Николай Проскурин

Оптоэлектронные ИС: результаты макетирования, моделирования маломощных переключений элементов оптронов

Николай Проскурин

Оптоэлектронные ИС: результаты макетирования, моделирования маломощных переключений элементов оптронов

«Издательские решения»

Проскурин Н.

Оптоэлектронные ИС: результаты макетирования, моделирования маломощных переключений элементов оптронов /
Н. Проскурин — «Издательские решения»,

ISBN 978-5-00-532101-5

Приведены результаты макетирования схем оптоэлектронных переключателей, устройств на их основе, в маломощных режимах (значение токов СД оптронов на порядок меньше номинальных), что открывает возможность использовать дискретные оптроны СД-ФР, СД-ФТр. и СД-ФД. Перспективным оказались оптроны типа СД — p-i-n ФД (с ВЧ n-p-n транзистором). На макетах схем ОЛУ (кольцевой «ГИ», «R-S» триггер, др.) при модуляции СД в составе маломощных схем ОЛЭ nИЛИ-НЕ получены частоты переключения до 0,1… 0,25МГц.

ISBN 978-5-00-532101-5

© Проскурин Н.
© Издательские решения

Оптоэлектронные ИС: результаты макетирования, моделирования маломощных переключений элементов оптронов

Николай Проскурин

© Николай Проскурин, 2021

ISBN 978-5-0053-2101-5
Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

В память моих предков и замечательных родителей: отца – инженера, побудившего во мне интерес к науке, технике и матери – врачу, поддержавшей меня.

От автора: предисловие к книге 2.

Уважаемые читатели! Этот раздел издания является специализированным и основан на 2-й части адаптированных материалов диссертации автора[1], проведенных им в 2001—2003гг. расчетов и исследований вместе с его коллегами. Оно является продолжением исследования и (как 1-я книга издания[2]) предназначено специалистам и разработчикам в области цифровой оптоэлектроники и ОВЧ, УВЧ полупроводниковых устройств, др. для ознакомления с ее положениями, подходами, методиками и полученными промежуточными его результатами, которое проведено по классической методике: идея (а что будет, если…), изучение публикаций и фактов, выбор элементов и базовой схемы, ее макетирование, моделирование, анализ, выводы. Возможно оно заинтересует экспертов, исследователей, конструкторов и технологов, работающих с «железом» (hard) в перспективной ее области**:** создания оптоэлектронных цифровых устройств, логических элементов, переключателей на основе микромощных оптронов УВЧ диапазона, интегральных и гибридных схем (ИС) с оптическими связями на их базе, решения и проекты которых уже созданы (в т. ч. на базе WDM технологий), становясь альтернативой цифровым ИС в 21 веке.

Также она может быть полезной для студентов, магистрантов, соискателей и аспирантов технических ВУЗов соответствующих специальностей, интересующихся способами и подходами при создании микромощных оптоэлектронных цифровых и аналоговых устройств. Автор признает, что часть исходных данных, уровень примененных им микронных технологий, инструментарий и методики исследования могли устареть и/или измениться за прошедшее время, однако наблюдаемые им тенденции (trends) остались прежними: подтверждением этого м. б. концепты «Silicon Photonic», «On-Board Optics», «Photonics in Aerospace», «Photonic integral circuits», etc.; он также будет признателен экспертам, специалистам и разработчикам, кто выскажет конструктивные замечания и/или предложения, уточняющие, дополняющие и раскрывающие потенциал указанного направления развития оптоэлектронных цифровых ИС, компьютерных систем и сетей на их базе.

[1,2] Проскурін М. П. Мікропотужні оптоелектронні логічні елементи цифрових інтегральних схем на твердотільних світловипромінюючих і фотоелектричних пристроях. Автореферат на здобуття наукового ступеня к.т.н: спец. 05.27.01 «Твердотільна електроніка» / М.П.Проскурін, Одеса, ОНПУ, 2007- 20с.

Проскурин Н. П. Электронные и оптоэлектронные ИС, их характеристики: обзор преимуществ и недостатков (книга1), Е – из-во ridero.ru, 06—2020, ISBN 978-5-0051-2225-4, 60с.

Примененный перечень сокращений, аббревиатур в тексте приведен в начале книги 1. Нумерация разделов, формул, рисунков, литературных, информационных источников для книг 1,2,3,4 – сквозная; последние добавляются по мере появления ссылок на них.

