

02,19

## Исследование сверхпроводящих линий передачи на основе NbTiN/Al и накачки СИС-переходов Nb/AlN/NbN в частотном диапазоне выше 1 THz

© Н.В. Кинев<sup>1</sup>, А.М. Чекушкин<sup>1</sup>, Ф.В. Хан<sup>1,2</sup>, К.И. Рудаков<sup>1,3</sup>, Н.Н. Котова<sup>1,2</sup>, В.П. Кошелец<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup> Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия

E-mail: nickolay@hitech.cplire.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 апреля 2024 г.

Принята к публикации 8 мая 2024 г.

Исследованы сверхпроводящие линии передачи на основе NbTiN/Al в качестве высокочастотных линий для работы на частотах до 1.1 THz. Численно смоделированы и изготовлены схемы для исследования поглощения в тонкопленочных структурах, содержащие приемную щелевую антенну THz диапазона, набор микрополосковых линий передачи NbTiN/Al, а также согласованные с линией два THz-детектора на основе туннельного перехода Nb/AlN/NbN вида „сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник“. Проведен эксперимент по регистрации внешнего сигнала источника (лампы обратной волны) на частоте около 1.1 THz, демонстрирующий успешную работу разработанных линий передачи NbTiN/Al на частотах выше 1 THz, где неприменимы традиционные линии передачи на основе Nb. Проведен анализ теплового эффекта при воздействии на детектор излучением источника, которое приводит к мощной накачке туннельного перехода.

**Ключевые слова:** детекторы терагерцового диапазона, СИС-переходы, тонкие пленки, тепловой эффект, сверхпроводящая щель.

DOI: 10.61011/FTT.2024.07.58368.26NN

### 1. Введение

Высокочувствительные детекторы терагерцового (THz) диапазона в настоящее время востребованы в целом ряде областей, таких как связь, биомедицина, астрофизические исследования, молекулярная спектроскопия [1–3]. Криогенные сверхпроводниковые детекторы являются наиболее чувствительными на сегодняшний день в THz-диапазоне [4], одним из достаточно распространенным типом которых является туннельный переход „сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник“ (СИС). В большинстве существующих приемных систем на основе туннельных переходов, в качестве электродов СИС-перехода используется ниобий (напр., Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb) либо нитрид ниобия (напр., Nb/AlN/NbN), работающие при температуре кипения жидкого гелия 4.2 К. Для таких переходов наиболее традиционными линиями передачи сигналов являются тонкие пленки ниобия, изготавливаемые с использованием таких же технологических процессов, что и при формировании туннельного перехода, при этом некоторые элементы формируются в едином вакуумном цикле. Они обладают максимальной рабочей частотой около 750 GHz, выше которой значительно возрастают потери в пленках в связи с фундаментальным ограничением, обусловленным энер-

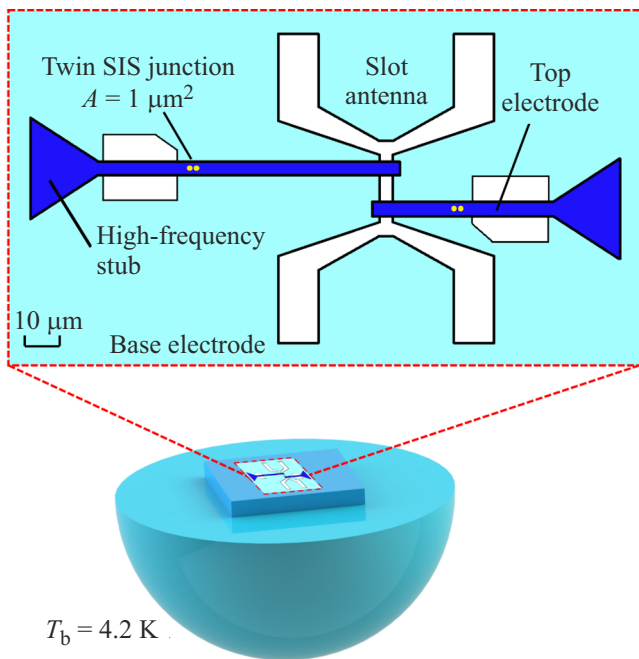
гетической щелью сверхпроводника  $\Delta$ , согласно теории Маттиса–Бардина [5]. В системах, работающих на частотах до 1 THz и выше, необходимо использование более высокочастотных линий передачи из материалов с более высоким значением  $\Delta$ . Наиболее подходящими для таких задач являются линии передачи на основе NbTiN, имеющие фундаментальное ограничение порядка 1.4 THz [6–7]. Целью данной работы является разработка, изготовление и исследование сверхпроводниковых интегральных схем для изучения характеристик линий передачи на основе NbTiN/Al с рабочими частотами выше 1 THz.

