

## Разработка криогенной волноводной нагрузки для СИС смесителя с разделением боковых полос диапазона 1.1–1.4 мм

© А.В. Худченко,<sup>1,2</sup> К.И. Рудаков,<sup>1,2</sup> И.В. Третьяков,<sup>1</sup> А.М. Чекушкин,<sup>2</sup> И.А. Мутаев,<sup>3</sup> В.П. Кошелец<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Астрокосмический центр ФИАН,  
117810 Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009 Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия  
e-mail: khudchenko@asc.rssi.ru

Поступило в Редакцию 19 мая 2024 г.

В окончательной редакции 19 мая 2024 г.

Принято к публикации 19 мая 2024 г.

Описана волноводная нагрузка для криогенного приемника с разделением полос на основе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник смесителей для диапазона 1.1–1.4 мм. Нагрузка спроектирована как металлическая вставка в центре волновода, представляющая из себя кварцевую подложку толщиной около 125 мкм с нанесенной на нее тонкой пленкой сплава NiCr толщиной 8 нм с сопротивлением около 250 Ω/см<sup>2</sup>. Измерения показали, что сопротивление полученной пленки изменяется менее чем на 3% при варьировании температуры от 300 до 4.2 К. Расчеты показали, что уровень отражений от нагрузки должен быть менее –35 дБ в диапазоне 220–330 ГГц.

**Ключевые слова:** волноводная нагрузка, тонкие металлические пленки, волноводные сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник смесители, смесители с разделением боковых полос, криогенные гетеродинные приемники.

DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58548.179-24

### Введение

Результаты по разработке криогенной волноводной нагрузки, представленные в настоящей работе, являются частью комплексной работы по созданию высокочувствительного приемника с разделением боковых полос для диапазона 211–275 ГГц (примерно 1.1–1.4 мм) на основе туннельных переходов сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС). Этот приемник может быть использован для проведения уникальных астрофизических наблюдений как в составе наземных телескопов [1–6], так и на борту космических обсерваторий, таких как Миллиметрон [7,8]. Необходимость размещения приемника с разделением боковых полос на борту обсерватории Миллиметрон обусловлена тем, что для приведенного диапазона все наземные телескопы оснащены именно таким типом приемников, а не более простым в техническом плане двухполосным приемником. Поэтому для наиболее эффективной корреляции сигналов наземного и космического сигналов радиоинтерферометра со сверхдлинной базой нужно иметь как можно более схожие приемные системы в обоих плечах. Если же использовать на космическом телескопе двухполосный приемник, то только одна полоса будет коррелировать с наземным сигналом, в то время как сигнал второй полосы будет вести себя как шум. Использование же приемников с разделением полос на наземных телескопах обусловлено выигрышем по сравнению с двухполос-

ными приемниками в соотношении сигнал-шум за счет снижения в два раза вклада тепловых шумов атмосферы и оптики приемника в общую шумовую температуру системы за счет исключения вклада шумов зеркального диапазона. Стоит отметить, что этот выигрыш имеет место в случае наблюдения спектральных линий и отсутствует при исследовании широкополосных сигналов, присутствующих одновременно в обоих полосах гетеродинного приемника. В настоящее время активно ведется поиск перспективных площадок для создания субмиллиметрового телескопа на территории Российской Федерации [9–11]. Ввиду отсутствия в нашей стране высокогорных пустынных мест, сопоставимых с плато Чахантор, где на высоте более 5000 м над уровнем моря расположены телескопы ALMA [2] и APEX [4], приходится рассматривать площадки, на которых интегральное содержание воды в атмосфере составляет порядка 2–4 мм в реалистичном случае. В этих условиях прозрачность атмосферы в диапазоне 1.1–1.4 мм составит в среднем около 0.8 [12,13]. В таком случае шумовой вклад атмосферы в каждой полосе можно оценить приблизительно в 50 К, что сравнимо с ожидаемой шумовой температурой смесителя, и дает сильную мотивацию для использования именно приемника с разделением полос.

