03,07,13

Регистрация с помощью второй гармоники изменений слабых напряжений в слоях HgCdTe при воздействии локального нагрева

© М.Ф. Ступак[1], С.А. Дворецкий[2], Н.Н. Михайлов[2], С.А. Макаров[1], А.Г. Елесин[1]

[1] Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Новосибирск, Россия
[2] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: dvor@isp.nsc.ru

Поступила в Редакцию 6 марта 2025 г.
В окончательной редакции 6 марта 2025 г.
Принята к публикации 5 мая 2025 г.

Проведено исследование теплового воздействия слабым лазерным инфракрасным излучением в локальной точке слоя HgCdTe сложной гетероструктуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs с одновременным измерением сигнала второй гармоники нуль методом на „отражение“. Мощность воздействия составляла 0.8 mW в лазерном пучке диаметром $\sim 400\,\mu$m со временем облучения в течение 15 минут. Наблюдалось расщепление сигнала второй гармоники в максимумах с появлением дополнительных двух пиков. С увеличением времени воздействия до 15 минут величина сигнала второй гармоники в первоначальном максимуме уменьшилась до величины шумов системы измерений, с одновременным увеличением высоты дополнительных пиков от 3000 до 6000 единиц счета. После окончания лазерного воздействия форма сигнала второй гармоники восстанавливается до начального вида с уменьшением их величины до 1700–2200 единиц счета. Температура в точке воздействия измерялось с помощью тепловизора и составила в начале измерений 24.0 °C и в конце воздействия 24.6 °C.

Ключевые слова: напряжения, HgCdTe, вторая гармоника, лазер, нуль метод

DOI: 10.61011/FTT.2025.07.61184.2HH-25

1. Введение

Взаимодействие лазерного излучения с твердыми телами, такими, как металлы, полупроводники и изоляторы, приводит при его поглощении к разнообразным тепловым процессам, таким, как нагрев, плавление и испарение, вследствие сложных процессов электрон-фононного взаимодействия [1,2]. Тепловое воздействие лазерного излучения различной мощности с короткими импульсами на приповерхностные слои полупроводников приводит к различным фазовым переходам: плавление — отвердевание, аморфное состояние — кристалл и кристалл — аморфное состояние в течение времени фемто — или пикосекунд [3–6]. Для диагностики процессов фазовых переходов твердотельного полупроводника может быть получена информация из анализа их нелинейного отклика по измерениям сигналов оптических гармоник и комбинационных частот [7]. Как было показано, нелинейно-оптические методы являются чрезвычайно информативными, быстродействующими, обладают высоким пространственным разрешением. Так, исследования сигнала генерации второй гармоники (ГВГ) при отражении от поверхности нецентросимметричного кристалла GaAs (класс $\bar{4}3m$) и центросимметричного кристалла Si позволил провести исследования динамики при импульсном лазерном отжиге (ИЛО) [8–10]. Нами проведен ряд исследований состояния кристаллической решетки приповерхностных слоев и подложки в составе многослойной гетероструктуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs методом генерации второй гармоники с помощью измерения амплитуды сигнала азимутальной зависимости и/или нуль метода на основе фазового синхронизма [11,12]. Гетероструктуры выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [13]. Слабая мощность зондирующего излучения позволила получить информацию о состоянии деформации кристаллической решетки, поворота плоскости ориентации (013) в плоскости роста и перпендикулярно плоскости роста и выявить нарушения кристаллической структуры в виде разориентированных микровключений при исследовании слоев HgCdTe, CdTe и подложки GaAs [14–17].

