



О перспективах научно-технических исследований

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИОФОТОНИКИ

В. А. ЛАБУНОВ

MICROELECTRONICS CAPABILITIES EXPANDING USING RADIOPHOTONICS TECHNOLOGY

VLADIMIR A. LABUNOV

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Введение

Информационные технологии представляют собой процессы создания, хранения, передачи, восприятия информации, а также методы и средства их реализации. Для обеспечения этих процессов необходимо развивать высокоуровневые технологии следующих поколений, к которым относятся: интернет вещей IoT, большие данные, беспроводная мобильная связь 5G, облачные вычисления, дополненная и виртуальная реальность, автономные подвижные средства, автоматизация (включая промышленных роботов), умные фабрики, квантовые вычисления. Особое место отводится искусственному интеллекту (ИИ). Предполагается, что ИИ будет драйвером высоких технологий. Перечисленные технологии взаимосвязаны: большие данные обрабатываются и передаются с помощью мобильной беспроводной связи и хранятся в облачных хранилищах. Эта связь обеспечивает повышение производительности, расширение полосы пропускания и энергетическую эффективность информационных систем. Во главе всего стоит интегральная схема (ИС) – КМОП-чип, т. е. микроэлектроника определяет развитие информационных технологий.

Основные вехи развития микроэлектронной промышленности

Долгое время микропроцессоры служили двигателями электронной промышленности. Уменьшение топологических норм полупроводниковых ИС (масштабирование) определяло прогресс в развитии этой отрасли, которое осуществлялось согласно закону Мура, гласящему: «Количество компонентов на кристалле удваивается каждые 24 месяца». До технологической нормы 90 нм масштабирование осуществляется только за счет геометрического фактора (классическое масштабирование), а с 90 нм – за счет применения новых материалов и структур. Характеристики транзисторов в основном определяются конструкцией затвора, которая обеспечивает электростатический контроль за каналом транзистора. GAA-транзистор представляет собой отдельные горизонтальные нанопластинки, каждая из которых является каналом. Затвор охватывает все пластинки канала. Этот транзистор еще называют нанопластинчатым. Транзистор GAA фирмы TSMC (Тайвань), которая в 2021 г. разработала ИС с транзисторами с технологической нормой 3 нм, – наиболее эффективен. Массовое производство GAA-транзисторов запланировано на 2024 г.

Медная металлизация ИС, которая используется сегодня во всех выпускаемых в мире ИС, была разработана в МРТИ (ныне – БГУИР). Впервые она упоминалась в журнале «Доклады Академии наук СССР» [1]. Также в рамках проекта Европейского союза Plated Copper Interconnect Systems for Advanced Microelectronics (INTAS-BELARUS, Project 97-0880, February 2001) была разработана технология медной металлизации. Уже в 2003 г. в промышленном производстве появились ИС с медной металлизацией, в результате чего впервые была достигнута технологическая

норма ИС 90 нм. Однако в Беларуси данная технология не используется, поскольку интегральные схемы, выпускаемые по отечественным технологическим нормам, не требуют медной металлизации.

Обычно развитие микроэлектроники связывают с законом масштабирования Мура. Однако он не полностью отражает картину развития микропроцессорной и вычислительной техники. Ее можно подробно описать лишь при рассмотрении трех взаимосвязанных законов – Мура, Деннарда и Амдахла.

Закон Мура используется в полупроводниковой индустрии более 50 лет, определяя долгосрочное планирование и цели для исследований и развития. К настоящему времени его действие находится на завершающем этапе. Закон масштабирования Деннарда гласит: с уменьшением размера транзисторов уменьшается потребляемая мощность, при этом меньшие транзисторы работают быстрее, в результате повышается тактовая частота процессора и пропорционально повышается его производительность. Таким образом, закон Деннарда соотносит масштабирование с производительностью, что определяет долгосрочный прогресс в развитии микропроцессорной и вычислительной техники. Законы Мура и Деннарда связаны с миниатюризацией, но если закон Мура определяет только повышение степени интеграции при миниатюризации, то закон Деннарда расширяет закон Мура, связав масштабирование с повышением производительности. Эти два закона определили, что постоянно уменьшающийся размер транзистора (технологический фактор) стал главным показателем прогресса в индустрии микропроцессорной техники. Однако, если закон Мура работает уже более 50 лет, и только к настоящему времени предсказывается окончание его действия, то закон Деннарда перестал выполняться в полной мере к 2016 г., хотя количество транзисторов в ИС продолжает увеличиваться. Отсюда нет результирующего улучшения в производительности – этот факт связан с пробоями в транзисторах малого размера и увеличенными токами утечки, что приводит к нагреву чипа и к повышенному потреблению энергии. Окончание действия закона Деннарда, которое приведет к невозможности увеличения тактовой частоты, стимулировало большинство производителей микропроцессорной техники перейти на использование многоядерных процессоров, как на альтернативный путь увеличения производительности.

