ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 56, № 8 ФИЗИКА 2013

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 621.315.592

К.О. БОЛТАРЬ, И.Д. БУРЛАКОВ*, А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ**, А.Л. СИЗОВ*,*
*В.Г. СРЕДИН***, Н.Х. ТАЛИПОВ***, С.А. ШУЛЬГА***

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $Cd_xHg_{1-x}Te$[1]

Представлены результаты исследования радиационной модификации поверхности гетероэпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ), выращенных методами молекулярно-лучевой и жидкофазной эпитаксии (ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ), при воздействии мощного импульсного коротковолнового ИК-излучения. Установлено, что после воздействия мощных импульсов лазерного коротковолнового ИК-излучения поверхность ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ обогащается ртутью.

Ключевые слова: *гетероэпитаксиальные слои, CdHgTe, радиационные дефекты, лазерное облучение.*

Лазерное излучение представляет собой удобный инструмент для исследования различных процессов в оптоэлектронных приборах, включая режимы работы при высоких уровнях освещения, исследования нелинейных явлений и оптической стойкости. Воздействие мощного импульсного лазерного излучения приводит к возникновению в полупроводниках ряда нелинейных эффектов, связанных с образованием электронно-дырочной плазмы, генерацией акустических волн, поверхностным плавлением и разрушением материалов, многофотонным поглощением, а также поляризационным нелинейным явлениям [1, 2].

Мощное импульсное ИК-излучение широко используется для засветки ИК-фотоприемников на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) в реальных условиях их применения. Поэтому представляет особый интерес исследование оптической стойкости структур на основе гетероэпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных методами молекулярно-лучевой эпитаксии (ГЭС КРТ МЛЭ), и слоев жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) КРТ при воздействии мощных импульсов коротковолнового лазерного ИК-излучения, в частности излучения твердотельного YAG/Nd^{3+}-лазера на длине волны 1,06 мкм.

Для узкозонных полупроводников, к которым относится $Cd_xHg_{1-x}Te$ ($x \le 0{,}25$), наиболее важными эффектами при импульсном возбуждении при оптических мощностях менее 10^6 Вт/см^2 являются тепловой нагрев, генерация высоких концентраций неравновесных носителей заряда и высокая скорость их рекомбинации. Поэтому при воздействии мощных импульсов лазерного излучения с длиной волны, принадлежащей области фундаментального поглощения КРТ, следует учитывать изменение спектров поглощения, вызванных температурным сдвигом ширины запрещенной зоны материала при лазерном нагреве, и эффект Бурштейна – Мосса, приводящий к заполнению энергетических состояний разрешенных зон неравновесными носителями заряда [3, 4].

Энергия кванта излучения YAG/Nd^{3+}-лазера больше ширины запрещенной зоны фоточувствительного материала, поэтому оно поглощается в верхнем приповерхностном слое толщиной не более 0,5 мкм. Уже при относительно малых значениях плотности мощности температура в поверхностном поглощающем слое КРТ достигает температуры плавления, что определяет как структурное изменение поверхностного слоя, так и его оптические характеристики.

Целью настоящей работы являлось исследование радиационной модификации поверхности гетероэпитаксиальных слоев ГЭС КРТ МЛЭ и ЖФЭ КРТ при воздействии мощного импульсного коротковолнового ИК-излучения YAG/Nd^{3+}-лазера.

В экспериментах использовались гетероэпитаксиальные слои $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенные методами молекулярно-лучевой эпитаксии в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) на подложках GaAs

[1] Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ НШ–3851.2012.10, по ФЦП, соглашения № 14.B37.21.0074, 14.B37.21.1177.

(ГЭС КРТ МЛЭ) и жидкофазной эпитаксии в ГИРЕДМЕТе (г. Москва) на подложках CdZnTe (ЖФЭ КРТ). Параметры образцов приведены в таблице.

