

На правах рукописи



ГУСИН Дмитрий Вадимович

**Теория и моделирование биполярных полупроводниковых
переключателей силовой микроэлектроники**

Специальность

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Санкт-Петербургском государственном политехническом университете и в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе

А. В. Горбатюк

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе

К. Д. Цэндин

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, начальник отдела
ФГУП «Всероссийский электротехнический
институт им. В. И. Ленина»

А. С. Кюрегян

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится «_18_» __октября__ 2012 г. в _12_ час. _00_ мин.
на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «_10_» __сентября__ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Л. М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сильноточная полупроводниковая электроника в настоящее время обеспечивает преобразование более половины всей вырабатываемой в промышленно развитых странах электроэнергии. Ключевыми компонентами всех современных преобразовательных устройств являются мощные полупроводниковые приборы. Основные требования, предъявляемые к ним, заключаются в способности пропускать большие токи (десятки и сотни ампер на один прибор) при минимальном падении напряжения, блокировать высокие напряжения (несколько киловольт) в запертом состоянии с минимальными токами утечки и осуществлять управляемую коммутацию с как можно меньшими потерями энергии.

В наибольшей степени перечисленным требованиям удовлетворяют новые приборы транзисторного и тиристорного типов, производимые на основе гибридных полупроводниковых технологий – биполярных и МДП (металл-диэлектрик-полупроводник). В настоящее время они активно внедряются в силовую электротехнику для частотного преобразования электроэнергии. Интегральные структуры (чипы) таких приборов имеют рабочую площадь от долей до единиц см^2 и содержат большое число (10^2 – 10^5) почти одинаковых элементарных ячеек, равномерно распределенных по площади чипа (с шагом 10–20 мкм). Верхний предел плотности коммутируемой мощности для приборов типовых конструкций на сегодня близок к $P_{\text{max}} = 150$ – 200 кВт/см^2 .

Актуальными задачами дальнейшего совершенствования биполярных переключателей являются повышение максимальной коммутируемой мощности, а также расширение области их безопасной работы (ОБР) по токам и напряжениям [1*]. Физические механизмы, ограничивающие ОБР, включают в себя целый ряд существенно нелинейных эффектов – электрический пробой, пространственная неустойчивость распределения тока, его сосредоточение на малых участках рабочей площади и т. д. В условиях неизбежного статистического разброса параметров (например, времен жизни носителей) между ячейками реальной приборной структуры и неравномерного размещения элементов распределенного затвора на ее рабочей площади эти эффекты характеризуются выраженной поперечной неоднородностью и становятся доминирующими в развитии аварийных сценариев переходного процесса выключения.

Улучшение характеристик биполярных переключающих приборов сопряжено с максимальным использованием физических свойств материалов и режимов функционирования, основанных на инжекционных процессах в условиях сильных электрических полей $\sim (1$ – $2) \cdot 10^5 \text{ В/см}$ и высоких плотностей токов $\sim 100 \text{ А/см}^2$. Закономерности развития таких процессов и свойственные им неустойчивости представляют существенный интерес для физики полупроводников с фундаментальной точки зрения. Их теоретическое понимание требуется

и для решения актуальной проблемы определения количественных границ ОБР при разработке новых приборных структур. Без адекватных теоретических представлений невозможно эффективно планировать полномасштабные численные и натурные эксперименты и интерпретировать их результаты, физически обосновывать выбор структур и режимов, указывать направления их дальнейшей оптимизации. Существующие приближенные аналитические модели [2*,3*] не обеспечивают удовлетворительного решения таких задач для современных интегральных конструкций приборов с неизбежно присутствующими технологическими и конструктивными несовершенствами. Неполный характер носят и сведения о влиянии последних на ограничения ОБР в различных режимах управления затвором, реализуемых в биполярных переключателях. Таким образом, развитие теоретического базиса мощной полупроводниковой электроники представляется актуальным направлением в физике полупроводников и полупроводниковых приборов. В целом, при очевидной невозможности построения общей замкнутой аналитической теории, охватывающей все типы приборных структур и режимов их работы, получение исчерпывающей информации о механизмах ограничений ОБР обеспечивается только совместным использованием экспериментальных, теоретических и основанных на численном моделировании исследовательских методов.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании механизмов электрической перегрузки современных мощных биполярных переключающих приборов и определении границ областей их безопасной работы, обусловленных этими механизмами.

Для достижения поставленной цели решался следующий комплекс задач:

- уточнение свойств исследуемых приборов силовой микроэлектроники – биполярных полупроводниковых переключателей с распределенными микрозатворами (БПМЗ) – как класса управляемых распределенных систем с инжекционной модуляцией проводимости и выявление общих закономерностей переходных процессов в таких системах;
- анализ начальной стадии динамического лавинного пробоя (ДЛП) при выключении по затвору и определение границ ОБР, обусловленных входением в ДЛП;
- разработка обобщенной нестационарной модели запирающего биполярного переключателя с технологическими неоднородностями параметров структуры и конструктивно неэквивалентным расположением управляемых ячеек в его интегральном чипе;
- определение ограничений по рабочей частоте переключения приборов и предложение возможных способов их расширения;
- проверка адекватности разработанной теории при помощи средств численного моделирования с имитационной полнотой описания электрофизических процессов в приборных структурах;

- исследование и сравнительный анализ реализуемых режимов запираания биполярных переключателей на примере интегрального тиристора с внешним полевым управлением и доминирующих механизмов ограничения ОБР в каждом из режимов.

Научная новизна работы обусловлена созданием оригинального комплекса теоретических моделей механизмов электрической перегрузки биполярных переключателей, приводящей к аварийной локализации тока на стадии выключения по затвору. В этих моделях впервые согласованно учтены два нелинейных эффекта: зависимость инжекционной электронной составляющей тока в полевом домене от экстракционной дырочной компоненты через локальное смещение катодного эмиттера и возникновение генерационного электронного тока в приколлекторном слое лавинного умножения. В совокупности оба этих эффекта играют критическую роль в развитии опасных локализаций тока в процессе выключения.

