

УДК 621.382.088

## ОЦЕНКА В РАМКАХ ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТОЙКОСТИ СВЕТОДИОДА К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СВЧ ИМПУЛЬСОВ

А. М. Ходаков, В. А. Сергеев

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,  
Ульяновский филиал, 432071, Ульяновск, Гончарова, д. 48/2

Статья поступила в редакцию 13 октября 2017 г.

**Аннотация.** Рассматривается оценка в рамках теплоэлектрической модели стойкости гетеропереходного светодиода к воздействию периодической последовательности импульсов ЭМИ, с учетом нелинейных температурных зависимостей плотности тепловой мощности и теплофизических характеристик материалов структуры. Приводятся рассчитанные по разработанной модели зависимости максимальной температуры полупроводниковой структуры светодиода и длительности ее облучения до достижения критических температур в зависимости от параметров импульса ЭМИ.

**Ключевые слова:** импульс СВЧ излучения, мощность излучения, критическая температура, длительность импульса, частота импульса

**Abstract.** To assess the durability of the LED to the effects of a periodic sequence of microwave pulses, a mathematical thermoelectric model was developed. The mathematical description of the model is the joint solution of time-dependent equations of electric and heat conductivity with temperature-dependent thermo-physical and electrical characteristics of the elements of the device structure and bulk density of thermal power. Three LED heating phases corresponding to sequential regimes of work and different external conditions were considered: the LED structure heat in the operation mode until the temperature reaches a steady value; thermal heating of the structure by means of incoming operating electric power of the device and power of electromagnetic radiation; and then melting of its structure. Calculation studies were carried out for AlGaAs/GaAs and InGaN/GaN structures of high-power LEDs on 6H-SiC substrate. Analysis of the results of computational studies showed: 1) the magni-

tude of the pulse duration and the repetition period have a significant effect on the process of heat accumulation in the structure of the LED and the value of its maximum temperature; 2) an increase in the pulse repetition rate and pulse duration may result in the accumulation of more heat in the structure and in the reduction of the critical level of the power density of the EMP, leading either to a deterioration in the quality of the device's operation or to the destruction of its structure; 3) for a given pulse duration, required for damage to the structure of the LED, the energy of the EMR is required the less, the larger the value of the duty cycle of the pulse train.

**Key words:** pulse of microwave radiation, radiation power, critical temperature, pulse duration, pulse frequency

## 1. Введение

Одним из наиболее опасных воздействий, которым могут подвергаться радиоэлектронные средства (РЭС) в процессе эксплуатации является воздействие мощных импульсов СВЧ электромагнитного излучения (ЭМИ). Наименее стойкими к воздействию ЭМИ компонентами РЭС являются полупроводниковые приборы (ППП). Критерием стойкости ППП к СВЧ излучению является качество её функционирования. При этом прибор будет находиться в одном из состояний [1]: нормальное функционирование в соответствии с установленными требованиями; временное снижение качества функционирования либо потеря функции и работоспособности с самовосстановлением; временное снижение качества функционирования либо потеря функции и работоспособности, которые требуют вмешательства оператора или перезапуска системы; снижение качества функционирования или потеря функции, которая не может быть восстановлена оператором из-за повреждения оборудования (компонентов) или программного обеспечения, а также потери данных. Количественная оценка стойкости ППП обычно производится исходя из величины минимального значения плотности мощности (энергии) внешнего поля, при которой прибор находится в одном из вышеперечисленных состояний.

