

Исследование кристаллического состояния слоев молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs методом генерации второй гармоники

© С.А. Дворецкий^{1,4}, М.Ф. Ступак², Н.Н. Михайлов^{1,3}, С.Н. Макаров², А.Г. Елесин², А.Г. Верхогляд²

¹ Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

² Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук, 630058 Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет (НГУ), 630090 Новосибирск, Россия

⁴ Томский государственный университет (ТГУ), 634050 Томск, Россия

E-mail: dvor@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Проведено исследование кристаллического совершенства слоев HgCdTe-гетероструктур, выращенных на подложках (013)GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe, поворота ориентации в плоскости (угол φ) и перпендикулярном направлении роста (угол θ) методом генерации второй гармоники. Наблюдалось изменение угла φ для слоев CdTe от ориентации подложки GaAs и его немонотонное изменение по толщине в слое КРТ постоянного состава и широкозонных варизонных слоях на его границах. Наблюдалось увеличение угла θ при выращивании верхнего варизонного широкозонного слоя КРТ. Абсолютное значение угла θ может быть использовано для качественной оценки кристаллического совершенства слоев HgCdTe.

Ключевые слова: кристаллы класса сфалерита, вторая гармоника, азимутальные угловые зависимости, кристаллическое совершенство, гетероструктуры Cd_xHg_{1-x}Te.

DOI: 10.21883/FTP.2022.08.53145.31

1. Введение

Гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) твердого раствора теллурида кадмия и ртути (КРТ, Hg_{1-x}Cd_xTe), выращиваемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), занимают лидирующее место в качестве базового фоточувствительного материала для детекторов инфракрасного (ИК) излучения с высокой чувствительностью в широком спектральном диапазоне длин волн [1,2]. Перспективным направлением рассматривается применение ГЭС КРТ для лазеров ИК и терагерцовой области (ТГц), а также детекторов ТГц спектральных диапазонов длин волн [3–5]. Фотозлектрические характеристики приборов на основе ГЭС КРТ МЛЭ в значительной степени определяются кристаллическим совершенством структуры. Проведенные исследования показали, что для выращивания ГЭС КРТ МЛЭ приборного качества и высокого структурного совершенства кристаллической решетки используют подложки с вицинальной поверхностью (112)В и (013) (см. [6] (и ссылки в ней), [7–9]). Как известно, возникающие напряжения из-за несоответствия параметров кристаллической решетки (ПКР) приводят к генерации дислокаций несоответствия (ДН) и увеличению их плотности в растущем слое (с ростом толщины растет напряжение до критической величины, образуется сетка дислокаций для снятия напряжения). Выращивание ГЭС КРТ МЛЭ с мольным

содержанием теллурида кадмия $X_{\text{CdTe}} \cong 0.22$ на изovalентных подложках Cd_yZn_{1-y}Te ($y = 0.04$) с полным соответствием ПКР слоя КРТ и подложки позволяет обеспечить максимальное структурное совершенство структур [10–12]. Однако незначительное отличие ПКР приводит к ухудшению структурного совершенства и повышению плотности прорастающих дислокаций. Выращивание ГЭС КРТ МЛЭ на альтернативных подложках Ge, GaAs и Si с большим несоответствием ПКР слоя КРТ и подложек приводит к значительному (около 2 порядков и более) повышению плотности дислокаций. Также рост на вицинальных поверхностях приводит к поворотам ориентации растущего слоя в плоскости и направлении роста по отношению к заданной ориентации подложки, которые связаны с различием ПКР, типом и количеством ДН подложки [13,14]. Экспериментальное измерение углов поворота ориентации слоя относительно подложки в направлении роста при выращивании ГЭС чаще всего осуществляется методом рентгеновской дифракции. Поворот плоскости ориентации в направлении роста наблюдается при выращивании гетеросистем на основе различных полупроводников [15–22]. Для ГЭС КРТ МЛЭ на подложке (112)CdZnTe наблюдался поворот плоскости ориентации до 100 угл.сек при незначительном несоответствии ПКР в 0.116% [10]. Для ГЭС КРТ МЛЭ наблюдался поворот плоскости (111)CdTe на 2–6 угл.град при отклонении

подложек (001)GaAs на 2–7 угл. град [23]. В работе [24] сообщается о повороте на 3.5 угл. град плоскости слоя (112)CdTe при выращивании на подложке (112)ZnTe/Si. Детальные исследования поворота плоскости ориентации слоев (013)CdTe и (013)HgCdTe при выращивании на подложках (013)ZnTe/GaAs(Si) и механизмов введения дислокаций приведены в работе [25]. Поворот слоев плоскости (013)CdTe составил 0.68–1.59 угл. град и 2.31–4.4 угл. град при выращивании на подложках (013)ZnTe/Si и (013)ZnTe/GaAs соответственно. Основную причину поворота в направлении роста связывают с несоответствием ПКР при псевдоморфном росте [17] или введением краевых дислокаций несоответствия [13]. Кроме введения краевых дислокаций, возможно введение винтовых дислокаций, которые определяют поворот поверхности в плоскости роста [13].

Учитывая уникальную возможность определения абсолютной ориентации для нецентросимметричных кристаллов относительно плоскости среза методом генерации второй гармоники зондирующего лазерного излучения, нами был исследован поворот ориентации подложек (013)GaAs и слоев (013)CdTe при выращивании на подложках (013)ZnTe/GaAs в плоскости роста методом генерации второй гармоники (ГВГ) [26–29]. Было показано, что для структур CdTe/ZnTe/GaAs(013) поворот в плоскости роста составляет от 3 до 8 угл. град и зависит от поворота исходной поверхности подложки GaAs от (013). Метод ГВГ позволяет проводить экспрессные бесконтактные измерения структурного совершенства кристаллов без центра инверсии с высоким локальным разрешением в тонких приповерхностных слоях [30]. Для кристаллов GaAs, эпитаксиальных слоев CdTe на различных подложках и ГЭС КРТ МЛЭ на подложках из GaAs и Si метод ГВГ показал высокую эффективность и позволил получить новые данные при измерении кристаллического совершенства [31–33].

