07

Экспериментальное исследование пассивных электронных компонентов криогенной электроники

© Д.И. Вольхин, И.Л. Новиков, А.Г. Вострецов

Новосибирский государственный технический университет,
630073 Новосибирск, Россия
e-mail: d.i.volkhin@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.
В окончательной редакции 5 мая 2025 г.
Принято к публикации 5 мая 2025 г.

Представлены результаты измерений параметров коммерчески доступных пассивных электронных компонентов поверхностного монтажа: конденсаторов и индуктивностей в типоразмерах 0402 и 0201 при температурах 300, 77 и 4 K. Проведены измерения частотных зависимостей номинальных значений и параметров матрицы рассеяния. Значения электрической емкости конденсаторов поверхностного монтажа типа NPO, изготовленных по тонкопленочной технологии, при температурах 77 и 4 K показали отклонения менее 4 % от значения, измеренного при 300 K. Матрицы рассеяния данных типов конденсаторов при 77 и 4 K не имели существенных отклонений от значений, предоставленных производителем. Показано отклонение значения емкости конденсатора 120 pF поверхностного монтажа типа X7R более 30 %. Результаты измерений индуктивностей поверхностного монтажа, изготовленных по тонкопленочной технологии, при температурах 77 и 4 K показали изменение индуктивности на величину порядка 10 % при 77 K. Использованный авторами метод компенсации влияния измерительного тракта на величину индуктивности и параметры матрицы рассеяния при охлаждении до 4 K не позволил достоверно определить параметры индуктивностей при данной температуре, что требует проведения дальнейших исследований с использованием методов прецизионной калибровки.

Ключевые слова: конденсаторы, индуктивности, пассивные электронные компоненты, криогенная электроника, матрица рассеяния конденсатора, матрица рассеяния индуктивности.

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61235.104-25

Введение

Исследования, представленные в настоящей работе, относятся к области криогенной электроники, используемой в системах считывания сверхпроводниковых квантовых устройств таких, как сверхпроводниковые интерференционные датчики (сквиды), болометры и однофотонные детекторы [1–5]. Квантовые компьютерные технологии на основе микроволновых сверхпроводниковых структур также нуждаются в считывающей электронике, работающей при низких температурах порядка 4 K. Состав электронных криогенных устройств для контроля, управления и регистрации сигналов при низких температурах включает активные полупроводниковые электронные компоненты, такие, как транзисторы, а также пассивные компоненты: резисторы, конденсаторы и индуктивности, необходимые как для обеспечения режимов работы полупроводниковых активных компонентов, так и для создания различных пассивных электронных схем — аттенюаторов, фильтров и т. д. [6–8]. Применение коммерчески доступных электронных компонентов при температурах ниже 213 K не регламентируется производителями, поэтому является областью исследований [9–12].

В настоящей работе представлены результаты измерений параметров коммерчески доступных пассивных компонентов (конденсаторов и индуктивностей поверхностного монтажа) при температурах 300, 77 и 4 K. Данные компоненты предполагается использовать при создании различных электронных устройств, применяемых в современных криогенных измерительных системах. Измерения характеристик резисторов при криогенных температурах выполнены авторами ранее и представлены в работе [13].

В настоящей работе в качестве пассивных компонентов были выбраны конденсаторы и индуктивности поверхностного монтажа в типоразмерах 0402 ($1.0 \times 0.5 \times 0.5$ mm (Д × Ш × В)) и 0201 ($0.6 \times 0.3 \times 0.3$ mm (Д × Ш × В)). Измерены частотные зависимости номинальных значений и параметры матрицы рассеяния, так как предполагается применение компонентов в составе как низкочастотных, так и сверхвысокочастотных (СВЧ) криогенных электронных устройств.

1. Пассивные компоненты, оборудование и схема измерений

Для исследования выбраны конденсаторы поверхностного монтажа производителей: Kemet, Murata и Kyocera AVX, представленные в табл. 1, с указани-

Таблица 1. Перечень исследуемых конденсаторов и индуктивностей поверхностного монтажа

Наименование элемента	Производитель/серия	Номиналы, pF/nH	Сокращенное обозначение
Конденсаторы	Kemet/ CBR04	1; 10; 100	CBR [15]
	Kyocera AVX/ Accu-P	1; 10	AP [14]
	Murata/ GJM0335	1; 10; 30	GJM [16]
	Murata/ GRM0335	1; 10; 33; 120	GRM [17]
Индуктивности	Murata/ LQP03TN	10	TN [18]
	Murata/ LQP03HQ	10	HQ [19]

ем сокращенного обозначения серии, используемого в настоящей работе. Размер корпуса конденсаторов Kemet — 0402, AVX и Murata — 0201. Конденсаторы Kemet и Murata имели один тип диэлектрика NPO/COG, за исключением конденсатора Murata GRM номиналом 120 pF с диэлектриком X7R. Конденсаторы Kyocera AVX изготовлены по специальной тонкопленочной технологии с использованием чистых металлов в качестве электродов и тонкого диэлектрика SiO_2/SiNO, нанесенного плазменным осаждением. Такая технология обеспечивает малые потери, высокие диэлектрическую проницаемость и сопротивление диэлектрика в широком диапазоне высоких и сверхвысоких частот, а также малый температурный коэффициент емкости TCC, сравнимый с TCC конденсаторов, изготовленных на основе термостабилизированной керамики NPO [14].

В качестве индуктивностей выбраны компоненты поверхностного монтажа производителя Murata в типоразмере 0201, изготовленные по тонкопленочной технологии методами фотолитографии. Такие компоненты широко используются в согласующих и резонансных схемах СВЧ устройств, которые требуют миниатюризации размеров, минимального отклонения индуктивности и точной градуировки значений индуктивности. Для исследований выбраны индуктивности двух серий — LQP03TN и LQP03HQ, представленные в табл. 1. Серия LQP03HQ отличается повышенным значением добротности, меньшим значением сопротивления по постоянному току и более высокой частотой собственного резонанса.

Выбор элементов обоснован их применением в составе широкополосных малошумящих криогенных СВЧ усилителей [8,20,21]. В согласующих схемах уход номинала элемента от значения, используемого при проектировании, влияет на результирующие характеристики усилителя. Значения элементов, с одной стороны, близки к максимальным, применяемым в цепях согласования диапазона СВЧ до 12 GHz, с другой стороны — близки к минимально возможным для измерения в условиях современных рефрижераторов.

Для исследуемых пассивных компонентов измерялись частотные характеристики и матрицы рассеяния при 300, 77, 4 K.

