

Образование наноразмерных структур на поверхности кристаллов p -CdTe при однократном воздействии импульсом излучения рубинового лазера

© А. Байдуллаева[¶], А.И. Власенко, Л.Ф. Кузан, О.С. Литвин, П.Е. Мозоль

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины, 03028 Киев, Украина

(Получена 10 ноября 2004 г. Принята к печати 7 декабря 2004 г.)

Исследовано образование наноразмерных структур на поверхности кристаллов p -CdTe в зависимости от плотности мощности лазерного излучения при однократном облучении. Установлены оптимальные режимы лазерного облучения кристаллов, при которых образуется однородная структура с периодом 100 нм и с латеральными размерами $\sim (19-20)$ нм и средней высотой $\sim (3.40-9.38)$ нм. Обнаружено, что периодичность проявляется строго в одном из кристаллографических направлений.

1. Введение

В настоящее время исследование процессов формирования наноразмерных структур на поверхности кристаллов при лазерном облучении является одним из наиболее интересных и многообещающих направлений в области технологии полупроводников. Размеры и плотности распределения элементов этих структур сложным образом зависят от локальных температурных эффектов, плотности мощности или дозы облучения, концентрации генерированных при лазерном облучении дефектов, физической природы материала и других факторов.

Образование наноструктур на поверхности кристаллов p -CdTe в зависимости от дозы облучения (при фиксированной интенсивности излучения лазера — от числа импульсов) было изучено нами в [1,2]. Было показано, что основную роль в этом процессе играет эффект накопления. Следовательно, актуальным является выбор плотности энергии одиночного импульса лазерного излучения, который приводил бы к образованию наноразмерных упорядоченных структур на поверхности кристаллов CdTe, что открывает новые возможности для развития современной оптоэлектронной техники. В оптоэлектронике кристаллы CdTe применяются как материал для изготовления работающих при комнатной температуре быстродействующих модуляторов интенсивности световых потоков и в качестве подложечного материала для выращивания слоев CdHgTe. Поэтому получение на поверхности кристаллов CdTe упорядоченных поверхностных структур в дальнейшем, возможно, решило бы и проблемы выращивания наноразмерных слоев CdHgTe.

Цель настоящей работы заключалась в определении минимальной интенсивности одиночного импульса рубинового лазерного излучения, при которой начинается формирование равномерно распределенных наноразмерных элементов на поверхности кристаллов p -CdTe.

2. Методика эксперимента

Объектом исследования были специально не легированные пластинчатые бездислокационные кристаллы CdTe p -типа проводимости ориентации (111), полученные методом синтеза из паров исходных элементов [3]. Толщина образцов составляла ~ 100 мкм.

Облучение кристаллов проводили при комнатной температуре одним импульсом излучения многомодового рубинового лазера, работающего в режиме модулированной добротности с длительностью импульса $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с. Излучение лазера фокусировали в пятно диаметром ~ 1 мм. Для получения однородного лазерного излучения использовали дополнительно кварцевый диффузатр. Интенсивность лазерного излучения (I) изменяли с помощью нейтральных серых фильтров. При изменении интенсивности световое пятно перемещали на ранее не облучавшийся участок поверхности образца.

Морфологию поверхности кристаллов до и после облучения исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NanoScope IIIa фирмы Digital Instruments в режиме периодического контакта (Tapping ModeTM).

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 приведены АСМ-изображения поверхности 1×1 мкм кристаллов p -CdTe в зависимости от плотности мощности излучения лазера. Среднеарифметическая шероховатость поверхности исходного (необлученного) образца составляла ~ 0.075 нм (рис. 1, *a*). В зоне облучения кристаллов с плотностью мощности лазерного излучения $I_1 = 4$ МВт/см² на поверхности образцов появляется островковая пленка Te (рис. 1, *b*), которая смывается в 1 н растворе КОН в метаноле [1,2]. Среднеарифметическая шероховатость поверхности образцов увеличивалась до ~ 0.171 нм. При этом наблюдалось начало формирования рельефной структуры с латеральными размерами $\sim (23-46.87)$ нм и средней высотой ~ 1.30 нм. В зоне лазерного облучения кристаллов с плотностью мощности лазерного излучения

