



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Научно-технический журнал

Выпуск 3(183) 2021

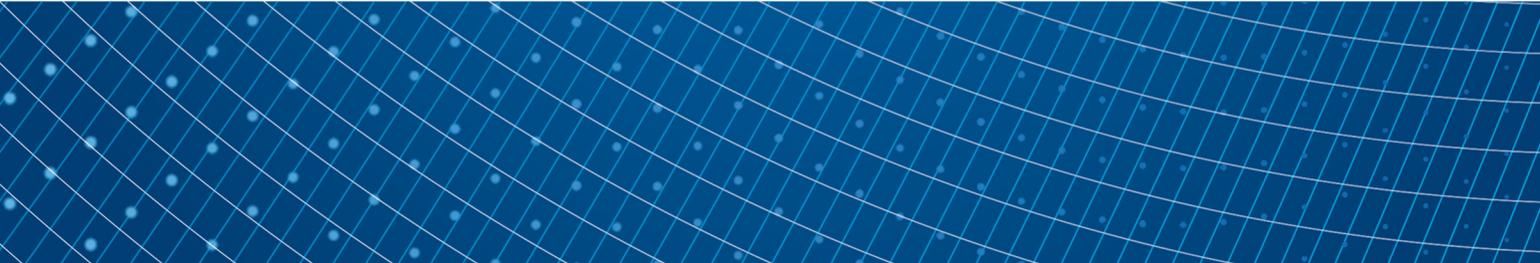
ELECTRONIC ENGINEERING

SERIES 3 MICROELECTRONICS

Scientific & Technical Journal

Выпуск 3(183) 2021

Москва, 2021



«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.**Серия 3.****МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»****Редакционный совет****Главный редактор****Красников Геннадий Яковлевич,**
д. т. н., академик РАН**Члены редакционного совета****Асеев Александр Леонидович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Vaklanov M. R., Dr. Sc.**Бетелин Владимир Борисович,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Бокарев Валерий Павлович,

ответственный секретарь, д. т. н.

Бугаев Александр Степанович,

д. ф.-м. н., академик РАН

Быков Виктор Александрович,

д. т. н.

Галиев Галиб Бариевич, д. ф.-м. н.**Горбачевич Александр Алексеевич,**

д. ф.-м. н., академик РАН

Горнев Евгений Сергеевич,

зам. главного редактора,

д. т. н., член-корреспондент РАН

Грибов Борис Георгиевич, д. х. н.,

член-корреспондент РАН

Зайцев Николай Алексеевич,

д. т. н.

Ким Александр Киирович, к. т. н.**Критенко Михаил Иванович,** к. т. н.**Maev Roman Gr.,** Dr. Sc.**Петричкович Ярослав Ярославович,**

д. т. н.

Сигов Александр Сергеевич,

д. ф.-м. н., академик РАН

Стемпковский Александр**Леонидович,** д. т. н., академик РАН**Чаплыгин Юрий Александрович,**

д. т. н., академик РАН

Шелепин Николай Алексеевич,

зам. главного редактора, д. т. н.

Эннс Виктор Иванович, к. т. н.**Адрес редакции**📍 Россия, 124460, Москва,
Зеленоград, улица Академика
Валиева, дом 6, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

Журнал издается с 1965 года

УчредительАО «Научно-исследовательский
институт молекулярной
электроники»**Слово редактора** 4**Разработка и конструирование****В.И. Эннс**Методы разработки оптимальных программируемых
интегральных схем с использованием теоретико-множественного
описания 5**Процессы и технология****А.А. Конарев, Д.А. Варламов, Б.Г. Грибов**Оптимизация технологии получения тетраметиламмония
гидроксида требуемой концентрации и качества 14**М.В. Литаврин, Е.С. Горнев, С.И. Янович**Типы моделей для описания направленной самосборки
блок-сополимеров 23**M.V. Litavrin, E.S. Gornev, S.I. Yanovich**

