

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.Э. БАУМАНА**

**ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ "ТЕХНОМАШ"**

ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

(МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОФОТОНИКИ)

МАТЕРИАЛЫ

**XVIII Международной научно-технической конференции
(Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 6-8 сентября)**

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

МАТЕРИАЛЫ

**XXV Международного симпозиума
(Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 6-8 сентября)**

НАНОИНЖЕНЕРИЯ

МАТЕРИАЛЫ

**V Международной научно-технической конференции
(Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012, 6-8 сентября)**



ОСОБЕННОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

А.В. Войцеховский¹, Н.А. Кульчицкий², А.А. Мельников²,
П.П. Мальцев³, С.Н. Несмелов¹

¹Томский государственный университет, (Томск) e-mail vav@elefot.tsu.ru,

²Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики
(Технический университет, Москва) e-mail n.kulchitsky@gmail.com, melnikov@mirea.ru.

³Учреждение Российской академии наук Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (ИСВЧПЭ РАН)

В работе обсуждаются проблемы, связанные с развитием технологии детекторов излучения терагерцового диапазона. Рассмотрены основные физические явления и недавний прогресс в различных методах детектирования терагерцового излучения (прямого детектирования и гетеродинного детектирования). Обсуждаются преимущества и недостатки сенсоров прямого детектирования и сенсоров с гетеродинным детектированием.

Features detection in terahertz range (A.A. Voytsehovskiy, N.A. Kulchitskiy, A.A. Melnikov, P.P. Maltsev, S.N. Nesmelov). In this paper issues associated with the development of terahertz radiation detector technology are discussed. The basic physical phenomena and recent progress in different types of terahertz detection (direct detection and heterodyne detection) were considered. The advantages and disadvantages of direct detection detectors and heterodyne detection detectors are discussed.

1. ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовое (ТГц) излучение часто рассматривается как излучение в спектральной области спектра, которой соответствует интервал частот 1-10 ТГц (300-30 мкм), и этот диапазон частично перекрывает субмиллиметровый (суб-мм) диапазон длин волн 0,1-3 ТГц (3 мм - 100 мкм) [1,2]. В данной работе принимается, что ТГц диапазон находится в пределах 0,1-10 ТГц и включает ТГц зону и субмиллиметровый диапазон длин волн.

Приборы, действующие в терагерцовом диапазоне, приобретают все большее значение в разнообразных приложениях (например, в охранном, биологическом, медицинском, для газоанализа, для формирования изображений). Исследование излучения в этой спектральной области играет важную роль в астрономических приложениях, поскольку это излучение содержит около половины светимости Вселенной и 98% от всех фотонов, испускаемых с момента Большого Взрыва [1].

В настоящее время существует большое разнообразие сенсоров ТГц излучения, как относительно традиционных (например, болометров), так и основанных на различных принципах и материалах, которые появились недавно. Критическое различие между детектированием в субмиллиметровом диапазоне длин волн и детектировании в инфракрасном диапазоне заключается в малой энергии фотонов.

Серьезная проблема, которая ограничивает применение гетеродинных матриц в субмиллиметровой спектральной области (то есть для при-

ложений высокоразрешающей спектроскопии ($\nu/\Delta\nu \sim 10^6$, где ν - частота, $\Delta\nu$ - интервал частот), или фотометрии ($\nu/\Delta\nu \sim 3-10$) и для формирования изображений, обусловлена технологическими ограничениями твердотельного локального осциллятора (LO) мощности или гетеродина. Из-за значительного ослабления ТГц волны не очень полезны для дальней связи, но вследствие сильного поглощения большинством материалов ТГц излучение предоставляет информацию о физических свойствах материалов.

Воздух эффективно поглощает большинство ТГц длин волн (исключая узкие окна прозрачности около 35 ТГц, 96 ТГц, 140 ТГц и 220 ТГц). ТГц и миллиметровые волны являются эффективными в обнаружении присутствия воды и, таким образом, позволяют эффективно различать различные объекты на человеческих телах (содержание воды в человеческом организме составляет около 60%), поскольку одежды являются прозрачными.

