

И.В. Писаренко, Е.А. Рындин

**ФОТОДЕТЕКТОР С УПРАВЛЯЕМОЙ ПЕРЕДИСЛОКАЦИЕЙ:
ДИФфуЗИОННО-ДРЕЙФОВАЯ МОДЕЛЬ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
В ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЯХ**

Ранее для реализации оптических межсоединений в интегральных схемах были предложены инжекционные лазеры с двойными $A^{III}B^V$ наногетероструктурами, выполняющие функции источников и модуляторов излучения. Чтобы преобразовать короткие оптические импульсы, генерируемые лазерами-модуляторами, в электрические сигналы, необходимы технологически совместимые фотодетекторы с субпикосекундным временем отклика. Поскольку традиционные конструкции фоточувствительных полупроводниковых приборов не удовлетворяют предъявляемым требованиям, разработан перспективный метод построения быстродействующих фотодетекторов на основе принципа управляемой передислокации максимумов плотности носителей заряда в специально организованных квантовых областях. Данные оптоэлектронные приборы содержат продольный фоточувствительный p-i-n переход и поперечную управляющую гетероструктуру, в которую входят слои, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах, и два управляющих перехода. До наступления среза оптического импульса фотодетектор работает аналогично классическому p-i-n фотодиоду. Поперечное электрическое поле включается только во время заднего фронта лазерного импульса и передислоцирует максимумы плотности электронов и дырок из области поглощения в области с низкой подвижностью и коротким временем жизни, в результате чего время отклика сокращается до субпикосекундной величины. В предыдущих исследованиях быстродействие рассматриваемого фотодетектора оценивалось с помощью квантово-механической комбинированной модели, которая не учитывала некоторые важные аспекты протекающих в нем физических процессов. В данной статье предложена двумерная нестационарная диффузионно-дрейфовая модель, позволяющая провести детальный анализ транспорта носителей заряда в структуре фотодетектора с управляемой передислокацией с точки зрения полуклассического подхода. Для реализации представленной модели разработаны методика конечно-разностного численного моделирования на основе явного метода и прикладные программные средства. Полученные результаты диффузионно-дрейфового моделирования выявили необходимость использования дифференциального принципа подключения для компенсации токов смещения в цепи питания прибора. С учетом данной особенности разработаны фотоприемная схема, обеспечивающая как формирование результирующего электрического сигнала, так и требуемый режим подачи управляющего напряжения на контакты фотодетектора, и драйвер для лазеров-модуляторов.

Оптические межсоединения в интегральных схемах; лазеры-модуляторы; фотодетектор с управляемой передислокацией; диффузионно-дрейфовое приближение; численная модель; фотоприемная схема; драйвер.

I.V. Pisarenko, E.A. Ryndin

**PHOTODETECTOR WITH CONTROLLED RELOCATION:
DRIFT-DIFFUSION MODEL AND APPLICATION IN OPTICAL
INTERCONNECTIONS**

Previously, we proposed an injection laser with a double $A^{III}B^V$ nanoheterostructure for the generation and modulation of light in optical interconnections for integrated circuits. To convert short optical pulses generated by the laser-modulator into electrical signals, a technologically compatible photodetector with subpicosecond response time is needed. Traditional designs of photosensitive semiconductor devices do not meet the specified requirements. Therefore, we developed a promising concept of a high-speed photodetector with controlled relocation of carrier density peaks within specially organized quantum regions. This optoelectronic device includes a longitudinal photosensitive p-i-n junction and a transverse control heterostructure, which contains

two low-temperature-grown layers and two control junctions. Before the trail of an optical pulse, the photodetector operates as a classical p-i-n photodiode. Transverse electric field is activated only during the back edge of a laser pulse. It relocates the peaks of electron and hole densities from the absorbing region to the regions with low carrier mobility and short lifetime. This process leads to the decrease in response time to a subpicosecond value. In our previous papers, we estimated the performance of the considered device using a quantum mechanical combined model that had not taken into account certain aspects of charge carrier transport in its structure. This paper is aimed at a proper semiclassical analysis of transients in the photodetector with controlled relocation by means of a two-dimensional drift-diffusion model. For the numerical implementation of the model, we develop a finite difference simulation technique based on the explicit method and applied software. According to the obtained results, it is reasonable to use the differential connection principle in order to compensate displacement currents in the supply circuit of the device. In view of this feature, we propose a circuit of optical receiver that provides the generation of resultant electrical signal as well as the required mode of the control voltage application to the photodetector contacts, and a driver circuit for the lasers-modulators.

Optical interconnections in integrated circuit; lasers-modulators; photodetector with controlled relocation; drift-diffusion approximation; numerical model; optical receiver circuit; driver circuit.