В параллельных вычислениях часто применяется закон Амдахла, теоретически предсказывающий увеличение производительности при использовании многоядерных процессоров. Эти мультипроцессоры помогли поддерживать постоянный рост производительности за счет параллельных вычислений, но их использование привело к повышению потребления энергии. Кроме того, согласно анализу закона Амдахла, ускорение параллельных вычислений, в конечном счете, ограничено, и они не смогут решить всех проблем после окончания действия закона Мура. Получение оптимальных характеристик многоядерных процессоров потребует дальнейших исследований в развитии параллелизма и обеспечении более высокой скорости отдельных ядер.

На рис. 1 представлены графики тенденций масштабирования микропроцессорной техники.

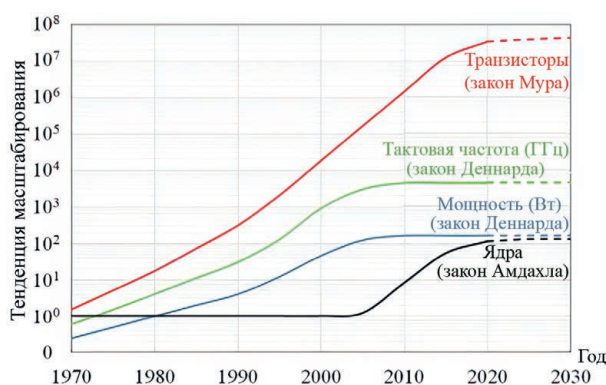


Рис. 1. Тенденции масштабирования микропроцессорной техники
Fig. 1. Trends in microprocessor technology scaling

Как видно из рис. 1, число транзисторов на кристалле (закон Мура), тактовая частота и мощность (закон Деннарда) и число ядер (закон Амдахла) возрастают начиная с 1970-х годов, но с 2020-го эти законы демонстрируют симптомы насыщения. Такая ситуация приводит к необходимости искать новые решения повышения функциональных возможностей и производительности электронных изделий. Выходом из положения является объединение электроники с совместимыми технологиями, такими как фотоника.

Объединение электроники и фотоники

Сегодня драйвер прогресса IoT – непрерывный и глобальный рост информации и рынка коммуникаций, которые требуют развития сверхскоростных (до 100 Гб/с), а, значит, и сверхширокополосных (с полосой пропускания до 100 ГГц) линий передачи данных, что невозможно обеспечить электронными средствами. Дело в том, что за последние три десятилетия, согласно законам Мура, Деннарда и Амдахла, быстродействие активных компонентов, размещенных на кремниевом кристалле, постоянно возрастало. В то же время скорость носителей в металлических проводниках, соединяющих отдельные компоненты, оставалась неизменной. В результате общее время задержки на логических элементах сопоставимо или даже превышает время переключения транзисторов, т. е. именно время соединения и обмена информацией между составляющими компонентами чипа определяет предел быстродействия «традиционных» микропроцессоров. Выходом из ситуации является оптическая передача данных внутри кремниевого кристалла. Оптические межсоединения обеспечивают скорость передачи данных около 50–100 Гбит/с, в то время как предел используемой в настоящее время медной металлизации оценивается в 20 Гбит/с. Отсюда появилась очевидная идея – эффективно объединить полупроводниковый и фотонный миры. В результате чиповая электронная индустрия начинает развивать новую гибридную область науки и техники путем интегрирования кремниевых (электронных) интегральных схем с оптическими компонентами.