Исследование накачки СИС-детекторов Nb/AlN/NbN, включенных в линию передачи NbTiN/Al, сигналом лампы обратной волны (ЛОВ) на частотах до 1.1 THz были описаны нами в [8], однако численный анализ не проводился. Определение абсолютного значения мощности, поглощенной СИС-переходом в линии передачи, является достаточно комплексной задачей, для решения которой, помимо прочего, требуется учет влияния теплового эффекта от воздействия излучения на переход. Оценка мощности традиционно производится путем численного моделирования кривых ВАХ перехода при воздействии сигнала определенной амплитуды и частоты [8–10] и их сопоставления с экспериментально измеренными кривыми ВАХ. При этом, в результате теплового эффекта

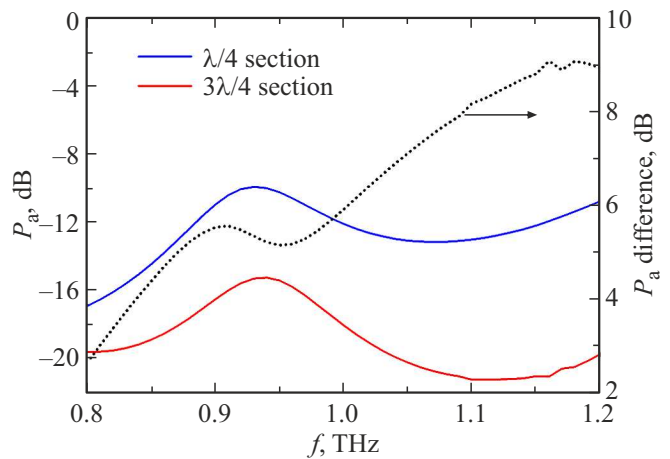
от воздействия внешнего сигнала меняется „щелевое напряжение“  $V_g$  СИС-перехода [9,11], которое необходимо знать при численном моделировании кривых ВАХ и оценке мощности в абсолютных единицах. Поэтому, для возможности исследования линий передач не только качественно, но и количественно, в данной работе была реализована методика определения  $V_g$  СИС-перехода при воздействии на него внешнего сигнала. Результаты моделирования и изготовления экспериментальных образцов описаны в разд. 2. Результаты эксперимента по регистрации сигналов THz-частоты представлены в разд. 3. Анализ теплового влияния накачки и определенные значения  $V_g$  СИС-детекторов представлены в разд. 4.

## 2. Численное моделирование и изготовление образцов

Была разработана и численно промоделирована топология интегральной схемы, содержащей СИС-переходы на основе Nb/AlN/NbN, включенные в THz-линию передачи с нижним электродом из NbTiN и верхним электродом из Al и выполняющие роль детекторов внешнего THz-сигнала. Топология микросхемы показана на рис. 1 и состоит из входной щелевой антенны, выполненной в нижнем электроде NbTiN интегральной структуры, двух детекторов, которые выполнены на основе двойного СИС-перехода площадью  $1 \mu\text{m}^2$  каждый, а также исследуемой линии передачи, согласованной с антенной по входу и СИС-переходами по выходу. Двой-



**Рис. 1.** Топология сверхпроводниковой интегральной схемы для исследования поглощения в линиях передачи NbTiN/Al (сверху) и схема установки чипа на линзу для формирования приемного тракта (снизу).



