

УДК 621.315.592:004.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СОСТОЯНИИ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Беспалов Николай Николаевич, Капитонов Сергей Сергеевич, Катяев Юрий Анатольевич
ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева»,
Российская Федерация, г. Саранск,
E-mail: bnn48@mail.ru , kapss88@mail.ru , тел. +7(834-2) 24-37-05,
430005, г. Саранск, ул. Богдана Хмельницкого, д. 39

Аннотация. В статье рассмотрены особенности создания модели силового полупроводникового прибора в состоянии высокой проводимости в среде NI Multisim и использование созданной модели для исследования зависимости величин параметров вольтамперной характеристики силовых полупроводниковых приборов в состоянии высокой проводимости от электрофизических и геометрических параметров их полупроводниковой структуры.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы; вольтамперная характеристика; состояние высокой проводимости; напряжение; ток; модель; NI Multisim.

I. ВВЕДЕНИЕ

Силовые полупроводниковые приборы (СПП) являются основной составной частью силовых электрических преобразователей. Надежность преобразователей на основе СПП при эксплуатации зависит от надёжности составных элементов, в частности СПП. При групповом соединении СПП надёжность, как отдельных приборов, так и всего преобразователя, определяется качеством подбора СПП по определённым параметрам, позволяющим отобрать приборы с идентичными вольтамперными характеристиками (ВАХ). Подбор приборов для группового соединения осуществляется для обеспечения равномерного распределения токов, протекающих через приборы группы, при параллельном соединении СПП в состоянии высокой проводимости и равномерного распределения напряжения по СПП группы при последовательном соединении СПП в состоянии низкой проводимости.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для моделирования групповых соединений СПП и исследования их электротепловых режимов требуется разработка моделей приборов с величинами параметров электротепловых характеристик, приближенными к реальным. Существующие среды виртуального математического моделирования электрических процессов в преобразовательных устройствах, например в PSpice, EWB, Pspice и другие, содержат модели СПП, которые не позволяют задавать электрофизические и геометрические параметры их полупроводниковых структур (ПС). При этом в данных моделях существует статическая зависимость влияния температуры ПС T_j на зависимости ВАХ СПП, но не учитывается динамическое временное влияние температуры ПС T_j на них. Это обусловлено отсутствием в моделях динамической обратной тепловой связи, что не позволяет объективно и адекватно моделировать тепловые режимы приборов в динамике. С помощью известных моделей можно проводить исследование общих процессов, протекающих в преобразователе при групповом соединении СПП. Для более глубокого анализа группового соединения приборов требуется разработка моделей, позволяющих учитывать и статическую, и динамическую тепловые обратные связи между величиной температуры ПС T_j и величинами параметров их ВАХ.

В работе рассмотрена разработанная нами среде Multisim подобная модель СПП в состоянии высокой проводимости. Модель создана на основе известных теоретических зависимостей и характеристик СПП в состоянии высокой проводимости, описанных в [1]. Проведено исследование зависимостей ВАХ СПП и температуры ПС T_j СПП в состоянии высокой проводимости при вариации величин параметров ПС СПП при токах, достигающих ударного неповторяющегося тока в открытом состоянии.

III. ТЕОРИЯ

Модель СПП в состоянии высокой проводимости состоит из электрической модели (ЭМ), описывающей электрические процессы, протекающие в СПП, и тепловой модели (ТМ), описывающей тепловые процессы. ЭМ и ТМ охвачены тепловой обратной связью [2, 3]. На рис. 1 представлена электротепловая модель (ЭТМ) СПП, где ДТ — датчик тока, ДН — датчик напряжения, УМН — умножитель.

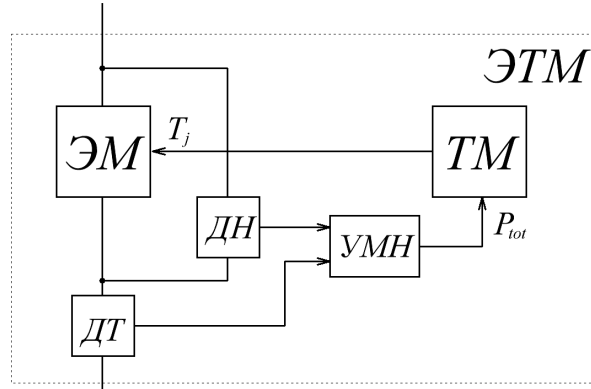


Рис. 1. Структурная схема модели СПП в состоянии высокой проводимости.

