

06;07;11;12

К вопросу об измерении толщины слоев на вращающихся подложках в установках молекулярно-лучевой эпитаксии

© С.Е. Александров,¹ Г.А. Гаврилов,¹ Г.Ю. Сотникова,¹ А.Н. Алексеев,² Д.А. Баранов,² А.П. Шкурко²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: gga_holo@mail.ru

² ЗАО „Научное и технологическое оборудование“,
194156 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: info@semiteq.ru

(Поступило в Редакцию 4 июня 2008 г.)

Разработан простой и эффективный способ синхронной регистрации сигнала интерференции при измерении толщины слоя, наращиваемого на вращающейся подложке в установках молекулярно-лучевой эпитаксии. Выделение информационной составляющей сигнала из помех, обусловленных вращением (кондиционирование сигнала), приводит к повышению точности регистрации сигнала интерференции, поступающего в устройство вычисления толщины слоя и систему автоматического управления технологическим процессом, обеспечивая повышение качества и воспроизводимость выращиваемых структур.

PACS: 07.05.Hd, 07.60.Ly, 81.70.Fy

Введение

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) является одним из важнейших инструментов изготовления полупроводниковых структур с заданными свойствами. Наличие эффективных средств контроля параметров процесса (температура подложки, толщина наращиваемого слоя и т. п.) *in situ* позволяет управляемо выращивать и создавать многослойные структуры с планируемым распределением состава в слоях и контролируемые гетеропереходами, при этом качество и воспроизводимость составов зависят от точности, быстродействия и чувствительности используемого контрольно-измерительного оборудования. Контроль толщины наращиваемого слоя в процессе роста является одним из важнейших условий достижения необходимого результата.

Обычно для дистанционного измерения толщины прозрачных пленок используются оптические — эллипсометрические или интерференционные — методы [1]. Для обоих методов характерно наличие зондирующего луча света с заданными параметрами (спектральный состав, интенсивность, поляризация и т. п.), падающего на исследуемый образец под фиксированным углом θ , и регистрация изменения параметров отраженного излучения (поляризации или интенсивности). По этим данным рассчитывают толщину нанесенной на подложку пленки (h).

С точки зрения простоты технической реализации измерительного устройства, необходимости измерения толщины многослойных структур и обеспечения требуемой точности измерений на установках МЛЭ используется интерферометрический метод измерения толщины слоев. Участок подложки с наращиваемым на ней слоем освещается лучом лазера с длиной волны λ под углом θ . Лучи света, отраженные от передней и задней

поверхностей слоя, интерферируют, и интенсивность отраженного луча (интерферограмма) регистрируется фотоприемником и определяется выражением [1]

$$I = I_0 \left(1 + \cos \left\{ \frac{2hn \cos \left[\arcsin \left(\frac{\sin \theta}{n} \right) \right] + 1/2\lambda}{\lambda} \right\} \right), \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность зондирующего луча, I — интенсивность отраженного луча, λ — длина волны зондирующего излучения, θ — угол падения зондирующего луча, h — толщина слоя (пленки), n — показатель преломления материала слоя.

Из выражения (1) видно, что для вычисления толщины пленки необходимо в течение всего цикла измерения поддерживать постоянными интенсивность зондирующего пучка I_0 и его угол падения θ . Задача стабилизации интенсивности зондирующего пучка I_0 легко решается путем формирования опорного канала для контроля мощности излучения источника.

Что касается угла θ , то при вращении подложки исключить его вариации невозможно. Величина угла θ изменяется при наличии клиновидности подложки или напряженных слоев в составе эпитаксиальной структуры, что приводит к ее изгибу при изменении температуры. Изменение угла θ проявляется в виде высокочастотной модуляции интенсивности отраженного пучка, так как время оборота держателя ($60\text{--}90 \text{ min}^{-1}$) много меньше периода изменения интерферограммы. Более существенные помехи возникают, если держатель подложки оказывается наклонным к оси вращения в результате некачественной сборки системы и/или установки подложки в держатель с некоторым наклоном, тогда отраженный от вращающейся подложки луч при ограниченной апертуре фотоприемника может даже выходить за его пределы, что приводит к полному про-

паданию сигнала. Современные установки эпитаксиального роста автоматически управляют технологическим процессом, поэтому пропадание управляющего сигнала может привести к нарушению технологического цикла и, как следствие, к появлению брака.