Матрица рассеяния (S-матрица) содержит комплексные коэффициенты отражения и передачи и характеризует высокочастотные свойства измеряемых устройств. Применительно к пассивным элементам S-матрица содержит информацию о номинале, резонансах и паразитных составляющих, таких как ESR, ESL (для конденсаторов), Cp (для индуктивностей).

Для конденсаторов измерялись частотная зависимость электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 kHz до 2 MHz и матрица рассеяния в диапазоне частот от 10 MHz до 10 GHz, для индуктивностей — частотная зависимость индуктивности и добротности в диапазоне частот от 100 kHz до 2 MHz и матрица рассеяния в диапазоне частот от 10 MHz до 10 GHz. Матрицы рассеяния измерялись при последовательном включении элементов в 50-омную линию передачи.

Измерительное оборудование, используемое при проведении исследований характеристик пассивных компонентов, включало в себя:

- прецизионный LCR-метр Tonghui TH-2840B. Производит измерения по постоянному току, а также в полосе частот от 20 Hz до 2 MHz. Метод измерения — 4-проводный метод Кельвина с предварительной калибровкой. Аксессуары: TH26011BS — четырехпроводный кабель с зажимами с изоляцией; TH26009B — четырехпроводный кабель с пинцетом с изоляцией;
- векторный анализатор цепей (ВАЦ) Rhode&Schwarz ZVL-13. Производит измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения в полосе частот от 5 kHz до 13 GHz;
- рефрижератор замкнутого цикла с механическим приводом Entropy He7.

В процессе измерения использовался держатель образца (рис. 1), состоящий из латунного корпуса; печатной платы Rogers 4350B с изготовленными на ней подводящими микрополосковыми копланарными линиями передачи, с волновым сопротивлением 50 Ω, между которыми припаивался образец; разъемов SubMiniature version A (SMA) для присоединения коаксиальных кабелей. Для минимизации потерь при распространении СВЧ сигнала в держателе образца использовалась пайка конденсаторов непосредственно к копланарным

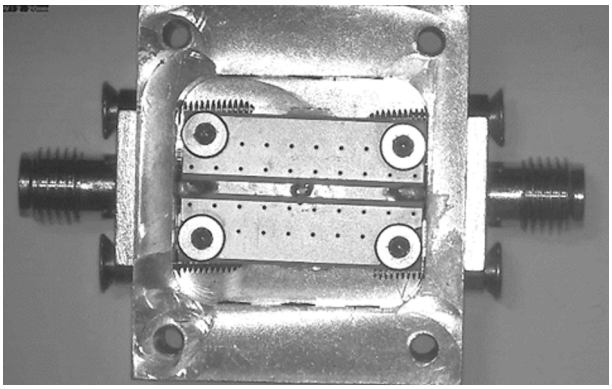

Рис. 1. Фотография держателя образца.

линиям. Параметры печатной платы и копланарной линии: относительная диэлектрическая проницаемость 3.66, толщина платы 0.508 mm, толщина медной фольги 0.018 mm, удельное сопротивление проводников относительно удельного сопротивления золота 0.72, тангенс угла диэлектрических потерь платы 0.0022, ширина копланарной линии, 1 mm, длина копланарной линии 7.2 mm, ширина зазора между линией и общим полигоном 0.48 mm.

Дополнительные аксессуары:

• Коаксиальные кабели, длиной 30 cm. Использовались в измерениях характеристик при комнатной температуре и при 77 K для погружения держателя образца в жидкий азот.

• Коаксиальные кабели, длиной 150 cm. Использовались в измерениях характеристик при 4 K для соединения измерительных приборов с 300 K фланцем рефрижератора Entropy He7.

• Сосуд с жидким азотом. Использовался для обеспечения температуры 77 K при измерениях характеристик пассивных электронных компонентов.

Схема измерения пассивных компонентов при температурах 300, 77, 4 K представлена на рис 2.

Перед измерением выполнялась калибровка измерительного тракта: 1) при измерениях частотной зависимости с использованием LCR-метра Tonghui TH-2840B калибровка открыто-закорочено (Open/Short) на плоскость держателя образца; 2) при измерениях матрицы рассеяния с использованием векторного анализатора цепей ZVL-13 калибровка типа TOSM (на проход-открыто-закорочено-согласованная нагрузка) с помощью встроенных средств калибровки и набора калибров. При измерениях в рефрижераторе калибровка выполнялась следующим образом: 1) при измерениях частотной зависимости с использованием LCR-метра Tonghui TH-2840B калибровка Open/Short на разъемы на 300 K фланце рефрижератора; 2) при измерениях матрицы рассеяния с использованием векторного анализатора цепей ZVL-13 калибровка типа TOSM с помощью встроенных средств калибровки и набора калибров при 300 K на плоскость держателя образца, установленного в рефрижератор.

2. Полученные результаты

2.1. Частотная зависимость электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 kHz до 2 MHz

Номинальные и измеренные значения емкости при температурах 300, 77 и 4 K представлены в табл. 2. В качестве значений емкости конденсаторов и тангенса угла диэлектрических потерь использовались средние значения этих параметров, полученные в интервале частот 50–250 kHz из их частотной зависимости при температурах 300, 77 и 4 K. Отклонение значений емкости рассчитаны для результатов измерений при 77 и 4 K относительно значения емкости при 300 K согласно следующему выражению:

$$\Delta = \frac{|\overline{C_{300}} - \overline{C_T}|}{\overline{C_{300}}} \cdot 100\,\%,$$

где $\overline{C_T}$ — среднее значение емкости при температуре T, $\overline{C_{300}}$ — среднее значение емкости при 300 K.

Эквивалентное последовательное сопротивление ESR-конденсаторов на частоте 100 kHz, показывающее влияние паразитных составляющих, рассчитывалось по следующему уравнению:

$$ESR = \frac{\overline{\mathrm{tg}\,\delta}}{\omega\overline{C_T}},$$

где $\overline{\mathrm{tg}\,\delta}$ — среднее значение тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора, ω — угловая частота.

Номинальные и измеренные средние значения емкости, тангенса угла диэлектрических потерь и эквивалентного последовательного сопротивления конденсаторов на частоте 100 kHz при температурах 300, 77 и 4 K представлены в табл. 3. Отклонение значения емкости при 4 K и эквивалентного последовательного сопротивления конденсаторов рассчитаны относительно значения емкости и ESR, измеренных в рефрижераторе при 300 K. Значение емкости и ESR, измеренных в рефрижераторе при 300 K, показано в табл. 3 через косую черту.

