

УДК 535.5 : 621.793.162

**ВЫРАЩИВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР HgCdTe
ПРИ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ *in situ*****В. А. Швец^{1,2}, Н. Н. Михайлов¹, С. А. Дворецкий¹**¹ Учреждение Российской академии наукИнститут физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Новосибирский государственный университет»,

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

E-mail: shvets@isp.nsc.ru

Представлен ретроспективный анализ проблемы выращивания многослойных и варизонных структур на основе КРТ методом МЛЭ с эллипсометрическим контролем, а также методические разработки в области эллипсометрии неоднородных структур. Проведены расчёты и получено решение прямой и обратной задач для ряда практически важных случаев. Экспериментально продемонстрирована высокая точность определения толщины и состава слоёв при выращивании гетероструктур нанометрового диапазона толщин. В ряде случаев для повышения точности решения обратной задачи в расчётах предложено использовать относительную производную эллипсометрических параметров, измеренных в процессе выращивания структуры. Это позволило определять профили оптических постоянных градиентных по составу структур. Проведены теоретические расчёты для периодических слоистых структур и экспериментально показана возможность их контролируемого создания.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, кадмий—ртуть—теллур, гетероструктуры, ИК-фотоприёмники, эллипсометрия, технологический контроль.

Введение. Фотоприёмные устройства на основе тройного соединения CdHgTe (КРТ) имеют высокие быстродействие, квантовую эффективность и обнаружительную способность и занимают лидирующие позиции в новейших разработках тепловизионной техники [1]. Одно из преимуществ данного материала — значительный диапазон изменения ширины запрещённой зоны в зависимости от состава соединения. Это открывает большие перспективы конструирования всевозможных композиционных структур самого широкого назначения. Такие структуры легко могут быть реализованы при синтезе слоёв КРТ с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), которая даёт возможность выращивать многослойные структуры с резкими границами раздела, варизонные слои с плавным изменением состава и проводить легирование в процессе роста. Особый интерес представляет создание полупроводниковых сверхрешёток — периодически чередующихся слоёв КРТ разного состава, которые позволяют продвинуться в спектральную область дальнего ИК-диапазона.

Для реализации в полной мере всех перечисленных возможностей МЛЭ необходим надёжный и довольно простой метод *in situ* контроля характерных параметров создаваемых структур, в первую очередь состава. Обычно при выращивании полупроводниковых слоёв используется дифракция электронов. Однако для низкотемпературного синтеза КРТ высокоэнергетичный электронный пучок может привести к локальному разогреву образца [2] и оказать сильное влияние на процессы роста. Кроме того, эффективность электронной дифракции значительно снижается для ориентаций поверхности с высокими индексами Мюллера.

Таких недостатков лишены оптические методы, в частности метод эллипсометрии, который не воздействует на процессы роста, достаточно прост в реализации и обладает высоким быстродействием. Ещё один важный аргумент в пользу эллипсометрии заключается в особенностях оптических спектров КРТ. Диапазон изменений энергетического положения критической точки E_1 лежит в видимой области спектра [3], что обеспечивает высокую чувствительность эллипсометрических измерений к составу на длине волны He—Ne-лазера, особенно для рабочих значений состава $x = 0,2-0,3$. Эти обстоятельства предопределили выбор эллипсометрии в качестве метода технологического контроля процессов МЛЭ КРТ. На начальном этапе выбора при активной инициативе К. К. Свиташева были проведены необходимые расчёты и в работах [4, 5] показана эффективность эллипсометрического контроля при выращивании структур на основе КРТ.

Широкомасштабное использование эллипсометрии для целей, сформулированных выше, предполагает в первую очередь решение ряда теоретических задач, связанных с отражением поляризованного света оптически неоднородными слоистыми структурами КРТ. Такие исследования были проведены в работах [6–10], где представлены алгоритмы для решения прямой и обратной задач эллипсометрии. Важнейшей методической задачей является также измерение оптических постоянных КРТ и получение их параметрических зависимостей от состава. Решение данной задачи в совокупности с теоретическими разработками позволило создать метод эллипсометрического контроля и выращивать структуры различного типа с заданным распределением состава по толщине.

Цель данной работы — представить ретроспективный анализ проблемы выращивания гетероструктур КРТ при полном эллипсометрическом контроле.

1. Теория эллипсометрического метода. В основе метода оптической эллипсометрии лежит измерение отношения комплексных коэффициентов отражения для волн, поляризованных в плоскости падения (R_p) и перпендикулярно к этой плоскости (R_s). Данное отношение описывается двумя эллипсометрическими параметрами Ψ и Δ :

$$\operatorname{tg} \Psi e^{i\Delta} = R_p/R_s. \quad (1)$$

Если отражение происходит от однородной среды с оптически резкой границей, то коэффициенты $R_{p,s}$ будут равны коэффициентам отражения Френеля. Подставляя в (1) соответствующие для них выражения из [11], получим

$$\operatorname{tg} \Psi e^{i\Delta} = \frac{\cos^2 \varphi - \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi}}{\cos^2 \varphi + \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi}}. \quad (2)$$