Все ТГц системы обнаружения могут быть подразделены на две группы, когерентные (гетеродинные) системы обнаружения и некогерентные (прямого детектирования) системы обнаружения [1,2]. Первые позволяют определять не только амплитуды сигналов, но также их фазы, что важно для увеличения объема информации, получаемой об объекте. Это позволяет также реализовать наилучшие характеристики чувствительности детектора и его спектрального разрешения. Некогерентные системы обнаружения позволяют опреде-

XVIII М
дять тол
являются
ры, испо
жения, с
из них,
воднико
невыгод
из-за от
($\tau \sim 10^{-7}$ с
неохлажд
Сейч
текторе
ных зон
ных свер
теризую
(NEP) -
ре $T=10$
тельность
виях ни
примене
В 6 м
метровы
часто ис
лаждаем
полосе
детектор
те дейст
при ком
частот. 1
Вт/Гц^{0.5}.
ТГц
космиче
мах, рас
симум к
Сред
ТГц изо
ки Голес
метры и
антенны
шающим

Тип
Яче
Пьезоэ
Микро
Nb мик
Диод
GaAs
Si

ВОМ

и,
 атики
 mirea.ru.
 провод-

ения тера-
 пичных ме-
 детекти-
 сенсоров с

P. Multsev,
 technology
 ction (direc
 etection de

троскопич
 ал частот)
 мировани
 гическим
 юго осцил
 . Из-за зна
 очень по
 е сильное
 ТГц излу
 физически

ольшинств
 прозрачно
 0 ТГц). ТГц
 ективными
 таким обра
 различны
 жание вод
 около 60%
 ими.
 могут быт
 тные (гете
 когерентны
 обнаружен
 не только
 и, что важн
 получаемо
 зовать на
 юсти детек
 ия. Неког
 уют опред

для только амплитуды сигналов и, как правило, являются широкополосными системами. Детекторы, используемые в этих двух системах обнаружения, сходны во многих случаях, но некоторые из них, например, низкотемпературные полупроводниковые болометры на горячих электронах невыгодно использовать в когерентных системах из-за относительно большого времени отклика ($\tau \sim 10^{-7}$ с). Это также относится и к большинству неохлаждаемых тепловых детекторов.

Сейчас большинство субмиллиметровых детекторов, действующие в определенных частотных зонах, основаны на предельно чувствительных сверхпроводящих структурах, которые характеризуются мощностью, эквивалентной шуму (NEP) $\sim 10^{-18} - 10^{-20}$ Вт/Гц^{0.5} при рабочей температуре $T = 100 - 200$ мК [1,5]. Из-за высокой чувствительности эти детекторы предпочтительны в условиях низкого фонового потока фотонов и нашли применение, в частности, в астрономии.

В большинстве миллиметровых и субмиллиметровых спектрометров со средним разрешением часто используются как охлаждаемые, так и неохлаждаемые детекторы, действующие в широкой полосе частот. Преимущества неохлаждаемых детекторов заключаются в относительной простоте действия, а также в их способности работать при комнатной температуре в широкой полосе частот. Их NEP находится в диапазоне $10^{-9} - 10^{-11}$ Вт/Гц^{0.5}.

ТГц спектральная полоса активно осваивается космической астрономией на внешних платформах, расположенных вне атмосферы Земли. Максимум космического реликтового излучения, ко-

торое несет информацию о космическом пространстве, галактиках, звездах и формировании планет, расположен в ТГц диапазоне ($\nu = 0.28$ ТГц).

Когерентные системы обнаружения сигнала используют дизайн гетеродинных схем, так как до сих пор, для высоких частот излучения собственных усилителей не существует. Детектируемые сигналы преобразуются в существенно более низкочастотные ($f \sim 1 - 30$ ГГц), которые затем усиливаются малошумящими усилителями. В основном, эти системы являются селективными (узкополосными) системами обнаружения.

2. ДЕТЕКТОРЫ ПРЯМОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

В субмиллиметровом и миллиметровом спектральных диапазонах сенсоры с прямым детектированием подходят для применений, не требующих ультравысокого ($\nu/\Delta\nu \sim 10^6$) спектрального разрешения, которое обеспечивается гетеродинными спектроскопическими системами. Но в отличие от гетеродинных систем детектирования для них не существует проблем формирования многоэлементных матриц, обусловленных мощностью локального осциллятора или гетеродина и быстрым откликом детекторов ($\tau \sim 10^{-10} - 10^{-11}$ с). Поэтому даже детекторы, действующие при комнатной температуре с относительно большим временем отклика ($\tau \sim 10^{-2} - 10^{-3}$ с) и умеренной чувствительностью, могут быть использованы в системах прямого детектирования.

