

Расширенная диффузионно-дрейфовая модель быстродействующих фотодетекторов для оптических межсоединений интегральных схем

И.В. Писаренко, Е.А. Рындин

Южный федеральный университет, ivan123tgn@yandex.ru, earyndin@sfnedu.ru

Аннотация — Лазеры-модуляторы на основе $A^{III}B^V$ наногетероструктур представляют собой перспективные приборы, открывающие новые возможности в области оптической коммутации элементов интегральных схем. Чтобы реализовать оптические межсоединения на основе лазеров-модуляторов, требуются быстродействующие интегральные фотодетекторы, характеризующиеся субпикосекундным временем отклика и технологической совместимостью как с источниками излучения, так и с базовыми конструкциями интегральных схем. В данной статье предложена расширенная диффузионно-дрейфовая модель быстродействующих фотодетекторов, учитывающая эффекты насыщения дрейфовых скоростей носителей заряда и междолинного перехода электронов. Для реализации модели разработаны конечно-разностная методика численного моделирования на основе метода Ньютона и специализированное программное обеспечение. Данные средства были апробированы для моделирования $InP/InGaAs$ UTC-фотодиода. В соответствии с результатами моделирования время отклика прибора составляет порядка нескольких единиц пикосекунд. Предложенная численная модель позволяет адекватно описывать процессы переноса и накопления носителей заряда в структурах на основе материалов типа $A^{III}B^V$.

Ключевые слова — оптические межсоединения для интегральных схем, быстродействующие фотодетекторы, численное моделирование, расширенная диффузионно-дрейфовая модель, комплексная модель подвижности.

I. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматривается фундаментальная научно-техническая проблема улучшения характеристик межэлементных соединений в интегральных устройствах микро- и нанoeлектроники. С уменьшением минимального топологического размера транзисторов и повышением степени интеграции микросхем традиционные методы формирования межсоединений на кристалле, предусматривающие использование металлических проводников, постепенно перестают удовлетворять требованиям разработчиков к целому ряду основополагающих характеристик [1]. В настоящее время рассматриваются различные подходы к решению рассматриваемой проблемы [2]–[4]. Одним из перспективных направлений исследований является внедрение конструктивно и технологически интегрированных оптических связей на верхних уровнях иерархии системы межсоединений интегральной схемы (ИС) [5], [6]. В частности, рассматривается возможность создания гибридных и монолитно интегрированных оптоэлектронных систем, осуществляющих коммутацию ядер в многоядерных ИС ультрабольшой степени интеграции [7].

В работах [8]–[10] предложен метод построения быстродействующих инжекционных лазеров с функционально интегрированными модуляторами излучения, которые могут применяться в качестве эффективных источников излучения для межъядерных оптических соединений в ИС. В указанных приборах максимальная частота модуляции излучения не ограничена относительно инерционными процессами в цепи питания лазера, а определяется временем управляемой передислокации максимумов плотности электронов и дырок в квантовых ямах гетероструктуры, которое может достигать величины порядка 1 пс и менее [11]. Для реализации потенциала, заложенного в конструкциях лазеров-модуляторов, необходимо создание специализированных быстродействующих фотодетекторов, характеризующихся субпикосекундным временем отклика и технологической совместимостью с лазером-модулятором и базовой конструкцией ИС.

Целью данной статьи является разработка модели и средств моделирования, позволяющих адекватно описывать транспорт носителей заряда в полупроводниковых структурах на основе материалов типа $A^{III}B^V$ с учетом эффекта междолинного перехода электронов. В качестве основы для реализации модели выбрано диффузионно-дрейфовое приближение полуклассического подхода к моделированию полупроводниковых приборов [12].

II. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования быстродействующих фотодетекторов в данной работе предлагается применить диффузионно-дрейфовую систему уравнений [12] в базисе переменных $\{\varphi, F_n, F_p\}$ [13], где φ – электростатический потенциал; F_n, F_p – экспоненты квазиуровней Ферми для электронов и дырок. Формулы для перехода между вышеупомянутым и традиционным базисами переменных имеют следующий вид:

$$F_n = \frac{n}{n_i} \cdot \exp\left(\frac{-\varphi - V_n}{\varphi_T}\right); \quad (1)$$

$$F_p = \frac{p}{n_i} \cdot \exp\left(\frac{\varphi - V_p}{\varphi_T}\right), \quad (2)$$