Объединение полупроводникового и фотонного миров привело к созданию новой отрасли науки и техники. В зарубежной англоязычной литературе в подавляющем большинстве случаев для идентификации этой области используется термин «микроволновая фотоника» (Microwave Photonics, MWP). Однако в повседневном применении эту область называют фотоникой. Микроволновая фотоника – дисциплина, направленная на изучение физики, технологии и методов генерации, обработки и применения оптических полей, модулированных радиочастотными сигналами (с частотным диапазоном до 100 ГГц и более). Основными компонентами общей фотонной структурной схемы являются источник света (лазер), электрооптический преобразователь (модулятор), преобразователи сигналов (волноводы) и оптоэлектронный преобразователь (фотоприемник).

Этапы развития фотоники

Первичным этапом развития фотоники явилось создание устройств на основе дискретных фотонных компонентов. Здесь всегда стояли проблемы надежности традиционных дискретных оптических систем. На смену дискретной микроволновой фотонике пришла интегральная фотоника, когда активные и пассивные оптические компоненты формируются в едином технологическом процессе на одном чипе. Конечный продукт такой технологии – фотонные интегральные схемы (ФИС). Одновременно с ФИС на чипе или на пластине могут формироваться необходимые микроэлектронные компоненты и блоки. В этом случае считается, что понятие «фотоника» неадекватно отражает ситуацию. Намного корректнее такую область называть интегральной радиофотоникой, конечным продуктом которой являются радиофотонные ИС (РФИС). В случае, когда РФИС интегрированы с изделиями микроэлектроники, имеет смысл использовать термин «радиофотонные системы».

Фундаментальные преимущества интегральной радиофотоники:

- сверхмалые потери при передаче сигналов;
- возможность передачи сверхширокополосных сигналов, вплоть до терагерц;
- высокая скорость передачи данных (сегодня – 100х, завтра – 1000х);
- управляемость и контролируемость процессов;
- помехозащищенность (устойчивость к внешним электромагнитным излучениям).

Интегральный подход позволяет обеспечивать малые мощность и цену, низкую задержку, увеличенную плотность полосы частот и улучшенные рабочие характеристики информационных систем, что необходимо для удовлетворения требований взрывообразного роста данных и трафика данных. Согласно зарубежным источникам, пик инвестиций в развитие дискретных технологий фотоники пройден, в настоящее время усилия концентрируются на интегральной радиофотонике.

Технологические платформы фотонных интегральных схем

Базовым компонентом интегральной радиофотоники являются ФИС. Технологические платформы ФИС определяются используемым материалом. Исторически первыми материалами были фосфид индия (InP), арсенид галлия (GaAs) и нитрид кремния (SiN). Они интенсивно исследовались в течение длительного времени для придания им новых функциональных возможностей. Но одновременно развивались и другие технологические платформы на основе таких материалов, как кремний (Si) или кремний на изоляторе (КНИ, которому в последнее время уделяется особое внимание), тонкие пленки нитрида лития на изоляторе (LNOI), полимеры, стекло, силикон и плазмонная фотоника. В настоящее время в основном используются две действующие технологические платформы – ФИС на основе фосфида индия и на основе кремния.

Платформа на основе фосфида индия получила наибольшее распространение, все компоненты ФИС в ней выполняются в кристалле InP. Это перспективные системы в чипе, позволяющие передавать данные с высокой скоростью, используя оптические носители, функционирующие в видимой и инфракрасной областях электромагнитного спектра (350–1650 нм), обеспечивающие комплексные функции, аналогичные электронным ИС. Наивысшую степень интеграции (2000 функций в чипе) имеет оптический трансмиттер, показавший рекордные 4.9 Tbps объема данных. Будущая интеграция с электронными схемами (драйверы, логика) расширит функциональность InP ФИС для широкого спектра приложений. Однако такая степень интеграции привела к большому размеру чипа и его высокой стоимости. В результате степень интеграции в чипе фактически не увеличилась за последние десять лет.