Принцип действия данной модели заключается в следующем. ЭМ описывает зависимость ВАХ СПП от величин различных электрофизических параметров их ПС. Величины данных параметров, в свою очередь, зависят от температуры ПС T_j . С помощью ДТ, ДН и УМН определяется величина мощности P_{tot} , которая рассеивается на приборе. Значение мощности P_{tot} поступает в ТМ, где рассчитывается величина температуры ПС T_j . Рассчитанное значение T_j поступает в ЭМ, в которой осуществляется пересчёт электрофизических параметров ПС, зависящих от величины T_j . В результате образуется тепловая обратная связь между ЭМ и ТМ, позволяющая приблизить характеристики данной модели к реальным характеристикам СПП.

Реализована данная модель в среде моделирования электрических процессов Multisim. Принцип создания ЭМ СПП в состоянии высокой проводимости аналогичен принципу создания модели СПП в состоянии низкой проводимости, описанной в [4]. Данный принцип заключается в разработке в среде Multisim модели нелинейной нагрузки на основе известных зависимостей [1], описывающих параметры и характеристики СПП в состоянии высокой проводимости. На основании зависимостей, приведённых в [1], получено выражение, позволяющее определить напряжение u_F на СПП в состоянии высокой проводимости при протекании через него тока i_F :

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

где k — постоянная Больцмана; q — элементарный электрический заряд; L_p — диффузионная длина дырок; D — диаметр ПС; D_p — коэффициент диффузии дырок; n_i — концентрация собственных носителей полупроводника; $B \approx 23,6$ для кремния при температуре структуры $T_{j0} = 25$ °С; W_n — толщина n -базы; b — отношение подвижностей электронов и дырок; τ_p — время жизни дырок в n -области.

Принцип создания ТМ основан на использовании метода электротепловой аналогии, описанного в [2, 3]. Данный метод заключается в том, что тепловые величины заменяются аналогичными электрическими величинами с учётом поправочных коэффициентов, и ведётся расчёт элементарной электрической схемы. Температура заменяется напряжением, тепловое сопротивление

— электрическим сопротивлением, теплоёмкость — электрической ёмкостью. В результате расчётная электрическая схема состоит из множества Т-образных RC -цепей. Все процессы, протекающие в данной электрической схеме, аналогичны тепловым процессам, протекающим в ПС СПП.

Таким образом, разработанная в среде Multisim ЭТМ СПП позволяет создавать модели СПП с заданными величинами электрофизических и геометрических параметров ПС, и исследовать тепловые процессы, протекающие в ПС. Кроме того, ЭТМ предоставляет возможность исследовать влияние вариации величин различных электрофизических параметров ПС на величины параметров характеристик СПП в состоянии высокой проводимости.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Разработанная модель позволяет исследовать влияние электрофизических параметров ПС на зависимость ВАХ СПП. С помощью вышеописанной модели проведено исследование зависимости ВАХ диода В200, который широко применяется в силовых преобразователях и имеет следующие значения параметров:

- повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} — 1,3 кВ;
- максимально допустимый средний ток в открытом состоянии I_{TAVm} — 200 А;
- ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии I_{FSM} при температуре ПС $T_j = T_{jm} = 125$ °С — 6 кА.

На рис. 2 представлены зависимости ВАХ диода В200 при различных величинах толщины n -базы W_n . Из [1] известно, что для СПП класса, соответствующего классу В200, величина толщины n -базы $W_n \approx 200$ мкм, поэтому исследование зависимости ВАХ проводилось при меньших значениях $W_{n1} = 100$ мкм, при равном $W_{n2} = 200$ мкм и при больших $W_{n3} = 300$ мкм и $W_{n4} = 400$ мкм. Моделирование осуществлялось при величине начальной температуры ПС $T_{j0} = 25$ °С и значении времени жизни дырок в n -области $\tau_p = 25$ нс.

