

PACS numbers: 52.80.Pi, 44.10.+ i

АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЛАВИННО-ПРОЛЕТНЫХ ДИОДОВ

М.С. Сорокин¹, А.В. Архипов²

¹ Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
им. Петра Василенко
ул. Энгельса, 19, 61002, Харьков, Украина

² Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
ул. ак. Проскуры, 12, 61085 Харьков, Украина
E-mail: obel@ire.kharkov.ua

Решена нестационарная задача теплового процесса для импульсного режима ЛПД. Рассмотрена одномерная тепловая модель этих диодов, в которой учтены неоднородность распределения тепловой мощности и растекания тепла по теплоотводу в рабочем интервале температур. Приведены результаты численного расчета зависимости средней температуры активного слоя и теплового сопротивления от параметров импульса, а также от геометрических и теплофизических параметров диода.

Ключевые слова: ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ, ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА, СКВАЖНОСТЬ ИМПУЛЬСА, ТЕПЛОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ.

(Получено 18.11.2009, в отредактированной форме – 05.12.2009)

1. ВВЕДЕНИЕ

Максимальные выходные мощности полупроводниковых приборов ограничиваются прежде всего разогревом активных участков полупроводника до температур, при которых происходит термическое разрушение этих участков. Переход к импульсному режиму позволяет увеличить мгновенные значения отдаваемой прибором СВЧ мощности в тем большей степени, чем меньше длительность импульса. Строгое решение нестационарных тепловых задач для конкретных структур является математически весьма сложным и может быть выполнено только с привлечением ЭВМ. Для ряда упрощенных моделей в литературе получены аналитические зависимости температуры активного участка лавинно-пролетных диодов (ЛПД) от времени [1, 2]. Однако эти зависимости для строго количественных оценок непригодны, т.к в них не учтен такой существенный фактор, как изменение с температурой теплопроводности материалов в рабочем интервале температур 300 ÷ 500 К, которое весьма значительно.

В данной работе определение температурных характеристик ЛПД проводится на основе аналитического подхода [3]. Результаты такого анализа охватывают широкую область параметров и оказываются сопоставимыми с результатами экспериментального изучения температурных характеристик.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Лавинно-пролетные диоды, собранные с применением монтажа активного слоя непосредственно на теплоотводе, обладают пренебрежимо малым тепловым сопротивлением $p-n$ перехода и могут быть представлены следующей тепловой моделью – цилиндром конечной длины (активная область) на полубезграничном теплоотводе. Рассматриваемая тепловая модель представлена на рис. 1.

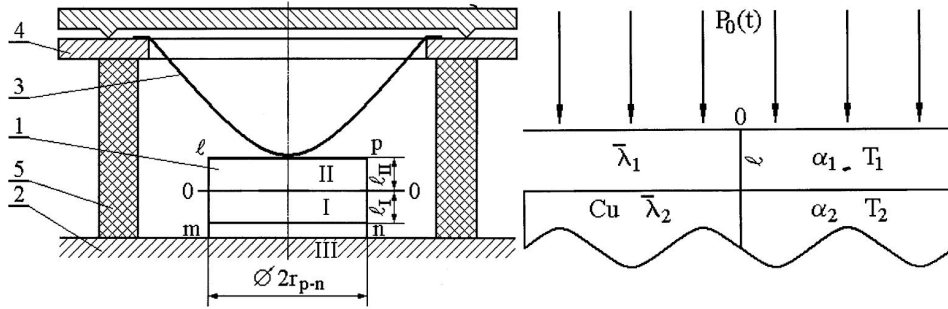


Рис. 1 – Тепловая модель диода и ее одномерный эквивалент

Полупроводниковая структура 1 с одной стороны закреплена на медном теплоотводящем основании 2, а с другой стороны при помощи монтажной пластинки 3 соединена с фланцем 4 корпуса 5 диода. Принятая модель расчета сводится к следующему:

- импульсная мощность питания диода вводится в сечение $p-n$ перехода 00 (рис. 1);
- рассматривается периодический режим питания диода с постоянным значением импульсной мощности P_u , длительности импульса τ_u , периода повторения T ;

Рассматриваемая модель удовлетворяет соотношению $\tau_u \ll \tau_i \ll T$ $i = 1, 2$, где $\tau_i = r^2/\lambda_2$ – время релаксации растекания тепла через пассивный теплоотвод; r – радиус поперечного сечения диода; α – коэффициенты температуропроводности; теплоотводящее основание III рассматривается как полупространство с заданными величинами коэффициента теплопроводности λ , плотности материала ρ , температуропроводности $\alpha = 1/c\rho$, где c – удельная теплоемкость материала. В таблице приведены тепловые характеристики некоторых материалов, заимствованных из работы [4].

В полупроводниковых приборах СВЧ размеры активного участка $p-n$ перехода ($l_1 + l_n = l$) значительно меньше размеров теплоотвода. В 8-мм диапазоне радиус $p-n$ перехода $r_{p-n} = 80$ мкм, длина активного участка $l = 1$ мкм. Активному участку соответствуют минимальные времена релаксации τ_a , которые и определяют время основного подъема температуры активного слоя при импульсном включении источника питания. Дальнейшее установление температуры, связанное с диффузией тепла в отдаленные от активного участка элементы полупроводниковой

структуры и теплоотода, происходит значительно медленнее. Поэтому нет необходимости рассчитывать весь процесс установления температуры в системе, достаточно знать закон ее нарастания за время $t < \tau_i$

Таблица 1 – Тепловые характеристики некоторых материалов

Материал	ρ , г/см ³	c , Дж/г град	λ , Вт/см град		α , (300 К), см ² /с	σ (300 К), Вт с/см ² град
			300 К	500 К		
Si-n	2,3	0,76	1,1	0,7	0,63	1,4
Si-n ⁺	2,3		0,8	0,45	0,45	1,2
Cu	8,9	0,39	4,0	3,8	1,14	3,75

При указанных выше предположениях можно воспользоваться одномерной моделью диода и теплоотода (см. рис. 1). В этом случае краевая задача, описывающая тепловой процесс в диоде и теплоотводе, формируется следующим образом. Пусть T_1 и T_2 – соответственно избыточные температуры диода и теплоотода в сравнении с температурой внешней среды (условно принятой равной нулю). Эти величины должны удовлетворять уравнениям параболического типа

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1}{\partial t} = -\frac{Q(t)}{\lambda_1}, \quad 0 < x < l, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} - \frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0, \quad x < 0, \quad (2)$$

начальным условиям $t = 0$

$$T_1(x, 0) = T_2(x, 0) = 0 \quad (3)$$

и граничным условиям

$$\left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad T_1(0, t) = T_2(0, t), \quad (4)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=0} = \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=l}, \quad T_2|_{x=-\infty} = 0, \quad (5)$$

где a_1, a_2 – коэффициенты температуропроводности диода и теплоотода; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности диода и теплоотода; l – толщина активного слоя (диода); $Q(t)$ – плотности тепловой мощности.

3. РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛПД

Вначале исследуемый процесс нарастания температуры активного слоя при воздействии мощности одиночного импульса $Q(t)$ имеет вид

$$Q(t) = U \begin{cases} 1, 0 \leq t \leq \tau_u \\ 0, t < 0 \\ 0, t > \tau_u \end{cases} \quad (6)$$

где τ_u – длительность импульса.

Далее предположим, что коэффициенты $\lambda_n, a_n, n = 1, 2$ не зависят от температуры, т.е. исходная задача (1)-(5) рассматривается в линейном приближении.

