

УДК 621.38+535.2

ЭКСПРЕССНАЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СОВЕРШЕНСТВА СТРУКТУР $Cd_xHg_{1-x}Te$ 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

¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

²Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

³Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

⁴Томский государственный университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

E-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

Представлены результаты численного моделирования для кристаллов класса $\bar{4}3m$ и экспериментальные результаты азимутальных угловых зависимостей поляризационных компонент сигнала второй гармоники, отражённой от подложек GaAs с ориентацией (013), буферных слоёв CdTe/ZnTe/GaAs и структур $Cd_xHg_{1-x}Te/CdTe/ZnTe/GaAs$, последовательно выращенных на этих подложках при нормальном падении на образец зондирующего лазерного излучения и азимутальном вращении плоскости его поляризации. По результатам исследования подложек (013)GaAs и буферных слоёв CdTe/ZnTe/GaAs выявлено, что отклонения от базового среза (013) по углам θ , φ составили 1–3° у подложек GaAs и до 8° у буферных слоёв CdTe/ZnTe/GaAs. Наблюдаемая асимметрия минимумов угловой экспериментальной зависимости сигнала второй гармоники в подложках GaAs связана с напряжениями. На основе экспериментальных данных высказано предположение, 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: кристаллы класса $\bar{4}3m$, вторая гармоника, азимутальные угловые зависимости, подложки GaAs, структуры $Cd_xHg_{1-x}Te$.

DOI: 10.15372/AUT20190505

Введение. Исследования структуры твёрдых 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. Такие методы требуют специального оборудования, организации условий защиты и специального приготовления образцов, однако не обеспечивают контроля вещества в малых объёмах. Глубина проникновения исследуемой области зависит от атомной природы кристалла и для рентгеновского излучения составляет сотни микрон. Одним из быстрых и неразрушающих методов, позволяющих получить данные с большой площади с высоким локальным разрешением в слое кристалла толщиной 1 мкм, является метод генерации второй гармоники (ВГ) [1]. Благодаря зависимости интенсивности второй гармоники от взаимной ориентации поляризации возбуждающего излучения относительно кристаллофизических осей (далее — угловая или азимутальная зависимость) можно получить в конкретной локальной области образца экспрессную количественную информацию о кристаллическом состоянии и совершенстве приповерхностного

слоя исследуемой структуры, её реальной ориентации в этой области с погрешностью не более 1° , об относительной плотности дефектов в однотипных структурах. Такой метод эффективен для получения информации от сложных полупроводниковых структур для широкой области применений, особенно в микроэлектронике и оптоэлектронике. Изучение последовательных стадий эпитаксиальной технологии позволяет определить оптимальные условия получения структур. Метод генерации ВГ имеет высокую чувствительность для неразрушающего оптического контроля структурных свойств приповерхностных слоёв кристаллов класса $\bar{4}3m$ [1–3] 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 базовым материалом для инфракрасной оптоэлектроники. Бурно растущее применение инфракрасных оптоэлектронных устройств требует большого количества ГЭС КРТ, для создания которых развиваются такие эпитаксиальные методы, как молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и металлоорганическая парофазная эпитаксия. Молекулярно-лучевая эпитаксия является более гибкой технологией и благодаря низким температурам осаждения позволяет создавать структуры различного состава с толщинами слоёв на нанометровом уровне на подложках большого диаметра из GaAs и Si. Проблема получения качественных ГЭС КРТ МЛЭ связана с большим рассогласованием параметров решёток 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 с ориентацией (013) показало, что введение дислокации приводит к развороту кристаллической структуры слоя CdTe в отношении кристаллической структуры подложки. Причём величина разворота для подложки из GaAs составляет величину до $4,5^\circ$ и больше, чем для подложки из Si, что, по мнению авторов, связано с различным типом возникающих дислокаций [4, 5]. Однако данные о других физических параметрах ГЭС КРТ МЛЭ в этих работах не приводятся.

Экспрессная, локальная и неразрушающая диагностика ориентации кристаллического состояния и его совершенства структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ и подложечного материала методом генерации на отражение второй гармоники зондирующего излучения может оказаться эффективным дополнительным контрольным инструментом при экспериментальной обработке режимов создания высококачественных ГЭС КРТ МЛЭ.