Аннотация (книга 2). Приведены результаты макетирования схем оптоэлектронных переключателей (модуляторов, вентилей, др.) и устройств на их основе, в маломощных режимах (значение токов СД оптронов на порядок меньше номинальных). Показано, что это открывает возможность использовать все типы исследуемых дискретных оптронов (иное название – оптопара; англ. optocouple): СД-ФР, СД-ФТр. и СД-ФД. Оптопары типа СД-ФР в составе маломощных схем ОЛЭ и ОЛУ могут обеспечить переключение логических элементов на частотах до 0,1кГц. Оптопары типа СД-ФТр. обеспечивают устойчивое переключение в указанных режимах, но на более высоких частотах – до нескольких единиц кГц. Перспективным прибором для применения в составе маломощных ОЛЭ КИПТ по частотным характеристикам оказались дискретные оптопары типа СД – p-i-n ФД (с ВЧ n-p-n транзистором). На макетах схем ОЛУ типа кольцевой «ГИ», «R-S» триггер при модуляции СД в составе маломощных схем ОЛЭ n ИЛИ-НЕ получены частоты переключения до 0,1…0,25МГц. Исследования схем ОЛЭ КИПТ (макетирование на оптопарах АОР124Б1, АОТ101БС и 3ОД120А-1 с ВЧ транзистором КТ3102Е и моделирование электрических схем на оптопаре К249КП1) показало, что оптопары с внутренним усилением типа СД-ФТр. или СД- p-i-n ФД (с ВЧ n-p-n транзистором) обладают возможностью функционирования в мало- и микромощных режимах (мощность и токи потребления снижены на 1…2 порядка по сравнению с номинальными, соответственно) и адаптивностью (подстройкой режима ФП к мощности входных оптических ЦС) за счет выбора положения рабочей точки базы ФТр. на его ВАХ (как вариант – ВЧ n-p-n транзистор в схеме с p-i-n ФД). Это позволяет в адаптивных схемах ОЛЭ (в некоторых пределах) регулировать значения выходного сигнала усилителя-формирователя (УФ), обеспечивает подстройку его выходного тока I_K (повышения/снижения до требуемого уровня при снижении/повышении мощности входных оптических ЦС) для обеспечения устойчивости модуляции выходного СД в режиме «малого сигнала». Показано, что значение коэффициента передачи по току К оптопары (для таких схем ОЛЭ и ОЛУ) должно иметь величину более 1,1…1,5.

Указанное позволяет сделать вывод о возможности применения оптопар такого типа (с уменьшенными линейными размерами их ППС СД и ФП более чем на порядок и без изменения их физических свойств) в качестве рабочих устройств и узлов на основе мало- и микромощных адаптивных схем ОЛЭ, ОЛУ при обработке потоков оптических ЦС с частотой до 3…8МГц. Также полученные результаты указывают направление исследований, разработок микромощных оптопар для схем ОЛЭ КИПТ ОВЧ, УВЧ диапазонов с одновременным снижением их мощности потребления.

ОГЛАВЛЕНИЕ

2. МЕТОДИКА, ИНСТРУМЕНТАРИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛО- И МИКРОМОЩНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТОПАР В СХЕМАХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЕЙ

2.1. Оценка предложенных схем оптоэлектронной логики nИЛИ-НЕ

2.2. Особенности программных сред моделирования электронных схем

2.3. Методы физикотопологического проектирования и моделирования полупроводниковых структур

2.4. Исходные данные и результаты исследования переключения светодиодов в маломощных режимах при макетировании схем логических вентилей.

2.4.1. Исследование процессов переключения светодиодов и отклика фотоприемников на макетах маломощных схем модуляторов – инверторов

2.4.2. Анализ результатов макетирования маломощных оптоэлектронных логических схем на дискретной оптопаре ЗОД120А-1

2.5. Моделирование схем оптоэлектронных логических вентилей

2.5.1. Результаты моделирования электрических схем маломощных оптоэлектронных логических вентилей и устройств на модели оптопары К249КП1

2.5.2. Результаты моделирования мало-, микромощных логических вентилей, устройств на их основе на элементах оптопар с виртуальными параметрами.

2.6. Выводы по разделу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ (к книгам 1 и 2)

Приложение Б.

Б.1. Методика расчета схемы маломощного оптоэлектронного инвертора (ОИ) в составе макета кольцевого «генератора импульсов».

Б.2. Погрешности измерительной аппаратуры.

Б.3.Описание моделей приборов и схем на языке МАЭС-П.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ К КНИГЕ 2.