При относительно большой мощности зондирующего излучения 0.3 W наблюдались изменения кристаллического состояния приповерхностного слоя HgCdTe [11]. При воздействии в течение 60 секунд происходило уменьшение величины сигнала ГВГ в максимуме с дальнейшим увеличением шумов после 194 секунд наблюдений. Это было связано с локальным нагревом приповерхностного слоя, при котором его кристаллическое совершенство ухудшилось и не восстановилось до начального состояния. Нагрев слоя HgCdTe лазерным пучком такой мощности привел к возникновению напряжений, в результате которых произошло образование разориентированных микроучастков [11], определяющих диффузную составляющую в сигнале ГВГ. Было

показано, что величины напряжений можно получить из измерений сигнала с помощью нуль метода „на отражение“ [12]. Следовательно, этот метод позволит провести детальные измерения напряжений и оценить их величину с одновременным нагревом локальной области кристалла и измерения сигнала ГВГ при воздействии зондирующим лазерным пучком слабой мощности.

В настоящей работе представлены результаты измерения сигнала ГВГ для определения напряжений и их изменений в локальной области слоя HgCdTe в составе сложной структуры, выращенного методом МЛЭ, с помощью нуль метода в процессе нагрева поверхности HgCdTe при воздействии слабого лазерного инфракрасного излучения. Изложенные в статье результаты и результаты [11] позволяют говорить о возможности использования лазерной подсветки в процессе МЛЭ КРТ для корректировки уровня напряжений.

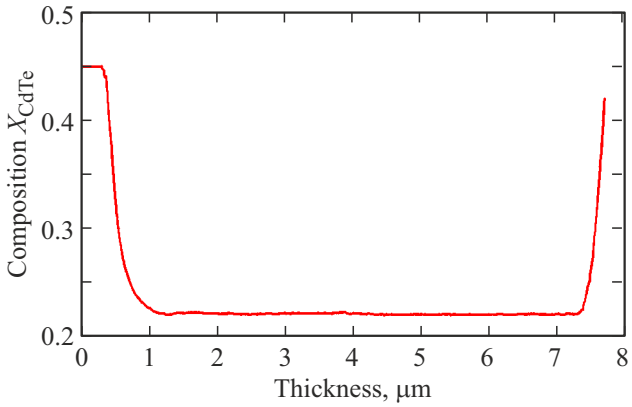

Рис. 1. Распределение состава X_{CdTe} в слое гетероструктуры 1MCT191107. Поверхность слоя CdTe в гетероструктуре, находящегося слева, определяет нулевую координату горизонтальной оси.

2. Методика эксперимента

Исследования теплового воздействия лазерного зондирующего излучения на кристаллическую структуру проводились нуль методом ГВГ в приповерхностном слое HgCdTe на образце гетероструктуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs, выращенной методом МЛЭ с контролем состава и толщины слоев с помощью высокочувствительной одноволновой эллипсометрии *in situ* [18]. Толщины слоев ZnTe и CdTe составляли ~ 30 nm и $\sim 5.5\,\mu$m, соответственно. На рис. 1 приведен профиль состава в исследуемом слое HgCdTe гетероструктуры 1MCT191107. Слой HgCdTe с однородным составом $X_{CdTe} \sim 0.23$ толщиной $6.4\,\mu$m включал широкозонные обкладки с изменением состава от $X_{CdTe} \sim 0.45$ до $X_{CdTe} \sim 0.23$ толщиной $\sim 1\,\mu$m на гетерогранице с буферным слоем CdTe и с изменением состава от $X_{CdTe} \sim 0.23$ до $X_{CdTe} \sim 0.42$ с толщиной $\sim 0.3\,\mu$m на поверхности.