Таблица 1. Параметры некоторых неохлаждаемых ТГц детекторов

Тип детектора	Частота модуляции, Гц	Рабочая частота, ТГц	NEP, Вт/Гц ^{0.5}
Ячейка Голя	≤ 20	≤ 30	$10^{-9} - 10^{-10}$
Пьезоэлектрические	$\leq 10^2$	≤ 30	$\approx (1-3) \times 10^{-9}$ (уменьшается с увеличением ν)
Микроболометры	$\leq 10^2$	≤ 30	$\approx 10^{-10}$ (уменьшается с увеличением ν)
Nb микроболометры	-	≤ 30	5×10^{-11}
Диоды Шоттки	$\leq 10^{10}$	≤ 10	$\leq 10^{-10}$ (уменьшается на несколько порядков при увеличении ν от 0.1 до 10 ТГц)
GaAs HEMT	$\leq 2 \times 10^{10}$	≤ 30	10^{-10} (зависит от длины затвора и напряжения на затворе)
Si MOSFET	3×10^4	0.645	3×10^{-10}
SHEB	10^8	0.03-2	4×10^{-10} (зависит от ν)

Среди таких детекторов для формирования ТГц изображений используются, например, ячейки Голя и пьезоэлектрические детекторы, болометры и микроболометры, которые используют антенны для связи по мощности с малыми поглощающими тепловое излучение областями. Значе-

ние NEP для неохлаждаемых детекторов обычно составляет от 10^{-10} до 10^{-9} Вт/Гц^{1/2} (таблица 1). В этой таблице использованы следующие обозначения: HEMT – транзисторы с высокой подвижностью электронов, MOSFET – МОП полевые тран-

зисторы, SHEB – полупроводниковый болометр на горячих электронах.

Также используются различные виды охлаждаемых полупроводниковых детекторов (болометры на основе InSb, Si, Ge с горячими электронами, примесные Si и Ge) [6] со временем отклика ($\tau \sim 10^6 \cdot 10^{-8}$ с) и $NEP \sim 10^{-13} \cdot 5 \times 10^{-17}$ Вт/Гц^{0.5} при рабочей температуре $T < 4$ К. Различные разработки болометров, охлаждаемых до $T \sim 100 \cdot 300$ мК, обладают наибольшей чувствительностью среди других детекторов прямого действия в суб-мм и мм спектральных диапазонах, достигая NEP, ограниченной флуктуациями космического фонового излучения. Примесные фоторезисторы с прямым детектированием (Ge:Ga) чувствительны до длины волны около 400 мкм и могут быть объединены в матрицы, также используются в субмиллиметровом спектральном диапазоне. Их пороговая мощность может достигать $NEP \approx 5 \times 10^{-17}$ Вт/Гц^{0.5} при $\lambda = 150$ мкм и рабочей температуре $T = 2$ К.

Схематическая диаграмма прямого детектирования показана на рисунке 1. На детектор падает как сигнальное излучение с мощностью W_s , так и фоновое излучение с мощностью W_B . Фокусирующая оптика (линзы, зеркала и т.д.) используется для сбора излучения с большой площади и фокусировки ее на детектор. Часто оптический фильтр расположен до детектора для удаления фонового излучения в спектральном диапазоне длин волн, отличных от длины волны сигнала. Относительно малый электрический сигнал от детектора усиливается и генерируемый сигнал i_s в дальнейшем обрабатывается.

Можно показать, что для прямого детектирования с не фотопроводящими детекторами, когда преобладает шум флуктуаций фонового потока, минимально обнаруживаемый сигнал в условиях ограничения пороговых характеристик фоном (BLIP) равен:

$$W_{s,dir}^{min} = \left(\frac{2h\nu}{\mu} W_B \Delta f \right)^{0.5}, \text{ Вт}$$

где η - квантовая эффективность детектора (эффективность связи) и Δf - полоса частот.

Видно, что $W_{s,dir}^{min} \sim (\Delta f)^{0.5}$ и детектируемый сигнал может быть заметно меньше, чем W_B . Из этого выражения следует, что когда сравниваются детекторы, полезно проводить нормировку на $(\Delta f)^{0.5}$, что позволяет сравнивать NEP различных детекторов.

Способность обнаруживать малые сигналы для детекторов с прямым детектированием ограничена непреодолимым шумом фоновых фотонов, который не становится малым даже для космического фона. Характеристики этих детекторов ограничены фоновым шумом по сравнению с гете-

родинными детекторами, характеристики которых ограничены квантовым шумом. Как правило, пороговая мощность, регистрируемая детекторами с прямым обнаружением, больше, чем для гетеродинных, что обусловлено вкладом других шумов, присутствующих в самом детекторе, в элементах схемы и усилителях.

