УДК 535.34+621.314.26+538.945

ТЕРАГЕРЦЕВЫЙ ГЕТЕРОДИННЫЙ ПРИЁМНИК СО СМЕСИТЕЛЕМ НА ЭФФЕКТЕ ЭЛЕКТРОННОГО РАЗОГРЕВА И ГЕТЕРОДИНОМ НА ОСНОВЕ КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА

С. В. Селиверстов¹*, В. А. Анфертьев^{2,3}, И. В. Третьяков^{1,2}, И. А. Ожередов⁴, П. М. Солянкин⁴, Л. С. Ревин^{2,3}, В. Л. Вакс^{2,3}, А. А. Русова¹, Г. Н. Гольцман^{1,5}, А. П. Шкуринов⁴

¹ Московский педагогический госуниверситет, г. Москва;
² Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород;
³ Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;
⁴ Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова, г. Москва;
⁵ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

Исследованы характеристики лабораторного макета терагерцевого гетеродинного приёмника с смесителем на эффекте электронного разогрева и гетеродином на основе квантово-каскадного лазера. Полученные в работе результаты демонстрируют возможность создания на основе этого приёмника чувствительного терагерцевого спектрометра, предназначенного для решения ряда фундаментальных и практических задач. При этом существенным преимуществом такого приёмника станет возможность размещения смесителя и гетеродина в одном криостате, что приведёт к значительному уменьшению размеров прибора. Проанализированы полученные экспериментальные результаты и предложены методы оптимизации параметров приёмника.

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцевый диапазон частот расположен между микроволновой и инфракрасной областями спектра. Интерес к этому диапазону в последнее десятилетие значительно возрос что обусловлено необходимостью решения ряда актуальных фундаментальных и прикладных задач в области терагерцевой спектроскопии высокого разрешения, радиоастрономических исследований, систем связи и безопасности, медицинских приложений. Возросший интерес связан, прежде всего, с появлением новых источников и приёмников терагерцевого излучения.

Тем не менее, поскольку хорошо разработанные способы генерации излучения в микроволновом и инфракрасном диапазонах плохо применимы для генерации в терагерцевой области, создание эффективных широкополосных источников терагерцевого диапазона остаётся существенной проблемой. В частности, для генерации частотно-стабильного терагерцевого излучения применяется умножение частоты опорного синтезатора. В качестве умножителей традиционно используются планарные полупроводниковые диоды с барьером Шоттки, однако их применение на частотах выше 1 ТГц (в качестве как смесителей, так и умножителей частоты) затруднено, т. к. такие структуры имеют относительно высокую паразитную ёмкость и сравнительно больши́е времена пролёта носителей [1]. Более перспективными приборами для умножения частоты (а также для смешивания) являются устройства на основе квантовых полупроводниковых сверхрешёток [2, 3]. Однако главной проблемой при их использовании является низкая мощность генерируемого терагерцевого излучения, особенно на высоких гармониках. Используются также лампы обратной волны, в которых генерация терагерцевого излучения происходит при наличии сильных электрических и магнитных полей в ограниченном объёме пространства. Однако данные устройства

^{*} seliverstovsv@mail.ru

являются довольно громоздкими, относительно медленно перестраиваются по частоте, а потому не всегда удобны в использовании.

В противовес указанным подходам в настоящее время широкие перспективы открываются на пути использования компактных полупроводниковых приборов, генерация терагерцевого излучения в которых основана на межподзонных переходах. Такие приборы получили название квантово-каскадных лазеров (ККЛ) [4, 5]. Хотя данные устройства необходимо охлаждать до криогенных температур, что связано с невозможностью добиться долговременной и устойчивой инверсной заселённости уровней при комнатной температуре, они являются компактными, а мощность генерируемого ими излучения достаточна для множества практических применений.

