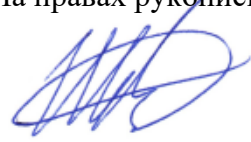


На правах рукописи



Шевченко Глеб Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ РЭА ЗА
СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА С
НЕКВАЗИСТАТИЧЕСКИМИ ЭФФЕКТАМИ ПРЯМОГО
И ОБРАТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

Специальность 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» и федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук».

Научный руководитель – Семенов Эдуард Валерьевич,
доктор технических наук, доцент, ТУСУР

Официальные оппоненты – Разинкин Владимир Павлович,
доктор технических наук, профессор,
Новосибирский государственный технический университет

Ладур Александр Анатольевич,
кандидат технических наук, руководитель
проектов, АО «Научно-производственная
фирма «Диполь», г. Санкт-Петербург

**Ведущая организация – АО «Экспериментальное научно-
производственное объединение
«СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ
СИСТЕМЫ», г. Москва**

Защита состоится «27» декабря 2022 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/e8ane8e0>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Мандель А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Проектирование любой современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) не обходится без предварительного компьютерного моделирования с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Качество моделирования определяет количество итераций при разработке макетов. В свою очередь, это существенно сказывается, в большую сторону, на сроках и стоимости радиоэлектронного устройства.

В радиоэлектронике, среди используемой при проектировании электронной компонентной базы (ЭКБ), широко распространены полупроводниковые приборы с $p-n$ -переходом. Например, быстросовсстанавливающиеся диоды, диоды с накоплением заряда (ДНЗ), биполярные и IGBT транзисторы и т.д.

Существующие модели диодов, предложенные в САПР, научных трудах и производителями ЭКБ, имеют существенно большую погрешность моделирования, что приводит к существенному расхождению между результатами моделирования и экспериментом при использовании импульсных широкополосных сигналов. Погрешность в существующих эквивалентных схемах объясняется следующими факторами. Во-первых, количество заряда неравновесных носителей вычисляется по безынерционной (квазистатической) формуле. Данное представление не в состоянии удовлетворительно охарактеризовать процессы, протекающие в диоде, а именно инерцию накопления и релаксации неравновесных носителей заряда при прямом (выброс напряжения на переходной характеристике прямого восстановления) и обратном (экспоненциальное изменение диффузионного заряда при исчезновении тока электропроводности) восстановлении. Стоит отметить, предложено описание инерции заряда неравновесных носителей, но ключевой недостаток такого описания сводится к тому, что уравнение не является разрешенным относительно диффузионного заряда, что приводит пользователя к необходимости применять рекурсивные алгоритмы для интеграции в САПР.

Во-вторых, не учитывается зависимость последовательного сопротивления диода от накопленного в нем диффузионного заряда, а также та часть

сопротивления, которая образуется на удаленных областях в диоде, в которых накопление неосновных носителей заряда незначительно. Данная инерционность проявляется выбросом напряжения в начале переходной характеристики прямого восстановления. Существующие модели сглаживают выброс, так как последовательное сопротивление в них, задается фиксированным значением, что противоречит физическому поведению.

В-третьих, в научных трудах время жизни неравновесных носителей предоставлено в виде постоянного значения. Величина времени жизни существенно влияет на быстродействие диода. Экспериментально показана нелинейная зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока диода. Распространенные квазистатические и неквазистатические модели не в состоянии удовлетворительно охарактеризовать зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от плотности тока, что приводит к большой погрешности (десятки процентов) моделирования на импульсных сигналах. Погрешность моделирования объясняется тем, что в существующих моделях время жизни имеет неизменное значение.

Актуальность адекватного моделирования динамических процессов в полупроводниковых приборах в настоящее время возрастает по причине сокращения длительности рабочих сигналов в различных радиотехнических системах. Особенную актуальность правильное моделирование имеет для разработки защитных устройств, генераторов сверхвысокой мощности, усилителей. Низкое качество моделирования может вызвать непредвиденное поведение макета радиоэлектронного устройства, которое способно привести к некорректной работе с дальнейшим выводом его из строя.

Подводя итог вышесказанному, нелинейно-инерционная модель диода с учетом внутренней инерции прямого и обратного восстановления, с возможностью простой интеграции пользователем эквивалентной схемы в САПР, является актуальной и востребованной.

Степень разработанности темы. Актуальность повышения качества моделирования радиоэлектронных устройств, включающих в себя диоды,

подтверждается объемными исследованиями в этом направлении. Проблеме повышения качества моделирования уделяется большое внимание на международных конференциях, например, Международной конференции по автоматизированному инженерному проектированию и проектной параметризации (ICCAEDDP), Международной конференции по автоматизированному проектированию (ICOCA), Азиатской конференции по твердотельным схемам (IEEE A-SSCC) и других.

