

УДК 621.382.088

ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕТЕРОПЕРЕХОДНОМ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕМ ДИОДЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

А. М. Ходаков, В. А. Сергеев, А. А. Гавриков

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

Статья поступила в редакцию 22 марта 2017 г.

Аннотация. Представлена теплоэлектрическая модель теплового поражения гетеропереходного светодиода мощным СВЧ электромагнитным импульсом, с учетом нелинейных температурных зависимостей плотности тепловой мощности и теплофизических характеристик материалов структуры. Приводится рассчитанная по разработанной модели зависимость мощности теплового поражения полупроводниковой структуры от длительности воздействующего импульса для различных типов гетероструктур светоизлучающих диодов.

Ключевые слова: импульс СВЧ излучения, тепловое поражение, мощность теплового поражения, температура.

Abstract. One of the possible causes of failures of heterojunction light-emitting diodes under the influence of powerful microwave electromagnetic radiation are thermal processes that occur in a LED's heterojunction structure. A mathematical thermoelectric model of thermal damage of a heterojunction LED was developed in order to investigate the dependence of catastrophic failure of heterojunction LEDs with maximum power of microwave radiation pulse P_k on its length τ_k . 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 and Si substrates. Resulting graph calculated from the represented model contains a part of adiabatic heating with heating pulses lengths much less than characteristic time of heat diffusion in the semiconductor structure of the LED and a part of gradual output to the quasistatic heating mode with a minimum striking power. The obtained results were compared with results calculated using the generic Wunsch-Bell model.

Key words: impulse of microwave radiation; thermal damage; thermal damage power, temperature.

1. Введение

Физические процессы в полупроводниковых приборах (ППП) в условиях электромагнитного воздействия различного вида давно и активно исследуются [1-5]. Причиной необратимых отказов ППП при воздействии мощных импульсов электромагнитного излучения (ЭМИ) может быть тепловое поражение полупроводников, при котором происходит проплавление локальных областей этих структур. Однако, несмотря на разнообразие предложенных моделей теплового поражения полупроводниковых приборов ЭМИ [1], имеются существенные расхождения между расчетными и экспериментальными данными, особенно при достижении в полупроводниках высоких температур.

Наиболее широкое распространение получили тепловые модели воздействия на ППП однократного мощного импульса ЭМИ [2-4]. Эти модели основываются на решении нестационарного уравнения теплопроводности. При этом предполагается, что область локализации тепла находится в обедненной области $p-n$ перехода. Подобный подход дает возможность оценить зависимость мощности теплового поражения P_r ППП от длительности

воздействующего импульса τ_r , но существенным ограничением таких моделей является предположение о том, что мощность импульса ЭМИ рассеивается в области $p-n$ перехода, а не распределяется по всему объему приборной структуры. В этих моделях также не учитывались температурные зависимости плотности тепловой мощности и теплофизических характеристик материалов полупроводниковой структуры, изменение значений величин которых при высоких температурах становится значительным [6,7].

Теплоэлектрические процессы в гетеропереходных светоизлучающих диодах при воздействии импульсов мощного ЭМИ до настоящего времени не рассматривались. Вместе с тем исследование этих процессов представляет как теоретический, так и практический интерес, поскольку светодиоды в настоящее время широко используются в составе ответственных радиоэлектронных устройств, и их отказ может привести к отказу устройства в целом. Сами механизмы однократного и периодического воздействия на светодиод импульса мощного СВЧ ЭМИ еще не изучены, отсутствуют экспериментальные данные, позволяющие установить какие-либо функциональные зависимости и провести оценки областей изменений параметров СВЧ излучения, при которых сохраняется работоспособность прибора.

Следует ожидать, что основной причиной отказов светодиодов при воздействии мощных импульсов ЭМИ также является тепловое поражение (разрушение) гетеропереходной светоизлучающей структуры (ГСС). Однако при моделировании теплоэлектрических процессов в светодиодах необходимо учитывать свойства и особенности применяемых в них полупроводниковых материалов, а также ранее не учитываемые механизмы положительной тепловой обратной связи (ПТОС), которые усиливают эффекты неоднородного распределения плотности тока и температуры в активной области ГСС [8,9]. В результате действия этих механизмов зависимости максимальной и средней температуры $p-n$ перехода светодиода от полной рассеиваемой светодиодом тепловой мощности становятся нелинейными. Линейные тепловые модели

дают существенно заниженные значения указанных температур, особенно при больших мощностях внешнего ЭМИ.

Основной целью проведенного в настоящей работе исследования является нахождение поля температур в элементах структуры светодиода при воздействии на него мощного СВЧ ЭМИ. Предложенная модель должна позволить определить изменение максимальной температуры гетероструктуры со временем, критические значения мощности теплового поражения и длительности импульса СВЧ излучения, вызывающего катастрофический отказ гетеропереходного светодиода.

