

УДК 621.793.162

К. К. Свиташев, В. А. Швец, А. С. Мардежов,  
С. А. Дворецкий, Ю. Г. Сидоров, Е. В. Спесивцев,  
С. В. Рыхлицкий, С. И. Чикичев, Д. Н. Придачин

(Новосибирск)

### МЕТОД ЭЛЛИПСОМЕТРИИ В ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА СОЕДИНЕНИЙ КАДМИЙ—РТУТЬ—ТЕЛЛУР

Разработана эллипсометрическая методика контроля последовательных стадий выращивания пленок кадмий—ртуть—теллур методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Применение эллипсометрии *ex situ* и *in situ* позволило решить ряд технологических проблем, таких как оценка качества очистки подложек для МЛЭ, контроль толщины и скорости роста буферных слоев CdTe и пленок КРТ, контроль морфологии поверхности и состава КРТ в течение всего процесса синтеза и измерение температуры поверхности роста. С использованием эллипсометрического контроля были выращены слои КРТ высокого структурного совершенства, пригодные для создания фотоприемных устройств.

**Введение.** Ключевым моментом в технологии синтеза полупроводниковых материалов и структур является постановка методов контроля их параметров. Особый интерес в связи с этим представляют оптические методы и, в частности, метод эллипсометрии как наиболее информативный [1]. Одно из существенных преимуществ оптических методов — практически полное отсутствие воздействия на исследуемый объект — становится принципиальным при контроле *in situ* низкотемпературного синтеза твердых растворов  $Cd_xHg_{1-x}Te$  (КРТ) методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Используемая обычно для этих целей дифракция быстрых электронов может давать необъективную информацию, так как высокоэнергетичный пучок электронов вызывает локальный разогрев образца и условия роста в области зондирования и вне ее могут существенно различаться.

Аспнес одним из первых использовал спектроэллипсометрию для контроля состояния поверхности КРТ и изучения параметров зонной структуры [2—4]. Применение эллипсометрии *in situ* в процессе роста пленок КРТ из молекулярных пучков позволило в реальном времени контролировать скорость роста, состав  $x$  КРТ [5, 6], морфологию поверхности роста [7], а также наблюдать процессы взаимной диффузии CdTe и HgTe при повышенных температурах [6]. Контроль состава основан на зависимости оптических постоянных КРТ для фиксированной длины волны [7, 8] или энергетического положения критических точек в спектрах диэлектрических функций от  $x$  [6, 9].

В данной работе изложены результаты последовательного и целенаправленного использования метода эллипсометрии в Институте физики полупроводников СО РАН для контроля различных стадий технологического процесса получения пленок КРТ, таких как преэпитаксиальная подготовка подложек, выращивание буферных слоев, синтез пленок КРТ.

**Методика и аппаратура.** Эллипсометрия — оптический метод, основанный на анализе амплитудно-фазовых характеристик отраженного от исследуемой поверхности света. Экспериментально измеряемые эллипсометрические параметры  $\psi$  и  $\Delta$  связаны с коэффициентами отражения образца для света,

поляризованного в плоскости падения ( $R_p$ ) и перпендикулярно к ней ( $R_s$ ), соотношением

$$\operatorname{tg} \psi e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s}.$$

Из этого уравнения находят параметры, характеризующие исследуемую отражающую структуру (оптические постоянные, геометрические размеры), от которых явным образом зависят коэффициенты отражения  $R_p$  и  $R_s$ . В зависимости от целей исследования нами были использованы различные экспериментальные методики и аппаратные разработки.

*Спектральная эллисометрия.* Измеряются зависимости  $\psi$  и  $\Delta$  от длины волны света  $\lambda$ . Мы проводили измерения на эллисометрической установке, собранной по балансной схеме [10]. Источником излучения служила ксеноновая лампа, сканирование по спектру осуществлялось монохроматором МСД-1 в диапазоне  $\lambda = 250\text{—}700$  нм с разрешением 6 нм. Для управления работой и накопления экспериментальных данных установка была оснащена персональным компьютером. Установка включала также малогабаритную вакуумную камеру (давление остаточных газов  $10^{-6}$  Па), предназначенную для проведения температурных измерений.

Спектроэллисометрия — наиболее информативная методика, однако при сканировании спектра монохроматором имеет невысокое быстродействие: время измерения одного спектра составляет порядка 10 мин, что ограничивает ее применение для быстрых процессов. Следует отметить, что данная проблема не является принципиальной: в последние годы появились многоканальные спектроэллисометры, использующие линейку фотоприемников и обладающие благодаря этому высоким быстродействием [11].

*Эллисометрия временного разрешения.* Для регистрации динамических процессов в высоковакуумной установке использовался серийный автоматический эллисометр ЛЭФ-701 с длиной волны зондирующего излучения 632,8 нм, минимальным временем одного измерения 50 мс и точностью измерений  $\delta\psi = \delta\Delta = 0,01^\circ$ . По сравнению со спектроэллисометрией интерпретация одноволновых измерений не столь однозначна и более затруднена. Однако если физическая картина исследуемого процесса достаточно ясна, то для количественного контроля наиболее приемлемы одноволновые измерения благодаря их точности и высокому быстродействию.

