

НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОФОТОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

М.Е. Белкин, профессор
С.А. Кудж, д.т.н., ректор
А.С. Сигов, д.ф.-м.н., президент

*Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия
Автор для переписки, e-mail: rector@mirea.ru*

Рассматриваются фундаментальные и практические преимущества внедрения нового междисциплинарного направления – радиопоники (микроволновой фоники) – в разработки современных и перспективных радиосредств двойного назначения. Главные преимущества заключаются в повышении рабочей частоты до терагерцевого диапазона, расширении полосы обработки до нескольких гигагерц, улучшении электромагнитной совместимости и массогабаритных характеристик. Дается классификация компонентной базы радиопоники, анализируется современный уровень мирового развития радиопоники с акцентом на ее второй этап: интегральную радиопонику. Кратко описываются работы в области радиопоники, выполненные и ведущиеся в Московском технологическом университете, включая результаты моделирования и экспериментальных исследований, обучение и ближайшие задачи созданного научно-технологического центра «Интегральная радиопоника».

Ключевые слова: радиопоника, терагерцевый диапазон, компьютерное моделирование, радиопонные интегральные схемы, кремниевая фоника, поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором.

NOVEL PRINCIPLES OF MICROWAVE BAND RADIOELECTRONIC DEVICES DESIGN WITH THE USE OF MICROWAVE PHOTONICS TECHNOLOGY

M.E. Belkin,
S.A. Kudzh,
A.S. Sigov

*Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia
Corresponding author e-mail: rector@mirea.ru*

There are highlighted fundamental and practical advantages referred to introduction of the new interdisciplinary scientific and technological direction, that is, microwave photonics, in modern and perspective radio means of a dual purpose. The main advantages consist in increase of operating frequency to terahertz range, expansion of a processing band to several gigahertz, improvement of electromagnetic compatibility and mass-volume characteristics. A classification of the component base of microwave photonics is proposed, the modern level of world development of microwave photonics with emphasis on its second stage, which is integrated microwave photonics, is analyzed. The works in the field of microwave photonics that have been performed or being conducted by research groups at Moscow Technological University, including results of modeling and research

projects, training, and the nearest tasks of the established Scientific and Technological Center «Integrated Microwave Photonics» are briefly described.

Keywords: microwave photonics, terahertz band, computer modeling, microwave integrated circuits, silicon photonics, VCSEL.

Введение

Анализ современного мирового развития радиоэлектронных систем СВЧ-диапазона показывает, что наиболее эффективным путем решения стратегически важной проблемы улучшения пропускной способности, массогабаритных и стоимостных характеристик, энергопотребления, надежности современных радиоэлектронных систем (РЭС) СВЧ-диапазона гражданского и военного назначений является применение для формирования и обработки сигналов методов и подходов радиофотоники (микроволновой фотоники) – нового междисциплинарного направления, созданного на стыке СВЧ-радиоэлектроники и фотоники. Реализация данного подхода в РЭС СВЧ-диапазона, помимо значительного улучшения вышеуказанных технико-экономических показателей, дополнительно приведет к улучшению таких важных характеристик РЭС двойного назначения, как электромагнитная совместимость, стойкость к внешним воздействиям (в том числе, преднамеренным), экологичность.

Актуальность и необходимость скорейшего внедрения (промышленного освоения) фотонной и радиофотонной технологий в нашей стране определяются:

- приоритетом направления радиофотоника для технологического развития отрасли электронной и радиоэлектронной промышленности в Государственной Программе Российской Федерации «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 гг.» (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 15 декабря 2012 г. № 2396-р);
- задачами создания критических и базовых промышленных технологий, задачами создания электронной компонентной базы для обеспечения выполнения Государственной программы вооружения–2020, в том числе, технологической независимости и импортозамещения для нужд стратегических отраслей в соответствии с Федеральной программой (ФЦП) «Развитие ВПК на 2012–2020 гг.»;
- возможностью преодоления технических, технологических, ресурсных, экологических и других ограничений в отечественной радиоэлектронной промышленности;
- отсутствием широкой возможности воспользоваться существующими решениями, методами, технологиями, развитыми в зарубежных странах.

Устройства и узлы радиоэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона на базе фотонной и радиофотонной технологий, в том числе устройства обработки радиосигналов, а также радиоэлектронные системы двойного назначения с применением радиофотоники широко исследуются и разрабатываются в университетах и научных секторах крупных фирм промышленно развитых зарубежных стран [1, 2]. Однако данное, важное для оборонного потенциала страны, направление очень слабо развивается в России, причем уже наметилось значительное отставание. Для поиска путей и создания условий его преодоления в последние годы при НТС ВПК создана специальная рабочая группа по радиофотонике, которой разработана Программа развития отечественной радиофотоники на 2016–2025 гг. Кроме того, Фондом перспективных исследований ВПК разработана Дорожная карта по фотонике и радиофотонике. Реализация намеченных планов в настоящее время осуществляется целым рядом университетов, учреждений Российской академии наук и предприятий радиоэлектронной промышленности.

Наш университет, имеющий многолетний опыт исследований и разработок в области микроволновой фотоники и сверхвысокочастотной оптоэлектроники [3], также принимает активное участие в этой деятельности. Так, в 2015 г. была выполнена научно-исследовательская работа «Фотон-комплекс», в которой проведен комплексный анализ необходимых мероприятий

для становления и развития научно-технического направления – нанофотоника (радиофотоника). По инициативе МИРЭА, Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) в конце 2014 г. был объявлен конкурс ориентированных фундаментальных исследований по теме «Фундаментальные проблемы новой компонентной базы радиофотоники и функциональных систем на ее основе». В рамках его в настоящее время выполняются 17 проектов, включая проект от нашего университета, связанный с поиском оптимальных путей моделирования радиофотонного диаграммообразующего устройства сверхширокополосной радиоэлектронной системы СВЧ-диапазона. Дополнительно в университете предложены и реализованы пионерские для нашей страны инициативы, связанные с переподготовкой инженерных кадров в области радиофотоники и развитием интегрального подхода к построению радиофотонной аппаратуры.

В данной статье рассматриваются фундаментальные и практические преимущества внедрения радиофотоники, дается классификация компонентной базы радиофотоники, анализируется современный уровень мирового развития микроволновой фотоники с акцентом на ее второй этап: интегральную радиофотонику. Кратко описываются работы в области радиофотоники, выполненные и ведущиеся в Московском технологическом университете, включая результаты моделирования и экспериментальных исследований, обучение и ближайшие задачи созданного научно-технологического центра «Интегральная радиофотоника».

