

PACS numbers: 68.35.Ct, 68.37.Ps, 78.20.Ci, 78.67.Pt, 78.68.+m, 81.16.Mk, 81.16.Rf

## Формирование наноструктур на поверхности кристаллов $\text{Cd}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}$ при импульсном лазерном облучении

А. Байдуллаева, А. И. Власенко, Е. И. Гацкевич\*, В. А. Гнатюк,  
Г. Д. Ивлев\*, П. Е. Мозоль

*Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины,  
просп. Науки, 41,  
03028 Киев, Украина*

*\*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,  
просп. Независимости, 68,  
220070 Минск, Беларусь*

Методом оптического зондирования исследована динамика отражательной способности поверхности кристалла  $\text{MnCdTe}$ . Показано, что фазовые превращения, происходящие при лазерном воздействии, обуславливают разную динамику отражения зондирующего излучения от нагреваемой зоны. Причиной этого является образование на короткое время слоистой системы, в которой условия интерференции при отражении зондирующих потоков излучения с  $\lambda_1 = 1,06$  мкм и  $\lambda_2 = 0,53$  мкм существенно различаются. Методом атомно-силовой спектроскопии показано, что на поверхности образца происходит образование поверхностных островков, латеральные размеры, высота и характер распределения которых зависят от плотности энергии облучения.

Методом оптичного зондування досліджено динаміку відбивної здатності поверхні кристалу  $\text{MnCdTe}$ . Показано, що фазові перетворення, які відбуваються при лазерному впливі, обумовлюють різну динаміку відбивання зондувального випромінювання від зони, що нагрівається. Причиною цього є утворення на короткий час шаруватої системи, в якій умови інтерференції при відбиванні зондувальних потоків випромінювання з  $\lambda_1 = 1,06$  мкм і  $\lambda_2 = 0,53$  мкм суттєво різняться. Методом атомово-силової спектроскопії показано, що на поверхні зразка відбувається утворення поверхневих острівців, латеральні розміри, висота та характер розподілу яких залежать від густини енергії опромінювання.

Reflectivity dynamics of  $\text{MnCdTe}$  crystal surface is investigated by the optical probing method. As shown, the phase transformations occurring under laser irradiation cause different dynamics of probing-beams reflection from a heated zone. The reason for that is formation of short-lived layered system, in which conditions of interference at reflection of probing-beam streams with  $\lambda_1 = 1.06$

$\mu\text{m}$  and  $\lambda_2 = 0.53 \mu\text{m}$  differ essentially. As shown by the atomic-force spectroscopy method, formation of surface islands occurs on a sample surface. Lateral sizes, height and character of distribution of these surface islands depend on irradiation-energy density.

**Ключевые слова:** MnCdTe, поверхность, лазерное облучение, динамика отражательной способности, наноструктуры.

(Получено 23 листопада 2007 р.)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развиваются методы получения наноструктурированных материалов в связи с многообещающими перспективами использования нанотехнологий в различных сферах человеческой деятельности. Одним из таких методов является импульсная лазерная обработка. Наиболее часто для формирования различных наноструктур используется лазерная абляция [1]. Установлено [2–4], что облучение с плотностями энергии ниже порога абляции также может приводить к образованию на поверхности наноразмерных упорядоченных структур. В указанных работах исследовано воздействие 20-наносекундных импульсов излучения рубинового лазера на монокристаллы CdTe. В частности, показано, что степень шероховатостей зависит от плотности мощности лазерного излучения, причем, высота и латеральный размер образуемых наноструктур имеют максимум при определенном значении плотности мощности лазерного излучения.

В настоящей работе исследованы процессы модификации поверхности кристаллических образцов CdMnTe при их облучении рубиновым лазером. Для изучения динамики лазерного воздействия *in situ* использовался метод оптического зондирования. Морфология образцов до и после лазерного воздействия исследовалась методом атомной силовой микроскопии (АСМ).

