

УДК 535.51+536.51

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ *IN SITU* МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫРАЩИВАНИЯ СЛОЁВ МЛЭ КРТ

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

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1
E-mail: basil5353@mail.ru

Рассмотрена проблема *in situ* контроля температуры при выращивании эпитаксиальных слоёв CdHgTe методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Предложены различные подходы к решению проблемы с использованием спектральной эллипсометрии. Они основаны на температурной зависимости спектров оптических постоянных буферного слоя CdTe и растущего слоя CdHgTe. Представлены результаты экспериментального тестирования этих методик, которые показывают, что точность измерения температуры составляет несколько градусов, а чувствительность достигает долей градуса. На стадии стационарного роста из эллипсометрических спектров удаётся определить изменение не только температуры, но и состава растущего слоя.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, кадмий—ртуть—теллур, температура роста, эллипсометрия, технологический контроль.

DOI: 10.15372/AUT20210505

Введение. В технологии синтеза слоёв кадмий—ртуть—теллур (КРТ) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) рост происходит при относительно низких температурах вблизи 200 °С, и её значение играет исключительно важную роль. Оптимальный диапазон для выращивания слоёв высокого качества составляет всего $\pm 0,5$ °С [1, 2], что труднодостижимо. Тем не менее желательный интервал не должен превышать ± 5 °С [3]. Отклонение температуры от оптимальной приводит либо к повышению плотности мелких дефектов на поверхности роста при низких температурах, либо к разрастанию крупных дефектов и текстурированию поверхности при превышении оптимальной температуры [4], вплоть до образования наклонных анизотропных структур [5]. Значение температуры необходимо также для корректной интерпретации данных эллипсометрического мониторинга состава.

Прямые измерения температуры подложки с помощью термометрического метода крайне затруднены из-за конструктивных особенностей технологических установок. Поэтому в технологии используют альтернативные методы, такие как низкотемпературная пирометрия [6], Фурье-спектроскопия ИК-излучения (FTIR) [7], термометрия по краю поглощения (band edge thermometry) [3, 8], эллипсометрия [9]. Каждый из этих методов имеет свои особенности. Так, пирометрический метод при низких температурах оказывается слишком сложным как в техническом плане, так и в интерпретации данных. Реализация методов, основанных на термометрии края поглощения, предъявляет определённые требования к конструкции вакуумных установок, которые не всегда приемлемы.

В Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН длительное время развиваются эллипсометрические методы *in situ* контроля технологии МЛЭ, с помощью

которых удаётся диагностировать состав КРТ, скорость роста, кристаллическое совершенство слоёв и ряд других параметров. Попытки использования лазерного эллипсометра для измерения температуры буферного слоя CdTe [10] показали слишком низкую точность ($\delta T \sim 30^\circ\text{C}$), которая неприемлема для технологии. Поэтому было решено для задач термометрии использовать спектральную эллипсометрию.

С этой целью модуль эпитаксии КРТ был оснащён спектральным эллипсометром, работающим по статической схеме [11], и на базе этой установки проведены эллипсометрические исследования процессов роста КРТ, которые послужили основой для создания методов измерения температуры. В методе эллипсометрии измеряется отношение модулей комплексных коэффициентов отражения для компонент излучения, поляризованных в плоскости падения и перпендикулярно к ней (параметр Ψ), и разность фаз для данных коэффициентов отражения (параметр Δ) [12].

В предлагаемой работе представлены результаты спектральных эллипсометрических исследований процессов роста КРТ с целью разработки *in situ* методов измерения температуры.

Формулировка задачи и методические проблемы. Эллипсометрические измерения чувствительны к температуре благодаря температурной зависимости оптических постоянных слоёв растущей гетероструктуры. В общем случае определение температуры по результатам эллипсометрических измерений представляет собой крайне сложную задачу, так как на разных стадиях выращивания оптическая модель, описывающая структуру, меняется и оказывается принципиально иной. Поэтому приходится искать частные решения проблемы для каждой стадии роста.