Процессы, протекающие в ППП при действии мощных импульсов ЭМИ,

активно исследуются с 60-х годов прошлого века, с начала широкого применения ППП в аэрокосмической и военной технике [2] и продолжают исследоваться в настоящее время в связи с постоянным изменением технологии, конструкции и функциональных характеристик ППП и средств радиоэлектронной борьбы. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что основной причиной отказов ППП в результате воздействия мощных импульсов ЭМИ является тепловое поражение приборных структур. Обычно рассматривается два вида воздействия ЭМИ на ППП: однократным импульсом и последовательностью импульсов (полиимпульсами). В случае однократного импульса величина плотности мощности СВЧ ЭМИ должна быть значительной, для того чтобы осуществить тепловой разогрев полупроводниковой структуры ППП и ее разрушение. Происходящие в структуре прибора тепловые процессы резко изменяют ее температурное состояние в достаточно ограниченной пространственной области [3, 4]. В случае полиимпульсного режима СВЧ облучения структуры прибора основным процессом, вызывающим ее поражение, является накопление тепла от импульса к импульсу, которое зависит от длительности импульса и частоты его повторения. В самом начале работы ППП постепенное накопление тепловой энергии приводит к функциональному сбою (например, в случае светоизлучающего диода (СИД) к падению оптической мощности), а в дальнейшем к разрушению *p-n* перехода и расплавлению структуры.

Обзор основных моделей теплового поражения полупроводниковых структур СВЧ электромагнитным излучением [5,6] показал, что наиболее широкое распространение получили тепловые модели воздействия на ППП однократного мощного импульса ЭМИ. Стойкость полупроводниковых приборов к воздействию полиимпульсов СВЧ излучения изучена значительно меньше как теоретически, так и экспериментально. Особенности теплоэлектрических процессов (ТЭП) в гетеропереходных светоизлучающих диодах при воздействии на них периодической последовательности электромагнитного излучения до настоящего времени не рассматривались. Тепловое поражение ЭМИ СИД, прежде

всего, приводит к разрушению его гетеропереходной светоизлучающей структуры (ГСС). В процессе исследования ТЭП в светоизлучающем диоде необходимо учитывать механизмы положительной тепловой обратной связи (ПТОС), которые усиливают эффекты неоднородного распределения плотности тока и температуры в активной области ГСС, а также сильную температурную зависимость теплофизических характеристик материалов структуры СИД в рассматриваемых диапазонах температур [7].

## 2. Теплоэлектрическое моделирование и анализ полученных результатов

Для оценки стойкости светодиода к воздействию периодической последовательности СВЧ импульсов была разработана математическая теплоэлектрическая модель, которая позволила исследовать, как при облучении СИД плотностью мощности  $P$  изменяется максимальная температура ГСС в зависимости от времени облучения (числа импульсов), при заданных длительности импульса  $\tau$  и периода его повторения  $t_p$  (частоты  $f$ ). Чтобы учесть выделение тепла в квазинейтральных областях структуры (подложке), предлагаемая модель ГСС представлялась в виде трехслойной системы в прямоугольной системе координат (рис. 1), каждый слой которой характеризуется температурозависимыми теплофизическими и электрофизическими параметрами:  $\lambda_i$  – теплопроводностью,  $\rho_i$  – плотностью,  $c_i$  – теплоемкостью,  $\sigma_i$  – электропроводимостью ( $i = 1, 2, 3$ ).

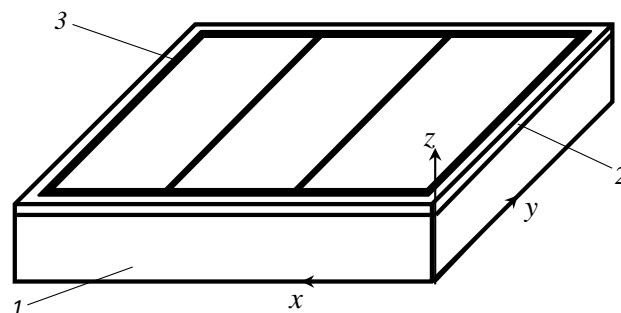


Рис. 1. Геометрия структуры СИД: 1 – подложка,  $a \times a \times h_1$ ; 2 – гетероструктура,  $a \times a \times h_2$ ; 3 – токоведущая металлизация.

