

Метод проектирования функционально-интегрированных лазеров-модуляторов

Е.А. Рындин, М.А. Денисенко

Современные технологии производства интегральной электроники направлены, прежде всего, на увеличение производительности интегральных схем. В настоящее время прослеживается тенденция совмещения компонентов интегральной микроэлектроники и микросистемной техники [1 – 3]. Становится актуальным подход упрощения архитектуры вычислительного ядра с одновременным увеличением количества таких ядер [4], что позволяет уменьшить стоимость разработки и производства вычислительных систем в целом. Ведутся активные разработки систем для коммутации вычислительных ядер посредством оптических линий связи [5]. Одним из перспективных способов повышения быстродействия, снижения потребляемой мощности и энергии переключения интегральных элементов является комплексное использование кремния и альтернативных полупроводниковых материалов, в частности, материалов группы $A^{III}B^V$. Применительно к интегральным системам оптической коммутации технологии создания сверхбыстродействующей элементной базы сверхбольших интегральных схем (СБИС) на основе GaAs на кремниевых пластинах особенно важны и перспективны вследствие трудности создания источников лазерного излучения на основе кремния [6].

В работе [7] описаны структура и модель быстродействующего интегрального инжекционного лазера с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда, в работах [8, 9] рассматриваются вопросы применения данного устройства в качестве источника стимулированного излучения для интегральных систем оптической коммутации, а также метод построения данных систем. Примечательно, что предложенный метод построения предполагает

изготовление всей системы в едином технологическом процессе с кремниевыми ядрами СБИС с использованием стандартных технологических операций арсенид-галлиевой технологии.

Определенный интерес представляет разработка метода проектирования элементной базы таких систем, что позволит существенно упростить прототипирование и разработку систем оптической коммутации и многоядерных СБИС в целом. Такой метод позволит автоматически варьировать параметры оптической системы на этапе проектирования в зависимости от предъявляемых требований.

В основе разработки метода проектирования элементов систем оптической коммутации лежит комплексный анализ уравнений и функций, описывающих электрические и оптические параметры лазерных гетероструктур, а также электрооптических модуляторов и резонаторов Фабри-Перро.

С учетом многопланового и многомерного характера решаемой задачи, а также границ применимости полученных моделей [7], разработан метод проектирования рассматриваемых наноструктур инжекционных лазеров с функционально интегрированными амплитудными модуляторами, который на верхнем уровне представления включает следующие основные этапы:

- этап 1. Ввод входных данных;
- этап 2. Присвоение первоначальных значений выходных данных с целью получения начального приближения для дальнейших расчетов;
- этап 3. Составление геометрической модели анализируемой наноструктуры инжекционного функционально-интегрированного лазера-модулятора;
- этап 4. Оценка предельного быстродействия лазера-модулятора (максимальной частоты амплитудной модуляции стимулированного излучения) с учетом квантовых эффектов посредством численного решения нестационарного уравнения Шредингера с соответствующими граничными и начальными условиями в одномерном приближении [7];

– этап 5. Оценка коэффициента модуляции стимулированного излучения, пороговой плотности тока накачки, потребляемой мощности, минимального напряжения питания и минимальной амплитуды управляющих импульсов по результатам численного решения комбинированной нестационарной модели [10]:

$$\varepsilon_0 \nabla(\varepsilon \cdot \nabla \varphi) = e(n - p - N);$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla(\mu_n (n \cdot \nabla(\varphi + V_n) - \varphi_T \nabla n)) - (n - n_0) \left(\frac{1}{\tau_S} + \alpha \cdot n_{ph} \right);$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\nabla(\mu_p (p \cdot \nabla(\varphi - V_p) + \varphi_T \nabla p)) - (p - p_0) \left(\frac{1}{\tau_S} + \alpha \cdot n_{ph} \right);$$

$$\frac{\partial n_{ph}}{\partial t} = -\frac{n_{ph}}{\tau_f} + (n - n_0) \left(\frac{\beta}{\tau_S} + \alpha \cdot n_{ph} \right),$$

$$n_{ph} = 0 \text{ при } E_{F_n} - E_{F_p} < E_C - E_V,$$

где n – концентрация электронов; p – концентрация дырок; n_{ph} – плотность фотонов в лазерной моде; n_0 , p_0 – равновесные концентрации электронов и дырок; N – эффективная концентрация примесей; φ – электростатический потенциал; V_n , V_p – гетероструктурный потенциал в областях зоны проводимости и валентной зоны соответственно; ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника; ε_0 – электрическая постоянная; e – элементарный заряд; μ_n , μ_p – подвижности электронов и дырок; φ_T – температурный потенциал; α – коэффициент оптического усиления; β – доля спонтанного излучения, попадающего в лазерную моду; τ_S – время спонтанной излучательной рекомбинации; τ_f – время жизни фотона в активной области лазера; E_{F_n} , E_{F_p} – квазиуровни Ферми для электронов и дырок; E_C – уровень дна зоны проводимости; E_V – уровень потолка валентной зоны; t – время.