**Рис. 2.** Результаты численного расчета детектируемой мощности в короткой и длинной секциях, и разница между ними.

ные СИС-переходы вместо одиночных используются для увеличения ширины приемной полосы частот за счет взаимной отстройки емкости переходов индуктивностью соединяющей их линии. Детекторы включены в отрезки микрополосковой линии, имеющие длину  $\lambda/4$  и  $3\lambda/4$ , где  $\lambda$  — длина волна принимаемого излучения (далее — короткая и длинная секции, соответственно). Разница между принимаемой детектором мощностью в длинной и короткой секциях позволяет в дальнейшем оценивать потери в микрополосковой линии и определять параметры тонких пленок. Микросхема с интегральной структурой устанавливается в фокусе полуэллиптической кремниевой линзы, что формирует квазиоптический линзово-антенный приемный тракт.

Результаты численных расчетов детектируемой мощности  $P_a$  в короткой и длинной секциях представлены на рис. 2. Метод численного моделирования данных структур более подробно описан в [12], расчеты проводились в программе Ansys HFSS. Частота наиболее эффективного детектирования практически совпадает для двух секций с точностью до 10 GHz и составляет около 0.93 THz. В то же время, детектируемая мощность в длинной секции в окрестности частоты 1.1 THz практически на порядок (8 dB) ниже, чем в короткой секции, что показано пунктирной кривой.

Экспериментальные образцы микросхем описанной топологии изготовлены методами магнетронного распыления и оптической УФ-литографии, фотошаблоны с субмикронной точностью размеров изготавливались при помощи электронно-лучевой литографии. Все структуры изготавливались на высокоомной подложке ( $> 5 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ ) из полированного кремния. Технология изготовления туннельных переходов Nb/AlN/Nb, Nb/AlN/NbN с использованием традиционных линий передачи Nb/Nb достаточно детально описана в [13], а технология туннельных переходов, встроенных в линии передачи NbTiN/Al, обсуждалась в [14]. Микрофотогра-

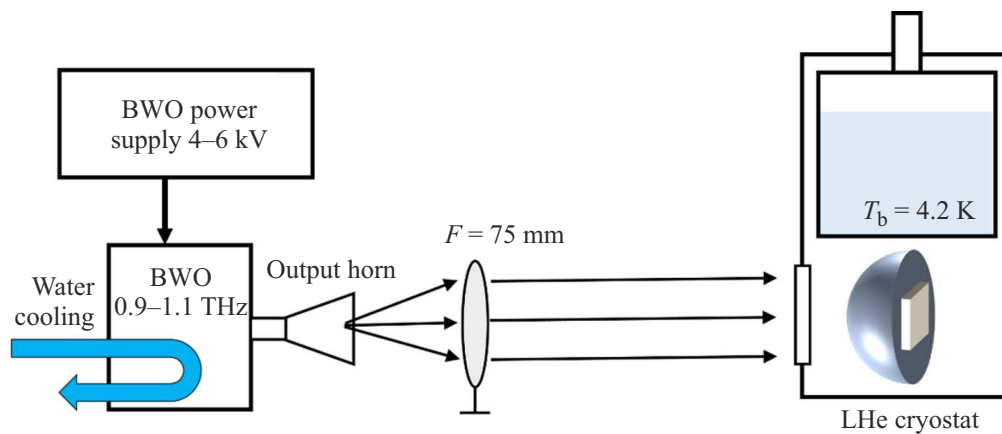


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования накачки СИС-детекторов сигналом ЛОВ на частотах до 1.1 THz.

фии изготовленных структур можно найти в недавних работах [8,12]. Нормальное сопротивление переходов в короткой и длинной секциях равнялось 14.1 и 14.8  $\Omega$  соответственно, что составляет различие менее 5% и свидетельствует о достаточно высокой технологической точности при изготовлении структур с размерами порядка 1  $\mu\text{m}$ .