Здесь N — комплексный показатель преломления среды, φ — угол падения света. Для однослойной структуры коэффициенты отражения даются следующими выражениями (для простоты индексы p и s опущены):

$$R = \frac{r_{01} + r_{12}X}{1 + r_{01}r_{12}X}, \quad (3)$$

где r_{01} , r_{12} — коэффициенты Френеля для границ раздела соответствующих сред (индексы 0, 1, 2 относятся к внешней среде, плёнке и подложке соответственно); $X = \exp(4\pi i(d/\lambda)\sqrt{N_1^2 - \sin^2 \varphi})$, N_1 и d — комплексный показатель преломления слоя и его толщина, λ — длина волны света. Если исследуемая структура состоит из нескольких слоёв (например, $j+1$), то для расчёта её коэффициента отражения R_{j+1} удобно использовать рекуррентные соотношения. Тогда r_{01} в (3) соответствует коэффициенту Френеля r_{j+1} текущего ($j+1$)-го слоя, а вместо r_{12} нужно подставить коэффициент отражения для

границы раздела между $(j+1)$ -м слоем и оставшейся частью структуры. Последний можно выразить через r_{j+1} и коэффициент отражения j -слойной структуры R_j и получить искомого рекуррентное соотношение, в котором все коэффициенты отражения рассматриваются по отношению к внешней среде:

$$R_{j+1} = \frac{r_{j+1}(1 - r_{j+1}R_j) + (R_j - r_{j+1})X_{j+1}}{1 - r_{j+1}R_j + r_{j+1}(R_j - r_{j+1})X_{j+1}}. \quad (4)$$

С помощью этого соотношения можно рассчитать также коэффициенты отражения и эллипсометрические параметры для неоднородной по составу структуры с произвольным профилем распределения показателя преломления по толщине $N(z)$. Зависимость эллипсометрических параметров в этом случае описывается дифференциальным уравнением [12], которое символически представим в виде

$$\frac{d(\operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta})}{dz} = \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} F(N). \quad (5)$$

Для КРТ имеет место монотонная зависимость показателя преломления N от состава на длине волны He—Ne-лазера 632,8 нм, поэтому задача определения состава равносильна задаче определения показателя преломления растущего слоя. При непрерывных эллипсометрических измерениях, проводимых в процессе выращивания структур, экспериментально доступны только параметры Ψ и Δ , которые вычерчивают на плоскости Ψ — Δ кривую (так называемую «кривую роста»); координата z при этом остаётся неопределённой. В (5) удобно исключить z и перейти к относительным производным [6]:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta}{d\Psi} &= G_1(N); \\ \frac{d^2\Delta}{d\Psi^2} &= G_2(N, N'); \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d^m\Delta}{d\Psi^m} &= G_m(N, N', N'', \dots, N^{(m-1)}), \end{aligned} \quad (6)$$

где G_i ($i = 1, 2, \dots, m$) — некоторые функции, интегрально характеризующие отражающие свойства выращенной части структуры. Из приведённых формул следуют важные выводы. Для гладких профилей состава (а значит, и гладких профилей оптических постоянных) производная кривой роста — тоже гладкая функция. Для резкой границы раздела между слоями различного состава наблюдается скачок показателя преломления, который сопровождается также скачком производной $d\Delta/d\Psi$, т. е. изломом кривой роста. Такие изломы служат своего рода маркерами, отмечающими границу раздела и степень её размытости. Из анализа второй производной можно определить точки на кривой роста, где происходит скачок градиента состава. Однако с возрастанием порядка производной одновременно растут и требования к точности эллипсометрических измерений.

Уравнение (4) и вытекающие из него соотношения (5), (6) описывают вклад интерференции в изменение поляризации света, отражённого от поверхности и внутренних областей неоднородного слоя. Этот вклад будет тем больше, чем выше градиент состава. Для слоёв с малым градиентом, наоборот, параметры отражённого света определяются в основном свойствами границы раздела слоя с внешней средой и в нулевом приближении

описываются формулой (2), где в качестве N берётся текущее значение показателя преломления на поверхности. Для градиентных слоёв аналитическими расчётами была получена поправка к формуле (2) в первом приближении по величине градиента $\beta = dN/dz$ [7]:

$$\operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta} = \operatorname{tg} \Psi_0 \cdot e^{i\Delta_0} \left[1 + i \frac{\beta \lambda N \cos \varphi}{2\pi(N^2 - \sin^2 \varphi)} \frac{(N^2 - 1) \sin^2 \varphi}{N^4 \cos^2 \varphi - N^2 + \sin^2 \varphi} \right], \quad (7)$$

где Ψ_0 , Δ_0 соответствуют границе с однородной средой (нулевое приближение). Особенность оптических постоянных КРТ такова, что при угле падения φ в диапазоне $65\text{--}70^\circ$, который обычно используется в эллипсометрических измерениях, второе слагаемое в (7) — величина, близкая к мнимой. Поэтому для слабоградиентных структур параметр Δ отличается от Δ_0 , в то время как параметр Ψ остаётся почти неизменным и характеризует непосредственно приповерхностную область материала. Как показывают оценки, поправками к параметру Ψ можно пренебрегать вплоть до значений градиента состава $dx/dz \sim 1/\lambda$.