В качестве начального приближения к решению комбинированной нестационарной модели использовались результаты численного решения

фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении [10];

– этап 6. Проверка полученных на этапах 3 – 5 оценок значений выходных данных на предмет соответствия требованиям технического задания. Если полученные оценки соответствуют предъявляемым требованиям, выполняется переход к этапу 7, в противном случае выполняется анализ и корректировка параметров, после чего осуществляется возврат к этапу 1;

– этап 7. Анализ и сохранение результатов проектирования. Выработка рекомендаций по разработке конструкции функционально интегрированного лазера-модулятора.

Разработанный метод проектирования элементной базы быстродействующих интегральных систем оптической коммутации СБИС, в отличие от аналогичных, обеспечивает автоматизацию проектирования функционально-интегрированных источников-модуляторов оптического излучения, изготавливаемых в едином технологическом цикле. Разработанные на основе предложенного метода проектирования программные средства проектирования элементной базы быстродействующих интегральных систем оптической коммутации СБИС обеспечивают итерационную оптимизацию параметров конструкции инжекционного лазера-модулятора с использованием численного решения уравнений разработанных моделей для двух пространственных координат и могут быть использованы при создании систем автоматизированного проектирования (САПР) высокопроизводительных многоядерных СБИС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-07-00274), Министерства образования и науки Российской Федерации (проекты 7.5760.2011, 8.5757.2011), а также за счет средств Программы развития Южного федерального университета (2011 – 2021 гг.).

Литература

1. Pitcher, G. Taking the initiative. Altera embeds ARM processors to create distinct class of device. [Text] / Graham Pitcher // New electronics, 2011. – № 11. – P. 37 – 38.
2. Лысенко, И.Е. Интегральные сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа на основе углеродных нанотрубок [Электронный ресурс] / И.Е. Лысенко, А.В. Лысенко // Инженерный вестник Дона, 2012. – №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный) – Загл. с экрана.– Яз. рус.
3. Рындин, Е.А. Методика численного моделирования спектрометрических газочувствительных сенсорных систем [Электронный ресурс] / Е.А. Рындин, А.С. Леньшин // Инженерный вестник Дона, 2012. – №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/> (доступ свободный) – Загл. с экрана.– Яз. рус.
4. Park, H. Photonic Integration on the Hybrid Silicon Evanescent Device Platform [Text] / H. Park, A. Fang, D. Liang, Y.H. Kuo, H.H. Chang, B.R. Koch, H.W. Chen, M.N. Sysak, R. Jones, J.E. Bowers // Advances in Optical Technologies, 2008. – Vol. 14. – P. 9203 – 9210.
5. Li, M.P. Transferring High-Speed Data over Long Distances with Combined FPGA and Multichannel Optical Modules [Text] / M.P. Li, J. Martinez., D. Vaughan // Altera White Papers, 2012. – WP-01177-1.0, P. 1 – 6.
6. Chau, R. Low-dimensional Systems and Nanostructures [Text] / R. Chau // Physica E., 2003. – Vol. 19, № 1–2. – P. 1.
7. Коноплев, Б.Г. Интегральный инжекционный лазер с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда [Текст] / Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, М.А. Денисенко // Вестник Южного научного центра РАН, 2010. – Т. 6, № 3. – С. 5 – 11.
8. Коноплев, Б.Г. Амплитудная модуляция лазерного излучения в интегральных системах оптической коммутации многоядерных УБИС

[Текст] / Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, М.А. Денисенко // Известия ЮФУ. Технические науки, 2011. – №1 (114). – С. 92 – 97.

9. Коноплев, Б.Г. Метод построения интегральных систем оптической коммутации многоядерных УБИС [Текст] / Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, М.А. Денисенко // Известия ЮФУ. Технические науки, 2011. – №4 (117). – С. 21 – 27.

10. Рындин, Е.А. Модель функционально-интегрированных инжекционных лазеров-модуляторов для интегральных систем оптической коммутации [Текст] / Е.А. Рындин, М.А. Денисенко // Известия вузов. Электроника, 2012. – № 9. – С. 32-40.