

БЕСПАЛОВ Н. Н., ДЁМКИН П. М., ПАНЬКИН К. Ю., ЯХЛОВ А. В.
АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СТРУКТУРЕ СИЛОВОГО ДИОДА

Аннотация. В статье приведен способ аналитической оценки распределения активной мощности электрических потерь на составных частях структуры силового диода в состоянии высокой проводимости. Полученные результаты могут быть использованы для расчёта и моделирования силовых диодов в различных программных средах.

Ключевые слова: аналитическая модель, формула, схема замещения, моделирование.

BESPALOV N. N., DYOMKIN P. M., PANKIN K. Y., YAKHLOV A. V.
ANALYTICAL ASSESSMENT OF ACTIVE POWER DISTRIBUTION
OF ELECTRIC LOSSES IN POWER DIODE STRUCTURE

Abstract. The article presents a method for analytical assessment of the active power distribution of electrical losses in the component parts of the structure of a power diode in the state of high conductivity. The study results can be used to calculate and simulate power diodes in various software environments.

Keywords: analytical model, formula, equivalent circuit, simulation.

Математические модели силовых полупроводниковых приборов используются для расчёта и моделирования электрических принципиальных схем различных электронных устройств, например, таких как преобразователи электрической энергии. В современных программных средах для моделирования схем для аналоговой, цифровой и силовой электроники используются модели полупроводниковых приборов основанные на технологии SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) – симулятор электронных схем общего назначения с открытым исходным кодом, основанной на замене прибора схемой замещения и схемами с распределенными параметрами. Пример SPICE-модели из [1], созданной на основе схемы Гуммеля-Пуна, представлен на рисунке 1.

Данная технология моделирования полупроводниковых приборов пригодна для моделирования электрических принципиальных схем устройств интегральной электроники и необъективна для моделирования электрических принципиальных схем устройств дискретной силовой электроники из-за значительного разброса параметров отдельных полупроводниковых приборов присутствующих в составе схемы устройства. Особенно это важно при расчёте электрических потерь, а соответственно и температурных режимов работы полупроводниковых приборов.

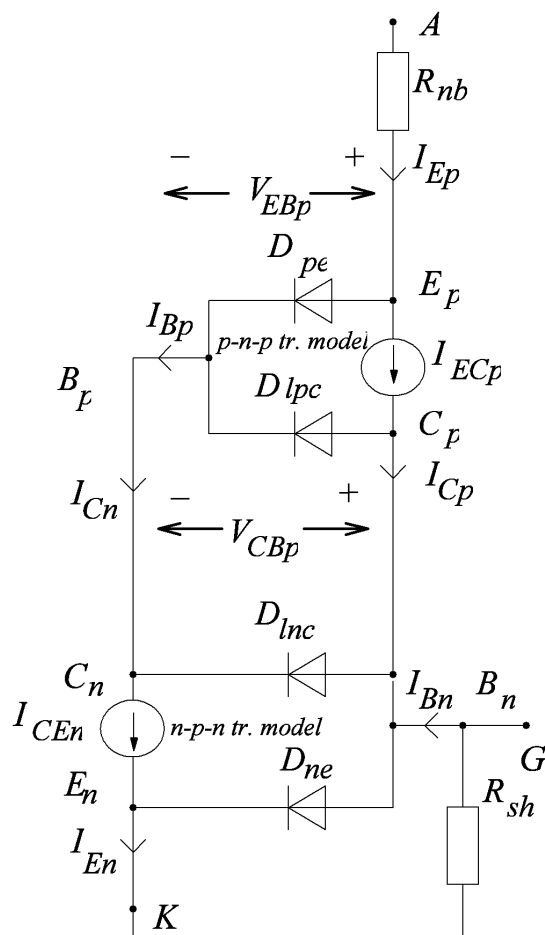


Рис. 1. SPICE-модель тиристора на основе схемы Гуммеля-Пуна.

Для моделирования устройств дискретной силовой электроники математические модели полупроводниковых приборов должны быть описаны аналитическими формулами, основанными на физических процессах, протекающих в полупроводниковых структурах.

В данной работе рассмотрена аналитическая физико-математическая модель (далее – АФМ) силового диода в состоянии высокой проводимости, схема замещения которой представлена на рисунке 2.

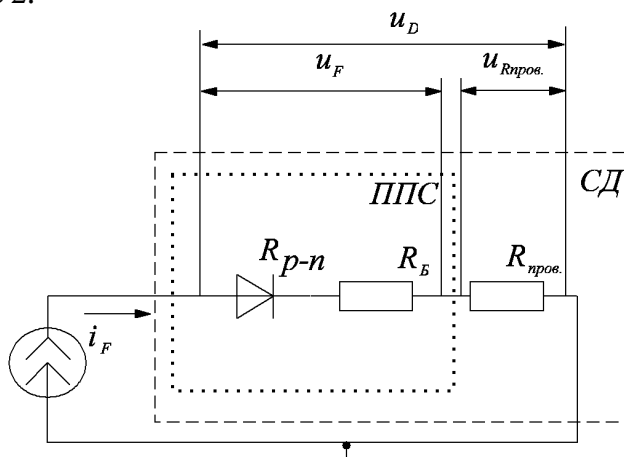


Рис. 2. Функциональная схема модели силового диода в состоянии высокой проводимости.