Один из ответственных этапов роста — это выход подложки CdTe/Si на заданный температурный режим. Эллипсометрические параметры в этом случае зависят только от оптических постоянных CdTe, а в области прозрачности материала ещё от его толщины и параметров кремния. С началом роста КРТ модель усложняется и становится двухслойной (слой CdTe и слой КРТ), причём толщина слоя КРТ $d_{\text{КРТ}}$ непрерывно меняется, что ещё более усложняет модель. На этой стадии интерпретация эллипсометрических измерений наиболее затруднена из-за большого числа неизвестных параметров. Наконец, после того как толщина $d_{\text{КРТ}}$ многократно превысит глубину проникновения света, эллипсометрические параметры определяются только оптическими постоянными КРТ. Последние, в свою очередь, зависят от температуры и состава растущего слоя. Следует также отметить, что помимо перечисленных параметров эллипсометрические измерения зависят ещё от угла падения света, который может неконтролируемо изменяться от загрузки к загрузке, а также в процессе роста. Именно это обстоятельство делает невозможным измерение температуры буферного слоя с помощью лазерного эллипсометра.

Измерение температуры буферного слоя CdTe/Si перед началом роста КРТ. Для разработки эллипсометрической методики измерения температуры прежде всего был проведён цикл исследований с нагревом образцов и изучена температурная зависимость спектров оптических постоянных CdTe. Все нагревы проводили на воздухе с помощью малогабаритной печи, установленной на предметном столике *ex situ* эллипсометра [13]. Измерения спектров проводили при пошаговом нагреве образцов до 220°C после стабилизации температуры, которая измерялась с помощью термопары. Предварительно исследовались влияние нагревов на состояние поверхности измеряемых образцов и её стабильность. Из сравнения спектров эллипсометрических параметров установлено, что после первого нагрева наблюдается удаление тонкого поверхностного слоя толщиной ~ 1 нм, который предположительно связан с адсорбированными парами воды. Последующие циклы нагревов не приводили к заметным изменениям в спектрах.

В результате этих экспериментов было установлено, что наиболее сильные изменения в эллипсометрических спектрах наблюдаются вблизи критических точек E_0 (край погло-

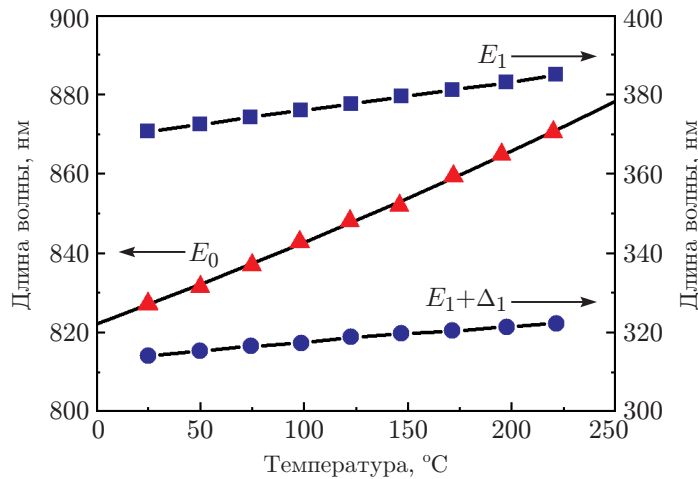


Рис. 1. Температурная зависимость положения длин волн, соответствующих критическим точкам E_0 , E_1 и $E_1 + \Delta_1$

щения), E_1 и $E_1 + \Delta_1$. Температурные зависимости длин волн λ_0 , λ_1 и λ_2 , соответствующих E_0 , E_1 и $E_1 + \Delta_1$, показаны на рис. 1. Для E_1 и $E_1 + \Delta_1$ значения λ_1 и λ_2 определялись как точки максимумов $\Psi(\lambda)$, а для E_0 — по началу интерференционных осцилляций, которые возникают при $\lambda > \lambda_0$. Приведённые зависимости близки к линейным с коэффициентами наклонов $k_0 = 0,225$, $k_1 = 0,072$ и $k_2 = 0,041$ нм/°C для λ_0 , λ_1 и λ_2 соответственно, которые определяют чувствительность λ_i к изменению температуры. Эти зависимости можно использовать для определения температуры. В спектральную область эллипсометра, установленного на технологическую камеру, попадают критические точки E_0 и E_1 . При аппаратной погрешности $\delta\Psi = \pm 0,02^\circ$ положение максимума Ψ для E_1 определяется с точностью до нескольких долей нанометра, и температуру CdTe можно измерять с точностью до $\delta T = \delta\lambda/k_1 \approx \pm 3^\circ\text{C}$. Однако в процессе проведения многократных экспериментов оптические окна ввода-вывода излучения зарастают продуктами рассеяния молекулярных пучков, интенсивность света вблизи E_1 падает и указанная точность становится заметно меньше.