где n , p – концентрации электронов и дырок; n_i – собственная концентрация носителей заряда; φ_T – температурный потенциал; V_n , V_p – разрывы дна зоны проводимости и потолка валентной зоны (гетеропотенциалы). Используя формулы (1) и (2) и стандартные нормировочные коэффициенты [13] получим следующую базовую систему уравнений модели:

$$\frac{\partial}{\partial t} [F_n \cdot \exp(\varphi + V_n)] = \nabla \vec{j}_n + G - R; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [F_p \cdot \exp(-\varphi + V_p)] = -\nabla \vec{j}_p + G - R; \quad (4)$$

$$\vec{j}_n = \mu_n \cdot \exp(\varphi + V_n) \cdot \nabla F_n; \quad (5)$$

$$\vec{j}_p = -\mu_p \cdot \exp(-\varphi + V_p) \cdot \nabla F_p; \quad (6)$$

$$\nabla(\varepsilon \nabla \varphi) = F_n \exp(\varphi + V_n) - F_p \exp(-\varphi + V_p) - N_D + N_A, \quad (7)$$

где \vec{j}_n , \vec{j}_p – электронная и дырочная составляющие плотности тока; ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; t – время; μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок; G , R – скорости генерации и рекомбинации электронно-дырочных пар; N_D , N_A – концентрации ионизированных доноров и акцепторов. В предположении фотодиодного режима работы фотодетекторов и бесконечной скорости рекомбинации на омических контактах граничные условия для системы уравнений (3)–(7) [14] принимают следующий нормированный вид:

$$F_n = \exp[-U(t)]; \quad (8)$$

$$F_p = \exp[U(t)]; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \varphi = \ln \left[\frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + 1} \right] + U(t) = \dots \\ \dots = -\ln \left[-\frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + 1} \right] + U(t), \quad (10) \end{aligned}$$

где $U(t)$ – напряжение, приложенное к контакту в момент времени t . Для расчета начальных условий целесообразно осуществлять решение диффузионно-дрейфовых уравнений (3)–(7) в стационарной форме.

В полупроводниках типа $A^{III}B^V$ эффекты насыщения дрейфовых скоростей носителей заряда и между-

линого перехода электронов приводят к проявлению нелинейного характера зависимости подвижности от напряженности электрического поля, который влияет на быстродействие приборов. В рамках диффузионно-дрейфового приближения учет данных эффектов осуществляется, как правило, путем использования дополнительной комплексной модели для расчета подвижности носителей заряда [14], которая включает следующие составляющие:

- 1) аналитическую модель Коэ-Томаса [14], которая описывает рассеяние электронов и дырок на фононах и ионизированных атомах примеси;
- 2) модель подвижности с учетом насыщения дрейфовой скорости носителей заряда [14]:

$$\mu_{c,sat} = \mu_{c,LF} \cdot \left(1 + \left(\frac{\mu_{c,LF} \cdot E_c}{v_{c,sat}} \right)^\chi \right)^{-\frac{1}{\chi}}, \quad (11)$$

где $c = n, p$; $\mu_{c,LF}$ – подвижность Коэ-Томаса; $v_{c,sat}$ – скорость насыщения дрейфа носителей заряда; χ – параметр, зависящий от типа полупроводникового материала; E_c – эффективное электрическое поле, равное градиенту квазиуровня Ферми для носителей заряда;

- 3) двухдолинную модель подвижности для электронов [14]:

$$\mu_n = \frac{\mu_{n,sat,low} + \mu_{n,up} \cdot P_{val}}{1 + P_{val}}; \quad (12)$$

$$P_{val} = Q \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_{val}}{kT_n}\right), \quad (13)$$

где $\mu_{n,sat,low}$, $\mu_{n,up}$ – подвижности в нижней и верхней долинах, рассчитанные с использованием формулы насыщения (11); Q – отношение между плотностями состояний в долинах; k – постоянная Больцмана; T_n – электронная температура; ΔE_{val} – энергетический зазор между соответствующими минимумами зоны проводимости.

Основной проблемой, возникающей при реализации рассматриваемого подхода, является вычисление распределения электронной температуры, входящей в уравнение (13). В работах [15] и [16] мы использовали приближение, в рамках которого электронная температура считалась неизменной во времени и рассчитывалась путем решения стационарного уравнения баланса энергии для электронов в каждой точке координатной сетки. Вычислительные эксперименты показали, что применение вышеупомянутого подхода для нестационарного моделирования быстродействующих фоточувствительных гетероструктур приводит к нарушению адекватности результатов моделирования, вызванному отсутствием учета задержки между изменениями градиента квазиуровня Ферми и электронной температуры (рис. 1).