1. Фундаментальные и практические преимущества внедрения радиофотоники

В современном понимании фотоника означает обширную область знаний, в которой изучаются разнообразные явления, связанные с оптическим излучением (светом). Одним из новых направлений фотоники является сверхвысокочастотная оптоэлектроника [3], появившаяся в результате интеграции оптоэлектроники и СВЧ-радиоэлектроники. В развитие СВЧ-оптоэлектроники в последнее время используется новый термин «радиофотоника» (РФ), охватывающий более широкую область знаний. Основные объекты исследования РФ: полупроводниковые лазеры, фотодиоды и фототранзисторы, СВЧ-диоды и транзисторы с дополнительным оптическим вводом, а также узлы и модули на основе их сочетания между собой и со сверхскоростной цифровой и аналоговой компонентной базой микроэлектроники.

Цели и задачи РФ: исследования и разработки сверхбыстродействующих активных оптоэлектронных приборов и устройств с полосой пропускания в радиодиапазоне, их применения в различных оптических и радиотехнических системах передачи информации, а также создание активных приборов и устройств формирования и обработки сигналов радиочастотного диапазона с использованием оптических и оптоэлектронных средств.

К фундаментальным преимуществам радиофотонной технологии, позволяющим совершенствовать характеристики радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона, можно отнести следующие:

Базирующиеся на фундаментальных свойствах носителей информации: фотон – безмассовая элементарная частица, способная существовать, только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Это обеспечивает:

- повышенное быстродействие (до десятков фемтосекунд);
- расширенную полосу пропускания (до терагерцевого диапазона).

В результате улучшаются тактико-технические показатели традиционных узлов формирования и обработки СВЧ сигналов: генератора, преобразователя частоты, линии задержки, фильтра и т.д.

Базирующиеся на свойствах среды распространения: кварцевое оптическое волокно –

- малые потери при передаче ($<0,2$ дБ/км) и независимость их от частоты модуляции в радиочастотном диапазоне (рис. 1);

- расширенная рабочая полоса частот (до 15 ТГц);
- гораздо лучшие массогабаритные характеристики (волоконный кабель: масса 1,7 кг/км, диаметр 250 мкм; коаксиальный кабель: масса 560 кг/км, диаметр 10 мм);
- нечувствительность к электромагнитным наводкам (диэлектрик): улучшение электромагнитной совместимости внутри системы, повышение имитостойкости аппаратуры;

• значительно лучшие фазотемпературные характеристики: фазовая стабильность и возможность когерентного приема и обработки сигналов (рис. 2). Относительное изменение задержки на единицу длины и градус температуры для волокна без покрытия составляет $8 \cdot 10^{-6}$ [4], если оно не прикреплено механически к другому материалу с большим коэффициентом температурного расширения.

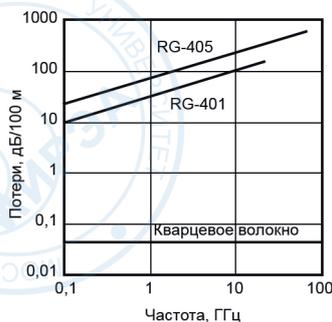


Рис. 1. Потери в функции от частоты, включая только потери при распространении в коаксиальном кабеле типов RG-401, RG-405 (увеличиваются пропорционально квадратному корню от частоты) и в оптическом волокне.

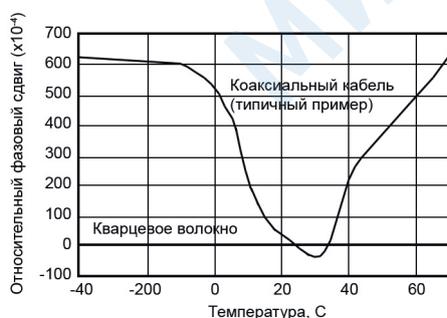


Рис. 2. Типичная температурная зависимость относительного фазового сдвига для коаксиального кабеля и оптического волокна.

В результате улучшаются тактико-технические показатели и характеристики передачи радиосредств.

Принципиальным недостатком использования радиофотонной технологии в РЭС является необходимость операций прямого и обратного преобразований в оптический диапазон, в ходе которых возникают существенные потери мощности сигнала. Тем не менее, их влияние в значительной степени компенсируется за счет малых собственных потерь в волокне. В подтверждение этого на рис. 3 приведены расчетные интервальные характеристики полных потерь, из которых следует преимущество использования фотоники при длине линии передачи более 100 м на частоте радиосигнала 1 ГГц и более 30 м на частоте 10 ГГц. При необходимости передачи радиосигналов более высоких частот баланс потерь достигается при еще меньшей длине линии.

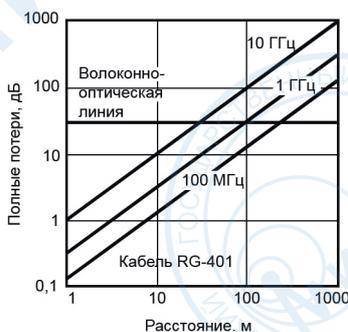


Рис. 3. Расчетные интервальные характеристики линий передачи на базе оптического волокна и коаксиального кабеля.

Использование вышеуказанных фундаментальных достоинств обеспечивает конкретные практические преимущества, приводящие к возможности улучшения ключевых тактико-технических характеристик (ТТХ) РЭС, что иллюстрируется на примере радиолокационной системы на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР).

- Возможность работы с пространственным (сейчас до 7 сердцевин в одном волокне (рис. 4), в дальнейшем до 19 сердцевин) и/или спектральным (до 80 оптических несущих по одной сердцевине с шагом 50 ГГц) уплотнением: передача с терабитными скоростями, улучшение массогабаритных характеристик и упрощение схемы диаграммообразующего устройства (ДОУ), многофункциональное (локация, радиоэлектронная борьба РЭБ, связь, мониторинг), многодиапазонное (от L- до Ka-диапазона) функционирование, связь наземной и бортовой аппаратуры по одному кварцевому волокну (например, для 1500-элементной АФАР).

- Широкополосность: расширение мгновенной полосы обработки (сейчас до 2–3 ГГц, в будущем до 10 ГГц): повышение скорости и пропускной способности систем обработки.

- Широкий динамический диапазон тракта приема: повышение скрытности функционирования РЭС за счет работы на фоне сильных сигналов и помех.

- Малые потери и дисперсия в оптическом волокне: высококачественная передача цифровых и аналоговых СВЧ сигналов между разнесенными постами аппаратуры, что упрощает размещение аппаратуры на носителях и позволяет создавать когерентный прием в системах распределенной структуры.