2. МЕТОДИКА, ИНСТРУМЕНТАРИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛО- И МИКРОМОЩНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТОПАР В СХЕМАХ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ВЕНТИЛЕЙ

2.1. Оценка предложенных схем оптоэлектронной логики nИЛИ-НЕ

В подразделе 1.4 рассмотрены оптоэлектронные схемы логики КИПТ базиса nИЛИ-НЕ с несколькими типами ФП и излучателем в виде СД. Предложенная схема «Оптический инвертор» [46] (точнее оптоэлектронный инвертор – ОИ) реализует функцию НЕ (1ИЛИ-НЕ), структурно совпадает с ОЛЭ КИПТ, но отличается конструкцией излучателя по патенту Франции[2)] (оптический усилитель на многослойной ППС типа ИЛ или ЛД с оптическим возбуждением).

2 Патент 2503394 МКИ G02 F3/00 (Франция), 1982. Коммутирующий элемент оптической коммутирующей матрицы и матрица на таких элементах.

Особенностью этой ППС является то, что излучение на длине волны λ_1 (мощности $P_{Вых.}$) происходит при наличии одновременно двух условий: наличия прямого тока $I_{Пр.}$ через p-n переход (при значении ≥ 80% величины тока его полного включения $I_{Вкл.}$) и вводе в ППС внешнего излучения мощностью $P_{Вх.}$ (на длине волны λ_1) опре-деленной малой мощности причем ($P_{Вых.}$> $P_{Вх.}$), что служит энергетической добавкой – оптической «накачкой» ППС. При изменении величины тока $I_{Вкл.}$ на единицы процентов за счет его шунтирования, ППС прекращает излучать, что использовано в решении ОИ [46]. Преимуществом схемы является малое значение мощности внешнего сигнала, способное обеспечить гашение излучения ППС. Недостатками – наличие опорного когерентного излучателя, сложность организации сети подводящих световодов к каждой ППС, высокие требования к постоянству уровня тока $I_{Вкл.}$ и оптической мощности на входе ППС и параметрам ИП.

Для устранения их предложена схема ОЛЭ типа ОИ [47]. Ее отличие в том, что излучатель ОИ выполнен на основе СД, работающего в маломощном режиме, ФП – на ФР, ФТ, ФД с УФ на транзисторе и к нему может быть подключен маломощный дополнительный источник питания (ДИП) для усиления адаптивных свойств ФП (влияние ДИП на работу ОЛЭ заключается в задании напряжения смещения относительно общего провода одного из выводов ФП, см. подр. 2.2). Схема ОИ приведена на рис.2.1а с ФП на основе ФР, ее преимущества перед

схемой ОИ [46] – излучатель на типовом СД, отсутствие жестких требований к значениям токов $I_{Вкл.\ СД}$, возможность использования ФП разных типов и применение ДИП в их цепи. Схемы адаптивного типа PROS [48] (рис.2.1б), PROCOS [49] сочетают в себе схему n ИЛИ-НЕ (базис Пирса) с адаптивными ФП и имеют расширенные функциональные возможности.

Преимуществами схемы ОЛЭ PROS перед схемой ОИ [46] являются: функциональное – охват ею минимального логического базиса (универсальность); схемотехническое – использование в схемах ОЛЭ nИЛИ-НЕ базового вывода ФТр., двойного переменного резистора для обеспечения адаптивности по входам (заданием тока смещения Б транзистора) и выходам (изменением тока излучения выходных СД1, СД2); наличие неинверсного оптического выхода – СД1. Это позволяет влиять на выбор режима ФП, адаптировать (подстраивать) его к изменяющимся значениям входной оптической мощности ЦС и управлять значением выходной оптической мощности СД на логическом выходе схемы ОЛЭ.

Недостатками схем ОЛЭ КИПТ [15,48,49] является их усложнение (увеличение количества элементов, связей) – общее количество элементов в устройствах растет пропорционально n – числу входных переменных. В схеме ОЛЭ nИЛИ-НЕ типа SUPROSTD [50] на n оптических входов (соединенных между собой по схеме У – образного оптического ответвителя) использован один ФП (функция «монтажного»» оптического ИЛИ на n входов, см. рис.2.1в). Это схемотехническое решение применимо в некоторых схемах ОЛЭ, при этом количество логических входов схемы равно n, логических выходов – один, количество ФП – один, общее количество элементов – три. Мало- и микромощные схемы nИЛИ-НЕ [47—50] в интегральном исполнении могут быть основой при создании ИС с оптическими связями.

