

**Моделирование характеристик и оптимизация
конструктивно-технологических параметров
интегральных магниточувствительных элементов
в составе микро- и наносистем**

А.В. Козлов, А.Ю. Красюков, Т.Ю. Крупкина, Ю.А. Чаплыгин

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

**Characteristics Simulation and Optimization
of Constructive and Technological Parameters
of Integrated Magnetosensitive Elements
in Micro- and Nanosystems**

A.V. Kozlov, A.Yu. Krasjukov, T.Yu. Krupkina, Yu.A. Chaplygin

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Рассмотрены особенности приборно-технологического моделирования интегральных магниточувствительных элементов в составе микро- и наносистем. Представлены результаты моделирования и оптимизации конструктивно-технологических параметров для магниточувствительных транзисторов, интегральных элементов Холла, формируемых в рамках стандартной КМОП-технологии, полевого датчика Холла на основе КНИ-структур, а также характеристики концентраторов магнитного поля.

Ключевые слова: интегральные магниточувствительные элементы; магниточувствительные транзисторы; интегральные элементы Холла; приборно-технологическое моделирование.

Some specific features of the device-technological simulation have been considered. The results of the simulation and optimization of the integrated magnetosensitive elements as a part of micro- and nanosystems have been considered. The results of the simulation and optimization of the constructive – technological parameters for magnetosensitive transistors, Hall integrated elements, formed within the CMOS technology standards and the field Hall sensor based on the SOI technology as well as the characteristics of magnetic field concentrators have been presented.

Keywords: integrated magnetosensitive elements; magnetosensitive transistors; integrated Hall elements; process and device simulation.

Введение. Одно из важных направлений научно-технических исследований в области создания и совершенствования базовых элементов микроэлектроники и микро-системной техники – разработка и использование методов приборно-технологического

моделирования (ПТМ) [1]. Результаты исследований позволяют решать широкий круг задач по разработке технологических процессов, интегральных полупроводниковых приборов, обеспечивать интерфейс между производством и дизайн-центрами, повышать уровень технологичности выпускаемых изделий, разрабатывать интегральные элементы, устойчивые к разбросу технологических параметров, повышать выход годных изделий. ПТМ является традиционной частью проектирования для производства и применяется для оптимизации полупроводниковых приборов и технологий, для анализа различных отклонений параметров технологических процессов и их влияния на электрические характеристики приборов.

Значительную часть изделий нано- и микросистемной техники создают с использованием возможностей интегрального микроэлектронного производства. В состав микро- и наносистем входят не только элементы и блоки цифровой обработки сигналов, изготавливаемые по интегральной технологии, но и интегральные чувствительные элементы, преобразующие входную информацию в электрический сигнал: магниточувствительные транзисторы, интегральные элементы Холла, чувствительные элементы резистивного типа для микроболометров и др.

Интегральная технология совершенствуется применительно к новым задачам создания сенсорных и исполнительных элементов микро- и наносистем. Средства ПТМ Sentaurus TCAD компании Synopsys позволяют разрабатывать эффективные модели для расчета и оптимизации конструктивно-технологических параметров создаваемых элементов, повышения их чувствительности, минимизации размеров, снижения технологического разброса. Сквозной характер моделирования позволяет анализировать взаимосвязь технологических и приборных характеристик, что существенно для адаптации интегральных технологических маршрутов к особенностям создания элементов микросистем.

Моделирование интегральных магниточувствительных элементов. Исследование магниточувствительных элементов датчиков магнитного поля (ДМП) в составе интегральных микросхем средствами ПТМ проводится на кафедре интегральной электроники и микросистем МИЭТ с 2000 г. За этот период осуществлялось моделирование структур классического полевого элемента Холла, магнитодиодов, структур латерального двухколлекторного биполярного и планарного магниточувствительных транзисторов, концентраторов магнитного поля. В настоящее время исследуются структуры КНИ полевого элемента Холла.

На сегодняшний день существует большое количество дискретных и интегральных преобразователей магнитного поля, отличающихся механизмами его преобразования, размерами элементов, типами материалов, из которых они изготовлены, и электрическими параметрами [2–4]. Преобразователями магнитного поля могут служить такие известные элементы, как датчики Холла, магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы, магнитотиристоры, гальваномагниторекомбинационные элементы, полевые гальваномагниторекомбинационные магнитотранзисторы, преобразователи магнитного поля на доменоносителях, датчики Виганда, магниточувствительные Z-элементы, феррозондовые датчики, сверхпроводниковые структуры и некоторые другие преобразователи, выполненные на их основе.