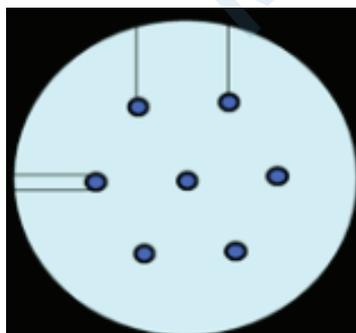


Рис. 4. Поперечное сечение современного 7-сердцевинного оптического волокна [5].

2. Классификация компонентной базы радиофотоники

Предыдущее рассмотрение позволяет ввести следующие определения для чисто фотонного и радиофотонного устройств.

Фотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит исключительно элементы оптического диапазона.

Радиофотонное устройство – обособленный функциональный узел, структура которого содержит элементы радио- и оптического диапазонов.

С этих позиций компонентную базу радиофотоники и строящиеся на их основе функциональные элементы и устройства можно разделить на пять типов [6]. Их классификация представлена на рис. 5, а-д.

Как видно из рис. 5, приборы и элементы с прямым взаимодействием СВЧ и оптического излучений включают:

- оптико-электрический преобразователь (рис. 5, а), например, полупроводниковый фотодиод;
- электрооптический преобразователь (рис. 5, б), например, полупроводниковый лазер;
- датчик СВЧ-сигнала с оптическим управлением (рис. 5, в), например, оптоэлектронный генератор СВЧ-сигналов;
- преобразователь оптического сигнала (рис. 5, г), например, оптический модулятор, лазерный усилитель;
- преобразователь СВЧ-сигнала (рис. 5, д), например, СВЧ-усилитель, коэффициент усиления ко-

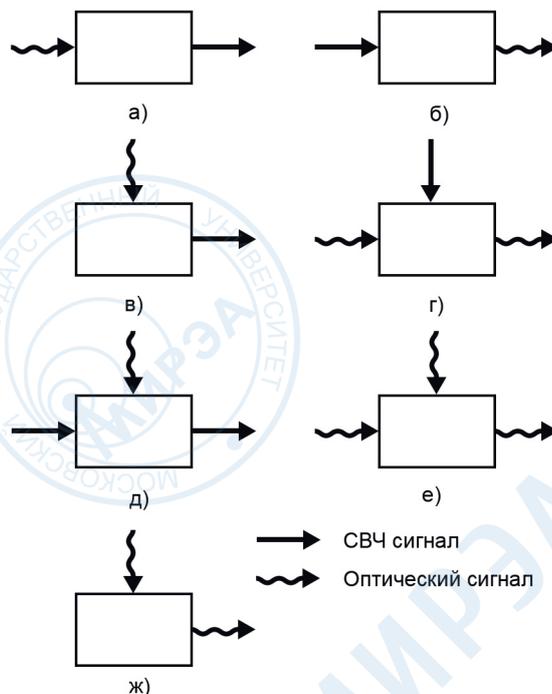


Рис. 5. Классификация компонентной базы и функциональных элементов и устройств с позиций радиофотоники.

того регулируется оптическим сигналом, оптоэлектронная схема задержки, оптоэлектронный смеситель.

Общая отличительная черта всех вышеперечисленных приборов и функциональных элементов заключается в работе в С (1530–1565 нм) и/или L (1565–1625 нм) спектральных диапазонах по классификации МСЭ–Т. Основными причинами такого выбора являются самые низкие потери в кварцевом волокне и самая широкая рабочая спектральная полоса, что, например, позволяет эффективно заменить обычно применяемый в АФАР набор переключаемых линий задержек на базе большого числа СВЧ линий передачи на многоволновую передачу с спектральным разделением каналов по одной общей волоконно-оптической линии. Кроме того, только в указанных диапазонах существует уникальная возможность компенсации потерь за счет экономичных и высокотехнологичных волоконных усилителей. Устройства данного типа, основанные на чисто оптическом взаимодействии, появились в процессе развития волоконно-оптических систем и также могут быть эффективно применены в радиофотонной аппаратуре. К ним относятся: преобразователь оптического сигнала с оптической накачкой (рис. 5, е), например, эрбиевый, рамановский и бриллюэновский волоконные усилители, датчик оптического сигнала с оптической накачкой (рис. 5, ж), например, эрбиевый волоконный генератор.

3. Общий принцип построения и современный уровень мирового развития

В последние годы разработчики РЭС гражданского и военного назначений все большее внимание уделяют радиофотонному принципу построения, основанному на достижениях СВЧ оптоэлектроники и фотоники [1–3, 6]. Общая суть его иллюстрируется с помощью рис. 6. На рисунке входной радиосигнал СВЧ диапазона посредством электрооптического преобразования (ЭОП) конвертируется в оптический диапазон. Модулированный оптический сигнал при помощи волоконно-оптических либо интегрально-оптических узлов и устройств соответствующим образом задерживается, обрабатывается либо просто передается в удаленную точку аппаратуры, где осуществляется обратное оптико-электрическое преобразование (ОЭП) в радиодиапазон.

Анализ результатов исследований и разработок показывает, что использующая радиофотонный принцип радиоэлектронная аппаратура должна функционировать в четырех частот-

Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии

ных диапазонах: в полосах модулирующих, промежуточных, несущих частот радиодиапазона (включая СВЧ- и КВЧ-диапазоны) и в полосе оптического диапазона (точнее, ближнего ИК-диапазона). В данной сверхширокой полосе (8 декад) к компонентной базе и схемотехническим принципам построения аппаратуры предъявляются самые разнообразные, часто противоречивые требования, что делает весьма привлекательным для упрощения схем узлов широкое использование радиофотонных принципов, основанных на прямом взаимодействии СВЧ и оптического излучений, а также фотонных интегральных схем (ФИС).

Объем исследований в области интегральной фотоники для телекоммуникационных и радиолокационных применений постоянно увеличивается на протяжении последних трех десятилетий. Так, считается, что в настоящее время мировым научным сообществом, в общем, закончен первый этап исследований и разработок аппаратуры РЭС с использованием объемной радиофотонной компонентной базы и волоконных узлов и происходит переход ко второму этапу ее развития с применением интегральной радиофотонной технологии. Данная технология так же, как когда-то микроволновая фотоника с использованием объемных волоконно-оптических компонентов и узлов, развивается на базе достижений в области телекоммуникаций, а именно, для больших ФИС исследован целый ряд материалов. Уже прошли длительное изучение полупроводники III–V групп, в частности, структуры на основе GaAs и InP [7, 8]. Материалы IV группы, такие как Si и Ge, также имеют большой потенциал, как в стандартных телекоммуникационных спектральных полосах, так и в среднем ИК-диапазоне [9].



Рис. 6. Радиофотонный принцип построения РЭС.