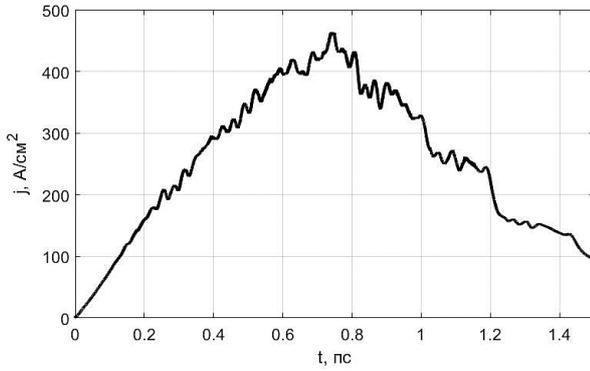


Рис. 1. Результаты моделирования фотоотклика UTC-фотодиода, рассчитанные без учета задержки между изменениями градиента квазиуровня Ферми и электронной температуры

В данной статье для расчета распределения электронной температуры в структуре фотодетектора предлагается осуществлять решение упрощенного нестационарного уравнения баланса энергии для электронов [17] на каждом шаге по времени. В предположении равенства средней энергии электронов $3kT_n/2$ указанное уравнение может быть переписано следующим образом:

$$\frac{dT_n}{dt} = \frac{2e}{3k} \mu_n E_n^2 - \frac{T_n - T}{\tau_E}, \quad (14)$$

где e – элементарный заряд; T – температура решетки; τ_E – среднее время релаксации энергии. Последний параметр оценивался с использованием следующего аналитического выражения, зависящего от T_n и представленного в работе [14]:

$$\tau_E = \tau_{E,0} + \tau_{E,1} \cdot \exp \left[C_1 \cdot \left(\frac{T_n}{300 \text{ К}} + C_0 \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + C_2 \cdot \left(\frac{T_n}{300 \text{ К}} + C_0 \right) + C_3 \cdot \left(\frac{T}{300 \text{ К}} \right) \right], \quad (15)$$

где $\tau_{E,0}$, $\tau_{E,1}$, C_0 , C_1 , C_2 , C_3 – параметры, зависящие от типа полупроводникового материала.

Так как при моделировании быстродействующих фотодетекторов рассматриваются временные интервалы порядка единиц и десятков пикосекунд, то процессами ловушечной, межзонной и Оже рекомбинации можно пренебречь ввиду их инерционности [18]. Расчет скорости биполярной оптической генерации носителей заряда осуществлялся с использованием модели, подробно рассмотренной в работе [16].

Для реализации расширенной диффузионно-дрейфовой модели (3)–(15) разработана методика численного моделирования, основанная на применении метода конечных разностей [19] и имеющая следующие ключевые особенности:

1) Схема дискретизации базовых диффузионно-дрейфовых уравнений аналогична варианту, представленному в работе [20].

2) Для дискретизации уравнения баланса энергии применяется явная разностная схема [19]. Соответствующее конечно-разностное уравнение в одномерном приближении имеет следующий вид:

$$\frac{T_{n,i}^{j+1} - T_{n,i}^j}{\Delta t^j} = \frac{2e}{3k} \mu_{n,i}^j (E_{n,i}^j)^2 - \frac{T_{n,i}^j - T}{\tau_{E,i}^j}, \quad (16)$$

где i – индекс точек координатной сетки; j – индекс точек временной сетки; Δt^j – j -й шаг по времени.

3) Для расчета начальных условий проводится стационарное моделирование при рабочем значении напряжения питания и отсутствии освещения. Решение стационарной диффузионно-дрейфовой системы уравнений осуществляется методом Ньютона [21]. Распределение электронной температуры вычисляется путем решения стационарного уравнения баланса энергии.

4) Нестационарная диффузионно-дрейфовая система уравнений (3)–(7) решается методом Ньютона [21] на каждом шаге по времени. После каждой итерации подвижности носителей заряда уточняются с использованием уравнения баланса энергии (14) и формул (11)–(13).

5) Системы линейных алгебраических уравнений решаются прямым методом.

Вышеупомянутая методика расширенного диффузионно-дрейфового моделирования демонстрирует численную устойчивость и достаточно высокую скорость сходимости в широком диапазоне шагов по времени и координате.