Метод генерации второй гармоники (ГВГ) оказывается более быстрым и удобным методом по сравнению с электронными и рентгеновскими дифракционными методами для проведения исследований с целью получения экспрессной неразрушающей информации, дополняя применение традиционных электронных, рентгеновских и других дифракционных методов [26–29, 34–40].

В данной статье представлены результаты исследования высокочувствительным методом ГВГ кристаллического состояния гетероструктур (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs и поворота ориентации (013) в азимутальной плоскости и в перпендикулярном направлении роста в различных слоях гетероструктуры и по толщине слоя HgCdTe.

2. Образцы и методика эксперимента

Исследования структурного совершенства и поворота плоскости ориентации проводились методом ГВГ на двух образцах ГЭС КРТ МЛЭ, выращенных методом МЛЭ с контролем состава и толщины слоев методом

одноволновой эллипсометрии *in situ* [41]. При выращивании ГЭС КРТ МЛЭ используются полированные с обеих сторон подложки из GaAs с ориентацией (013). Для сохранения ориентации и решения проблемы большого несоответствия параметров решеток GaAs и КРТ в 13.6% последовательно выращиваются буферные слои ZnTe и CdTe. Новая „альтернативная“ подложка CdTe/ZnTe/GaAs сохраняет ориентацию (013) и обеспечивает существенно меньшее несоответствие параметров решетки с КРТ (< 0.3%). Выращенные структуры включают буферные слои ZnTe и CdTe и слой КРТ с варизонными широкозонными слоями на границах однородного слоя на подложке (013)GaAs. Толщины слоев ZnTe и CdTe составляли до 30 нм и 5.5 мкм соответственно. На рис. 1 приведен профиль состава в слоях КРТ структур ГЭС КРТ МЛЭ 1МСТ170622 и 1МСТ80130.

Слои КРТ с однородным составом ~ 0.23 для структуры 1МСТ170622 и $x \sim 0.24$ для структуры 1МСТ180130, толщиной 5–8 мкм включали широкозонный нижний варизонный слой на гетерогранице с буферным слоем CdTe с изменением состава от $x \sim 0.45$ до $x \sim (0.23–0.24)$ толщиной ~ 1.5 мкм и верхним широкозонным варизонным слоем с изменением состава от $x \sim (0.23–0.24)$ до $x \sim 0.4$ с толщиной ~ 0.5 мкм на поверхности КРТ.

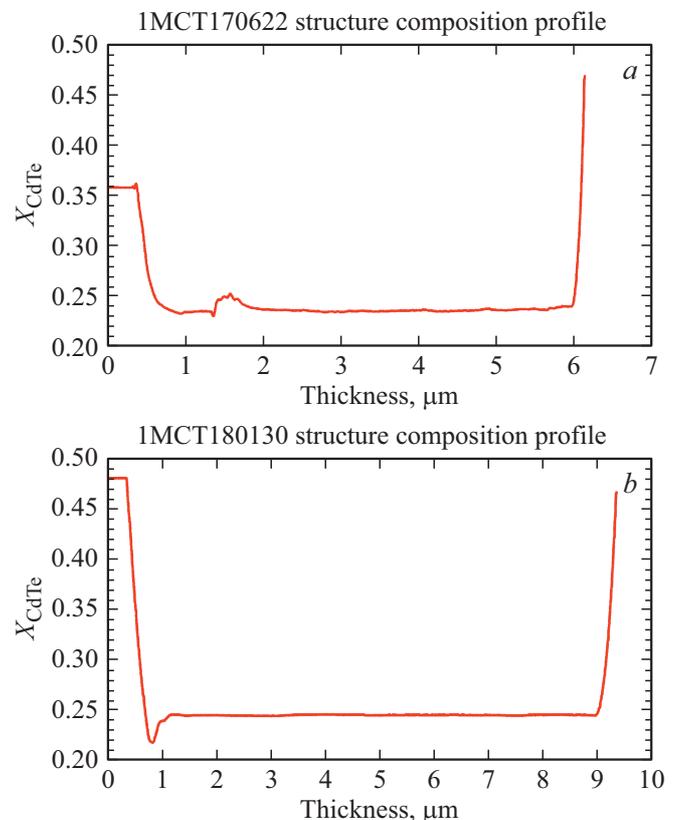


Рис. 1. Распределение состава X_{CdTe} в слоях ГЭС КРТ МЛЭ: *a* — 1МСТ170622, *b* — 1МСТ180130. Поверхность подложки, находящейся слева, определяется нулевой координатой горизонтальной оси.

Измерение структурного кристаллического совершенства подложки и слоев ГЭС КРТ МЛЭ проводилось при комнатной температуре методом ГВГ *ex situ* на высокочувствительном лабораторном стенде нелинейно-оптической диагностики, детальное описание работы которого представлено в [27,28]. Средняя мощность для ГВГ изменялась в пределах от 0.01 до 0.07 Вт с помощью Nd:YAG-лазера. Диапазон измерения азимутальной зависимости сигнала второй гармоники (ВГ) составлял от 10 до 30 с.