В настоящей работе предложены способ и устройство, позволяющие устранить помехи, обусловленные вращением образца и, следовательно, повысить точность измерения толщины наращиваемого слоя и исключить пропадание сигнала, негативно отражающееся на работе системы автоматизации.

Кондиционирование сигнала интерферометра как способ повышения точности измерений в технологических установках МЛЭ

Подавление помех в сигнале интерферограммы может быть реализовано разными способами, например, с помощью низкочастотной фильтрации сигнала фотоприемника. Недостатком частотной фильтрации является зависимость качества сигнала от скорости вращения подложки. Другим способом борьбы с помехами может быть детектирование сигнала интерферограммы синхронно с вращением образца, реализуемое с помощью импульсных лазеров [2]. Недостатком такого метода является его значительная техническая сложность, связанная с необходимостью модуляции источника при сохранении стабильности мощности и спектрального состава излучения.

Среди потенциально возможных решений нами был выбран легко реализуемый технически способ синхронного детектирования сигнала интерферограммы на выходе фотоприемника. Такой подход допускает использование непрерывных источников зондирующего излучения (He-Ne или полупроводниковый лазер), что упрощает устройство и существенно облегчает его настройку. Детектирование сигнала интерферограммы фотоприемником осуществляется непрерывно, а его регистрация и оцифровка осуществляются после обработки в схеме кондиционирования сигнала. Обработка заключается в синхронной выборке значений интерферограммы, соответствующих фиксированным угловым положениям подложки ψ_0 и, следовательно, постоянному углу падения луча лазера θ на измеряемый слой, и сохранении этих значений до следующего отсчета.

Предлагаемый подход был реализован нами в интерферометрическом устройстве для измерения толщины слоя в ростовой камере МЛЭ [3], блок-схема которого приведена на рис. 1. Для синхронизации момента измерения сигнала интерферометра в установке МЛЭ на внешний ввод вала вращения ростового манипулятора, жестко связанного с осью вращения держателя подложки, монтируется датчик углового положения.

Функции кондиционирования сигнала и вычисления толщины слоя выполняет микроконтроллер, на сигналь-

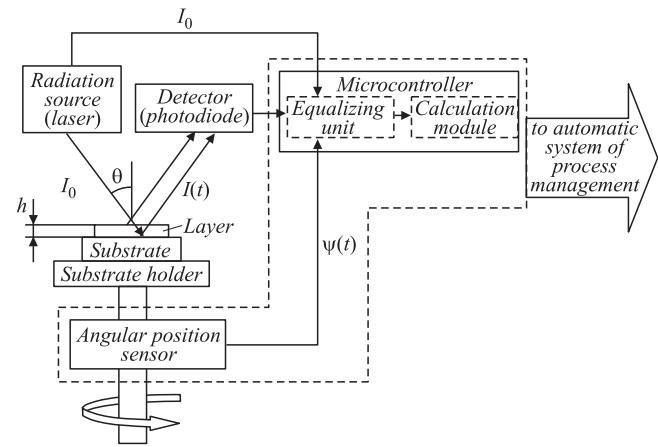


Рис. 1. Блок-схема интерферометрического устройства измерения толщины пленки, выращиваемой на подложке, в ростовой камере установки МЛЭ.

ный вход которого подается сигнал с выхода фотоприемника, а на управляющий вход поступает сигнал $\psi(t)$ с датчика углового положения оси вращения держателя подложки.

Во время предварительной настройки интерферометра оператор выбирает определенную точку на подложке, в которой желательнее измерять толщину слоя, фиксирует в памяти микроконтроллера соответствующее этой точке значение угла ψ_0 , поступающее с датчика углового положения, и при необходимости настраивает оптическую часть интерферометра на максимум выходного сигнала. В дальнейшем при непрерывном вращении подложки в процессе технологического роста регистрация и оцифровка сигнала интерферометра производится только в моменты времени, когда подложка занимает положение ψ_0 , причем измерение производится за время, на порядки меньшее, чем период измерений. Во всех остальных положениях подложки сигнал интерференции не регистрируется, а на выходе модуля кондиционирования в контроллере удерживается зафиксированное значение сигнала интерферограммы, пропорциональное толщине пленки при заданном угловом положении подложки ψ_0 . Это значение сохраняется до прихода следующего импульса оцифровки и непрерывно поступает на вход модуля контроллера, производящего вычисление толщины слоя, и далее — в систему автоматического управления технологическим процессом. Полученный таким образом сигнал интерферограммы при кажущейся „медлительности“ будет зависеть только от толщины выращиваемого слоя.