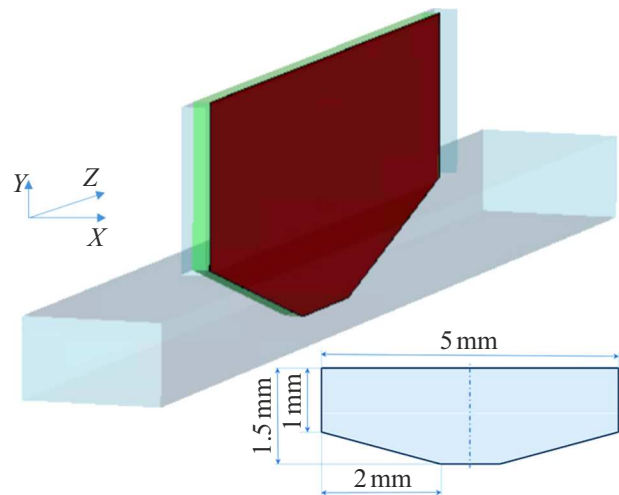
Проведенное недавно моделирование полной волноводной структуры СИС-смесителя с разделением боковых полос показало, что уровень отражения от встро-енных волноводных нагрузок не должен превышать

величину  $-20$  dB при рабочей температуре 4 K [14]. В противном случае достижение желательного качества разделения боковых полос в  $-15$  dB будет сложно выполнимой задачей. При этом предпочтительно, чтобы отражение от волноводной нагрузки было уменьшено до  $-30$  dB. В таком случае будет заметно упрощена задача проектирования и изготовления всей волноводной структуры для приемника с разделением полос высокого качества за счет снижения требований к точности исполнения волноводных структур, а также к их предельным размерам. Приведенные аргументы являются мотивацией для разработки криогенной волноводной нагрузки, описанной в настоящей работе.

Существует целый ряд решений по созданию волноводных нагрузок, работающих в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн при криогенных температурах. Большинство этих решений используют диэлектрические поглотители различной формы. Поглотители могут быть либо установлены в волновод [5,15,16], либо размещены в специальной полости на конце волновода [17]. Однако принципиальной особенностью этих нагрузок является то, что их изготавливают из специфического диэлектрического материала MF-112 и MF-116 [16], который производится только в США. Это ограничение послужило одной из главных причин для принятия решения о самостоятельной разработке нагрузки. Распространенным в промышленности способом по созданию волноводных нагрузок до 50 GHz является использование ферритового порошка, смешанного с эпоксидной смолой. Создание нагрузки такого типа для криогенных температур и для частот выше 200 GHz потребует отдельной технологической разработки. При этом использование приведенных выше волноводных вставок несет в себе сложности для сборки всего волноводного блока с разделением полос, так как в этом блоке потребуется использование как минимум трех таких нагрузок [14]. Вставки должны быть размещены в одной половине блока и будут выходить за площадь стыковки, а вторая половина должна быть надета на них. Для этого вставки должны быть сделаны в уменьшенном размере, что несет риск для их поглощающих свойств. Чтобы избежать этих сложностей, мы выбрали вариант нагрузки на основе ножевой вставки, которая может быть целиком размещена внутри одной из половин волноводного блока и не будет влиять механически на совмещение с другой половиной.

## 1. Дизайн волноводной нагрузки

Одним из классических решений для создания волноводных нагрузок и перестраиваемых аттенуаторов является использование ножевой вставки (см., например, [18]). Схожее решение было выбрано для нашей разработки, представленной в настоящей работе (рис. 1). Нагрузка представляет собой пластину из аморфного кварца толщиной  $125 \mu\text{m}$ . На одну из сторон пласти-

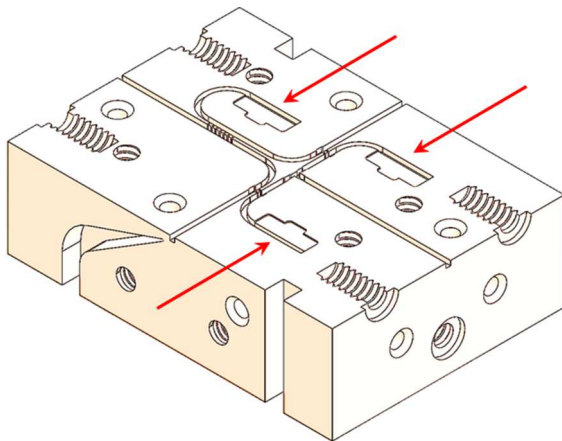


**Рис. 1.** 3D-вид волноводной нагрузки, вставленной в волновод. В нижней части рисунка показаны размеры спроектированной нагрузки.

