

# ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ CdTe В УСЛОВИЯХ НАНОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2008 г. Г. Д. Ивлев, канд. физ.-мат. наук; Е. И. Гацкевич, канд. физ.-мат. наук

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

E-mail: ivlev@inel.bas-net.by

Исследована динамика фотолюминесценции, возбуждаемой в CdTe при воздействии импульсом ( $\tau = 80$  нс) рубинового лазера, модифицирующего субмикронный поверхностный слой. Получены зависимости максимальной интенсивности фотолюминесценции от плотности энергии облучения  $E$  при одно-, двух- и трехкратном воздействии лазерного импульса. Установленные зависимости объясняются влиянием конкурирующих факторов: возрастанием уровня фотовозбуждения с ростом  $E$  и температурным гашением фотолюминесценции. Обнаружен эффект роста фотолюминесценции при плотностях энергии выше порога плавления поверхности полупроводника.

Коды OCIS: 350.3390.

*Поступила в редакцию 06.11.2007.*

Наноимпульсная лазерная обработка является перспективным методом целенаправленного изменения физических свойств субмикронных поверхностных слоев полупроводниковых кристаллов и, в частности, теллурида кадмия [1]. Ранее фазовые превращения, происходящие в приповерхностной области образцов CdTe под действием наносекундных импульсов излучения рубинового лазера, изучались нами методом оптической диагностики с регистрацией отраженного и прошедшего пучков зондирующего излучения на длинах волн 0,53 и 1,06 мкм [2, 3].

В настоящей работе динамика наносекундного лазерного воздействия на теллурид кадмия исследована в аналогичных [2, 3] экспериментальных условиях путем детектирования фотолюминесценции образцов CdTe, возбуждаемой излучением самого рубинового лазера. Монокристаллические пластины CdTe (толщиной 1 мм) облучались при длительности лазерного импульса  $\tau = 80$  нс и варьировании плотности энергии облучения  $E$  в интервале 0,02–0,4 Дж/см<sup>2</sup>. Диаметр облучаемой зоны составлял 2,5 мм, неравномерность распределения энергии в лазерном пятне не превышала  $\pm 5\%$ , энергия облучения воспроизводилась от импульса к импульсу с отклонением не выше ( $\pm 1,5$ –2)%. Лазер работал в режиме генерации одиночных импульсов колоколообразной формы с интервалом между вспышками 10–15 с. Фотолюминесценция CdTe детектировалась посредством фотоэлектронного умножителя ФЭУ-83, снабженного светофильтрами, в спектральном интервале, определяемом характеристикой пропускания оптической системы  $\lambda = 0,74$ –0,96 мкм по уровню 0,5 (от максимума на  $\lambda = 0,8$  мкм) и  $\lambda = 0,72$ –1,08 по уровню 0,1. Отметим [4], что спектр фотолюминесценции CdTe при

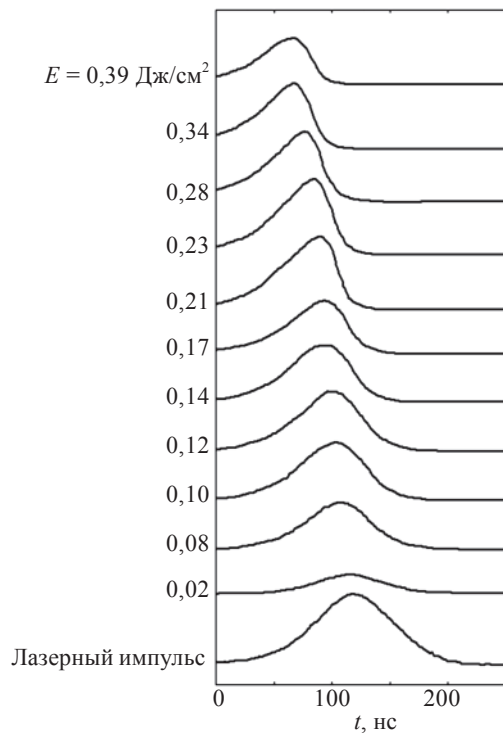
300 К охватывает интервал длин волн примерно от 0,75 до 0,8 мкм и состоит из двух полос. При повышении температуры CdTe вплоть до точки плавления спектр фотолюминесценции сдвигается в длинноволновую область до  $\lambda \approx 1$  мкм [5]. В эксперименте регистрировался поток фотолюминесценции, испускаемый визируемой фотоприемником центральной зоной диаметром 1,7 мкм в телесный угол 0,1 стер под углом 30° относительно нормали к поверхности образца.

