

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СОСТОЯНИИ НИЗКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Беспалов Н.Н., Капитонов С.С., Пьянзин И.И.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск

Научно-производственное предприятие «Электронная техника — МГУ», г. Саранск

Тел.: (834-2) 24-37-05. E-mail: bnn48@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности создания нелинейной нагрузки с заданными характеристиками в программной среде NI Multisim и использование созданной модели для исследования силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, вольтамперная характеристика, состояние низкой проводимости, напряжение, ток, ёмкостная и активная составляющие, нелинейная нагрузка, модель, NI Multisim.

Annotation. The article discusses about the features of a nonlinear load with the given characteristics in a program NI Multisim and using this models for research of power semiconductor devices in a low conductivity state.

Key words: power semi-conductor devices, current-voltage characteristic, condition of low conductivity, voltage, current, capacitive and active components, nonlinear loading, model, NI Multisim.

Постановка задачи

В настоящее время силовые полупроводниковые приборы (СПП) получили широкое распространение в самых различных областях электротехники и электроники. Надежность преобразователей на основе СПП, в качестве которых широко применяются силовые диоды и тиристоры, при эксплуатации определяется надёжностью составных элементов, в частности СПП. Надёжность СПП, в свою очередь, определяется их исходным качеством и режимами эксплуатации. Отсутствие учёта разброса параметров и характеристик СПП в реальных режимах эксплуатации приводит к неэффективности подбора для группового соединения, что при определённых условиях эксплуатации приводит к повышению вероятности отказа отдельных приборов, ведущему к выходу из строя преобразователя в целом.

Параметры и характеристики СПП определяются в соответствии с действующим стандартом [1], принятым в 1982 году. С тех пор предельные значения токов и напряжений СПП выросли в десятки раз, что существенным образом отразилось на требованиях, предъявляемых к аппаратуре для диагностики качества СПП. Прежде чем приступить к проектированию подобной аппаратуры, необходимо провести теоретический анализ режимов испытания и оценить требования, предъявляемые к данной аппаратуре.

Наиболее универсальным способом исследования режимов работы СПП является использование программ математического моделирования, позволяющих быстро и точно проводить расчёт процессов, протекающих в электрических цепях. До последнего времени в различных средах математического моделирования электрических процессов было сложно создать модель нелинейной нагрузки (НН) с характеристиками, задаваемыми пользователем, а имеющиеся модели СПП лишь частично соответствовали реальным приборам. NI Multisim предоставляет возможность решения данной задачи. Опираясь на известные теоретические зависимости и характеристики СПП, описанные в [2], предполагается создание моделей СПП в состоянии высокой и низкой проводимости с характеристиками, наиболее приближенными к характеристикам реальных приборов.

В статье рассматриваются особенности создания в NI Multisim модели СПП в состоянии низкой проводимости и исследование созданной модели при условиях, определяемых стандартом [1].

Особенности построения модели нелинейной нагрузки в NI Multisim

На рис. 1 представлена общая структурная схема модели, предназначенной для анализа работы источника напряжения бесконечной мощности (ИБМ) на нелинейную нагрузку.

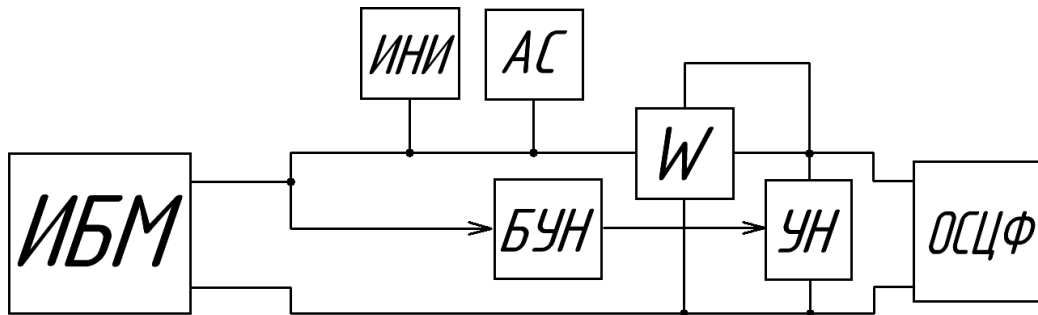


Рис. 1. Структурная схема модели.