В табл. 1 показан сравнительный анализ основных достоинств и недостатков ФИС на базе четырех наиболее известных материалов подложек [10]. С учетом всех возможностей двумя ведущими платформами для крупномасштабной оптической интеграции считаются ФИС на основе кремния и фосфида индия.

Есть разные мнения среди экспертов, какие подложки, Si или InP, являются наиболее подходящими для фотонной интеграции [9, 10]. Подложки InP более привлекательны сегодня для лазеров и активных ФИС. Так, в современной телекоммуникационной отрасли используется больше ФИС на основе InP, чем на кремниевых подложках. Тем не менее некоторые эксперты считают, что фотонная интеграция на основе кремния является более эффективным подходом в долгосрочной перспективе [9].

Кремниевая фотоника имеет явные преимущества по сравнению с InP, как, например, низкие потери волноводов для маршрутизации и межсоединений, самая развитая инфраструктура для обработки и совместимость с электронными интегральными схемами (табл. 1). Данное направление предлагает также много перспективных возможностей для применений в микроволновой фотонике [10].

Кремниевые волноводы и активные фотонные устройства имеют потенциал, чтобы обеспечить большинство рассмотренных выше преимуществ радиофотонной технологии на базе волоконной оптики для радиочастотных применений, в том числе широкополосность и высокую эффективность. Дополнительные преимущества, предоставляемые кремнием в отличие от традиционных объемных решений, включают уменьшение габаритов, улучшение масшта-

Таблица 1. Сравнение основных существующих платформ интегральной радиофотоники

Материал подложки	Достоинства	Недостатки
Фосфид индия InP	<ul style="list-style-type: none"> • Монолитная реализация как активных (лазеры, фотодиоды, модуляторы, оптические усилители), так и пассивных фотонных компонентов. • Возможность интеграции с высокоскоростными и СВЧ электронными компонентами. • Высокий уровень интеграции и надежность. 	<ul style="list-style-type: none"> • Недостаточно развита индустриальная база. • Пластины относительно малого диаметра и высокой стоимости. • Слабый контраст показателя преломления – сложность создания компактных пассивных компонентов. • Высокие оптические потери.
Кремний Si	<ul style="list-style-type: none"> • Использование развитой КМОП технологии – экономичность. • Высокий контраст показателя преломления – компактные и высококачественные волноводы и резонаторы. 	<ul style="list-style-type: none"> • Слабый электрооптический эффект - трудность реализации эффективных модуляторов. • Непрямой квантовый переход – только гибридная или гетерогенная интеграция лазеров. • Относительно высокие оптические потери, легко возникают дополнительные потери на рассеивание.
Нитрид кремния Si ₃ N ₄	<ul style="list-style-type: none"> • Самые низкие потери в интегральном волноводе: создание диаграммообразующих устройств с требуемыми задержками СВЧ сигнала. • Наиболее эффективное сопряжение с волокном. • Потенциально низкая стоимость. 	<ul style="list-style-type: none"> • Невозможна монолитная реализация активных компонентов. • Требуется подстройка и температурное управление сложными пассивными схемами.
Ниобат лития LiNbO ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Сильный электрооптический эффект и относительно низкие потери – внешние модуляторы с полосой в СВЧ-диапазоне. • Высокоразвитая технологическая база. 	<ul style="list-style-type: none"> • Сложность интеграции с управляющей электроникой. • Относительно большие габариты. • Невозможна реализация лазеров, фотодетекторов и оптических усилителей.

бируемости в многоканальных применениях, устойчивость к внешним воздействиям в оптических когерентных системах, простота технологии производства и потенциал для интеграции с другими компонентами на уровне чипа.

Однако в настоящее время еще остались серьезные проблемы, не позволяющие немедленно перейти на технологии кремниевой фотоники.

К ним относятся потери при распространении и потери на внутренние и внешние соединения в кристаллах, которые требуют дополнительного изучения. Как указано выше, коэффициенты затухания оптических волокон измеряются в долях децибела на километр, однако аналогичный параметр для кремниевых волноводов – в децибелах на сантиметр и в последнее время в децибелах на метр. Например, типичные потери при распространении в одномодовом волокне 0,2 дБ/км в отличие от потерь в кремнии, которые, как правило, порядка 0,2 дБ/см.

Примеры коэффициентов затухания для различных типов волноводов на основе кремния представлены на рис. 7 [11]. Необходимо отметить сложность точного построения общего сравнительного графика такого рода, поскольку потери зависят от многих конкретных волноводных параметров.

Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии

Они включают в себя материал сердцевины волновода (например, кремний, нитрид кремния или диоксид кремния), толщину сердцевины и тип волноводов (одно- или многомодовый) и т. п.

Следует также отметить, что данные на рис. 7 относятся к различным волноводным технологиям, таким, как нанофотонные кремниевые волноводы, гребневые кремниевые волноводы и кварцевые волноводы с низкими потерями. Тем не менее, тенденция улучшения характеристик передачи является очевидной, и современный рекорд затухания в интегральных волноводах на базе кремния составляет менее 1 дБ/м, что на два порядка меньше по сравнению с первыми результатами.

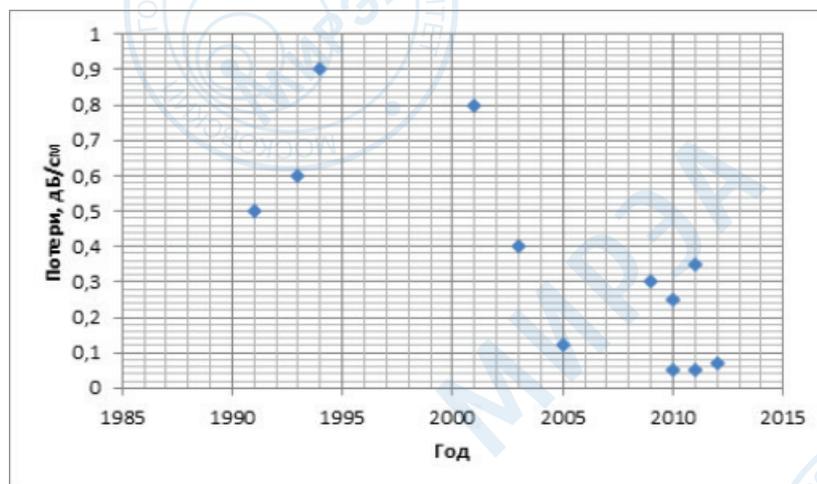


Рис. 7. Примеры коэффициентов затухания для различных типов волноводов на основе кремния [11].

В заключение этого краткого обзора приведем обобщенные по докладом на последней конференции по интегральной фотонике данные [12], характеризующие современный уровень развития производства ФИС в Европе и США.