На практике „медлительность“ изменения интерферограммы не имеет существенного значения, так как рост пленок происходит за большое число оборотов подложки, а улучшенный (кондиционированный) таким образом сигнал позволит вычислять толщину слоя с большей точностью не только подсчетом числа максимумов, но и с учетом долей периода интерферограммы.

Эксперимент

Разработанное устройство измерения толщины слоев на вращающейся подложке, предназначенное для контроля ростового процесса на технологических установках, было испытано в ЗАО „Светлана-Рост“ при изготовлении многослойных гетероструктур GaAlN/Al₂O₃ методом МЛЭ на установке SemiTEq™ STE3N2. Конструктивно устройство было выполнено в соответствии с блок-схемой рис. 1, и в нем можно выделить три основных блока.

1. Блок излучателя, содержащий источник когерентного зондирующего излучения с блоком питания (полупроводниковый лазер мощностью 1 мВт), механическое устройство наведения, обеспечивающее поворот зондирующего луча на угол $\pm 10^\circ$ и смещение его по плоскости крепления на ± 12 мм, и делитель света, обеспечивающий деления пучка лазера на две неравные части и направление меньшей из них на фотоприемник для контроля мощности излучения лазера.

2. Блок приемника отраженного излучения (кремниевый фотодиод), содержащий тепловой фильтр, защищающий приемник от теплового излучения подложки, систему визуализации положения отраженного луча в плоскости фотоприемника и механическое устройство наведения приемника для юстировки положения отраженного луча в плоскости фотоприемника.

3. Блок синхронизации, содержащий датчик угла положения подложки, выполненный в виде металлического диска с прорезями и оптопары, и электронный блок, обеспечивающий кондиционирование сигнала интерферограммы и вычисление толщины слоя. Блок осуществляет также передачу кондиционированного сигнала интерферограммы в аналоговом виде для контроля работы измерительного устройства, а также по двум цифровым каналам:

— RS-232, информация, передаваемая по данному каналу, предназначена для программного обеспечения, позволяющего производить настройку блока синхронизации на стартовый уровень сигнала;

— RS-485, протокол MODBUS, предназначенный для передачи информации в систему автоматического управления технологическим процессом.

На рис. 2 приведены типичные сигналы интерферограмм, полученные в процессе эпитаксиального роста полупроводниковой пленки на вращающейся подложке с помощью обычного асинхронного (а) и рассматриваемого в настоящей работе синхронного детектора (b).

Очевидно, что по интерферограмме практически невозможно измерить толщину выращенного слоя до достижения сигналом первого экстремума (в случае использования He-Ne-лазера при угле падения излучения на поверхность 40° при выращивании эпитаксиального слоя AlN ($n = 2.15$) на подложке сапфира ($n = 1.70$) первый экстремум достигается при толщине слоя порядка 700 \AA). В промежутках между уже зафиксированными экстремумами точность вычисления толщины

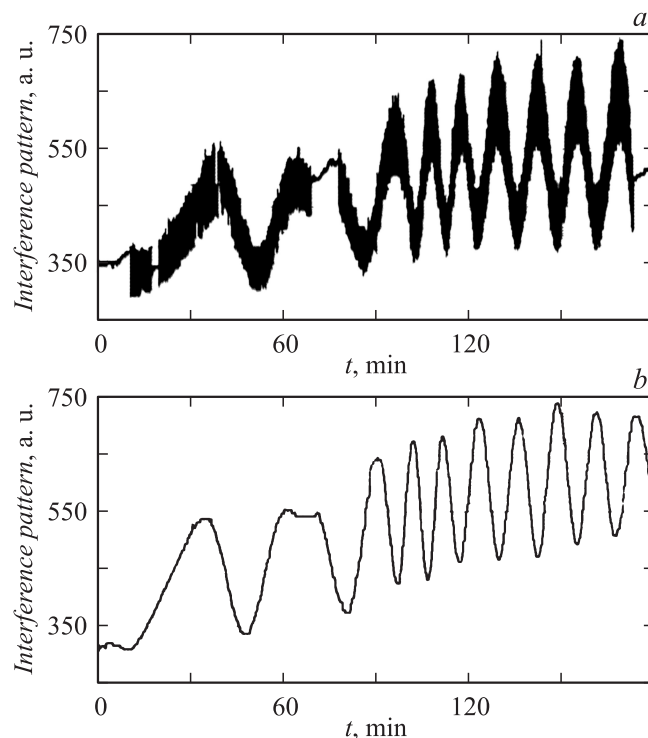


Рис. 2. Сигналы интерферограмм на выходе асинхронного (а) и синхронного (b) детекторов.