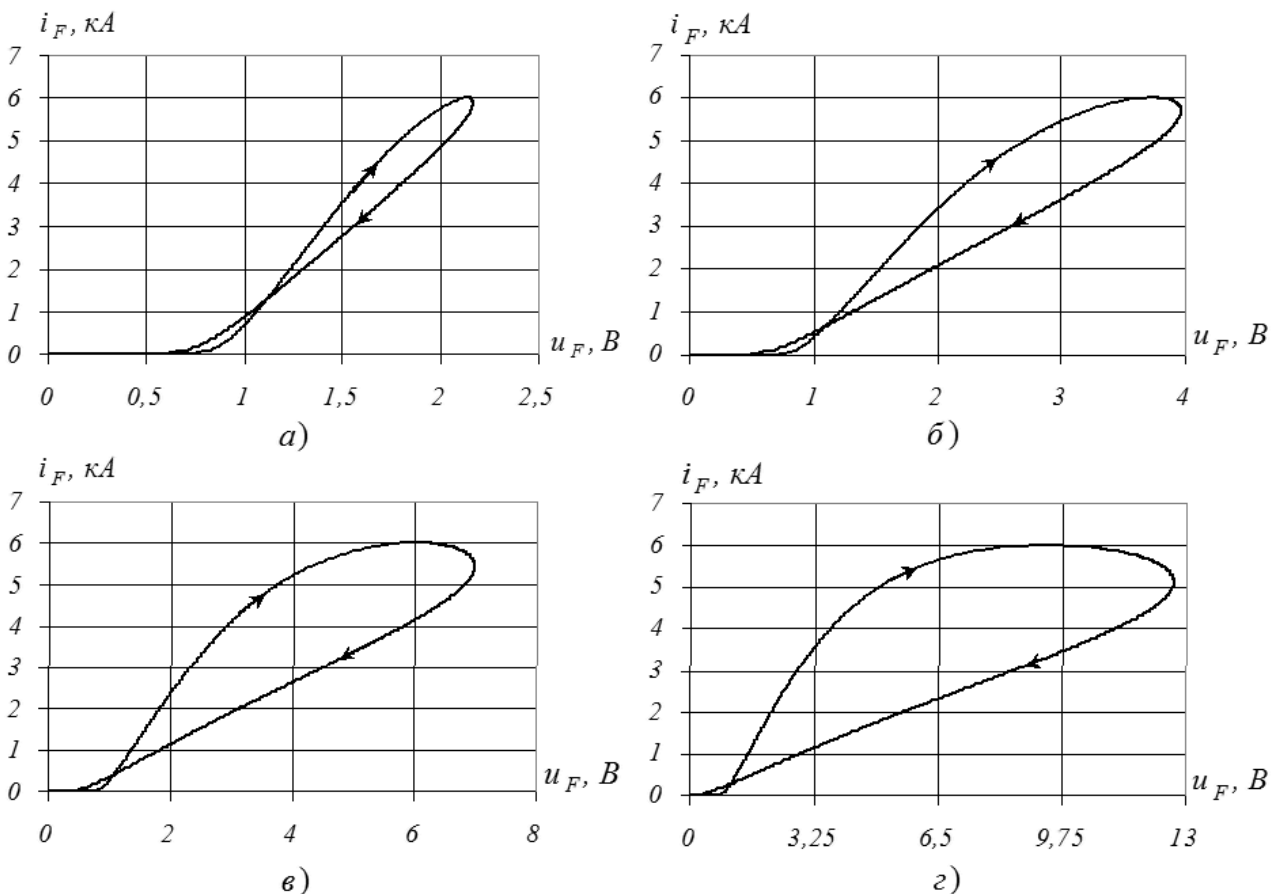


Рис. 2. ВАХ СПП в состоянии высокой проводимости при $W_{n1} = 100$ мкм (а), $W_{n2} = 200$ мкм (б), $W_{n3} = 300$ мкм (в), $W_{n4} = 400$ мкм (г).

Из рис. 2 видно, что зависимость ВАХ представляет собой петлю. При увеличении величины толщины n -базы W_n ширина петли ВАХ увеличивается, а точка инверсии температурного коэффициента напряжения (ТКН) опускается в область более низких токов. Это объясняется тем, что при увеличении W_n увеличивается падение напряжения на СПП U_F при одной и той же величине тока I_F , протекающего через прибор, что приводит к увеличению мощности P_{tot} , а, следовательно, к росту температуры его ПС T_j . Зависимости изменения T_j при различных величинах W_n при протекании через прибор шести однополупериодных синусоидальных импульсов тока с амплитудой, равной ударному неповторяющемуся току в открытом состоянии, приведены на рис. 3.

