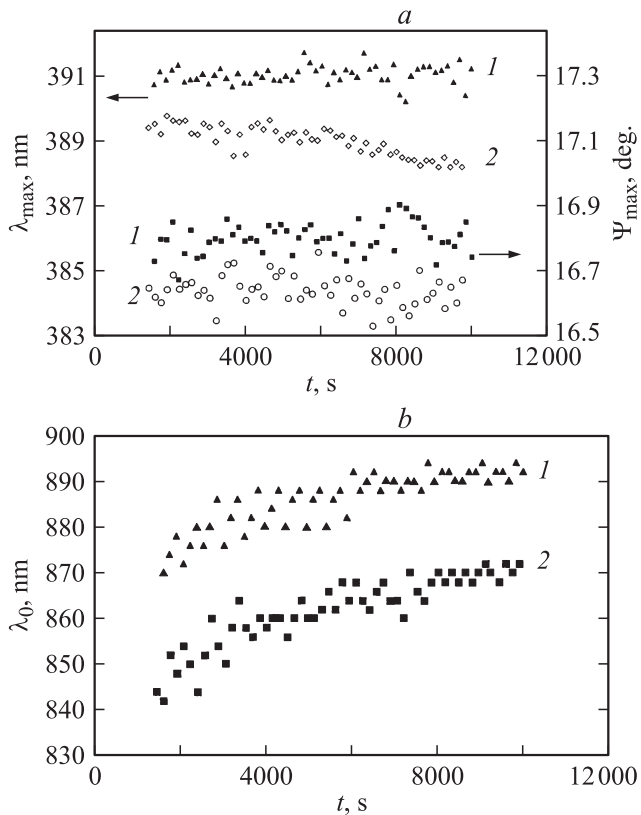


Рис. 2. Изменение в процессе роста параметров спектров Ψ_{\max} , λ_{\max} (a) и λ_0 (b) для двух образцов $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$, отличающихся по составу. 1 — $z = 0$, 2 — $z = 0.065$.

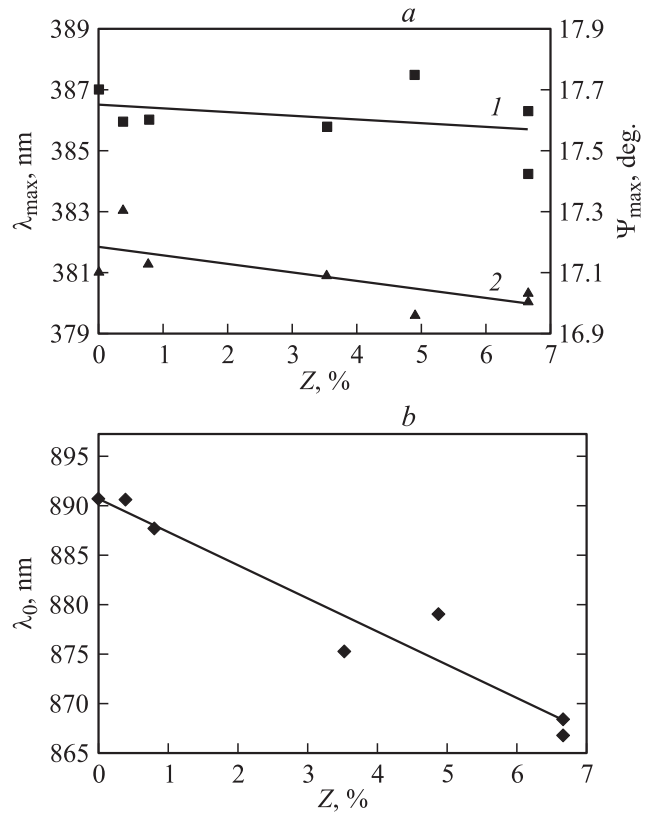


Рис. 3. Зависимости параметров спектров Ψ_{\max} , λ_{\max} (a) и λ_0 (b) от состава слоев $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$. 1 — зависимость λ_{\max} , 2 — зависимость Ψ_{\max} .