В диссертационной работе впервые проведена классификация аварийных сценариев запираания в интегральных приборных структурах с конструктивными и технологическими несовершенствами различных масштабов на основе разработанной обобщенной аналитической модели. Установлены ограничения по предельному коммутируемому току в каскодном режиме запираания, вызванные ранее не наблюдавшимся эффектом взаимодействия ячеек через распределенный электрод катода и сильно зависящим от пространственного масштаба конструктивной неоднородности.

Научная и практическая значимость. С использованием построенного в работе теоретического аппарата указаны пути повышения плотности коммутируемой мощности и рабочей частоты переключения путем выбора приборных структур, предусматривающих выведение основных носителей из базы при выключении по затвору. Разработана методология нахождения количественных границ ОБР биполярного переключателя с различными типами несовершенств приборной структуры. Выполнено исследование эффектов динамической локализации тока в условиях лавинного пробоя и регенеративного отпираания управляемого эмиттера, на основании результатов которого обоснованы практические рекомендации по выбору режима управления затвором интегрального тиристора. С помощью разработанного расчетно-теоретического базиса оценена эффективность методов повышения коммутируемого тока тиристорных чипов и нового класса силовых переключающих модулей на их основе.

Расчеты статических и динамических характеристик встречно-параллельного диода в силовом модуле и нахождение ограничений по коммутируемому току интегрального тиристорного чипа были использованы при подготовке производства силовых полупроводниковых модулей с полевым управлением в ЗАО «ВЗПП-Микрон» (г. Воронеж) и могут применяться также на других предприятиях электронной промышленности. Результаты соответст-

вующих разделов диссертационной работы вошли в научно-технические отчеты по НИОКР, выполненной в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А. Ф. Иоффе) в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы».

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Область безопасной работы биполярного переключателя по отношению к началу динамического лавинного пробоя имеет наиболее широкие границы по коммутируемому току для таких структур с буферными слоями, при выключении которых из слаболегированной базы экстрагируются основные носители с меньшими коэффициентами ударной ионизации.
2. В структурах с буферными слоями, выключаемых в условиях экстракции основных носителей из слаболегированной базы, величина переходных тепловых потерь ниже по сравнению со структурами, выключаемыми в условиях экстракции неосновных носителей. Относительное различие плотности энергии потерь для указанных типов приборных структур возрастает с увеличением легирования базы.
3. Эффекты перераспределения и локализации тока в пространственно-неоднородной структуре биполярного переключателя с технологическим разбросом параметров могут быть адекватно описаны путем представления ее в виде связанных по напряжению подсистем неодинаковой рабочей площади с различающимися параметрами управляемых ячеек и их электрических связей с внешними выводами интегрального чипа.
4. Ограничение области безопасной работы интегрального тиристора с неидеально-идентичными управляемыми ячейками, запираемого путем шунтирования эмиттеров по внешней управляющей цепи, определяется:
 - 4.1. Со стороны низких напряжений – невозможностью перевода всех управляемых ячеек в режим отсечки инжекции непосредственно в момент включения шунтирующей цепи;
 - 4.2. Со стороны высоких напряжений – эффектом регенеративного включения катодного эмиттера малой группы управляемых ячеек, инициируемым в процессе ее запираения в условиях динамического лавинного пробоя.
5. Для безопасной реализации каскодного режима выключения интегрального тиристора величина обратного смещения управляемого эмиттерного перехода в подсистеме с наибольшей рабочей площадью, определяемая эффективным сопротивлением распределенных электродов затвора и масштабным фактором отношения площадей подсистем, не должна достигать напряжения пробоя этого перехода.

Апробация работы. Результаты исследований, составляющих основу диссертационной работы, докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: международной зимней школе ФТИ им. А. Ф. Иоффе по физике полупроводников (Зеленогорск, С.-Петербург, Россия, 2009 г.), Международной конференции-семинаре по микро- и нанотехнологиям и электронным приборам EDM'2011 (Эрлагол, республика Алтай, Россия, 2011 г.), Международной научно-практической конференции «XL Неделя науки СПбГПУ» (С.-Петербург, Россия, 2011 г.), XIX Уральской международной зимней школе по физике полупроводников UIWSPS-2012 (Екатеринбург – Новоуральск, Россия, 2012 г.), а также на конкурсе научных работ Отделения твердотельной электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе (2010 г.) и научных семинарах в Санкт-петербургском государственном политехническом университете и Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в шести публикациях, в том числе, в пяти статьях в журналах из утвержденного ВАК Минобрнауки России Перечня российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, а также в одном сборнике трудов международной конференции.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем работы составляет 175 страниц текста, включая 73 рисунка, 6 таблиц и библиографический список из 132 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность направления и темы выполненных исследований, сформулированы цель и основные задачи работы, показаны научная новизна, научная и практическая значимость полученных результатов, приведены научные положения, выносимые на защиту, перечислены основные публикации автора по теме работы.

Первая глава работы посвящена обзору литературы по теме диссертации, уточнению задач исследования и планированию работы по их решению. Современные интегральные биполярные переключающие приборы [4*], такие как биполярные транзисторы с изолированными затворами, тиристоры с МДП-затворами и запираемые тиристоры различных конструкций, объединены в общий класс БПМЗ (§ 1.1) на основе выявленных универсальных механизмов управления проводимостью во всех перечисленных типах приборов. Структура управляемой ячейки БПМЗ содержит биполярную часть транзисторного или тиристорного типов и примыкающий к ней затвор, управляющий токами ин-

жекции электронов I_C и экстракции дырок I_G и, тем самым, инжекционной модуляцией проводимости биполярной части прибора. Сделанное обобщение предполагает и проводимый далее анализ фундаментальных ограничений ОБР (§ 1.2), свойственных всем представителям класса БПМЗ с последующим более детальным рассмотрением интересующих частных случаев [1*,5*]. Значительное внимание при этом уделено неустойчивому поведению инжекционных систем (§ 1.3) и неоднородностям концентраций носителей и плотности тока (вызванных статистическим поперечным разбросом параметров структур, дискретностью управляющей подсистемы и неоднородностями ее управляющих воздействий), способных развиваться в опасные локализации тока и тепла.