Неквазистатическое описание диффузионного заряда было дано в научных работах: Э.В. Семенова, О.Ю. Малаховского, В.Г. Божкова, К.Ж. Tseng, Р.О. Lauritzen, А.Т. Yang, В. Tien, L. Sochova и другие. Р.О. Lauritzen, А.Т. Yang, В. Tien предложили дифференциальное уравнение, описывающее инерцию диффузионного заряда, но оно не является разрешенным относительно этого заряда, что приводит пользователя к необходимости применять рекурсивные алгоритмы для интеграции в САПР. В работах Э.В. Семенова и О.Ю. Малаховского приводится описание диффузионного заряда в замкнутой, разрешенной относительно диффузионного заряда неквазистатической форме, учитывающей инерцию накопления и релаксации неравновесных носителей заряда.

Решению проблемы моделирования последовательного сопротивления потерь и времени жизни неравновесных носителей заряда посвятили свои работы: Э.В. Семенов, О.Ю. Малаховский, Н. А. Поклонский Н. И. Горбачук, А. И. Сягло, С. В. Шпаковский Л.В. Карадинов, К.Ж. Tseng, В.В М'Named, F. Torres, A. Reineix и другие. В работах предложены модели диодов в которых не рассматривается часть сопротивления диода, которое определяется толщиной базы и омическим сопротивлением выводов, а время жизни задается фиксированным значением.

Существенный вклад в повышение качества моделирования радиоэлектронных устройств внесли: Л.И. Бабак, А.А. Калентьев, Т.Р. Газизов, Э.В. Семенов, А.Т. Yang, Yu Liu, J.T., I.H. Kang, S.C. Kim, P. Hoffmann и другие.

Основной **целью диссертационной работы** является повышение качества моделирования радиоэлектронных устройств путем реализации нелинейно-

инерционной модели диода с неквазистатическими эффектами прямого и обратного восстановления.

Подытожив вышесказанное, с учетом поставленной цели перечислю **основные задачи исследования:**

1. Проведение сравнительного анализа существующих научно–технических решений по реализации внутренней инерции диода в виде эквивалентной схемы.

2. Математическое описание зависимости последовательного сопротивления потерь от диффузионного заряда и зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока диода.

3. Структурный синтез неквазистатической эквивалентной схемы диода.

4. Экспериментальные исследования созданной неквазистатической модели диода на радиотехническом устройстве.

Научная новизна

1. Предложена оригинальная неквазистатическая модель переходных процессов в прямосмещенном диоде в виде эквивалентной схемы, позволяющая получать существенно меньшую погрешность моделирования относительно квазистатической модели за счет использования зависимости последовательного сопротивления потерь от прямого тока.

2. Впервые предложена неквазистатическая эквивалентная схема диода, учитывающая зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока при высоком уровне инжекции, позволяющая с меньшей погрешностью описывать фактическое поведение $p-n$ -перехода в прямом и обратном смещении.

3. Продемонстрирована неквазистатическая модель диода в виде эквивалентной схемы, которая позволяет получать существенно меньшую погрешность моделирования различных радиоэлектронных устройств относительно квазистатической модели.

Теоретическая значимость

1. Получена модель $p-n$ -перехода, учитывающая уменьшение плотности диффузионного заряда при удалении от $p-n$ -перехода.

2. Получена модель $p-n$ -перехода, учитывающая зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока при высоком уровне инжекции.

Практическая значимость диссертационной работы

Предложена законченная неквазистатическая эквивалентная схема $p-n$ -перехода, позволяющая сократить время и стоимость проектирования радиоэлектронного устройства, с возможностью беспрепятственной реализации ее в современных САПР на пользовательском уровне.

Методы исследования и достоверность

Методы исследования в диссертационной работе выбирались, исходя из постановки решаемых задач, с учетом особенностей исследуемых объектов и включают: теорию электропроводности Друде, преобразование Фурье, расчеты во временной области методом решения дифференциальных уравнений, методы эквивалентных схем, элементы теории полупроводниковых приборов, методы расчета SPICE-параметров диода, методы схемотехнического моделирования с применением систем автоматизированного проектирования, а также физическое макетирование.

Достоверность научных положений и выводов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждаются согласованностью полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается современными средствами измерений и стандартными методиками проведения исследований, а также методами статистической обработки данных.

Область исследования диссертационной работы соответствует указанным в паспорте профиля «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (2.12.13)»:

- п. 14 «Разработка и исследование методов моделирования радиотехнических устройств и систем, включая системы цифрового телевидения высокой, сверхвысокой, ультравысокой четкости и других форматов, для телевизионного вещания и специальных применений»;

• п. 15 «Разработка и исследование физических, математических и гибридных имитационных моделей радиотехнических устройств и систем, включая системы и устройства аналогового и цифрового телевидения и оптикоэлектронных устройств».

Положения, выносимые на защиту

1. Неквазистатическая модель переходных процессов в прямосмещенном диоде в виде эквивалентной схемы, учитывающая уменьшение плотности диффузионного заряда при удалении от p - n -перехода, позволяет получить существенно меньшую погрешность моделирования переходной характеристики прямого восстановления относительно квазистатической модели.

2. Неквазистатическая эквивалентная схема диода, учитывающая зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока при высоком уровне инжекции, позволяет получать существенно меньшую погрешность моделирования переходных процессов при прямом и обратном смещении.

