

Анализ работы болометра на границе сверхпроводящего перехода с использованием СВЧ-считывания

© А.А. Кузьмин,¹ С.В. Шитов,^{2,3} А.В. Устинов³

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия

³ Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, 119049 Москва, Россия

¹ Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700 Долгопрудный, Московская область, Россия
e-mail: sergey3e@gmail.com

(Поступило в Редакцию 22 января 2013 г.)

Проведен анализ первых экспериментальных результатов нового метода СВЧ-регистрации болометрического отклика пленки металла в области ее сверхпроводящего перехода. Первые эксперименты проводились при температуре 4.5 К с использованием поглотителя из тонкой пленки ниобия с критической температурой 6.7 К. Была подтверждена правильность исходной электродинамической модели. Чип содержал миниатюрную антенну на частоту 600 GHz, интегрированную в планарный резонатор с частотой около 6 GHz, слабо связанный с линией накачки. На основе экспериментальных и модельных данных показано наличие электротермической обратной связи, найдены критерии устойчивости режима и получены вольт-амперные характеристики на СВЧ. Численные оценки для довольно массивных экспериментальных образцов с размером поглотителя $5 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m} \times 15 \text{nm}$, изготовленных с применением оптической фотолитографии, при шумах канала усиления 3 К позволяют ожидать оптическую чувствительность приемника-прототипа на уровне $10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

Введение

В работе [1] был теоретически обоснован новый подход к созданию болометрических приемных элементов для матричных применений, в основе которого лежит управление добротностью связанного резонатора путем изменения его омических потерь. Было показано, что метод СВЧ-разогрева металлической наноразмерной пленки титана, включенной в связанный резонатор, приводящий к ее переходу из сверхпроводящего в нормальное состояние, позволяет создать приемное устройство с чувствительностью около $10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$ при физической температуре сенсора около 300 мК. Для экспериментальной проверки полученных в работе [1] подходов и детальной проработки экспериментальных методов было решено начать с исследований при более высокой температуре — при температуре жидкого гелия. Для этого было предложено использовать в качестве чувствительного элемента тонкие пленки ниобия (Nb, $t_1 = 10\text{--}30 \text{ nm}$), критическая температура которых сильно меняется с толщиной. Это позволило создать резонансную структуру полностью из Nb. Такая пленка может иметь температуру сверхпроводящего перехода $T_{c1} = 5\text{--}7 \text{ K}$ и работать как поглотитель, играя роль чувствительного терморезистора. В то же время резонатор из толстой пленки ниобия ($t_2 = 200\text{--}300 \text{ nm}$, $T_{c2} = 8\text{--}9 \text{ K}$) находится в сверхпроводящем состоянии и сохраняет высокую добротность в области температур в окрестности сверхпроводящего перехода (вблизи T_{c1}). Настоящая работа посвящена анализу первых экспериментальных результатов [2,3] новой концепции считывания болометрического отклика: описана процедура

изготовления экспериментальных образцов и их тестирование на постоянном токе и токе накачки с частотой около 6 GHz.

Прибор-прототип

За основу новой концепции принята схема с резонатором, экспериментальная реализация которой показана на рис. 1. Копланарный резонатор, возбуждаемый на собственной частоте около 6 GHz, содержит терагерцовую антенну, в которую включена пленка поглотителя из сверхпроводника, находящаяся в области сверхпроводящего перехода. Антенна предназначена для приема сигналов терагерцовой частоты и согласована с поглотителем в диапазоне частот 620–670 GHz. Ток резонатора независимо от сигнала протекает через поглотитель, подогревая его и обеспечивая удержание пленки в области сверхпроводящего перехода. В связи с этим мы будем называть ток возбуждения резонатора током накачки. Здесь лежит главное различие с традиционными TES-болометрами, которые выводятся в область перехода за счет температуры самого криостата. Приемная матрица может содержать всего одну передающую линию, оснащенную набором резонаторов, подобных показанному на рис. 1. Если сделать частоты таких высокодобротных резонаторов слегка различающимися (их полосы не перекрывающимися), то мы получаем возможность частотной селекции отклика разных пикселей, используя линию в качестве зондирующей антенны, наподобие многочастотной радиолокационной станции. Генератор гребенчатого спектра такой станции