Целью настоящего сообщения является демонстрация возможностей этого эффективного инструментария при его использовании на разных стадиях процесса создания ГЭС КРТ МЛЭ. На основе метода генерации на отражение второй гармоники зондирующего излучения создан описанный в предлагаемой работе автоматизированный лабораторный стенд нелинейно-оптической диагностики (НОД), позволяющий изучать азимутальные угловые зависимости S - и P - поляризации второй гармоники в различных точках образца и сравнивать их с ожидаемыми расчётными зависимостями. Проведено исследование методом генерации ВГ ориентации кристаллического состояния подложек из (013)GaAs и (013)Si, эпитаксиальных буферных слоёв CdTe/ZnTe на этих подложках и слоёв HgCdTe, изучено структурное совершенство, выявлено наличие или отсутствие напряжений, проведены качественные сравнения величин нелинейных восприимчивостей исследуемых материалов.

Лабораторный стенд нелинейно-оптической диагностики, методика эксперимента. Стенд состоит из лазерного источника, оптико-механического блока, блока приёма и обработки информации на основе управляющего компьютера. Схема стенда представлена на рис. 1.

В качестве источника излучения в комплексе используется импульсно-периодический YAG:Nd-лазер с диодной накачкой DUETTO-OEM V3.4 (Швейцария) с длиной волны

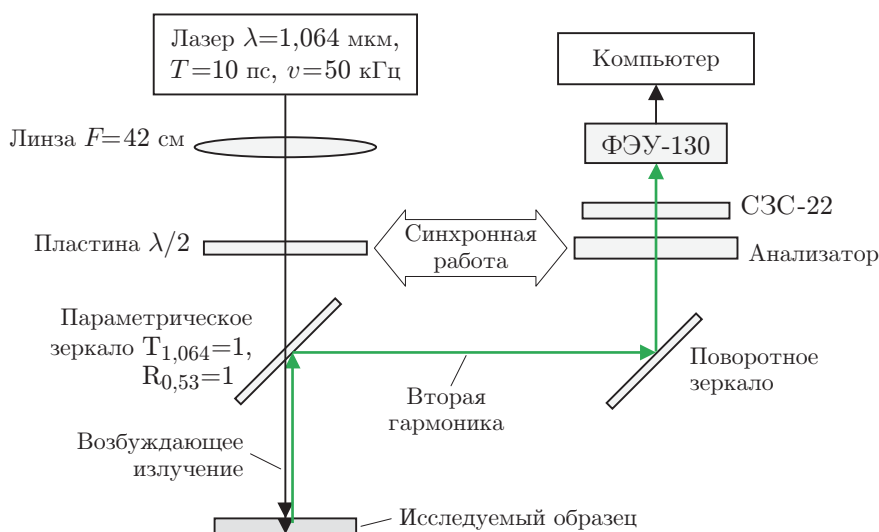


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда нелинейно-оптической диагностики

1,064 мкм, частотой повторения цуга из 10 импульсов 50 кГц. Длительность одного импульса в цуге 10 пс. Излучение лазера фокусируется длиннофокусными линзами на поверхность тестируемого образца в пятно, диаметр которого (0,05 – 0,2 мм) выбирается в соответствии с необходимым пространственным разрешением. Энергия в импульсе составляет около 10^{-5} Дж и может программно варьироваться с целью достижения требуемой для исследуемого образца интенсивности. Излучение лазера имеет линейную поляризацию, падение луча нормально к поверхности образца.

Для получения угловой зависимости ВГ перед образцом стоит полуволновая фазовая пластинка $\lambda/2$, вращаемая программно вокруг оси лазерного луча шаговым двигателем, что позволяет вращать плоскость поляризации падающего на образец излучения. Параметрическое зеркало отделяет в отражённом от образца излучении сигнал ВГ и далее через анализатор, ориентация которого синхронизована зубчатой передачей с ориентацией фазовой пластинки $\lambda/2$, и светофильтр, пропускающий только ВГ, направляет излучение ВГ на ФЭУ-130.

