

Николай Проскурин

**Оптоэлектронные ИС:
результаты макетирования,
моделирования
маломощных переключений
элементов оптронов**

Николай Проскурин

Оптоэлектронные ИС: результаты макетирования, моделирования маломощных переключений элементов оптронов

*http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=63937611
ISBN 9785005321015*

Аннотация

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 – р-і-п 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 пИЛИ-НЕ получены частоты переключения до 0,1...0,25 МГц.

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 автора¹, проведенных им в 2001—2003 гг. расчетов и исследований вместе с его коллегами. Оно является продолжением исследования и (как 1-я книга издания²) 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 – р-і-п ФД (с ВЧ п-р-п транзистором). На макетах схем ОЛУ типа кольцевой «ГИ», «R-S» триггер при модуляции СД в составе маломощных схем ОЛЭ и ИЛИ-НЕ получены частоты переключения до 0,1...0,25МГц. Исследования схем ОЛЭ КИПТ (макетирование на оптопарах АОР124Б1, АОТ101БС и ЗОД120А-1 с ВЧ транзистором КТ3102Е и моделирование электрических схем на оптопаре К249КП1) показало, что оптопары с внутренним усилением типа СД-ФТр. или СД- р-і-п ФД (с ВЧ п-р-п 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 K 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...8 МГц. 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 ПЕ-

РЕКЛЮЧЕНИЯ 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 пере-
ключения светодиодов в маломощных режимах при макети-
ровании схем логических вентилях.

2.4.1. Исследование процессов переключения светодио-
дов 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 МА-ЭС-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 Франции²⁾ (оптический усилитель на многослой-

ной 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 $P_{\text{Вых.}}$) происходит при наличии одновременно двух условий: наличия прямого тока $I_{\text{пр.}}$ через р-п переход (при значении $\geq 80\%$ величины тока его полного включения $I_{\text{Вкл.}}$) и вводе в ППС внешнего излучения мощностью $P_{\text{Вх.}}$ (на длине волны λ_1) определенной малой мощности причем ($P_{\text{Вых.}} \gg P_{\text{Вх.}}$), что служит энергетической добавкой – оптической «накачкой» ППС. При изменении величины тока $I_{\text{Вкл.}}$ 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 $I_{\text{Вкл.}}$ 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 $I_{В.кл. СД}$, 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 пИЛИ-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 пИЛИ-НЕ [47—50] в интегральном исполнении могут быть основой при создании ИС с оптическими связями.

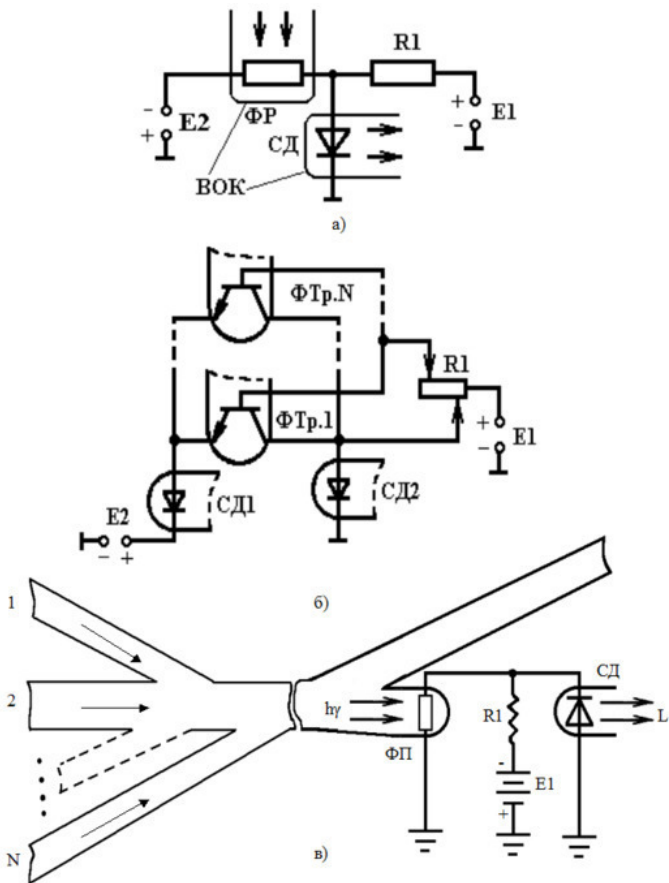


Рис.2.1 Эскизы предложенных электрических схем логических элементов: оптоэлектронного инвертора -а; базиса НИПИ-НЕ адаптивного типа с расширенными функциональными возможностями -б; оптоэлектронного инвертора с функцией "монтажного ИЛИ" (1, 2,...N - логические входы, L - логический выход) -в.

