

В. А. ШВЕЦ, С. В. РЫХЛИЦКИЙ, Е. В. СПЕСИВЦЕВ, Н. Н. МИХАЙЛОВ

## ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ВЫРАЩИВАЕМЫХ НАНОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Приведены результаты по исследованию и разработке аппаратурных средств и методик эллипсометрического контроля *in situ* параметров гетероструктур, выращиваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии, на основе тройного соединения  $Cd_xHg_{1-x}Te$ . Представлены экспериментальные результаты и модельные расчеты, которые демонстрируют возможность контролируемо выращивать наноструктуры, сформированные из однородных по составу слоев, а также с заранее заданным распределением состава по толщине растущего слоя.

**Ключевые слова:** эллипсометрия, контроль *in situ*, молекулярно-лучевая эпитаксия, наноструктуры, кадмий—ртуть—теллур.

**Введение.** Тройное соединение кадмий—ртуть—теллур (КРТ)  $Cd_xHg_{1-x}Te$  — по видимому, наиболее перспективный материал для создания фоточувствительных структур дальнего ИК-диапазона спектра [1]. Ширина запрещенной зоны КРТ изменяется от 0 до 1,5 эВ в зависимости от процентного содержания кадмия. Эта особенность позволяет выращивать в едином технологическом процессе варизонные структуры с уникальными физическими свойствами. Технологической основой создания таких структур служит метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Он позволяет формировать как тонкие однородные слои нанометровой толщины заданного состава, так и градиентные по составу структуры. Для выращивания этих структур требуется надежный метод контроля, а эллипсометрия позволяет следить за изменениями состава и управлять процессом роста в режиме реального времени.

Задачу эллипсометрического контроля можно сформулировать следующим образом: необходимо определить распределение состава растущей структуры по глубине  $x(z)$  на основе измеренных в процессе роста эллипсометрических параметров  $\Psi(t)$  и  $\Delta(t)$  (здесь  $z$  — координата по нормали к поверхности структуры).

Использован одноволновой метод эллипсометрии, он имеет максимальную чувствительность к составу в области длины волны He—Ne-лазера. Учитывая при этом более высокие точностные характеристики лазерного эллипсометра, можно полагать, что он может успешно конкурировать со спектральным методом.

Однако главное преимущество лазерной эллипсометрии заключается в ее быстродействии. Действительно, при скорости роста  $\sim 1$  мкм/ч формирование активной области наноструктуры происходит за время 10—30 с, характерное время измерения эллипсометрического спектра имеет тот же порядок, и этого быстродействия явно недостаточно для эффективного контроля. Следует отметить, что применение спектроэллипсометра предполагает измерение больших массивов экспериментальных данных, обработка которых в режиме реального времени затруднена.

Ниже приведены результаты по исследованию и разработке аппаратурных средств и методов эллипсометрического контроля состава КРТ в процессе формирования гетероструктур с помощью МЛЭ.

**Оптическая схема и функциональные особенности статического лазерного эллипсометра.** Для контроля роста гетероструктур КРТ был разработан встраиваемый быстродействующий лазерный эллипсометр ЛЭФ-755. В основу прибора положена оригинальная оптическая схема статических измерений [2]. Ее особенность состоит в том, что в процессе изме-

рений *in situ* поляризационные элементы не вращаются, и модуляция сигналов отсутствует. Измеряются четыре сигнала, по которым рассчитываются эллипсометрические параметры структуры. Достоинство такой схемы заключается в том, что время измерения ограничивается только временем считывания и оцифровки сигналов, что дает возможность накапливать данные с целью усреднения для повышения точности измерений.

Эллипсометр состоит из двух оптико-механических модулей: излучающего плеча поляризатора и приемного плеча анализатора, которые крепятся непосредственно на камеру МЛЭ таким образом, чтобы излучение лазера проходило через оптический вход камеры. Излучающее плечо поляризатора включает в себя источник света и поляризатор. В качестве источника света используется высокостабильный He—Ne-лазер с рабочей длиной волны 632,8 нм и мощностью излучения 2 мВт.

Поляризатор формирует линейно поляризованный пучок света, изменение состояния поляризации которого после отражения от поверхности пленки гетероэпитаксиальной структуры КРТ подлежит измерению в приемном плече анализатора. В качестве поляризатора используется призма Глана с воздушным промежутком.

Оптическая схема прибора показана на рис. 1. Излучаемый лазером 1 световой пучок линейно поляризуется призмой 2 и отражается от поверхности измеряемой структуры 3. Две диафрагмы 4 вырезают два узких пучка света, отраженных от поверхности образца под равными углами. Далее на пути световых пучков располагается компенсатор 5, представляющий собой термостабилизированное устройство, состоящее из двух фазосдвигающих пластинок, разность фазового сдвига между которыми равна  $\pi/2$ . Пластинки ориентированы между собой таким образом, что „быстрая“ ось одной совпадает с „медленной“ осью другой. Такое устройство обеспечивает стабильность измерений при изменении температуры воздуха вокруг прибора. Обе пластинки имеют форму диска с отверстием в центральной части, для того чтобы один из пучков проходил через эти отверстия без изменений поляризации, в то время как другой претерпевал бы относительный фазовый сдвиг, равный приблизительно  $90^\circ$ . Далее оба световых пучка расщепляются призмой Волластона 6 на две ортогонально поляризованные компоненты, которые засвечивают фоточувствительные площадки четырехэлементного фотоприемника 7, с выходов фотоприемника снимаются сигналы  $I_1, I_2, I_3$  и  $I_4$ . В процессе измерения поляризационные элементы могут фиксироваться в положениях: поляризатор  $P = +45^\circ$  или  $-45^\circ$ , компенсатор  $C = 45^\circ$  или  $0^\circ$ , анализатор  $A = 0^\circ$  или  $45^\circ$ .