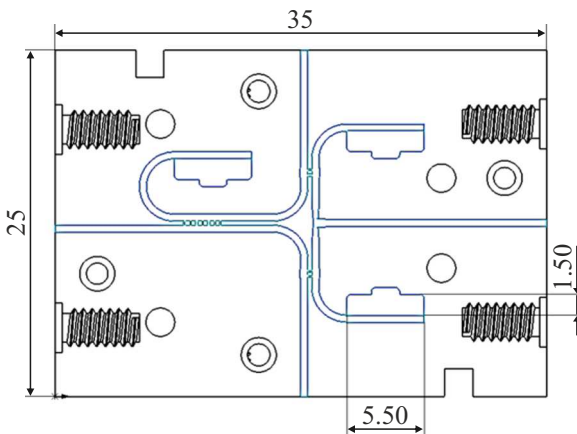
ны нанесена пленка резистивного материала. Форма пластины представляет собой прямоугольник размером  $5 \times 1.5$  mm с двумя усеченными углами. Неусеченная широкая сторона прямоугольника является основанием пластины длиной 5 mm, а параллельная ей сторона — обуженной вершиной нагрузки, которая имеет ширину 1 mm. Плоская вершина должна подходить вплотную к дальней стенке волновода, таким образом, что вся наклонная часть, образованная в результате усечения углов прямоугольника, проходит от одной до другой стороны волновода в плоскости вдоль вектора электрического поля первой волноводной моды.

Размеры волновода, в который должна быть вставлена нагрузка, составляют  $1000 \times 500 \mu\text{m}$ . Эти величины определены разработанным ранее однополосным СИС-смесителем [19] и спроектированным для него волноводным блоком [14,20]. Нагрузка размещена в специальной полости глубиной  $140 \mu\text{m}$  в одной из половин сплит-блока, что гарантирует качественную и надежную установку. Поверхность пластины, на которую нанесен металл, оказывается почти ровно посередине волновода.

Три одинаковых нагрузки будут установлены в волноводный блок СИС-смесителя с разделением боковых полос, поэтому они достаточно компактны, чтобы уместиться в нем, но при этом имеют достаточно большие габариты, удобные для надежного размещения и монтажа. На рис. 2 показан внешний вид половины волноводного блока, в которую будут смонтированы три нагрузки. Они будут размещены в полостях, показанных стрелками. Две из них используются для поглощения неиспользуемой мощности опорного генератора, и одна для абсорбирования отражений от СИС-смесителей и квадратурного делителя. Детальное описание элементов представленного волноводного блока и их функционала можно найти в статьях [14,20]. На рис. 3 приведены



**Рис. 2.** Половина волноводного блока СИС смесителя с разделением боковых полос, построенная с учетом спроектированной волноводной нагрузки.

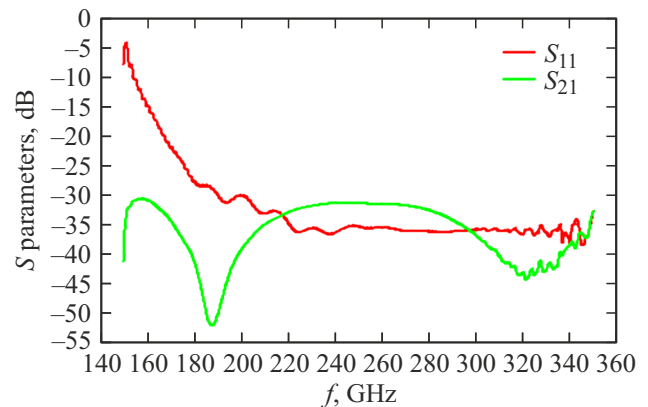


**Рис. 3.** Габаритный чертеж половины волноводного блока.

габариты монтажной полости, которые превосходят размеры самой нагрузки, что позволит удобно разместить и точно установить ее. Для фиксации вставки в полости может быть использован любой клей, не обязательно имеющий высокую проводимость, так как проводящая поверхность нагрузки закорочена на стенки волновода по высокой частоте за счет емкостной связи. При этом стоит учесть, что клей должен гарантировать качественное отведение тепла, так как мощность поглощаемого сигнала от опорного генератора существенна и может вызвать дополнительный нагрев.