в процессе роста характерные параметры спектров Ψ_{\max} , λ_{\max} и λ_0 от времени для двух образцов КЦТ, отличающихся по составу на величину $\delta z = 0.065$. Разница средних значений измеренных параметров для образцов составляет $\delta(\Psi_{\max}) = 0.2^\circ$ и $\delta(\lambda_{\max}) = 1.6$ нм, а их среднеквадратичные разбросы от измерения к измерению соответственно 0.04° и 0.5 нм.

Чтобы установить степень корреляции параметров Ψ_{\max} , λ_{\max} и λ_0 с составом z , выращивали пленки КЦТ различного состава и периодически проводили для них эллипсометрические измерения. Значения Ψ_{\max} , λ_{\max} и λ_0 для каждого образца рассчитывали как средние по 6 последним измерениям спектров. Состав пленок определялся по спектрам фотолюминесценции *ex-situ*. Полученные зависимости от состава, а также их линейные аппроксимации показаны на рис. 3, a. Из этих результатов следует, что вблизи $z = 0$ чувствительность λ_{\max} составляет 0.11 нм при изменении состава $\delta z = 0.01$. Низкая чувствительность и большой разброс экспериментальных данных не позволяют реализовать с надлежащей точностью контроль состава по положению максимума Ψ , соответствующего критической точке E_1 .

Следует отметить, что измеряемое положение λ_{\max} помимо состава зависит по крайней мере еще от двух факторов: степени совершенства морфологии поверхности и температуры образца. Оценки показывают, что

наличие поверхностного рельефа высотой 3 нм может приводить к смещению максимума в спектре $\Psi(\lambda)$ по энергетической шкале на 1 нм. Это усложняет контроль состава по положению критической точки E_1 , так как развитие микрорельефа — неконтролируемый фактор. В отличие от рельефа температуру можно контролировать с определенной степенью точности, хотя в условиях эпитаксиального роста эта точность невысока.

Обратимся теперь к зависимостям края поглощения, представленным на рис. 2, *b*. Для них тоже наблюдается значительный разброс и монотонный рост λ_0 со временем. Последнее обстоятельство обусловлено не приборной точностью, а чисто методическими причинами. Для вычисления края поглощения λ_0 было использовано начало интерференционных осцилляций. При малых толщинах осцилляции проникают в коротковолновую область спектра, создавая тем самым наблюдаемый в эксперименте сдвиг. Методические причины приводят также к разбросу экспериментальных точек, который составляет несколько нанометров и на порядок превышает дисперсию при измерении λ_{\max} . Действительно, при сканировании длины волны начало осцилляций по спектру соответствует резкому изменению поглощения в пленке и, как следствие, такому же резкому изменению эллипсометрических параметров за счет френелевского отражения. Эти изменения накладываются на интерференционные осцилляции, которые могут быть как в фазе (тогда осцилляции усиливаются), так и в противофазе (тогда начало осцилляций подавляется и несколько смещается по спектру).

Между тем зависимость края поглощения от состава, которая представлена на рис. 3, *b*, показывает, что чувствительность λ_0 к составу на порядок выше, чем для λ_{\max} , и составляет 3.39 нм при изменении состава на $\delta z = 0.01$. Это значение хорошо согласуется с аналогичными данными работ [11,12] (2.9 и 3.4 нм соответственно), полученными для комнатной температуры. При той точности, с которой удается определять λ_0 , это соответствует погрешности определения состава $\sim 1.2\%$. Таким образом, измерение края поглощения может быть положено в основу способа контроля состава, если уменьшить методически обусловленный разброс экспериментальных точек и избавиться от их сдвига. Это можно сделать, если использовать не локальный по спектру критерий для определения λ_0 , а учитывать достаточно широкий спектральный диапазон вблизи края поглощения.

Для разработки соответствующей методики были предприняты попытки решения обратной задачи эллипсометрии в рамках однослойной модели: определяли толщину и спектры оптических постоянных слоя КЦТ. Это в принципе возможно, так как в длинноволновой области спектра поглощение отсутствует, и на каждой длине волны можно определить два параметра: показатель преломления и толщину. Затем при известной толщине можно рассчитать спектральные зависимости для обеих оптических постоянных во всем диапазоне,

и по этим зависимостям определить состав. Однако такой алгоритм расчета оказался неэффективным, так как при больших толщинах (несколько микрон) поисковые методы крайне чувствительны к случайным и систематическим ошибкам измерений.

