

УДК 621.3.049.771.14

Б.Г. Коноплев, Е.А. Рындин, М.А. Денисенко

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ
КОММУТАЦИИ МНОГОЯДЕРНЫХ УБИС***

Рассматривается метод построения систем оптической коммутации многоядерных ультрабольших интегральных схем (УБИС). Предложены метод построения и структура интегральных источников оптического излучения с функционально интегрированными амплитудными модуляторами на основе управляемой электрическим полем передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в квантовых областях, обеспечивающих за счет функциональной интеграции повышение быстродействия интегральных систем оптической коммутации и возможность изготовления всех элементов данных систем в едином технологическом цикле. Обсуждаются актуальные проблемы проектирования быстродействующих оптоэлектронных интегральных схем.

УБИС; коммутация ядер; гетероструктура; интегральный инжекционный лазер; терагерцовый диапазон.

B.G. Konoplev, E.A. Ryndin, M.A. Denisenko

**METHOD OF CONSTRUCTING INTEGRATED SWITCHING SYSTEMS
OF MULTI-CORE ULSI**

A method of constructing optical multi-switching systems of ultra large scale integrated circuits (ULSI) is considered in this paper. A method of constructing and a structure of integrated sources of optical radiation with functionally integrated amplitude modulators based on the managed by electric field carrier wave-function-rearrangement in quantum wells, which allow increase the speed of optical multi-switching systems and manufacture all elements of these systems in single technological cycle, were proposed. Discuss topical problems of designing high-speed optoelectronic integrated circuits.

ULSI; switching kernels; heterostructure; integrated injection laser; terahertz band.

На текущем этапе развития технологических процессов изготовления ультрабольшых интегральных схем (УБИС), методов и средств их проектирования увеличение производительности УБИС обеспечивается не только за счет уменьшения размеров транзисторов и повышения тактовой частоты, а в значительной степени благодаря наращиванию числа ядер подобных интегральных систем [1]. Одной из основных проблем увеличения числа ядер на кристаллах УБИС является недостаточно высокая эффективность применяющихся межъядерных соединений. Металлические проводящие линии перестают удовлетворять растущим требованиям, в частности, по быстродействию и помехозащищенности [2].

Данная проблема может быть решена за счет применения интегральных оптических линий, которые, по результатам исследователей ИВМ, позволят повысить пропускную способность внутрочиповых соединений примерно в 100 раз при одновременном десятикратном снижении энергопотребления [2].

Интегральная система оптической коммутации включает следующие основные элементы (рис. 1): источники оптического излучения, быстродействующие модуляторы, интегральные линии оптической связи и фотоприемники, осуществляющие преобразование модулированных оптических сигналов в электрические.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, госконтракт № 16.740.11.0425 от 03.12.2010 г., проект 2.1.2/10229.

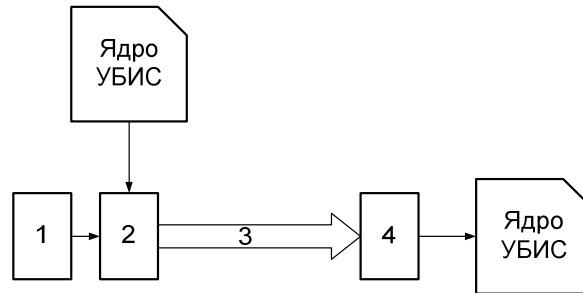


Рис. 1. Интегральная система оптической коммутации многоядерных УБИС:
 1 – интегральный инжекционный лазер; 2 – модулятор лазерного излучения;
 3 – линии оптической связи; 4 – фотоприемник

Создание эффективных систем оптической коммутации многоядерных УБИС связано, прежде всего, с решением следующих основных проблем:

- ◆ интегральные инжекционные лазеры систем оптической коммутации не могут быть изготовлены на основе кремния. Наиболее эффективные лазерные элементы получают на основе полупроводниковых материалов группы $A^{III}B^V$ [3];
- ◆ динамика амплитудной модуляции излучения посредством управления плотностью тока накачки лазера определяется переходными процессами в цепи питания лазера, инерционностью процессов накопления и рассеивания носителей заряда в его активной области, что ограничивает максимальную частоту модуляции (не более 10 ГГц) [4];
- ◆ внешние амплитудные модуляторы также не обеспечивают терагерцовых частот модуляции и требуют использования материалов, не позволяющих изготавливать их в едином технологическом цикле с интегральными лазерными элементами и транзисторными структурами [4];
- ◆ фотоприемники, выполненные в виде гетероструктур на основе материалов группы $A^{III}B^V$, обладают значительно более высокими показателями чувствительности и быстродействия по сравнению с кремниевыми;
- ◆ интегральные оптические линии связи необходимо выполнять в едином технологическом цикле с остальными компонентами системы оптической коммутации;
- ◆ учитывая, что современные УБИС изготавливаются на основе кремниевых технологий, необходимо обеспечить технологическую совместимость всех элементов систем оптической коммутации и кремниевых КМОП-структур.

