

03,09,13

Возможности характеристики кристаллических параметров структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ на подложке из GaAs методом генерации на отражение второй гармоники зондирующего излучения

© М.Ф. Ступак^{1,2}, Н.Н. Михайлов^{2,3}, С.А. Дворецкий^{3,4}, М.В. Якушев³, Д.Г. Икусов³, С.Н. Макаров¹, А.Г. Елесин¹, А.Г. Верхогляд¹

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴ Томский государственный университет, Томск, Россия

E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

Поступила в Редакцию 25 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 3 октября 2019 г.

Принята к публикации 8 октября 2019 г.

Представлены сравнительные результаты численного моделирования и эксперимента при регистрации азимутальных угловых зависимостей сигнала второй гармоники, отраженной от структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ и подложек GaAs, при нормальном падении на образец зондирующего лазерного излучения и азимутальном вращении плоскости его поляризации. По результатам исследования подложек (013) GaAs и буферных слоев CdTe|ZnTe|GaAs выявлено, что отклонения от ориентации поверхности (013) по кристаллофизическим углам Θ и φ составили $1-3^\circ$ у подложек GaAs и до 8° у буферных слоев CdTe|ZnTe|GaAs, причем величину сигнала второй гармоники от буферных слоев можно считать обратно пропорциональной ширине рентгеновских кривых качания на половине максимума.

На основе экспериментальных данных показано, что компоненты тензора нелинейной восприимчивости $\chi_{xyz}(\omega)$ кристаллической структуры $Cd_xHg_{1-x}Te$ существенно превосходят по величине аналогичные компоненты тензора в CdTe и GaAs.

Ключевые слова: нецентросимметричные кристаллы класса сфалерита, вторая гармоника, азимутальные угловые зависимости, подложки GaAs, структуры $Cd_xHg_{1-x}Te$.

DOI: 10.21883/FTT.2020.02.48870.601

1. Введение

Исследование структуры твердых тел дают важную информацию о физическом состоянии и строении материала. Для определения совершенства кристаллов и их дефектности используют традиционные методы, основанные на дифракции рентгеновских лучей, электронных и нейтронных пучков. Эти методы требуют специального оборудования и организации условий защиты, а также специального приготовления образцов, и не обеспечивают контроля вещества в малых объемах. Глубина проникновения исследуемой области зависит от атомной природы кристалла и для рентгеновского излучения составляет сотни микрон. Метод генерации второй гармоники (ВГ) — один из быстрых и неразрушающих методов, позволяющих получить данные с большой площади с высоким локальным разрешением в приповерхностном слое кристалла [1]. Благодаря зависимости интенсивности второй гармоники от взаимной ориентации поляризации возбуждающего излучения относительно кристаллофизических

осей (далее — угловая и азимутальная зависимость), можно в конкретной локальной области образца получить количественную экспресс-информацию о кристаллическом состоянии и совершенстве приповерхностного слоя исследуемой структуры, ее реальной ориентации в этой области с погрешностью не более градуса, и об относительной плотности дефектов в однотипных структурах. Данный метод эффективен для получения информации от сложных полупроводниковых структур для широкой области применений, особенно в микроэлектронике и оптоэлектронике [1–6]. Изучение последовательных стадий эпитаксиальной технологии позволяет определить оптимальные условия получения структур. Метод генерации ВГ имеет высокую чувствительность неразрушающего оптического контроля структурных свойств приповерхностных слоев кристаллов класса $\bar{4}3m$ [1,3,5,6], как к изменениям на границе раздела различных сред, так и к фазово-структурным свойствам приповерхностного слоя.

Гетероэпитаксиальные слои (ГЭС) теллурида кадмия и ртути (КРТ) в настоящее время являются базо-

вым материалом для инфракрасной оптоэлектроники. Для удовлетворения бурно растущего спроса на ГЭС КРТ идет развитие таких эпитаксиальных методов, как молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и металлоорганическая парофазная эпитаксия (МОРФЭ). МЛЭ является более гибкой технологией и, благодаря более низким температурам осаждения, позволяет создавать структуры различного состава с толщинами слоев на нанометровом уровне на подложках большого диаметра из GaAs и Si. Проблема получения качественных ГЭС КРТ МЛЭ связана с большим рассогласованием параметров решеток КРТ и подложек из GaAs и Si. Это приводит к появлению различных дефектов в процессе роста ГЭС КРТ МЛЭ, и в первую очередь, к высокой плотности дислокаций. Исследование дислокационной структуры ГЭС КРТ МЛЭ на подложках из GaAs и Si ориентацией (013) показали, что введение дислокаций приводит к развороту кристаллической структуры слоя CdTe по отношению к кристаллической структуре подложки, причем величина разворота для подложки из GaAs составляет величину до 4.5° и оказывается больше, чем для подложки из Si, что авторы [7,8] связывают с различием типов возникающих дислокаций. Однако данные о других физических параметрах ГЭС КРТ МЛЭ в этих работах не приводятся.

Локальная и неразрушающая экспресс-диагностика ориентации кристаллического состояния и совершенства структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ и подложки методом генерации на отражение второй гармоники зондирующего излучения показала высокую эффективность при экспериментальной отработке режимов создания высококачественных ГЭС КРТ МЛЭ [9–11].