Измерение состояния кристаллической структуры приповерхностного слоя HgCdTe проводилось в окружающей атмосфере, находящейся при комнатной температуре, с помощью нуль метода „на отражение“ по измерениям сигнала ГВГ на основе фазового синхронизма на высокочувствительном лабораторном стенде нелинейно оптической диагностики [11,12]. В качестве излучателя используется импульсно-периодический YAG:Nd-лазер с диодной накачкой DUETTO-OEM V3.4 с длиной волны $1.064\,\mu$m, частотой повторения цуга 50 kHz из ~ 10 импульсов при длительности одного импульса в цуге ~ 10 ps. Мощность зондирующего излучения составила 0.8 mW. Диаметр зондирующего лазерного луча в исследуемой области поверхности (центр вращения образца) $\sim 400\,\mu$m. Временной диапазон развертки измерения сигналов ГВГ составил 51 s, что определялось характеристиками ПО, которое не было синхронизовано с пуском шагового двигателя, вращающего образец. Начало вращения образца и скорость вращения задавались вручную с помощью отдельного контроллера, поэтому положение первого пика ГВГ на развертках имеет различное положение на графиках. Слои HgCdTe непрозрачны для возбуждающего излучения на $\lambda = 1.064\,\mu$m. По нашим данным и литературным источникам [19] глубина поглощения излучения лазера в HgCdTe не превышает $0.2\,\mu$m, в которой происходит преобразование поглощенной мощности в тепло. Для измерения температуры в зоне лазерного луча на поверхности под углом 45° был установлен тепловизор марки UTi260B с пространственным разрешением 256×192 пикселя с размером пикселя $12 \times 12\,\mu$m и разрешением по температуре 0.1 °C.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведено изменение величины и формы сигнала ГВГ и температуры в зоне падения зондирующего излучения от времени его воздействия. На начальной стадии измерений наблюдаются узкие пики сигналов ГВГ (рис. 2, *a* вверху). Угол между максимумами 1 и 2 составляет ~ 180 градусов при повороте образца, который за время измерений осуществляет ~ 2 оборотов. В процессе измерений наблюдается практически постоянство сигнала ГВГ $\sim 3000-3500$ единиц счета. Такие значения сигнала ГВГ превышают ранее измеренные величины сигналов ГВГ от поверхности слоя HgCdTe в структуре с близким распределением состава по толщине [12,17]. Повышенные значения сигналов ГВГ в максимуме можно связать с уменьшением толщины исследуемого образца и широкозонного варизонного слоя на поверхности, что связано с повышением напряжений. Ранее было показано, что наблюдаемая форма, положение и угловое расстояние в сигналах ГВГ определяется напряжениями в слоях HgCdTe. Температура в локальной области измерений, совпадающей с осью вращения, показанная крестом (визир тепловизора) на