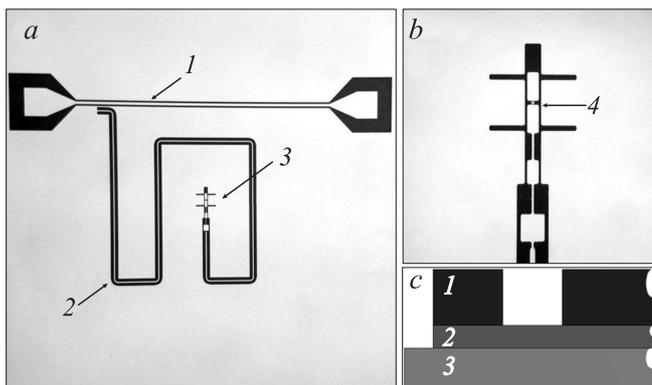


Рис. 1. Фотография экспериментальной структуры болометра с СВЧ-считыванием: *a* — общий вид структуры: 1 — копланарная линия накачки, 2 — копланарный четвертьволновой резонатор, 3 — щелевая антенна на 600 GHz; *b* — разомкнутый конец резонатора с антенной и TES (4); *c* — схематичное изображение слоев структуры: 1 — толстый ниобий копланарного резонатора, 2 — тонкий ниобий TES, 3 — сапфировая подложка.

должен быть настроен так, чтобы накачка на частоте каждого резонатора обеспечивала подогрев терморезистора до рабочего состояния, в котором крутизна зависимости $R(T)$ оптимальна (максимальна). При этом отклик на терагерцовое излучение возникает из-за дополнительного нагрева поглотителя и считывается с помощью усилителя СВЧ на индивидуальных, заведомо известных частотах гребенчатого спектра генератора. В нашем экспериментальном случае — случае одиночного резонатора — это происходит на частоте около 6 GHz в виде вариаций проходящего сигнала накачки в общей линии, как показано на рис. 2. Структура содержит копланарный волновод накачки ($Z_0 = 50 \Omega$) и четвертьволновой резонатор ($Z_0 = 71 \Omega$), настроенный

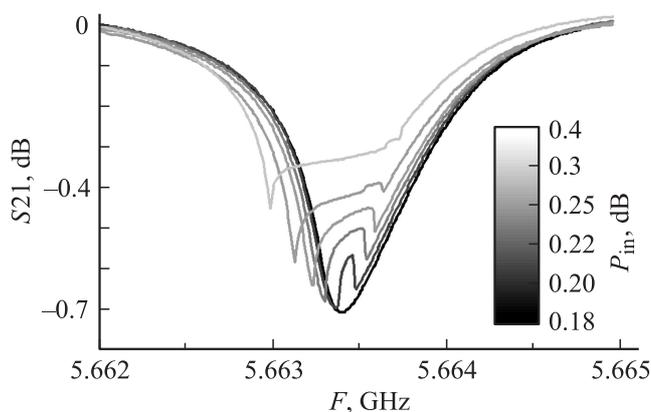


Рис. 2. Частотная зависимость пропускания линии накачки с Nb-резонатором, нагруженным TES при температуре 5 К. Скачкообразное переключение в резистивное состояние происходит при примерно одинаковом СВЧ-токе, протекающем через TES. Нижняя кривая соответствует сверхпроводящему состоянию поглотителя в резонаторе, добротность которого $Q \approx 7000$.

на частоту около 6 GHz. Геометрия области связи линии накачки и резонатора была подобрана так, чтобы полоса ненагруженного резонатора составила 0.5 MHz. Правильность выбора электродинамических параметров и их экспериментальную реализацию подтверждают экспериментальные данные с рис. 2. Целью этих измерений являлась проверка заложенных в прибор СВЧ-свойств при температурах около 4 К. Чип прибора (рис. 1, *a*) был закреплен на плоской поверхности полусферической сапфировой линзы с помощью цианакрилатного клея. Контактные площадки линии накачки были приварены алюминиевыми проводниками толщиной $20 \mu\text{m}$ к специальной плате, которая играла роль электрического интерфейса между чипом и подводными коаксиальными кабелями. Вся сборка закреплялась в специальном держателе и опускалась в транспортный сосуд Дюара с жидким гелием. При измерениях прибор находился не в жидком гелии, а в парах с температурой выше 4.5 К. Для получения частотных характеристик использовался анализатор цепей фирмы Agilent PNA-X с мощностью выходного сигнала от -27 до $+6$ dBm.