Для осуществления когерентного приёма терагерцевого излучения требуется использовать смесительный элемент. Эффект разогрева электронов в сверхпроводниковых плёнках (NbN, Nb, NbTiN, MoRe и др.) позволил разработать уникальные приёмники электромагнитного излучения с рекордно высокой чувствительностью и быстродействием, а именно сверхпроводниковые болометры (Hot Electron Bolometer, HEB) [6], которые могут работать в режиме смесителей. Особо важными параметрами смесителя на основе НЕВ являются шумовая температура и полоса промежуточных частот, т. к. именно эти параметры определяют чувствительность болометров, а поэтому и возможность их применения в различных практических задачах. Уменьшение шумовой температуры и увеличение полосы промежуточных частот важны для широкополосных спектральных наблюдений. Например, смесители, используемые в таких инструментах для астрономических наблюдений, как HIFI космической обсерватории «HERScHEL» и GREAT обсерватории самолётного базирования, имеют полосу промежуточных частот менее 3,5 ГГц [7].

Шумовая полоса, определяемая диапазоном частот, где шумовая температура не превышает двукратного минимального значения, для HEB-смесителей, как правило, шире полосы промежуточных частот. Важную роль в уменьшении шумовой температуры смесителя играет качество контактов. Впервые это было показано в работе [8], где очистка сверхпроводниковой плёнки NbN перед осаждением металлических контактов, а также дополнительный буферный слой сверхпроводника для предотвращения влияния их близости позволили уменьшить шумовую температуру в 2 раза. На частоте гетеродина 2,5 ТГц шумовая температура составила около 950 К. Следующим шагом по улучшению контакта было осаждение сверхпроводящей (NbN) и металлической (Au) плёнок в одном технологическом процессе (in situ), что гарантировало отсутствие дополнительного загрязнения на границе сверхпроводника и нормального металла [9].

В данной работе охарактеризован терагерцевый гетеродинный приёмник с НЕВ-смесителем и гетеродином на основе ККЛ. Приведены результаты измерения шумовой температуры смесителя в такой конфигурации. Особый интерес представляет использование охлаждаемого ККЛ в качестве гетеродина. Во-первых, это позволило получить достаточную мощность терагерцевого излучения для накачки НЕВ-смесителя. Во-вторых, открывается возможность совмещения в одном криостате как смесителя, так и гетеродина, что позволит создать единый компактный охлаждаемый приёмный модуль.

Идея использования ККЛ в качестве гетеродина для терагерцевого приёмника уже использовалась ранее в работах других авторов. В частности, в работе [10] подробно описан инструмент GREAT обсерватории SOFIA. Отличие нашей гетеродинной системы заключается в том, что мы применили квазиоптическое согласование смесителей с излучением, а не волноводное, которое было использовано в инструменте GREAT. Квазиоптическая схема согласования имеет ряд преимуществ по сравнению с волноводной. В первую очередь, это связано с тем, что квазиоптическая схема согласования может быть использована для излучения с гораздо меньшей длиной волны, чем волноводная схема согласования. Кроме того, создание рупора для согласования смесителя с излучением на частотах выше 1 ТГц представляет собой нетривиальную технологическую

задачу.

В работе [11] представлена терагерцевая гетеродинная система на основе ККЛ и сверхпроводникового болометра в качестве смесителя. Полученная шумовая температура в предложенной конфигурации составила 1 400 К. При этом частота излучения гетеродина равнялась 2,8 ТГц. В более поздних работах [12, 13] использовался ККЛ с более высокой частотой излучения (3,8 и 4,7 ТГц). Интересной, однако, остаётся задача создания гетеродинной системы, оптимизированной для частотного диапазона вблизи 2,0 ТГц, характеристика лабораторного образца которой представлена в данной работе. Данная технология будет использована в индустрии систем безопасности и детектирования опасных веществ. Одними из основных продуктов естественного и термического разложения взрывчатых веществ, таких как тринитротолуол (TNT), нитроглицерин (NG) и октоген (HMX), являются формальдегид (CH₂O), N₂O и NO [14, 15]. Большое число наиболее интенсивных линий поглощения формальдегида лежит в диапазонах от сотен гигагерц до 2,3 ТГц, для N₂O — от сотен гигагерц до 2,1 ТГц.

