

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СВЧ ТЕХНИКИ, ТЕХНОЛОГИИ И МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

А. В. ГУСИНСКИЙ, Н. А. ПЕВНЕВА, В. П. БОНДАРЕНКО, М. М. КАСПЕРОВИЧ, И. А. ЗАХАРОВ,  
С. В. РЕДЬКО, М. А. БОРОВСКАЯ, А. А. КОПШАЙ

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

**Аннотация.** Рассмотрены наиболее актуальные и перспективные сферы для применения технологии ММДВ. Представлены параметры мощных СВЧ транзисторов. Приведены этапы проектирования, конструирования, моделирования, изготовления универсальных, автоматизированных приборов ММДВ.

**Abstract.** The most relevant and promising areas for the application of millimeter-wave technology are considered. The parameters of powerful microwave transistors are presented. The stages of design, construction, modeling, and manufacturing of universal, automated millimeter-wave devices are given.

### Введение

Системы связи миллиметрового диапазона длин волн (ММДВ) обладают особыми характеристиками, которые отличают их от систем в диапазонах более низких частот:

- большая доступная полоса пропускания: спектр ММДВ предлагает огромные объемы доступной полосы пропускания, что позволяет передавать большие объемы данных. Это обилие полосы пропускания необходимо для удовлетворения постоянно растущих требований к высокоскоростной связи.

- короткая длина волны: сигналы ММДВ имеют короткие длины волн, обычно от 1 до 10 миллиметров. Более короткая длина волны позволяет реализовать компактные и высоконаправленные антенные решетки, облегчая эффективные методы формирования луча.

- высокая направленность: системы ММДВ работают, концентрируя сигналы в узкие лучи, которые можно направлять в любом направлении благодаря специальным алгоритмам формирования луча. Эта характеристика позволяет эффективно использовать имеющиеся ресурсы, уменьшая помехи и улучшая общую производительность системы.

Система связи ММДВ предлагает несколько преимуществ, которые делают ее привлекательным выбором для различных приложений:

- высокая скорость передачи данных: большая доступная полоса пропускания в частотах ММДВ позволяет передавать данные на значительно более высоких скоростях по сравнению с более низкими частотными диапазонами. Это делает связь ММДВ подходящей для приложений с высокими требованиями к передаче данных, таких как потоковое видео высокой четкости и виртуальная реальность.

- низкий уровень помех: фокусируя энергию сигнала в определенных направлениях, системы ММДВ помогают минимизировать помехи от других источников, улучшая качество сигнала и увеличивая общую пропускную способность сети.

- малый форм-фактор: благодаря короткой длине волны сигналов ММДВ антенны и другие компоненты могут быть спроектированы компактными и могут вписываться в меньшие форм-факторы, что делает их пригодными для интеграции в устройства с ограничениями по размеру, такие как смартфоны и устройства Интернета вещей (IoT).

Хотя система связи ММДВ предлагает значительные преимущества, она также имеет характерные проблемы:

- ограниченное покрытие и проникновение сигнала: сигналы ММДВ более восприимчивы к помехам и атмосферным условиям, что приводит к уменьшению покрытия по сравнению с диапазонами более низких частот. Они имеют ограниченную способность проникать через препятствия, такие как здания или листва, что может повлиять на их применимость в определенных сценариях.

- более высокие потери на пути: сигналы ММДВ испытывают более высокие потери на пути по сравнению с более низкочастотными сигналами. Это означает, что они затухают быстрее на расстоянии, требуя использования передовых антенных решеток, формирования луча и методов обработки сигнала для компенсации более высоких потерь.

- чувствительность к отражениям и дифракции: сигналы ММДВ также очень чувствительны к отражениям и дифракции, что может привести к многолучевому затуханию и ухудшению сигнала. Для смягчения этих эффектов и поддержания надежных каналов связи необходимы сложные алгоритмы обработки сигналов и методы формирования луча.

**1 Перспективные сферы для применения СВЧ технологий**

Наиболее актуальными и перспективными сферами для применения технологии ММДДВ являются следующие [1]:

1. Транспортные сети (рисунок 1, а). Здесь выделяют три аспекта: внутренняя связь для различных высоконагруженных систем (экономия веса и увеличение скорости передачи за счёт отсутствия кабелей), связь между транспортными средствами (датчики одного делятся информацией с несколькими транспортными средствами для координации действий в случае сложных или не предвиденных ситуаций) и связь транспортного средства с инфраструктурой (улучшенная навигация беспилотных систем и передача информации для аналитики в центры контроля за дорожным движением).

2. 5G/В5G/6G сотовые сети (рисунок 1, б). Для конечных пользователей главными изменениями будут существенно более высокая скорость обмена данными при очень малых задержках сигнала. С точки зрения связи между базовыми станциями ММДДВ может дать больше свободы и экономического эффекта по сравнению с традиционными оптоволоконными каналами при конкурентоспособной скорости и задержках сигнала.

3. Поддержка связи при помощи БПЛА (рисунок 1, в). Компактность ММДДВ систем связи позволяет размещать их на БПЛА, которые в свою очередь могут быть использованы в качестве точки доступа к сети, ретранслятора сигнала между абонентами в зоне покрытия или резервного канала связи между сегментами базовых станций для временного расширения пропускной способности или восстановления связи после чрезвычайной ситуации.

4. Спутниковая связь (рисунок 1, г). Для самих спутников связи переход в ММДДВ выражается в основном лишь в увеличении пропускной способности и уменьшении задержек при передаче данных, а вот со стороны абонентских устройств все интереснее, так как малые габариты приемопередающих устройств ММДДВ позволяют размещать их непосредственно на транспортных средствах (автомобили, лодки, самолеты и т. п.) или даже в носимых устройствах, таких как привычные мобильные телефоны. Таким образом можно легко установить прямой канал связи в зоне видимости спутника без того, чтобы полагаться на дополнительные наземные ретрансляторы.

5. Связь в дата-центрах (рисунок 1, д). На текущий момент в дата-центрах доминируют кабельные оптоволоконные каналы связи и ММДДВ вряд ли может предложить что-то, ради чего всем стоило бы перейти на эту технологию. Но при этом использование ММДДВ для повышения гибкости путем временного подключения/отключения кластеров или резервирования канала связи на случай повреждения оптоволоконного кабеля всецело приветствуется.

6. Иммерсивные коммуникации (рисунок 1, е). Всевозможные устройства дополненной, расширенной и виртуальной реальности требуют высокоскоростной передачи огромных объемов данных с минимальными задержками между носимым устройством вывода информации (очки, шлем и т. п.) и устройством обработки данных (ПК, рабочая станция или сервер в облаке). Использование для этих целей кабелей неудобно, так как сильно ограничивает движения пользователя и создает дополнительную нагрузку.