слоя будет зависеть от точности определения положения экстремумов и отношения сигнал/шум в сигнале интерферограммы. Очевидно, что путем последующей обработки сигнала интерферограммы (в режиме накопления) можно достичь сколь угодно высокой точности вычисления толщины слоя, однако в режиме *in situ* она будет полностью определяться текущим значением отношения сигнал/шум в измеряемом сигнале.

Таким образом, с точки зрения оценки измерений, помеху, вызванную вращением образца, можно рассматривать как шум информационного сигнала, который определяет ошибку в нахождении экстремума интерферограммы в реальном времени. По приближенным оценкам отношение сигнал/шум на рис. 2, а (не более 10) позволяет определить положение экстремума интерферограммы с точностью ± 10 – 15% от ее периода, что соответствует погрешности в измерении толщины слоя ± 100 – 120 \AA . Увеличение отношения сигнал/шум более чем на порядок (рис. 2, b) приводит к уменьшению погрешности в измерении толщины слоя до ± 20 – 30 \AA .

Разработка высококачественной контрольно-измерительной аппаратуры открывает широкие перспективы дальнейшего развития метрологического обеспечения технологических процессов. В частности, свободный от помех сигнал оптического интерферометра позволяет использовать современное программное обеспечение, например, пакеты программ фирмы ORS типа R-FIT[©]LIVE и R-FIT[©]v4 (www.ors-ltd.com). Данное программное обеспечение позволяет в реальном времени

определять текущую толщину слоя, его комплексный показатель преломления, среднеквадратичную шероховатость (RMS) и скорость роста, в том числе и для переходных слоев, т.е. градиентных и каскадных (ступенчатых и сверхрешеточных), в условиях изменения температуры и связанным с этим искажением сигнала (при изменении температуры меняется толщина слоев).

Суть метода обработки сигнала интерферограмм заключается в создании компьютерной модели динамики параметров планируемого процесса роста, приводящего к получению материала с заданными свойствами, и обеспечении максимально точного соответствия модели и текущих значений измеряемых параметров реального процесса. Такой способ мониторинга технологического процесса *in situ* позволяет не только улучшить качество производимой продукции, но и создать новые материалы с заданными свойствами.

Заключение

Предложен и реализован простой и эффективный способ кондиционирования сигнала оптического интерферометра при измерении толщины слоев на вращающихся подложках, который позволяет в несколько раз повысить точность измерений, а также использовать современные программные средства метрологического обеспечения технологических процессов.

Разработанное устройство, предназначенное для контроля ростового процесса на технологических установках, было испытано в ЗАО „Светлана-Рост“ при изготовлении многослойных гетероструктур GaAlN/Al₂O₃ методом МЛЭ на установке SemiTEqTM STE3N2 и принято к постоянной эксплуатации.

Блок синхронизации, входящий в состав измерительного устройства, включающий датчик угла поворота оси держателя подложки и микропроцессорный модуль кондиционирования сигнала интерферограммы и вычисления толщины слоя, может быть использован на установках МЛЭ любых модификаций как дополнение к существующим асинхронным устройствам измерения толщины наращиваемых слоев.

Предложенный подход к кондиционированию измеряемого сигнала может быть распространен для измерения толщины слоев и в многоподложечных ростовых установках МЛЭ.

Список литературы

- [1] Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.
- [2] Ду-Нуор О. Способ и устройство для измерения толщины фоторезистивной пленки, в частности, фоторезистивной пленки на полупроводниковой подложке, Пат. RU2001107968 от 20.05.2003.
- [3] Александров С.Е., Гаврилов Г.А. и др. Устройство для измерения толщины пленок на вращающихся подложках. Пат. № 73728 от 12.11.2007.