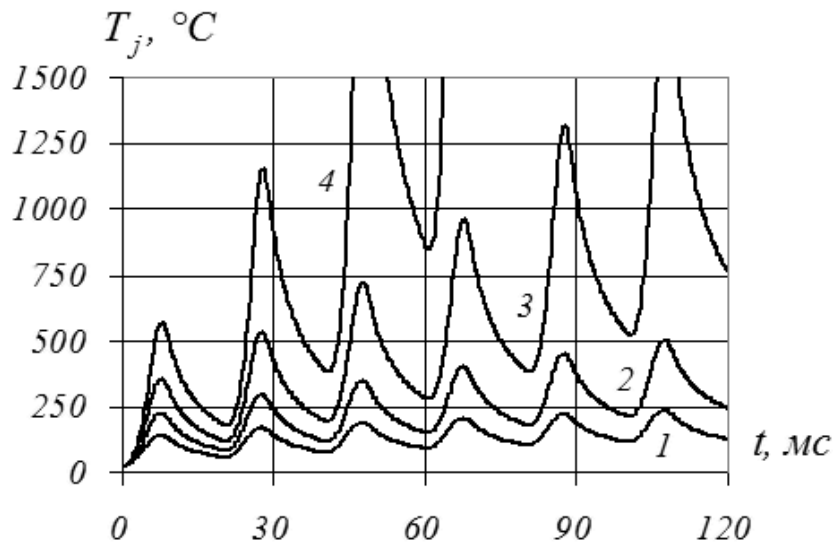


Рис. 3. Зависимости изменения T_j при $W_{n1} = 100$ мкм (кривая 1), $W_{n2} = 200$ мкм (кривая 2), $W_{n3} = 300$ мкм (кривая 3), $W_{n4} = 400$ мкм (кривая 4).

Рис. 3 показывает, что подобный режим работы способны выдержать приборы с величинами $W_{n1} = 100$ мкм (кривая 1) и $W_{n2} = 200$ мкм (кривая 2), поскольку температура их ПС не превышает или незначительно превышает критическую величину температуры $T_{j\text{crit}} = 250$ °С, при которой из-за явления собственной проводимости значительно возрастают значения проводимости полупроводника и тока i_F , протекающего через него, что приводит к ещё большему перегреву прибора. При величинах $W_{n3} = 300$ мкм (кривая 3) и $W_{n4} = 400$ мкм (кривая 4) диод выйдет из строя к 60 мс и 30 мс, соответственно, так как к этим временам величины температуры их ПС T_j не опускаются ниже температуры $T_{j\text{crit}} = 250$ °С.

Таким образом, для увеличения величины предельного тока, протекающего через СПП в состоянии высокой проводимости, следует уменьшать величину толщины n -базы W_n , что приводит к уменьшению максимально допустимого значения повторяющегося импульсного обратного напряжения U_{RRM} .

Ещё одним физическим параметром ПС, влияющим на зависимость ВАХ СПП, является время жизни дырок в n -области τ_p . Зависимость τ_p от температуры описывается выражением [1]:

$$\tau_p = \tau_{p0} \left(\frac{T_j}{T_{j0}} \right)^{1,5}; \quad (2)$$

где τ_{p0} — время жизни дырок в n -области при T_{j0} .

Из [5] известно, что для низкочастотных СПП величина времени жизни дырок в n -области $\tau_p \approx 25$ мкс, поэтому исследование зависимости ВАХ проводилось при меньших значениях $\tau_{p1} = 1$ мкс и $\tau_{p2} = 10$ мкс, при равном $\tau_{p3} = 25$ мкс и при большем $\tau_{p4} = 100$ мкс. На рис. 4 приведена зависимость τ_p от температуры ПС T_j при различных величинах времени жизни дырок в n -области

τ_{p0} при температуре ПС T_{j0} , равных $\tau_{p01} = 1$ мкс, $\tau_{p21} = 10$ мкс, $\tau_{p03} = 25$ мкс, $\tau_{p04} = 100$ мкс.