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 систе-

му 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, моделиро-

вания 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 разработчика 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 по-

строения 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 ($\beta_{\text{ЭТА}}$, $\beta_{\text{ЭТАИ}}$) 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), электрон-

но – 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 0,2 мкм) p-n перехода.

да. 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 дифференциальных уравнений) отношениями конечных приращений; в результате система дифференциальных 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 АЗВ5, 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 оптоэлек-

тронных 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 па-

раметрам: величина тока $I_{\text{СД}}$ (напряжения $U_{\text{СД}}$), мощность потребления $P_{\text{СД}}$, частота переключения $f_{\text{СД}}$ 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 учетом падения напряжения на слаболегированной области базы СД, обладающей повышенным сопротивлением r (для реального СД) оно несколько меняется и имеет вид 2.2:

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

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

где: $I_{\text{Нас.}}$, $I_{\text{СД}}$ – токи насыщения обратной ВАХ и текущего в СД;

e – заряд электрона, $U_{\text{Пр.}}$ – напряжение прямого смеще-

ния 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 $I_{\text{СД}}$ близкие к нулю (область большого значения дифференциального сопротивления $R_{\text{диф. СД}} = \Delta U / \Delta I$); 2 – линейной зависимости $I_{\text{СД}}$ от $U_{\text{СД}}$ (область малого значения дифференциального сопротивления $R_{\text{диф. СД}}$). Абсцисса перехода зон 1 в 2 соответствует значению порогового напряжения $U_{\text{Пор.}}$, 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:

$$I_{\text{СД}} = 0 \text{ при } U \leq U_{\text{Пор.}}, \quad (2.3.1)$$

$$I_{\text{СД}} = \text{tg } b (U - U_{\text{Пор.}}) \text{ при } U \geq U_{\text{Пор.}}, \quad (2.3.2)$$

где $\text{tg } b = \Delta I / \Delta U = 1 / R_{\text{диф.}} - \text{const}$ при $U \geq U_{\text{Пор.}}$;

В известных устройствах с использованием оптопар типа излучатель – ФП (оптических линий связи, волстронов, эле-

ментарных 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 $P_{\text{изл.}}$ и передачи ее по ВОК к удаленному ФП. Для оптопар типа СД-ФП это связано со значением коэффициента передачи по току K , 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 $U_{\text{Пор.}}$ 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 р-п перехода ($C_{\text{р-п}} \sim \Delta Q/\Delta U$). Эти условия соответствуют режиму «малого сигнала», который отличается повышенной частотой модуляции (примерно на порядок) по сравнению с режимом «большо-

го сигнала». Его представляют в виде наложения на прямой ток СД $I_{\text{Пр. СД0}}$ (или напряжение $U_{\text{Пр. СД0}}$) значение прямого смещения – гармонического возмущения на частоте f [14, с.144]: $\Delta I_{\text{Пр. СД0}}$ ($\Delta U_{\text{Пр. СД0}}$) при $\Delta I_{\text{Пр. СД0}} / I_{\text{Пр. СД0}} \ll 1$ (рис.1.11б, подраздел1.4, книга1]. Если принять $I_{\text{Пр. СД0}} = I_{\text{Пор.}}$, то выражение 1.6 для тока (напряжения) $I_{\text{Пр. СД}}$ ($U_{\text{Пр. СД}}$) примет вид:

$$\begin{aligned} I_{\text{Пр.СД}}(t) &= I_{\text{Пор.}} + \Delta I_{\text{Пор.}} \sin(2\pi \times f \times t) \\ U_{\text{Пр.СД}}(t) &= U_{\text{Пор.}} + \Delta U_{\text{Пор.}} \sin(2\pi \times f \times t) \end{aligned} \quad \text{III} \quad (2.4)$$

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

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

В схеме включения СД по рис.1.8а (книга1) значение $U_{\text{Пр. СД0}} = U_{\text{Пор.}}$ задано резистором $R_{\text{Н1}}$, а его величина определяется выражением $E - U_{\text{Пор.}} = R_{\text{Н1}} \cdot I_{\text{Пр. СД}}$. Напряжение питания E должно иметь высокий коэффициент стабилизации (определяется режимом модуляции СД типа «малый сигнал» и повышенной чувствительностью к значениям $I_{\text{Пор.}}$, $\Delta I_{\text{Пор.}}$, рис.1.8в, книга1), что достигается применением прецизионных стабилизаторов [6, т.9, с.135]. Недостатком этого режима является разброс параметра $I_{\text{Пор.}} (U_{\text{Пор.}})$ 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 светодиода (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 R_1 , задающее ток СД, основной, дополнительный источники питания (ОИП, ДИП) E_1 , E_2 . 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 K . Осуществлялись измерения и расчет параметров маломощного режима переключения СД, ФП в схемах типа ОИ (при напряжении ОИП $E_1 \sim 3,75 \dots 5,0\text{В}$) входной, выходной электрических (оптических) мощностей, коэффициента передачи по току K , 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.