*Эллисометрия пространственного разрешения.* Информацию о распределении исследуемых характеристик по поверхности образца получали сканированием измерений, которые проводились на серийном эллисометре ЛЭФ-8 «Микроскан» [12]. Параметры прибора: длина волны 632,8 нм, размер зондирующего пятна от 10 мкм до 1 мм, точность измерений  $\delta\psi = \delta\Delta = 0,01^\circ$ . Пространственное разрешение было реализовано с помощью прецизионного сканирующего столика, автоматически перемещаемого шаговыми двигателями от управляющей ЭВМ.

*Установка молекулярно-лучевой эпитаксии.* Эпитаксиальные слои КРТ выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии типа «Катунь-В», модернизированной для работы с ртутью. В качестве подложек использовались CdTe и GaAs с ориентациями (130) и (112)В с буферными слоями CdTe. Для создания потоков Te и Cd применялись двухзонные источники, а пара ртути — источник оригинальной конструкции, включающий зону испарения и рассеивания для формирования однородного потока. Температура образца измерялась с помощью термопары, находящейся в контакте с носителем подложки.

**Контроль предэпитаксиальной подготовки подложек.** Качество исходной подложки (CdTe, GaAs, Si) играет определяющую роль при выращивании бездефектных слоев КРТ из молекулярных пучков. Предэпитаксиальная подготовка подложек включает стандартную химическую обработку и последующий отжиг в сверхвысоком вакууме. Ранее нами было показано [13], что с помощью эллисометрии можно контролировать состояние поверхности CdTe

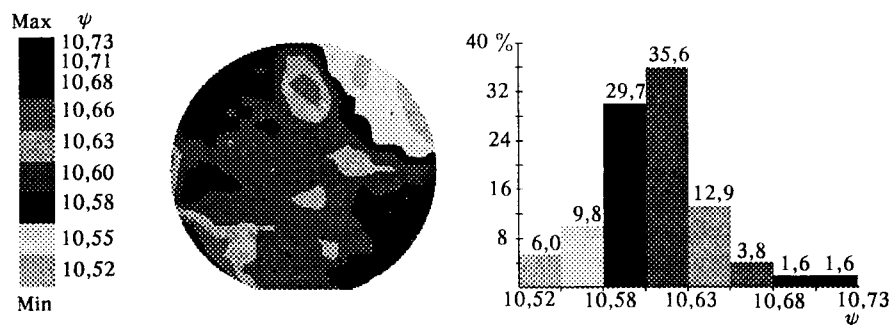


Рис. 1. Распределение значений параметра  $\psi$  по пластине GaAs после вакуумного отжига:  
 а – карта, б – гистограмма

после различных видов обработки и определять наличие остаточных слоев теллура, оценивать поверхностный рельеф, наблюдать процесс окисления. Используя эллипсометрию *in situ*, мы исследовали также процесс термической очистки GaAs в вакууме [14]. Это позволило наблюдать в реальном времени удаление окислов с поверхности и выбрать оптимальный режим отжига, не допускающий термического разложения поверхности GaAs.

Информацию о степени однородности поверхности исходной подложки дают измерения эллипсометрических параметров на сканирующем эллипсометре. Были последовательно проведены сканирующие измерения исходной пластины GaAs диаметром 50 мм после химического травления и вакуумного отжига. При этом мы наблюдали увеличение среднего по площади значения параметра  $\Delta$  (165,3, 167,1 и 167,9° соответственно), что свидетельствовало об очистке поверхности. На рис. 1 представлена карта распределения параметра  $\psi$  и соответствующая гистограмма для термически очищенной пластины. Среднее значение  $\psi = 10,61^\circ$  соответствует гладкой атомарно чистой поверхности GaAs [15], а незначительная величина дисперсии  $\delta\psi = \pm 0,04^\circ$  свидетельствует о высокой степени однородности поверхности.

Перспективной подложкой для выращивания фоточувствительных слоев КРТ служит кремний, так как на его базе можно создавать монолитные интегральные устройства по планарной технологии. В связи с этим были проведены исследования кремниевой поверхности.