Изготовление

Для изготовления экспериментальных TES-болометров микронного размера, интегрированных с антенной рис. 1, использовались пленки ниобия, полученные с помощью магнетронного напыления на сапфировой подложке ($\epsilon = 9.8$, $\text{tg } \delta = 10^{-5}$). Для резонатора и антенны напылялась пленка ниобия толщиной 200 nm, имеющая критическую температуру $T_c = 8.8$ К, для поглотителя использовались пленки ниобия толщиной 10–20 nm с критической температурой сверхпроводящего перехода, подобранной для получения $T_c = 6.7$ К. Для этого было исследовано подавление T_c в тестовых пленках различной толщины [4], осажденных при одинаковых условиях. Результат контролируемого изменения критической температуры пленок ниобия для TES-поглотителя представлен на рис. 3.

Ниобиевые пленки осаждались в установке магнетронного напыления „UNIVEX 450“ со скоростью 0.27 nm/s. Процесс осаждения был оптимизирован по давлению аргона: пленки наилучшего качества (максимальное T_c и максимальное относительное падение сопротивления при охлаждении) осаждались при $5 \cdot 10^{-3}$ mbar. Сверхпроводящие и транспортные свойства пленок были исследованы на постоянном токе с помощью измерительной вставки в транспортный сосуд Дюара с жидким He^4 ; измерения проводились без стабилизации температуры. Прототип СВЧ-болометра изготавливался с помощью контактной фотолитографии. Вначале на всю поверхность сапфировой подложки осаждалась тонкая (10–20 nm) пленка ниобия для поглотителя, затем с помощью метода взрывной фотолитографии из второго слоя Nb толщиной 200 nm формировались копланарный резонатор, антенна и линия накачки. Для получения „чистого“ электрического контакта между слоями ниобия

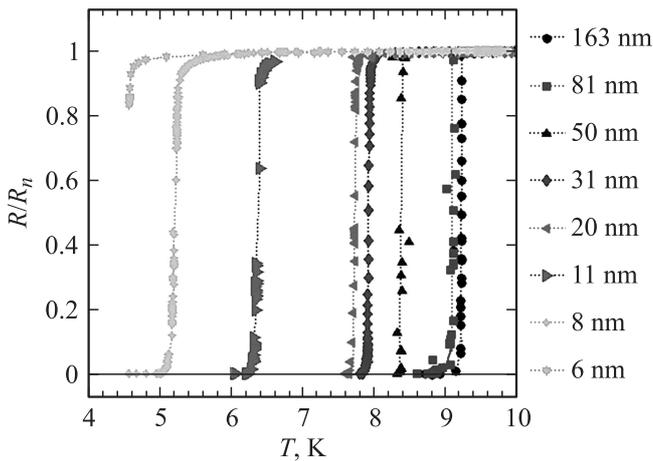


Рис. 3. Зависимости нормированного сопротивления от температуры, $R(T)/R_n$, для тестовых пленок из ниобия при уменьшении их толщины.

перед напылением верхнего слоя применялась ионная чистка поверхности нижнего слоя с помощью аргоновой пушки. Поглотитель с размерами $5\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m} \times 15\text{nm}$ формировался путем травления нижнего слоя ниобия пучком ионов Ag^+ , используя в качестве маски фоторезист в области поглотителя и второй толстый слой ниобия на остальной площади чипа. Параметры пленок поглотителя на постоянном токе оценивались не прямым измерением, а с помощью образца-свидетеля с такой же геометрией поглотителя. Это связано с тем, что прямое подключение на постоянном токе к поглотителю в резонаторе невозможно.

Моделирование

Экспериментальные данные (рис. 2) показывают, что при увеличении мощности накачки, начиная с некоторого порогового значения мощности, вблизи резонансной частоты появляется особенность отклика. Это можно объяснить как переключение в режим малой добротности, что происходит при достижении максимального (критического) тока в резонаторе. Такое поведение прибора благоприятно для режима счетчика фотонов, но нежелательно для применений в качестве болометра с линейным откликом.

Для исследования режимов работы болометра, в частности для выработки методики вывода его в рабочую точку, а также для оценки чувствительности, проводилось численное квазистатическое моделирование в системе MATLAB-Simulink™. Для этого была предложена модель прибора, представленная на рис. 4. Она позволяет получить численное решение для температуры поглотителя и его сопротивления, а также оценку отклика прибора на внешний терагерцовый сигнал при любой, заданной наперед, мощности накачки и температуры криостата. Модель прибора состоит из четырех подсистем, включающих в себя линейные электродинамические параметры рассеивания $S21(R_{\text{TES}})$ и $S31(R_{\text{TES}})$,

а также зависимости теплообмена $R_{\text{TES}}(T_e)$ и $T_e(P_J)$ для трех внешних параметров P_{in} , T_{bath} , P_{THz} . Подсистемы $S21(R_{\text{TES}})$ и $S31(R_{\text{TES}})$ характеризуют отклик системы на изменение среднего значения сопротивления поглотителя в резонаторе.