3. Использование предложенной модели диода, позволяет получить погрешность моделирования выходного напряжения двухтактного обострителя импульсов не более 5%, в то время как квазистатическая модель дает существенно большую погрешность моделирования как формы, так и положения сигнала.

Личный вклад автора состоит в получении нелинейно-инерционной эквивалентной схемы диода с учетом зависимости последовательного сопротивления потерь от прямого тока. Автором лично предложено математическое описание зависимостей: время жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока и последовательного сопротивления потерь от диффузионного заряда. Автором также проведен анализ состояния научно-технических решений, выполнение расчётов, проведение и анализ экспериментов, и разработка программного обеспечения для управления вспомогательными аппаратными средствами. Совместно с научным руководителем поставлены задачи исследования. Сборка макета двухтактного обострителя импульсов и получение экспериментальных измерений выполнено совместно с Березиным А.А.

Использование результатов исследования

Результаты исследования использованы при выполнении следующих работ:

1. Конкурс «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК-2019»);

2. Государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWRM-2021-0015;

3. Российского научного фонда, грант № 22-29-00605 "Характеризация нелинейно-инерционных свойств и динамического диапазона систем со сложными и импульсными широкополосными сигналами".

Основные положения диссертационной работы апробировались на:

1. XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2017);

2. Студенческой международной научно-практической конференции «Научное сообщество студентов XXI столетия. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ» (г. Новосибирск, 2017);

3. 5-ой Международной научно-практической конференции студентов "САПР и моделирование в современной электронике" 2021 (г. Брянск, 2021);

4. 32-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2022) (г. Севастополь, 2022)

Публикации

По результатам исследований опубликовано 9 работ: 2 статьи в журналах из перечня ВАК, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 4 доклада и 2 статьи в трудах международных конференций с индексацией в наукометрической базе РИНЦ.

Результаты диссертационной работы, внедрены на предприятия АО «Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов», ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» и ООО "500м ТЕХНОЛОДЖИС".

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 4 раздела, заключение, список источников из 68 наименований, приложение из 6 с. Объем диссертации с приложением – 121 с., в т.ч. 75 рис. и 1 табл.

Краткое содержание работы. Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, представлена научная новизна и практическая значимость результатов, приведены сведения об апробации работы, публикациях и внедрении.

В первой главе проведен сравнительный анализа существующих научно–технических решений по реализации внутренней инерции диода в виде эквивалентной схемы. Рассмотрены предложения по реализации зависимостей последовательного сопротивления потерь от диффузионного заряда и времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока. Проанализированы квазистатические и неквазистатические модели диода, используемые в САПР и производителями ЭКБ, а также описанные в научных трудах. Это позволило создать систематическую базу для определения дальнейшего пути исследования по выбранной тематике. Сформулированы цель и задачи работы.

Во второй главе предложена формула (1) последовательного сопротивления диода, учитывающая уменьшение плотности диффузионного заряда при удалении от p – n -перехода. При этом значение диффузионного заряда рассчитывается в неквазистатическом приближении, учитывающем конечную подвижность неравновесных носителей заряда. Так же учитывается независящая от заряда часть последовательного сопротивления потерь. Это та часть сопротивления, которая образуется на удаленных областях p – n -перехода, в которых накопление неосновных носителей заряда незначительно. Предлагаемая формула последовательного сопротивления p – n -перехода имеет вид:

$$R_S(Q_d) = \frac{1}{Y_0 + \alpha Q_d} + R_0, \quad (1)$$

где R_0 – независящее от диффузионного заряда значение последовательного сопротивления потерь, Q_d диффузионный заряд, Y_0 – проводимость пассивных областей при нулевом токе, α – параметр, зависящий от геометрии диода и

процессов изготовления, которым подвергался диод. Величина R_0 определяется толщиной базы и омическим сопротивлением выводов.

Для нахождения диффузионного заряда используется формула:

$$Q_d(t) = h(t) * i(t)T, \quad (2)$$

где $*$ – символ свертки, $h(t)$ – импульсная характеристика, определяющая произвольное линейное преобразование тока электропроводности через диод в заряд неравновесных носителей. Эта формула определяет диффузионный заряд в замкнутой, разрешенной относительно диффузионного заряда неквазистатической форме, учитывающей инерцию накопления и релаксации неравновесных носителей заряда.

Использование формулы (2) позволит без затруднений реализовать модель диода в современных САПР в виде соответствующей эквивалентной схемы, так как Q_d представлен в явной форме, и поэтому применение рекурсивных алгоритмов не требуется.

Для реализации модели прямого восстановления p - n -перехода в САПР предлагается эквивалентная схема, приведенная на рисунке 1.

Реализация неквазистатического уравнения диффузионного заряда (2) на эквивалентной электрической цепи должна иметь импеданс параллельной RC -цепи. Емкость конденсатора RC -цепи численно равна постоянной времени τ_d при $R = 1$ Ом. Параметр τ_d устанавливает динамический процесс накопления и релаксации неравновесных носителей заряда.