В § 1.4 рассмотрены и критически оценены результаты исследований по проблеме ДЛП (см. ссылки в [4*]), полученные на основе упрощенных моделей (позволяющих, например, аналитически оценить [1*,6*] величину P_{\max} , ограниченную началом пробоя), численных и натуральных экспериментов [7*]. Изложена общая схема организации полномасштабного численного эксперимента (§ 1.5) на основе иерархии уравнений: от фундаментальной системы для потенциала и концентраций носителей в геометрии реальной структуры до уравнений, моделирующих работу прибора в конкретной цепи. В диссертации рассматриваются случаи простейшей цепи с омической нагрузкой и эквивалентной схемы инвертора с индуктивной нагрузкой.

В конце главы отмечены недостатки численного моделирования как самостоятельного инструмента решения задач данной работы и необходимость коренного совершенствования расчетно-теоретического базиса мощной полупроводниковой электроники. План последовательного решения поставленных во введении задач (§ 1.6), основанного на новых обобщенных аналитических моделях и численных расчетах, завершает первую главу диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию переходных процессов в БПМЗ на основе одномерных аналитических моделей.

Эффект динамического пробоя обуславливает фундаментальное физическое ограничение по коммутируемому току и мощности для всех инжекционных приборов – БПМЗ и диодов. На начальной стадии пробоя, когда генерируемые при лавинном умножении заряды еще малы на фоне суммы зарядов ионов примеси в базе и носителей, выводимых током экстракции, уже возможно развитие быстронарастающих опасных отклонений [7*] от однородного распределения тока. Сформулированный в § 2.1 критерий начала ДЛП позволил установить приближенные количественные ориентиры в отношении границ ОБР. Он представляет собой условие перехода от убывания со временем суммарной (включающей и лавинную составляющую) плотности тока J_Σ в плоскости максимального поля к ее возрастанию в некоторый момент времени на стадии выключения по затвору. Вычисление величины J_Σ производилось с помощью уравнения Пуассона для области объемного заряда (ООЗ) в приближении

насыщенного дрейфа и интегральных представлений для генерационных компонент токов электронов и дырок. Таким образом, без решения двумерной нестационарной задачи стало возможным находить критические комбинации начальной плотности тока $J^{(0)}$ и блокируемого напряжения источника U_{st} , соответствующие вхождению в динамический пробой для четырех возможных вариантов построения многослойных структур биполярных переключателей по типу проводимости слаболегированной базы и расположению затвора. Установлено, что для концентраций легирования базы $N_0 > 4,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ варианты кремниевых структур, в которых при выключении экстрагируются неосновные носители, характеризуются меньшей величиной P_{\max} , чем те, где экстрагируются основные носители. Так, при $N_0 = 2,25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в случае экстракции электронов из p_0 -базы P_{\max} составляет $\sim 100 \text{ кВт/см}^2$ (при экстракции дырок из n_0 -базы это значение возрастает до 290 кВт/см^2). Однако при реализации условий экстракции основных носителей предел P_{\max} значительно увеличивается, в частности, для $p^+ - n - n_0 - p - n^+$ -структуры с анодным затвором при легировании $2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ $P_{\max} \sim 810 \text{ кВт/см}^2$, а для $p^+ - n - p_0 - p - n^+$ -структуры при том же легировании – 980 кВт/см^2 . При сравнимых концентрациях подвижных носителей и легирующей примеси в базе условие начала пробоя сильно зависит от типа носителей (основные или неосновные). При снижении N_0 доминирующим в определении границ ОБР становится соотношение коэффициентов ударной ионизации [8*]. Для кремниевых структур наибольший критический ток – в варианте с экстракцией дырок из p_0 -базы, а для карбид-кремниевых (4H-SiC) – в варианте экстракции электронов, независимо от того, выступают ли они основными или неосновными носителями.

В § 2.2 построена обобщенная аналитическая одномерная нестационарная модель обратного восстановления биполярных переключателей класса БПМЗ в условиях биполярного состава тока в ООЗ (с вкладами экстрагируемых дырок, а также электронов благодаря ударной ионизации и инжекции) и ненасыщенного дрейфа носителей при различных соотношениях концентраций связанных и свободных зарядов обоих знаков. Данная модель является базовой для дальнейшего исследования переходных процессов в отношении динамических потерь и описания эффектов динамической локализации (ДЛ) тока в следующей главе работы. Состояние прямой проводимости биполярного переключателя, задающее начальные условия для нестационарной задачи выключения, рассчитано предварительно в рамках одномерной модели двойной инжекции.

Исследованию возможности повышения рабочей частоты биполярных переключающих приборов посвящен § 2.3. Предлагаемое решение состоит в замене типа проводимости слаболегированной базы так, чтобы при выключении из нее через затвор выводились основные носители. Данное предложение обосновано количественным расчетом энергии переходных потерь за операцию выключения и предельной рабочей частоты (рис. 1) для двух вариантов кремни-

евых структур – стандартной $n^+p-n_0-n'-p^+$ с катодным затвором и с альтернативной $n^+-p'-p_0-n-p^+$ с анодным затвором. Наиболее сильное различие потерь имеет место при высоком уровне легирования N_0 . В частности, для прибора с легированием $N_0 = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (рассчитанного на напряжение $U_{st} = 5 \text{ кВ}$) потери за одну операцию при смене легирования базы с n - на p -тип снижаются с 200 до 90 мДж/см², а рабочая частота переключения f_{\max} соответственно повышается с 0,5 кГц (кривая 3) до 1,0 кГц (кривая 3'). При усилении легирования до $N_0 = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (со снижением U_{st} до 2 кВ) частота f_{\max} увеличивается с 1,75 до 4,5 кГц. Дополнительное преимущество альтернативной структуры по сравнению с исходной, следующее из выполненного выше сравнительного анализа условий начала ДЛП, состоит в расширении границ ОБР по коммутируемому току.