Распределение СВЧ-мощности в системе „линия накачки–резонатор с переменной добротностью“ можно получить, проведя электромагнитное моделирование структуры, изображенной на рис. 1. На рис. 5 представлены зависимости распределения фиксированной мощности накачки P_{in} , подводимой к линии накачки (к чипу), от сопротивления R_{TES} поглотителя в резонаторе в виде параметров рассеивания в децибелах: $S21$ — коэффициент передачи мощности на выходной порт чипа, $S31$ — передача на поглотитель болометра в виде тепловой мощности P_J .

Из рис. 5 видно, что при малых значениях сопротивления разогрев поглотителя (рост его сопротивления) приводит к росту выделяемой на нем мощности, т.е. имеет место положительная обратная связь (ПОС). И лишь при достижении некоего порогового значения сопротивления дальнейший нагрев вызывает уменьшение мощности поглощения, что эквивалентно наличию отрицательной обратной связи (ООС).

Отметим, что перевод болометра из сверхпроводящего состояния в состояние с конечным сопротивлением внутри зоны сверхпроводящего перехода с помощью варьирования СВЧ-мощности практически обречен на неудачу. Из-за положительной обратной связи, возникающей при малых сопротивлениях, имеет место не просто быстрое, а самоускоряющееся (лавинное) переключение поглотителя либо в нормальное, либо обратно в сверхпроводящее состояние; разогрев или охлаждение поглотителя СВЧ-током происходят с собственной (максимальной) скоростью реакции системы, что ведет к ее неустойчивости. Таким образом, процесс перегрева

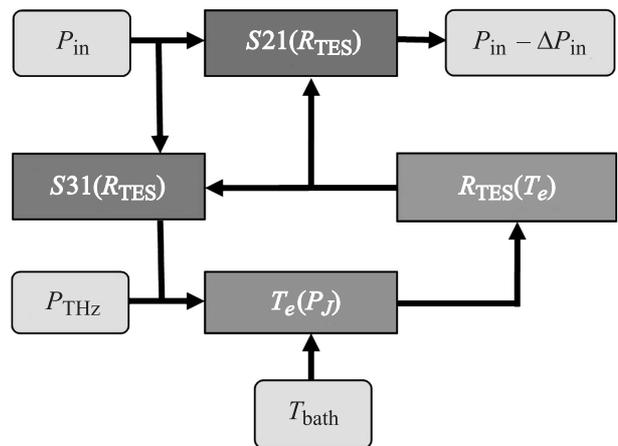


Рис. 4. Блок-схема модели прибора для моделирования его работы с использованием системы MATLAB-Simulink™. Подсистемы $S21(R_{\text{TES}})$, $S31(R_{\text{TES}})$ получены путем электромагнитного моделирования чипа, включая линию накачки, антенну и резонатор. Подсистемы $R_{\text{TES}}(T_e)$, $T_e(P_J)$ являются характеристиками поглотителя.

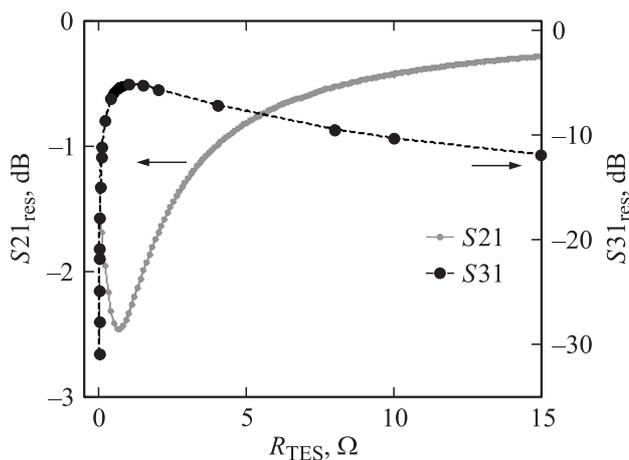


Рис. 5. Рассчитанные с помощью электромагнитного моделирования зависимости распределения фиксированной мощности накачки P_{in} , подводимой к чипу, от сопротивления R_{TES} поглотителя в резонаторе в виде параметров рассеивания, в децибелах.