7. Сенсорные системы (рисунок 1, ж). Малая длина волны позволяет реализовывать на базе ММДДВ радарные системы, а также устройства радио-видения совершенно иного уровня четкости и скорости реакции, чем это было возможно на базе сантиметровых волн. Это позволяет реализовывать новые системы автономного управления транспортными средствами и контроля за производственными процессами. Радио-видение в миллиметровом диапазоне позволяет отслеживать скрытое ношение опасных предметов без создания дополнительных неудобств для людей, находящихся в зоне сканирования. В медицине ММДДВ также имеет многогранное применение. Соответствующие радарные системы позволяют отслеживать присутствие человека в комнате, стоит ли он или лежит, наличие дыхания и частоту сердечных сокращений. Сканирование тела в ММДДВ позволяет выявлять некоторые топологии, а при частотах выше 100 ГГц еще и выявлять специфические патогены.

Основу интегральной электроники СВЧ диапазона составляет преимущественно технология сложных полупроводников GaAs, GaN, SiC, InP. GaN предлагает сравнимые характеристики с InP и GaAs с точки зрения усиления и коэффициента шума, располагая при этом более высоким напряжением пробоя. Тем не менее, технологические процессы на основе GaAs по-прежнему остаются основным выбором в приложениях миллиметрового диапазона, когда требуется значительное количество мощности. В основном из-за дороговизны изготовления GaN на подложке SiC. Со своей стороны в настоящее время (2024 год) технология производства на основе InP является единственной с помощью которой можно создать усилитель с выходной мощностью >20 дБм и рабочей частотой более 200 ГГц. Однако стоимость данной технологии еще выше, чем у GaN. Усилители мощности на основе Si явно испытывают трудности в достижении тех же показателей мощности и частоты, что и конкуренты, но они остаются непревзойденными с точки зрения стоимости (при массовом производстве) и интегрируемости.

Основные параметры мощных СВЧ транзисторов, изготовленных по различным технологиям приведены в таблице 1 [2].

На базе технологии гетерогенной интеграции (рисунок 2) возможно кардинально улучшить характеристики СВЧ измерительных систем и модулей и добиться дальнейшего повышения эффективности радиоэлектронных систем.



ж

**Рис. 1.** Перспективные сферы для применения технологии ММДВ  
Секция 1 «Радиотехника, радиотехнические измерения, техника СВЧ»

Таблица 1. Параметры мощных СВЧ транзисторов

Технология	Длина затвора/Ширина эмиттера (нм)	$f_T$ , ГГц	$f_{MAX}$ , ГГц	Разбивка GD/CE, В	Плотность мощности, мВт/мм
GaAs pHEMT	250	45-70	90-100	18-20	700-1200
	150	70-85	120	12-16	560-1000
	100	130	185-200	5-9	250-850
GaAs mHEMT	125	150	250	8	30
	100-30	200-515	380-1000	4-2	-
InP HBT/DHBT	512-500	250-370	390-490	4-4.9	-
	256-250	375-520	650-850	4	500
	128	730	1300	3.3	-
InP HEMT	100	120	500	5.5	-
	80	300	700	-	-
SiGe HBT/BiCMOS	180	170-180	200-250	1.6	-
	136-120	200-270	260-450	1.6-3.5	-
GaN/Si HEMT	100	100	180	25-50	3300-4000
	60	150	190	25-30	3000
GaN/SiC HEMT (power)	200	40	100	-	3400
	150	35-80	120	70	3500-4000
	100	140	-	-	2000
GaN/SiC HEMT (high freq.)	150 (T2)	90	220	50	-
	40 (T3)	200	400	40	300
	20 (T4)	330	550	17	-
Si CMOS/SOI	120	196	230	-	-
	90	243	208	2.5-3	-
	45	300-400	350-500	-	50

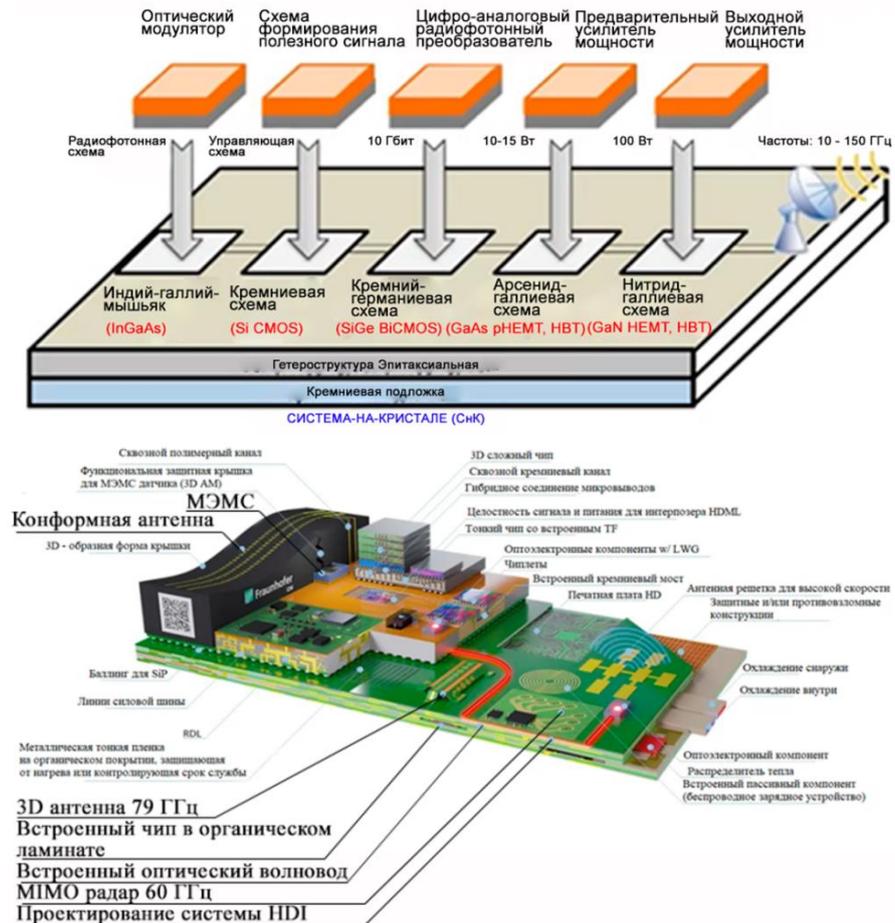


Рис. 2. Трехмерная гетерогенная интеграция

Секция 1 «Радиотехника, радиотехнические измерения, техника СВЧ»

## 2 Имеющаяся элементная и аппаратная база БГУИР

За последние годы достигнут значительный прогресс в создании универсальных, автоматизированных приборов ММДДВ (рисунок 3) в диапазонах частот от 10МГц до 178ГГц, таких как: ваттметры, генераторы, панорамные измерители КСВН и ослабления, измерители комплексных параметров отражения и передачи, базовые устройства СВЧ и КВЧ диапазонов (головки детекторные, смесители на гармониках, балансные смесители, измерительные ячейки, направленные ответвители, поляризационные аттенуаторы, оборудование специального назначения).