Величина шума (с нулевым средним) соответствовала ~ 16 единицам кода АЦП, уровень характерной амплитуды сигнала ВГ на графиках находился в пределах 2000–4500 единиц кода АЦП. Сравнительный анализ амплитуд экспериментального сигнала ВГ (вдоль поверхности или для однотипных образцов) может быть проведен с погрешностью менее 0.05. Проводились измерения зависимости интенсивности поляризационных компонент ВГ от взаимной ориентации поляризации возбуждающего излучения относительно кристаллофизических осей, когда в эксперименте регистрируется поляризация ВГ, параллельная азимутально меняющейся линейной поляризации возбуждающего излучения (далее — азимутальная зависимость). Анализ экспериментальных и численных модельных данных для идеального кристалла в заданной локальной области позволил получать количественную информацию о кристаллическом состоянии приповерхностного слоя, его ориентации и поворотах ориентации поверхности растущих слоев в плоскости и направлении роста, и ряд других характеристик с погрешностью не более градуса [26–29,34–40]. Измерения кристаллического состояния слоев КРТ по толщине проводились при последовательном послойном химическом травлении и измерении азимутальной зависимости интенсивности сигнала ВГ. Нами экспериментально было установлено, что амплитуда и структура сигнала ВГ не зависят от травления поверхности, что позволило установить закономерности поведения поверхности (013) при выращивании сложной многослойной структуры HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs.

3. Результаты и анализ экспериментальных данных

3.1. Анализ поведения и регистрация азимутальных зависимостей сигналов второй гармоники в кристаллах GaAs, CdTe, HgCdTe вблизи ориентации (013)

Расчет интенсивности сигнала ВГ с помощью тензора нелинейной восприимчивости $\chi_{xyz}(\omega)$ в кристаллах сфалерита или цинковой обманки (международная классификация — класс $\bar{4}3m$) подробно описан в работах [30,31]. При сравнении расчетных и экспериментальных результатов азимутальных зависимостей сигнала ВГ в конкретной геометрии и для конкретных срезов кристалла применяется численное моделирование [25–29,32–34].

Подложка GaAs и слои CdTe и ZnTe прозрачны в области возбуждающего излучения ~ 1 мкм [37–39]. В области фундаментального поглощения на длине волны второй гармоники ($\lambda = 0.53$ мкм) глубина проникновения, по нашим данным, составляет для CdTe ≈ 130 нм, для GaAs ≈ 140 нм, для ZnTe ≈ 210 нм, что находится в удовлетворительном соответствии со справочными и литературными данными [42–44]. Слои КРТ непрозрачны и для возбуждающего излучения на $\lambda = 1.064$ мкм, и для его второй гармоники. По нашим данным, глубина проникновения для верхнего варизонного слоя исследуемых гетероструктур по амплитуде в области ~ 1 мкм не превышает 0.2 мкм, а длина поглощения ВГ по амплитуде ≤ 0.03 мкм, что хорошо согласуется с данными работ [43,44]. Это означает, что в наших экспериментах сигналы ВГ от гетероструктуры КРТ и от ее тыльной стороны (подложки GaAs) являются чисто отраженными.

Эффективная глубина генерации отраженной ВГ определяется в случае прозрачной среды ее когерентной длиной $d \approx \lambda/4\pi n(\omega)$, а при сильном поглощении глубина генерации d определяется минимальным значением величин $\alpha^{-1}(\omega)$ и $\alpha^{-1}(2\omega)$ [25], где λ — длина волны основного излучения, $n(\omega)$ — показатель преломления среды на этой длине волны, α — коэффициенты поглощения на основной и удвоенной частотах. В случаях слабого поглощения $d = \lambda/4(n(\omega) + n(2\omega))$ [45,46]. Проведенные оценки показали, что глубина диагностики методом ГВГ исследуемых образцов HgCdTe определяется величиной $\alpha^{-1}(2\omega)$, глубина генерации ВГ, отраженной от подложек GaAs и слоев CdTe (без учета отраженного от тыльной стороны лазерного излучения) определяется когерентной длиной и составляет величину ~ 20 –25 нм.

Анализ поведения графиков модельных азимутальных зависимостей сигнала ВГ с вариацией по углам θ и φ вблизи ориентации (013) показал (см. работы [26–29]), что эти зависимости чрезвычайно чувствительны к небольшим отклонениям от угла φ при нормальном падении луча. Поэтому на лабораторном стенде осуществлено нормальное падение лазерного излучения частоты ω на исследуемый образец с одновременным вращением его плоскости поляризации (азимутальный угол) в диапазоне от 0 до 359° и регистрацией интенсивности сигнала отраженной ВГ с поляризацией, параллельной поляризации лазерного излучения.

График азимутальной зависимости сигнала ВГ для идеальной ориентации (013) должен демонстрировать одинаковые амплитуды всех четырех максимумов (рис. 2).

На рис. 2 приведен для кристаллов класса $\bar{4}3m$ пример поведения модельных азимутальных зависимостей отраженного сигнала ВГ с вариацией по углу φ вблизи среза (013). При моделировании отсчет углов θ и φ среза (013) велся от базового среза (100). Здесь представлена в относительных единицах интенсивность сигнала поляризации отраженной ВГ, параллельной поляризации возбуждающего лазерного излучения. Жирной темной

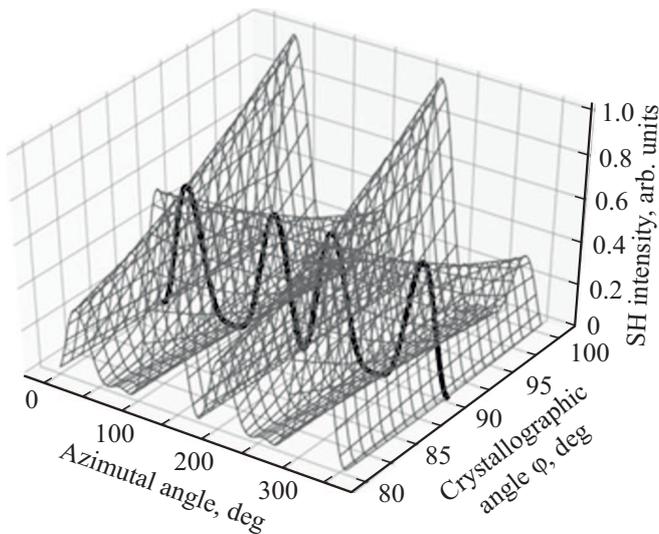


Рис. 2. Модельная поверхность азимутальной интенсивности ВГ для нормального падения луча при вариации среза вблизи (013) по углу φ . Поляризация сигнала ВГ параллельна поляризации возбуждающего излучения.