1. ГЕТЕРОДИН

Мы использовали ККЛ, изготовленный в университете города Лидс (Великобритания), с частотой излучения 2,006÷2,007 ТГц. Для охлаждения ККЛ был применён гелиевый криостат замкнутого цикла DE210S фирмы «Advanced Research Systems». Для уменьшения вибраций, возникающих при работе компрессора, в конструкцию криостата были внесены изменения: между второй ступенью и холодной платой криостата был установлен вибропоглощающий интерфейс на основе гибких медных теплообменников. Температура ККЛ определялась с точностью 0,03 К с помощью закреплённого на нём калиброванного кремниевого диода. Минимальная температура, которую удалось достичь на холодной плате данного криостата и держателем с установленным на нём ККЛ мы использовали серебряную токопроводящую пасту. Для обеспечения хорошего термоконтакта между холодной платой криостата и держателем ККЛ в месте винтового крепления была установлена индиевая прокладка.

Фотография внутренней части используемой вакуумной камеры с криостатом и установленным оборудованием представлена на рис. 1. Юстировка квазиоптического тракта осуществлялась по видимому лучу гелий-неонового лазера. Излучающая грань ККЛ была установлена в фокусе внеосевого параболического зеркала с фокусным расстоянием 50 мм, формирующего параллельный пучок лучей с диаметром 50 мм. Излучение ККЛ на выходе имело линейную поляризацию (вектор напряжённости электрического поля волны был перпендикулярен горизонтальной плоскости лазера). Для оптимальной юстировки держатель ККЛ был повёрнут вокруг вертикальной оси на 10° относительно излучающей грани. Этот угол соответствовал углу отклонения главного лепестка диаграммы направленности ККЛ относительно плоскости ККЛ. После внеосевого параболического зеркала под углом 45° к пучку излучения было установлено плоскопараллельное зеркало, направляющее пучок терагерцевого излучения в выходное окно вакуумной камеры с диаметром 25 мм. Для оптимизации вывода излучения из вакуумной камеры внутри неё была установлена собирающая линза из полиэтилена высокой плотности так, что фокальная плоскость линзы совпадала с выходным окном камеры. Дополнительное внеосевое параболическое зеркало с диаметром 25 мм, установленное снаружи вакуумной камеры так, что его фокус совпадал с центром окна камеры, обеспечивало формирование паралелльного пучка излучения, диаметр которого соответствовал диаметру входного окна криостата приёмника.

Изменяя длительность импульса питания ККЛ, мы варьировали фактор заполнения в широком диапазоне вплоть до режима непрерывной генерации. С увеличением фактора заполнения



Рис. 1. Фотография внутренней части криостата (вакуумного объёма) с установленным оборудованием: 1- холодная плата, 2- ККЛ, 3- плоскопараллельное зеркало, 4- внеосевое параболическое зеркало, 5- выходное окно

возрастала и температура холодной платы криостата. Перестройка мощности генерируемого терагерцевого излучения осуществлялась за счёт изменения тока смещения ККЛ. В режиме непрерывной генерации при токе питания 960 мА температура холодной платы криостата составляла около 33 К.

Мощность излучения ККЛ в режиме непрерывной генерации при токе смещения 1 А, измеренная с помощью оптико-акустического приёмника, составила величину порядка 100 мкВт. Фотографии профиля коллимированного пучка ККЛ, полученные с помощью терагерцевой камеры при различных значениях тока смещения и фактора заполнения, представлены на рис. 2.

2. СМЕСИТЕЛЬ

В качестве смесителя был использован сверхпроводниковый болометр на эффекте электронного разогрева с квазиоптической схемой его согласования с входным излучением. Данный болометр изготавливался на основе двухслойной структуры NbN-Au на подложке из высокоомного кремния. Толщина слоя NbN составляла около 4 нм, слоя Au — около 20 нм. Слои наносились один за другим в едином технологическом процессе без перерыва поддержания вакуума (in situ). Это условие позволило избавиться от образования паразитного оксидного слоя на поверхности



Рис. 2. Профиль интенсивности коллимированного пучка излучения квантово-каскадного лазера: (*a*) ток смещения 953 мА, фактор заполнения (dutycycle) 10%; (*б*) ток смещения 1000 мА, фактор заполнения 10%; (*в*) ток смещения 955 мА, фактор заполнения 100% (непрерывный режим); (*г*) ток смещения 1000 мА, фактор заполнения 100% (непрерывный режим);

NbN-плёнки, что привело к существенному улучшению чувствительности смесителя.