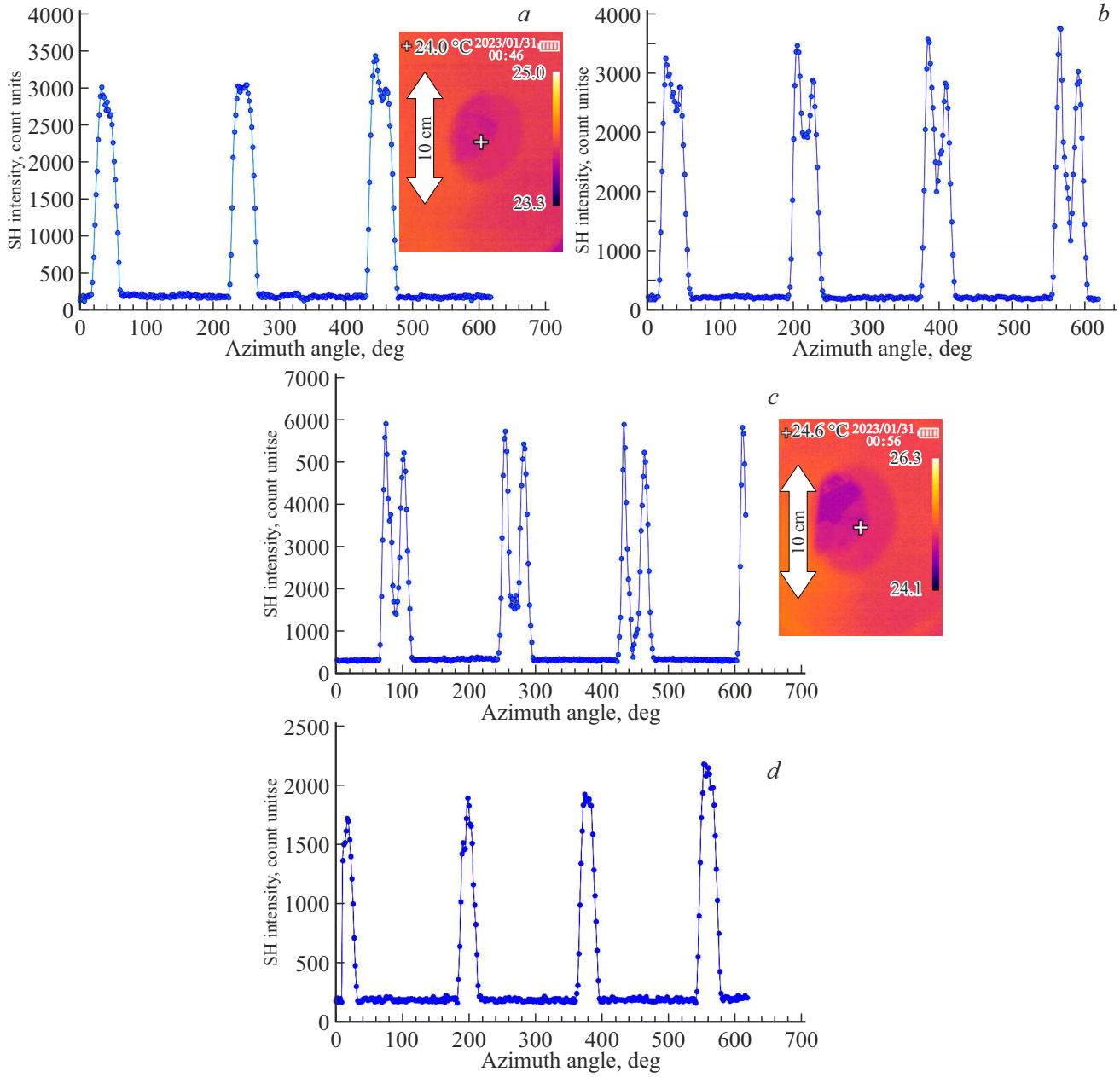

Рис. 2. Графики развёртки экспериментальных значений сигнала ГВГ от поверхности HgCdTe гетероструктуры 1MCT191107 и термограммы с тепловизора при непрерывном лазерном воздействии мощностью 0.8 mW и при выключении лазера: *a* — 0 минут (начало измерений). Вверху — график развертки сигнала ГВГ, внизу — термограмма с тепловизора (в левом верхнем углу термограммы значение температуры в визирной точке), линейный размер участка термообъекта, равный 10 cm, показан белой стрелкой, *b* — через 5 минут график развертки сигнала ГВГ, *c* — через 15 минут. Вверху — график развертки сигнала ГВГ, внизу — термограмма с тепловизора (в левом верхнем углу термограммы значение температуры в визирной точке), линейный размер участка термообъекта, равный 10 cm, показан белой стрелкой, *d* — после 15 минут с выключенным лазером график развертки сигнала ГВГ.

термограмме (рис. 2, *a* внизу), составляла 24 °C. На термограммах таже показан белой стрелкой линейный размер участка измеряемой структуры, равный 10 cm. После облучения лазерным лучом локальной области в течение 5 минут были проведены измерения сигналов ГВГ (рис. 2, *b*). Наблюдается резкое уменьшение сигнала ГВГ от 3500 единиц счета до 1100 единиц счета в максимуме при начальных измерениях, которые становятся минимумами с появлением двух новых максимумов, величина которых увеличивается от 4250 до 4750 единиц счета (слева от минимума) и 3700 до 4000 единиц счета (справа от минимума).

Угол между максимумами 1 и 2, 3 и 4 также составляет $\sim$ 180 градусов при повороте образца. Такое пове-