линией показан график азимутальной зависимости сигнала ВГ для идеально точной ориентации (013) при угле $\varphi = 90^\circ$, демонстрирующий одинаковые амплитуды всех четырех максимумов.

Тщательный анализ наших многочисленных экспериментов со структурами КРТ и подложками в окрестности ориентации (013) [27–29] позволяет сделать однозначный вывод, что экспрессная диагностика по сигналу ВГ абсолютной ориентации локального участка исследуемого образца по углу φ (с погрешностью, при необходимости, до 0.1 угл.град) является полностью достоверной и не требует каких-либо дополнительных проверок.

Угол θ определяет отклонение направления ориентации подложки от направления плоскостей (001) в структуре цинковой обманки. Для ориентации (013) этот угол составляет 18.46 угл.град. Было показано [27–29], что изменения сигнала ВГ по углу θ (при фиксированном угле φ) вблизи ориентации (013) приводят к простому изменению амплитуды в максимумах графиков зависимости интенсивности ВГ от азимутального угла без изменения соотношений между максимумами.

Проведенный дополнительный анализ изменения амплитуд двух соседних максимумов модельных азимутальных зависимостей сигнала ВГ в окрестности угла $\theta \approx 19$ угл.град (рис. 3) показывает, что при увеличении угла θ на 8 угл.град амплитуда сигнала ВГ увеличивается в 2 раза линейным образом в зависимости от изменения угла θ . На рис. 3 точками прописана линейная зависимость амплитуд равных максимумов ВГ от угла θ с тангенсом угла наклона 0.25 при идеальной ориентации (013) по углу φ . Точно такие же линейные зависимости для соответствующих максимумов, как видно из рис. 3, получаются при отклонении от (013) по фиксированному углу φ .

Это означает, что без контроля амплитуды сигнала ВГ в эксперименте с однотипными образцами со структурой цинковой обманки погрешность определения угла θ методом ГВГ вблизи ориентации (013) может достигать значений ± 5 угл.град. Если же в серии экспериментов наблюдаются незначительные отличия амплитуд сигналов ВГ от различных поверхностей однотипных исследуемых структур, то это позволяет предположить, что вариации угла θ находятся в пределах максимум 2–3 угл.град.

Для полупроводниковых материалов и структур, прозрачных для основного излучения, величина регистрируемого сигнала смешанной (отраженной плюс прошедшей) ВГ при заданном уровне возбуждающего лазерного излучения определяется в большей степени переотражением возбуждающего излучения от тыльной поверхности образца [26–28,34]. При исследовании подложек GaAs и буферных слоев CdTe на этих подложках сигнал ВГ соответствует точечной группе симметрии кристалла приповерхностного слоя и может, таким образом, использоваться для характеристики структурного качества слоя толщиной 0.3–1 мкм. Величина сигнала ВГ в этом случае может более чем на порядок превосходить величину отраженного только от передней поверхности сигнала ВГ [26,27,34].

Так как слои КРТ непрозрачны для возбуждающего излучения ($\lambda = 1.064$ мкм) и для его второй гармоники, в эксперименте фиксируется только отраженная ВГ и от поверхностного слоя КРТ, и от обратной стороны подложки. Подложки GaAs в наших экспериментах имели двухстороннюю полировку, что позволяет в этом случае производить сравнительный анализ нелинейных восприимчивостей данных материалов, диагностировать сравнительное присутствие напряжений в подложке и в слоях гетероструктуры КРТ, а также с высокой точностью определять различие в ориентации по углу φ слоев гетероструктуры КРТ и подложки GaAs.

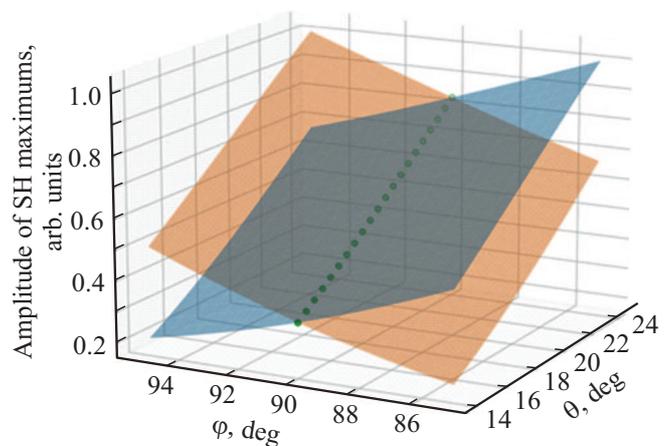


Рис. 3. Поведение амплитуд двух соседних максимумов азимутальных графиков сигнала ВГ в окрестности ориентации (013) в зависимости от углов θ и φ . Точная ориентация (013) определена углами $\theta \approx 19^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ (отсчет от ориентации (100)).

Следует отметить, что легко выявляемое методом ГВГ присутствие напряжений в подложке и их прорастание в слои выращиваемой гетероструктуры КРТ [28] приводит в итоге к некоторому незначительному увеличению погрешностей при определении ориентации по углам θ и φ .