Напряжение с ИБМ поступает на НН. НН формируется посредством блока управления нагрузкой (БУН) и управляемой нагрузки (УН). БУН реализует заданную зависимость выходного сигнала от входного сигнала, коим является напряжение на УН. УН представляет собой блок, параметры которого (сопротивление, ёмкость, индуктивность) линейно зависят от напряжения, поступающего с БУН. Возможна реализация произвольной математической зависимости параметров УН от величины напряжения на УН.

Для анализа работы схемы используются следующие приборы: измеритель нелинейных искажений (ИНИ), предназначенный для определения коэффициента гармоник в процентах; анализатор спектра (АС), служащий для построения спектра напряжения на НН; ваттметр (W), измеряющий мощность, выделяющуюся на НН и коэффициент мощности; осциллограф (ОСЦФ), отображающий форму напряжения на НН.

Подобный подход позволяет проводить анализ схем, работающих на нагрузку любого характера, учитывать факторы, влияющие на характеристики нагрузки, и создавать модели приборов и устройств, максимально приближенных к их реальным прототипам. Все результаты измерений и определенные характеристики из среды NI Multisim переносятся в среду MS Excel для дальнейшей обработки и более удобного графического представления.

Анализ ВАХ СПП в состоянии низкой проводимости с помощью разработанной модели

Эквивалентная схема p - n -перехода в состоянии низкой проводимости представляет собой параллельное соединение нелинейной активной и ёмкостной составляющей со значительной барьерной ёмкостью $C_{\bar{\sigma}}$, которая зависит от прикладываемого напряжения. В связи с этим в НН при приложении к ней изменяющегося напряжения $u_{D(R)}$ протекают активная $i_{D(R)A}$ и ёмкостная $i_{D(R)C}$ составляющие суммарного тока $i_{D(R)}$ [3]:

$$i_{D(R)} = i_{D(R)A} + i_{D(R)C} \quad (1)$$

Активная составляющая суммарного тока описывается выражением [3]:

$$i_{D(R)A} = 0,26 \frac{qn_i \sqrt{\rho_n u_{D(R)}}}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} S \cdot \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right], \quad (2)$$

где q — элементарный заряд, равный абсолютному заряду электрона; n_i — концентрация собственных носителей полупроводника; ρ_n — удельное сопротивление кремния в n -базе.; S — площадь p - n -перехода; τ_p и τ_n — времена жизни дырок в n -области и электронов в p -области, соответственно; T_j — температура полупроводниковой структуры (ПС); $B \approx 23,6$ для кремния при температуре структуры $T_{j0} = 25$ °С.

Как известно, p - n -переход обладает подобно плоскому конденсатору ёмкостью. Эта ёмкость зависит от конструктивных размеров ПС. Причем с ростом прикладываемого в обратном направлении напряжения к p - n -переходу толщина слоя объемного заряда W_{on} увеличивается, а барьерная ёмкость C_b при этом уменьшается. Величина барьерной ёмкости обратно смещенного p - n -перехода определяется в виде [3]:

$$C_a = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{0,52 \sqrt{\rho_n U_{D(R)}}}, \quad (3)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость кремния; ε_0 — электрическая постоянная.

С учетом (1, 2, 3) ток через СПП в состоянии низкой проводимости определяется как:

$$i_{D(R)} = 0,26 \frac{qn_i \sqrt{\rho_n u_{D(R)}}}{\sqrt{\tau_p \tau_n}} S \cdot \exp \left[B \left(1 - \frac{T_{j0}}{T_j} \right) \right] + \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 S}{0,52 \sqrt{\rho_n u_{D(R)}}} \frac{du_{D(R)}}{dt}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что суммарный ток в значительной мере зависит от температуры ПС (T_j), площади ПС (S) и времени жизни электронов в p -области и дырок в n -области, поэтому представляет интерес рассмотреть влияние данных величин на вид ВАХ СПП в состоянии низкой проводимости.

Нагрузочная способность, надёжность и долговечность СПП в сильной степени определяются их тепловым режимом. Наибольший интерес представляет анализ характеристик СПП при максимально допустимой для тиристоров температуре ПС ($T_j = 125$ °С), так как данный случай является предельным, и большинство отказов СПП связано с превышением данной температуры.