Основными задачами **третьей главы** диссертации являются построение обобщенной теоретической модели процесса неоднородного запирания биполярного переключателя с технологическими и конструктивными несовершенствами структуры, исследование механизмов ДЛ тока в ней и нахождение ограничений ОБР по коммутируемому току. После формулировки в § 3.1 этих задач обсуждаются существующие экспериментальные методы обнаружения и наблюдения ДЛ тока, отмечается их ограниченная применимость к современным приборам типа БПМЗ, после чего приводятся экспериментальные переходные характеристики (§ 3.2) выключения интегрального тиристорного чипа [5*] с внешним полевым управлением – ключевого компонента разрабатываемого в ФТИ им. А. Ф. Иоффе нового типа силового переключающего модуля. Данные соответствуют двум начальным токам ($J^{(0)} = 144$ и 156 А/см^2) при одном и том же рабочем напряжении (1,5 кВ) в схеме с омической нагрузкой и характеризуют два качественно различных случая – полное запираение всех тиристорных ячеек чипа при шунтировании их эмиттерных элементов внешним сильноточным МДП-транзистором и инициированное конструктивной неоднородностью системы возникновение ДЛ тока на малом участке рабочей площади чипа, приводящее к его разрушению и выходу из строя. Результаты этих экспериментов и выполнявшихся ранее численных расчетов [1*, 7*] мотивируют постановку теоретической задачи о неоднородном запираении тока в распределенно-

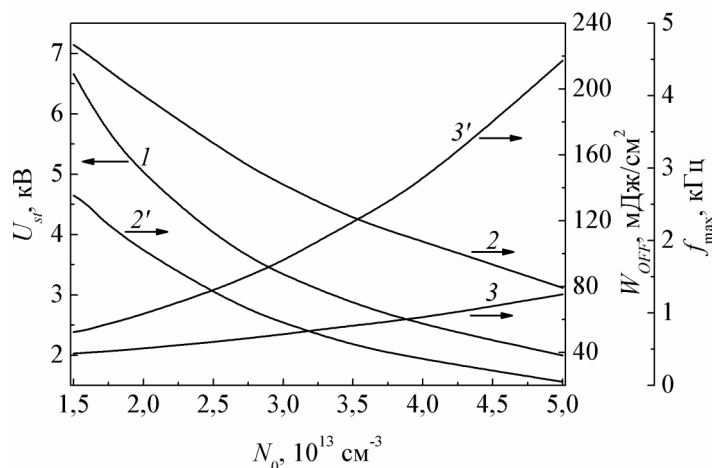


Рис. 1 — Блокируемое напряжение U_{st} (1), плотность потерь за операцию выключения W_{OFF} (2, 2') и рабочая частота f_{\max} (3, 3') в зависимости от концентрации N_0 и типа легирования базы (2, 3 для n -типа, 2', 3' для p -типа)

управляемой структуре БПМЗ (§ 3.3). Рассмотрена иерархия (п. 3.3.1) физических масштабов в реальных приборных структурах и сформулировано представление всего ансамбля управляемых ячеек интегрального чипа в виде нескольких конкурирующих групп – подсистем – ячеек, в пределах каждой группы считаемых идентичными по своим технологическим параметрам и геометрическим размерам. Эти подсистемы содержат различные количества ячеек и отличаются друг от друга:

- технологическими параметрами, т. е. временами жизни носителей, толщинами слоев и концентрациями примесей в них,
- параметрами электрических связей ячеек с выводами интегрального чипа как целого.

Для приближенного количественного рассмотрения эффектов локализации тока в неидеальной структуре переключателя разбиение всего ансамбля ячеек (полное их число $\sim 10^5$) выполнялось на две подсистемы – основную S_0 и «возмущенную» S' (рис. 2, на вставке) с числом ячеек N_1 и рабочей площадью A_1 , в N раз меньшими соответствующих величин для S_0 . При таком разбиении малая подсистема моделировала группу ячеек с наибольшими отклонениями параметров от своих средних значений. Порядок величины отношения площадей подсистем, или масштабного фактора N , определяется типом и происхождением неоднородности (разброс времен жизни, инжектирующих способностей эмиттеров, неравные сопротивления участков распределенного затвора и т. д.) и в данной работе задавался в пределах $1 \leq N \leq 10^4$. Предварительный качественный анализ фазовых траекторий процессов переключения параллельно соединенных бистабильных подсистем проведен в п. 3.3.2.

Основные соотношения разработанной аналитической модели неоднородного запирающего тока приводятся в § 3.4. Сначала рассмотрено включенное состояние (п. 3.4.1) двух параллельных групп ячеек S_0 и S' и получена нелинейная система из 6 уравнений относительно плотностей анодного тока $J_{0,1}^{(0)}$ и параметров распределений плазмы $p_{0,1}^{(0)}(y)$ в них при заданном полном токе $I_A^{(0)}$. Уравнения из § 2.2, описывающие динамику процесса выключения в каждой из подсистем, дополнены условием равенства их напряжений анод-катод, а также