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе использовались монокристаллические образцы  $\text{Cd}_{0,96}\text{Mn}_{0,04}\text{Te}$ , выращенные методом Бриджмена. Временная форма лазерного импульса соответствовала колоколообразной с шириной 120 нс по полувысоте. Неоднородность распределения энергии облучения в лазерном пятне диаметром 4 мм не превышала  $\pm 5\%$ . Исследуемые образцы облучались однократно лазерным импульсом при плотностях энергии  $E = 0,1, 0,15, 0,2$  и  $0,25 \text{ Дж/см}^2$ . В эксперименте детектировалось отраженное от облучаемой поверхности зондирующее излучение *p*-поляризации при угле падения  $40^\circ$  с  $\lambda_1 = 1,06$  и  $\lambda_2 = 0,53 \text{ мкм}$ , сфокусированное в пятно размером  $\sim 1 \text{ мм}$ . Заметим, что край полосы фундамен-

тального поглощения излучения в монокристалле CdTe, как известно [5, 6], соответствует длине волны  $\lambda = 0,832$  мкм, т.е. зондирующее излучение с  $\lambda_1$  почти не поглощается в образце при  $T = 300$  К, в то же время излучение с  $\lambda_2$  практически полностью поглощается в слое  $10^5$  см<sup>-1</sup>. Влияние Mn ( $x = 0,04$ ) приводит лишь к небольшому увеличению ширины запрещенной зоны  $E_g$ , которая, согласно [6], равна 1,564 эВ.

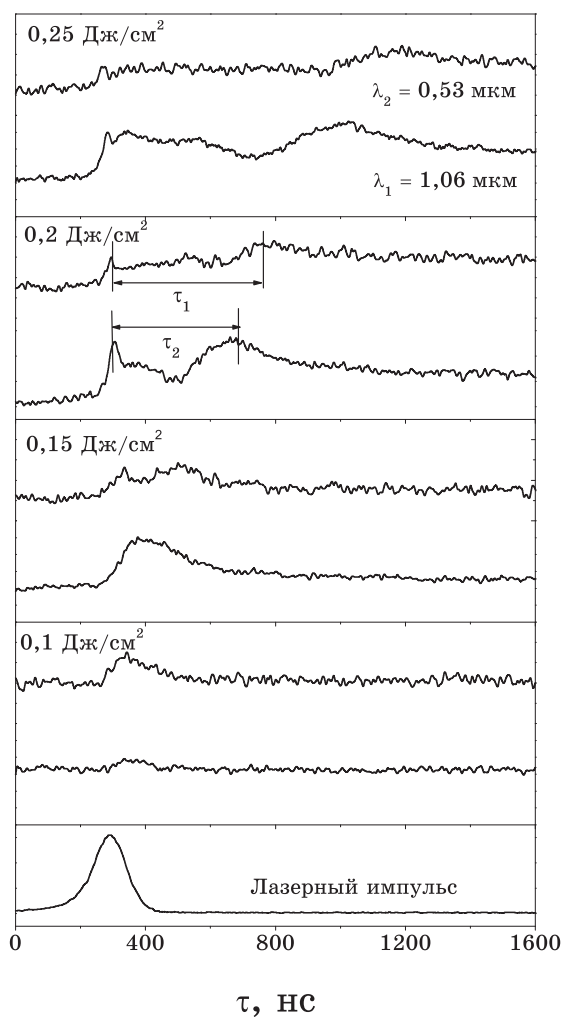
Морфологию поверхности кристаллов до и после облучения исследовали на атомно-силовом микроскопе NanoScope IIIa фирмы Digital Instruments в режиме периодического контакта (Tapping Mode™). Для измерений были применены кремниевые зонды с номинальным радиусом острия ~ 10 нм.

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При лазерном воздействии на кристаллы CdMnTe на осциллограммах отраженного сигнала наблюдаются изменения отражательной способности на обеих длинах волн зондирующего излучения, причем эти изменения более выражены для  $\lambda_1$  (рис. 1). Можно выделить три различных режима лазерного воздействия на CdMnTe для плотностей энергий облучения  $E$  меньших порога разрушения материала. При  $E \approx 0,1$  Дж/см<sup>2</sup> наблюдается возрастание отражательной способности  $R$  на обеих длинах волн зондирующего излучения, которое можно объяснить температурной зависимостью оптических параметров CdMnTe в твердом состоянии. При  $E = 0,15$  Дж/см<sup>2</sup> появляются отличия в характере временной зависимости коэффициента отражения. На  $\lambda_1$  происходит дальнейшее увеличение  $R$ , но на  $\lambda_2$  наблюдается два слабовыраженных максимума. После увеличения  $E$  до 0,2 Дж/см<sup>2</sup>, подобное поведение имеет место для обеих длин волн, причем расстояние между максимумами больше для  $\lambda_2$ . Дальнейшее увеличение плотности энергии от этого значения вплоть до 0,25 Дж/см<sup>2</sup> не меняет характера зависимости  $R(t)$ , а приводит только к увеличению временного промежутка между этими максимумами. Отметим, что во всех рассматриваемых режимах начальные и конечные значения коэффициента отражения совпадают, что свидетельствует об отсутствии разрушения или других значительных изменений поверхности.