Для численного моделирования полупроводниковых фотодетекторов в рамках рассмотренного подхода реализован специализированный пакет прикладного программного обеспечения. Программы написаны на языке программирования Octave и реализованы в системе GNU Octave версии 4.2.1 [22]. Прикладные программные средства позволяют моделировать гетероструктурные полупроводниковые приборы с различными электрофизическими и конструктивно-технологическими параметрами в широком диапазоне управляющих воздействий.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанная расширенная диффузионно-дрейфовая модель, методика численного конечно-разностного моделирования и прикладные программные средства были апробированы для исследования быстродействия фотодиодов с переносом электронов (Uni-Travelling-Carrier Photodiodes, UTC-фотодиодов) [23]. В отличие от традиционных p - i - n фотодиодов данные структуры используют в качестве активных носителей заряда только электроны, что исключает негативное влияние низкой подвижности дырок на их быстродействие. Главными преимуществами UTC-фотодиода являются возможность работы при низком

напряжении питания, высокий выходной ток насыщения и малое время отклика [24]. Согласно [23], время отклика *InP/InGaAs* UTC-фотодиода с толщиной коллектора 350 нм составляет менее 1 пс. По этой причине рассматриваемое устройство является перспективным вариантом фотодетектора для быстродействующих оптических межсоединений на кристаллах ИС.

В данной работе исследовался волноводный *InP/InGaAs* UTC-фотодиод, структура которого представлена на рис. 2. Для повышения квантовой эффективности прибора применяется оптический резонатор, образуемый полу- и полностью отражающими зеркалами 1 и 2, которые сформированы на боковых гранях фотодетектора. Пиковое значение внешней квантовой эффективности при длине резонатора 1 мкм составляет порядка 0,7.

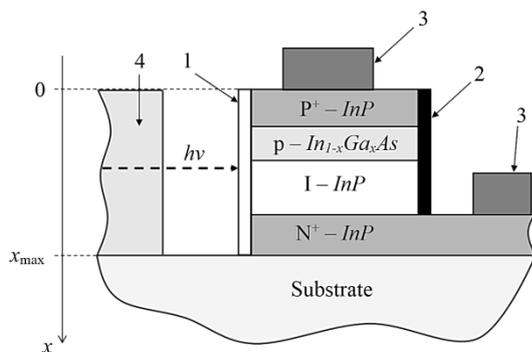


Рис. 2. Структура *InP/InGaAs* UTC-фотодиода: 1 – полупрозрачное зеркало; 2 – полностью отражающее зеркало; 3 – омические контакты; 4 – интегральный оптический волновод

Рис. 3 демонстрирует зонные диаграммы UTC-фотодиода с *InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As* гетеропереходами при обратном напряжении смещения 0,5 В в случаях отсутствия освещенности (а) и в начальный момент освещения прямоугольным оптическим импульсом мощностью 1 мВт (б). Толщина *p-In_{0.53}Ga_{0.47}As* слоя поглощения составляет 150 нм, коллектора – 350 нм. Графики иллюстрируют влияние освещения на квазиуровни Ферми для электронов и дырок. Генерация большого количества неравновесных электронов приводит к возникновению градиента квазиуровня Ферми в области поглощения и коллекторе, в результате чего мы наблюдаем рост эффективной напряженности поля и существенное снижение подвижности электронов, что негативно отражается на быстродействии фотодиода. Соответствующие зонным диаграммам распределения концентраций носителей заряда и подвижности электронов представлены на рис. 4 и 5.

На рис. 6 представлена зависимость плотности фототока в цепи рассматриваемого *InP/InGaAs* UTC-фотодиода от времени при освещении его структуры одиночным прямоугольным лазерным импульсом длительностью 1,25 пс. Как следует из графика, фототок не успевает достичь состояния насыщения, что обусловлено существенным по сравнению с длительностью оптического импульса временем отклика прибора. Обобщенная теоретическая оценка быстродействия

UTC-фотодиода, приведенная в работе [23], не учитывает эффектов насыщения дрейфовых скоростей носителей заряда и междолинного перехода электронов, в результате чего оценочные значения времени отклика оказываются в несколько раз меньше, чем получаемые с использованием расширенной диффузионно-дрейфовой модели. Исследование фотоотклика UTC-структуры на более длинные оптические импульсы позволило рассчитать длительности переднего и заднего фронтов импульса фототока, которые приблизительно равны и составляют около 3,5 пс (по уровням 90 % и 10 %).