В этой связи большой интерес представляет другая критическая точка — край поглощения E_0 , которая демонстрирует наиболее высокую температурную чувствительность. Измерения показали, что зависимость края поглощения от температуры хорошо воспроизводится для выращиваемых эпитаксиальных плёнок CdTe, в том числе для плёнок с различной плотностью прорастающих дефектов. Край поглощения характеризуется появлением интерференционных осцилляций эллипсометрических параметров Ψ и Δ на слое CdTe, нарастающих с увеличением длины волны.

Для определения E_0 была разработана экспресс-методика, основанная на анализе огибающей этих осцилляций. На рис. 2 показан спектр параметра Ψ , измеренный вблизи края поглощения для буферного слоя CdTe ($d \approx 6$ мкм) при комнатной температуре. В некотором интервале длин волн амплитуда осцилляций растёт линейно с длиной волны, как это показано на вставке рисунка. Пересечение этой зависимости с горизонтальной осью можно принять за λ_0 и находить температуру в соответствии с калибровочной кривой рис. 1. Такой метод определения температуры был назван интерференционным. Как показал опыт, среднеквадратичный разброс температуры, определяемый таким способом, составляет несколько градусов. Метод является по сути локальным по спектру, так как в расчёт принимаются только отдельные измерения вблизи длины волны λ_0 .

В дополнение к интерференционному методу был рассмотрен также разностный метод, в котором учитывается изменение спектра на интервале длин волн между E_0 и E_1 [14].

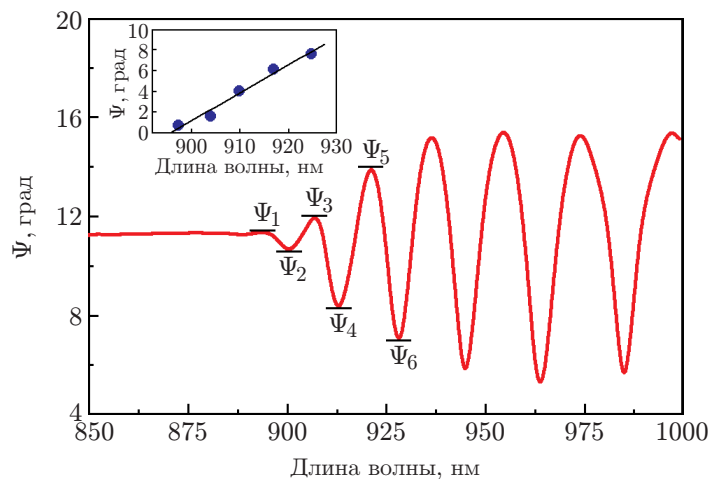


Рис. 2. Спектр $\Psi(\lambda)$ вблизи края поглощения. Значения в экстремумах обозначены как Ψ_i . На вставке показана зависимость разности $|\Psi_{j+1} - \Psi_j|$ от средней длины волны на интервале между Ψ_i и Ψ_{j+1}

На этом участке наблюдается сильное поглощение, свет не проникает до внутренней границы слоя CdTe и спектр эллипсометрического параметра Ψ зависит только от температуры. Эту зависимость при заданном значении λ можно разложить в ряд Тейлора:

$$\Psi(T, \lambda) = \Psi(T_0, \lambda) + \frac{\partial \Psi}{\partial T} (T - T_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial T^2} (T - T_0)^2 + \dots \quad (1)$$

Здесь T_0 — некоторая реперная температура, а $\Psi(T_0, \lambda)$ — измеренный при данной температуре спектр. В качестве T_0 можно выбрать комнатную температуру или любую другую при условии, что её значение известно. Экспериментальное исследование функции $\Psi(T)$ при различных значениях λ из указанного диапазона показывает, что рассматриваемая зависимость практически линейна и можно в (1) ограничиться лишь первыми двумя слагаемыми. Тогда расчётное значение температуры для заданного λ даётся выражением

$$T_\lambda = T_0 + \frac{\Psi_{\text{meas}}(\lambda) - \Psi(T_0, \lambda)}{(d\Psi/dT)|_\lambda}, \quad (2)$$

где $\Psi_{\text{meas}}(\lambda)$ — измеренный спектр при искомой температуре T . Значение T находится усреднением T_λ по всем длинам волн диапазона. Стоящая в знаменателе (2) производная была определена экспериментально как угол наклона зависимостей $\Psi(T)$, измеренных на разных длинах волн, в которых температура находилась интерференционным методом.