Model types for block copolymers directed self-assembly description 29

В.Л. ЕвдокимовСтадии гетерогенного роста и характеристики слоев,
осаждаемых из газовой фазы 34**Свойства материалов****В.П. Бокарев, Г.Я. Красников**Роль поверхности материалов в технологии микро-
и нанозлектроники 40**V.P. Bokarev, G.Ya. Krasnikov**The role of the surface of materials in micro- and nanoelectronic
technology 51**Математическое моделирование****А.А. Сапегин, М.Ю. Барабаненков**Упрощенное описание условий формирования темной моды
в дискретном нановолноводе 62**В.И. Эннс, С.В. Гаврилов, М.А. Заплетина**Формализация этапа автоматической трассировки в маршруте
проектирования на основе гетерогенных реконфигурируемых
интегральных схем 69**В.И. Эннс, С.В. Гаврилов, В.М. Хватов, В.Г. Курбатов**Программное прототипирование и анализ реконфигурируемых
интегральных схем с древовидной архитектурой 78**Аннотации** 92Журнал включен Всероссийской аттестационной комиссией (ВАК)
в число изданий, рекомендованных для публикации статей
соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук № 1969

**“ELECTRONIC ENGINEERING.
Series 3.
MICROELECTRONICS”**

**Editorial Council
Chief Editor**

Krasnikov G. Ya., Sc. D.,
Full Member of the RAS

The Members of Editorial Council

Aseev A. L., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Baklanov M. R., Sc. D.,

Betelin V. B., Sc. D., Full
Member of the RAS

Bokarev V. P., Sc. D.,
Responsible Secretary

Bugaev A. S., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Bykov V. A., Sc. D.

Galiev G. B., Sc. D.

Gorbatshevich A. A., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Gornev E. S., Sc. D.,
Corresponding Member
of the RAS, Deputy Chief Editor

Gribov B. G., Sc. D.,
Corresponding Member of the RAS

Zaitsev N. A., Sc. D.

Kim A. K., Ph. D.

Kritenko M. I., Ph. D.

Maev Roman Gr., Sc. D.

Petrichkovich Ya. Ya., Sc. D.

Sigov A. S., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Stempkovskiy A. L., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Chaplygin Yu. A., Sc. D.,
Full Member of the RAS

Shelepin N. A., Sc. D.,
Deputy Chief Editor

Enns V. I., Ph. D.

Editorial Staff Address

📍 6/1, Akademika Valieva street,
Zelenograd, Moscow 124460,
Russian Federation

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal_EEM-3@mikron.ru
www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

Founder

“Molecular Electronics Research
Institute”, Stock Company

Editor’s Column 4

Development and Designing

V.I. Enns

Methods for developing optimal programmable integrated circuits
using a set-theoretic description 5

Processes and Technology

A.A. Konarev, D.A. Varlamov, B.G. Gribov

Optimization of production technology for tetramethylammonium
hydroxide of Required concentration and quality 14

M.V. Litavrin, E.S. Gornev, S.I. Yanovich

Model types for block copolymers directed self-assembly description 23

V.L. Evdokimov

Stages of heterogeneous growth and characteristics of layers
deposited from the gas phase 34

Properties of Materials

V.P. Bokarev, G.Ya. Krasnikov

The role of the surface of materials in micro- and nanoelectronic
technology 40

Mathematical simulation

A.A. Sapegin, M.Yu. Barabanenkov

Simplified description of dark mode formation in discrete
nanowaveguide 62

V.I. Enns, S.V. Gavrilov, M.A. Zapletina

Formalization of the automatic routing stage in the design flow
on heterogeneous reconfigurable integrated circuits 69

V.I. Enns, S.V. Gavrilov, V.M. Khvatov, V.G. Kurbatov

Software circuit prototyping and analysis of reconfigurable integrated
circuits used tree based architecture 78

Abstracts 92

The journal has included in the number of publications recommended
for publication of articles by applicants for academic degrees of
candidate and doctor of Sciences №1969 by the all-Russian attestation
Commission (НАС)

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед вами очередной 183-й выпуск научно-технического издания «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника».