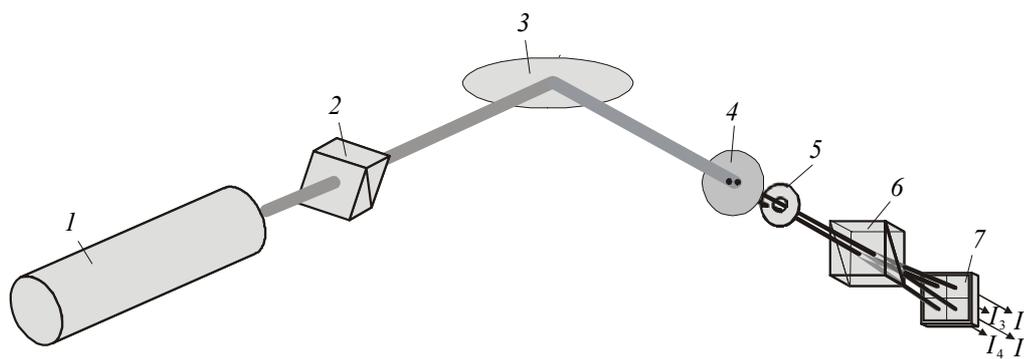


Рис. 1

По измеренным сигналам  $I_1, I_2, I_3$  и  $I_4$  вычисляются эллипсометрические параметры образца  $\Psi$  и  $\Delta$ . Альтернативные положения поляризационных элементов предусмотрены для исключения систематических ошибок и снятия неоднозначности в измерениях. Так, комбинация элементов  $P = 45^\circ, C = 45^\circ, A = 0^\circ$  дает следующие соотношения между измеренными сигналами и эллипсометрическими параметрами:

$$\cos 2\Psi = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}; \quad (1)$$

$$\sin 2\Psi \sin \Delta = \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4}. \quad (2)$$

В этом случае области однозначного определения эллипсометрических параметров лежат в границах:  $\Psi \{0; 90^\circ\}$ ,  $\Delta \{90; 270^\circ\}$ . Области максимальной чувствительности: для значений  $\Delta$  — в окрестностях  $180^\circ$  или  $0^\circ$ , для значений  $\Psi$  — в окрестности  $45^\circ$ .

Комбинация элементов  $P = 45^\circ$ ;  $C = 0^\circ$ ;  $A = 45^\circ$  связывает сигналы с эллипсометрическими параметрами выражениями

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{(I_3 - I_4)(I_1 + I_2)}{(I_3 + I_4)(I_1 - I_2)}; \quad (3)$$

$$\sin^2 2\Psi = \left( \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \right)^2 + \left( \frac{I_3 - I_4}{I_3 + I_4} \right)^2. \quad (4)$$

В этом случае области однозначного определения эллипсометрических параметров лежат в границах:  $\Psi \{0; 45^\circ\}$ ,  $\Delta \{0; 360^\circ\}$ . Области максимальной чувствительности: для значений  $\Psi$  — в окрестности  $0$  и  $90^\circ$ , для значений  $\Delta$  чувствительность одинакова во всем диапазоне значений от  $0$  до  $360^\circ$ . Таким образом, выбирая ту или иную комбинацию элементов, можно подобрать условия измерений, обеспечивающие максимальную чувствительность и диапазон однозначного определения эллипсометрических параметров из выражений (1)—(4).

С целью повышения точности измерений за счет увеличения отношения сигнал/шум в электронной схеме обработки сигналов применена схема дифференциального включения, в которой измеряются и усиливаются не сами сигналы  $I_1$  и  $I_2$  ( $I_3$  и  $I_4$ ), а непосредственно их разность и сумма. В электронном тракте обработки сигналов применяются малозумящие операционные усилители с автоматической сменой коэффициента усиления от 1 до 1000 с шагом 10 по логарифмической шкале. Смена коэффициента усиления задается автоматически исходя из условия насыщения сигнала. Усиленные сигналы направляются в 14-разрядный АЦП, представляющий собой многофункциональное устройство L761, размещаемое на материнской плате компьютера. Дополнительно АЦП выдает цифровые коды на управление операционными усилителями.

**Контроль при выращивании слоев постоянного состава.** При измерении состава использована сильная зависимость оптических постоянных КРТ от состава на длине волны He—Ne-лазера  $\lambda = 632,8$  нм. По результатам проведенных ранее измерений [3, 4] были получены следующие эмпирические зависимости для оценки показателей преломления  $n$  и поглощения  $k$  от состава КРТ при комнатной температуре:

$$n(x) = 3,907 - 1,052x + 0,16x^2; \quad (5)$$

$$k(x) = 1,186 - 1,481x + 0,53x^2. \quad (6)$$

Для температуры роста  $190$ — $200$  °С эти данные были скорректированы с учетом температурных коэффициентов, измеренных в работе [5]. Для эллипсометрических параметров можно рассчитать аналогичные зависимости  $\Psi(x)$  и  $\Delta(x)$  на основании соотношений (5) и (6) с использованием модели полубесконечной среды. Было установлено, что от состава в большей степени зависит параметр  $\Psi$ , в то время как зависимость  $\Delta(x)$  слабее, кроме того, значение  $\Delta$  также зависит от рельефа поверхности. Используя в качестве калибровочной кривой зависимость  $\Psi(x)$ , можно выращивать слои заданного состава с точностью не менее  $\pm 0,002$  мольных долей. Такой контроль позволил получать однородные по составу структуры, пригодные для создания фотоприемных устройств дальнего ИК-диапазона.