Особый интерес для эллипсометрического исследования представляют периодические структуры. Если суммарная толщина слоёв такой структуры превышает глубину проникновения света, то дальнейший её рост будет сопровождаться циклическими изменениями эллипсометрических параметров в плоскости $\Psi\text{—}\Delta$. Для периодической структуры, состоящей из однородных слоёв состава x_1 и толщины d_1 и слоёв состава x_2 и толщины d_2 , удаётся получить аналитические выражения для расчёта эллипсометрических параметров. Обозначим через $R_{1,2}$ комплексные коэффициенты отражения рассматриваемой структуры, заканчивающейся слоем первого или второго типа (индексы для поляризации снова опускаем). Используя рекуррентные соотношения (4), описывающие изменение коэффициентов отражения при наслаивании, и учитывая их цикличность, получаем следующие квадратные уравнения для $R_{1,2}$ [4]:

$$AR_1^2 + BR_1 + C = 0, \quad (8)$$

$$CR_2^2 + BR_2 + A = 0, \quad (9)$$

где

$$A = r_1(1 - X_1)(X_2 - r_2^2) + r_2(1 - X_2)(1 - X_1r_1^2);$$

$$B = (X_1 - X_2)(r_1^2 - r_2^2) + (X_1X_2 - 1)(1 - r_1^2r_2^2); \quad (10)$$

$$C = r_2(1 - X_2)(X_1 - r_1^2) + r_1(1 - X_1)(1 - X_2r_2^2),$$

индексы в (10) соответствуют номеру слоя. Из уравнений (8)–(10) находятся коэффициенты отражения $R_{1,2}$ и соответствующие им значения эллипсометрических параметров Ψ_1 , Δ_1 , Ψ_2 , Δ_2 , которые представляют собой предельные точки циклической кривой роста.

2. Определение оптических постоянных КРТ. Для эллипсометрического моделирования процессов наслаивания, а также для определения состава КРТ необходимо установить зависимости оптических постоянных этого материала от состава. Данная задача была решена путём эллипсометрических измерений серии калиброванных по составу образцов КРТ, полученных методами парофазной эпитаксии и МЛЭ. Состав в приповерхностной области определялся по спектрам отражения, которые измерялись на спектрофотометре «SPECORD» (“Analytik Jena AG”, Германия).

При интерпретации эллипсометрических измерений важную роль играет качество поверхности. Наличие окисной плёнки, микрошероховатость, ряд других факторов могут исказить результаты расчёта оптических постоянных, для вычисления которых использовалась модель полубесконечной среды и формула (2). Анализ показывает, что рельеф поверхности, как и окисная плёнка, влияет главным образом на параметр Δ , уменьшая его значение. Поэтому более высокое Δ соответствует более совершенной границе раздела. Статистический вес i -го измерения выбирался с учётом этого критерия и величины Δ_i , которая сравнивалась со значениями Δ_{i-1} и Δ_{i+1} для ближайших по составу точек:

$$g_i = \frac{\Delta_i - \Delta_0}{\Delta_{i-1} + \Delta_i + \Delta_{i+1} - 3\Delta_0},$$

где Δ_0 — некоторый параметр, характеризующий минимально допустимое значение Δ , пригодное для дальнейших вычислений.

С помощью такого подхода были получены зависимости $\Psi(x)$ [2, 13, 14] и рассчитаны значения оптических постоянных КРТ от состава для длины волны 632,8 нм при комнатной температуре. Для контроля процессов роста необходимы зависимости оптических постоянных при температуре роста 190–200 °С. Такие измерения были проведены на выращенных образцах непосредственно в технологической камере, оснащённой встроенным эллипсометром, что позволило избежать проблем, связанных с образованием оксидных слоёв. Результаты этих измерений представлены на рис. 1. Из экспериментов найдены эмпирические формулы, описывающие зависимости оптических постоянных. Для показателя преломления формула имеет вид

$$n(x) = 3,911 - 0,775x - 0,088x^2 \quad (0 < x < 1). \quad (11)$$

Попытка описать зависимость показателя поглощения во всём диапазоне квадратичной формулой (пунктирная кривая) даёт большие расхождения для крайних точек состава

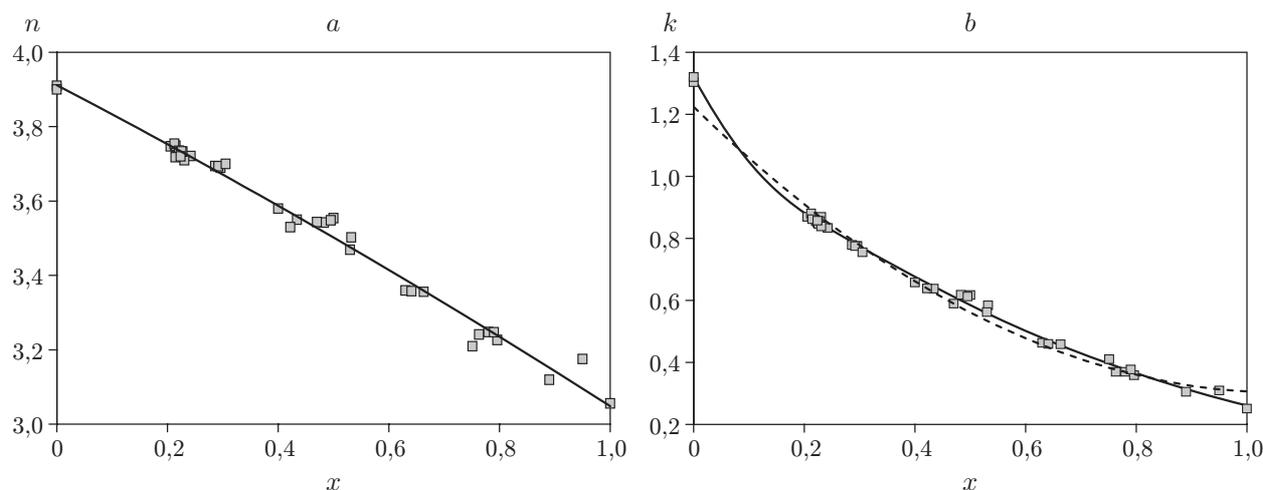


Рис. 1. Зависимости оптических постоянных: показателей преломления n (а) и поглощения k (б) от состава КРТ для температуры 190 °С. Символы — измеренные значения, сплошная кривая (а) и пунктирная (б) — аппроксимация экспериментальных точек квадратичной зависимостью для всего диапазона состава; сплошная кривая (б) получена аппроксимацией данных отдельно для диапазонов $0 < x < 0,3$ и $0,2 < x < 1$