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

Величина регистрируемого сигнала отражённой ВГ зависит от кристаллического совершенства приповерхностного слоя образца, интенсивности лазерного излучения, а также от таких характеристик исследуемого образца в точке падения луча, как коэффициент поглощения на основной частоте и приводящие к двулучепреломлению объёмные напряжения. Она также зависит от качества и непараллельности поверхностей образца в данной точке, влияющих из-за интерференции с переотражённым от тыльной поверхности образца лазерным излучением на итоговую интенсивность регистрируемой ВГ [2, 3, 6–8]. Учитывая сильное поглощение на частоте второй гармоники в полупроводниковых материалах, можно утверждать, что сигнал ВГ содержит в основном информацию о кристаллическом совершенстве приповерхностного слоя полупроводника, глубина которого для CdTe, например, порядка 1 мкм.

Основные результаты и их обсуждение. Численное моделирование условий возбуждения ВГ.

Приёмной аппаратурой стенда НОД регистрируется интенсивность сигнала S - или P -поляризации отражённой ВГ, выходящего из приповерхностного слоя образца. Интенсивность пропорциональна квадрату вектора нелинейной поляризуемости $\mathbf{P}^{NL}(2\omega)$. Для исследуемых кристаллов (GaAs, CdTe, КРТ) компоненты $P_i^{NL}(2\omega)$ в системе координат преломлённой волны лазерного излучения в кристалле $\mathbf{E}(\omega)$ (лабораторная система координат) определяются как

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

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

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

Чтобы найти \mathbf{P}_i^{NL} , необходимо знать конкретный вид тензора $\chi'_{ijk}(\omega)$. Для авторов представляют интерес кристаллы класса $\bar{4}3m$, к которым относятся GaAs, CdTe, КРТ. В системе координат, совпадающей с кристаллографическими осями (x , y , z), тензор кристалла этого класса будет иметь только шесть отличных от нуля и равных друг другу компонент [1]:

$$\chi_{xyz} = \chi_{xzy} = \chi_{yxz} = \chi_{zxy} = \chi_{zyx} = \chi_{yzx} = d_{14}. \quad (3)$$

Аналитические выражения для отражённой волны ВГ, вычисленные на основе (1)–(3), чрезвычайно громоздки и малонаглядны, поэтому для сравнения экспериментальных результатов с расчётными использовалось численное моделирование на основе оригинального программного обеспечения.

Поскольку угловая зависимость интенсивности второй гармоники для идеальных кристаллов исследуемого класса хорошо известна, даже малые отклонения от идеальности легко идентифицируются и, значит, можно рассчитывать на высокую чувствительность данного метода. Условие неразрушающей диагностики легче выполнить при возбуждении в образце сигнала второй гармоники светом в области его прозрачности. Следовательно, в регистрируемую интенсивность второй гармоники будет давать немалый вклад [2, 3, 6] волна лазерного возбуждающего излучения, переотражённая (в том числе многократно при нормальном падении) от тыльной поверхности образца. В результате появляется сложная интерференционная зависимость интенсивности второй гармоники от толщины образца в месте падения лазерного луча. Величина сигнала ВГ в этом случае может быть почти на порядок больше «чисто отражённого» сигнала ВГ, так как при чистом отражении продольная область генерации ВГ составляет $\sim 0,1$ мкм, а при переотражении от тыльных слоёв эта область достигает, например, для CdTe 1 мкм.

Анализ поведения модельных угловых зависимостей сигнала ВГ с вариацией по углам θ и φ вблизи часто используемого среза (013) для создания КРТ-структур на подложках GaAs показал, что наиболее чувствительным это поведение становится при нормальном падении луча к срезу. Поэтому на стенде НОД реализовано нормальное падение лазерного излучения частоты ω на исследуемый образец с одновременным вращением его плоскости поляризации в диапазоне от 0 до 359° . Приёмной аппаратурой стенда НОД регистрируется интенсивность сигнала поляризации отражённой ВГ, параллельной поляризации лазерного излучения.