Рис. 2 иллюстрирует динамику процесса очистки поверхности Si *in situ* при термическом отжиге в вакууме. Пластина кремния ориентации (130) подвергалась обработке в водном растворе HF, которая, как известно, приводит к пассивации поверхности Si(111) водородом [16]. Затем пластина закружалась

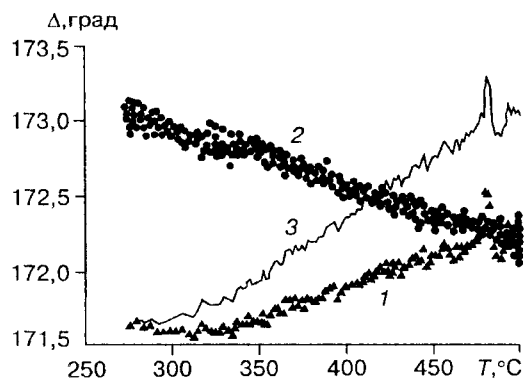


Рис. 2. Зависимость параметра  $\Delta$  от температуры прогрева кремния:  
 1 – первый прогрев, 2 – два цикла охлаждения – нагрева, 3 – кривая 1, пересчитанная с учетом температурных изменений оптических постоянных

в вакуумную камеру и прогревалась до температуры 500 °С со скоростью 0,2 град/с. При этом наблюдались изменения параметра  $\Delta$  (кривая 1), которые определяются двумя эффектами: десорбцией пассивирующей пленки и температурными изменениями оптических постоянных кремния. Дальнейшие циклы охлаждения — нагрева (кривая 2) связаны только со вторым фактором, что подтверждается их хорошей воспроизводимостью (на кривой представлены два цикла). В чистом виде эффект удаления пассивирующей пленки получается после вычитания из кривой 1 добавки, связанной с температурными изменениями, и изображен кривой 3. Для субмонослойных покрытий изменение величины  $\Delta$  пропорционально коэффициенту заполнения поверхности, поэтому можно считать, что кривая 3 описывает десорбцию пассивирующей пленки. Из рис. 2 видно, что удаление пассивирующего покрытия происходит в широком интервале температур и растянуто по времени. По-видимому, такой характер процесса связан с несингулярной ориентацией пластины, что дает большой разброс для энергии связи пассивирующего покрытия.

**Контроль начальных стадий роста пленок *in situ*.** На начальной стадии выращивания буферных или фоточувствительных слоев эллипсометрические параметры сильно изменяются вследствие интерференции на слое и имеют в координатах  $\psi - \Delta$  вид сворачивающейся спирали. На рис. 3 приведены три такие зависимости, измеренные в процессе эпитаксии пленок КРТ с различным составом на CdTe. Аналогичные результаты мы наблюдали также при росте буферных слоев CdTe на GaAs [14]. Для расчетов использовались значения оптических постоянных КРТ, зависимость которых от состава была тщательно измерена нами на выращенных пленках в широком диапазоне  $x$ .

При росте монокристаллических слоев высокого структурного совершенства наблюдается хорошее соответствие между расчетной кривой, откалиброванной по толщине, и экспериментом (см. рис. 3), что позволяет определять с высокой точностью скорость роста пленки. Было найдено, что на начальной стадии скорость роста увеличивается и стабилизируется при толщинах 100—150 нм. Стационарные значения скорости роста использовались для прогнозирования времени роста, необходимого для получения пленок заданной толщины. Толщины выращенных пленок измерялись затем по сколу на микроскопе МИИ-4. Расхождения между данными обоих методов во всех случаях не превышали 5 %, при этом скорости роста варьировались в диапазоне 1—6 мкм/ч.

В некоторых случаях процесс роста характеризуется незначительными отклонениями эллипсометрических параметров от расчетной кривой. Эти

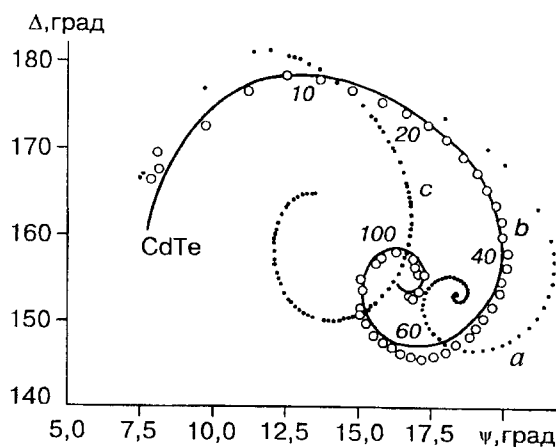


Рис. 3. Изменения эллипсометрических параметров на начальных стадиях роста пленок КРТ на CdTe.

Кружки и точки — экспериментальные данные для трех процессов синтеза пленок различного состава:  $x = 0$  (а),  $x = 0,2$  (б) и  $x = 0,45$  (с). Сплошная линия — расчетная зависимость для состава  $x = 0,2$ , цифры у кривой указывают толщину пленки в нм

отклонения можно объяснить образованием неоднородного слоя и рассчитать распределение оптических постоянных по толщине, используя методику, изложенную в [17]. Так, для пленок CdTe на GaAs были найдены аномально большие значения показателя поглощения вблизи подложки, что связано с высокой плотностью образования дефектов на начальной стадии роста [14].