Согласно полученным результатам измерения характеристик конденсаторов можно отметить, что величина их емкости существенно не изменилась при охлаждении до 4 K. Исключение составляет образец GRM 120 pF компании Murata, который не имеет в своем составе термостабилизированной керамической подложки. Этот образец показал существенное уменьшение емкости с отклонением более 98 % от значения, измеренного при комнатной температуре. Следует отметить, что конденсаторы компании AVX, изготовленные с применением тонкопленочной технологии, показали сохранение

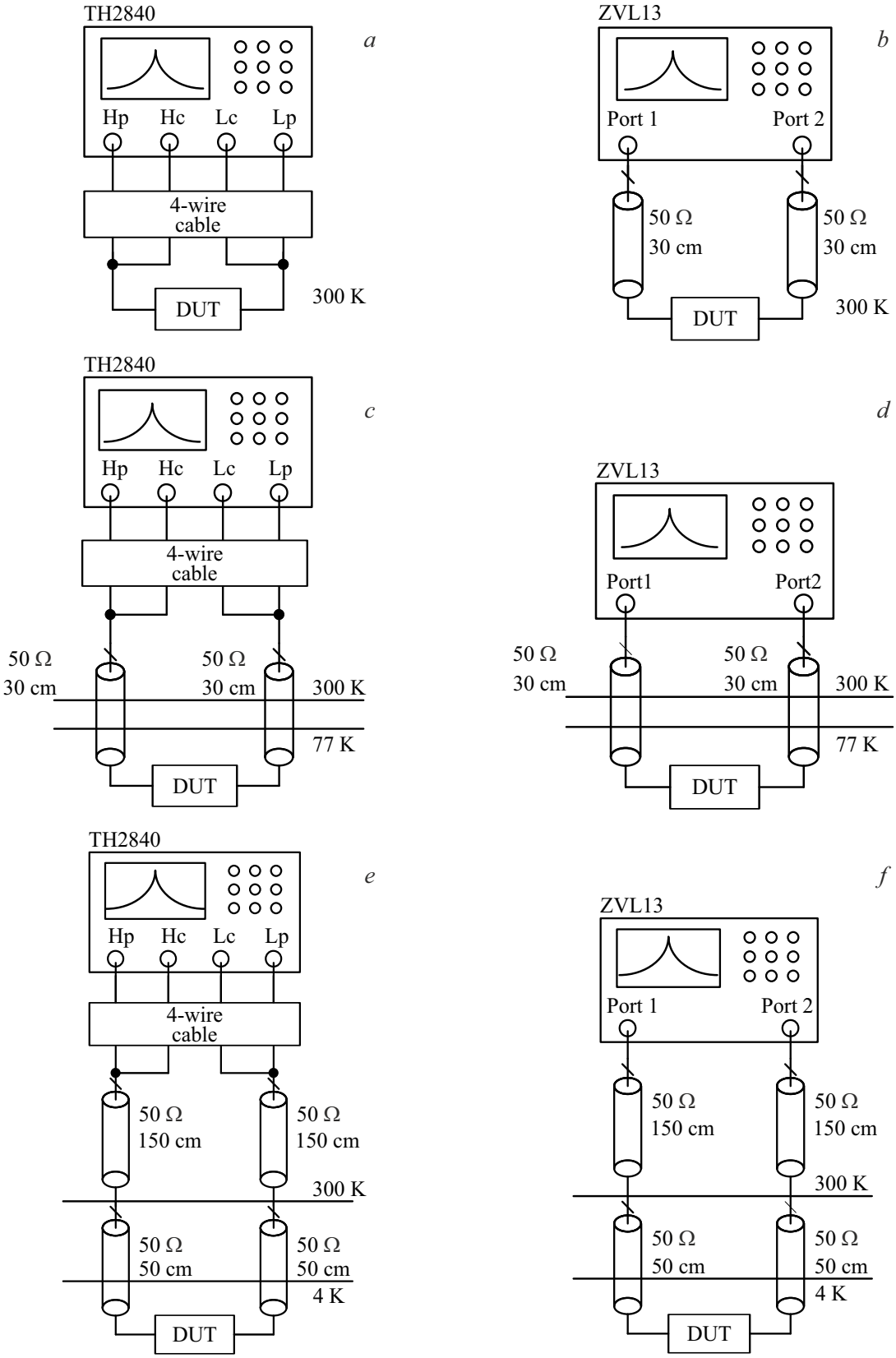

Рис. 2. Схемы измерения: частотной зависимости (*a*, *c*, *e*); матрицы рассеяния (*b*, *d*, *f*) при температурах 300, 77 и 4 K. DUT (Device under test) — тестируемое устройство.

Таблица 2. Средние значения емкости конденсаторов при различных температурах

Обозначение конденсатора	Номинал, pF	$\overline{C}$, 300 K	$\overline{C}$, pF 77 K	Δ_{77K}, %	$\overline{C}$, pF 4 K	Δ_{4K}, %
CBR	1	1.028	1.055	2.65	–	–
	10	9.94/9.01	9.74	2.05	9.19	0.61
	100	96.08	96.64	0.58	–	–
ACCU	1	1.021	1.028	0.7	–	–
	10	10.09/9.496	10.04	0.55	9.44	3.3
GJM	1	0.99	1.013	2.4	–	–
	10	10.14/9.31	10.17	0.28	9.44	1.45
	30	29.84	29.87	0.11	–	–
GRM	1	1.01	1.04	2.75	–	–
	10	9.98/8.8	10.04	0.6	9.06	3
	33	34.08/29	34.29	0.61	30.12	3.9
	120	115.57/97.12	29.56	74.4	1.59	98.4

Таблица 3. Средние значения тангенса угла диэлектрических потерь и ESR конденсаторов на частоте 100 kHz при различных температурах

Обозначение конденсатора	Номинал, pF	$\overline{\mathrm{tg}\,\delta}$, 10^{-3} 300 K	$\overline{\mathrm{tg}\,\delta}$, 10^{-3} 77 K	$\overline{\mathrm{tg}\,\delta}$, 10^{-3} 4 K	ESR, Ω 300 K	ESR, Ω 77 K	ESR, Ω 4 K
CBR	1	107.14	53.15	–	166023	80237	–
	10	56.12	49.82	66.91	8988/11299	8147	11591
	100	2.62	2.02	–	43	33	–
ACCU	1	83.53	53.73	–	130280	83219	–
	10	53.12	50.63	63.45	8377/10547	8028	10698
GJM	1	81.31	53.34	–	130928	83879	–
	10	53.69	50.85	63.97	8434/11593	7966	10785
	30	2.15	1.54	–	115	82	–
GRM	1	82.85	55.06	–	130337	84303	–
	10	54.95	51.37	66.06	8768/11010	8147	11605
	33	1.83	1.47	2.8	86/244	68	148
	120	15.56	53.95	19	214/235	2906	18980

величины емкости при криогенных температурах. Это обстоятельство говорит о том, что не только конденсаторы с типом диэлектрика NPO, но и многослойные конденсаторы, изготовленные по тонкопленочной технологии, пригодны для использования при криогенных температурах. Эквивалентное последовательное сопротивление, как параметр, чувствительный к величине тока утечки диэлектрика конденсаторов [11], показал отличие в поведении конденсаторов AVX от конденсаторов типа NPO, приведенных ранее в [11]. В заключение отметим, что величина тангенса угла диэлектрических потерь для всех образцов значительно меняется при изменении номинала конденсатора. Авторам не удалось выяснить причины такого поведения тангенса угла потерь.