Введение. Физическое масштабирование транзисторов до нанометровых размеров и увеличение степени их интеграции на кристалле приводят к ухудшению характеристик металлических межэлементных соединений в интегральных схемах (ИС) [1, 2]. Оптоэлектронный подход к решению представленной проблемы предполагает замену отдельных металлических проводников с критическими параметрами (например, межъядерных соединений в многоядерных ИС) на конструктивно и технологически интегрированные системы оптической коммутации [3–5]. В рамках рассмотренного подхода разработаны инжекционные лазеры с двойными $A^{III}B^V$ наногетероструктурами, которые совмещают функции источников излучения и быстродействующих оптических модуляторов [6–8]. Для детектирования коротких лазерных импульсов, генерируемых лазерами-модуляторами, необходимы фотодетекторы с субпикосекундным временем отклика, которые могут быть монолитно интегрированы с другими элементами оптических межсоединений. Исследования, проведенные в работах [8, 9], показали, что стандартные конструкции интегральных фоточувствительных приборов не удовлетворяют предъявляемым требованиям. Поэтому был предложен перспективный метод построения фотодетекторов на основе принципа управляемой передислокации максимумов плотности носителей заряда в специально организованных квантовых областях [10], позволяющий существенно сократить длительность заднего фронта импульса фототока в цепи питания прибора [11, 12]. Разработка физикотопологических моделей нового типа фотодетектора для анализа протекающих в нем физических процессов представляет собой актуальную научную задачу.

Предложенная ранее квантово-механическая комбинированная модель фотодетектора с управляемой передислокацией (ФДУП) [11] основана на системе уравнений Шредингера-Пуассона и не учитывает влияние ряда полуклассических факторов (токи смещения, диффузию носителей заряда и двумерный характер их переноса), что требует реализации одной из численных моделей полуклассического подхода [13]. Поэтому первой целью данной статьи является разработка двумерной диффузионно-дрейфовой (ДД) модели ФДУП, а также соответствующих прикладных средств численного моделирования.

В интегральной системе оптической коммутации ФДУП функционирует в составе фотоприемной схемы, требования к которой сформулированы в данной работе на основе анализа результатов ДД моделирования ФДУП. В связи с этим вторая цель данной статьи – разработка принципов схемной реализации драйвера лазеров-модуляторов и фотоприемника на основе ФДУП, которые обеспечат создание оптических межсоединений с субпикосекундным временем отклика.

Диффузионно-дрейфовая модель. Как правило, полуклассическое моделирование транспорта носителей заряда в полупроводниковых приборах осуществляется в рамках ДД, квазигидродинамического (КГД) или гидродинамического (ГД) приближений [13]. Длительность переходных процессов в ФДУП на порядок меньше среднего времени релаксации энергии в материалах типа $A^{III}B^V$, поэтому запаздывание изменения подвижности носителей заряда относительно изменения электрического поля, описываемое КГД моделью, не оказывает существенного влияния на характеристики прибора, и зависимостью подвижности носителей заряда от времени можно пренебречь. Анализ баллистического транспорта носителей заряда в рамках ГД приближения также не актуален: область поглощения фотодетектора имеет длину не менее 200 нм в продольном направлении, что исключает возможность баллистического пролета, а поперечный транспорт ограничен потенциальными барьерами и осуществляется через область толщиной несколько нанометров, после чего электроны и дырки попадают в рекомбинационные слои с высокой концентрацией дефектов и быстро претерпевают рассеяние. Поэтому для моделирования ФДУП выбрано ДД приближение, в рамках которого возможен учет различных механизмов генерации, рекомбинации и рассеяния носителей заряда, а также двумерного характера транспортных процессов.

В общем случае ДД модель включает электронное и дырочное уравнения непрерывности и уравнение Пуассона, которые для структур с гетеропереходами могут быть представлены следующим образом [13, 14]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla \cdot \left\{ \mu_n \left[n \cdot \nabla (\varphi + V_n) - \varphi_T \cdot \nabla n \right] \right\} + G - R_n; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \mu_p \left[p \cdot \nabla (\varphi - V_p) + \varphi_T \cdot \nabla p \right] \right\} + G - R_p; \quad (2)$$

$$\nabla (\varepsilon \cdot \nabla \varphi) = -\frac{q}{\varepsilon_0} \cdot (p - n + N_d - N_a); \quad (3)$$

где n, p – концентрации электронов и дырок; t – время; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок; φ – электростатический потенциал; V_n, V_p – гетероструктурные потенциалы в зоне проводимости и валентной зоне; φ_T – температурный потенциал; G – скорость генерации электронно-дырочных пар; R_n, R_p – скорости рекомбинации электронов и дырок; ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; q – элементарный заряд; ε_0 – электрическая постоянная; N_d, N_a – концентрации ионизированных доноров и акцепторов.

При заданных управляющих напряжениях на контактах граничные условия для системы ДД уравнений (1)–(3) имеют следующий вид [8]:

$$n = \left\{ \frac{N_d - N_a}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_d - N_a}{2} \right)^2 + n_i^2} \right\} \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_{Sch}}{\varphi_T} \right); \quad (4)$$

$$p = \left\{ -\frac{N_d - N_a}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_d - N_a}{2} \right)^2 + n_i^2} \right\} \cdot \exp\left(\frac{\varphi_{Sch}}{\varphi_T} \right); \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi_T \ln\left(\frac{n}{n_i} \right) + U - \varphi_{Sch} = -\varphi_T \ln\left(\frac{p}{n_i} \right) + U - \varphi_{Sch}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \xi} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial \xi} = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} = 0; \quad (7)$$

где φ_{Sch} – высота барьера Шоттки (для омических контактов $\varphi_{\text{Sch}} = 0$); n_i – собственная концентрация носителей заряда; U – напряжение, прикладываемое к контакту в рассматриваемый момент времени; ξ – нормаль к поверхности контакта. Выражения (4)–(6) используются на омических контактах и контактах с барьерами Шоттки, а уравнения (7) – на свободных от контактов границах.