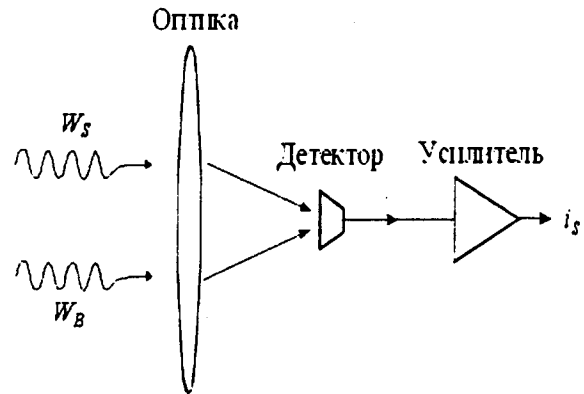


Рис. 1. Схематическое представление прямого детектирования. W_s - сигнальная мощность и W_B - мощность фонового излучения, i_s - сигнальный ток [1]

Одной из характеристик качества для миллиметровых и субмиллиметровых детекторов является NEP, которая является функцией шума и чувствительности и определяется как среднеквадратичное значение входной мощности сигнального излучения W_s , требуемой для обеспечения среднеквадратического выходного сигнала (S), который равен среднеквадратическому значению шума N (SNR=1). Для BLIP детектирования (Background Limited Infrared Photodetection), когда нормируют NEP детектора на $(\Delta f)^{0.5}$ следует:

$$NEP_{dir} = \left(\frac{2h\nu}{\eta} W_B \right)^{0.5}, \text{ Вт/Гц}^{0.5}$$

Преимуществом систем с прямым детектированием является относительная простота и возможность разработки крупноформатных матриц. Большинство систем формирования изображения используют прямое детектирование и эти системы обычно пассивного типа.

3. ДЕТЕКТОРЫ С ГЕТЕРОДИННЫМ ОБНАРУЖЕНИЕМ

В гетеродинных детекторах сигналы с ТГц или суб-ТГц частотами преобразуются в сигналы с более низкими промежуточными частотами (IF), предоставляя информацию об амплитуде и фазе входного излучения. На протяжении нескольких

десятилетий
высокор
дованный
важня, а
ваться д
метрово

W_s
 W_B

Рис. 2.
ние ге
сигнала
излучен
осцилля

Схе
на на ри
сти фон
ность из
(наприм
полосно
цилятор
оптиче

Выход частоты ГГц
800
1500
1800
2400

Осно
ного дет
о частот
ется в ч
более н
соответс
Это прео
родинны
сигнала

ки которых
 авило, по-
 екторами с
 для гетеро-
 гих шумов,
 : элементах

десятилетий такие детекторы применяются для высокоразрешающих спектроскопических исследований, космического дистанционного зондирования, а относительно недавно стали использоваться для формирования изображения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне [7].

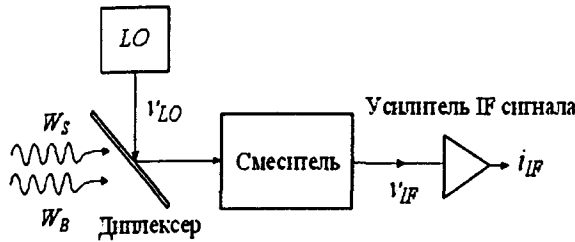


Рис. 2. Упрощенное схематическое представление гетеродинного приемника. W_s – мощность сигнала с частотой ν_s , W_B – мощность фонового излучения, W_{LO} – мощность излучения локального осциллятора с частотой ν_{LO} и ν_{IF} – промежуточная частота [1]

Схема гетеродинного детектирования показана на рисунке 2. Вдобавок к сигналу W_s и мощности фонового излучения W_B добавляется мощность излучения W_{LO} от локального осциллятора (например, лазера или любого другого вида узкополосного источника излучения). Локальный осциллятор необходим для обеспечения процесса оптического смешивания. Основными элементами

миллиметровых или субмиллиметровых гетеродинных детекторов является смеситель, который необходим для смешивания W_s и W_{LO} и для генерации сигнала на промежуточной частоте

$$\nu_{IF} = |\nu_s - \nu_{LO}|$$

Ключевым компонентом смесителя является нелинейный смешивающий элемент (детектор), в котором сигнальная мощность и мощность LO излучения взаимодействуют при использовании некоторого вида диплексера (фильтра, предназначенного для объединения сигналов различных диапазонов частот, который служит для объединения двух портов в один). При использовании миллиметровой или субмиллиметровой матрицы выбор смесителя определяется доступностью источника LO мощности в данном спектральном диапазоне, рабочей температурой смесителя и необходимой чувствительностью.

В табл.2 представлены ограничения современных технологий с одним источником LO, действующим при 300 и 120K. Расчеты предполагают, что LO импульсная мощность, требуемая для смесителей Шоттки составляет 1 мВт, для смесителей сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник (SIS) – 40 мкВт и для смесителей на основе болометров с горячими электронами (HEB)– 2 мкВт. Предполагались потери связи локального осциллятора равные 3 дБ [8].