Параметры исходных образцов

Номер образца, тип проводимости	Состав поверхности и рабочего слоя, x_s / x	Толщина варизонного слоя, мкм	Толщина общая d, мкм	Концентрация носителей n, p, см$^{-3}$	Подвижность μ_n, μ_p, см^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$
050727 (МЛЭ) n-тип	0,48/0,220	0,4	10,5	n $2{,}1\cdot10^{14}$	μ_n $8{,}1\cdot10^{4}$
040107 (МЛЭ) p-тип	0,46/0,219	0,4	10,5	n $9{,}0\cdot10^{15}$	μ_p 470
Т 174-1 (ЖФЭ) n-тип	0,216	_	16	n $1{,}4\cdot10^{15}$	μ_n $1{,}4\cdot10^{5}$
Т 166-3 (ЖФЭ) n-тип	0,218	_	20	n $2{,}8\cdot10^{14}$	μ_n $1{,}3\cdot10^{5}$
ТС 32-2(ЖФЭ) p-тип	0,222	_	19	p $1{,}4\cdot10^{16}$	μ_p 510

Все образцы, представленные в таблице, облучались при комнатной температуре излучением импульсного YAG/Nd^{3+}-лазера, генерирующего излучение на длине волны 1,06 мкм. Длительность импульса на полувысоте 15 и 25 нс. На рис. 1 приведены изображения импульса, снятые на осциллографе с помощью быстродействующего фотодиода. Диаметр пучка составлял 10 мм. Излучение лазера характеризуется высокой стабильностью по мощности и достаточной степенью однородности в площади сечения пучка. Ослабление энергии пучка проводилось с помощью фильтров НС-6, ТС-1, ФС-6. Два образца (ТС32-2 и 050727) были облучены импульсами очень большой мощности (длительность τ = 11 нс, энергия W = 175 мДж).

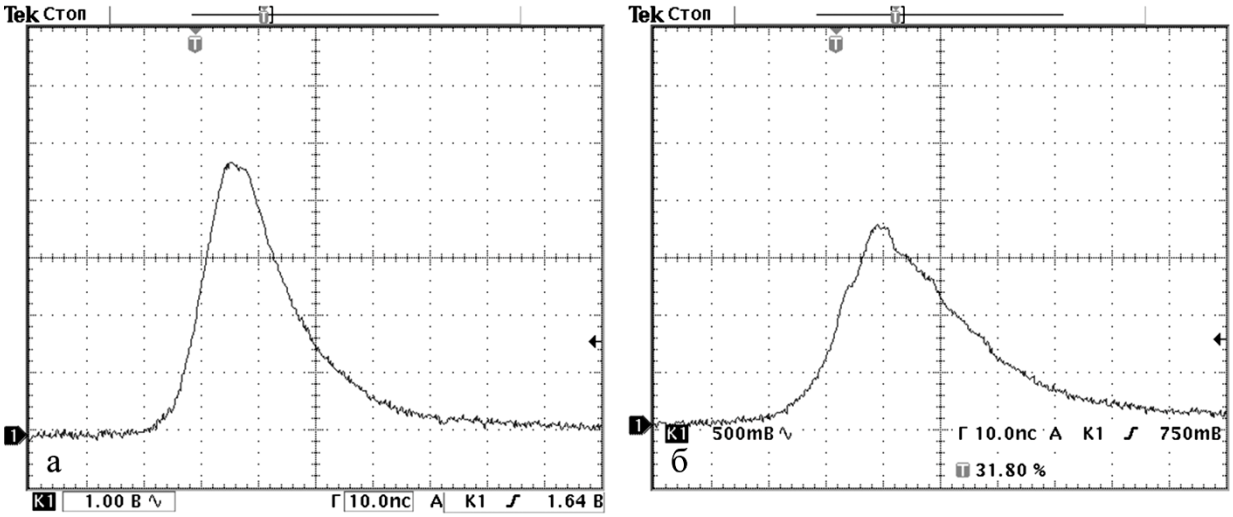

Рис. 1. Профиль импульса YAG/Nd^{3+}-лазера. Длительность импульса на полувысоте: *а* – 15; *б* – 25 нс

Поверхность исходных и облученных структур КРТ исследовалась методом ЭСХА на установке «Microlab MK II», сканирующем электронном микроскопе «JEOL», оптическом цифровом микроскопе фирмы «Nikon», профилометре «Dektak-8». Также на фурье-спектрометре «ИНФРАЛЮМ ФТ-02» измерялись спектры отражения и пропускания исходных и облученных образцов при комнатной температуре.

Рассмотрим влияние воздействия лазерных импульсов на состояние поверхности образцов, полученных методом жидкофазной эпитаксии. Поглощающая поверхность у фоточувствительных структур, полученных этим методом, открыта, и поэтому существует возможность выноса вещества в случае, когда температура поверхности превышает температуру плавления, так как ртуть является особо легколетучим элементом [5].