На рис. 2, a , b для кристаллов класса $\bar{4}3m$ приведены примеры поведения модельных угловых зависимостей ВГ с вариацией по углу φ вблизи среза (013). Для данных рисунков регистрируется интенсивность сигнала P -поляризации отражённой ВГ при

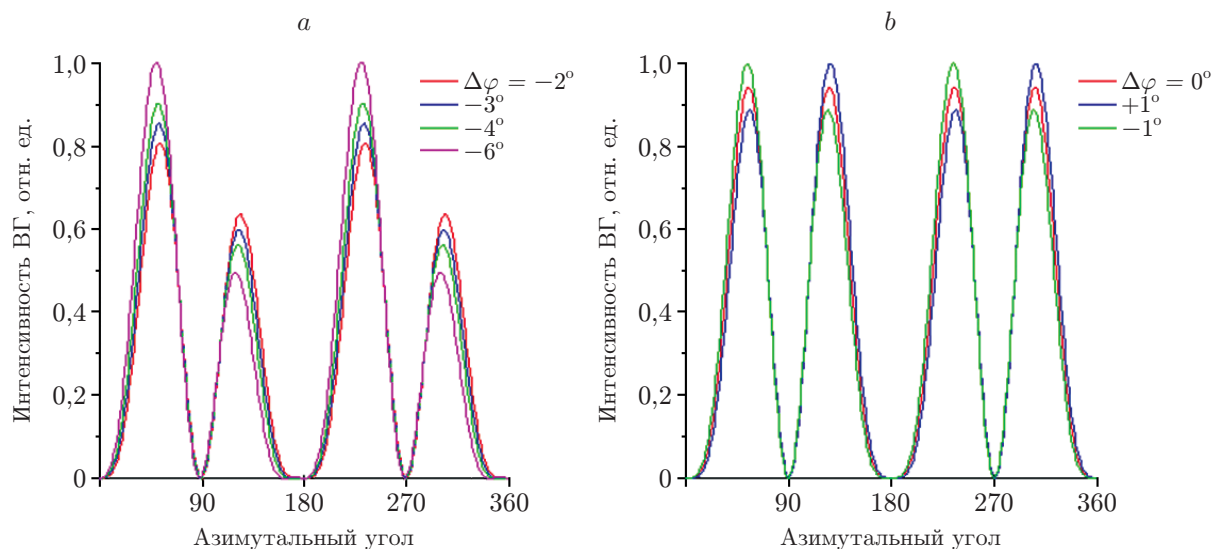


Рис. 2. Модельные угловые зависимости сигнала отражённой ВГ от среза (013) с вариацией по углу φ : *a* — в диапазоне от -2 до -6 градусов, *b* — в диапазоне от $+1$ до -1 градуса. Падение луча нормально к срезу

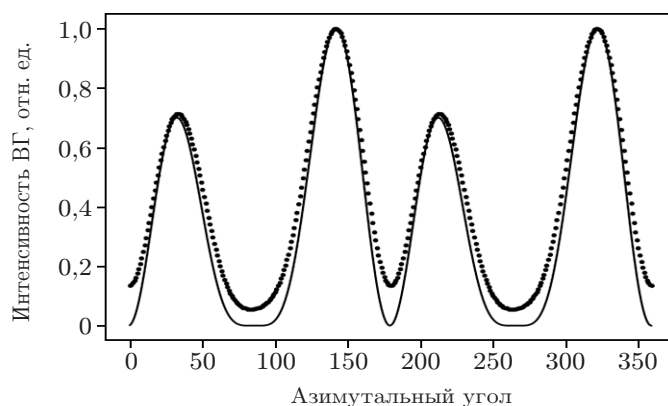


Рис. 3. Результат сравнения экспериментального графика (точечная линия, проведена очистка массива по высоким частотам) с теорией (сплошная линия) для образца КТ 040120

P-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.

Исследование с помощью сигнала ВГ кристаллического совершенства подложек GaAs и буферных слоёв CdTe/ZnTe/GaAs.

Проведены исследования подложек GaAs и буферных слоёв CdTe/ZnTe/GaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Обь-М. Толщины буферных слоёв $d_{\text{ZnTe}} \approx 30$ нм и $d_{\text{CdTe}} \approx 5,5$ мкм. 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 минимальная погрешность экспериментальных результатов, представленных в данной работе.