2. Теплоэлектрическая модель

Для определения температурного поля в элементах структуры гетеропереходного светодиода при воздействии на него мощного СВЧ ЭМИ была построена теплоэлектрическая модель осесимметричной полупроводниковой структуры светодиода. Обычно полагают [10-12], что поскольку толщина и глубина залегания активной области гетероструктуры мала по сравнению с толщиной кристалла (подложки), то все источники тепла можно считать расположенными на верхней поверхности кристалла светодиода. В этом случае однородное уравнение теплопроводности решается с поверхностной плотностью тепловой мощности. Для того чтобы учесть выделение тепла в квазинейтральных областях структуры (подложке), предлагаемая осесимметричная модель светодиода представляется в виде двухслойной системы (1-й верхний слой – гетероструктура и 2-й слой – подложка), каждый слой которой характеризуется температурозависимыми теплофизическими и электрофизическими параметрами: λ_i – теплопроводностью, ρ_i – плотностью, c_i – теплоемкостью, σ_i – электропроводимостью ($i = 1, 2$).

Температурное поле в структуре находится из решения неоднородного уравнения теплопроводности

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

где $T_i(r,z,t) = (T_{Si} - T_0)$, T_{Si} – величина перегрева и температура i -го элемента светоизлучающей структуры соответственно, T_0 – начальная температура; $\nabla_{r,z}$ – оператор набла в цилиндрической системе координат.

В каждом слое этой системы выделяется тепло с объемной плотностью мощности

$$Q_{wi}(T_i) = I_{wi}(T_i)V_i(T_i), \quad (2)$$

где $I_{wi} = I_D / w_i$ – объемная плотность рабочего тока I_D , w_i – объем i -го слоя; V_i – распределение по слою электрического потенциала, определяемое из решения уравнения:

$$-\nabla_{r,z}(\sigma_i(T_i)\nabla_{r,z}V_i) = I_{wi}, \quad (3)$$

$\sigma_i(T_i) = \sigma_i(T_0)(1 + \alpha_i(T_i - T_0))^{-1}$; α_i – температурный коэффициент сопротивления.

Потенциал нижней поверхности структуры равен нулю, а потенциал верхней поверхности металлизации ($z = h_1$) задан:

$$V_1(r, h_1, t) = U_0. \quad (4)$$

Значение U_0 берется из рабочей вольтамперной характеристики (ВАХ) прибора. Остальные поверхности структуры светодиода электроизолированы.

Уравнение теплопроводности решается со следующим начальным и граничными условиями:

$$T_i(r, z, 0) = 0, \quad (5)$$

$$\lambda_i(T_i)T_{ir}(\pm R, z, t) = 0, \quad \lambda_1(T_1)T_{1z}(r, h_1, t) = 0, \quad (6)$$

$$\lambda_2(T_2)T_{2r}(r, 0, t) = \alpha_{sp}T_2(r, 0, t), \quad (7)$$

где R – радиус структуры, $\alpha_{sp} = 1 / (\pi R^2 R_{sp})$, а $R_{sp}^{-1} = \pi R \lambda_{sp}$ – тепловое сопротивление растекания контакта подложка-корпус [13].

Процесс нагрева светодиодной структуры мощным импульсом СВЧ ЭМИ разделяется на три временных этапа [14], которые соответствуют трем различным тепловым состояниям светодиода и отличаются характеристиками внешнего воздействия, а именно:

1) На первом этапе определяется тепловой нагрев ГСС светодиода в рабочем режиме до выхода температуры на стационарное значение. Так как занимаемый гетероструктурой объем мал по сравнению с объемом подложки, то можно считать, что плотность тока $J(r, z, t)$ в гетероструктуре слабо зависит от координаты z . Тогда объемная плотность мощности тепловых источников, действующих в слое гетероструктуры, представляется следующим образом:

$$Q_{w1} = \frac{(1 - \eta(T_1, J))J(T_1(r, t))U_1(T_1)}{\Delta h_1}, \quad (8)$$

где $J(T_1(r, t)) = J_0 \exp\left(-\frac{\Delta E - e(U_1 - R_D S_{ar} J(T_1(r, t)))}{pk_B T_1(r, t)}\right), \quad (9)$

J_0 – слабо зависящий от температуры параметр, ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводника, R_D – сопротивление квазинейтральных областей гетероструктуры, S_{ar} – площадь активной области, Δh_1 – толщина гетероструктуры, p – параметр, зависящий от механизма токопереноса в светодиоде, e – заряд электрона, k_B – постоянная Больцмана, η – эффективность СИД.

На этом этапе необходимо чтобы выполнялось условие включения светодиода во внешнюю электрическую цепь, то есть соблюдалось условие постоянства протекающего через СИД полного тока I_D [8]:

$$2\pi \iint_{S_{ar}} J(T_1(r, t)) r dr = I_D = const. \quad (10)$$

Максимальная температура гетероперехода светодиода T_m в рабочем состоянии обычно меньше 450 К.