Таблица 2. Ограничения современных технологий с одним источником LO, действующим при 300 и 120 K

Выходная частота, ГГц	Выходная мощность (опубликованные данные), мкВт		Выходная мощность (возможная), мкВт		Число пикселей для различных смесителей					
	300 K	120 K	300 K	120 K	Шоттки		SIS		HEB	
	300 K	120 K	300 K	120 K	300 K	120 K	300 K	120 K	300 K	120 K
800	1 000	2 000	2 000	4 000	2	4	25	50	400	800
1500	15	40	40	80			1	2	20	40
1800	3	20	10	50					5	25
2400			2	5					1	2

Основным преимуществом систем гетеродинного детектирования является то, что информация о частоте и фазе сигнала с частотой ν_s преобразуется в частоту ν_{IF} , которая находится в намного более низкочастотном диапазоне ($\nu_{IF} \ll \nu_s$), соответствующем времени отклика электроники. Это преобразование ($\nu_s \rightarrow \nu_{IF}$) называется гетеродинным переходом (конверсией). Если частоты сигнала и локального осциллятора равны между

собой, тогда $\nu_{IF} = 0$ (т.е. вырождается в постоянный сигнал), то такой процесс детектирования называется гомодинным переходом.

Для эффективного преобразования и обеспечения низкого шума в миллиметровом и субмиллиметровом спектральных диапазонах может быть использовано только несколько типов детекторов в качестве смесителей. Часто используются приборы, имеющие сильную электрическую квадратичную нелинейность. Примерами являются прямо смещенные диоды Шоттки, сверхпровод-

ник-диэлектрик-сверхпроводник (SIS) с туннельным переходом, полупроводниковые и сверхпроводниковые болометры HEBs, сверхрешетки (SL). Схематические вольт-амперные характеристики таких приборов показаны на рисунке 3.

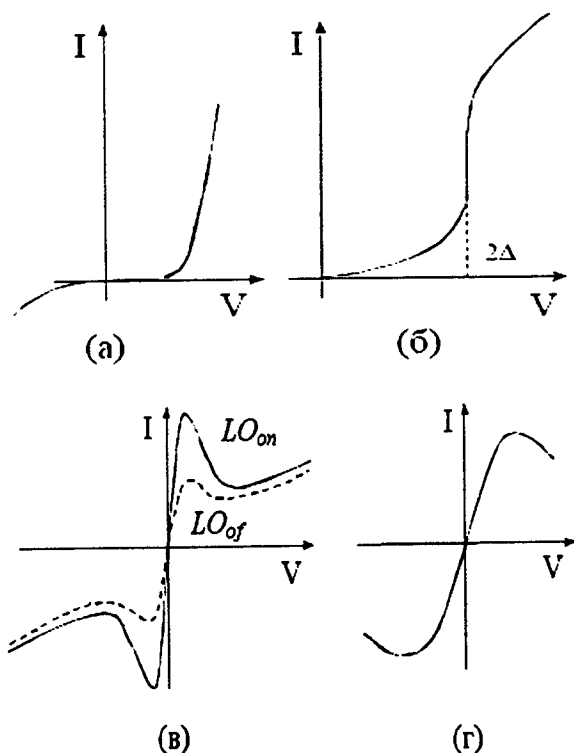


Рис. 3. Схематические вольт-амперные характеристики нелинейных элементов, на которых основаны ТГц гетеродинные приемники: (а) диод Шоттки, (б) SIS, (в) HEB, и (г) SL [2]

Одновременно с разумной эффективностью преобразования и низким шумом эти нелинейные приборы должны обладать высокой операционной скоростью преобразования для обеспечения широкой полосы для последующего усиления сигналов при намного более низких частотах (f-1-30 ГГц).

При большой LO мощности W_{LO} можно детектировать относительно малую мощность сигнала W_s . Когда такое условие соблюдается (при $W_{LO} \gg W_s$), квантовый шум в сигнальном потоке может быть доминирующим шумом и для внутреннего усиления сигнала $G=1$ для не фотопроводящих детекторов при отношении сигнала к шуму $S/N=1$, следует:

$$W_{s,het}^{min} = \frac{h\nu}{\eta} \Delta f, \text{ Вт}$$

а для минимальной обнаруживаемой энергии имеем $E_{s,het}^{min} = \frac{h\nu}{\eta}$. Для эффективности связи $\eta=1$ это

означает квантовый предел обнаружения сигнала. Так как при этом энергия одного фотона, принимаемая не фотопроводящим детектором, трансформируется в кинетическую энергию одного электрона, который затем пересекает барьер.

