

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ПРИ НАНОИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Г.Д. Излев¹⁾, Е.И. Гацкевич²⁾, И.Н. Пархоменко¹⁾, О.В. Королик¹⁾, Л.А. Власукова¹⁾,
В.А. Гнатюк³⁾, В.П. Велещук³⁾, А.И. Власенко³⁾, С.А. Дворецкий⁴⁾, Н.Н. Михайлов⁴⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, 220030, Минск, пр. Независимости, 4,
тел.375(17)2070072, e-mail: ivlev-1947@mail.ru

²⁾Белорусский национальный технический университет, 220013, Минск, пр. Независимости,
65, тел 375(17)2939245, e-mail: gatskevich_elena@yahoo.com

³⁾Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины
03028, Украина, Киев, пр. Науки, 41.

⁴⁾Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13

Проведена оптическая диагностика лазерно-индуцированных процессов в твердых растворах $Cd_xHg_{1-x}Te$. Образцы подвергались воздействию наносекундных импульсов излучения рубинового лазера. Методом оптического зондирования исследована динамика отражательной способности на длинах волн 1,06 и 0,53 мкм. Установлены пороги лазерно-индуцированного плавления и время существования жидкой фазы. Динамика отражательной способности определяется в основном температурной зависимостью отражательной способности, а также интерференционными эффектами, возникающими при отражении зондирующего излучения от системы расплавленной пленки – твердая подложка. Методом комбинационного рассеяния света (КРС) исследован состав образцов $Cd_xHg_{1-x}Te$. Показано, что лазерное воздействие приводит к появлению дополнительных пиков в спектре КРС, которые могут быть связаны с образованием преципитатов теллура на поверхности образцов.

Введение

Твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ широко применяются в современной оптоэлектронике. Фотодиоды на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ используются в матричных фотоприемных устройствах среднего и дальнего инфракрасного (ИК) диапазона [1]. Для аэрокосмического зондирования важно, чтобы полосы фоточувствительности фотоприемников соответствовали окнам прозрачности земной атмосферы [1]. Изменяя соотношение кадмия и ртути в исходном твердом растворе, можно получить материалы с оптимальными свойствами для регистрации ИК излучения в основных окнах прозрачности: диапазон 1-2,5 мкм при $x \approx 0,4$; 3-5 мкм при $x \approx 0,3$; 8-12 мкм при $x \approx 0,2$ [1]. Детекторы на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ обладают большей стойкостью к проникающим излучениям по сравнению с детекторами на основе $InAs$ и Si [1].

Интересные возможности открывает использование структур $Cd_xHg_{1-x}Te$ с варизонными слоями, в которых содержание Cd (x) изменяется по глубине от 1 до 0,2. В частности, в работе [2] показана возможность создания двухполосного фоторезистора для ИК-областей спектра на основе варизонной эпитаксиальной структуры с расположенным в глубине пленки рекомбинационно-активным слоем. Спектральное расположение полос фоточувствительности может регулироваться составом варизонного слоя и параметрами рекомбинационного слоя.

Одним из возможных методов получения варизонных слоев в композиционных полупроводниковых кристаллах является лазерная обработка материалов. В настоящей работе исследовано воздействие наносекундных импульсов излучения рубинового лазера в широком диапазоне плотностей энергий на

пленки $Cd_xHg_{1-x}Te$. Оптическая диагностика *in situ* лазерно-индуцированных теплофизических процессов проводилась путем детектирования отраженного от облучаемой зоны потока зондирующего излучения (ЗИ). Для тестирования эффектов лазерного воздействия на объекты *ex situ* проводились исследования методом комбинационного рассеяния света.

Эксперимент

Образцы $Cd_xHg_{1-x}Te$ выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии [3]. Основные параметры образцов описаны в работе [4]. Твердые растворы $Cd_xHg_{1-x}Te$ могут кристаллизоваться в диапазоне составов $0 < x < 1$, при этом ширина запрещенной зоны E_g непрерывно меняется от -0,3 до 1,6 эВ.