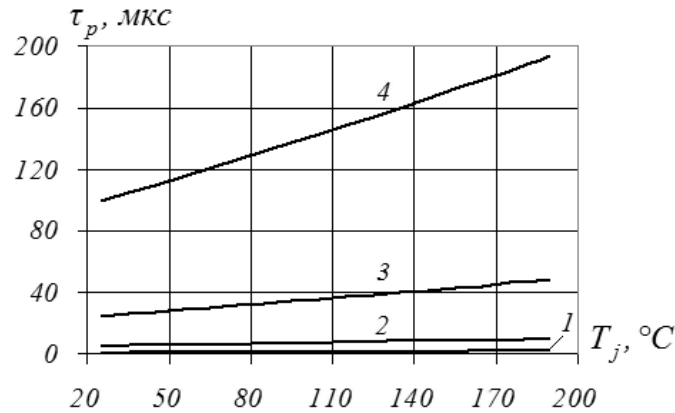


Рис. 4. Зависимости τ_p от температуры ПС T_j при $\tau_{p01} = 1$ мкс (кривая 1), $\tau_{p02} = 10$ мкс (кривая 2), $\tau_{p03} = 25$ мкс (кривая 3), $\tau_{p04} = 100$ мкс (кривая 4).

Из рис. 4 следует, что с увеличением температуры ПС T_j время жизни дырок в n -области τ_p значительно возрастает. Характер изменения τ_p в выбранном диапазоне температур практически линейный.

На рис. 5 показаны зависимости ВАХ диода В200 при различных величинах времени жизни дырок в n -области τ_p при температуре ПС T_{j0} , равных $\tau_{p01} = 1$ мкс, $\tau_{p21} = 10$ мкс, $\tau_{p03} = 25$ мкс, $\tau_{p04} = 100$ мкс. Моделирование проводилось при величине начальной температуры ПС $T_{j0} = 25$ °С и значении толщины n -базы $W_n = 200$ мкм.