Чувствительный элемент болометра представлял собой участок плёнки NbN с размерами 0,2 мкм в длину и 2 мкм в ширину, очищенный от атомов Au. Типичное поверхностное сопротивление плёнки NbN составляло около 500 Ом на квадрат. Поэтому выбранное соотношение длины и ширины чувствительного элемента обеспечивало его оптимальное согласование с используемой планарной логарифмической спиральной антенной.

Падающее излучение фокусировалось на планарной антенне с помощью гиперполусферической линзы из высокоомного кремния. Специальный держатель с закреплённой в нём линзой с чипом детектора устанавливался на холодной плате оптического криостата для жидкого гелия. Окно криостата было изготовлено из полиэтилена высокой плотности с толщиной 0,3 мм. Для фильтрации инфракрасного излучения был использован фильтр «Zitex G104», установленный на холодном экране криостата.

Цепь промежуточной частоты содержала широкополосный адаптер смещения, соединённый с низкошумящим охлаждаемым усилителем с коэффициентом усиления 23 дБ в полосе, верхняя граница которой составляла 12 ГГц, и шумовой температурой порядка 5 К. Предварительно усиленный сигнал с помощью коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом выводился из криостата и поступал на вход второго каскада усиления, который состоял из усилителя с коэффициентом усиления 23 дБ в полосе с верхней границей выше 12 ГГц, работающего при комнатной температуре. Выходной сигнал регистрировался с помощью анализатора спектра.



Рис. 3. Схема экспериментальной установки по измерению шумовой температуры смесителя: 1 — чёрное тело с температурой 77 или 300 К, 2 — делитель луча, 3 — ККЛ в криостате 4, 5 — НЕВ в криостате 6, 7 — усилитель, 8 — анализатор спектра



Рис. 4. Вольт-амперные характеристики смесителя без излучения ККЛ (сплоппная кривая) и под воздействием излучения ККЛ с меньшей (пунктирная кривая) и большей (штрихпунктирная кривая) мощностью. Стрелками показано направление изменения тока смещения НЕВ в петле гистерезиса. Рабочая точка обозначена эллипсом

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для измерения шумовой температуры была собрана гетеродинная система, блок-схема которой представлена на рис. 3. Коллимированный пучок излучения ККЛ попадал на делитель луча, в качестве которого использовалась натянутая майларовая плёнка. Делитель луча устанавливался под некоторым оптимальным углом к пучку излучения, при котором порядка 11% мощности излучения отражалось на смеситель. В такой схеме удавалось совместить излучение гетеродина и сигнальное излучение от чёрного тела в одном пучке, который поступал во входное окно криостата со смесителем. Потери мощности сигнального излучения при его прохождении через делитель луча составляли около 11% за счёт отражения.

На рис. 4 представлены вольт-амперные характеристики смесителя, которые были получены при различных мощностях ККЛ. Как видно, мощности сфокусированного на смеситель излучения гетеродина было достаточно, чтобы привести смеситель в рабочее состояние. На графике эллипсом обозначена рабочая точка НЕВ.

В эксперименте по измерению двухполосной шумовой температуры, как правило, используют методику *Y*-фактора [16], в которой шумовая температура вычисляется по формуле

$$T_{\rm n}^{\rm DSB} = \frac{T_{\rm hot} - Y T_{\rm cold}}{Y - 1} \,, \tag{1}$$

где $T_{\rm hot} = 300$ К и $T_{\rm cold} = 77$ К — температуры нагрузок, которые представляют собой абсолютно чёрные тела, Y — отношение $P_{\rm hot}/P_{\rm cold}$ уровней мощности на выходе смесителя для горячих (индекс hot) и холодных (индекс cold) нагрузок на входе болометра. Мощность теплового излучения нагрузок, не ограниченная специальным образом, может вызывать болометрический отклик смесителя при смене горячей и холодной нагрузок на входе. Болометрический отклик приводит к сдвигу рабочей точки смесителя на вольт-амперной характеристике синхронно со сменой нагрузок на входе, что, в свою очередь, вызывает изменение коэффициента преобразования и непропорциональное температуре нагрузки изменение выходного шума смесителя. При измерениях шумовой температуры смесителя данный эффект оказывает негативное влияние, т. к. искажает

584

измеряемый *Y*-фактор. Этот эффект называют эффектом прямого детектирования [17]. Для его подавления на холодном экране криостата устанавливался фильтр.