**Контроль морфологии поверхности роста.** Известно, что реальная поверхность пленок КРТ может иметь микрорельеф с характерными размерами меньше или порядка длины волны, и это обстоятельство сильно затрудняет эллипсометрическое исследование [18]. Однако при синтезе пленок КРТ изучение характеристик рельефа имеет самостоятельное значение благодаря его взаимной корреляции со структурой растущих слоев.

При толщинах слоев КРТ больше  $\sim 0,2$  мкм экспериментальная «спираль» в  $\psi - \Delta$ -плоскости сворачивается в предельную точку (см. рис. 3) из-за поглощения света в слое, и дальнейшая эволюция эллипсометрических параметров зависит от условий роста. При оптимальных условиях (плотности молекулярных потоков, температура подложки и т. д.) и качественной структуре подложки измеряемые значения  $\psi, \Delta$  находятся вблизи предельной точки, которая соответствует выбранному составу КРТ и гладкой поверхности роста.

При неоптимальных условиях возможно образование дефектов с высокой плотностью [19], что, в свою очередь, приводит к огрублению поверхности и как следствие к значительному уменьшению угла  $\Delta$ . Такая ситуация отражена на рис. 4, где представлены результаты измерений  $\psi$  и  $\Delta$  во времени для  $x \approx 0,2$ . Представленная здесь же номограмма показывает зависимость эллипсометрических параметров от размеров рельефа. Для расчета номограммы использована модель отражения поляризованного света статистически шероховатой поверхностью [20].

Сопоставляя изменения эллипсометрических параметров с номограммой, можно судить о развитии рельефа. Сначала огрубление поверхности сопровождается возрастанием как высоты, так и длины характерных размеров рельефа, затем  $L$  стабилизируется, а  $H$  продолжает увеличиваться. При этом неизбежно появление других ориентаций поверхности, помимо исходной, на которых заданные условия роста уже не будут оптимальными. Это приводит к резкому ухудшению структуры растущей пленки вплоть до срыва монокристаллического роста и образования поликристалла. С другой стороны, включения поликристаллической фазы и дефектов роста способствуют развитию рельефа, и, таким образом, процесс будет развиваться по нарастающей. Бла-

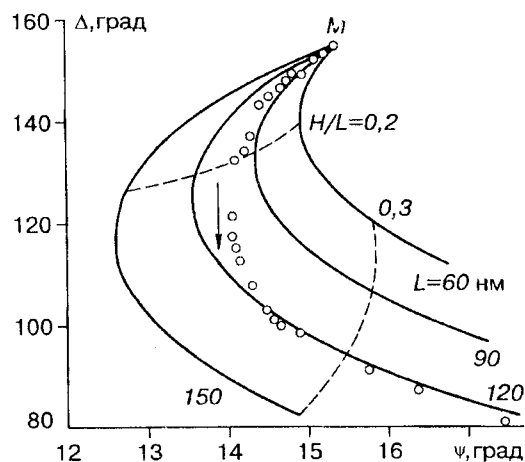


Рис. 4. Расчетные зависимости  $\psi$  и  $\Delta$  для КРТ состава  $x = 0,2$  от характерных размеров микрорельефа в плоскости образца  $L$  и по нормали  $H$ .

Точка  $M$  соответствует гладкой поверхности. Сплошные линии —  $L = \text{const}$ , штриховые —  $H/L = \text{const}$ . Символы — результаты измерений в процессе роста пленки с развивающейся морфологией, стрелка указывает направление изменений во времени

годаря такой взаимосвязи кристаллической структуры с рельефом последний удобно использовать в качестве критерия кристаллического совершенства растущих слоев.

Экспериментально установлено, что развитие рельефа становится необратимым, если  $\Delta$  падает ниже  $\sim 150^\circ$ . На начальных же стадиях образования рельефа ( $\Delta > 150^\circ$ ) процесс может быть остановлен подбором соответствующих условий роста, и с течением времени поверхность снова выгладится. Проводя тщательный подбор условий выращивания и контролируя процесс измерением эллипсометрических параметров, можно определить наиболее оптимальные условия роста, необходимые для получения высококачественных слоев КРТ [21].

**Контроль состава пленок КРТ.** Для создания высококачественных фоточувствительных структур на основе КРТ исходные пленки должны иметь однородный состав как по толщине, так и по площади образца. Опыт показывает, что при фиксированных параметрах технологического режима состав может меняться в процессе роста и необходима их корректировка, чтобы компенсировать эти изменения. С другой стороны, может возникнуть необходимость выращивания варизонных структур с переменным составом, например, для оптического просветления поверхности.