Целью настоящей статьи является изучение по характеристикам сигнала отраженной ВГ кристаллического состояния эпитаксиальных слоев при выращивании ГЭС КРТ МЛЭ на подложках из GaAs и сравнение полученных результатов с традиционными (полуширина рентгеновской кривой качания) методами. Проведено исследование методом генерации ВГ на отражение ориентации кристаллического состояния и совершенства подложек из (013) GaAs, эпитаксиальных буферных слоев CdTe|ZnTe на этих подложках и слоев HgCdTe. Получены данные о структурном совершенстве, выявлены напряжения и проведены качественные сравнения величин нелинейных восприимчивостей исследуемых материалов.

2. Численное моделирование условий возбуждения ВГ

Приемной аппаратурой стенда нелинейно-оптической диагностики (НОД) может в общем случае регистрироваться интенсивность сигнала S- или P-поляризации отраженной ВГ, выходящего из поверхностного слоя образца. Интенсивность сигнала ВГ пропорциональна

скалярному квадрату вектора нелинейной поляризуемости $P^{NL}(2\omega)$. Для исследуемых кристаллов (GaAs, CdTe, КРТ) компоненты $P_i^{NL}(2\omega)$ в системе координат преломленной волны лазерного излучения в кристалле $E(\omega)$ (лабораторная система координат) определяется как [1,2]

$$P_i^{NL}(2\omega) = \chi'_{ijk}(\omega) E_j(\omega) E_k(\omega), \quad (1)$$

где $\chi'_{ijk}(\omega)$ — компоненты тензора нелинейной восприимчивости в этой системе координат. Они вычисляются с помощью матрицы поворота $C_{\alpha,\beta}$ через соответствующие табличные компоненты $\chi_{xyz}(\omega)$ в системе координат кристаллографических осей

$$\chi'_{ijk}(\omega) = C_{ix} C_{jy} C_{kz} \chi_{xyz}(\omega). \quad (2)$$

Для кристаллов класса $\bar{4}3m$, к которым относятся GaAs, CdTe и КРТ, тензор $\chi_{xyz}(\omega)$ будет иметь только 6 отличных от нуля и равных друг другу компонент [1]:

$$\chi_{123} = \chi_{132} = \chi_{213} = \chi_{312} = \chi_{231}. \quad (3)$$

Аналитические выражения для отраженной волны ВГ, получаемые на основе (1)–(3), чрезвычайно громоздки и мало наглядны. Поэтому для сравнения экспериментальных результатов с расчетными использовалось численное моделирование с помощью оригинального программного обеспечения.

Отметим, что развернутое решение электродинамической задачи генерации отраженной ВГ для кристаллов класса $\bar{4}3m$ можно найти в обзоре [1] (с. 692–698), а также в монографии [2].

Анализ поведения модельных угловых зависимостей сигнала ВГ с вариацией по кристаллофизическим углам Θ и φ вблизи часто используемого среза (013)

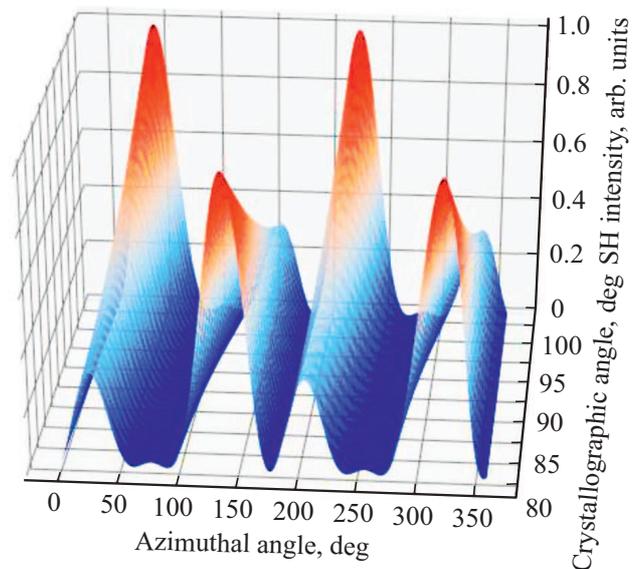


Рис. 1. Модельная поверхность азимутальной интенсивности ВГ для нормального падения луча при вариации среза вблизи (013) по углу φ .

