

Динамика развития поверхностных структур в кристаллах p -CdTe при облучении импульсным лазерным излучением

© А. Байдуллаева[¶], М.Б. Булах, А.И. Власенко, А.В. Ломовцев, П.Е. Мозоль

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

(Получена 1 апреля 2003 г. Принята к печати 29 апреля 2003 г.)

Исследована динамика модификации поверхности кристаллов p -CdTe ориентации (111) под действием импульсного излучения рубинового лазера ($\hbar\omega = 1.78$ эВ) наносекундной длительности из области фундаментального поглощения света. Показано, что в зависимости от дозы облучения морфология поверхности меняется в такой последовательности: появление пленки теллура, рост плотности дислокаций под пленкой теллура, образование упорядоченных квазипериодических структур как микронных, так и нанометровых размеров. Характер распределения и размеры структур зависят от дозы лазерного облучения.

1. Введение

Лазерная модификация полупроводников является перспективным методом создания современных функциональных элементов для опто- и микроэлектроники. Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников может вызвать формирование на ней структур различной морфологии. В связи с этим в последнее время активно развивается новый подход к управлению свойствами полупроводников, основанный на формировании в полупроводниковой матрице низкоразмерных структур, в состав которых могут входить собственные точечные и протяженные дефекты кристаллической решетки, а также атомы вводимых примесей.

В отличие от других технологий получения низкоразмерных структур, например из газовой или жидкой фазы, в предлагаемой работе их образование происходит в кристаллической решетке полупроводника, играющей роль матрицы и оказывающей существенное влияние на все стадии формирования структур.

Перспективность рассматриваемого направления работ требует дальнейшего экспериментального и теоретического исследования процессов формирования низкоразмерных структур. В связи с этим в данной работе исследована динамика структурных изменений поверхности кристаллов p -CdTe и формирование в них низкоразмерных структур под действием импульсного лазерного излучения. Исследовали специально не легированные пластинчатые бездислокационные ($N_d \approx 10^2 \text{ см}^{-2}$) кристаллы CdTe p -типа ориентации (111), полученные методом синтеза из паров исходных элементов [1]. Толщина образцов составляла 100 мкм. Облучение кристаллов проводили при комнатной температуре излучением рубинового лазера, работающего в режиме модулированной добротности, длительностью импульса $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ с. Морфологию поверхности кристаллов до и после облучения исследовали на оптическом микроскопе МИ-4 и на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NanoScope IIIa фирмы Digital Instruments в режиме

периодического контакта (tapping mode — ТМ). Для измерений в АСМ были применены кремниевые зонды с номинальным радиусом острия ~ 10 нм.

2. Экспериментальные результаты

При облучении кристаллов CdTe излучением лазера плотностью мощности $I = 2 \text{ МВт/см}^2$ дозой $D_1 = 0.08 \text{ Дж/см}^2$ (где $D = IN\tau$, N — число импульсов, τ — длительность импульса излучения лазера) на поверхности образца появляется островковая пленка Те (рис. 1, *a*). Непосредственно после облучения пленка Те имеет аморфную структуру, которая со временем кристаллизуется [2]. Образовавшуюся после лазерного облучения пленку Те смывали в 1н растворе КОН в метаноле. Под пленкой Те формируется насыщенная дислокациями область глубиной $\sim 3\text{--}5$ мкм, которая выявляется селективным травлением. Доза облучения, при которой образуется пленка Те ($D_1 = 0.08 \text{ Дж/см}^2$), совпадает с началом формирования дислокаций,

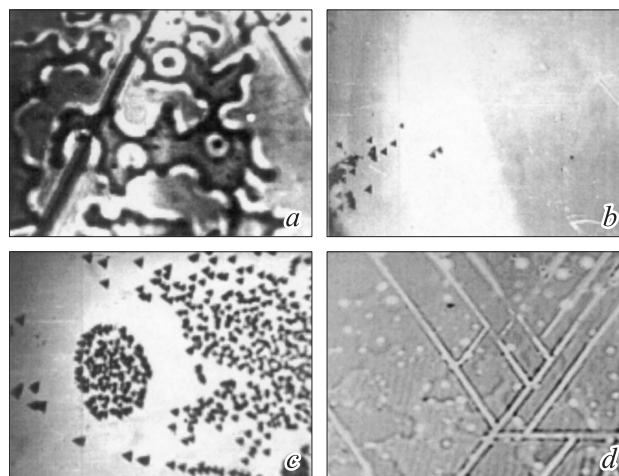


Рис. 1. Микрофотографии поверхности кристалла p -CdTe (111), облученного импульсами излучения рубинового лазера: *a* — появление пленки Те островкового характера; *b*, *c* и *d* — после селективного травления образца.