[¶] E-mail: baidulla@yahoo.com

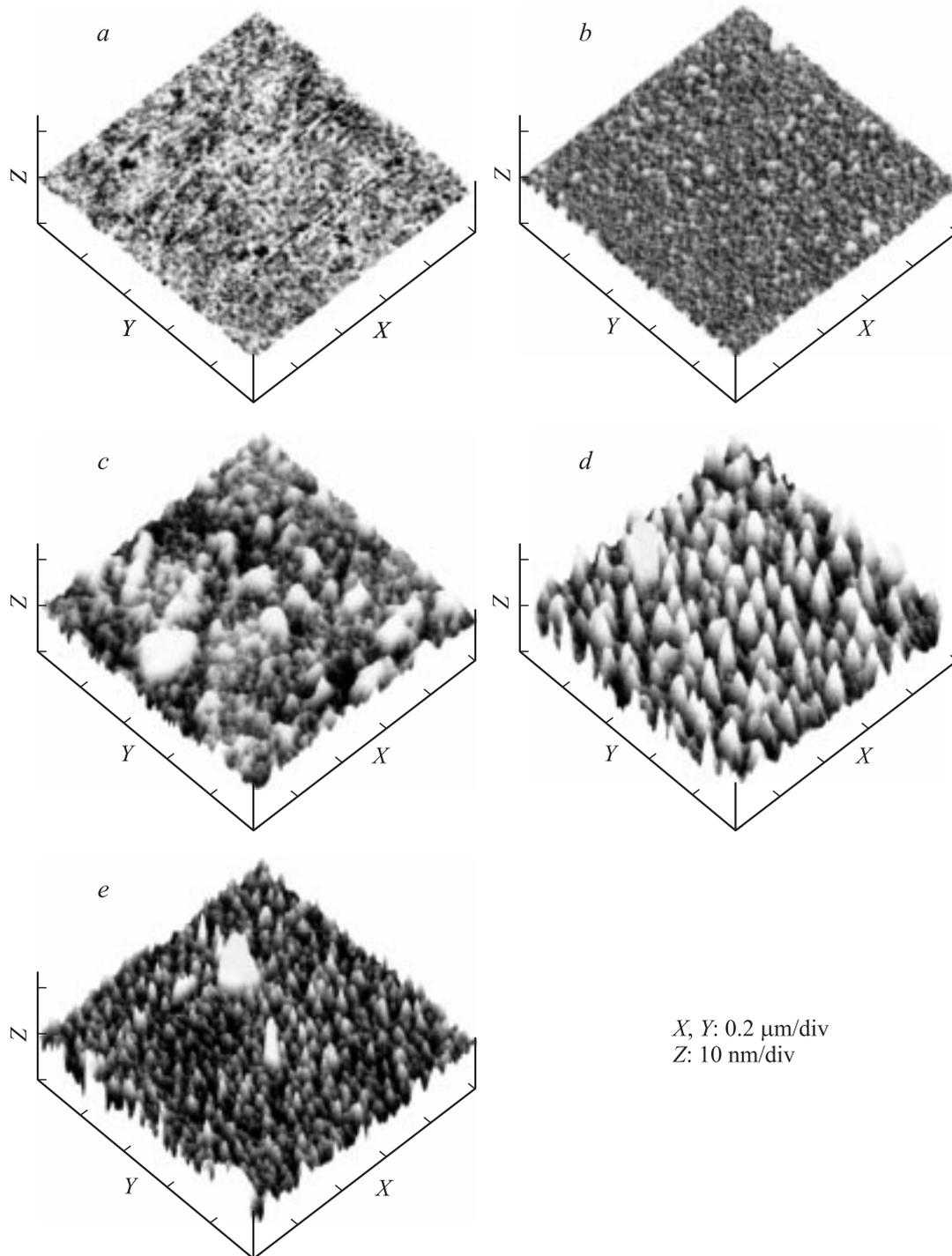


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности кристалла *p*-CdTe до облучения (*a*) и после облучения (*b, c, d, e*) одним импульсом излучения лазера с плотностью мощности I , $\text{МВт}/\text{см}^2$: *b* — 4, *c* — 8, *d* — 12, *e* — 16.

$I_2 = 8 \text{ МВт}/\text{см}^2$ среднеарифметическая шероховатость поверхности составляла $\sim 0.760 \text{ нм}$ (рис. 1, *c*). Образующаяся рельефная структура с латеральными размерами $\sim (27\text{--}132) \text{ нм}$ и средней высотой $\sim (1.84\text{--}4.32) \text{ нм}$ хаотично распределена по поверхности кристалла. Четко сформированные и равномерно распределенные по плотности структурные элементы с латеральными размера-

ми $\sim (19\text{--}20) \text{ нм}$ и средней высотой $\sim (3.40\text{--}9.38) \text{ нм}$ наблюдались в зоне лазерного облучения с плотностью мощности излучения лазера $I_3 = 12 \text{ МВт}/\text{см}^2$ (рис. 1, *d*). Нанокластеры имеют куполообразную форму, их плотность составляет $1.8 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Среднеарифметическая шероховатость поверхности после такой обработки становится 1.583 нм . При этом наблюдается упорядочение

наноструктурных элементов вдоль определенных кристаллографических направлений с образованием периодического рельефа поверхности. При увеличении интенсивности облучения до $I_4 = 16 \text{ МВт/см}^2$ происходит увеличение плотности наноструктур. Латеральные размеры кластеров составляли $\sim (19\text{--}23) \text{ нм}$, а их высота $\sim (2.0\text{--}5.7) \text{ нм}$ (рис. 1, *e*). Среднеарифметическая шероховатость поверхности составляла $\sim 0.870 \text{ нм}$.