дение сигналов ГВГ может быть связано с изменением пространственного распределения напряжений и повышением их величины. Следует отметить, тепловое воздействие лазерного пучка в процессе измерений происходит за короткий промежуток времени в локальной области $\sim 400\,\mu$m. После 15 минутного облучения наблюдается дальнейшее изменение сигналов ГВГ (рис. 2, *c* сверху). Так, сигналы ГВГ во вновь появившихся максимумах увеличиваются до ~ 6000 единиц счета (слева от минимума) и ~ 5200 единиц счета (справа от минимума) с понижением минимума между ними от ~ 1500 единиц счета до уровня шума ~ 400 единиц счета. Следует отметить, что величина сигнала ГВГ в максимумах остается постоянной в процессе измерений. Величина сигнала ГВГ в минимуме показывает, что имеющиеся напряжения в их направлении первоначальной ориентации (011) близки к нулю или полностью отсутствуют. Температура в точке измерения в этот момент составила 24.6 °C (рис. 2, *c* снизу). После 15-и минутной выдержки образца без воздействия на приповерхностную область HgCdTe лазерным пучком угловая зависимость сигналов ГВГ возвращается к прежней форме, но с уменьшением величины максимумов почти в два раза (рис. 2, *d*). В процессе измерений наблюдается изменение величины сигнала ГВГ в максимуме, слегка увеличиваясь от 1700 единиц счета до 2200 единиц счета, но с появлением в 4-ом максимуме едва заметного его расщепления и уменьшения величины. Такое поведение можно связать с остаточной повышенной температурой в точке измерения по сравнению с температурой окружающей среды, т. е. за 15 минут не происходит полного охлаждения в измеряемой точке на поверхности HgCdTe.

Как следует из приведенных данных, при проведении измерений одновременно происходит слабый нагрев в области облучения материала зондирующим лазерным лучом с мощностью, как указано ранее, 0.8 mW. Это утверждение следует из рассмотрений сигналов ГВГ (рис. 2, *b* вверху) при изменении величины пиков в максимумах с их увеличением и уменьшением в минимуме в процессе измерений. Такое поведение свидетельствует об уменьшении напряжений и повышении структурного качества в облучаемой точке. Непрерывно действующее слабое зондирующее излучение создает локальные градиенты температуры, что приводит к изменению положений атомов в кристаллической решетке, и, соответственно, к радикальному изменению формы и величины сигнала ГВГ. Наблюдаемое изменение формы сигнала ГВГ свидетельствует о снятии напряжения в данной локальной точке при обработке воздействующим излучением и указывает на азимутальное перераспределение напряжений. Уменьшение напряжений в области первоначального максимума можно связать с процессами при лазерном отжиге с пучком слабой мощности, который может привести к улучшению структурного совершенства обрабатываемой области кристалла. Такая процедура может уменьшить возникающие в процессе роста гетероэпитаксиальной структуры напряжения.

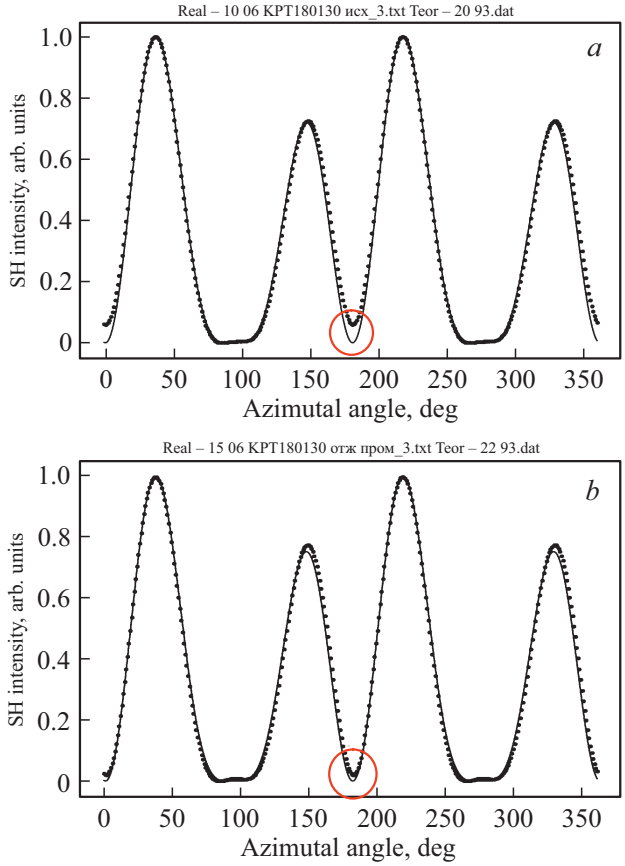

Рис. 3. Азимутальная зависимость амплитуды ГВГ в слоях HgCdTe гетероструктуры 1KPT189130: *a* — после роста, *b* — после термического отжига при 200 °C в течение 24 часов.