## 2. Моделирование СВЧ характеристик нагрузки

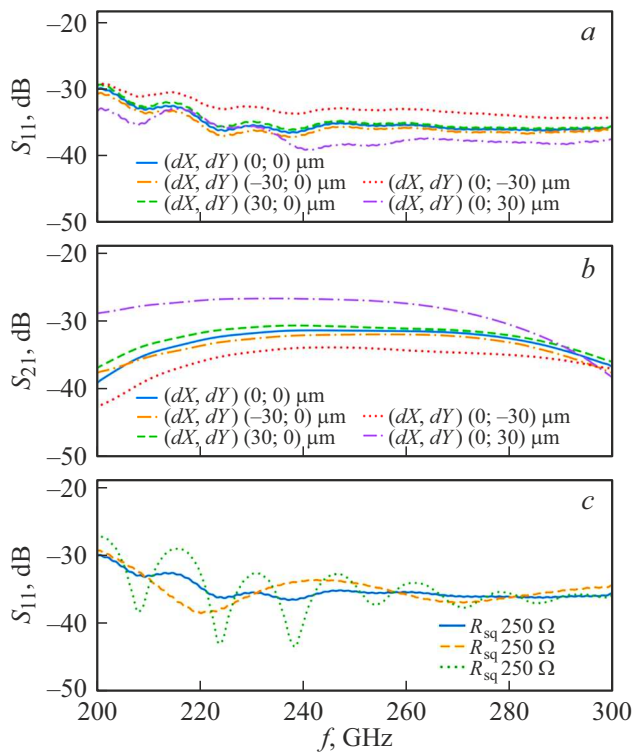
Результаты моделирования СВЧ параметров нагрузки представлены на рис. 4. Расчеты проведены с помощью трехмерного электромагнитного симулятора. Вычисления выполнены для номинального проектного сопротивления металлической пленки  $250 \Omega/\text{sq}$ . Материал стенок



**Рис. 4.** Рассчитанные величины отражения  $S_{11}$  и пропускания  $S_{21}$  для спроектированной волноводной нагрузки.

волновода и окружения взят как идеальный проводник, что оправдано ввиду крайне малых потерь в имеющемся коротком волноводе. Учет резистивных потерь в стенках волновода лишь может лишь улучшить поглощающие характеристики нагрузки. Из рис. 4 видно, что для частот выше 220 GHz уровень отражения  $S_{11}$  не превышает  $-35 \text{ dB}$ . На графике также приведена кривая пропускания  $S_{21}$ , имеющая уровень не более  $-30 \text{ dB}$ . Этот уровень гарантирует качественное поглощение СВЧ сигнала в нагрузке и позволяет пренебречь в дальнейшем той долей излучения, которая проходит за нагрузку. Это объясняется тем, что сигнал, отраженный за нагрузкой, претерпевает повторное прохождение сквозь нее и его относительная величина ослабевает уже ниже уровня  $-60 \text{ dB}$ , и не сможет сказаться существенным образом на общей картине для  $S_{11}$ .

