

03,14

Аномальное поведение механических напряжений в полупроводниковых структурах класса сфалерита

© М.Ф. Ступак¹, С.А. Дворецкий², Н.Н. Михайлов², С.Н. Макаров¹, А.Г. Елесин¹

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН),
Новосибирск, Россия

² Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН),
Новосибирск, Россия

E-mail: dvor@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 5 марта 2026 г.

В окончательной редакции 15 мая 2026 г.

Принята к публикации 29 мая 2026 г.

Наблюдалось аномальное поведение механических напряжений в слоях HgCdTe и подложке (013)GaAs с кристаллической структурой класса сфалерита в составе гетероструктуры HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs(013) при изменении пространственной ориентации, которое определяет существенные изменения формы азимутальной зависимости генерации отраженной второй гармоники. Зондирование поверхностей HgCdTe и GaAs, находящихся в вертикальном и горизонтальном положениях, проводилось при вращении нормально падающего лазерного инфракрасного излучения с линейной поляризацией. Положение образца в пространстве изменялось последовательным поворотом по окружности с шагом 45° относительно первоначального положения базового среза (011). Проводится анализ возможных причин, приводящих к наблюдаемому эффекту кардинального изменения формы азимутальной зависимости генерации второй гармоники и, соответственно, аномальному распределению напряжений.

Ключевые слова: напряжения, вторая гармоника, азимутальная зависимость, HgCdTe, GaAs.

DOI: 10.61011/FTT.2026.06.63565.9217

1. Введение

Генерация второй гармоники (ГВГ) в нелинейных кристаллах используется в качестве эффективного метода диагностики. Так, в области материаловедения было показано, что величина и форма сигналов ГВГ обеспечивают контроль состояния кристаллической структуры нецентросимметричных кристаллов. Простой, быстрый и экспрессный метод ГВГ имеет преимущество перед другими традиционными диагностическими методами, такими, как электронные, рентгеновские и другими дифракционными методами.

Интенсивность поляризационных компонент ГВГ зависит от взаимной ориентации поляризации зондирующего излучения (ЗИ) относительно кристаллофизических осей. Параллельная или перпендикулярная составляющая поляризации ГВГ при меняющейся азимутально линейной поляризации падающего по нормали ЗИ позволяет получать количественную или качественную информацию о кристаллических свойствах полупроводников класса сфалерита, таких, как агрегатное состояние, класс симметрии, ориентация осей относительно поверхности, механические напряжения от слабых единиц до сильных — сотни-тысячи МПа и ряд других характеристик при сравнении экспериментальных и модельных данных в заданной локальной области [1–9].

В настоящее время для требований фото- и микроэлектроники при создании приборов на основе классических и квантовых свойств проводятся разработки различных гетеро- и наноструктур на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 и A^2B^6 . Такие соединения имеют нецентросимметричную кристаллическую решетку типа сфалерита, что позволяет характеризовать их кристаллические свойства с помощью ГВГ.

Объемные слои прямозонного полупроводника теллурида кадмия и ртути (КТ, HgCdTe) гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) на подложках CdZnTe, Si, GaAs обеспечили лидирующее место при создании инфракрасных (ИК) оптоэлектронных и тепловизионных устройств в широком спектральном диапазоне [10–12]. Возникающие деформации в ГЭС при эпитаксии материалов с большим рассогласованием параметров кристаллической решетки могут приводить к значительному снижению электро- и фотоэлектрических характеристик ИК приборов на основе ГЭС КРТ вследствие образования различных структурных и морфологических дефектов.

Основным методом для определения структурного совершенства слоев в ГЭС является метод рентгеновской дифракции, который, в основном, использовался для исследования состояния структурного совершенства и морфологических дефектов.

При получении ГЭС КРТ высокого приборного качества, применение метода ГВГ позволило выявить ряд

особенностей при выращивании ГЭС КРТ на подложках с большим рассогласованием параметров решетки. Нами проведен ряд исследований кристаллического совершенства составляющих слоев и подложек полупроводниковых ГЭС КРТ на подложках (013)GaAs/(Si) с буферными слоями ZnTe и CdTe класса симметрии сфалерита, выращиваемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [13] по измерениям азимутальной зависимости амплитуды отраженного сигнала ГВГ. В области фундаментального поглощения на длине волны второй гармоники ($\lambda_{sh} = 0.53 \mu m$) глубина проникновения ЗИ по нашим данным составляет для CdTe ~ 130 nm, для GaAs ~ 140 nm, для ZnTe ~ 210 nm. Эти цифры находятся в удовлетворительном соответствии со справочными и литературными данными [14–16]. Для HgCdTe глубина проникновения существенно зависит от состава верхнего слоя КРТ и составляет до ~ 200 nm для длины волны $1 \mu m$ с поглощением на длине волны второй гармоники ~ 30 nm, что хорошо согласуется с данными [15,16]. Таким образом, наблюдаемые сигналы определяются генерацией отраженной второй гармоники (ГОВГ).