Действительно, при одновременном процессе роста гетероструктуры со слоями HgCdTe микронной толщины для инфракрасных (ИК) фотоприемников (ФП) с воздействием лазерным облучением растущей поверхности следует ожидать повышение качества кристаллической структуры по всей толщине слоев с уменьшением или полным отсутствием напряжений. После выращивания гетеро структуры методом МЛЭ плотность дислокаций в слоях HgCdTe на подложках из GaAs и Si лежит в диапазоне от $10^6\,\mathrm{cm}^{-2}$ до более чем $10^7\,\mathrm{cm}^{-2}$, соответственно [20]. Жесткое термоциклирование в диапазоне температур 250–400 °C [21] или 300–500 °C [20] позволяет повысить структурное совершенство материала за счет снижения плотности дислокаций практически на порядок величины. Однако, такая процедура приводит к сильному диффузионному размытию широкозонных варизонных слоев, предназначенных для пассивации фоточувствительного слоя на гетерограницах, обеспечивавших повышение характеристик ИК ФП, и появлению развитой морфологии. Более мягкий термический отжиг при 200 °C также приводит к повышению структурного совершенства слоя HgCdTe, но без диффузионного размытия профиля слоя HgCdTe. На рис. 3 приведены азимутальные зависимости амплитуды сигнала собствен-

ной ГВГ, возникающей в приповерхностных слоях гетероструктуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs после выращивания и после стандартного термического отжига при 200 °C в течение 24 часов в инертной атмосфере для конверсии типа проводимости.

При сравнении графиков амплитудных зависимостей собственного сигнала ГВГ, полученного из модельных расчетов (сплошные кривые) и из эксперимента (точки), видно, что имеется разница в величине сигналов в минимумах, в которых расчет и эксперимент имеют наибольшее отличие (обозначено красными кружками). Высота таких минимумов относительно шума измерительного тракта находится в соотношении 3 : 1 для слоев HgCdTe после роста (рис. 3, *a*) и после термического отжига (рис. 3, *b*). Такое отличие свидетельствует о меньшей величине напряжений в слое HgCdTe после мягкого термического отжига, т. е. в его процессе происходит релаксация напряжений и повышение структурного качества. Такая процедура позволяет обеспечить слоям HgCdTe *p*-типа проводимости на подложках GaAs требуемые параметры и высокое структурное качество для обеспечения высокой чувствительности ИК фотоприемников. Следовательно, лазерное воздействие при эпитаксии HgCdTe в методе МЛЭ позволит обеспечить высокое структурное качество в материале после роста.

4. Заключение

Нуль метод на основе генерации второй гармоники „на отражение“ показал, что слабое лазерное инфракрасное излучение в локальной точке приводит к существенному изменению напряжения и его структуры в слое HgCdTe сложной гетероструктуры (013)HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs. Показано, что напряжения, выявленные в одноосном направлении, снимаются при лазерном воздействии за время 15 минут, в течение которого происходит нагрев в локальной точке. Сложная картина появления новых пиков в сигнале ГВГ связана, по-видимому, с неоднородным распределением температуры в объеме исследуемого слоя HgCdTe. Полученные результаты могут быть использованы при выращивании гетероструктуры методом МЛЭ при одновременном воздействии лазерного излучения в процессе роста для уменьшения или полного снятия напряжений. Это в свою очередь позволит получить более высокое структурное совершенство слоев HgCdTe после роста или других гетероэпитаксиальных структур, например, HgTe.