Разностный метод в отличие от интерференционного является интегральным по спектру и поэтому должен быть более чувствителен к температуре. Однако его абсолютная точность зависит от калибровки, которая проводится по реперному спектру. Заметим, что алгоритмы интерференционного и разностного методов могут быть построены как на основе спектров параметра Ψ , так и параметра Δ . Параметр Ψ более предпочтителен, так как он значительно в меньшей степени зависит от неконтролируемого изменения микрорельефа растущего слоя.

На рис. 3 показаны *in situ* измерения температуры интерференционным и разностным методами в процессе подготовки структуры CdTe/ZnTe/Si к эпитаксиальному росту КРТ. Эллипсометрические спектры измерялись непрерывно с интервалом 36 с. Для сравнения на рисунке приведены также показания термопары, расположенной внутри нагревательного

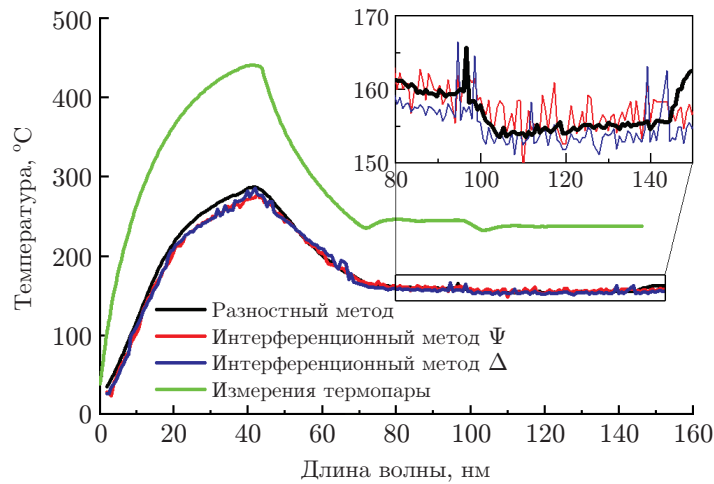


Рис. 3. Изменение температуры подложки в процессе её термической обработки перед эпитаксией КРТ. Измерения проведены разностным и интерференционным методами. На вставке приведён увеличенный фрагмент графика

элемента. Динамика изменения температуры, определяемая эллипсометрическими методами, совпадает по форме с температурным профилем термопары.

Как и ожидалось, разностный метод оказывается более чувствительным к изменению температуры. Он демонстрирует разброс в несколько раз меньший, чем при измерении интерференционным методом. С помощью разностного метода удаётся отследить слабые вариации температуры величиной $\sim 5^\circ\text{C}$. Так, изменение режима нагревателя при $t_1 = 97$ мин приводит к падению температуры, которое хорошо обнаруживается разностным методом. Последующий рост температуры при $t_2 = 145$ мин происходит из-за удаления экрана, закрывающего тепловое излучение молекулярных источников. Интерференционный метод не может обнаружить столь малые изменения из-за более высокого разброса. В то же время из сравнения результатов измерений температуры двумя методами было установлено, что интерференционный метод более устойчив к изменению угла падения и к различного рода систематическим аппаратным погрешностям. Действительно, абсолютные значения эллипсометрических параметров не столь существенны при определении начала интерференционных осцилляций. Можно резюмировать, что наилучший результат получается при совместном использовании интерференционного и разностного методов: первый обеспечивает абсолютную точность, второй — чувствительность.

Измерение температуры и состава КРТ на стадии стационарного роста. На стадии стационарного роста КРТ свет не проникает до подложки. Поэтому измеряемые спектры эллипсометрических параметров зависят только от состава КРТ и его температуры. Для получения однородных по толщине качественных слоёв необходимо поддержание обоих параметров на уровне заданных значений. В отличие от метода лазерной эллипсометрии, которая не в состоянии решить эту задачу, при спектральных измерениях в процессе роста становится возможным разделение вкладов от состава и температуры, так как разные участки спектра имеют различную чувствительность к этим параметрам. Целью эллипсометрического контроля на данной стадии является мониторинг малых изменений состава и температуры.