Европа

Основные участники:

- **European Photonic Industry Consortium – EPIC;**
- **Access Center for Photonics Innovation Solutions – ACT PHAST;**
- **Silicon Photonics Alliance of CEA-LETI, IMEC, VTT, INP, Tyndall National Institute, TNO and CMC Microsystems – EPIXfab.**

Производство:

- На сегодня более 5 тысяч малых и средних предприятий в области фотоники.
- Ежегодный прирост рынка фотоники более 6,5%.
- Прогноз рынка в 2020 г. – 615 млрд. Евро.

США

• В июле 2015 г. принята **Национальная программа по развитию производства фотонных интегральных схем (Integrated Photonics Manufacturing Program)**, срок 5 лет, фонд 610 млн. долларов, координаторы: **U.S. Department of Defense (DoD), Manufacturing Innovation Institute for Integrated Photonics (AIM-Photonics)**. Участвуют 124 промышленные фирмы, некоммерческие организации и университета.

4. Работы в области радиофотоники в Московском технологическом университете

Следуя отмеченным выше мировым и отечественным тенденциям развития радиофотоники, в МИРЭА за последние годы выполнены и продолжают выполняться целый ряд НИОКР по Госконтрактам с Минобрнаукой и Минпромторгом, а также в рамках грантов РФФИ. По результатам исследований и разработок опубликовано 3 монографии и главы в монографии, более 20 статей в отечественной и зарубежной научной периодике, включающей журналы

и материалы ведущих конференций, получено 6 патентов на изобретения и полезные модели. Накопленный опыт позволил в конце прошлого года создать специализированную образовательную программу профессиональной переподготовки «Фотоника и радиофотоника в радиоэлектронных системах сверхвысокочастотного диапазона», в рамках которой в настоящее время обучаются сотрудники семи предприятий радиоэлектронной промышленности. Кроме того, в соответствии с описанными выше современными мировыми тенденциями, организован первый в стране научно-технологический центр «Интегральная радиофотоника», включающий дизайн-центр и научно-исследовательскую лабораторию. Ниже кратко описываются основные результаты работ.

Компьютерное моделирование и экспериментальная верификация

Согласно современным представлениям, наиболее эффективным путем сокращения финансовых и временных затрат при продвижении инновационной продукции на рынок является проведение тщательного моделирования ее работы и характеристик с использованием современных систем автоматизированного проектирования (САПР). Особую важность это имеет для электронной компонентной базы с рабочими частотами в СВЧ-диапазоне, где стоимость специализированного измерительного оборудования и экспериментальных работ гораздо выше, чем в более низкочастотных диапазонах. В свете этого, прежде всего, изучены современное состояние в области автоматизированного проектирования и возможности современных САПР по критериям выполнения задач радиофоники [13]. Данные анализа различных САПР, классифицированных по назначению как универсальные и специализированные, представлены в табл. 2.

В результате исследований сделан общий вывод [14], что оптимальное решение задачи моделирования по критериям точности и времени решения компонентов и функциональных

Таблица 2. Современные программные продукты для моделирования функционирования компонентов и узлов радиофоники

Назначение	Наименование/ Разработчик	Объекты моделирования	Методы моделирования
Универсальное	Sentaurus TCAD/ Synopsys	Лазеры, фотодиоды, транзисторы, СВЧ и интегрально-оптические пассивные элементы	BPM, SPICE-модели, FDTD, транспортные модели: дрейфово-диффузионная, термо-диффузионная, гидродинамическая
	Microwave Studio Suit/CST	СВЧ и интегрально-оптические пассивные элементы	Метод конечного интегрирования, волновой метод, метод собственных мод
Специализированное	FIMMWAVE, FIMMPROP, Kallistos, CrystalWave/ Photon Design	Любые пассивные функциональные элементы ФИС	FEM, FDM, FDTD
	APSS/ Apollo Photonics	Любые пассивные функциональные элементы ФИС	BPM, FDTD, СВPM, BPM+FDTD, CMT, MMM
	OptiFDTD, OptiBPM/ Optiwave VPI Photonics/VPI Systems	Пассивные и нелинейные компоненты ФИС Пассивные и активные функциональные элементы, устройства, системы	BPM, FDTD S-матрицы, метод линий передачи, совместное моделирование в частотной и временной областях

Новые принципы построения радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона с использованием радиофотонной технологии

узлов радиофотоники должно основываться на рациональном сочетании структурных (физических и в виде физической эквивалентной схемы ФЭС) и бесструктурных (имитационных) моделей. При этом для расчетов могут быть использованы средства нескольких САПР, например, технологической САПР (TCAD) и электронной САПР (ECAD) [15]. Такой подход назван сквозным проектированием.

С помощью универсальной САПР Sentaurus TCAD фирмы Synopsys проведено моделирование активной компонентной базы радиофотоники: ряда лазерных структур [16–18] с полосой модуляции до 10 ГГц и фотодиодных структур [19, 20] с полосой пропускания до 30 ГГц. Однако, как известно, физическое моделирование не позволяет исследовать характеристики более сложных модулей и устройств. Наиболее распространенным в мире инструментом разработчика компонентной базы, функциональных устройств и систем современной фотоники (рис. 5) являются названные специализированными в табл. 2 оптоэлектронные САПР (OE-CAD). Следуя этому, с помощью VPI Transmission Maker фирмы VPI Systems разработаны модели и проведены модельные эксперименты по базовым радиотехническим устройствам: оптоэлектронному генератору (ОЭГ), преобразователю частоты (смесителю) и схеме задержки сигналов СВЧ-диапазона на основе традиционных лазеров с торцевым излучением (ЛТИ) и с использованием перспективного поверхностно излучающего лазера с вертикальным резонатором (VCSEL).

Применение VCSEL в принципе позволяет уменьшить энергопотребление, улучшить экономические характеристики и обеспечить возможность интегрализации этих радиофотонных устройств [21, 22]. В качестве примера на рис. 8 приведены структурные схемы ОЭГ на базе ЛТИ (рис. 8, а) и VCSEL (рис. 8, б) [21, 22].