Наш журнал ориентирован не только на русскоязычную аудиторию, поэтому каждая статья снабжена метаданными на английском языке, кроме того, мы начинаем печатать переводные версии статей.

Широкая география авторов и членов редакционного совета, среди которых представлены зарубежные специалисты, также обусловлена стремлением редакции расширять перспективы ознакомления научной общественности с публикуемыми материалами.

В данном номере внимание читателей журнала привлекут тематические материалы, опубликованные в разделах: «Разработка и конструирование», «Процессы и технология», «Свойства материалов» и «Математическое моделирование».

Выпуск журнала представлен восемью оригинальными статьями, посвящёнными результатам актуальных научных исследований.

В первом разделе «Разработка и конструирование», представлена работа по использованию теоретико-множественного подхода при разработке оптимальных гетерогенных ПЛИС. Автором приведён метод оценки эффективности использования площади кристалла ПЛИС.

В следующем разделе «Процессы и технология» представлены результаты оптимизации технологии получения концентрата тетраметиламмония гидроксида (ТМАГ) мембранным электролизом водного раствора хлорида тетраметиламмония. Там же представлена статья по методу направленной самосборки (directed self-assembly, DSA) блок-сополимеров, с общей схемой маршрута формирования маски и требованиями к моделям направленной самосборки. В третьей статье, в рамках молекулярно-кинетической модели газофазного осаждения



слоёв, рассмотрены стадии процесса гетерогенного роста и приведены расчеты скоростей при таких условиях.

В разделе «Свойства материалов» авторами рассмотрено влияние поверхностной энергии материалов на физико-химические свойства поверхностей. Приведены результаты такого влияния на границу контактирующих поверхностей при проведении ряда технологических операций микроэлектроники.

Заключительный раздел «Математическое моделирование» представлен тремя статьями. В первой авторами выведена приближенная формула для параметра волнового взаимодействия соседних частиц в нановолноводе. Во второй статье представлена модель для описания соотношения между коммутационными ресурсами базовых кристаллов гетерогенных реконфигурируемых интегральных схем.

В последней статье приведён метод программного прототипирования архитектуры программируемых логических интегральных схем и реконфигурируемых систем на кристалле.

Приглашаем всех заинтересованных специалистов к сотрудничеству!

С уважением,
главный редактор журнала,
академик РАН,

Г.Я. Красников

МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ

Работа посвящена методам разработки оптимальных гетерогенных ПЛИС с использованием теоретико-множественного подхода. Представлен метод оценки эффективности использования площади кристалла ПЛИС. Описаны основные этапы маршрута проектирования специализированных гетерогенных ПЛИС и методы оценки требуемых параметров архитектуры ПЛИС на основе анализа пользовательских схем. Также представлен новый этап данного маршрута проектирования программируемых схем – программное прототипирование, который может быть использован для более точной оценки архитектуры ПЛИС.

Ключевые слова: гетерогенные ПЛИС, архитектура ПЛИС, программируемые схемы, программное прототипирование.

Сведения об авторе:

Эннс Виктор Иванович, кандидат технических наук, Акционерное общество Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, e-mail: venns@niime.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕТРАМЕТИЛАММОНИЯ ГИДРОКСИДА ТРЕБУЕМОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И КАЧЕСТВА

В работе представлены результаты оптимизации технологии получения концентрата тетраметиламмония гидроксида (ТМАГ) мембранным электролизом водного раствора хлорида тетраметиламмония, полученные на опытно-промышленной установке.

Ключевые слова: тетраметиламмоний гидроксид, хлорид тетраметиламмония, электролиз, электроосмотический перенос воды, катионообменная мембрана.