Рис. 3. Приборы ММДДВ, изготовленные в БГУИР

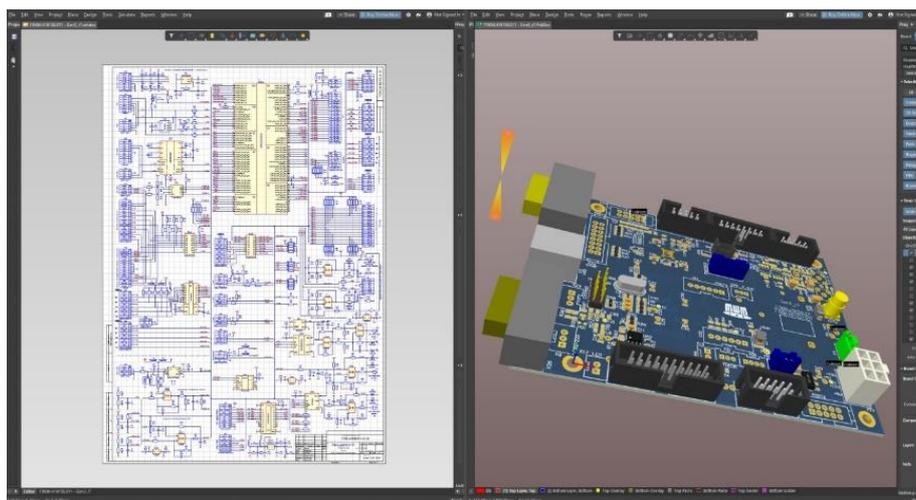
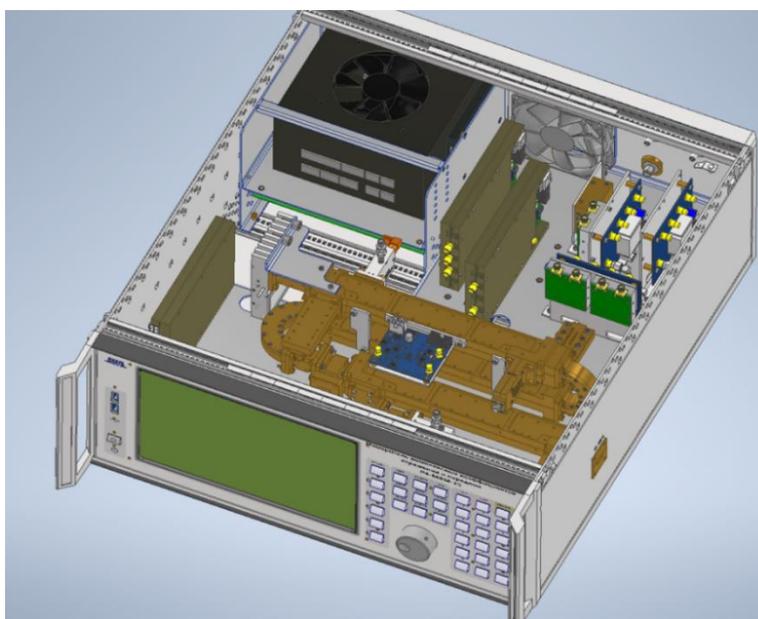
Современное развитие измерительной техники СВЧ диапазона в БГУИР направлено на:

- продвижение вверх по частотному диапазону и использование новых измерительных сред;
- повышение точности измерений и дальнейшее совершенствование методов и средств их метрологического обеспечения;
- расширение функциональных возможностей;
- создание новых автоматизированных технологических измерительных систем, предназначенных для измерений параметров СВЧ микроскобок, подложек, технологических вставок в миллиметровом диапазоне волн;
- разработку разнообразного программного продукта для специализированных измерительных задач.

### **3 Разработка и производство приборов на основе собственных СВЧ компонентов**

В состав сложных устройств входят различные СВЧ узлы. Создания этих узлов включает в себя следующие этапы: научно-исследовательская работа; опытно-конструкторская работа; метрологические исследования.

Конструирование и технология производства (рисунок 4) являются частями сложного процесса разработки РЭА и не могут выполняться в отдельности, без учета взаимосвязей между собой и с другими этапами разработки, и определяют в конечном итоге общие потребительские свойства изделий.



**Рис. 4.** 3D моделирование и проектирование СВЧ устройств

В БГУИР осуществляется разработка конструкторской, технологической и программной документации на: формы, размеры и состав изделия; входящие в него детали и узлы; используемые материалы и комплектующие изделия; взаимное расположение частей и связей между ними; технологию изготовления;

метрологию поверки и методику эксплуатации изделий. Прорабатываются основные вопросы технологии изготовления, наладки и испытания элементов, узлов, устройств и РЭА в целом.

На стадии эскизного проектирования осуществляют проработку выбранного варианта реализации РЭА (рисунок 5, а). Изготавливается действующий образец, проводятся испытания в объеме, достаточном для подтверждения заданных в ТЗ технических и эксплуатационных параметров, организуется разработка необходимой конструкторской документации. Прорабатываются основные вопросы технологии изготовления, наладки и испытания элементов, узлов, устройств и РЭА в целом. На начальных этапах в конструкторской группе разрабатывается чертеж СВЧ узла (рисунок 5, б), для этого определяются основные параметры изделия, влияющие как на стоимость разработки, так и на длительность изготовления детали, и, соответственно, измерительного прибора.