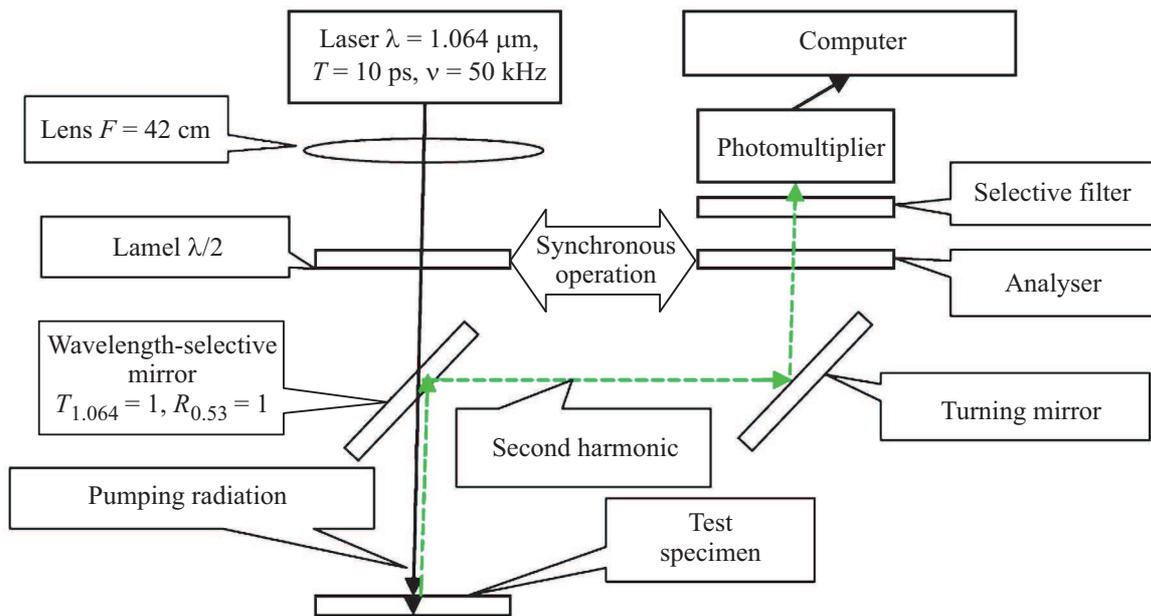


Рис. 2. Принципиальная схема лабораторного стенда нелинейно-оптической диагностики.

для создания КРТ-структур на подложках GaAs показал, что наиболее чувствительным это поведение становится при нормальном падении луча к срезу. Поэтому на лабораторном стенде нелинейно-оптической диагностики (НОД) реализовано нормальное падение лазерного излучения частоты ω на исследуемый образец с одновременным вращением его плоскости поляризации (азимутальный угол) в диапазоне $0-359^\circ$. Приемной аппаратурой стенда НОД регистрируется интенсивность сигнала поляризации отраженной ВГ, параллельной поляризации лазерного излучения.

На рис. 1 приведен для кристаллов класса $43m$ пример поведения модельных угловых зависимостей отраженного сигнала ВГ с вариацией по углу φ вблизи среза (013). Здесь представлена интенсивность сигнала поляризации отраженной ВГ, параллельной поляризации возбуждающего лазерного излучения. Отметим, что вариации по углу Θ вблизи среза (013) приводят лишь к одинаковому изменению интенсивности ВГ вдоль азимутального угла, без изменения формы угловой зависимости.

3. Методика эксперимента

Лабораторный стенд НОД состоит из лазерного источника, оптико-механического блока и блока приема и обработки информации на базе управляющего компьютера [11]. Принципиальная схема представлена на рис. 2

В качестве источника излучения в комплексе используется импульсно-периодический YAG : Nd-лазер с диодной накачкой (DUETTO-OEM V3.4, Switzerland), с длиной волны $1.064 \mu\text{m}$ и частотой повторения цуга из ~ 10 импульсов 50 kHz . Длительность одного импульса в цуге — $\sim 10 \text{ ps}$. Излучение лазера фокусируется

длиннофокусными линзами на поверхность тестируемого образца в пятно, диаметр которого ($0.05-0.2 \text{ mm}$) выбирается в соответствии с требуемым пространственным разрешением. Энергия в импульсе, порядка 10^{-5} J , может варьироваться по заданной программе с целью достижения требуемой для исследуемого образца интенсивности. Излучение лазера имеет линейную поляризацию. Падение луча нормально к поверхности образца.

Для получения азимутальной угловой зависимости сигнала ВГ используется (см. рис. 2) полуволновая фазовая пластинка $\lambda/2$, вращаемая вокруг оси лазерного луча шаговым двигателем по заданной программе, что позволяет вращать плоскость поляризации падающего на образец излучения. Специализированное параметрическое зеркало (при угле падаления 45° пропускает лазерное излучение и отражает его вторую гармонику) отделяет в отраженном от образца излучении сигнал ВГ и направляет излучение ВГ на ФЭУ-130 через анализатор, ориентация которого синхронизована с ориентацией фазовой пластинки $\lambda/2$, и светофильтр, пропускающий только ВГ. Таким образом, приемной аппаратурой стенда НОД регистрируется интенсивность сигнала поляризации отраженной ВГ, параллельной поляризации лазерного излучения; все представленные в настоящей статье экспериментальные результаты соответствуют данной конфигурации.

Сигнал с ФЭУ поступает на модуль АЦП и считывается специализированной программой компьютера. Параллельно приему информации происходит ее программная обработка и отображение в необходимом графическом виде на экране дисплея.

Амплитудные погрешности на приводимых здесь экспериментальных графиках азимутальной угловой зави-

симости сигнала ВГ определяются отношением сигнал/шум (SNR) цифровых данных с модуля АЦП, имеющим величину не менее $SNR \geq 40$ dB. Стандартное отклонение сигнала шума (с нулевым средним) соответствует примерно 16 единиц кода АЦП, уровень характерной амплитуды сигнала ВГ на графиках находился в пределах 2000–3500 единиц кода АЦП.

При сравнении экспериментальных и модельных угловых зависимостей сигнала ВГ от образцов использовался массив модельных угловых зависимостей с шагом по углу φ в 1° — эта величина определяет погрешность экспериментальных результатов по определению абсолютного значения угла φ . В ходе процедуры сравнения для повышения соотношения сигнал/шум экспериментальные данные предварительно отфильтровывались цифровым фильтром низких частот с шириной полосы, соответствующей полосе частот полезного сигнала.

Проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования с большим объемом экспериментальных данных, полученных при регистрации азимутальных угловых зависимостей сигнала отраженной второй гармоники (поляризации ВГ и лазерного излучения параллельны) при нормальном падении на различные образцы подложек и структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ зондирующего лазерного излучения, локализованного по апертуре $\sim 200 \mu m$.

4. Основные результаты и обсуждение

4.1. Исследование с помощью сигнала ВГ кристаллического совершенства подложек GaAs и буферных слоев CdTe|ZnTe|GaAs

Были проведены исследования подложек GaAs и буферных слоев CdTe|ZnTe|GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке „Обь-М“, подробно описанной в [12–14]. Толщина буферных слоев $d_{ZnTe} \approx 30$ nm и $d_{CdTe} \approx 5.5 \mu m$.

Для GaAs, CdTe и ZnTe поглощение в области $1 \mu m$ не существенное. Можно считать, что свет проходит через всю структуру, потери есть только на френелевских отражениях. В области фундаментального поглощения ($\lambda = 0.53 \mu m$) глубина проникновения по справочным и нашим данным составляет для CdTe ~ 130 nm, для GaAs ~ 140 nm, для ZnTe ~ 210 nm.

После предварительного химического травления, подложка GaAs с кристаллографической ориентацией (013) помещалась в камеру подготовки подложек, где проводилась ее предэпитаксиальная подготовка. Атомарно чистая поверхность GaAs достигалась путем термического прогрева в условиях сверхвысокого вакуума и десорбции оксидов с поверхности, с дополнительным потоком мышьяка для сохранения стехиометрического состава поверхности. Контроль состояния поверхности осуществлялся по появлению сверхструктур в дифрак-

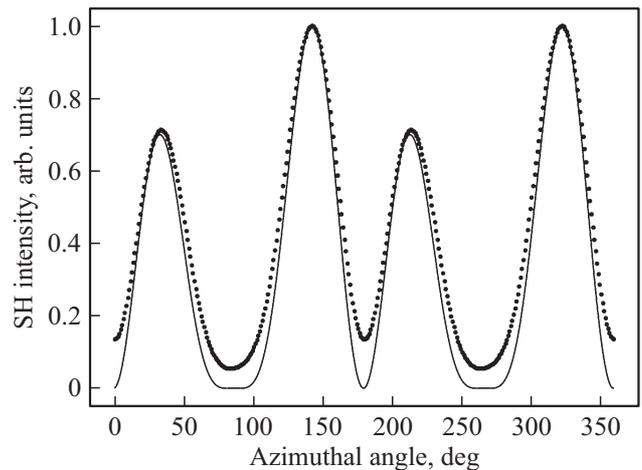


Рис. 3. Результат сравнения экспериментального графика интенсивности сигнала ВГ (точечная линия, проведена очистка массива по высоким частотам) с теорией (сплошная линия) для тыльной стороны образца № КТ 040120 (подложка GaAs). Отклонение от ориентации (013) по углу φ составляет -3° . Напряжения в подложке слабые (отсутствует асимметрия у экспериментального графика).

ционной картине (метод дифракции быстрых электронов на отражение [15]).

В камере роста буферных слоев с использованием отдельных эффузионных источников потока цинка, кадмия и теллура последовательно выращивались слои ZnTe и CdTe. Слои ZnTe для всех структур выращивались в оптимальных технологических режимах (температура подложки $\sim 280^\circ C$), соотношение потоков $J_{Zn}/J_{Te} = 2-3$, скорость роста $\sim 0.1 \mu m/h$.

Эпитаксиальные слои CdTe так же выращивались в идентичных условиях (температура подложки $\sim 280^\circ C$, скорость роста $2-2.3 \mu m/h$). Для каждого роста структуры варьировалось только соотношение потоков Cd/Te, за счет изменения потока кадмия. Величина соотношения потоков Cd/Te изменялась в интервале 0–28.

Для измерения величины потоков веществ, поступающих на подложку, использовался вакуумметр ВИ-14 с ионизационным датчиком ПМИ-27, который при калибровке источников потоков помещался непосредственно перед подложкой.

Сравнение экспериментальных и модельных угловых зависимостей сигнала ВГ от образцов осуществлялось программно с использованием массива модельных угловых зависимостей с вариацией по углу φ в 1° — это и есть погрешность экспериментальных результатов, представленных в настоящей статье.

