

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 $Cd_xHg_{1-x}Te$ 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 кафедрой¹.
Сахаров Михаил Викторович, начальник кафедры^{1,2}.

¹Военная 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

²Автономная 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.

галлия. В этом случае между фоточувствительным слоем и подложкой создают достаточно толстый согласующий слой, например из $Zn_xCd_{1-x}Te$.

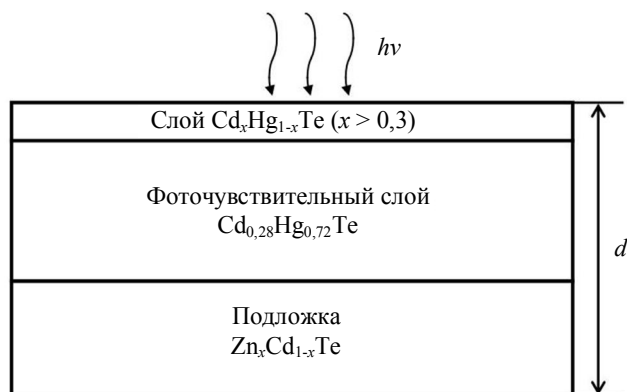


Рис. 1. Схема многослойной полупроводниковой структуры

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 толщины 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 τ — длительность импульса воздействующего на фоточувствительную структуру лазерного излучения.

Уравнение (1) дополняется начальными и граничными условиями:

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

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 ε — коэффициент черноты (степень серости);

σ — 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 Δt 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 Δt :

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

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 Δt — шаг дискретизации по времени;

Δz — шаг дискретизации по толщине чувствительного элемента.

Примеры использования математической модели

С использованием разработанной модели проводился расчет тепловых полей, возникающих в фоточувствительной структуре $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ 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/см² 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 $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ фотоприемников при воздействии различных по форме импульсов лазерного излучения.