### 3. Эксперимент по регистрации THz-сигнала

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Криогенный модуль с интегральной структурой помещался в вакуумном заливном криостате с рабочей температурой 4.2 К. Для накачки СИС-детекторов THz-сигналом и исследования свойств линий передачи в качестве внешнего генератора использован мощный источник на основе ЛОВ с рабочим диапазоном выходных частот порядка 0.9–1.1 THz. Используемая ЛОВ имеет выходную частоту 1.056 THz при замедляющем напряжении на катоде 5 kV и коэффициент перестройки частоты около 79 GHz/kV, при этом генерация происходит в диапазоне напряжений 4–6 kV. Воздействие THz-сигнала ЛОВ на детектор регистрировалось путем измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) СИС-перехода. Характерные токи через переход составляли до 1000  $\mu\text{A}$ . Для компенсации расходимости выходного пучка источника установлена собирающая линза с фокусным расстоянием 75 mm; линза изготовлена из тефлона, прозрачного в THz-диапазоне.

Семейства измеренных ВАХ СИС-переходов при наборе рабочих параметров ЛОВ представлены на рис. 4. Кривые ВАХ на рис. 4, *a*, *b*, полученные при указанном номере рабочей точки ЛОВ, измерены одновременно и независимо на разных детекторах, при этом для удобства выбран такой набор кривых, который демонстрирует возможность накачки СИС-детекторов в широком диапазоне по мощности: от тока накачки порядка 0.1–0.2 от „щелевого“ скачка до значений насыщения

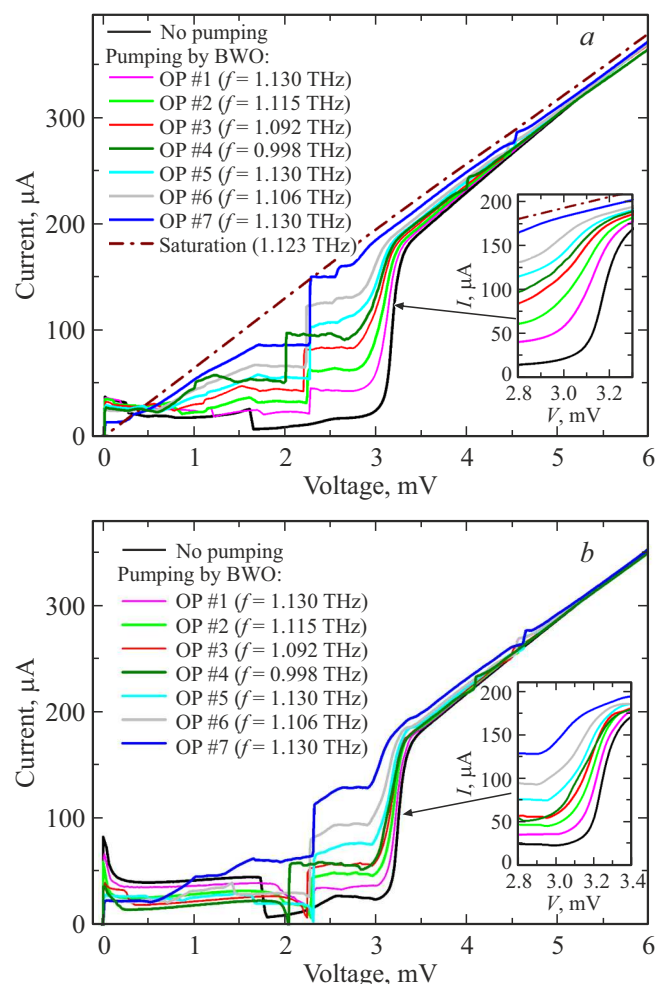


Рис. 4. Серия ВАХ СИС-детекторов в короткой (*a*) и длинной (*b*) секциях без воздействия и с воздействием сигнала внешнего источника различного уровня мощности и на различных частотах. Параметры ЛОВ в рабочих точках („Operating point“ — OP), обозначенных одинаковым номером ##1–7, идентичны для (*a*) и (*b*).