Более устойчивой к ошибкам будет такая методика, которая использовала бы априорную информацию о спектрах оптических постоянных. В связи с этим была создана параметрическая модель, описывающая дисперсионные зависимости показателей преломления и поглощения от состава КЦТ вблизи края поглощения. Показатель преломления от длины волны и от состава $n(\lambda, z)$ представляли линейной интерполяцией по z соответствующих дисперсионных кривых для CdTe и Cd_{0.3}Zn_{0.7}Te, взятых из [13] для комнатной температуры. Дисперсию показателя поглощения задавали табличными данными для CdTe [12], а зависимость от состава описывали линейным смещением полученной кривой вдоль оси длин волн. Коэффициент пропорциональности при таком смещении 3.4 нм на 1% состава исходно был взят из [12], в дальнейшем он уточнялся таким образом, чтобы минимизировать расхождения между данными эллипсометрии и фотолюминесценции. Обратную задачу решали с учетом заданных таким образом дисперсионных функций $n(\lambda, z)$ и $k(\lambda, z)$ путем минимизации целевой функции стандартного вида:

$$S(z, d) = \sum_i \left[\frac{(\psi_i^{\text{cal}} - \psi_i^{\text{ex}})^2}{\delta\psi^2} + \frac{(\Delta_i^{\text{cal}} - \Delta_i^{\text{ex}})^2}{\delta\Delta^2} \right], \quad (1)$$

добиваясь максимального совпадения расчетных $(\Psi_i^{\text{cal}}, \Delta_i^{\text{cal}})$ и экспериментальных $(\Psi_i^{\text{ex}}, \Delta_i^{\text{ex}})$ спектров. Входящие в целевую функцию величины $\delta\Psi$ и $\delta\Delta$ имеют смысл экспериментальных ошибок измерения. Подгоночными параметрами служили толщина слоя КЦТ d в нанометрах и его состав z в процентах. Расчеты проводили в спектральном диапазоне 750–1000 нм.

Для апробации этой методики исследуемые пленки КЦТ были измерены на спектральном эллипсометре *ex-situ* при комнатной температуре. На рис. 4 показаны измеренные и рассчитанные для найденных значений z и d спектры эллипсометрических параметров для одного из образцов, для остальных получились похожие результаты.

Таблица 1. Измерение толщины и состава пленок КЦТ по эллипсометрическим (ЭМ) спектрам и сравнение с данными фотолюминесценции (ФЛ)

№ образца	Толщина, нм	Состав, ЭМ, %	Состав, ФЛ, %
1	5542	0	0
2	5996	0.25	0.39
3	5881	1.4	0.78
4	7182	3.5	3.52
5	5855	4.5	4.89
6	5012	6.7	6.65
7	6050	6.2	6.65

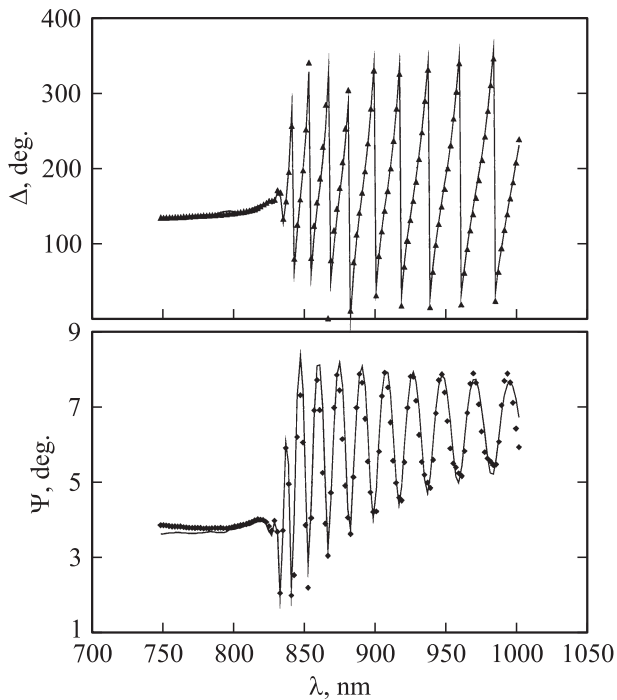


Рис. 4. Рассчитанные и измеренные при комнатной температуре спектры эллипсометрических параметров для гетероструктуры $Cd_{1-z}Zn_zTe/Si(310)$ с толщиной слоя 6 мкм и составом $z = 0.004$. Точки — результаты измерений, сплошная линия — расчет.

