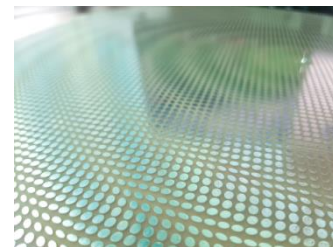
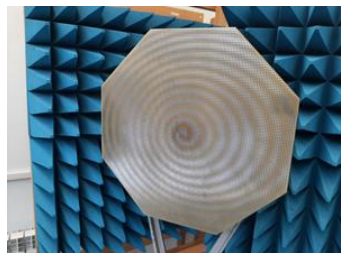


Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения
Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

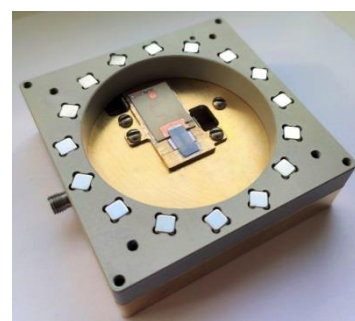
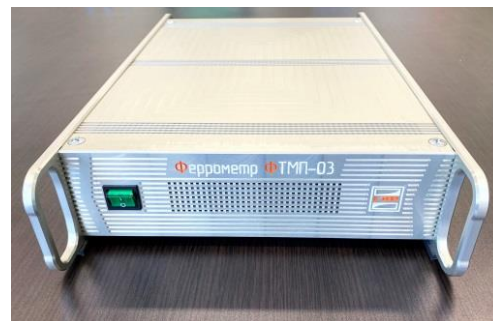


**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ
ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК
И УСТРОЙСТВА СВЧ**



Докладчик: к.ф.-м.н., зав. лаб.
Научного приборостроения
ИФ СО РАН,
Боев Никита Михайлович

Новосибирск, 25.09.2024



Разработка, исследование и опытное производство устройств для
бортовой аппаратуры космических аппаратов и наземных станций связи
Выполнение НИОКР с АО «» и ООО «НПЦ «»



Федеральный проект
«Комплексное
развитие космических
информационных
технологий «Сфера»

Связь и вещание:

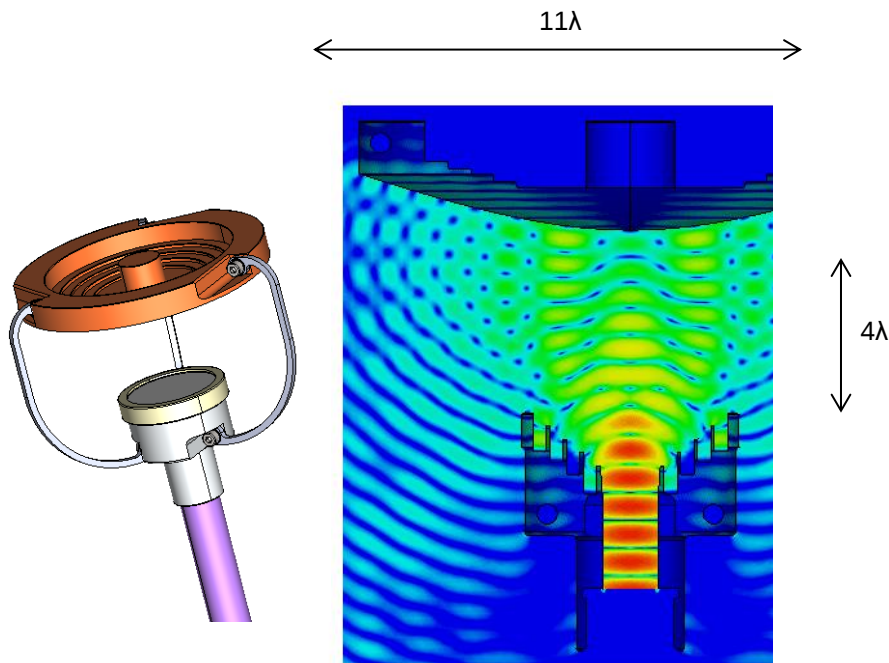
- Скиф-Д
- Скиф
- Марафон-IoT
- Ямал
- Экспресс
- Экспресс-РВ
- Экспресс-АМУ4



Двухдиапазонные облучатели зеркальных антенн с ближнепольным контррефлектором

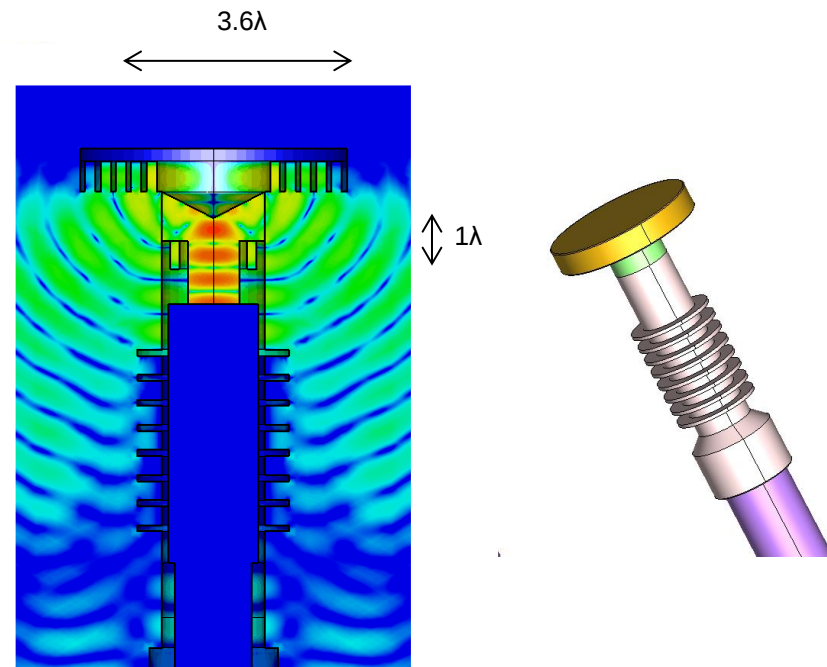


Классический облучатель по схеме Кассегрена, оптические принципы, 1920-е



- Проще в разработке
- Низкая эффективность при небольшом электрическом размере рефлектора ($<50\lambda$)
- Конструктивно сложнее

Облучатель с ближнепольным контррефлектором, электродинамические принципы, 1990-е

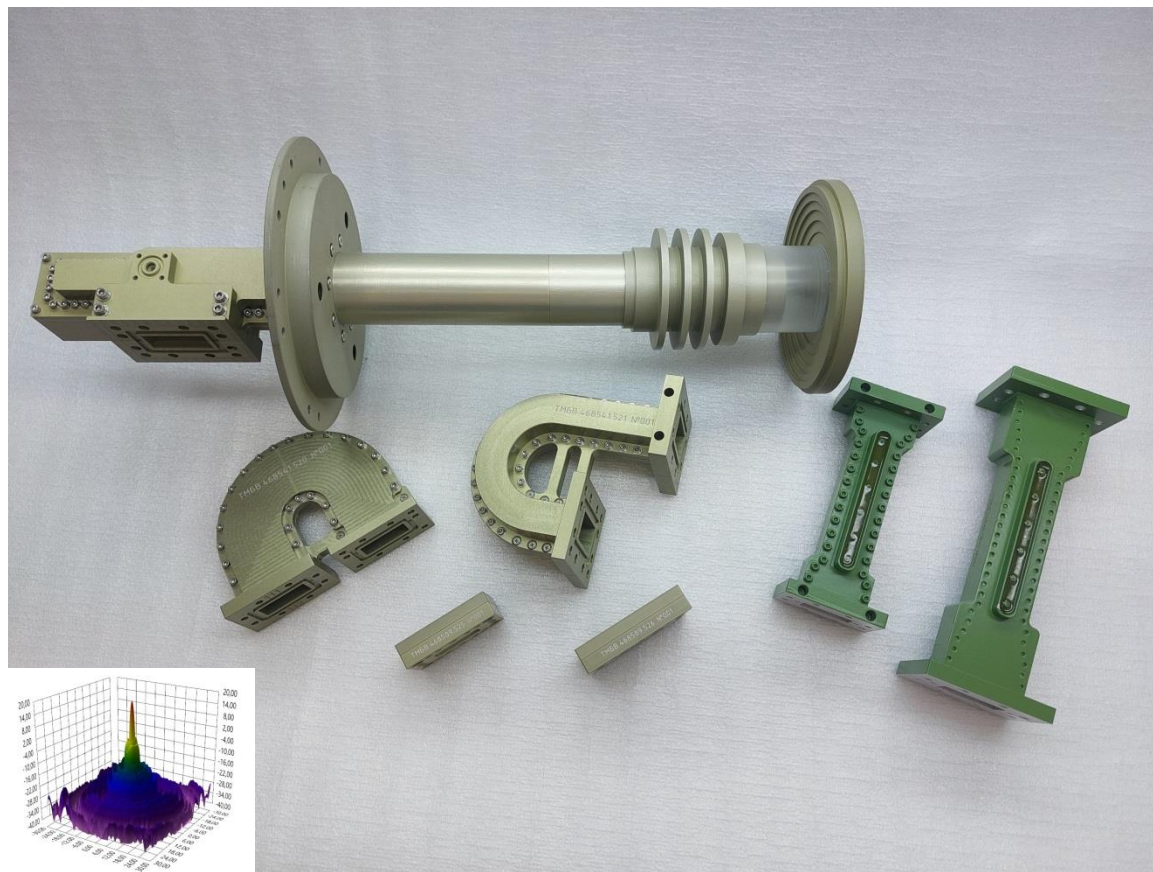


- Сложнее в разработке
- Высокая эффективность при небольшом электрическом размере рефлектора ($<50\lambda$)
- Конструктивно проще

Два рабочих диапазона частот, поляризационное разделение в каждом

Выполнение работ в рамках договоров с АО «С» и «НПЦ А»

Выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках проекта Сфера: Марафон, Скиф и др. Опытное и мелкосерийное изготовление облучающих систем и СВЧ-фильтров.



Облучатель с двумя электроприводами для переключения поляризации и слежения за спутником

Патенты РФ №2774796, №2774737, №2777698

Выполнение работ в рамках договоров с АО «» и «НПЦ «»



Выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках проекта Сфера: Марафон, Скиф и др. Опытное и мелкосерийное изготовление облучающих систем и СВЧ-фильтров.