по накачке). Различный уровень мощности накачки на одной частоте 1.130 THz (для рабочих точек ##1, 5, 7) достигался дополнительной установкой одного и двух слоев поглотителя. Вставками на рис. 4, *a, b* выделена область сверхпроводящей щели СИС-перехода в увеличенном масштабе, из них видно достаточно заметное уменьшение значения щели с ростом мощности накачки; данные результаты будут использованы для анализа теплового эффекта в разд. 4.

Воздействие внешним излучением на СИС-детектор с неподавленным критическим током приводит к появлению двух серий ступеней туннельного тока: ступени Шапиро [15] и ступеней квазичастичного тока [4]. Для всех кривых под воздействием излучения на рис. 4, *a, b* наблюдается четко выраженная первая ступень Шапиро при напряжениях в диапазоне 2–2.25 mV, а также слабо выраженная вторая ступень на нормальном участке ВАХ при напряжениях около 4–4.5 mV. Положение ступеней в точности соответствует частоте источника 0.998–1.13 THz при пересчете из джозефсоновской константы  $2e/h \approx 483.6 \text{ GHz/mV}$ , где  $e$  — заряд электрона,  $h$  — постоянная планка.

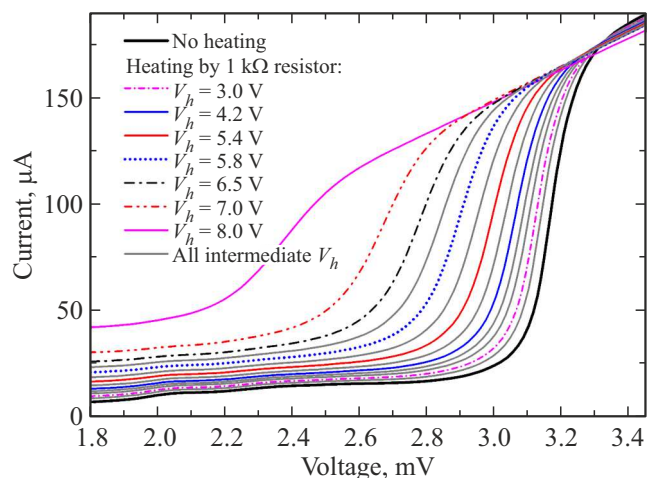
Таким образом, получена мощная накачка детекторов в обеих секциях в диапазоне генерации ЛОВ от 990 GHz до 1.13 THz, что демонстрирует применимость изготовленных линий передачи для задач детектирования на данных частотах. Экспериментальные результаты качественно соответствуют численным, в которых накачка в длинной секции оказалась слабее, чем в короткой. Количественная оценка мощности СВЧ, поглощенной СИС-детектором, проводится методом численного моделирования кривой ВАХ под воздействием излучения (определенной мощности и частоты) и ее сопоставления с экспериментально измеренной кривой ВАХ [4,9,10]. В свою очередь, для вычисления кривой ВАХ под воздействием излучения необходимо достаточно точно знать параметры перехода в автономном режиме (без воздействия), в том числе: нормальное сопротивление перехода, щелевое напряжение  $V_g$  и „подщелевой“ ток (то утечки)  $I_{\text{leak}}$  при некотором заданном напряжении смещения. Из вставок на рис. 4, *a, b* видно, что  $V_g$  уменьшается с увеличением мощности накачки, что объясняется, в первую очередь, тепловым нагревом перехода до некоторой эффективной температуры  $T_{\text{eff}}$  [9], при этом определить точное значение  $V_g$  по форме ВАХ под воздействием излучения невозможно, поскольку неизвестна форма и крутизна ВАХ в области „щели“ из-за слишком высокой квазичастичной ступени. Кроме того, экспериментальное значение квазичастичного тока накачки  $I_p$  для корректного сопоставления с численным значением также неизвестно: во-первых, ступени Шапиро вносят значительный вклад в форму характеристики (суперпозиция ступеней тока от двух независимых эффектов), а во-вторых, ток утечки  $I_{\text{leak}}$  также зависит от температуры перехода и при текущей  $T_{\text{eff}}$  перехода неизвестен. Ток накачки в случае полностью подавленного критического тока определяется как

разница фактического тока смещения через переход  $I_{\text{bias}}$  и тока утечки  $I_p = I_{\text{bias}} - I_{\text{leak}}$ , однако, в использованной системе измерений отсутствует возможность подавления критического тока. Таким образом, целый ряд неизвестных параметров не позволяет провести численное моделирование с достаточно достоверным результатом. Чтобы определить  $V_g$  и  $I_{\text{leak}}$  для количественной оценки мощности, было проведено дополнительное исследование, описанное в разд. 4.

