

Раздел III. Электроника, радиоэлектроника, нанотехнологии

УДК 621.3.049.771.14

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

АМПЛИТУДНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ КОММУТАЦИИ МНОГОЯДЕРНЫХ УБИС*

Приведены принципы построения и конструкции сверхбыстродействующих интегральных инжекционных лазеров на основе соединений группы $A^{III}B^V$, на основе управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в связанных квантовых областях, с функционально интегрированным модулятором оптического излучения, обеспечивающих возможность амплитудной модуляции стимулированного излучения в терагерцовом диапазоне частот без использования акустооптических дефлекторов. Приведена структура и результаты моделирования инжекционного лазера. Рассматриваются вопросы применения этих лазеров в системах коммутации ядер в многоядерных УБИС.

Интегральный инжекционный лазер; квантоворазмерная гетероструктура; амплитудная модуляция; терагерцовый диапазон.

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

AMPLITUDE MODULATION OF LASER RADIATION IN INTEGRATED OPTICAL SWITCHING SYSTEMS OF MULTICORES ULSI

Principles of construction and design of ultrahigh-speed integrated injection lasers based on materials of $A^{III}B^V$ based on the managed realignment of the maximum amplitude of the wave functions of carriers in coupled quantum fields with functionally integrated modulator of optical radiation, enabling the amplitude modulation of the stimulated emission in the terahertz band without using of acousto-optic deflectors are considered in this work. Shows the structure and simulation results of the injection laser. We consider the application of these lasers in the switching core-systems in multicores ULSI.

Integrated injection lasers; quantum-scale heterostructure; amplitude modulation; terahertz range.

Высокие темпы развития технологических процессов наноэлектроники, обусловленные появлением принципиально нового нанотехнологического оборудования, позволяют создавать вычислительные системы на основе многоядерных ультрабольших интегральных схем (УБИС). При этом актуальной становится проблема коммутации ядер в подобных системах.

Оптоэлектроника предполагает замену электрических сигналов оптическими и таким образом позволяет решить ряд проблем, связанных с созданием сверхбыстродействующих интегральных схем на основе наноразмерной элементной базы, в частности, проблему задержек сигналов в соединительных линиях. Одним из возможных решений повышения надежности и быстродействия систем связи между ядрами является использование оптической коммутации.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект 2.1.2/3775.

Основной принцип оптоэлектроники состоит в модуляции стимулированного излучения, генерируемого интегральными лазерными элементами, с последующим преобразованием модулированных оптических сигналов в соответствующие электрические импульсы. При этом методы модуляции оптического излучения можно разделить на внешние и внутренние. Внешние методы предполагают модуляцию параметров сформированного лазерного луча, а внутренние предполагают модуляцию посредством воздействия на сам квантовый генератор, т.е. модуляцию луча в процессе его формирования [1].

В настоящее время в интегральных схемах оптоэлектроники для внешней амплитудной модуляции лазерного излучения успешно используют описанные выше модуляторы, характеризующиеся высоким быстродействием (менее 10^{-9} с) [1]. Однако их существенным недостатком, особенно критичным в области интегральной наноэлектроники, является использование таких кристаллических материалов, как $LiNbO_3$, $DKDP$ и др., что приводит к невозможности изготовления модуляторов в едином технологическом цикле с полупроводниковыми лазерными и логическими интегральными элементами на основе $GaAs$, GaN , GaP и других соединений группы $A^{III}B^V$ [2].

Разработка интегральных инжекционных лазеров, использующих принципы управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей заряда в связанных квантовых областях, является актуальной задачей опто- и наноэлектроники.

Предлагаемые принципы построения быстродействующих 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 (гомоструктурного или гетеропереходного) с соответствующими омическими контактами и система связанных квантовых областей с управляющими затворами;
- ◆ продольное электрическое поле создает определенный, неизменный во времени, уровень инжекции носителей заряда и соответственно инверсную заселенность энергетических уровней в активной области лазера, а поперечное поле управляющих затворов 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 область в зоне проводимости пространственно смещена относительно квантовой области в валентной зоне таким образом, что данные квантовые области имеют одинаковую ширину и лишь частично пространственно перекрываются с целью обеспечения пространственного наложения максимумов амплитуды волновых функций электронов и дырок при одном направлении управляющего электрического поля и соответственно их пространственного разделения при противоположном направлении управляющего поля;
- ◆ максимальная частота амплитудной модуляции инжекционного лазера определяется инерционностью управляемой передислокации максимума амплитуды волновых функций электронов и дырок в квантовых областях зоны проводимости и валентной зоны.