Рассмотрим результаты исследования подложек GaAs и буферных слоёв

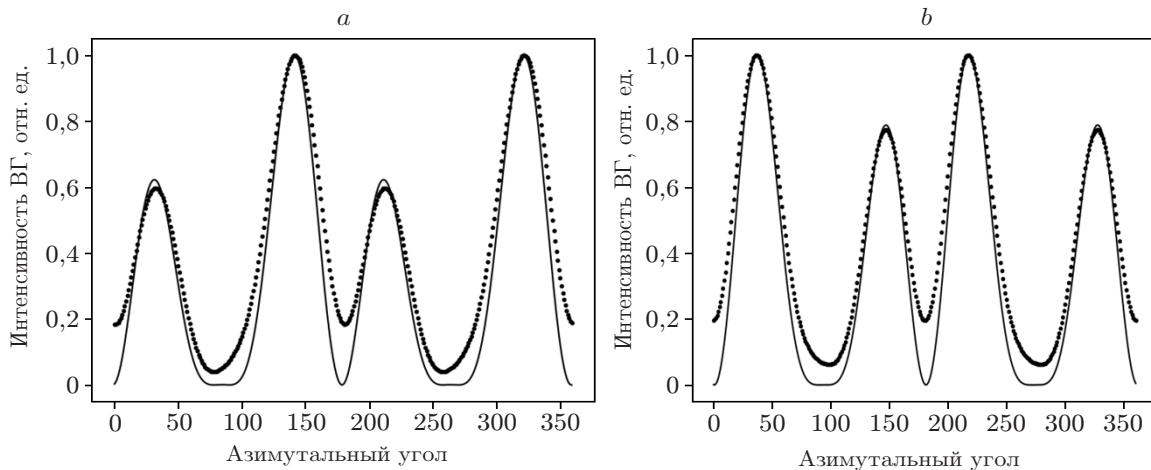


Рис. 4. Результат сравнения экспериментальной угловой зависимости сигнала ВГ (точечная линия, проведена очистка массива по высоким частотам) с теорией (сплошная линия) в образце КТ 040126-1: *a* — от лицевой стороны (слои CdTe/ZnTe); отклонение от среза (013) по углу $\varphi = -4$ градуса; заметные напряжения в слоях и подложке (выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментального графика); *b* — от тыльной стороны (подложка GaAs); отклонение от среза (013) по углу $\varphi = 2$ градуса; заметные напряжения в подложке (выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментального графика)

CdTe/ZnTe/GaAs. Все исследованные подложки GaAs были близки к срезу (013), отличия от идеального среза составляли по углу φ порядка $2-3^\circ$ (см. рис. 2). В качестве примера на рис. 3. приведены экспериментальная и модельная угловые зависимости сигнала ВГ от тыльной стороны (подложка GaAs) образца кадмий—теллур (КТ) 040120. Отклонение от среза (013) по углу φ зафиксировано на -3 градуса. Напряжение в подложке очень слабое (отсутствует асимметрия вблизи минимумов у экспериментального графика).

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

Подведём предварительный итог по результатам исследования подложек GaAs и буферных слоёв CdTe/ZnTe/GaAs. Отклонения от базового среза (013) по углам θ, φ составили $1-3^\circ$ у подложек и несколько больше (до 8°) у буферных слоёв. Часто фиксируются напряжения в подложечном материале (выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментального графика). Отметим, что связь асимметрии и изменения уровней минимумов с напряжениями была выявлена в работах [2, 6, 7], однако тщательных количественных исследований в силу их сложности в этом направлении не проводилось.

Аналогичные результаты по развороту кристаллической решётки CdTe относительно кристаллической решётки (013)GaAs получены для таких же образцов рентгеновским методом [4, 5]. Однако приведённые данные свидетельствуют о большей величине разворота. Вполне возможно ожидать получения бóльших величин. Объяснение разворота связывается с введением определённого типа дислокаций. Может быть и другая причина появления разворота кристаллических решёток. Следует понять, по каким причинам, помимо дислокаций, может меняться величина разворота вплоть до полученных к настоящему времени величин 8° .