[¶] E-mail: baidulla@yahoo.com

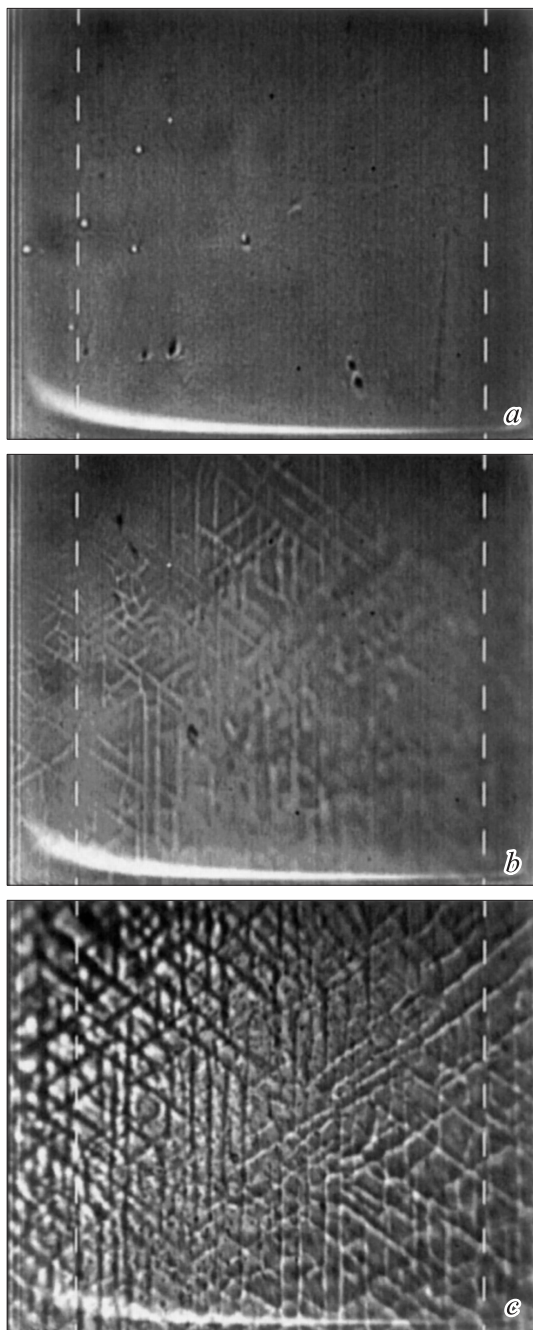


Рис. 2. Упорядоченные структуры дислокаций на поверхности кристалла p -CdTe (111) при разных дозах облучения: *a* — до облучения, *b* — 0.32 Дж/см², *c* — 0.8 Дж/см².

распределение плотности дислокаций имеет случайный характер (рис. 1, *b*). Увеличение дозы облучения до $D_2 = 0.16$ Дж/см² приводит к увеличению плотности дислокаций до $N_d = 7 \cdot 10^3$ см⁻², а при дозе $D_3 = 0.32$ Дж/см² начинают формироваться отдельные (или разрозненные) элементы дислокационной сетки (рис. 1, *c, d*). Аналогичная динамика структурных изменений поверхности наблюдается при такой же дозе облучения (D_3), набранной меньшим количеством

лазерных импульсов более высокой плотности мощности излучения (не превышающей порога разрушения или плавления материала) (рис. 2, *b*). Дальнейшее увеличение дозы облучения до $D_4 = 0.8$ Дж/см² приводит к образованию на поверхности кристалла дислокационной сетки, звенья которой упорядочены и ориентированы под углом 120° друг к другу (рис. 2, *c*).

Исследования этих образцов на АСМ показали, что исходная поверхность кристалла является атомарно-гладкой со среднеарифметической шероховатостью $R_a \approx 0.056$ нм, а после облучения на ней образуются однородно распределенные островки нанометровых размеров. На рис. 3, *a, b* приведено АСМ изображение фрагмента (20 × 20 мкм) поверхности кристаллов p -CdTe ориентации (111) после лазерного облучения дозами D_3 и D_4 . Линейные размеры островков варьируются в пределах от 25 до 350 нм, а их высота изменяется в пределах от 1 до 17 нм в зависимости от дозы облучения (рис. 3, *c, d*).

