

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Шевченко Глеба Михайловича «Повышение качества моделирования РЭА за счет использования эквивалентной схемы полупроводникового диода с неквазистатическими эффектами прямого и обратного восстановления», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

### Актуальность темы

Моделирование с использованием современных вычислительных средств является неотъемлемым этапом проектирования радиоэлектронной аппаратуры. Точность результатов моделирования влияет на сроки и затраченные средства для получения устройства с требуемыми техническими параметрами. Современная радиоэлектронная аппаратура состоит из большого количества полупроводниковых компонентов и устройства с *p-n*-переходом. В связи с этим актуальной является задача разработки их оптимальных моделей, обеспечивающих высокую степень совпадения расчета и эксперимента.

### Общая характеристика работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 69 наименований и приложений с актами внедрения результатов работы соискателя и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ. Объем диссертации с приложениями 121 с., 75 рисунка и 1 таблица.

**Автореферат** диссертации написан и оформлен в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 и требованиями ВАК Минобрнауки России, а также отражает основное содержание диссертационной работы.

**Во введении** указаны основные проблемы моделирования, определены цель и задачи исследований, приведены основные научные результаты, представлено научное и практическое значение работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, показана актуальность работы и личный вклад автора.

**В первой главе** проведен сравнительный анализа существующих реализации внутренней инерции диода в виде эквивалентной схемы. Рассмотрены 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 электронных компонентов, а также модели, описанные в научных трудах. Сформулированы цель и задачи работы.

**Во второй главе** предложена модифицированная модель 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 и независимую от заряда часть последовательного сопротивления, которая образуется на удаленных областях  $p-n$ -перехода с незначительным накоплением неосновных носителей заряда. Предложенная модель реализована в виде эквивалентной схемы и возможностью использования в современных САПР.

**Третья глава** посвящена моделированию зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда от прямого тока диода. Предложена модифицированная модель времени жизни неравновесных носителей заряда, учитывающая динамику процесса рекомбинации. Модель диода представлена в виде эквивалентной схемы и позволяет реализовать ее в современных САПР на пользовательском уровне.

**В четвертой главе** проведено исследование предложенной модели диода на примере двухтактного формирователя импульсов. Продемонстрированы результаты моделирования двухтактного формирователя импульсов. Предложенная неквазистатической эквивалентная схема диода обеспечила невязку между экспериментальной и модельной кривой не более 5%.

В приложениях содержатся акты внедрения результатов диссертационной работы, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и диплом выигранного гранта УМНИК.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы заключается в следующем.

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 р-п-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.

### **Научная значимость**

В диссертации Глеба Михайловича представлено решение актуальной проблемы повышения качества моделей диодов, предложены новые научно обоснованные предложения для проектирования РЭА, предложены модели для разных типов диодов, таких как быстро останавливающиеся, с накоплением заряда и высоковольтные. Предложенные модели позволяют достигнуть значения невязки с экспериментальными данным до значения 5%.

### **Достоверность результатов**

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.

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.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы подтверждена актами о внедрении её результатов на предприятиях АО «Научно-исследовательского института полупроводниковых приборов», ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» и ООО «50 Ом ТЕХНОЛОДЖИС».

### **Замечания по диссертационной работе**

Следует отметить некоторые недостатки диссертационной работы:

1. В разделе научной новизны и положениях, выносимых на защиту, присутствуют формулировки качественной оценки, нераскрыто насколько предложенная модель лучше существующей модели.
2. В обзоре не рассмотрены физические модели, которые достаточно точно описывают динамические процессы в диоде и успешно применяются.
3. В автореферате и диссертации не сказано почему предлагается модель именно при высоком уровне инжекции.
4. Не раскрыта возможность применения на СВЧ.
5. Имеются некоторые стилистические, терминологические и орфографические ошибки.

## Заключение

На основании выше сказанного считаю, что диссертационная работа Глеба Михайловича Шевченко «Повышение качества моделирования РЭА за счет использования эквивалентной схемы полупроводникового диода с неквазистатическими эффектами прямого и обратного восстановления» является завершенным научным исследованием, актуальной научной новизной и соответствует требованиям, установленным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 в редакции от 26.09.2022, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.13 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

### Официальный оппонент

кандидат технических наук по специальности 05.12.07,

Руководитель проектов, Контрольно-измерительные решения

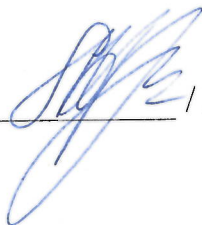
Акционерное общество «Научно-производственная фирма «Диполь»,

197101, Санкт-Петербург г, Большая Монетная улица, дом № 16,

корпус 45, литер Я, помещение 52,

Тел. +7 (812) 702 1266, доб. 2049

e-mail: LadurAA@dipaul.ru



/ Александр Анатольевич Ладур

«08» декабря 2022

Подпись к.т.н. Ладура А.А. удостоверяю

Генеральный директор «НПФ «Диполь»



М.П.

/ А.А. Верецкий