Ранее проведенные исследования кристаллического совершенства других структур показали, что величина сигнала ВГ в максимуме имеет более высокое значение для структур с высоким кристаллическим совершенством. В частности, в работе [27] выявлено хорошее соответствие между амплитудой сигнала ВГ и полушириной рентгеновской кривой качания (FWHM) для структур, выращенных при различных соотношениях потоков кадмий/теллур. Это говорит о том, что метод ВГ позволяет осуществлять экспрессную отбраковку структур по кристаллическому качеству.

3.2. Результаты исследования ориентации слоев (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs методом генерации второй гармоники и обсуждение

Проведенные исследования методом ВГ показали, что наблюдается поворот кристаллической решетки φ в плоскости подложки (013) GaAs и впоследствии в плоскости роста поверхности слоев CdTe и HgCdTe в структуре HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs [26,27]. Точность определения угла φ составляет ± 1 угл.град. Для слоев CdTe величина угла φ составляет до 8 угл.град при переходе от поверхности (013)GaAs. Для слоев КРТ наблюдалось немонотонное изменение угла φ по толщине с незначительным уменьшением значений при переходе от варизонных к рабочим слоям постоянного состава [24]. Для структур 1MCT170622 и 1MCT180130 наблюдается изменение отклонения угла φ от идеальной ориентации (013) в противоположных направлениях, что связано с полярностью поверхности подложек из GaAs. Поворот ориентации слоев в плоскости роста φ связывают с винтовыми дислокациями [13,14]. Значение угла φ увеличивается при увеличении рассогласования параметров решетки сопрягаемых материалов, которая для CdTe и GaAs составляет 13.6% и для CdTe и КРТ $< 0.3\%$. Введение дислокаций, их плотность и природа зависят от механизмов роста слоев и их введения в растущий слой. Наблюдаемые изменения φ качественно соответствуют изменению несоответствия параметров решетки и, следовательно, плотности дислокаций несоответствия. При увеличении рассогласования параметров решетки плотность дислокаций увеличивается, что приводит к увеличению угла φ . При выращивании слоев КРТ с варизонными широкозонными слоями наблюдается изменение плотности дислокаций, как показано, методом просвечивающей электронной микроскопии [25]. Наблюдалось введение дислокаций несоответствия и последующее образование сетки дислокаций при выращивании нижнего варизонного широкозонного слоя КРТ. Изменение плотности дислокаций несоответствия приводит к незначительному изменению угла φ . При

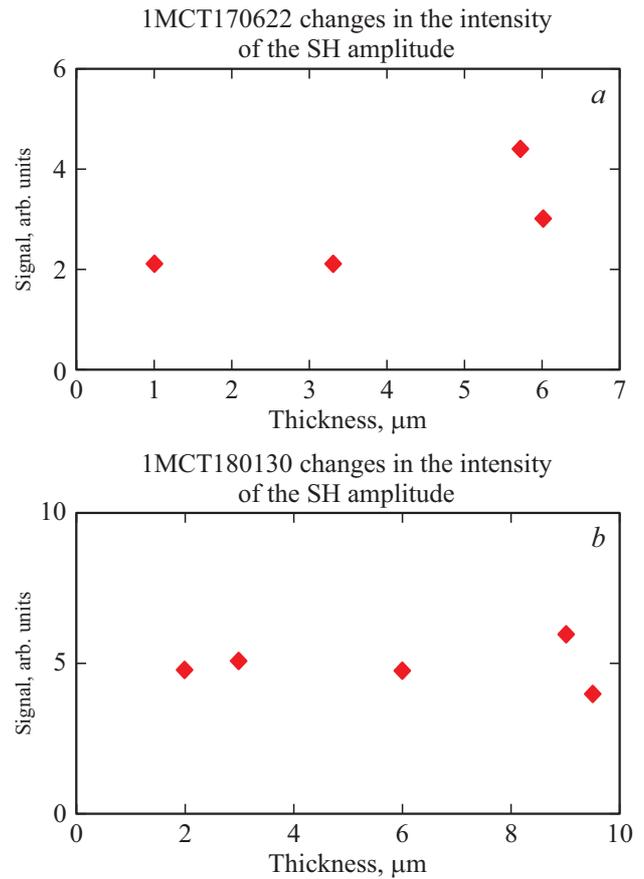


Рис. 4. Зависимость интенсивности ВГ по толщине слоев КРТ в структурах ГЭС КРТ МЛЭ: *a* — 1MCT170622; *b* — 1MCT180130.

росте слоя КРТ постоянного состава плотность дислокаций останется постоянной и изменений угла φ не происходит. При выращивании верхнего варизонного широкозонного слоя КРТ плотность дислокаций также изменяется, как и при выращивании нижнего варизонного широкозонного слоя, что приводит к наблюдаемому изменению угла φ и, соответственно, к повороту ориентации растущего слоя КРТ в плоскости роста. Для количественной зависимости угла φ необходимо измерить плотность винтовых дислокаций, что представляет определенные трудности. Измерение угла φ методом ГВГ и сопоставление с условиями роста слоев в сложной многослойной структуре можно использовать в прикладной науке для практических целей при определении оптимальных условий выращивания высококачественных структур.

На рис. 4 приведены зависимости относительной интенсивности амплитуды ВГ (амплитуда главного максимума азимутальной зависимости в относительных единицах) по толщине слоя в структурах ГЭС КРТ МЛЭ 1MCT170622 и 1MCT180130.

