

УДК 621.315.592

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРАХ In/CdTe
Гацкевич Е. И.

*Белорусский национальный технический университет
 Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проведено численное моделирование плавления и отвердевания в гетероструктурах In/CdTe в условиях облучения наносекундными лазерными импульсами. Моделирование проводилось на основе численного решения задачи Стефана с равновесными условиями на границе фазового перехода. Рассмотрены структуры с пленками индия 30, 100 и 400 нм. Проанализированы пиковые температуры поверхности и времена существования расплава в различных режимах облучения.

Ключевые слова: лазерное облучение, задача Стефана, плавление, индий, теллурид кадмия.

SIMULATION OF LASER-INDUCED PROCESSES IN In/CdTe STRUCTURES
Gatskevich E.

*Belarusian National Technical University
 Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. Numerical modeling of melting and solidification in In/CdTe heterostructures under irradiation with nanosecond laser pulses has been carried out. The simulation was carried out based on the numerical solution of the Stefan problem with equilibrium conditions at the phase transition boundary. Indium films with thicknesses of 30, 100 and 400 nm were considered. Peak surface temperatures and melting times were analyzed in various irradiation modes.

Key words: laser irradiation, Stefan problem, melting, indium, cadmium telluride.

*Адрес для переписки: Гацкевич Е. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
 e-mail: gatskevich_elena@bk.ru*

Теллурид кадмия широко используется для создания детекторов ионизирующего излучения. Перспективность CdTe для изготовления детекторов γ -излучения обусловлена большой шириной запрещенной зоны (1,47 эВ), достаточно высокой подвижностью электронов (1100 см²/(В·с)) и дырок (100 см²/(В·с)) при комнатной температуре, большим атомным номером ($Z_{eff} = 48,52$)

Для формирования *p-n* переходов, которые являются основой полупроводниковых детекторов, применяется метод лазерного легирования. В частности, в работах [1–3] исследованы электрические свойства диодов на основе структур In/CdTe, сформированных методом лазерного легирования.

В настоящей работе проведено численное моделирование лазерно-индуцированных процессов в системе In/CdTe в условиях облучения лазерными импульсами длительностью 20 нс. Толщина пленки варьировалась от 30 до 400 нм. Такие толщины выбраны для моделирования, поскольку именно для этих толщин ранее были получены [1–3] *p-n* переходы методом лазерного легирования.

Моделирование динамики нагрева и плавления структуры In/CdTe проводилось на основе численного решения задачи Стефана. Рассматривалась ситуация равномерного распределения плотности лазерного излучения по облучаемой зоне. Характерная длина диффузии тепла за время импульса τ составляет величину порядка $(\chi\tau)^{1/2}$, где χ – температуропроводность среды. Для обоих компонентов структуры длина тепловой диффузии при длительности лазерного импульса $\sim 10^{-7}$ с

существенно меньше диаметра лазерного пятна. Отсюда следует, что в рассматриваемом случае можно ограничиться одномерным приближением.

В этой постановке задачи нелинейное неоднородное уравнение теплопроводности с условием Стефана на границе фазового перехода имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho(x, T) (c(x, T) + L\delta(T - T_m)) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x, T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + Q(x, t), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0,$$

$$T|_{x=D} = T|_{t=0} = T_0,$$

где T – температура, $T_0 = 300$ К, координата x направлена вглубь образца, ρ – плотность, c – удельная теплоемкость, k – теплопроводность, L – скрытая теплота плавления, T_m – температура плавления, $\delta(T)$ – дельта функция Дирака. Функция $Q(x, t)$ описывает выделение тепла при поглощении лазерного излучения:

$$Q(x, t) = \alpha(T)(1 - R)q(t) \exp \left\{ - \int_0^x \alpha(T(x')) dx' \right\}, \quad (2)$$

здесь α – коэффициент поглощения; R – коэффициент отражения; $q(t) = \frac{W}{\tau} \sin^2 \left(\frac{\pi t}{2\tau} \right)$ – форма лазерного импульса; W – плотность энергии лазерного облучения; τ – длительность импульса.

Поскольку коэффициент отражения индия сильно зависит от температуры и эта зависимость в настоящее время не исследована, моделирова-

ние проводилось для поглощенной энергии, т. е. полагалось, что $R = 0$. На границе пленка – подложка предполагалась идеальная адгезия. Программа построена так, что позволяет учесть зависимости теплофизических и оптических параметров от координаты, температуры и фазового состояния.