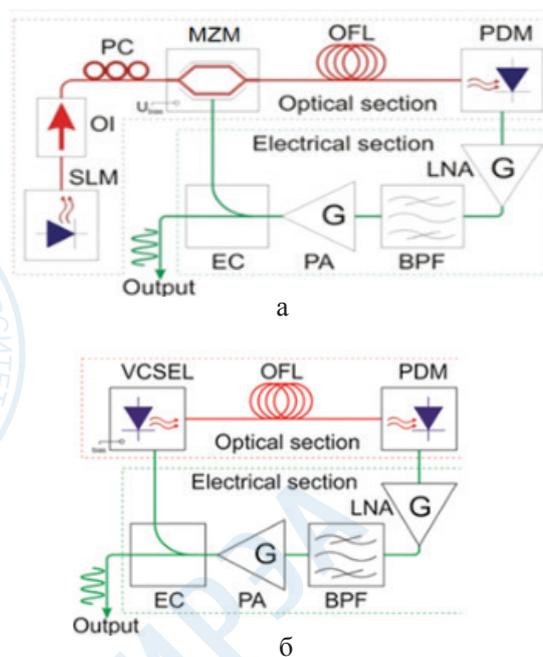


Рис. 8. Структурные схемы разработанных оптоэлектронных генераторов сигналов СВЧ-диапазона на базе лазера с торцевым излучением (а) и VCSEL (б).

Как видно из рис. 8, достоинство ОЭГ на базе VCSEL, помимо вышеуказанных преимуществ самого лазера, состоит в упрощении схемы за счет исключения ее наиболее дорогостоящего элемента – внешнего электрооптического модулятора Маха-Цандера (ММЦ). Однако использование непосредственной модуляции лазера вместо общепринятой внешней модуляции должно принципиально привести к ухудшению основных параметров ОЭГ: полосы перестройки и фазового шума. Работы по моделированию в OE-CAD и экспериментальной верификации обоих вариантов построения ОЭГ [23, 24] позволили получить результаты [25, 26], приведенные в табл. 3. Там же для сравнения даны параметры электронного аналога – современного синтезатора частоты фирмы Analog Devices.

Из табл. 3 явно следует ухудшение перестроечных и шумовых параметров, особенно, вблизи несущей в варианте непосредственной модуляции активного элемента. Тем не менее, даже в этом случае по сравнению с электронным аналогом получается примерно в три раза большая полоса перестройки, а фазовые шумы улучшаются более, чем на 10 дБ, что свидетельствует о перспективности ОЭГ для построения источников прецизионных сигналов СВЧ-диапазона.

Таблица 3. Сравнение параметров оптоэлектронного генератора СВЧ-сигналов на базе внешней и непосредственной модуляции

Параметр	ОЭГ на базе ММЦ [25]	ОЭГ на базе VCSEL [21]	ADF350 (основная мода)
Диапазон перестройки частоты, ГГц	2,5–15	2,5–9	2,2–4,4
Выходная мощность, дБм	9	7	5
Подавление побочных мод, дБ	46,5	50	13
Фазовый шум на частоте 3 ГГц при отстройке, дБн/Гц			
10 kHz	-125	-108	-92
100 kHz	-128	-118	-111
1 MHz	-138	-136	-134

Кроме того, основываясь на фундаментальных исследованиях оптических межсоединений в интегральных схемах [27, 28], в последние годы выполнен анализ эффективности применения исследованных ранее лазеров (VCSEL) и фотодиодов р-і-n-типа в интегральном исполнении и фотоннокристаллических пассивных узлов в перспективных гетерогенных ФИС [29]. Особенность их построения заключается в том, что на определенных участках кремниевой пластины с пассивными интегрально-оптическими элементами, как, например, волноводами, разветвителями, спектральными мультиплексорами и т.д., устанавливаются активные эпитаксиальные структуры (лазеры, фотодетекторы, модуляторы и т.д.), сформированные на подложках из других материалов, например, GaAs, InP, LiNbO₃, SiN, GaN. Для конкретности результатов моделирования выбрана схема оптического межсоединения с типичной для современной телекоммуникационной волоконно-оптической системы скоростью передачи 10 Гбит/с. Полученные результаты позволили определить оптимальные принципы построения данного узла гетерогенной ФИС и подтвердили эффективность описанного выше подхода на базе сквозного проектирования с использованием Т-CAD и ОЕ-CAD.

Однако, как показали дальнейшие исследования, выше описанный подход становится некорректным при проектировании радиоэлектронных устройств и систем СВЧ-диапазона на базе радиофотонной технологии. Основная причина заключается в том, что существующие в мире оптические и оптоэлектронные САПР (табл. 2) развиты значительно слабее, чем САПР, предназначенные для моделирования компонентной базы, узлов и устройств СВЧ-диапазона. В библиотечных моделях этих САПР не учитываются особенности работы компонентов и узлов в СВЧ диапазоне, что приводит к значительным погрешностям расчета. Кроме того, с помощью современных ОЕ-CAD очень сложно либо невозможно выполнить модельные эксперименты по расчету ключевых параметров и характеристик радиофотонных устройств и систем, включающих компоненты и узлы оптического и СВЧ-диапазонов. Речь идет о характеристиках фазовых шумов, коэффициентах шума, коэффициентах передачи в режиме большого сигнала, интермодуляционных искажениях, динамическом диапазоне. В связи с этим, еще в начале 90-х годов прошлого столетия сделан вывод, что для повышения точности моделирования радиофотонных устройств и систем с учетом влияния паразитных параметров цепей СВЧ-диапазона необходимо применение работающих на символическом уровне профессиональных СВЧ-САПР [30]. Типичными представителями таких программных сред являются САПР ADS фирмы Keysight Technologies и САПР AWDE фирмы National Instruments, в которых указанные

выше параметры и характеристики рассчитываются посредством «однокнопочной» операции.

Подобный подход для проектирования оптоэлектронной компонентной базы с полосой пропускания в радиочастотном диапазоне несколько ранее был предложен нами [31] и в прошлом году окончательно оформлен с учетом современного уровня развития радиофотоники [32]. Для его реализации с помощью САПР NI AWRDE разработана активная компонентная база радиофотоники (рис. 5): нелинейные модели в виде ФЭС лазерного излучателя (VCSEL) [33, 34], р-і-п-фотодиода [20, 35] и электрооптического модулятора [36], которые приведены на рис. 9. Используя ее, разработаны модели, проведены модельные эксперименты и экспериментальная верификация ключевых радиофотонных устройств: оптоэлектронного генератора СВЧ-сигналов [37] и оптоэлектронного смесителя сигналов СВЧ-диапазона [38].

Показанное в результате близкое совпадение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о корректности разработанных моделей.

Обучение

Учитывая высокий интерес к радиофотонике ведущих отечественных предприятий радиоэлектронной промышленности, в Московском технологическом университете (МИРЭА) в рамках дополнительного обучения разработана Программа профессиональной переподготовки «Фотоника и радиофотоника в радиоэлектронных системах сверхвысокочастотного диапазона», и в настоящее время проводится обучение сотрудников семи предприятий Москвы и Московской области. Программа направлена на получение компетенций, необходимых для приобретения новой квалификации: инженер – разработчик радиоэлектронных систем с применением радиофотоники.