Во время действия лазерного импульса с плотностью энергии 0,02 Дж/см<sup>2</sup> (что значительно ниже порога плавления облучаемой поверхности  $E_m \approx 0,1$  Дж/см<sup>2</sup> [2]) CdTe испускает люминесцентное излучение, интенсивность которого пропорциональна плотности потока возбуждающего излучения, т. е. импульсы люминесцентного и лазерного излучения одинаковы как по форме, так и по длительности, причем максимумы интенсивности того и другого излучения совпадают по времени (рис. 1). При  $E > 0,08$  Дж/см<sup>2</sup> по мере увеличения энергии облучения CdTe импульс фотолюминесценции укорачивается при сокращении заднего фронта, а его максимум сдвигается к началу импульса возбуждающего излучения (рис. 1).

При достаточно точной аппроксимации формы лазерного импульса функцией  $f(t) = \sin^2(\pi t/2\tau)$  плотность потока лазерного излучения  $q_m$ , поглощенного к моменту достижения максимума интенсивности фотолюминесценции, определяется выражением

$$q_m = \frac{E}{\tau} \int_0^{\tau-\Delta t} f(t) dt = \frac{E}{2\pi} \left[ \frac{\pi(\tau - \Delta t)}{\tau} - \sin\left(\frac{\pi(\tau - \Delta t)}{\tau}\right) \right],$$

где  $\Delta t$  – временной интервал между максимумами импульса лазерного излучения и фотолюминесценции.

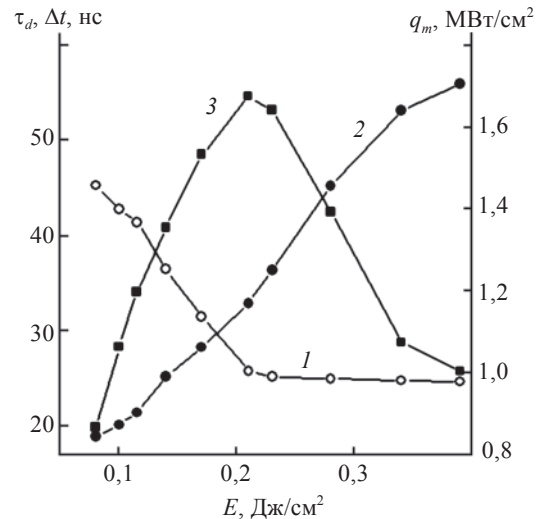


**Рис. 1.** Осциллограммы импульсов фотолюминесценции CdTe и лазерного излучения.

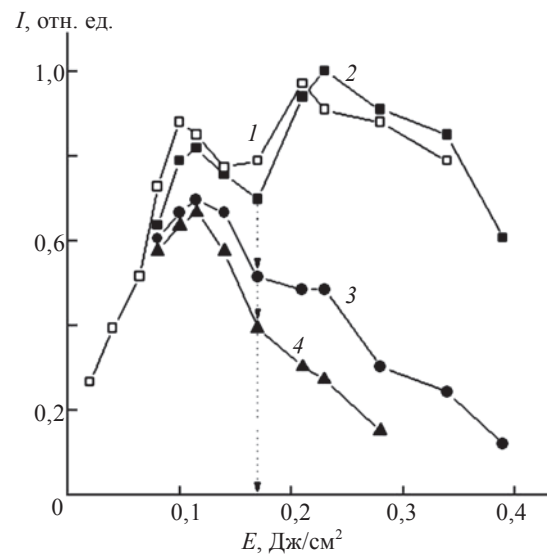
ции. Из полученных данных следует (рис. 2), что с ростом  $E$  время спада фотолюминесценции  $\tau_d$  (между уровнями 0,9 и 0,1 от максимума) уменьшается с 45 до 25 нс при  $E \approx 0,2$  Дж/см<sup>2</sup> и далее почти не меняется; временной сдвиг  $\Delta t$  возрастает монотонно с увеличением  $E$ . На зависимости  $q_m(E)$  наблюдается максимум при значении  $E \approx 0,2$  Дж/см<sup>2</sup>. Установленные зависимости рассматриваемых параметров от величины  $E$  можно объяснить следующим образом: гашение фотолюминесценции связано с нагревом поверхности монокристалла и плавлением, которое начинается тем раньше, чем больше плотность энергии облучения. Это приводит как к увеличению временного сдвига между максимумами лазерного излучения и интенсивности фотолюминесценции, так и к сокращению времени ее спада, обусловленного началом фазовых превращений. Максимум на зависимости  $q_m(E)$ , возможно, обусловлен тем, что с увеличением  $E$  возрастает количество поглощенной энергии; в то же время за счет временного сдвига уменьшается время до достижения максимума интенсивности фотолюминесценции, что приводит к уменьшению этой энергии.