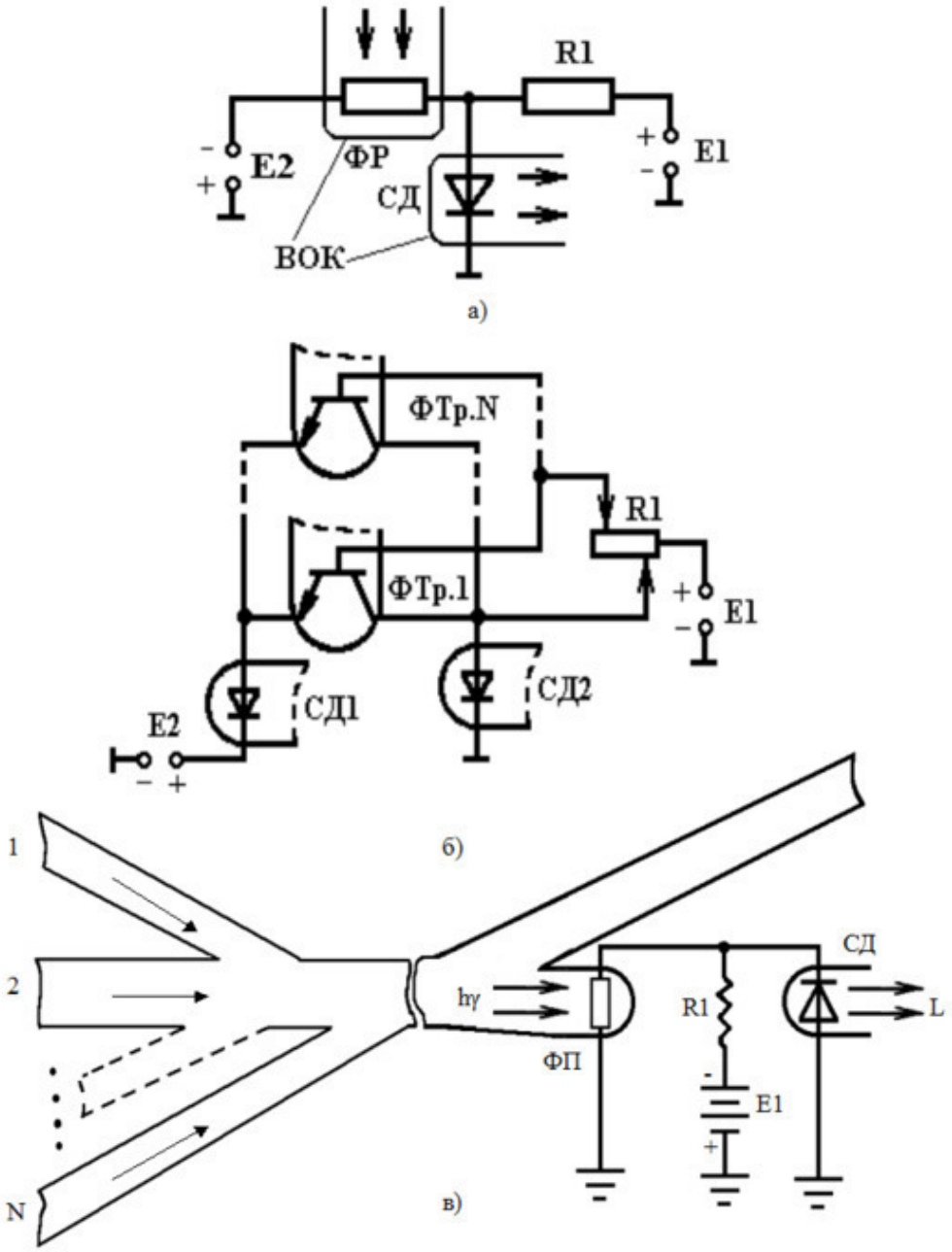

Рис.2.1 Эскизы предложенных электрических схем логических элементов: оптоэлектронного инвертора -а; базиса НИЛИ-НЕ адаптивного типа с расширенными функциональными возможностями -б; оптоэлектронного инвертора с функцией "монтажного ИЛИ" (1, 2…N - логические входы, L - логический выход) -в.

В следующем подразделе приведены характеристики программ моделирования – современного инструмента для изучения и разработки оптоэлектронных устройств.

2.2. Особенности программных сред для моделирования электронных схем

Автоматизированные системы управления технологическим проектированием устройств электронной техники получили широкое распространение [51—60]. Их применение связано с возможностями математически описать физические процессы (проходящие в схемах и устройствах на их основе) любой сложности на языке математических зависимостей, что позволяет с достаточной точностью проектировать и проводить исследование моделей. Преимуществами программных сред (ПС) схемотехнического моделирования типа Micro-CapV,