Эллипсометрический контроль состава основан на зависимости оптических постоянных КРТ от  $x$ . За счет этого при выбранном угле падения света  $\varphi = 70^\circ$  параметр  $\psi$  меняется от  $4^\circ$  для CdTe до  $15^\circ$  для HgTe, обеспечивая чувствительность к изменению  $x$  на уровне  $\delta x \sim 0,001$ . Для получения градуировочной кривой  $\psi(x)$  были проведены тщательные измерения пленок КРТ высокого структурного совершенства, полученных методами МЛЭ и парофазной эпитаксии [22]. Результаты представлены на рис. 5. Аппроксимация этих данных квадратичной зависимостью дает  $\psi(x) = 14,87 - 12,95x + 2x^2$ . Градуировочная кривая может быть пересчитана применительно к условиям измерения в установке синтеза (соответствующие угол падения и температура) и позволяет определять состав с точностью  $\delta x = \pm 0,01$ , а относительное его изменение в процессе роста пленки — не хуже 0,001.

В качестве примера на рис. 6 приведены значения  $\psi$  и  $\Delta$ , измеренные в процессе выращивания варизонной структуры, и рассчитанная для данных  $\psi$  зависимость состава от толщины. Барьерные области на границах пленки были получены для уменьшения поверхностной рекомбинации носителей. Распределение состава в этих структурах проверялось по спектрам отражения при последовательном стравливании пленки и обнаружило хорошее согласие с данными эллипсометрических измерений *in situ*. Параметр  $\Delta$  оставался

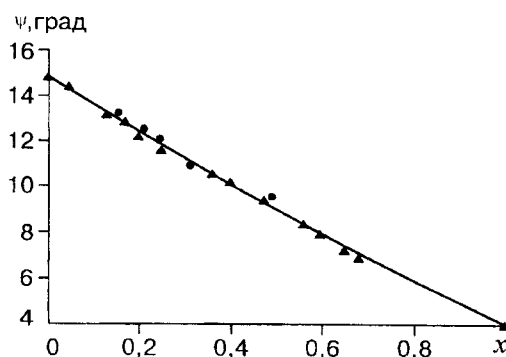


Рис. 5. Калибровочная кривая  $\psi(x)$  для определения состава.

Треугольники и точки — экспериментальные данные, соответствующие образцам, полученным парофазной технологией и МЛЭ соответственно; сплошная кривая — аппроксимация эксперимента квадратичной зависимостью  $\psi(x) = 14,87 - 12,95x + 2x^2$

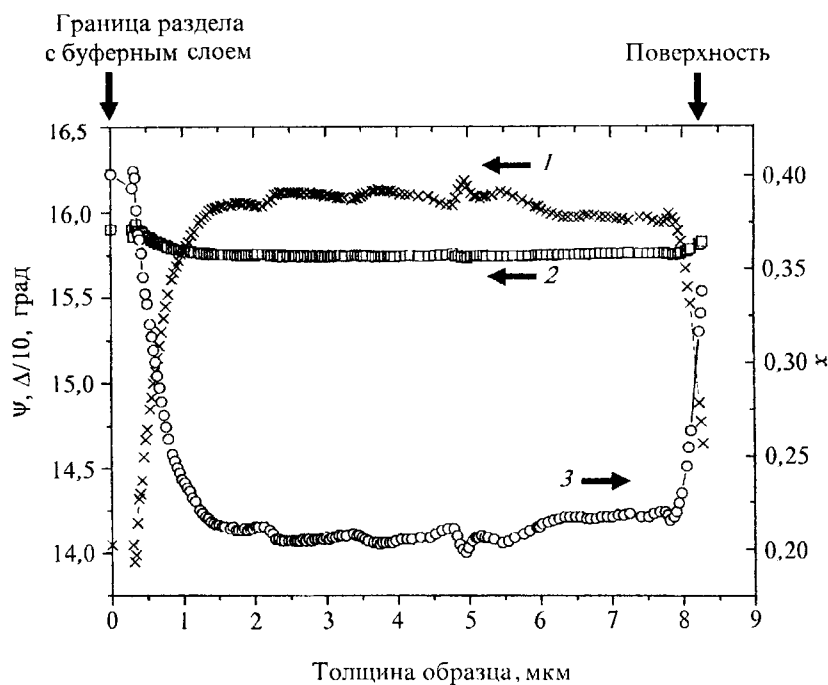


Рис. 6. Профиль эллипсометрических параметров и распределение состава по толщине образца, измеренные *in situ*:

1, 2 — параметры  $\psi$  (крестики) и  $\Delta$  (квадратики) соответственно; 3 — распределение состава  $x$  (кружки)

неизменным в течение всего процесса роста и соответствовал гладкой поверхности.

**Контроль температуры поверхности роста.** Одна из важных проблем в технологии молекулярно-лучевой эпитаксии — определение температуры поверхности роста. В условиях сложного лучистого теплообмена показания термопары, расположенной вблизи подложки со стороны нагревателя, могут заметно отличаться от температуры поверхности образца, в особенности при отсутствии теплового контакта образца с держателем. При нестационарных процессах это отличие имеет место даже в том случае, когда обеспечен надежный тепловой контакт.

