

П. Е. Бережная, М. Ф. Ступак

(Новосибирск)

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ЛОКАЛЬНОГО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Используется эффект генерации второй гармоники зондирующего лазерного излучения для экспрессного, локального, неразрушающего контроля количественных и качественных кристаллических характеристик материалов. Представлены технические характеристики и описаны возможности автоматизированной лазерной системы выходного контроля кристаллических параметров полупроводниковых материалов. Данная система позволяет в течение нескольких минут определить ориентацию кристаллографических осей с погрешностью $\sim 0,1^\circ$ в локальных приповерхностных областях (диаметром ≤ 100 мкм, глубиной 0,1–1,0 мкм), выявить наличие локальных напряжений, создать карты и микрокарты кристаллического качества поверхности и оптического качества объема тестируемых материалов (время картирования ~ 15 мин).

Физические основы и достоинства используемого метода. Обычно для контроля физических свойств полупроводниковых материалов используют традиционные методы, основанные на дифракции рентгеновских, электронных и нейтронных пучков. Однако подобные системы малопродуктивны, а в некоторых случаях их использование связано с разрушением исследуемых структур. Указанных недостатков лишен метод нелинейно-оптического контроля (НОК) кристаллического качества на основе эффекта генерации второй гармоники (ГВГ) [1, 2]. Он позволяет осуществлять контроль кристаллографических параметров и качества изделий и образцов, прост в реализации, не требует вакуума в рабочем объеме.

Суть метода заключается в целевом анализе совокупности поляризационных характеристик излучения второй гармоники (ВГ), генерируемой в образце под воздействием зондирующего лазерного излучения и являющейся, по сути, однозначной характеристикой класса симметрии кристалла и его ориентации в пространстве. Ярко выраженная зависимость интенсивности поляризационных компонент ВГ от взаимной ориентации поляризации возбуждающего излучения и кристаллографических осей – угловая зависимость (УЗ) – определяет высокую чувствительность метода к вариациям локальных кристаллических характеристик контролируемых образцов [1].

В лабораторной практике широкое распространение получила схема НОК, работающая «на отражение» [1]. Однако она требует прецизионной

юстировки оптико-механических узлов, принятия специальных мер для исключения интерференции волн, отраженных от передней и задней поверхностей образца, что трудно реализовать на практике, в частности для пленок. Существенно, что упрощенный учет отраженной волны ВГ приводит к большим ошибкам [3].

Эти проблемы отсутствуют при использовании разработанного нами метода экспрессного НОК «на просвет», когда регистрируется прошедшая ВГ, возникающая в приповерхностном слое задней стороны образца [3–5]. Современная реализация этого метода позволяет получать набор данных о кристаллическом состоянии локальных участков исследуемых пленок и подложек, синтезировать карты распределения их вариаций вдоль поверхности образцов, формировать карты оптического качества всего объема образцов.

Далее представлены краткое описание установки нелинейно-оптического контроля кристаллического качества полупроводниковых материалов, ее технические характеристики и функциональные возможности, а также результаты экспериментальных исследований.

Схема, принципы и режимы контроля установки. Схема автоматизированной системы НОК представлена на рис. 1. Система состоит из лазерного источника излучения, оптико-механического сканирующего блока, блока приема и обработки информации, блока цифровых приемно-управляющих модулей и управляющего компьютера. В качестве источника излучения 1 используется YAP : Nd-лазер с длиной волны 1,079 мкм, работающий в импульсно-периодическом режиме с пассивной модуляцией добротности. Одномодовое линейно поляризованное излучение, падающее нормально к поверхности образца, фокусируется системой 2 на поверхность тестируемого образца 4 в пятно диаметром 0,05–0,2 мм для обеспечения необходимого пространственного разрешения.