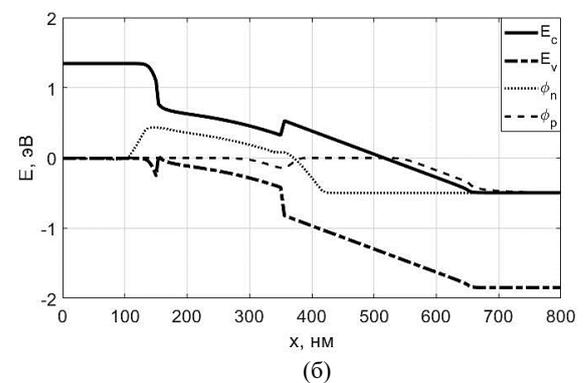
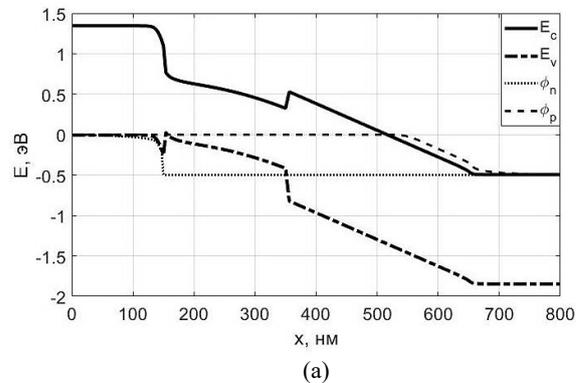


Рис. 3. Зонные диаграммы *InP/InGaAs* UTC-фотодиода до (а) и после (б) переднего фронта прямоугольного оптического импульса; E_c , E_v – энергетические уровни дна зоны проводимости и потолка валентной зоны; ϕ_n , ϕ_p – квазиуровни Ферми для электронов и дырок

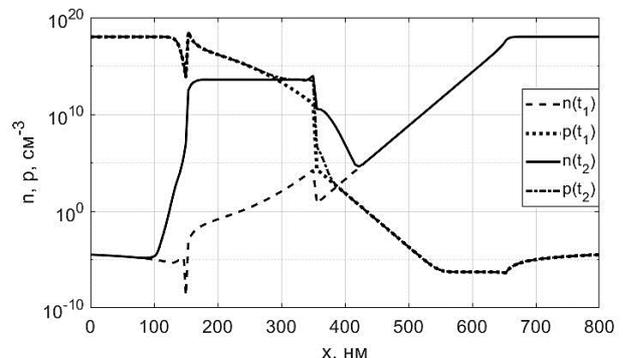


Рис. 4. Распределения концентраций электронов (n) и дырок (p) в UTC-фотодиоде в моменты времени до (t_1) и после (t_2) переднего фронта оптического импульса

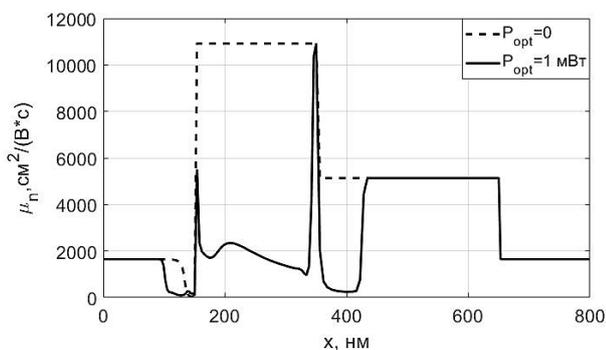


Рис. 5. Влияние освещения на распределение подвижности электронов в структуре UTC-фотодетектора

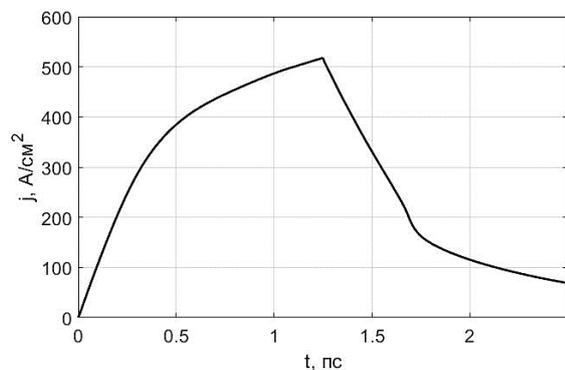


Рис. 6. Фотоотклик *InP/InGaAs* UTC-фотодиода при детектировании прямоугольного оптического импульса длительностью 1,25 пс

