

УДК 621.373.826

## ФУНКЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР-МОДУЛЯТОР ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

<sup>1</sup>Денисенко М.А., <sup>1,2</sup>Рындин Е.А., <sup>3</sup>Левин Д.Д.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Южный федеральный университет», Таганрог, e-mail: dema.bmfe@gmail.com;

<sup>2</sup>ФГБУН «Южный научный центр Российской академии наук»,  
Ростов-на-Дону, e-mail: rynenator@gmail.com;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет МИЭТ»,  
Зеленоград, e-mail: vkn@nanotube.ru

Одним из наиболее перспективных путей построения сложных быстродействующих систем мониторинга и анализа информации в настоящее время является создание гибридных интегральных схем, сочетающих использование кремниевых технологий и материалов группы  $A^{III}B^V$ . Рассмотрен метод построения быстродействующих интегральных модулируемых источников излучения для оптической коммутации компонентов оптоэлектронных систем мониторинга параметров и состояния. Предложены принципы построения и структура интегрального инжекционного лазера с функционально интегрированным модулятором на основе управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда, обеспечивающим амплитудную модуляцию стимулированного излучения сигналами терагерцового диапазона. Представлены модель и методика моделирования быстродействующих интегральных лазеров-модуляторов для оптоэлектронных компонентов систем мониторинга и обработки информации. Обсуждаются результаты численного моделирования. Приведены рекомендации по проектированию сверхбыстродействующих интегральных систем оптической коммутации компонентов оптоэлектронных систем мониторинга.

**Ключевые слова:** наногетероструктура, инжекционный лазер, амплитудная модуляция, терагерцовый диапазон

## FUNCTIONALLY INTEGRATED HIGH-SPEED INJECTION LASER-MODULATOR FOR OPTOELECTRONIC COMPONENTS OF MONITORING SYSTEMS

<sup>1</sup>Denisenko M.A., <sup>1,2</sup>Ryndin E.A., <sup>3</sup>Levin D.D.

<sup>1</sup>Southern Federal University, Taganrog, e-mail: kb@tti.sfedu.ru;

<sup>2</sup>Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences,  
Rostov-on-Don, e-mail: rynenator@gmail.com;

<sup>3</sup>National Research University of Electronic Technology MIET, Zelenograd, e-mail: vkn@nanotube.ru

One of the most promising ways of constructing complex high-speed monitoring and information analysis systems is creating a hybrid integrated circuits that combine the use of silicon technology and  $A^{III}B^V$  materials. The method of construction of high-speed integrated light sources-modulators for optical commutation of optoelectronic monitoring systems components is presented. The principle of construction and structure of the functionally integrated injection laser and modulator based on a managed amplitude maximum of the charge carriers wave functions relocation, providing amplitude modulation of terahertz signals stimulated emission are suggested. The model and methodology for high-speed integrated laser-modulators for optoelectronic components of monitoring and processing simulation are submitted. The results of numerical modeling of high-speed injection laser are discussed. The recommendations for the design of high-speed integrated optical switching systems components monitoring systems are requested.

**Keywords:** nanoheterostructures, injection laser, amplitude modulation, terahertz range

Оптоэлектроника как научно-техническое направление предполагает развитие целого ряда базовых технологий и главным образом технологии создания новых типов высокоэффективных полупроводниковых материалов и структур на их основе, включая квантово-размерные структуры [5, 6].

### Метод построения модулируемых источников оптического излучения

Одним из наиболее перспективных путей построения сложных быстродействующих систем мониторинга и анализа информации в настоящее время является создание гибридных УБИС: отдельные ядра на кристалле, содержащие схемы обработки электронных сигналов, изготавливаются

на основе кремния, а системы оптической коммутации ядер формируются на основе полупроводниковых соединений типа  $A^{III}B^V$  и функционально интегрируются с кремниевыми ядрами в едином технологическом процессе, что обеспечивает интеграцию оптоэлектронного интерфейса для соединений между компонентами УБИС. Кроме того, оптоэлектронные компоненты могут использоваться для получения, преобразования и передачи информации непосредственно внутри систем.

Инжекционные лазеры являются важнейшими элементами интегральных оптоэлектронных информационно-измерительных систем мониторинга. В данной работе описывается структура функционально

интегрированного лазера-модулятора, обеспечивающего внутреннюю амплитудную модуляцию оптического излучения. Это устройство имеет ряд преимуществ, в частности, позволяет отказаться от использования модуляторов как отдельных устройств, кроме того, описываемые устройства значительно превосходят лазеры с модуляцией посредством управления плотностью тока накачки по быстродействию [2].