Сведения об авторах:

Конярев Александр Андреевич, доктор технических наук, Научно-исследовательский институт полупродуктов и красителей, 141701, г. Долгопрудный Московской области, Лихачевский проезд, д. 7, e-mail: lab32@niopik.ru

Варламов Денис Александрович, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, строение 1, e-mail: dvarlamov@niime.ru

Грибов Борис Георгиевич, доктор химических наук, профессор, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, дом 6, строение 1

METHODS FOR DEVELOPING OPTIMAL PROGRAMMABLE INTEGRATED CIRCUITS USING A SET-THEORETIC DESCRIPTION

The paper is devoted to the methods of developing optimal heterogeneous FPGAs using a set-theoretic approach. A method for evaluating the efficiency of using the FPGA crystal area is presented. The main stages of the design route of specialized heterogeneous FPGAs and methods for evaluating the required parameters of the FPGA architecture based on the analysis of user schemes are described. A new stage of this route of designing programmable circuits is also presented—software prototyping, which can be used for a more accurate assessment of the FPGA architecture.

Keywords: heterogeneous FPGAs, architecture FPGA, programmable circuits, software prototyping.

Data of the author:

Enns Victor Ivanovich, Candidate of technical science, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, 6/1, Akademika Valiyeva Street, Moscow 124460, Russian Federation, e-mail: venns@niime.ru

OPTIMIZATION OF PRODUCTION TECHNOLOGY FOR TETRAMETHYLAMMONIUM HYDROXIDE OF REQUIRED CONCENTRATION AND QUALITY

The research paper presents the result of optimization of the production technology for the tetramethylammonium hydroxide (TMAH) concentrate by means of a membrane electrolysis of the tetramethylammonium chloride aqueous solution. The results were gained at a pilot plant.

Keywords: tetramethylammonium hydroxide, tetramethylammonium chloride, electrolysis, electroosmotic water transfer, cation-exchange membrane.

Data of authors:

Konarev Alexandr Andreevich, Doctor of technical sciences, Science and Research Institute of Organic Intermediates and Dyes, 7, Likhachevsky proezd, 141701, Moscow region, Dolgoprudny, e-mail: lab32@niopik.ru

Varlamov Denis Alexandrovich, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, Akademika Valiyeva street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: dvarlamov@niime.ru

Gribov Boris Georgievich, Doctor of chemical Sciences, Professor, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, Akademika Valiyeva street, 6/1, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia

ТИПЫ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НАПРАВЛЕННОЙ САМОСБОРКИ БЛОК-СОПОЛИМЕРОВ

Рассматривается метод направленной самосборки (directed self-assembly, DSA) блок-сополимеров, общая схема маршрута формирования маски и требования к моделям направленной самосборки. Проводится обзор классов моделей для описания данного метода.

Ключевые слова: направленная самосборка (DSA), блок-сополимер (BCP), литография.

Сведения об авторах:

Литаврин Михаил Владимирович,

Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет)
141701 Россия, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9;
Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1,
e-mail: mlitavrin@niime.ru

Горнев Евгений Сергеевич, член-корр. РАН, доктор технических наук, профессор, начальник управления РПТН, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1,
e-mail: egornev@niime.ru

Янович Сергей Игоревич, главный специалист, РПТН, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО «НИИМЭ»), 124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1,
e-mail: syanovich@niime.ru

СТАДИИ ГЕТЕРОГЕННОГО РОСТА И ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЕВ, ОСАЖДАЕМЫХ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

В рамках молекулярно-кинетической модели газофазного осаждения слоев материалов различной проводимости на структурах кристаллов субмикронных интегральных схем рассмотрены стадии данного процесса и выражения для расчета их скоростей для условий гетерогенного роста. Модель учитывает диффузию, адсорбцию и химическое превращение реагентов в основной и побочный продукты. Предложены показатели, отражающие степень конформности и примесности слоев, сделаны оценки скоростей стадий и значений показателей для исходных реагентов с различными физико-химическими характеристиками.

Ключевые слова: газофазное осаждение, гетерогенный рост, моделирование процесса, конформность, примесность.