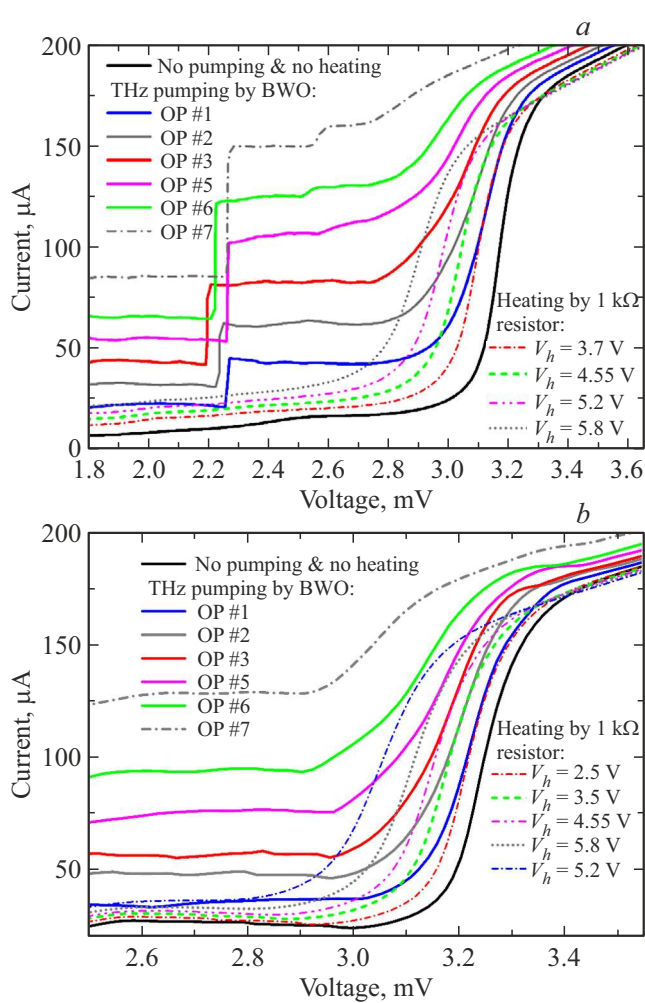
#### 4. Анализ теплового эффекта накачки СИС-детекторов

Для определения сверхпроводящей щели  $V_g$  и тока утечки  $I_{\text{leak}}$  СИС-детекторов под воздействием излучения были проведены измерения ВАХ в автономном режиме в широком диапазоне температур. Данная методика была предложена и описана в [9]. Для этого в непосредственной близости с интегральной микросхемой был установлен нагревательный резистивный элемент с сопротивлением около 1 kΩ. На рис. 5 представлена серия ВАХ СИС-перехода в короткой секции при различном уровне нагрева: подаваемое напряжение на нагревательный элемент  $V_h$  составило до 8 V, при дальнейшем увеличении нагрева форма ВАХ становится практически линейной, что свидетельствует о температуре, близкой к критической температуре перехода в нормальное состояние. Практически идентично выглядит серия ВАХ для перехода в длинной секции, поскольку температура переходов абсолютно одинакова в двух секциях и равна температуре микросхемы.

Затем кривая ВАХ без воздействия внешнего сигнала, соответствующая той же  $T_{\text{eff}}$ , к которой привел нагрев от воздействия сигналом, определяется методом сопо-



**Рис. 5.** Серия ВАХ СИС-перехода в короткой секции при различных температурах, зависящих от подаваемого на нагревательный элемент напряжения. Для простоты значение напряжения на нагревателе обозначено лишь для некоторых кривых с шагом около 1 V.