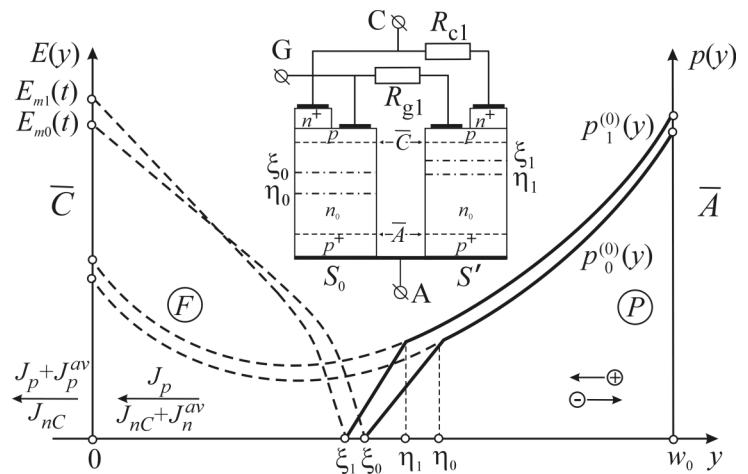


Рис. 2 — Распределения электрического поля и концентраций плазмы и биполярный состав токов в n_0 -базах управляемых ячеек подсистем S_0 и S' (на вставке) на стадии запирающего

соотношением $I_A = A_\Sigma (NJ_0 + J_1) / (N + 1)$ для мгновенных плотностей токов $J_{0,1}$ и интегрального анодного тока всего чипа. Эволюция распределений поля и плазмы и состав токов показаны на рис. 2, где нижние индексы 0 и 1 обозначают соответственно подсистемы чипа S_0 и S' .

Полная система уравнений модели включает:

- связи плотности тока $J(t)$ с напряжением анод-катод $U_A(t)$ и текущим положением границы $\xi(t)$ полевого домена F , выраженные в параметрической форме $\xi = \xi(J, E_m)$ и $U_A = U_A(J, E_m)$, где E_m – напряженность поля в плоскости коллектора;
- соотношение $J_{n\xi} = J_{nC} + J_n^{av} = \alpha_1 J_C (U_{n^+-p}) + J^{av}$ для плотности электронного тока в F с инжекционной J_{nC} и лавинной J_n^{av} компонентами, соответственно зависящими от смещения управляемого эмиттера U_{n^+-p} в данной подсистеме (здесь α_1 – коэффициент передачи по току катодного n^+-p-n -транзистора) и распределения поля $E(y)$ через ионизационный интеграл I^{av} ;
- уравнения $d\eta/dt = f(\eta, J, J_{n\xi}, dJ/dt, dJ_{n\xi}/dt)$ и $\eta - \xi = qD_h p^{(0)}(\eta) / (\gamma_n^d J - J_{n\xi})$, описывающие взаимосвязанное движение лидирующей $\eta(t)$ и отстающей $\xi(t)$ границ переходного слоя D между областями поля F и квазинейтральной плазмы P , распределение концентрации $p(y)$ в которой совпадает со стационарным профилем $p^{(0)}(y) = p_{\min} \text{ch}[(y - y_{\min}) / L_h]$ исходного проводящего состояния (здесь y_{\min} и p_{\min} – координата минимума распределения и минимальная концентрация, q – заряд электрона, D_h и L_h – коэффициент и длина амбиполярной диффузии в базе, γ_n^d – доля электронной дрейфовой компоненты тока в плазме);
- связи полного анодного тока I_A и напряжения U_A для конкретного типа цепи.

Соотношения компонент плотности тока на управляемой (катодной) границе слаболегированной базы для подсистем S_0 и S' в общем случае различны, как и локальные потенциалы их электродов катода и затвора. Связи этих потенциалов с токами электродов определяются конструкцией и режимом работы затвора (**п. 3.4.2**). Наибольшее внимание уделено случаю интегрального тиристора, управление инжекцией и экстракцией носителей во всех ячейках которого осуществляется внешним быстродействующим сильноточным МДП-транзистором. Этот случай интересен и с теоретической, и с практической точек зрения, поскольку он наглядно иллюстрирует взаимодействие подсистем ячеек через распределенные электроды катода и затвора и возможное динамическое перераспределение тока между ними.

Потенциалы контактов к p -базам V_{G0} , V_{G1} относительно общего вывода катода C , неодинаковые даже при условии идентичности параметров всех ячеек, содержат несколько вкладов – напряжения исток-сток на открытом МДП-транзисторе; падения на эффективном сопротивлении электрода затвора R_{g1} для малой подсистемы ячеек (см. рис. 2, на вставке) при протекании через него базового тока I_{G1} этой подсистемы; запирающего напряжения от внешнего источ-

ника $V_{ext} < 0$, подключаемого к затвору G. Локальные смещения эмиттерных $n^+ - p$ -переходов в каждой ячейке содержат также падения напряжения на p -базе при протекании по ней экстракционного тока. Полные смещения эмиттеров задают плотности инжекционных токов катодов в каждой подсистеме согласно формуле Шокли, в которую входят плотности токов насыщения для конкретных эмиттерных переходов.

В § 3.5 перечислены уравнения модели процесса выключения двух связанных подсистем (в общей сложности 12 уравнений – обыкновенных дифференциальных первого порядка и трансцендентных алгебраических) и приведены числовые значения всех параметров. Решение системы выполнялось по методу Ньютона с переменным шагом по времени.

Результаты применения построенной модели к конкретной структуре интегрального тиристора, запираемого посредством шунтирования катодных эмиттеров, представлены в § 3.6. Выбранные для расчетов параметры структуры со статическим блокируемым напряжением ~ 5 кВ соответствовали экспериментальным образцам. Для чипа с реальными размерами 7×7 мм дана оценка сопротивления $R_{g1} \approx 5$ мОм·см² (считалось, что периферийные ячейки занимают 10 % от всей рабочей площади чипа $A_{\Sigma} = 0,45$ см², таким образом, здесь $N \approx 10$; значение R_{g1} приведено к площади подсистемы S'). Рассчитанные переходные характеристики номинального режима работы прибора с идентичными ячейками для двух вариантов силовых схем представлены на рис. 3, а, б.