При выращивании тонких нанослоев состав КРТ изменяется скачком на величину  $\delta x$ . При этом за счет френелевского отражения на границе раздела возникают интерференционные осцилляции эллипсометрических параметров, которые в плоскости  $\Psi$ – $\Delta$  из-за поглощения света представляют собой сворачивающуюся спираль.

На рис. 2 показаны такие кривые, рассчитанные для различных значений  $\delta x$ . Точка  $S$  соответствует результатам измерения  $\Psi$ ,  $\Delta$  на поверхности пленки КРТ достаточно большой толщины (больше глубины проникновения света —  $\approx 100$  нм) и постоянного состава  $x_0 = 0,3$ . Амплитуда размаха спиральных кривых пропорциональна величине  $\delta x$ , и их центральные точки представляют собой калибровочную кривую (пунктир), соответствующую отмеченной выше зависимости эллипсометрических параметров от состава.

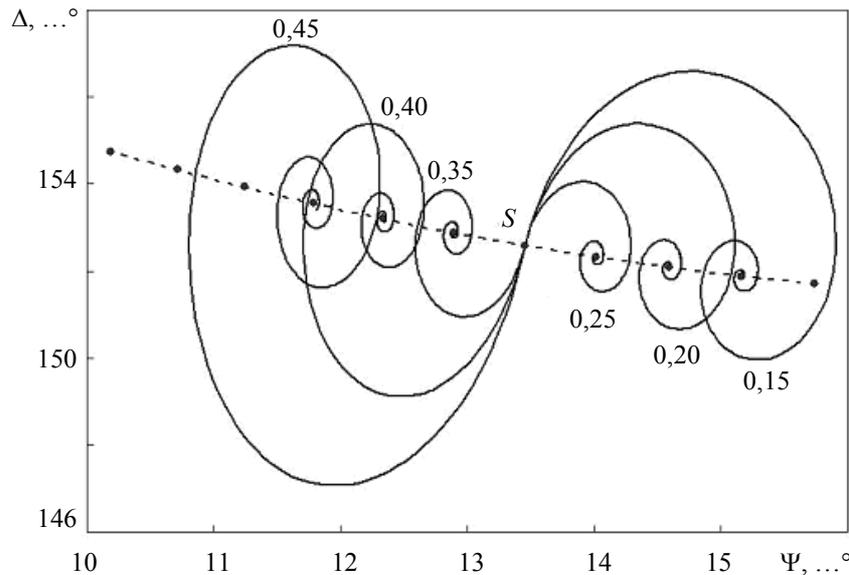


Рис. 2

С помощью приведенных кривых легко представить поведение эллипсометрических параметров при росте потенциального барьера или ямы. В этом случае имеется две ступеньки в профиле состава, и соответствующая траектория эллипсометрических параметров  $\Psi$  и  $\Delta$  будет составлена из участков двух спиральных кривых; форма кривых будет определяться составом, а их протяженность — толщиной выращиваемых слоев.

На рис. 3 показана траектория эллипсометрических параметров, измеренная при незначительном уменьшении на короткое время ( $\sim 14$  с) потока теллура за счет частичного перекрытия его молекулярного источника. Экспериментальные результаты показаны символами, интервалы между измерениями составляют 1 с. Начало изменений (точка  $S$ ) соответствует стационарному росту КРТ с составом  $x_0 = 0,422$ . После перекрытия потока  $Te$  наблюдается быстрое изменение параметров  $\Psi$ ,  $\Delta$  вдоль линии  $SA$ . В соответствии с проведенным выше моделированием участок  $SA$  представляет собой фрагмент спиральной кривой, соответствующей росту барьерного слоя. Из сравнения с расчетными кривыми (пунктирные линии на рисунке, числа возле кривых показывают состав слоя) получаем, что состав барьерного слоя  $x = 0,449$ , а погрешность его определения  $\delta x = \pm 0,002$ . Толщина слоя определяется длиной кривой  $SA$  и составляет  $16,2 \pm 0,1$  нм. После восстановления потока  $Te$  наблюдается излом в траектории эллипсометрических параметров в точке  $A$  (окончание роста слоя), которые продолжают изменяться вдоль другой спиральной кривой, сворачивающейся к исходной точке  $S$ .

Хорошее совпадение расчетной кривой с экспериментом, которое наблюдается после восстановления потока  $Te$  (участок спирали  $AS$ ), доказывает, что растет однородный слой постоянного состава. Незначительное расхождение соответствует изменению состава всего в

несколько тысячных мольных долей. Излом экспериментальной траектории в точке  $A$  свидетельствует о ступенчатом изменении состава: верхняя оценка толщины переходного слоя не превышает 0,5 нм. Восстановленный по эллипсометрическим измерениям профиль состава  $x(z)$  схематично показан на вставке к рис. 3.

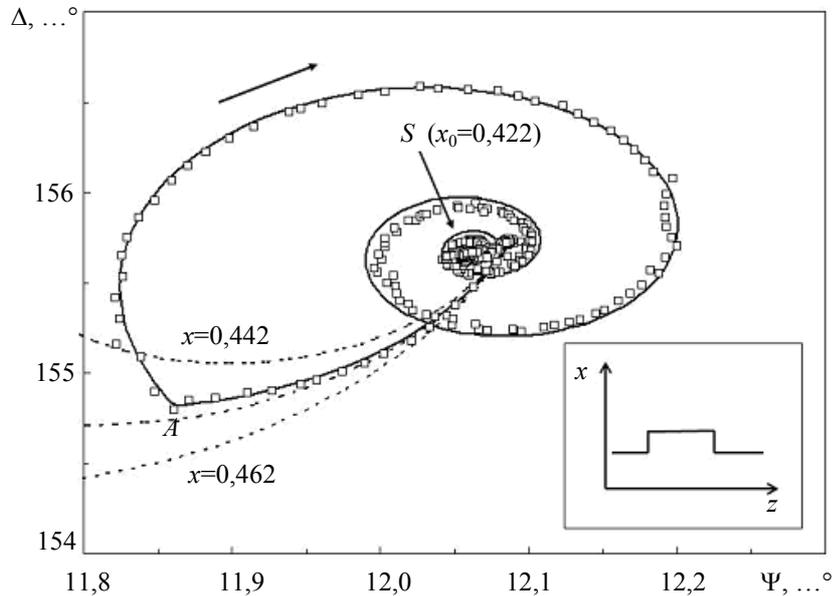


Рис. 3

Аналогичным образом удастся контролируемо выращивать различные структуры, состоящие из одного или нескольких однородных по составу слоев, обладающие уникальными характеристиками [6, 7], в том числе и периодические структуры [8].