2.2. Матрица рассеяния конденсаторов в диапазоне частот до 10 GHz

Были выполнены измерения одного конденсатора каждого номинала при температурах 300, 77, 4 K. Мат-

рица рассеяния измерена с предварительной калибровкой СВЧ коаксиальных кабелей в диапазоне частот от 10 MHz до 10 GHz. Для конденсаторов производителями предоставлены параметры матрицы рассеяния при 300 K, с которыми сравнивались результаты измерений.

Результатом измерения является матрица рассеяния конденсатора, установленного в держатель образца, имеющего модель, показанную на рис. 3. Модель держателя образца была верифицирована по зависимостям S-параметров держателя образца от частоты, измеренных при комнатной температуре с калибровкой типа TOSM с помощью встроенных средств калибровки и набора калибров.

Результаты измерений матрицы рассеяния конденсаторов при температурах 300, 77 и 4 K представлены на рис. 4 в виде зависимостей параметров $S11$ и $S21$ от частоты. Параметры $S22$ и $S12$ имели аналогичный вид.

Для оценки изменений матрицы рассеяния при изменении температуры и частоты рассчитывалась величина $\delta_{C,T}$ среднеквадратического значения относительного отклонения параметра $S21$ при температуре T от значения при температуре 300 K, для набора частот в анализируемом диапазоне:

$$\delta_{C,T} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum\nolimits_{k=1}^{N}\left[\left(\frac{S21_{300,k} - S21_{T,k}}{S21_{300,k}}\right)^2\right]}, \qquad (1)$$

где N — количество точек измерения коэффициента прохождения $S21$ матрицы рассеяния по частоте, $S21_{300,k}$ — коэффициент прохождения матрицы рассеяния в k-й точке по частоте при температуре 300 K, $S21_{T,k}$ — коэффициент прохождения матрицы рассеяния в k-й точке по частоте при температуре T. Верхняя граница анализируемого диапазона частот была ограничена величиной 1 GHz. Выбор верхней границы диапазона частот обусловлен наличием существенного влияния держателя образца на характеристики измеряемой матрицы рассеяния конденсаторов и индуктивностей выше этой частоты.

Предварительно качество измерений оценивалось по величине $\delta_{C,300}$, полученной при температуре 300 K для двух матриц рассеяния: измеренной и представленной производителем. Матрица рассеяния, представленная производителем, была дополнена матрицами подводящих копланарных линий передачи $CPW1$ и $CPW2$ (рис. 3). Количество точек суммирования для расчета данной величины было равно 46. Оно соответствовало

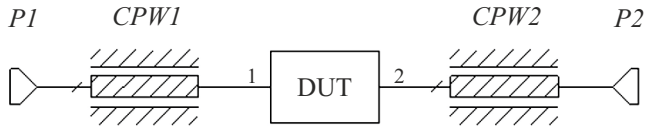

Рис. 3. Модель держателя образца с подводящими копланарными линиями. $P1$, $P2$ — входной и выходной порты, $CPW1$, $CPW2$ — модель копланарных линий держателя образца со стороны входного и выходного порта, DUT — модель тестируемого устройства.

Таблица 4. Величины $\delta_{C,300}$ и $\delta_{C,77}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния, измеренной при 300 и 77 K

Обозначение конденсатора	Номинал, pF	$\delta_{C,300}$	$\delta_{C,77}$
CBR	1	0.04837	0.03271
	10	0.01257	0.01664
	100	0.00762	0.01327
ACCU	1	0.0164	0.01371
	10	0.0117	0.01118
GJM	1	0.01162	0.014
	10	0.01761	0.01487
	30	0.0102	0.01296
GRM	1	0.00843	0.01688
	10	0.01483	0.01616
	33	0.01245	0.01507
	120	0.02425	0.07389

количеству точек в данных, представленных производителями, и охватывало диапазон от 100 MHz до 1 GHz с шагом 20 MHz.

Результаты сравнения представлены в табл. 4.

Из представленных данных можно видеть, что величина отклонения значений параметра $S21$ матрицы рассеяния для большинства конденсаторов, за исключением конденсатора GRM 120 pF, лежит в диапазоне от 0.00762 до 0.04837 без корреляции с величиной измеряемой емкости. Это может указывать на погрешность измерений, связанную с неконтролируемыми отклонениями параметров измерительной установки при ее сборке и разборке.

Изменение параметров $S21$ матрицы рассеяния при 77 K относительно значений, полученных при комнатной температуре, представлено в табл. 4. Величина $\delta_{C,77}$ рассчитана в соответствии с выражением (1) в диапазоне от 100 MHz до 1 GHz с количеством точек 46.

Из представленных результатов $\delta_{C,77}$ можно видеть, что параметры матрицы рассеяния, измеренной при температуре 77 K, относительно значений, измеренных при комнатной температуре, существенно не изменились для большинства конденсаторов в рабочем диапазоне частот до 1 GHz. Величина относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния для конденсаторов слабо увеличилась и находилась в диапазоне от 0.01118 до 0.03271 без корреляции с величиной измеряемой емкости. Это может указывать не только на погрешность измерений, связанную с неконтролируемыми отклонениями параметров измерительной установки при ее сборке и разборке, но также на изменение харак-