При детальном измерении большого количества напряженных слоев HgCdTe, CdTe, HgTe, подложки (013)GaAs в образцах ГЭС КРТ МЛЭ и монокристаллических пластин GaAs с различной ориентацией поверхности было обнаружено аномальное поведение азимутальной зависимости сигнала ГОВГ и ее формы для случая различной вертикальной пространственной ориентации расположения кристаллографического направления слоев HgCdTe и подложки из GaAs структуры ГЭС КРТ МЛЭ при вращении вектора линейной поляризации зондирующего лазерного излучения. Такое поведение, как предположено нами, связано с сложным распределением напряжений в таких ГЭС после роста. Поэтому для выяснения причин и получения более детальной информации были проведены исследования азимутальной зависимости сигнала ГВГ на одном образце ГЭС КРТ на подложке (013)GaAs при различной пространственной ориентации поверхности и падающего ЗИ.

В работе представлены результаты измерений азимутальной зависимости сигнала ГОВГ от слоев HgCdTe и обратной стороны подложки из (013)GaAs в составе сложной структуры HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs при нормальном падении зондирующего инфракрасного излучения при вращении линейной поляризации ЗИ для вертикального расположения исследуемой поверхности при поворотах в интервале от 0 до 360° с шагом 45° относительно базового среза (011).

2. Методика эксперимента

Наблюдение напряжений в слое HgCdTe и подложке (013)GaAs осуществлялось по наличию на экспериментальных графиках ярко выраженной асимметрии узких минимумов угловой зависимости и изменению их уровней [17,18]. Механические напряжения при из-

менении атомных расстояний в различных направлениях не влияют на класс симметрии или ориентацию кристаллографических осей кристалла. В нашем случае для лазерного пятна диаметром $400 \mu m$ глубиной снятия информации 30–150 nm для исследуемых монокристаллов можно говорить о регистрации глобальной симметрии. Но при этом происходит существенное изменение поляризационных свойств распространяющегося в кристалле падающего лазерного ЗИ. Для идеального кубического кристалла падающая линейно поляризованная волна внутри кристалла сохраняет свою поляризацию, в то время как в реальном кристалле присутствующие напряжения приводят к эллиптической поляризации. Ориентация эллипса в пространстве определяется распределением механических напряжений в образце. Появление перпендикулярной компоненты поляризации в отраженном лазерном излучении приводит к ГОВГ перпендикулярной и параллельной ее компонент. Новая перпендикулярная компонента складывается с регистрируемой поляризацией ГОВГ, параллельной поляризации лазерного излучения. Это приводит к поднятию узких минимумов азимутальных зависимостей ГОВГ и перераспределению амплитуд максимумов. Следовательно, азимутальные зависимости ГОВГ являются чрезвычайно чувствительным инструментом регистрации напряжений, то есть сдвига атомов в узлах кристаллической решетки относительно идеального положения, с наличием „абсолютной“ нулевой точки отсчета в области широкого минимума, где собственные минимумы параллельной и перпендикулярной к поляризации лазера ГОВГ совпадают.

Измерения сигналов ГОВГ в указанной геометрии пространственной ориентации образца относительно земной поверхности проводились на стенде нелинейно-оптической диагностики [17]. Плоскость поляризации ЗИ при нормальном падении на поверхность образца вращается от 0 до 359° вращением пластинки $\lambda/2$. В качестве источника зондирующего излучения используется импульсно-периодический YAG:Nd-лазер с диодной накачкой DUEITO-OEM V3.4 с длиной волны $1.064 \mu m$, частотой повторения цуга из 10 импульсов 50 kHz при длительности одного импульса в цуге около 10 ps. Регистрируемая поляризация ГОВГ всегда параллельна поляризации лазерного излучения.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведены результаты измерения азимутальных зависимостей сигнала ГОВГ от слоя HgCdTe при различном пространственном положении образца КРТ191107 в вертикальной плоскости с поворотом относительно основного базового среза (011) от 0 до 359° с шагом 45° против часовой стрелки. Мощность ЗИ составляла 0.05 W.

При горизонтальном положении базового среза слоя HgCdTe (вставка к рис. 1, а) на экспериментальной ази-