Появление двух максимумов во временной зависимости отражательной способности на  $\lambda_2$  указывает на образование жидкой фазы. Изменение зависимости  $R(t)$  при повышении  $E$  до 0,15 Дж/см<sup>2</sup> объясняется плавлением CdMnTe в момент наибольшего нагрева поверхности, когда достигается первый максимум отражения зондирующего излучения. Последующее уменьшение, а затем возрастание  $R$  до второго максимума связано с интерференцией при отражении излучения от поверхности образца и движущейся границы раздела фаз.

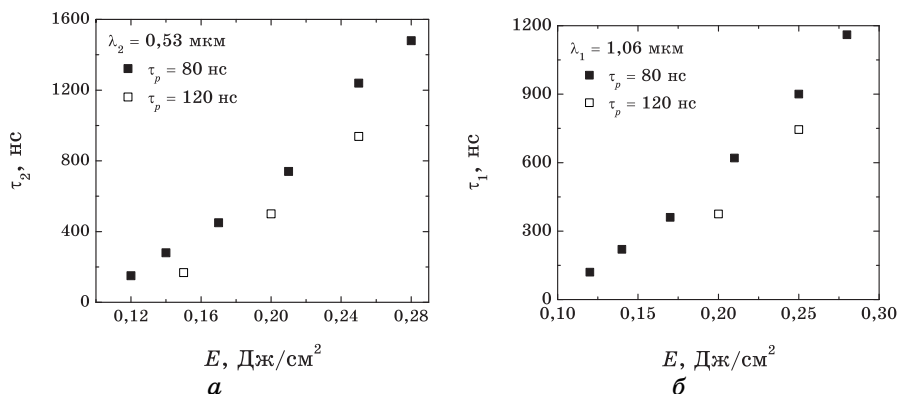
По мере повышения  $E$  возрастает глубина проплавления, время существования расплава и, соответственно, время нестационарно-



**Рис. 1.** Динамика отражательной способности  $R(t)$  образцов CdMnTe при лазерном воздействии.

сти  $R$ . Промежуточный минимум на  $\lambda_1$  вначале плавления не наблюдается, что, по-видимому, связано с более сложной температурной зависимостью оптического поглощения на  $\lambda_1$ , на величину которого, с одной стороны, влияет увеличение поглощения за счет нагрева, а с другой стороны — температурное сужение ширины запрещенной зоны. Таким образом, расстояние между максимумами отражения  $\tau_2$  при  $\lambda_2$  более соответствует времени существования расплава.

Наряду с представленными данными для длительности импульса облучения  $\tau_p = 120$  нс, на рис. 2 приведены результаты измерений