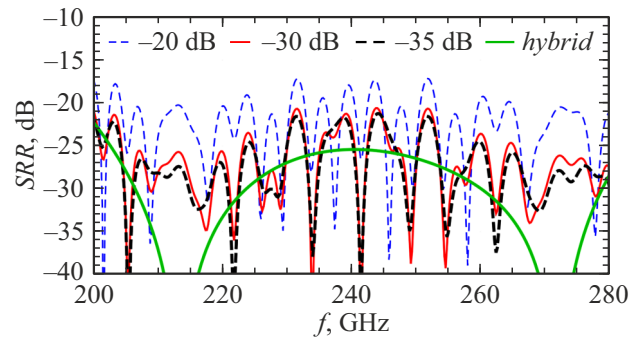
Для оценки риска, связанного с возможной погрешностью в форме нагрузки или волновода, либо с ошибками в положении нагрузки относительно волновода при монтаже, был проведен анализ влияния точности установки нагрузки в волновод на итоговые СВЧ параметры. На рис. 5, *a, b* показаны изменения уровня отражения и уровня пропускания при неточностях выдвигания нагрузки в волновод ( $dY$ ), а также при ошибках положения нагрузки относительно разделительной плоскости сплит-блока ( $dX$ ), которые могут быть вызваны неточностью изготовления углубления под нагрузку, а также попаданием под нее мусора при установке. Из приведенных зависимостей видно, что для значительных отклонений до  $30 \mu\text{m}$ , которые достоверно могут быть зарегистрированы измерительным микроскопом, уровень отражения остается заведомо ниже  $-30 \text{ dB}$ , что делает реалистичным практическую реализацию такой нагрузки. Интересно заметить, что выдвиганию нагрузки в волновод не до конца ( $dY = 30 \mu\text{m}$ ) дает даже еще большее снижение уровня отражения  $S_{11}$ . При этом  $S_{21}$  начинает возрастать немного выше  $-30 \text{ dB}$ . Это все еще совершенно не критично, но однозначно говорит о нарастающем негативном влиянии при отклонениях



**Рис. 5.** *a* — зависимость уровня отражения от нагрузки  $S_{11}$  от частоты при варьировании положения нагрузки; *b* — зависимость уровня пропускания нагрузки  $S_{21}$  от частоты при варьировании положения нагрузки (направления смещения показаны соответствующими осями на рис. 1); *c* — зависимость уровня отражения от нагрузки  $S_{11}$  от частоты при варьировании сопротивления металлической пленки.

больших, чем представленные  $30\ \mu\text{m}$ , и предостерегает от дальнейшего умышленного смещения нагрузки в этом направлении. Представленные отклонения  $dX$  и  $dY$  однозначно соответствуют осям, обозначенным на общем виде нагрузки на рис. 1.

Помимо отклонения в положении нагрузки, весьма вероятной представляется вариация параметров поглощающей металлической пленки, в частности, ее сопротивления. Такая девиация может возникнуть за счет отличий в проводимости напыляемой на кварц тонкой металлической пленки от номинальных  $250\ \Omega$  как из-за особенностей изготовления, так за счет температурных изменений при охлаждении до 4 К. Моделирование уровня отражений для различного сопротивления пленки проиллюстрировано на рис. 5, *c*. Даже при значительном изменении сопротивления от 100 до  $400\ \Omega/\text{sq}$  уровень отражений остается ниже  $-30\ \text{dB}$ , что показывает крайне слабую зависимость качества работы нагрузки от сопротивления металлической пленки. Продемонстрированная крайняя устойчивость дизайна нагрузки к вариациям сопротивления пленки указывает на его высокую степень практичности и надежности. Возникающая периодическая картина для кривых отражения  $S_{11}$  при сопротивлении на квадрат  $400\ \Omega$  обусловлена наложе-



**Рис. 6.** Рассчитанная зависимость качества разделения полос  $SRR$  от частоты для различных уровней отражения от нагрузки, варьирующихся от  $-20$  до  $-35\ \text{dB}$ . В сравнение приведена кривая „hybrid“, показывающая вид  $SRR$  в случае полного отсутствия отражений в волноводном блоке.

нием нескольких слабых отражений, которые начинают проявляться ввиду меньшего поглощения в самой нагрузке.