Магниточувствительные элементы ДМП характеризуются такими критериями, как размер активной области, разрешающая способность, потребляемая мощность, занимаемая площадь на кристалле, величина тока управления, магнитная чувствительность, диапазон рабочих частот, диапазон индукции магнитного поля и др.

На рис.1 приведен перечень наиболее известных преобразователей магнитного поля с их характерным диапазоном магнитной индукции.

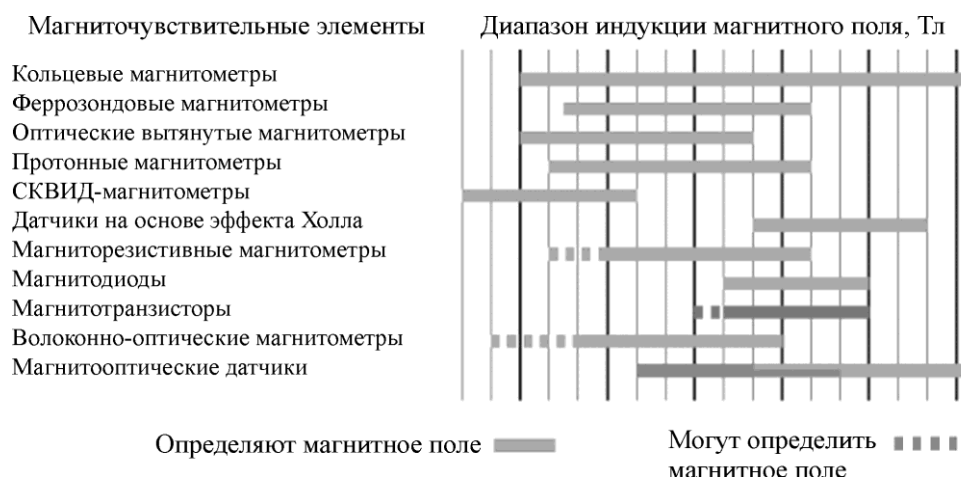


Рис. 1. Диапазоны измерения магнитных полей различных преобразователей магнитного поля [5]

При разработке ДМП в составе микросистемы, способных измерять как параметры магнитного поля Земли, так и источники с более высокой величиной магнитной индукции, практическое применение находит класс магнитотранзисторов с диапазоном от десятков микротесла до единиц тесла. Важно отметить, что наряду с указанным диапазоном преимуществом магнитотранзисторов является возможность предварительного усиления выходного сигнала, возможность их формирования в едином технологическом маршруте, невысокая потребляемая мощность и высокая чувствительность.

Моделирование интегральных магниточувствительных элементов в среде TCAD предполагает разработку вычислительных моделей для сквозного ПТМ для каждого типа элементов, выбор необходимых уравнений и параметров моделей. В среде Sentaurus TCAD в настоящее время существуют и развиваются следующие транспортные модели: диффузионно-дрейфовая, термодинамическая, квазигидродинамическая, гидродинамическая, кинетическая, гибридная и квантовая. Масштаб магниточувствительных элементов в горизонтальном и вертикальном измерениях и рабочие частоты элементов позволяют проводить моделирование магниточувствительных элементов в приближении диффузионно-дрейфовой модели.

Результаты и их обсуждение. Наибольший интерес в классе магнитотранзисторов представляет латеральный двухколлекторный биполярный магниточувствительный транзистор (ДКБМТ), изготавливаемый по КМОП-технологии.

ДКБМТ является полупроводниковым интегральным прибором (рис.2,а), сочетающим в себе два биполярных транзистора, имеющих общий эмиттер. Их работа зависит от направления и индукции магнитного поля. Формирование биполярных транзисторов проводится с помощью стандартных операций КМОП технологического маршрута совместно с остальными элементами ИС путем ионной имплантации или диффузии. Магнитная чувствительность таких структур, как правило, не превышает 0,35–0,4 1/Тл, что затрудняет применение магнитоэлементов в составе ДМП радиоэлектронной аппаратуры.

Разработанная модель ДКБМТ обеспечивает проведение расчетов электрических характеристик и электрофизических параметров областей прибора средствами ПТМ. Исследование ДКБМТ с помощью ПТМ позволило повысить относительную магнитную чувствительность до 0,9–1 1/Тл путем размещения транзистора в двойном диффузионном кармане, а также исследовать механизм смены знака дифференциального сигнала при неизменном направлении магнитного поля. Разработанная конструкция ДКБМТ [6] представлена на рис.2,б, распределение концентрации электронов в ДКБМТ в двойном кармане – на рис.3.