Для гетеродинного детектирования может быть показано, что NEP равно (BLIP режим):

$$NEP_{het} = \frac{W_{s,het}^{min}}{\Delta f} = \frac{h\nu}{\eta}, \text{ Вт/Гц}$$

Заметим, что для гетеродинного детектирования, единицами измерения NEP являются Вт/Гц вместо $\text{Вт/Гц}^{0.5}$, как для прямого детектирования.

Чувствительность гетеродинных детекторов часто дается в терминах температуры шума смесителя T_{mix} , которая коррелирует с эквивалентной мощностью шума смесителя:

$$NEP_{mix} = k_B T_{mix}$$

Для спектральной зоны $\lambda \approx 3 \text{ мм}$ ($\nu \approx 100 \text{ ГГц}$), где есть окно прозрачности атмосферы, значение $T_s^{min} = \frac{E_{s,het}^{min}}{k_B} = \frac{h\nu}{k_B} \approx 4.8 \text{ К}$ является фундаментальным пределом шумовой температуры, введенным принципом неопределенности любых одновременных измерений амплитуды и фазы электромагнитной волны.

Предельные значения шумовой температуры гетеродинных ТГц детекторов часто сравнивают используя значения T_s^{min} . Поскольку гетеродинные детекторы измеряют как амплитуду, так и фазу, одновременно, они регулируются принципом неопределенности и следовательно они ограничены квантовым шумом при абсолютном уровне шума 48 К/ТГц.

Традиционно доступная технология терагерцевых приемников использует смесители на основе диодов с барьерами Шоттки (SBD) с накачкой локальным осциллятором на основе газового лазера. Температура шума таких приемников по существу достигает предела $50 \frac{h\nu}{k_B}$ в частотном диапазоне ниже 3 ТГц (см. рисунок 4). Свыше 3 ТГц происходит ступенчатое увеличение T_s^{min} в основном вследствие увеличивающихся потерь в антеннах и снижения характеристик самого диода. В последние два десятилетия впечатляющие улучшения в чувствительности приемников были достигнуты при использовании сверхпроводящих SIS и HEB смесителей. На рисунке 4 изображены

XVIII Ме
 селективн
 ников. SI
 почти ква
 частоты 0

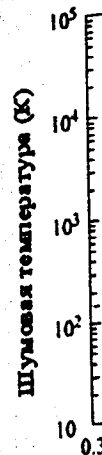


Рис. 4. Л
 нове бар
 смесит

В от
 смесител
 детектор
 близка к
 ми Шотт
 три или
 мощнос

Гете
 зуются
 ния кос
 мм и с
 включае
 совой ф

4. СРА ПРЯМ

Гете
 сокое
 Очень
 но, по
 особен
 критич
 осцилл
 В
 ровани
 спектра
 низок
 разреш
 го спе

ргии име-
 ии $\eta=1$ это
 я сигнала,
 на, прини-
 эм, транс-
 ю одного
 ьер.
 ия может
 ким):

/Гц

тектирова-
 тся Вт/Гц
 рования.
 детекторов
 шума сме-
 валентной

≈ 100 ГГц)
 1, значени
 фундамен-

туры, вве-
 любых од-
 фазы эле-

мператур
 сравниваю
 гетеродин-

уду, так
 оя принци
 они огра-
 нном уро-

ия терагер-
 ли на осно-
 с накачко-
 зового лаз-
 ов по суще-
 ствующем ди-

выше 3 ТГц
 T_s^{\min} в ос-

я потерь
 имого диод-
 ечатляющ-
 ников был
 проводящ-
 изображе-

селективные шумовые температуры таких приемников. SIS-смесители на основе Nb обеспечивают почти квантово-ограниченные характеристики до частоты 0.7 ТГц.

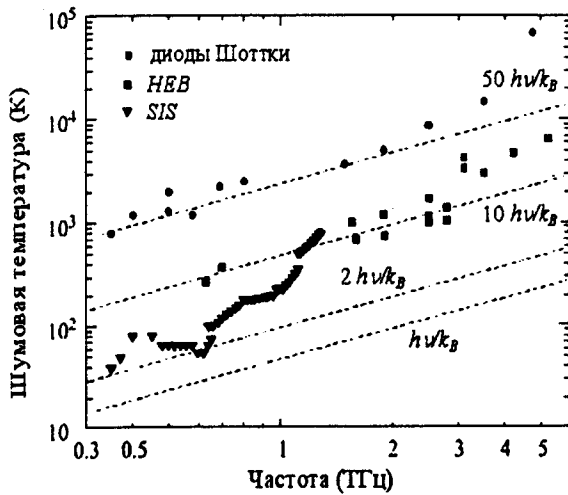


Рис. 4. Шумовая температура смесителей на основе барьеров Шоттки, SIS – смесителей и NEB – смесителей, действующих в терагерцовом спектральном диапазоне [1,9]

В отличие от смесителей на основе SBD и SIS смесители на основе NEB являются тепловыми детекторами. До 2.5 ТГц шумовая температура близка к линии $10 hv/k_B$. По сравнению с барьерами Шоттки смесители на основе NEB требуют на три или четыре порядка амплитуды меньшую LO мощность.