Серия проведенных экспериментов показала, что плотность мощности излучения выше 2 МВт/см^2 приводит к началу процесса плавления поверхности, который носит очаговый характер с образованием круговых структур (рис. 2). При указанной плотности мощности и длительности импульса излучения на поверхности образца температура должна превышать температуру плавления материала. Процесс плавления однозначно свидетельствует о начале необратимых изменений в структурах. Неравномерный характер распределения очагов плавления позволяет предположить, что они зарождаются в точках скопления приповерхностных дефектов структуры. При росте плотности мощности происходит увеличение концентрации очагов и увеличение размеров большинства из них. При этом отмечается падение величины коэффициента зеркального отражения от поверхности ЖФЭ КРТ.

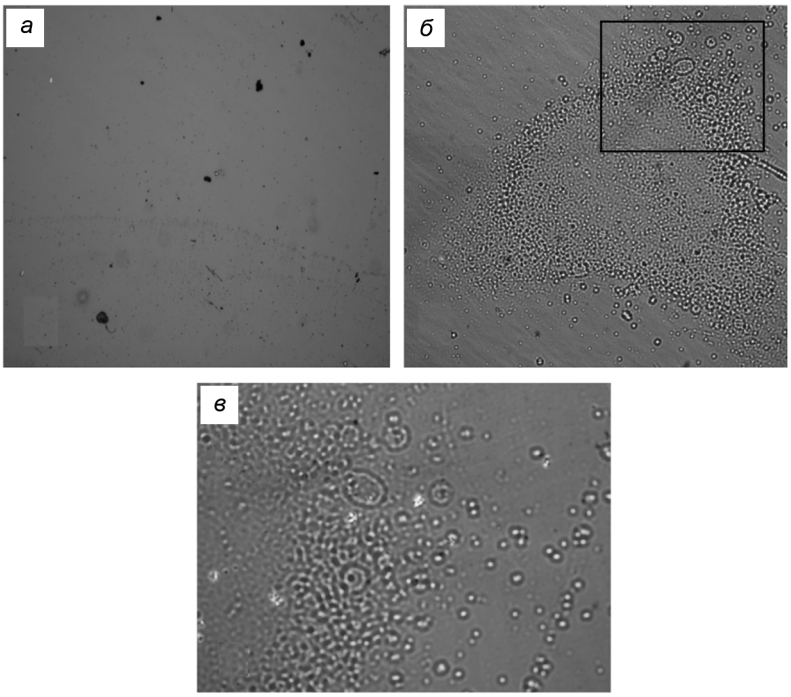

Рис. 2. Исходная и облученная поверхность образца ЖФЭ КРТ 174-1. Плотность мощности 5,6 МВт/см^2, τ = 25 нс: *а* – исходный (поле снимка 174×252 мкм); *б* – облученный (поле снимка 174×252 мкм); *в* – снимок выделенной красным прямоугольником области (поле снимка 87×126 мкм)

В эксперименте с облучением образца ЖФЭ КРТ № 174-1 его часть была задиафрагмирована от лазерного излучения. На рис. 3 показаны результаты исследования этой области с помощью растрового электронного микроскопа «JEOL». На снимках хорошо видна резкая граница между облученной и необлученной частями образца. Граница соответствует уменьшению толщины облученной части образца приблизительно на 0,1 мкм (см. профилограмму на рис. 6). Обращает также на себя внимание образование трещин вблизи границ областей, свидетельствующих о возникновении в процессе облучения термоупругих напряжений, величина которых превышает предел прочности материала.

Как показали дальнейшие исследования, граница областей формируется в виде ступеньки из материала, испытавшего быструю рекристаллизацию за время прохождения одного импульса наносекундной длительности [6]. Отметим, что термоупругие напряжения распространяются и на необлученную часть структуры, о чем свидетельствуют сколы на границе края кратера (например, треугольник вдоль направления риски в левой части рисунка).

Увеличение плотности центров плавления при росте плотности мощности облучения вплоть до 20 МВт/см^2 демонстрирует рис. 4, на котором представлено изображение поверхности образца гетероструктуры, полученной методом жидкофазной эпитаксии (рис. 4, *а*). Образование микротрещин на этом образце видно при большем увеличении (рис. 4, *б*).