С помощью анализатора спектра определялся уровень выходного шума смесителя при двух нагрузках на входе — горячей (при комнатной температуре) и холодной (при температуре жидкого азота). Исходя из этих данных вычислялся коэффициент Y и шумовая температура смесителя. Полученная шумовая температура смесителя составила 1500 К. Вклад прямого детектирования также был оценён в ходе эксперимента. В случае использования охлаждаемого фильтра на входе при оценке шумовой температуры изменение последней при прямом детектировании не превышает 5%, что соизмеримо с погрешностью эксперимента.

Полученная шумовая температура смесителя в предложенной конфигурации позволяет надеяться на возможность создания терагерцевой гетеродинной системы, обладающей высокой чувствительностью. При этом в работе [19] для аналогичных смесителей на частоте излучения 2,5 ТГц шумовая температура составила 600 К. Дальнейшая работа по улучшению чувствительности предложенного варианта гетеродинной системы будет направлена на снижение потерь мощности сигнала в оптических компонентах. Потери мощности в используемой кремниевой линзе без антиотражающего покрытия при температуре 4 К составляют около 1,5 дБ, в делителе луча при комнатной температуре — около 0,5 дБ, в инфракрасных фильтрах при температуре 77 К около 0,6 дБ. К некоторому снижению сигнала и, соответственно, увеличению шумовой температуры приводит также неидеальное согласование чувствительного элемента болометра с 50-омным высокочастотным трактом.

Спектральное разрешение предложенной системы определяется шириной линии гетеродина, уменьшение которой возможно путём использования системы фазовой автоподстройки частоты ККЛ. Подобные системы уже применялись для стабилизации излучения ККЛ на частоте 3,0 ТГц. При этом стабилизация осуществлялась по сигналу молекулярного лазера, что позволило получить ширину линии излучения на уровне 65 кГц [18]. Существенным преимуществом предложенного варианта терагерцевой гетеродинной системы является возможность размещения смесителя и гетеродина в одном криостате, который будет представлять собой единый компактный приёмный модуль.

В работе [19] приведены результаты исследования шумовой температуры смесителя на основе диода Шоттки, работающего при комнатной температуре. Измеренная шумовая температура составила 11 000 К на частоте излучения гетеродина (ККЛ) 2,52 ТГц и 20 000 К на частоте 2,9 ТГц. Таким образом, представленный в данной работе гетеродинный приёмник демонстрирует на порядок меньшую шумовую температуру по сравнению с гетеродинными системами, в которых в качестве смесительного элемента используются диоды Шоттки. Сделанный вывод подтверждают также данные, представленные в обзоре [20]. Вместе с тем использование диодов Шоттки в качестве смесителей позволило бы продвинуться в область более высоких температур (азотных и выше), которые уже достижимы для терагерцевых ККЛ.