Изменения интенсивности амплитуды ВГ при одинаковых уровнях возбуждающего излучения 0.06 Вт и одинаковой чувствительности приемного тракта связа-

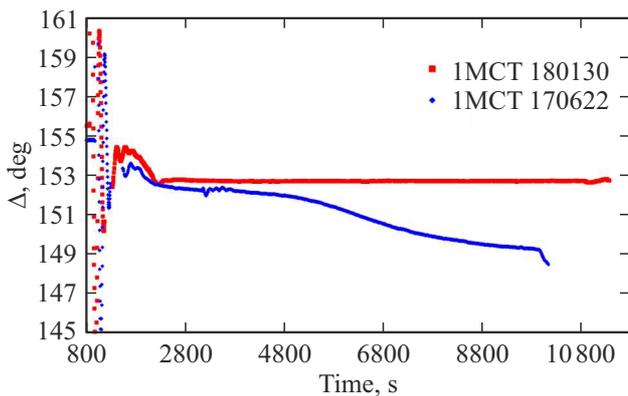


Рис. 5. Зависимость эллипсометрического параметра Δ от времени роста слоя КРТ в структурах ГЭС КРТ МЛЭ: синие ромбы — 1МСТ170622; красные квадраты — 1МСТ180130.

но с изменением угла θ , что характеризует поворот плоскости ориентации в направлении роста. Как следует из приведенных данных, интенсивность амплитуды ВГ для структуры 1МСТ170622 в 2 раза меньше, чем для структуры 1МСТ180130. Интенсивность амплитуды в однородном слое КРТ остается неизменной и незначительно увеличивается на поверхности верхнего варизонного широкозонного слоя. Таким образом, угол θ имеет практически постоянное значение в однородном слое КРТ и увеличивается к поверхности верхнего варизонного широкозонного слоя. Отметим, что в структуре 1МСТ170622 при приближении к поверхности верхнего широкозонного слоя в соответствии с изменением амплитуды ВГ угол θ увеличивается сильнее по сравнению со структурой 1МСТ180130, что связано с неоптимальными условиями роста 1МСТ170622. Поворот плоскости ориентации в направлении роста в аналогичных слоях КРТ на подложках из GaAs не наблюдался при исследовании методом рентгеновской дифракции, как было показано в работе [25]. Действительно, плотность дислокаций и параметры решетки при росте слоя КРТ постоянного состава остаются неизменными. Следовательно, нет движущей силы для обеспечения поворота ориентации при росте. При выращивании верхнего варизонного широкозонного слоя, как было показано выше, плотность дислокаций должна изменяться, что и должно привести к наблюдаемому изменению угла θ и, следовательно, к повороту ориентации в направлении роста. Такой результат трудно получить при наблюдении поворота методом рентгеновской дифракции. Напротив, метод ГВГ, позволяющий зондировать тонкие приповерхностные слои, позволил показать наблюдаемые изменения угла θ по измерениям интенсивности амплитуды ВГ. Абсолютное значение угла θ в рабочем слое HgCdTe для структуры 1МСТ170622 на $8-10^\circ$ меньше, чем в рабочем слое HgCdTe для структуры 1МСТ180130 при условии одинакового кристаллического совершенства структур. Учитывая эти данные и принимая во внимание различие в интенсивности амплитуды ВГ

для исследуемых структур, можно утверждать, что для структуры 1МСТ170622 кристаллическое совершенство слоя HgCdTe значительно ниже, чем для структуры 1МСТ180130. На рис. 5 приведены экспериментальные данные изменения эллипсометрического параметра Δ в процессе роста структур 1МСТ170622 и 1МСТ180130. Приведенные данные показывают различное изменение этого параметра, что свидетельствует о росте структур в различных условиях. Для 1МСТ180130 наблюдается типичное изменение значений Δ при выращивании слоя КРТ с варизонными широкозонными слоями. Параметр Δ остается постоянным при выращивании слоя однородного состава в интервале времени 2300–10800 с, что свидетельствует об оптимальных условиях роста (рис. 5, квадратные точки). Напротив, для 1МСТ170622 при выращивании слоя однородного состава, начиная с 2300 секунд, наблюдаются уменьшение Δ и его резкое падение при выращивании варизонного широкозонного слоя, что связано с проведением процессов в неоптимальных условиях (рис. 5, синие ромбы). Уменьшение параметра Δ свидетельствует о значительном изменении морфологии поверхности и ее ухудшении со временем, что не позволяет выращивать толстые слои. Такое различие при выращивании 1МСТ170622 и 1МСТ180130 должно приводить к различным механизмам введения дислокаций при выращивании варизонного широкозонного слоя по окончании процесса роста, принимая анализ введения дислокаций при выращивании структур (013)CdTe/ZnTe/GaAs [25].

Таким образом, проводя сравнение угла θ для выращенных структур со значением угла θ для эталонного образца HgCdTe, можно качественно проводить оценку кристаллического совершенства.

Анализ сравнения приведенных выше экспериментальных данных по динамике разворота слоев по углам θ и φ вдоль толщины гетероструктуры позволяет сделать однозначный вывод об отсутствии какой-либо связи в этих разворотах по углам θ и φ , т. е. причины вариаций ориентации по углам θ и φ структуры при росте могут быть разными и совершенно независимыми.