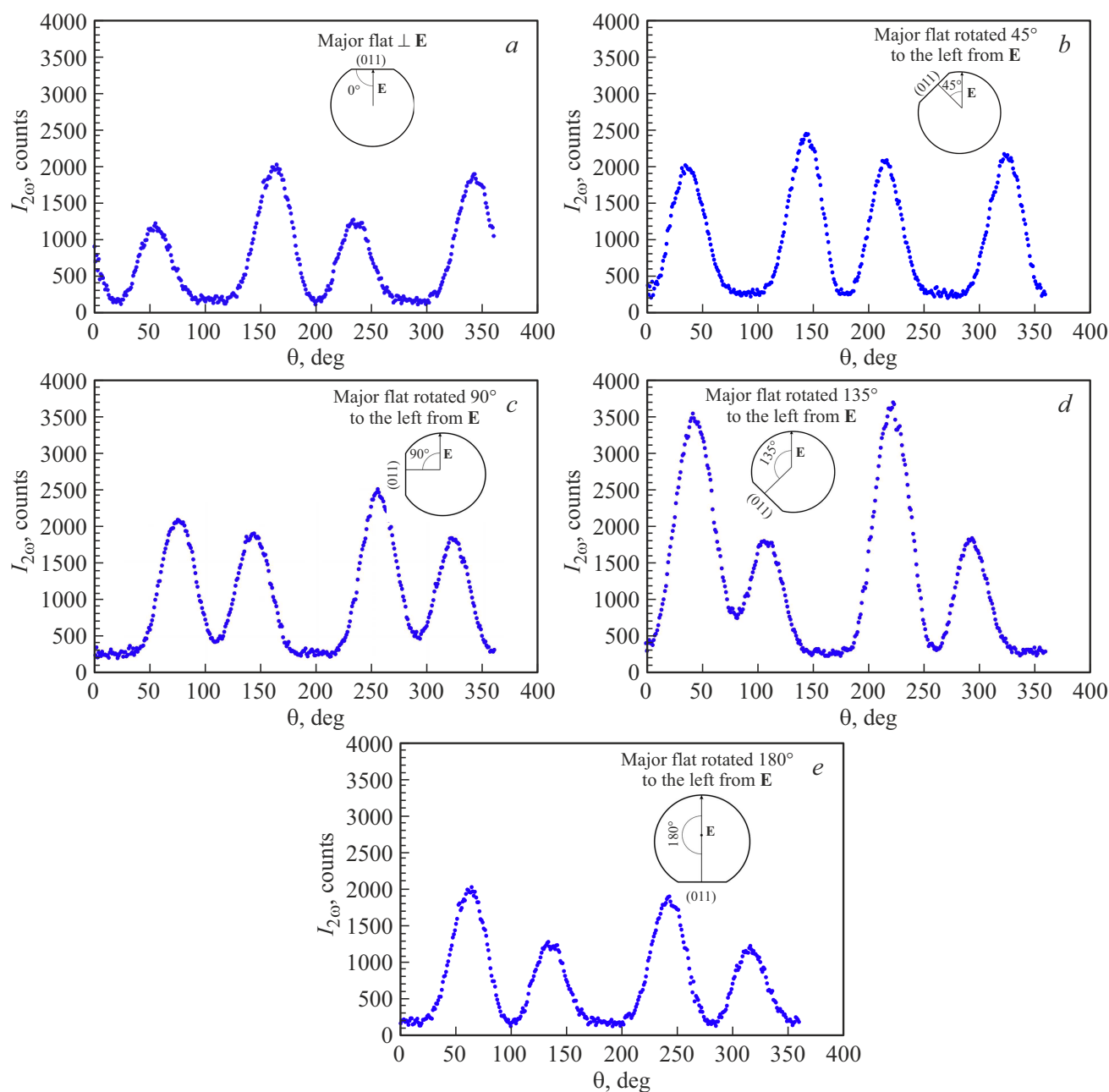


Рис. 1. Азимутальные зависимости сигнала ГОВГ при разных пространственных ориентациях слоя HgCdTe гетероструктуры КРТ191107 в вертикальной плоскости при вращении поляризации зондирующего лазерного ИК излучения: *a* — базовый срез (011) в верхней части образца параллельно горизонту (линии земной поверхности, 0°), *b* — поворот образца против часовой стрелки на 45° ; *c* — поворот образца против часовой стрелки на 90° ; *d* — поворот образца против часовой стрелки на 135° ; *e* — поворот образца против часовой стрелки на 180° . На вставках приведены схемы пространственной ориентации образца и начального направления вектора поляризации падающего по нормали зондирующего излучения.

мутальной зависимости сигнала ГОВГ (рис. 1, *a*) наблюдаются по 4 максимума и минимума. Величина сигналов ГОВГ в каждой из пары максимумов, расположенных на расстоянии $\sim 180^\circ$ имеет одинаковое значение ~ 1200 и ~ 2000 counts (отсчет идет от первого максимума). В узких и широких минимумах величина сигнала ГОВГ определяется шумами измерительного тракта величиной ~ 200 counts. Сравнение экспериментальной зависи-

сти с модельной для ориентации (013) кристалла типа сфалерита показывает, что ориентация поверхности слоя HgCdTe повернута на -3° от ориентации поверхности подложки (013)GaAs.

При повороте образца на 45° против часовой стрелки (вставка к рис. 1, *b*) экспериментальная азимутальная зависимость сигналов ГОВГ (рис. 1, *b*) изменяется в направлении выравнивания величины сигнала в макси-

умах величиной $\sim 2000\text{--}2400$ counts и слабого увеличения в минимумах до ~ 300 counts. Стоит отметить, что величина сигнала ГОВГ в максимумах практически совпадает с максимальными значениями амплитуды максимумов начального измерения (рис. 1, *a*).