Решение задачи (1)-(5) строится с помощью операционного метода [6]. Пусть $\bar{T}_1(x, p), \bar{T}_2(x, p), \bar{Q}(p)$ – преобразование Лапласа функции $T_1(x, t), T_2(x, t), Q(t)$, а именно

$$\bar{T}_1(x, p) = \int_0^{\infty} T_1(x, t) e^{-pt} dt \quad (7)$$

$$\bar{T}_2(x, p) = \int_0^{\infty} T_2(x, t) e^{-pt} dt \quad (8)$$

$$\bar{Q}(p) = \int_0^{\infty} Q(t) e^{-pt} dt = \frac{Q_0(1 - e^{-p\tau_u})}{p} \quad (9)$$

Тогда применяя преобразования Лапласа к уравнениям (1),(2) и учитывая начальные условия (3) имеем

$$\frac{d^2 \bar{T}_1}{dx^2} - \frac{p}{a_1} \bar{T}_1 = \frac{\bar{Q}}{\lambda_1}, \quad 0 < x < l \quad (10)$$

$$\frac{d^2 \bar{T}_2}{dx^2} - \frac{p}{a_2} \bar{T}_2 = 0, \quad x < 0 \quad (11)$$

Далее, применяя преобразование Лапласа к граничным условиям(4),(5) получаем

$$\left. \frac{d\bar{T}_1}{dx} \right|_{x=l} = 0, \quad \bar{T}_1(0, p) = \bar{T}_2(0, p), \quad (12)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{d\bar{T}_1}{dx} \right|_{x=0} = \lambda_2 \left. \frac{d\bar{T}_2}{dx} \right|_{x=0}, \quad \bar{T}_2(x, p) \Big|_{x=-\infty} = 0, \quad (13)$$

Таким образом, с помощью преобразования Лапласа по времени, сходная задача для уравнений в частных производных сведена к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка.

В результате решений задачи (10)-(13) было получено выражение для температуры активного слоя (диода), усредненного по его толщине

$$T_{1cp}(t) = \frac{U\tau l^2}{3T\lambda_1} + \frac{a_1 U \tau}{2\lambda_1} \left[1 + \frac{2}{T} (2T - \tau) \right] -$$

$$-\sum_{n \neq 0} \frac{\overline{Q_n} e^{\frac{i 2\pi n}{T} t}}{\sqrt{\frac{i\omega_n l}{a_1} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2 + cth}{a_1} \frac{i\omega_n l}{a_1}}}}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi, \quad (14)$$

Зная среднюю температуру активного слоя можно рассчитывать тепловое сопротивление согласно выражения [3]

$$R(t) = \frac{l}{2\pi\lambda_1 r^2} T_{1cp}(t) \quad (15)$$

где l , r – соответственно толщина и радиус поперечного сечения диода.

Таким образом, получены формулы, описывающие тепловой процесс в диоде при периодическом импульсном воздействии в зависимости от геометрических и теплофизических параметров диода.

На рис. 2 представлены результаты расчетов по формулам (14), (59) нормированной средней температуры $T = T_{1cp}/a_1 U \tau$ активного слоя и теплового сопротивления $R\tau$ для момента времени $t = \tau$ (τ – длительность импульса) при различных значениях параметров импульса.

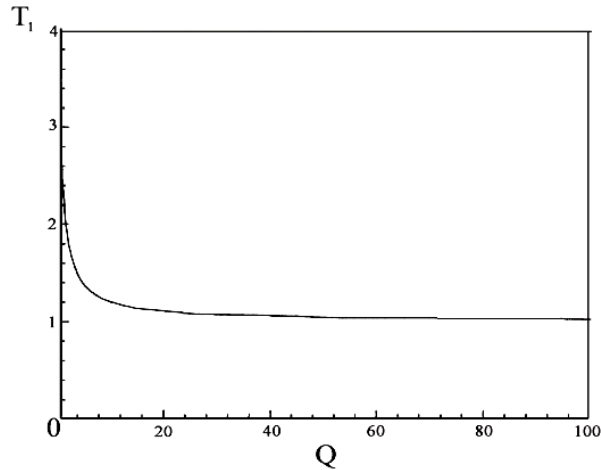


Рис. 2 – Зависимость нормированной температуры T активного слоя от скважности Q

Как видно из рис. 2, с увеличением скважности ($Q = T/\tau$) импульса нормированная средняя температура стремится к единице, т.е. средняя температура T_{1cp} активного слоя стремится к величине

$$T_N = U a_1 \tau / \lambda_1. \quad (16)$$

Таким образом, при скважности импульса $Q > 100$ средняя температура активного слоя может быть вычислена по формуле (16).