2) На втором этапе рассчитывается температура структуры в результате ее разогрева электрической мощностью от источника рабочего тока и мощностью ЭМИ. То есть к определяемой выражением (8) объемной плотности мощности добавляется тепловая объемная плотность мощности ЭМИ: $Q_{rad} = P_r / w_1$. В этом режиме температура структуры может достигать некоторого критического значения T_{crit} , при котором происходит функциональный сбой в работе светодиода, но еще не наступает разрушение его гетероструктуры. В зависимости от материала гетероструктуры критическая температура гетероперехода находится в пределах $450 \text{ K} \leq T_{crit} \leq 600 \text{ K}$ [14].

3) На третьем этапе происходит нагрев светоизлучающей структуры мощностью ЭМИ до максимальной температуры $T_m > 600\text{K}$. При достижении некоторого значения температуры, зависящего от степени легирования областей $p-n$ перехода, примесная проводимость исчезает, полупроводниковая структура превращается в собственный полупроводник. Мощностью источника рабочего тока в этом режиме можно пренебречь и объемную плотность мощности представить в следующем виде [15]:

$$Q_{w_{1,2}} = Q_{0_{1,2}} \left(1 + \alpha(T_{1,2}) \exp \left(- \frac{\Delta E_{1,2}}{k_B T_{1,2}(r, z, t)} \right) \right), \quad (11)$$

где α – модельный параметр, значение которого на каждом временном интервале определяется из решения уравнения, описывающего условие сохранения мощности ЭМИ:

$$\int_{w_1} Q_{w_1}(r, z, t) dw + \int_{w_2} Q_{w_2}(r, z, t) dw = P_r, \quad (12)$$

где $dw = 2\pi r dr dz$.

Известно, что с ростом температуры и плотности тока квантовая эффективность светодиода падает, что приводит к дополнительной ПТОС в гетероструктуре. Зависимость квантовой эффективности светодиода от плотности тока и температуры чаще всего моделируется функцией вида [9]:

$$\eta_{int}(T_1, J) = \eta_0(T_0, J_0) \exp(-C_T \Delta T_1 - C_J \Delta J), \quad (13)$$

где η_0 – значение квантовой эффективности СИД при начальных значениях T_0 и J_0 , ΔT_1 , ΔJ – отклонения температуры и плотности тока от начальных значений. Параметры C_T , C_J и η_0 определяются из аппроксимации экспериментальных данных для выбранного типа СИД.

3. Численное решение задачи и анализ полученных результатов

Решение модельной задачи (1) – (7) находилось численным методом конечных элементов с помощью специально разработанной программы, включающей в себя интерактивную программную среду COMSOL Multiphysics. Для нахождения нестационарного распределения температуры в структуре применялся метод последовательных интервалов времени [16]. Расчетные исследования проводились для структур AlGaAs/GaAs [17] и InGaN/GaN [18] мощных СИД на подложках 6H-SiC и Si. Зависимости от температуры теплофизических характеристик структур выбирались из базы данных моделирующей среды COMSOL, в которой температурные зависимости описываются кусочно-непрерывными полиномами двух видов:

$$1) \lambda(T) = \sum_j a_{\lambda_j} T^j, c(T) = \sum_j a_{c_j} T^j, 2) \lambda(T) = \exp\left(\sum_j a_{\lambda_j} T^j\right), c(T) = \exp\left(\sum_j a_{c_j} T^j\right)$$

Значения плотности материалов элементов структуры ρ_i слабо меняются в широком диапазоне температур, вплоть до температуры плавления. Геометрические размеры полупроводниковой структуры СИД изменялись в пределах: $R = (1.0 - 1.5) \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta h_1 = (4.0 - 6.0) \cdot 10^{-6}$ м; $\Delta h_2 = (1.4 - 1.7) \cdot 10^{-4}$ м. Электрофизические характеристики элементов структуры светодиода взяты из справочных данных, приведенных в [7].

Для находящегося в рабочем состоянии светодиода (режим 1), зависящее от коэффициента температуропроводности структуры a время выхода температуры на стационарное значение τ_D составляет для выбранных структур порядка несколько миллисекунд (рис. 1).