Учитывая масштабность современных исследований, направленных на создание различных по назначению систем терагерцового диапазона (в том числе и интегральных систем оптической коммутации компонентов систем мониторинга и обработки информации), повышение максимальной частоты амплитудной модуляции излучения, генерируемого интегральными инжекционными лазерами, является актуальной проблемой.

В работах [7, 9, 11] представлены результаты разработки и исследования интегральных логических элементов и коммутаторов с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в связанных квантовых областях с взаимодополняющими типами проводимости на основе гетероструктур материалов группы  $A^{III}B^V$ . Показано, что использование методов зонной инженерии, принципа управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в сочетании с принципами комплементарной логики обеспечивает сокращение минимального времени задержки интегральных элементов до значений менее 0,2 пс.

В данной работе исследуется возможность создания на основе перечисленных принципов интегральных инжекционных лазеров с функционально интегрированными амплитудными модуляторами, обеспечивающими модуляцию стимулированного излучения в терагерцовом диапазоне частот для оптической коммутации компонентов систем мониторинга и обработки информации. Областью применения таких инжекционных лазеров являются интегральные системы оптической коммутации многоядерных УБИС, телекоммуникационные и вычислительные системы, средства связи, высокочувствительные системы медицинской диагностики, системы регистра-

ции и анализа быстропротекающих физических процессов и др.

Основными требованиями, предъявляемыми к модуляторам лазерного излучения интегральных систем оптической коммутации компонентов систем мониторинга, являются высокое быстродействие (соответствующее терагерцовому, а в ближайшей перспективе – петагерцовому диапазону частот) и возможность изготовления в едином технологическом цикле с инжекционными лазерами и другими компонентами систем мониторинга.

### Модель функционально-интегрированных лазеров-модуляторов

Традиционно динамику функционирования инжекционных лазеров описывают уравнениями кинетики, представляющими собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Эта модель не позволяет учесть влияние пространственного распределения концентраций подвижных носителей заряда и фотонов в активной области лазера на интенсивность генерируемого стимулированного излучения [1, 4].

Учет данного фактора может быть осуществлен в процессе численного решения фундаментальной системы уравнений (ФСУ) полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении, однако в этом случае не учитывается влияние фотонов лазерной моды на распределение концентраций подвижных носителей, скорость излучательной рекомбинации и, как следствие, на интенсивность генерируемого излучения [3].

Особенность структуры предложенного устройства состоит в том, что в отличие от традиционных инжекционных лазеров предусмотрены два дополнительных управляющих контакта, создающих в активной области лазера-модулятора поперечное управляющее поле.

Для решения задачи моделирования инжекционных лазеров-модуляторов в данной работе используется комплексная модель, учитывающая влияние пространственного распределения концентраций электронов, дырок и фотонов в активной области лазера на интенсивность генерируемого стимулированного излучения. Разработанная модель в векторной форме в базисе переменных  $\{n, p, \phi, f\}$  для двух пространственных измерений может быть записана следующим образом:

$$\varepsilon_0 \operatorname{div}(\varepsilon \cdot \operatorname{grad}(\phi)) = e(n - p - N); \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \operatorname{div}(\overline{j_n}) + G - R; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \operatorname{div}(\overline{j_p}) + G - R; \quad (3)$$

$$\frac{df}{dt} = -\frac{f}{\tau_f} + \beta \frac{n}{\tau_s} + \alpha \cdot n \cdot f; \quad (4)$$

$$\overline{j_n} = -e\mu_n n \cdot \operatorname{grad}(\phi + V_h) + eD_n \operatorname{grad}(n); \quad (5)$$

$$\overline{j_p} = -e\mu_p p \cdot \operatorname{grad}(\phi - V_H) - eD_p \operatorname{grad}(p); \quad (6)$$

$$N = N_D - N_A, \quad (7)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\phi$  – электростатический потенциал;  $e$  – электростатический потенциал;  $n$  – концентрация электронов;  $p$  – концентрация дырок;  $N$  – эффективная концентрация примесей;  $t$  – время протекания процессов в активной области лазера;  $j_n$  – электронная составляющая плотности тока;  $j_p$  – дырочная составляющая плотности тока;  $G$  – скорость генерации электронно-дырочных пар в активной области;  $R$  – скорость рекомбинации электронно-дырочных пар в активной области;  $f$  – плотность фотонов в лазерной моде;  $\tau_f$  – время жизни фотона в резонаторе;  $\tau_s$  – время спонтанной излучательной рекомбинации;  $\alpha$  – коэффициент оптического усиления;  $\beta$  – доля спонтанного излучения, попадающего в лазерную моду;  $\mu_n$  – подвижность электронов;  $\mu_p$  – подвижность дырок;  $V_h$  – гетероструктурный потенциал в области зоны проводимости;  $V_H$  – гетероструктурный потенциал в области валентной зоны;  $D$  – коэффициент диффузии электронов;  $D^n$  – коэффициент диффузии дырок;  $N_D$  – концентрация доноров;  $N_A$  – концентрация акцепторов.