**Контроль градиентных слоев переменного состава.** Другой пример неоднородных структур — градиентные слои переменного состава. Задача эллипсометрического контроля остается той же, что и при выращивании слоев с резкой границей — определение в реальном времени состава растущего слоя. В отличие от слоистых структур интерпретация измерений для неоднородных слоев оказывается более сложной.

В случае малого градиента состава ( $dx/dz \ll 1/\lambda$ ) отражение света происходит, главным образом, от верхней границы раздела, поэтому отраженный пучок несет информацию о составе приповерхностной области. При этом измеряемые эллипсометрические параметры пересчитываются в состав по модели полубесконечной среды, как это описано в предыдущем разделе для толстых непрозрачных слоев. Однако наиболее интересным и важным является случай, когда градиент  $dx/dz \approx 1/\lambda$  и больше. При таких значениях градиента в состояние поляризации отраженного света существенный вклад вносят парциальные волны, отраженные от внутренних областей неоднородного слоя.

На рис. 4 показаны результаты численных расчетов, имитирующих поведение эллипсометрических параметров при росте градиентных слоев. В качестве исходных были выбраны три профиля (а) с линейной зависимостью состава  $x(z)$  и с тремя различными градиентами:  $dx/dz = 2$  (кривые 1), 1,5 (2) и 1 (3). Для этих профилей рассчитывались соответствующие зависимости  $\Psi(z)$  и  $\Delta(z)$ , которые показаны на рис. 4, б и в символами (для этого градиентный слой разбивался на большое количество однородных подслоев); сплошными линиями показаны также зависимости  $\bar{\Psi}(z)$  и  $\bar{\Delta}(z)$ , рассчитанные для френелевской границы раздела „внешняя среда—среда с комплексным показателем преломления  $N(z)$ “, т. е. в пренебрежении парциальными волнами:  $\text{tg} \bar{\Psi} e^{i\bar{\Delta}} = r_p(z)/r_s(z)$ . Стрелками отмечены особенности в поведении эллипсометрических параметров в точках излома профилей  $x(z)$ .

Из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

- излом в профиле состава приводит к появлению затухающих интерференционных осцилляций, главным образом, параметра  $\Delta$ ;
- амплитуды осцилляций пропорциональны величине изменения градиента в точке излома;
- после затухания осцилляций эллипсометрический параметр  $\Psi(z)$  становится равным  $\bar{\Psi}(z)$ , в то время как  $\Delta(z) = \bar{\Delta}(z) - \delta\Delta$ , где сдвиг  $\delta\Delta$  пропорционален градиенту состава;
- для слоев с градиентом  $dx/dz < 0,5$  интерференцией можно пренебречь, и эллипсометрические параметры равны  $\bar{\Psi}$  и  $\bar{\Delta}$ , т. е. полностью определяются составом верхнего слоя.

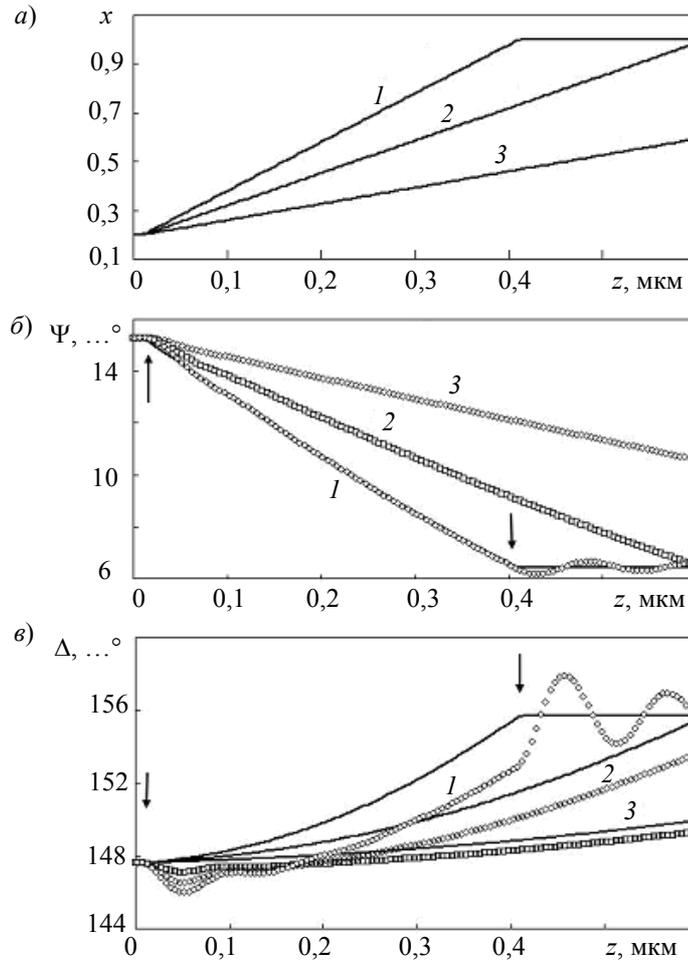


Рис. 4

Для объяснения отмеченных выше закономерностей рассмотрим достаточно толстый (по сравнению с глубиной проникновения света) слой, для которого комплексный показатель преломления изменяется с толщиной по линейному закону:  $N(z) = N_0 + \beta z$ , где  $\beta = dN/dz$  — постоянная величина. По мере роста слоя комплексные коэффициенты отражения  $R_{p,s}$  будут изменяться, и их зависимость от координаты  $z$  можно записать в следующем виде:

$$R_{p,s}(z) = (1 + \alpha_{p,s})r_{p,s}(z),$$

где  $\alpha_{p,s} \ll 1$  — слабо меняющаяся функция координаты  $z$ ,  $r_{p,s}(z)$  — коэффициенты Френеля для границы раздела „внешняя среда—среда с показателем преломления  $N(z)$ “. Тогда в рассматриваемом приближении для производной коэффициентов отражения будет

$$\frac{dR_{p,s}}{dz} = (1 + \alpha_{p,s}) \frac{dr_{p,s}}{dz}. \tag{7}$$

С другой стороны, производную от коэффициентов отражения можно найти в явном виде, если выразить приращение  $dR$  при нанесении слоя толщины  $dz$  с показателем преломления  $N(z)$  на подложку с коэффициентом отражения  $R(z)$ . Используя итерационные формулы для однослойной системы [9] и опуская для простоты здесь и ниже индексы „ $p$ “ и „ $s$ “, запишем:

$$R(z + \delta z) = \frac{r[1 - rR(z)] + [R(z) - r]X}{1 - rR(z) + r[R(z) - r]X}, \quad (8)$$

где

$$X = \exp\left(-i \frac{4\pi\delta z}{\lambda} \sqrt{N^2(z) - \sin^2\varphi}\right),$$

$\varphi$  — угол падения света, а коэффициенты Френеля берутся для координаты  $z$ . После некоторых преобразований из (7), (8) получаем для  $\alpha_{p,s}$  следующие выражения:

$$\alpha_p = i \frac{\beta\lambda N \cos\varphi}{2\pi(N^2 - \sin^2\varphi)} \cdot \frac{N^2 - 2\sin^2\varphi}{N^4 \cos^2\varphi - N^2 + \sin^2\varphi}; \quad \alpha_s = i \frac{\beta\lambda N \cos\varphi}{2\pi(N^2 - \sin^2\varphi)(N^2 - 1)}.$$

Наконец, для эллипсометрических параметров получим

$$\operatorname{tg}\Psi e^{i\Delta} = \operatorname{tg}\bar{\Psi} e^{i\bar{\Delta}} (1 + \alpha_p - \alpha_s) = \operatorname{tg}\bar{\Psi} e^{i\bar{\Delta}} \left[ 1 + i \frac{\beta\lambda N \cos\varphi}{2\pi(N^2 - \sin^2\varphi)} \frac{(N^2 - 1)\sin^2\varphi}{N^4 \cos^2\varphi - N^2 + \sin^2\varphi} \right].$$

Для КРТ абсолютное значение показателя преломления  $|N| \approx 3-4$ , поэтому обе величины  $\alpha_p$  и  $\alpha_s$  остаются малыми даже в случае относительно большого градиента, когда  $\beta\lambda \approx 1$ . Обращает внимание, что второе слагаемое в скобках последнего выражения для заданного диапазона значений  $N$  и угла падения  $\varphi$  — мнимая величина. Это объясняет сдвиг параметра  $\Delta$  по отношению к  $\bar{\Delta}$  для градиентного слоя КРТ и одновременно неизменность параметра  $\Psi$ .

Проведенное выше рассмотрение позволяет сформулировать простое правило, пригодное для контроля состава в процессе роста градиентных слоев. Если градиент состава  $dx/dz$  порядка  $1/\lambda$  или меньше, то после затухания интерференционных осцилляций, вызванных скачком градиента, параметр  $\Psi$  соответствует текущему значению состава растущего слоя. Иначе говоря, для таких градиентных слоев состав можно по-прежнему рассчитывать по модели полубесконечной среды, как это делалось для однородных слоев. В то же время параметр  $\Delta$  оказывается заниженным по сравнению со значением  $\bar{\Delta}$  для текущего состава, и этот сдвиг пропорционален величине градиента. В работах [3, 4] было показано, что параметр  $\Delta$  может служить критерием качества растущей поверхности КРТ: появление поверхностного рельефа приводит к уменьшению  $\Delta$ . При росте градиентного слоя в качестве индикатора шероховатости по-прежнему можно использовать измеренное значение  $\Delta$  после его коррекции.

Представленная методика контроля использовалась при выращивании поверхностного барьерного слоя КРТ на финишной стадии создания фоточувствительной структуры. Барьерный слой позволяет уменьшить поверхностную рекомбинацию и увеличить время жизни неосновных носителей. При этом изменение состава должно быть плавным, чтобы избежать образования ростовых дефектов.

На рис. 5, а показано поведение эллипсометрических параметров  $\Psi$  (кривая 1) и  $\Delta$  (кривая 2) при росте градиентного барьерного слоя. Вертикальной стрелкой отмечен момент перекрытия потока теллура (начало роста слоя). После этого значение параметра  $\Psi$  начинает уменьшаться, в то время как для параметра  $\Delta$  на начальной стадии наблюдаются немонотонные изменения вследствие интерференционных колебаний. Последующее уменьшение  $\Delta$  вызвано ростом градиентного слоя и согласуется с теми результатами, которые обсуждались выше.