Все исследованные подложки GaAs имели ориентацию поверхности подложки (013), отклонения по углам φ составляли $\sim 2-3^\circ$. В качестве примера, на рис. 3 приведены экспериментальная и модельная угловые зависимости величины сигнала ВГ от тыльной стороны подложки GaAs образца № КТ 040120. Здесь

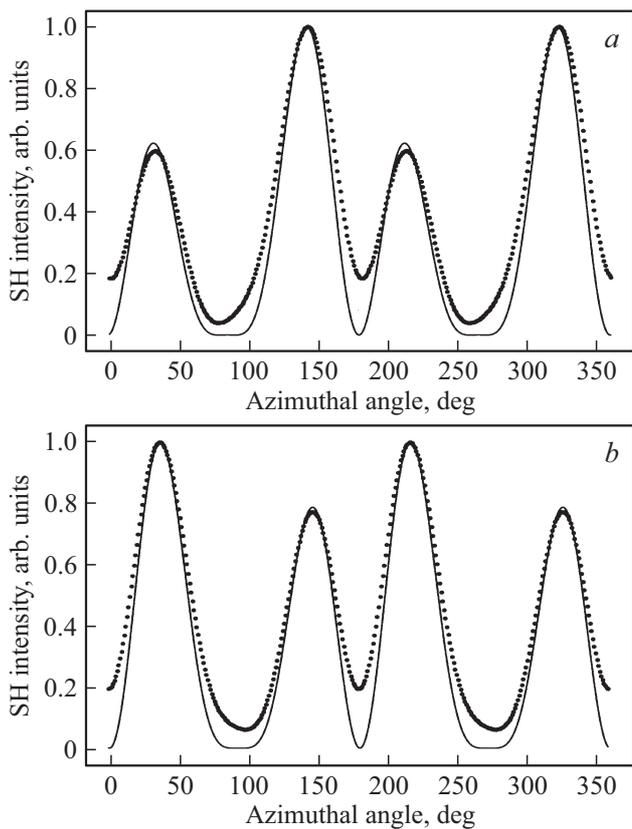


Рис. 4. Результат сравнения экспериментальной азимутальной зависимости сигнала ВГ (точечная линия, проведена очистка массива по высоким частотам) с теорией (сплошная линия) в образце № КТ 040126-1. *a)* От лицевой стороны (слои CdTe|ZnTe). Отклонение от ориентации (013) по углу φ составляет $= 4^\circ$. Заметные напряжения в слоях и подложке (выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментального графика). *b)* От тыльной стороны (подложка GaAs). Отклонение от ориентации (013) по углу φ составляет $+2^\circ$. Заметные напряжения в подложке (выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментального графика).

экспериментальный график — точечная линия (проведена очистка экспериментального массива по высоким частотам), теоретическая угловая зависимость — сплошная линия. Отклонение от ориентации (013) по углу φ составило -3° . Напряжения в подложке очень слабые (отсутствует асимметрия вблизи минимумов у экспериментального графика).

Результаты исследования лицевой и тыльной сторон другого образца серии КТ (подложка GaAs среза \sim (013), буферный слой CdTe|ZnTe|GaAs) приведены на рис. 4, *a* и *b*.

Общий вывод по результатам исследований методом отраженной ВГ подложек GaAs и буферных слоев CdTe|ZnTe|GaAs следующий:

— отклонения от ориентации (013) по углам Θ , φ составили $1-3^\circ$ у подложек и несколько больше (до 8°) у буферных слоев;

— часто фиксируются напряжения в материале подложки (выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментального графика).

Отметим, что связь асимметрии и изменения уровней минимумов с напряжениями была выявлена нами давно [3,5,6], однако тщательных количественных исследований в этом направлении не проводилось.

Аналогичные результаты по развороту кристаллической решетки CdTe относительно ориентации поверхности (013) GaAs получены для таких же образцов рентгеновским методом [7,8]. Однако наши данные свидетельствуют о большей величине разворота. Вполне возможно ожидать получения еще больших величин. Вероятное объяснение разворота связывается с введением определенного типа дислокаций. Не исключена и другая причина появления разворота кристаллических решеток. Определенно следует понять, от каких причин, помимо дислокаций, может меняться величина разворота вплоть до полученных к настоящему времени величин в 8 градусов.

При исследовании методом ВГ буферных слоев CdTe|ZnTe|GaAs в различных образцах, выращенных при различном соотношении потоков кадмий/теллур, было выявлено различие в уровнях сигнала ВГ при одинаковом уровне возбуждающего излучения. При сопоставлении этих данных (при фиксированном азимутальном угле) с данными полных ширин на половине максимума рентгеновских кривых качания (FWHM) была выявлена хорошая корреляция между ними, что демонстрирует рис. 5. Таким образом, метод ВГ позволяет осуществлять

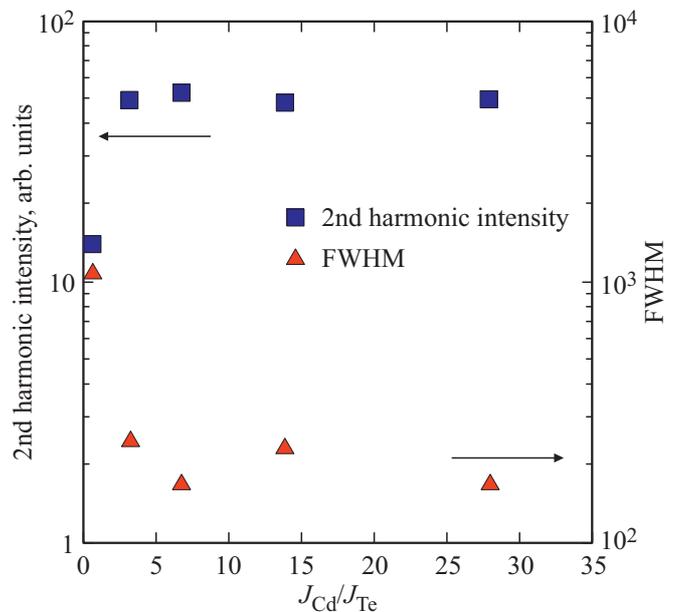


Рис. 5. Экспериментальная картина интенсивности сигнала ВГ при фиксированном азимутальном угле и FWHM рентгеновских кривых качания для структур (013) CdTe|ZnTe|GaAs, выращенных при различных соотношениях потоков Cd/Te. Средняя мощность возбуждающего излучения равна 0.13 W, относительная погрешность амплитуды сигнала ВГ $\sim 1\%$.