Сформулируем задачу следующим образом. Пусть в некоторый момент при выращивании слоя КРТ был измерен референтный спектр $\Psi_0(\lambda)$. Значение состава на поверхности и температуры в этот момент обозначим как 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 $\delta\Psi(\lambda) = \Psi_t(\lambda) - \Psi_0(\lambda)$. Решение такой задачи достигается минимизацией функционала

$$S_\Psi(\delta x, \delta T) = \sum_{\lambda} [\delta\Psi_{\text{изм}}(\lambda) - \delta\Psi_{\text{рас}}(\lambda, \delta x, \delta T)]^2, \quad (3)$$

где $\delta\Psi_{\text{изм}}$ и $\delta\Psi_{\text{рас}}$ — измеренные и рассчитанные значения разностных спектров параметра Ψ . В силу малости искомых величин расчётный спектр можно представить в линейном приближении по δx и δT :

$$\delta\Psi_{\text{расч}} = \frac{\partial\Psi}{\partial T} \delta T + \frac{\partial\Psi}{\partial x} \delta x. \quad (4)$$

Фигурирующие в (4) частные производные — это коэффициенты спектральной чувствительности параметра Ψ , зависящие от x и λ . Чтобы построить алгоритм минимизации функционала (3), необходимо задать коэффициенты чувствительности аналитически как функции состава и длины волны.

Функцию чувствительности параметра Ψ к составу можно рассчитать, воспользовавшись параметрической моделью оптических постоянных КРТ, представленной в [15]. Эта модель была получена интерполяцией экспериментальных данных, измеренных *in situ* в процессе роста серии образцов различного состава. С её помощью можно рассчитать аналитически спектры эллипсометрических параметров $\Psi(\lambda, x)$ и $\Delta(\lambda, x)$ для любого значения состава в интервале от 0,2 до 0,4. При этом чувствительность к составу находится как производная параметра Ψ : $\alpha_x = d\Psi(\lambda, x)/dx$.

Гораздо сложнее оказалось найти функцию чувствительности к температуре и представить её в параметрическом виде. С этой целью для образцов составов $x_1 = 0,160$, $x_2 = 0,235$ и $x_3 = 0,327$ были проведены две серии температурных экспериментов: *ex situ* измерения эллипсометрических спектров вблизи комнатной температуры при термоциклировании и *in situ* измерения в процессе пассивного остывания выращенных образцов. Главная проблема, которая затрудняет изучение температурной зависимости оптических постоянных КРТ *in situ*, состоит в протекании поверхностных процессов после прекращения роста [16]. Эти процессы активно продолжаются в течение нескольких минут и искажают результаты температурных измерений. Поэтому референтный спектр измерялся через 10 мин от момента начала остывания, а второй спектр — по прошествии ещё 50 мин. По оценкам, основанным на смещении положения максимума в спектре $\Psi_t(\lambda)$ вблизи критической точки E_1 , изменение температуры на этом интервале составляло приблизительно 40 град.

Для тех же образцов были выполнены аналогичные измерения *ex situ* при их нагревах на 40° относительно комнатной температуры. Многократные циклы нагрева и охлаждения показали воспроизводимость спектров при релаксации к комнатной температуре, что свидетельствует об отсутствии необратимых изменений на поверхности, которые могли бы быть вызваны повышением температуры. Основываясь на результатах *in situ* и *ex situ* экспериментов, была смоделирована и представлена в параметрическом виде функция чувствительности эллипсометрического параметра Ψ к температуре для произвольных значений состава и длины волны: $\alpha_T(\lambda, x) = \delta\Psi(\lambda, x)/40^\circ$.

На рис. 4 показаны функции чувствительности параметра Ψ к составу (нормирована на $\delta x = 0,001$) и к температуре (нормирована на 1 °C), рассчитанные для состава $x = 0,24$ по соответствующим параметрическим моделям. Кривые симметричны по форме, но между ними есть существенное отличие. Кривая $\alpha_x(\lambda)$ — постоянная 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.