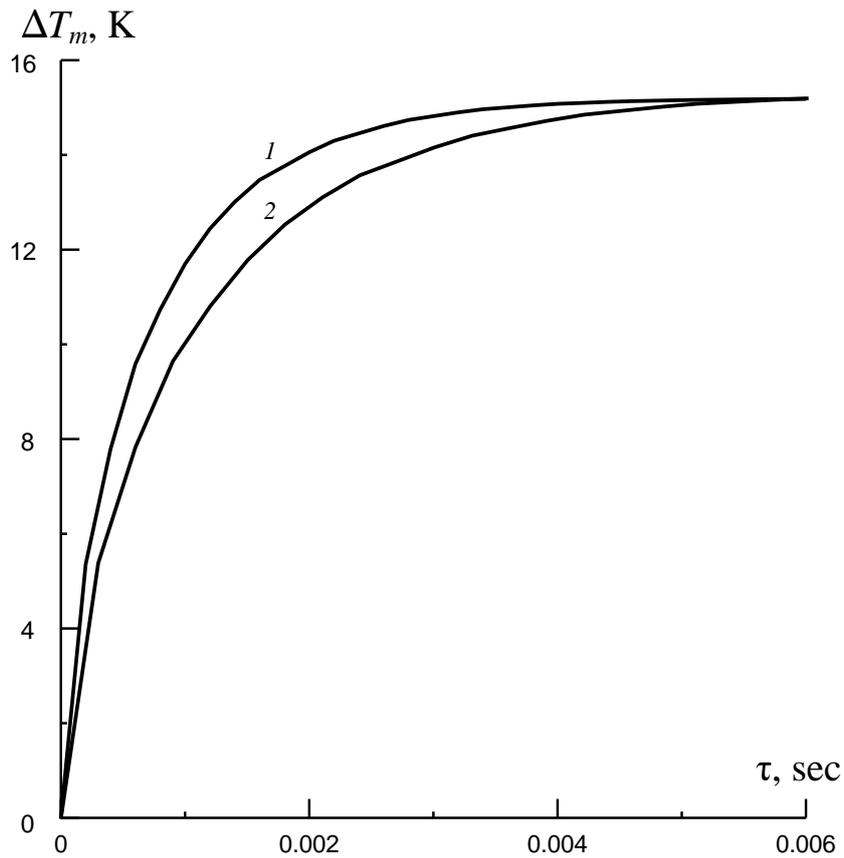


Рис. 1. Максимальный перегрев гетероструктур СИД в рабочем режиме:
 1 – InGaN/GaN ($a = 4.31 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$); 2 – AlGaAs/GaAs ($a = 1.89 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$)

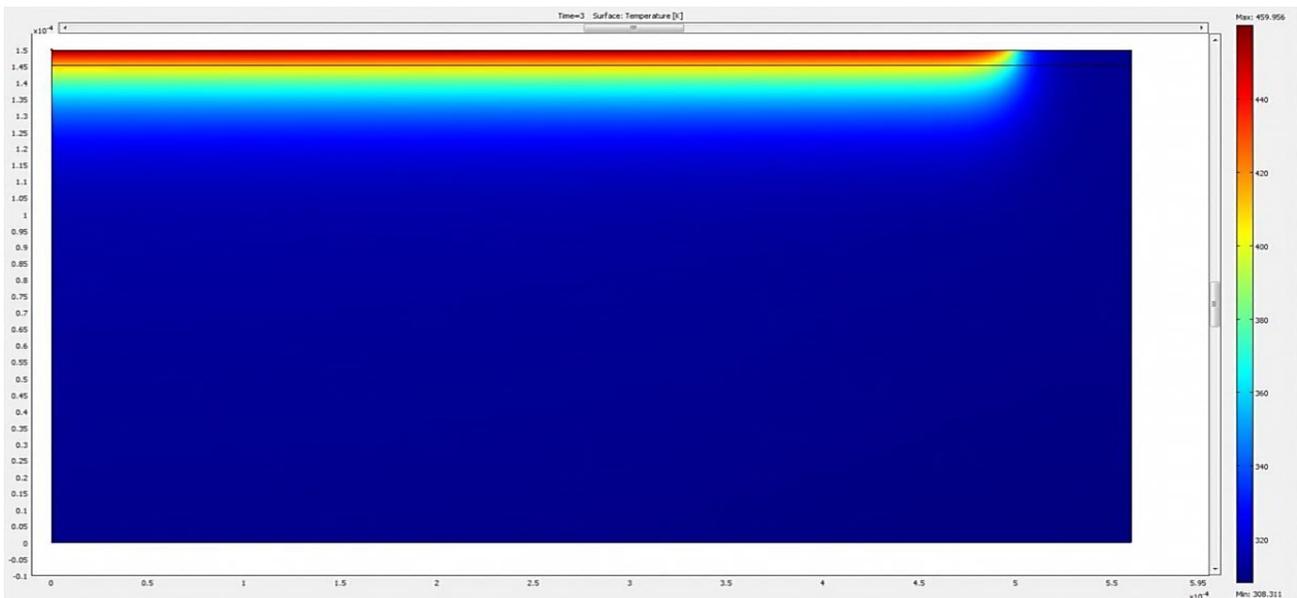


Рис. 2. Температурное поле при адиабатном разогреве структуры InGaN/GaN светодиода импульсом ЭМИ; $E_r = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$, $\tau_r = 30 \text{ нс}$, $T_{crit} = 460 \text{ К}$

В дальнейшем (режим 2), в течение длительности воздействующего на полупроводниковую структуру мощного импульса СВЧ ЭМИ с энергией E_r , тепло слабо распространяется от области перегрева гетероструктуры ($\tau_r \ll 0,001\text{с}$); происходит ее адиабатический разогрев (рис. 2). В малом объеме структуры возникает большой градиент температуры (рис. 3), что приводит к появлению значительных термических напряжений в элементах структуры, которые являются причиной отслоения контактно-металлизационной системы, нарушения контакта между элементами структуры и т.д. Этот режим работы светодиода также характерен тем, что при протекании токов большой плотности происходит электродиффузионное перераспределение примесей в области скопления протяженных микродефектов, расположенных в активной области.