Площадь ПС определяется диаметром ПС. В связи с бурным развитием рынка СПП диаметры ПС постоянно увеличиваются и возникает необходимость контроля ВАХ СПП при различных диаметрах ПС. В таблице 1 представлены значения диаметров ПС СПП, выпускаемых в настоящее время.

Таблица 1. Диаметры ПС СПП, выпускаемых в настоящее время.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D, мм	16	20	24	32	40	56	63	76	101

Для выпускаемых в настоящее время СПП наибольший диаметр ПС составляет 101 мм. Структуры с данным диаметром обладают наибольшими значениями критических параметров по напряжению и току, поэтому исследованию ВАХ подобной структуры следует уделить особое внимание.

На вид ВАХ СПП оказывают значительное влияние величины τ_n и τ_p , поэтому необходимо определить ВАХ при различных значениях τ_n и τ_p провести анализ полученных характеристик. В [2] время жизни электронов в p -области и дырок в n -области принимаются равными $\tau_n = 10$ мкс и $\tau_p = 4$ мкс, соответственно. Именно эти значения величин τ_n и τ_p стали базовыми при исследовании ВАХ СПП.

На рис. 2 представлена схема модели, созданной в среде NI Multisim для анализа НН, эквивалентной p - n -переходу в состоянии низкой проводимости. ВАХ НН описывается формулой (4).

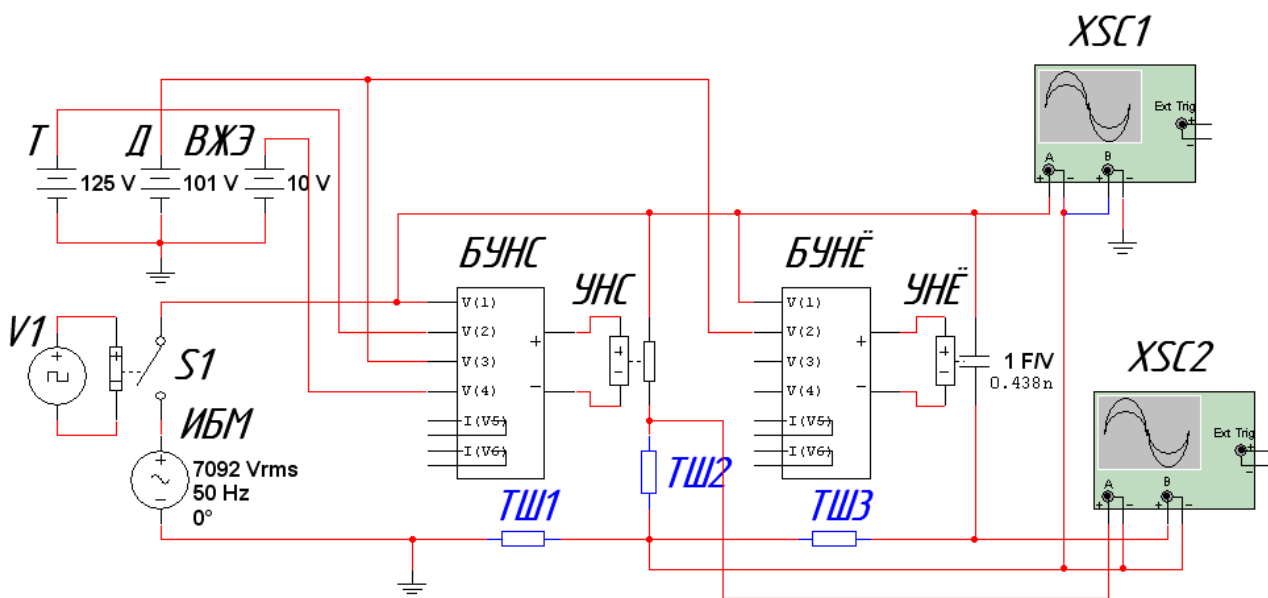


Рис. 2. Схема модели, разработанной в среде NI Multisim и предназначенной для анализа p - n -перехода в состоянии низкой проводимости.