**Рис. 6.** Результаты сопоставления кривых ВАХ с воздействием внешнего сигнала с кривыми ВАХ с подогревом и без воздействия внешнего сигнала (а) для СИС-детектора в короткой секции, (b) — в длинной.

ставления кривых. Так, для детектора в длинной секции из рис. 6, b установлено, что кривой ВАХ с накачкой сигналом ЛОВ в рабочей точке ОП #1 соответствует  $V_g = 3.21$  мВ, ОП #2 —  $V_g = 3.17$  мВ, ОП #3 —  $V_g = 3.15$  мВ, ОП #5 —  $V_g = 3.11$  мВ, ОП #6 —  $V_g = 3.04$  мВ, при этом  $V_g$  в автономном режиме составляет 3.24 мВ. Аналогичным образом определены  $V_g$  для разных кривых ВАХ с накачкой сигналов ЛОВ для детектора в короткой секции. Сводные результаты изменения щелевого напряжения  $\Delta V_g$  вследствие накачки детекторов для набора исследованных точек (параметров источника) представлены в таблице.

Результаты, приведенные в таблице, полностью соответствуют визуальному сравнению уровня мощности накачки в короткой и длинной секциях (по высоте ступени накачки): при заданных параметрах источника изменение щелевого напряжения  $\Delta V_g$  СИС-детектора в короткой секции выше, чем в длинной секции. Следует отметить, что данная методика определения  $V_g$  при-

Изменение щелевого напряжения детекторов в зависимости от параметров накачки

Рабочая точка источника	Частота накачки, THz	$\Delta V_g$ СИС-детектора, мВ	
		в короткой секции	в длинной секции
ОП #1	1.13	0.07	0.03
ОП #2	1.115	0.13	0.07
ОП #3	1.092	0.19	0.09
ОП #5	1.13	0.25	0.13
ОП #6	1.106	—	0.2

меня для накачки СИС-перехода вдали от режима насыщения, когда  $I_p$  составляет не более чем  $\sim 0.7-0.8$  от полного щелевого скачка тока. Приграничную зону применимости данного метода демонстрирует, например, на рис. 6, a кривая накачки для ОП #5 и соответствующая ей кривая при  $V_h = 5.8$  мВ, а на рис. 6, b — кривая накачки ОП #6 и соответствующая ей кривая при  $V_h = 5.2$  мВ. Для обоих случаев кривая ВАХ под действием нагрева не накладывается непосредственно на кривую ВАХ под действием накачки, но скорее является ее зрительным продолжением с такой же крутизной сверхпроводящей щели. При накачке, близкой к насыщению, например, из рис. 6, a для рабочих точек источника ОП #6 и ОП #7, определить  $V_g$  таким способом невозможно, поэтому в таблице в соответствующей ячейке указан прочерк.

Данным методом также определяется ток утечки  $I_{leak}$ , который виден непосредственно из экспериментальной кривой под действием нагрева в области напряжений ниже „щели“ (см. рис. 5). Интересно заметить, что определение абсолютного значения  $T_{eff}$  в данном методе не требуется, достаточно лишь экспериментальной реализации соответствующего нагрева СИС-перехода. Определение точного значения температуры является отдельной численной задачей по вычислению  $V_g(T) = \Delta_1(T) + \Delta_2(T)$  (сумма сверхпроводящих щелей электродов СИС-перехода) с краевыми условиями, решение которой в рамках данного исследования не требуется. Мощность, выделяемая резистором, в контексте данного исследования также не важна, поскольку мы не решаем пространственную задачу теплопроводности в системе нагрева детекторов.