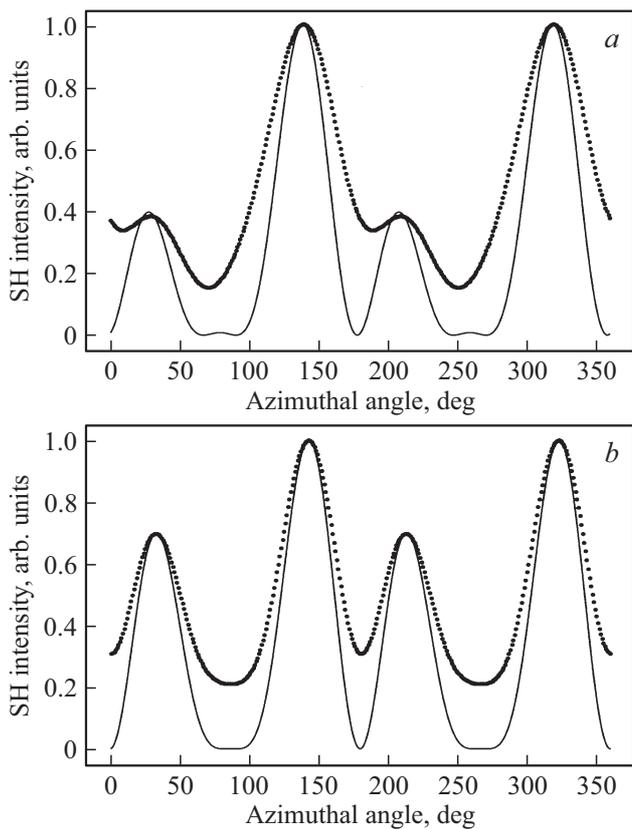


Рис. 6. Результат сравнения экспериментальной азимутальной зависимости сигнала ВГ (точечная линия, проведена очистка массива по высоким частотам) с теорией (сплошная линия) в различных образцах (слои $CdTe|ZnTe$). *a*) № КТ 040126, отклонение от ориентации (013) по углу $\varphi -3^\circ$. Заметные напряжения в слоях и подложке (выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментального графика). *b*) № КТ 040122, отклонение от ориентации (013) по углу $\varphi +2^\circ$. Заметные напряжения в подложке и слоях отсутствуют (выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментального графика не наблюдается).

экспресс-отбраковку буферных слоев и подложек из GaAs по кристаллическому качеству в процессе обработки технологии МЛЭ.

Также азимутальные зависимости сигнала ВГ в этих образцах (см. рис. 6) позволяют получить количественную экспресс-информацию о степени отклонения от ориентации поверхности (013).

4.2. Исследование с помощью сигнала ВГ кристаллического совершенства структур КРТ

Были проведены исследования структур $Cd_xHg_{1-x}Te|CdTe|ZnTe|GaAs$, выращенных методом МЛЭ на установке „Обь-М“. Толщины буферных слоев $d_{ZnTe} \approx 30\text{ nm}$ и $d_{CdTe} \approx 5.5\text{ }\mu\text{m}$. Слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ имели варизонные широкозонные области на гетерограницах с плавно изменяющимся составом X_{CdTe} от 0.45 до

рабочего 0.22: толщина нижнего варизонного слоя $d_{1var} \approx 1.5\text{ }\mu\text{m}$, толщина рабочего состава $d_{CdHgTe} \approx 6\text{ }\mu\text{m}$, и от рабочего слоя к поверхности толщина верхнего варизонного слоя $d_{2var} \approx 0.5\text{ }\mu\text{m}$.

Проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования с большим объемом экспериментальных данных, полученных при регистрации азимутальных угловых зависимостей сигнала отраженной второй гармоники при нормальном падении на различные образцы структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ зондирующего лазерного излучения.

При фиксированном во время экспериментов уровне чувствительности регистрирующей аппаратуры (питание ФЭУ, предусилитель АЦП) и одинаковом уровне возбуждающего ИК-излучения (средняя мощность излучения на $\lambda = 1.064\text{ }\mu\text{m}$ равнялась 0.07 W) амплитуда сигнала отраженной от слоя КРТ второй гармоники была значительно больше по сравнению с аналогичными сигналами ВГ от слоев $CdTe|ZnTe|GaAs$ или от тыльной стороны образцов, т.е. от подложек GaAs. Этот результат наглядно представлен на рис. 7, где приведены в одинаковом масштабе без какой-либо обработки экспериментальные графики азимутальной угловой зависимости сигнала ВГ от структуры КРТ (*a*) и от подложки GaAs этой структуры (*b*) для образца № 1-141107-1.