Профиль изменения состава, полученный после обработки эллипсометрических данных, представлен на рис. 5, б. Сначала наблюдается медленное изменение состава, а к моменту окончания роста градиент состава достигает максимального значения —  $dx/dz = 1,3 \text{ мкм}^{-1}$ . При этом безразмерный параметр, характеризующий величину градиента,  $\lambda(dx/dz) = 0,82$ , что подтверждает применимость рассмотренной выше методики к данному примеру.

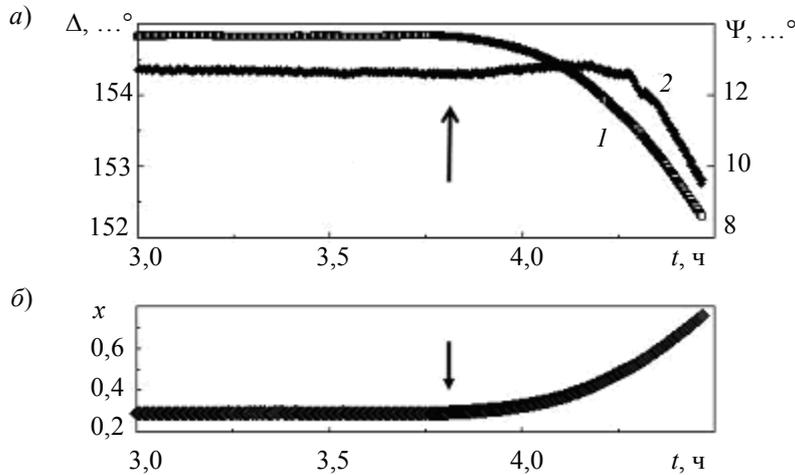


Рис. 5

**Наноструктуры с большим градиентом состава.** Уникальные возможности технологии МЛЭ КРТ позволяют выращивать квантовые наноструктуры с произвольно заданным профилем состава. Значительный интерес представляют квантовые ямы с асимметричным градиентным распределением состава. При толщине таких структур в несколько десятков нанометров и диапазоне изменения состава порядка единицы безразмерный параметр  $\lambda(dx/dz)$ , характеризующий градиент, оказывается порядка десяти и выше. В этом случае полученные в предыдущем разделе результаты оказываются неприменимы, и необходимо искать другие подходы для интерпретации эллипсометрических измерений.

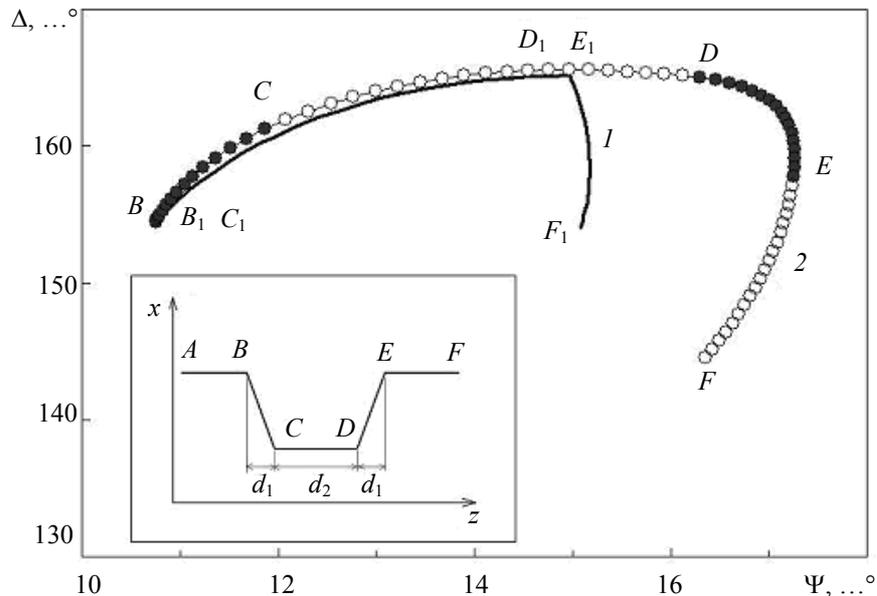


Рис. 6

Проблемы, которые возникают при контроле состава таких структур, легко пояснить на примере численного моделирования. На рис. 6 представлены траектории эллипсометрических параметров при выращивании гетероструктуры, изображенной на вставке. Кривая 1 ( $B_1C_1D_1E_1F_1$ ) показывает траекторию изменения эллипсометрических параметров при росте

структуры с резкими границами ( $d_1 = 0$ ). Кривая 2 ( $BCDEF$ ) рассчитана для структуры с градиентным изменением состава ( $d_1 = 8$  нм). Задача эллипсометрического контроля в данном случае состоит в измерении градиента состава на участке  $BC$ . Однако из рисунка хорошо видно, что кривая  $BC$  для градиентного участка почти совпадает с кривой  $C_1D_1$  для дна ямы с резкими границами. При изменении градиента смещается только конечная точка  $C$ , но форма кривой  $BC$  изменяется слабо. Кроме того, точка  $C$ , соответствующая переходу от градиентного участка к дну ямы, на экспериментальной кривой никак не выделена, в отличие от кривой  $BCDEF$ , где в точке  $D_1$  ( $E_1$ ) наблюдается излом, служащий своего рода маркером границы раздела.