Для оценки влияния уровня отражения от нагрузки на общую картину качества разделения полос (Sideband Rejection Ratio,  $SRR$ ) для спроектированной уже структуры волноводного блока, представленного в статье [20], проведено дополнительное моделирование работы всей волноводной структуры приемника с учетом отражений, описанных подробно в работе [14]. Получены зависимости уровня  $SRR$  для трех случаев:  $-20$ ,  $-30$ ,  $-35\ \text{dB}$ . Сравнение этих кривых приведено на рис. 6. Расчеты сделаны для уровня отражения от СИС смесителей  $-3.3\ \text{dB}$ . Видно, что улучшение отражений от нагрузки от  $-20$  до  $-30\ \text{dB}$  может привести к уменьшению  $SRR$  в худших точках примерно от  $-17$  до  $-21\ \text{dB}$ , что является значительным изменением. Дальнейшее снижение отражений до  $-35\ \text{dB}$  приводит уже к небольшим изменениям качества разделения полос, примерно на  $1\ \text{dB}$ . Это обусловлено тем, что вклад отражений, задействующих СИС смесители и нагрузку становится сильно меньше искажений сигнала, возникающих за счет отражений от СИС смесителей, которые просачиваются через изоляцию квадратурного моста и при этом никак не взаимодействуют с волноводной нагрузкой. Эти виды отражений подробно описаны в работе [14]. Для сравнения на рис. 6 показана кривая „hybrid“, демонстрирующая уровень качества разделения полос, который возник бы при наличии одних лишь искажений, вносимых квадратурным мостом, называемым также hybrid splitter. Такое качество разделения полос было бы при полном отсутствии отражений и дисбалансов в остальных частях приемника.

Следует отметить, что представленные оценочные расчеты сделаны для относительно упрощенного случая, а именно, когда в расчет не берется возможное различие в коэффициенте усиления двух одиночных СИС смесителей, используемых в приемнике с разделением полос, а также не учитывается искажение фазы между сигналами



опорного генератора, приходящими на одиночные СИС смесители, которое также возникает из-за отражений сигналов от СИС смесителей и волноводных нагрузок. Учет этих факторов даст еще большую разницу в изменении SRR при вариации уровня отражения от разрабатываемой волноводной нагрузки.

### 3. Изготовление металлической пленки нагрузки

В статье [18] в роли резистивного материала нагрузки использовался слой Ti толщиной менее 10 nm, который затем был активно окислен на поверхности, чтобы защитить саму пленку титана от последующей деградации в атмосфере. Также с помощью контролируемого окисления части пленки подбиралась ее итоговая толщина для достижения требуемого уровня сопротивления. Целью настоящей работы было получение нагреваемой нагрузки для калибровки волноводных устройств за счет локального изменения температуры нагрузки. Однако Ti может существенно менять сопротивление между комнатными и криогенными условиями. В связи с этим мы решили использовать тонкую пленку NiCr. Принципиально важно, что сопротивление таких пленок должно крайне слабо меняться от температуры даже при охлаждении до 4 K. Это заметно упростит процесс испытаний таких нагрузок, так как позволит провести измерения коэффициента отражения при комнатной температуре с уверенностью, что близкие характеристики будут проявляться и в криогенных условиях [21].

В результате в рамках этой работы было отработано нанесение пленки методом магнетронного распыления с использованием NiCr-мишени с соотношением доли соответствующих металлов 60/40. Распыление проведено в атмосфере аргона при давлении  $7 \cdot 10^{-3}$  mbar. За время напыления 12 s на кварцевой подложке сформируется NiCr-пленка толщиной около 8 nm. Как показали измерения по постоянному току, проведенные при различных температурах, сопротивление полученной пленки составляет 251  $\Omega/\text{sq}$  при 300 K, 253  $\Omega/\text{sq}$  при 77 K и 257  $\Omega/\text{sq}$  при 4.2 K. Таким образом, вариация сопротивления от комнатных до криогенных условий составила менее трех процентов, что с учетом характера кривых, показанных на рис. 5, позволяет ожидать пренебрежимо малые изменения уровня отражения при охлаждении.

Чтобы убедиться в однородности получаемых NiCr-пленок было проведено сканирование поверхности пленки с помощью электронного микроскопа. Результат полученного изображения приведен на рис. 7. Видно, что пленка растет равномерно, практически полностью отсутствуют разрывы, а характерный размер гранул, почти неизбежно возникающих при напылении, составляет менее 10 nm, что сравнимо с толщиной самой пленки. Это позволяет заключить, что пленка нанесена непрерывно и однозначно будет работать как однородный материал для СВЧ сигналов в рабочем диапазоне

