

Исследование лазерно-индуцированного дефектообразования в кристаллах CdTe методом резерфордовского обратного рассеяния

© Л.А. Головань, П.К. Кашкаров, В.М. Лакеенков*, Ю.Н. Сосновских, В.Ю. Тимошенко, Н.Г. Чеченин

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

*Государственный институт редких металлов,
109017 Москва, Россия

(Поступила в Редакцию 25 июня 1997 г.)

Методом резерфордовского обратного рассеяния изучены процессы образования дефектов в приповерхностном слое CdTe при импульсном лазерном облучении. Установлено, что формирование центров рассеяния происходит только при энергиях лазерного импульса, превышающих порог плавления поверхности образца. Определены пространственные распределения Cd и Te, а также структурных дефектов в облученном слое. Полученные данные интерпретируются с учетом интенсивного испарения одного из компонентов (Cd) материала.

Теллурид кадмия является важным материалом современной оптоэлектроники, применяемым для изготовления солнечных элементов, электрооптических модуляторов, приемников жесткого излучения, а также в качестве подложки для роста слоев твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$. К числу особенностей данного материала относятся сравнительно низкие величины теплопроводности и теплоемкости, а также высокая летучесть компонентов [1]. Одним из перспективных методов направленной модификации электрических и рекомбинационных свойств бинарных соединений представляется импульсное лазерное облучение (ИЛО), отличающееся локальностью и кратковременностью воздействия на полупроводник [2,3]. Исследованию ИЛО CdTe и вызванной им модификации свойств данного полупроводника посвящено лишь несколько работ [4–10]. Наиболее изучена модификация состава приповерхностных слоев в результате лазерного воздействия. Так, в [4–7] сообщается об обогащении приповерхностного слоя Te и обеднении его Cd. Однако данные об изменении состава и дефектообразовании, представленные в [4–8], не позволяют сделать однозначного вывода о механизмах лазерно-индуцированной модификации, поскольку авторами не проводилось различия между случаем, когда ИЛО вызывает фазовый переход плавления на поверхности, и случаем лазерного воздействия с энергией меньше порога плавления. Кроме того, вывод о возникновении дефектов делался на основании исследований электронных свойств облученных кристаллов, например, методами фотолюминесценции и фотопроводимости [5–10]. Одним из способов прямого определения концентрации и распределения дефектов в приповерхностной области является метод резерфордовского обратного рассеяния (РОР) [11]. В настоящей работе впервые поставлена задача использовать данный метод для изучения лазерно-индуцированной модификации приповерхностного слоя CdTe. Отметим, что величина порога плавления CdTe W_m была определена нами ранее в расчетах [9] и экспериментально [10]. При облучении наносекундными импульсами рубинового лазера значение W_m составило 40 mJ/cm^2 , что в несколько раз меньше величин

порогов плавления для большинства полупроводников групп A^{IV} и $A^{III}B^V$ [3].

1. Методика эксперимента

Измерения выполнялись на монокристаллах CdTe с ориентацией рабочей грани (111). Спектры РОР регистрировались на установке, созданной на базе ускорителя Ван-дер-Граафа НИИЯФ МГУ. Использовался пучок ионов He^+ с энергией 1.4 MeV. ИЛО проводилось моноимпульсами рубинового лазера ОГМ-20 ($\lambda = 694 \text{ nm}$, $\tau = 20 \text{ ns}$). Для получения неполяризованного однородного по пространству излучения использовался гомогенизатор [3]. ИЛО осуществлялось в вакууме при $T = 300 \text{ K}$, спектры РОР снимались *in situ*, непосредственно сразу после лазерного воздействия. Подробное описание установки приведено в [12]. Спектры РОР измерялись при случайном и осевом падении ионного пучка. Распределение компонентов было получено при помощи компьютерного анализа формы спектра с использованием программы RUMP [13].

Известно, что спектры РОР в режиме каналирования содержат информацию о концентрации и распределении дефектов. Профиль распределения относительной концентрации точечных дефектов по глубине может быть получен из формулы [11]

$$n_d(z) = \frac{N_d(z)}{N} = \frac{\chi_d(z) - \chi_r(z)}{1 - \chi_r(z)}, \quad (1)$$

где N_d и N — концентрации дефектов и регулярных атомов в соответствующей подрешетке, χ_d — выход РОР при ориентированном падении пучка ионов от облученного кристалла, нормированный на выход РОР при неориентированном падении, $\chi_r(z) = \chi_v(z) + F(z)$ — вклад неканализованной части ионов, движущихся в облученном кристалле, $\chi_v(z)$ — нормированный выход РОР для необлученного кристалла при ориентированном падении ионного пучка. Функция деканализации $F(z)$ рассчитывалась в приближении однократного рассеяния, правомерность использования которого была подтверждена последующей проверкой (см. [11]).