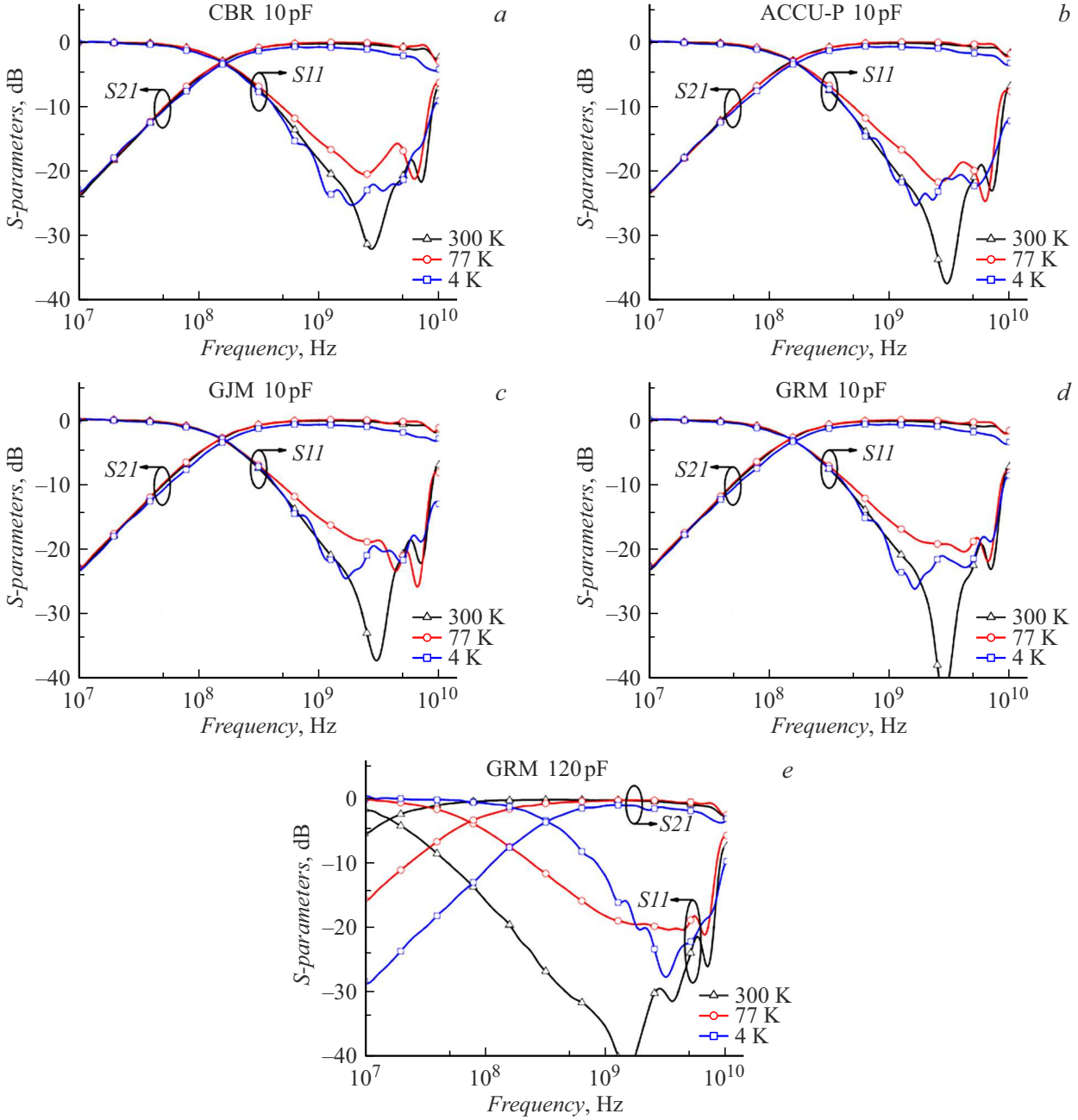

Рис. 4. Параметры $S11$ и $S21$ матрицы рассеяния конденсаторов при температурах 300, 77 и 4 K; *a* — Kemet CBR04 10 pF (C0G); *b* — Kyocera AVX Accu-P 10 pF (Si/SiO); *c* — серия Murata GJM0335 10 pF (C0G); *d* — Murata GRM0335 10 pF (C0G); *e* — Murata GRM0335 120 pF (X7R).

теристик измерительного тракта и образца с изменением температуры, связанные с изменением как величины емкости, так и параметров держателя образца.

Значительное отклонение значений наблюдалось для конденсатора GRM 120 pF, который не имеет температурно-стабилизированной керамической подложки. Для данного конденсатора величина относительного отклонения значений параметра $S21$ матрицы рассеяния составила 0.07389, что значительно больше изменений, наблюдаемых для остальных конденсаторов. Аналогичное поведение можно видеть при анализе данных, полученных при низких частотах. Согласно табл. 2, отклонения номиналов конденсаторов при их охлаждении до 77 K не превышало 3 %, за исключением конденсатора GRM 120 pF, для которого такое отклонение составило около 75 %. Такое поведение величины отклонения $\delta_{C,77}$ отражает, главным образом, существенный уход величины емкости этого конденсатора при охлаждении, что приводит к существенному изменению характеристики коэффициента прохождения от частоты.

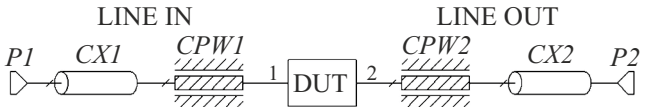

Рис. 5. Модель линий передачи рефрижератора с подводящими копланарными линиями держателя образца. $P1$, $P2$ — входной и выходной порты, LINE IN, LINE OUT — модель линии передачи рефрижератора с подводящими копланарными линиями держателя образца со стороны входного и выходного порта, DUT — модель тестируемого устройства.

Качество измерений матрицы рассеяния, выполненных в рефрижераторе, также было предварительно оценено при комнатной температуре относительно матрицы рассеяния, представленной производителем. Однако для корректировки параметров $S21$ матрицы рассеяния производителей они были дополнены матрицами линий передачи, полученными из модели линии передачи, учитывающей как подводящие копланарные линии, так и линии передачи рефрижератора при температуре измерения 4 K. В модели выполнялась подстройка коэффициента затухания линий передачи (рис. 5) таким образом, чтобы компенсировать отклонение параметров $S21$ матрицы рассеяния, представленной производителем, от параметров, полученных при измерении в рефрижераторе. В качестве модели тестируемого устройства использовалась матрица рассеяния, представленная производителем.

Качество измерений матрицы рассеяния в рефрижераторе оценивалось по величине $\delta_{CR,300}$, полученной для двух матриц рассеяния: измеренной и представленной производителем, которая была дополнена матрицами линий передачи рефрижератора с подводящими копланарными линиями держателя образца (рис. 5). Количество точек суммирования для расчета данной величины было равно 46. Оно соответствовало количеству точек в данных, представленных производителями, и охватывало диапазон от 100 MHz до 1 GHz:

Результаты сравнения представлены в табл. 5.

Можно отметить, что значения величины $\delta_{CR,300}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния, измеренной в рефрижераторе при комнатной температуре, относительно параметров $S21$ матрицы рассеяния, представленной производителем при 300 K, хорошо согласуется со значениями величины $\delta_{C,300}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния, измеренной при комнатной температуре, полученных при измерениях только с калиброванными коаксиальными линиями. Небольшое рассогласование, скорее всего, связано с процессом сборки и разборки измерительной установки.