Хорошее совпадение расчетных и измеренных спектров служит наглядным подтверждением того, что используемая параметрическая модель оптических постоянных правильно описывает их реальные зависимости. Найденные по этой методике значения толщин исследуемых пленок КЦТ и их составов показаны в табл. 1. Для сравнения в таблице приведены также результаты определения состава по спектрам фотолуминесценции. Оба метода дают близкие значения, и расхождение не превышает 0.6%.

Точность измерения состава эллипсометрическим методом зависит от систематических погрешностей, которые обусловлены в первую очередь параметрической моделью оптических постоянных, а также от случайных ошибок, связанных непосредственно с методикой расчета. Методическую ошибку легко оценить: она соответствует отклонению состава δz , при котором целевая функция (1) увеличивается в 2 раза относительно своего минимума. Для анализируемых спектров такая оценка дает значение $\delta z = 0.2\%$. Это значение следует рассматривать как предельное для рассматриваемой методики. Реальная погрешность может оказаться в 2–3 раза больше за счет неконтролируемых факторов (рельефа поверхности, влияния структурных дефектов пленки, дрейфа температуры и т.п.).

Для того чтобы эту методику можно было использовать *in situ* при температуре роста, необходимо расширить параметрическую модель оптических спектров,

включив в нее еще один параметр — температуру. Решение этой задачи предполагает проведение дополнительных экспериментов по измерению оптических постоянных КЦТ при температуре роста. Однако даже упрощенная модель зависимости n и k от температуры, полученная сдвигом соответствующих спектров по оси длин волн, показала удовлетворительную сходимость расчетных спектров $\Psi(\lambda)$ и $\Delta(\lambda)$ к измеренным.

Для оценки чувствительности эллипсометрических спектров к температуре гетероструктура $CdTe/Si(310)$ с толщиной слоя 6 мкм была нагрета от комнатной температуры до 300°C. На рис. 5 показаны результаты измерений Ψ_{max} , λ_{max} и λ_0 в процессе нагрева. Интегральное смещение указанных параметров при нагреве составило 1.6°, 16 и 62 нм соответственно. Отсюда следует, что изменение температуры на 15 градусов будет равносильно по своему действию изменению состава на 0.01, поэтому для реализации точности измерения состава 1% необходимо поддержание температуры в интервале 10°. Проведенные измерения позволяют выразить сдержанный оптимизм в вопросе одновременного контроля состава и температуры по эллипсометрическим спектрам.

В табл. 2 показаны коэффициенты чувствительности характерных параметров спектров Ψ_{max} , λ_{max} и λ_0 по