Структура интегрального инжекционного гетеропереходного лазера с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда представлена на рис. 1.

В данной структуре, как и в традиционных инжекционных лазерах, создание инверсной заселенности осуществляется за счет прямого смещения вырожденного $p-n$ -перехода. Однако, в отличие от традиционных структур, вырожденный $p-n$ -переход горизонтальный, причем $p+$ - и $n+$ -области разделены вертикальной наногетероструктурой, содержащей квантовые ямы в зоне проводимости и валентной зоне на основе гетеропереходов $GaAs/InGaAs/InGaSbAs/GaSbAs/GaAs$, а также два управляющих перехода (переход Шоттки и $p-n$ -переход), позволяющих создать поперечное управляющее поле.

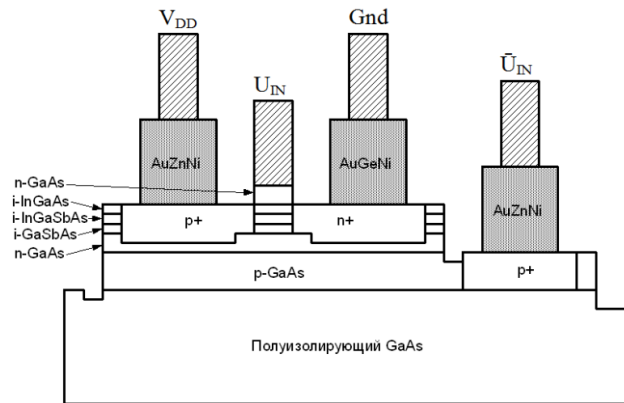


Рис. 1. Структура инжекционного лазера с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда

На рис. 2 приведены зонные диаграммы функционально интегрированного модулятора инжекционного лазера для противоположных направлений управляющего поля.

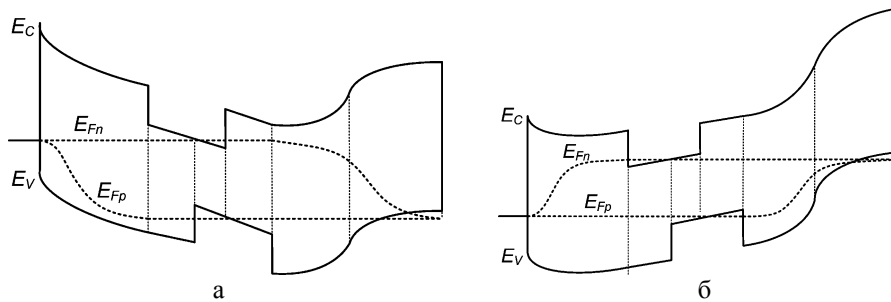


Рис. 2. Зонная диаграмма активной области инжекционного лазера с управляемой передислокацией максимума амплитуды волновых функций носителей заряда при противоположных направлениях управляющего поля: а – прямое смещение управляющего поля; б – обратное смещение управляющего поля

Слева на данном рисунке управляющий переход Шоттки, справа – управляющий $p-n$ -переход. 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 друг относительно друга, но при этом частично перекрываются (в области *InGaSbAs*).

При направлении поперечного управляющего поля, показанного на рис. 2,а, максимум амплитуды волновых функций электронов сместится вправо, а максимум амплитуды волновых функций дырок соответственно влево в пределах квантовых областей. В результате максимальные плотности носителей обоих знаков окажутся сосредоточенными в области частичного пространственного перекрытия квантовых ям зоны проводимости и валентной зоны, а именно в *InGaSbAs*-области, что приведет к увеличению квантового выхода и соответственно к росту интенсивности стимулированного излучения.

При направлении поперечного управляющего поля, показанного на рис. 2,б, максимум амплитуды волновых функций электронов сместится влево, а максимум амплитуды волновых функций дырок соответственно вправо в пределах квантовых областей. При этом максимальные плотности носителей обоих знаков окажутся пространственно разделенными в пределах квантовых ям зоны проводимости и валентной зоны, что приведет к уменьшению квантового выхода и соответственно к резкому снижению интенсивности стимулированного излучения (вплоть до полного прекращения квантового усиления излучения).