Начальные условия для модели (1)–(3) определяются численным решением системы ДД уравнений в стационарной форме при начальных значениях нестационарных параметров модели, определяемых исследуемым режимом работы прибора. При моделировании ФДУП наибольший интерес представляет переходной процесс, протекающий при освещении активной области прибора и последующем включении управляющего напряжения. Следовательно, начальные условия вычисляются при рабочем значении напряжения питания и нулевых мощности оптического излучения и управляющем напряжении.

Для описания процессов генерации и рекомбинации носителей заряда в данном исследовании применяются следующие аналитические модели [8, 15]:

модель, вычисляющая скорости электронной и дырочной рекомбинации R_n , R_p через времена жизни τ_n , τ_p и концентрации неравновесных носителей заряда Δn , Δp в момент времени t :

$$R_n(t) = \Delta n(t) / \tau_n; \quad R_p(t) = \Delta p(t) / \tau_p; \quad (8)$$

1) модель скорости биполярной оптической генерации G в волноводном фотодетекторе со встроенным оптическим резонатором:

$$G(t) = \frac{P_{\text{in}}(t) \cdot Q}{V_{\text{res}} \cdot E_{\text{ph}}} \quad (9)$$

$$Q = (1 - R_1) [1 - \exp(-\alpha L)] [1 + R_2 \cdot \exp(-\alpha L)] [1 - \sqrt{R_1 R_2} \cdot \exp(-\alpha L)]^{-2}, \quad (10)$$

где $P_{\text{in}}(t)$ – мощность падающего оптического излучения в момент времени t ; Q – квантовая эффективность фотодетектора; V_{res} – объем резонатора (в случае ФДУП – i -области поглощения излучения); E_{ph} – энергия фотонов, равная ширине запрещенной зоны в области поглощения; R_1 , R_2 – коэффициенты отражения полу- и полностью отражающего зеркал оптического резонатора; α – коэффициент поглощения полупроводника; L – длина резонатора, соответствующая условию $\lambda = 2L / m$, где λ – резонансная длина волны оптического излучения, m – натуральное число.

Одним из фундаментальных свойств ЛТ слоев, входящих в состав управляющей гетероструктуры ФДУП, является низкая подвижность носителей заряда в сравнении с областями, выращенными при стандартных температурных условиях. В данной работе используются экспериментальные значения подвижностей для полупроводниковых материалов различных областей прибора, приведенные в работах [16, 17].

Таким образом, ДД модель ФДУП включает базовые дифференциальные уравнения (1)–(3), граничные условия (4)–(7), начальные условия, получаемые из решения системы уравнений (1)–(3) в стационарной форме, и модели процессов рекомбинации и генерации (8)–(10).

Методика и программные средства моделирования. Предлагаемая в данном исследовании методика ДД численного моделирования объединяет эффективную схему дискретизации и экономичный вычислительный алгоритм, необходимые для устойчивого и сходящегося решения системы дифференциальных уравнений в частных производных, и имеет следующие характерные особенности:

1. Уравнения (1)–(3) рассматриваются в комбинированном базисе переменных $\{n, p, \varphi, F_n, F_p\}$, где F_n, F_p – переменные Слотбума [20].
2. Все переменные, входящие в базовые уравнения ДД модели, нормируются стандартными коэффициентами [20].
3. Решение дифференциальных уравнений осуществляется численным методом конечных разностей [21].
4. Схема дискретизации уравнений непрерывности основана на явном [21] и противопоточном [22] разностных методах.
5. Уравнение Пуассона дискретизируется стандартным способом, представленным в работе [23].
6. Решение системы дискретных ДД уравнений осуществляется модифицированным итерационным методом Гуммеля [23]. Поскольку уравнения непрерывности дискретизированы явным методом, на каждом шаге временной сетки реализуется цикл по невязке электрического потенциала φ , в котором на каждой итерации рассчитываются концентрации носителей заряда n и p , а затем решается система линейных алгебраических уравнений относительно переменной φ . Перед переходом на следующую итерацию или на следующий шаг по времени концентрации пересчитываются в величины F_n, F_p .
7. Для расчета начальных условий стационарная задача в базисе переменных $\{F_n, F_p, \varphi\}$ решается итерационным методом Ньютона [23].

Применение явного и противопоточного методов дискретизации в комплексе с итерационным методом Гуммеля позволяет свести задачу реализации нестационарной диффузионно-дрейфовой модели к решению на каждом шаге по времени (либо итерации) одной СЛАУ с размерностью, соответствующей рассматриваемой координатной сетке, и выполнению ряда сопутствующих математических операций. Очевидно, что подобная методика характеризуется существенно меньшими затратами временных и вычислительных ресурсов на получение результатов моделирования по сравнению с полунявным или неявным методами.

Для реализации рассмотренных выше диффузионно-дрейфовой модели и методики конечно-разностного моделирования разработан пакет прикладных программ в свободной среде GNU Octave, использующей MATLAB-совместимый язык высокого уровня [24]. Представленные программные средства позволяют моделировать переходные и стационарные процессы в структурах быстродействующих $A^{III}B^V$ фотодетекторов с различными электрофизическими и конструктивно-технологическими параметрами в широком диапазоне управляющих воздействий.