Такое изменение эллипсометрических параметров можно пояснить. Направление кривой для эллипсометрических параметров в плоскости  $\Psi$ – $\Delta$  характеризуется производной  $d\Delta/d\Psi$ . В работе [10] показано, что производная  $d\Delta/d\Psi$  при росте оптически неоднородных структур является функцией текущего значения комплексного показателя преломления  $N = n - ik$  (в нашем случае — функцией текущего значения состава, так как и показатель преломления  $n$ , и показатель поглощения  $k$  зависят от состава КРТ). Аналогично вторая производная  $d^2\Delta/d\Psi^2$  зависит от показателя преломления и его градиента в точке измерения. Принимая во внимание, что оптические постоянные связаны с составом эмпирическими формулами (5), (6), получим для производных:  $d\Delta/d\Psi = G_1(x)$  и  $d^2\Delta/d\Psi^2 = G_2(x, x')$ , где  $x'$  — градиент состава, а  $G_1$  и  $G_2$  — явные функции состава и его градиента. Из этих соотношений следует, что кривая в плоскости координат  $\Psi$ – $\Delta$  претерпевает излом (т. е. производная  $d\Delta/d\Psi$  претерпевает скачок) в том случае, если наблюдается скачок состава. Если имеет место скачок в первых производных состава, как для структуры, изображенной на вставке (точки  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ), то в соответствующих точках кривой эллипсометрических параметров должны наблюдаться скачки вторых производных. Из этих рассуждений ясно, что для анализа результатов эллипсометрических измерений структур с большим градиентом состава целесообразно привлекать информацию о производных эллипсометрических параметров  $d\Delta/d\Psi$ , т. е. вычислять наклон эллипсометрической траектории.

На рис. 7 приведена номограмма для градиентного участка  $BC$  структуры, изображенной на вставке рис. 6, которая построена в координатах „производная  $d\Delta/d\Psi$ —параметр  $\Delta$ “.

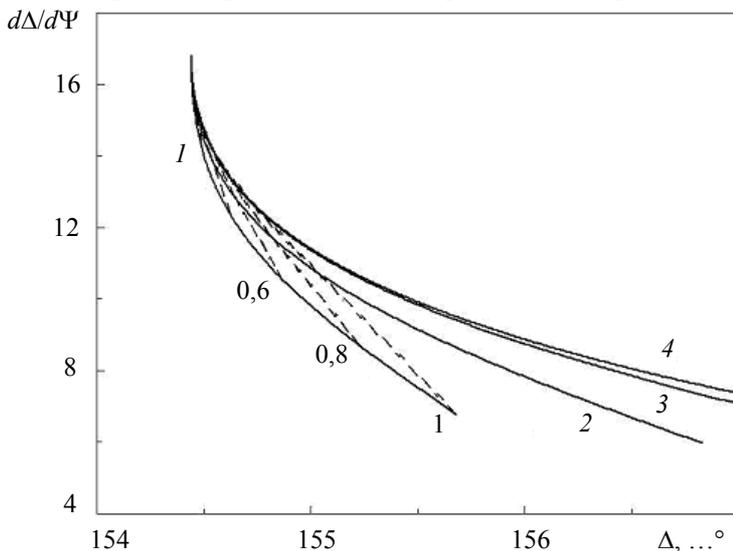


Рис. 7

Сплошные кривые соответствуют постоянным значениям градиента  $dx/dz$ : 1 — 0,6, 2 — 0,3, 3 — 0,15, 4 — 0,075 нм<sup>-1</sup>; пунктиром показаны линии постоянной толщины 0,6, 0,8 и 1 нм (числа возле кривых). Как видно, в данном случае удается разделить линии для разных  $d_1$ , в отличие от представления в координатах  $\Psi$ – $\Delta$ , где соответствующие кривые просто накладываются друг на друга. Кроме того, в новых координатах траектория эллипсометрических параметров

построенная для структуры, будет иметь изломы в точках, соответствующих изломам состава, что существенно облегчает контроль.

Рассмотрим предельные возможности обсуждаемых измерений. Точность вычисления производной зависит от ряда параметров, а именно:

— относительной точности измерения эллипсометрических параметров  $\delta\Psi$  и  $\delta\Delta$ ;

— интервалов изменения эллипсометрических параметров, на которых вычисляется производная ( $\Psi_n - \Psi_1$  и  $\Delta_n - \Delta_1$ );

— количества измерений  $n$  на этом интервале.

Погрешность вычисления производной  $d\Delta/d\Psi$  по двум измерениям в начале и в конце интервала с точностью до множителя равна

$$\frac{\delta\Delta}{\Psi_n - \Psi_1} + \frac{\delta\Psi}{\Delta_n - \Delta_1}.$$

Если на интервале проведено  $n$  измерений, то погрешность уменьшается в  $\sqrt{n}$  раз. Здесь следовало бы учесть, что измерения проведены не на границах интервала, а равномерно распределены по нему, поэтому при расчете погрешности должен появиться множитель  $K$  порядка 2. В итоге получим для оценки погрешности вычисления производной следующую формулу:

$$\delta\left(\frac{d\Delta}{d\Psi}\right) \approx \frac{K}{\sqrt{n}} \left( \frac{\delta\Delta}{\Psi_n - \Psi_1} + \frac{\delta\Psi}{\Delta_n - \Delta_1} \right). \quad (9)$$

Численная проверка была проведена путем имитации эллипсометрических измерений, наложением случайного разброса и последующим вычислением производной по методу наименьших квадратов. Моделирование подтвердило приведенную выше функциональную зависимость от  $n$  и интервалов измерения  $\Psi_n - \Psi_1$  и  $\Delta_n - \Delta_1$ , при этом было найдено значение множителя  $K = 4$ .