Electronics Work Bench-5.12 (EWB) [54,55] являются: адаптированный многооконный интерфейс пользователя, библиотека моделей (БМ) аналоговых и цифровых устройств (совместима с PSpice), интерфейс со стандартными приложениями (Windows). Программа EWB характеризуется дополнительной возможностью изменения параметров компонентов схем, отличается управлением точностью расчета, созданием отчетов моделирования, встраиваемые виртуальные приборы (для визуализации процессов – определения значений токов, напряжений, получения осциллограмм в узлах схем, др.). Это позволяет реализовать систему типа «рабочий стол» с качественным и количественным анализом ряда электронных схем при приемлемой точности моделирования. Указанные ПС применяются в качестве инструмента построения, моделирования (эмулирования) и демонстрации поведения несложных электронных схем, измерения и оценки полученных параметров в процессе обучения студентов электронных специальностей, что является их преимуществом. Недостатком их является невозможность ввода аналоговых, цифровых компонентов (диодов, транзисторов, оптопар, ИС, др.), отсутствующих в БМ – например, с расчетными параметрами.

Наибольшее развитие для разработки электронной аппаратуры на ПК в странах СНГ (наряду с отечественными разработками) получили ПС типа P-CAD, PSpice [56]. Они предназначены для решения следующих задач: графический ввод принципиальных схем, моделирование цифровых и аналоговых устройств, проектирование программируемых логических ИС, разработка печатных плат (размещение компонентов и трассировка печатных проводников) и др.. В 2001г. выпущена версия OrCAD 9.2, которая объединила ПС моделирования цифровых, аналоговых устройств и обеспечила их оптимизацию с графическим схемным редактором. В состав версии OrCAD 9.2 входят 10 программных модулей, информация о которых представлена в источнике [57]. Популярность ПС связана с развитыми функциями сервиса для проектирования, моделирования электронных схем, составления технической и проектной документации, развитием средств Internet для пополнения и информационной поддержки десятков тысяч математических моделей цифровых, аналоговых электронных устройств, входивших в базовый комплект. Каталоги БМ и корпусов компонентов пополняются моделями элементов, приборов, схем фирмами производителями (Analog Devices, Linear Technology, Siemens, Texas Instruments, др.), что обеспечивает выбор элементной базы, но связывает разработ-чика только с существующими моделями, а через них – с конкретными производителями электронных изделий. Недостатком указанных ПС являются закрытость внутренних параметров моделей, ограничение возможностей создания новых приборов на их основе, отсутствие инструмента моделирования электронных компонентов с расчетными параметрами [57]. Вопрос ввода расчетных параметров новых устройств в модель после их формализации (например, ввода характеристик ППС – СД и ФП микромощной оптопары ОВЧ диапазона) не решается на основе таких ПС. Причина – жесткая их связь с существующими БМ и закрытыми для пользователя описаниями в них моделей электронных элементов (в виде «черного ящика»), которые разрабатывает и пополняет за плату производитель электронного изделия.

Анализ имеющихся ПС указал на оригинальную отечественную разработку – ПС Моделирование Аналоговых Электронных Схем – МАЭС-П [58—61], особенности построения и применения которой позволяют: моделировать электрические схемы ОЛЭ, ОЛУ на основе модели оптопары К249КП1 (СД-ФТр.) из ее БМ, вводить в нее виртуальные и расчетные параметры их ППС. ПС МАЭС-П (см. п.2.5) предназначена для автоматизированного проектирования на IBM-PC устройств электронной техники, имеет БМ с десятками типов электронных приборов производства СНГ.

В следующем подразделе приведена оценка методов физикотопологического проектирования – инструмента для расчета ППС, указаны их достоинства и недостатки.

2.3. Методы физикотопологического проектирования и моделирования полупроводниковых структур

В настоящем пункте проведен анализ и выбор методов решения основных дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса НЗ в ППС [35—38] применительно к задаче расчета элементов ОВЧ оптопары.