В качестве нелинейной активной составляющей нагрузки используется управляемое нелинейное сопротивление ($U_{НС}$). Блок управления нелинейным сопротивлением ($БУ_{НС}$) предназначен для управления $U_{НС}$ по заданному пользователем закону. Закон управления $U_{НС}$ описывается формулой (2). В качестве ёмкостной составляющей нагрузки, которая зависит от прикладываемого напряжения, используется управляемая нелинейная ёмкость ($U_{НЁ}$). Блок управления нелинейной ёмкостью ($БУ_{НЁ}$) предназначен для управления $U_{НЁ}$ по заданному пользователем закону. Закон управления $U_{НЁ}$ описывается формулой (3). В совокупности $U_{НС}$, $БУ_{НС}$, $U_{НЁ}$ и $БУ_{НЁ}$ образуют НН, эквивалентную p - n -переходу в состоянии низкой проводимости.

Стандартом [1] предусмотрено определение параметров СПП в состоянии низкой проводимости при воздействии на испытуемый прибор импульсов напряжения полусинусоидальной формы, поэтому наибольший интерес представляет исследование подобного режима. $ИБМ$ формирует синусоидальное напряжение амплитудой 10 кВ, частотой 50 Гц. С помощью ключа $S1$, управляемого источником прямоугольного напряжения $V1$, напряжение с $ИБМ$ преобразуется в импульсы полусинусоидальной формы. Блоки T , D и $ВЖЭ$ устанавливают температуру ($^{\circ}C$), диаметр (мм) ПС и время жизни электронов (мкс), соответственно. Ток

шунты $TШ1$, $TШ2$ и $TШ3$ предназначены для определения суммарного, активного и ёмкостного токов, временные зависимости которых отображаются на осциллографах $XSC1$ и $XSC2$.

Наибольшей информативностью обладают участки зависимостей и характеристик, соответствующие половине испытательного импульса напряжения (интервал времени от 0 до 5 мс), где напряжение на СПП нарастает от 0 до 10 кВ, поэтому на всех приведённых графиках отображаются именно эти участки.

На рис. 3 представлены зависимости активного, ёмкостного и суммарного токов, протекающих через СПП с диаметром ПС 101 мм в состоянии низкой проводимости при $T_j = 125^\circ\text{C}$.

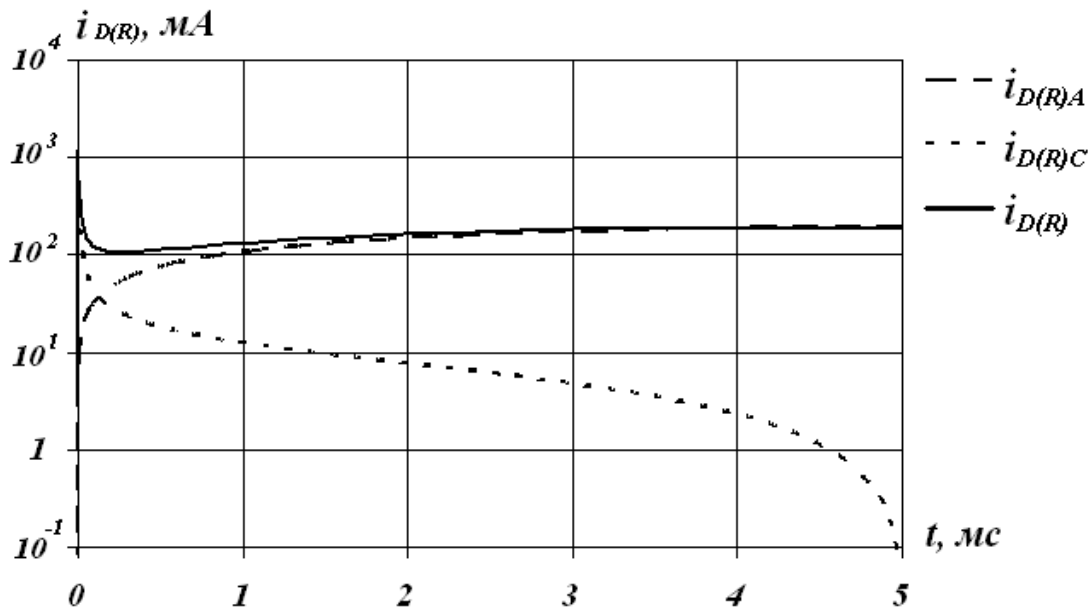


Рис. 3. Зависимости токов, протекающих через СПП с диаметром ПС 101 мм в состоянии низкой проводимости при $T_j = 125^\circ\text{C}$.