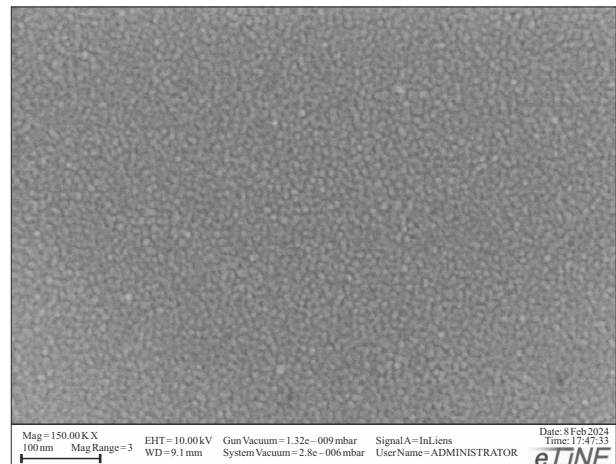


Рис. 7. Результат сканирования с помощью электронного микроскопа поверхности нанесенной NiCr-пленки, имеющей толщину 8 nm. Размерная метка приведена в левом нижнем углу.

частот, т. е. выше 200 GHz. Все это позволяет с высокой вероятностью рассчитывать на хорошее соответствие расчетных и будущих экспериментальных параметров всей волноводной нагрузки.

### Заключение

Спроектирована криогенная волноводная нагрузка для диапазона 1.1–1.4 mm, выполненная в форме ножевой вставки в центре волновода, представляющая из себя подложку из аморфного кварца толщиной 125  $\mu\text{m}$  с нанесенной на нее тонкой пленкой сплава NiCr толщиной около 8 nm. Сопротивление изготовленной металлической пленки составляет около 250  $\Omega/\text{sq}$  и изменяется менее чем на 3 при охлаждении до криогенных температур (4 K), что позволяет провести полную характеризацию нагрузки в комнатных условиях и быть уверенным с высокой степенью вероятности в столь же качественной ее работе и в криогенных условиях. Расчеты показывают, что уровень отражений от нагрузки должен быть не выше  $-35$  dB в диапазоне 220–330 GHz, что с запасом удовлетворяет требованиям для приемника с разделением боковых полос. При этом моделирование работы нагрузки при реалистичных параметрах ошибки изготовления и установки в 10  $\mu\text{m}$  показывает, что уровень отражения гарантировано останется в пределах величины  $-30$  dB в требуемом диапазоне частот. Следующим этапом работ мы планируем непосредственное изготовление нагрузок и проведение исследования их свойств в специальном тестированном блоке при комнатной температуре и в криогенных условиях. Далее нагрузки будут установлены в уже разработанный волноводный блок и испытаны в составе полноценного СИС приемника с разделением боковых полос диапазона 1.1–1.4 mm.

## Благодарности

Выражаем искреннюю признательность нашим коллегам Тарасову М.А. и Стрелкову М. за плодотворные беседы и предложенные идеи, которые принципиально сказались на успешности проведенной работы. Для изготовления и исследования образцов было использовано оборудование УНУ #352529 „Криоинтеграл“.

## Финансирование работы

Проектирование нагрузки и расчет ее СВЧ свойств выполнены за счет гранта РФ (№ 23-79-00061, <https://rscf.ru/project/23-79-00061/>). Работа по отладке технологии изготовления нагрузки поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2024-538).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