Аналитические модели ВАХ ППС (модели: Молла-Росса для низкого уровня инжекции; Гуммеля-Пуна для высокого уровня инжекции; Эберста-Молла для режимов высоких плотностей тока) содержат обычно упрощающие предположения, которые ограничивают область применения каждой конкретной формулы моделей [35,62—64]. Использование упрощенных одномерных моделей ППС Эберса-Молла и соответствующих уравнений при расчетах их параметров для ФД следует проводить только после учета ряда дополнительных эффектов: расширение базы (Б), Оже- рекомбинации и др.. В транзисторной модели внимание уделяется процессу снижения коэффициента усиления по току h с увеличением плотности тока за счет увеличения рекомбинации в его Б. Для этого необходимо ввести в модель прямой и инверсный коэффициенты усиления по току (BETA, BETAИ) и их зависимость от частоты. Конечные соотношения для токов зависят от суперпозиции двух токовых составляющих, одна из которых связана с эмиттерным (Э-Б), а другая с коллекторным (Б-К) переходами в приложении Б. Описание моделей транзистора Эберса-Молла и Гуммеля-Пуна приведены на основе источников [35,62], причем количество параметров в последней возрастает вдвое, что несколько повышает точность расчета. С другой стороны, большинство аналитических моделей, применяющихся в схемотехническом моделировании, не связаны непосредственно с геометрией элементов ППС, что не позволяет определить частотные зависимости в схемах от их размеров. Перечисленные модели в большинстве своем не учитывают эффекты: сужение эмиттера (Э), расширение Б, модуляции при распределенном сопротивлении Б. Физическими эффектами, определяющими, например, снижение коэффициентов инжекции являются: рекомбинация НЗ в толстых слоях структуры (например, Б), через глубокие уровни в ЗЗ и за счет Оже – процессов (в сильно-легированных структурах), электронно – дырочное рассеяние, изменение параметров Si в сильнолегированных слоях ППС. Их учет полезен для оценки влияния различных геометрических, физических параметров на характеристики ППС при создании конструкций СД, ФП, ВЧ транзистора. Конечные формулы ВАХ ППС получены в результате разложения общих решений уравнений непрерывности в ряд по малому параметру [62]. Для практических расчетов характеристик многослойных ППС (с высокими плотностями тока J, малыми топологическими размерами и глубинами переходов) такие подходы не всегда приемлемы по причине узости границ применимости формул аналитических моделей. В них игнорируются некоторые эффекты, например, связанные с высокими плотностями тока в сильнолегированных ППС. С другой стороны, в ППС на основе Si, работающих на повышенных плотностях тока, кроме эффектов, описываемых взаимодействием НЗ с примесями, решеткой кристалла, существенными становятся эффекты, определяемые взаимодействием НЗ друг с другом. В результате вступает в действие дополнительный канал рекомбинации (за счет Оже – процессов), возникает эффект взаимного увлечения НЗ, который изменяет коэффициенты переноса, приводит к возникновению дополнительных членов в выражениях для токов электронов и дырок в ППС. Существенное значение играет эффект туннелирования НЗ, который становится возможен при концентрациях примеси выше 10^{19}см$^{-3}$ и очень малой ширине (менее 0,2мкм) p-n перехода. Большинство указанных эффектов в аналитических моделях не учитываются [13,35], поэтому расчет ППС необходимо вести с помощью методов, включающих учет большей части известных эффектов. Высокому соответствию происходящих в ППС физических процессов, отвечают методы численного моделирования (ЧМ), учитывающие указанные эффекты и позволяющие работать в широких пределах концентраций, плотностей токов, глубин и геометрических размеров [62—64]. Основой ЧМ является замена производных (частных решений дифферен-

циальных уравнений) отношениями конечных приращений; в результате система дифференциальное уравнений переходит в систему алгебраических уравнений (в случае линейного уравнения она оказывается линейной системой [65]), что позволяет получить числовые значения.

Моделирование ФП на основе Si также требует дополнительного учета оптических процессов (объемной скорости генерации – ОСГ, рекомбинации НЗ под действием излучения, учет типов поглощения, глубины проникновения, др.).

Моделирование приборов на основе GaAs является более сложной задачей (чем ППС на основе Si) из-за более сложной структуры и параметров материалов типа А3В5, их зависимости от способа изготовления [64]. Необходимо учитывать межзонную рекомбинацию, неравновесные и квантовые эффекты, связь между оптическими, оптоэлектронными процессами, процессами переноса НЗ.

Но аналитические методы не требуют специальных ПС, обеспечивают определенную точность расчета ППС с одним p-n переходом [13,17,31].

Исходя из анализа методов расчета ППС и с учетом приведенных рассуждений, расчет электрических параметров излучателя ОВЧ оптопары (СД ИК диапазона, один p-n переход) предложено проводить аналитическим методом. Дополнительно возможно составление аналитической модели для расчета оптических параметров излучения СД (по методикам, изложенным в работе [31]).

Характеристики ФП (интегральная структура в виде многослойной ППС, состоящей из двух приборов: ФД и n-p-n транзистор, трех p-n переходов, см. рис.1.8б) предложено получить ЧМ в ПС «Исследование», применяемой для расчета ВЧ приборов по методикам, приведенным в работе [62]. Результат математического моделирования ППС p-i-n ФД и ВЧ n-p-n транзистора представляется в виде решения систем дифференциальных уравнений: Пуассона (описывает распределение потенциала) и непрерывности (описывающих поведение НЗ) и наборов статических, динамических ВАХ этих ППС. В источниках [13, 35—43, 62—64] приведены основные уравнения для расчета полупроводниковых приборов и методика их решения на примере расчета аналитической модели транзистора.