4. Заключение

Проведены исследования структурного совершенства слоев HgCdTe в ГЭС КРТ МЛЭ, выращенных на подложке (013)GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe при азимутальном измерении интенсивности генерации второй гармоники с помощью высокочувствительного стенда нелинейно-оптической диагностики. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных. Расчет проводился на основе модельной азимутальной зависимости интенсивности ВГ для нормального падения луча при вариации ориентации по углу φ вблизи (013). Наблюдалось изменение угла φ до 8 угл.град от ориентации (013) подложки GaAs, который определяет поворот ориентации в плоскости роста при выращивании ГЭС КРТ МЛЭ. Немонотонное изменение угла φ по

толщине слоя КРТ и его небольшое увеличение в варизонных широкозонных слоях связано с образованием дислокаций несоответствия. В слоях постоянного состава угол φ остается постоянным, что свидетельствует об отсутствии поворота ориентации в плоскости роста. Анализ интенсивности амплитуды ВГ позволил провести оценку изменения угла θ при выращивании ГЭС КРТ МЛЭ, показавшее его изменение на 5 угл. град от ориентации (013) подложки GaAs. Такое изменение связано с поворотом ориентации в направлении роста. Незначительное увеличение угла θ в варизонном широкозонном слое нами связывается с изменением плавности прорастающих дислокаций при его выращивании. Поворот ориентации поверхности при росте ГЭС КРТ МЛЭ от ориентации (013) подложки GaAs определяется рассогласованием параметров решеток. Большая величина рассогласования параметров решеток для КРТ и GaAs определяет значительный поворот ориентации в плоскости роста и в его направлении. Малая величина рассогласования параметров решеток при выращивании слоя КРТ с изменением состава по толщине определяет незначительные значения поворота ориентации в плоскости роста и в его направлении. Величина интенсивности амплитуды ВГ может быть определена экспрессным методом определения кристаллического совершенства слоев КРТ.

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-20053; проект № 21-52-12015), Volkswagen Found проект № 97738 и в рамках государственного задания Министерства образования и науки России в части проекта АААА-А20-120102190007-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W. Lei, J. Antoszewski, L. Faraone. *APR*, **2**, 041303 (2015).
- [2] В.С. Варавин, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, В.Г. Ремесник, И.В. Сабина, Ю.Г. Сидоров, В.А. Швец, М.В. Якушев, А.В. Латышев. *Автометрия*, **56** (5), 12 (2020).
- [3] S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, V.G. Remesnik, Yu.G. Sidorov, V.A. Shvets, D.G. Iksuv, V.S. Varavin, M.V. Yakushev, J.V. Gumenjuk-Sichevska, A.G. Golenkov, I.O. Lysiuk, Z.F. Tsybrii, A.V. Shevchik-Sheker, F.F. Sizov, A.V. Latyshev, A.L. Aseev. *Opto-Electron. Rev.*, **27** (3), 282 (2019).
- [4] M.A. Fadeev, V.V. Rummyantsev, A.M. Kadykov, A.A. Dubinov, A.V. Antonov, K.E. Kudryavtsev, S.A. Dvoretzkii, N.N. Mikhailov, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov. *Opt. Express*, **26**, 12755 (2018).
- [5] S. Ruffenach, A. Kadykov, V.V. Rummyantsev, J. Torres, D. Coquillat, D. But, S.S. Krishtopenko, C. Consejo, W. Knap, S. Winnerl, M. Helm, M.A. Fadeev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzkii, V.I. Gavrilenko, S.V. Morozov, F. Teppe. *APL Materials*, **5** (3), 35503 (2017).
- [6] L.A. Almeida, M. Groenert, J. Markunas, J.H. Dinan. *J. Electron. Mater.*, **35** (6), 1214 (2006).
- [7] R.J. Koestner, H.F.J. Schaake. *Vac. Sci. Technol. A*, **6**, 2834 (1988).
- [8] V.S. Varavin, S.A. Dvoretzky, V.I. Liberman, N.N. Mikhailov, Yu.G. Sidorov. *J. Cryst. Growth*, **159**, 1161 (1996).
- [9] A. Million, L.Di. Cioccio, J.P. Gailliard, J. Piaguet. *J. Vacuum Sci. & Technol. A*, **6**, 2813 (1988).
- [10] T.T. Lam, C.D. Moore, R.L. Forrest, M.S. Goorsky, S.M. Johnson, D.B. Leonard, T.A. Strand, T.J. De Lyon, M.D. Gorwitz. *J. Electron. Mater.*, **29** (6), 804 (2000).
- [11] B. Shojaei, R. Cottier, D. Lee, E. Piquette, M. Carmody, M. Zandian, A. Yulius. *J. Electron. Mater.*, **48** (10), 6118 (2019).
- [12] T. Skauli, T. Colin, R. Slølie, S. Løvold. *J. Electron. Mater.*, **29** (6), 687 (2000).
- [13] F. Riesz. *J. Appl. Phys.*, **79**, 4111 (1996).
- [14] C.C. Fulk, T. Parodos, P. Lamarre, S. Tobin, P. LoVecchio, J. Markunas. *J. Electron. Mater.*, **38** (8), 1690 (2009).
- [15] N. Nagai. *J. Appl. Phys.*, **45**, 3789 (1974).
- [16] P. Auvray, M. Baudet, A. Regreny. *J. Cryst. Growth*, **95**, 288 (1989).
- [17] Y. Takagi, Yu. Furukawa, A. Wakahara, H. Kan. *J. Appl. Phys.*, **107**, 063506 (2010).
- [18] А.В. Колесников, А.С. Ильин, Е.М. Труханов, А.П. Василенко, И.Д. Лошкарёв, А.С. Дерябин. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **75**, 652 (2011).
- [19] И.Д. Лошкарёв, А.П. Василенко, Е.М. Труханов, А.В. Колесников, М.А. Путято, Б.Р. Семягин, В.В. Преображенский, О.П. Пчеляков. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **77**, 264 (2013).
- [20] А.В. Колесников, Е.М. Труханов, А.С. Ильин, И.Д. Лошкарёв. *Поверхность*, **7**, 30 (2014).
- [21] И.Д. Лошкарёв, А.П. Василенко, Е.М. Труханов, А.В. Колесников, М.А. Путято, М.Ю. Есин, М.О. Петрушков. *Письма ЖТФ*, **43** (4), 64 (2017).
- [22] Е.А. Емельянов, А.В. Васев, Б.Р. Семягин, М.Ю. Есин, И.Д. Лошкарёв, А.П. Василенко, М.А. Путято, М.О. Петрушков, В.В. Преображенский. *ФТП*, **53**, 512 (2019).
- [23] E. Ligeon, C. Chami, R. Danielou, G. Feuillet, J. Fontenelle, K. Seminadayar, A. Ponchet. *J. Appl. Phys.*, **67**, 2428 (1990).
- [24] W.F. Zhn hao, R.N. Jakobs, M. Jaime-Vasquez, L.O. Bubulak, D.J. Smith. *J. Electron. Mater.*, **40** (8), 1733 (2011).
- [25] Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, В.С. Варавин, А.В. Колесников, Е.М. Труханов, И.В. Сабина, И.Д. Лошкарёв. *ФТТ*, **57** (11), 2095 (2015).
- [26] М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, М.В. Якушев. *Автометрия*, **55** (5), 31 (2019).
- [27] М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, М.В. Якушев, Д.Г. Икусов, С.Н. Макаров, А.Г. Елесин, А.Г. Верхогляд. *ФТТ*, **62** (2), 214 (2020).
- [28] М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, С.Н. Макаров, А.Г. Елесин, А.Г. Верхогляд. *ЖТФ*, **91** (11), 1799 (2021).
- [29] С.А. Дворецкий, М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.Н. Макаров, А.Г. Елесин, А.Г. Верхогляд. *Автометрия*, **57** (5), 18 (2021).
- [30] С.А. Ахманов, В.И. Емельянов, Н.И. Коротеев, В.В. Семиногов. *УФН*, **147** (12), 675 (1985).
- [31] T.F. Heinz. *Second-Order Nonlinear Optical Effects at Surfaces and Interfaces*. In: *Nonlinear Surface Electromagnetic Phenomena*, eds by H. Ponath, G. Stegeman (North Holland Pub., Amsterdam, 1991).