Исследование с помощью сигнала ВГ кристаллического совершенства струк-

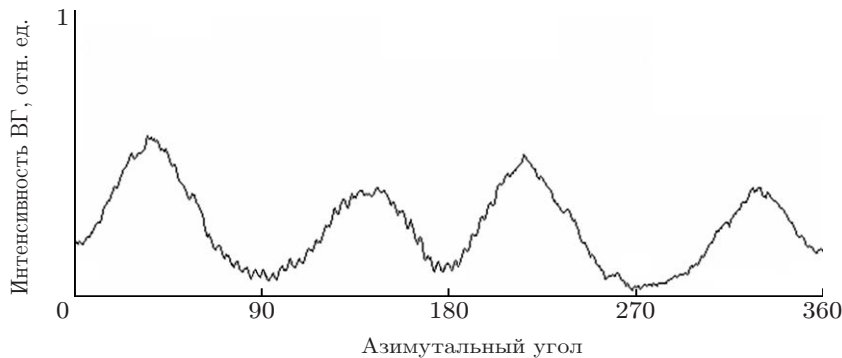


Рис. 5. Экспериментальная угловая зависимость сигнала ВГ от КРТ на кремнии

тур КРТ. Были проведены исследования структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$ и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}$, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке Обь-М. Толщины буферных слоёв $d_{\text{ZnTe}} \approx 30$ нм и $d_{\text{CdTe}} \approx 5,5$ мкм. Слои КРТ были варизонными на гетерограницах с плавно изменяющимся составом X_{CdTe} от 0,45 до рабочего 0,22: толщина нижнего варизонного слоя $d_{\text{в.н}} \approx 1,5$ мкм, толщина рабочего состава $d_{\text{КРТ}} \approx 6$ мкм и от рабочего слоя к поверхности толщина верхнего варизонного слоя $d_{\text{в.в}} \approx 0,5$ мкм.

Проведён сравнительный анализ результатов численного моделирования с большим числом экспериментальных данных, полученных при регистрации азимутальных угловых зависимостей сигнала отражённой второй гармоники при нормальном падении на различные образцы структур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ зондирующего лазерного излучения.

При фиксированном во время экспериментов уровне чувствительности регистрирующей аппаратуры (питание ФЭУ, предусилитель АЦП) и одинаковом уровне возбуждающего ИК-излучения амплитуда сигнала отражённой от слоя КРТ второй гармоники была значительно больше по сравнению с аналогичными сигналами ВГ от слоёв $\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$. На основании данного факта и с учётом экспериментально зафиксированной непрозрачности слоя КРТ для возбуждающего излучения на $\lambda = 1,064$ мкм (т. е. толщина слоя генерации ВГ $\sim 0,1$ мкм) можно предположить, что компоненты тензора нелинейной восприимчивости $\chi_{xyz}(\omega)$ (3) качественной кристаллической структуры КРТ существенно превосходят по величине аналогичные компоненты тензора в CdTe и GaAs .

На рис. 5 приведена экспериментальная угловая зависимость ВГ от структуры $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{Si}$. Срез структуры близок к (013), отклонение от него по углу $\varphi \approx 2^\circ$.

На рис. 6 представлена экспериментальная угловая зависимость ВГ от образца $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$. Высокая амплитуда сигнала ВГ указывает на хорошее кристаллическое качество структуры КРТ. Эти результаты свидетельствуют об отсутствии разворота слоёв $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ относительно слоя CdTe в структуре $\text{CdTe}/\text{ZnTe}/\text{GaAs}$, что согласуется с данными [4, 5].

Полное поглощение возбуждающего излучения на $\lambda = 1,064$ мкм в слое КРТ приводит к «обратимому тепловому дыханию» — временной модификации вида угловой зависимости сигнала ВГ от слоя КРТ в процессе записи азимутальной зависимости при средних уровнях возбуждающего излучения выше 0,2 Вт. Экспериментальные графики для структур КРТ на рис. 5, 6 получены при уровнях средней мощности, заведомо меньших 0,2 Вт.

В экспериментах зафиксировано отсутствие значимого сигнала ВГ от тыльной стороны образцов со слоями КРТ. Если для структуры КРТ на кремнии это закономерно (Si

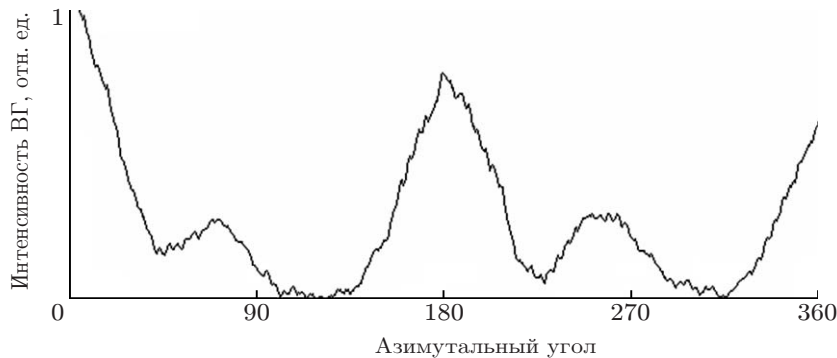


Рис. 6. Экспериментальная угловая зависимость сигнала ВГ от образца 141010-1 (КРТ на GaAs среза (013))

