

Численное моделирование быстродействующих фотодетекторов на основе материалов типа $A^{III}B^V$ в диффузионно-дрейфовом приближении

И.В. Писаренко¹, Е.А. Рындин¹

¹Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, Шевченко 2, Таганрог, Россия, 347922

Аннотация. В данной статье рассматривается фундаментальная научно-техническая проблема исследования и разработки быстродействующих оптоэлектронных приборов, предназначенных для межэлементных оптических межсоединений в интегральных схемах. В настоящее время разработаны инжекционные лазеры с функционально интегрированными модуляторами излучения и двойными $A^{III}B^V$ наногетероструктурами, которые, согласно результатам численного моделирования, могут генерировать амплитудно- и частотно-модулированные оптические импульсы длительностью 1 пс и менее. Следовательно, применение лазеров-модуляторов в составе интегральных оптических межсоединений требует технологически совместимых фотодетекторов с субпикосекундным временем отклика. Целью данного исследования является разработка моделей, методов моделирования и прикладного программного обеспечения, позволяющих моделировать процессы транспорта носителей заряда в структурах быстродействующих $A^{III}B^V$ фотодетекторов и оценивать их основные характеристики. Предлагаемая модель основана на диффузионно-дрейфовом приближении полуклассического подхода к моделированию полупроводниковых приборов.

1. Введение

В данной работе рассматривается фундаментальная научно-техническая проблема улучшения характеристик межэлементных соединений в интегральных устройствах микро- и нанoeлектроники. Одним из перспективных направлений исследования является внедрение конструктивно и технологически интегрированных оптических связей на верхних уровнях иерархии системы межсоединений интегральной схемы (ИС) [1]. В частности, рассматривается возможность создания гибридных и монолитно интегрированных оптоэлектронных систем, осуществляющих коммутацию ядер в многоядерных ИС ультрабольшой степени интеграции. В работах [2]–[4] 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. 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 моделей и средств моделирования переходных процессов, протекающих в структурах быстродействующих $A^{III}B^V$ фоточувствительных приборов при детектировании субпикосекундных и пикосекундных частотно- и амплитудно-модулированных лазерных импульсов, и их применение для исследования характеристик ряда перспективных конструкций.

2. Модели

В данной работе для моделирования быстродействующих полупроводниковых фотодетекторов на основе материалов типа $A^{III}B^V$ предлагается использовать диффузионно-дрейфовое приближение полуклассического подхода. Базовыми уравнениями стандартной диффузионно-дрейфовой модели являются [5]:

- уравнения для электронной и дырочной составляющих плотности тока $\vec{j}_n$ и $\vec{j}_p$:

$$\vec{j}_n = -q\mu_n [n \cdot \text{grad}(\varphi + V_n) - \varphi_T \cdot \text{grad}(n)], \quad (1)$$

$$\vec{j}_p = -q\mu_p [p \cdot \text{grad}(\varphi - V_p) + \varphi_T \cdot \text{grad}(p)], \quad (2)$$

где q – элементарный заряд; μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок; n , p – концентрации электронов и дырок; φ – электростатический потенциал; V_n , V_p – гетероструктурные потенциалы в зоне проводимости и валентной зоне; φ_T – температурный потенциал;

- уравнения непрерывности для электронов и дырок:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \text{div}(\vec{j}_n) + G - R; \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \cdot \text{div}(\vec{j}_p) + G - R, \quad (4)$$

где t – время; G , R – скорости генерации и рекомбинации электронно-дырочных пар;

- уравнение Пуассона для электростатического поля:

$$\text{div}[\varepsilon \cdot \text{grad}(\varphi)] = -\frac{q}{\varepsilon_0} (p - n + N_D - N_A), \quad (5)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; ε_0 – диэлектрическая постоянная; N_D , N_A – концентрации ионизированных доноров и акцепторов.

Граничные условия для системы уравнений (1)–(5) подробно рассматриваются в работах [5], [6]. Для расчета скоростей генерации и рекомбинации носителей заряда используются дополнительные модели биполярной оптической генерации, межзонной и Оже рекомбинации и рекомбинации Шокли-Рида-Холла [6]. Высокополевые эффекты, оказывающие существенное влияние на характеристики приборов на основе материалов типа $A^{III}B^V$, учитываются с помощью комплексной модели подвижности, реализация которой требует решения уравнения баланса энергии для электронов [7]:

$$\text{div}(\vec{S}_n) = -\text{grad}(\varphi + V_n) \cdot \vec{j}_n - \frac{3k}{2} \cdot \left[\frac{\partial(nT_n)}{\partial t} + (R - G) \cdot T_n + n \cdot \frac{T_n - T}{\tau_{w,n}} \right], \quad (6)$$

где $\overline{S_n}$ – плотность потока энергии электронов, включающая диффузионную и дрейфовую составляющие; k – постоянная Больцмана; T_n – электронная температура; $\tau_{w,n}$ – среднее время релаксации энергии электронов; T – температура кристаллической решетки.