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена расширенная диффузионно-дрейфовая модель полупроводниковых фотодетекторов, которая дополняет традиционную систему уравнений комплексной моделью подвижности носителей заряда, что позволяет адекватно описывать выскополевоый транспорт носителей заряда в полупроводниках типа $A^{III}B^V$. В рамках представленного подхода расчет электронной температуры, входящей в уравнение двухдолинной модели подвижности, осуществляется путем численного решения нестационарного уравнения баланса энергии для электронов совместно с базовыми диффузионно-дрейфовыми уравнениями. Разработанная модель позволяет учесть эффекты насыщения дрейфовых скоростей носителей заряда и междолинного перехода электронов в материалах типа $A^{III}B^V$ в рамках диффузионно-дрейфового приближения, не прибегая к использованию более сложных моделей. Рассмотренные эффекты определяют снижение подвижностей электронов и дырок в области поглощения и коллекторе UTC-фотодиода, что негативно сказывается на его быстродействии.

Для реализации расширенной диффузионно-дрейфовой модели предложена методика численного конечно-разностного моделирования. Данная методика основана на методе Ньютона и обеспечивает приемлемый баланс между затратами временных и вычислительных ресурсов и адекватностью получаемых ре-

зультатов моделирования. Расчеты проводились с использованием разработанного прикладного программного обеспечения, которое позволяет исследовать структуры с различными электрофизическими и конструктивно-технологическими параметрами при различных управляющих воздействиях.

UTC-фотодиод является одним из наиболее быстродействующих типов фотодетекторов, основанных на полуклассических транспортных эффектах. Расчеты показали, что быстродействие данного прибора является недостаточным для эффективной работы в составе оптических межсоединений ИС совместно с быстродействующими лазерами-модуляторами. Таким образом, разработка методов снижения времени отклика интегральных фоточувствительных приборов является актуальным направлением исследований в области разработки элементной базы оптических межсоединений для ИС.

ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-37-00432.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ceyhan A., Naeemi A. Cu interconnect limitations and opportunities for SWNT interconnects at the end of the roadmap // IEEE Trans. Electron Dev. 2013. V. 60. P. 374–382.
- [2] Das D., Rahaman H. Carbon Nanotube and Graphene Nanoribbon Interconnects. CRC Press, 2014.
- [3] Subash S., Kolar J., Chowdhury M.H. A new spatially rearranged bundle of mixed carbon nanotubes as VLSI interconnection // IEEE Transactions on Nanotechnology. 2013. V. 12. P. 3–12.
- [4] Buckel W., Kleiner R. Superconductivity Fundamentals and Applications. Wiley-VCH Verlag, 2004.
- [5] Zhou Z., Tu Z., Li T., Wang X. Silicon Photonics for Advanced Optical Interconnections // Journal of Lightwave Technology. 2015. V. 33. № 4. P. 928–933.
- [6] Miller, D.A.B. Optical interconnects to electronic chips // Appl. Opt. 2010. V. 49. P. F59–F70.
- [7] Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А. Метод построения интегральных систем оптической коммутации многоядерных УБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. №4 (117). С. 21–27.
- [8] Pisarenko I.V., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-drift model of injection lasers with double heterostructure // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 586. P. 012015.
- [9] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-Drift Model of the Transport of Charge Carriers and Photons in Injection Lasers // Technical Physics Letters. 2015. V. 41. №. 6. P. 587–590.
- [10] Ryndin E.A., Denisenko M.A. A Functionally Integrated Injection Laser-Modulator with the Radiation Frequency Modulation // Russian Microelectronics. 2013. V. 42. № 6. P. 360–362.
- [11] Рындин Е.А., Денисенко М.А., Исаева А.С. Физико-топологическая и схемотехническая модели функционально интегрированных инжекционных лазеров-модуляторов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 9 (170). С. 23–30.