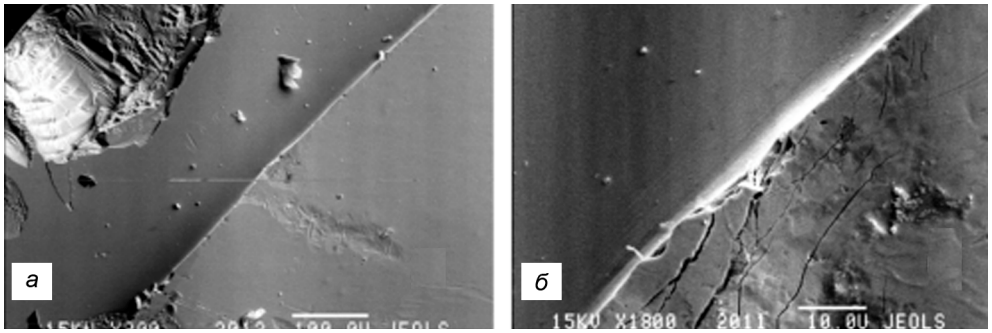

Рис. 3. Изображение поверхности ЖФЭ КРТ №174-1 в электронном микроскопе: *а* – увеличение × 300; *б* – увеличение ×1800, левый угол – необлученная поверхность, правый – облученная. Плотность мощности 5,6 МВт/см^2, τ = 25 нс

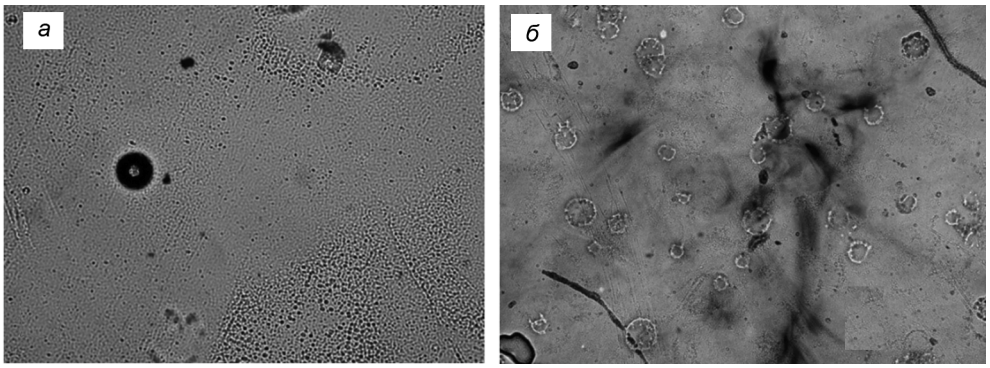

Рис. 4. Облученная поверхность образца ЖФЭ КРТ № ТС-32-1. Плотность мощности 20 МВт/см^2, τ = 11 нс: *а* – поле снимка 174×252 мкм; *б* – поле снимка 87×126 мкм

Образцы ГЭС КРТ МЛЭ отличаются от ЖФЭ КРТ, рассмотренных выше, наличием поверхностного варизонного слоя толщиной порядка 0,4 мкм, через который и проводилось облучение в наших экспериментах. При этом указанный варизонный слой частично отражает, а частично поглощает излучение лазера, выполняя, таким образом, защитную функцию по отношению к фоточувствительному слою.

На рис. 5, *а* показано образование трещин в ГЭС КРТ МЛЭ из-за возникновения термоупругих напряжений, причем трещины распространяются через поверхность в фоточувствительный слой. Как и в случае со структурами, полученными методом жидкофазной эпитаксии, напряжения, возникнув в освещенной области, переходят в область, диафрагмированную от облучения.

Действительно, процессы зарождения центров плавления материала на этих образцах возникают, также как и в рассмотренном выше случае, на поверхности (рис. 5, *б*). На рисунке видны достаточно плотно расположенные центры рекристаллизации, свидетельствующие о процессе плавления поверхности. Как и в предыдущем случае, часть образца была закрыта диафрагмой, и точно так же вдоль этой границы четко наблюдается образование уступа из рекристаллизованного материала высотой около 0,2 мкм, возникающего за счет возгонки части кристалла в области, подвергнутой лазерному облучению. Отметим, что в данном случае барьер сформирован, по-видимому, целиком в варизонном слое.

Таким образом, эксперименты показали, что морфология деградации поверхности эпитаксиальных слоев твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ в поле мощного импульсного излучения YAG/Nd^{3+}-лазера имеет одинаковую природу и сводится к тем же процессам независимо от способа получения эпитаксиальных слоев.