На рис. 2 показаны АСМ-изображения поверхности $5 \times 5 \text{ мкм}$ и фурье-преобразование облученного кристалла *p*-CdTe. Преобразование Фурье показало, что нанокластеры образуют на поверхности кристалла однородную структуру с периодом 100 нм только в зоне

лазерного облучения с плотностью мощности излучения лазера $I_3 = 12 \text{ МВт/см}^2$ (рис. 2, *b*). При этом периодичность наноструктур проявляется преимущественно в одном из кристаллографических направлений (косая линия на рис. 2, *a*).

АСМ-исследование показало, что морфология поверхности (размеры кластеров и плотность их распределения) после нескольких суток хранения на воздухе при комнатной температуре не менялась.

4. Обсуждение

Наноразмерная кластеризация (диаметр кластеров 20 нм и высота 3 нм) наблюдалась на поверхности слоя CdTe, выращенного атомной эпитаксией [4]. Формирование нанокластеров авторы [4] объяснили образованием TeO_2 в результате окисления после хранения на воздухе. Однако наши результаты отличаются тем, что, во-первых, размеры и плотность структурных элементов не менялись после выдержки на воздухе, во-вторых, структура, показанная на рис. 1, *d*, не наблюдалась на поверхности кристаллов CdTe с пленкой Te даже через несколько дней. Отметим, что окисление Te происходит за 3–4 суток [5]. Проведенные нами измерения спектров комбинационного рассеяния света показали, что в области частот $500\text{--}800 \text{ см}^{-1}$ полосы TeO_2 и CdTeO_3 отсутствуют [2]. Исходя из этого, а также учитывая, что при облучении CdTe с поверхности кристалла происходит испарение более летучей компоненты — атомов Cd можно предположить, что в нашем случае наноразмерные структуры состоят из нестехиометрического соединения $\text{Cd}_{1-y}\text{Te}_y$, образующегося при лазерном облучении. Образование тонкого слоя нестехиометрического соединения $\text{Cd}_{1-y}\text{Te}_y$ в приповерхностной области кристалла CdTe при облучении импульсами излучения рубинового лазера нами было показано в [6]. Образование такого состава обусловлено тем, что при облучении CdTe наносекундными лазерными импульсами происходит преимущественное удаление атомов кадмия из приповерхностных слоев кристалла. Таким образом, приповерхностный слой материала обедняется кадмием, а на поверхности кристалла образуется пленка поликристаллического теллура. Под пленкой теллура образуется тонкий ($12\text{--}15 \text{ нм}$) слой нестехиометрического соединения $\text{Cd}_{1-y}\text{Te}_y$. Отметим, что при воздействии на кристалл CdTe излучением с плотностью мощности $I_3 = 12 \text{ МВт/см}^2$ пленка Te исчезает, что связано, по-видимому, с ее растворением в жидкой фазе CdTe.

При воздействии на CdTe излучением наносекундной длительности происходит не только испарение компонентов кристалла, но и изменение дефектной структуры приповерхностной области кристалла [1,2,6]. Изменение дефектной структуры существенно зависит от плотности мощности лазерного излучения. С ростом плотности мощности излучения лазера в кристалле растет концентрация дефектов (преимущественно V_{Cd} и V_{Te}), кото-