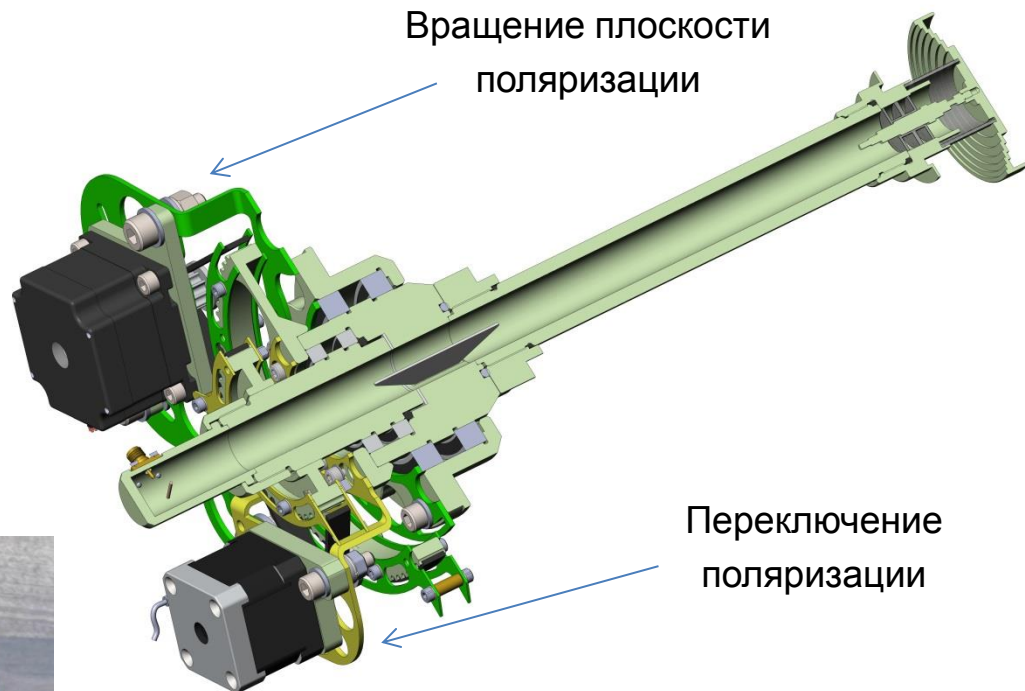
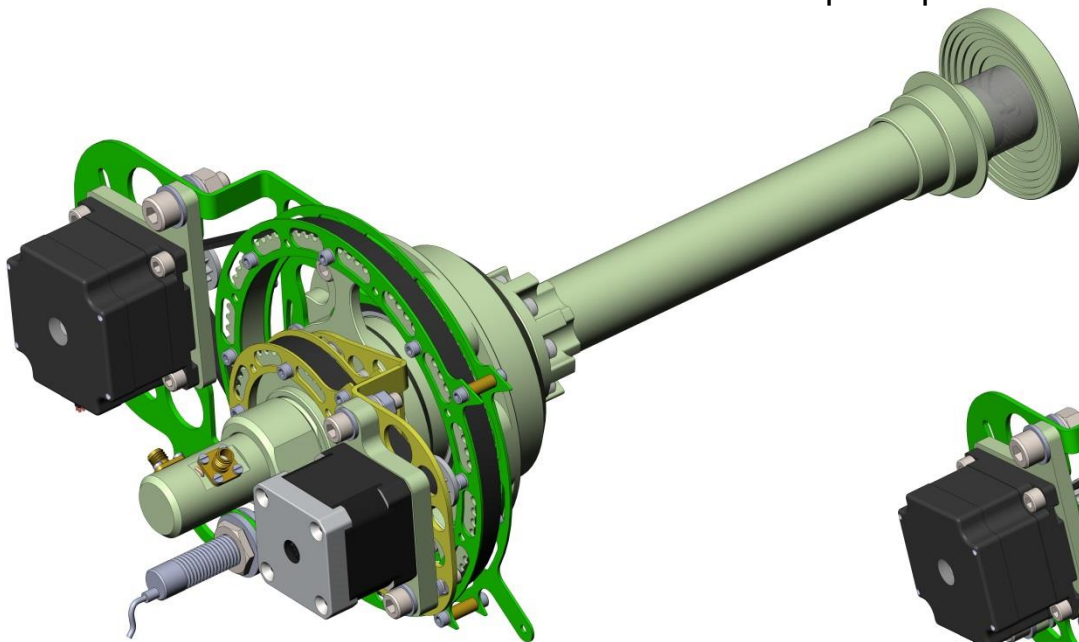
Фотографии зеркальной антенны наземной станции связи, установленной на опорно-поворотном устройстве для слежения за спутником «Скиф-Д»



Патенты РФ №2791426, №2816555, №2821156

Выполнение работ в рамках договоров с АО «» и «НПЦ «»

Выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках проекта Сфера: Марафон, Скиф и др. Опытное и мелкосерийное изготовление облучающих систем и СВЧ-фильтров.



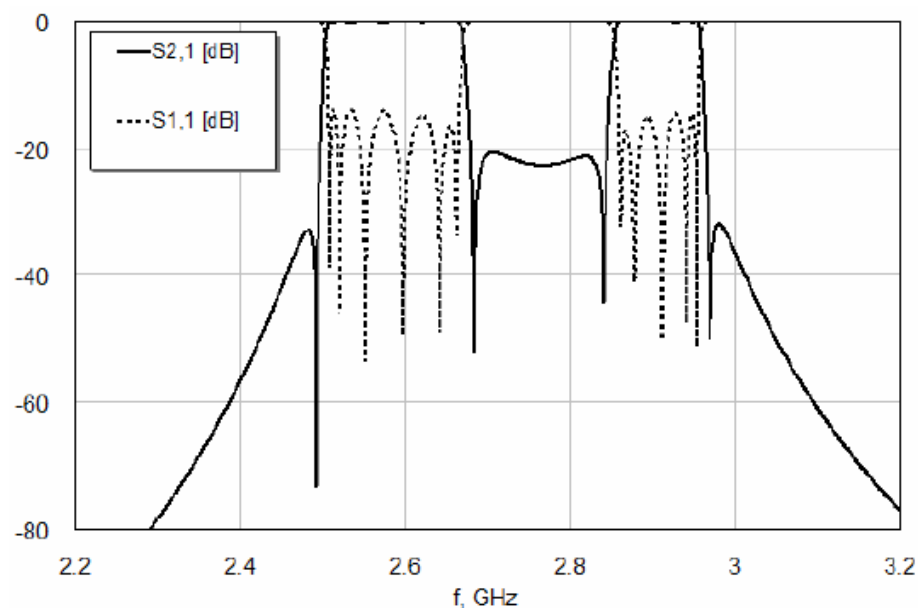
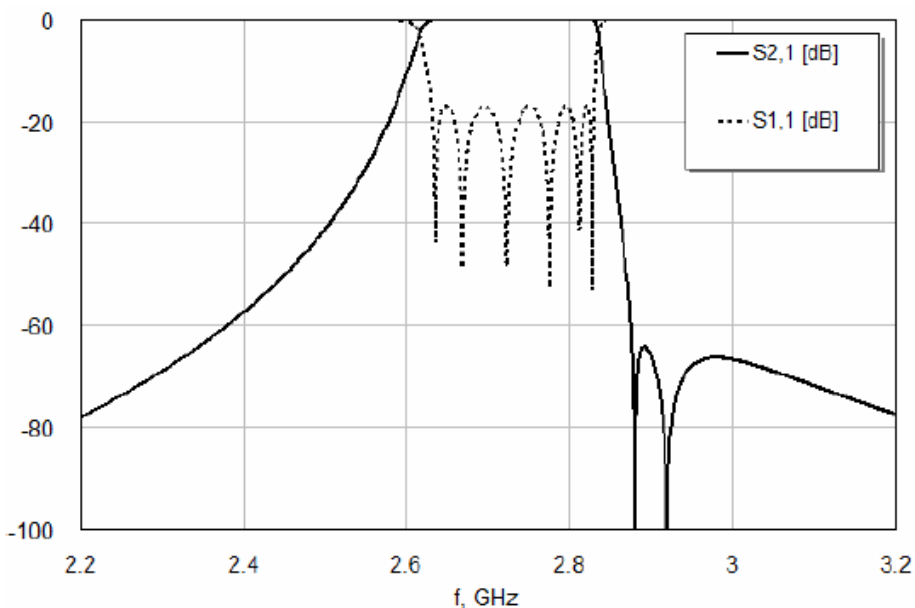
Облучатель с двумя электроприводами для переключения поляризации и слежения за спутником



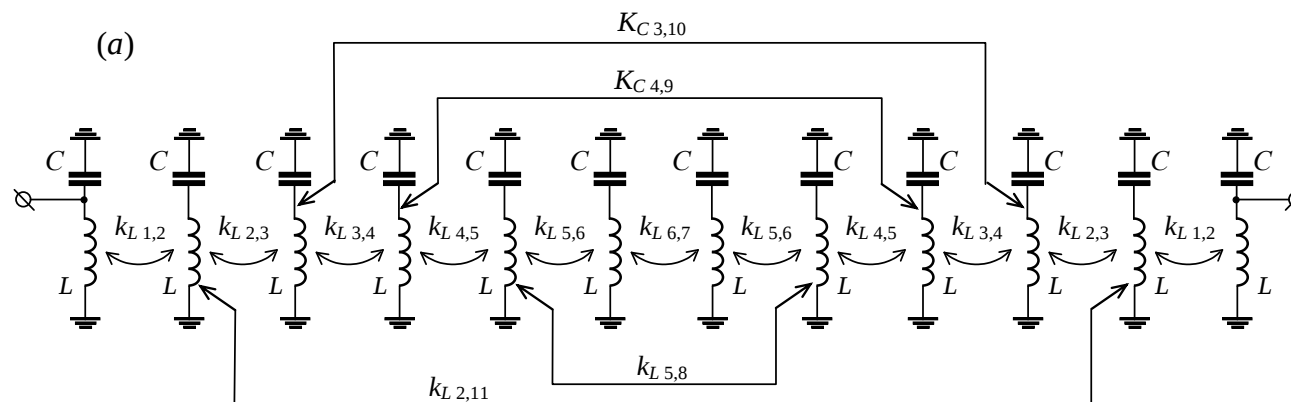
Постановка проблемы

С вводом в начале 1970-х годов в эксплуатацию первых спутниковых телекоммуникационных систем, возникли потребности в:

- расширении частотного диапазона
- создании высокоселективных фильтров и новых методов их синтеза



Примеры АЧХ специального вида
Нереализуемые стандартной аппроксимацией
(Баттерворта, Чебышева)