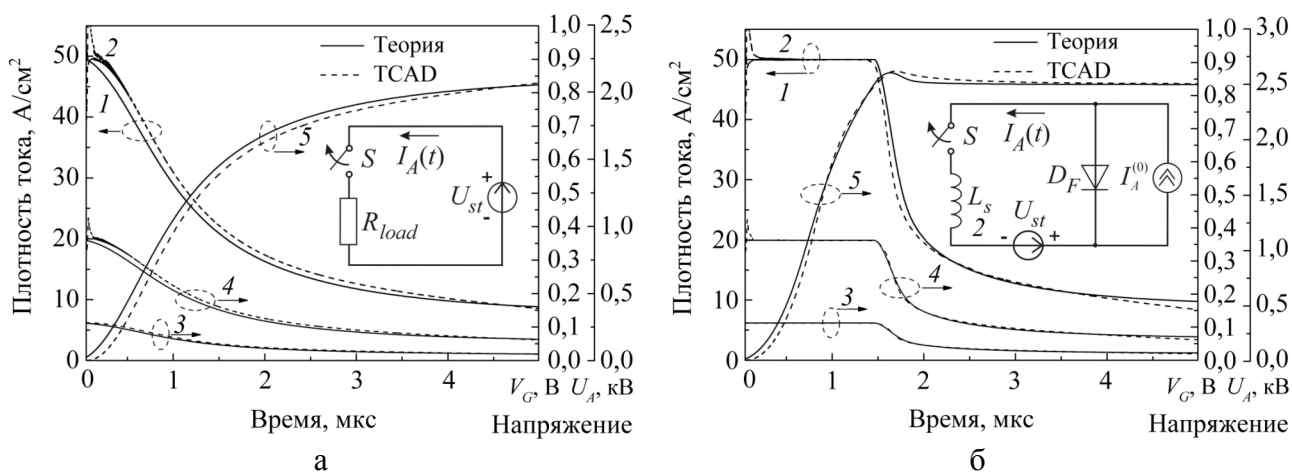


Рис. 3 — Плотности анодных токов (1, 2), напряжения на затворах (3, 4) двух подсистем ячеек и анодное напряжение (5) в номинальном режиме запираения (50 А/см², 2,5 кВ) для двух эквивалентных силовых схем (на вставках) – с омической нагрузкой (а) и инвертора с индуктивной нагрузкой (б)

При заданных параметрах структуры чипа механизм ограничения предельного коммутируемого тока в цепи с омической нагрузкой определяется обратной связью зависящей от локального смещения эмиттера инжекционной компоненты тока J_{nC} с током J_G выводимых через p -базу и цепь затвора дырок,

возникающей непосредственно после включения в момент $t = 0$ шунтирующей цепи G–C. Катодный эмиттер ячейки в малой подсистеме не может быть переведен в режим отсечки инжекции, если начальная плотность анодного тока превышает критическую величину J_{mcc} , и поэтому при $t = 0$ эмиттер в данной подсистеме не запирается, в отличие от основной подсистемы S_0 . В результате полный анодный ток прибора локализуется на малой площади подсистемы S' . При повышенном времени жизни носителей в малой подсистеме (относительный разброс $\Delta\tau_h/\tau_h = 10\%$) ограничение по коммутируемому току (рис. 4, а), как и в предыдущем случае, определяется условием одновременного достижения отсечки инжекции в обеих подсистемах в момент $t = 0$.

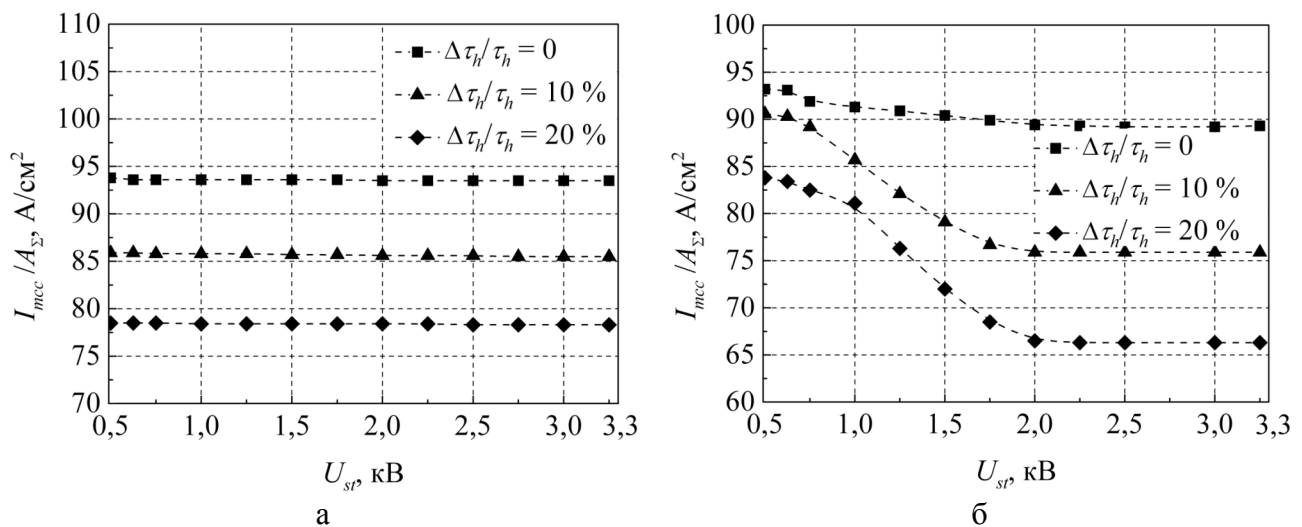


Рис. 4 — Границы ОБР при идентичных параметрах ячеек ($\Delta\tau_h/\tau_h = 0$) и при наличии разброса времен жизни между двумя подсистемами ячеек в 10 % и 20 % для двух эквивалентных силовых схем – с омической нагрузкой (а) и инвертора с индуктивной нагрузкой (б)