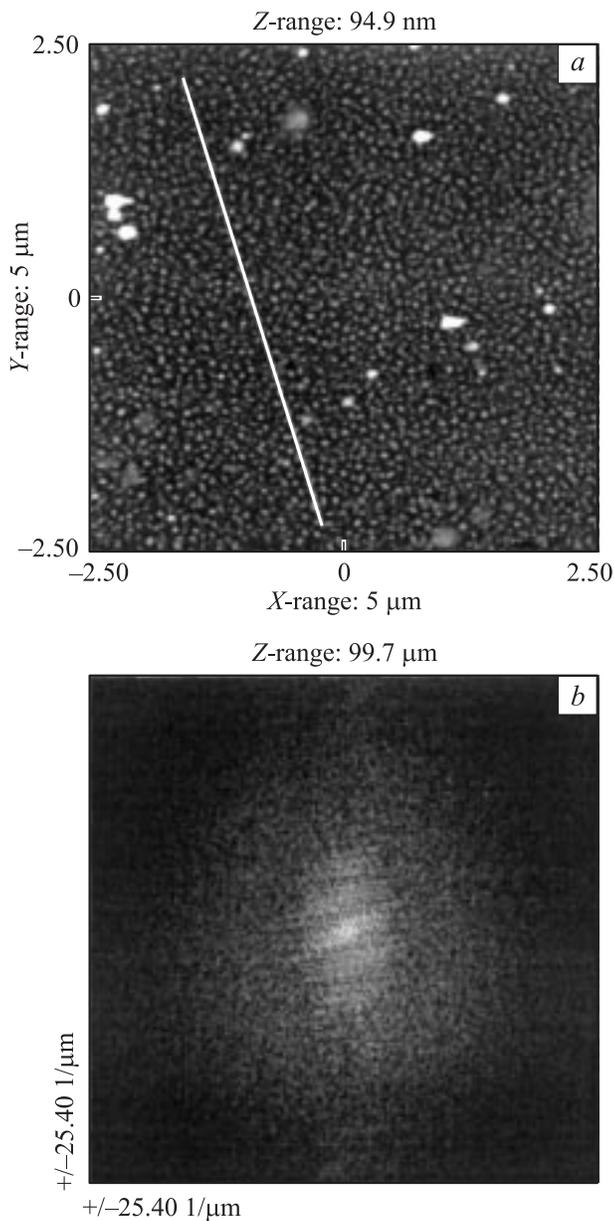


Рис. 2. АСМ-изображение (*a*) и фурье-преобразование изображения (*b*) поверхности кристалла *p*-CdTe после облучения одним импульсом излучения лазера с $I_3 = 12 \text{ МВт/см}^2$.

рая является внешне контролируемым параметром [7,8]. Оценка концентрации генерированных дефектов при лазерном облучении кристаллов CdTe по формуле, приведенной в работе [8], дает величину $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует первому критическому значению, обуславливающему экранировку упругого взаимодействия точечных дефектов. При этом происходит образование кластеров дефектов нанометровых размеров как фазовый переход второго рода [7].

5. Заключение

Таким образом, облучение кристаллов *p*-CdTe одним лазерным импульсом наносекундной длительности существенно модифицирует его поверхностную структуру. Анализ экспериментальных данных позволил установить оптимальную величину интенсивности лазерного излучения, при которой на поверхности кристаллов CdTe образуются периодические наноструктуры с минимальными латеральными размерами и периодом 100 нм.

Список литературы

- [1] А. Байдуллаева, М.Б. Булах, А.И. Власенко, А.В. Ломовцев, П.Е. Мозоль. ФТП, **38** (1), 26 (2004).
- [2] В.В. Артамонов, А. Байдуллаева, А.И. Власенко, Н.В. Вуйчик, О.С. Литвин, П.Е. Мозоль, В.В. Стрельчук. ФТТ, **46** (8), 1489 (2004).
- [3] Б.М. Булах, С.М. Красикова. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **9**, 1112 (1973).
- [4] L. Marsal, H. Mariette, Y. Samson, J.L. Rouviere, E. Picard. Appl. Phys. Lett., **73**, 2974 (1998).
- [5] А.К. Гутаковский, В.М. Елисеев, Р.И. Любинская, Н.В. Лях, А.С. Мардезов, И.П. Петренко, Л.Д. Покровский, И.В. Сабина, Ю.Г. Сидоров, В.А. Швец. Поверхность. Физика, химия, механика, № 9, 80 (1988).
- [6] В.Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, А.И. Власенко, С.И. Горбань, Б.К. Даулетмуратов, П.Е. Мозоль. ФТП, **27** (10), 1618 (1993).
- [7] В.И. Емельянов. ФТТ, **43** (4), 637 (2001).
- [8] Б.Л. Володин, Б.И. Емельянов. Изв. АН СССР. Сер. физ., **55** (7), 1274 (1991).

Редактор Л.В. Шаронова

Formation of nanosize structures on a surface of *p*-CdTe crystals due to the ruby laser single pulse irradiation

A. Baidullaeva, A.V. Vlasenko, L.F. Cuzan, O.S. Litvin, P.E. Mozol'

V. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

Abstract Formation of nanosize structures on the surface of the *p*-CdTe crystals has been investigated as a function of the power density of the laser irradiation under a single pulse.