3. Методы моделирования

Для реализации расширенной диффузионно-дрейфовой модели (1)–(6) разработаны две методики численного моделирования, основанные на методе конечных разностей [8]. В обоих случаях для расчета начальных условий решается полная стационарная система диффузионно-дрейфовых уравнений. Первая методика предполагает использование явной разностной схемы для дискретизации производных по времени, итерационного метода Гummеля, противоположной разностной схемы и комбинированного базиса переменных $\{n, p, \varphi, F_n, F_p\}$, где F_n, F_p – экспоненты квазиуровней Ферми для электронов и дырок [6]. Вторая методика основана на применении неявной разностной схемы для дискретизации производных по времени, итерационного метода Ньютона и базиса переменных Слотбума $\{\varphi, F_n, F_p\}$ [5]. Обе предлагаемые методики позволяют получать адекватные результаты моделирования и обеспечивают устойчивость и сходимость численного решения диффузионно-дрейфовой системы уравнений в широком диапазоне электрофизических и конструктивно-технологических параметров и управляющих воздействий. Для численного моделирования быстродействующих фотодетекторов разработаны прикладные программные средства в среде GNU Octave.

4. Результаты моделирования

В данной работе предлагаемые модели, методики численного конечно-разностного моделирования и прикладные программные средства апробированы для исследования фотодиода с переносом электронов (uni-travelling-carrier, UTC), работающего в режиме детектирования пикосекундных оптических импульсов, генерируемых быстродействующим лазером с функционально интегрированным частотным модулятором [4]. Кроме того, рассматривается влияние высокополевых эффектов и динамики распространения фотонов в резонаторе на время отклика фотодиодов при детектировании субпикосекундных амплитудно-модулированных лазерных импульсов.

5. Заключение

Разработанные модели и средства моделирования позволяют исследовать переходные процессы в структурах быстродействующих фоточувствительных приборов на основе материалов типа $A^{III}B^V$ и оценивать их ожидаемые характеристики. UTC фотодиод может быть использован в качестве быстродействующего детектора оптических импульсов, генерируемых лазером с функционально интегрированным частотным модулятором.

6. Литература

- [1] Miller, D.A.B. Optical interconnects to electronic chips / D.A.B. Miller // *Applied Optics*. – 2010. – Vol. 49. – P. F59-F70.
- [2] Konoplev, B.G. Components of Integrated Microwave Circuits Based on Complementary Coupled Quantum Regions / B.G. Konoplev, E.A. Ryndin, M.A. Denisenko // *Russian Microelectronics*. – 2015. – Vol. 44(3). – P. 190-196.
- [3] Konoplev, B.G. Injection Laser with a Functionally Integrated Frequency Modulator Based on Spatially Shifted Quantum Wells / B.G. Konoplev, E.A. Ryndin, M.A. Denisenko // *Technical Physics Letters*. – 2013. – Vol. 39(11). – P. 986-989.
- [4] Коноплев, Б.Г. Исследование транспорта носителей заряда в инжекционном лазере с частотной модуляцией оптического излучения / Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, И.В. Писаренко // *Известия вузов. Электроника*. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 217-229.

- [5] Абрамов, И.И. Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных схем. – Мн.: БГУ, 1999. – 189 с.
- [6] Pisarenko, I.V. Numerical Drift-Diffusion Simulation of GaAs p-i-n and Schottky-Barrier Photodiodes for High-Speed AIII^{III}B^V On-Chip Optical Interconnections / I.V. Pisarenko, E.A. Ryndin // Electronics. – 2016. – Vol. 5(3). – P. 52.
- [7] Palankovski, V. Analysis and Simulation of Heterostructure Devices / V. Palankovski, R. Quay. – Wien: Springer-Verlag, 2004.
- [8] Самарский, А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.

Благодарности

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

Numerical Simulation of High-Speed A^{III}B^V Photodetectors within Drift-Diffusion Approximation

I.V. Pisarenko¹, E.A. Ryndin¹

¹Southern Federal University, Institute of Nanotechnology, Electronics and Electronic Equipment Engineering, Shevchenko 2, Taganrog, Russia, 347922

Abstract. In this paper, we consider the problem of research and development of high-speed optoelectronic devices designed for on-chip optical interconnecting in integrated circuits. Previously, we proposed the injection laser with functionally integrated optical modulator and double A^{III}B^V heterostructure. Numerical simulation showed that the laser-modulator could generate amplitude- and frequency-modulated optical pulses with the duration of 1 ps or less. Hence, the application of the laser-modulator in on-chip optical interconnection requires technologically capable photodetector with subpicosecond response time. This research is aimed at the development of model, numerical simulation technique and applied software allowing to describe carrier transport in high-speed A^{III}B^V photosensitive devices and estimate their expected characteristics. The model is based on the drift-diffusion approximation of the semiclassical approach to simulation of semiconductor devices.