2. Экспериментальные результаты

Вначале рассмотрим изменение состава приповерхностных слоев CdTe, проявляющиеся в вариациях спектров POP, полученных при случайном падении ионов. В эксперименте изменение формы этих спектров фиксировалось при $W \geq 100 \text{ mJ/cm}^2$. Спектры POP для исходного образца и для образца, подвергнутого облучению с плотностью энергии $W = 120 \text{ mJ/cm}^2$, полученные при неориентированном падении ионного пучка, приведены на рис. 1. Ввиду близости масс Cd и Te вклады этих компонентов в спектр POP необлученного кристалла практически не удалось разрешить. В результате ИЛО становилось заметным обогащение приповерхностных слоев образца теллуrom и обеднение их кадмием. Данный результат представляется весьма закономерным, если учесть, что давление паров кадмия при температуре плавления заметно превосходит давление паров теллура при той же температуре (7 и 0.2 atm соответственно [1]) и, следовательно, при ИЛО происходит преимущественное испарение Cd из расплава. Полученное в результате анализа распределение относительных концентраций компонентов приведено на врезке к рис. 1. Как видно из этого рисунка, по мере увеличения глубины z относительная концентрация Te в облученном кристалле падает, а относительная концентрация Cd возрастает, выходя на постоянные уровни соответствующих концентраций компонентов в необлученном кристалле CdTe. Таким образом, толщина приповерхностного слоя CdTe с измененным в результате ИЛО составом равна $\approx 10 \text{ nm}$.

Спектры POP CdTe в режиме каналирования приведены на рис. 2. Как видно из этого рисунка, воздействие лазерного импульса с $W \approx W_m$ не приводило к изменениям в них. Модификация спектров каналирования начиналась

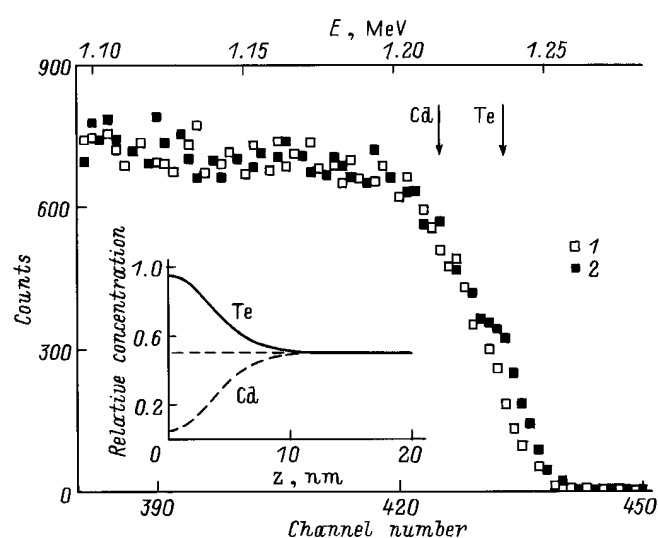


Рис. 1. Спектры POP при неориентированном падении ионного пучка для необлученного (1) и облученного с $W = 120 \text{ mJ/cm}^2$ (2) образца CdTe. На врезке — профиль распределения концентрации компонентов CdTe после ИЛО с $W = 120 \text{ mJ/cm}^2$ (слошная линия — Te, штриховая — Cd).