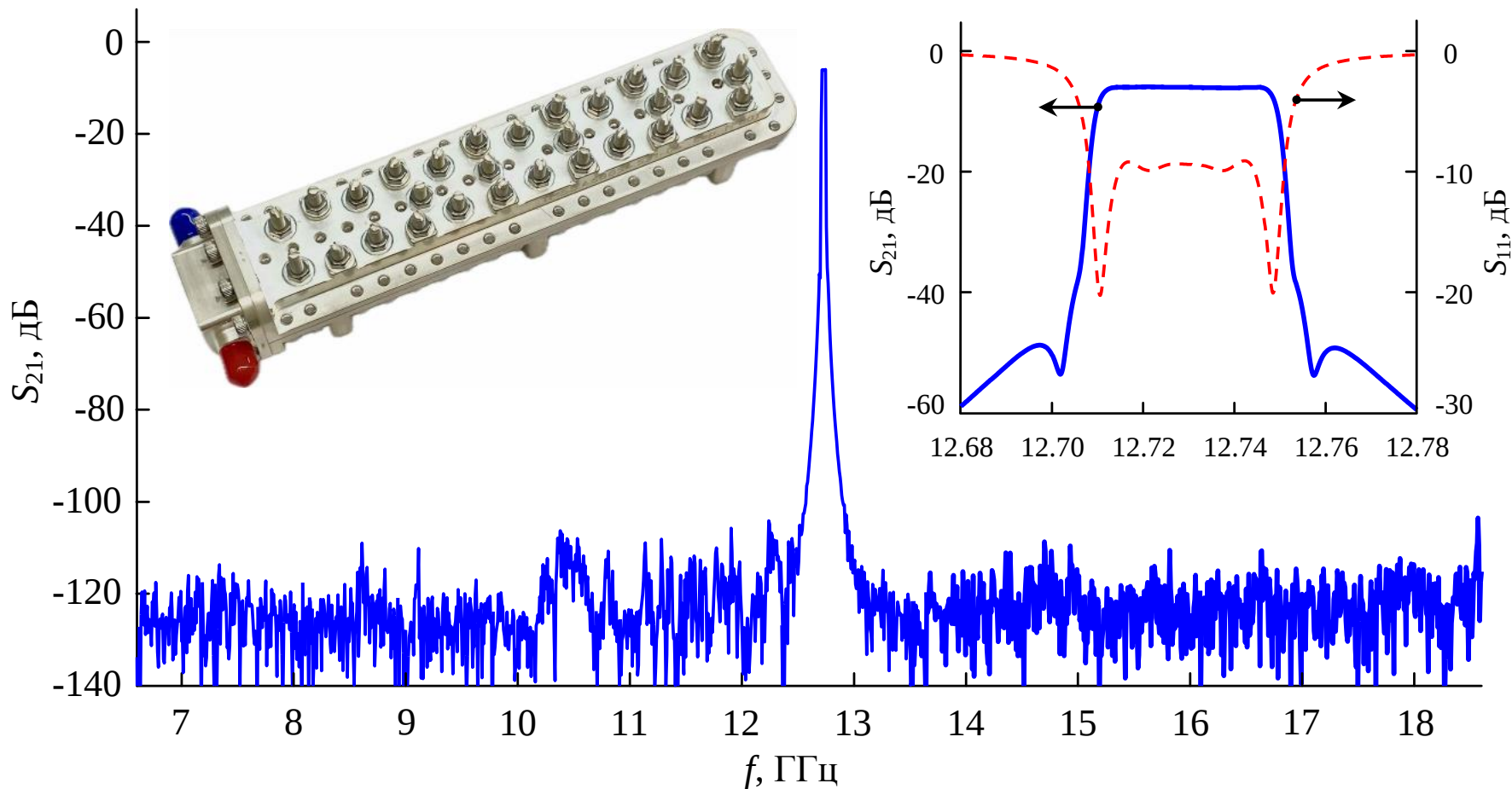


		Номер резонатора												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Номер резонатора	Вход	1.251899	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1.251899	0	1.05461	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	1.05461	0	0.668934	0	0	0	0	0	0	0.011188	0	0
	3	0	0	0.668934	0	0.594437	0	0	0	0	-0.01492	0	0	0
	4	0	0	0	0.594437	0	0.507167	0	0	-0.05221	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0.507167	0	0.422829	0	0.044755	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0.422829	0	0.671303	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0.671303	0	0.423016	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0.044755	0	0.423016	0	0.507249	0	0	0
	9	0	0	0	0	-0.05221	0	0	0.507249	0	0.594529	0	0	0
	10	0	0	0	-0.01492	0	0	0	0	0.594529	0	0.669319	0	0
	11	0	0	0.011188	0	0	0	0	0	0	0.669319	0	1.054203	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.054203	0	1.251899
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.251899	Выход

Использование матриц связи для проектирования СВЧ-фильтров и их регулировки



Высокая избирательность канальных фильтров,
ширина полосы пропускания 0,3%



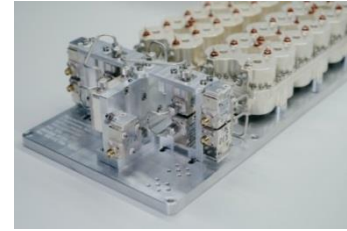
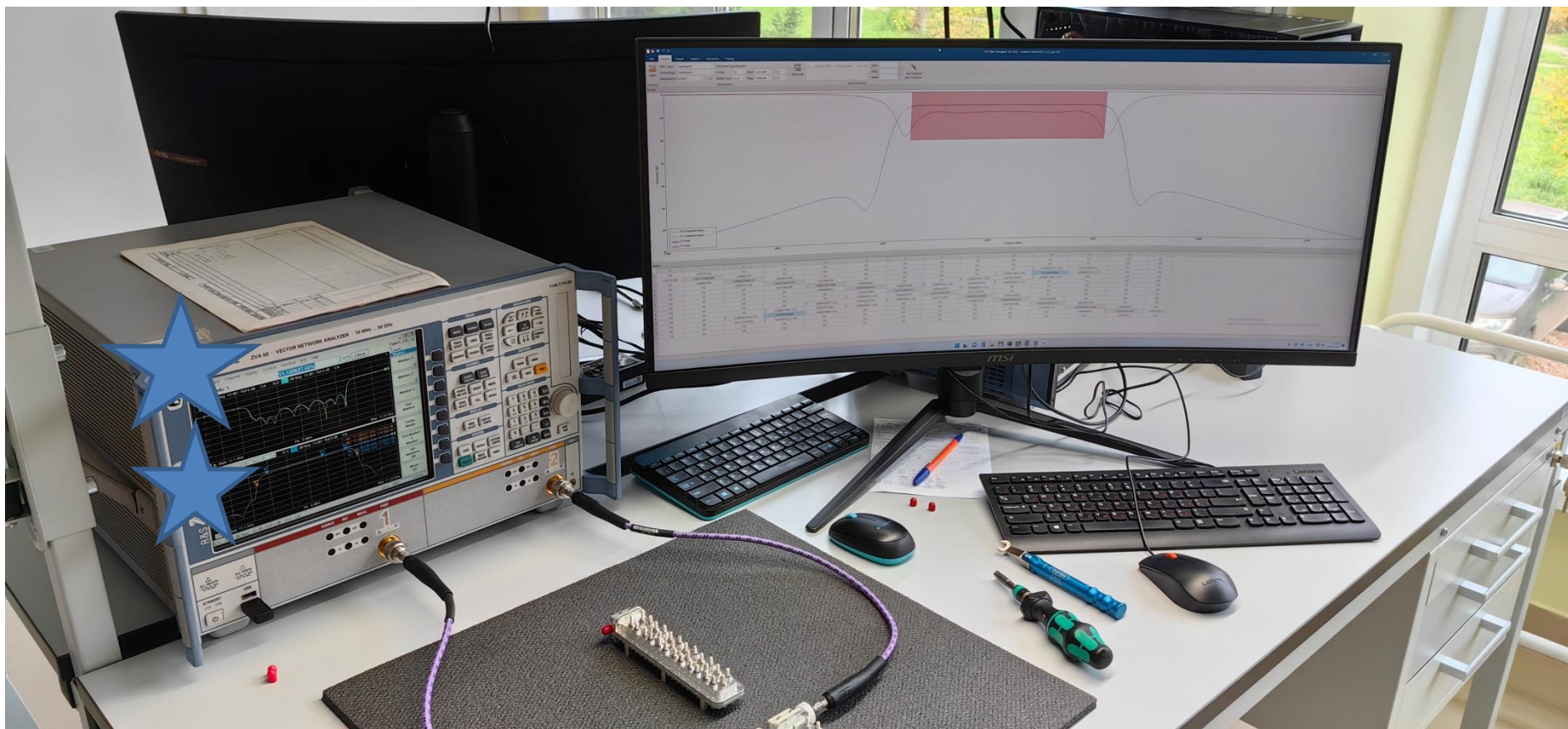
- Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 13. С. 16-20.
- IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2022. Vol. 12. No. 7. Pp. 1186-1195.
- ДАН. Физика. Технические науки. 2023. Т. 513. С. 88–94.

Патенты РФ № 2774737, № 2774796, № 2816555, № 2816678.