Результаты моделирования. Конфигурация структуры ФДУП, исследованная в данной работе в рамках ДД приближения полуклассического подхода, представлена на рис. 1. Продольная фоточувствительная p - i - n структура образована высоколегированными p^+ - и n^+ -GaAs областями длиной по 100 нм и расположенной между ними 200-нм i -InGaAsSb областью поглощения оптического излучения. Направление распространения лазерного излучения перпендикулярно плоскости показанного сечения. Поперечная управляющая гетероструктура включает верхний управляющий переход Шоттки с n -AlGaAs областью толщиной 25 нм, верхний и нижний 10-нм LT-слои с малым временем жизни и низкой подвижностью носителей заряда, 5-нм i -область и нижний управляющий переход Шоттки с p -AlGaAs областью толщиной 25 нм. Управляющее напряжение ($U_{c,1} - U_{c,2}$) = 1,5 В прикладывается к верхнему и нижнему контактам Шоттки, а напряжение питания ($U_{s,1} - U_{s,2}$) = -0,5 В – к боковым омическим контактам, соединенным с высоколегированными областями.

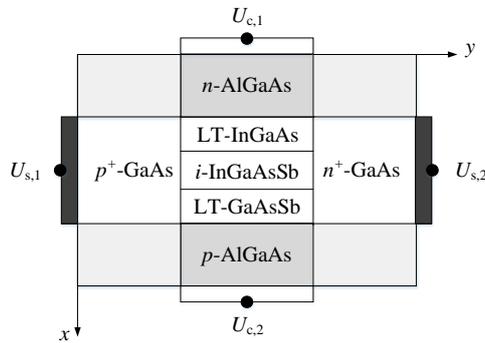


Рис. 1. Схематическое представление структуры ФДУП с двумя управляющими переходами Шоттки n- и p-типов проводимости; области диэлектрика выделены штриховкой

ФДУП имеет несимметричную двумерную структуру, поэтому эквивалентные емкости его полупроводниковых переходов и выпрямляющих контактов металл-полупроводник не сбалансированы. Поэтому достаточно быстрое включение управляющего напряжения во время заднего фронта оптического импульса вызывает протекание токов перезарядки емкостей через питающие и управляющие контакты. Результаты нестационарного диффузионно-дрейфового моделирования, которые иллюстрируют данный негативный эффект, приведены на рис. 2,а. Как следует из представленных кривых, амплитуда тока смещения в 3,75 раза превышает амплитуду фототока на правом контакте и почти в 10 раз – на левом контакте, что неприемлемо с точки зрения требований к измерительному сигналу фотодетектора. С одной стороны, вычислительные эксперименты показали, что амплитуда токов смещения может быть снижена до адекватных значений (порядка 5 мкА) путем задания определенных разностей потенциалов между контактами прибора. В таком случае обеспечивается баланс между эквивалентными емкостями переходов структуры. С другой стороны, практическая реализация данного подхода достаточно проблематична, так как исследуемый фотодетектор предназначен для работы в составе оптических межсоединений ИС и прецизионная настройка управляющих воздействий не представляется возможной.

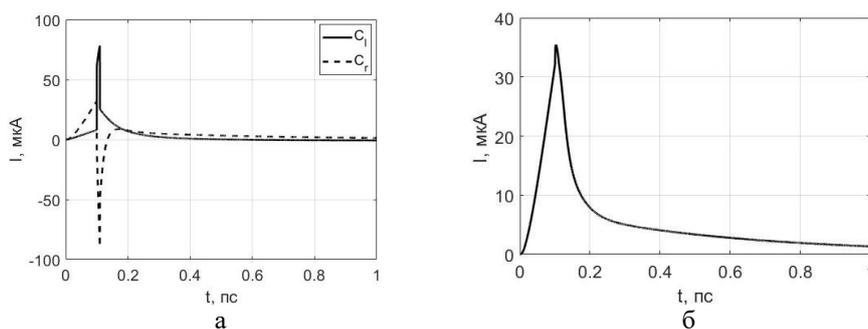


Рис. 2. Всплески тока на левом (C_l) и правом (C_r) контактах питания ФДУП при включении управляющего напряжения во время заднего фронта оптического импульса длительность 0,1 пс (а); фототок в цепи питания ФДУП при компенсации токов смещения за счет использования дифференциального принципа подключения (б)

Для решения рассмотренной проблемы и получения адекватного измерительного сигнала предлагается использовать дифференциальный принцип, в соответствии с которым измерительный сигнал формируется двумя ФДУП, подключенными к быстродействующему дифференциальному усилителю. Обе fotocувствительные структуры имеют одинаковые конструктивно-технологические параметры и управляются одинаковыми напряжениями, но только одна из структур соединена с оптическим волноводом и освещается лазерными импульсами. При обработке сигналов дифференциальным усилителем токи перезарядки емкостей одинаковых фотодетекторов компенсируют друг друга, и на выходе схемы формируется выделенный полезный сигнал – фототок. Результаты ДД моделирования, подтверждающие возможность использования дифференциального принципа для компенсации токов смещения в цепи питания ФДУП, приведены на рис. 2, б. На приведенном графике длительность импульсного отклика, измеренная по половине его амплитуды, равна около 0,08 пс (при длительности оптического импульса 0,1 пс).