происходит лавинообразно, аналогично переключению пленки из сверхпроводящего в резистивное состояние под воздействием постоянного тока. Более того, анализ мощности переключения дает амплитуду СВЧ-тока, практически равную току переключения свидетеля при измерении его на постоянном токе, т.е. равную критическому току пленки. Продолжив аналогию с измерениями на постоянном токе, заметим, что токи меньше критического, именно такие токи соответствуют состоянию внутри сверхпроводящего перехода и могут оказаться доступными при движении вниз по току в петле гистерезиса, т.е. при уменьшении СВЧ-мощности для нашего прибора, при условии, что он уже находится в нормальном состоянии. Такой режим не удалось реализовать в описанной выше конфигурации эксперимента, так как свипирование по частоте происходило при постоянной мощности накачки.

Подсистемы $R_{TES}(T_e)$, $T_e(P_J)$ в модели рис. 4 относятся к самому поглотителю. Сопротивление поглотителя R_{TES} в области сверхпроводящего перехода сильно зависит от температуры его электронного газа T_e . Для построения модели в качестве зависимости $R_{TES}(T_e)$ использовались экспериментальные данные, полученные для образца-свидетеля на постоянном токе. Пленка поглотителя представлялась в виде нескольких взаимодействующих термических подсистем, представленных на рис. 6. Температура электронной подсистемы T_e изменяется за счет поглощения СВЧ-мощности от двух источников: от резонатора на частоте около 6 GHz и от терагерцовой антенны, $P_J = P_{THz} + P_{RF}$. Поглощенная мощность сбрасывается в виде потока тепла через фононную подсистему поглотителя в сапфировую подложку, температура T_{bath} которой поддерживается постоянной. Временной шаг квазистатического моделирования ограничен снизу постоянной времени поглотителя $\tau = C/G$ (C — теплоемкость поглотителя,

G — коэффициент теплопроводности от поглотителя к подложке). Предполагается, что для принимаемого сигнала f_{THz} и сигнала накачки f_{THz} , $f_{res} \gg 1/\tau$, и поглотитель настолько инертен, что не чувствует фазу переменного тока, т.е. работает как квадратичный детектор. Если подать на поглотитель мощность P_J , то через время τ установятся вполне определенные различные температуры электронной и фононной подсистем, которые, согласно [5], в тонких Nb пленках связаны друг с другом следующим образом:

$$P_J = \nu \Sigma (T_e^4 - T_{ph}^4). \quad (1)$$

Здесь $\nu \approx 0.2 \mu m^3$ — объем поглотителя, $\Sigma = 8.2 \cdot 10^9 W/(\mu m^3 \cdot K^4)$ — параметр материала [5], T_{ph} — температура фононов, T_e — температура разогретого электронного газа. Соотношение (1) напрямую связано с зависимостью времени электрон-фононного взаимодействия от температуры, которая для тонких пленок ниобия имеет вид $\tau_{e-ph} \propto T^2$. Теоретическое рассмотрение вопроса о температурной зависимости τ_{e-ph} для тонких сильно неупорядоченных пленок является сложной задачей. Полного понимания зависимости $\tau_{e-ph} \propto T^2$ для ниобиевых пленок на сегодня нет, и она определяется экспериментально. Согласно [6], $\tau_{e-ph} \approx 1$ ns при 4.5 K, а коэффициент диффузии для электронов $D \approx 1$ cm²/s. Таким образом, условие $f_{res} \gg 1/\tau$ достаточно хорошо выполняется. Благодаря тому, что длина поглотителя значительно больше диффузионной длины для электронов $(D\tau_{e-ph})^{1/2}$, влиянием теплоотвода в контакты можно пренебречь.

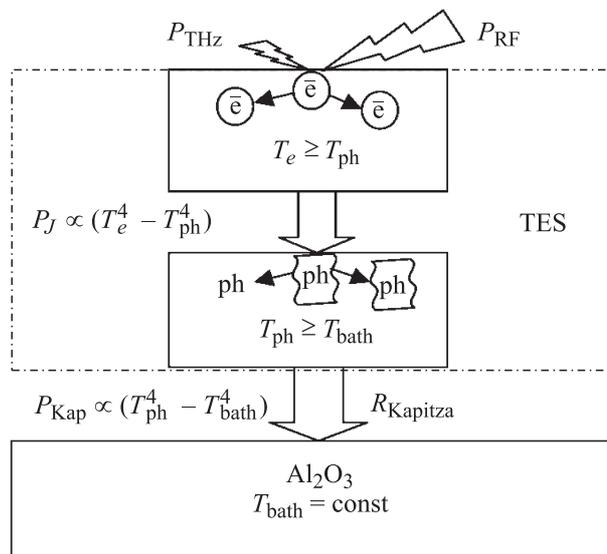


Рис. 6. Схематичное представление поглотителя в виде нескольких взаимодействующих термических подсистем. Из-за того, что при низких температурах время электрон-электронного взаимодействия меньше времени электрон-фононного взаимодействия, температуры электронного газа и температура решетки поглотителя различны. Также при гелиевых температурах приходится учитывать эффект Капицы, характеризующий скачок температуры на границе пленка-подложка.