В следующем подразделе приведены исходные данные и результаты макетирования маломощных схем оптоэлектронных логических вентилей на оптопарах производства СНГ с тремя типами ФП.

2.4. Исходные данные и результаты исследования переключения светодиодов в маломощных режимах при макетировании схем логических вентилей

Задачами настоящего подраздела являются проверка функционирования схем ОЛЭ КИПТ типа ОИ, n ИЛИ-НЕ с узлами переключений СД, выполненными по схеме рис.1.10в (см. подр.1.5) на дискретных оптопарах типа СД-ФП и ОЛУ на их основе с возможностью использования маломощных режимов. Анализ узлов схем ОЛЭ показывает обязательное наличие в них элементов оптопар, разнесенных между входными, выходными логическими входами отдельно взятого ОЛЭ [15]. Схема ОЛУ состоит из нескольких ОЛЭ, соединенных между собой для реализации выходной функции Y (по аналогии со схемами цифровых устройств на известных типах логики [1—6]). Между собой две и более схемы ОЛЭ связаны оптически, что предполагает наличие одного излучателя и одного (или нескольких) ФП. Для подтверждения их работоспособности применим в электрических схемах ОЛЭ серийные оптопары (например, ИК диапазона) с несколькими типами ФП так, что выходной СД (являясь излучателем предыдущей схемы ОЛЭ) был оптически связан с логическим входом ФП последующей схемы ОЛЭ (см. рис. 1.10д,е, книга1). Оценим режимы работы СД по параметрам: величина тока $I_{СД}$ (напряжения $U_{СД}$), мощность потребления $P_{СД}$, частота переключения $f_{СД}$ и характеристики модуляции с учетом того, какая часть его ВАХ используется. ВАХ СД представлена на рис.1.8в, она соответствует ВАХ идеальных СД ИК диапазона и описывается выражением 2.1 [10, с.70], а с уче-

том падения напряжения на слаболегированной области базы СД, обладающей повышенным сопротивлением r (для реального СД) оно несколько меняется и имеет вид 2.2:

$$I_{СД} = I_{Нас.} \exp\left(eU_{Пр.}/kT - 1\right), \quad (2.1)$$

$$I_{СД} = I_{Нас.} \exp\left(\left(eU_{Пр.} - rI_{Нас.}\right)/kT - 1\right), \quad (2.2)$$

где: $I_{Нас.}$, $I_{СД}$ – токи насыщения обратной ВАХ и текущего в СД;
e – заряд электрона, $U_{Пр.}$ – напряжение прямого смещения СД;
k – постоянная Больцмана;
T – температура в градусах Кельвина;
r – сопротивление слаболегированной области базы СД.

Характерными особенностями ВАХ СД является две области, которые можно условно обозначить: 1 – значения тока $I_{СД}$ близкие к нулю (область большого значения дифференциального сопротивления $R_{Диф.\ СД} = \Delta U/\Delta I$); 2 – линейной зависимости $I_{СД}$ от $U_{СД}$ (область малого значения дифференциального сопротивления $R_{Диф.\ СД}$). Абсцисса перехода зон 1 в 2 соответствует значению порогового напряжения $U_{Пор.}$, при котором возможно его свечение. При анализе работы оптоэлектронной схемы ОИ (на оптопаре СД-ФП), используется упрощенное представление ВАХ СД – путем аппроксимации исходной ВАХ кусочно-линейной функцией [13, с.152], имеющей два участка а и б:

$I_{СД} = 0$ при $U \le U_{Пор.}$, (2.3.1)
$I_{СД} = tg\ b\ (U - U_{Пор.})$ при $U \ge U_{Пор,}$ (2.3.2)

где $tg\ b = \Delta I / \Delta U = 1 / R_{Диф.}$ – const при $U \ge U_{Пор.}$;

В известных устройствах с использованием оптопар типа излучатель – ФП (оптических линий связи, волстронов, элементарных оптопар) рабочая точка СД на их ВАХ обычно выбирается ближе к середине линейного участка 2 и носит название режима «большого сигнала». При проектировании оптоэлектронных устройств для ВОЛС это обусловлено характером требований к режиму функционирования – получением номинальной (или максимальной) мощности оптического излучения $P_{Изл.}$ и передачи ее по ВОК к удаленному ФП. Для оптопар типа