В предложенной эквивалентной схеме (рисунок 1), диффузионный заряд отражается выходными сигналами двух блоков: на выходе источника заряда, управляемого напряжением (ИЗУН) и на выходе источника напряжения, управляемого напряжением (ИНУН2). В первом случае в блоке ИЗУН устанавливается коэффициент преобразования, численно равный времени жизни диффузионного заряда для добавления к заряду p - n -перехода. Во втором случае блок ИНУН2 предназначен для получения напряжения, численно равного значению диффузионного заряда Q_d' путем умножения напряжения с RC -цепи (рисунок 1) на время жизни неравновесных носителей заряда T . Данное решение

предложено из-за отсутствия в САПР источников сигналов, управляемых зарядом (для вычислений по (2)).

Отличительная особенность схемы на рисунке 1 заключается в учете неквазистатических свойств прямого восстановления. Неквазистатические свойства реализуются в блоке ИНУН1, где происходит расчет падения напряжения на R_s по формуле:

$$U_{R_s} = \left(\frac{1}{Y_0 + \alpha Q_d^u} + R_0 \right) I, \quad (3)$$

где Q_d^u – напряжение, численно равно значению диффузионного заряда, I – ток диода, а множитель в скобках представляет собой последовательное сопротивление p - n -перехода (см. формулу (1)). Выход блока источника напряжения, управляемым током (ИНУТ) формирует напряжение, численно равно току диода I . Источник тока, управляемый током ИТУТ, введен в качестве развязывающего буфера.

Параметры формулы (1) R_0 , Y_0 и α реализованы в виде констант. Кроме того, в схеме учитывается барьерная емкость p - n -перехода C_j .

Экстракция большинства параметров представленной на рисунке 1 модели происходит обычными способами из вольт-амперной характеристики (ВАХ) и вольт-фарадной характеристики (ВФХ) диода.

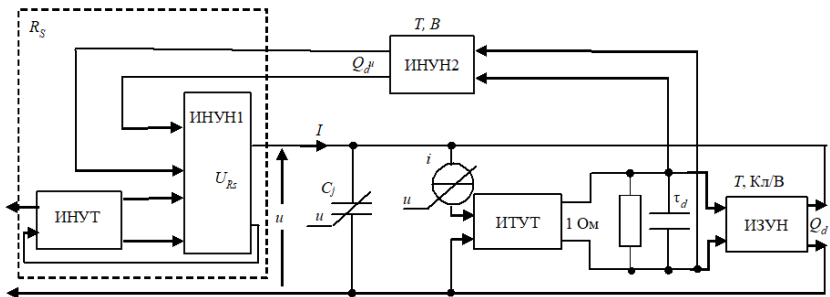


Рисунок 1 – Неквазистатическая эквивалентная схема p - n -перехода

Последовательное сопротивление потерь R_s определяется как разность дифференциального сопротивления диода и дифференциального сопротивления p - n -перехода. Удобство оперирования дифференциальными сопротивлениями состоит в том, что для отыскания сопротивления p - n -перехода достаточно определить лишь коэффициент неидеальности N .

Дифференциальное сопротивление диода вычисляется дифференцированием ВАХ. Дифференциальное сопротивление p - n -перехода вычисляется как гиперболическая функция тока, построенная по коэффициенту неидеальности p - n -перехода, найденного в области максимального наклона ВАХ.

В качестве примера для экспериментальных измерений используется биполярный транзистор n - p - n типа 2N6488G, производства ON Semiconductor. Транзистор исследуется в диодном включении эмиттерного перехода. Коллектор, при этом, замкнут с базой.

На рисунке 2 приведены расчетные и экспериментальная кривые последовательного сопротивления потерь R_s , демонстрирующие его зависимость от тока, проходящего через диод. Для демонстрации целесообразности введения переменной R_0 приведена кривая (кривая 1), построенная без учета R_0 .

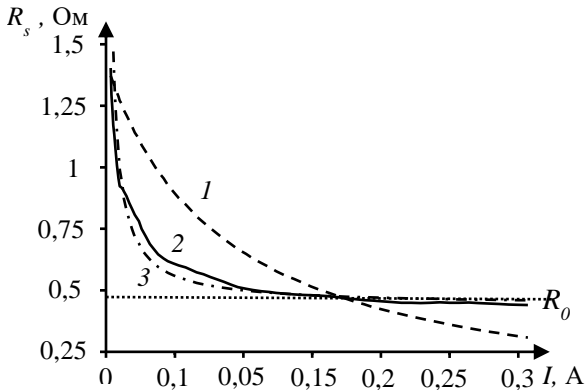


Рисунок 2 – Последовательное сопротивление потерь: кривая 1 – расчет без учета R_0 ; кривая 2 – эксперимент; кривая 3 – расчет по формуле (1).

Параметры Y_0 и α подбираются так, чтобы обеспечить наименьшую невязку между моделью и экспериментом (рисунок 2, кривая 2).

Из рисунка 2 также видно, что кривая 1 полученная без учета R_0 , имеет существенное расхождение с экспериментальной кривой 2. В то время как кривая 3, построенная по формуле (1), соответствует экспериментальной кривой 2 значительно лучше.