Дальнейший поворот образца на 45° против часовой стрелки (вставка к рис. 1, *c*) приводит к перераспределению величины сигналов ГОВГ (рис. 1, *c*) в максимумах амплитудной зависимости до $\sim 2100\text{--}2500$ и $\sim 1800\text{--}1900$ counts в максимумах и ~ 300 counts в широких минимумах, но с увеличением (поднятием) узких минимумов до ~ 450 counts. Такая форма азимутальной зависимости свидетельствует о слабых напряжениях в исследуемом направлении положения поверхности образца.

Поворот на 135° против часовой стрелки (вставка к рис. 1, *d*) приводит к кардинальному изменению формы амплитудной зависимости сигнала ГОВГ, в которой наблюдается дальнейшее перераспределение величины амплитуды в максимумах до $3500\text{--}3700$ и 1800 counts и в узких минимумах до $\sim 750\text{--}800$ и ~ 350 counts с значением ~ 250 counts в широких максимумах.

Наконец, при дальнейшем повороте образца еще на 45° (вставка к рис. 1, *e*) амплитудная зависимость сигнала ГОВГ совпадает с формой сигналов первоначального положения образца (вставка на рис. 1, *a*), но со значениями пары максимумов, расположенных на расстоянии $\sim 180^\circ$, имеет одинаковое значение ~ 2000 и ~ 1200 counts (от первого максимума), соответственно.

Дальнейшие повороты образца с последующим изменением на 45° против часовой стрелки (225° , 270° и 315°) приводит к формам амплитудной зависимости сигнала ГОВГ последовательно повторяя данные на рис. 1, *b, c, d*, и рис. 1, *a*, но с фазовым сдвигом измеренных значений на 180° , возвращаясь к первоначальной форме. Таким образом, наблюдается диагональное соответствие формы амплитудной зависимости сигнала ГОВГ, т.е. напряжения или их отсутствие в слое HgCdTe связано с направлением кристаллографической ориентации поверхности (013) относительно базового среза пластины (110).

На рис. 2 приведены азимутальные зависимости амплитуды ГОВГ от обратной стороны подложки (013)GaAs гетероструктуры КРТ191107 при различном положении в вертикальной плоскости, которые по форме сигнала повторяют аналогичные зависимости, представленные на рис. 1.

Мощность ЗИ составляла 0.08 W. Увеличение мощности при измерениях ГОВГ от (013)GaAs по сравнению с ГОВГ от HgCdTe потребовалось вследствие отличия значений нелинейной восприимчивости, которая меньше для GaAs [17]. Наблюдалось изменение формы и величины сигналов ГОВГ при изменении начального положения базового среза (011) с шагом 45° против часовой стрелки относительно вектора поляризации падающего зондирующего излучения

При горизонтальном положении базового среза подложки из GaAs (вставка к рис. 2, *a*) на экспериментальной азимутальной зависимости сигнала ГОВГ наблюдаются по 4 максимума и минимума. Величина сигнала ГВГ в каждой из пары максимумов расположенных на расстоянии 180° имеет практически близкие значения ~ 2100 и ~ 1700 counts (от первого максимума, соответственно). Такая форма азимутальной зависимости показывает, что ориентация подложки из GaAs близка к ориентации (013). Небольшое различие значений сигналов ГОВГ в максимумах связано с изменением плоскостности подложки при подготовке к эпитаксии с помощью химического травления. В узких и широких минимумах величина сигнала ГВГ определяется шумами измерительного тракта величиной ~ 200 counts.

При повороте образца на 45° против часовой стрелки (вставка к рис. 2, *b*) экспериментальная азимутальная зависимость сигнала ГОВГ при вращении поляризации изменяется в направлении изменения величины сигнала ГОВГ в максимумах, составляющих 1200 и 2100 counts и в широком и первом узком минимуме ~ 200 counts с подъемом второго минимума до величины ~ 300 единиц, что свидетельствует о появлении очень слабых напряжений.

Дальнейший поворот образца на 45° против часовой стрелки (вставка к рис. 2, *c*) приводит к выравниванию сигналов ГОВГ в максимумах с уменьшением до 1300 и 600 counts и значениями в обоих узких минимумах ~ 300 counts.

Наконец, поворот на 135° против часовой стрелки (вставка к рис. 2, *d*) приводит к кардинальному изменению амплитудной зависимости сигнала ГВГ, в которой наблюдается дальнейшее перераспределение величины амплитуды в максимумах до 2500 counts и увеличение в первом узком минимуме до 500 counts, оставаясь в остальных минимумах ~ 200 counts.