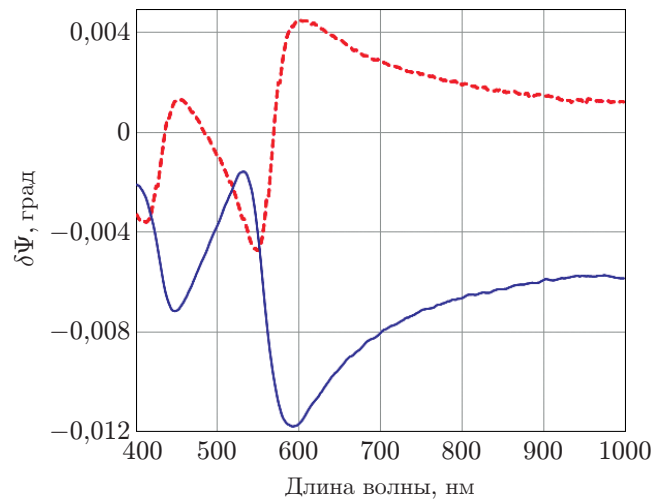


Рис. 4. Чувствительности параметра Ψ к составу $\alpha_x(\lambda)$ (сплошная кривая) и к температуре $\alpha_T(\lambda)$ (пунктирная кривая) для КРТ состава $x = 0,24$. Кривые нормированы: $\alpha_x(\lambda)$ на 0,001 изменения состава, $\alpha_T(\lambda)$ — на 1°C

Следовательно, рассматриваемые функции линейно независимы: состав и температура не могут взаимно компенсировать изменения спектра $\Psi(\lambda)$. Это указывает на возможность разделения вкладов от температуры и от состава в экспериментально измеренных спектрах параметра Ψ .

Для тестирования рассматриваемой методики были проведены два эксперимента и выращены два тестовых слоя КРТ составов $x_1 = 0,24$ (образец 1) и $x_2 = 0,34$ (образец 2). Заданное значение состава контролировалось измерениями параметра Ψ на лазерном эллипсометре, 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 её предэпитаксиальной термической обработки.

На рис. 5 показан один из разностных спектров $\delta\Psi$ тестового образца 1 (референтный спектр $\Psi_0(\lambda)$ измерялся перед падением напряжения на нагревателе, исследуемый спектр — через 1600 с после измерения референтного) и расчётная кривая, полученная по формуле (4) для оптимальных значений $\delta T = -8^\circ\text{C}$, $\delta x = -0,0035$, доставляющих минимум функционала (3). Расчётная кривая достаточно хорошо согласуется с экспериментом. Динамика изменения разностных спектров, наблюдаемая после изменения температурного режима нагревателя, показана на вставке. Путём обработки всех разностных спектров по вышеописанному алгоритму были получены зависимости δT и δx от времени, которые показаны на рис. 6.

Вместе с изменением температуры образца, которое происходит из-за понижения напряжения на нагревателе, наблюдается также монотонное изменение состава растущего слоя КРТ. Полученные изменения температуры качественно согласуются с показаниями термопары, регистрирующей температуру нагревателя. Уменьшение состава 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

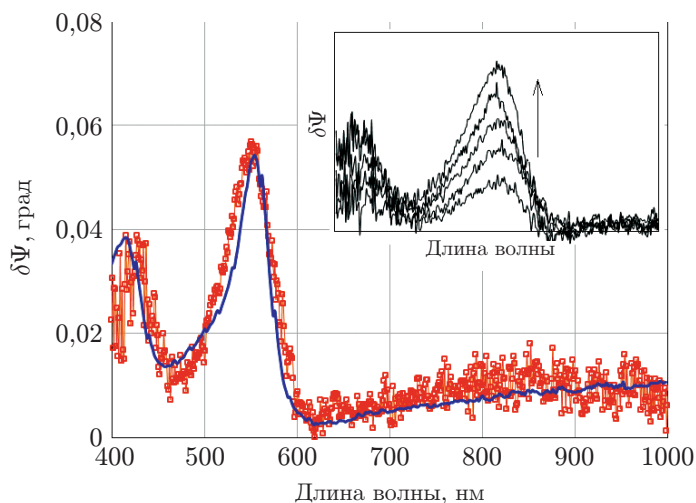


Рис. 5. Измеренный спектр $\delta\Psi$ (символы) и расчётная кривая, полученная для оптимизированных значений $\delta T = -8^\circ\text{C}$, $\delta x = -0,0035$ (сплошная кривая). На вставке показана динамика изменения спектров в области критических точек после падения напряжения на нагревателе. Стрелка показывает последовательность спектров по времени