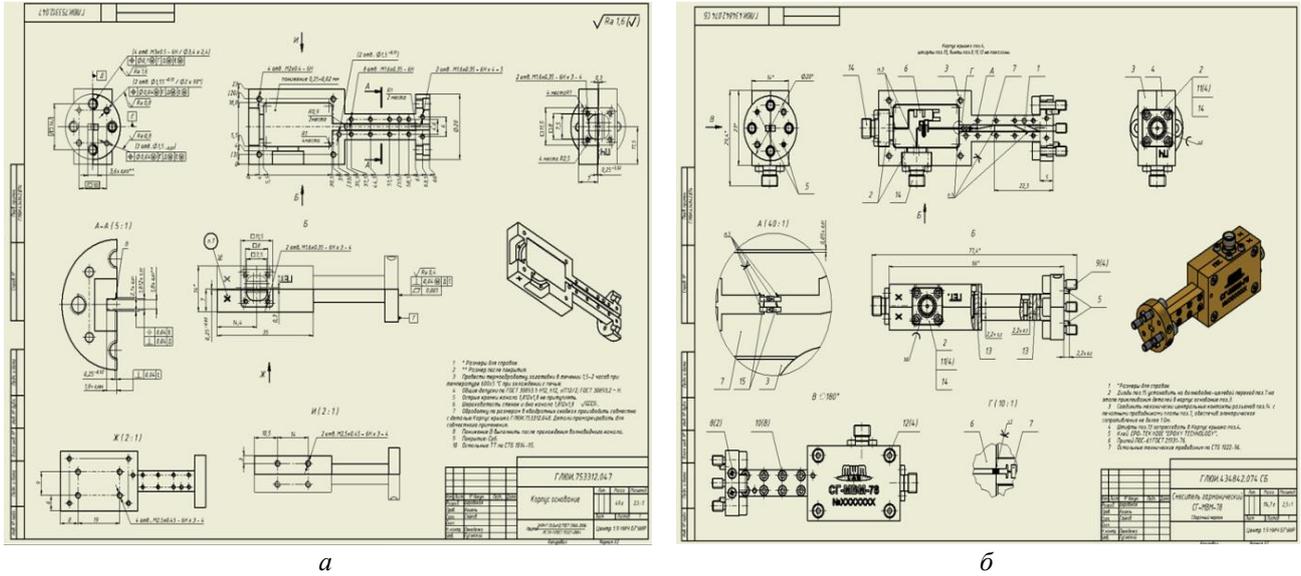


Рис. 5. Конструкторская документация на смеситель

Следующим этапом на основании чертежа и заданных параметров детали, создается ее 3D модель (рисунок 6), включая в себя внутренние и внешние соединительные приспособления. На основании готовой модели будет создаваться опытный образец (или опытная партия).

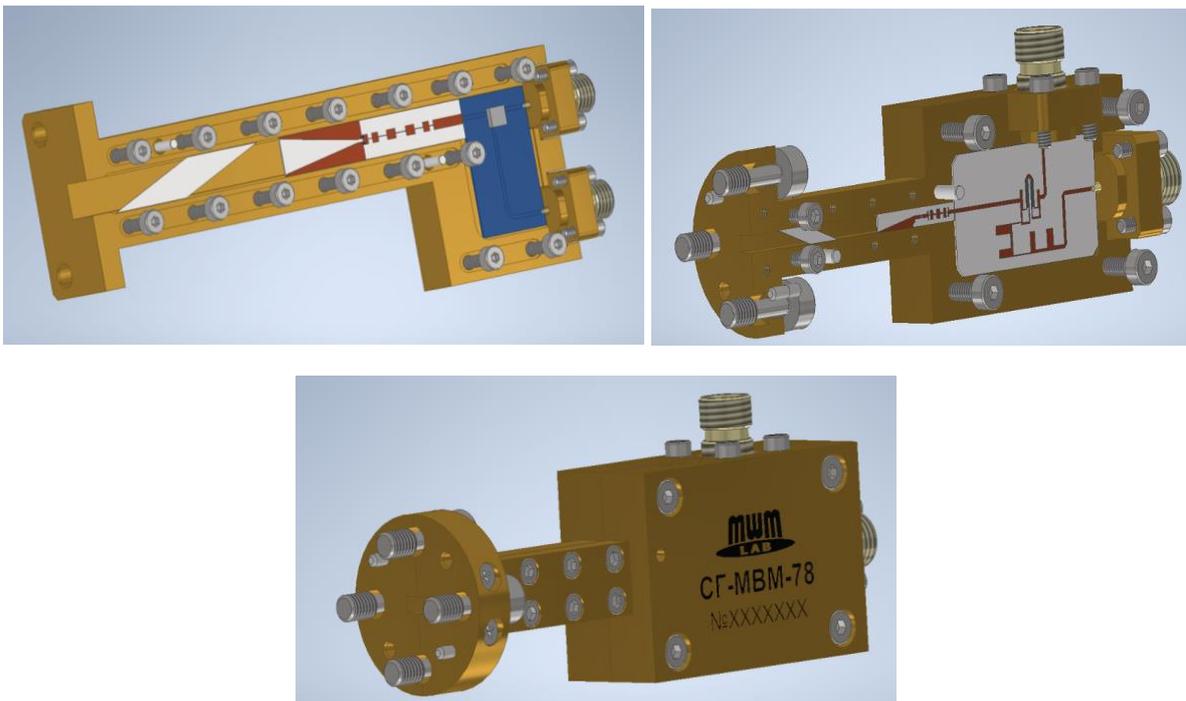


Рис. 6. Смесители на гармониках в диапазонах 8, 3 и 2мм длин волн

ОКР заканчивается выпуском полного комплекта технической документации на изделие (рисунок 7), изготовлением (рисунок 8) и испытанием его опытного образца (или опытной партии).



**Рис. 7.** Комплект технической документации на изделие



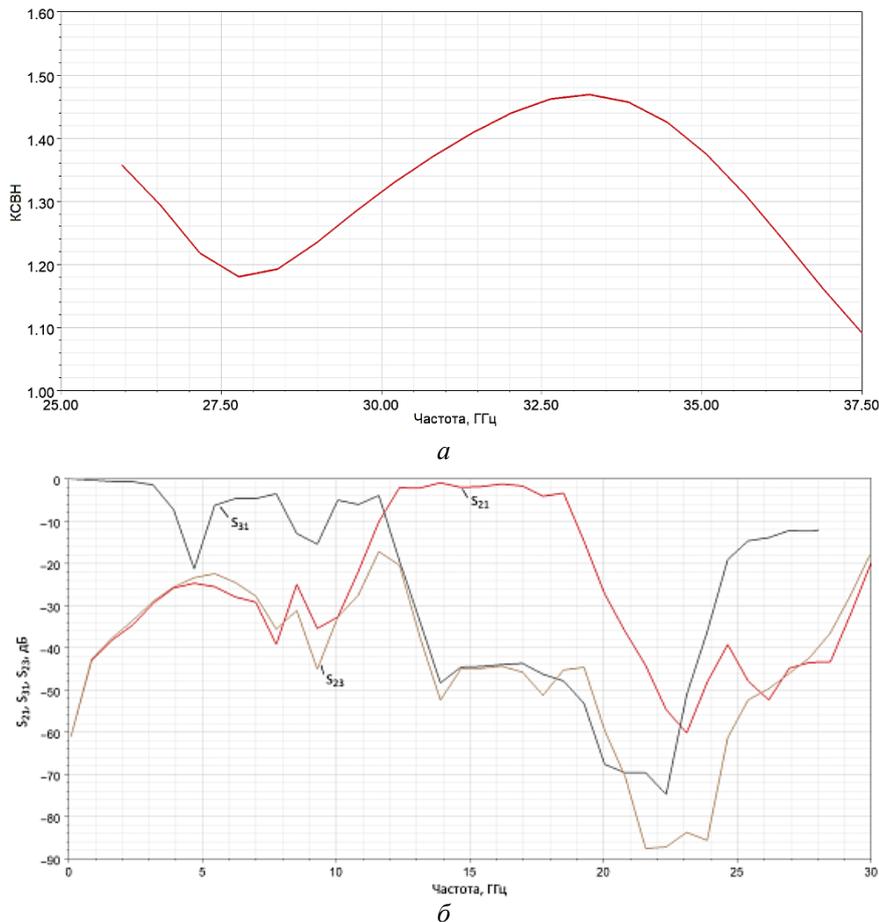
**Рис. 8.** Восьмиканальный супергетеродинный приемник 94 ГГц