Для нахождения распределения температуры по структуре СИД совместно решались следующие уравнения:

$$c_i(T_i)\rho_i(T_i)\frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial t} = \nabla_{r,z}(\lambda_i(T_i)\nabla_{x,y,z}T_i) + Q_{wi}(T_i), \quad (1)$$

$$-\nabla_{x,y,z}(\sigma_i(T_i)\nabla_{x,y,z}V_i) = I_{wi}(T_i)V_i(T_i), \quad (2)$$

где  $T_i(x, y, z, t) = (T_{Si} - T_0)$ ,  $T_{Si}$  – величина перегрева и температура  $i$ -го элемента светоизлучающей структуры соответственно,  $T_0$  – начальная температура;  $\nabla_{x,y,z}$  – оператор набла в прямоугольной системе координат,  $Q_{wi}$ ,  $I_{wi} = I_D / w_i$  – объемные плотности мощности и рабочего тока  $I_D$ ,  $w_i$  – объем  $i$ -го слоя;  $V_i$  – распределение по слою электрического потенциала;  $\sigma_i(T_i) = \sigma_i(T_0)(1 + \alpha_i(T_i - T_0))^{-1}$ ,  $\alpha_i$  – температурный коэффициент сопротивления.

Уравнения решаются со следующим начальным и граничными условиями:

– потенциал нижней поверхности структуры равен нулю, а потенциал верхней поверхности металлизации ( $z_0 = h_1 + h_2$ ) задан:

$$V_3(x, y, z_0, t) = U_0, \quad (3)$$

остальные поверхности структуры светодиода электроизолированы;

$$T_i(x, y, z, 0) = 0, \quad (4)$$

– боковая и верхняя поверхность структуры СИД теплоизолированы, а на нижней поверхности задается условие:

$$\lambda_3(T_3)T_{3z}(x, y, 0, t) = \alpha_{sp}T_3(x, y, 0, t), \quad (6)$$

где  $\alpha_{sp} = 1/(\pi a^2 R_{sp})$ , а  $R_{sp}^{-1} = \pi^{1/2} a \lambda_{sp}$  – тепловое сопротивление растекания контакта подложка-корпус [8].

В случае облучения светодиода последовательностью импульсов ЭМИ плотность мощности моделировалась следующей функциональной зависимостью (рис. 2):

$$P(t) = P_r \sum_{n=0}^N (H(t - nt_p) - H(t - nt_p - \tau)), \quad (7)$$

где  $H(t)$  – функция Хевисайда,  $N$  – полное число импульсов в рассматриваемом промежутке времени.

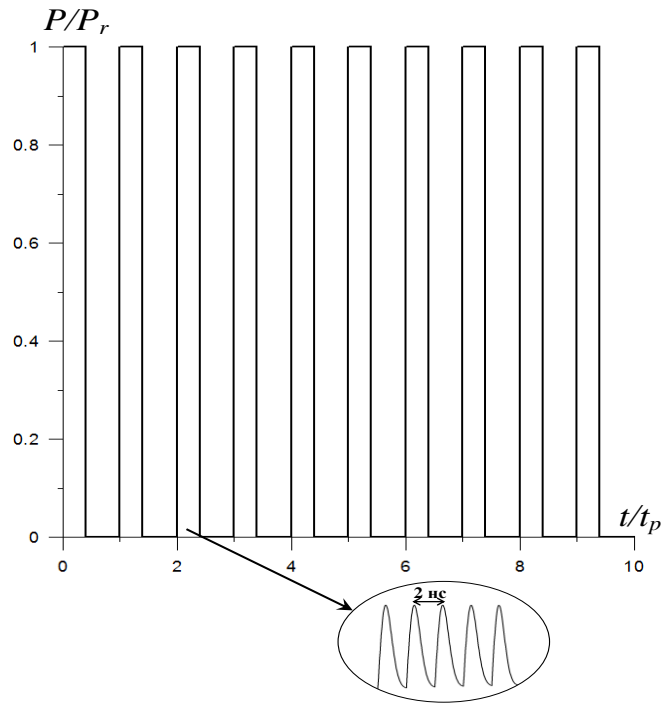


Рис. 2. Нормированная функция плотности мощности ЭМИ.