Вкладом коэффициента теплопроводности границы пленка-подложка (сопротивлением Капицы) в постоянную времени обычно пренебрегают, полагая его намного бóльшим по сравнению G_{e-ph} . Поток тепла через границу $P_{Кар}$ определяется соотношением

$$P_{Кар} = \sigma A(T_{ph}^4 - T_{bath}^4). \quad (2)$$

Здесь $A \approx 12.5 \mu m^2$ — площадь контакта поглотителя с подложкой, $\sigma \approx 5 \cdot 10^{-10} W/(\mu m^2 K^4)$ — постоянная, характеризующая интерфейс ниобий-сапфир, которую можно грубо оценить из моделей рассогласования акустических импедансов и диффузионной модели [7]. Видно, что даже без учета малой толщины пленки (эффективная двумерность фононной подсистемы) вклад сопротивления Капицы не превышает 20%. При динамическом равновесии, очевидно, должно выполняться $P_J \approx P_{Кар}$.

Для модели прибора, построенной в Simulink™, проводилось моделирование во времени при различных внешних параметрах: P_{in} , T_{bath} , P_{THz} . Прежде всего исследовалась методика вывода TES на рабочую точку с промежуточным сопротивлением поглотителя. Именно в области сопротивлений $R_{TES} = 1-5 \Omega$, согласно электромагнитному моделированию рис. 4 и экспериментальным измерениям, $S21(R_{TES})$, $R_{TES}(T_e)$ имеют максимальную крутизну, а $S31(R_{TES})$ должна обеспечивать отрицательную обратную связь по мощности накачки P_{in} . Для нахождения самосогласованного решения разумно выбрать начальное значение параметров для рабочей точки (нулевое приближение) именно в области сопротивлений, где имеет место ООС. Результат моделирования представлен на рис. 7 в виде временных зависимостей P_{in} , T_{bath} и R_{TES} .

Виртуальный эксперимент начинается с охлаждения: на чип не подается мощность накачки, а температура плавно уменьшается от 9 до 4.2 К (линия 1). При этом видно, как сопротивление поглотителя уменьшается до нуля (линия 2) в соответствии с экспериментальной кривой $R(T)$. После достижения базовой температуры предпринимается попытка выйти в рабочую точку (на рабочую температуру поглотителя) путем простого увеличения мощности накачки (линия 3) до значения, заведомо превышающего равновесное состояние внутри зоны перехода. Однако из-за того что пленка находится в сверхпроводящем состоянии, СВЧ-мощность накачки практически не поглощается ($S31$ бесконечно мал). Очевидно, что инициализация разогрева невозможна без перехода в нормальное состояние, и поглотитель остается в сверхпроводящем состоянии (линия 2) вплоть до уровня мощности СВЧ, соответствующей критическому току пленки.

Перевод пленки в резистивное состояние с помощью изменения температуры криостата видится нецелесообразным, так как этот процесс инерционен. Такая инерционность чревата высокой вероятностью срыва в петлю гистерезиса и переходом в сверхпроводящее состояние. Изменение мощности накачки также является непростой задачей, так как возможные случайные отклонения в