Этапы моделирования смесителя миллиметрового диапазона (рисунок 6) методом конечных элементов включают:

1. Создание геометрии модели: определение формы и размеров смесителя с использованием программного обеспечения для моделирования (например, ANSYS, ADS, рисунок 9).
2. Задание свойств материалов: выбор материала для компонентов смесителя и определение его механических и электрических свойств.
3. Создание конечно-элементной сетки: разбиение геометрии модели на множество мелких элементов для более точного расчёта и учёта особенностей конструкции.
4. Решение задачи методом конечных элементов: использование программного обеспечения для решения системы уравнений, описывающих поведение смесителя под воздействием заданных условий.

5. Анализ результатов: изучение полученных данных и проверка соответствия расчётных значений требованиям ТЗ.

6. Оптимизация конструкции: внесение изменений в геометрию, материалы или параметры модели для улучшения характеристик смесителя и достижения требуемых показателей качества.



**Рис.9.** Моделирование перехода с волноводной линии передачи на щелевую линию передачи (а) и частотного диплексера (б)

Критерием положительного моделирования является минимальные уровни КСВН по радиочастотному входу RF смесителя, по выходу промежуточной частоты IF и по входу гетеродина LO.

После этапа моделирования топологии смесителя происходит перенесение топологического рисунка на печатную плату (ПП). Процесс изготовления ПП полностью выполняется в БГУИР. После изготовления ПП происходит контроль точности изготовления при помощи высокоточного измерительного микроскопа, позволяющего зафиксировать отклонения от номинального размера до микрон. Далее выполняется процесс измерения характеристик изготовленного смесителя.

Современный уровень развития механической обработки материалов, а также достижения в области СВЧ электроники позволяют создавать компактные многоканальные устройства СВЧ, объединяющие несколько функциональных узлов в едином, миниатюризованном корпусе. В процессе проектирования таких устройств важное место занимают процессы оптимизации элементов линии передачи сигналов, а также вопросы, связанные с производственными допусками на изготовление механических деталей, применяемых в таких устройствах.

Наиболее проблематичным элементом многоканальных волноводных устройств является делитель мощности СВЧ. Делитель должен обеспечивать равномерное разделение входной мощности между потребителями, минимальный коэффициент потерь, максимальную развязку между потребителями. Поскольку длина волны сигнала приближается к единицам миллиметров, при конструировании устройств данного диапазона следует учитывать особенности металлообработки: размеры инструмента, характер шероховатости получаемой поверхности, допуски изготовления.

Оптимизация конструкции делителя основывается на решении уравнений Максвелла методом конечных элементов в пакете Ansys HFSS для параметрической модели геометрии элементов Т-образного делителя мощности 1 к 2, с последующим объединением полученной оптимальной геометрии в многополюсник с 2<sup>н</sup> количеством выходов. Пример структуры волноводного делителя, оптимизированной на частоту 92,5 ГГц представлен на рисунке 10.

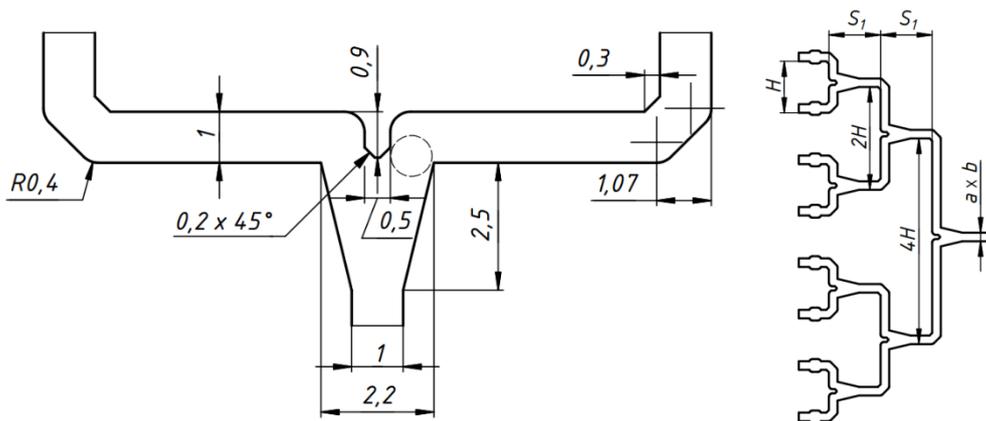


Рис. 10. Оптимальная структура узкополосного волноводного делителя мощности ( $H = 6$  мм,  $S_1 = 6$  мм)

В рамках работ по освоению миллиметровых диапазонов длин волн в Центре 1.9 НИЧ БГУИР был разработан восьмиканальный смесительный модуль, обеспечивающий прием, частотное преобразование и усиление сигналов в диапазоне частот  $(94,0 \pm 0,5)$  ГГц. Конструкция модуля показана на рисунке 11.