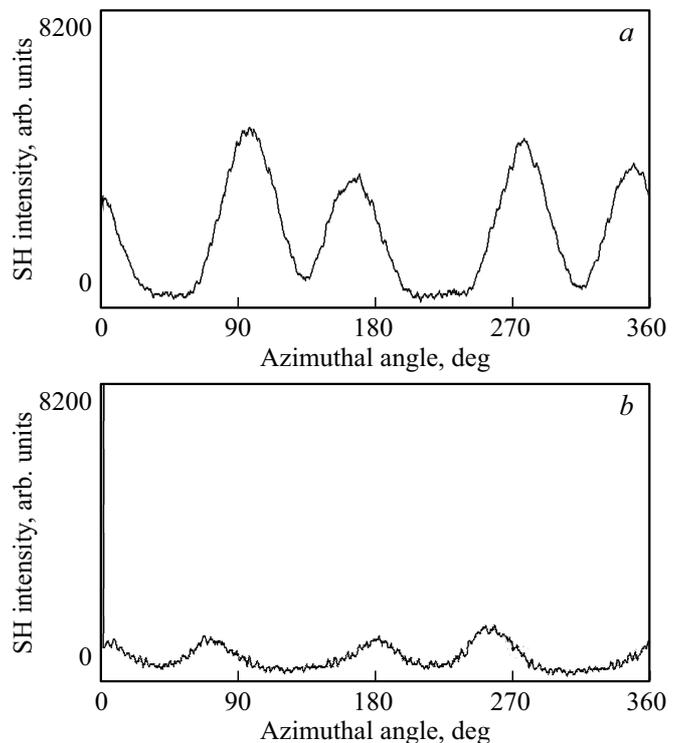


Рис. 7. Экспериментальные графики азимутальной угловой зависимости сигнала ВГ от структуры КРТ (*a*) и от подложки GaAs этой структуры (*b*) для образца № 1-141107-1. Средняя мощность излучения на $\lambda = 1.064\text{ }\mu\text{m}$ равна 0.07 W. Ориентация структуры $Cd_xHg_{1-x}Te|CdTe|ZnTe|GaAs$ отлична от (013) по углу φ на -2° . Поляризации ВГ и лазерного излучения параллельны.

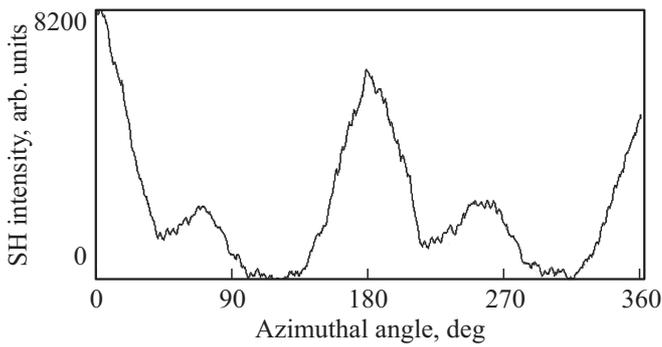


Рис. 8. Экспериментальная азимутальная угловая зависимость сигнала ВГ от образца № 141010-1 — (013) $Cd_xHg_{1-x}Te|CdTe|ZnTe|GaAs$. Ориентация структуры отлична от (013) по углу φ на $\sim 7-8^\circ$.

На основании этих и других полученных данных, а также с учетом экспериментально зафиксированной непрозрачности слоя КРТ для возбуждающего излучения на $\lambda = 1.064 \mu m$ (по нашим данным, глубина проникновения по амплитуде не превышает $0.2 \mu m$, а длина поглощения ВГ по амплитуде $\leq 0.03 \mu m$), можно утверждать, что сигналы ВГ от структуры КРТ и от подложки GaAs этой структуры на рис. 7 являются чисто отраженными, без вклада переотраженного лазерного излучения от тыльной поверхности образца. Это означает (с учетом разницы в амплитудах сигналов ВГ на рис. 7 и характерной длины поглощения по амплитуде второй гармоники в используемых подложках арсенида галлия $\sim 0.15 \mu m$), что компоненты тензора нелинейной восприимчивости $\chi_{xyz}(\omega)$ (см. (3)) качественной кристаллической структуры КРТ на порядок превосходят по величине аналогичные компоненты тензора в CdTe и GaAs.

На рис. 8 представлена экспериментальная азимутальная угловая зависимость сигнала ВГ (поляризации ВГ и лазерного излучения параллельны) от образца № 141010-1 ($Cd_xHg_{1-x}Te|CaTe|ZnTe|GaAs$). Большая амплитуда сигнала ВГ свидетельствует о высоком кристаллическом качестве структуры КРТ. Форма графика показывает, что ориентация структуры отлична от (013) по углу φ на $\sim 7-8^\circ$. Эти результаты свидетельствуют об отсутствии разворота слоев Cd_xHg_{1-x} относительно слоя CdTe в структуре $CaTe|ZnTe|GaAs$, что согласуется с данными работ [7,8].