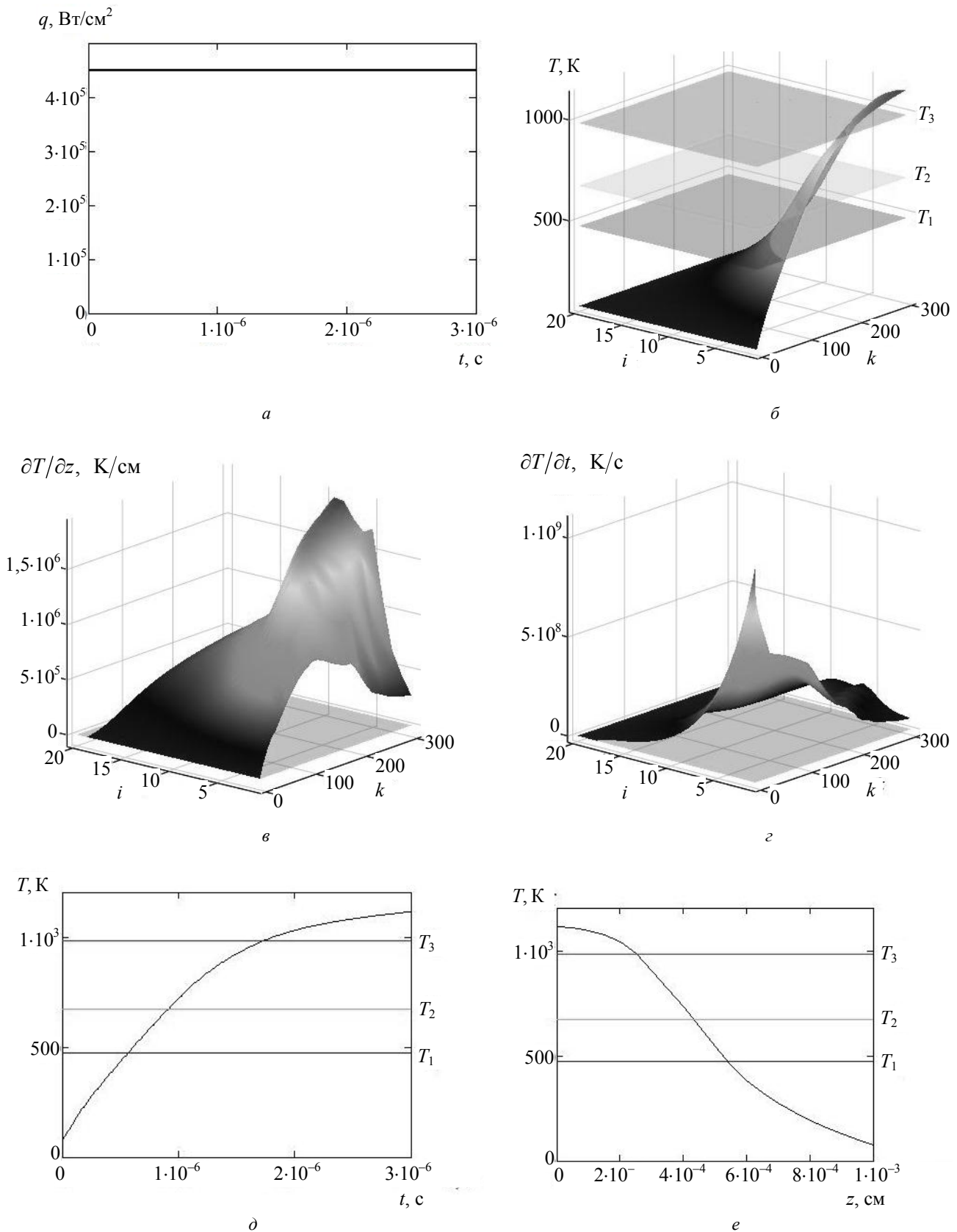


Рис. 2. Результаты моделирования воздействия прямоугольного импульса лазерного излучения на фотоприемную структуру фоторезистора на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$:

a — форма импульса; *б* — график распределения теплового поля по слоям и во времени; *в* — градиент температуры по продольной координате; *г* — скорость изменения температуры; *д* — график изменения температуры поверхности фоточувствительного элемента при воздействии импульса лазерного излучения; *е* — график распределения теплового поля по слоям после окончания воздействия импульса лазерного излучения

