

# Общая физика

УДК 621.315.592

## Математическая модель воздействия лазерного импульса на многослойную полупроводниковую фоточувствительную структуру

*В. Г. Средин, М. В. Сахаров*

*Рассмотрена математическая модель воздействия мощного импульсного лазерного излучения на многослойную полупроводниковую структуру, состоящую как из прозрачных, так и из поглощающих излучение слоев.*

PACS: 42.70.Gi, 44.10.+i, 66.70.Dr, 73.61.Ga, 78.30.Fs, 79.60.Jv

**Ключевые слова:** полупроводниковые фоточувствительные структуры, мощное импульсное лазерное излучение, теплопередача, математическая модель.

### Введение

Проблеме взаимодействия интенсивного лазерного излучения с полупроводниковыми материалами и приборными структурами на их основе посвящено большое число исследований, теоретической основой которых является анализ моделей, базирующихся на решении различных вариантов уравнения теплопроводности [1, 2]. С точки зрения анализа физических процессов, протекающих при подобных воздействиях, наибольшее внимание уделяется проблеме возникновения фазовых переходов и обусловленных ими изменений электрофизических характеристик материала. Исследования в этом направлении представляют значительный интерес в связи с разработкой технологии лазерного отжига дефектов в полупроводниковых кристаллах и эпитаксиальных слоях, возникающих, например, при ионной имплантации. Следует отметить, что эффекты, возникающие в поле лазерного излучения в кристаллических материалах, отличаются относительно низкой воспроизводимостью, так как результат этого воздействия существенно зависит от множества факторов: соот-

ношения энергий кванта лазерного излучения и ширины запрещенной зоны, длительности лазерного импульса, исходного распределения примесей и дефектов кристаллической структуры, однородности распределения энергии излучения по сечению пучка и т. д. Отметим, что в подавляющем большинстве работ объектом исследований является однородная пластина кристалла, в то время как практически все современные оптоэлектронные и электронные приборы представляют собой сложные структуры, состоящие из большого числа разнородных слоев.

Цель настоящей работы — разработка математической модели нагрева многослойной полупроводниковой структуры импульсным лазерным излучением с учетом температурных зависимостей основных оптических и теплофизических характеристик материалов каждого слоя, а также параметров воздействующих импульсов.

### Описание математической модели

Схема структуры представлена на рис. 1, причем она в основных чертах соответствует строению чувствительных элементов ИК-фоторезисторов на основе твердого раствора  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  с фронтальным освещением.

Отметим, что между фоточувствительным слоем и слоями, его окружающими, во время роста структуры за счет взаимной диффузии компонентов твердых растворов возникают варизонные слои, не показанные на рис. 1, роль которых в настоящей работе в дальнейшем не учитывается ввиду их малой толщины и малой (относительно других слоев структуры) массы. Конечно, существуют и другие конфигурации фоточувствительной структуры, например с подложкой из арсенида

**Средин Виктор Геннадьевич**, заведующий кафедрой<sup>1</sup>.  
**Сахаров Михаил Викторович**, начальник кафедры<sup>1, 2</sup>.

<sup>1</sup>Военная академия РВСН им. Петра Великого.  
Россия, 103074, Москва, Китайгородский проезд, 9.  
Тел. (495) 698-44-84.

E-mail: sredinvg@rambler.ru; m\_sakharov@mail.ru

<sup>2</sup>Автономная некоммерческая организация.

Научно-инновационный центр ракетно-космических технологий.

Россия, 103074, Москва, Китайгородский проезд, 9.  
Тел. (495) 698-44-54. Факс (495) 698-44-85.

E-mail: nic-rct@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2010 г.

© Средин В. Г., Сахаров М. В., 2011

галлия. В этом случае между фоточувствительным слоем и подложкой создают достаточно толстый согласующий слой, например из  $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ .

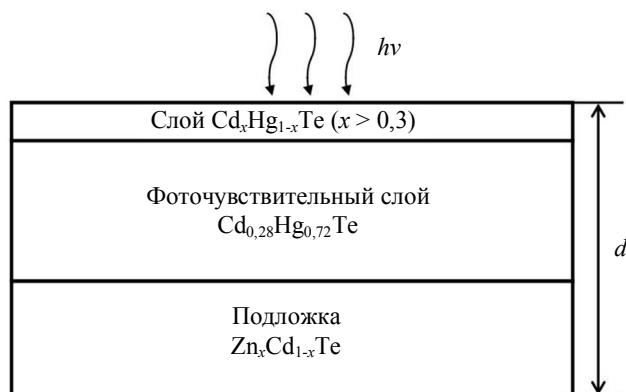


Рис. 1. Схема многослойной полупроводниковой структуры

В основе предлагаемой модели лежит одномерное уравнение теплопроводности, при решении которого учитываются профиль многослойной структуры, температурные зависимости оптических и теплофизических характеристик материалов, входящих в ее состав. В данной модели введены следующие ограничения и допущения:

вещество фотоприемной структуры изотропно в пределах каждого слоя;

пучок лазерного излучения, воздействующего на чувствительный элемент, полностью его накрывает и падает нормально к поверхности;

распределение введенной в фоточувствительный материал энергии однородно в любой плоскости, перпендикулярной лучу, т. е. распределения искомых величин являются функцией только продольной координаты;

форма импульса и длина волны лазерного излучения известны;

до воздействия температура фоточувствительной структуры одинакова во всем объеме, отсутствуют также механические напряжения;

нижняя поверхность охлаждается и имеет постоянную температуру при любых предполагаемых воздействиях.

В условиях принятых допущений неоднородный и нестационарный нагрев фоточувствительной структуры (возникновение поля температуры), а также распространение температуры во внутренние области фоточувствительного элемента (эволюция температурного поля) описываются одномерным уравнением теплопроводности, которое может быть представлено в виде [3]:

$$\rho(T)C(T)\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right) + Q(z,t), \quad (1)$$

где  $\rho(T)$  — плотность материала;

$C(T)$  — удельная теплоемкость материала;

$\lambda(T)$  — теплопроводность материала;

$T(z,t)$  — температура на глубине  $z$  от поверхности фотоприемной структуры толщиной  $d$  в момент времени  $t$ ;

$Q(z,t)$  — объемный тепловой источник, описывающий выделение тепла при поглощении лазерного излучения.

Этот тепловой источник можно выразить в виде следующего соотношения:

$$Q(z,t) = (1 - R_1(T))(1 - R(T))q(t)\alpha(z,T)e^{-\int_0^d \alpha(z',T)dz'}, \quad (2)$$

где  $R(T)$  — коэффициент отражения лазерного излучения от границы раздела фоточувствительной структуры с защитным поверхностным слоем;

$R_1$  — коэффициент отражения света от внешней поверхности структуры;

$\alpha(z,T)$  — коэффициент поглощения лазерного излучения на глубине  $z$ ;

$q(t) = Jf(t)$  — временная функция распределения плотности подведенной к поверхности фотоприемной структуры мощности лазерного излучения, описывающее форму импульса;

$J$  — номинальная плотность потока лазерной энергии, подведенной к поверхности фоточувствительной структуры;

$f(t)$  — функция распределения мощности лазерного излучения по времени. В силу близости свойств защитного поверхностного и фоточувствительного слоев можно считать, что  $R \rightarrow 0$ .

Упрощенное выражение (для случая прямоугольного импульса лазерного излучения) имеет вид:

$$Q(z,t) = (1 - R_1(T))(1 - R(T))\frac{J}{\tau}\alpha(z,T)e^{-\int_0^d \alpha(z',T)dz'}, \quad (3)$$

где  $\tau$  — длительность импульса воздействующего на фоточувствительную структуру лазерного излучения.

Уравнение (1) дополняется начальными и граничными условиями:

$$\left. \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \quad T(z,t=0) = T_0; \quad T(z=d,t) = T_0, \quad (4)$$

на границах слоев — условием идеального теплового контакта:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_i = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{i+1}; \quad T_{i-} = T_{i+}, \quad (5)$$

а на верхней поверхности фоточувствительной структуры — соотношением:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial z} = \varepsilon \sigma T^4 - (1 - R_1(T)) q_0, \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент черноты (степень серости);

$\sigma$  — постоянная Стефана—Больцмана.

При этом полагается, что на нижней поверхности фоточувствительной структуры поддерживается постоянная температура  $T_{\text{охл}} = T_0$ .