Дальнейшие повороты образца с последующим изменением на 45° в против часовой стрелки (225° , 270° и 315°) приводят к формам амплитудной зависимости сигнала ГОВГ как и случае слоя HgCdTe последовательно повторяя данные на рис. 2, *b, c, d*, и рис. 2, *a*, но с фазовым сдвигом измеренных значений на 180° , возвращаясь к первоначальной форме. Также для (013)GaAs наблюдается диагональное соответствие формы амплитудной зависимости сигнала ГОВГ, т.е. напряжения или их отсутствие в подложке связаны с направлением кристаллографической ориентации поверхности (013) относительно базового среза пластины (011).

Следует отметить, что форма амплитудной зависимости ГОВГ зависит только от пространственного положения исследуемого образца и не зависит от начального направления поляризации падающего ЗИ, что было подтверждено экспериментально. Приведенные аномалии азимутальной зависимости сигнала ГОВГ от пространственной ориентации в вертикальном положении гетероструктуры КРТ191107 ($\text{HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs}(013)$) для слоев HgCdTe и подложки GaAs(013) проявляются

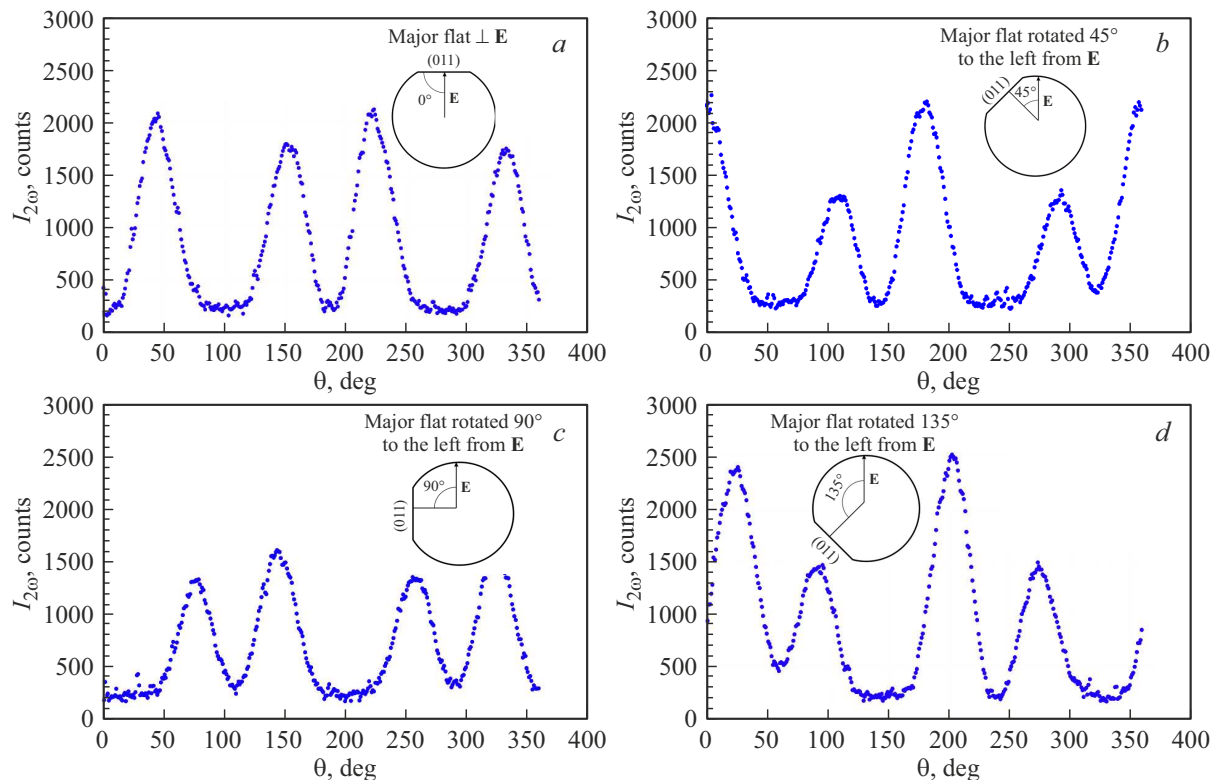


Рис. 2. Азимутальные зависимости сигнала ГОВГ при разных пространственных ориентациях подложки из (013)GaAs гетероструктуры КРТ191107 в вертикальной плоскости при вращении поляризации зондирующего лазерного ИК излучения: *a* — базовый срез (011) в верхней части образца параллельно горизонту (линии земной поверхности, 0°), *b* — поворот образца против часовой стрелки на 45°; *c* — поворот образца против часовой стрелки на 90°; *d* — поворот образца против часовой стрелки на 135°. На вставках приведены схемы пространственной ориентации образца и начального направления вектора поляризации падающего по нормали зондирующего излучения.

и при горизонтальном расположении гетероструктуры (HgCdTe и подложки GaAs(013) с отклонением от плоскости горизонта $\sim 8^\circ$ при нормальном падении ЗИ с вращаемой линейной поляризацией.