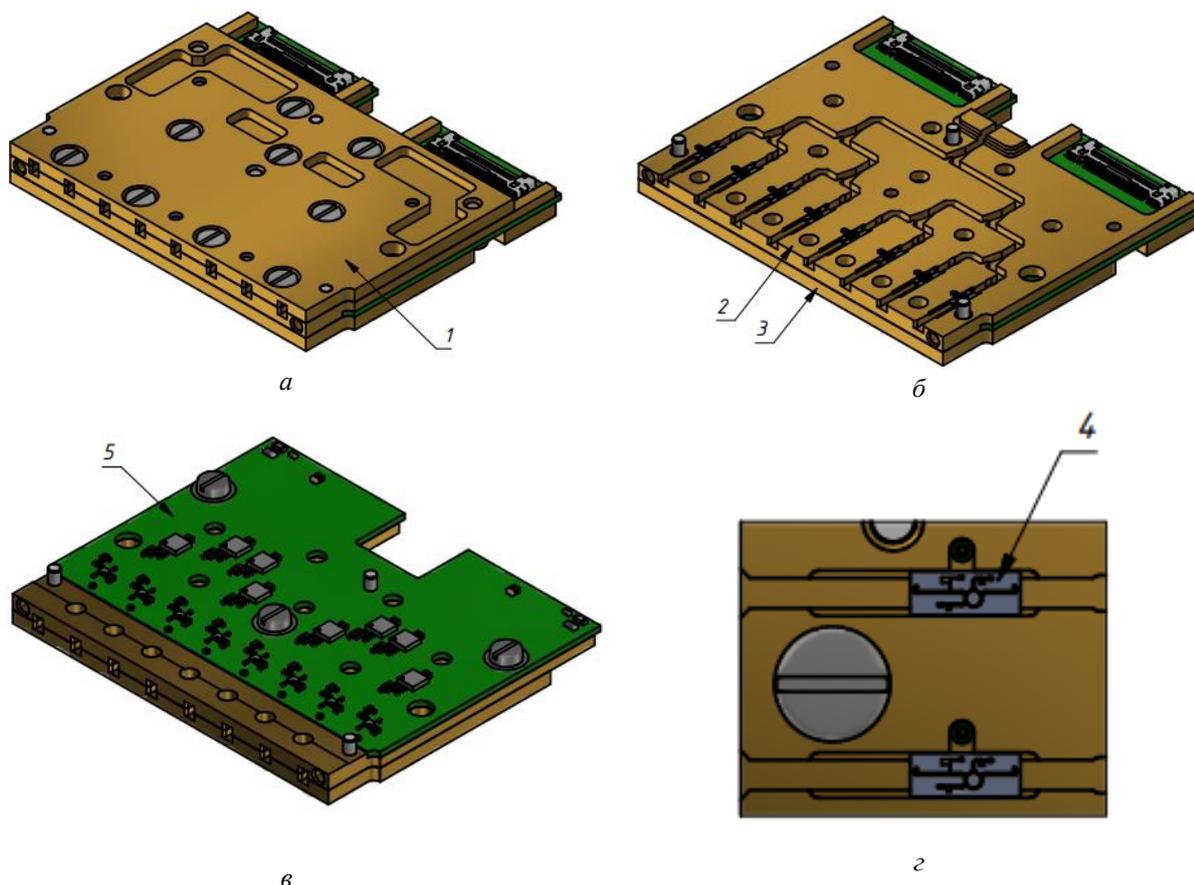


Рис. 11. Конструкция компактного многоканального смесительного модуля в диапазоне частот 94 ГГц

Волноводные каналы выполнены методом фрезеровки в деталях 1, 2 и обеспечивают подведение сигналов ВЧ и гетеродина к смесителям. Смесительный чип 4 устанавливается в паз в середине волновода, параллельно узкой стенке волновода. Сигнал промежуточной частотой 1575 МГц через штырь связи переносится на плату МШУ 5, где производится фильтрация и усиление сигнала. Деталь 3 выполняет функцию экранировки и развязки каналов усиления. Сигналы ПЧ выводятся через два микрокоаксиальных разъёма, через них же обеспечивается питание усилителей напряжением 2,8 В. Коэффициент преобразования смесителей с учётом всех неоднородностей каналов составляет  $(9,2 \pm 2)$  дБ. Габаритные размеры модуля –  $52 \times 38 \times 6$  мм.

В волноводной СВЧ технике широко используются устройства для ответвления части электромагнитной энергии из основного канала передачи во вспомогательный – направленные ответвители (НО). Среди множества типов НО наибольшее применение нашли многоэлементные НО, поскольку имеют высокий уровень направленности, малые потери, низкий уровень кросс-поляризации и широкий рабочий диапазон частот. Волноводный НО с множеством элементов связи представляет собой устройство, состоящее из основного и вспомогательного волноводов, соединенных через ряд отверстий или щелей, расположенных вдоль общей стенки. Основной волновод передает сигнал, часть которого через элементы связи направляется во вторичный. Размер, форма, расположение и количество элементов связи определяются для обеспечения требуемых параметров. Такая конструкция обеспечивает высокую изоляцию между портами и стабильную работу в заданном частотном диапазоне, а также может быть дополнена элементами для юстировки или согласования импедансов.

На базе Центра 1.9 НИЧ БГУИР освоен полный цикл производства волноводных НО с множеством элементов связи. Процесс производства волноводных НО включает в себя следующие этапы:

1. Проектирование и моделирование. Этап теоретического синтеза включает в себя расчет геометрических параметров НО исходя из требуемых характеристик: диапазон рабочих частот, входная/выходная мощность, переходное ослабление и направленность. Расчет осуществляется при помощи математической модели с последующим уточнением рассчитанных параметров с учетом применяемых при производстве материалов в среде численного моделирования. При необходимости проводится оптимизация конструкции с учетом физического взаимодействия между элементами. При изготовлении для корпусов НО используется латунь, для покрытий – серебро.

2. Изготовление волноводов. При изготовлении проводят токарные и фрезерные работы с высокой точностью (до микрон) для формирования стенок и направляющих каналов. Для изготовления волноводной вкладки – разделительной стенки между волноводами с элементами связи, используется лазерной резка (для обеспечения высокой точности изготовления элементов связи) и сверление (для позиционных отверстий). Обязательным этапом является контроль размеров и расстояний между отверстиями (элементами связи) для минимизации отражений и обеспечения согласования импедансов при помощи измерительного микроскопа.

3. Нанесение покрытий. Для улучшения проводимости внутренних стенок волноводов и снижения потерь применяется гальваническое или вакуумное напыление серебром. После нанесения покрытий проводится контроль шероховатости и, при необходимости, сглаживание стенок для минимизации поверхностного рассеяния.

4. Сборка элементов связи. Производится установка элементов конструкции НО, вставки в корпусах размещаются в местах максимального взаимодействия полей. Особое внимание уделяется точному позиционированию вставки относительно волноводов, для чего используются юстировочные механизмы, прецизионная обработка стыков, волноводные ловушки.

5. Тестирование и настройка. При помощи векторных анализаторов цепей проводятся измерения направленности и коэффициента передачи. По результатам измерений осуществляется подстройка параметров включая лазерную обработку вставок для точного соответствия модели.

Таким образом, можно выделить основные факторы, влияющие на конечный результат:

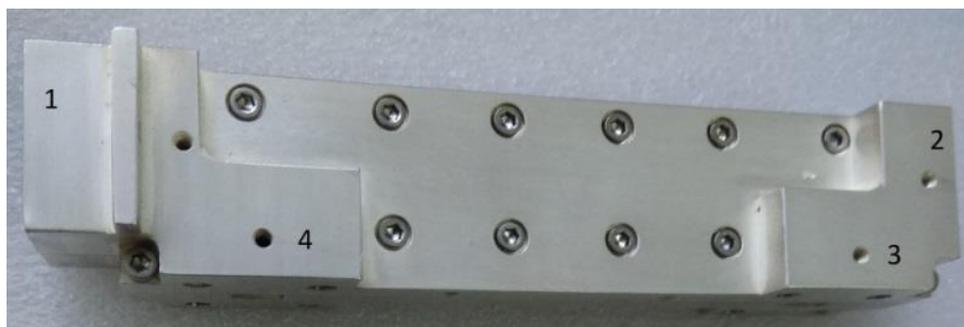
1. Точность механической обработки – неправильное расположение отверстий или шероховатость стенок волновода увеличивает потери и отражения.