Для уточнения изменения морфологии поверхности ГЭС КРТ МЛЭ в результате действия мощного лазерного излучения дополнительно проведены измерения степени плоскостности их поверхности с помощью профилометра «Dektak-8».

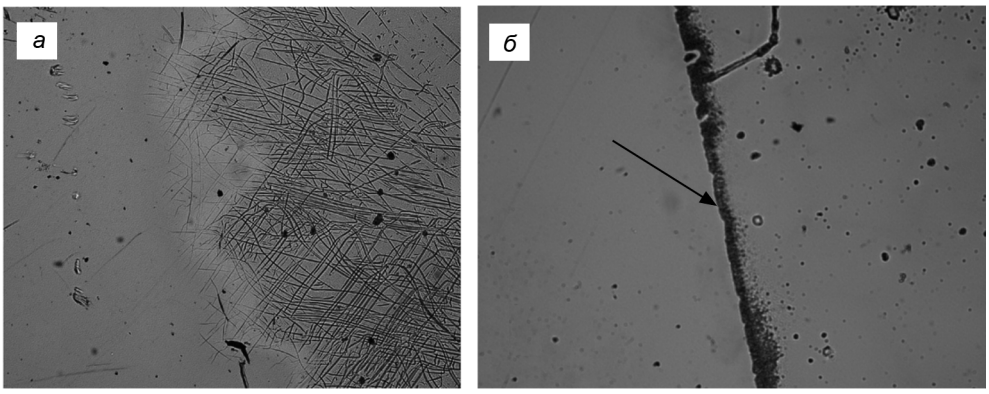

Рис. 5. Облученная поверхность образца ГЭС КРТ МЛЭ: *а* – № 050727, плотность мощности 3,4 МВт/см^2, τ = 25 нс, левая сторона – необлученная, правая – облученная, видна сетка трещин; поле снимка 348×504 мкм; *б* – № 040107, плотность мощности 5,6 МВт/см^2, τ = 25 нс, левая сторона – необлученная, правая – облученная, поле снимка 174×252 мкм. На облученной поверхности материал испарился на глубину около 0,1 мкм. Видна ступенька (черная стрелка), профиль которой представлен внизу. Эта ступенька – валик из переплавленного материала

На рис. 6 показана типичная профилограмма, полученная в серии экспериментов на облученных структурах. В данном эксперименте левая часть образца была диафрагмирована от действия лазерного излучения. Как видно из рисунка, в облученной части произошла возгонка материала на глубину порядка 0,1 мкм, причем на границе облученной – необлученной частей возникает барьер из рекристаллизованного материала высотой около 0,2 мкм, о существовании которого свидетельствуют также рис. 3–5.

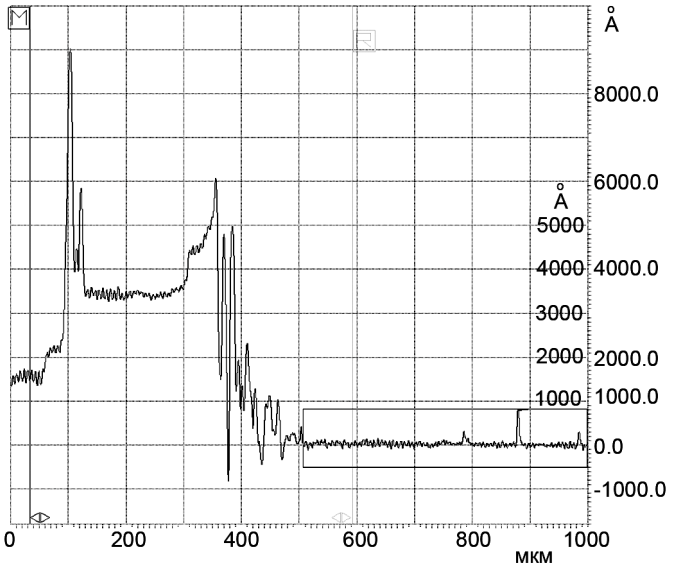

Рис. 6. Профиль поверхности ГЭС КРТ МЛЭ № 040107, измеренный на профилометре «Dektak-8». Плотность мощности 5,6 МВт/см^2, τ = 25 нс. Видно, что из облученной части (выделенная область) произошло испарение материала на глубину около 0,1 мкм

Очевидно, что результатом плавления и испарения материала на основе эпитаксиальных слоев твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ в результате действия мощного лазерного излучения должно стать изменение не только строения поверхности, но и состава твердого раствора.