Принципы схемной реализации оптических межсоединений. Подводя итоги физико-топологического моделирования ФДУП в рамках квантово-механического и полуклассического подходов, следует отметить следующие особенности, которые необходимо учитывать при разработке схем приемной и передающей частей интегральных систем оптической коммутации:

- 1) в отличие от традиционных устройств, схема фотоприемника с ФДУП должна не только усиливать выходной сигнал фотодетектора, но и своевременно подавать импульсы напряжения на управляющие контакты;
- 2) импульсы управляющего напряжения и оптические импульсы должны иметь фиксированную длительность;
- 3) для компенсации токов перезарядки емкостей в цепи питания ФДУП две структуры с одинаковыми параметрами, одна из которых освещается лазерным излучением, подключаются ко входам дифференциального каскада фотоприемника;
- 4) чтобы обеспечить высокое быстродействие оптических межсоединений, фотоприемная схема и драйвер должны быть построены на основе электронной элементной базы с субпикосекундным временем задержки.

Предлагаемая в данной статье принципиальная схема драйвера для функционально-интегрированных инжекционных лазеров-модуляторов [6–8] изображена на рис. 3. Устройство построено с использованием логических элементов на основе комплементарных туннельно-связанных наногетероструктур (КТСН) с управляемой передислокацией максимумов плотности носителей заряда, обеспечивающих требуемое быстродействие и подробно рассмотренных в работе [7]. Поскольку лазеры-модуляторы и КТСН-элементы управляются противофазными сигналами, схема имеет прямой и инверсный входы V_{IN} , $\overline{V_{IN}}$. Функциональный узел на элементах DD1.1 – DD5.1 формирует по каждому переднему и каждому заднему фронтам сигнала V_{IN} субпикосекундные импульсы (V_R и V_F , соответственно), длительность которых определяется временем задержки КТСН-инвертора $t_{NOT} < 0,2$ пс [7]. Временные диаграммы сигналов V_{IN} , V_R и V_F показаны на рис. 4.

Соответствующие инвертированные сигналы $\overline{V_R}$ и $\overline{V_F}$ формируются аналогичным образом функциональным узлом на элементах DD1.2 – DD5.2. При этом конструктивно два рассмотренных функциональных узла представляют собой единый интегральный блок вследствие функциональной и структурной интеграции противофазных инверторов DD1 – DD3 и элементов 2ИЛИ-НЕ/2И-НЕ DD4, DD5, схемы которых представлены в работе [7].

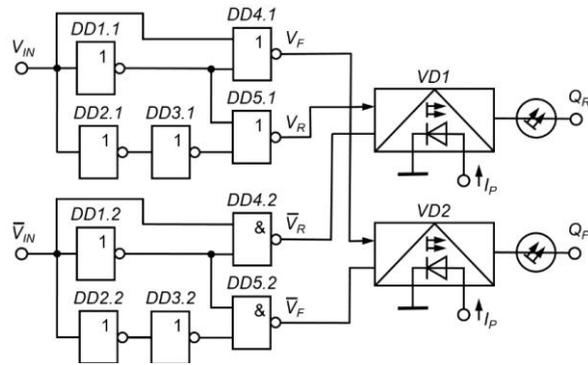


Рис. 3. Принципиальная схема передающей части интегральной системы оптической коммутации, построенная на основе быстродействующих лазеров-модуляторов и логических элементов с КТСН

Субмикросекундные противофазные импульсы V_R , $\overline{V_R}$ и V_F , $\overline{V_F}$ подаются на управляющие входы функционально интегрированных лазеров-модуляторов VD1, VD2, формирующих соответствующие оптические импульсы Q_R и Q_F при неизменном во времени токе накачки I_p . Временные диаграммы оптических сигналов Q_R и Q_F , приведенные на рис. 4, отражают переходные процессы в инжекционных лазерах. Скорость затухания оптических импульсов в каждой серии определяется плотностью тока накачки и временем жизни фотонов в резонаторе лазера-модулятора [6–8].

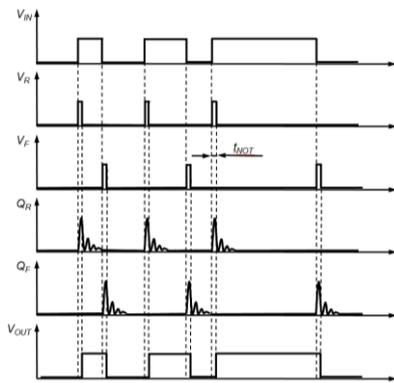


Рис. 4. Временные диаграммы, поясняющие принцип работы интегральной системы оптической коммутации

Приемная часть интегральной системы оптической коммутации на основе ФДУП, принципиальная схема которой приведена на рис. 5, позволяет восстановить входные сигналы V_{IN} , $\overline{V_{IN}}$ на выходных контактах V_{OUT} , $\overline{V_{OUT}}$ с использованием оптических импульсов Q_R и Q_F . При этом необходимо решить следующие основные задачи:

- 1) обеспечить изменение выходных сигналов V_{OUT} , $\overline{V_{OUT}}$ только по первому в каждой серии затухающих оптических импульсов Q_R и Q_F , как показано на рис. 4;

2) устранить влияние токов перезаряда емкостей управляющих цепей фотоприемников на импульсы фототока и, соответственно, на выходные сигналы V_{OUT} , $\overline{V_{OUT}}$.

Для решения первой задачи в качестве основного функционального узла приемной части системы оптической коммутации используется быстродействующий триггер на КТСН VT11 – VT14 и управляющих транзисторах VT10, VT15 (рис. 5).