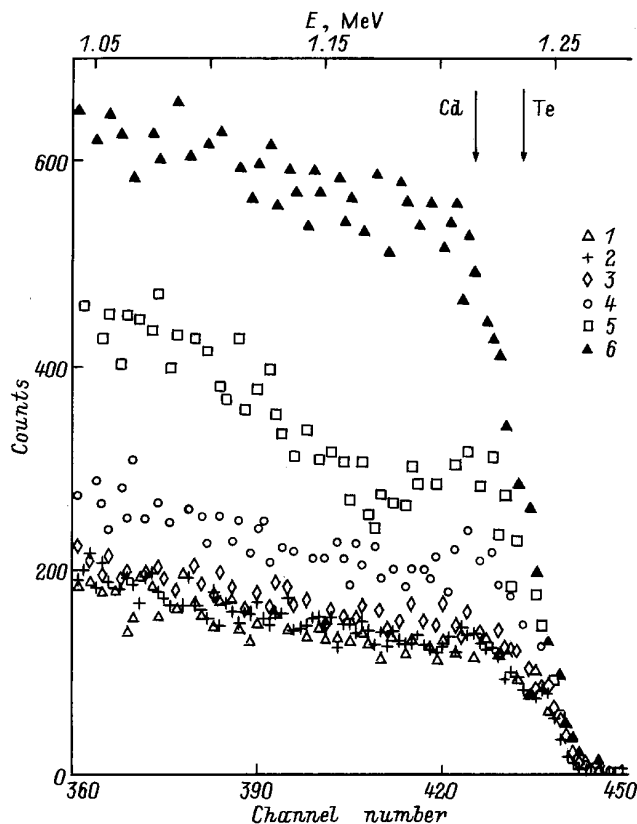


Рис. 2. Осевые спектры POP CdTe до облучения (1) и после ИЛО с $W = 40$ (2), 50 (3), 103 (4) и 143 mJ/cm^2 (5). Случайный выход POP CdTe изображен темными треугольниками (6).

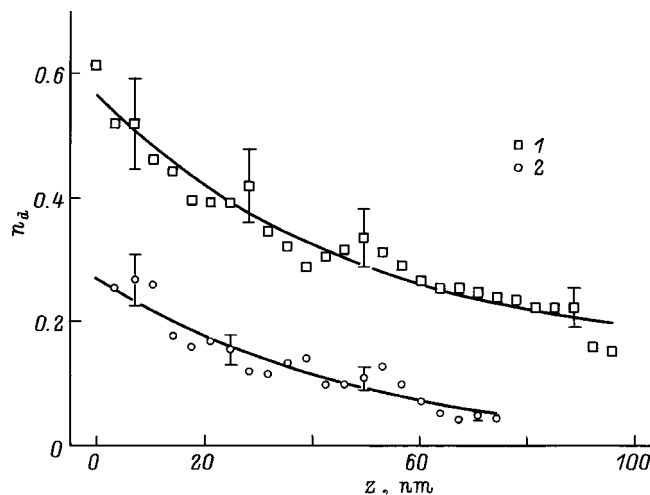


Рис. 3. Профиль концентрации точечных дефектов в CdTe после ИЛО с $W = 82$ (1) и 143 mJ/cm^2 (2).

при $W \geq 50 \text{ mJ/cm}^2$. Осевой выход POP увеличивался с ростом плотности энергии лазерного импульса.

Анализ вариаций спектров POP в режиме каналирования ионов показал, что дефектообразование в приповерхностной области удовлетворительно описывается в предположении о возникновении точечных центров рас-

сеяния вследствие лазерного воздействия. Полученные в результате расчетов профили распределения дефектов для различных плотностей энергии представлены на рис. 3. Из этого рисунка видно, что при $W = 80 \text{ мДж/см}^2$ повреждение приповерхностного слоя весьма значительно: из регулярных положений смещено около 30% атомов, а толщина дефектного слоя составляет $\approx 70 \text{ нм}$. При дальнейшем росте W происходит расширение дефектной области (до $\approx 100 \text{ нм}$ при $W = 143 \text{ мДж/см}^2$), а концентрации дефектов соответствуют аморфизации поверхности.

3. Обсуждение результатов

В наших экспериментах впервые был применен метод РОР для регистрации изменений композиционных свойств приповерхностного слоя CdTe в результате лазерного воздействия. Изменения в его составе наблюдаются при ИЛО с $W > 120 \text{ мДж/см}^2$, которое приводит к эффективному испарению легколетучего компонента — кадмия — из расплава. На это указывает наличие слоя, обедненного Cd и обогащенного Te, толщина которого составляет $\approx 10 \text{ нм}$. Это заметно меньше, чем толщина расплавленного слоя ($\approx 400 \text{ нм}$, согласно нашим расчетам).

Как показали эксперименты, дефектообразование в CdTe носит надпороговый характер: образование дефектов — точечных центров рассеяния — регистрируется методом РОР при плотности энергии лазерного импульса $W \geq 50 \text{ мДж/см}^2$. С ростом энергии лазерного импульса увеличиваются концентрация дефектов и толщина дефектного слоя. Отметим, что толщина дефектного слоя l_d в несколько раз меньше толщины расплавленного слоя d . Так, при $W = 80 \text{ мДж/см}^2$ $l_d \approx 70 \text{ нм}$, а величина d при той же плотности энергии лазерного импульса, согласно нашим расчетам [8], составляла 235 нм.