Поворот плоскости поляризации падающего на образец излучения для получения угловых зависимостей ВГ осуществляется посредством полуволновой фазовой пластинки 3. В установке предусмотрена возможность сканирования исследуемого образца в плоскости, перпендикулярной лучу, что позволяет получать УЗ в любой точке образца, а также производить его картирование. Параметрическое зеркало 5 используется в качестве фильтра: отделяет ВГ от основной частоты и через анализатор 6 (ориентация которого

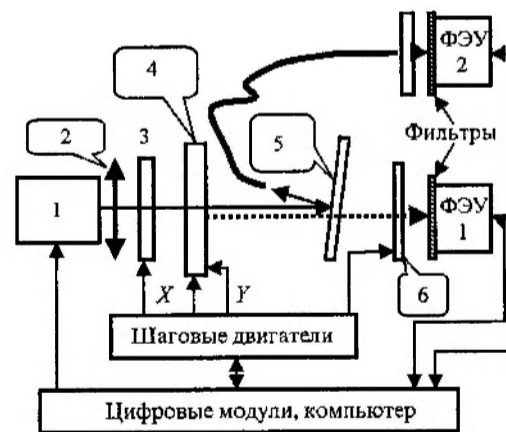


Рис. 1. Блок-схема комплекса НОК (пунктирная линия – излучение ВГ)

синхронизирована с ориентацией фазовой пластинки) направляет излучение ВГ на ФЭУ1 – рабочий канал.

Наличие двух каналов регистрации: рабочего и опорного (оптоволокно + не критичный удвоитель частоты + ФЭУ2), а также сильное поглощение излучения на частоте ВГ в исследуемых полупроводниковых материалах позволяют разделить вклады поверхности и объема в сигнал ВГ.

Технологические особенности исполнения данной системы и физические основы возбуждения ВГ в веществе накладывают ограничения на виды тестируемых материалов. Из всего набора кристаллических веществ эффективно тестироваться данной системой могут только кристаллические структуры без центра инверсии, за исключением узкозонных полупроводников (из-за значительного поглощения в них излучения используемого лазера).

В системе с помощью программного обеспечения реализовано два режима работы.

Режим количественного определения локальной ориентации кристаллографических осей в приповерхностном слое тестируемого образца и относительного кристаллического качества локальной области предусматривает вращение плоскости поляризации лазерного излучения при неподвижном исследуемом образце. В результате получается график зависимости интенсивности ВГ от угла поворота плоскости поляризации – угловая зависимость. По данной зависимости программа определяет в изначально заданной локальной области ориентацию кристаллографических осей в приповерхностном слое плоскости среза. Результаты работы системы в этом режиме представлены на примере определения направления кристаллографических осей образца GaAs, класс симметрии – 43m.

Программа представляет собой многооконное приложение пользователя. Для оптимизации поиска области наилучшего совпадения программа использует базу данных (БД) УЗ, по которой и происходит первичный поиск.

Алгоритм обработки данных включает в себя три этапа. Первый этап – очистка экспериментального массива данных от высокочастотных шумов методом фурье-фильтрации. Второй этап – сопоставление экспериментальных данных с БД модельных угловых зависимостей во всей области значимых углов, определяющих кристаллографический срез ($\theta - \varphi$) (рис. 2). Элементы БД вычислены в рамках модели генерации ВГ в идеальных нецентро-

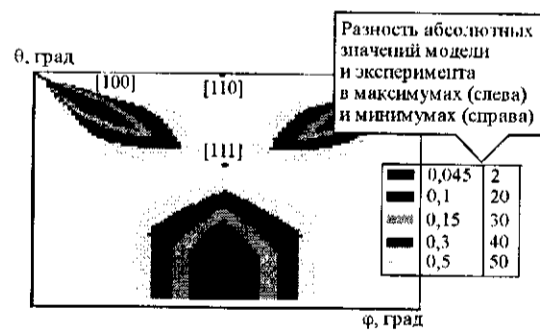


Рис. 2. Карта соответствия экспериментальных и модельных УЗ. По вертикальной и горизонтальной осям отложены углы, определяющие ориентацию поверхности исследуемого образца в кристаллографической системе координат θ, φ ; углы меняются в пределах $0 - 90^\circ$. Область максимального соответствия между графиками обозначена черным цветом. На карте отмечены три базовых среза