Индий характеризуется низкой температурой плавления и малой скрытой теплотой плавления по сравнению с CdTe, но имеет достаточно высокую температуру кипения (2353 К) и большую скрытую теплоту испарения (почти на 2 порядка большую теплоты плавления). CdTe характеризуется низкой теплопроводностью. Это приводит к тому, что пленка практически мгновенно плавится, а потом долго находится в расплавленном состоянии. До температур кипения, по-видимому, испарением в пленке можно пренебречь, поскольку давление насыщенных паров In мало.

Согласно расчетным данным (рисунок 1) для толщин пленок 30 и 100 и даже 400 нм данные по длительности нахождения пленки в жидком состоянии почти совпадают при $W < 100$ мДж/см². При больших плотностях энергий различие возрастает, что особенно видно для пленки толщиной 400 нм. Наибольшая максимальная температура достигается при одних и тех же энергиях в пленке толщиной 30 нм (рисунок 1), причем с ростом плотности энергии до приблизительно 50 мДж/см² различие в температурах для пленок с толщинами 30 и 100 нм увеличивается, с дальнейшим ростом W различие в пиковых температурах уменьшается. Для пленки толщиной 400 нм максимальная поверхностная температура ниже почти на 700–800 К, причем начиная с плотности энергии 50 мДж/см² это различие не изменяется.

Проанализированы зависимости пиковой температуры поверхности и времени существования расплава при облучении с плотностями поглощенной энергии от 10 до 150 Дж/см². Расчетные данные показали, что при облучении системы In/CdTe лазерными импульсами (длительность 20 нс) с плотностями поглощенной энергии менее 100 Дж/см² время существования расплава не зависит от толщины пленки индия. При больших плотностях энергии время существования жидкой фазы увеличивается с толщиной пленки. Пиковые температуры поверхности уменьшаются с увеличением толщины пленки, причем с увеличением толщины пленки различие в пиковых температурах растет. При $W > 50$ мДж/см² различие в пиковых температурах остается постоянным и приблизительно равно 700–800 К.

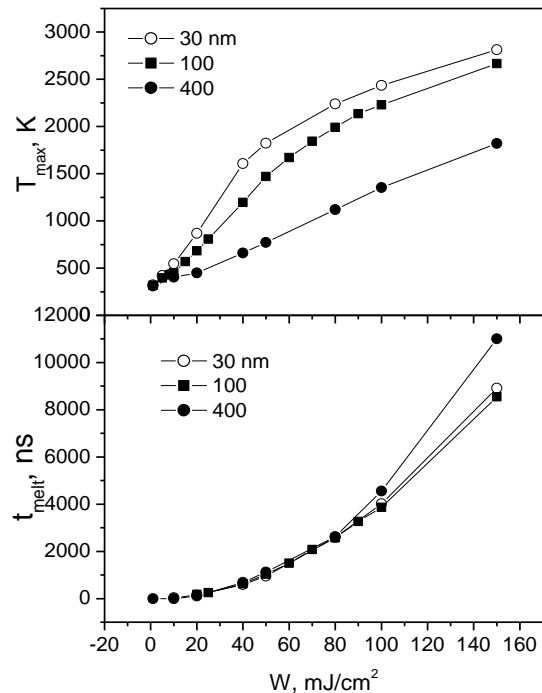


Рисунок 1 – Зависимости пиковой температуры поверхности и времени существования расплава от плотности энергии облучения

Согласно экспериментальным данным [1–3] условия облучения влияют на получение p-n переходов с наилучшими выпрямляющими свойствами. Разработанная модель может быть использована для анализа температурных режимов при формировании диодных структур с использованием метода лазерного легирования.

Литература

1. Gnatyuk, V. A. Mechanisms of laser-induced defect formation and In doping in CdTe crystals / V. A. Gnatyuk, V. A., T. Aoki, Y. Hatanaka // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 2004. – V. 51, № 5. – P. 2466–2471.
2. Modification of the surface state and doping of CdTe and CdZnTe crystals by pulsed laser irradiation / V. A. Gnatyuk [et al.] // Applied Surface Science. – 2009. – V. 255, № 24. – P. 9813–9816.
3. Ивлев, Г. Д. Воздействие нанопульсного лазерного излучения на тонкопленочную систему In/CdZnTe / Г. Д. Ивлев, Е. И. Гацкевич, Л. И. Постнова // Сборник статей: 7-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе», 1–5 июня 2009 г., Минск. – Минск, 2009. – С. 291–294.