является centrosимметричным кристаллом, где в дипольном приближении вторая гармоника запрещена), то для образцов со слоями КРТ на GaAs среза (013) это означает, что сигнал «чисто отражённой» ВГ от «полубесконечной» поверхности GaAs среза (013) на порядок меньше сигнала ВГ от многократно переотражённой от поверхностей структуры поля возбуждающего излучения на длине волны 1,064 мкм.

Заключение. В данной работе представлены результаты численного моделирования и эксперимента при регистрации азимутальных угловых зависимостей поляризационных компонент сигнала отражённой 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 отражённой ВГ зависит от кристаллического совершенства генерирующего сигнал отражённой ВГ приповерхностного слоя образца, от интенсивности лазерного излучения, а также от таких характеристик исследуемого образца в точке падения луча, как коэффициент поглощения на основной частоте и объёмные напряжения, приводящие к двулучепреломлению. Кроме того, у образцов, прозрачных для основной частоты, качество и непараллельность их поверхностей в данной точке влияют из-за интерференции с переотражённым от тыльной поверхности образца лазерным излучением на итоговую интенсивность отражаемого приповерхностного лазерного излучения, генерирующего отражённую ВГ.

По результатам исследования подложек GaAs и буферных слоёв CdTe/ZnTe/GaAs выявлено, что отклонения от базового среза (013) по углам θ , φ составили 1–3° у подложек и несколько больше (до 8°) у буферных слоёв.

Наблюдаемая выраженная асимметрия минимумов угловой зависимости у экспериментальных графиков связана с напряжениями в подложке GaAs [7].

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

Показана возможность получения экспрессной количественной 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 слоёв.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам ИФП СО РАН Д. Г. Икусову, В. А. Карташеву и И. Н. Ужакову за полезные дискуссии, выращивание буферных слоёв и структур $Cd_xHg_{1-x}Te$; сотрудникам КТИ НП СО РАН С. Н. Макарову и А. Г. Елесину за помощь в создании аппаратной и программной частей лабораторного стенда нелинейно-оптической диагностики.

Финансирование. Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-29-20053), а также Программы фундаментальных исследований РАН, программы развития ИФП СО РАН и Министерства науки и высшего образования РФ (проект № АААА-А17-117121270018-3).

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**, вып. 12. С. 675–745.
2. **Краснов В. Ф., Проц В. И., Рубенчик А. М. и др.** Особенности ГВГ в пластинах GaAs // Квантовая электроника. 1990. **17**, № 5. С. 602–606.
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. 46–49.
4. **Сидоров Ю. Г., Якушев М. В., Колесников А. В.** Дислокации в гетероэпитаксиальных структурах теллурида кадмия на подложках из арсенида галлия и кремния // Автометрия. 2014. **50**, № 3. С. 25–33.
5. **Сидоров Ю. Г., Якушев М. В., Варавин В. С. и др.** Плотность дислокаций в гетероэпитаксиальных структурах CdHgTe на подложках из GaAs и Si ориентации (013) // Физика твердого тела. 2015. **57**, вып. 11. С. 2095–2101.
6. **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**, № 2. С. 196–200.
7. **Balaniuk V. V., Musher S. L., Rubenchik A. M. et al.** Local express scanning characterisation of crystal parameters of semiconductor surface and bulk simultaneously by means of second harmonic generation // Mater. Sci. Eng. 1997. **44**, Is. 1–3. P. 168–172.
8. **Бурлаков И. Д., Демин А. В., Левин Г. Г. и др.** Измерение интенсивности генерации второй оптической гармоники в гетероэпитаксиальных структурах теллурида кадмия—ртути // Измерительная техника. 2010. № 6. С. 15–17.

Поступила в редакцию 24.06.2019

После доработки 05.07.2019

Принята к публикации 07.08.2019