Это наглядно иллюстрируется результатами, представленными на рис. 7. Пластина кремния подвергалась последовательным прогревам и охлаждениям со средней скоростью 0,2 (кривая 1) и 0,4 град/с (кривая 2) соответственно. Температура контролировалась термопарой, находящейся в тепловом контакте с молибденовым держателем, к которому подложка была приклеена индием. За счет температурных изменений оптических постоянных кремния параметр  $\psi$  варьировался в диапазоне 0,6°.

Как видно из рисунка, наблюдается гистерезис зависимости  $\psi(T)$ , который объясняется тем, что температура поверхности кремния устанавливается с некоторым запаздыванием по сравнению с показаниями термопары.

Метод эллипсометрии, таким образом, несет информацию в реальном

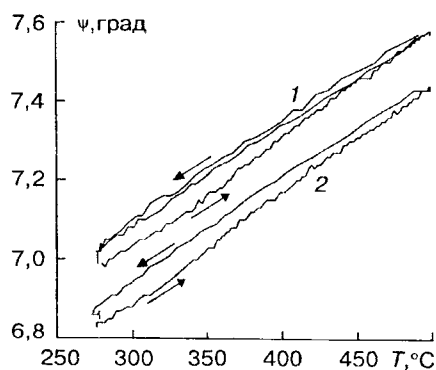


Рис. 7. Зависимость эллипсометрического параметра  $\psi$  от температуры прогрева пластины Si, измеренной термопарой.

Стрелки показывают направление изменений во времени

времени непосредственно с приповерхностной области, простирающейся на глубину проникновения света (для Si это несколько десятых микрона, для КРТ состава  $x = 0,2$  около 100 нм). Как следует из приведенных выше результатов, данная информация особенно существенна при чередовании технологических режимов с различной температурой, например при выращивании сверхрешеток. При этом важно знать, как быстро показания термпары релаксируют к истинной температуре подложки.

Для постановки эллипсометрической методики контроля температуры КРТ предварительно измерены температурные зависимости оптических постоянных CdTe и HgTe (рис. 8). Показатели преломления и поглощения рассчитаны по модели с резкой границей раздела из результатов измерений углов  $\psi$ ,  $\Delta$ , проведенных при прогреве образцов в вакуумной камере. Большой разброс данных для HgTe обусловлен трудностью поддержания в широком температурном интервале условий, препятствующих неконгруэнтному испарению ртути, которое приводит к нарушению стехиометрии и развитию микрорельефа.

Используя температурные зависимости  $n$  и  $k$  для крайних точек тройного соединения CdHgTe, можно рассчитать в общем виде зависимость комплексного показателя преломления КРТ от состава и температуры  $T$ . Экспериментальные данные свидетельствуют, что для КРТ выполняется соотношение Лорентца—Лоренца [23], описывающее оптические постоянные смеси двух компонентов, в данном случае HgTe и CdTe. Поэтому можно записать в рамках этого приближения:

$$\frac{N^2(x) - 1}{N^2(x) + 2} = x \frac{N_{\text{CdTe}}^2 - 1}{N_{\text{CdTe}}^2 + 2} + (1 - x) \frac{N_{\text{HgTe}}^2 - 1}{N_{\text{HgTe}}^2 + 2},$$

где  $N(x) = n(x) - ik(x)$ ,  $N_{\text{HgTe}} = n_{\text{HgTe}} - ik_{\text{HgTe}}$ ,  $N_{\text{CdTe}} = n_{\text{CdTe}} - ik_{\text{CdTe}}$  — комплексные показатели преломления КРТ, HgTe и CdTe соответственно.

Решение этого уравнения дает искомую зависимость  $N(x, T)$ , что позволяет рассчитать интересующие нас температурные коэффициенты чувствительности параметров  $\psi$  и  $\Delta$ :  $\beta_\psi(x) \equiv d\psi/dT$  и  $\beta_\Delta(x) \equiv d\Delta/dT$ . Для наиболее важной области  $0 < x < 0,3$  коэффициенты чувствительности аппроксимируются линейными выражениями:

$$\beta_\psi = (4,6 - 2,2x)10^{-3} \quad \text{и} \quad \beta_\Delta = (-2,3 + 1,6x)10^{-2} \text{ угл. град/}^\circ\text{C}.$$

Несмотря на то что во всем диапазоне  $x$   $|\beta_\Delta| > |\beta_\psi|$ , удобнее использовать для контроля температуры зависимость  $\psi(T)$ , поскольку  $\psi$  изменяется более воспроизводимо, чем  $\Delta$ . При погрешностях измерений  $\delta\psi = \pm 0,01^\circ$  относительная точность определения температуры для КРТ с составом, близким к 0,2, будет  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Реально эта точность ограничена не приборной погрешностью, а