Изменение параметров $S21$ матрицы рассеяния при 4 K относительно значений, полученных при комнатной температуре, представлено в табл. 5. Величина $\delta_{CR,4}$ рассчитана по уравнению (1) в диапазоне от 100 MHz до 1 GHz с количеством точек 46.

Таблица 5. Величины $\delta_{CR,300}$ и $\delta_{CR,4}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния, измеренной в рефрижераторе при 300 и 4 K

Обозначение конденсатора	Номинал, pF	$\delta_{CR,300}$	$\delta_{CR,4}$
CBR	10	0.01257	0.06205
	100	0.00889	0.05568
ACCU-P	10	0.01565	0.06309
GJM	10	0.01603	0.06221
GRM	10	0.01288	0.05975
	33	0.01319	0.06107
	120	0.02449	0.25554

2.3. Частотная зависимость индуктивности и добротности в диапазоне частот от 100 kHz до 2 MHz

Номинальные и измеренные значения индуктивности и добротности при температурах 300, 77 и 4 K представлены в табл. 6 и 7. В качестве значений индуктивности и добротности использовались средние значения этих параметров, полученные в интервале частот 50–250 kHz из их частотной зависимости при температурах 300, 77 и 4 K. Отклонение значений индуктивности рассчитаны для результатов измерений при 77 и 4 K относительно значения индуктивности при 300 K по следующему выражению:

$$\Delta = \frac{|\overline{L_{300}} - \overline{L_T}|}{\overline{L_{300}}} \cdot 100\,\%,$$

где $\overline{L_T}$ — среднее значение индуктивности при температуре T, $\overline{L_{300}}$ — среднее значение индуктивности при 300 K.

В качестве значений индуктивности и добротности использовались средние значения этих параметров, полученные при измерении набора из трех индуктивностей каждого типа при температурах 300 и 77 K. При температуре 4 K выполнялось измерение одного образца каждого типа.

Так как в измерениях при 4 K калибровка выполнялась на разъемы на 300 K фланце рефрижератора, результат измерения, помимо индуктивности измеряемого компонента, включает в себя индуктивности линий передачи рефрижератора и держателя образца. Для корректного сравнения результатов измерения компонента при 4 K в качестве референса было измерено значение компонента при 300 K в составе той же измерительной установки, т. е. в составе рефрижератора. Отклонение индуктивности при 4 K рассчитано относительно значения индуктивности, которое было измерено в рефрижераторе при 300 K. Значение индуктивности, измеренное в рефрижераторе при 300 K, показано в табл. 6 через косую

Таблица 6. Средние значения индуктивности при различных температурах

Обозначение индуктивности	Номинал, nH	$\overline{L}$, nH 300 K	$\overline{L}$, nH 77 K	Δ_{77K}, %	$\overline{L}$, nH 4 K	Δ_{4K}, %
TN	10	10.24/858.6	11.27	10	669.5	22
HQ	10	10.88/855	11.12	2.2	678.82	20.6

Таблица 7. Средние значения добротности при различных температурах

Обозначение индуктивности	Номинал, nH	$\overline{Q}$, 10^{-3} 300 K	$\overline{Q}$, 10^{-3} 77 K	$\overline{Q}$, 10^{-3} 4 K
TN	10	15.46	108.5	549.88
HQ	10	25.7	160.3	579.56

черту. Можно видеть, что параметры линий передачи рефрижератора с охлаждением меняются значительно. Данный факт не позволяет сделать вывод об изменении значения индуктивности исследуемого образца при 4 K.

3. Матрица рассеяния индуктивностей в диапазоне частот до 10 GHz

Матрица рассеяния измерена с предварительной калибровкой СВЧ коаксиальных кабелей в диапазоне частот от 10 MHz до 10 GHz. Для индуктивностей производителями предоставлены параметры матрицы рассеяния при 300 K, с которыми сравнивались результаты измерений.

Результатом измерения является матрица рассеяния индуктивности, установленной в держатель образца (рис. 1).

Результаты измерений матрицы рассеяния индуктивностей при температурах 300, 77 и 4 K представлены на рис. 6 в виде зависимостей параметров $S11$ и $S21$ от частоты. Параметры $S22$ и $S12$ имели аналогичный вид.

Для оценки изменений матрицы рассеяния при охлаждении до температуры 77 и 4 K рассчитывалась величина $\delta_{L,T}$ среднеквадратического значения относительного отклонения параметра $S21$ при температуре T от значения при температуре 300 K, для набора частот в анализируемом диапазоне частот от 50 MHz до 1 GHz с количеством точек 218:

$$\delta_{L,T} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum\nolimits_{k=1}^{N}\left[\left(\frac{S21_{300,k} - S21_{T,k}}{S21_{300,k}}\right)^2\right]}. \quad (2)$$

Предварительно качество измерений оценивалось по величине $\delta_{L,300}$, полученной при комнатной температуре для двух матриц рассеяния: измеренной и представленной производителем. Матрица рассеяния, представленная производителем, была дополнена матрицами подводящих копланарных линий передачи $CPW1$ и $CPW2$ (рис. 3), аналогичным образом, как описано выше при измерении матрицы рассеяния конденсаторов. Результаты сравнения представлены в табл. 8.

Таблица 8. Величины $\delta_{L,300}$ и $\delta_{L,77}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния индуктивностей, измеренной при 300 и 77 K

Обозначение индуктивности	Номинал, nH	$\delta_{L,300}$	$\delta_{L,77}$
TN	10	0.0061	0.01408
HQ	10	0.00511	0.01151

Из представленных данных можно видеть, что величина относительного отклонения значений параметра $S21$ матрицы рассеяния для индуктивностей составляет 0.00511 для HQ и 0.0061 для TN. Небольшое различие данных параметров может указывать на погрешность измерений, связанную с неконтролируемыми отклонениями параметров измерительной установки при ее сборке и разборке.

Изменение параметров $S21$ матрицы рассеяния при 77 K относительно значений, полученных при комнатной температуре, представлено в табл. 8. Величина $\delta_{L,77}$ рассчитана по выражению (2). Из представленных данных можно видеть, что величина отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния для индуктивностей увеличилась до 0.01151 для HQ и 0.01408 для TN. Такое изменение величины $\delta_{L,77}$ может указывать на изменение характеристик измерительного тракта и образца, связанные с изменением как величины индуктивности, так и параметров держателя образца. Согласно табл. 6, отклонения величины индуктивности при их охлаждении до 77 K составило порядка 10 %, что могло привести к наблюдаемому увеличению величины отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния по сравнению с комнатной температурой.