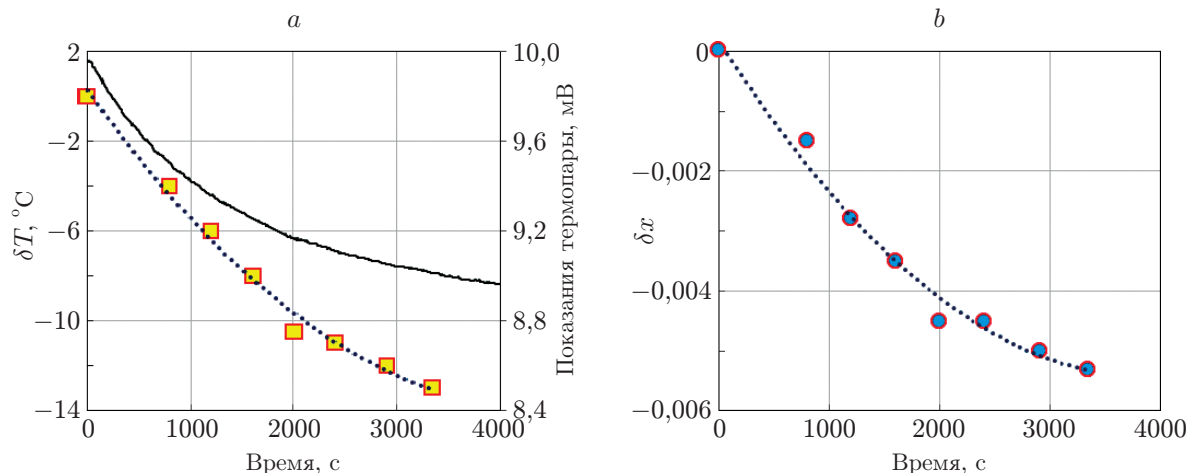


Рис. 6. Изменение искомых параметров в процессе роста тестового образца после падения напряжения на нагревателе: температуры (а) и состава (b). Символы — данные, полученные минимизацией функционала (3), точечные кривые — линии тренда для символов. Сплошная кривая на рисунке (а) — показания термопары

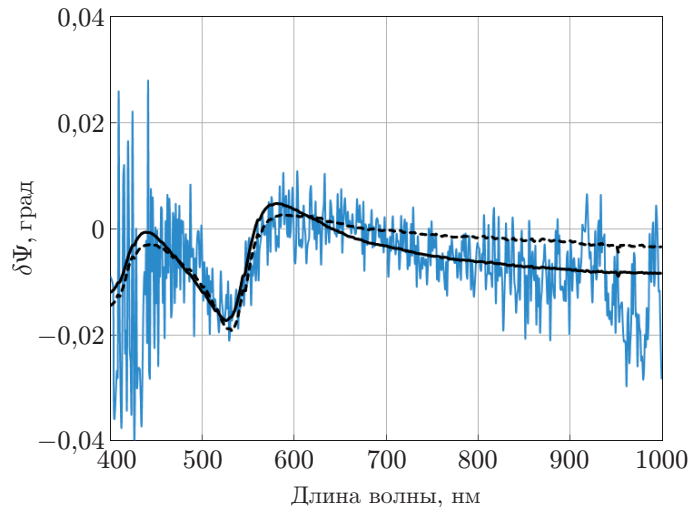


Рис. 7. Разностный спектр тестового образца 2 (зашумлённая кривая) и его моделирование изменением температуры, состава и угла падения. Пунктирная кривая: $\delta T = 4$ °C, $\delta x = 0,001$, $\delta \varphi = 0$. Сплошная кривая: $\delta T = 2,5$ °C, $\delta x = -0,0006$, $\delta \varphi = 0,01$

ртути на поверхности, что может привести к смещению кинетического равновесия реакций в сторону понижения состава.

Анализ эллипсометрических спектров, полученных в процессе выращивания образца 2 при постоянном режиме работы нагревателя, обнаруживает слабое возрастание температуры. В измеренных на этом образце разностных спектрах, как и в спектрах образца 1, проявляется особенность вблизи критической точки E_1 , свидетельствующая об изменении температуры. Однако в отличие от образца 1 вблизи E_1 при $\lambda = 530$ нм наблюдается не максимум функции $\delta\Psi(\lambda)$, а минимум, который с течением времени проявляется всё более отчётливо 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 полтора часа после измерения референтного. Моделирование проводилось для двух вариантов: с вариацией только температуры и состава при постоянном угле падения (пунктирная кривая) и с вариацией всех трёх переменных: температуры, состава и угла падения (сплошная кривая). Во втором случае наблюдается лучшее совпадение с экспериментом.

Обнаруженное возрастание температуры может быть вызвано как изменением излучательной способности образца, так и дополнительным тепловым потоком от молекулярных источников, который появляется с началом роста.