Таким образом, в модели предполагается, что лазерное излучение поглощается в фоточувствительном слое, преобразуясь в конечном итоге в тепло, а тепловая энергия переносится в прозрачные для лазерного излучения слои структуры за счет явления теплопроводности. При этом подложка, находящаяся в тепловом контакте с охладителем, свою температуру не успевает изменить за промежуток времени, сопоставимый с длительностью лазерного импульса. Верхняя поверхность кроме того излучает энергию как серое тело с температурой  $T$ , определяемой уравнением (6).

Решение (1) в явном аналитическом виде затруднено. Поэтому решение искалось конечно-разностным методом. Для этого толщина пластины  $d$  фоточувствительной структуры разбивалась на  $n$  слоев  $\Delta z = z_{i+1} - z_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , а рассматриваемый интервал времени  $[0, \tau]$  — на  $m$  промежутков длительностью  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$ ,  $k = 0, \dots, m$ . На каждом  $k$ -м промежутке времени определялась текущая температура каждого  $i$ -го слоя и рассчитывались теплофизические и оптические параметры.

В этом приближении решение (1) имеет вид:

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \frac{Q^k \Delta t}{\rho C} + \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \times \left[ \left( \frac{\chi_{i+1}^k + \chi_i^k}{2} (T_{i+1}^k - T_i^k) \right) + \left( \frac{\chi_i^k + \chi_{i-1}^k}{2} (T_{i-1}^k - T_i^k) \right) \right], \quad (7)$$

где  $\chi = \frac{\lambda}{\rho C}$  — коэффициент температуропроводности материала.

Анализ (7) показывает, что изменение температуры  $\Delta T_i^{k,k+1} = T_i^{k+1} - T_i^k$  в  $i$ -м слое в соседние моменты времени  $t_k$  и  $t_{k+1}$  обусловлено:

количеством поглощенной  $i$ -м слоем за интервал времени  $\Delta t$  подведенной к нему энергии лазерного импульса:

$$\Delta T_i^{k,k+1} = \frac{Q^k \Delta t}{\rho C}; \quad (8)$$

теплопередачей части тепловой энергии из  $i$ -го слоя во внутренние слои за интервал времени  $\Delta t$ :

$$\Delta T_i^{k,k+1} = \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \times \left[ \left( \frac{\chi_{i+1}^k + \chi_i^k}{2} (T_{i+1}^k - T_i^k) \right) + \left( \frac{\chi_i^k + \chi_{i-1}^k}{2} (T_{i-1}^k - T_i^k) \right) \right]. \quad (9)$$

Таким образом, выражение (7) может быть представлено в виде:

$$\Delta T_i^{k,k+1} = \Delta T_i^{k,k+1} + \Delta T_i^{k,k+1}. \quad (10)$$

Критерий устойчивости расчетов по данной модели имеет вид [4]:

$$\frac{\chi}{\rho C} \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} < \frac{1}{2}, \quad (11)$$

где  $\Delta t$  — шаг дискретизации по времени;

$\Delta z$  — шаг дискретизации по толщине чувствительного элемента.

### Примеры использования математической модели

С использованием разработанной модели проводился расчет тепловых полей, возникающих в фоточувствительной структуре  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  фоторезистора толщиной 10 мкм с  $x = 0,28$  в рабочем слое при воздействии импульсного лазерного излучения с длиной волны 4,0 мкм, плотностью энергии 1,35 Дж/см<sup>2</sup> и длительностью импульса 3 мкс. При расчете использовались температурные зависимости оптических и теплофизических параметров, используемых в данной фотоприемной структуре [5, 6].

На рис. 2 и 3 показаны результаты данного расчета для импульсов с равномерным (см. рис. 2) и нормальным (см. рис. 3) распределениями энергии во времени, которые рассматриваются как наиболее показательные с точки зрения эволюции температурного поля. Графики, полученные для ряда других форм импульса, лежат, как правило, между зависимостями, приведенными на рис. 2 и 3.

Обозначения на рис. 2 и 3 следующие:  $i$  — номер слоя в многослойной фотоприемной структуре;  $k$  — номер шага дискретизации расчета по длительности воздействующего импульса.

Данные результаты позволяют судить о некоторых закономерностях возникновения и эволюции температурных полей в чувствительных элементах  $\text{Cd}_{1-x}\text{Hg}_x\text{Te}$  фотоприемников при воздействии различных по форме импульсов лазерного излучения.