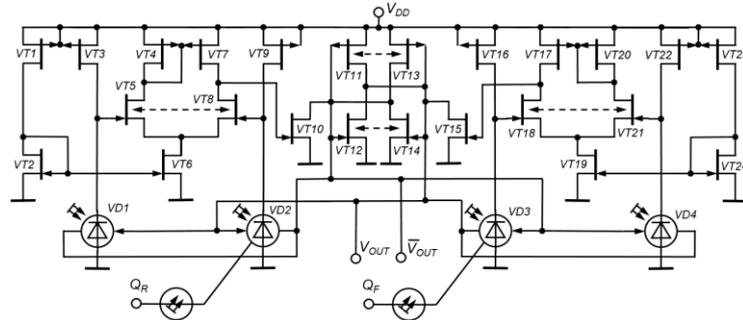


Рис. 5. Принципиальная схема быстродействующего фотоприемника на основе ФДУП

Для решения второй задачи помимо основных фотоприемников VD2, VD3, на которые по интегральным оптическим линиям подаются лазерные импульсы Q_R и Q_F , используются дополнительные фотоприемники VD1, VD4, на которые лазерные импульсы не подаются, а также дифференциальные усилители VT4 – VT8 и VT17 – VT21. При этом управляющие электрические сигналы поступают параллельно на основные и дополнительные фотоприемники с выходов триггера V_{OUT} , $\overline{V_{OUT}}$ (см. рис. 5). Для повышения коэффициента усиления и коэффициента подавления синфазных сигналов дифференциальных каскадов используются токовые зеркала (VT4, VT7), (VT2, VT6), (VT17, VT20), (VT19, VT24) и источники стабильного тока на транзисторах VT1, VT3, VT9, VT16, VT22, VT23.

При отсутствии входных оптических импульсов Q_R и Q_F разности потенциалов на затворах КТСН VT5, VT8 и КТСН VT18, VT21 равны нулю, в результате чего на выходах дифференциальных усилителей (стоки VT8 и VT18) формируются низкие уровни напряжения, транзисторы VT10 и VT15 закрыты, и КТСН-триггер VT11 – VT14 находится в режиме хранения текущего состояния.

Пусть текущее состояние триггера определяется выходными уровнями $V_{OUT} \approx 0$, $\overline{V_{OUT}} \approx V_{DD}$, обеспечивающими пространственную передислокацию носителей заряда в фотоприемниках VD1, VD2 в активную область, а в фотоприемниках VD3, VD4 – в ЛТ области. При этом VD2 находится в состоянии готовности к приему оптического импульса, а VD3 – в состоянии формирования заднего фронта фототока. При поступлении оптического импульса Q_R на фотоприемник VD2, на выходе дифференциального усилителя (сток VT8) формируется усиленный импульс напряжения, отпирающий транзистор VT10 и устанавливающий триггер через время задержки, примерно равное t_{NOT} , в состояние $V_{OUT} \approx V_{DD}$, $\overline{V_{OUT}} \approx 0$, инициирующее пространственную передислокацию фотогенерированных носителей в VD2 из активной области в ЛТ области, что приводит к формированию заднего фронта импульса фототока длительностью порядка t_{NOT} с одновременным переходом фотоприемника VD3 в состояние готовности к приему оптического импульса. При этом последующие в текущей серии оптические импульсы Q_R не будут изменять установленное первым импульсом состояние триггера (см. рис. 4).

Аналогично, при поступлении оптического импульса Q_F на фотоприемник VD3, на выходе дифференциального усилителя (сток VT18) формируется усиленный импульс напряжения, отпирающий транзистор VT15 и устанавливающий триггер через время задержки, примерно равное t_{NOT} , в состояние $V_{OUT} \approx 0$, $\overline{V_{OUT}} \approx V_{DD}$, инициирующее пространственную передислокацию фотогенерированных носителей в VD3 из активной области в LT области, что приводит к формированию заднего фронта импульса фототока длительностью порядка t_{NOT} с одновременным переходом фотоприемника VD2 в состояние готовности к приему очередного оптического импульса Q_R .

Для усиления импульса фототока и подавления токов перезаряда емкостей в предложенной на рис. 5 схеме используются дифференциальные усилители, входы которых (затворы VT5, VT8 и VT18, VT21) подключены к двум парам фотоприемников VD1, VD2 и VD3, VD4, питаемым от источников тока VT3, VT9 и VT16, VT21. Поскольку управляющие электрические импульсы подаются на каждую пару фотоприемников параллельно, а оптические импульсы Q_R и Q_F поступают лишь на фотоприемники VD2 и VD3, дифференциальные каскады усиливают отклик фотоприемников VD2 и VD3 на оптические импульсы, а синфазные импульсы, обусловленные перезарядом емкостей, эффективно подавляют. В результате на выходах V_{OUT} , $\overline{V_{OUT}}$ приемной части системы оптической коммутации (см. рис. 5) воспроизводятся сигналы V_{IN} , $\overline{V_{IN}}$ передающей части (см. рис. 3) с временной задержкой порядка $t_{NOT} < 0,5$ пс.