4. ВЫВОДЫ

Предложенная в данной работе тепловая модель импульсного ЛПД удовлетворительно описывает динамику нагревания активного слоя при длительности импульса, меньшей времени тепловой релаксации теплоотвода.

Получены формулы, описывающие тепловой процесс в диоде при периодическом импульсном воздействии в зависимости от геометрии и тепло-физических параметров полупроводника и теплоотвода, которые могут быть использованы для инженерного расчета импульсных генераторных диодов.

THERMAL MOD ANALYSIS OF PULSED IMPACT IONIZATION AVALANCHE TRANSIT-TIME DIODE

*M. Sorokin*¹, *A. Arkhipov*²

¹ Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture
19, Engels Str., 61002, Kharkov, Ukraine

² Institute of Radio Physics and Electronics. A Usikova NAS of Ukraine
12, Ak. Proskury Str., 61085, Kharkiv, Ukraine
E-mail: obel@ire.kharkov.ua

The solution of the thermal process problem for the pulse IMPATT diode is presented. The one-dimensional thermal model of such diodes, which takes into account the distribution heterogeneity of power and heat spreading along the heat sink in the working temperature range, was considered. The results of numerical calculation of the active layer mean temperature and thermal resistance on the pulse parameters, as well as on the geometric and thermophysical diode parameters.

Keywords: THERMAL CONDUCTIVITY, THERMAL DIFFUSIVITY, PULSE DURATION, PULSE DUTY CYCLE, THERMAL RESISTANCE.

АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ ІМПУЛЬСНИХ ГЕНЕРАТОРІВ ЛАВИННО-ПРОЛІТНИХ ДІОДІВ

*М.С. Сорокин*¹, *А.В. Архипов*²

¹ Харківський національний технічний університет сільського господарства
ім. Петра Василенка
вул. Енгельса, 19, 61002, Харків, Україна

² Інститут радіофізики та електроніки ім. А.Я. Усикова НАН України
ул. ак. Проскури, 12, 61085 Харків, Україна
E-mail: obel@ire.kharkov.ua

Розв'язана нестационарна задача теплового процесу для імпульсного режиму ЛПД. Розглянута одновимірна теплова модель цих діодів, в якій враховані неоднорідність розподілу теплової потужності та розтікання тепла вздовж тепловідводу у робочому інтервалі температур. Наведені результати чисельного розрахунку залежності середньої температури активного шару та теплового опору від параметрів імпульсу, а також від геометричних та теплофізичних параметрів діода.

Ключевые слова: ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, ТЕМПЕРАТУРОПРОВІДНІСТЬ, ТРИВАЛІСТЬ ІМПУЛЬСУ, ШПАРУВАТІСТЬ ІМПУЛЬСУ, ТЕПЛОВИЙ ОПІР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Gibbons, *Solid State Electron.* **13** No6, 799 (1970).
2. V.S. Perlman, *RCA Rev.* **30** 4, 637 (1969).
3. В.К. Ясинский, *Электроника СВЧ* **2**, 63 (1974).
4. Г. Карслоу, Д. Егер, *Теплопроводность твердых тел* (М.: Наука: 1964).
5. А. Анго, *Математика для электро- и радиоинженеров* (М.: Наука: 1965).
6. И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев, *Справочник по математике* (М.: Наука: 1981).
7. М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат, *Методы теории функций комплексного переменного* (М.: ГИФМЛ: 1958).