

Моделирование теплового поражения СВЧ-диода мощным импульсом электромагнитного излучения

В.А. Сергеев^{1,2}, А.М. Ходаков¹, А.А. Молгачев²

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

²Ульяновский государственный технический университет

Modeling of Thermal Defeat of Microwave Frequency Diode by Electromagnetic Radiation High-Power Impulse

V.A. Sergeev^{1,2}, A.M. Hodakov¹, A.A. Molgachev²

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Ulyanovsk branch), Russian Academy of Sciences

²Ulyanovsk State Technical University

Представлена модель теплового поражения полупроводникового СВЧ-диода мощным СВЧ-импульсом с температурозависимой плотностью мощности. Найдено распределение максимальной температуры по полупроводниковой структуре в зависимости от длительности импульса излучения.

Ключевые слова: СВЧ-диод; импульс СВЧ-излучения; тепловое поражение; температура.

The model of the thermal defeat of the semiconductor microwave diode by powerful microwave impulse with the temperature dependent density of power has been presented. The distribution of the maximum temperature on semiconductor structure depending on duration of the impulse radiation has been found.

Keywords: microwave diode; impulse of microwave radiation; thermal defeat; temperature.

Воздействие на радиоэлектронную аппаратуру импульсов мощного электромагнитного излучения (ЭМИ) вызывает быстрый (за несколько десятков наносекунд) разогрев структуры полупроводниковых приборов (ППП). Это приводит к появлению канала высокой проводимости в приборной структуре и, как следствие, к тепловому пробоем $p-n$ -переходов. Для эффективной защиты ППП от поражения мощными импульсами ЭМИ необходимы адекватные модели изменения температуры перехода со временем [1]. Известные модели [2–4] теплового поражения ППП мощными ЭМИ являются одномерными и линейными. В этих моделях, в частности, не учитывались температурные зависимости плотности мощности источников тепла и теплофизических характеристик материалов приборных структур. Возникающая в результате этих механизмов положительная тепловая обратная связь (ПТОС) должна приводить к увеличению неоднородности распределения температуры по активной области полупроводниковой структуры и росту ее максимальной температуры [5] по сравнению с линейным приближением.

В настоящей работе рассматривается двухмерная осесимметричная тепловая модель полупроводниковой структуры СВЧ кремниевого диода с учетом ПТОС. Предполагается, что рассеиваемая в структуре тепловая энергия равна энергии внешнего воздействующего импульса ЭМИ и подводимой к диоду электрической энергии от источника питания. Вследствие малой толщины собственно $p-n$ -перехода его тепловое сопротивление является малым и им можно

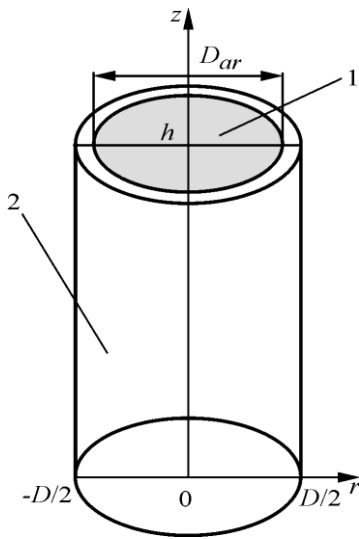


Рис.1. Геометрия моделируемой структуры: 1 – активная область; 2 – кристалл (D, h – характерные размеры структуры по осям r и z)

пренебречь по сравнению с тепловым сопротивлением подложки. В этом случае полупроводниковая структура представляется в виде однослойной пластины цилиндрической формы (рис.1).

Температурное поле в структуре определяется из решения неоднородного уравнения теплопроводности:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial t} = \nabla_{r,z}(\lambda(T)\nabla_{r,z}T(r,z,t)) + Q_V(T(r,z,t)), \quad (1)$$

где $T(r,z,t) = (T_s - T_0)$, T_s – величина перегрева и температура полупроводниковой структуры соответственно; T_0 – начальная температура; λ, c, ρ – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность полупроводника соответственно; $\nabla_{r,z}$ – оператор набла в цилиндрической системе координат; Q_V – объемная плотность мощности.