Из рис. 3 видно, что в начальный момент времени, когда скорость изменения напряжения $\frac{du_{D(R)}}{dt}$ наибольшая, а барьерная ёмкость p - n -перехода, вследствие ещё малой величины прикладываемого напряжения, максимальна, ёмкостная составляющая тока через СПП во много раз превышает активную. При этом с уменьшением барьерной ёмкости, вследствие увеличения напряжения и уменьшения скорости изменения напряжения на СПП, ёмкостной ток снижается. В момент, когда скорость изменения напряжения равна нулю ($t = 5$ мс), ёмкостной ток также равен нулю. В последующий этап изменения напряжения на СПП, когда его производная становится отрицательной, ток через барьерную ёмкость p - n -перехода протекает в обратном направлении [3].

На рис. 4 показаны статическая (без учёта ёмкостной составляющей тока) и динамическая (с учётом ёмкостной составляющей тока) ВАХ СПП с диаметром ПС 101 мм в состоянии низкой проводимости при $T_j = 125^\circ\text{C}$.

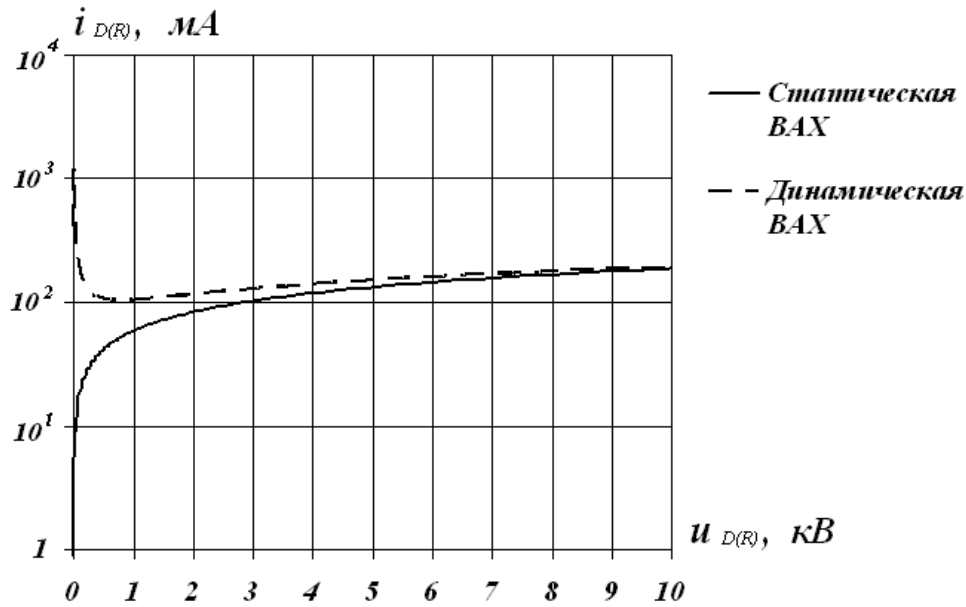


Рис. 4. Статическая и динамическая ВАХ СПП с диаметром ПС 101 мм в состоянии низкой проводимости при $T_j = 125\text{ °C}$.

Из приведённых зависимостей (рис. 4) видно, что при прикладывании к СПП импульса обратного напряжения синусоидальной формы, статическая и динамическая ВАХ не совпадают, кроме того, при малых напряжениях и больших скоростях ёмкостная составляющая тока существенно превышает активную.

На рис. 5 представлены динамические ВАХ СПП с диаметром ПС 101 мм при различных температурах.