Использование матриц связи для проектирования СВЧ-фильтров и их регулировки

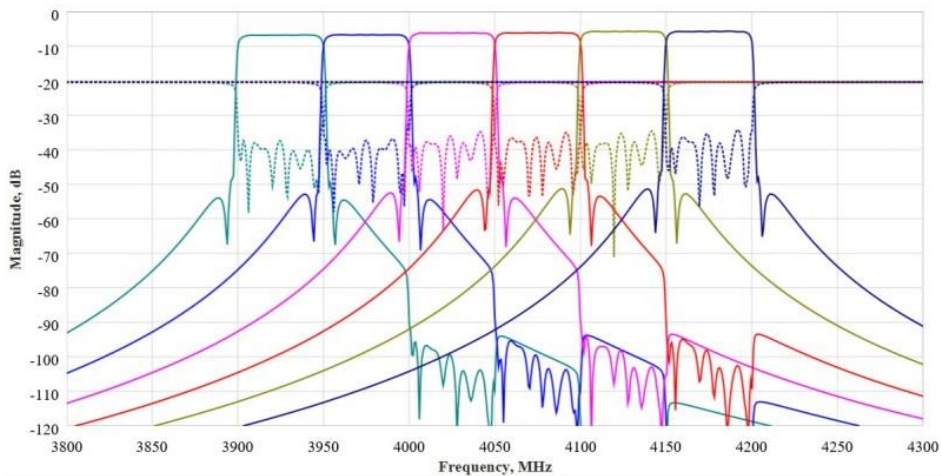


Рабочее место регулировщика СВЧ-фильтров

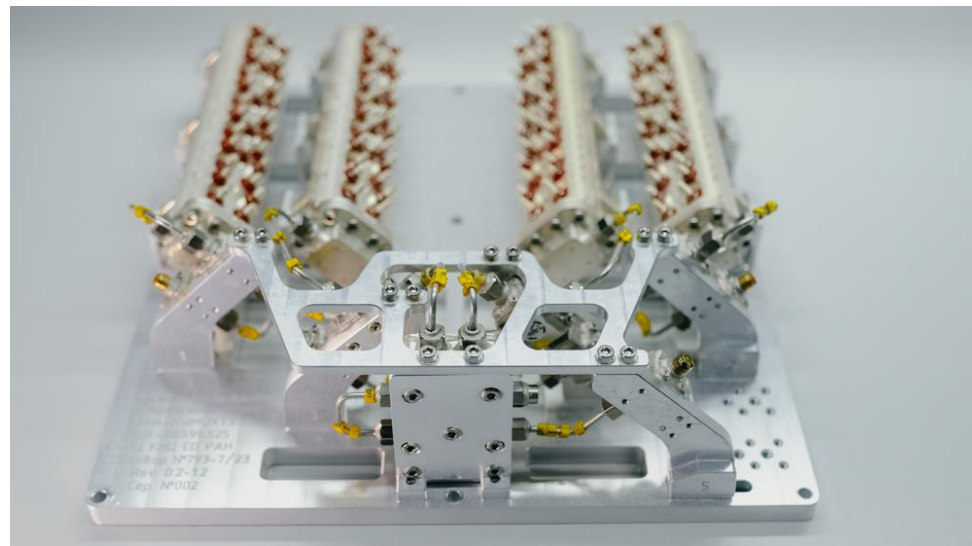
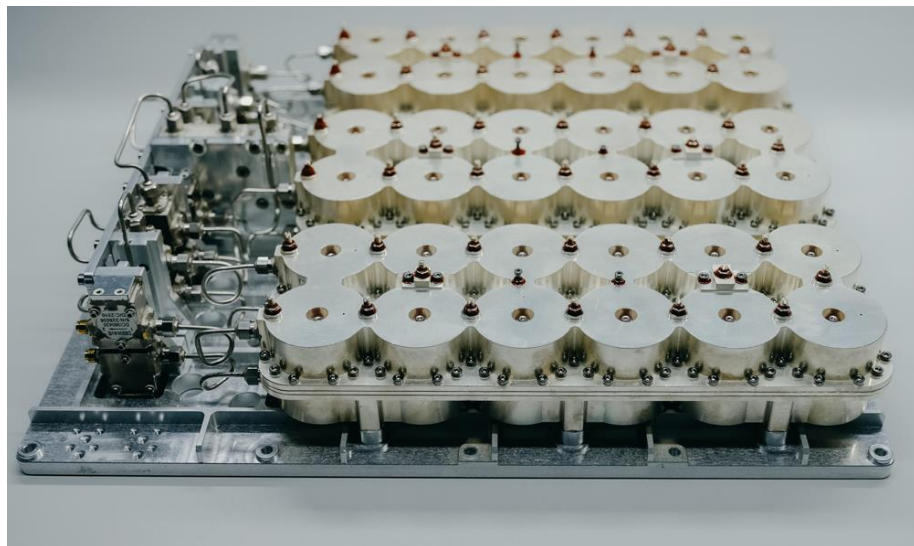
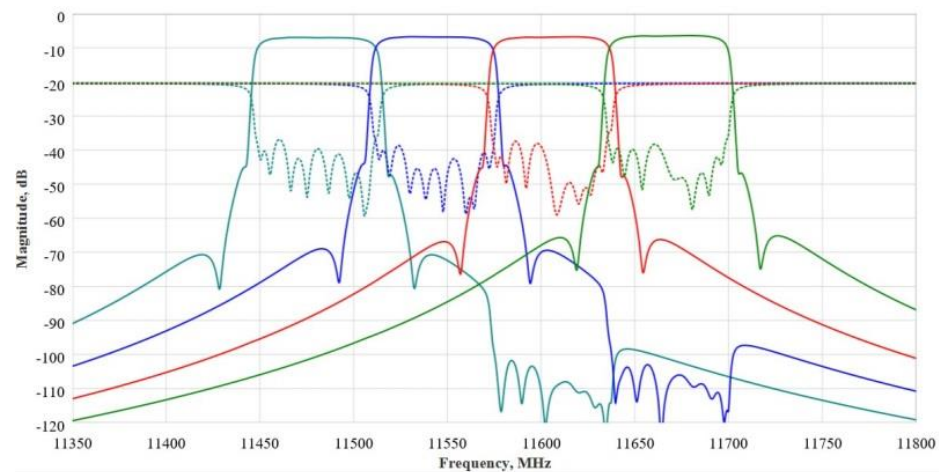


Мультиплексоры и демультимплексоры диапазонов C и Ku

Диапазон С, 6 каналов



Диапазон Ки, 4 канала



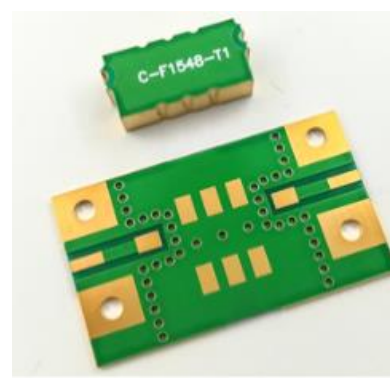
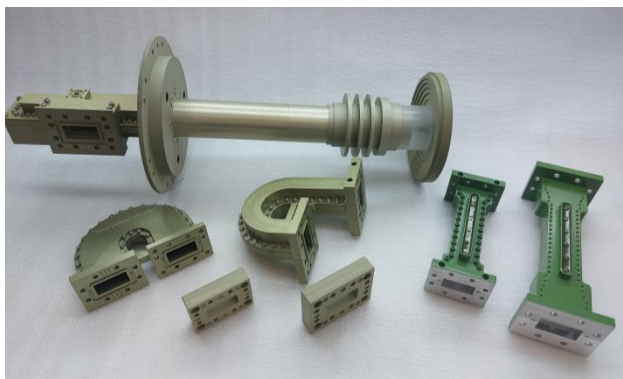
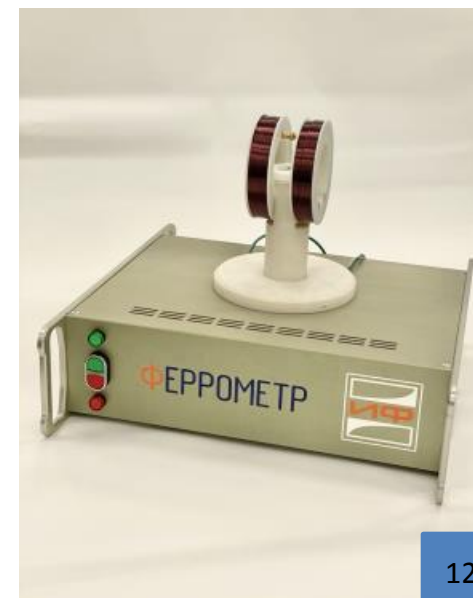
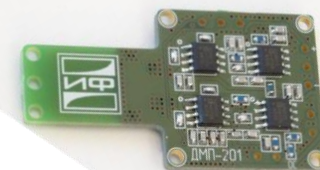
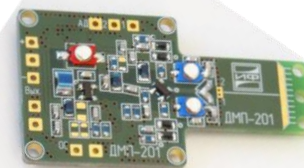
Лаборатория научного приборостроения Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН



- **Лаборатория НП** создана в декабре 2018 года.
- Основу созданной лаборатории составили сотрудники лаборатории **Электродинамики и СВЧ-электроники** ИФ СО РАН (руководитель – д.т.н., профессор, заслуженный изобретатель РФ **Беляев Борис Афанасьевич**).
- В лаборатории 12 научных сотрудников, 6 канд. наук.
- Средний возраст сотрудников в 2024 году – 35 лет.
- **В 2024 году создана еще одна молодежная лаборатория!**

Направления исследований:

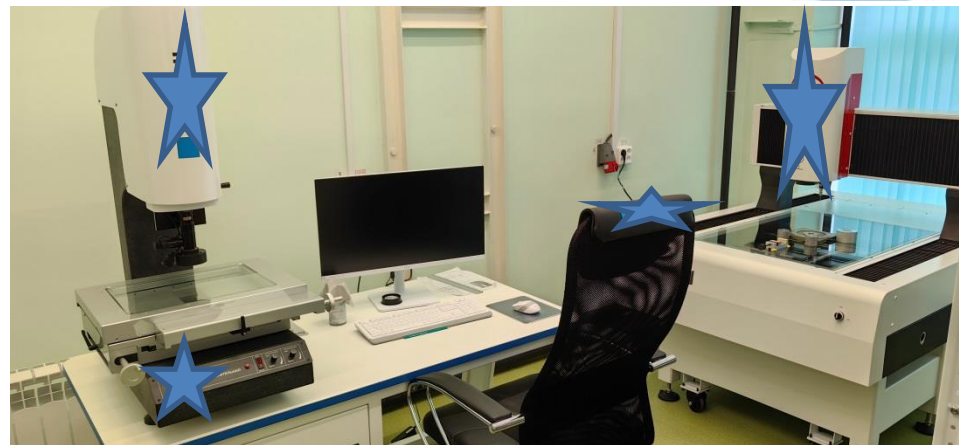
- Разработка и опытное производство миниатюрных высокоизбирательных частотно-селективных устройств, фазовращателей, антенн и других СВЧ-приборов.
- Разработка и опытное производство высокочувствительных широкополосных магнитометров на основе микрополосковых резонаторов с магнитными пленками.
- Разработка новых принципов и методов измерения магнитных характеристик тонких магнитных пленок.
- Разработка и опытное производство современных приборов для проведения локальных и интегральных измерений магнитных характеристик тонких пленок.
- Проектирование, разработка и создание различных средств автоматизации физического эксперимента.