Граничные условия на металлических контактах принимаются в соответствии с условиями Дирихле на свободных поверхностях гетероструктуры – Неймана.

Начальные условия определяются по результатам решения соответствующей стационарной задачи.

В виду того, что предложенная модель не учитывает квантовых эффектов в активной области структуры лазера-модулятора, была разработана методика численного моделирования, предполагающая на одном из этапов оценку быстродействия моделируемого элемента посредством численного решения нестационарного уравнения Шредингера. Основные этапы предложенной методики моделирования могут быть сформулированы следующим образом:

– на начальных этапах решается нестационарное уравнение Шредингера с целью оценки быстродействия системы с учетом квантовых эффектов. Для получения на-

чального условия выполняется самосоглашенное решение стационарного уравнения Шредингера и уравнения Пуассона;

– для получения начального приближения к решению разработанной комплексной модели выполняется численное решение ФСУ полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении в базе «потенциал, экспоненты квазиуровней Ферми для электронов и дырок» методом конечных разностей с использованием итерационной схемы Гуммеля в сочетании с методом продолжения решения по параметру (параметром является напряжение питания лазера);

– с использованием полученного начального приближения выполняется численное решение разработанной комплексной модели с учетом пространственного распределения концентраций электронов, дырок и фотонов методом Ньютона–Рафсона в сочетании с методом продолжения решения по параметру (параметром является управляющее напряжение);

– применение метода продолжения решения по параметру позволяет эффективно решить проблему начального приближения при моделировании режима высокого уровня инжекции, характерного для моделируемых лазеров-модуляторов, и повысить скорость сходимости вычислительного процесса [8, 10].

На основе предложенных моделей и методики моделирования разработаны программные средства численного моделирования функционально интегрированных лазеров-модуляторов. Отдельные результаты численного моделирования представлены на рис. 1–3.

В соответствии с полученными результатами численного решения уравнений разработанной модели управляемая поперечным электрическим полем передислокация максимумов плотности электронов и дырок в пространственно смещенных квантовых областях лазера-модулятора обеспечивает амплитудную модуляцию стимулированного излучения с коэффициентом, превышающим 0,9 при неизменном токе по цепи питания лазера.

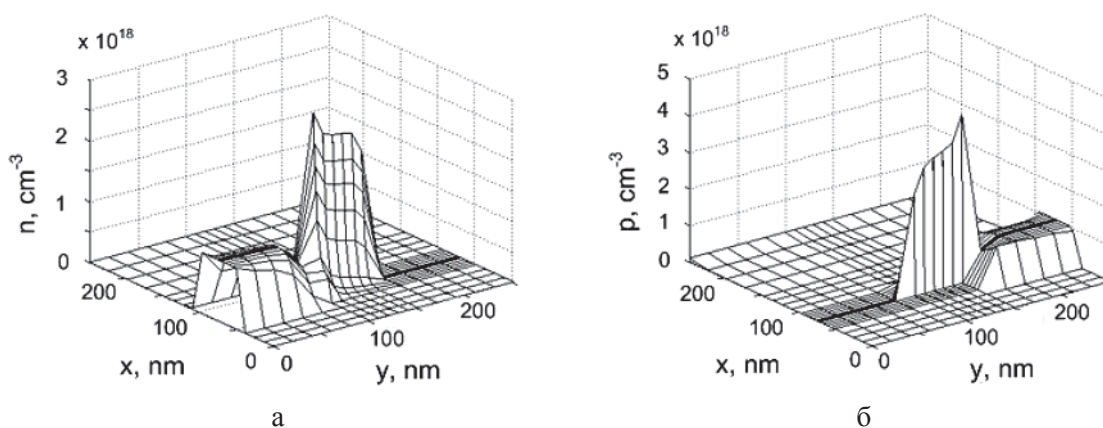


Рис. 1. Распределение концентрации электронов и дырок по координатам в лазере-модуляторе в режиме лазерной генерации; а – распределение концентрации электронов по координатам; б – распределение концентрации дырок по координатам