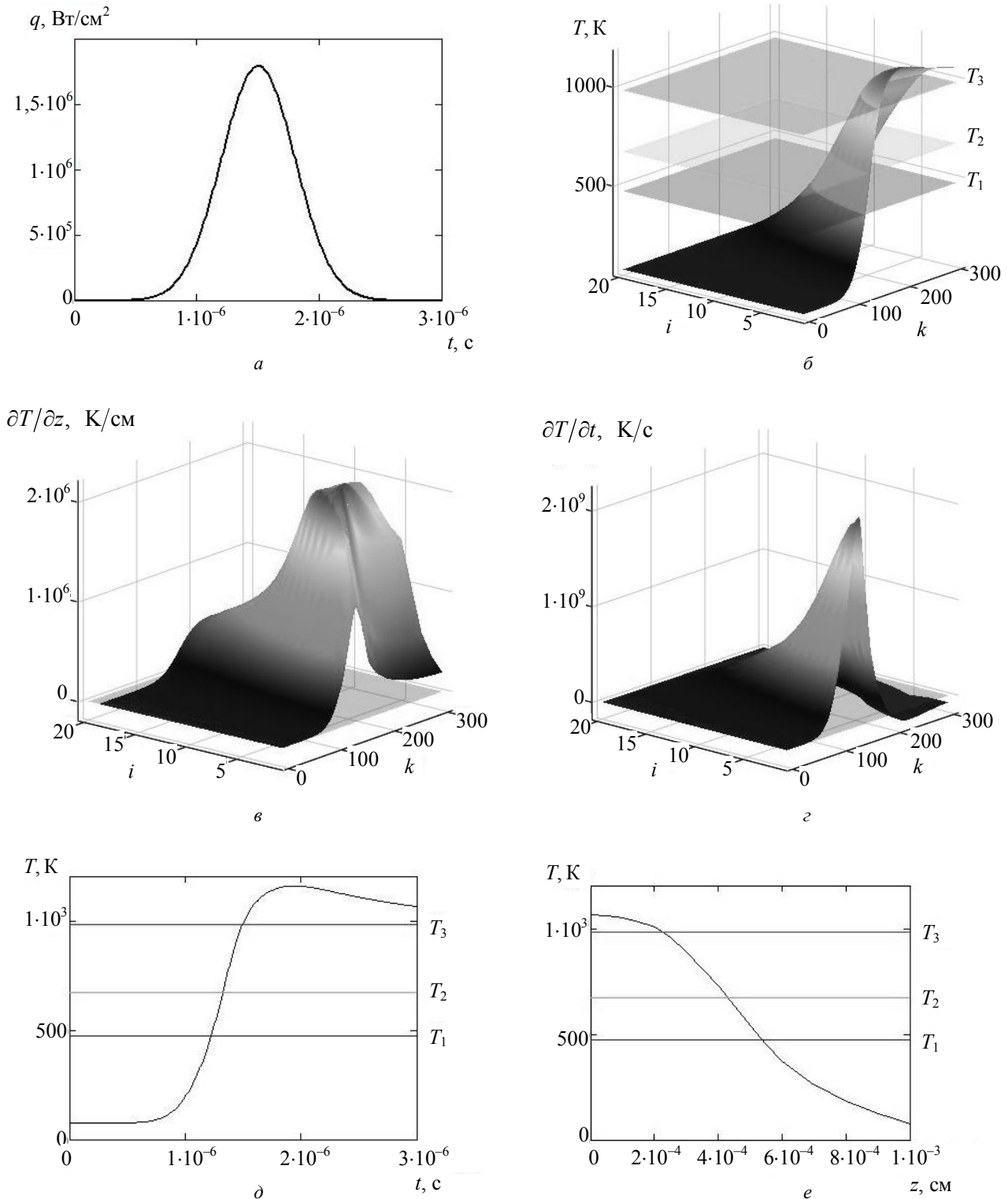


Рис. 3. Результаты моделирования воздействия лазерного импульса с нормальным распределением мощности во времени на фоточувствительную структуру фоторезистора на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$:
a — форма импульса; *б* — график распределения теплового поля по слоям и во времени; *в* — градиент температуры по продольной координате; *г* — скорость изменения температуры; *д* — график изменения температуры поверхности фоточувствительного элемента при воздействии импульса лазерного излучения; *е* — график распределения теплового поля по слоям после окончания воздействия импульса лазерного излучения

Из анализа представленных результатов расчета следует, что:

- максимальная температура реализуется на поверхности фоточувствительного слоя структуры и практически не зависит от формы импульса;

- от формы импульса зависят скорость и глубина прогрева слоев, а также скорость их остывания;
- чем круче передний фронт воздействующего импульса лазерного излучения, тем быстрее про-

исходит нагрев поверхности фотоприемной структуры, но и тем меньшая ее толщина подвергается прогреву, и наоборот, чем круче задний фронт действующего импульса лазерного излучения, тем быстрее происходит остывание фотоприемной структуры, и наоборот;

- глубина проникновения лазерного излучения определяется коэффициентом поглощения;
- по мере увеличения плотности мощности падающего излучения наблюдается рост температуры по амплитуде, затем за счет процессов теплопроводности происходит выравнивание температуры и ее перераспределение в глубину фотоприемной структуры.

На рис. 2 и 3 обозначены три характерные температуры: T_1 — температура обратимых изменений, T_2 — температура необратимых изменений, T_3 — температура плавления материала. Под T_3 здесь понимается не температура фазового перехода твердое тело—расплав (в дальнейшем термодинамическая температура плавления), а несколько меньшая, а именно, при которой начинается выход атомов ртути из узлов кристаллической решетки. Значение этой температуры оценивается в 980 К [7]. Этот выход можно рассматривать, как локальное плавление. Настоящая модель не учитывает фазовый переход кристалл—расплав, которому на графиках зависимости температуры от времени (см. рис. 2, $b-d$ и рис. 3, $b-d$) должны отвечать отрезки с различными углами наклона. При достижении термодинамической температуры плавления (для $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x = 0,28$ она приблизительно равна 1100 К) система должна становиться двухфазной, что не предполагается в настоящей модели, поэтому при достижении этого значения температуры программа прекращает расчет.

Под обратимыми изменениями физических характеристик материала и сопутствующих им изменений параметров фотоприемников понимаются процессы, связанные с влиянием температуры на физические характеристики материала. Прежде всего это ширина запрещенной зоны, подвижность и концентрация носителей заряда, а также ряд других, которые восстанавливаются до исходных значений при падении температуры до первоначальной. Процессы релаксации в этом случае происходят чрезвычайно быстро.

Под необратимыми изменениями понимаются процессы, в результате которых характеристики материала и фотоприемных устройств на его основе не возвращаются к исходным значениям после прекращения действия лазерного импульса. После достижения порога необратимых изменений начинается процесс деградации параметров фотоприемников вплоть до потери ими чувствительности. Можно предположить, что необратимые из-

менения связаны с генерацией дефектов структуры лазерным излучением. Причем диапазон обратимых изменений ограничивает область температур сверху, а диапазон необратимых изменений — снизу. В интервале между этими порогами находится область, в которой возникающие дефекты структуры играют существенную роль, однако после прекращения действия лазерного излучения фотоприемник восстанавливает свою чувствительность почти полностью, хотя процессы релаксации протекают достаточно медленно. Такие эффекты были обнаружены нами ранее как для одноэлементных [8], так и многоэлементных фотоприемников [9]. В настоящее время природа этих эффектов до конца не выяснена и, возможно, они связаны с процессами на границах раздела или поверхности фотоприемных структур.