Лаборатория научного приборостроения Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН



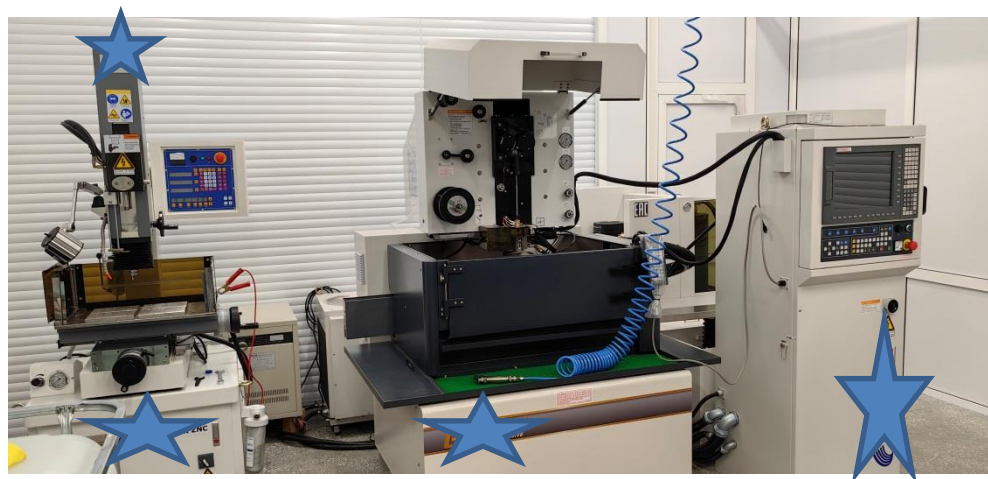
Сотрудники лаборатории НП ИФ СО РАН



Измерительное и производственное оборудование:
измерительные машины, фрезерные и токарные
обрабатывающие центры



Лаборатория научного приборостроения Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН

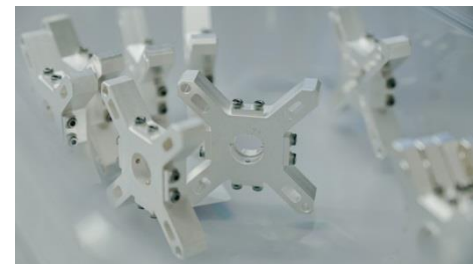
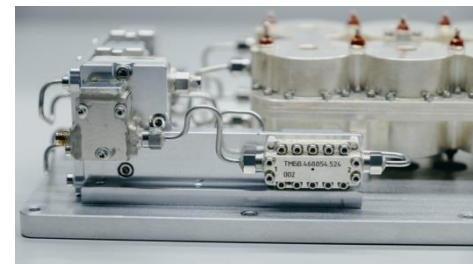


Электроэрозионные станки, высокоточные фрезерные обрабатывающие центры.

Радиотехническое измерительное и испытательное оборудование, камеры тепла-холода, вакуумное оборудование.

Организация чистых помещений для сборки элементов космической техники в ИФ СО РАН

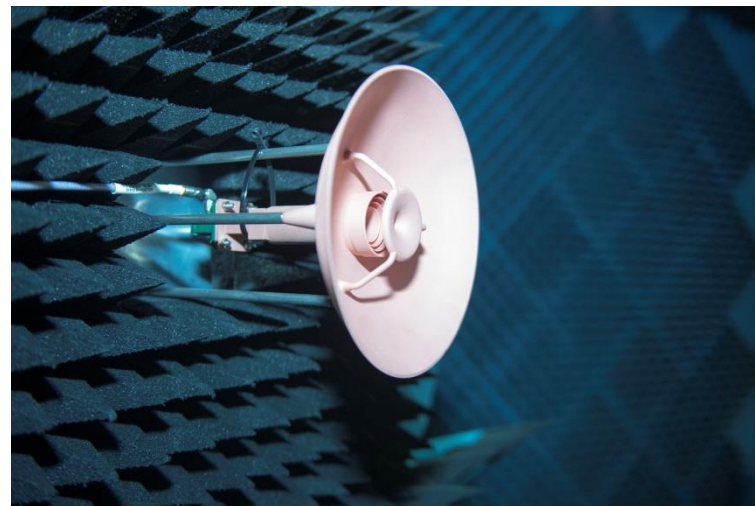
Безэховая камера со сканером ближнего электромагнитного поля, чистые помещения (ISO8) для хранения, сборки и регулировки СВЧ-изделий



Что в будущем? Снижение массы и габаритов изделий!



3D-печать металлом, в том числе
прецизионными сплавами





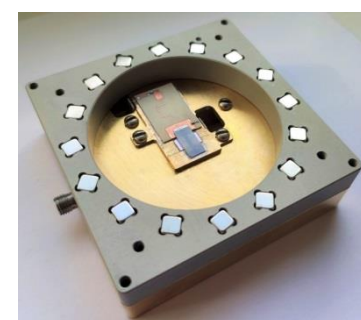
Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения
Российской академии наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Спасибо за внимание!

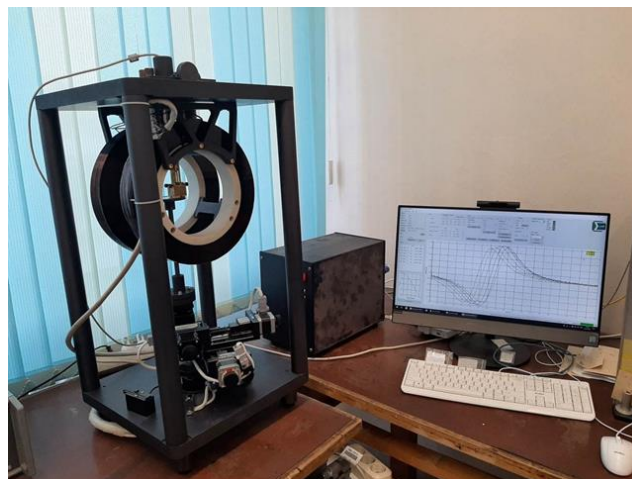
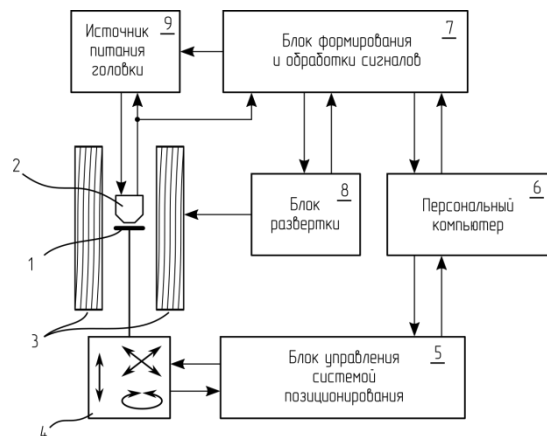


Докладчик: к.ф.-м.н., зав. лаб.
Научного приборостроения
ИФ СО РАН,
Боев Никита Михайлович

Новосибирск, 25.09.2024



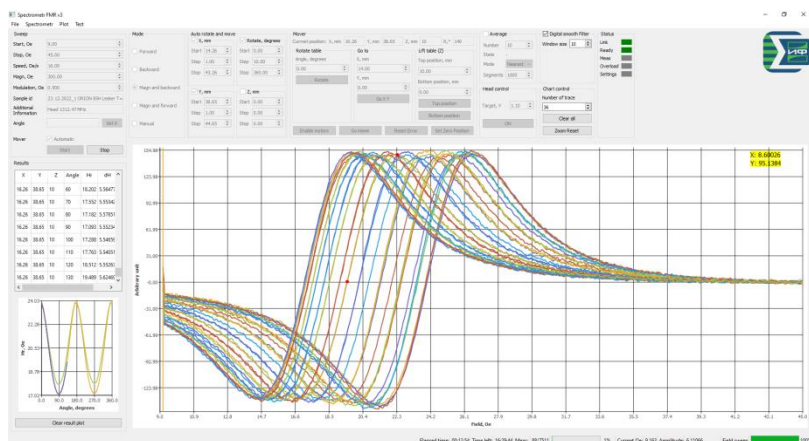
Автоматизированный сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса



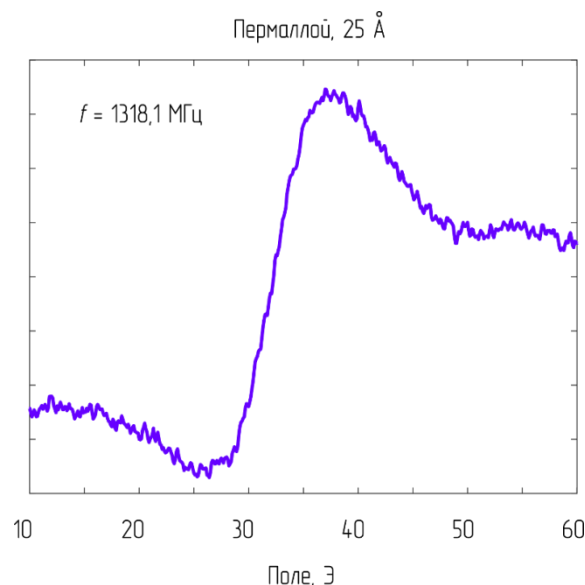
Блок-схема сканирующего
спектрометра ферромагнитного
резонанса

Фотография сканирующего спектрометра
ферромагнитного резонанса
в процессе проведения измерений

Фотография измерительной системы
сканирующего спектрометра
ферромагнитного резонанса

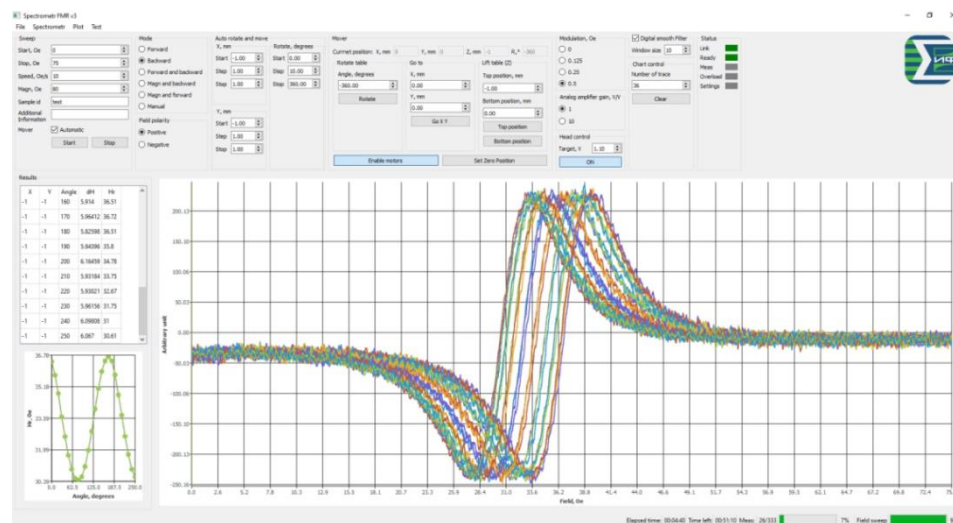


Программное обеспечение
сканирующего спектрометра ферромагнитного
резонанса

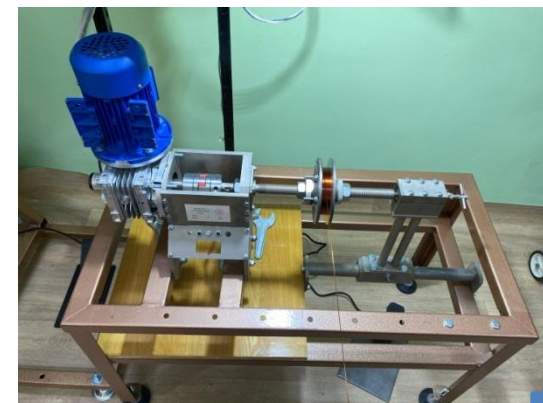


Результат измерения
спектра ферромагнитного
резонанса для
тонкопленочного образца
пермаллоя толщиной
всего 25 Å, при числе
накоплений – 100