Таким образом, практическое применение лазерного теплового воздействия возможно для пострстовой обработки слоев КРТ различного состава, как и квантовых структур для снижения остаточных деформаций и получения однородности их распределения на большой площади. Также полученные результаты совместно с результатами из [11] позволяют применить их для возможного использования лазерной подсветки в процессе МЛЭ КРТ для корректировки уровня напряжений в слоях. Также полученные результаты как и результаты из [11] позволяют говорить о возможности использования лазерной подсветки в процессе МЛЭ КРТ для корректировки уровня напряжений.

Финансирование работы

Работа поддержана при финансовом обеспечении в рамках Госзадания Минобрнауки РФ № FWGW-2025-0008 и № 1023031400007-9-1.3.6-1.3.6.

Конфликт интересов

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

[1] С.А. Ахманов, В.Ii. Емельянов, Н.И. Воротеев, В.Н. Семиногов. УФН, **147**, *4*, 675 (1985).
[2] А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Самохин. УФН, **187**, *2*, 159 (2017).
[3] А.В. Двуреченский Л.В., Г.А. Качурин, Н.В. Нидаев, Л.С. Смирнов. Импульсный отжпг полупроводниковых материалов. Наука, Новосибирск. (1982). 208 с.
[4] Ya.V. Fattakhov, M.F. Galyautdinov, T.N. L'vova, I.B. Khaibullin. Quantum Electron. **30**, *7*, 597 (2000).
[5] А.Б. Черемисин, С.В. Логинова, П.П. Борисков, А.А. Величко, А.Л. Пергамент, В.В. Путролайнен. Письма в ЖТФ **37**, *2*, 22 (2011).
[6] Л.Н. Александров. Кинетика кристаллизации и перекристаллизации полупроводниковых пленок. Наука, Новосибирск. (1985). 224 с.
[7] N. Bloembergen. Nonlinear Optics. 4th ed. World Scientific. Singapore. (1996). 188 c.
[8] С.А. Ахманов, М.Ф. Галяутдинов, Н.И. Коротеев, Г.А. Паитян, И.В. Хайбуллин, Е.И. Штырков, И.Л. Шумай. Письма ЖТФ, **10**, 1900 (1984).
[9] D. Guidotti, T.A. Driscoll, H.J. Gerritsen. Sol. State Commun., **46**, 337 (1983).
[10] T.A. Driscoll, D. Guidotti. Phys. Rev. Ser. B, **28**, 1171 (1983).
[11] М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, С.Н. Макаров, А.Г. Елесин, А.Г. Верхогляд. ЖТФ, **91**, *11*, 1799 (2021).
[12] M.F. Stupak, S.A. Dvoretsky, N.N. Mikhailov, S.N. Makarov, A.G. Elesin. J. Appl. Phys., **134**, 185102 (2023).
[13] Ю.Г. Сидоров, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, В.С. Варавин, А.П. Анциферов. Оптический журнал, **67**, *1*, 39 (2000).
[14] М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, М.В. Якушев. Автометря, **55**, *5*, 31 (2019).
[15] 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).
[16] С.А. Дворецкий, М.Ф. Ступак, Н.Н. Михайлов, С.Н. Макаров, А.Г. Елесин, А.Г. Верхогляд. ФТП, **56**, *8*, 780 (2022).
[17] М.Ф. Ступак, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, С.Н. Макаров, А.Г. Елесин. Оптический журнал. **91**, *2*, 88 (2024).
[18] В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, М.В. Якушев, И.В. Сабинина. ФТП **35**, *9*, 1092 (2001).

[19] Sadao Adachi. Optical Constants of Crystalline and Amorphous Semiconductors. Springer Science+Business Media, N.Y. (1999). 286 c.
[20] Ю.Г. Сидоров, М.В. Якушев, В.С. Варавин, А.В. Колесников, Е.М. Труханов, И.В. Сабинина, И.Д. Лошкарев. ФТТ, **57**, *11*, 2095 (2015).
[21] G. Brill, S. Farrel, Y.P. Chen, P.S. Wijewarnasuriya, N. Mulpury, V. Rao, J.D. Benson, N. Dhar. J. Electr. Mat, **39**, *7*, 967 (2010).

Редактор В.В. Емцев