Для решения перечисленных проблем в данной работе предлагается метод построения интегральных систем оптической коммутации многоядерных УБИС на основе комплексного использования методов зонной инженерии, принципов управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в квантовых областях и принципов парафазного управления, основные особенности которого состоят в следующем:

- ◆ модуляторы объединяются с инжекционными лазерами в единые функционально интегрированные наногетероструктуры с целью повышения максимальной частоты модуляции излучения и изготовления лазеров и модуляторов в едином технологическом цикле на основе полупроводниковых материалов группы $A^{III}B^V$;

- ◆ фотодетекторы проектируются в виде наногетероструктур на основе полупроводниковых материалов группы $A^{III}B^V$ с целью повышения их быстродействия, чувствительности и уменьшения шума, а также изготовления в едином технологическом цикле с источниками и модуляторами стимулированного излучения;
- ◆ оптические линии связи изготавливаются из материалов, технологически совместимых с материалами, формирующими структуры инжекционных лазеров, модуляторов и фотодетекторов, с целью повышения оптической эффективности и технологичности;
- ◆ особенности архитектуры описываемой системы позволяют отказаться от дополнительных устройств коммутации, в результате чего повышается технологичность системы и уменьшаются потери в линиях связи. В отличие от аналогов, вместо одного лазера и системы оптических линий связи с оптическими коммутаторами, к которым также необходимо подводить управляющие линии, используется система из нескольких быстродействующих лазеров с меньшей мощностью и соответствующих линий связи между ядрами. Такое архитектурное решение позволяет снизить оптические потери, уменьшить число управляющих электрических линий, а также уменьшить скорость вырождения активных областей лазеров за счет снижения их мощности, что позволяет продлить срок их службы и надежность системы в целом.

Обобщенная структурная схема рассматриваемых интегральных систем оптической коммутации приведена на рис. 2. В их состав входят инжекционные лазерные элементы с функционально интегрированными модуляторами, на управляющие входы которых поступают сигналы с отдельных ядер УБИС, интегральные линии оптической связи, а также быстродействующие фотоприемники.

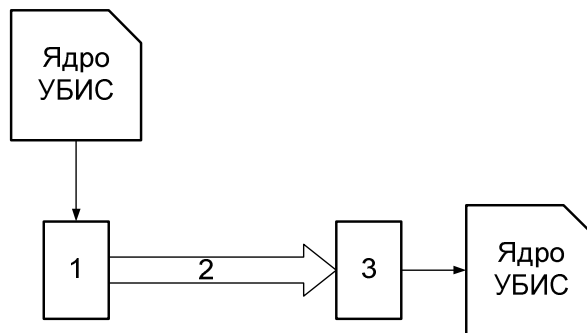


Рис. 2. Обобщенная структурная схема интегральной системы оптической коммутации многоядерных УБИС: 1 – интегральный инжекционный лазер с функционально интегрированным модулятором излучения; 2 – линия оптической связи; 3 – фотоприемник

Конструктивно-технологические аспекты интеграции подобных систем состоят в применении набора методов получения на кремниевой подложке структур из материалов на основе GaAs. Целесообразным является получение всех элементов, входящих в систему коммутации многоядерных УБИС, в едином технологическом процессе. Этого можно достичь как непосредственно нанесением гетероэпитаксиальных пленок GaAs на кремний, так и методами выращивания GaAs на кремниевой подложке через буферные слои Ge/GeSi/Si [5].

Предлагаемые в рамках рассматриваемого метода принципы построения быстроедействующих инжекционных лазеров на основе управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в связанных квантовых областях могут быть сформулированы следующим образом:

- ◆ инжекционный лазер представляет собой наноструктуру, в которой функционально интегрированы области вырожденного p - n -перехода (гомо- или гетероструктурного) с соответствующими омическими контактами и гетероструктура амплитудного модулятора в виде системы квантовых областей с управляющими контактами в активной области лазера;
- ◆ продольное электрическое поле создает определенный, неизменный во времени, уровень инжекции носителей заряда и, соответственно, инверсную заселенность энергетических уровней в квантовых ямах активной области лазера, а поперечное поле управляющих затворов модулятора позволяет изменять интенсивность стимулированного излучения за счет управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций электронов и дырок в области инверсной заселенности;
- ◆ с использованием методов зонной инженерии создается наноразмерная гетероструктура, в которой квантовая яма в зоне проводимости пространственно смещена относительно квантовой ямы в валентной зоне таким образом, что данные квантовые области лишь частично пространственно перекрываются с целью обеспечения пространственного наложения максимумов амплитуды волновых функций электронов и дырок при одном направлении поперечного управляющего электрического поля и, соответственно, их пространственного разделения при противоположном направлении управляющего поля;
- ◆ при неизменном во времени уровне инжекции электронов и дырок в активную область лазера, суммарное число носителей заряда в квантовых областях при изменении направления поперечного управляющего поля остается практически неизменным, в результате чего максимальная частота амплитудной модуляции лазерного луча определяется не относительно инерционными процессами накопления и рассасывания носителей, а, в основном, временем управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций электронов и дырок в квантовых областях зоны проводимости и валентной зоны, которое, согласно результатам численного моделирования, приведенным в [6], составляет десятые доли пикосекунды, в зависимости от параметров квантовых ям и потенциальных барьеров лазера, что соответствует частотам терагерцевого диапазона;
- ◆ использование наногетероструктуры функционально интегрированного амплитудного модулятора обуславливает реализацию собственно лазерного диода в виде горизонтально ориентированного относительно плоскости подложки вырожденного p - n -перехода. Такая концепция конструктивной реализации областей инжекционного лазера затрудняет технологическую реализацию достаточно резкого профиля распределения концентрации легирующих примесей на границах n + и p +-областей и характеризуется более высокой пороговой плотностью тока накачки по сравнению с лазерами на основе двойной гетероструктуры и гибридными лазерами на квантовых точках;

- ♦ использование принципа управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в гибридных гетеропереходных лазерах на квантовых точках нецелесообразно, поскольку в таких лазерах предельное быстродействие будет определяться временем захвата носителей заряда на локализованные энергетические уровни квантовых точек, составляющих единицы пикосекунд, что не соответствует задачам данного исследования.

Структура интегрального инжекционного гетеропереходного лазера с функционально интегрированным модулятором с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда представлена на рис. 3 [7].

На рис. 4 приведены зонные диаграммы функционально интегрированного модулятора инжекционного лазера для противоположных направлений управляющего поля [8].

Между границами широкозонных n -областей управляющих переходов расположена гетероструктура, представляющая собой квантовые ямы в зоне проводимости и валентной зоне со сложным потенциальным рельефом. За счет использования гетеропереходов второго типа $InGaAs/InGaSbAs/GaSbAs$ квантовые области в зоне проводимости и валентной зоне пространственно сдвинуты относительно друг друга, но при этом частично перекрываются (в области $InGaSbAs$).

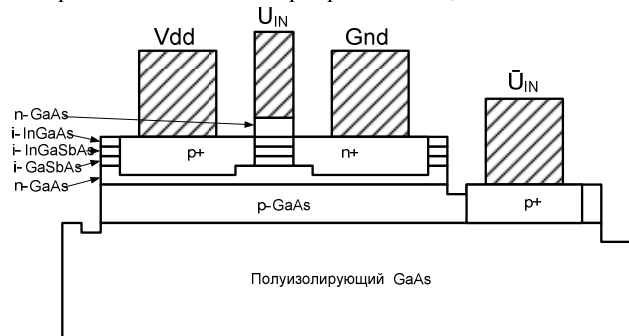


Рис. 3. Структура инжекционного лазера с функционально интегрированным модулятором [7]

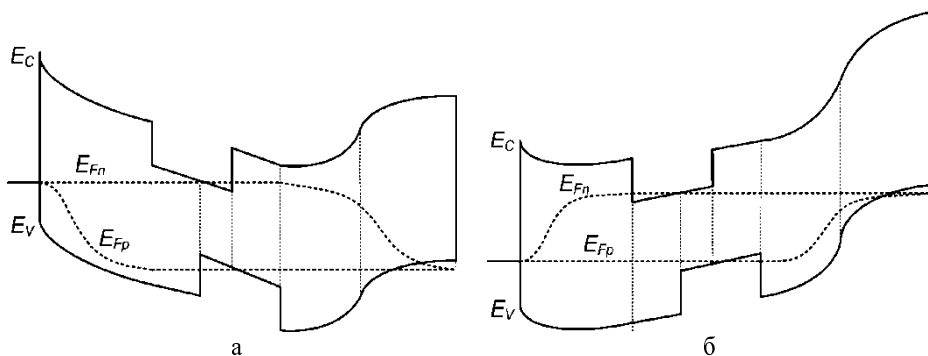


Рис. 4. Зонная диаграмма активной области инжекционного лазера с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда при противоположных направлениях управляющего поля: а – высокая интенсивность излучения; б – низкая интенсивность излучения

При направлении поперечного управляющего поля, показанного на рис. 4,а, в результате пространственной передислокации максимальные плотности носителей обоих знаков окажутся сосредоточенными в области частичного пространственного перекрытия квантовых ям зоны проводимости и валентной зоны, что приведет к росту интенсивности стимулированного излучения. При противоположном направлении управляющего поля, показанного на рис. 4,б, максимальные плотности носителей обоих знаков окажутся пространственно разделенными в пределах квантовых ям зоны проводимости и валентной зоны, что приведет к снижению интенсивности стимулированного излучения (вплоть до полного прекращения квантового усиления излучения).