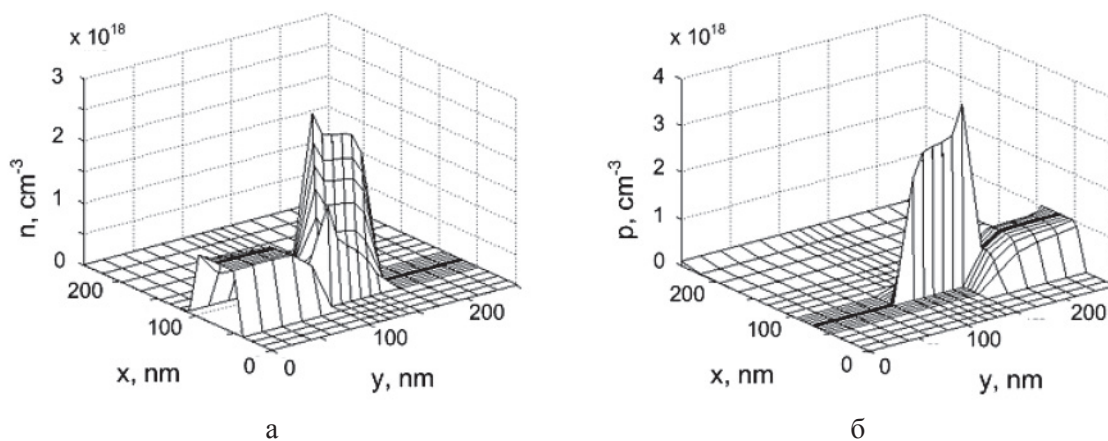


Рис. 2. Распределение концентрации электронов и дырок по координатам в лазере-модуляторе в отсутствие лазерной генерации; а – распределение концентрации электронов по координатам; б – распределение концентрации дырок по координатам

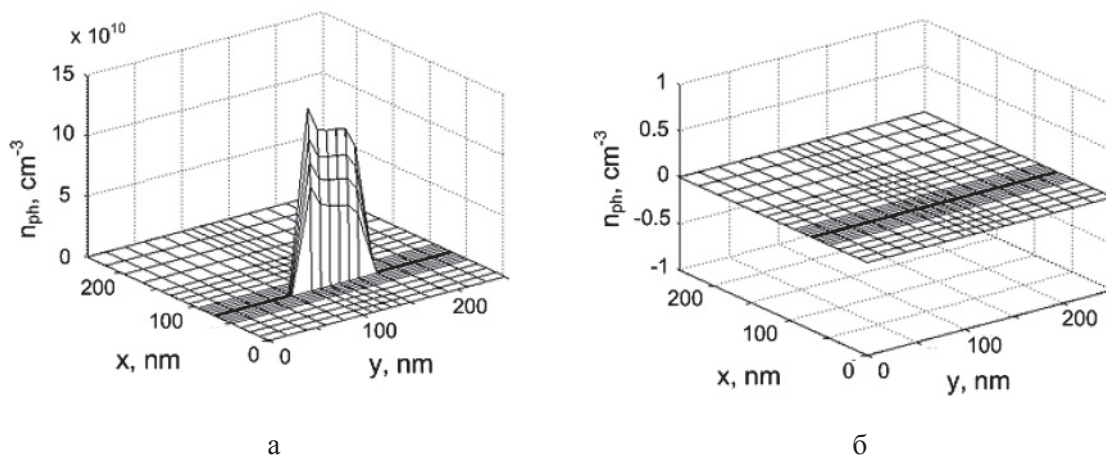


Рис. 3. Распределения концентрации фотонов по координатам в лазере-модуляторе в режиме лазерной генерации; а – в режиме лазерной генерации; б – в отсутствие лазерной генерации

По результатам численного решения уравнения Шредингера показано, что время управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в квантовых областях составляет (0,09–0,13) пс в зависимости от ширины данных областей. Таким образом, максимальная частота амплитудной модуляции стимулированного излучения в рассматриваемых интегральных системах оптической коммутации может достигать единиц ТГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Гос. контракт № 16.740.11.0425 от 03.12.2010, гос. соглашение № 14.А18.21.0126) в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