На рисунке 2 введены следующие обозначения: *ППС* – полупроводниковая структура, *СД* – силовой диод, i_F – прямой ток, протекающий через *СД*, R_B – сопротивление базовой области полупроводниковой структуры *СД*, R_{p-n} – сопротивление *p-n* перехода *СД*, $R_{пров.}$ – сопротивление внутренних проводников от внешних контактов до структуры полупроводникового элемента *СД*, u_F – прямое падение напряжения на полупроводниковой структуре *СД*, $u_{R_{пров.}}$ – падение напряжения на сопротивлении внутренних проводников от внешних контактов до структуры полупроводникового элемента *СД*, u_D – падение напряжения на всей структуре *СД*.

Для создания аналитического физико-математического описания данной схемы за основу взята модель *СД* в *СВП* [2], которая представлена следующим выражением:

$$u_F = \frac{2kT_j}{q} \ln \frac{i_F}{I_{si}} + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left(\frac{W_n}{2L'_p} \right) + \frac{W_n}{16S} i_F.$$

В работах [3; 4] эта модель преобразована в эквивалентное сопротивление *СД* в *СВП*, которая представлена следующей формулой:

$$r_F = \left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q D^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \right] \times i_F + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p \tau_p}} \right] \right) \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi D^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5}.$$

К данной *АФМ* в работе [5] добавлено эквивалентное последовательное сопротивление внутренних проводников структуры *СД*, обозначенное как $R_{пров.}$ (рис. 2).

Таким образом, была получена модель *СД* в *СВП*, которая представлена следующим выражением:

$$r_F = \left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q D^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \right] \times i_F + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p \tau_p}} \right] \right) \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi D^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5} + R_{пров.}$$

При этом в данной АФМ учитываются динамические тепловые процессы, протекающие в СД в СВП при протекании прямого тока [3–5].

Исходя из полученной АФМ, можно вывести выражения для расчёта мощности электрических потерь на составных частях структуры СД. Формула расчёта электрической мощности имеет следующий вид:

$$P = i^2 \times R.$$

Тогда мощность электрических потерь в полупроводниковой структуре $P_{ППС}$ СД определится как:

$$P_{ППС} = i_F^2 \times R_{ППС} = i_F^2 \times \left[\left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q D^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \right] \times i_F \right) + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p \tau_p}} \right] \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi D^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5} \right].$$

Мощность электрических потерь в последовательном сопротивлении внутренних проводников структуры полупроводникового элемента СД равна:

$$P_{R_{пров.}} = i_F^2 \times R_{пров.}$$

Общая мощность электрических потерь в СД составит сумму мощности потерь на элементах структуры СД:

$$P_{общ} = P_{ППС} + P_{R_{пров.}}$$

или

$$P_{общ} = i_F^2 \times r_F = i_F^2 \times \left[\left(\frac{2kT_j}{q} \ln \left[\frac{4L_p}{\pi q D^2 D_p n_i \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right]} \right] \times i_F \right) + \frac{1,5kT_j}{q} \exp \left[\frac{W_n}{2} \sqrt{\frac{b+1}{2bD_p \tau_p}} \right] \times (i_F)^{-1} + \frac{W_n}{4\pi D^2} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5} \right] + R_{пров.}.$$

В результате данной работы определены аналитические модели всех основных характеристик силовых диодов в состоянии высокой проводимости с учётом воздействия на них начальной и изменяющейся температуры как полупроводникового кристалла диода, так и силовых металлических выводов. На основе этих моделей в дальнейшем будет проведено исследование статических и динамических электрических процессов в силовых диодах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sayah G. T., Zekry A. A., Soliman F. A. A SPICE model of thyristors with amplifying gate and emitter-shorts // IET Power Electronics – 2014. – Vol. 7. – pp. 724–735.
2. Дерменжи П. Г., Кузьмин В. А., Крюкова Н. Н. Расчёт силовых полупроводниковых приборов / под ред. В. А. Кузьмина. – М.: Энергия 1980. – 184 с.
3. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Капитонов С. С., Лебедев С. В. Разработка и исследование электротепловых моделей силовых полупроводниковых приборов основных типовых конструкций // Естественные и технические науки. – 2011. – № 6 (56). – С. 405–412.
4. Беспалов Н. Н., Ильин М. В., Григорович С. Ю. Описание модели СД в состоянии высокой проводимости // Научный вестник. – 2015. – № 2(4). – С. 25–31.
5. Беспалов Н. Н., Горячкин Ю. В., Дёмкин П. М., Панькин К. Ю. Особенности вольт-амперной характеристики силового диода при воздействии ударного тока с учётом диффузионной ёмкости // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем. Материалы XIII всероссийской научно-технической конференции. – Чебоксары, 2019. – С. 255–258.