Автоматизированный сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса

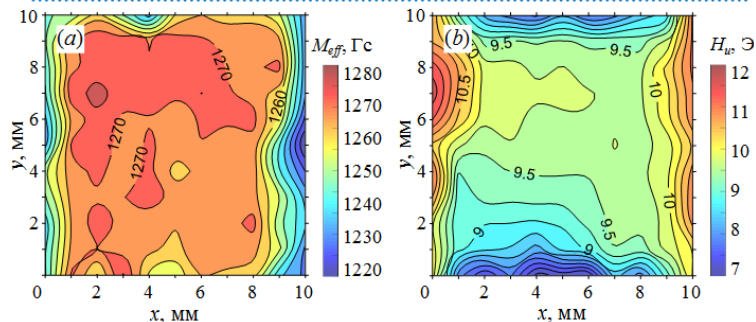


Фотографии измерительной системы,
блока управления и обработки сигналов,
станка для намотки колец Гельмгольца

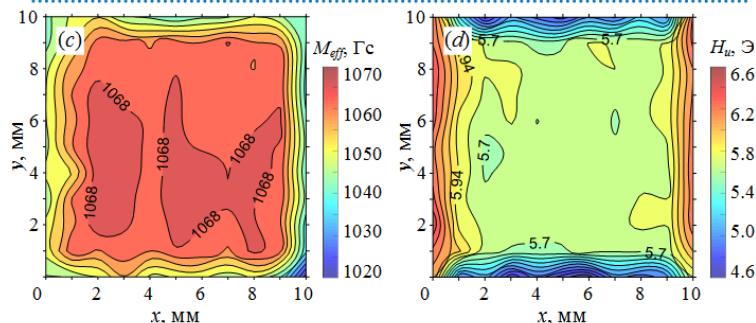


Влияние магнитных неоднородностей на уровень магнитных шумов пленки

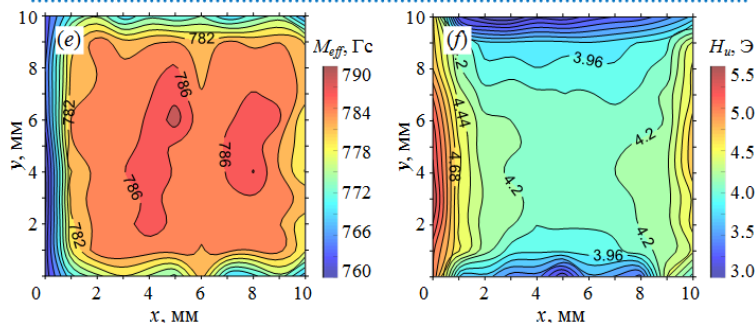
Образец $\text{Ni}_{60.2}\text{Fe}_{39.8}$



Образец $\text{Ni}_{75.1}\text{Fe}_{24.9}$



Образец $\text{Ni}_{86.6}\text{Fe}_{13.4}$



Оценка спектральной плотности магнитных шумов ТМП, обусловленных амплитудной δH_u^2 и угловой $\delta \phi_u^2$ дисперсией:

$$\langle H_{film}^2 \rangle^{(\delta)} = \frac{1}{f} \frac{k_b T}{(2\pi)^2 V} \frac{\delta H_u + 2 H_u \delta \phi_u^2}{M_s}$$

Магнитные параметры ТМП различных составов:

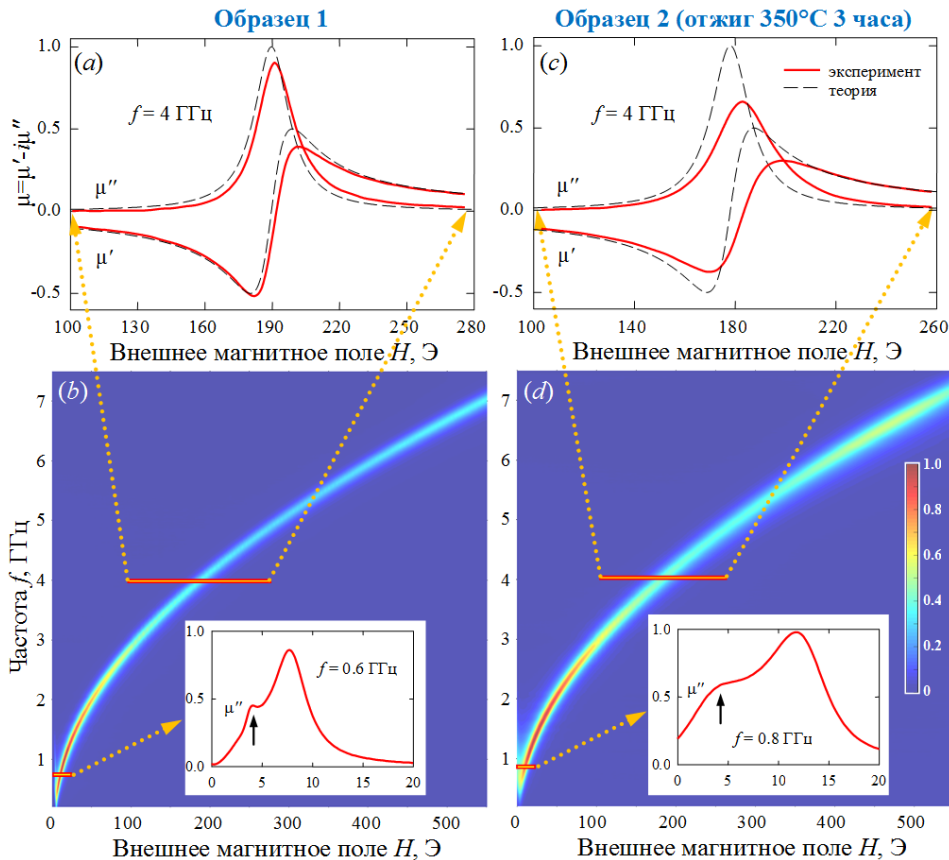
Состав	Среднее от измеряемой величины Среднеквадратичное отклонение измеренного параметра			Шум на частоте $f=1$ Гц ($\mu\text{Тл}/\sqrt{\text{Гц}}$)
	M_{eff} (Гс)	H_u (Э)	ϕ_u (град)	
$\text{Ni}_{60.2}\text{Fe}_{39.8}$	1269.8	9.59	86.7	24.8
	2.7	0.23	0.71	
$\text{Ni}_{71.1}\text{Fe}_{28.9}$	1127.6	7.84	88.63	15.7
	1.6	0.09	0.41	
$\text{Ni}_{75.1}\text{Fe}_{24.9}$	1068.1	5.77	88.71	11.9
	1.9	0.04	0.50	
$\text{Ni}_{81.5}\text{Fe}_{18.5}$	929.3	4.21	89.36	12.6
	1.0	0.04	0.64	
$\text{Ni}_{86.6}\text{Fe}_{13.4}$	785.6	4.14	90.0	18.3
	1.1	0.08	0.62	

Широкополосный спектрометр ферромагнитного резонанса (VNA-FMR)

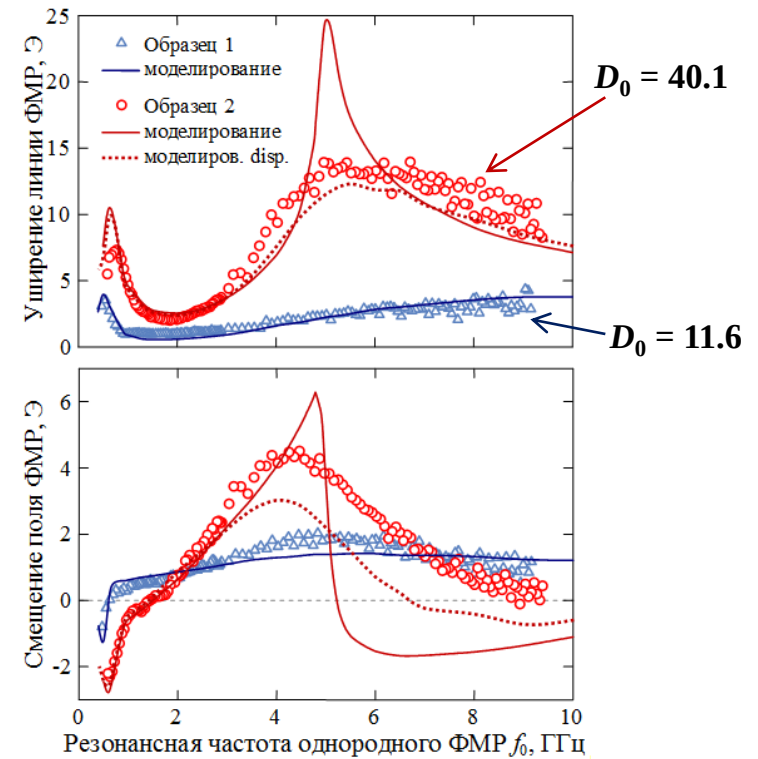


Эффект уширения и смещения линии ФМР (эксперимент + моделирование)

Магнитная проницаемость экспериментальных образцов (широкополосный спектрометр)



Частотные зависимости уширения линии ФМР и смещения резонансного поля



Датчики и векторные магнитометры слабых квазистационарных и высокочастотных магнитных полей