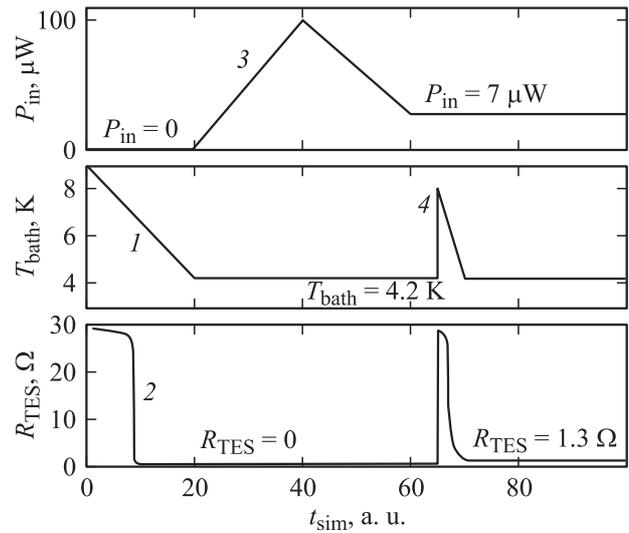


Рис. 7. Моделирование вывода TES-поглотителя в рабочую точку во времени: 1 — охлаждение криостата с 9 до 4.2 К при нулевой мощности накачки, 2 — сверхпроводящий переход в поглотителе, 3 — увеличение мощности накачки до предельного (оценочного) значения с целью вывести поглотитель в промежуточное состояние и последующее снижение до минимальной (оценочной) мощности устойчивой работы, 4 — импульсный нагрев прибора выше критической температуры поглотителя.

процессе инкрементального изменения мощности могут также привести к срыву в гистерезис. Нами предлагается схема, изображенная на рис. 7, которая предполагает импульсный нагрев прибора от температуры около 4.2 К до температуры выше T_c поглотителя при наличии некоторых предустановленных и стабилизированных мощности накачки и температуры криостата T_{bath} . Такая процедура обеспечивает плавный проход по петле гистерезиса выше критического тока и последующую релаксацию к равновесному сопротивлению поглотителя внутри зоны сверхпроводящего перехода, что показывают „хвосты“ линий (рис. 7). Значение предустановленной мощности накачки для заданной температуры можно получить путем расчета из экспериментальных параметров пленки, как было показано выше.

После выхода на рабочую точку в нашем виртуальном эксперименте можно исследовать зависимость R_{TES} от поглощенной на болометре мощности P_J , используя соотношение для среднеквадратичных значений тока и напряжения на поглотителе:

$$\begin{cases} I_{RF} = \sqrt{P_J/R_{TES}} \\ V_{RF} = \sqrt{P_J R_{TES}} \end{cases} \quad (3)$$

На основе (3) было построено семейство вольт-амперных характеристик (ВАХ) поглотителя в резонаторе $I_{RF}(V_{RF})$ (рис. 8) для нескольких температур криостата.

Полученные ВАХ имеют такой же вид, как и ВАХ НЕВ-смесителей (Hot Electron Bolometer mixers) и тра-

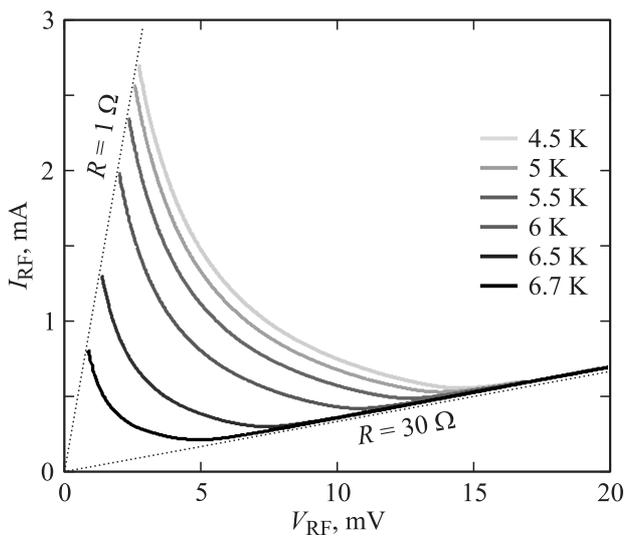


Рис. 8. Вычисленные ВАХ-поглопителя в резонаторе. Каждая точка на кривых является самосогласованным решением для зависимости $P_J(R_{\text{TES}}(T_e[P_J, T_{\text{bath}}]))$ при различных температурах криостата T_{bath} и мощности P_J на поглотителе. Отрицательный наклон кривых при малых напряжениях говорит о том, что резонатор является „источником постоянного напряжения“ для поглотителя, который обеспечивает стабилизацию TES посредством отрицательной электротермической связи.

диционных TES-боллометров на постоянном токе, которые стабилизируются обратной электротермической связью [8,9].