На рис. 3, *c* представлено АСМ изображение фрагмента (1 × 1 мкм) поверхности после облучения дозой D_3 , на котором наблюдаются квазипериодические островки с линейными размерами ~125–350 нм и высотой ~2 нм. С увеличением дозы облучения до D_4 структура становится более четкой: внутри крупных островков появляются мелкие „холмики“ с линейными размерами ~25–30 нм. При этом высота островков увеличивается до 17 нм (рис. 3, *d*).

3. Обсуждение результатов

Одной из причин образования дислокаций следует считать появление неоднородных термических деформаций в приповерхностных слоях кристалла, разогретых лазерным излучением до перехода в пластическое состояние. При облучении кристаллов CdTe излучением рубинового лазера (сильное поверхностное поглощение $K \approx 10^5$ см⁻¹) происходит разогрев поверхности до $T \approx 700^\circ\text{C}$ [3]. Для сравнения, температура плавления CdTe $T_m = 1092^\circ\text{C}$. Этот нагрев за время действия импульса лазерного излучения создает термонапряжение в приповерхностном слое кристалла, в результате которого на поверхности кристалла генерируются дислокации [4]. Таким образом, на границе разогретого приповерхностного слоя и „холодного“ объема следует ожидать возникновения деформаций и образования хаотически расположенных дислокационных петель с плотностью, зависящей от градиента температур и, следовательно, от плотности излучения. Зарождение дислокаций в первую очередь происходит на концентраторах упругих напряжений, где поглощательная способность может увеличиваться. Наибольшее изменение коэффициента поглощения происходит в окрестности крупных дефектов — включений, пор, дислокаций и микротрещин, что ведет к неконтролируемому изменению температуры в этих областях в процессе лазерного облучения и,