Разработанные и
изготовленные в
ИФ СО РАН
датчики и
магнитометры

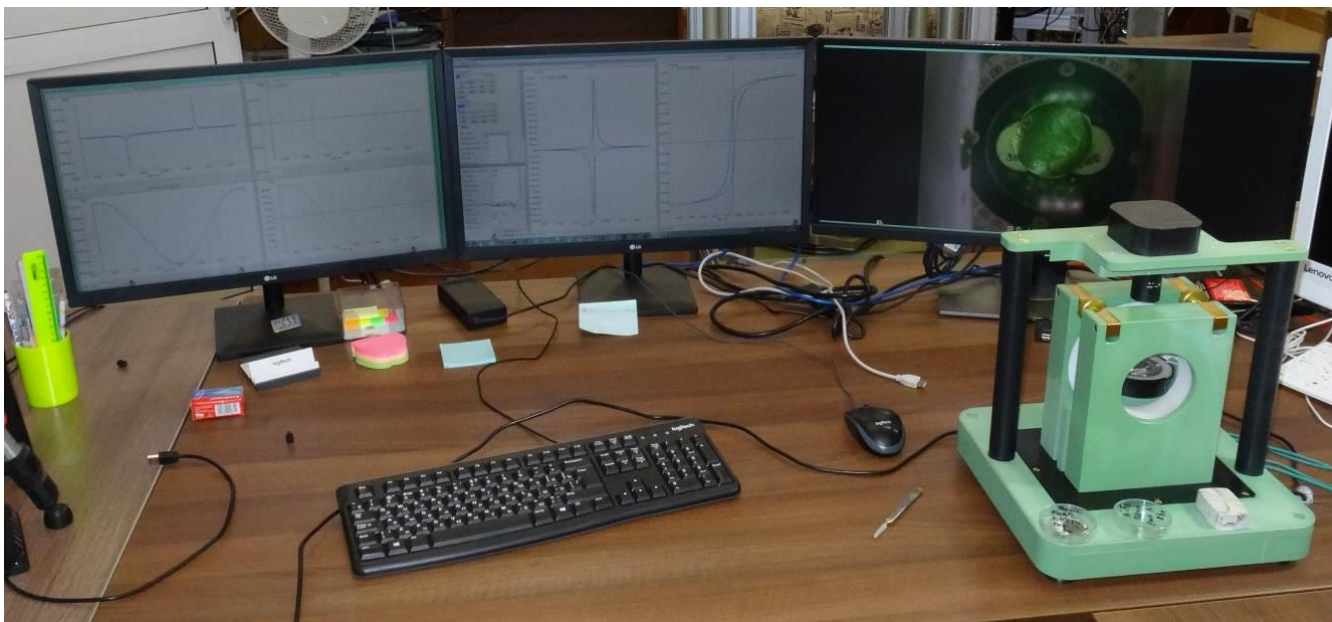


Изготовленные
на АО НПП
«РосНИИД»
Датчики

Феррометр (петлескоп) для тонких магнитных пленок

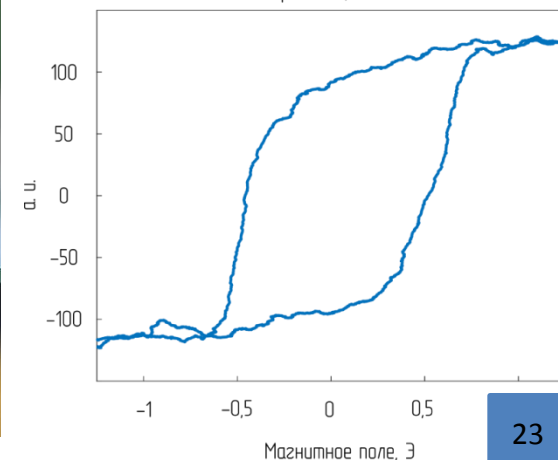
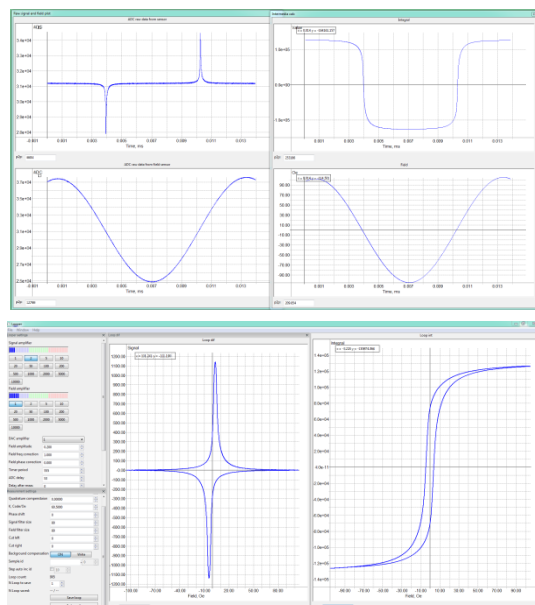


Фотография
рабочего места
оператора
устройства для
измерения
параметров петель
гистерезиса тонких
магнитных пленок –
феррометра



Пример измерения петли
гистерезиса
тонкопленочного образца
пермаллоя толщиной 30 Å
без накопления сигнала

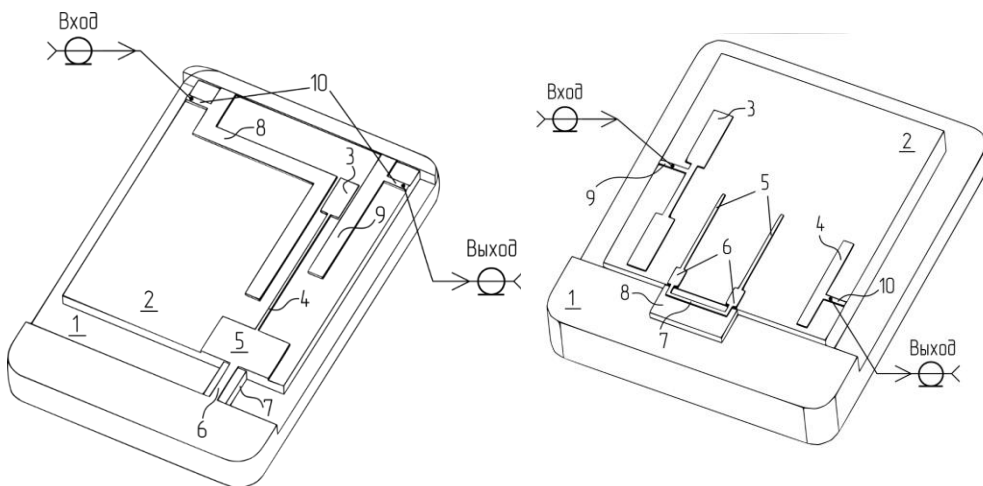
Пермаллой, 30 Å



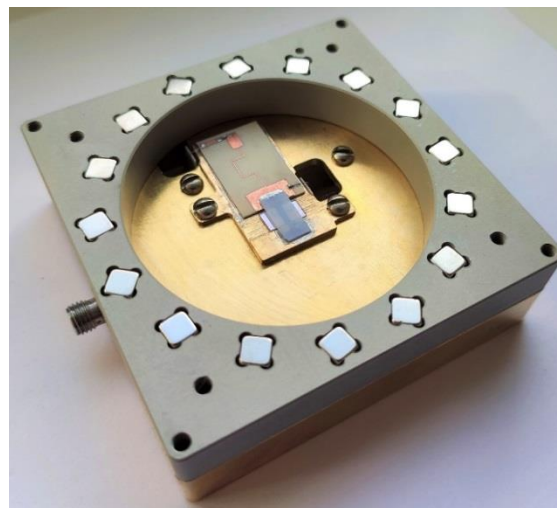
Теоретические и экспериментальные исследования микрополосковых структур, содержащих тонкие магнитные пленки



Фотографии установки для проведения исследований нелинейных эффектов в тонких магнитных пленках

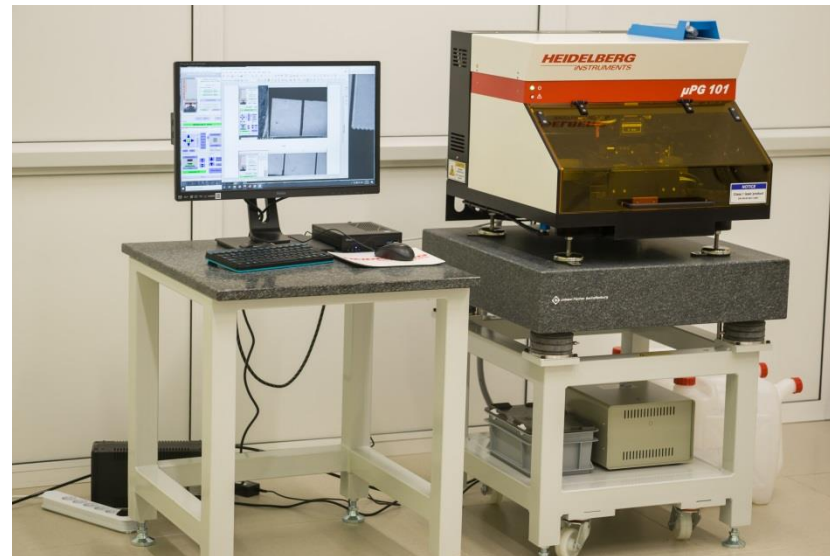
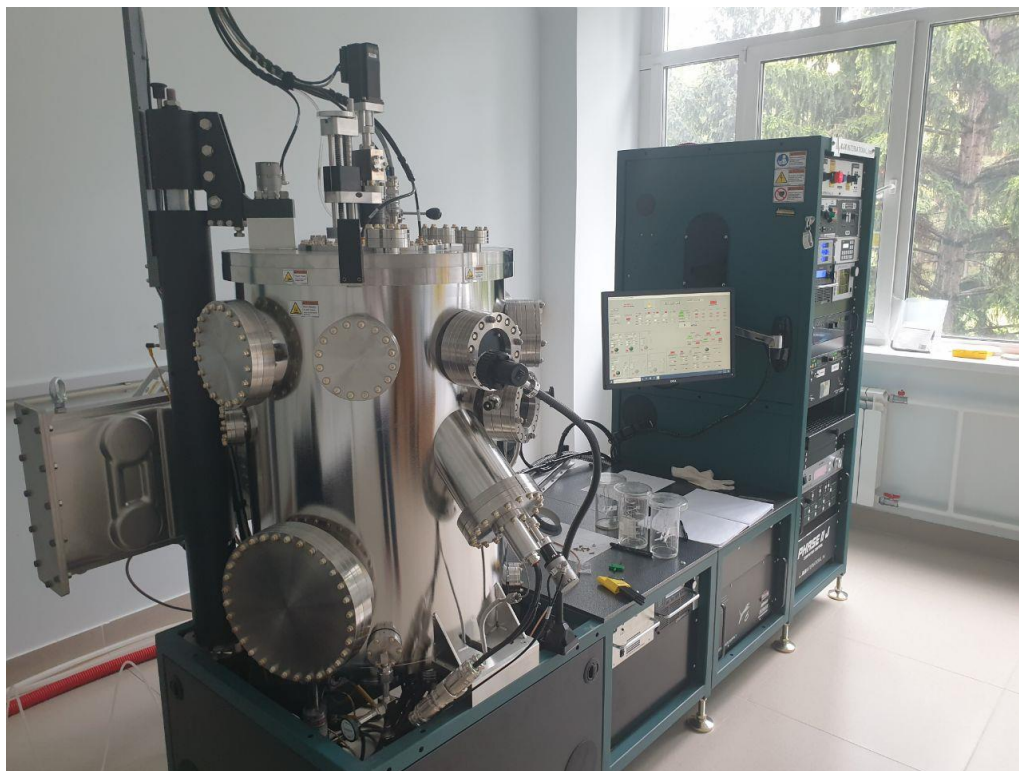