5. Заключение

Представлены результаты численного моделирования и эксперимента при регистрации азимутальных угловых зависимостей поляризационных компонент сигнала отраженной от структур ($Cd_xHg_{1-x}Te$ второй гармоники при нормальном падении на образец зондирующего лазерного излучения и азимутальном вращении плоскости его поляризации. Величина регистрируемого сигнала

отраженной ВГ зависит от кристаллического совершенства приповерхностного слоя образца, генерирующего сигнал отраженной ВГ, и от интенсивности лазерного излучения. Также эта величина зависит от таких характеристик исследуемого образца в точке падения луча, как коэффициент поглощения на основной частоте и приводящие к двулучепреломлению объемные напряжения. Кроме того, у образцов, прозрачных для основной частоты, качество и непараллельность их поверхностей в данной точке влияют на итоговую интенсивность отражаемого приповерхностного лазерного излучения, генерирующего отраженную ВГ, из-за интерференции с переотраженным от тыльной поверхности образца лазерным излучением.

По результатам исследования подложек GaAs и буферных слоев $CaTe|ZnTe|GaAs$ выявлено, что отклонения от ориентации поверхности (013) по углам Θ и φ составили $1-3^\circ$ у подложек и несколько больше (до 8°) у буферных слоев.

Выявлено хорошее соответствие между интенсивностью сигнала ВГ и полной шириной на половине максимума рентгеновской кривой качания (FWHM) для структур, выращенных при различных соотношениях потоков кадмий/теллур. Это говорит о том, что метод ВГ позволяет осуществлять экспресс-отбраковку структур по кристаллическому качеству.

Наблюдаемая выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментальных графиков связана с напряжениями в подложках GaAs.

Зарегистрированная большая амплитуда сигнала ВГ от $Cd_xHg_{1-x}Te$ по сравнению с CdTe и GaAs предположительно связана с тем, что компоненты тензора нелинейной восприимчивости $\chi_{xyz}(\omega)$ кристаллической структуры (013) $Cd_xHg_{1-x}Te|CaTe|ZnTe|GaAs$ существенно превосходят по величине аналогичные компоненты тензора в CdTe и GaAs.

Показана возможность получения количественной экспресс-информации о реальной ориентации исследуемых структур с погрешностью не более градуса, об относительной плотности дефектов в однотипных структурах и качественной информации о кристаллическом совершенстве подложечного материала и исследуемых слоев.

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-20053), Программы фундаментальных исследований (ФИ) РАН и программы развития организации и в рамках государственного задания Минобрнауки России (проект № АААА-А17-117121270018-3).

Конфликт интересов

У авторов нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.А. Ахматов, В.И. Емельянов, Н.И. Коротеев, В.В. Семиногов. УФН **147**, 12, 675 (1985).
- [2] T.F. Heinz. Second-Order Nonlinear Optical Effects at Surfaces and Interfaces. In: Nonlinear Surface Electromagnetic Phenomena / Eds H. Ponth, G. Stegeman. North Holland Publ., Amsterdam (1991). P. 353–416.
- [3] В.Ф. Краснов, В.И. Проц, А.М. Рубечик, С.Г. Струц, М.Ф. Ступак. Квантовая электрон. **17**, 5, 602 (1990).
- [4] К.А. Брехов, К.А. Гришунин, Д.В. Афанасьев, С.В. Семин, Н.Э. Шерстюк, Е.Д. Мишина, А.В. Кимель. ФТТ **60**, 1, 33 (2018).
- [5] В.В. Баланиук, В.Ф. Краснов, С.Л. Мушер, В.И. Проц, В.Э. Рябченко, С.А. Стоянов, С.Г. Струц, М.Ф. Ступак, В.С. Сыскин. Квантовая электрон. **22**, 2, 196 (1995).
- [6] V.V. Balaniuk, S.L. Musher, A.M. Rubenchik, V.E. Ryabchenko, M.F. Stupak, S.A. Dvoretzkii, V.I. Liberman, A.A. Fedorov, V.S. Syskin. Mater. Sci. Eng. B **44**, 168 (1997).
- [7] Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, А.В. Колесников. Автометрия **50**, 3, 25 (2014).
- [8] Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, В.С. Варавин, А.В. Колесников, Е.М. Труханов, И.В. Сабина, И.Д. Лошкарев. ФТТ **57**, 11, 2095 (2015).
- [9] И.Д. Бурлаков, А.В. Демин, Г.Г. Левин, Н.А. Пискунов, С.В. Заботнов, А.С. Кашуба. Измерительная техника, **6**, 15 (2010).
- [10] Е.В. Пермикина, А.С. Кашуба. Успехи прикладной физики **4**, 5, 493 (2016).
- [11] М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, М.В. Якушев. Автометрия **55**, 5, 31 (2019).
- [12] Yu.G. Sidorov, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, M.V. Yakushev, V.S. Varavin, V.V. Vasiliev, A.O. Suslyakov, V.N. Ovsyuk. Proc. SPIE **4355**, 228 (2001).
- [13] V.S. Varavin, V.V. Vasiliev, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, V.N. Ovsyuk, Yu.G. Sidorov, A.O. Suslyakov, M.V. Yakushev, A.L. Aseev. Opto-Electronics Rev. **11**, 2, 99 (2003).
- [14] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабина. ФТП **35**, 9, 1092 (2001).
- [15] S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, D.G. Ikusov, V.A. Kartashev, A.V. Kolesnikov, I.V. Sabinina, Yu.G. Sidorov, V.A. Shvets. The Growth of CdTe Layer on GaAs Substrate by MBE. In: Cadmium Telluride (CdTe) — Prospects, Challenges and Application (May 2019). DOI: 105772/intechopen.85563.

Редактор Е.В. Толстякова