Начальное условие задачи:

$$T(r,z,0) = T_0(r,z,0). \quad (2)$$

Граничные условия:

$$-\lambda(T) T_r(\pm D/2, z, t) = 0, \quad (3)$$

$$\lambda(T) T_r(r, 0, t) = \alpha_{sp} T(r, 0, t). \quad (4)$$

Здесь $\alpha_{sp} = 4/(\pi D^2 R_{sp})$; $R_{sp}^{-1} = (\pi D \lambda_{sp})/2$ – тепловое сопротивление растекания контакта подложка–корпус [6].

Расчет температурных полей проводился для трех последовательных режимов работы диода, которые отличаются характеристиками внешнего воздействия.

Сначала (первый режим) определяется тепловой нагрев диодной структуры в рабочем режиме до выхода температуры на стационарное значение. В этом случае граничное условие на верхней поверхности полупроводниковой структуры имеет вид

$$-\lambda(T)T_r(r,h,t) = \begin{cases} q(T(r,h,t)), & -(D_{ar}/2) \leq x \leq (D_{ar}/2), \\ 0, & -(D - D_{ar})/2 < x < (D - D_{ar})/2, \end{cases} \quad (5)$$

где $q(T(r,h,t))$ – плотность мощности источников тепла в активной области структуры, определяемая из уравнения теплоэлектрической обратной связи диода; D_{ar} – размер активной области [7]:

$$q(r,h,t) = U_d J_0 \exp\left(-\frac{\Delta E - e(U_d - R_d S_{ar} U_d^{-1} q(T_s(r,h,t)))}{m k_B T_s(r,h,t)}\right), \quad (6)$$

где U_d – прямое падение на светоизлучающем диоде; J_0 – слабо зависящий от температуры параметр; ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводника; R_d – сопротивление полупроводниковой структуры; S_{ar} – площадь активной области; m – параметр, зависящий от механизма токопереноса в диоде; e – заряд электрона; k_B – постоянная Больцмана.

Затем (второй режим) определяется тепловой нагрев структуры совместным действием поступающей в прибор рабочей электрической мощности и мощности ЭМИ. В этом случае к плотности мощности источников тепла в активной области (6) добавляется плотность мощности ЭМИ, равная

$$q_{rad}(r,h,t) = W_0 / S_{ar},$$

где W_0 – мощность ЭМИ.

При достижении в структуре некоторой критической температуры T_{crit} , зависящей от степени легирования областей $p-n$ -перехода (третий режим), примесная проводимость исчезает, полупроводниковая структура превращается в собственный полупроводник, зависимость удельного сопротивления которого от температуры становится подобной экспоненциальной зависимости удельного сопротивления термистора [8]. В этом режиме объемную плотность мощности можно представить в следующем виде:

$$Q_V = Q_0 \left(1 + \alpha(T) \exp \left(- \frac{\Delta E}{k_B T(r, z, t)} \right) \right), \quad (7)$$

где $Q_0 = W_0/V$; V – объем диодной структуры; α – модельный параметр.

Нестационарная нелинейная задача переноса тепла в структуре (1) – (7) решается итерационным численным методом конечных элементов с применением моделирующей среды COMSOL. Управляющим изменяющимся параметром цикла итераций является модельный параметр α , значение которого на каждом временном интервале определяется из решения уравнения, описывающего условие сохранения мощности излучения:

$$\int_V Q_V(r, z, t) dv = W_0, \quad (8)$$

где $dv = 2\pi r dr dz$.

Динамическое распределение температуры находится методом последовательных интервалов времени [9].

Для расчета в качестве примера выбрана диодная полупроводниковая структура с геометрическими размерами $D \times h = 500 \times 100$ мкм, $D_{ar} = 160$ мкм, материал подложки – Si. Зависимости от температуры теплофизических параметров полупроводника $\lambda(T)$, $c(T)$, $\rho(T)$ находятся из базы данных моделирующей среды COMSOL. Режим работы диода: $I = 110$ мА, $U = 3,3$ В. Мощность излучения ЭМИ меняется в пределах от 30 до 100 Вт.

Из проведенных расчетов следует, что при увеличении мощности W_0 вызывающая разрушение структуры длительность импульса заметно уменьшается (рис.2,а) по сравнению с линейным приближением. Для рассматриваемого примера при $W_0 = 100$ Вт учет ПТОС приводит к сокращению в два раза длительности импульса ЭМИ, вызывающей разрушение $p-n$ -перехода (рис.2,б).