Тщательный анализ возможных инструментальных причин не выявил их влияния на аномальное изменение формы азимутальной зависимости сигнала ГОВГ. Также было установлено, что внешние электрические, магнитные и электромагнитные поля не являются причиной приведенных в статье аномальных результатов. Было также проверено влияние начального положения поляризации лазерного излучения при неподвижном образце. Форма азимутальных зависимостей ВГ оставалась неизменной, сдвигаясь по фазе в соответствии с начальным положением вектора E лазерного ЗИ.

Для более глубокого анализа того факта, что именно напряженной кристаллической решетке типа сфалерита присуще аномальное поведение азимутальной зависимости ГОВГ, было проведено для одного из образцов подробное исследование азимутальной зависимости сигнала ГОВГ от монокристаллической кварцевой пластины с тригональным типом структуры, в которой оптическая ось лежит в плоскости среза, при ее различных пространственных ориентациях. На рис. 3 приведена

азимутальная зависимость сигнала ГОВГ пространственного положения кварцевой пластины и поляризации ЗИ аналогичным на вставках к рис. 1, *a* и рис. 2, *a*.

Как видно из рис. 3, азимутальная зависимость ГОВГ имеет 2 максимума и 2 минимума, величиной ~ 2700 и 200 counts. Никаких особенностей формы сигнала ГОВГ не выявлено, в том числе и при поворотах образца

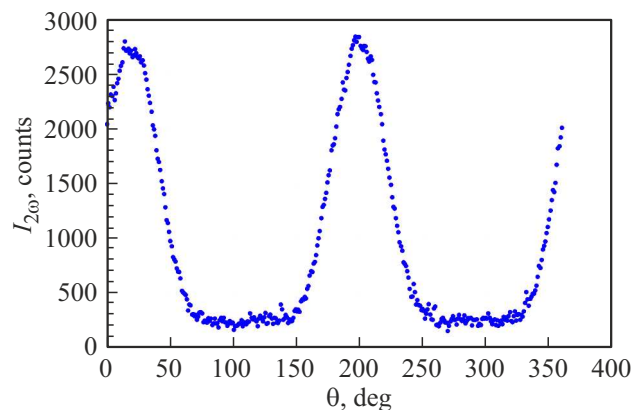


Рис. 3. Азимутальная зависимость сигнала ГОВГ от кварцевой пластины при пространственном вертикальном положении.

на фиксированные углы. Найдено, что азимутальная зависимость сигнала ГОВГ не меняет форму и величину в максимумах, изменяется лишь начальная фаза азимутальной зависимости из-за поворота. Данный результат свидетельствует о том, что инструментальные факторы не являются причиной обнаруженной аномалии в слое HgCdTe и подложке GaAs.

4. Обсуждение результатов

На основе рассмотрения кристаллов цинковой обманки GaAs было показано, что для описания ГОВГ достаточно рассматривать только объемные дипольные источники с гиперполяризуемостью $\alpha\text{GaAs} = (\alpha\text{Ga} - \alpha\text{As})$ [19]. Проведенные эксперименты по измерениям угловой зависимости сигналов ГОВГ с различной поляризацией ЗИ от пластины GaAs с сингулярной поверхностью показали присутствие четырех максимумов и минимумов при изменениях угла от 0° до 360° . По заключениям авторов разработанная модель хорошо описывает эксперимент без привлечения влияния ориентации и остаточных напряжений, несмотря на наблюдаемое различие величины сигналов ГОВГ, что, возможно, связано с отклонением пластины от сингулярной ориентации или остаточными напряжениями. Следует отметить, что измерение угловой зависимости ГОВГ проводилось при фиксированном положении без изменения пространственной ориентации.

В нашем случае, несмотря на прохождение ЗИ с длиной волны $1.06\text{ }\mu\text{m}$ через подложку (013)GaAs толщиной $400\text{ }\mu\text{m}$ глубина ГОВГ с длиной волны $0.53\text{ }\mu\text{m}$ составит $\sim 150\text{ nm}$. Для таких же условий генерация второй гармоники с длиной волны $0.53\text{ }\mu\text{m}$ слоя HgCdTe составит $\sim 30\text{ nm}$. Таким образом генерация второй гармоники возникает в объемном приповерхностном слое и является отраженной. Наши азимутальные зависимости по форме и величине сигналов совпадают с данными [19] для GaAs, моделирование и сравнение с экспериментом в которой приводилось для сингулярной поверхности (001). Аналитические выражения для ГОВГ чрезвычайно громоздки и мало наглядны. Развернутое решение электродинамической задачи ГОВГ для кристаллов класса сфалерита $\bar{4}3m$ можно найти, например в [1,2,19]. Нами, для сравнения экспериментальных результатов с расчетными, использовалось численное моделирование с помощью оригинального программного обеспечения.