$x = 0$ и $x = 1$. Поэтому весь диапазон был разбит на два интервала, для которых получено:

$$k(x) = 1,32 - 3,276x + 5,405x^2 \quad (0 < x < 0,2), \quad (12)$$

$$k(x) = 1,121 - 1,284x + 0,424x^2 \quad (0,2 < x < 1). \quad (13)$$

Причины сложной зависимости $k(x)$ понятны: при температуре 190° и $x \approx 0$ мы оказываемся в непосредственной близости к критической точке E_1 , что и обуславливает заметно нелинейные изменения поглощения от состава. Отметим, что практический интерес представляет диапазон $x > 0,2$, для которого экспериментальная зависимость хорошо описывается формулой (13).

3. Выращивание варизонных структур с непрерывным изменением состава. Одно из преимуществ КРТ — возможность создания структур с заданным профилем состава по толщине. Так, выращивание на границах рабочего слоя варизонных слоёв с повышенным содержанием CdTe позволяет уменьшить поверхностную рекомбинацию неосновных носителей. Введение узкозонного слоя с высокой проводимостью снижает последовательное сопротивление в матрицах большого формата [15]. На основе варизонных слоёв можно получать двухполосные фотоприёмники [16]. В указанных случаях необходимо с высокой точностью контролировать и управлять изменением состава растущего слоя.

Такой контроль можно реализовать с помощью эмпирически найденных зависимостей $n(x)$ и $k(x)$, используя модель полубесконечной среды. Расчёт по формуле (2) показывает, что наиболее чувствительным к составу является параметр Ψ . Однако применимость этой модели ограничена, если поверхность роста имеет микрорельеф, сравнимый по размеру с длиной волны. Наличие микрорельефа сказывается главным образом на измеренной величине Δ , понижающейся по мере его развития. Эмпирически был установлен предельно допустимый уровень параметра Δ (для угла падения $\varphi \approx 68^\circ$ $\Delta_{\text{пр}} = 150^\circ$), выше которого можно пренебречь влиянием микрорельефа на точность определения состава. На рис. 2 показан рассчитанный по результатам эллипсометрических измерений профиль состава для варизонной структуры, выращенной на установке МЛЭ. Измерения проводились на эллипсометре, встроенном в камеру роста. Параметр Δ в эксперименте не опускался ниже значения 150° , поэтому для расчёта использовалось соотношение (2). Состав в активной области удаётся поддерживать в диапазоне $\delta x = \pm 0,001$, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к фоточувствительным структурам. Максимальный градиент состава $dx/dz \approx 1 \text{ мкм}^{-1}$ достигается на границах слоя и не превышает определённого выше критического значения $1/\lambda$. Таким образом, и пренебрежение интерференционными эффектами в градиентном слое, о которых говорилось в разд. 2, и применение модели полубесконечной среды в данном примере вполне обоснованы.

4. Выращивание одно- и многослойных структур. При выращивании квантовых структур, состоящих из сверхтонких слоёв, интерференция на границах слоя вносит определяющий вклад в формирование эллипсометрических параметров. Благодаря этому наблюдается высокая их чувствительность к толщине и оптическим постоянным слоя (а следовательно, и его составу). На рис. 3 показана траектория эллипсометрических параметров — кривая роста, измеренная в процессе ступенчатого изменения состава в растущем слое, которое достигалось за счёт уменьшения на короткое время потока теллура. Точка S соответствует стационарному росту КРТ состава $x_0 = 0,422$. После уменьшения потока теллура начинает расти слой более высокого состава и эллипсометрические параметры быстро изменяются, смещаясь вдоль кривой SA . Этот участок траектории можно рассчитать с помощью соотношений (3) и (1), используя эмпирические зависимости n и

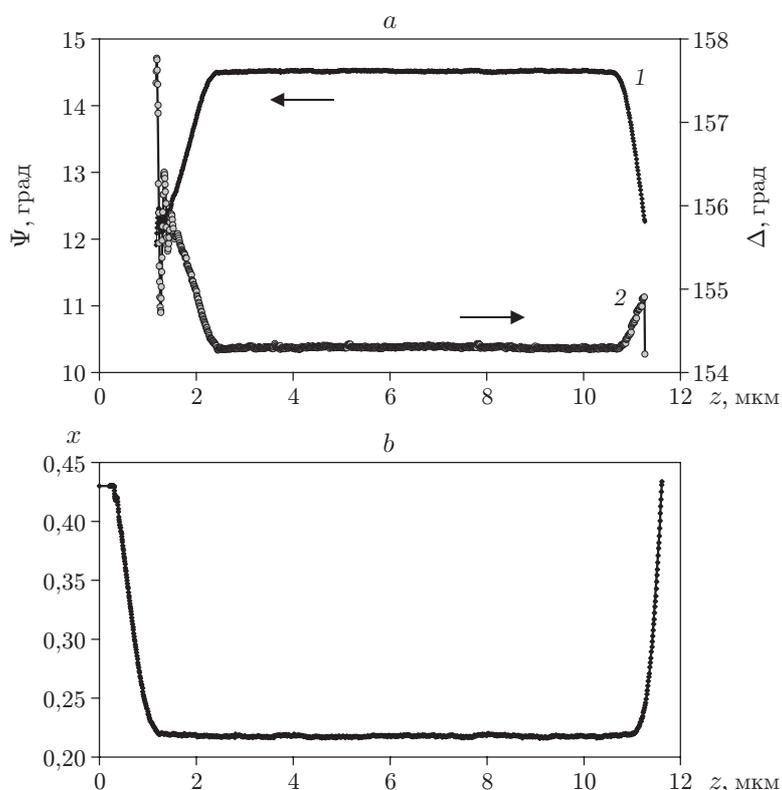


Рис. 2. Определение профиля состава для варизонной структуры: a — измеренные зависимости эллипсометрических параметров (кривая 1 — Ψ , кривая 2 — Δ), b — рассчитанная по ним зависимость состава КРТ от толщины растущего слоя