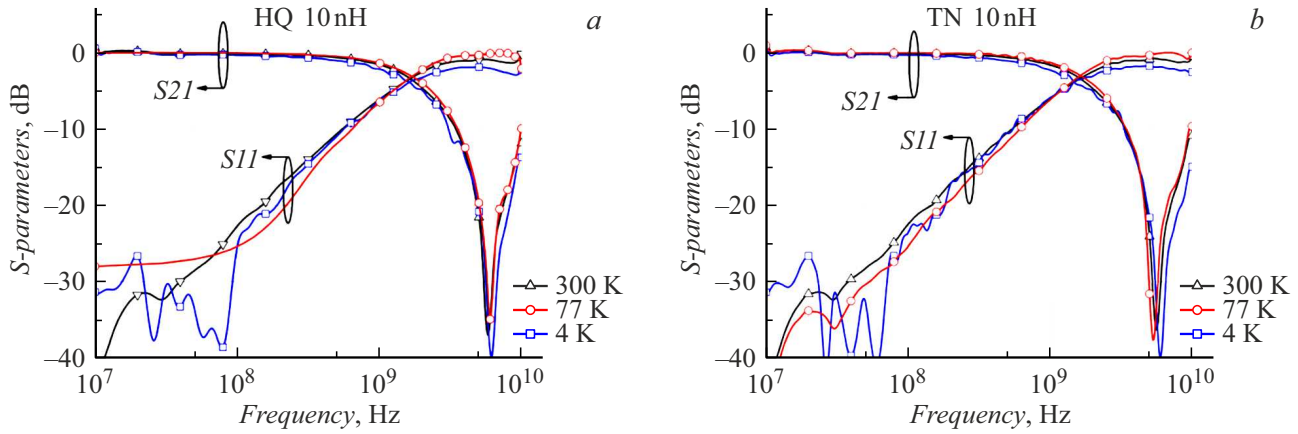

Рис. 6. Параметры $S11$ и $S21$ матрицы рассеяния индуктивностей 10 nH при температурах 300, 77 и 4 K: *a* — Murata LQP03HQ; *b* — Murata LQP03TN.

Таблица 9. Величины $\delta_{LR,300}$ и $\delta_{LR,4}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния индуктивностей, измеренной в рефрижераторе при 300 и 4 K

Обозначение индуктивности	Номинал, nH	$\delta_{LR,300}$	$\delta_{LR,4}$
TN	10	0.02244	0.05307
HQ	10	0.01869	0.05196

Качество измерений матрицы рассеяния в рефрижераторе оценивалось по величине $\delta_{LR,300}$, полученной для двух матриц рассеяния: измеренной и представленной производителем, которая была дополнена матрицами линий передачи рефрижератора с подводящими копланарными линиями держателя образца (рис. 5).

Результаты сравнения представлены в табл. 9.

Можно отметить, что значения величины $\delta_{LR,300}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния, измеренной в рефрижераторе при комнатной температуре, относительно параметров $S21$ матрицы рассеяния, представленной производителем при 300 K, которое составляет значения 0.01869 для HQ и 0.02244 для TN, не согласуется со значениями величины $\delta_{L,300}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния, измеренной при комнатной температуре, которые получены при измерениях только с калиброванными коаксиальными линиями. Рассогласование на порядок величины, скорее всего, связано с влиянием коаксиальных линий рефрижератора.

Изменение параметров $S21$ матрицы рассеяния при 4 K относительно значений, полученных при комнатной температуре, представлено в табл. 9. Величина $\delta_{LR,4}$ рассчитана в соответствии с выражением (2).

4. Обсуждение полученных результатов

Из представленных результатов $\delta_{CR,4}$ можно видеть, что параметры матрицы рассеяния конденсаторов, измеренной при температуре 4 K, относительно значений, измеренных при комнатной температуре, изменились для большинства конденсаторов в рабочем диапазоне частот до 1 GHz. Величина отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния для конденсаторов увеличилась и лежит в диапазоне от 0.05568 до 0.06309. Это может указывать на изменения характеристик измерительного тракта и образца, связанные с изменением как величины емкости, так и параметров держателя образца и коаксиальных линий в рефрижераторе. Согласно табл. 2, отклонения номиналов конденсаторов при их охлаждении до 4 K не превышало 4 %, что соответствует практически постоянной величине емкости конденсаторов при их охлаждении от 77 до 4 K. А значит, существенного изменения в поведении коэффициента прохождения при охлаждении до 4 K не должно наблюдаться. Увеличение же величины $\delta_{CR,4}$ относительного отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния более чем на порядок, может указывать на изменения в характеристиках коаксиальных линий в рефрижераторе, которые приводят к смещению всей частотной характеристики общего коэффициента прохождения на величину нескольких dB. Такое смещение всей характеристики, как показало наше моделирование, приводит к большому изменению величины $\delta_{CR,4}$, в то время как изменение в величине емкости сказывается на эту величину значительно слабее, так как приводит к изменению формы на локальном участке, а не всей характеристики.

Большое отклонение значений наблюдается для конденсатора GRM 120 pF, который не является температурно-стабилизированным. Для данного конденсатора величина относительного отклонения значений параметра $S21$ матрицы рассеяния составила 0.25554,

что значительно больше изменений, наблюдаемых для остальных конденсаторов. Аналогичное поведение можно видеть при анализе данных, полученных на низких частотах. Согласно табл. 2, отклонения номинала конденсатора GRM 120 pF при 4 K составило более 95 %. Серьезное изменение величины емкости конденсатора GRM 120 pF приводит к заметному смещению частотной характеристики коэффициента прохождения на выбранном частотном участке, которое вызывает значительный рост величины $\delta_{CR,4}$.

Из представленных результатов $\delta_{LR,4}$ для индуктивностей можно видеть, что параметры матрицы рассеяния, измеренной при температуре 4 K, относительно значений, измеренных при комнатной температуре, существенно изменились в рабочем диапазоне частот до 1 GHz. Величина относительных отклонений значений параметров $S21$ матрицы рассеяния индуктивностей увеличилась до значения 0.05307 для TN и 0.05196 для HQ. Такое изменение $\delta_{LR,4}$ может указывать на изменения характеристик измерительного тракта и образца, связанные с изменением как величины индуктивности, так параметров держателя образца и коаксиальных линий в рефрижераторе. Согласно табл. 6 отклонения величины индуктивности при охлаждении до 4 K достигло более 20 %, что увеличило отклонение данной величины в два раза при охлаждении индуктивностей от 77 до 4 K. Следует заметить, что при абсолютной величине индуктивности порядка 800 nH изменение ее на 20 % показывает, что основной вклад в такое поведение индуктивности с охлаждением в рефрижераторе вносит изменение параметров измерительного тракта. Кроме этого, увеличение величины $\delta_{LR,4}$ отклонения значений параметров $S21$ матрицы рассеяния более, чем на порядок, может также указывать на изменения в характеристиках коаксиальных линий в рефрижераторе, которые приводят к смещению всей частотной характеристики коэффициента прохождения на величину нескольких dB. Такое смещение всей характеристики приводит к значительному изменению величины $\delta_{LR,4}$. Наличие серьезных изменений параметров измерительного тракта не позволяет определить величину отклонения индуктивности при 4 K данным методом. Необходимы прецизионные измерения в криогенной зондовой станции для исключения влияния коаксиальных линий и держателя образца.