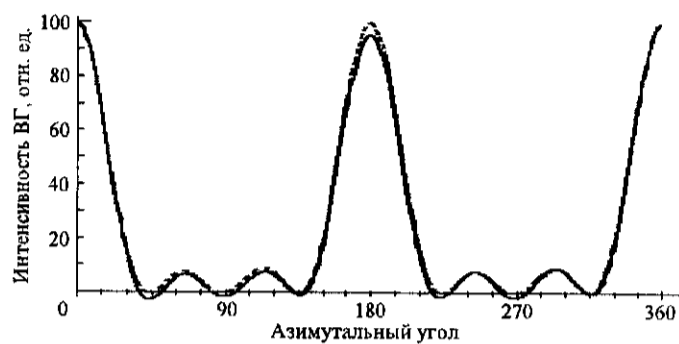


Рис. 3. Экспериментальная (сплошная линия) и соответствующая ей модельная (штриховая) зависимости. Выявлено отклонение от среза [100] на $9,4^\circ$ по углу θ и на $9,2^\circ$ по углу φ

симметричных средах в соответствии с геометрией реального эксперимента. Точность сопоставления $\sim 1^\circ$, время сопоставления меньше минуты. Результат представляется в виде карты плоскости $\theta - \varphi$ (θ и φ – стандартные переменные сферической системы координат), где тоновыми градациями выделены области различных степеней соответствия экспериментальных и модельных зависимостей, сравнение происходит по двум параметрам: значению и положению экстремумов. На этом этапе выделяется область максимального соответствия, дальнейшее сопоставление происходит в этой области.

Третий этап – сравнение экспериментальных данных с модельными УЗ в выделенной области максимального соответствия (рис. 3). Точность сопоставления $\sim 0,1^\circ$, время сопоставления 2–3 мин. Графические результаты представляются на одной координатной плоскости в виде двух УЗ: экспериментальной, очищенной от высокочастотных шумов, и модельной. Также в результате сравнения выдаются значения углов θ и φ , описывающие реальную ориентацию кристалла в исследуемой локальной области.

Рис. 4 демонстрирует возможности системы НОК по обнаружению напряжений в тестируемой «точке» поверхности образца. На этом рисунке показаны для пленки CdTe, выращенной на подложке GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии, снятые в центральной области пленки экспери-

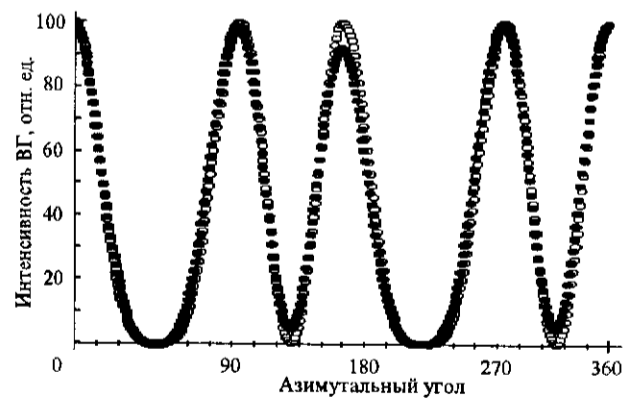


Рис. 4. Экспериментальная и соответствующая ей модельная угловые зависимости ВГ в пленке CdTe

ментальные графики угловой зависимости ВГ (черные точки). Здесь же приведены результаты модельного расчета угловой зависимости ВГ (белые точки) для идеальной пленки данной ориентации. Отличия графиков (в первую очередь хорошо видимое «поднятие» ряда минимумов экспериментального графика над нулевым значением) обусловлены присутствием напряжений в тестируемой локальной области пленки, в результате чего формируется локальное наведенное двулучепреломление. По результатам компьютерного анализа ориентация этого участка пленки отличается от среза [110] на $\Delta\theta = 0,1^\circ$, $\Delta\varphi = 8,1^\circ$.

В данном режиме работы система НОК имеет следующие характеристики: глубина сканируемого приповерхностного слоя для полупроводников составляет 0,1–1 мкм, диаметр локальной области 100 мкм, погрешность определения углов разворота осей кристалла $0,1^\circ$. Отображаемая информация: графики УЗ ВГ в реальном времени на экране монитора и в файле, значения углов разворота кристаллографических осей относительно выбранного базового среза. Время сбора информации 1 мин. Время получения конечного результата около 10 мин.