- [12] Абрамов И.И. Основы моделирования элементов микро- и наноэлектроники. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 437 с.
- [13] Vasileska D., Goodnick S. M., Klimeck G. Computational Electronics: Semiclassical and Quantum Device Modeling and Simulation. CRC Press, 2010.
- [14] Palankovski V., Quay R. Analysis and Simulation of Heterostructure Devices. Wien: Springer-Verlag, 2004.
- [15] Писаренко И.В., Рындин Е.А. Физико-топологическое моделирование фотодетекторов интегральных систем оптической коммутации на основе материалов типа $A^{III}B^V$ с учетом зависимостей подвижностей носителей заряда от напряженности электрического поля // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2016. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИПМ РАН, 2016. Часть IV. С. 16–23.
- [16] Pisarenko I.V., Ryndin E.A. Numerical Drift-Diffusion Simulation of GaAs p-i-n and Schottky-Barrier Photodiodes for High-Speed A^{III}B^V On-Chip Optical Interconnections // Electronics. 2016. V. 5 (3). P. 52.
- [17] Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 496 с.
- [18] Бирюкова Л.Ю., Николаева В.А., Рыжий В.И., Четверушкин Б.Н. Алгоритмы квазигидродинамической модели для расчета процессов в электронной плазме субмикронных полупроводниковых структур // Матем. Моделирование. 1989. Т. 1. № 5. С. 11–22.
- [19] Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
- [20] Pisarenko I.V., Ryndin E.A. Development of drift-diffusion numerical models of high-speed on-chip photodetectors with heterojunctions // Proc. of SPIE. 2016. V. 10224. P. 102240Z.
- [21] Абрамов И.И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Минск: БГУ, 1999. 189 с.
- [22] URL: <https://www.gnu.org/software/octave/> (дата обращения: 15.04.2018).
- [23] Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. М.: Физматкнига, 2011. 448 с.
- [24] Li C., Xue C.-L., Li C.-B., Liu Z., Cheng B.-W., Wang Q.-M. High bandwidth surface-illuminated InGaAs/InP uni-travelling-carrier photodetector // Chin. Phys. B. 2013. V. 22. P. 118503.

Extended Drift-Diffusion Model of High-Speed Photodetectors for On-Chip Optical Interconnections

I.V. Pisarenko, E.A. Ryndin

Southern Federal University, ivan123tgn@yandex.ru, earyndin@sfnedu.ru

Abstract — $A^{III}B^V$ injection laser-modulator based on the principle of the controlled spatial relocation of charge carrier density peaks in quantum regions of valence and conduction bands is an advanced optoelectronic device offering new possibilities in the field of on-chip optical interconnecting. To realize the laser-modulator-based on-chip interconnections, high-performance integrated photodetectors are required. The subpicosecond response time and technological compatibility with the laser-modulator and electronic elements of integrated circuit are the main requirements for the photosensitive devices being considered. In this paper, we propose the extended drift-diffusion model of $A^{III}B^V$ photodetectors. The model includes the basic transport equations, comprehensive mobility model and non-stationary energy balance equation for electrons. The last one is necessary for the calculation of electron temperature distribution in the device structure. The aforementioned model takes into account the effects of carrier drift velocity saturation and electron intervalley transition. For the implementation of the model, we developed the finite difference numerical simulation technique based on the Newton's method and dedicated software. We applied these aids for the simulation of *InP/InGaAs* uni-travelling-carrier photodiode. According to the simulation results, the device response time is about a few picoseconds. Thus, it is reasonable to develop new methods of performance improvement for on-chip semiconductor photodetectors.

Keywords — optical interconnections for integrated circuits, high-speed photodetectors, numerical simulation, extended drift-diffusion model, comprehensive mobility model.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant № 18-37-00432).

REFERENCES

- [1] Ceyhan A., Naeemi A. Cu interconnect limitations and opportunities for SWNT interconnects at the end of the roadmap // IEEE Trans. Electron Dev. 2013. V. 60. P. 374–382.
- [2] Das D., Rahaman H. Carbon Nanotube and Graphene Nanoribbon Interconnects. CRC Press, 2014.
- [3] Subash S., Kolar J., Chowdhury M.H. A new spatially rearranged bundle of mixed carbon nanotubes as VLSI interconnection // IEEE Transactions on Nanotechnology. 2013. V. 12. P. 3–12.
- [4] Buckel W., Kleiner R. Superconductivity Fundamentals and Applications. Wiley-VCH Verlag, 2004.
- [5] Zhou Z., Tu Z., Li T., Wang X. Silicon Photonics for Advanced Optical Interconnections // Journal of Lightwave Technology. 2015. V. 33. № 4. P. 928–933.
- [6] Miller, D.A.B. Optical interconnects to electronic chips // Appl. Opt. 2010. V. 49. P. F59–F70.