Кривые на рисунке 2 можно интерпретировать следующим образом. Перед включением диода заряд Q_d незначителен и $R_S = 1/Y_0$. Это аналогично использованию постоянного сопротивления R_S в обычной модели. Когда $\alpha Q_d \gg Y_0$ последовательное сопротивление диода стремится к параметру R_0 . При любом конечном токе диода, в том числе и в установившемся состоянии, R_S будет между крайними значениями $1/Y_0$ и R_0 .

Экспериментальная установка для измерений в режиме прямого восстановления включает в себя генератор Tabor Electronics 5201 и осциллограф National Instruments PXI-5114. Генератор формирует ступенчатое воздействие с амплитудой прямого тока 15 мА. С помощью осциллографа фиксируется напряжение на диоде.

Рисунок 3 иллюстрирует кривые прямого напряжения на диоде, полученные с помощью эксперимента и моделирования.

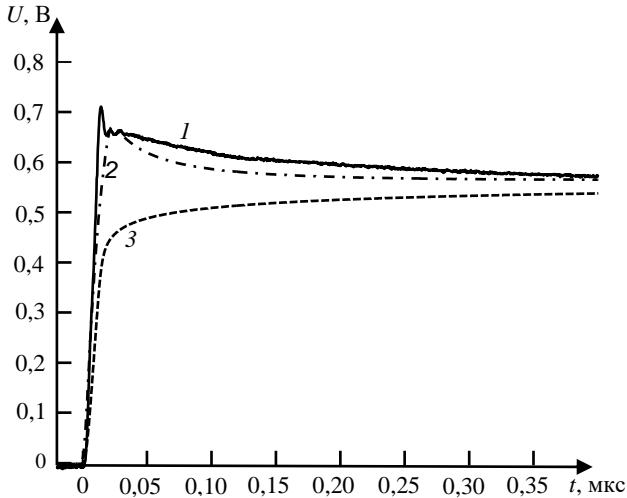


Рисунок 3 – Прямое напряжение на p - n -переходе: кривая 1 – эксперимент; кривая 2 – неквазистатическая модель; кривая 3 – квазистатическая модель

На рисунке 3 отчетливо наблюдается невязка кривой импульса напряжения прямого восстановления квазистатической модели диода (кривая 3) с экспериментальной кривой (кривая 1). В то же время кривая, полученная с помощью неквазистатической модели (кривая 2), имеет существенно меньшее расхождение с экспериментальной.

Невязка экспериментальной кривой (кривая 1) с предложенной неквазистатической моделью (кривая 2) не превышает 9%. Квазистатическая модель (кривая 3) имеет отклонение от экспериментальной кривой до 35%.

В итоге, предложена модифицированная модель последовательного сопротивления диода, учитывающая уменьшение плотности диффузионного заряда при удалении от p - n -перехода. При этом значение диффузионного заряда рассчитывается в неквазистатическом приближении, учитывающем конечную подвижность неравновесных носителей заряда.

Предложенная модель реализована в виде эквивалентной схемы, допускающей реализацию в современных САПР на пользовательском уровне.

Третья глава посвящена моделированию зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока диода.

Для рекомбинации необходимо одновременное наличие в одной и той же точке кристалла электрона n и дырки p . Будем рассматривать диод при высоком уровне инжекции, когда количество инжектированных носителей сравнимо с основным легированием. В связи с этим, необходимо учитывать избыточную концентрацию электронов δn . Тогда постоянная времени жизни неравновесных носителей при высоком уровне инжекции будет иметь вид:

$$\tau = \frac{1}{\gamma_r} \frac{1}{p_0 + n_0}, \quad (4)$$

где γ_r – коэффициент рекомбинации,

При работе с полупроводниковыми приборами, уровни легирования часто неизвестны. Поэтому используем модель, основанную на измерениях, предложенную нами ранее. Отношение $\delta n/(p_0+n_0)$ является линейной функцией тока. Тогда зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока p – n -перехода будет иметь вид:

$$\tau(I) = \tau_0 \frac{1}{1 + I / I_0}, \quad (5)$$

где I_0 – ток, при котором время жизни уменьшается в два раза, I – ток электропроводности p – n -перехода.

Использование формулы (5) позволит без затруднений реализовать модель p – n -перехода в современных САПР в виде соответствующей эквивалентной схемы, так как данное уравнение является разрешенным относительно τ , что не требует применения рекурсивных алгоритмов (решение дифференциальных уравнений). На рисунке продемонстрировано сравнение экспериментальных и расчетных результатов (по формуле (5)) зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока p – n -перехода.