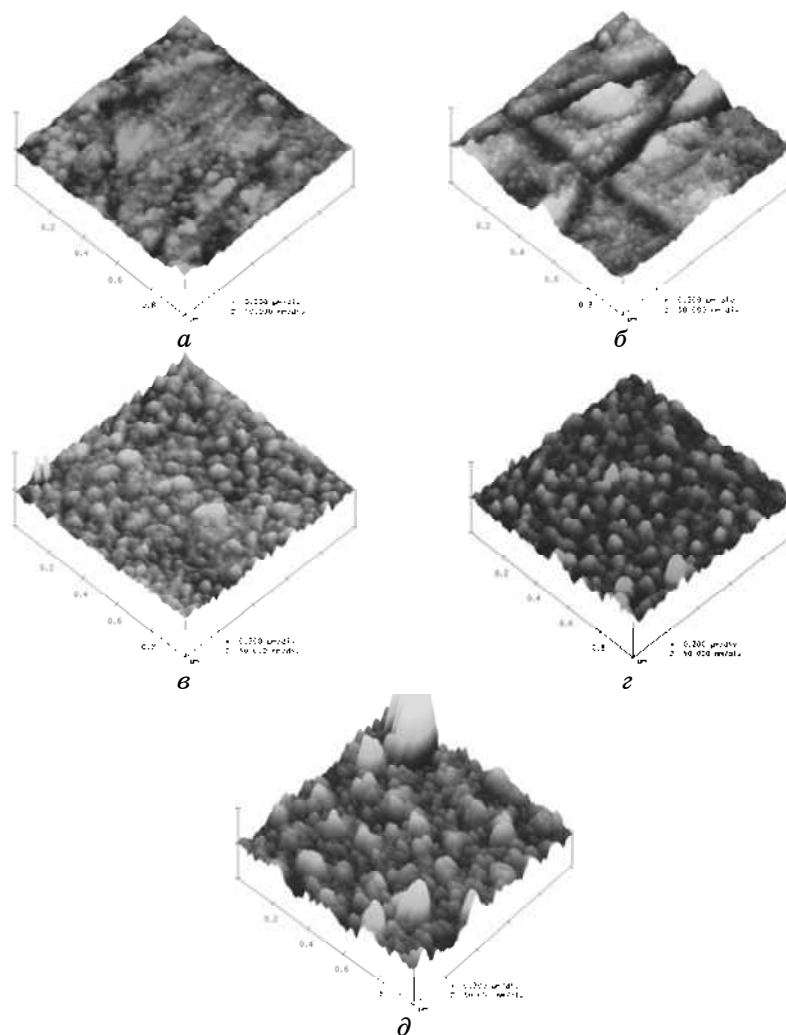
**Рис. 2.** Зависимости  $\tau_1$  и  $\tau_2$  для  $\text{Cd}_{0,96}\text{Mn}_{0,04}\text{Te}$  от плотности энергии облучения при двух длительностях импульса.

на аналогичных образцах, полученные ранее [7] при облучении с  $\tau_p = 80$  нс. Увеличение длительности лазерного воздействия требует большей плотности энергии, необходимой для начала плавления, — с  $0,12$  Дж/см<sup>2</sup> (80 нс) до  $0,15$  Дж/см<sup>2</sup> (120 нс). С увеличением длительности импульса время существования расплава уменьшается при  $E = 0,25$  Дж/см<sup>2</sup> приблизительно на 300 нс.

В условиях наносекундного лазерного облучения зависимости отражательной способности  $\text{CdMnTe}$  на  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  аналогичны наблюдаемым ранее зависимостям в  $\text{CdTe}$  [8], что свидетельствует о том, что плавление  $\text{CdMnTe}$  происходит также по типу «полупроводник–полупроводник».

Как показывает АСМ-исследование поверхности кристаллов  $\text{CdMnTe}$ , лазерно-индуцированные фазовые превращения приводят к возникновению наноразмерного рельефа на поверхности образцов (рис. 3). Исходная поверхность образцов характеризуется среднеарифметической шероховатостью  $R_a \approx 4$  нм (рис. 3, а). При облучении образцов с плотностью энергии  $0,1$  Дж/см<sup>2</sup>, т.е. ниже порога плавления, существенных изменений поверхности не наблюдается (рис. 3, б). Облучение с плотностью энергии  $0,15$  Дж/см<sup>2</sup> приводит к образованию неоднородных бесформенных nanoостровков; шероховатость при этом уменьшается ( $R_a \approx 3,55$  нм) (рис. 3, в). При увеличении  $E$  до  $0,2$  Дж/см<sup>2</sup> происходит дальнейшее уменьшение шероховатости, nanoостровки приобретают куполообразную форму, их распределение по поверхности становится более однородным (рис. 3, г). Дальнейшее увеличение плотности энергии облучения ведет к образованию неоднородных структур и росту шероховатости ( $R_a \approx 10$  нм) (рис. 3, д).