Платформа на основе кремния идеальна благодаря высокой развитости и экономичности КМОП-технологии производства кремниевых ИС, с которой она совместима. Кремний обладает важными оптическими свойствами в ближней инфракрасной области: он работает на длине волны 1,55 мкм, используемой в большинстве оптоволоконных телекоммуникационных системах. Базовые компоненты кремниевой фотоники – модуляторы, волноводы и фотоприемники – также могут быть созданы в кремнии по КМОП-технологии. Однако основы оптической связи требуют обеспечения возможности не только модулировать и детектировать свет, но и генерировать. Кремний не может быть использован для создания лазеров и оптических усилителей (не прямозонный полупроводник). Выход из положения – применение III–V полупроводников (InP, GaAs, SiN), которые являются прямозонными для всех длин волн, для создания III–V лазеров на кремнии. Такая гетерогенная интеграция привела к появлению термина «гибридная кремниевая фотоника», конечный продукт которой – гибридные кремниевые ИС. Эта технология является прорывной для следующих поколений ФИС и определяет размер, вес, мощность и целевые характеристики для различных приложений.

В случае гибридных кремниевых ИС лазерный источник отделен от чипа. Его нужно интегрировать с кремниевой подложкой. Но следует иметь в виду, что это приводит к высокой стоимости, сложности корпусирования и неизбежным потерям на соединениях, ограничивающим сохранение мощности. При гибридном подходе лазер может быть вне кремниевой подложки, может связываться с ней с помощью волоконного волновода или припаиваться к подложке.

Многообещающим подходом для решения проблемы повышения степеней интеграции является реализация гибридной технологии (технологии мембраны из фосфида индия InP на кремнии), основанной на использовании InP-мембраны субмикронной толщины, сформированной на кремниевой пластине. Радиофотоникой занимается множество компаний в мире, и каждая из них разрабатывает свою технологическую платформу, содержание которой в большинстве случаев не раскрывается.

Закон Мура в кремниевой фотонике

Интеграция ФИС развивается по тому же пути, что и микроэлектронная интеграция. В развитии этих двух направлений есть много схожего. На рис. 2 представлен рост степени интеграции (компонентов в чипе) радиофотонных схем с 1980 по 2020 год (и перспективы до 2030 г.). Наблюдается экспоненциальный рост степени интеграции, аналогичный закону Мура в электронике, хотя с несколько меньшим градиентом [2]. В начале века ФИС содержали десятки компонентов. Когда интеграция с лазерами и модуляторами улучшилась, соединились сотни компонентов. Наиболее сложные схемы, включающие лазеры, модуляторы, детекторы и мультиплексоры, имеют свыше тысячи компонентов в чипе (рис. 2, синие точки).



Рис. 2. Закон Мура в кремниевой фотонике
Fig. 2. Moore's law in silicon photonics

Наибольшее число компонентов в чипе, полученное до настоящего времени, равно 4096 для 64×64 -фазовой дифракционной решетки (рис. 2, красная точка). Однако с традиционной InP-технологией трудно продвигать уровень интеграции. Ожидается, что у ФИС, выполненных по технологии мембраны из фосфида индия на кремнии, будет обеспечена большая степень интеграции.

Основные проблемы оптических компонентов

В кремниевой фотонике не предусматриваются уровни интеграции, достигнутые ранее в цифровой микроэлектронике. Оптические компоненты обладают фундаментальным ограничением на размеры, которое диктуется дифракционным пределом. Электроны характеризуются длиной волны порядка нескольких нанометров, а фотоны – нескольких микрометров. В этом смысле фотоника схожа с аналоговой и радиочастотной СВЧ-электроникой, у которых степень интеграции тоже значительно ниже, чем в цифровой электронике.

Приборы волновой фотоники всегда будут больше по размеру, чем микроэлектронные, и могут производиться на фабриках, не требующих передовых микроэлектронных технологий. Микроэлектроника и фотоника – две разные технологии, поэтому имеет смысл держать их отдельно. В фотонике стоит задача разработки технологий и конструкций оптических компонентов с целью минимизации их размеров. Кроме больших размеров, оптические компоненты характеризуются низкой температурной стойкостью. Фундаментальная проблема при создании ФИС – изготовление проводников и волноводов с малыми потерями.