В режиме получения карт кристаллического качества поверхности и объема поляризация излучения фиксирована, а исследуемый образец перемещается по двум координатам перпендикулярно лучу – регистрируется интенсивность прошедшего лазерного излучения и ВГ от приповерхностного слоя в разных точках образца. Сигнал, пропорциональный квадрату интенсивности прошедшего лазерного излучения (опорный канал), используется для получения карты объемных искажений. Для генерации карты поверхности используется отношение сигнала ВГ в рабочем канале к сигналу в опорном канале, так как их отношение несет информацию о кристаллическом совершенстве только приповерхностного слоя. Режиму картирования соответствуют следующие характеристики: глубина сканируемого приповерхностного слоя для полупроводников 0,1–1 мкм, для диэлектриков видимого диапазона толщина образца вдоль трассы луча до 100 мм; размер поля карты от 60×60 до 1×1 мм; число сканируемых элементов 100×100 ; разрешение при картировании до 50 мкм; время получения карт 10–15 мин; вид карт: цветные в реальном времени на экране монитора и файле данных.

Работа комплекса в данном режиме показана на примере образца GaAs. На рис. 5, а представлена карта центральной области образца диаметром 60 мм (размер области 35×35 мм). В этой области был выделен относительно однородный участок как по характеристикам поверхности, так и по характеристикам объема. Затем на площади этого участка размером $0,7 \times 0,7$ мм были сняты микрокарты поверхности и объема (рис. 5, б). Как видно из рисунка, объемная оптическая однородность выбранного участка достаточно высокая, а кристаллическое качество приповерхностного слоя испытывает пространственные вариации. Отметим, что высокое пространственное разрешение и малое время получения результата делают режим картирования удобным и информативным при исследовании всей поверхности образца.

В связи с возможным влиянием локальных упругих напряжений на дисперсию пороговых характеристик цифровых и аналоговых интегральных схем на основе GaAs с помощью системы НОК было проведено картирование полей локальных упругих напряжений в многослойных структурах на подложках арсенида галлия на площадках в доли миллиметра с разрешением не хуже 50 мкм. На микрокартах кристаллического качества пленочных структур выявлено присутствие локальных упругих напряжений, проявляю-

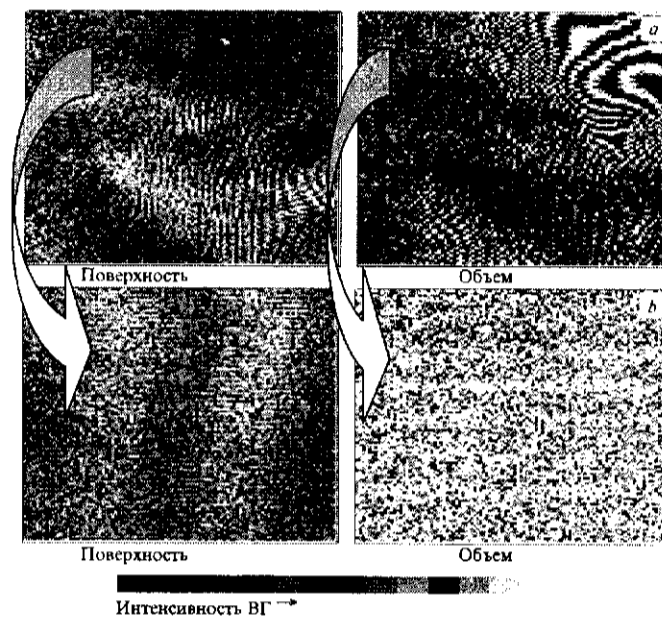


Рис. 5. Карты поверхности и объема GaAs (a); микрокарты поверхности и объема этого образца (пространственное разрешение $\sim 0,015$ мм) (b)