В случае цепи инвертора с индуктивной нагрузкой с теми же значениями тока и рабочего напряжения наблюдались иные, более сложные типы поведения исследуемой системы. Со стороны низких напряжений в ограничении ОБР преобладает тот же механизм обратной связи, что и в рассмотренном выше случае омической нагрузки, приводя к таким же значениям I_{mcc} . С увеличением рабочего напряжения (рис. 4, б) механизм изменяется. ДЛ тока происходит не непосредственно после начала запираания, а через время $\sim 0,5\text{--}1$ мкс, когда начинают проявляться эффекты динамического пробоя. В структуре, имеющей еще и разброс времен жизни (с фактором $N = 10$), неоднородность распределения тока, первоначально присутствовавшая благодаря повышенному времени жизни в S' на фоне средней величины $\tau_{h0} = 15$ мкс, в условиях ДЛП развивается в его локализацию. Она, в свою очередь, инициирует регенеративное включение инжекции электронов из катодного эмиттера подсистемы S' и потерю управления ею по затвору. Этот механизм и приводит к заметному падению I_{mcc} с ростом напряжения в интервале $0,75\text{ кВ} < U_{st} < 2,5\text{ кВ}$.

Четвертая глава диссертации посвящена численному моделированию эффектов электрической перегрузки биполярных переключателей. Моделирование осуществлялось с помощью программных пакетов ATLAS [9*] и Sentaurus Device [10*] с имитационным уровнем описания всей совокупности электрофизических процессов в полупроводниковой структуре (в том числе, при высоких концентрациях носителей и примесных центров, в сильных электрических полях) и электрических связей прибора с элементами внешней цепи. Структуры управляемых ячеек в каждой из подсистем описаны технологически заданными двумерными распределениями концентраций легирующих примесей. Подробно описана постановка задачи (§ 4.1) расчета стационарных состояний, процессов включения и выключения на примере интегрального тиристора для обоих рассматриваемых в работе вариантов силовой цепи. В варианте цепи инвертора с индуктивной нагрузкой исследовалось функционирование тиристора совместно с быстродействующим встречно-параллельным диодом. При оптимизации его статических и динамических характеристик показано (§ 4.2), что диод с высоким легированием анодного и катодного эмиттеров не может использоваться в схеме преобразователя напряжения с широтно-импульсной модуляцией из-за большого времени восстановления (при больших временах жизни τ_h) и резкого обрыва тока (при малых τ_h). Обоснована необходимость уменьшения концентрации инжектированной плазмы у анода, например, путем снижения инжектирующей способности анодного эмиттера (уровень легирования p' -слоя у поверхности структуры кремниевого диода должен составлять $5 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$). Для обеспечения «мягкости» процесса восстановления, наибольшего быстродействия и в то же время минимизации суммарных энергетических потерь значение τ_h в базе может выбираться в диапазоне 6–9 мкс.

Способы управления затвором сильно влияют на физическую картину транспортных процессов в полупроводниковых структурах ячеек, а значит, и на выходные характеристики прибора в целом. Сравнительному анализу ограничений ОБР по коммутируемому току для трех возможных режимов запираания интегрального тиристора с учетом конечных сопротивлений распределенных электродов затвора посвящен § 4.3. При шунтировании эмиттеров по внешней цепи возможно перераспределение тока по структуре и его локализация в группе периферийных ячеек (с более высокими последовательными сопротивлениями шунтирующей цепи) с выходом прибора из строя. В режиме с внешним источником запирающего напряжения V_{ext} прикладываемое к эмиттерному переходу обратное смещение должно быть ниже напряжения его лавинного пробоя ($\sim 10-20 \text{ В}$). Для обеспечения однородной модуляции проводимости во всем чипе необходимо, чтобы локальное смещение эмиттера при протекании тока по каналу экстракции ни в одной ячейке не достигало напряжения отсечки инжекции. При исследовании каскадного режима запираания (в котором полный ток катода прерывается МДП-ключом и коммутируется в шунтирующую цепь

затвора) выявлена существенная роль взаимодействия ячеек через распределенный электрод катода, отсоединенный от внешней цепи и находящийся под «плавающим» потенциалом. Обнаружена возможность локализации тока при значительно меньшем последовательном сопротивлении R_{g1} (соответствующем падению напряжения 20–25 мВ при протекании тока $J_1^{(0)}A_1$ по цепи затвора подсистемы S'), по сравнению с режимом шунтирования эмиттеров. Степень локализации тока и переходных тепловых потерь снижается при уменьшении отношения площадей подсистем N .

Предельные значения плотностей выключаемого тока, определяемые свойствами затвора и режимом запираания, для случая цепи с омической нагрузкой представлены в таблице для двух значений напряжения источника U_{st} .

U_{st} , кВ	J_{mcc} , А/см ²		
	Шунтирование эмиттеров	Отрицательное запирающее напряжение	Каскодное выключение
3,0	80	1050	950
1,5	80	1160	1040

При плотностях тока в сотни А/см² становится выраженным вклад ударной ионизации в балансе токов в области F и возникают ДЛ тока [7*] в условиях развитого лавинного пробоя, отсутствовавшие при выключении омической нагрузки при $J^{(0)} = 50$ А/см² и $U_{st} = 2,5$ кВ. Влияние динамического пробоя ослабляется при сниженном напряжении ($U_{st} = 1,5$ кВ). Найденные величины J_{mcc} характеризуют возможность безопасного выключения токов, значительно превышающих номинальное значение. Запас по току, отсутствующий в режиме управляемого шунтирования эмиттеров, в двух альтернативных режимах составляет приблизительно 1 порядок величины. При этом в каскодном режиме не требуется дополнительный источник напряжения и, кроме того, реализуются насыщающиеся прямые выходные характеристики (что существенно с точки зрения защиты от последствий коротких замыканий).

Разработанный в главе 3 аппарат обеспечивает хорошее количественное согласование результатов с данными имитационного моделирования (кривые «Теория» и «TCAD» на рис. 3, а, б). Теория адекватно предсказывает все тенденции механизмов неоднородного запираания тока в интегральной структуре биполярного переключателя.