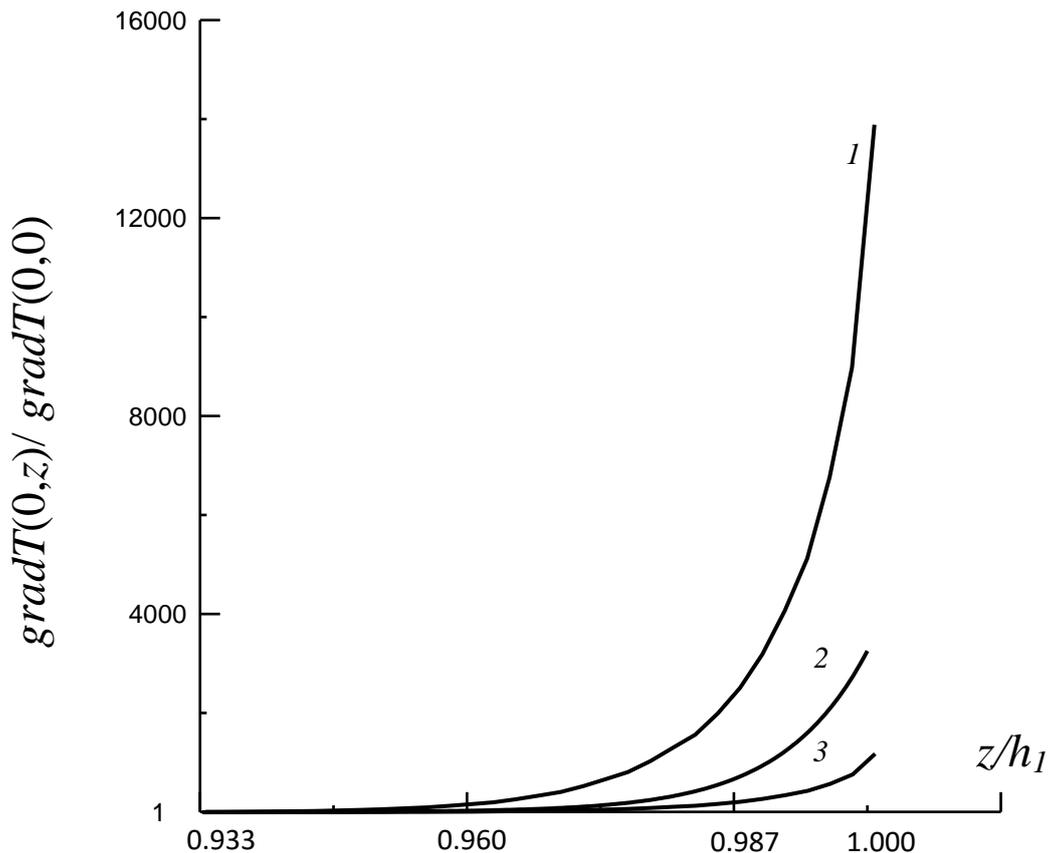


Рис. 3. Изменение градиента температуры по высоте гетероструктуры;
 $E_r = 6 \cdot 10^{-3}$ Дж; τ_r : 1 – 5, 2 – 30, 3 – 100 нс

В результате, такие факторы, как сильный локальный нагрев, появление термических напряжений и образование дополнительных точечных дефектов, являющихся центрами безизлучательной рекомбинации, приводят к резкому падению квантовой эффективности светодиода [19] и, следовательно, к дальнейшему увеличению действующей в структуре объемной плотности мощности тепловых источников (8). Начинаются процессы быстрой деградации светодиода, приводящие к функциональному сбою прибора и в конечном итоге к разрушению его гетероструктуры.

Если дальше увеличивать энергию импульса ЭМИ (режим 3), то за короткий промежуток времени наблюдается распространение мощного потока тепла вглубь структуры светодиода на значительное расстояние, вплоть до теплоотводящего элемента светодиода (рис. 4). Максимальная температура достигает температуры плавления полупроводника подложки $T_m = T_{melt} \approx 1700$ К (для Si) и 3100 (для 6H-SiC).