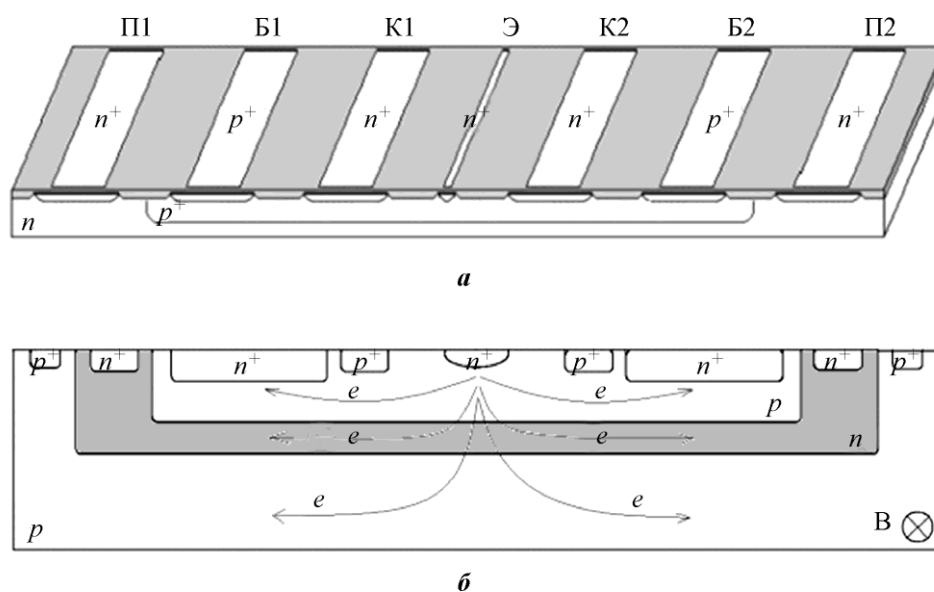


Рис.2. Структура латерального двухколлекторного биполярного магниточувствительного транзистора: а – транзистор, сформированный в диффузионном кармане; б – двумерное сечение разработанной структуры ДКБМТ в двойном кармане. П1 и П2 – левый и правый контакты к подложке; Б1 и Б2 – левый и правый контакты к базе; К1 и К2 – левый и правый коллекторы; Д1 и Д2 – контакты к левой и правой частям n-кармана; Э – эмиттер

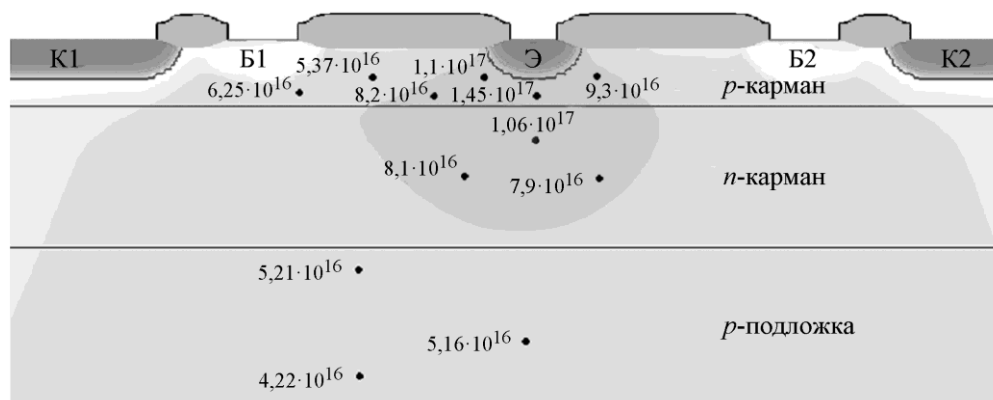


Рис.3. Расчетное распределение концентрации электронов в ДКБМТ в двойном кармане при включении по схеме с общим эмиттером с объединением контактов подложки, базы и n-кармана при напряжениях база–эмиттер $V_{Б-Э} = 0,9$ В

На основе опыта исследования двухколлекторного биполярного магнитотранзистора проведено также исследование и оптимизация трехмерной конструкции планарного магнитотранзистора.