## 5. Заключение

Сверхпроводящие интегральные структуры на основе СИС-детекторов являются высокочувствительными приемными системами как в субТГц диапазоне, так и на частотах выше 1 THz, однако разработка линий передачи и оптимизация их конструкции под конкретные

задачи является достаточно сложной технологической и численной задачей. В настоящей работе была разработана, численно рассчитана, изготовлена и экспериментально исследована интегральная структура на основе приемной антенны и СИС-детекторов Nb/AlN/NbN, встроенных в линию передачи NbTiN/Al, обладающая рабочим диапазоном частот 0.9–1.1 THz. В качестве внешнего источника THz-излучения была использована лампа обратной волны, а фидером являлся квазиоптический антенно-линзовый тракт. Была получена мощная накачка СИС-детекторов в диапазоне 0.998–1.13 THz, что демонстрирует успешное функционирование разработанных СИС-переходов и линий передачи для задач с целевой частотой выше 1 THz. Апробирован метод определения щелевого напряжения и тока утечки для СИС-детектора под действием мощного внешнего излучения посредством вспомогательного эксперимента с нагревом перехода. Использованный метод определения электрофизических параметров детектора, а также реализация подавления критического тока позволят в дальнейшем рассчитывать мощность накачки детекторов в абсолютных единицах, при этом разница этой мощности в короткой и длинной секциях позволит определять параметр затухания в микрополосковой линии передачи NbTiN/Al.

## Благодарности

Изготовление образцов выполнено с использованием уникальной научной установки „Криоинтеграл“ (УНУ № 352529) Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2024-538).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] S.L. Dexeimer. Terahertz Spectroscopy: Principles and Applications. CRC Press, N.Y. (2008). 360 p.
- [2] D.F. Plusquellic, K. Siegrist, E.J. Heilweil, O. Esenturk. Chem. Phys. Chem. **8**, 17, 2412. (2007).
- [3] A.G. Davies, A.D. Burnett, W. Fan, E.H. Linfield, J.E. Cunningham. Mater. Today **11**, 3, 18 (2008).
- [4] J.R. Tucker, M.J. Feldman. Rev. Mod. Phys. **57**, 4, 1055 (1985).
- [5] D.C. Mattis, J. Bardeen. Phys. Rev. **111**, 2, 412 (1958).
- [6] J.W. Kooi, J.A. Stern, G. Chattopadhyay, H.G. LeDuc, B. Bumble, J. Zmuidzinas. Int. J. Infrared Millimeter Waves **19**, 3, 373 (1998).
- [7] B.D. Jackson, N.N. Iosad, G. Lange, A.M. Baryshev, W.M. Laauwen, J.R. Gao, T.M. Klapwijk. IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 1, 653 (2001).
- [8] Н.В. Кинев, А.М. Чекушкин, Ф.В. Хан, К.И. Рудаков. Радиотехника и электроника **68**, 9, 858 (2023).
- [9] A. Traini, B.K. Tan, J.D. Garrett, A. Khudchenko, R. Hesper, A.M. Baryshev, P.N. Dmitriev, V.P. Koshelets, G. Yassin. IEEE Trans. THz Sci. Technol. **10**, 6, 721 (2020).
- [10] N.V. Kinev, K.I. Rudakov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets. Sensors **20**, 24, 7276 (2020).
- [11] A. Khudchenko, A.M. Baryshev, K. Rudakov, V. Koshelets, P. Dmitriev, R. Hesper, L. Jong. IEEE Trans. THz Sci. Technol. **6**, 1, 127 (2016).
- [12] N.V. Kinev, A.M. Chekushkin, F.V. Khan, V.P. Koshelets. In Proc.: 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (2023). P. 128.
- [13] P.N. Dmitriev, I.L. Lapitskaya, L.V. Filippenko, A.B. Ermakov, S.V. Shitov, G.V. Prokopenko, S.A. Kovtonyuk, V.P. Koshelets. IEEE Trans. Appl. Supercond. **13**, 2, 107 (2003).
- [14] А.М. Чекушкин, Л.В. Филиппенко, М.Ю. Фоминский, В.П. Кошелец. ФТТ **64**, 10, 1399 (2022).
- [15] C.C. Grimes, S. Shapiro. Phys. Rev. J. Archive **169**, 2, 397 (1968).

*Редактор Т.Н. Василевская*