- [32] T. Kimura, Ch. Yamada. *J. Cryst. Growth*, **150**, 92 (1995).
- [33] 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).
- [34] В.В. Баланик, В.Ф. Краснов, С.Л. Мушер, В.И. Проц, В.Э. Рябченко, С.А. Стоянов, С.Г. Струц, М.Ф. Ступак, В.С. Сыскин. *Квант. электрон.*, **22** (2), 196 (1995).
- [35] Г.М. Борисов, В.Г. Гольдорт, А.А. Ковалев, С.А. Кочубей, Д.В. Ледовских, В.В. Преображенский, М.А. Путятю, Н.Н. Рубцова, Б.Р. Семягин. *Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика*, **9** (4), 5 (2014).
- [36] Г.М. Борисов, В.Г. Гольдорт, К.С. Журавлев, А.А. Ковалев, С.А. Кочубей, Д.В. Ледовских, Т.В. Малин, Н.Н. Рубцова. *Сибирский физ. журн.*, **13** (2), 64 (2018).
- [37] С.Б. Бодров, А.И. Корытин, Ю.А. Сергеев, А.Н. Степанов. *Квант. электрон.*, **50** (5), 496 (2020).
- [38] И.Д. Бурлаков, А.В. Демин, Г.Г. Левин, Н.А. Пискунов, С.В. Заботнов, А.С. Кашуба. *Измерит. техн.*, № 6, 15 (2010).
- [39] Е.В. Пермикина, А.С. Кашуба. *Успехи прикл. физики*, **4** (5), 493 (2016).
- [40] Н.А. Кульчицкий. *Прикл. физика*, № 1, 44 (2021).
- [41] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабина. *ФТП*, **35** (9), 1092 (2001).
- [42] В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. *Оптические свойства полупроводников*. Справочник (Киев, Наук. думка, 1987).
- [43] *Handbook of Optical Constants of Solids*, ed. by E.D. Palik (Elsevier Science, USA, 1998).
- [44] Sadao Adachi. *Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors* (Springer Science+Business Media, N.Y., 1999).
- [45] E.D. Mishina, T.V. Misuryaev, N.E. Sherstyuk, V.V. Lemanov, A.L. Morozov, A.S. Sigov. *Rasing Th. Phys. Rev. Lett.*, **85** (17), 3664 (2000).
- [46] Е.Д. Мишина, А.И. Морозов, А.С. Сигов, Н.Е. Шерстюк, О.А. Акципетров, В.В. Леманов, Th. Rasing. *ЖЭТФ*, **121** (3), 644 (2002).

Редактор А.Н. Смирнов

The Study of the Crystalline State of Layers of MBE Heterostructures (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs by Second Harmonic Generation Method

S.A. Dvoretsky^{1,4}, M.F. Stupak², N.N. Mikhailov^{1,3}, S.N. Makarov², A.G. Yelesin², A.G. Verkhoglad²

¹ Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

² Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630058 Novosibirsk, Russia

³ Novosibirsk State University (NSU), 630090 Novosibirsk, Russia

⁴ Tomsk State University (TSU), 634050 Tomsk, Russia

Abstract The crystal perfection of HgCdTe layers of heterostructures grown on (013)GaAs substrates with ZnTe and CdTe buffer layers and orientation rotation in the plane (angle φ) and perpendicular to the growth direction (angle θ) were studied by the method of second harmonic generation. A change in the angle φ for CdTe layers was observed depending on the orientation of the GaAs substrate and its non-monotonic change throughout thickness in the MCT layer of constant composition and graded widegap layers at its boundaries. An increase in the angle θ was observed when growing the upper graded widegap MCT layer. The absolute value of the angle θ can be used for a qualitative assessment of the crystalline perfection of the HgCdTe layers.