Заключение. Температура роста является ключевым параметром в технологии МЛЭ КРТ. Метод спектральной эллипсометрии позволяет измерять температуру поверхности образца на различных стадиях выращивания слоёв КРТ. Для этого разработан комплекс эллипсометрических методик, с помощью которых можно проводить диагностику и управление температурными режимами как на стадии подготовки к эпитаксии, так и на этапе стационарного роста слоёв. Чувствительность методик составляет от нескольких градусов до долей градуса. Их применение позволяет добиться воспроизводимой технологии выращивания высококачественных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Garland J.** MBE Growth of Mercury Cadmium Telluride // Mercury Cadmium Telluride. Growth, Properties and Applications. Eds. P. Capper, J. Garland. Wiley, 2011. P. 131–150.
2. **Garland J. W., Sivananthan S.** Molecular-Beam Epitaxial Growth of HgCdTe // Springer Handbook of Crystal Growth. Eds. G. Dhanaraj, K. Byrappa, V. Prasad, M. Dudley. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. P. 1069–1132.
3. **Olson G. L., Roth J. A., Brewer P. D. et al.** Integrated multi-sensor system for real-time monitoring and control of HgCdTe MBE // Journ. Electron. Mater. 1999. **28**, Iss. 6. P. 749–755.
4. **Sabinina I. V., Gutakovskiy A. K., Sidorov Y. G., Latyshev A.** Nature of V-shaped defects in HgCdTe epilayers grown by molecular beam epitaxy // Journ. Cryst. Growth. 2005. **274**. P. 339–346.
5. **Бахтин П. А., Варавин В. С., Дворецкий С. А. и др.** Анизотропия проводимости плёнок $Cd_xHg_{1-x}Te$ с периодическим микрорельефом поверхности, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2002. **38**, № 2. С. 83–91.
6. **Азаров И. А., Швец В. А., Дулин С. А. и др.** Поляризационная пирометрия слоистых полупроводниковых структур в условиях низкотемпературных технологических процессов // Автометрия. 2017. **53**, № 6. С. 111–120. DOI: 10.15372/AUT20170612.
7. **Daraselia M., Grein C. H., Rujirawat S. et al.** *In-Situ* monitoring of temperature and alloy composition of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ using FTIR spectroscopic techniques // Journ. Electron. Mater. 1999. **28**, N 6. P. 743–748.
8. **Schlereth R., Hajer J., Fürst L. et al.** Band edge thermometry for the MBE growth of (Hg,Cd)Te-based materials // Journ. Cryst. Growth. 2020. **537**. 125602.
9. **Almedia L. A., Dhar N. K., Martinka M., Dinan J. H.** HgCdTe ellipsometric control of substrate temperature // Journ. Electron. Mater. 2000. **29**, N 6. P. 754–759.
10. **Азаров И. А., Марин Д. В., Швец В. А., Якушев М. В.** О возможностях контроля температуры CdTe в методе МЛЭ с помощью эллипсометра // Тезисы рос. конф. по актуальным проблемам фотэлектроники (ФОТОНИКА-2017). Новосибирск, 11–15 сент., 2017. С. 119.
11. **Спесивцев Е. В., Рыхлицкий С. В., Швец В. А.** Развитие методов и средств оптической эллипсометрии в Институте физики полупроводников СО РАН // Автометрия. 2011. **47**, № 5. С. 5–12.
12. **Аззам Р., Башара Н.** Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 580 с.
13. **Швец В. А., Азаров И. А., Марин Д. В. и др.** Эллипсометрический метод измерения температуры буферных слоёв CdTe в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии CdHgTe // ФТП. 2019. **53**, № 1. С. 132–137.
14. **Marin D. V., Shvets V. A., Azarov I. A. et al.** Ellipsometric thermometry in molecular beam epitaxy of mercury cadmium telluride // Infrar. Phys. & Technol. 2021. **116**. 103793.
15. **Швец В. А., Марин Д. В., Ремесник В. Г. и др.** Параметрическая модель спектров оптических постоянных $Hg_{1-x}Cd_xTe$ и определение состава соединения // Оптика и спектроскопия. 2020. **128**, вып. 12. С. 1815–1820.
16. **Бабенко А. А., Брунев Д. В., Сидоров Ю. Г. и др.** Взаимодействие паров кадмия с поверхностью слоёв $Cd_xHg_{1-x}Te$ при их выращивании на подложках GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Неорганические материалы. 2008. **44**, № 4. С. 431–435.

Поступила в редакцию 04.08.2021

После доработки 16.08.2021

Принята к публикации 23.08.2021