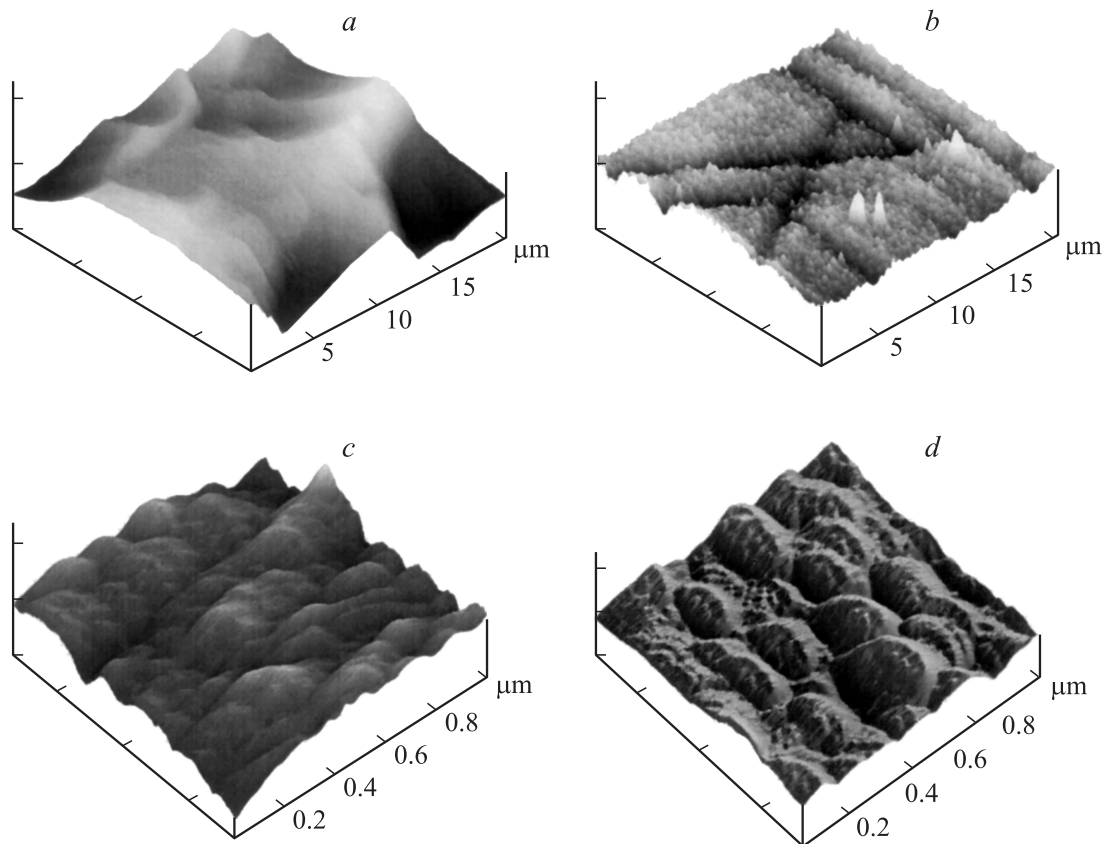


Рис. 3. Атомно-силовая микроскопия поверхности кристалла p -CdTe (111) при разных дозах облучения: a, b — 0.32 Дж/см^2 , c, d — 0.8 Дж/см^2 . Масштаб a, b : ось x — 5 мкм/дел. , ось z — 200 нм/дел. ; c, d : ось x — 0.2 мкм/дел. , ось z — 50 нм/дел.

как следствие, к неоднородному разогреву поверхности кристалла. Кроме того, в силу различных физико-технологических факторов для кристаллов CdTe характерно наличие включений атомов Cd и Te. Поскольку температуры плавления Cd (312°C) и Te (450°C) намного ниже, чем температура плавления CdTe (1092°C), уже при малой плотности мощности лазерного излучения может происходить их плавление и, возможно, испарение. При этом приповерхностные слои кристалла могут дополнительно деформироваться, что приводит к генерации избыточных дислокаций. Отметим, что при увеличении числа импульсов излучения лазера с плотностью энергии ниже порога разрушения наблюдается эффект накопления, при котором плотность дислокаций увеличивается. Крутообразное скопление дислокаций может быть связано с геттерированием дислокаций в полях упругих напряжений к местам нарушений стехиометрии кристаллической структуры (рис. 1, c).

Также следует отметить, что в процесс образования дислокаций вносят вклад поверхностная и ударная волны, которые возникают при лазерном импульсном облучении кристаллов [5,6]. При их воздействии образуется большое количество избыточных вакансий, которые вызывают дополнительную деформацию среды. Возникший упругодеформированный слой резко стимулирует

скорость диффузии вакансий за счет „восходящей“ диффузии, в результате которой вакансии локализуются в образованных ударной волной областях сжатия, образуя кластеры [5]. В зависимости от числа вакансий кластеры принимают форму сферы либо диска моноатомной толщины, т.е. дислокационной петли. Поэтому появление дислокаций на поверхности образца, возможно, обусловлено совокупным влиянием нескольких процессов, возникающих при лазерном облучении кристалла: возникновение термонапряжения, поверхностная и ударная волны. Поле дислокаций может стать неустойчивым по отношению к переходу в пространственно упорядоченное состояние [7]. При превышении определенной критической плотности дислокаций они испытывают фазовый переход в упорядоченное состояние, обусловленное их самосогласованным взаимодействием с деформацией.

Согласно известным в настоящее время литературным данным, упорядочение дислокационно-деформационных неустойчивостей при лазерном облучении кристаллов зависит от их кристаллографической ориентации. Упорядочение дислокационно-деформационных неустойчивостей при облучении пластин Si (111) миллисекундными импульсами неодимового лазера авторы [8] связывали с перераспределением дислокаций между различными атомными плоскостями за счет

деформационно-индуцированного дрейфа вакансий. Авторы этой работы считали, что процесс формирования поверхностных структур происходит в твердой фазе и образование регулярных структур при переходе кремния в пластическое состояние объясняли появлением участков локального плавления. При этом, согласно теории, описанной в [9], на поверхности кристалла должны наблюдаться решетки, образующие равносторонний треугольник со значением периода решеток $d \approx 10^{-4}$ см, оцененным теоретически и подтвержденным экспериментально [7,8]. Можно предположить, что в кристаллах CdTe (111) проявляется такой же механизм упорядочения дислокационных структур. Но в случае CdTe (111) линейные размеры образующихся структур зависят от плотности мощности излучения лазера или дозы облучения и относятся к микро- и нанодиапазонам, что намного меньше, чем в случае Si. Образование структур микронных размеров при облучении кристаллов CdTe, по-видимому, может быть обусловлено вышеописанным механизмом самоорганизации дефектов (рис. 2, с).