На основе формулы (9) была сделана оценка предельной точности вычисления производной применительно к рассматриваемым задачам. В качестве погрешностей эллипсометрических параметров были взяты их среднеквадратичные разбросы, измеренные в процессе роста пленки КРТ постоянного состава:  $\delta\Psi = \pm 0,009$  и  $\delta\Delta = \pm 0,04^\circ$ . Интервал изменения эллипсометрических параметров, на котором производится вычисление производных, определяется рядом простых соображений. Во-первых, он должен соответствовать достаточно малому изменению толщины растущего слоя, чтобы можно было вычислять производную в режиме реального времени; во-вторых, сама производная на этом интервале не должна существенно изменяться. Исходя из этих критериев оптимальная толщина — 0,1—0,2 нм, что соответствует интервалу изменения эллипсометрических параметров 0,05 и 0,35° для  $\Psi$  и  $\Delta$  соответственно при росте оптически контрастного слоя с резкой границей раздела. При росте градиентного слоя эти значения могут оказаться в несколько раз меньше.

Наконец, число измерений на интервале определяется быстродействием эллипсометра. Быстродействие описанного выше эллипсометра позволяет реализовать  $\sim 10^3$  измерений в секунду, и при скорости роста  $\sim 0,1$  нм/с обеспечивает порядка 1000 измерений на заданном интервале.

Исходя из этих оценок погрешность измерения производной составляет 0,1—0,2, а погрешность относительного измерения параметра  $\Delta$  на том же интервале окажется порядка  $\delta\Delta/\sqrt{n} \approx 0,001^\circ$ . Согласно номограмме рис. 7, такая точность приемлема для разделения кривых с градиентом  $\delta x/d_1 = 0,3$  и  $0,6$  нм<sup>-1</sup> при достижении толщины растущего слоя всего несколько десятых нанометра. Что касается кривых с малым градиентом ( $\delta x/d_1 < 0,15$  нм<sup>-1</sup>), то экспериментально разделить кривые можно только после достижения толщины в несколько нанометров. В данном случае наблюдается типичная корреляция между толщиной слоя и градиентом его состава: для эллипсометрических измерений увеличение толщины в два раза равносильно такому же увеличению градиента.

**Заключение.** Рассмотрена проблема эллипсометрического контроля гетероструктур на основе КРТ в процессе их выращивания методом МЛЭ. Для реализации этой задачи был разработан лазерный эллипсометр, интегрированный в камеру эпитаксии. Работа эллипсометра базируется на статической схеме измерений, за счет чего удается достичь высокого быстродействия и в режиме реального времени следить за процессами роста.

Разработаны эллипсометрические методики, позволяющие выращивать тонкие слои КРТ с прецизионным контролем их состава и толщины, а также градиентные структуры с заранее заданным распределением состава. Численным моделированием и аналитическими расчетами определены области применения этих методик, их эффективность подтверждена экспериментальными результатами. Предложены методики контроля при выращивании градиентных структур толщиной в несколько нанометров. Требуемая для этого точность достигается за счет привлечения информации о поведении производной эллипсометрических параметров  $d\Delta/d\Psi$  в процессе роста структуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоконев В. М., Крайлюк А. Д., Дегтярев Е. В. и др. Статус молекулярно-лучевой эпитаксии кадмий—ртуть—теллур в тепловизионной технике // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. № 9. С. 7—19.
2. Патент РФ № 2007120401/28 (022214). Эллипсомер / Е. В. Спесивцев, С. В. Рыхлицкий, А. Г. Борисов, В. А. Швец. Заявл. 31.05.2007, опубл. 10.09.2008.
3. Svitashv K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G. et al. The Growth of high-quality MCT films by MBE using in-situ ellipsometry // Cryst. Rec. Technol. 1994. Vol. 29, N 7. P. 931—937.
4. Svitashv K. K., Shvets V. A., Mardezhov A. S. et al. Ellipsometry as a powerful tool for the control of epitaxial semiconductor structures in-situ and ex-situ // Mat. Sci. and Engineer. B. 1997. Vol. B44, N 1—3. P. 164—167.
5. Shvets V. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Spesivtsev E. V. Ellipsometric measurements of the optical constants of solids under impulse heating // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4900. P. 46—52.
6. Михайлов Н. Н., Швец В. А., Дворецкий С. А. и др. Эллипсометрический контроль роста наноструктур на основе  $Cd_xHg_{1-x}Te$  // Автометрия. 2003. Т. 39, № 2. С. 71—80.
7. Дворецкий С. А., Икусов Д. Г., Кwon Д. Х. и др. Выращивание квантовых ям  $HgTe/Cd_{0.735}Hg_{0.265}Te$  методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2007. Т. 43, № 4. С. 104—111.
8. Mikhailov N. N., Smirnov N. N., Dvoretzky S. A. et al. Growth of  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  nanostructures by molecular beam epitaxy with ellipsometric control // Int. J. Nanotechnology. 2006. Vol. 3, N 1. P. 120—130.
9. Антонов В. А., Дронь О. С., Пшеницын В. И. Эллипсометрия неоднородных поверхностных слоев и пленок // Эллипсометрия — метод исследования поверхности / Под ред. А. В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1983. С. 9—16.
10. Швец В. А. Определение профилей оптических постоянных неоднородных слоев из эллипсометрических измерений in situ // Автометрия. 1993. № 6. С. 25—33.

#### Сведения об авторах

- Василий Александрович Швец** — канд. физ.-мат. наук; Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск; Специализированный учебно-научный центр Новосибирского государственного университета, кафедра физики; E-mail: shvets@isp.nsc.ru
- Сергей Владимирович Рыхлицкий** — канд. техн. наук; Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, лаборатория эллипсометрии, Новосибирск; E-mail: rhl@isp.nsc.ru
- Евгений Васильевич Спесивцев** — канд. техн. наук, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, лаборатория эллипсометрии, Новосибирск; E-mail: evs@isp.nsc.ru
- Николай Николаевич Михайлов** — канд. физ.-мат. наук, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, лаборатория эпитаксии из молекулярных пучков соединений  $A_2B_6$ , Новосибирск; E-mail: mikhailov@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию  
12.01.09 г.