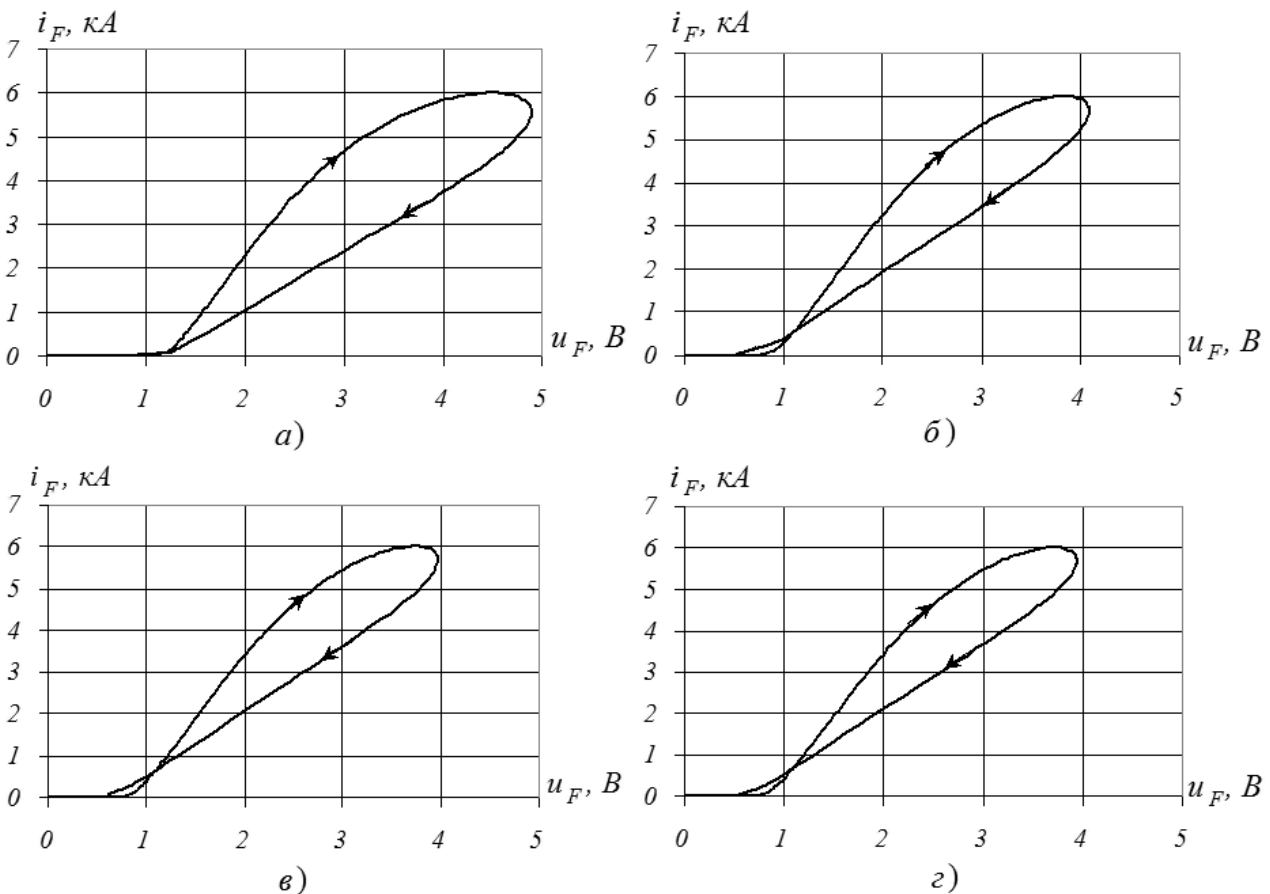


Рис. 5. ВАХ СПП в состоянии высокой проводимости при $\tau_{p1} = 1$ мкс (а), $\tau_{p2} = 10$ мкс (б), $\tau_{p3} = 25$ мкс (в), $\tau_{p4} = 100$ мкс (г).

Из рис. 5 видно, что при увеличении величины времени жизни дырок в n -области τ_p ширина петли ВАХ уменьшается, а точка инверсии ТКН поднимается в область более высоких токов. Это объясняется тем, что при увеличении τ_p уменьшается падение напряжения на СПП U_F при одной и той же величине тока I_F , протекающего через прибор, что приводит к уменьшению мощности, выделяющейся на приборе, а, следовательно, к уменьшению температуры его ПС T_j . Зависимости изменения T_j при различных величинах τ_p при протекании через прибор шести однополупериодных синусоидальных импульсов тока с амплитудой, равной ударному неповторяющемуся току в открытом состоянии, приведены на рис. 6.

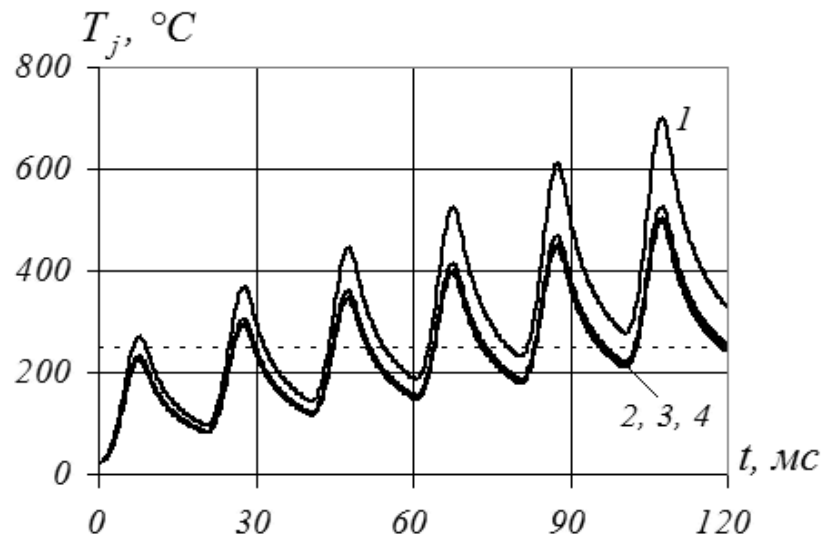


Рис. 6. Зависимости изменения T_j при $\tau_{p1} = 1$ мкс (кривая 1), $\tau_{p2} = 10$ мкс (кривая 2), $\tau_{p3} = 25$ мкс (кривая 3), $\tau_{p4} = 100$ мкс (кривая 4).

Рис. 6 показывает, что зависимость изменения температуры ПС T_j существенно выделяется только при низких значениях $\tau_{p1} = 1$ мкс. При величинах $\tau_{p2} = 10$ мкс, $\tau_{p3} = 25$ мкс и $\tau_{p4} = 100$ мкс зависимости T_j практически совпадают. Это говорит о том, что величина τ_p оказывает влияние на тепловой режим СПП только при низких значениях $\tau_p < 10$ мкс. При $\tau_{p1} = 1$ мкс значение температуры ПС T_j диода к 100 мс не опускается ниже критической величины температуры $T_{j\text{crit}} = 250$ °С. Из этого следует, что приборы, имеющие величины $\tau_p = 1$ мкс, нельзя использовать при подобном режиме работы.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, можно сделать вывод, что для высокочастотных приборов, имеющих низкие значения времени жизни дырок в n -области τ_p , предельные токи, протекающие через СПП в состоянии высокой проводимости, имеют значительно меньшие значения по сравнению с низкочастотными приборами, имеющими большие величины τ_p . Для увеличения предельных токов высокочастотных СПП нужно уменьшать величину толщины n -базы W_n , что уменьшит максимально допустимое значение повторяющегося импульсного обратного напряжения U_{RRM} .