2. Качество покрытия – шероховатости и дефекты покрытия увеличивают потери.

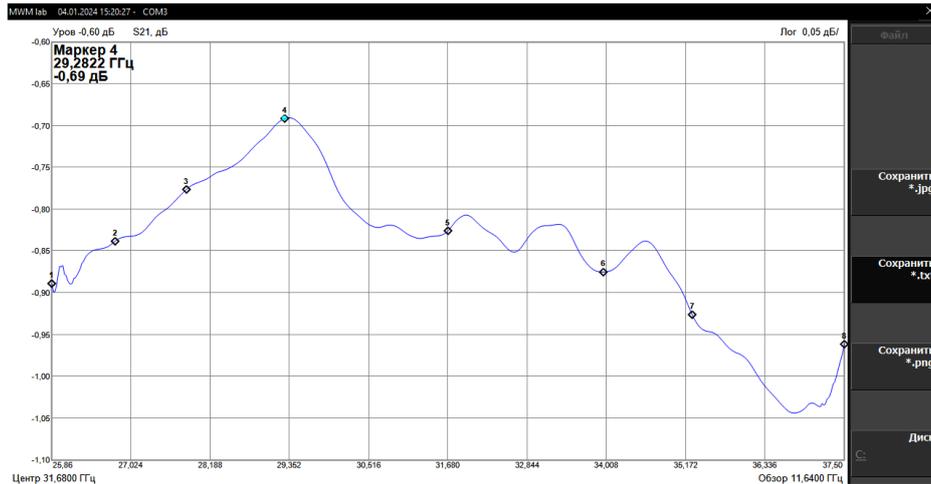
3. Стабильность материала – устойчивость к температурным расширениям и внешним механическим воздействиям.

4. Точность настройки – правильная юстировка обеспечивает минимальные отражения и равномерное распределение мощности.

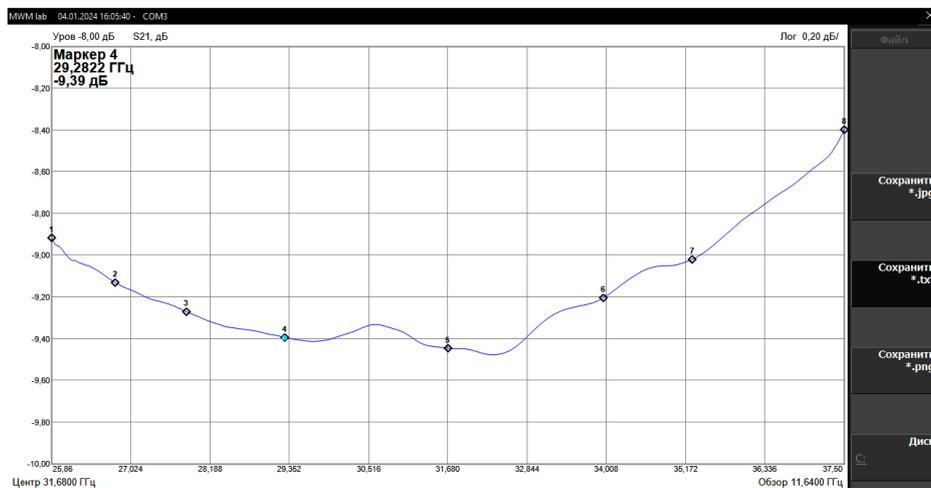
Обозначение портов НО приведено на рисунке 12. На рисунке 13 представлены результаты измерений характеристик изготовленного НО в диапазоне частот от 25,95 до 37,5 ГГц, выполненных при помощи измерителя комплексных коэффициентов отражения и передачи P4-MBM-37.



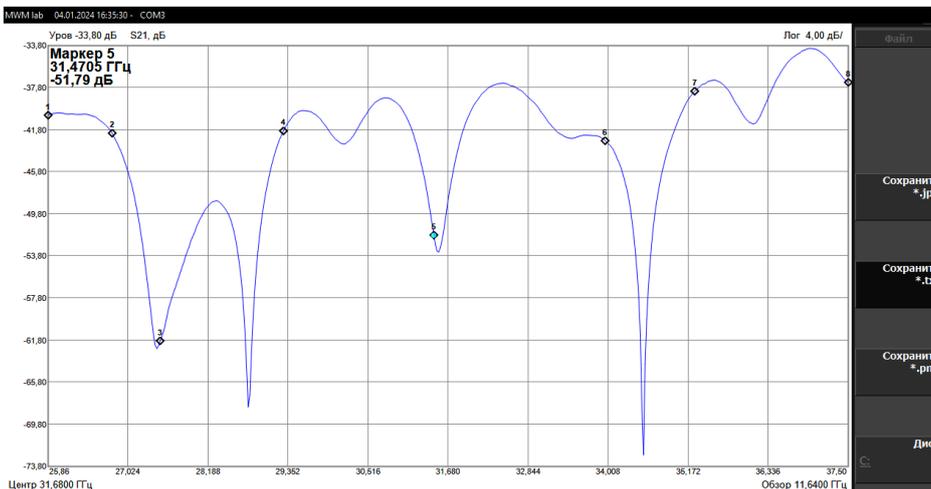
**Рис. 12.** Внешний вид НО с обозначением портов



а



б



в

Рис. 13. Рабочее затухание (порт 1 – порт 2) (а), переходное ослабление (порт 1 – порт 3) (б), развязка (порт 1 – порт 4) (в)

Проводятся механические испытания и создается оборудование для технической оснастки (рисунок 14). Детали производятся с помощью различных токарно-фрезерных станков с ЧПУ (рисунок 15). Данные станки предназначены для металлообработки с погрешностью 5 – 10 мкм.

После токарно-фрезерной обработки на готовый образец наносят гравировку с помощью лазерного гравера (рисунок 16), а также проводят контроль качества детали на соответствие заданным геометрическим параметрам. Контроль осуществляется с использованием видеоизмерительной системы NORGAU.