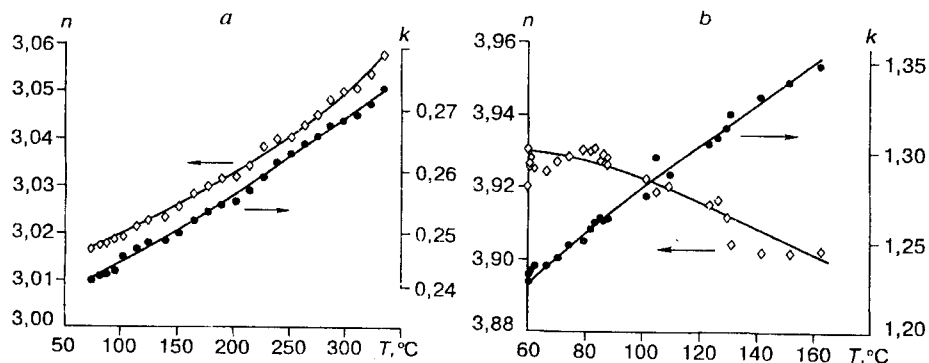


Рис. 8. Зависимости показателей преломления  $n$  и поглощения  $k$  от температуры:  
а — CdTe, б — HgTe



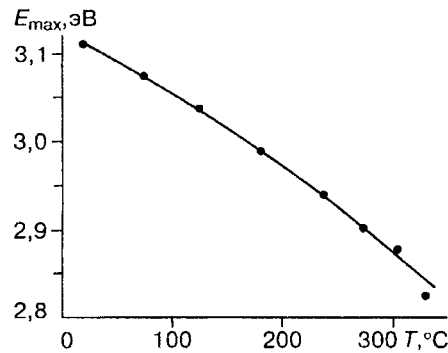


Рис. 9. Зависимость энергетического положения максимума псевдодиелектрической функции  $\epsilon_1(E)$  для CdTe от температуры образца.

Точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимирующая кривая

неконтролируемыми изменениями на поверхности (например, развитием микрорельефа) и составляет порядка  $10^\circ\text{C}$ .

Альтернативный способ определения температуры и не столь критичный к совершенству поверхности состоит в измерении энергетического положения экстремумов  $E_{\text{max}}$  в спектрах диэлектрических функций, соответствующих критическим точкам плотности состояний. Для определения калибровочной кривой  $E_{\text{max}}(T)$  были проведены температурные измерения спектров оптических постоянных CdTe в энергетическом диапазоне от 1,8 до 3,3 эВ.

Исследуемый образец — пленка CdTe толщиной 3 мкм на подложке GaAs — был выращен на установке МЛЭ. После загрузки в измерительную камеру он предварительно подвергался отжигу в вакууме при температуре  $300^\circ\text{C}$ , чтобы избежать неконтролируемого удаления поверхностных слоев в процессе измерений. При последующем нагреве измерялись спектры эллипсометрических параметров при различных температурах и рассчитывались псевдодиелектрические функции  $\epsilon_1(E)$  и  $\epsilon_2(E)$ .

Анализ полученных спектров показывает, что максимум в зависимости  $\epsilon_1(E)$ , соответствующий критической точке  $E_1$ , с увеличением температуры уширяется и смещается в длинноволновую область. Зависимость  $E_{\text{max}}(T)$  (рис. 9) имеет слегка нелинейный характер и аппроксимируется соотношением  $E_{\text{max}}(T) = -7,1 \cdot 10^{-7}T^2 - 6,15 \cdot 10^{-4}T + 3,124$ . Коэффициент при линейном члене этого выражения хорошо согласуется с известными из литературы данными [24].

Экспериментальные точки довольно точно укладываются на аппроксимирующую кривую за исключением последней, полученной при  $330^\circ\text{C}$ , что объясняется, по-видимому, появлением рельефа за счет термического испарения. Такая воспроизводимость результатов позволяет измерять температуру с точностью порядка  $2^\circ\text{C}$ , что вполне удовлетворяет требованиям технологии.

Что касается измерения температуры КРТ, то проблема усложняется одновременной зависимостью положения максимумов в спектрах  $\epsilon_1(E)$  и  $\epsilon_2(E)$  как от температуры, так и от состава. Можно, однако, надеяться, что анализ формы спектральных зависимостей  $\epsilon(E)$ , например измерение полуширины пика в области максимума, позволит разделить влияние этих факторов и определить оба параметра.

**Заключение.** Эллипсометрия является удобным методом контроля различных стадий технологического процесса при выращивании слоев КРТ методом МЛЭ. Применение эллипсометрии позволило решить такие проблемы, как оценка качества очистки подложек для МЛЭ, контроль толщины и скорости роста буферных слоев CdTe и пленок КРТ, контроль морфологии поверхности и состава КРТ в течение всего процесса синтеза и измерение температуры поверхности роста. Наиболее воспроизводимо и точно температура может быть измерена с использованием спектроэллипсометрии.