Решение модельной задачи находилось численным методом конечных элементов. Расчетные исследования проводились для гетероструктуры InGaN/GaN СИД на подложке 6H-SiC. Период повторения импульсов  $t_p$  изменялся от  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$  сек, а длительность импульса от 20 до 100 нс.

Тепловое поведение светодиодных гетероструктур при полиимпульсном режиме воздействия определяется процессом релаксации температуры внутри структуры, в интервалах между импульсами. Для моделируемых видов светодиодных гетероструктур характерное время диффузии тепла составляет (4 – 6) мс. На рисунке 3 представлено изменение максимальной температуры  $p$ - $n$  перехода при мощности импульса ЭМИ  $W = 1$  кВт для определенных значений величин  $\tau$  и  $t_p$ . Резкое возрастание максимальной температуры в определенные моменты времени (в рассматриваемом примере до 880 К) приводят к появлению значительных по величине термонапряжений в гетероструктуре светодиода, образованию протяженных микродефектов и т.д., которые, в конечном итоге, увеличивают скорость деградации прибора. При этом за весь рассматриваемый период времени работы СИД его максимальная температура увеличивается на гораздо меньшую величину (в данном случае  $\Delta T_{\max} = 250$  К). В режиме

разогрева структуры светодиода электрической мощностью от источника рабочего тока и мощностью ЭМИ ее температура может достигать некоторого критического значения  $T_{crit1}$ , при котором происходит функциональный сбой в работе светодиода и последующее разрушение его гетероструктуры. В зависимости от материала гетероструктуры критическая температура гетероперехода находится в пределах  $450 \text{ К} \leq T_{crit1} \leq 600 \text{ К}$  [9].

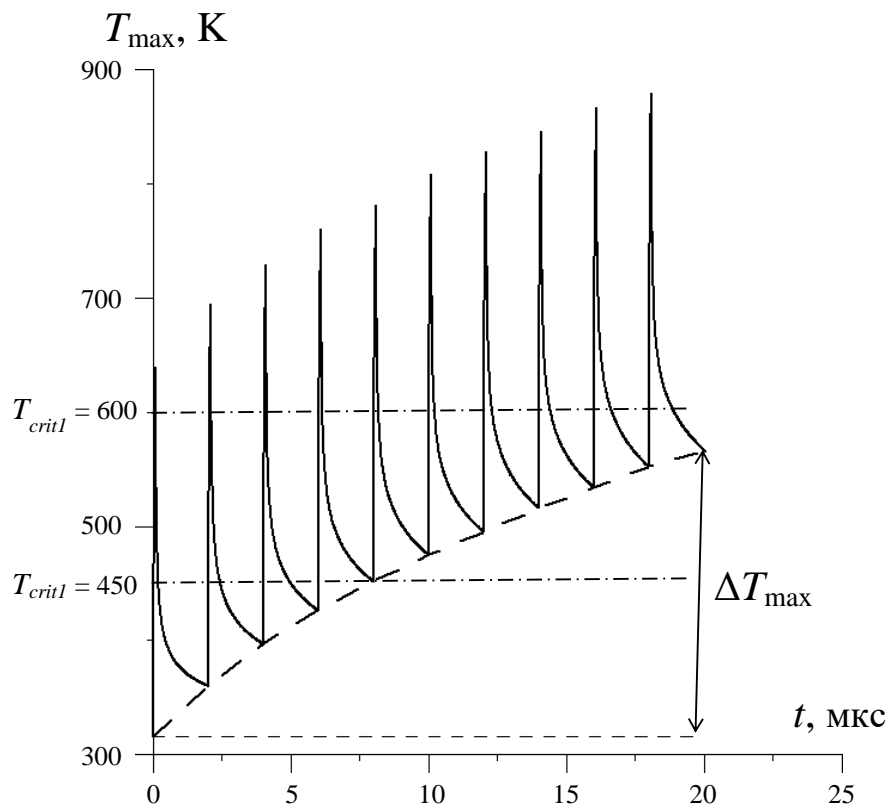


Рис. 3. Максимальная температура гетероструктуры СИД InGaN/GaN;  $\tau = 100$  нс,  $f = 500$  кГц,  $W = 1$  кВт