Для полученной модели прибора (рис. 4) можно сделать оценки вольт-ваттной чувствительности (S), коэффициента усиления (G), мощности насыщения (P_{sat}) и мощности, эквивалентной шуму (NEP). На поглотитель, находящийся в рабочей точке, в нашем виртуальном эксперименте подавалась дополнительная „пробная“ тепловая мощность, которая ассоциировалась с сигналом, принимаемым терагерцовой антенной ΔP_{THz} , а затем вычислялось изменение мощности на выходе линии накачки ΔP_{in} . В системе с TES-боллометром обнаруживается коэффициент усиления мощности, который составил в нашем конкретном случае $G = \Delta P_{\text{in}}/\Delta P_{\text{THz}} \approx 6.5$. Дифференцируя соотношение напряжения и мощности в согласованной линии накачки $Z_0 = 50 \Omega$, получим амплитуду модуляции напряжения на выходе прибора:

$$\Delta U_{\text{in}} = \frac{\Delta P_{\text{in}} Z_0}{2\sqrt{P_{\text{in}} Z_0}}. \quad (4)$$

Используя (4), получим вольт-ваттную чувствительность $S = \Delta U_{\text{in}}/\Delta P_{\text{THz}} \approx 23\,000 \text{ V/W}$. Если на выход прибора поставить холодный полупроводниковый усилитель, значение шумовой температуры которого $T_N \approx 3 \text{ K}$ [10], что меньше физической температуры $T_{\text{bath}} = 4.5 \text{ K}$, можно считать, что тепловые шумы доминируют. Вычислив мощность шума усилителя в полосе 1 Hz , получим $\Delta U_{\text{noise}} \approx 9 \cdot 10^{-11} \text{ V/Hz}^{1/2}$ и $\text{NEP} = \Delta U_{\text{noise}}/S \approx 4 \cdot 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$. Полученное значение NEP можно считать неплохим для достаточно

массивного прибора (микронного размера), работающего при гелиевых температурах. Мощность насыщения составила $P_{\text{sat}} \approx 7 \mu\text{W}$, что определялось как мощность теплового сигнала, при которой сопротивление болометра становилось примерно равным нормальному сопротивлению $R_{\text{TES}} \approx 0.9 R_N$.

Заключение

Из проведенного анализа видно, что новый прибор действительно является разновидностью TES-боллометра, использующего саморазогрев током накачки в гигагерцовом диапазоне частот, и при правильном выборе параметров электродинамической системы, включающей высокодобротный сверхпроводниковый резонатор, может работать в режиме с обратной электротермической связью, что обеспечивает стабилизацию в заданной рабочей точке внутри сверхпроводящего фазового перехода пленки с максимальной чувствительностью к внешним тепловым и электрическим СВЧ-сигналам, включая сигналы от терагерцовых источников.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 12-02-01352-а) и Министерства образования и науки России (контракты № 11.G34.31.0062, № 11.G34.31.0029).

Список литературы

- [1] Шитов С.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 19. С. 88–94.
- [2] Kuzmin A.A., Shitov S.V., Il'in K.S., Meckbach J.M., Wuensch S., Siegel M., Ustinov A.V. // IEEE Trans. Terahertz Sci. Tech. 2013.
- [3] Kuzmin A.A., Shitov S.V., Il'in K.S., Meckbach J.M., Wuensch S., Siegel M., Ustinov A.V. // Abstract book. The 2nd Intern. Conf. „Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications“ — TERA'2012. M. State University, 2012. P. 52.
- [4] Park S.I., Geballe T.H. // Physica B + C. 1985. Vol. 135. N 1–3. P. 108–112.
- [5] Gershenzon E.M., Gershenzon M.E., Gol'tsman G.N., Lyul'kin A.M., Semenov A.D., Sergeev A.V. // Sov. Phys. ZhETP. 1990. Vol. 70, N. 3, P. 505–511.
- [6] Swartz E.T., Pohl R.O. // Rev. Mod. Phys. 1989. Vol. 61. N. 3. P. 605–668.
- [7] Burke P.J., Schoelkopf R.J., Prober D.E., Skalare A., Karasik B.S., Gaidis M.C., McGrath W.R., Bumble B., LeDuc H.G. // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85. N. 3. P. 1644–1653.
- [8] Gershenzon E.M., Gol'tsman G.N., Gogidze I.G., Gousev Y.P., Elantiev A.I., Karasik B.S., Semenov A.D. // Sov. Phys. Superconduct. 1990. Vol. 3. P. 1582.
- [9] Lee A.T., Richards P.L., Nam S.W., Cabrera B., Irwin K.D. // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69. N. 12. P. 1801–1803.
- [10] Wadefalk N., Mellberg A., Angelov I. et al // IEEE Trans. Microwave Theor. Tech. 2003. Vol. 51. N. 6. P. 1705–1711.