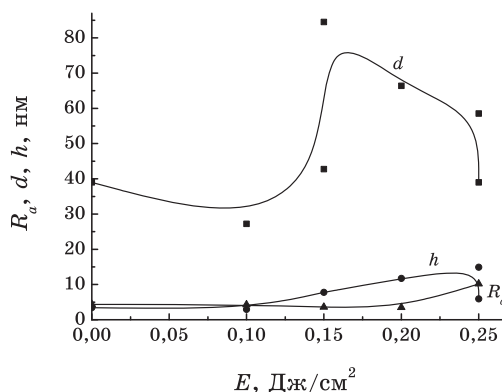
На рисунке 4 приведены изменения характерных параметров островков и шероховатости поверхности образца  $\text{Cd}_{0,96}\text{Mn}_{0,04}\text{Te}$  в за-



**Рис. 3.** АСМ-изображения поверхностей образцов  $\text{Cd}_{0,96}\text{Mn}_{0,04}\text{Te}$  до (а) и после воздействия лазерного излучения с плотностями энергии 0,1 (б), — 0,15 (в), 0,2 (г), 0,25 Дж/см<sup>2</sup> (д).

висимости от плотности энергии лазерного облучения. Из рисунка видно, что зависимости латеральных размеров и высоты островков от плотности энергии лазерного облучения имеют максимумы. Максимальные латеральные размеры наноструктур достигаются в начале плавления поверхности образца.

Таким образом, при облучении поверхности кристаллов  $\text{CdMnTe}$  в определенном энергетическом интервале наблюдается образование наноразмерного рельефа поверхности, происхождение которого



**Рис. 4.** Зависимости латерального размера ( $d$ ) и высоты ( $h$ ) наностроек, а также среднеарифметической шероховатости ( $R_a$ ) поверхности образцов  $Cd_{0.96}Mn_{0.04}Te$  от плотности энергии облучения.

можно объяснить дефектно-деформационным механизмом фазового перехода на поверхности кристаллов [9].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования динамики отражательной способности, проведенного методом оптического зондирования, установлено, что порог лазерно-индуцированного плавления поверхности образцов  $Cd_{0.96}Mn_{0.04}Te$  приближается к  $E = 0,15$  Дж/см<sup>2</sup>. Фазовые превращения, происходящие при лазерном воздействии, обуславливают разную динамику отражения зондирующего излучения от нагреваемой зоны. Причиной этого является образование на короткое время слоистой системы, в которой условия интерференции при отражении зондирующих потоков излучения с  $\lambda_1 = 1,06$  и  $\lambda_2 = 0,53$  мкм существенно различаются. Изменение интенсивности отраженного зондирующего пучка более выражены на  $\lambda_1$ .

Проведенное исследование показывает, что, меняя режимы облучения, можно получать наноструктурированные поверхности с различными размерами характерных параметров островков. При этом наиболее равномерно распределенные по поверхности наностройки получаются при облучении с плотностями энергии несколько выше порога плавления поверхности полупроводникового кристалла  $CdMnTe$ .

### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. Marine, L. Patrone, B. Luk'yanchuk, and M. Sentis, *Appl. Surf. Sci.*, **154**: 345

- (2000).
2. А. Байдуллаева, А. И. Власенко, Л. Ф. Кузан, П. Е. Мозоль, О. С. Литвин, *ФТП*, **39**, № 9: 1064 (2005).
  3. В. И. Емельянов, А. Байдуллаева, А. И. Власенко, Л. Ф. Кузан, П. Е. Мозоль, О. С. Литвин, *Письма в ЖТФ*, **32**, № 16: 90 (2006).
  4. А. Байдуллаева, М. Б. Булах, А. И. Власенко, А. В. Ломовцев, О. С. Литвин, П. Е. Мозоль, *ФТП*, **38**, № 1: 26 (2004).
  5. *Handbook of Optical Constants of Solids* (Ed. E. D. Palik) (Academic Press: 1998), pt. II.
  6. В. Ф. Агекян, *Соросовский образовательный журнал*, **8**, № 2: 85 (2004).
  7. E. I. Gatskevich, G. D. Ivlev, A. I. Rarenko, A. I. Savchuk, V. N. Strebegev, Z. I. Zakharuk, *Appl. Surf. Sci.*, **254**: 993 (2007).
  8. Г. Д. Ивлев, Е. И. Гацкевич, *Приборостроение*, **49**, № 9: 19 (2006).
  9. В. И. Емельянов, *Квантовая электроника*, **28**, № 1: 2 (1999).