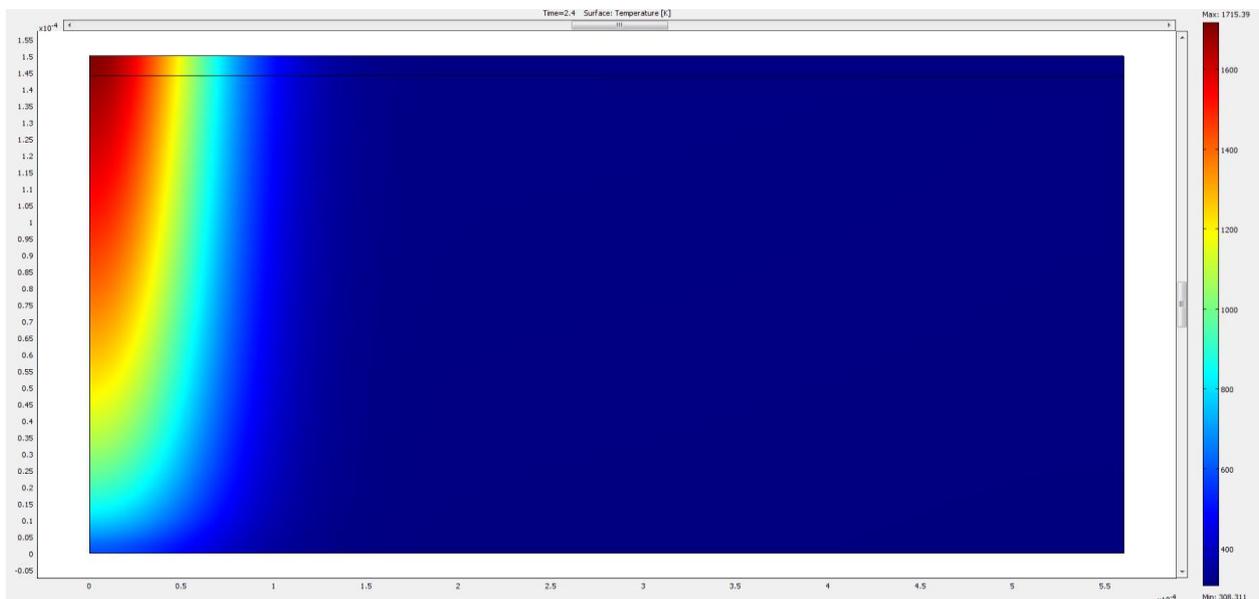


Рис. 4. Температурное поле при локальном плавлении структуры InGaN/GaN светодиода импульсом ЭМИ; $E_r = 8 \cdot 10^{-2}$ Дж, $\tau_r = 100$ нс, $T_{melt} = 1700$ К

Представленные на рис. 5 и 6 в рассматриваемом временном диапазоне изменения длительности импульса СВЧ ЭМИ расчетные зависимости $P_r(\tau_r)$ содержат участки адиабатного нагрева, при длительностях импульса много меньше характерного времени диффузии тепла в светодиодной структуре

$(\tau_r \ll \tau_D)$, с постепенным выходом на режим квазистатического нагрева с поражающей минимальной мощностью $P_r(\tau_r \rightarrow \infty) = P_0$. Для рассматриваемых видов светодиодных структур величина $\tau_D = (4 - 6)$ мс, а предельная минимальная мощность разрушения P_0 составляет порядка 10^7 Вт/м².

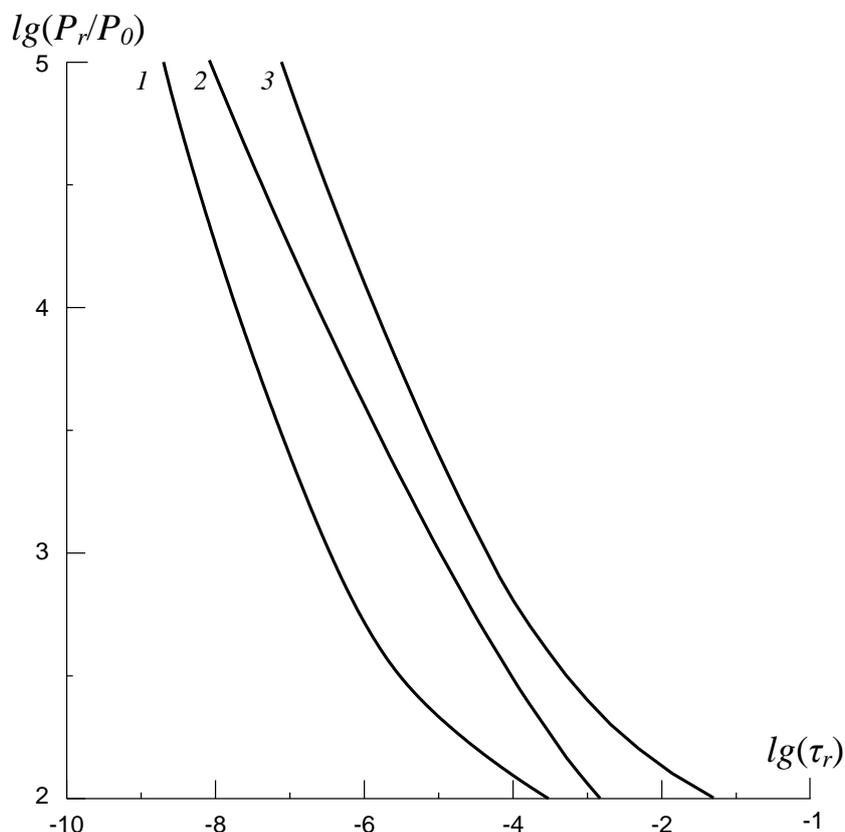


Рис. 5. Мощность теплового поражения структуры InGaN/GaN; T_m : 1 и 2 (расчет по модели сравнения [20]) – 600 К, 3 – 1700 К