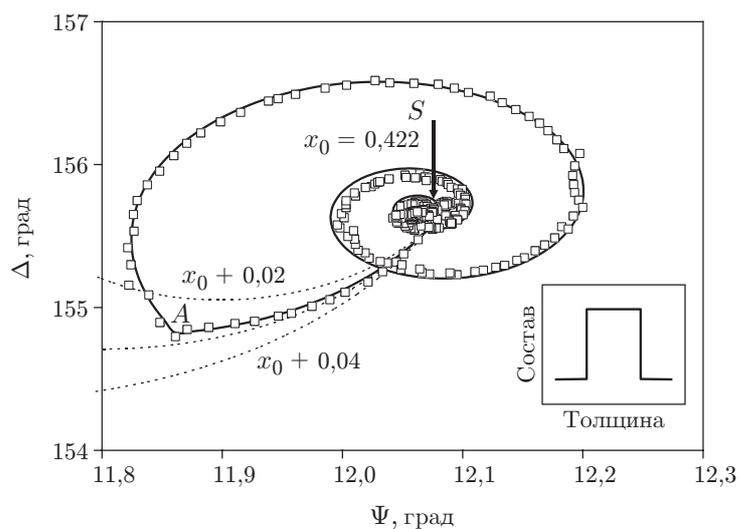


Рис. 3. Траектория эллипсометрических параметров при ступенчатом изменении состава в процессе роста КРТ: символы — эксперимент, сплошная линия — расчётная кривая для найденного профиля состава (показан схематично на вставке), пунктирные кривые — модельный расчёт для различных значений состава слоя (числа возле кривых). Точки S и A соответствуют началу и концу роста слоя

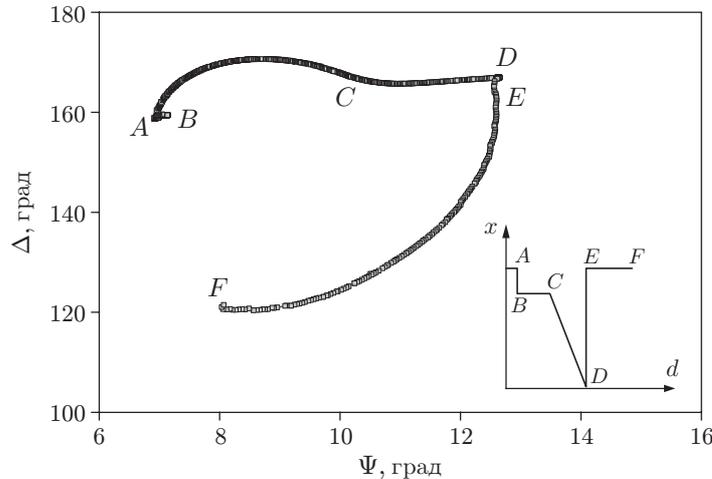


Рис. 4. Экспериментальная кривая роста для структуры, профиль состава которой схематично изображён на вставке рисунка. Обозначения отдельных точек профиля соответствуют обозначениям на кривой

k от состава. Результаты расчётов показаны пунктирными линиями и демонстрируют высокую чувствительность Ψ и Δ к составу слоя. Сравнение расчётных кривых с экспериментом показывает, что состав увеличился на 0,028 по сравнению с x_0 , а точность его нахождения не хуже 0,002. Толщина слоя определяется протяжённостью участка SA и составляет 16,2 нм. После восстановления потока Te вновь начинает расти слой прежнего состава $x_0 = 0,422$ и эллипсометрические параметры возвращаются к исходной точке S по спиральной кривой.

В точке A , которая соответствует ступенчатому изменению состава, наблюдается излом кривой роста, как это следовало из теоретических рассуждений. Этот излом характеризует степень резкости границы раздела и служит её удобным маркером. Излом исчезает, если состав изменяется плавно, без разрывов, например при выращивании квантовых ям с градиентными границами. Кривая роста такой структуры приведена на рис. 4, а профиль состава — схематично на вставке рисунка. В точке C кривой роста, находящейся на границе однородного и градиентного слоёв, не наблюдается излома. Однако он проявляется, если эту кривую пересчитать и отобразить в координатах $(d\Delta/d\Psi—\Psi)$, как показано на рис. 5. Более того, номограмма, построенная в тех же координатах, позволяет повысить точность определения состава по сравнению с представлением в плоскости $\Psi—\Delta$. Восстановленный по номограмме профиль состава показан на вставке рисунка символами. Он несколько отличается от проектируемого профиля (сплошная линия), но незначительно. Таким образом, использование при анализе кривой роста её производной (т. е. направления изменения эллипсометрических параметров) даёт дополнительную информацию и возможность решить обратную задачу эллипсометрии для градиентных участков с более высокой точностью. Эта возможность открывается благодаря высокому быстродействию эллипсометрической аппаратуры, которая позволяет проводить сглаживание шумов, возникающих при численном дифференцировании. Отметим, что в данном разделе речь идёт о структурах с градиентом $dx/dz \gg 1/\lambda$ в отличие от структур, которые были рассмотрены в разд. 3.