Для составов твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ с $x < 0,5$, как известно из [5, 6], температурный коэффициент ширины запрещенной зоны положителен, вследствие чего с ростом температуры фоточувствительного материала отношение энергии кванта, поглощаемого за счет прямых межзонных переходов лазерного излучения, к ширине запрещенной зоны уменьшается и при некоторой температуре становится равным единице. При дальнейшем нагревании фоточувствительного материала он "просветляется" и перестает поглощать излучение, причем это может произойти за промежуток времени, меньший длительности лазерного импульса. При выбранных параметрах лазерного излучения и состава твердого раствора фоточувствительного материала описанный выше эффект возникать не должен, однако он легко учитывается в рамках предложенной математической модели влияния лазерного импульса на фоточувствительную структуру.

Заключение

С учетом принятых допущений приведенная математическая модель расчетов может использоваться для теоретической оценки интенсивностей лазерного излучения (с учетом их временной зависимости), приводящих к возникновению пороговых эффектов в многослойных фоточувствительных структурах, а также для исследования процессов возникновения и эволюции температурных полей в них. Адекватность модели подтверждается удовлетворительным совпадением расчетов с результатами ранее проведенных экспериментальных исследований [9] влияния лазерного излучения на функционирование $Cd_xHg_{1-x}Te$ фотоприемников.

Работа выполнена при поддержке
Министерства образования и науки
Российской Федерации в рамках Федеральной
целевой программы "Научные и научно-
педагогические кадры инновационной России"
на 2009—2013 гг. по Государственным
контрактам № П2322 от 16.11.2009 г.,
№ П389 от 11.05.2010 г.

Литература

1. Jevtic M. M., Scepanovic M. J. Melting and Solidification in Laser-Irradiated HgCdTe. A Numerical Analysis//Appl. Phys. 1991. A53. P. 332.
2. Средин В. Г., Укроженко В. М. Взаимодействие лазерного излучения с полупроводниковыми соединениями // За рубежом электронная техника. 1986. Т. 11 (306). С. 33.
3. Цветков Ф. Ф. Тепломассобмен. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

4. Суханов Я. А., Сахаров М. В., Дяченко И. В. и др. Взаимодействие лазерного излучения с материалами оптико-электронной техники: Монография/Под ред. Н. С. Захарова — Сергиев-Посад: ЦФТИ МО РФ, 2004.

5. Берченко Н. Н., Кревс В. Е., Средин В. Г. Полупроводниковые твердые растворы и их применение: Монография/Под ред. В. Г. Средина — М.: Воениздат, 1982.

6. Chu J., Sher A. Physics and Properties of Narrow Gap Semiconductors. Springer. 2008.

7. Voitshovskii A. V., Kohanenko A. P., Shulga S. A., Smith R. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2005. V. 227. P. 531.

8. Стафеев В. И., Булаков И. Д., Болтарь К. О., Средин В. Г., Сахаров М. В., Суховой С. Б. Влияние лазерного излучения на функционирование матрицы "смотрящего" типа на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$. XIX Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докл. — М.: ФГУП «НПО "Орион"», 2006. С. 92.

9. Стафеев В. И., Булаков И. Д., Болтарь К. О., Средин В. Г., Сахаров М. В., Суховой С. Б. Экспериментальное исследование оптической стойкости матрицы "смотрящего" типа на основе $Cd_xHg_{1-x}Te$ к воздействию лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм//Известия вузов. Материалы электронной техники. 2007. № 2. С. 31.

Mathematical model of high power pulsed infrared laser irradiation of multilayer semiconductor photosensitive structures

V. G. Sredin¹, M. V. Sakharov^{1,2}

¹Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Force, 9 Kitaygorodsky passage, Moscow, 103074, Russia
E-mail: sredinvg@rambler.ru m_sakharov@mail.ru

²Scientific Innovation Center of Rocket Space Technology, 9 Kitaygorodsky passage, Moscow, 103074, Russia
E-mail: nic-rct@mail.ru

In this work, we describe a mathematical model of high power pulsed infrared laser irradiation of the multilayer semiconductor photosensitive structures, which consist of both radiation transparent and absorbing layers.

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

Keywords: multilayer semiconductor light-sensitive structures, high power pulsed infrared laser irradiation, heat conduction, mathematical model.