Было проведено сравнение (рис. 5, кривые 1 и 2) полученных результатов и рассчитанных по обобщенной модели Вунша–Белла [20]. Согласно этой модели зависимость мощности поражения от величины длительности импульса ЭМИ определяется соотношением:

$$P_r(\tau_r) = (A\tau_r^{-1} + B\tau_r^{-0.5} + C)(T_r - T_0), \quad (14)$$

где постоянные A , B , C зависят от геометрических и теплофизических характеристик кристалла, температуры поражения, толщины p - n перехода и рассчитываются при некоторой средней температуре полупроводниковой структуры. Из сравнения результатов следует, что при одной и той же

мощности поражения светодиодной структуры, длительность импульса, рассчитанная по модели сравнения [20], значительно больше (в среднем на 150% для всего расчетного временного диапазона) чем аналогичная длительность, полученная из расчетов по предложенной нами модели, причем разница значительно уменьшается для импульсов длительностью $\tau_r > \tau_D$. Разница между полученными результатами объясняется, в основном, не учетом вышеуказанных механизмов ПТОС.

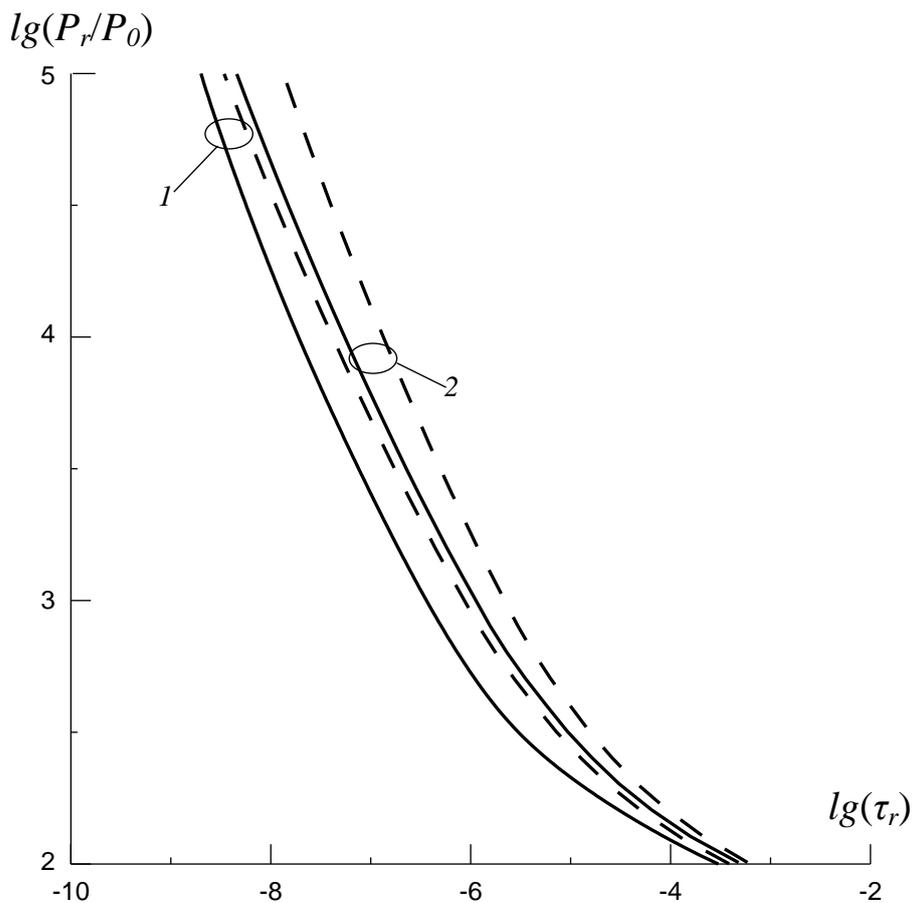


Рис. 6. Мощность теплового поражения структур: 1 – InGaN/GaN 2 – AlGaAs/GaAs; пунктир – подложка 6H-SiC; $T_m = 600$ К

Как следует из результатов вычислений, представленных на рис. 6, во всем расчетном временном диапазоне, при одинаковой мощности поражения P_r , для поражения гетероструктуры InGaN/GaN (кривые 1) требуется импульс поражения в среднем в 2 раза меньшей длительности, чем для гетероструктуры AlGaAs/GaAs (кривые 2). Замена в структурах подложки из материала Si на подложку из материала 6H-SiC, который обладает большим коэффициентом

теплопроводности, увеличивает длительность τ_r , примерно в 2 и 3 раза соответственно для рассматриваемых структур.