Наиболее перспективным подходом для решения проблем уменьшения размеров фотонных компонентов представляется использование поверхностных плазмонов. Они распространяются вдоль границы раздела проводник/диэлектрик и характеризуются более короткими длинами волн и высокой локализацией электромагнитного поля. Это позволяет достичь характерных размеров порядка 100 нм, что сравнимо с размерами электронных компонентов в современных микросхемах, и создать действительно наноразмерные приборы. Кроме того, фотонные компоненты на поверхностных плазмонах обладают повышенной температурной стойкостью. Исключительным материалом для плазмонных приборов является графен – гексагональная сетка из атомов углерода толщиной в один атом. Он обладает уникальными электрическими, оптическими, механическими и тепловыми свойствами. Важно, что все основные строительные блоки переднего конца архитектуры ФИС могут быть реализованы с использованием графеновой плазмоники, включая переключатели, фазовращатели, фильтры с низкой полосой пропускания или модуляторы и фотоприемники.

Компонентная база кремниевой фотоники

Ранее значительные исследования и разработки концентрировались на создании «строительных блоков» – компонентов схем, необходимых для повышения их функциональности. К таким блокам относятся активные и пассивные компоненты, а также электронные схемы.

Активные компоненты – это оптические компоненты кремниевых ФИС:

- гибридные инжекционные полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью (Distributed Feedback Laser, DFB), электроны генерируют фотоны;
- полупроводниковые оптические усилители на чипе (Semiconductor SOAs);

– полупроводниковый светодиод на чипе (Semiconductor LED-SLED) – высокая мощность, низкая когерентность; Si/Ge фотодетекторы (PD) – детектирующие нормально падающий свет (Normal-Incidence Photodetector, NIPD); волноводные PD, лавинные PD – фотоны генерируют электроны;

– кремниевые модуляторы: Mach-Zehnder-модуляторы, микрокольцевые модуляторы – электроны контролируют фотоны.

Пассивные компоненты (к ним укрупненно отнесены основные компоненты): мультиплексоры/демультиплексоры (MUX/DEMUX), оптические фильтры, разветвители/сумматоры (планарные волноводы), системы ввода/вывода оптического излучения в волноводы (Coupling I/O), интерферометры/переключатели, разнообразные поляризаторы. Основной пассивный компонент – планарный волновод, который выполняет следующие функции: управление распространением света, перенос информации фотонами, распространение света → поглощение, ограничение предельного быстродействия скоростью света в среде (оптический переключатель).

Электронные схемы включают резисторы, конденсаторы, драйверы модуляторов, контроллеры.

Сегодня для повышения функциональности схем ведутся разработки таких компонентов, как источники света, электрооптические модуляторы, фотоприемники и т. д. Среди источников света, создаваемых в настоящее время, можно выделить следующие типы:

– монолитные интегральные III-V/ViCMOS-лазеры, работающие при высоких температурах (выше 85 °C). В Физическом институте имени П. Н. Лебедева РАН разрабатывается GaN-лазер на квантовых точках на кремниевой подложке, обладающий малыми размерами и высокой температурной стойкостью;

– монолитные интегральные III-V/ViCMOS-лазеры с внутренней модуляцией; применяя их, можно исключить модулятор из радиофотонной схемы;

– полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором (VCSEL) для использования в 3D-схемах;

– широкополосный (белый) источник света для восприятия. В БГУИР разработан и прошел практическую проверку источник некогерентного света на основе наноструктурированного кремния с внутренним модулятором.

Требования к минимизации фотонных элементов вынуждают критически относиться к выбору типа электрооптического модулятора. На практике чаще всего разрабатывают и используют нерезонантные модуляторы, такие как Mach-Zehnder-интерферометры. Они имеют типичные размеры в миллиметровой области и обычно применяются в Telecom/Datacom-приложениях. Перспективным является кремний/графен Mach-Zehnder-модулятор. Разработаны устройства с полосой пропускания 30 ГГц и эффективностью модуляции 15 дБ на 10 В. В то же время резонантные модуляторы (например, кольцевые резонаторы) могут иметь размеры в несколько десятков микрометров, что позволяет использовать их в ФИС в качестве электрооптических модуляторов.

Большой интерес представляет высокоскоростной лавинный фотодиод, который представлен в работе Бартоло Переса (Калифорнийский университет) “High Sensitivity Avalanche Photodetectors for Low-Light Detection and Imaging”. В Беларуси такой фотоприемник разработан и серийно выпускается ОАО «Интеграл». Наличие фотодиодов и фотодетекторов, выполняемых по одной технологии, позволяет создать реальную фотонную систему.