В качестве чувствительных элементов при измерении величины напряженности магнитного поля в системах промышленного контроля, в потребительской электронике широко используются элементы Холла. Интегральные элементы Холла в составе микро- и наносистем позволяют измерять не только величину напряженности магнитного поля, но и скорость, положение объекта и другие характеристики. В интегральном виде элемент Холла может быть реализован в стандартном КМОП-маршруте. Как правило, элемент Холла имеет крестовидную топологию [7].

Важными параметрами элемента Холла являются магниточувствительность и сопротивление прибора. Для исследования и оптимизации характеристик элемента Холла, формируемого в стандартном КМОП-маршруте, разработана приборно-технологическая модель такого элемента [8]. Средствами TCAD сформирована трехмерная модель элемента Холла, представленная на рис.4,а. В данной модели элемент Холла реализован в виде глубокой области *n*-кармана (SNWELL).

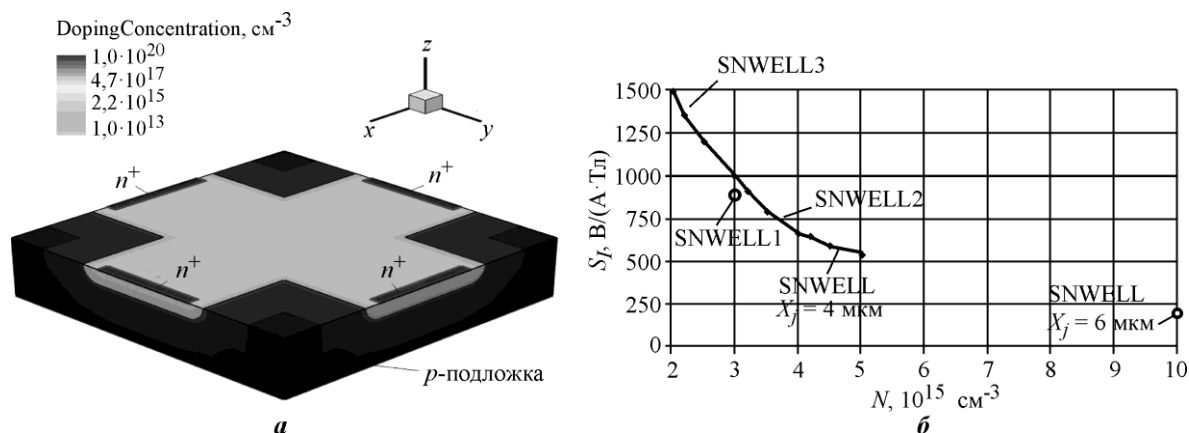


Рис.4. Результаты моделирования интегрального элемента Холла: а – 3D-модель элемента Холла, реализованного в виде *n*-кармана SNWELL; б – зависимость относительной магниточувствительности элемента Холла от максимальной результирующей концентрации примеси в кармане

Последовательность технологических операций стандартного КМОП-маршрута не позволяет варьировать концентрацию примеси в данной области. Однако относительная магниточувствительность элемента Холла по току связана с поверхностной концентрацией обратно пропорционально согласно уравнению

$$S_I = \frac{1}{I_D} \frac{dV_H}{dB} = \frac{1}{N_s e} \frac{dV_H}{dB}, \quad (1)$$

где V_H – напряжение Холла; B – приложенное магнитное поле; I_D – входной ток; N_s – поверхностная концентрация примеси.

Моделирование показало, что максимальная магниточувствительность элемента Холла по току S_I для типовых значений N_s не превышает 236 В/(А·Тл), что недостаточно для большинства применений. На основании разработанной трехмерной модели проведено исследование возможности уменьшения концентрации примеси и глубины залегания кармана за счет использования топологии маски для легирования кармана, сформированной в виде массива малых окон. В процессе оптимизации топологии рассмотрены варианты топологии с малыми окнами в форме прямоугольных полос (SNWELL1) и малых квадратов, расположенных с различным шагом (SNWELL2, SNWELL3). При использовании маски в виде массива окон распределение примеси в горизонтальном направлении становится неоднородным. Концентрация примеси под закрытыми участками маски определяется латеральной диффузией примеси с соседних островков и имеет наименьшие значения X_j и N_{\max} , что способствует существенному росту магниточувствительности элемента Холла. Однако необходимо обеспечить смыкание всех диффузионных областей после отжига. Таким образом, расстояние между окнами должно быть меньше глубины залегания примеси X_j .