Образование же квазипериодических структур нанометровых размеров, возможно, следует рассматривать с точки зрения роста концентрации и преобразования систем точечных дефектов [9]. При образовании нанометровых периодических структур авторами этой работы предлагаются три этапа самоорганизации точечных дефектов, вводимых в твердое тело при лазерном облучении. С ростом плотности мощности излучения лазера (или дозы облучения) в кристалле растет пространственно однородная концентрация дефектов, которая является внешне контролируемым параметром. На первом этапе, когда пространственное распределение дефектов остается однородным, самоорганизации дефектов не происходит. Затем, при достижении критического значения пространственно однородной концентрации дефектов, образуются симметричные кластеры дефектов, захваченных в самосогласованные и симметричные деформационные ямы, т. е. происходят процессы самоорганизации. Размеры этих кластеров лежат в нанометровом диапазоне. Далее, после достижения следующего критического значения пространственно однородной концентрации дефектов, образуется сильно ангармоническая периодическая структура, размеры которой тоже лежат в нанометровом диапазоне. В случае p -CdTe (111) образование нанометровой структуры, возможно, связано с таким механизмом самоорганизации дефектов.

Таким образом, облучение образцов p -CdTe (111) импульсами излучения рубинового лазера наносекундной длительности приводит к существенному изменению поверхности кристалла. В зависимости от дозы облучения морфология поверхности меняется в такой последовательности: появления пленки теллура, рост плотности дислокаций, образование упорядоченных квазипериодических структур как микронных, так и нанометровых размеров. Исследование на АСМ показало, что после лазерного облучения образцов CdTe дозой D_3 на их поверхности появляются квазипериодические островки с

линейными размерами ~ 125 – 350 нм и высотой ~ 2 нм, а после облучения дозой D_4 внутри крупных островков появляются мелкие „холмики“ с линейными размерами ~ 25 – 30 нм. При увеличении дозы высота островков увеличивается до 17 нм.

Авторы выражают благодарность ст. науч. сотр. ИФН НАН Украины канд. физ.-мат. наук П.М. Литвину за проведение исследования образцов на атомно-силовом микроскопе.

Список литературы

- [1] Б.М. Булах, С.М. Красикова. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **9**, 1112 (1973).
- [2] В.В. Артамонов, М.Я. Валах, В.В. Стрельчук, А. Байдуллаева, П.Е. Мозоль. ЖПС, **48**, 990 (1988).
- [3] В.В. Апаллонов, А.М. Прохоров, В.Ю. Хомич, С.А. Четкин. Квант. электрон., **9**, 343 (1982).
- [4] Ч. Киттель. *Введение в физику твердого тела* (М., Наука, 1978).
- [5] А. Байдуллаева, А.И. Власенко, Б.Л. Горковенко, А.В. Ломовцев, П.Е. Мозоль. ФТП, **34**, 443 (2000).
- [6] А. Байдуллаева, А.И. Власенко, Э.И. Кузнецов, А.В. Ломовцев, П.Е. Мозоль, А.Б. Смирнов. ФТП, **35**, 960 (2001).
- [7] Б.Л. Володин, Б.И. Емельянов. Изв. АН СССР. Сер. физ., **55**, 1274 (1991).
- [8] А.Ф. Банишев, Б.Л. Володин, Б.И. Емельянов, К.С. Мерзляков. ФТТ, **32**, 2529 (1990).
- [9] Б.И. Емельянов, И.М. Панин. ФТТ, **39**, 2059 (1997).

Редактор Л.В. Беляков

Dynamics of surface structure evolution in p -CdTe crystals under the pulse laser irradiation

A. Baidullaeva, M.B. Bulakh, A.I. Vlasenko, A.V. Lomovtsev, P.E. Mosol'

Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

Abstract In this paper, the dynamics of surface modification of p -CdTe (111) has been investigated under the ruby laser radiation ($\hbar\omega = 1.78$ eV) of nanosecond duration from the fundamental absorption area of crystals. It has been shown that surface morphology as a function of the irradiation dose the following: appearance of the tellurium film on the crystal surface, the increase of dislocation density under the Te film, and appearance of ordered quasi-periodic structures of micron sizes and areas of nanometer sizes. The character of structures distribution and their size depend on the laser irradiation dose.