Образцы с рабочими слоями $Cd_xHg_{1-x}Te$ облучались одиночными импульсами излучения рубинового лазера ($\lambda = 0,69$ мкм, длительность импульса по полувысоте 80 нс в диапазоне плотностей энергий E от 10 до 360 мДж/см²). Оптическая схема лазера обеспечивала высокую однородность облучения. Неравномерность распределения энергии моноимпульса в пятне не превышала $\pm 5\%$. Энергия облучения воспроизводилась от импульса к импульсу с отклонением не выше $\pm 1,5-2\%$. Область лазерного воздействия составляла 2,5 мм в диаметре.

В качестве источника ЗИ использовался лазер на стекле, активированном неодимом (длина волны $\lambda_1 = 1,06$ мкм). Часть излучения с помощью кристалла KDP преобразовывалась во вторую гармонику ($\lambda_2 = 0,53$ мкм). Зондирующий пучок p – поляризации (угол падения 40°) фокусировался в центре зоны лазерного нагрева в пятно размером ~ 1 мм.

Химический состав приповерхностной области исходных и лазерно-модифицированных образцов исследовался методом КРС на конфокальном микро-Рамановском спектрометре Nanofinder HighEnd (LOTIS-TII). Спектры возбуждались лазером с длиной волны 532 нм в геометрии обратного рассеяния в диапазоне частот 50 – 300 см^{-1} .

Обсуждение результатов

Из осциллограмм отражения ЗИ на длине волны 1,06 мкм видно, что изменение содержания Cd « x » от 0,22 до 0,3 (или, соответственно, содержания Hg от 0,78 до 0,7) ведет к увеличению начального уровня отражательной способности R , но не влияет на характер изменений R вследствие лазерного воздействия (рис.1). При плотности энергии облучения $E < 60$ мДж/см² изменения R не наблюдаются для обеих длин волн зондирующего излучения. Увеличение E до 60 мДж/см² ведет к увеличению отражательной способности (рис.1, “1” и “2”). Это значение E , вероятно, соответствует порогу лазерно-индуцированного плавления твердого раствора.

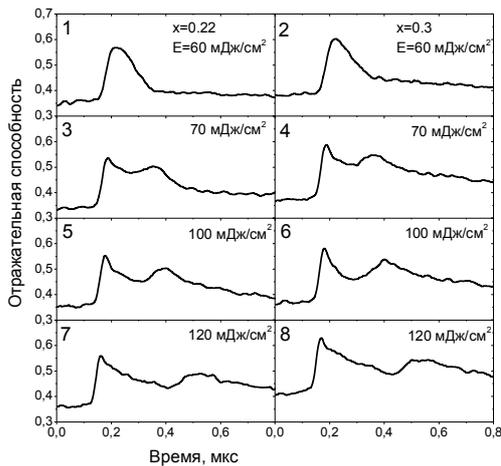


Рис. 1. Динамика отражательной способности $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на длине волны 1,06 мкм при наносекундном лазерном облучении с указанными плотностями энергии

При возрастании E динамика отражательной способности аналогична наблюдаемой ранее в наших экспериментах с CdTe [5] и CdMnTe [6]. При $E=70$ мДж/см² сначала происходит резкое возрастание $R(t)$ до значений 0,55 для первого образца и 0,6 для второго образца (рис.1, “3” и “4”). Затем отражательная способность плавно уменьшается до минимального значения, которое выше начального уровня R . После этого наблюдается возрастание R до значений слегка меньших, чем первый максимум. Далее, по мере остывания образца происходит плавное уменьшение R до первоначального уровня.