Гетеродинные детекторы чаще всего используются в исследованиях при измерениях излучения космического микроволнового фона (СМВ) в мм и суб-мм диапазонах. Типичный приемник включает коническую антенну, усилитель, полосовой фильтр и детектор на основе SIS или NEB.

4. СРАВНЕНИЕ ГЕТЕРОДИННОГО И ПРЯМОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Гетеродинное детектирование предлагает высокое спектральное разрешение $\nu/\Delta\nu \sim 10^5 \cdot 10^6$. Очень высокое спектральное разрешение возможно, пока $\nu_{IF} \ll \nu$. Но для гетеродинных систем, особенно для SBD приемников в ТГц области, критическим компонентом является локальный осциллятор.

В то же время детекторы с прямым детектированием, как правило, действуют в широком спектральном диапазоне, и когда фотонный фон низок могут обеспечивать достаточно высокое разрешение. Они предпочтительнее для умеренного спектрального разрешения $\nu/\Delta\nu \sim 10^3 \cdot 10^4$ или

ниже, а также для формирования изображений. Детекторы с прямым детектированием могут использоваться в таких применениях, где чувствительность более важна, чем спектральное разрешение.

Иметь ограниченную фоновую матрицу детекторов важно с точки зрения исключения, например, фонового шума неба, учитывая, что любая пространственно коррелированная компонента этого шума, детектируемая во всех сенсорах в матрице, может быть существенно подавлена. Среди детекторов с прямым детектированием, низкотемпературные болометры обычно обеспечивают наивысшую чувствительность от дальнего инфракрасного до миллиметрового диапазона электромагнитного спектра, обеспечивая ограниченные фоновые характеристики с $NEP \sim (0.4-3) \times 10^{-19}$ Вт/Гц^{0.5} при рабочей температуре 100-300 мК. В условиях микроволнового фона (СМВ) использовались системы когерентных детекторов и некогерентные болометрические системы. Для космических экспериментов наземного базирования применимыми являются оба типа детекторов.

По сравнению с прямым детектированием, гетеродинное детектирование обладает преимуществами и недостатками. Преимущества гетеродинного детектирования заключаются в следующем:

- оно может детектировать частотную модуляцию и фазовую модуляцию;
- доминирующий шум следует из флуктуаций мощности гетеродина W_{LO} и он более вероятен, чем шум фонового излучения, таким образом, обеспечивается избирательность, например, против фонового потока и т.д.;
- процесс преобразования частоты IF обеспечивает усиление так, что выходной сигнал IF детектора может быть сделан больше чем, например, тепловой и генерационно-рекомбинационный шум;
- усиление преобразования пропорционально W_{LO}/W_s и, таким образом, намного меньшая мощность сигнала излучения может быть обнаружена по сравнению с прямым детектированием.

Недостатками гетеродинного детектирования являются:

- оба пучка должны совпадать и быть равными по диаметру, и также их векторы Пойтинга должны совпадать;
- волновые фронты обоих пучков должны иметь одинаковые радиусы кривизны и иметь похожие структуры поперечных пространственных мод, поэтому они должны быть поляризованы в одном направлении;
- трудности в производстве матриц большого формата.

Системы когерентного детектирования (с SIS или SBD смесителями), как правило, ограничены в детектировании сигналами с частотами, превы-

шающими 1 ТГц. Гетеродинные НЕВ смесители и детекторы прямого детектирования на основе сенсоров, действующих вблизи края перехода в сверхпроводящее состояние (TES) почти не имеют практических ограничений в применении в коротковолновом субмиллиметровом диапазоне.

5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СВЯЗЬ

В видимом или ИК диапазонах чувствительные элементы непосредственно поглощают излучение. Но в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, как правило, антенная электрическая связь предпочтительнее для введения электромагнитной мощности в чувствительный элемент, объем которого может быть намного порядков меньше длины волны. Этот метод состоит из переноса полученной антенной мощности к сенсору. С начала 1980-х планарные антенны обычно используются для связи тонкопленочных чувствительных элементов с полями излучения. Использование широкополосных планарных антенн предпочтительно для улучшения связи между излучением и прибором, но не обеспечивает необходимую чувствительность и высокое быстродействие прибора.