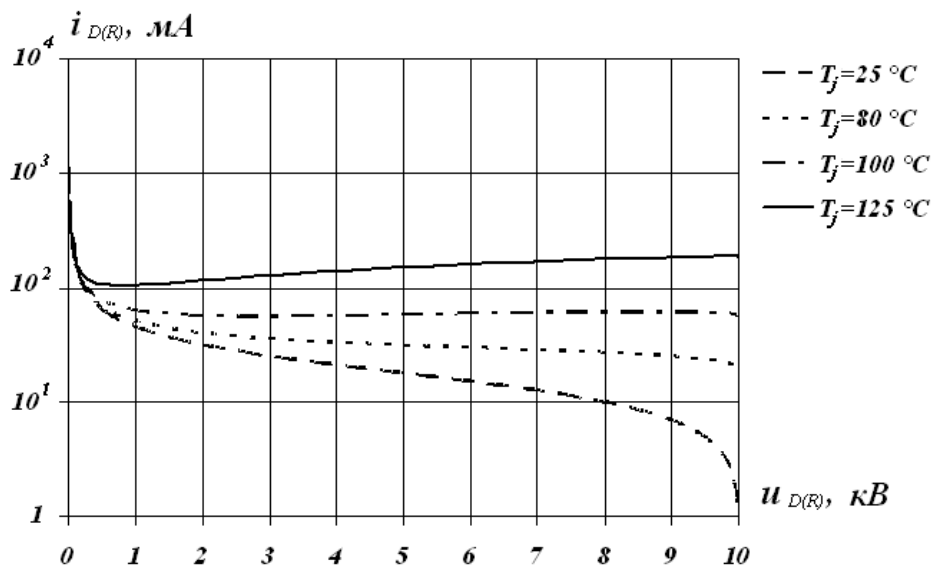


Рис. 5. Динамические ВАХ СПП с диаметром ПС 101 мм при различных температурах.

Из рис. 5 понятно, что с ростом температуры активная составляющая суммарного тока существенно возрастает, и при $T_j = 125\text{ °C}$ активная составляющая значительно преобладает над ёмкостной составляющей.

На рис. 6 изображены динамические ВАХ СПП с различными диаметрами ПС при $T_j = 125^\circ\text{C}$.

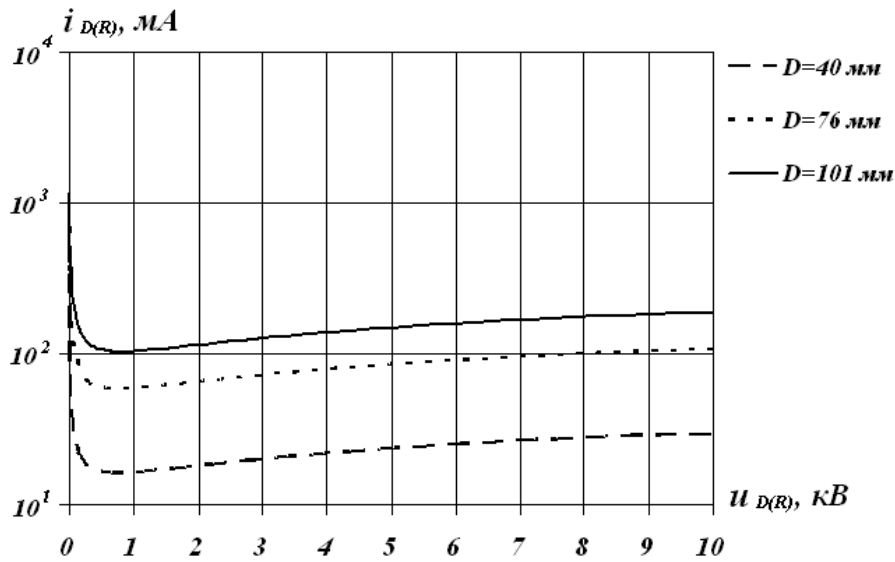


Рис. 6. Динамические ВАХ СПП с различными диаметрами ПС при $T_j = 125^\circ\text{C}$.

Из полученных зависимостей на рис. 6 видно, что с увеличением диаметра ПС одинаково увеличивается как активная составляющая суммарного тока, так и ёмкостная, что говорит о практически линейной зависимости суммарного тока от диаметра ПС.

На рис. 7 показаны динамические ВАХ СПП с диаметром ПС 101 мм при $T_j = 125^\circ\text{C}$ для различных значений времени жизни электронов в p -области.