Максимум зависимости  $q_m(E)$  достигается при том же значении  $E$ , которое соответствует также второму максимуму пиковой интенсивности фотолюминесценции  $I(E)$  (рис. 3) при начальном облучении поверхности кристалла CdTe. Кривая 1 на пред-

ставленном рисунке отражает зависимость  $I(E)$ , полученную при однократном воздействии лазерного импульса, т. е. каждый раз на новый участок поверхности образца. Кривые 2, 3 и 4 из другой серии измерений характеризуют соответственно однократное, повторное и трехкратное воздействия лазерного импульса с заданной энергией на один и тот же участок поверхности, что поясняется данными для  $E = 0,17$  Дж/см<sup>2</sup> (пунктирные прямые со стрелками). По мере увеличения  $E$  и достижения порога плавления величина  $I$  возрастает до максимума, затем снижается вследствие температурного тушения



**Рис. 2.** Зависимости от плотности энергии облучения  $E$ . 1 – время спада люминесценции  $\tau_d$ , 2 – временной сдвиг  $\Delta t$ , 3 – плотность мощности излучения  $q_m$ , поглощенного за время  $\tau - \Delta t$ .



**Рис. 3.** Зависимости интенсивности фотолюминесценции CdTe от плотности энергии облучения. 1, 2 – однократное облучение; 3 – двухкратное, 4 – трехкратное. Пояснения см. в тексте.

люминесценции. Фазовые превращения (плавление–отвердевание) приводят к нарушению стехиометрии полупроводника и образованию точечных дефектов, способствующих безызлучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда в переплавленном слое. Именно поэтому уровень  $I$ , достигаемый при действии повторного и тем более третьего лазерного импульса, оказывается значительно меньшим. Так, при  $E = 0,17$  Дж/см<sup>2</sup> повторное воздействие лазерного излучения вызывает фотолюминесценцию примерно в два раза слабее, чем при первичном облучении, и еще меньшую во время действия третьего импульса. Неожиданным результатом является рост пиковой интенсивности фотолюминесценции до второго максимума (кривые 1 и 2), достигаемый при примерно двукратном превышении порога плавления поверхности образца. При этом второй максимум  $I$  превышает первый.

Таким образом, вследствие проведенного исследования получены экспериментальные данные, характеризующие динамику фотолюминесценции кристалла CdTe, возбуждаемой наноимпульсным излучением рубинового лазера при энергиях облучения ниже и выше порога лазерно-индуцированного плавления поверхности полупроводника. Установлены зависимости пиковой интенсивности фотолюминесценции от плотности энергии в лазерном импульсе при однократном, двух- и трехкрат-

ном воздействии наносекундного излучения. Обнаружен эффект роста фотолюминесценции при плотностях энергии однократного лазерного облучения выше порога образования расплавленного слоя полупроводника.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gnatyuk V.A., Aoki T., Hatanaka Y., Vlasenko O.I. Metal–semiconductor interfaces in CdTe crystals and modification of their properties by laser pulses // Appl. Surf. Sci. 2005. V. 244. P. 528–532.
2. Ивлев Г.Д., Гацкевич Е.И. Динамика отражения и поглощения теллурида кадмия при лазерно-индуцированных фазовых превращениях // Приборостроение. 2006. Т. 49. № 9. С. 25–29.
3. Gatskevich E., Ivlev G., Přikryl P., Černý R., Chab V., Cibulka O. Pulsed laser-induced phase transformations in CdTe single crystals // Appl. Surf. Sci. 2005. V. 248. № 1–4. P. 259–263.
4. Корбутяк Д.В., Мельничук С.В., Корбут С.В., Борисюк М.М. Теллурид кадмію: домішково-дефектні стани та детекторні властивості. Киев: Иван Федоров, 2000. 190 с.
5. Mathew X., Enriquez J.P. Temperature dependences of the optical transitions in CdTe thin film – Investigation with photoresponse spectra // Solar Energy Materials & Solar Cells. 2000. V. 63. P. 347–354.