Заключение. Таким образом, в данной статье разработаны двумерная ДД модель быстродействующего оптического сенсора нового типа – ФДУП, а также средства численного моделирования (методика и пакет прикладных программ), которые позволили исследовать протекающие в структуре переходные процессы. Согласно полученным результатам моделирования, для компенсации токов смещения в цепи питания прибора, возникающих при подаче коротких импульсов управляющего напряжения, целесообразно использовать дифференциальный принцип, реализованный в данной работе в виде схемы, в которой две одинаковые фоточувствительные структуры подключаются к дифференциальному усилителю, причем только один фотодетектор освещается оптическим излучением. При дифференциальном подключении ФДУП с двумя управляющими переходами Шоттки обеспечивает импульсный фототклик с амплитудой более 30 мкА и длительностью (измеренной по полуамплитуде) около 0,08 пс при длительности оптического импульса 0,1 пс. На основе анализа полученных результатов моделирования предложены принципы схемной реализации драйвера лазеров-модуляторов и быстродействующего фотоприемника для интегральных систем оптической коммутации, обеспечивающего эффективную компенсацию токов смещения и временную задержку передачи сигнала порядка 0,5 пс.

Поддержка. Результаты получены в рамках задания № FENW-2020-0022 на выполнение научных исследований, осуществляемых за счет средств федерального бюджета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Clark R., Tapily K., Yu K.-H., Hakamata T., Consiglio S., O'Meara D., Wajda C., Smith J., Leusink G. New Process Technologies Required for Future Devices and Scaling // APL Materials. – 2018. – Vol. 6. – P. 058203.
2. Brain R. Interconnect Scaling: Challenges and Opportunities // Proceedings of 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA. – IEEE, 2016. – P. 9.3.1-9.3.4.

3. *Chen Z., Gu H., Yang Y., Bai L., Li H.* A Power Efficient and Compact Optical Interconnect for Network-on-Chip // IEEE Computer Architecture Letters. – 2014. – Vol. 13, No. 1. – P. 5-8.
4. *Bashir J., Peter E., Sarangi S.R.* A Survey of On-Chip Optical Interconnects // ACM Computing Surveys. – 2019. – Vol. 51, No. 6. – P. 115.
5. *Miller D.A.B.* Optical interconnects to electronic chips // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49, No. 25. – P. F59-F70.
6. *Ryndin E.A., Konoplev B.G.* Active Region of a Functionally Integrated Laser-Modulator // Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 49, No. 6. – P. 563-569.
7. *Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A.* Components of Integrated Microwave Circuits Based on Complementary Coupled Quantum Regions // Russian Microelectronics. – 2015. – Vol. 44, No. 3. – P. 190-196.
8. *Pisarenko I., Ryndin E.* Drift-Diffusion Simulation of High-Speed Optoelectronic Devices // Electronics. – 2019. – Vol. 8, No. 1. – P. 106.
9. *Pisarenko I.V., Ryndin E.A.* Numerical Simulation of High-Speed $A^{III}B^V$ Photodetectors Within Drift-Diffusion Approximation // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368, No. 4. – P. 042052.
10. *Webb K.J., Cohen E.B., Melloch R.E.* Fabrication and Operation of a Velocity Modulation Transistor // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2001. – Vol. 48, No. 12. – P. 2701-2709.
11. *Pisarenko I., Ryndin E.* Photodetector with Controlled Relocation of Carrier Density Peaks: Concept and Numerical Simulation // Photonics. – 2020. – Vol. 7, No. 1. – P. 21.
12. *Pisarenko I.V., Ryndin E.A.* High-speed photodetector with controlled relocation of carrier density peaks // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1482. – P. 012037.
13. *Абрамов И.И.* Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. Ч. II. Модели полуклассического подхода // Нано- и микро-системная техника. – 2006. – № 9. – С. 26–36.
14. *Абрамов И.И.* Основы моделирования элементов микро- и нанoeлектроники. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 434 с.
15. *Шалимова К.В.* Физика полупроводников. 4-е изд. – СПб.: Изд-во «Лань», 2010. – 400 с.
16. *Palankovski V., Quay R.* Analysis and Simulation of Heterostructure Devices. – Wien: Springer-Verlag, 2004. – 257 p.
17. *Currie M.* Low-Temperature Grown Gallium Arsenide (LT-GaAs) High-Speed Detectors // Photodetectors: Materials, Devices and Applications. Ed. by B. Nabet. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. – Chapter 5. – P. 121-155.
18. Analyze Semiconductor Devices at the Fundamental Level with the Semiconductor Module // COMSOL Website. – URL: <https://www.comsol.ru/semiconductor-module> (дата обращения: 01.05.2020).
19. Genius: 3D Parallel Device Simulator // Cogenda Website. – URL: <http://www.cogenda.com/article/Genius> (дата обращения: 01.05.2020).
20. *Vasileska D., Goodnick S.M., Klimeck G.* Computational Electronics: Semiclassical and Quantum Device Modeling and Simulation. – Boca Raton: CRC Press, 2010. – 782 p.
21. *Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М.* Численные методы. 7-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. – 636 с.
22. *Куликова И.В., Лысенко И.Е., Приступчик Н.К., Лысенко А.С.* Численное решение нестационарной фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 106-111.
23. *Абрамов И.И.* Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. – Мн.: БГУ, 1999. – 189 с.
24. GNU Octave: Scientific Programming Language // GNU Octave Website. – URL: <https://www.gnu.org/software/octave/> (дата обращения: 01.05.2020).

REFERENCES

1. *Clark R., Tapily K., Yu K.-H., Hakamata T., Consiglio S., O'Meara D., Wajda C., Smith J., Leusink G.* New Process Technologies Required for Future Devices and Scaling, *APL Materials*, 2018, Vol. 6, pp. 058203.
2. *Brain R.* Interconnect Scaling: Challenges and Opportunities, *Proceedings of 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA.* IEEE, 2016, pp. 9.3.1-9.3.4.