Особый интерес представляет контролируемое выращивание периодических слоистых структур, состоящих из нескольких десятков слоёв с чередующимся составом. Интерес к этим структурам связан с перспективами получения на основе сверхрешёток КРТ фотоприёмных устройств терагерцового диапазона. Как отмечалось при теоретическом рас-

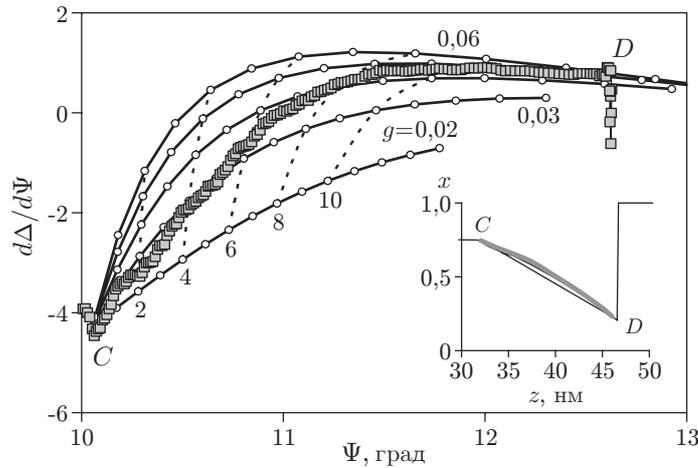


Рис. 5. Кривая роста для градиентной квантовой ямы и номограмма, построенные в координатных осях ($d\Delta/d\Psi$ — Ψ). Сплошные линии соответствуют постоянному градиенту состава $g = dx/dz$ (числа возле кривых обозначают изменение состава в единицах нм^{-1}), пунктирные линии — постоянные толщины (значения в нм показаны числами возле кривых). На вставке приведены проектируемый профиль состава (сплошная линия) и восстановленный по номограмме (символы)

смотрении, эллипсометрические параметры для таких структур после нескольких циклов наслаивания должны изменяться периодически. Это подтверждается экспериментальной кривой роста, которая представлена на рис. 6: после выращивания ~ 5 пар слоёв эллипсометрические параметры начинают циклически изменяться между точками B и A . Эти точки соответствуют верхнему слою структуры состава x_1 или x_2 , и их положение на плоскости Ψ — Δ определяется уравнениями (8)–(10).

Один из циклов периодического участка экспериментальной кривой роста, совмещённый с расчётными кривыми для определения параметров каждого слоя, приведён на рис. 7. Из сравнения эксперимента с расчётом можно заключить, что состав широкозонного слоя

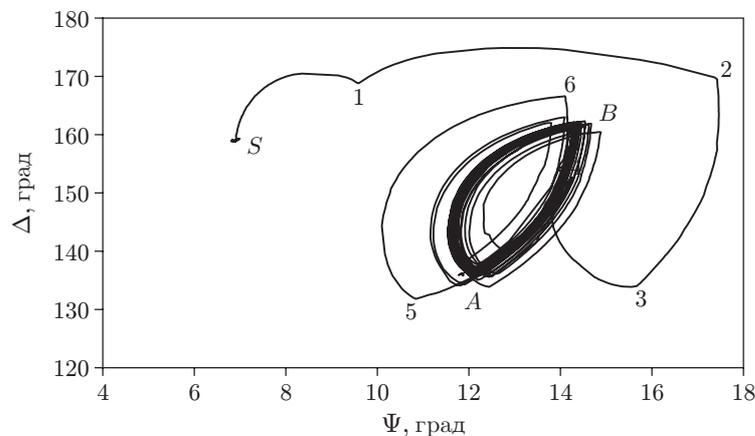


Рис. 6. Траектория эллипсометрических параметров, измеренная при росте структуры КРТ с периодическим изменением состава на подложке CdTe. Угол падения света $\varphi = 68,3^\circ$. Составы слоёв периодической структуры: $x_1 = 0,1$, $x_2 = 0,76$. Точка S соответствует началу роста (подложка CdTe), A и B — предельные точки циклического участка кривой, цифры возле кривой — порядковый номер выращенного слоя

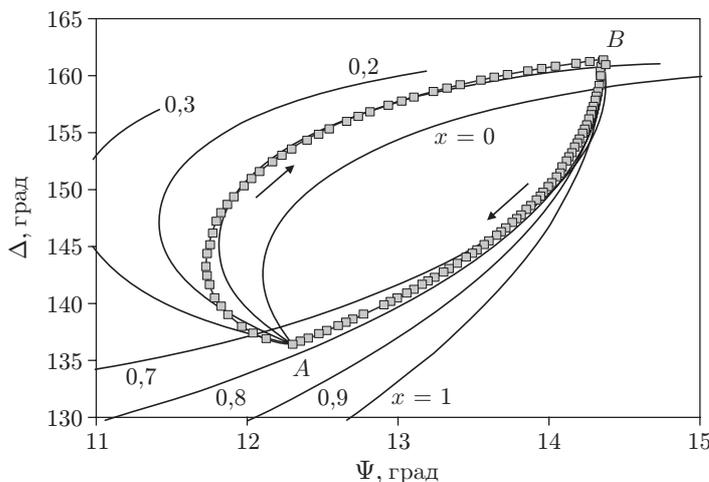


Рис. 7. Один из циклов периодического участка кривой роста на рис. 6: символы — эксперимент, сплошные линии — расчётная номограмма для различных значений составов слоёв (значения состава отмечены числами возле кривых). Стрелками показано направление увеличения толщины. Точки *A* и *B* соответствуют структурам, оканчивающимся широкозонным или узкозонным слоем