Сведения об авторе:

Евдокимов Владимир Лукьянович, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 12, стр. 1,
e-mail: vevdokimov@niime.ru

MODEL TYPES FOR BLOCK COPOLYMERS DIRECTED SELF-ASSEMBLY DESCRIPTION

In the article the directed self-assembly (DSA) method of block copolymers is reviewed. The general scheme of the patterning route and the requirements for directed self-assembly models are discussed. An overview of the model classes to describe this method is given.

Keywords: directed self-assembly (DSA), block-copolymer (BCP), lithography.

Data of authors:

Litavrin Mikhail Vladimirovich,

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
141701 Russia, Dolgoprudny, Institutsky per., 9;
«Molecular Electronic Research Institute», Stock Company,
124460 Russia, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva street, 6/1,
e-mail: mlitavrin@niime.ru

Gornev Evgeny Sergeevich, Corresponding Member of RAS, Doctor of Science, Professor, Head of Department, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva street, 6/1,
e-mail: egornev@niime.ru

Yanovich Sergey Igorevich, Member of Technical Staff, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, Akademika Valieva street, 6/1,
e-mail: syanovich@niime.ru

STAGES OF HETEROGENEOUS GROWTH AND CHARACTERISTICS OF LAYERS DEPOSITED FROM THE GAS PHASE

The stages of the process and expressions for calculating their velocities under conditions of heterogeneous growth are considered in the framework of a molecular-kinetic model of the gas-phase deposition of layers. The model takes into account the diffusion, adsorption and chemical transformation of reagents into the main and by-products. Indicators reflecting the degree of conformality and the contamination of layers are proposed, estimates of the rates of stages and values of indicators for initial reagents with different physical and chemical characteristics are made.

Keywords: gas-phase deposition, heterogeneous growth, process modeling, conformality, contamination.

Data of the author:

Evdokimov Vladimir Lukyanovich,

«Molecular Electronic Research Institute», Stock Company,
12/1, Akademika Valieva Ulitsa, Zelenograd, Moscow, 124460,
e-mail: vevdokimov@niime.ru

РОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИИ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрено влияние физико-химических свойств поверхности кристаллов на физические и химические свойства материалов. На примерах ряда технологических операций показано определяющее влияние физико-химических свойств поверхностей контактирующих материалов на результат воздействия и его анизотропию.

Ключевые слова: поверхность, технология, микроэлектроника, нанозлектроника.

Сведения об авторах:

Бокарев Валерий Павлович, доктор технических наук; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1 e-mail: vbokarev@niime.ru

Красников Геннадий Яковлевич, доктор технических наук, академик Российской академии наук, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, г. Зеленоград, улица Академика Валиева, 6/1, e-mail: gkrasnikov@niime.ru

УПРОЩЕННОЕ ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМНОЙ МОДЫ В ДИСКРЕТНОМ НАНОВОЛНОВОДЕ

Рассмотрена задача дальнего распространения электромагнитного возбуждения по линейной цепочке малых частиц в приближении ближайших соседей. Выведена приближенная формула для параметра волнового взаимодействия соседних частиц. Рассчитаны резонансные длины волн для Au-наносфер. Сопоставление с результатами точного расчета показало, что приближенная формула справедлива только для длин волн электромагнитного излучения, на которых мнимая часть диэлектрической проницаемости материала частиц имеет близкий к нулю минимум при отрицательной действительной части.

Ключевые слова: оптический нановолновод, связанные резонаторы, распространение возбуждения, темная мода.

Сведения об авторах:

Сапегин Александр Андреевич, акционерное общество «Научный институт электронной техники», 124460, г. Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 12, строение 1, e-mail: asapegin@niime.ru

Барабаненков Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук, 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 6, ИПТМ РАН, e-mail: barab@iptm.ru

THE ROLE OF THE SURFACE OF MATERIALS IN MICRO- AND NANOELECTRONIC TECHNOLOGIES

The effect of the surface on the physical and chemical properties of materials is considered. The examples of a number of technological operations show the decisive influence of the physicochemical properties of the surfaces of contacting materials on the result of exposure and on its anisotropy.