Действительно, химическая связь Hg–Te много слабее, чем связь Cd–Te [7]. Этим обстоятельством объясняются такие особенности твердого раствора, как высокая концентрация вакансий ртути, возникающих из-за относительно низкой энергии активации образования как вакансий в катионной подрешетке, так и сопутствующих им атомов межузельной ртути. Последние способны

мигрировать в кристаллической решетке, достигая поверхности. По этой причине именно ртуть в этом материале является наиболее летучим компонентом. При очень быстром нагреве материала при импульсном лазерном облучении скорость миграции ртути из объема к поверхности должна существенно возрастать, приводя к обогащению приповерхностных областей атомами ртути [8–11]. Проведенные исследования спектров ЭСХА (электронная спектроскопия для химического анализа) показали, что данный эффект имеет место и в эпитаксиальных слоях, причем независимо от способа их получения. Результаты измерений представлены на рис. 7. Как видно из рисунка, поверхность эпитаксиальных слоев обогащается ртутью (рост амплитуды пиков в спектрах, соответствующих возбуждению уровней атомов ртути).

Переход ртути в приповерхностную область, однако, не означает, что все ее атомы появились за счет выбивания из узлов кристаллической решетки, а следовательно, возрастания относительной доли кадмия в составе твердого раствора. Как отмечалось выше, исходные слои содержат в качестве дефектов структуры межузельную ртуть. К сожалению, с помощью использованного метода невозможно установить природу происхождения анализируемых атомов (ионов), кроме того, этот метод позволяет исследовать только тонкий приповерхностный слой порядка 0,1 мкм и не дает информации о состоянии более глубоких областей.

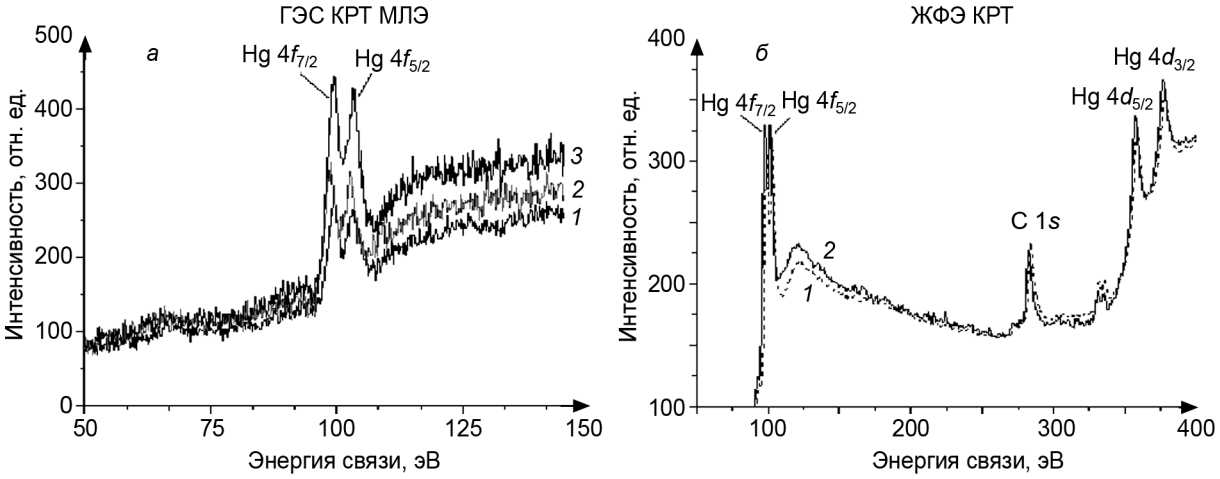

Рис. 7. Спектры ЭСХА эпитаксиальных слоев после облучения импульсом лазера YAG/Nd^{3+}: *а* – ГЭС КРТ МЛЭ № 040107, кр. *1* – исходный; кр. *2* – P = 1,5 МВт/см^2; кр. *3* – P = 5,6 МВт/см^2; *б* – ЖФЭКРТ № 174-1, кр. *1* – исходный; кр. *2* – облученный, P = 5,6 МВт/см^2

Таким образом, исследования облученных образцов методом рентгеновского микроанализа не содержат однозначных доказательств изменения состава твердых растворов в объеме, однако содержат информацию о высокой степени их вероятности.