Области применения кремниевой фотоники

Кремниевая радиофотоника вместе с оптическими трансиверами заняла значительную нишу в областях связи и обработки данных. Основное ее применение – для иммунологического анализа, который появился в 2020 г. В том же году кремниевая радиофотоника вышла на автомобильный рынок с LiDAR (Light Detection and Ranging) и волоконно-оптическими гироскопами. Ожидается, что другие области применения кремниевой радиофотоники появятся в ближайшие годы – это носимые устройства, например, умные часы, фотонные вычисления в искусственном интеллекте, квантовые вычисления, а также оптические межсоединения в дезагрегированных центрах обработки данных. Расширяется применение кремниевой радиофотоники и в области построения 5G-систем. В табл. 1 представлены прогнозные показатели рынка различных фотонных технологий до 2030 г.¹

¹ Photonics Market Size, Trends & Opportunities, 2024–2030. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/photonics-market-size-trends-opportunities-ug5yf> (Accessed 26 February 2024).

Таблица 1. Прогноз рынка различных технологий радиофотоники до 2030 года
Table 1. Market forecast for various radiophotonics technologies until 2030

Область применения фотоники / Application area of photonics	Прогнозный показатель, млрд долл. / Forecast figure, billion dollars
5G-системы	4–10
Дисплейные технологии	5–20
Автомобильная промышленность (LiDAR)	20–50
3D-оптическое зондирование	2–5
Биофотонное зондирование	2–5
Медицинская электроника	5–10
Приборостроение	1–3
Волоконно-оптическая связь	40–60
Воспроизводительные вычисления / искусственный интеллект	10–20
Создание центров обработки данных	20–30

Согласно табл. 1, самый большой рынок будут иметь автомобильная промышленность (применение LiDAR) – 20–50 млрд долл., трансиверы для центров обработки данных (20–30 млрд долл.) и волоконно-оптическая связь (40–60 млрд долл.). Очевидно, что первых два обозначенных приложения должны явиться предметом первостепенного внимания разработчиков ОАО «Интеграл».

Заключение

Волновая фотоника – хорошо отработанная технология и рынок для оптических трансиверов. Начиная с 2020 года, появился ряд новых важных приложений фотоники, таких как LiDAR для автомобильного и промышленного применения. Учитывая достигнутый технологический уровень ОАО «Интеграл» в области микроэлектроники, нужно рассматривать, как перспективу для него, развитие кремниевой радиофотоники. В частности, большую перспективу представляют LiDAR для автомобильного и промышленного применения, биосенсоры, бытовая электроника (умные часы), квантовые вычисления. Необходимо создание отечественной компонентной базы (сначала дискретной, затем – интегральной) с последовательным освоением технологий как в области более низких частот, так и в области высокочастотных диапазонов. Работы следует проводить в тесном сотрудничестве с предприятиями и организациями Российской Федерации.

Список литературы

1. Лабунов В. А. Влияние постоянного магнитного поля на электроосаждение меди / В. А. Лабунов [и др.] // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 311, № 1. С. 139–142.
2. Thulen, L. A Moores Law for Photonics / L. Thulen // Proceedings of International Symposium on Biophotonics, Nanophotonics and Metamaterials. 2006. P. 252–259.

References

1. Labunov V. A., Danilyuk F. L., Kurmashev V. I., Matyushkov F. L. (1990) Influence of Constant Magnetic Field Upon Copper Electrodeposition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 311 (1), 139–142 (in Russian).
2. Thulen L (2006) A Moores Law for Photonics. *Proceedings of International Symposium on Biophotonics, Nanophotonics and Metamaterials*. 252–259.

Сведения об авторе

Лабунов В. А., академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф., науч. рук. науч.-исслед. лаб. «Интегрированные микро- и наносистемы», Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-21-21
E-mail: labunov@bsuir.by
Лабунов Владимир Архипович

Information about the author

Labunov V. A., Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Scientific Director of the Research Laboratory “Integrated Micro- and Nanosystems”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-21-21
E-mail: labunov@bsuir.by
Labunov Vladimir Arkhipovich