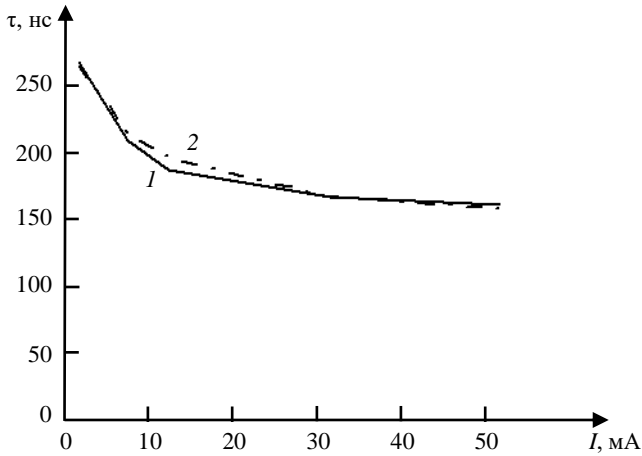


Рисунок 4 – Сравнение экспериментальной (кривая 1) и расчетной (кривая 2) зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда

На рисунке 5 продемонстрирована неквазистатическая эквивалентная схема диода с учетом зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока. Зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока (формула (5)) реализована с помощью узла источника напряжения, управляемого током (ИНУТ). Выход узла ИНУТ формирует напряжение численно равное времени жизни.

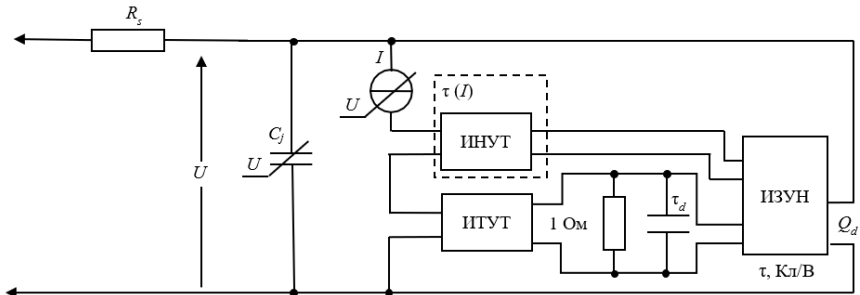


Рисунок 5 – Неквазистатическая эквивалентная схема диода

Эквивалентная схема спроектирована с возможностью беспрепятственной ее реализации в распространенных САПР (например, AWR Design Environment). Объясняется это тем, что предложенные элементы имеются во многих библиотеках современных САПР. Узел ИНУТ соответствует C CVS (Current-Controlled Voltage Source), узел ИНУН соответствует DYN_VCCS (Dynamic Nonlinear Voltage-Controlled Current/Voltage Source), узел ИТУТ соответствует CCCV (Current-Controlled Current Source), узел ИЗУН соответствует DYN_VCQS (Dynamic Nonlinear Voltage-Controlled Charge Source).

Однако узел ИЗУН присутствует не во всех популярных САПР (Например, Advanced Design System). Поэтому можно использовать последовательное включенные узлы: дифференциальная цепь и источник тока, управляемый напряжением (ИТУН), а также узел ИТУТ заменить на источник тока, управляемый напряжением (ИТУН). Допустимость использования данной связки объясняется тем, что в узле ИЗУН наблюдается изменение заряда. Дифференцируя сигнал с выхода узла ИНУТ, получаем сигнал численно току, который возникает при изменении диффузионного заряда.

На рисунке 6 продемонстрированы экспериментальные и модельные кривые импульса тока обратного восстановления при разном прямом токе (a – 15 мА, b – 34 мА, c – 54 мА). Из рисунка 6 видно, что невязка между экспериментальной кривой (рисунок 6, кривая 1) и предложенной неквазистатической моделью (рисунок 7, кривая 2) не превышает 9%. Модель без учета зависимости $\tau(I)$ имеет отклонение от экспериментальной кривой до 45% (рисунок 7, кривая 3).

Так же рисунок 6 показывает, что при токе 14 мА модель без учета и с учетом зависимости $\tau(I)$ не имеет существенных отклонений от экспериментальной кривой, так как у модели без учета зависимости $\tau(I)$ время жизни рассчитывается при 14 мА.

Представленная модель диода в виде эквивалентной схемы, позволяет беспрепятственно реализовать ее в современных САПР на пользовательском уровне.

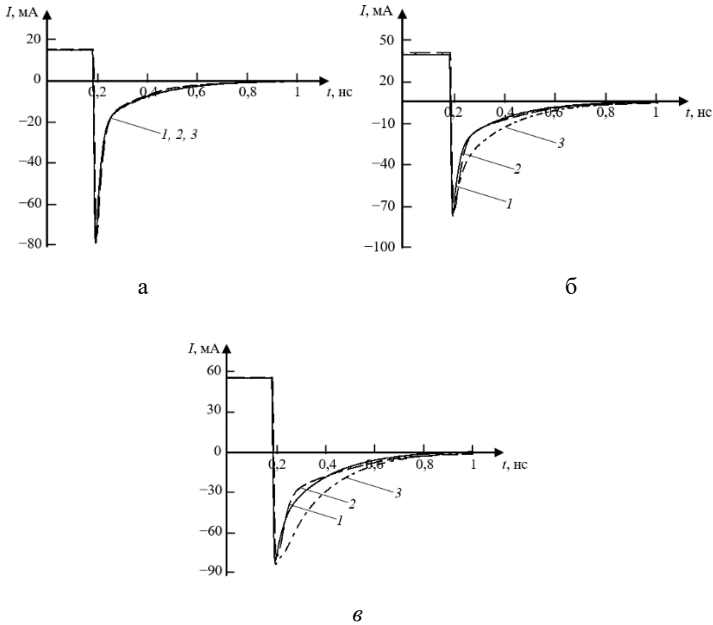


Рисунок б – Импульс тока обратного восстановления на диоде: кривая 1 – эксперимент; кривая 2 – предложенная неквазистатическая модель; кривая 3 – стандартная модель. а – 15 мА; б – 34 мА; в – 54 мА