Предложенный вариант гетеродинного приёмника может быть использован для решения ряда научных задач, связанных со спектроскопией высокого разрешения. В последних измерениях, посвящённых исследованию характеристик приёмника, в качестве сигнального использовалось излучение от полупроводниковой сверхрешётки, для накачки которой применялась лампа обратной волны с шириной линии генерации 1 кГц. Было показано, что разрешающая способность гетеродинного приёмника задаётся шириной линии излучения ККЛ, измеренное значение которой составило порядка 1 МГц. Данное значение может быть уменьшено путём использования системы фазовой автоподстройки частоты. Полученные в данном эксперименте и дальнейшие результаты будут являться предметом для обсуждения в следующей статье.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе продемонстрирована работа лабораторного образца терагерцевой гетеродинной системы на основе ККЛ в качестве гетеродина и НЕВ в качестве смесительного элемента, предназначенной для решения различных научных и практических задач, связанных с астрономическими наблюдениями, а также спектроскопией высокого разрешения. Предложенный метод позволяет создать компактный терагерцевый гетеродинный приёмник путём объединения гетеродина и смесителя в одном криостате.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 15–12–10035).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Павельев Д. Г., Демарина Н. В., Кошуринов Ю. И. и др. // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38, № 9. С. 1 141.
- 2. Endres C. P., Lewen F., Giesen T. F., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2007. V. 78, No. 4. Art. no. 043106.
- 3. Esaki L., Tsu R. // IBM J. Res. Dev.. 1970. V. 14, No. 1. P. 61.
- 4. Faist J., Capasso F., Sivco D. L., et al. // Science. 1994. V. 264, No. 5158. P. 553.
- 5. Williams B.S., Callebant Y., Kumar S., et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. No. 7. P. 1015.
- Seliverstov S., Maslennikov S., Ryabchun S., et al. // IEEE Trans. Appl. Superconduct. 2015. V. 25, No. 3. P. 1.
- 7. https://www.sofia.usra.edu/.
- 8. Baselmans J. J., Hajenius M., Gao J. R., et al. // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84, No. 11. P. 1958.
- 9. Tretyakov I., Ryabchun S., Finkel M., et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98, No. 3. Art. no. 033507.
- 10. Pütz P., Honingh C. E., Jacobs K., et al. // Astron. Astrophys. 2012. V. 542. Art. no. L2.
- 11. Gao J. R., Hovenier J. N., Yang Z. Q., et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86, No. 24. Art. no. 244104.
- Khosropanah P., Zhang W., Hovenier J.N., et al. // J. Appl. Phys. 2008. V.104, No. 11. Art. no. 113106.
- Kloosterman J. L., Hayton D. J., Ren Y., et al. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102, No. 1. Art. no. 011123.
- 14. Набиев Ш. Ш., Надеждинский А. И., Ставровский Д. Б. и др. // Ж. физ. химии. 2011. Т. 85, № 8. С. 1521.
- 15. Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Анфертьев В. А. и др. // Ж. радиоэлектроники. 2016. № 2. Статья 7.
- Третьяков И.В., Финкель М.И., Рябчун С.А. и др. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 657.
- Baselmans J. J. A., Baryshev A., Reker S. F., et al. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86, No. 16. Art. no. 163503.
- 18. Betz A. L., Boreiko R. T., Williams B. S., et al. // Opt. Lett. 2005. V. 30, No. 14. P. 1837.
- Lee M., Wanke M. C., Lerttamrab M., et al. // IEEE J. Selected Topics Quantum Electron. 2008. V. 14, No. 2. P. 370.
- 20. Maestrini A., Thomas B., Wang H., et al. // Comptes Rendus Physique. 2010. V. 11, No. 7. P. 480.

Поступила в редакцию 27 июля 2016 г.; принята в печать 3 ноября 2016 г.

TERAHERTZ HETERODYNE RECEIVER WITH AN ELECTRON-HEATING MIXER AND A HETERODYNE BASED ON THE QUANTUM-CASCADE LASER

S. V. Seliverstov, V. A. Anfertyev, I. V. Tretyakov, I. A. Ozheredov, P. M. Solyankin, L. S. Revin, V. L. Vaks, A. A. Rusova, G. N. Goltsman A. P. Shkurinov

We study characteristics of the laboratory prototype of a terahertz heterodyne receiver with an electron-heating mixer and a heterodyne based on the quantum-cascade laser. The results obtained demonstrate the possibility to use this receiver as a basis for creation of a high-sensitivity terahertz spectrometer, which can be used in many fundamental and practical applications. A significant advantage of this receiver will be the possibility of placing the mixer and heterodyne in the same cryostat, which will reduce the device dimensions considerably. The obtained experimental results are analyzed, and methods of optimizing the parameters of the receiver are proposed.