Расчитаны зависимости магниточувствительности (рис. 4,б) и сопротивления датчика от максимальной концентрации примеси в кармане. В результате проведенного

моделирования и оптимизации показана возможность увеличения относительной магниточувствительности элемента Холла по току с 236 В/(А·Тл) до 1100–1500 В/(А·Тл) за счет использования симметричной топологии, состоящей из массива малых квадратных окон без внесения изменений в стандартный технологический процесс.

Полевой элемент Холла (ПЭХ) – один из самых распространенных магниточувствительных элементов благодаря безотказной работе и простоте интеграции с другими элементами интегральной схемы. Однако недостатками ПЭХ традиционно являются большая занимаемая площадь на кристалле, сравнительно небольшая чувствительность и высокая потребляемая мощность. ПЭХ на основе КНИ структуры представлен в работе [9]. Он превосходит классический датчик Холла по таким критериям, как способность работать при высокой температуре, устойчивость к воздействию радиации, увеличение пороговой магнитной чувствительности, уменьшение рабочего тока КНИ ПЭХ, повышение отношения сигнал/шум, питание датчика постоянным током и др.

С помощью методов ПТМ на базе системы Sentaurus TCAD компании Synopsys разработана вычислительная модель полевого элемента Холла с КНИ-структурой (рис.5). Верификация модели осуществлялась путем сравнения экспериментальной и расчетной передаточных характеристик прибора.



Рис.5. Распределение примеси в сечении полевого элемента Холла КНИ-типа

На основе разработанной модели исследовано влияние концентрации примеси в рабочем слое датчика и концентрации примеси в подложке на величину тока стока. Показано, что по мере увеличения концентрации примеси ток стока растет, а его зависимость от напряжения на верхнем затворе ослабевает. Влияние концентрации примеси в подложке на ток стока проявляется при переходе в режим обеднения вследствие изменения контактной разности потенциалов на нижнем затворе.

Для повышения чувствительности интегральных ДМП используются концентраторы магнитного поля. Как правило, для создания концентратора выбирается магнитомягкий ферромагнитный материал с высокой магнитной проницаемостью, большой величиной магнитной индукции насыщения, малой коэрцитивной силой, малым гистерезисом зависимости $\mathbf{B}(\mathbf{H})$, например пермаллой.

Для оценки усилительных свойств концентратора необходимо получить распределение магнитного поля в заданной многослойной трехмерной структуре. Средствами TCAD проведены расчеты распределения магнитного поля в структурах с одним и двумя концентраторами. Расчетная модель рассматриваемой структуры с одним и двумя концентраторами включает в себя геометрию и параметры материалов концентраторов и окружающей среды. Рассчитанное распределение магнитного поля показано на

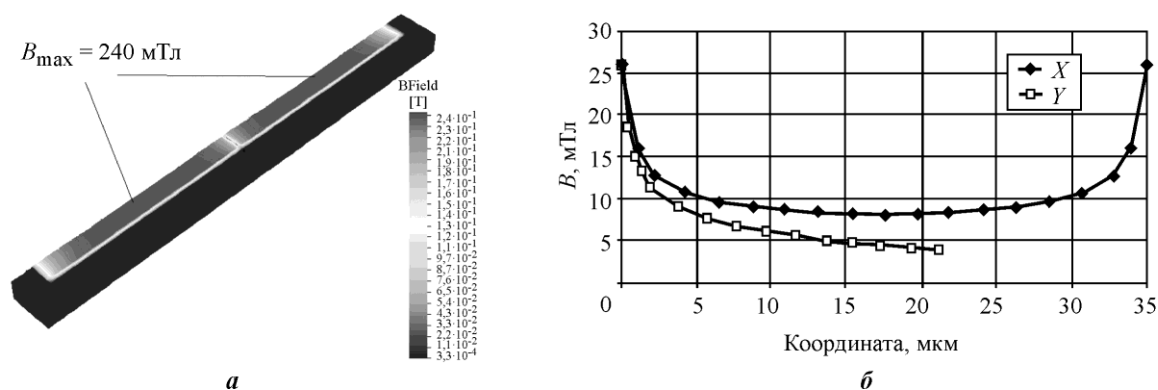


Рис.6. Распределение магнитного поля: *а* – в структуре с двумя концентраторами при $d = 1,5$ мкм, $L = 5$ мкм, внешнее поле $B = 1$ мТл, максимальное поле $B = 240$ мТл; *б* – в вертикальном Y и горизонтальном X сечениях концентратора

рис.6,а. Получены распределения магнитного поля в зазоре между концентраторами, а также в вертикальном и горизонтальном сечениях концентратора (рис.6,б). Разработанная модель позволяет проводить оптимизацию геометрии концентратора при заданных параметрах используемых материалов.