## Список литературы

- [1] A. Wootten, A.R. Thompson. Proc. IEEE, **97** (8), 1463 (2009).
- [2] *ALMA Observatory Website*. Available online: <https://www.almaobservatory.org/en/about-alma/>
- [3] A.M. Baryshev, R. Hesper, F.P. Mena, T.M. Klapwijk, T.A. van Kempen, M.R. Hogerheijde, B.D. Jackson, J. Adema, G.J. Gerlofsma, M.E. Bekema, J. Barkhof, L.H.R. de Haan-Stijkel, M. van den Bemt, A. Koops, K. Keizer, C. Pieters, J. Koops van het Jagt, H.H.A. Schaeffer, T. Zijlstra, M. Kroug, C.F.J. Lodewijk, K. Wielinga, W. Boland, M.W.M. de Graauw, E.F. van Dishoeck, H. Jager, W. Wild. *A&A*, **577**, A129, (2015). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425529>
- [4] R. Güsten, R.S. Booth, C. Cesarsky, K.M. Menten, C. Agurto, et. Al. Proc. SPIE, **6267**, 626714 (2006).
- [5] D. Maier, J. Reverdy, D. Billon-Pierron, A. Barbier. *SSB*, **4** (8), 129 (2014).
- [6] P.T. Ho, J.M. Moran, K.Y. Lo. *Astrophys. J.*, **616** (1), L1-L6 (2004).
- [7] I.D. Novikov, S.F. Likhachev, Yu.A. Shchekinov, A.S. Andrianov, A.M. Baryshev, A.I. Vasyunin, D.Z. Wiebe, Th. de Graauw, A.G. Doroshkevich, I.I. Zinchenko, N.S. Kardashev, V.I. Kostenko, T.I. Larchenkova, L.N. Likhacheva, A.O. Lyakhovets, D.I. Novikov, S.V. Pilipenko, A.F. Punanova, A.G. Rudnitsky, A.V. Smirnov, V.I. Shematovich. *Phys.-Uspekhi*, **64** (4), 386 (2021). <https://doi.org/10.3367/ufne.2020.12.038898>
- [8] *Millimetron Space Observatory Website*. Available online: <http://millimetron.ru/index.php/en/>
- [9] I.I. Zinchenko, A.V. Lapinov, A.V. Lapinov, V.F. Vdovin, P.M. Zemlyanukha, T.A. Khabarova. *Appl. Sci.*, **13** (21), 11706 (2023). <https://doi.org/10.3390/app132111706>
- [10] V.B. Khaikin, A.Y. Shikhovtsev, A.P. Mironov, X.A. Qian. *A Study of the Astroclimate in the Dagestan Mountains Agul Region and at the Ali Observatory in Tibet as Possible Locations for the Eurasian SubMM Telescopes (ESMT)* In Proceed. of the The Multifaceted Universe: Theory and Observations — 2022 (Nizhny Arkhyz, Russia, 2022), p. 72.
- [11] A.Y. Shikhovtsev, V.B. Khaikin, A.P. Mironov, G.P. Kovadlo. *Atmos Ocean Opt.*, **35**, 168 (2022).
- [12] A. Otarola, M. Holdaway, L.E. Nyman, S.J.E. Radford, B.J. Butler. *Atmospheric Transparency at Chajnantor: 1973–2003*, in ALMA Memo Series, 2005, Memo 512. [Online]. Available: <http://library.nrao.edu/alma.shtml>
- [13] Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.apex-telescope.org/weather/>.
- [14] A. Khudchenko, I. Tretyakov, V.P. Koshelets, R. Hesper, A.M. Baryshev. *IEEE Transactions on Terahertz Sci. Technol.*, **13** (6), 645 (2023).
- [15] A.R. Kerr et al. Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., 1 (2013).
- [16] A.R. Kerr, H. Moseley, E. Wollack, W. Grammer, G. Reiland, R. Henry, K.P. Stewart. NRAO, ALMA Memo, 14 May 2004.
- [17] R. Hesper, A. Khudchenko, A.M. Baryshev, J. Barkhof, F.P. Mena. *Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VIII*. **9914**, 79 (2016).
- [18] J.W. Kooi et al. *IEEE Transactions on Terahertz Sci. Technol.*, **8** (4), 434 (2018).
- [19] K.I. Rudakov, A.V. Khudchenko, L.V. Filippenko, M.E. Paramonov, R. Hesper, D.A.R., da Costa Lima, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. *Appl. Sci.*, **11** (21), 10087 (2021).
- [20] И.В. Третьяков, А.В. Худченко, Р.А. Черный, С.Ф. Лихачев. *Радиотехника и электроника*, **68** (9), 904 (2023). DOI: 10.31857/S0033849423090243 [I.V. Tretyakov, A.V. Khudchenko, R.A. Cherniia, S.F. Likhachev. *J. Commun. Technol. Electron.*, **68** (9), 989 (2023).
- [21] M.V. Strelkov, A.M. Chekushkin, A.A. Gunbina, M.A. Tarasov. *IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC)*, 49 (2022).