Предложенная наноструктура объединяет инжекционный лазер и модулятор и фактически представляет собой «лазерный триод», в отличие от традиционных лазерных диодов.

В работах [6, 8] показано, что время управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в квантовых областях может составлять менее 0,1 пс. Таким образом, максимальная частота амплитудной модуляции стимулированного излучения в рассматриваемых интегральных системах оптической коммутации соответствует терагерцевому диапазону.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chau R. et al.* Low-dimensional Systems and Nanostructures // *Physica E*. – 2003. – Vol. 19, Issues 1-2. – P. 1.
2. *Vlasov Y., Green W.M.J., Xia F.* High-throughput silicon nanophotonic wavelength-insensitive switch for on-chip optical networks // *Nature Photonics*. – 2008. – № 2. – P. 242-246.
3. *Алферов Ж.И.* Двойные гетероструктуры: концепция и применение в физике, электронике и технологии // *Успехи физических наук*. – 2002. – № 9 (172). – С. 1068-1086.
4. *Мальшиев В.А.* Основы квантовой электроники и лазерной техники: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2005. – 543 с.
5. *Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П.* Эпитаксия GaAs на кремниевых подложках: современное состояние исследований и разработок // *Успехи физических наук*. – 2008. – № 5 (178). – С. 459-480.
6. *Konoplev B.G., Ryndin E.A.* A Study of the Transport of Charge Carriers in Coupled Quantum Region // *Semiconductors*. – 2008. – Vol. 42, № 13. – P. 1462-1468.
7. *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А.* Интегральный инжекционный лазер с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда // Патент РФ 2400000, 2010.
8. *Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А.* Интегральный инжекционный лазер с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда // *Вестник Южного научного центра РАН*. – 2010. – № 3 (6). – С. 5-11.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Э.К. Алгазинов.

Коноплев Борис Георгиевич

Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kbg@tti.sfedu.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371767.

Факультет электроники и приборостроения; декан; д.т.н.; профессор.

Денисенко Марк Анатольевич

E-mail: dema.bmfe@gmail.com.

Кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

Рындин Евгений Адальбертович

Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

Тел.: 88634311584.

Ведущий научный сотрудник; д.т.н.; доцент.

Konoplev Boris Georgievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kbg@fep.tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634371767.

College of Electronics and Electronic Equipment Engineering; Dean; Dr. of Eng. Sc.; Professor.

Denisenko Mark Anatolievich

E-mail: dema.bmfe@gmail.com.

The Department of Electronic Apparatus Design; Postgraduate Student.

Ryndin Eugeny Adalbertovich

Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don.

E-mail: ryn@fep.tti.sfedu.ru.

41, Chekhov Street, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

Phone: +78634311584.

Senior Researcher; Dr. of Eng. Sc.; Associate Professor.

УДК 621.385.002

**А.М. Светличный, О.Б. Спиридонов, Е.Ю. Волков, Л.Г. Линец,
М.Н. Григорьев**

**ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК АВТОЭМИССИОННЫХ НАНОСТРУКТУР
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И КАРБИДА КРЕМНИЯ**

Проведена оценка характеристик автоэмиссионных наноструктур на основе карбида кремния и кремния. Определены зависимости плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности электрического поля. Построены вольт-амперные характеристики катодов на основе SiC и Si. Также получено оценочное значение предельной плотности тока автоэлектронной эмиссии, при которой катод обладает тепловой устойчивостью. Исследована зависимость предельной плотности тока от конструкции автоэмиссионного катода. Оценка показывает, что наноструктуры на основе карбида кремния обладают характеристиками, позволяющими использовать их в современных приборах нанoeлектроники.

Карбид кремния; автоэлектронная эмиссия; наноструктуры; кремний.

A.M. Svetlichnyi, O.B. Spiridonov, E.Y. Volkov, L.G. Linets, M.N. Grigoriev

**THE EVALUATION OF THE CHARACTERISTICS OF FIELD EMISSION
NANOSTRUCTURES BASED ON SI AND SiC**

The evaluation of the characteristics of field emission nanostructures based on silicon carbide (SiC) and silicon (Si) was carried out. The dependence of the field emission current density from the electric field was determined. Current-voltage characteristics of SiC and Si cathodes were plotted. Also the estimation of the limiting field emission current density necessary for cathode thermostability was provided. The interrelation of the limiting current density on the design