Предложена модифицированная модель времени жизни неравновесных носителей заряда, учитывающая динамику процесса рекомбинации. При этом значение диффузионного заряда рассчитывается в неквазистатическом приближении, учитывающем конечную подвижность неравновесных носителей заряда. Расхождение между экспериментальной и модельной кривой не превышает 9%.

В четвертой главе показана практическая значимость на примере радиотехнических устройств. Проведено исследование предложенной модели диода при проектировании двухтактного формирователя импульсов, генератора пар импульсов противоположной полярности на двухтактном каскаде с биполярными транзисторами и генераторе импульсов мощностью 1МВт.

Предложенная неквазистатическая эквивалентная схема диода обеспечила минимальную невязку между экспериментальной и модельной кривой не более 5%.

На рисунке 7 приведена схема двухтактного обострителя сигнала в САПР. Это законченное устройство, которое используется в установке по измерению нелинейного рассеяния объектов в ИСЭ СО РАН.

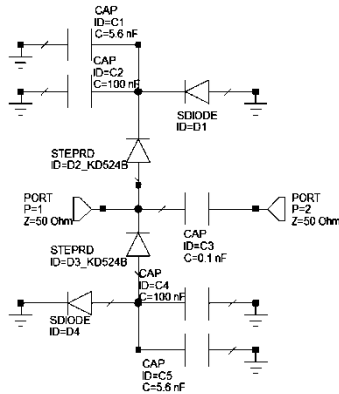


Рисунок 7 – Двухтактного обострителя сигнала

Рисунок 8 иллюстрирует кривые напряжения на выходе двухтактного обострителя (фронт импульса), полученные с помощью эксперимента и моделирования. Рис. 9 наглядно показывает существенное расхождение между экспериментальной и модельной кривой модели без учета зависимости времени жизни от прямого тока. В то время как модель с учетом формулы (5) корректно описывает экспериментальную кривую.

Невязка экспериментальной кривой (кривая 1) с модельной по предложенной формуле (5) (кривая 2) не превышает 5%. В то время как стандартная модель имеет отклонение более 35% (кривая 3). С помощью формулы (5) получилось уменьшить задержку в 2 раза относительно эксперимента. Учет задержки играет важную роль при проектировании пикосекундной техники, а также защитных устройств.

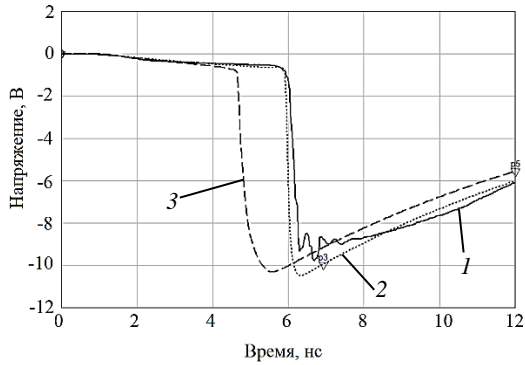


Рисунок 8 – Сигнал на выходе двухтактного обострителя. Кривая 1 (сплошная) – Эксперимент; кривая 2 (пунктирная) – модель с учетом формулы (1); кривая 3 (штриховая) – стандартная модель.

Далее было рассмотрено влияние инерционности в накоплении и экстракции диффузионного заряда диода ВУ12 на работу модели генератора импульсов на 1 МВт (рисунок 9).

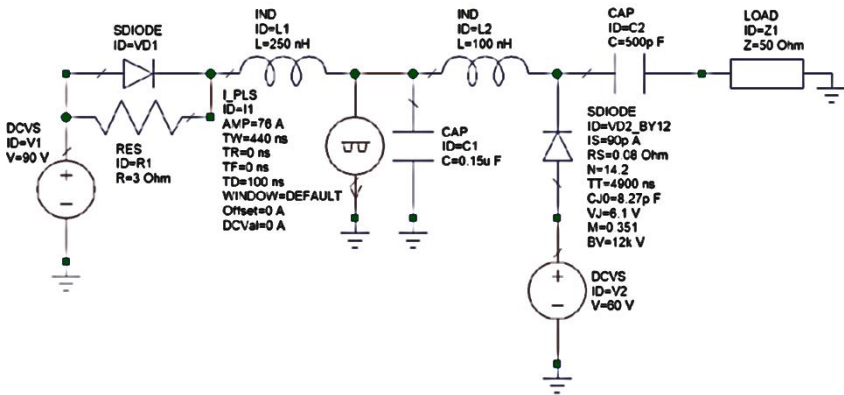


Рисунок 9 – Функциональная схема генератора импульсов на 1МВт

Квазистатическая модель дает ступенчатое запираение диода после того, как диффузионный заряд рассеется. Экспериментально этот процесс занимает 400 нс. Это сказывается на том, что после прекращения тока электропроводности через

диод продолжается медленно уменьшающийся ток. В результате выходное напряжение составляет не 7,2 кВ (рисунок 10 а), а 92 В (рисунок 10 б).