Основной целью программы является получение следующих профессиональных компетенций для приобретения новой квалификации:

- ◆ представлений о современной фотонной компонентной базе (ФКБ) и принципах построения аналоговых волоконно-оптических систем передачи, являющихся базой для радиофотонных узлов в радиоэлектронной системе СВЧ-диапазона, и предъявляемым к ним требованиям;
- ◆ знаний теоретических и практических вопросов разработки, исследования и применения радиоэлектронных устройств и систем СВЧ-диапазона на базе радиофотонных технологий;
- ◆ умений компьютерного проектирования вышеуказанных устройств и систем и расчета их основных параметров и характеристик;
- ◆ навыков измерения основных характеристик ФКБ и узлов формирования, передачи и обработки сигналов, используемых в радиоэлектронных устройствах и системах СВЧ-диапазона на базе радиофотонных технологий.

Нормативная трудоемкость программы 250 часов, из них 116 часов аудиторных занятий и 134 часа самостоятельной работы слушателей. Срок освоения программы 29 недель, форма обучения очная, режим занятий 4 часа в неделю (аудиторные занятия). Сфера применения компетенций, полученных после освоения программы: разработка аппаратуры для систем радиолокации, радиотехнической разведки, радиоэлектронного противодействия, радионавигации и комбинированных волоконно-эфирных телекоммуникационных систем.

Учебный план программы содержит модуль 1 «Основы современной фотоники и радиофотоники» (общее количество часов 96, из них: лекции 36 часов, практические занятия 28 часов, самостоятельная работа слушателей 32 часа) и модуль 2 «Применение фотонной и радиофотонной технологий в перспективных радиоэлектронных системах СВЧ-диапазона» (общее количество часов 154, из них: лекции 20 часов, практические занятия 32 часа, самостоятельная работа слушателей 102 часа). Формой итогового контроля является подготовка и защита квалификационной работы, тема которой предлагается предприятием, направившим своих специалистов на обучение.

Научно-технологический центр «Интегральная радиофотоника»

Следуя рассмотренным выше мировым тенденциям развития радиофотоники, в Москов-

Целью деятельности НТЦ ИРФ является:

- ◆ развитие в стране нового научно-технологического направления «радиофотоника», появившегося в последние годы на стыке фотоники и сверхвысокочастотной радиоэлектроники;
- ◆ создание и обеспечение эффективного функционирования первого в стране дизайн-центра по проектированию изделий интегральной радиофотоники.

Конкретной задачей ДЦ ИРФ является: компьютерное моделирование и топологическое проектирование радиофотонных интегральных схем (РФИС), заказ РФИС на европейских (а в дальнейшем, на отечественных) фабриках.

Конкретные задачи ОНИЛ СОУ в рамках деятельности НТЦ ИРФ состоят:

- в разработке ТЗ на основе технических требований Заказчика под требования фотонных фабрик;
- в конструировании, изготовлении и экспериментальном исследовании макетных образцов для верификации технических показателей ТЗ и результатов проектирования, входной контроль и приборная характеристика изготовленных образцов РФИС.

Начало регулярного выполнения заказов запланировано на осень 2016 года. До этого дизайн-центр будет работать в тестовом режиме.

Заключение

Применение радиофотоники в радиосредствах различного назначения имеет потенциал, прежде всего, с точки зрения повышения рабочих частот вплоть до терагерцевого диапазона, что обеспечивает возможность увеличения их быстродействия и пропускной способности в соответствии с современными требованиями. Другое направление радиофотоники состоит в улучшении тактико-технических показателей существующих радиосредств, таких как полоса пропускания, электромагнитная совместимость, имитостойкость, массогабаритные характеристики.

Данные технологии могут быть применены практически во всех видах радиоэлектронной аппаратуры военного и гражданского назначений: радиолокации, радиоэлектронного противодействия, навигации, связи. Их скорейшее внедрение позволит не только решить ближайшие задачи отечественной радиоэлектронной промышленности и промышленности средств связи в области импортозамещения, но и существенно повысить обороноспособность, а также конкурентоспособность и экспортный потенциал российской техники в краткосрочной и долгосрочной перспективе за счет опережающих поставок радиоаппаратуры, еще не освоенной зарубежной промышленностью.

Следуя описанным выше мировым и отечественным тенденциям в области развития радиофотонных технологий, в МИРЭА выполнен цикл работ по моделированию и экспериментальной верификации основной компонентной базы и ключевых узлов и устройств радиофотоники. Организовано профессиональное обучение сотрудников ведущих отечественных предприятий радиоэлектронной промышленности и создан дизайн-центр «Интегральная радиофотоника».

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант офи-м № 14-29-08141).

Литература:

1. Capmany J., Novak D. Microwave photonics combines two worlds // Nature Photonics. 2007. V. 1. P. 319–330.
2. Yao J. Microwave Photonics // IEEE J. Lightwave Technol. 2009. V. 27. № 3. P. 314–335.
3. Белкин М.Е., Сигов А.С. Новое направление фотоники – сверхвысокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 901–914.
4. Hartog A.H., Conduit A.J., Payne D.N. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibers // Optical and Quantum Electronics. 1979. V. 11. № 3. P. 265–273.
5. Inao S., Sato T., Senstui S., Kuroha T., and Nishimura Y. Multicore optical fiber // In: Opti-