4. Заключение

Анализ результатов теплоэлектрического моделирования импульсного воздействия СВЧ ЭМИ на полупроводниковую структуру светоизлучающего диода позволяет сделать следующие выводы:

– разработанная теплоэлектрическая модель, в которой учитываются нелинейные температурные зависимости плотности тепловой мощности и физических характеристик материалов структуры позволяет получить зависимость мощности теплового поражения полупроводниковой структуры от длительности воздействующего импульса ЭМИ;

– модель описывает все известные в настоящее время характерные участки поведения мощностных характеристик ГГС при воздействии импульса СВЧ ЭМИ; полученные зависимости мощности теплового поражения от длительности импульса ЭМИ содержат участок адиабатного нагрева при длительностях импульса много меньше характерного времени диффузии тепла в ГГС светодиода, с постепенным выходом на режим квазистатического нагрева с поражающей минимальной мощностью;

– показано, что для одной и той же мощности поражения ГГС длительность поражающего импульса, рассчитанная по предлагаемой модели, значительно меньше длительности, рассчитанной по наиболее распространенной обобщенной модели Вунша–Белла; это означает, что учет вышеупомянутых нелинейностей в разработанной модели приводит к существенному уменьшению значений величины энергии поражения ГГС светодиода мощным СВЧ электромагнитным излучением.

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

Литература

1. Алексеев В.Ф., Журавлев В.И. Тепловые модели отказов полупроводниковых структур при воздействии мощных электромагнитных импульсов // Доклады БГУИР. 2005. №2. Стр. 65-72.
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. V. NS-15. N 6. P. 244-259.
3. Dwyer V.M., Franklin A.J., Campbell D.S. Thermal failure in semiconductor devices//Solid-State Electronics. 1990. V.33. N5. P. 553-560.
4. Добыкин В.Д. Развитие теории теплового поражения полупроводниковых структур мощным электромагнитным излучением // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. №1. Стр. 108-111.
5. Кравченко В.И., Серков А.А., Бреславец В.С. и др. Моделирование физических механизмов возникновения необратимых отказов полупроводниковых приборов в условиях электромагнитного воздействия // Вестник НТУ «ХПИ». 2015. №51. Стр. 56- 59.
6. Hiroyuki Shibata, Yoshio Waseda, Hiromichi Ohta at.al. High thermal conductivity of gallium nitride (GaN) crystals grows by HVPE process // Materials Transactions. 2007. V.48. N10. P. 2782-2786.
7. NSM Archive Physical Properties of Semiconductors. // URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/>.
8. 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. Стр. 1254-1258.
9. Сергеев В.А., Ходаков А.М. Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов. Ульяновск: УлГТУ, 2012.
10. Bin Du, Hudgins J.L. Santi E. at al. Transient Electrothermal Simulation of Power Semiconductor Devices // IEEE Transactions on power electronics. 2010. V. 25. N1. P. 237-248.

11. T.K. Gachovska, B. Du, J.L. Hudgins, E. Santi. Transient Electro-Thermal Modeling of Bipolar Power Semiconductor Devices. Morgan & Claypool: San Rafael, 2013.
12. Shan O., Dai Q., Chhajed S. Analysis of thermal properties of GaInN light-emitting diodes and laser diodes. // Journal of applied physics. 2010. N108. P. 30-38.
13. 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
14. Шуберт Ф. Светодиоды. М. : Физматлит, 2008.
15. Сергеев В.А., Ходаков А.М. и Молгачев А.А. Моделирование теплового поражения СВЧ диода мощным импульсом электромагнитного излучения // Известия вузов. Электроника. 2016. Т. 21. №3. Стр. 289–292.
16. Сергеев В.А., Ходаков А.М. Моделирование нестационарных теплоэлектрических процессов в структуре мощного светодиода. // Известия вузов. Электроника. 2011. №6. Стр. 80–82.
17. Johnston, A. H. Proton Degradation of Light-Emitting Diodes / A. H. Johnston, B. G. Rax, L. E. Selva and C. E. Barnes // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1999. V. 46. P. 1781.
18. Светодиоды arlight // URL: <http://www.arlight.ru/catalog/svetodiody-100001/> .
19. Shun-Lien Chuang, Akira Ishibashi, Satoru Kijima et al. Kinetic model for degradation of light-emitting diode // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1997 V. 33. N6. P.970-979 .
20. Taska D.M. Pulse power failure modes in semiconductors // IEEE Transaction on Nuclear Science. 1970. V. NS-17. N 7. P. 364-372.

Ссылка на статью:

А.М.Ходаков, В.А.Сергеев, АА.Гавриков. 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>