Величина скважности  $Q = t_p / \tau$  сильно влияет на величины максимального перегрева СИД и числа импульсов  $N$  (время облучения), при которых достигается критическая температура структуры светодиода. При постоянной мощности облучения уменьшение скважности приводит к возрастанию  $T_{max}$  (рис. 4) и уменьшению времени облучения структуры светодиода до достижения ей температуры  $T_{crit1}$  (рис. 5).

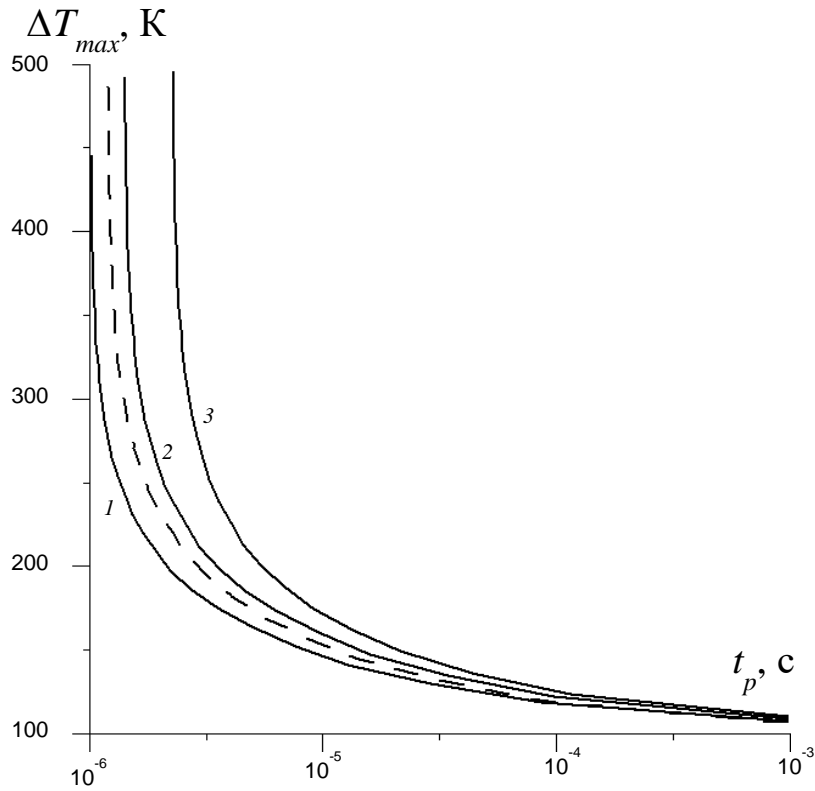


Рис. 4. Максимальный перегрев гетероструктуры СИД InGaN/GaN;  
 $\tau$ : 1 — 30 нс, 2 — 50 нс, 3 — 100 нс (пунктир — без учета ПТОС);  
 $W = 1$  кВт