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования, полученные с помощью разработанной в среде Multisim модели СПП в состоянии высокой проводимости, показали, что реальная зависимость ВАХ при токах, близких к ударному неповторяющемуся току в открытом состоянии имеет загиб и принимает петлевидный характер. Ширина петли ВАХ, положение точки инверсии ТКН и тепловой режим СПП определяются величинами электрофизических и геометрических

параметров ПС СПП.

С помощью разработанной модели планируется исследовать параллельное групповое соединение СПП в состоянии высокой проводимости. Данная модель позволяет исследовать токи, протекающие в каждом параллельном плече преобразователя, и проводить анализ тепловых режимов каждого СПП группы при вариации различных величин электрофизических, геометрических и тепловых параметров их ПС.

Список литературы

- 1 Евсеев Ю. А., Дерменжи П. Г. Силовые полупроводниковые приборы: Учебник для техникумов. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 472 с.
- 2 Ильин М. В. Методы и технические средства определения параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов для группового соединения: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Саратов, 2008. — 200 с.
- 3 Беспалов Н. Н. Моделирование тепловых процессов в силовых полупроводниковых приборах при токовых перегрузках / Н. Н. Беспалов, М. В. Ильин // Научно-прикладной журнал «Силовая электроника и энергоэффективность». — Киев, 2009. — Ч. 3. — С. 82-85.
- 4 Беспалов Н. Н. Моделирование характеристик силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости / Н. Н. Беспалов, С. С. Капитонов, И. И. Пьянзин // Электроника и информационные технологии. 2010. Вып. 2 (9). URL: <http://fetmag.mrsu.ru> (дата обращения: 10.06.2011)
- 5 Кузьмин Н. Н., Дерменжи П. Г., Крюкова В. А. и др. Расчёт силовых полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1980. — 184 с.

SIMULATION OF CHARACTERISTICS OF POWER SEMICONDUCTOR DEVICES IN A HIGH CONDUCTIVITY STATE

Nikolay Nikolaevich Bepalov, Sergey Sergeevich Kapitonov, Yuri Anatolievich Katyaev
Mordovian N. P. Ogarev state university,
Russian Federation, Saransk city
E-mail: : bnn48@mail.ru, kapss88@mail.ru, tel.: +7(834-2) 24-37-05,
39, Bohdan Khmelnytsky street, room 526, 433005, Saransk, Mordovia, Russia

Annotation. The article deals with features of a model of power semiconductor device in a high conductivity state in the NI Multisim and using this model for research of dependence of the parameters of current-voltage characteristics of power semiconductor devices in a high conductivity state from of electrophysical and geometrical parameters of the semiconductor structure.

Key words: power semi-conductor devices; current-voltage characteristic; condition of high conductivity; voltage; current; model; NI Multisim.



Николай Николаевич Беспалов
Россия, РМ, г. Саранск
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
E-mail: bnn48@mail.ru
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил радиотехнический факультет Новосибирского электротехнического института (1974). Кандидат технических наук (2000). Заведующий кафедрой автоматики (с 2003 г. по настоящее время).

Область научных интересов: разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик; разработка методов и аппаратуры для ионизации воздушной среды.



Сергей Сергеевич Капитонов
Россия, РМ, г. Саранск
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
E-mail: kapss88@mail.ru.
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва (2010). Аспирант кафедры автоматики факультета электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва.

Область научных интересов: разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик; разработка методов и аппаратуры для ионизации воздушной среды.



Юрий Анатольевич Катяев
Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
E-mail: kapss88@mail.ru.
Тел. +7(834-2) 24-37-05

Окончил факультет электронной техники Мордовского государственного университета имени Н. П. Огарёва (2010).

Область научных интересов: разработка методов и аппаратуры для испытания силовых полупроводниковых приборов и определения их параметров и характеристик.