Авторы выражают благодарность В. Г. Ремеснику за измерения спектров отражения КРТ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
2. Arvin H., Aspnes D. E., Rhiger D. R. Properties of  $\text{Hg}_{0,71}\text{Cd}_{0,29}\text{Te}$  and some native oxides by spectroscopic ellipsometry // J. Appl. Phys. 1983. 54. P. 7132.
3. Aspnes D. E., Arvin H. Nondestructive analysis of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,00, 0,20, 0,29$ , and 1,00) by spectroscopic ellipsometry. 1. Chemical oxidation and etching // J. Vac. Sci. Technol. 1984. A2. P. 1309.
4. Arvin H., Aspnes D. E. Nondestructive analysis of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x = 0,00, 0,20, 0,29$ , and 1,00) by spectroscopic ellipsometry. 2. Substrate, oxide, and interface properties // Ibid. P. 1316.
5. Demay Y., Gailliard J. P., Medina P. In situ spectroscopic ellipsometry of mercury cadmium telluride MBE layers // J. Cryst. Growth. 1987. 81. P. 97.
6. Demay Y., Arnoult D., Gailliard J. P., Medina P. In situ spectroscopic ellipsometry during molecular-beam epitaxy of cadmium mercury telluride // J. Vac. Sci. Technol. 1987. A5. P. 3139.
7. Hartley R. H., Folkard M. A., Carr D. et al. Ellipsometry: a technique for real time monitoring and analysis of MBE grown CdHgTe and CdTe—HgTe superlattices // J. Cryst. Growth. 1992. 117. P. 166.
8. McLevige W. V., Arias J. M., Edwall D. D., Johnston S. L. Ellipsometric profiling of HgCdTe heterostructures // J. Vac. Sci. Technol. 1991. B9, N 5. P. 2483.
9. Vina L., Umbach C., Cardona M., Vodopjanov L. Ellipsometric studies of electronic interband transitions in  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  // Phys. Rev. B. 1984. 29. P. 6752.
10. А. с. 4235335 СССР. Спектроэллисометр /С. В. Рыхлицкий, В. К. Соколов, В. Н. Федоринин. Опубл. 28.07.89. Бюл. № 27.
11. An I., Li Y. M., Nguyen H. V., Collins R. W. Spectroscopic ellipsometry on the millisecond time scale for real-time investigation of thin film and surface phenomena // Rev. Sci. Instrum. 1992. 63. P. 3848.
12. Аульченко Н. А., Ладыгин В. И., Рыхлицкий С. В. и др. Автоматический лазерный эллисометр ЛЭФ-801 «Микроскан» // Лазеры и современное приборостроение: Мат-лы шк.-сем.-выст. Санкт-Петербург, 1991.
13. Гутаковский А. К., Елисеев В. М., Любинская Р. И. и др. Исследование состояния поверхности CdTe // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 9. С. 80.
14. Мардежев А. С., Михайлов Н. Н., Швец В. А. Эллипсометрический контроль предэпитаксиальной подготовки подложек GaAs и роста эпитаксиальных пленок CdTe // Поверхность. Физика, химия, механика. 1990. № 12. С. 92.
15. Aspnes D. E., Studna A. A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1,5 to 6,0 eV // Phys. Rev. 1984. 27, N 2. P. 985.
16. Higashi G. S., Chabal Y. J., Trucks G. W., Raghavachari K. Ideal hydrogen termination of the Si(111) surface // Appl. Phys. Lett. 1990. 56, N 7. P. 657.
17. Швец В. А. Определение профилей оптических постоянных неоднородных слоев из эллипсометрических измерений in situ // Автометрия. 1993. № 6. С. 25.
18. Баютова О. Р., Мардежев А. С., Покровский Л. Д. и др. Исследование микрорельефа поверхности пленок HgTe методом эллипсометрии // Автометрия. 1993. № 1. С. 98.
19. Sabinina I. V., Gutakovsky A. K., Sidorov Yu. G. et al. Defect formation during growth of CdTe(111) and HgCdTe films by molecular beam epitaxy // J. Cryst. Growth. 1992. 117. P. 238.
20. Брагинский Л. С., Гишинский И. А., Свиташева С. Н. Отражение света шероховатой поверхностью: интерпретация эллипсометрических измерений // ДАН СССР. 1987. 293, № 5. С. 1097.
21. Svitashov K. K., Dvoretzky S. A., Sidorov Yu. G. et al. The growth of high-quality MCT films by MBE using in-situ ellipsometry // Cryst. Res. Technol. 1994. 29. P. 931.
22. Варавин В. С., Сидоров Ю. Г., Ремесник В. Г. и др. Приготовление пленок  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  методом парофазной эпитаксии HgTe на подложках CdTe с последующей взаимной диффузией // ФТП. 1994. 28, вып. 4. С. 577.
23. Свиташев К. К., Швец В. А., Мардежев А. С. и др. Метод эллипсометрии в технологии синтеза соединений кадмий—ртуть—теллур // ЖТФ. 1995. 165, № 9. С. 110.
24. Rodzik A., Kiziel A. Reflectivity spectra of monocrystalline  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  as a function of composition and temperature // J. Phys. C: Solid State Phys. 1983. 16. P. 203.

Поступила в редакцию 3 апреля 1996 г.