Дальнейшее возрастание E до 300 мДж/см² не изменяет динамику отражательной способности, но ведет к увеличению расстояния между пиками. Следует отметить, что в отличие от образцов

CdTe и CdMnTe излучение с λ_1 попадает в область фундаментального поглощения для обоих образцов. По всей видимости, временной интервал между пиками соответствует времени существования жидкой фазы. Из измерений методом оптического зондирования следует, что времена существования расплава приблизительно равны для обоих образцов. Наблюдаемая динамика R может быть обусловлена интерференционными эффектами при отражении зондирующего пучка от многослойной системы, включающей жидкий слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, нагретый твердый слой $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и буферный слой переменного состава.

В отличие от прежних результатов измерений [5,6] в данном эксперименте не наблюдалось выраженной динамики $R(t)$ на λ_2 , что может быть объяснено незначительным изменением оптических параметров $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на длине волны 0,53 мкм при переходе из кристаллического состояния в жидкое.

Превышение критической плотности энергии облучения ~ 300 мДж/см² ведет к разрушению поверхности образцов, что вызывает резкое падение отражения зондирующего пучка.

Исследования методом КРС показали, что импульсное лазерное воздействие приводит к появлению дополнительных полос в диапазоне частот 50 – 150 см^{-1} для обоих типов образцов (рис. 2). Аналогичные изменения в спектрах комбинационного рассеяния наблюдались ранее в работе [7], в которой эпитаксиально выращенные слои $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x=0.21$ подвергались воздействию импульсов излучения рубинового лазера длительностью импульса 20 наносекунд.

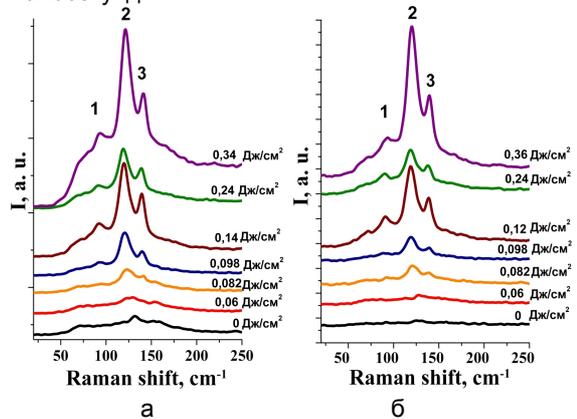


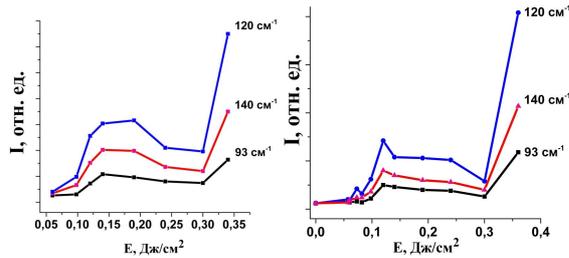
Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния образца $\text{Cd}_{0.22}\text{Hg}_{0.78}\text{Te}$ (а) и $\text{Cd}_{0.3}\text{Hg}_{0.7}\text{Te}$ (б) после лазерных отжигов

Согласно данным [8], наблюдаемые пики можно приписать рассеянию на частицах фазы элементарного теллура (табл. 1).

При лазерном воздействии происходит нагрев и плавление поверхностного слоя твердого раствора, что приводит к нарушению стехиометрического состав из-за испарения ртути. Таким образом, верхний слой обогащается теллуrom с образованием преципитатов Te. Одновременно при облучении на воздухе может происходить окисление теллура.

Таблица 1 – Значение частот и принадлежность к модам колебаний полос в спектрах КР

Номер пика	Спектральное положение, см ⁻¹	Принадлежность
1	90	Е-мода колебаний кристаллического теллура
2	123 126	А ₁ -мода тригонального теллура Преципитаты теллура
3	141	Е-мода тригонального теллура (мода Е) Преципитаты теллура

Рис. 3. Зависимость интенсивности полос с максимумами при 90, 120 и 140 см⁻¹ от мощности лазерного импульса для образца.