$x_2 = 0,78 \pm 0,02$, а для узкозонного слоя состав x_1 меняется от 0,3 в начале его роста до 0,1 в конце. Из номограмм определяются также с прецизионной точностью толщины слоёв $d_1 = 21,1$ и $d_2 = 16,6$ нм. При получении расчётных кривых можно сделать существенное упрощение: вместо уравнения (4), описывающего коэффициенты отражения от многослойной структуры, использовать уравнение (3) для однослойной модели. При этом подложкой для текущего слоя служит вся нижележащая часть структуры, которая описывается эффективными оптическими постоянными [8]. Как было показано, такое приближение практически не вносит методических ошибок для слоёв с высокими показателями преломления, но существенно упрощает процедуру расчётов. Кроме того, при указанном подходе становится очевидным, что не происходит накопления экспериментальных ошибок по мере продвижения расчётов от одного слоя к другому. Действительно, результаты для j -го слоя зависят в данном случае только от эллипсометрических измерений на границах этого слоя.

Большой интерес представляют также периодические структуры с плавным изменением состава по толщине. На рис. 8, *a, b* показаны циклические участки расчётных кривых роста для структур с синусоидальным профилем состава $x(z) = x_0 + \delta x \sin(2\pi(z/d_0))$, а на рис. 8, *c* схематично изображён один период изменения состава. Кривые роста представляют замкнутые траектории эллипсоидальной формы. Обратная задача заключается в определении по этим траекториям параметров профиля: среднего значения состава x_0 , его амплитуды δx и периода d_0 . Она решается численно путём оптимизации стандартной целевой функции. Однако это длительный процесс, и такое численное решение имеет смысл только при анализе полученных структур *post factum*. Более актуальной является задача экспресс-диагностики процесса роста. В отличие от кривой на рис. 7 у аналогичных кривых роста на рис. 8 нет точек излома из-за плавного изменения состава. Это усложняет проблему контроля. Тем не менее, проводя эллипсометрический мониторинг, можно оценить текущее значение фазы состава в растущем слое $\Theta = 2\pi(z/d_0)$. Точки пересечения кривой роста с её большой осью (точки *A* и *B*) приблизительно соответствуют завершению роста широкозонного и узкозонного полупериодов ($\Theta_A = \pi$, $\Theta_B = 0$) подобно тому, как это наблюдалось при росте однородных слоёв. Соответственно точки *D* и *C* (пересече-