СД-ФП это связано со значением коэффициента передачи по току К, величина которого может уменьшаться при приближении к участку 1 [19,29]. Представляется интересным исследование модуляции СД, в котором включение (излучение) СД обеспечивается переводом его в зону 2 ВАХ, выключение – переводом его в зону 1 ВАХ (при близости к $U_{Пор.}$ в обоих случаях, см. рис.1.8в, раздел1, книга1) для реализации мало- и микромощных схем ОЛЭ КИПТ. Это обеспечивает определенные возможности и преимущества: близкий к единице коэффициент модуляции СД, ненасыщенные режимы включения и получения значений токов СД примерно на порядок менее номинальных для выбранных типов оптопар. При этом желательно добиться получения резкого изменения значения дифференциального сопротивления СД при достаточно малом изменении управляющего сигнала и емкости p-n перехода ($C_{p\text{-}n} \sim \Delta Q/\Delta U$). Эти условия соответствуют режиму «малого сигнала», который отличается повышенной частотой модуляции (примерно на порядок) по сравнению с режимом «большого сигнала». Его представляют в виде наложения на прямой ток СД $I_{Пр.\,СД0}$ (или напряжение $U_{Пр.\,СД0}$) значение прямого смещения – гармонического возмущения на частоте f [14, с.144]: $\Delta I_{Пр.\,СД0}$ ($\Delta U_{Пр.\,СД0}$) при $\Delta I_{Пр.\,СД0} / I_{Пр.\,СД0} << 1$ (рис.1.11б, подраздел1.4, книга1]. Если принять $I_{Пр.\,СД0} = I_{Пор.}$, то выражение 1.6 для тока (напряжения) $I_{Пр.\,СД}$ ($U_{Пр.\,СД}$) примет вид:

$$I_{Пр.СД}(t) = I_{Пор.} + \Delta I_{Пор.} \sin(2\pi \times f \times t) \quad \text{ИЛИ} \quad (2.4)$$

$$U_{Пр.СД}(t) = U_{Пор.} + \Delta U_{Пор.} \sin(2\pi \times f \times t)$$

где: $I_{Пор.}$ ($U_{Пор.}$) – значение порогового тока (напряжения) СД;

$\Delta I_{Пор.}$ ($\Delta U_{Пор.}$) – значение малого изменения прямого тока (напряжения) СД.

В схеме включения СД по рис.1.8а (книга1) значение $U_{Пр.\,СД0} = U_{Пор.}$ задано резистором $R_{Н1}$, а его величина определяется выражением $E - U_{Пор.} = R_{Н1} \cdot I_{Пр.\,СД}$. Напряжение питания Е должно иметь высокий коэффициент стабилизации (определяется режимом модуляции СД типа «малый сигнал» и повышенной чувствительностью к значениям $I_{Пор.}$, $\Delta I_{Пор.}$, рис.1.8в, книга1), что достигается применением прецизионных стабилизаторов [6, т.9, с.135]. Недостатком этого режима является разброс параметра $I_{Пор.}$ ($U_{Пор.}$) СД в регулярных структурах, что преодолевается улучшением их технологий.

В следующем подразделе приведены результаты исследования маломощного переключения СД в макетах схем ОЛЭ и ОЛУ на их основе.

2.4.1. Исследование процессов переключения светодиодов и отклика фотоприемников на макетах маломощных схем модуляторов – инверторов

Для исследований условий переключения выходного СД в схеме ОИ выбраны оптроны с тремя типами ФП: на основе фоторезистора (ФР), n-p-n фототранзистора (ФТр.) и фотодиода (ФД), в которых СД и ФП составляют оптопару – АОР124Б1 (СД-ФР), АОТ101БС (СД-ФТр. с «оборванной» Б) и АОД 120А-1 (СД- p-i-n ФД); параметры оптопар приведены в [29,30]. В состав схемы ОИ, приведенной на рис.2.1а входят: излучающий элемент СД, ФП в виде ФР, входной и выходной ВОК, сопротивление R1, задающее ток СД, основной, дополнительный источники питания (ОИП, ДИП) Е1, Е2. Целью исследования являлось изучение условий переключений выходных СД схемы ОИ (статика, динамика), исследование особенностей поведения ФП при малых значениях подводимой к ним оптической мощности, определение величины коэффициента К. Осуществлялись измерения и расчет параметров маломощного режима переключения СД, ФП в схемах типа ОИ (при напряжении ОИП Е1~ 3,75…5,0В) входной, выходной электрических (оптических) мощностей, коэффициента передачи по току К, построение АЧХ при сниженных значениях электрического тока СД (мощности потребления оптопары) на порядок меньше номинального. Методика расчета электрических элементов схемы маломощного оптоэлектронного инвертора (ОИ) приведена в приложении Б.1 (режим – статика).

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.