Отметим, что, как и в работе [7], интенсивность связанных с фазой элементарного теллура полос в спектрах КРС нелинейно зависит от плотности энергии облучения (рис.3). С ростом плотности энергии импульса интенсивность данных полос сначала растет, затем падает. Это, по-видимому, связано с эффектами испарения компонентов твердого раствора. При плотностях энергии ниже 0,2 Дж/см² из-за испарения ртути в обогащенной теллуrom приповерхностной области образцов формируются преципитаты теллура. При более высоких плотностях энергии

облучения теллура также начинает испаряться, что приводит к падению интенсивности связанных с ним полос в спектрах КРС.

Заключение

Методом оптического зондирования установлено, что динамика отражательной способности на длине волны 1,06 мкм определяется в основном температурной зависимостью отражательной способности, а также интерференционными эффектами, возникающими при отражении зондирующего излучения от системы расплавленная пленка – твердая подложка. Из анализа спектров КР можно судить о формировании преципитатов Те в процессе облучения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.А.Володину за полезные обсуждения.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ по проекту № F13K-117.

Список литературы

1. Стафеев В.И., Бурлаков И.Д., Акимов В.М. [и др.] // ФТП. - 2005. - Т. 39. - С. 1257.
2. Власенко А.И., Власенко З.К., Гнатюк В.А. [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2001. - 9. - С. 25.
3. Осадчий В.М., Сусяков А.О., Васильев В.В., Дворецкий С.А. // Автометрия. -1998. -4. -С. 71.
4. Dvoretzky S.A., Gatskevich E.I., Ivlev G.D., Mikhailov N.N., Shimko A.N. // Physics of Extreme States of Matter – 2012. Edited by Fortov V.E. [et al.]. – P. 108.
5. Ivlev G.D., Gatskevich E.I., Zhvavyi S.P. [et al.] //Proc.SPIE.- 2004. - Vol. 5449. - P. 10-18.
6. Gatskevich E.I., Ivlev G.D., Rarenko A.I. et al. // Appl. Surf. Sci. - 2007. - Vol. 254. - P. 993.
7. Gnatyuk V.A. // Solid State Phenomena. - 1998. - Vol. 63-64. – P. 353.
8. Белогорохов А.И., Денисов И.А., Смирнова Н.А., Белогорохова Л.И. // ФТП. - 2004. - Т. 38. - С. 84.

OPTICAL DIAGNOSTICS OF Cd_xHg_{1-x}Te SOLID SOLUTIONS AT NANOPULSED LASER IRRADIATION

G.D. Ivlev¹, E.I. Gatskevich², I.N. Parkhomenko¹, O.V. Korolik¹, L.A. Vlasukova¹, V.A. Gnatyuk³, V.P. Veleschuk³, A.I. Vlasenko³, S.A. Dvoretzky⁴, N.N. Mikhailov⁴

¹Belarusian State University, 220030, Minsk, Nezavisimosty Ave. 4, tel. 375(17)2070072, e-mail: ivlev-1947@mail.ru

²Belarusian National Technical University, 220013, Minsk, Nezavisimosty 65, tel. 375(17)2939245, e-mail: gatskevich_elen@yahoo.com

³V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, 03028, Ukraine, Kyiv, Nauky Ave. 41

⁴Institute of Semiconductor Physics, 630090, Russia, Novosibirsk, ac. Lavrenteev Ave, 13

Optical diagnostics of laser-induced processes in Cd_xHg_{1-x}Te solid solutions has been carried out. Samples were irradiated by ruby laser pulses. Time-resolved reflectivity measurements were executed at wavelengths 1.06 and 0.53 μm. The laser-induced melting thresholds and melt durations are established. Reflectivity dynamics is mainly determined by temperature dependence of reflectivity and interference effects which arise under reflection of probing beam from molten film –solid substrate. Structure of the samples Cd_xHg_{1-x}Te were investigated by Raman scattering. It was shown laser irradiation results in appearance new bands in the RS spectra, which associated with formation of Te precipitates at the surface.