щеся в характерных периодических полосах с периодом 50–100 мкм. На микрокартах объема подложки арсенида галлия присутствие локальных упругих напряжений также проявляется в периодически меняющейся структуре, причем по тому же закону, что и на микрокарте пленочной структуры. Природа этих полос – наведенное двулучепреломление за счет полей напряжений. В некоторых участках образцов карты кристаллического качества пленочных структур зафиксированы слабоинтенсивные полосы, не связанные с объемными напряжениями, что может быть вызвано неоднородностью кристаллического качества структуры. На рис. 6 приведена микрокарта поверхности и объема подложки GaAs с нанесенными технологическими слоя-

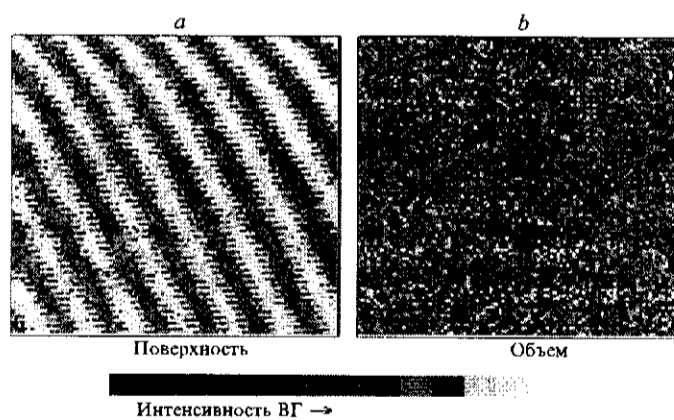


Рис. 6. Микрокарты поверхности (a) и объема (b) участка подложки GaAs с пленочными структурами

ми для интегральной схемы (размер исследуемой области $1,75 \times 1,75$ мм). Отчетливо видна «полосатая» структура микрокарты поверхности. В отличие от нее микрокарта объема несет информацию об одинаковой интенсивности прошедшего лазерного излучения в пределах сканируемой площади образца, что говорит об относительно хорошем качестве изготовления как самой пластины образца, так и нанесенных структур, в частности об одинаковой суммарной оптической толщине. Природа этих полос заключается в регулярных мелкомасштабных неоднородностях кристаллического качества пленочных структур, физическая сущность которых требует отдельного дополнительного исследования.

Заключение. Лабораторная эксплуатация созданной системы продемонстрировала ее эффективность в качестве дополнительного, а в ряде случаев и единственно возможного средства выходного контроля как промышленных партий полупроводниковых материалов, так и опытных образцов в процессе отладки технологии их изготовления. В последнем случае технологическая и пользовательская простота и локальность метода могут играть решающую роль в быстром проведении всего этапа разработки технологий выращивания новых материалов с заданными свойствами. Система позволяет в течение нескольких минут определять ориентацию кристаллографических осей с погрешностью $\sim 0,1^\circ$ в локальных приповерхностных областях диаметром ≤ 100 мкм, глубиной $0,1-1,0$ мкм; выявлять наличие локальных напряжений; создавать карты и микрокарты кристаллического качества поверхности и оптического качества объема тестируемых материалов.

Полученные результаты показывают возможность создания аналогичных систем для контроля *in situ* материалов, выращиваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахманов С. А., Емельянов В. И., Коротеев Н. И., Семиногов В. В. Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно-оптические эффекты и нелинейно-оптическая диагностика // УФН. 1985. 147. С. 675.
2. Kimura T., Yamada Ch. // Journ. Crystal Growth. 1995. 150. P. 92.
3. Ильичев Э. А., Краснов В. Ф., Мушер С. Л. и др. Неразрушающий экспресс-контроль методами нелинейной оптики структурного совершенства пластин арсенида галлия // Электронная промышленность. 1990. № 10. С. 46.
4. Баланюк В. В., Краснов В. Ф., Мушер С. Л. и др. Выявление локальных характеристик кристаллического совершенства и ориентации полупроводниковых пленок CdTe методами нелинейной оптики // Квантовая электроника. 1995. 22. С. 196.
5. Бережная П. Е., Ступак М. Ф. Нелинейно-оптическая система экспрессного контроля кристаллического качества полупроводниковых и диэлектрических материалов // Датчики и системы. 1999. № 2. С. 17.

Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

Поступила в редакцию
28 мая 2003 г.