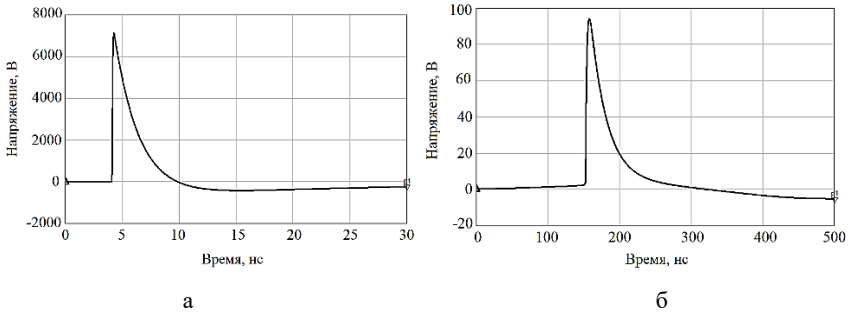


Рисунок 10 – Результаты моделирования квазистатической (а) и неквазистатической (б) модели диода ВУ12

Рисунок 10 показывает, что квазистатическая модель существенно искажает результаты моделирования, а также подводит к тому, что учет неквазистатических эффектов в диоде кардинально меняет оценку его применимости для генерации коротких импульсов большой амплитуды.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложенная неквазистатическая модель диода подходит для следующих типов диодов: быстро восстанавливающиеся, с накоплением заряда, высоковольтные.

2. Предложена модель последовательного сопротивления диода, учитывающая уменьшение плотности диффузионного заряда при удалении от $p-n$ -перехода. В модели учитывается конечная подвижность неравновесных носителей заряда. Невязка экспериментальной кривой прямого напряжения с предложенной неквазистатической моделью не превышает 5%.

3. Предложена модель $p-n$ -перехода в виде эквивалентной схемы, учитывающая зависимость времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока $p-n$ -перехода при высоком уровне инжекции. Расхождение между экспериментальной и модельной кривой не превышает 9% при импульсном воздействии на диод.

4. Использование предложенной модели p - n -перехода, позволяет получить погрешность моделирования выходного напряжения двухтактного обострителя импульсов не более 5%, в то время как квазистатическая модель дает существенно большую погрешность моделирования как формы, так и положения сигнала.

5. Экстракция параметров в предложенной модели происходит обычными способами из ВАХ и ВФХ диода кроме последовательного сопротивления потерь. Последовательное сопротивление потерь определяется как разность дифференциального сопротивления диода и дифференциального сопротивления p - n -перехода. Удобство в том, что для отыскания сопротивления p - n -перехода достаточно определить коэффициент неидеальности.

6. Изучено влияние последовательного сопротивления потерь на выброс напряжения переходной характеристики прямого восстановления. Изучено влияние зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда на форму выходного сигнала и его положение, на примере двухтактного обострителя импульсов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО

В РАБОТАХ:

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Шевченко Г.М. Уменьшение погрешности измерения времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов при использовании осциллографов с узкой полосой пропускания / Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – №2, ч. 1. – С. 37-41.

2. Шевченко Г.М. Неквазистатическая модель переходных процессов в прямосмещенном p - n -переходе / Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов // Докл. Том. гос. –ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – №3, ч. 1. – С 7-13.

Сборники всероссийских и международных конференций:

1. Шевченко Г.М. Измерение времени обратного восстановления быстровосстанавливающихся диодов / Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов // Материалы

Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск, Россия. – 2018. – С. 201–204.

2. **Шевченко Г.М.** Повышение метрологического качества измерения времени обратного восстановления диодов / Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов // Сборник материалов LXXIX Студенческой международной научно-практической конференции «Научное сообщество студентов XXI столетия». – 2018. – Т. 7, – С 96–100.

3. **Шевченко Г.М.** Простая модель зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока p - n -перехода / Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов // Материалы 32-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо)». – Севастополь, Россия – 2022. – Т., – С.

4. **Шевченко Г.М., Семенов Э.В.** Ключевые факторы, влияющие на невязку экспериментальных и модельных кривых, при моделировании p - n -перехода на импульсных широкополосных сигналах / Г.М. Шевченко, Э.В. Семенов // Материалы 5-ой международной научно-практической конференции; под ред. А.Ю. Дракиной. – Брянск: Издательство «Новый формат», – 2021. – С 208-211.

**Свидетельство о государственной регистрации программы для
электронных вычислительных машин или базы данных:**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021668091. SPICE-модель p - n -перехода с неквазистатическими эффектами прямого и обратного восстановления Авторы: Шевченко Г.М., Семенов Э.В. Заявка №2021664460. Дата поступления 13.09.2021 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.11.2021 г.