В **заключении** перечисляются основные результаты работы.

1. Проведен сравнительный анализ всевозможных вариантов структур биполярных переключателей с микрозатворами в отношении предельной коммутируемой мощности и границ ОБР, обусловленных входением в ДЛП на стадии выключения. Исследовано влияние соотношения типов затвора и экстрагируемых носителей и соотношения их коэффициентов ударной ионизации в струк-

турах на основе Si и 4H-SiC. Для кремния предельная плотность коммутируемой при выключении мощности может быть повышена в 10 раз в случае реализации экстракции основных носителей, и при том менее активных при ударной ионизации, по сравнению со случаем экстракции неосновных носителей. Для карбида кремния при таком выборе типа структуры P_{\max} достигает значений ~ 200 МВт/см², играющих роль верхнего теоретического предела плотности коммутируемой мощности по отношению к ДПП.

2. Построена обобщенная модель процесса запираания биполярного переключателя с распределенными микрозатворами с учетом биполярного состава тока в области объемного заряда с электронными вкладами токов ударной ионизации и инжекции.

3. Теоретически обоснован путь к снижению величины переходных потерь, основанный на переходе к альтернативной структуре с экстракцией основных носителей при выключении.

4. Предложена универсальная модель с аналитической постановкой задачи, объясняющая роли технологических и конструктивных несовершенств реальных структур в ограничении их ОБР. Установлены критерии регенеративного включения управляемых эмиттеров, возникновения динамического лавинного пробоя и других эффектов, сопровождающихся локализацией тока и способных привести к выходу прибора из строя.

5. Показаны пути повышения однородности модуляции проводимости в биполярных переключателях с большой рабочей площадью посредством компенсации влияния сопротивлений распределенных электродов для периферийных групп управляемых ячеек.

6. Исследованы статические и динамические характеристики быстродействующего встречно-параллельного диода, предназначенного для работы в инверторе напряжения.

7. Проанализированы номинальный рабочий и семейство аварийных сценариев выключения неидеального тиристорного микрочипа в трех режимах запираания – управляемом шунтировании эмиттеров внешним сильноточным МДП-транзистором, приложении отрицательного смещения к затвору от внешнего источника и каскодном прерывании тока катода.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях

1. А. В. Горбатюк, И. В. Грехов, Д. В. Гусин. Биполярные переключатели с распределенными микрозатворами. Условия вхождения в динамический пробой при выключении // ЖТФ. – 2009. – Т. 79. – Вып. 10. – С. 80–88.
2. А. В. Горбатюк, И. В. Грехов, Д. В. Гусин. Динамическая локализация тока при выключении мощных биполярных переключателей с микрозатворами // ФТП. – 2010. – Т. 44. – Вып. 11. – С. 1577–1583.

3. А. В. Горбатюк, И. В. Грехов, Д. В. Гусин. О возможности увеличения рабочей частоты мощных биполярных переключателей с распределенными микроразретами // Письма в ЖТФ. – 2010. – Т. 36. – Вып. 20. – С. 35–42.
4. А. В. Горбатюк, И. В. Грехов, Д. В. Гусин, Б. В. Иванов. Статические и динамические характеристики встречно-параллельного диода в составе переключающего силового модуля // Электротехника. – 2010. – В. 11. – С. 53–61.
5. А. В. Горбатюк, И. В. Грехов, Д. В. Гусин. Эффекты локализации тока в мощных биполярных переключателях с микроразретами при неидеальной связи управляемых элементов // ЖТФ. – 2012. – Т. 82. – Вып. 5. – С. 57–65.
6. D. V. Gusin, A. V. Gorbatyuk, and I. V. Grekhov. Dynamic current localization in power bipolar switches with imperfect interconnections of controlled cells // Proceedings of the 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011 (Erlagol, Russia, 2011). – ISBN 978-5-7782-1708-9. – P. 132–136.

Список цитируемой литературы

- 1* Y. Liu, B. You, and A. Q. Huang. Reverse-bias safe operation area of large area MCT and IGBT // Solid-State Electronics. – 2003. – Vol. 47. – P. 1–14.
- 2* X. Li, A. Q. Huang, and Y. Li. Analytical GTO turn-off model under snubberless turn-off condition // Microelectronics Journal. – 2003. – Vol. 34. – P. 297–304.
- 3* А. В. Горбатюк. Аналитическая модель запираемого тиристора с немонотонным отгеснением остаточной плазмы // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 5. – С. 54–62.
- 4* Semiconductor power devices: physics, characteristics, reliability / J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann [et al.]. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – 608 p.
- 5* И. В. Грехов, Т. Т. Мнацаканов, С. Н. Юрков [и др.]. Статические и динамические характеристики мощного интегрального тиристора с внешним полевым управлением // ЖТФ. – 2005. – Т. 75. – Вып. 7. – С. 80–87.
- 6* T. Ogura, H. Ninomiya, K. Sugiyama [et al.]. Turn-off switching analysis considering dynamic avalanche effect for low turn-off loss high-voltage IGBTs // IEEE Trans. Electron Devices. – 2004. – Vol. 51. – No. 4. – P. 629–635.
- 7* J. Oetjen, R. Jungblut, U. Kuhlmann [et al.]. Current filamentation in bipolar power devices during dynamic avalanche breakdown // Solid-State Electronics. – 2000. – Vol. 44. – P. 117–123.
- 8* T. Hatakeyama, T. Watanabe, T. Shinohe [et al.]. Impact ionization coefficients of 4H silicon carbide // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 85. – No. 8. – P. 1380–1382.
- 9* ATLAS User's Manual. Device simulation software. – SILVACO, Inc., 2010. – 1262 p.
- 10* Sentaurus Device User Guide. Ver. D-2010.03. – Synopsys, Inc., 2010. – 1328 p.