Возможными причинами лазерно-индуцированного дефектообразования являются высокая скорость затвердевания расплава и интенсивное испарение. Последний процесс был зарегистрирован оптическими методами при $W \geq 100 \text{ мДж/см}^2$ [14]. Интенсивное испарение может привести к возникновению дефектов как вследствие образования слоя с нестехиометрическим составом, так и в результате увеличения скорости затвердевания, вызванного оттоком тепла при испарении. Известно, что для полупроводников группы $A^{III}B^V$ последнее может вызвать неэпитаксиальное затвердевание расплава с поверхности, что в свою очередь вызывает формирование дефектов приповерхностного слоя [15]. Поскольку, как уже отмечалось, компоненты CdTe характеризуются высокой летучестью, можно предположить, что и для данного материала дефектообразование обусловлено этим же механизмом. С предположением об аморфизации приповерхностного слоя вследствие интенсивного испарения с поверхности хорошо согласуется тот факт, что толщина дефектного слоя заметно превосходит толщину слоя с измененным составом. Действительно, при испарении вещество теряет энергию λm_v (где λ — удельная теплота испарения, m_v — масса испаренного материала),

что может привести к кристаллизации некоторого слоя, масса m_c которого определяется из простого соотношения [15]

$$\lambda m_v = L m_c, \quad (2)$$

где L — удельная теплота кристаллизации, составляющая для CdTe $L = 209 \text{ Дж/г}$ [1]. Поскольку, как было показано, из расплава по преимуществу испаряется кадмий, величина λ должна определяться теплотой испарения Cd (888 Дж/г [16]). Следовательно, испарение Cd из слоя толщиной 15 нм обеспечивает кристаллизацию слоя CdTe толщиной $\approx 30 \text{ нм}$. Очевидно, что роль данного фактора дефектообразования возрастает с увеличением W .

В заключение отметим, что в настоящей работе впервые был применен метод РОР для исследования лазерно-индуцированного дефектообразования и изменения состава в кристаллах CdTe. Обнаружено, что ИЛО с плотностью энергии выше порога плавления вызывает появление дефектов, которые проявляют себя преимущественно как точечные центры рассеяния. Дефектообразование обусловлено интенсивным испарением одного из компонентов соединения.

Список литературы

- [1] K. Zanio. Cadmium Telluride. V. 13. Semiconductors and Semimetals. N.Y.–San Francisco–London (1978). 235 p.
- [2] А.В. Двуреченский, Г.А. Качурин, Е.В. Нидаев, Л.С. Смирнов. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М. (1982). 208 с.
- [3] П.К. Кашкаров, В.Ю. Тимошенко. Поверхность. Физика, химия, механика, 6, 5 (1995).
- [4] P.D. Brewer, J.J. Zinck, G.L. Olson. Appl. Phys. Lett. 57, 24, 2526 (1990).
- [5] В.Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, А.И. Власенко, С.И. Горбань, Б.К. Даулетмуратов, П.Е. Мозоль. ФТП 27, 10, 1618 (1993).
- [6] В.Н. Бабенцов, А. Байдуллаева, Б.М. Булах, С.И. Горбань, П.Е. Мозоль. Поверхность. Физика, химия, механика, 12, 144 (1988).
- [7] В.В. Артамонов, М.Я. Валах, А.П. Литвинчук, В.В. Стрельчук. Поверхность. Физика, химия, механика, 1, 46 (1989).
- [8] F.X. Wagner, K. Dhese, P.H. Key, D. Sands, S.R. Jackson, R. Kirbitson, J.E. Nicholls. Appl. Surf. Sci. 86, 364 (1995).
- [9] И.Ю. Висковатых, В.М. Лакеенков, П.К. Кашкаров, В.И. Петров, В.Ю. Тимошенко, Ф.И. Хилинский. Изв. РАН. Сер. физ. 57, 9, 12 (1993).
- [10] Л.А. Головань, В.Ю. Тимошенко, П.К. Кашкаров. Поверхность. Физика, химия, механика, 10, 65 (1995).
- [11] Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, И.С. Ташлыков. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. Минск (1987). 256 с.
- [12] Н.Г. Чеченин, Э.В. Монахов, К.К. Бурдель. ПТЭ, 3, 142 (1994).
- [13] L.R. Doolittle. Nucl. Instr. Meth. B9, 344 (1985).
- [14] Л.А. Головань, П.К. Кашкаров, В.Ю. Тимошенко. Письма в ЖТФ 21, 23, 26 (1995).
- [15] P.K. Kashkarov, V.Yu. Timoshenko, N.G. Chechenin, A.N. Obraztsov. Laser Phys. 2, 5, 790 (1992).
- [16] Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Кикоина. М. (1976). 1008 с.