3. Chen Z., Gu H., Yang Y., Bai L., Li H. A Power Efficient and Compact Optical Interconnect for Network-on-Chip, *IEEE Computer Architecture Letters*, 2014, Vol. 13, No. 1, pp. 5-8.
4. Bashir J., Peter E., Sarangi S.R. A Survey of On-Chip Optical Interconnects, *ACM Computing Surveys*, 2019, Vol. 51, No. 6, pp. 115.
5. Miller D.A.B. Optical interconnects to electronic chips, *Applied Optics*, 2010, Vol. 49, No. 25, pp. F59-F70.
6. Ryndin E.A., Konoplev B.G. Active Region of a Functionally Integrated Laser-Modulator, *Quantum Electronics*, 2019, Vol. 49, No. 6, pp. 563-569.
7. Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Components of Integrated Microwave Circuits Based on Complementary Coupled Quantum Regions, *Russian Microelectronics*, 2015, Vol. 44, No. 3, pp. 190-196.
8. Pisarenko I., Ryndin E. Drift-Diffusion Simulation of High-Speed Optoelectronic Devices, *Electronics*, 2019, Vol. 8, No. 1, pp. 106.
9. Pisarenko I.V., Ryndin E.A. Numerical Simulation of High-Speed $A^{III}B^V$ Photodetectors With- in Drift-Diffusion Approximation, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1368, No. 4, pp. 042052.
10. Webb K.J., Cohen E.B., Melloch R.E. Fabrication and Operation of a Velocity Modulation Transistor, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, Vol. 48, No. 12, pp. 2701-2709.
11. Pisarenko I., Ryndin E. Photodetector with Controlled Relocation of Carrier Density Peaks: Concept and Numerical Simulation, *Photonics*, 2020, Vol. 7, No. 1, pp. 21.
12. Pisarenko I.V., Ryndin E.A. High-speed photodetector with controlled relocation of carrier density peaks, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 1482, pp. 012037.
13. Abramov I.I. Problemy i printsipy fiziki i modelirovaniya pribornykh struktur mikro- i nanoelektroniki. Ch. II. Modeli poluklassicheskogo podkhoda [Problems and Principles of Physics and Simulation of Device Structures for Micro- and Nanoelectronics. Part II. Models of Semiclassical Approach], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystems Technology], 2006, No. 9, pp. 26-36.
14. Abramov I.I. Osnovy modelirovaniya elementov mikro- i nanoelektroniki [Fundamentals of Micro- and Nanoelectronic Elements' Simulation]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016, 434 p.
15. Shalimova K.V. Fizika poluprovodnikov [Semiconductor Physics]. 4 ed. Saint Petersburg: Izd-vo «Lan'», 2010, 400 p.
16. Palankovski V., Quay R. Analysis and Simulation of Heterostructure Devices. Wien: Springer-Verlag, 2004, 257 p.
17. Currie M. Low-Temperature Grown Gallium Arsenide (LT-GaAs) High-Speed Detectors, *Photodetectors: Materials, Devices and Applications*. Ed. by B. Nabet. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016, Chapter 5, pp. 121-155.
18. Analyze Semiconductor Devices at the Fundamental Level with the Semiconductor Module // COMSOL Website. Available at: <https://www.comsol.ru/semiconductor-module> (accessed 01 May 2020).
19. Genius: 3D Parallel Device Simulator // Cogenda Website. Available at: <http://www.cogenda.com/article/Genius> (accessed 01 May 2020).
20. Vasileska D., Goodnick S.M., Klimeck G. Computational Electronics: Semiclassical and Quantum Device Modeling and Simulation. Boca Raton: CRC Press, 2010, 782 p.
21. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennyye metody [Numerical Methods]. 7 ed. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2017, 636 p.
22. Kulikova I.V., Lysenko I.E., Pristupchik N.K., Lysenko A.S. Chislennoe reshenie nestatsionarnoy fundamental'noy sistemy uravneniy poluprovodnika v diffuzionno-dreyfovom priblizhenii [Numerical Solution of Fundamental Equation System for Semiconductor in Drift-Diffusion Approximation], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 106-111.
23. Abramov I.I. Modelirovanie fizicheskikh protsessov v elementakh kremnievykh integral'nykh mikroskhem [Simulation of Physical Processes in Elements of Silicon Integrated Circuits]. Minsk: BGU, 1999, 189 p.
24. GNU Octave: Scientific Programming Language, *GNU Octave Website*. Available at: <https://www.gnu.org/software/octave/> (accessed 01 May 2020).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.Е. Лысенко.

Писаренко Иван Вадимович – Южный федеральный университет; e-mail: ivan123tgn@yandex.ru; 347942, г. Таганрог, ул. Нижняя Линия, 8; тел.: +79185978535; аспирант.

Рындин Евгений Адальбертович – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: rynenator@gmail.com; 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5а, 5-й корпус; тел.: +78122343164; д.т.н.; профессор.

Pisarenko Ivan Vadimovich – Southern Federal University; e-mail: ivan123tgn@yandex.ru; 8, Nizhnyaya Liniya street, Taganrog, 347942, Russia; phone: +79185978535; postgraduate student.

Ryndin Eugeny Adal'bertovich – Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"; e-mail: rynenator@gmail.com; 5a, Professora Popova street, build. 5, Saint Petersburg, 197376, Russia; phone: +78122343164; dr. of eng. sc.; professor.