- [7] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Metod postroeniya integral'nyh sistem opticheskoy kommutacii mnogoyadernyh UBIS (Method of design of integrated optical commutation systems for multi-core ULSIs) // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2011. №4 (117). S. 21–27.
- [8] Pisarenko I.V., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-drift model of injection lasers with double heterostructure // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Vol. 586. P. 012015.
- [9] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-Drift Model of the Transport of Charge Carriers and Photons in Injection Lasers // Technical Physics Letters. 2015. V. 41. №. 6. P. 587–590.
- [10] Ryndin E.A., Denisenko M.A. A Functionally Integrated Injection Laser-Modulator with the Radiation Frequency Modulation // Russian Microelectronics. 2013. V. 42. № 6. P. 360–362.
- [11] Ryndin E.A., Denisenko M.A., Isaeva A.S. Fiziko-topologicheskaya i skhemotekhnicheskaya modeli funkcional'no integrirovannyh inzhekcionnyh lazerov-modulyatorov (Physical-topological and circuit models of functionally integrated injection lasers-modulators) // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2015. № 9 (170). S. 23–30.
- [12] Abramov I.I. Osnovy modelirovaniya ehlementov mikro- i nanoehlektroniki (Fundamentals of simulation of micro-and nanoelectronic elements). LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 437 s.
- [13] Vasileska D., Goodnick S. M., Klimeck G. Computational Electronics: Semiclassical and Quantum Device Modeling and Simulation. CRC Press, 2010.
- [14] Palankovski V., Quay R. Analysis and Simulation of Heterostructure Devices. Wien: Springer-Verlag, 2004.
- [15] Pisarenko I.V., Ryndin E.A. Fiziko-topologicheskoe modelirovanie fotodetektorov integral'nyh sistem opticheskoy kommutacii na osnove materialov tipa $A^{III}B^V$ s uchetom zavisimostej podvizhnostej nositelej zaryada ot napryazhennosti ehlektricheskogo polya (Physical and layout simulation of photodetectors for $A^{III}B^V$ integrated optical commutation systems accounting electric field dependence of carrier mobility) // Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanoehlektronnyh sistem – 2016. Sbornik trudov / pod obsch. red. akademika RAN A.L. Stempkovskogo. M.: IPPM RAN, 2016. CHast' IV. S. 16–23.
- [16] Pisarenko I.V., Ryndin E.A. Numerical Drift-Diffusion Simulation of GaAs p-i-n and Schottky-Barrier Photodiodes for High-Speed AIII₂BV On-Chip Optical Interconnections // Electronics. 2016. V. 5 (3). P. 52.
- [17] Dragunov V.P., Neizvestnyj I.G., Gridchin V.A. Osnovy nanoehlektroniki (Fundamentals of nanoelectronics). Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. 496 s.
- [18] Biryukova L.YU., Nikolaeva V.A., Ryzhij V.I., CHetverushkin B.N. Algoritmy kvazigidrodinamicheskoy modeli dlya rascheta processov v ehlektronnoj plazme submikronnyh poluprovodnikovyyh struktur (Algorithms for quasi-hydrodynamic models for calculation of processes in electron plasma of submicron semiconductor structures) // Matem. Modelirovanie. 1989. T. 1. № 5. S. 11–22.
- [19] Samarskij A.A., Gulin A.V. Chislennyye metody (Numerical methods). M.: Nauka, 1989. 432 s.
- [20] Pisarenko I.V., Ryndin E.A. Development of drift-diffusion numerical models of high-speed on-chip photodetectors with heterojunctions // Proc. of SPIE. 2016. V. 10224. P. 102240Z.
- [21] Abramov I.I. Modelirovanie fizicheskikh processov v ehlementah kremnievyh integral'nyh mikroskhem (Simulation of physical processes in silicon integrated circuit elements). Minsk: BGU, 1999. 189 s.
- [22] URL: <https://www.gnu.org/software/octave/> (access date: 15.04.2018).
- [23] Filachev A.M., Taubkin I.I., Trishenkov M.A. Tverdotel'naya photoehlektronika. Fotodiody (Solid-state photoelectronics. Photodiodes). M.: Fizmatkniga, 2011. 448 s.
- [24] Li C., Xue C.-L., Li C.-B., Liu Z., Cheng B.-W., Wang Q.-M. High bandwidth surface-illuminated InGaAs/InP untravelling-carrier photodetector // Chin. Phys. B. 2013. V. 22. P. 118503.