Исследования структурных изменений в приповерхностных областях имеют большое значение при анализе механизмов зарождения деградационных эффектов в матричных фотоприемниках в процессе продолжительной эксплуатации. На работоспособность приборной структуры большое влияние оказывают и оптические свойства материала. В этой связи проведены исследования спектров оптического пропускания и отражения эпитаксиальных структур ЖФЭ КРТ.

Исследования оптических спектров проводилось с помощью фурье-спектрометра «ИНФРАЛЮМ ФТ-02» при комнатной температуре при нормальном падении излучения на поверхность кристалла. Типичные результаты этих исследований представлены на рис. 8. Воздействие лазерного излучения при всех использовавшихся значениях плотности мощности и для всех образцов не продемонстрировали возникновения новых спектральных особенностей, которые могли бы быть отнесены к появлению новых примесных (дефектных) уровней в запрещенной зоне.

В спектрах поглощения обращает на себя внимание четкий сдвиг положения края собственного поглощения в коротковолновую область, величина которого возрастает по мере роста плотности мощности падающего излучения (рис. 8, *а*), что может быть вызвано эффектом Мосса – Бурштейна из-за обогащения приповерхностной области междоузельной ртутью.

Отметим, что при большом изменении состава твердого раствора изменение ширины запрещенной зоны приведет к более значительному сдвигу спектрального положения края собственного

поглощения, которое вызовет изменение вида спектральной характеристики фоточувствительности. Подобный эффект при достаточно больших уровнях засветки наблюдался в фоторезисторах на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ [12].