Для идеального кристалла класса сфалерита $\bar{4}3m$ наблюдается зависимость интенсивности сигнала поляризации ГОВГ для точной ориентации (013) при угле $\varphi = 90^\circ$ с одинаковыми амплитудами всех максимумов [9]. Вариации по углу φ приводят к перераспределению сигнала ГОВГ в максимумах без изменения формы. В случае появления напряжений форма сигнала ГОВГ при экспериментальных измерениях отличается от идеальной, что позволяет по отличиям оценить их качественно и количественно по соотношению величины

сигнала ГОВГ в приподнятом минимуме к максимуму. Экспериментальные зависимости формы и величины сигналов значительно изменяются при изменении пространственной ориентации слоев HgCdTe и подложки GaAs. Несомненно, в первую очередь, такие изменения связаны с напряжениями, которые имеют сложный характер распределения. Для кристаллов со структурой сфалерита наблюдается выделенные направления (типа 110 и $\bar{1}10$) для скольжения дислокаций при релаксации напряжений в плоскости (111 и $\bar{1}\bar{1}1$) и разворота плоскости эпитаксиального слоя относительно подложки по этой же причине [20–22]. Таким образом, в объемных пластинах и слоях гетероструктур типа сфалерита возникает сложное распределение остаточных напряжений для слоев HgCdTe и подложки из GaAs в составе гетероструктуры. Для направления пространственной ориентации плоскости среза (110) на -135° относительно горизонта по соотношениям величин сигналов ГОВГ в поднятом минимуме к максимуму, составляющим 0.16 и 0.13 в слое HgCdTe и подложке GaAs, следуя [23], были оценены величины напряжений. Полученные значения свидетельствуют о более высоких остаточных напряжениях в слое HgCdTe. Количественные значения остаточных напряжений для слоев HgTe, упругие постоянные которых близки по своим величинам к HgCdTe, составили менее 18 МПа при соотношении сигналов ГОВГ в поднятом минимуме к максимуму менее 0.15 [23]. Напряжения в твердом теле, как и кристаллическая структура, должны быть независимы от пространственной ориентации, что показано нами при исследованиях монокристалла кварца (см. рис. 3). Следовательно, должны быть причины появления анизотропии формы и величины сигнала ГОВГ в кристаллах типа сфалерита при изменении пространственной ориентации образца. Пока трудно однозначно ответить и найти объяснение этому явлению.

Мы полагаем, что причиной наблюдаемого аномального поведения сигналов ГОВГ при различном пространственном положении исследуемых кристаллов типа сфалерита на примере монокристаллических слоев HgCdTe и подложки в составе гетероструктуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs должно быть воздействие силового поля на положение атомов в узлах кристаллической решетки. Различное положение атомов при изменении пространственного расположения кристаллической решетки может дать дополнительный вклад в сигналы ГОВГ, которые определены существующими остаточными напряжениями, связанными с различием параметров решетки сопрягаемых материалов в случае эпитаксии или в подготовленных к эпитаксии пластинах. Аномальное поведение сигналов ГОВГ, как упоминалось ранее наблюдалось при многочисленных измерениях слоев HgCdTe и подложек GaAs в гетероструктуре, как и в монокристаллических слоях CdTe в составе гетероструктуры и пластинах GaAs с различной ориентацией поверхности. Это свидетельствует об одинаковой природе наблюдаемого эффекта.

Так показано в [24], что при воздействии ТГц излучения на кристаллическую решетку HgTe типа сфалерита с ГОВГ в ИК диапазоне изменение положения атомов может привести к искажению решетки при воздействии силового поля ГОВГ, что приведет к переходу из тривиального состояния в состояние с Вейлевскими точками (Вейлевским полуметаллом). Такой переход связан с изменением зонной структуры при искажении кристаллической решетки, но не ее типа. Было показано, что при изменении мощности ТГц излучения можно управлять величиной искажения кристаллической решетки. Такая тенденция наблюдается в HgSe и β -HgS с кристаллической структурой типа сфалерита при воздействии ГОВГ.

В нашем случае можно рассматривать воздействие падающего ИК ЗИ или ГОВГ с объемными дипольными источниками, образованными связями между атомами в структурах сфалерита, которые меняют свое пространственное направление при поворотах исследуемого объекта, в нашем случае слоя HgCdTe и подложки GaAs, состоящих из атомов различной природы. В нашем случае при пиковой интенсивности ЗИ порядка 10^6 – 10^7 W/cm² этот эффект может при определенных условиях проявляться. Однако, мы полагаем, что в нашем эксперименте за счет одинаковой циркуляции возбуждающего излучения и второй гармоники данный эффект, если он проявляется, должен быть одинаковым при любой пространственной ориентации исследуемого образца.

Тем не менее, в настоящее время окончательно неясна причина, приводящая к аномальному поведению ГОВГ в кристаллах типа сфалерита при его различном пространственном положении при измерениях. Мы полагаем, что дальнейшие исследования приведут к выяснению природы наблюдаемого эффекта аномального поведения сигнала ГОВГ в кристаллах типа сфалерита при изменении пространственного положения кристаллической решетки.