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что в данном лазере максимальная частота амплитудной модуляции определяется не инерционными процессами накопления и рассасывания носителей заряда в квантовых областях, как в традиционных лазерных элементах [2], а процессами передислокации максимума амплитуды волновых функций носителей в пределах пространственно смещенных квантовых областей, образованных гетеропереходами второго типа. При этом коэффициент амплитудной модуляции лазерного излучения (т.е. отношение разности между максимальным и минимальным значениями амплитуд модулированного сигнала к сумме этих значений), генерируемого на неизменном уровне инжекции носителей в активную область лазера, может оценочно определяться выражением

$$m \approx \frac{n_{MAX} P_{MAX} - n_{MIN} P_{MIN}}{n_{MAX} P_{MAX} + n_{MIN} P_{MIN}}, \quad (1)$$

где n_{MAX} , P_{MAX} – максимальные значения концентраций электронов и дырок в области пространственного совмещения квантовых ям в зоне проводимости и валентной зоне;

n_{MIN} , P_{MIN} – минимальные значения концентраций электронов и дырок в области пространственного совмещения квантовых ям в зоне проводимости и валентной зоне.

По результатам моделирования m достигает значений 0,9.

На рис. 3 и 4 представлены результаты численного моделирования.

В работе [3] 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, что подтверждается результатами моделирования, полученными в данной работе. Таким образом, максимальная частота амплитудной модуляции стимулированного излучения в рассматриваемых инжекционных лазерах может достигать (3–5) ТГц.

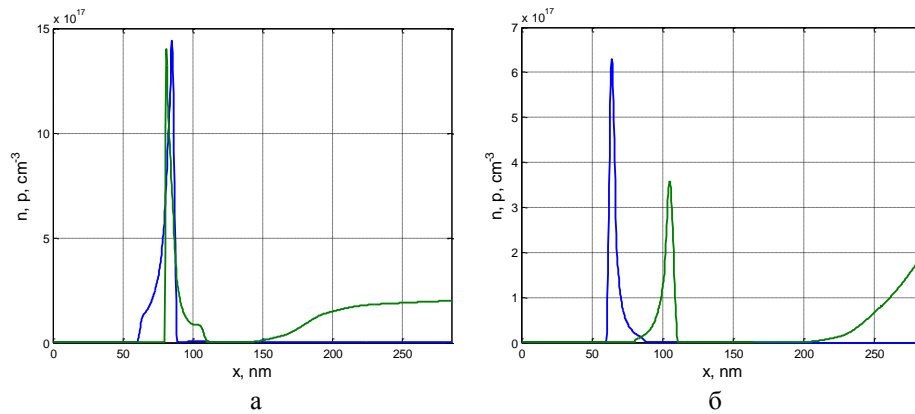


Рис. 3. Распределение концентраций электронов и дырок:
а – высокий уровень генерации; б – низкий уровень генерации

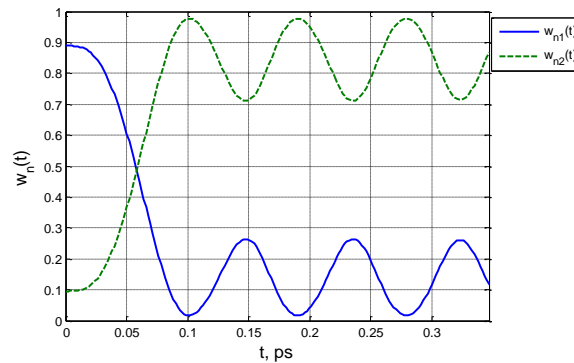


Рис. 4. Вероятность нахождения частиц в различных частях квантовой ямы при длительности управляющего фронта 100 фс

При этом важной отличительной особенностью предложенных лазеров является то, что высокая частота модуляции стимулированного излучения достигается не за счет использования дефлекторов, а благодаря функционально интегрированной, технологически совместимой с процессом изготовления вырожденного гетероперехода наноструктуре, что обеспечивает технологичность данных лазерных элементов, в том числе в интегральном исполнении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алферов Ж.И. Двойные гетероструктуры: концепция и применение в физике, электронике и технологии // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 9. – С. 1068-1086.
2. Малышев В.А. Основы квантовой электроники и лазерной техники: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2005. – 543 с.
3. 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.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Малюков.

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.

347900, 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, 347900, 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 621.002:621.941.2-82.192

**В.И. Бутенко, Л.В. Гусакова, Д.С. Дуров, А.Д. Захарченко, Т.А. Рыбинская,
Р.Г. Шаповалов**

**МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИЗДЕЛИЙ
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Определены роль и место материаловедческих и конструкторско-технологических направлений повышения работоспособности изделий машиностроения, учитывающих современные достижения в области наноматериалов и нанотехнологий, а также динамический мониторинг станочного оборудования.

Нанотехнология; наноматериалы; покрытия; трибосистемы; надежность; динамический мониторинг.