- cal Fiber Communication Conference (OFC'79). Washington, D.C., United States, 6 March 1979. P. 46–48. Paper WB1.
6. Белкин М.Е., Яковлев В.П. Наноструктурный поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором О и С спектральных диапазонов в качестве ключевого элемента компонентной базы радиофотоники // Наноматериалы и наноструктуры. 2014. Т. 5. № 3. С. 37–49.
 7. Deri R.J., Kapon E. Low-loss III-V semiconductor optical waveguides // IEEE J. Quantum Electronics. 1991. V. 27. № 3. P. 626–640.
 8. Koch T.L., Koren U. Semiconductor photonic integrated circuits // IEEE J. Quantum Electronics. 1991. V. 27. № 3. P. 641–653.
 9. Liang D., Bowers J.E. Photonic integration: Si or InP substrates // Electronics Lett. 2009. V. 45. № 12. P. 578–581.
 10. Marpaung D., Roeloffzen C., Heideman R., Leinse A., Sales S., Capmany J. Integrated microwave photonics // Laser & Photonics Reviews. 2013. V. 7. № 4. P. 506–538.
 11. Uruk V.J., McKinney J.D., Williams K.J. Fundamentals of Microwave Photonics. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2015. 467 p.
 12. Photonics Integration Conference. High Tech Campus Eindhoven, the Netherlands. 23 Sept. 2015.
 13. НИР «Исследование функциональных элементов оптоэлектронных и оптических интегральных схем на основе фотонных кристаллов для перспективных телекоммуникационных систем» // Аналитическая целевая программа Минобрнауки «Развитие научного потенциала высшей школы», 2009-2011 г.г. рег. № 2.1.2/494
 14. Белкин М.Е., Костенко К.Н., Мишина Е.Д. Современные методы и средства автоматизированного проектирования канальных и фотоннокристаллических волноводных структур для пассивных элементов ОИС и ОЭИС // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения / Материалы международной НТК «INTERMATIC-2009». Декабрь 2009 г., Москва. М.: Энергоатомиздат. 2009. Ч. 2. С. 202–212.
 15. Belkin M.E. TCAD and ECAD Modeling of Microwave and Millimeter Wave Photonic Devices // Int. Symposium PIERS-2009. August 2009. Moscow. Abstracts. P. 322.
 16. Белкин М.Е., Васильев М.Г. Полупроводниковые лазерные излучатели с высоким произведением средней мощности на полосу модуляции // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 9 (98). С. 23–33.
 17. Belkin M.E., Vasil'ev M.G. Simulation and design of semiconductor lasers with high power-bandwidth product for modern telecom and radar systems. // Int. Conf. Laser Optics 2008. St. Petersburg, Russia, June 2008. P. 66.
 18. Белкин М.Е., Белкин Л.М. Исследование эффективности применения полупроводникового лазерного излучателя для передачи многоканального аналогового сигнала СВЧ-диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 11. С. 32–37.
 19. Belkin M.E., Dzichkovski N.A. Research of Microwave-Bandwidth p-i-n Photodetectors // Proceedings Eurocon-2009. St. Petersburg, Russia, May 2009. P. 193–196.
 20. Belkin M.E. Multiscale Computer Aided Design of Microwave-Band P-I-N Photodetectors. P. 231–250. // In book Photodetectors / Ed. by S. Gateva. Croatia: InTech, 2012. 460 p.
 21. Belkin M.E., Belkin L., Loparev A., Sigov A.S., et al. VCSEL-based Processing of Microwave Signals // Int. Topical Meeting on Microwave Photonics. The 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, MWP/APMP2014. Sapporo, Japan. Oct. 2014. P. 481–484.
 22. Belkin M.E., Belkin L., Loparev A., Sigov A.S., Iakovlev V. Long Wavelength VCSELs and VCSEL-Based Processing of Microwave Signals // In book Optoelectronics – Advanced Materials and Devices. / Ed. by S. Pyshkin and J. Ballato. Croatia: InTech, 2015. Chapter 6. P. 231–250.
 23. НИР «Фотоника». Принципы построения и анализа новых приборов и устройств фотоники для перспективных телекоммуникационных систем. 2009-2011 г.г. Рег. № 2.2.2.2/6876.
 24. НИР «Проведение поисковых научно-исследовательских работ по приоритетным направлениям «Индустрия наносистем и наноматериалов» и «Информационно-телекоммуника-

ционные системы» в центре коллективного пользования научным оборудованием «Учебно-научное объединение «Электроника». 2009-2010 г.г.

25. Belkin M.E., Loparev A., Semenova Y., Farrell G., Sigov A.S. A Tunable RF-Band Optoelectronic Oscillator and OE-CAD Model for its Simulation // Microwave and Optical Technology Letters. 2011. V. 53. № 11. P. 2474–2477.

26. Belkin M.E., Loparev A.V. A Microwave Optoelectronic Oscillator: Mach-Zehnder Modulator or VCSEL Based Layout Comparison // PIERS Proceedings. Moscow, Russia, August 19–23 2012. P. 1138–1142.

27. Белкин М.Е., Сигов А.С. Оптические межсоединения в интегральных схемах // Наноиндустрия. 2012. № 1(31). С. 8–14.

28. Белкин М.Е., Сигов А.С. Исследование проблем создания оптических межсоединений // Наноиндустрия. 2012. № 2(32). С. 18–28.

29. Белкин М.Е., Бахвалова Т.Н., Хмельницкий И.В. Исследование компонентной базы и узлов гетерогенной фотонной интегральной схемы для оптического межсоединения // Нано-материалы и наноструктуры. 2014. Т. 5. № 4. С. 29–42.

30. van Dam C., de Vreede L.C.N., Smit M.K., Tauritz J.L., Verbeek B.H. Optical chip design with a microwave CAD-system // in Proc. 10th Eur. Conf. Circuit Theory and Design. Sept. 2–6, 1991. New York: Polytechnic, 1991. V. III. P. 1316–1323.

31. Белкин М.Е., Эйнасто М.В. Измерение частотных характеристик фотодиодов с использованием физической эквивалентной схемы // Радиотехника. 1989. № 11. С. 88–91.

32. Научно-технический отчет по гранту РФФИ офи_м № 14-29-08141, этап 2, 2015. 32 с.

33. Belkin M.E., Belkin L., Sigov A.S. [et al.] Performances of Microwave-Band Analog Signal Transmission using Wafer-Fused Long Wavelength VCSELs // IEEE Photonics Technology Letters. 2011. V. 23. № 20. P. 1463–1465.

34. Belkin M.E., Iakovlev V. Microwave-band Circuit-level Semiconductor Laser Modeling // 9th European Modelling Symposium on Mathematical Modelling and Computer Simulation, EMS2015, Madrid, Spain, 6–8 October 2015. P. 443–445.

35. Belkin M.E., Sigov A.S. Circuit-Level Large-Signal Modeling of Microwave Bandwidth Photodetector // Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications. ICEAA 2015, Torino, Italy, 7-11 Sept. 2015. P. 1587–1589.

36. Головин В.В., Тыщук Ю.Н. Применение модели электрооптического модулятора Маха-Цандера в оптической диаграммообразующей схеме антенной решетки // 25-я Междунар. НТК СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии, КрыМиКо-2015, г. Севастополь, 6–12 сентября 2015. С. 1031–1032.

37. Belkin M. E., Golovin V. Microwave Electronic CAD Modeling of Microwave-Band Optoelectronic Oscillator Based on Long Wavelength VCSEL // Int. Conf. on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems. COMCAS 2015. Tel Aviv, Israel, 2–4 November 2015. P. 1–3.

38. Belkin M.E., Tyschuk Y. Microwave Electronic CAD Modeling of Microwave Photonic Devices Based on LW-VCSEL Mixing // II Int. Conf. on Microwave and Photonics. ICMAP-2015. Dhanbad, India, December 11–13, 2015. P. 1–2.