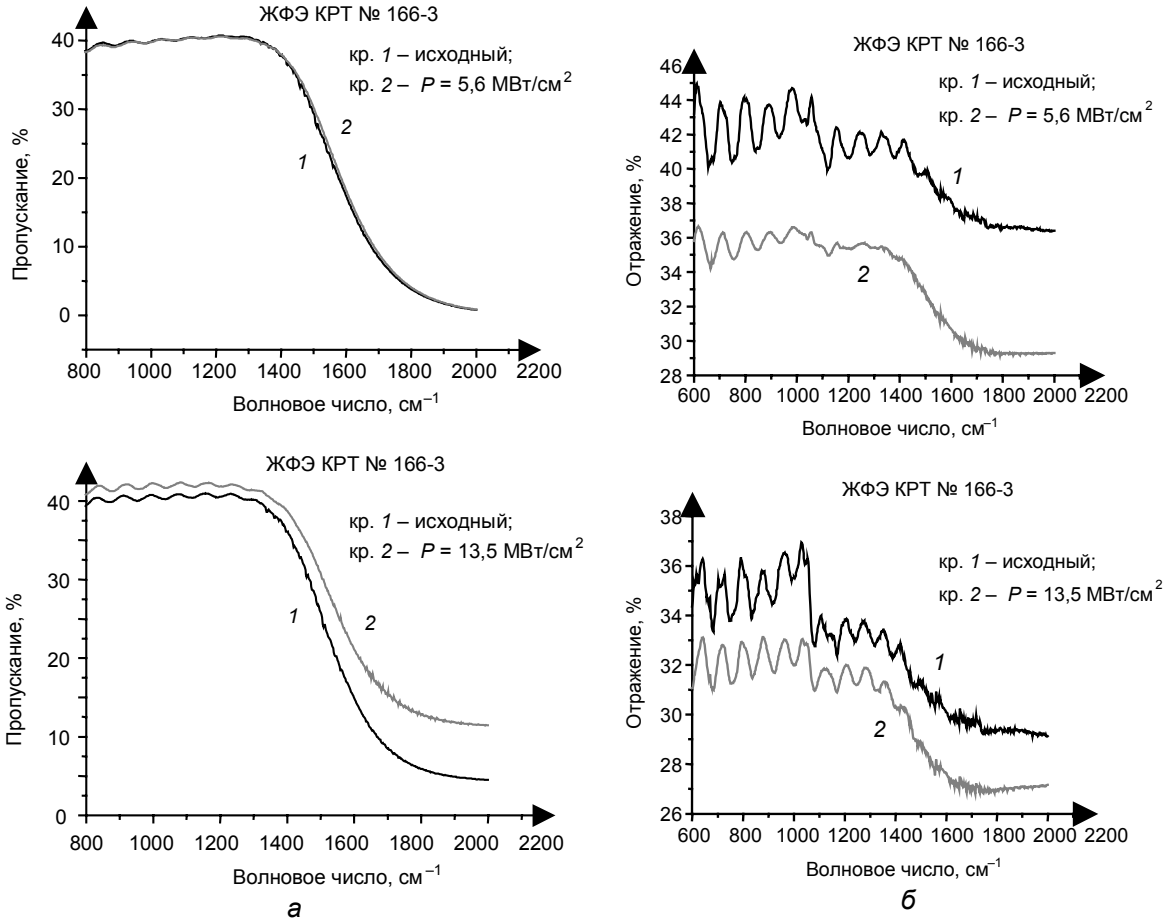

Рис. 8. Спектры пропускания (*а*) и отражения (*б*) ЖФЭ КРТ № 166-3 исходного и облученного разной плотностью мощности P = 5,6 и 13,5 МВт/см^2

В спектрах отражения обращает внимание существенное падение величины коэффициента отражения (рис. 8, *б*), которое связано с ухудшением качества облученной поверхности, вызванной, по-видимому, образованием дефектов в виде очагов плавления (см. рис. 2–4). С другой стороны, в этих спектрах сохраняется отчетливая интерференционная картина. Это свидетельствует о том, что плоскопараллельность образца, в целом, сохраняется. Некоторое уменьшение контрастности интерференционной картины обусловлено также деградацией состояния поверхности.

Как показали исследования, в результате воздействия импульсного излучения YAG/Nd^{3+}-лазера на гетероэпитаксиальные слои твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ происходит обогащение приповерхностных слов ионами ртути, генерация термоупругих напряжений с элементами механического повреждения целостности слоев, деградация поверхности. С точки зрения термодинамики, эти процессы относятся к необратимым и поэтому обладают свойством к накоплению. По нашему мнению, указанные эффекты приводят к процессам долговременной деградации матричных фотоприемников на основе гетероэпитаксиальных слоев КРТ при эксплуатации их в условиях интенсивной освещенности лазерным излучением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. – М., 1982. – 208 с.
2. Средин В.Г., Укроженко В.М // ФТП. – 1989. – Т. 23. – № 10. – С. 1762–1766
3. Войцеховский А.В., Шульга С.А., Громовенко В.М. и др. // Тез. докл. XXI Междунар. науч.-технич. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М., 2010. – С. 184−185.

4. Войцеховский А.В., Шульга С.А., Средин В.Г., Талипов Н.Х. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9. – С. 60–64.
5. Кузьма М., Поцяск М., Шерегий Е. и др. // ФТП. – 1995. – Т. 28. – № 8. – С. 1483–1487.
6. Голошихин П.В., Миронов К.Е., Поляков А.Я. // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1991. – № 12. – С. 12–16.
7. СтафеевВ.И. Теллурид кадмия-ртути. Фотоприемники инфракрасного диапазона. Другие приборы. – М.: Изд-во ФГУП «Орион», 2011. – 203 с.
8. Hähnert I. and Schenk M. // J. Cryst. Growth. – 1990. – V. 101. – No. 1–4. – P. 251–255.
9. Власенко А.И., Гнатюк В.А., Копишинская Е.П., Мозоль П.Е. // ФТП. – 1997. – Т. 31. – № 7. – С. 820–822.
10. Afonso C.N., Alonso M., Neira J.L.H., et al. // J. Vac. Sci. Technol. – 1989. – V. A7. – No. 6. – P. 3256–3264.
11. Dimiduk K.C., Opyd W.G., Gibbons J.F., et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. – 1983. – V. 1. – No. 3. – P. 1661–1665.
12. Способ коррекции спектральной характеристики полупроводникового фоторезистора лазерным излучением // Патент на изобретение РФ № 2276428 от 16.02.2005 г.

*ОАО НПО «Орион», г. Москва, Россия
**Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
***Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого, г. Москва, Россия
E-mail: vav@elefot.tsu.ru,

Поступила в редакцию 15.04.13.

Болтарь Константин Олегович, д.ф.-м.н., начальник НТК;
Бурлаков Игорь Дмитриевич, д.т.н., зам. генерального директора;
Войцеховский Александр Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;
Сизов Александр Леонидович, ст. инженер;
Средин Виктор Геннадьевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой;
Талипов Нияз Хатимович, к.ф.-м.н., доцент.
Шульга Сергей Анатольевич, ст. преподаватель.