Keywords: surface, technology, microelectronics, nanoelectronics.

Data of authors:

Valeriy P. Bokarev, doctor of Engineering Sciences, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: vbokarev@niime.ru

Gennady Ya. Krasnikov, doctor of Engineering Sciences, academician of Russian Academy of Sciences, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, d. 12/1, 1st Zapadny proezd, 124460, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru

SIMPLIFIED DESCRIPTION OF DARK MODE FORMATION IN DISCRETE NANOWAVEGUIDE

This article discusses the problem of long-range propagation of electromagnetic excitation along a linear chain of nanoparticles. The problem is considered in the nearest neighbors approximation. Here we derived the approximate formula for the wave interaction parameter of neighboring particles. Resonance wavelengths for Au nanospheres are calculated. Comparison with the results of exact calculations shows, that the approximate formula is valid only for wavelengths of electromagnetic radiation. At these wavelengths, the imaginary part of the dielectric constant of the particle material has a close to zero minimum with a negative real part.

Keywords: optical nanowaveguide, coupled resonator, excitation transfer, dark mode.

Data of authors:

Sapegin Aleksandr A., «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company 124460, Moscow, Zelenograd, Academika Valieva str. 12-1, e-mail: asapegin@niime.ru

Barabanenkov Mikhail Yu., doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of microelectronics technology and high purity materials RAS, 142432, Moscow region, Chernogolovka, Academika Osipyana str. 6, IMT RAS, e-mail: barab@iptm.ru

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЭТАПА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ В МАРШРУТЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В статье представлен математический аппарат на основе теории множеств для описания соотношения между коммутационными ресурсами базовых кристаллов гетерогенных реконфигурируемых интегральных схем и требованиями проектных пользовательских схем. С использованием предложенных в работе терминологии и обозначений построена модель коммутационных ресурсов гетерогенной реконфигурируемой интегральной схемы, формализована задача трассировки межсоединений проектных схем в рамках классического маршрута проектирования. Предложенный математический аппарат разработан в связи с необходимостью оперативной настройки средств автоматизации проектирования на разные архитектуры и структурные элементы коммутационных ресурсов базовых кристаллов реконфигурируемых интегральных микросхем.

Ключевые слова: гетерогенная интегральная схема, программное прототипирование, система автоматизации проектирования, трассировка, теория графов.

Сведения об авторах:

Эннс Виктор Иванович, кандидат технических наук, Акционерное общество Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, e-mail: venns@niime.ru

Гаврилов Сергей Витальевич, доктор технических наук, профессор, Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3, e-mail: s.g@ippm.ru

Заплетина Мария Андреевна, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3, e-mail: zapletina_m@ippm.ru

ПРОГРАММНОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ С ДРЕВОВИДНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

В работе описан метод программного прототипирования архитектуры программируемых логических интегральных схем (ПЛИС, FPGA) и реконфигурируемых систем на кристалле, основанный на множественных запусках системы автоматизации проектирования (САПР), интегральных схем с использованием набора тестовых пользовательских проектов. Также в статье показана обобщенная формализованная модель целевого кристалла и проектных пользовательских схем, которая может быть использована в САПР для обеспечения его гибкой настройки на любую архитектуру реконфигурируемой интегральной схемы. Практическое применение разработанного метода программного прототипирования продемонстрировано на примере итерационного изменения древовидной трассировочной архитектуры группы логических блоков программируемой логической интегральной схемы.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, реконфигурируемая система на кристалле, система автоматизированного проектирования, программное прототипирование, древовидная архитектура.