5. Заключение

Проведены детальные измерения азимутальной зависимости формы и величины амплитуды сигналов генерации отраженной второй гармоники от слоев HgCdTe и подложки GaAs структуры HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs(013), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Наблюдения нелинейных откликов в этих полупроводниках с кристаллической решеткой типа сфалерита показали их аномальное поведение, которое зависит от пространственной ориентации при вертикальном положении образцов. Такое поведение экспериментальных результатов определяется сложным пространственным распределением остаточных напряжений. Существуют дополнительные причины появления аномалий, природа которых пока неясна. Проведенные исследования показали, что для выявления напряжений в полупроводниковых структурах класса

сфалерита по измерениям азимутальной зависимости амплитуды сигнала ГОВГ, которые зависят от кристаллографического направления, необходим правильный выбор пространственной угловой ориентации структур относительно вертикали к горизонту.

Финансирование работы

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ИФП СО РАН и КТИ НП СО РАН в рамках Гос. заданий Минобрнауки РФ № FWGW-2025-0008 и № 1023031400007-9-1.3.6-1.3.6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] С.А. Ахманов, В.И. Емельянов, Н.И. Коротеев, В.В. Семионов. УФН **147**, 675 (1985).
- [2] T.F. Heinz. In: Nonlinear Surface Electromagnetic Phenomena / Eds. H. Ponath, G. Stegeman, North Holland Pub., Amsterdam, The Netherlands. (1991). С. 353.
- [3] Т. Kimura, Ch. Yamada. J. Cryst. Growth **150**, 92 (1995).
- [4] К.А. Брехов, К.А. Гришунин, Д.В. Афанасьев, С.В. Семин, Н.Э. Шерстюк, Е.Д. Мишина, А.В. Кимель. ФТТ **60**, 33 (2018).
- [5] В.В. Баланиук, В.Ф. Краснов, С.Л. Мушер, В.И. Проць, В.Э. Рябченко, С.А. Стоянов, С.Г. Струц, М.Ф. Ступак, В.С. Сыскин. Квантовая электроника **22**, 196 (1995).
- [6] Г.М. Борисов, В.Г. Гольдорт, К.С. Журавлев, А.А. Ковалев, С.А. Кочубей, Д.В. Ледовских, Т.В. Малин, Н.Н. Рубцова. Сиб. физ. журн. **13**, 64 (2018).
- [7] С.Б. Бодров, А.И. Корытин, Ю.А. Сергеев, А.Н. Степанов. Квантовая электроника **50**, 496 (2020).
- [8] Е.В. Пермикина, А.С. Кашуба. Успехи прикл. физ. **4**, 493 (2016).
- [9] 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**, 214 (2020).
- [10] A. Rogalski. Rep. Prog. Phys. **68**, 2267 (2005).
- [11] W. Lei, J. Antoszewski, L. Faraone. Appl. Phys. Rev, **2**, 041303 (2015).
- [12] Н.А. Кульчицкий, А.В. Наумов, В.В. Старцев. Фотоника **14**, 3, 234 (2020).
- [13] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, В.С. Варавин, А.П. Анциферов. Оптический журнал **67**, 39 (2000).
- [14] В.И. Гавриленко, А.М. Грехов, Д.В. Корбутяк, В.Г. Литовченко. Оптические свойства полупроводников. Справочник. Наукова думка, Киев. (1987). 606 с.
- [15] Handbook of Optical Constants of Solids / Ed. by E.D. Palik. Elsevier Science, USA (1998). 1096 p.
- [16] S. Adachi. Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors. Springer Science+ Business Media, N.Y. (1999). 714 p.

- [17] М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, С.Н. Макаров, А.Г. Елесин, А.Г. Верхогляд. *ЖТФ* **91**, 1799 (2021).
- [18] М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, М.В. Якушев. *Автометрия* **55**, 5, 31 (2019)
- [19] H. Hardhuenata, A. Lejo-Molina, C. Reitböck, A. Prylepa, D. Stifter, K. Hingerl. *J. Opt. Soc. Am. B* **33**, 195 (2016).
- [20] Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, В.С. Варавин, А.В. Колесников, Е.М. Труханов, И.В. Сабина, И.Д. Лошкарев. *ФТТ* **57**, 2095 (2015).
- [21] Haruo Nagai. *J. Appl. Phys.* **45**, 3789 (1974).
- [22] M.A. Berding, W.D. Nix, D.R. Rhiger, S. Sen, A. Sheri. *J. Electron. Mater.* **29**, 676 (2000).
- [23] M.F. Stupak, S.A. Dvoretzky, N.N. Mikhailov, S.N. Makarov, A.G. Elesin. *J. Appl. Phys.* **138**, 195102 (2025).
- [24] D. Shin, A. Rubio, P. Tang. *Phys.Rev. Lett.* **132**, 016603 (2024).

Редактор Ю.Э. Китаев