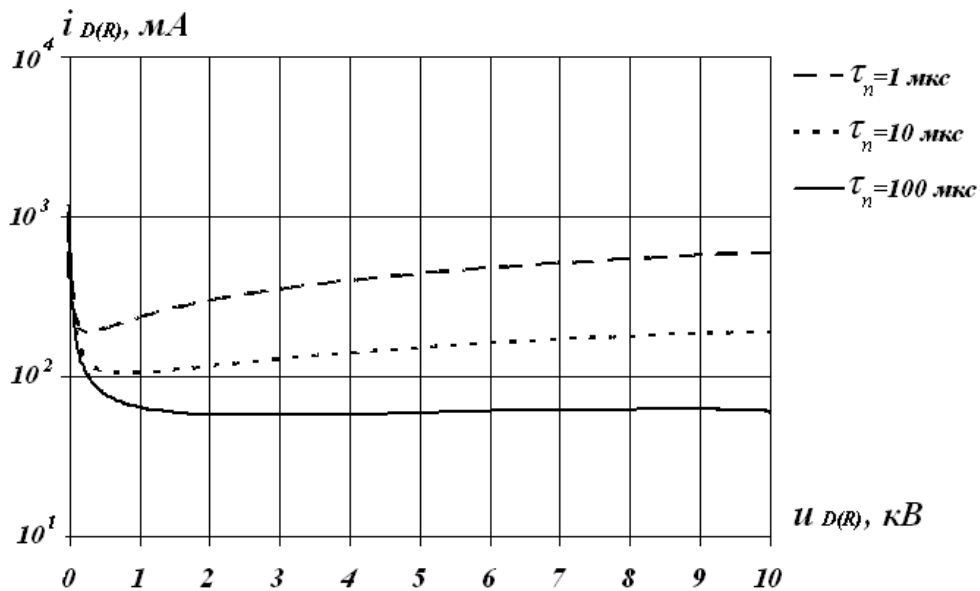


Рис. 7. Динамические ВАХ СПП с диаметром ПС 101 мм при $T_j = 125^\circ\text{C}$ для различных значений времени жизни электронов в p -области.

Из рис. 7 следует, что при увеличении времени жизни электронов в p -области активная составляющая суммарного тока существенно уменьшается, и при $\tau_n = 100$ мкс ёмкостная составляющая тока значительно преобладает над активной.

Выводы

Созданная в программной среде NI Multisim модель позволяет реализовать НН с характеристиками, описываемыми произвольной математической зависимостью. Это позволяет создавать модели ВАХ СПП в состоянии низкой проводимости, наиболее приближенные к реальным ВАХ и, соответственно, проводить исследования моделей СПП в различных температурных условиях. При этом обработку результатов исследования достаточно просто производить в MS Excel.

Планируется применение разработанной модели для комплексного анализа работы моделей СПП в состояниях низкой и высокой проводимости для анализа группового соединения СПП. На основании полученных данных будут выдвинуты требования, предъявляемые к самим СПП и к устройствам, предназначенным для определения их параметров и характеристик.

Литература

1. ГОСТ 24461–80 (СТ. СЭВ 1656–79). Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний. – М. : Издательство стандартов, 1981. — 56 с.
2. Евсеев Ю. А. Силовые полупроводниковые приборы: Учебник для техникумов. / Ю. А. Евсеев, П. Г. Дерменжи П. Г. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 472 с.
3. Н. Н. Беспалов, С. С. Капитонов. Измерение параметров силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости // Электроника и информационные технологии. — 2010 выпуск 1 (8) — 2010. — http://fetmag.mrsu.ru/2010-1/pdf/Measurement_in_low_conductivity.pdf.

Сведения об авторах

Беспалов Николай Николаевич — кандидат технических наук, *заведующий кафедрой автоматизации Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева*, e-mail: bnn48@mail.ru

Капитонов Сергей Сергеевич — аспирант *Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва*, научный руководитель – *Беспалов Николай Николаевич*, e-mail: KapitonovFET@rambler.ru

Пьянзин Иван Иванович — инженер НПП «Электронная техника — МГУ», e-mail: johnnie88@mail.ru

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

N. N. Bepalov, S. S. Kapitonov, I. I. Pyanzin
Mordovian N. P. Ogarev state university,
Scientific-production enterprise “Electronic technics — MSU”, Saransk
Phone: (834-2) 24-37-05. E-mail: bnn48@mail.ru