Сведения об авторах:

Эннс Виктор Иванович, кандидат технических наук, Акционерное общество Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, email: venns@niime.ru

Гаврилов Сергей Витальевич, доктор технических наук, профессор, Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3, email: s.g@ippm.ru

Хватов Василий Михайлович, Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, 124365, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Советская, д. 3, email: khvatov_v@ippm.ru

Курбатов Владислав Геннадьевич, Акционерное общество Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, 124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, email: vkurbatov@niime.ru

FORMALIZATION OF THE AUTOMATIC ROUTING STAGE IN THE DESIGN FLOW ON HETEROGENEOUS RECONFIGURABLE INTEGRATED CIRCUITS

The paper presents a mathematical apparatus based on set theory to describe the relationship between the routing resources of the basic circuit of heterogeneous reconfigurable integrated circuit and the requirements of custom design circuits. Using the terminology and designations proposed in the work, a model of the routing resources of a heterogeneous reconfigurable integrated circuit is built, and the task of interconnections routing is formalized for user circuits design flow in the basis of heterogeneous reconfigurable integrated circuit. The proposed mathematical apparatus was constructed due to the need to quickly adjust the design automation tools for different architectures and structural elements of the routing resources of the basic circuits of reconfigurable integrated circuits.

Keywords: heterogeneous integrated circuit, software circuit prototyping, computer-aided design, routing, graph theory.

Data of authors:

Enns Victor Ivanovich, Candidate of technical science, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, 6/1, Akademika Valiyeva Street, Moscow 124460, Russian Federation, e-mail: venns@niime.ru

Gavrilov Sergey Vitaliyevich, Doctor of technical science, professor, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 3, Sovetskaya Street, Moscow 124365, Russian Federation, e-mail: s.g@ippm.ru

Zapletina Mariya Andreevna, Federal State-Funded Institution of Science Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 3, Sovetskaya Street, Moscow 124365, Russian Federation, e-mail: zapletina_m@ippm.ru

SOFTWARE CIRCUIT PROTOTYPING AND ANALYSIS OF RECONFIGURABLE INTEGRATED CIRCUITS USED A TREE BASED ARCHITECTURE

The paper describes a method for software circuit prototyping of field programmable gate arrays (FPGA) and reconfigurable systems on a chip (RSoC) architecture, based on multiple launches of an integrated circuit computer aided design system (CAD) using a set of user test designs. This paper also shows a generalized formalized model of the target chip and user design that can be used in CAD to provide its flexible adjustment to any architecture of a reconfigurable integrated circuit. The practical application of the developed software circuit prototyping method is demonstrated on the example of iterative modification of the tree-based routing architecture in an FPGA logic array blocks.

Keywords: field programmable gate array, reconfigurable system on a chip, computer aided design system, software circuit prototyping, tree-based architecture.

Data of authors:

Enns Victor Ivanovich, Candidate of technical science, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, 6/1, Akademika Valiyeva Street, Moscow 124460, Russian Federation, email: venns@niime.ru

Gavrilov Sergey Vitaliyevich, Doctor of technical science, professor, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 3, Sovetskaya Street, Moscow 124365, Russian Federation, email: s.g@ippm.ru

Khvatov Vasilii Mikhaylovich, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 3, Sovetskaya Street, Moscow 124365, Russian Federation, email: khvatov_v@ippm.ru

Kurbatov Vladislav Gennadiyevich, «Molecular Electronic Research Institute», Stock Company, 6/1, Akademika Valiyeva Street, Moscow 124460, Russian Federation, email: vkurbatov@niime.ru

**ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3.
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ©**

Перерегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций 14 августа 2013 г., ПИ №ФС77-55092.

Журнал издается 4 раза в год с 1965 года.
Подписано в печать 29.10.2021.

Отпечатано в ФГУП «Издательство «Наука»
(Типография «Наука») 121099, Москва, Шубинский пер., 6
Заказ №8
Тираж 500 экз. Цена договорная.

© При перепечатке ссылка на журнал «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА. Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА» обязательна. Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей. Рукописи рецензируются, но не возвращаются. Срок рассмотрения рукописей – 5 недель.

ИЗДАТЕЛЬ

ФГУП «Издательство «Наука»
117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
E-mail: info@naukaran.com
<https://naukapublishers.ru>
<https://naukabooks.ru>