Результаты измерений показали сохранение работоспособности индуктивностей поверхностного монтажа, изготовленных по тонкопленочной технологии, при криогенных температурах, однако их применение в устройствах криогенной электроники требует дополнительного исследования.

Заключение

Результаты измерений конденсаторов поверхностного монтажа при криогенных температурах показали следующее: отклонения величины емкости конденсаторов типа NPO и изготовленных по тонкопленочной технологии при их охлаждении до 4 K не превышало 4 %, что соответствует незначительному изменению их матрицы рассеяния. Результаты измерений матриц рассеяния данных конденсаторов при температурах 77 и 4 K показывают возможность использовать матрицы рассеяния, предоставляемые производителем, для проектирования криогенных СВЧ устройств. Конденсаторы, не использующие термостабилизированную керамику, показали значительный уход емкости при криогенных температурах.

Результаты измерений индуктивностей поверхностного монтажа, изготовленных по тонкопленочной технологии, при криогенных температурах, показали следующее: величина индуктивности при охлаждении до 77 K изменилась на 10 %. Серьезные изменения как параметров матрицы рассеяния при 4 K, так и величины индуктивности, связанные с влиянием измерительного тракта, не позволяют определить величину отклонения значения индуктивности электронных компонентов данным методом. Требуются дополнительные исследования с применением криогенной зондовой станции для исключения влияния измерительного тракта.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSUN-2023-0007).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M. Schmidt, M. von Helversen, M. López, F. Gericke, E. Schlottmann, T. Heindel, S. Kück, S. Reitzenstein, J. Beyer. J. Low Temp. Phys., **193**, 1243 (2018). DOI: 10.1007/s10909-018-1932-1

[2] N. Oukhanski, M. Grajcar, E. Il'ichev, H.-G. Meyer. Rev. Sci. Instrum., **74**, 1145 (2003). DOI: 10.1063/1.1532539

[3] N. Wadefalk, A. Mellberg, I. Angelov, M.E. Barsky, S. Bui, E. Choumas, R.W. Grundbacher, E.L. Kollberg, R. Lai, N. Rorsman, P. Starski, J. Stenarson, D.C. Streit, H. Zirath. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **51** (6), 1705 (2003). DOI: 10.1109/TMTT.2003.812570

[4] A.V. Gordeeva, V.O. Zbrozhek, A.L. Pankratov, L.S. Revin, V.A. Shamporov, A.A. Gunbina, L.S. Kuzmin. Appl. Phys. Lett., **110**, 162603 (2017). DOI: 10.1063/1.4982031

[5] S. Weinreb, J. Bardin, H. Mani, G. Jones. Rev. Sci. Instrum., **80**, 044702 (2009). DOI: 10.1063/1.3103939

[6] J. Clarke, F.K. Wilhelm. Nature, **453**, 1031 (2008). DOI: 10.1038/nature07128

[7] G. Wendin. Rep. Prog. Phys., **80**, 106001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6633/aa7e1a

[8] Б.И. Иванов, M. Grajcar, И.Л. Новиков, А.Г. Вострецов, Е. Ильичев. Письма в ЖТФ, **42** (7), 90 (2016). [B.I. Ivanov, M. Grajcar, I.L. Novikov, A.G. Vostretsov, E. Il'ichev Tech. Phys. Lett., **42** (4), 380 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016040076]
[9] M.J. Gong, U. Alakusu, S. Bonen, M. Dadash, L. Lucci, H. Jia, L. Gutierrez, W. Chen, D. Daughton, G.C. Adam, S. Iordanescu, M. Pasteanu, N. Messaoudi, D. Harame, A. Muller, R. Mansour, S. Voinigescu. In: *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium* (RFIC, Boston, MA, USA, 111, 2019), DOI: 10.1109/RFIC.2019.8701847
[10] B. Patra, M. Mehrpoo, A. Ruffino, F. Sebastiano, E. Charbon, M. Babaie. IEEE J. Electron Devices Society, **8**, 448 (2020). DOI: 10.1109/jeds.2020.2986722
[11] F. Teyssandier, D. Prêle. In: *Ninth International Workshop on Low Temperature Electronics — WOLTE9* (Jun 2010, Guaruja, Brazil, 2010)
[12] H. Homulle, S. Visser, B. Patra, E. Charbon. Rev. Sci. Instrum., **89**, 014703 (2018). DOI: 10.1063/1.5004484
[13] I.L. Novikov, D.I. Volkhin, A.G. Vostretso In: *IEEE 3rd International Conference on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering* (PIERE) (Novosibirsk, Russian Federation, 300, 2024), DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10804918
[14] AVX capacitors ACCU-P series. Datasheet. URL: https://datasheets.kyocera-avx.com/Accu-P.pdf
[15] Kemet capacitors CBR series. Datasheet. URL: https://content.kemet.com/datasheets/KEM_C1030_CBR_SMD.pdf
[16] Murata capacitors GJM series. Datasheet. URL: https://www.murata.com/en-us/products/capacitor/ceramiccapacitor/overview/lineup/smd/gjm#anchor-2
[17] Murata capacitors GRM series. Datasheet. URL: https://www.murata.com/en-global/products/capacitor/ceramiccapacitor/overview/lineup/smd/grm
[18] Murata inductors. Chip coil (chip inductor) for Consumer equipment & Industrial equipment LQP03TN02 Reference specification. URL: https://search.murata.co.jp/Ceramy/image/img/P02/JELF243C-0015.pdf
[19] Murata inductors Chip coil (chip inductor) for Consumer equipment & Industrial equipment LQP03HQ02 Reference specification. URL: https://search.murata.co.jp/Ceramy/image/img/P02/JELF243C-0021.pdf
[20] B.I. Ivanov, D.I. Volkhin, I.L. Novikov, D.K. Pitsun, D.O. Moskalev, I.A. Rodionov, E. Il'ichev, A.G. Vostretsov. Beilstein J. Nanotechnol., **11**, 1484 (2020). DOI: 10.3762/bjnano.11.131
[21] D.I. Volkhin, I.L. Novikov, A.G. Vostretsov In: *IEEE 24th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials* (EDM) (Novosibirsk, Russian Federation, 800, 2023), DOI: 10.1109/EDM58354.2023.10225128