### Список литературы

1. Абрамов И.И., Харитонов В.В., Шашкова А.Г. Численное моделирование элементов интегральных схем. – Минск: Выш. шк., 1990. – 224 с.
2. Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применение в физике, электронике и технологии // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 9. – С. 1068–1086.
3. Бондаренко Д.В. Моделирование динамического поведения инжекционного лазера при проектировании оптических систем связи // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре. – 1999. – № 5–6. – С. 44–45.
4. Бубенников А.Н., Садовников А.Д. Физико-технологическое проектирование биполярных элементов кремниевых БИС. – М.: Радио и связь, 1991. – 288 с.
5. Ермаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника. – М.: Техносфера, 2004. – 416 с.
6. Ковальчук М.В. Конвергенция наук и технологий – прорыв в будущее // Российские нанотехнологии. – 2011. – Т. 6, № 1–2. – С. 13–23.
7. Коноплев Б.Г., Рындин Е.А. Элементная база нанокomпьютеров на основе связанных квантовых областей // Вестник Южного научного центра РАН. – 2005. – Т. 1, № 3. – С. 22–28.
8. Рындин Е.А. Разработка и исследование быстродействующих интегральных наноструктур СБИС с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда. – Таганрог, 2007. – С. 374–386.
9. Рындин Е.А. Сверхбыстродействующие электронные коммутаторы на основе управляемой передислокации максимума волновой функции носителей заряда // Вестник Южного научного центра РАН. – 2006. – Т. 2, № 2. – С. 8–16.

10. Inoue K., Sakaki H., Yoshino J., Hotta T. Self-consistent calculation of electronic states in AlGaAs/GaAs/AlGaAs selectively doped double heterojunction systems under electric fields // J. Appl. Phys. – 1985. – Vol. 58, no. 11. – P. 4277–4281.

11. Konoplev B.G., Ryndin E.A. A Study of the Transport of Charge Carriers in Coupled Quantum Regions // Semiconductors. – 2008. – Vol. 42, № 13. – P. 1462–1468.

### References

1. Abramov I.I., Haritonov V.V., Shashkova A.G. Chislenoe modelirovanie elementov integralnyh shem // Minsk.: Vysh. shk., 1990. 224 p.
2. Alferov J.I. Dvoynye heterostruktury: kontseptsiya i primenenie v fizike, elektronike i tekhnologii. Uspekhi fizicheskikh nauk. 2002. T. 172, no. 9. pp. 1068–1086
3. Bondarenko D.V. Modelirovanie dinamicheskogo povedeniya inzhekcionnogo lazera pri proektirovanii opticheskikh sistem svyazi // Tehnologija i konstruirovaniye v elektronnoi' apparature. 1999. no. 5-6. pp. 44–45.
4. Bubennikov A.N., Sadovnikov A.D. Fiziko-tekhnologicheskoe proektirovanie bipolyarnykh elementov kremniyevykh BIS // M.: Radio i svjaz', 1991. 288 p.
5. Ermakov O.N. Prikladnaya optoelektronika. Moscow: Technosphere, 2004. 416 p.
6. Kovalchuk M.V. Konvergenciya nauk i tekhnologiy – proryv v buduschee. Rossiyskie nanotekhnologii. 2011. T. 6, no. 1–2. pp. 13–23.
7. Konoplev B.G., Ryndin E.A. Elementnaya baza nanokompyuterv na osnove svyazannykh kvantovykh oblastey. Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN 2005. T. 1, no. 3. pp. 22–28.
8. Ryndin E.A. Razrabotka i issledovanie bystrodeystvuyuschih integral'nykh nanostruktur SBIS s upravlyaemoi' perezdislokaciei' maksimuma amplitudy volnovykh funktsiy nositelei zaryada // Taganrog, 2007. pp. 374–386.
9. Ryndin E.A. Sverkhbystrodeystvuyuschie electronnye kommutatory na osnove upravlyaemoy perezdislokatsii maksimuma volnovoy funktsii nositeley zaryada. Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN 2006. T. 2, no. 2. pp. 8–16.
10. Inoue K., Sakaki H., Yoshino J., Hotta T. Self-consistent calculation of electronic states in AlGaAs/GaAs/AlGaAs selectively doped double heterojunction systems under electric fields // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58, no. 11. pp. 4277–4281.
11. Konoplev B.G., Ryndin E.A. A Study of the Transport of Charge Carriers in Coupled Quantum Regions // Semiconductors. 2008. Vol. 42, no. 13. pp. 1462–1468.

### Рецензенты:

Агеев О.А., д.т.н., профессор, директор НОЦ «Нанотехнологии»;

Жорник А.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической, общей физики и технологии ФГБОУ ВПО ТГПИ.

Работа поступила в редакцию 26.10.2012.