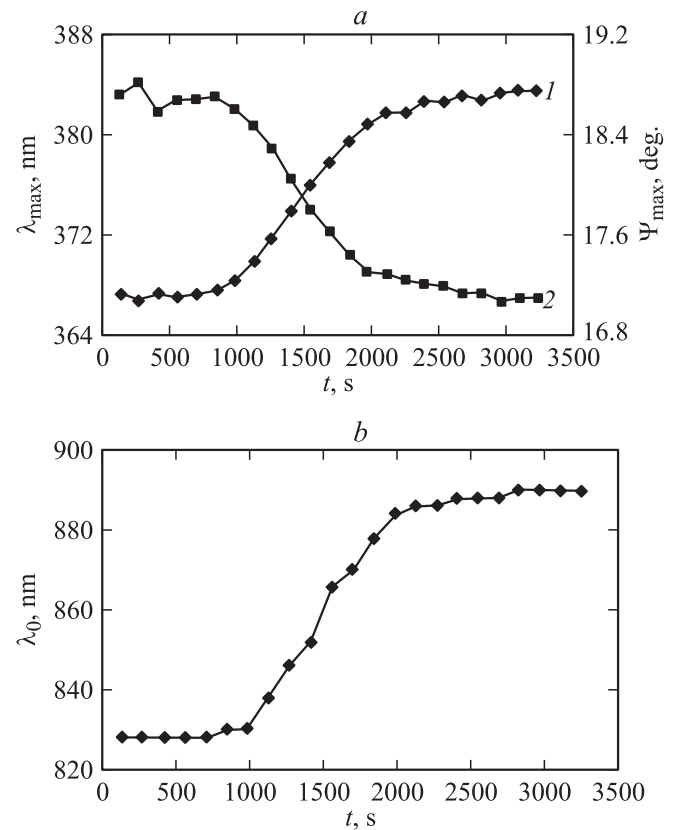


Рис. 5. Изменение параметров спектров Ψ_{max} , λ_{max} (a) и λ_0 (b) при нагреве гетероструктуры $CdTe/Si(310)$ от комнатной температуры до 300°C. 1 — зависимость λ_{max} , 2 — зависимость Ψ_{max} .

Таблица 2. Изменение характерных параметров спектров Ψ_{\max} , λ_{\max} и λ_0 при вариации состава на 1% и температуры на 1°C

Параметр вариации	$\delta\Psi_{\max}$, °	$\delta\lambda_{\max}$, нм	$\delta\lambda_0$, нм
δz	-0.03	-0.1	-3.4
δT	-0.006	0.057	0.22
Точность измерений	0.04	0.5	0.25

составу и температуре, а также точность измерения этих параметров.

Использование Ψ_{\max} не представляет интереса из-за недостаточной точности измерений. Для оставшихся двух параметров можно в линейном приближении записать:

$$\delta\lambda_{\max} = -0.1\delta z + 0.057\delta T,$$

$$\delta\lambda_0 = -3.4\delta z + 0.22\delta T.$$

Здесь $\delta\lambda_0$ и $\delta\lambda_{\max}$ — изменение параметров при вариации состава на δz (в процентах) и температуры на δT . Решение этой системы дает оба контролируемых параметра: состав и температуру. На практике можно пренебречь зависимостью $\delta\lambda_{\max}$ от состава, которая в диапазоне интересующих нас значений $0 < z < 0.05$ не выходит за пределы точности измерений. Поэтому положение максимума λ_{\max} можно использовать для контроля температуры и поддержания постоянного ее значения в пределах 10°C. Отметим, что проведенный здесь анализ в целом совпадает с выводами работы [6]. При этом в цитируемой работе для измерения состава было предложено использовать положение критической точки $E_0 + \Delta_0$, которая имеет практически такую же чувствительность к составу, как и E_0 , и хорошо заметна при комнатной температуре. Однако в экспериментальных спектрах, полученных при температуре роста, соответствующие особенности в области $E_0 + \Delta_0$ проявляются слабо из-за уширения пика. Представленные в работе экспериментальные данные показывают, что использование зависимости E_0 от состава более перспективно для разработки контроля.

4. Заключение

Анализ спектров эллипсометрических параметров пленок КЦТ, измеренных в процессе их роста, показал, что наиболее чувствительным к составу параметром является положение края поглощения. Если определять край поглощения по границе интерференционных осцилляций в области прозрачности, то удается добиться точности определения состава $Cd_{1-z}Zn_zTe \approx 1.2\%$ непосредственно в процессе роста. Для повышения точности определения состава предложено решать обратную задачу, используя в качестве подгоночных параметров

толщину и состав слоя. Для этого была разработана параметрическая модель оптических постоянных при комнатной температуре. Измерения на серии образцов показали, что использование такой методики позволяет в несколько раз повысить точность контроля, при этом чувствительность, оценка которой была выполнена на основании экспериментальных спектров, составляет 0.2%. Для реализации предложенной методики в условиях ростовой камеры (*in situ*) необходимо расширить параметрическую модель до температуры роста. Кроме того, для повышения точности требуется поддержание стабильной температуры образца в процессе роста.