**Рис. 14.** Парк станочного оборудования и оснастки



**Рис. 15.** Станки с ЧПУ

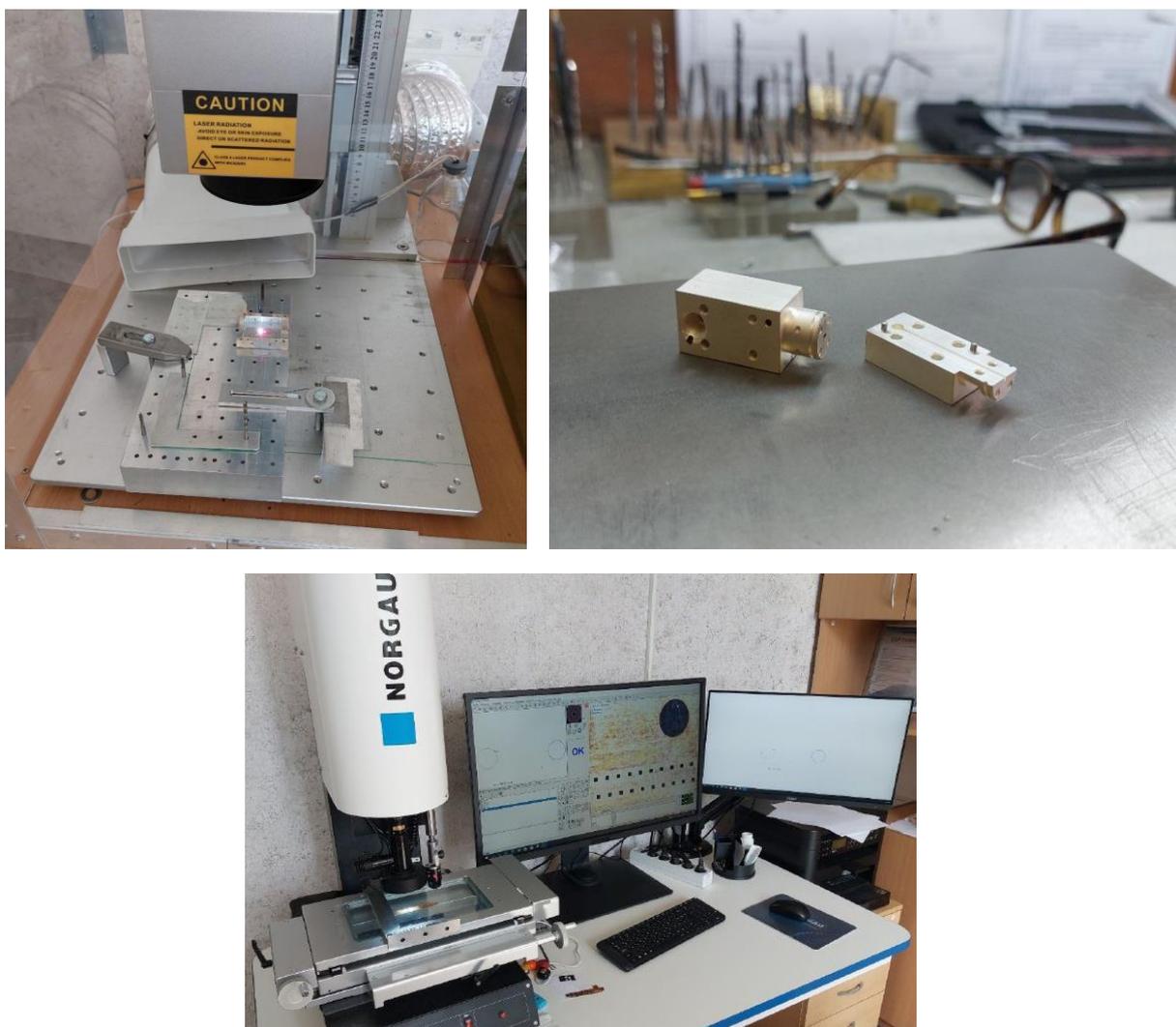


Рис. 16. Контроль размеров и допусков на всех этапах производства

Готовое изделие отправляется на метрологические исследования. В БГУИР получены высокие результаты, однако, для того чтобы изделия соответствовали высоким требованиям и стандартам, необходимо постоянное развитие и модернизация оборудования, оснащение его новым инструментом и обновление технической базы. А также необходимо поддержание условий для обеспечения стабильной и бесперебойной работы станков.

БГУИР располагает и другим технологическим оборудованием, которое уже используется и может более широко использоваться для разработки и производства СВЧ материалов, компонентов и узлов: фотолитография, напыление, оксидирование, посадка кристаллов, гальванопокрытие, распайка кристаллов, корпусирование.

Установки экспонирования ЭМ-576, ЭМ-586, ЭМ-5006 (рисунок 17, а), позволяют проводить контактную фотолитографию на пластинах диаметром 76 мм, 100 мм и 150 мм, соответственно. Установка ЭМ-586 имеет модифицированную систему позиционирования рабочего стола, что позволяет работать с подложками нестандартных размеров и толщины. Минимальный геометрический размер элементов при экспонировании, который обеспечивается на участке фотолитографии – 5 мкм.

Установки вакуумного напыления «Оратория-9.1», «Оратория-9.2» и «Оратория-5» (рисунок 17, б) позволяют осуществлять напыление тонких пленок алюминия, тантала, титана, ванадия, меди, молибдена, ниобия, никеля и других металлов толщиной от 30 нм до 1 мкм методами электронно-лучевого испарения и магнетронного распыления, а также осуществлять напыление пленок диэлектрических материалов (оксид кремния и оксид алюминия) и проводить ионное травление пленок металлов и оксидов толщиной до 70 нм.

Оборудование для исследования электрохимических процессов (рисунок 17, в) включает набор электрохимических ячеек различного диаметра, установку для электрохимических процессов на основе потенциогальваностата Metrohm Autolab PGSTAT 302N (Голландия) с компьютерным управлением; источник-измеритель Keithley 2450 для измерения вольтамперных характеристик.



**Рис. 17.** Технологическое оборудование БГУИР

### **Заключение**

Развитие СВЧ техники требует одновременного развития средств измерений СВЧ диапазона и их метрологического обеспечения, что является в том числе одним из компонентов метрологической безопасности государства. На протяжении последних лет в вышеуказанных областях ведутся интенсивные исследования, приводящие к созданию новой техники и технологий, необходимость освоения которых диктуется в первую очередь требованиями обеспечения конкурентоспособности экономики.

### **Список использованных источников**

1. A. E. C. Redondi. A Survey on Future Millimeter-Wave Communication Applications / A. E. C. Redondi, C. Innamorati, S. Gallucci, S. Fiocchi and F. Matera // IEEE Access, 2024, Vol. 12. – P. 133165-133182.
2. Y. Y. Wai. An Overview of Recent Development of the Gap-Waveguide Technology for mmWave and Sub-THz Applications / A. E. C. Redondi, V. Abbas, B. Alireza, V. D. V. Coen, H. Abolfazl, A. A. Glazunov // IEEE Access, 2023, Vol. 11. – P. 69378-69400.