Заключение. Представленные результаты исследования и разработки интегральных магниточувствительных элементов для микро- и наносистем показали эффективность применения средств ПТМ для оптимизации конструктивно-технологических параметров с целью повышения чувствительности элементов к магнитному полю.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 2720 по заданию № 2014/101).

Литература

1. Королев М.А., Крупкина Т.Ю., Чаплыгин Ю.А. Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники // Изв. вузов. Электроника. – 2005. – №4–5. – С. 64–71.
2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера. – 2007. – С. 145–151.
3. Балтес Г.П., Попович Р.С. Интегральные полупроводниковые датчики магнитного поля // ТИИЭР. – 1986. – Т. 74. – № 8. – С. 60–86.
4. Галушков А.И., Чаплыгин Ю.А. Интегральные магниточувствительные микросистемы // Изв. вузов. Электроника. – 2000. – № 4–5. – С. 124–127.
5. Tumanski S. Induction coil sensors // Meas. Sci. Technol. – 2007. – Vol. 18. – P. R31–R46.
6. Козлов А.В., Тихонов Р.Д. Исследование структуры биполярного двухколлекторного магнитотранзистора в двойном кармане с помощью приборно-технологического моделирования: мат. VI Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2008. – М.: МИРЭА, 2008. – С. 189–193.
7. Randjelovic Z.B., Kayal M., Popovic R., Blanchard H. High sensitive Hall magnetic sensor microsystem in CMOS technology // IEEE J. of Solid-State Circuits. – 2002. – Vol. 37. – P. 151–158.
8. Чаплыгин Ю.А., Крупкина Т.Ю., Красюков А.Ю., Артамонова Е.А. Исследование влияния топологии КМОП совместимого элемента Холла на его магниточувствительность // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем-2014»: сб. науч. тр. / Под общ. ред. А.Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2014. – С. 179–184.
9. Some features of magnetometric and sensor devices based on the field effect hall sensor / M.L. Baranochnikov, A.V. Leonov, V.N. Mordkovich et al. // Advanced Electromagnetics Symposium. Proceedings. – Paris, 2012. – P. 455–459.

Статья поступила
2 июня 2015 г.

Козлов Антон Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем (ИЭМС) МИЭТ. *Область научных интересов:* численное моделирование технологических процессов и интегральных приборов, приборно-технологическое моделирование магниточувствительных элементов датчиков магнитного поля.

Красюков Антон Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* численное моделирование элементов интегральных схем и микросистем.

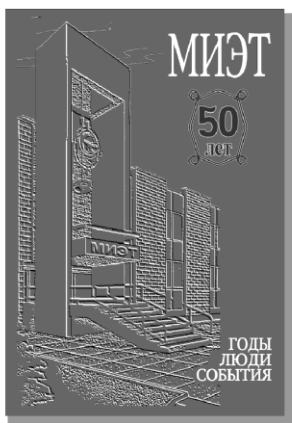
Крупкина Татьяна Юрьевна – доктор технических наук, профессор кафедры ИЭМС МИЭТ. *Область научных интересов:* моделирование технологических процессов и интегральных приборов, проектирование элементной базы и микросистем, интегральной наноэлектроники. **E-mail: Krupkina@dtd.miee.ru**

Чаплыгин Юрий Александрович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ИЭМС МИЭТ, ректор МИЭТ. *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, микро- и наносистемная техника, нанотехнология, фундаментальные и прикладные проблемы создания интегрированных устройств приема и обработки информации на основе технологии микро- и наноэлектроники.

К 50-летию МИЭТ

МИЭТ 50 лет. Годы, люди, события. - М.: МИЭТ, 2015. - 392 с. (Биография вуза). ISBN 978-5-7256-0825-0 (в пер.).

Редакционная коллегия: Чаплыгин Ю.А. (председатель), Вернер В.Д., Гаврилов С.А., Коваленко Д.Г., Руденко А.А.



Предлагаемая вниманию читателя книга – из серии «Биография вуза». Приурочена к 50-летию Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники» – ведущего вуза Российской Федерации, готовящего высококвалифицированных специалистов в области микроэлектроники и информатики.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: выпускников Университета, число которых к настоящему времени превышает 25 тыс., преподавателей, сотрудников и студентов – нынешних и будущих, которые в одном издании могут получить исчерпывающую информацию о МИЭТ.