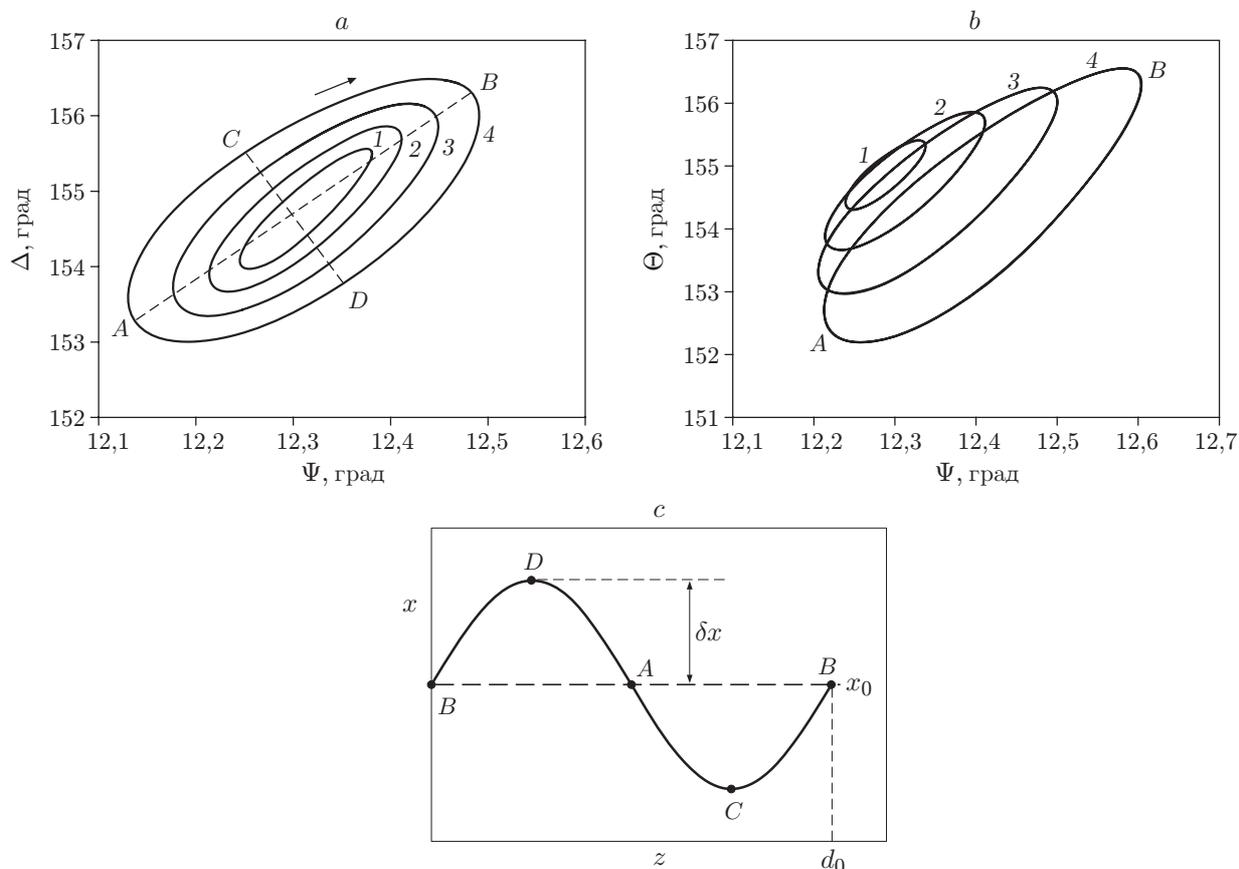


Рис. 8. Расчётные кривые роста для периодических структур с синусоидальным профилем состава (*a, b*) и схематическое изображение распределения состава по толщине (*c*). Параметры структур: *a* — $x_0 = 0,5$, $d_0 = 20$ нм, $\delta x = 0,05$ (кривая 1), 0,1 (2), 0,15 (3), 0,20 нм (4); *b* — $x_0 = 0,5$, $\delta x = 0,1$, $d_0 = 15$ (кривая 1), 20 (2), 25 (3), 30 нм (4)

ние кривой роста с малой осью) — точки максимального отклонения состава от среднего значения x_0 ($\Theta_D = \pi/2$, $\Theta_C = 3\pi/2$). С увеличением амплитуды состава δx возрастает амплитуда размаха кривой роста и происходит её смещение. Амплитуда размаха возрастает и с увеличением периода d_0 , при этом незначительно меняется ориентация осей кривой роста. Отметим также, что геометрический центр замкнутой кривой роста определяется главным образом значением среднего состава x_0 , слабо зависит от δx и почти не зависит от d_0 . Все отмеченные особенности проявляются для широкого диапазона параметров x_0 , δx и d_0 и могут быть использованы для их приближённой оценки в процессе роста.

Заключение. Быстродействующая лазерная эллипсометрия является эффективным методом экспресс-диагностики процессов роста гетероструктур на основе КРТ. Эллипсометрический контроль основан на сильной зависимости оптических постоянных КРТ от состава. Благодаря этому удаётся добиться прецизионной точности определения толщины ($\delta d = 0,5$ нм) и состава ($\delta x = 0,002$) тонких слоёв. Применение оригинальных методических разработок и непрерывный эллипсометрический мониторинг позволили отслеживать профиль изменения состава при выращивании варизонных структур, тонких градиентных по составу слоёв, а также периодических многослойных структур. Полученные результаты открывают широкие перспективы для зонной инженерии — выращивания квантовых

структур с заданным профилем распределения состава по толщине при полном эллипсометрическом контроле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варавин В. С., Гутаковский А. К., Дворецкий С. А. и др. Состояние и перспективы молекулярно-лучевой эпитаксии // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 25–41.
2. Свиташев К. К., Швец В. А., Мардежов А. С. и др. Эллипсометрия *in situ* при выращивании твердых растворов кадмий—ртуть—теллур методом МЛЭ // ЖТФ. 1995. **65**, вып. 9. С. 110–120.
3. Vina L., Umbach C., Cardona M., Vodopyanov L. Ellipsometric studies of electronic interband transitions in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ // Phys. Rev. B. 1984. **29**, N 12. P. 6752–6760.
4. Ржанов А. В., Свиташев К. К., Мардежов А. С., Швец В. А. Контроль параметров сверхрешеток в процессе их получения методом эллипсометрии // ДАН СССР. 1987. **297**, № 3. С. 604–607.
5. Ржанов А. В., Свиташев К. К., Мардежов А. С., Швец В. А. Основное уравнение эллипсометрии для сверхрешеток // ДАН СССР. 1988. **298**, № 4. С. 862–868.
6. Швец В. А. Определение профилей оптических постоянных неоднородных слоев из эллипсометрических измерений *in situ* // Автометрия. 1993. № 6. С. 25–33.
7. Shvets V. A., Rykhlytski S. V., Spesivtsev E. V. et al. In situ ellipsometry for control of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ nanolayer structures and inhomogeneous layers during MBE growth // Thin Solid Films. 2004. **455–456**. P. 688–694.
8. Швец В. А. О точности эллипсометрического контроля при выращивании полупроводниковых наноструктур // Оптика и спектроскопия. 2009. **107**, № 5. С. 822–825.
9. Швец В. А. Анализ оптически неоднородных слоев методом *in situ* эллипсометрии // Оптика и спектроскопия. 2010. **108**, № 6. С. 1042–1048.
10. Швец В. А., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. Эллипсометрический *in situ* контроль квантовых наноструктур с градиентными слоями // ЖТФ. 2009. **79**, вып. 11. С. 41–44.
11. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 583 с.
12. 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. 9–13.
13. Svitashov 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 Eng. B. 1997. **B44**, N 1–3. P. 164–167.
14. Свиташев К. К., Швец В. А., Мардежов А. С. и др. Метод эллипсометрии в технологии синтеза соединений кадмий—ртуть—теллур // Автометрия. 1996. № 4. С. 100–109.
15. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н. и др. Конструирование и выращивание фоточувствительных структур на основе КРТ МЛЭ для ИК-фотоприемников // Прикладная физика. 2000. № 5. С. 108–114.
16. Власенко А. И., Власенко З. К., Гнатюк В. А. и др. Варизонные слои на основе твердых растворов CdHgTe для двухполосных ИК-фоторезисторов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2001. № 6. С. 25–29.

Поступила в редакцию 15 июля 2011 г.