Разработанные конструкции умножителей на ТМП



Фотография макета удвоителя частоты на тонкой магнитной пленке

Оборудование для напыления тонких магнитных пленок и формирования структуры датчиков



Лазерная литография

Установка вакуумного напыления



СВЧ-фильтры. Теория матриц связи



Матричное описание схемы СВЧ фильтра. Матрица связи $N \times N$

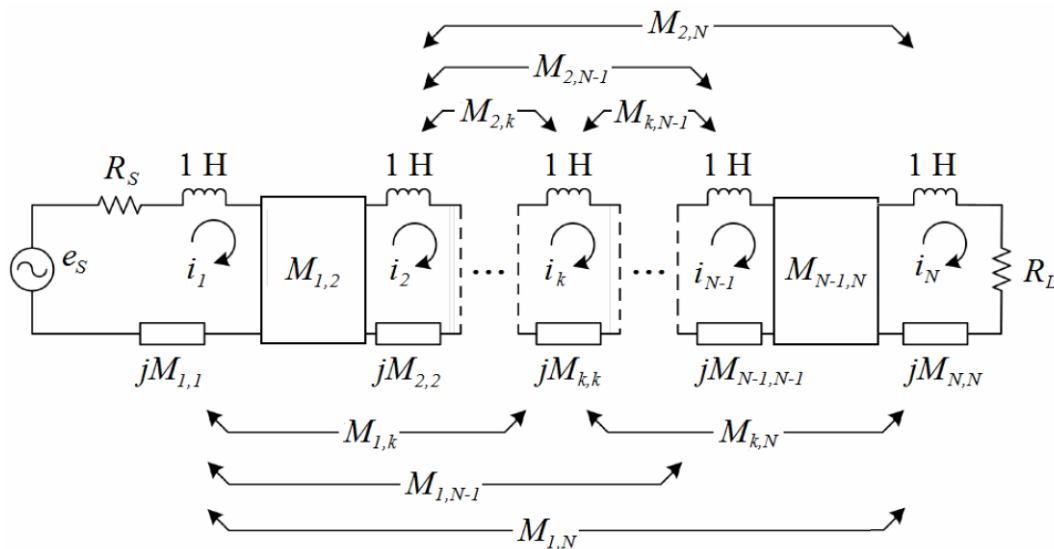


Схема низкочастотного фильтра-прототипа N -го порядка

R_S и R_L — это соответственно сопротивление источника и нагрузки.

$M_{i,k}$ — связь между резонаторами (может осуществляться как посредством магнитного, так и посредством электрического поля)

Параметр $s = j\omega$.

С учетом потерь: $s = j\omega + \omega_0 / (\Delta\omega \cdot Q)$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_s \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_N \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & R_L \end{bmatrix}, s\mathbf{U} = \begin{bmatrix} s & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} e_s \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S + j \cdot \omega + M_{1,1} & jM_{1,2} & \dots & jM_{1,N-1} & jM_{1,N} \\ jM_{2,1} & j \cdot \omega + M_{2,2} & \dots & jM_{2,N-1} & jM_{2,N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ jM_{N-1,1} & jM_{N-1,2} & \dots & j \cdot \omega + M_{N-1,N-1} & jM_{N-1,N} \\ jM_{N,1} & jM_{N,2} & \dots & jM_{N,N-1} & R_L + j \cdot \omega + M_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \dots \\ i_{N-1} \\ i_N \end{bmatrix}$$

Матричная запись уравнений Кирхгофа для представленной схемы СВЧ фильтра

$$\mathbf{E} = [\mathbf{R} + s\mathbf{U} + j\mathbf{M}]\mathbf{I} = \mathbf{A}\mathbf{I}$$

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{E}$$

$$S_{11}(\omega) = 1 - 2R_S \cdot \mathbf{A}_{1,1}^{-1}$$

$$S_{21}(\omega) = 2\sqrt{R_S R_L} \cdot \mathbf{A}_{N,1}^{-1}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & \dots & M_{1,N} \\ M_{1,2} & M_{2,2} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & M_{N-1,N} \\ M_{1,N} & \dots & M_{N-1,N} & M_{N,N} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{M}$ - матрица связи

СВЧ-фильтры. Теория матриц связи



1. Синтез полиномов
для S_{21} и S_{11}

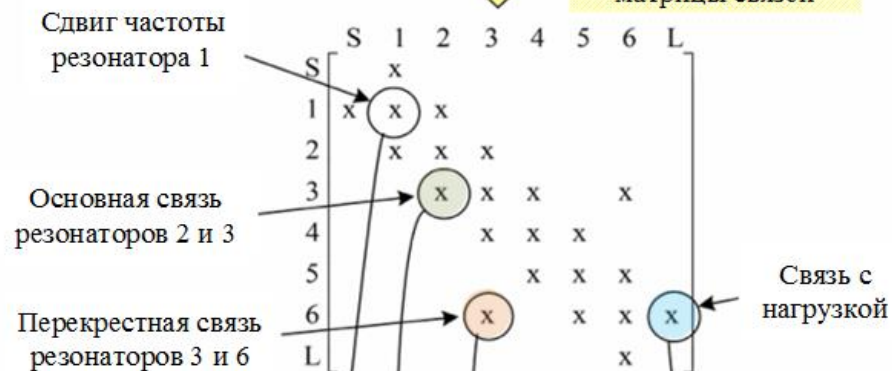
$$S_{21}(s) = \frac{P(s)/\varepsilon}{E(s)}$$

$$S_{11}(s) = \frac{F(s)/\varepsilon_R}{E(s)}$$

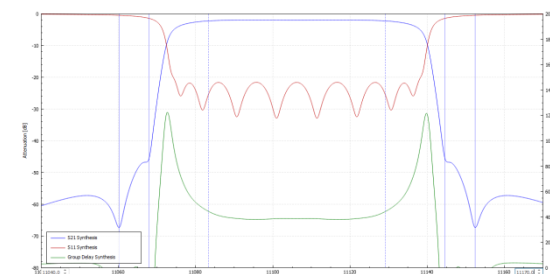
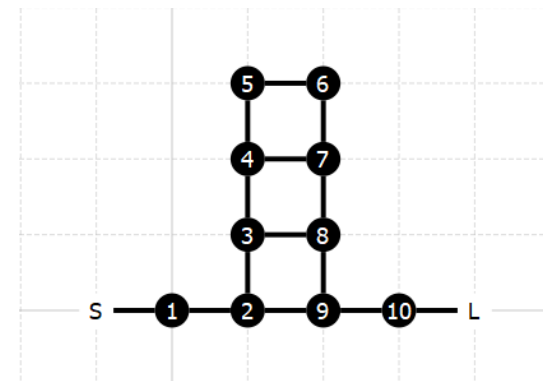
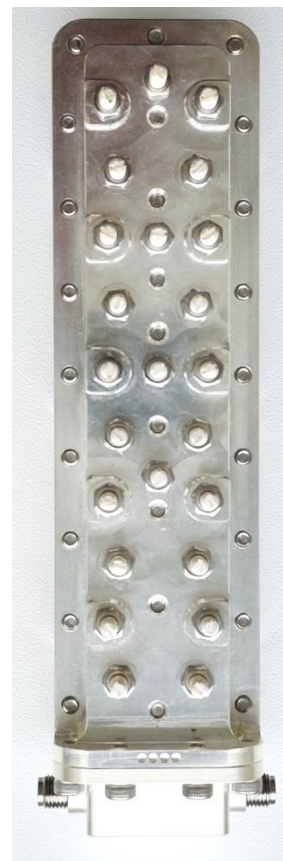
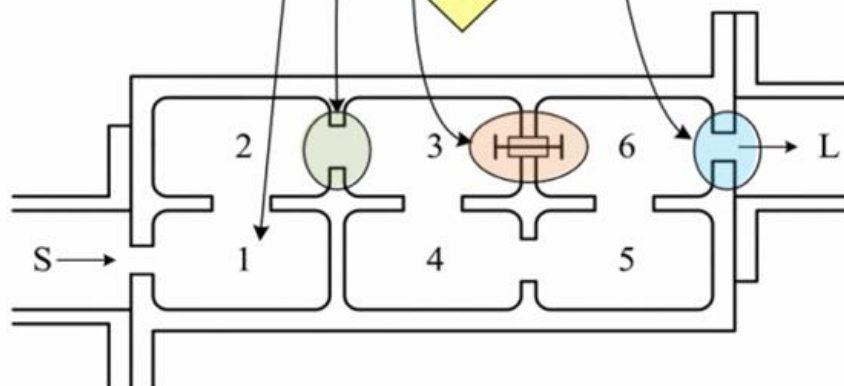
2. Синтез
канонической
матрицы
связей

	S	1	2	3	4	5	6	L
S		x						
1	x		x					
2		x		x		x		
3			x		x			
4				x		x		
5			x		x		x	
6					x	x		x
L							x	

3. Переконфигурация
матрицы связей



4. Реализация



Matrix

	S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	L
S	0.0	0.9822966815	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.9822966815	0.0	0.8077278489	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.8077278489	0.0	0.5794347841	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.01576185748	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.5794347841	0.0	0.5378106224	0.0	0.0	0.0	-0.05828618641	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.5378106224	0.0	0.4963842684	0.0	-0.1311476426	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4963842684	0.0	0.6916650457	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6916650457	0.0	0.4963842684	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1311476426	0.0	0.4963842684	0.0	0.5378106224	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	-0.05828618641	0.0	0.0	0.0	0.5378106224	0.0	0.5794347841	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.01576185748	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5794347841	0.0	0.8077278489	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8077278489	0.0	0.9822966815
L	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9822966815	0.0