Список литературы

- [1] В.С. Варавин, А.К. Гутаковский, С.А. Дворецкий, В.А. Карташов, А.В. Латышев, Н.Н. Михайлов, Д.Н. Придачин, В.Г. Ремесник, С.В. Рыхлицкий, И.В. Сабинина, Ю.Г. Сидоров, В.П. Титов, В.А. Швец, М.В. Якушев, А.Л. Асеев. Прикл. физика, **6**, 25 (2002).
- [2] К.К. Свиташев, В.А. Швец, А.С. Мардежов, С.А. Дворецкий, Ю.Г. Сидоров, Е.В. Спесивцев, С.В. Рыхлицкий, С.И. Чикичев, Д.Н. Придачин. Автометрия, **4**, 100 (1996).
- [3] К.К. Свиташев, В.А. Швец, А.С. Мардежов, Ю.Г. Сидоров, В.С. Варавин. ЖТФ, **65** (9), 110 (1995).
- [4] V.A. Shvets, S.V. Rykhiltski, E.V. Spesivtsev, N.A. Aulchenko, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, Yu.G. Sidorov, R.N. Smirnov. Thin Sol. Films, **455–456**, 688 (2004).
- [5] Н.Н. Михайлов, В.А. Швец, С.А. Дворецкий, Е.В. Спесивцев, Ю.Г. Сидоров, С.В. Рыхлицкий, Р.Н. Смирнов. Автометрия, **2**, 71 (2003).
- [6] M. Daraselia, G. Brill, J.W. Garland, V. Nathan, S. Sivananthan. J. Electron. Mater., **29** (6), 742 (2000).
- [7] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, В.С. Варавин, А.П. Анциферов. Оптич. журн., **67** (1), 39 (2000).
- [8] М.В. Якушев, А.А. Бабенко, В.С. Варавин, В.В. Васильев, Л.В. Миронова, Д.Н. Придачин, В.Г. Ремесник, И.В. Сабинина, Ю.Г. Сидоров, А.О. Сусликов. Прикл. физика, **4**, 108 (2007).
- [9] Е.В. Спесивцев, С.В. Рыхлицкий, В.А. Швец. Патент РФ № 2302623 (2007).
- [10] В.А. Швец, Е.В. Спесивцев, С.В. Рыхлицкий. Опт. и спектр., **97** (3), 514 (2004).
- [11] O. Castaing, R. Granger, J.T. Banhal, R. Triboulet. J. Phys., **8**, 5757 (1996).
- [12] S.P. Tobin, J.P. Tower, P.W. Norton, D. Chandler-Norowitz, P.M. Amirtharaj, V.C. Lopes, W.M. Duncan, A.J. Syllaios, C.K. Ard, N.C. Giles, J. Lee, R. Balasubramanian, A.B. Bollong, T.W. Steiner, M.L.W. Thewalt, D.K. Bowen, B.K. Tanner. J. Electron. Mater., **24**, 697 (1995).
- [13] S. Adachi. *Optical constants of crystalline and amorphous semiconductors* (Boston–Dordrecht–London, Kluwer Academic Publishers, 1999) D16.

Редактор Л.В. Беляков

Composition control of $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$ heteroepitaxial layers by spectroscopic ellipsometry

*M.V. Yakushev**, *V.A. Shvets*⁺*, *I.A. Azarov⁺*,
C.V. Rykhlytski^{}*, *Yu.G. Sidorov**, *E.V. Spesivtsev**,
*T.S. Shamirzaev**

* Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

+ Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The hardware-software complex on a basis of spectroscopic ellipsometer combined with molecular-beam epitaxy system is presented. The complex is designed for the control of $\text{Cd}_{1-z}\text{Zn}_z\text{Te}$ solid solution composition at small values z . Methodical features of composition determination of growing layers from ellipsometric spectra are considered. The procedure of composition determination, involved dependence of absorption edge is developed. The procedure allows measuring these parameters with an accuracy of 1.2%. The problems are discussed to solve improvement of composition resolution. In particular, a stable temperature maintenance in the course of film growth is required.