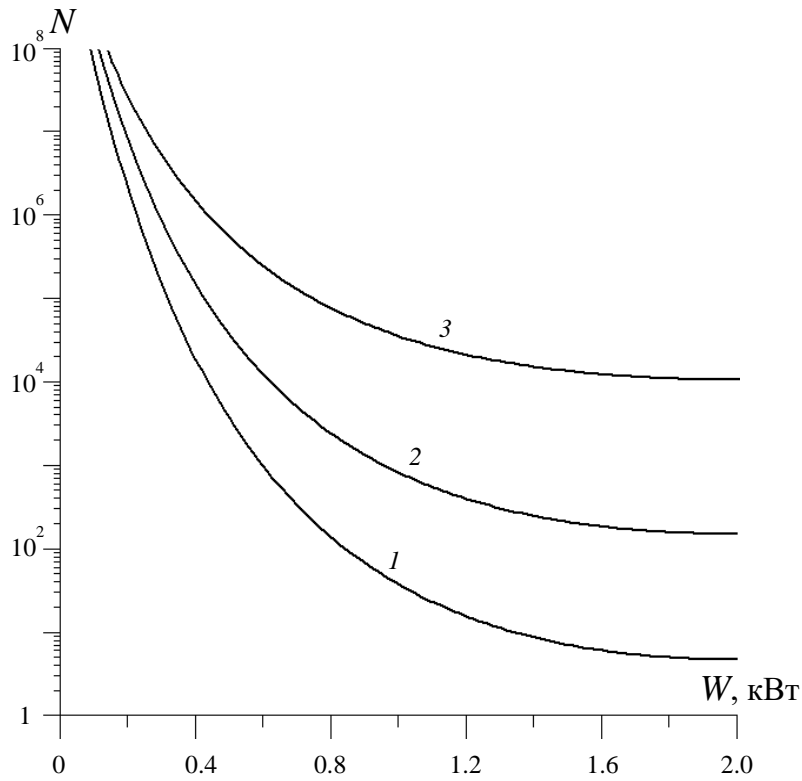


Рис. 5. Число импульсов облучения структуры СИД;  
 $Q$ : 1 — 10, 2 — 50, 3 — 100;  $\tau = 100$  нс;  $T_{crit1} = 460$  К



## Заключение

Анализ результатов оценки стойкости полупроводниковой структуры светоизлучающего диода к воздействию периодической последовательности импульсов СВЧ ЭМИ в рамках теплоэлектрической модели позволяет сделать следующие выводы:

– величины длительности импульса и периода его повторения имеют существенное влияние на процесс накопления тепла в структуре СИД и значения ее максимальной температуры;

– увеличение частоты повторения импульса и длительности импульса может привести к накоплению большего количества тепла в структуре и снижению критического уровня плотности мощности ЭМИ, приводящего либо к ухудшению качества функционирования прибора, либо к разрушению его структуры;

– при заданной длительности импульса, требуемой для поражения структуры СИД энергии ЭМИ требуется тем меньше, чем меньше величина скважности последовательности импульсов излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732151.

## Литература

1. ГОСТ Р 51317.4.4-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний. М: ГОССТАНДАРТ РОССИИ, 1999.
2. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. М: Радио и связь 1988.
3. Рикетс Л.У., Бриджес Д.Э, Майлетта Д. Электромагнитный импульс и методы защиты. М: Атомиздат, 1979.
4. Ходаков А.М., Сергеев В.А., Гавриков А.А. Теплоэлектрические процессы в гетеропереходном светоизлучающем диоде при воздействии на него мощного

импульсного СВЧ излучения. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2017, № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar17/6/text.pdf>.

5. 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, v. NS-15, № 6, p. 244-259.

6. Алексеев В.Ф., Журавлев В.И. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Доклады БГУИР. – 2005, №2, с. 65-72.

7. Сергеев В. А., Ходаков А. М. Теплоэлектрические модели мощных биполярных полупроводниковых приборов. Часть II. Нелинейная теплоэлектрическая модель мощных светоизлучающих диодов. // Радиотехника и электроника. – 2015, т. 60, № 12, с. 1254-1258.

8. Lee, S. Spreading Resistance Model for Electronic packaging / S. Lee, S. Song ,V. Au // Proceedings of ASME/JSME Thermal Engineering Conference. 1995. V. 4. P. 199.

9. Шуберт Ф. Светодиоды. М. : Физматлит, 2008.

**Ссылка на статью:**

А. М. Ходаков, В. А. Сергеев. Оценка в рамках теплоэлектрической модели стойкости светодиода к воздействию периодической последовательности СВЧ импульсов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct17/7/text.pdf>