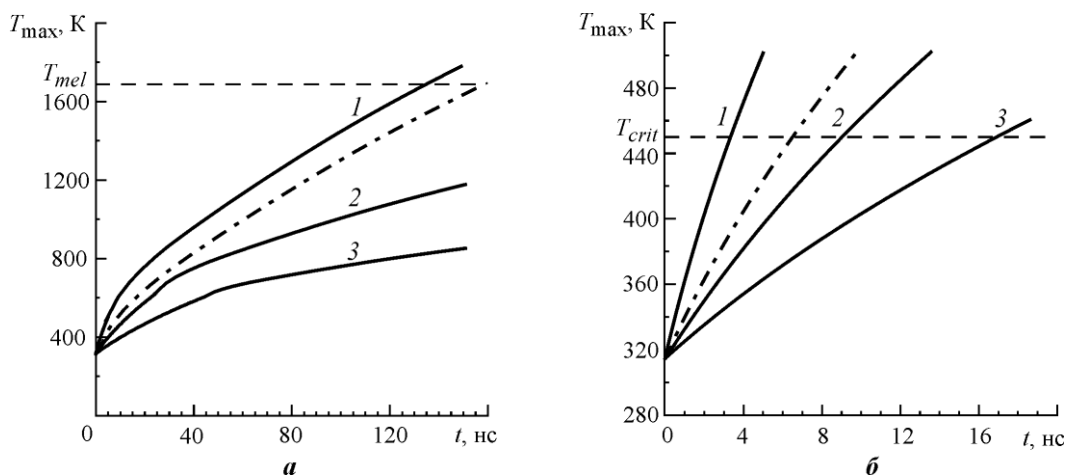


Рис.2. Зависимость максимальной температуры структуры диода от длительности импульса ЭМИ: а – до температуры плавления кристалла $T_{mel} = 1690$ К; б – до температуры разрушения $p-n$ -перехода $T_{crit} = 450$ К; $W_0 = 100; 50; 30$ Вт (кривые 1–3 соответственно); штрихпунктирная линия – температуронезависимое приближение

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (государственное задание №2014/232).

Литература

1. **Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарёв В.Г., Шустов Л.Н.** Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение электронных систем. – М.: Вузовская книга, 2007. – 464 с.
2. **Wunsh D.C., Bell R.R.** Determination of threshold failure levels of semiconductor diodes and transistors due to pulse voltage // IEEE Transaction on Nuclear Science. – 1968. – Vol. NS-15. – N. 6. – P.244–259.
3. **Taska D.M.** Pulse power failure modes in semiconductors // IEEE Transaction on Nuclear Science. – 1970. – Vol. NS-17. – N. 7. – P. 364–372.
4. **Добыкин В.Д.** Развитие теории теплового поражения полупроводниковых структур мощным сверхвысоко-частотным излучением // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53. – №1. – С. 108–111.
5. **Сергеев В.А., Ходаков А.М.** Нелинейная тепловая модель гетеропереходного светодиода // Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – Вып. 5. – С. 691–694.
6. **Lee S., Song S., Au V., Moran K.** Constriction/spreading resistance model for electronic packaging // Proc. of ASME/JSME Thermal Engineering Conference. – 1995. – Vol. 4P. – P. 199.
7. **Сергеев В.А., Ходаков А.М.** Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – 160 с.
8. **Пасынков В.В., Чиркин Л.К.** Полупроводниковые приборы. – СПб.: Лань, 2001. – 480 с.
9. **Сергеев В.А., Ходаков А.М.** Моделирование нестационарных теплоэлектрических процессов в структуре мощного светодиода. // Изв. вузов. Электроника. – 2011. – №6(92). – С. 80–82.

Поступило
3 ноября 2015 г.

Сергеев Вячеслав Андреевич – доктор технических наук, доцент, директор УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, заведующий базовой кафедрой радиотехники, опто- и наноэлектроники Ульяновского государственного технического университета при УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. *Область научных интересов:* токораспределение и теплофизические процессы в твердотельных структурах полупроводниковых приборов и интегральных микросхемах, методы и средства измерения теплофизических параметров изделий электронной техники.
E-mail: sva@ulstu.ru

Ходаков Александр Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. *Область научных интересов:* токораспределение и теплофизические процессы в твердотельных структурах.

Молгачев Алексей Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Ульяновского государственного технического университета. *Область научных интересов:* уравнения математической физики.