Расчеты NEP для ТГц тепловых детекторов, включающие предел фонового шума, показаны на рисунке 5 для низкой температуры фона. Число фотонов не мало даже для космического фона и уменьшение NEP детектора для обнаружения индивидуальных ТГц фотонов должно сопровождаться уменьшением влиянием потока флуктуаций излучения от объекта и фонового излучения при использовании, например, узкополосного охлаждаемого фильтра или охлаждения частей объекта.

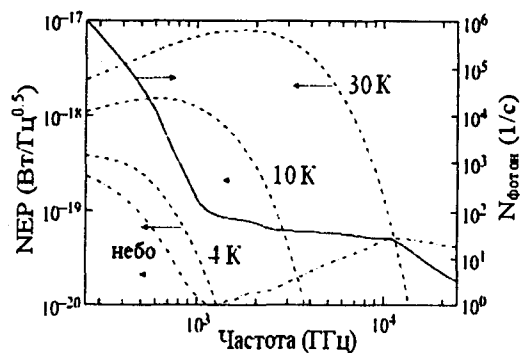


Рис. 5. NEP для детекторов, ограниченных фотонным шумом, от фона и от излучения от телескопа (зеркал) (5% - излучательная способность, температура зеркала 4 К, 10 К и 30 К) для спектрометра с умеренным разрешением ($\nu/\Delta\nu=1000$) и потока падающих фоновых фотонов ($N_{\text{фотон}}$) в зависимости от частоты [1, 10]

Применение тепловых детекторов, характеризующихся малой тепловой проводимостью в рабочих условиях глубокого охлаждения детектора ($T < 200$ мК), позволяет достичь значений $NEP \sim 10^{19} - 10^{20}$ Вт/Гц^{0.5} и предоставляет возможность для реализации режима счета фотонов в ТГц частотном диапазоне.

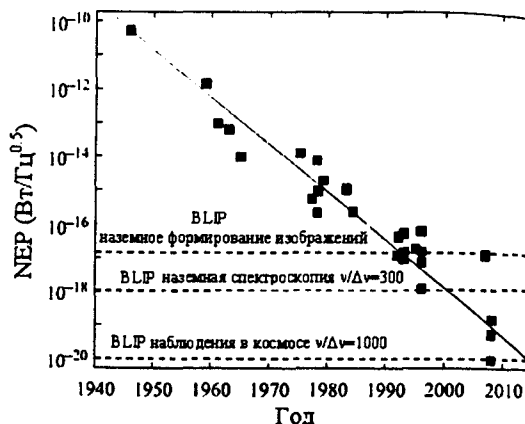


Рис. 6. Картина, показывающая улучшение NEP болометров в два раза каждые два года [1]

На рисунке 6 показаны характеристики болометра, которые улучшались за период в более чем половину столетия, начиная от неохлаждаемых вариантов до суб-Кельвиновского охлаждения для приложений с космическим фоном.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий прогресс в технологии ТГц детекторов обеспечивается решением технологических проблем, новыми физическими концепциями и явлениями, а также многообещающими приложениями. Характеристики нескольких типов дискретных детекторов и малоформатных матриц, действующих при низких или суб-Кельвиновских температурах (например, SIS, НЕВ, TES и болометры на холодных электронах (СЕВ)) близки к предельным характеристикам при низком уровне фона. Они охватывают весь ТГц диапазон. Однако будущее улучшение чувствительности будет обеспечиваться использованием крупноформатных матриц со считыванием в фокальной плоскости для обеспечения высокоразрешающей спектроскопии ($\nu/\Delta\nu \sim 10^7$) и регистрации при частотах, превышающих 1 ТГц. Сверхпроводящие НЕВ детекторы характеризуются хорошими темновыми характеристиками, ТГц скоростью счета и они также перспективны как счетчики отдельных фотонов в широком ИК спектральном диапазоне. Сомнительно, что сверхпроводящие НЕВs, действующие при высоких температурах, достигнут чувствительности низкотемпературных сверхпро-

рактически в диапазоне частот 10⁹-10¹¹ Гц.



Рис. 1. Зависимость NEP от частоты [1]

Важными преимуществами неохлаждаемых детекторов являются их простота и надежность.

ТГц детекторы являются перспективными для приложений в области спектроскопии и фотоники. В настоящее время ведутся работы по созданию неохлаждаемых детекторов на основе наноструктур. Одним из перспективных направлений является разработка детекторов на основе наноструктур из HgCdTe [11-15], на основе квантовых колец [19] и квантовых точек Ge/Si.

Водящих NEBs из-за избыточного шума, но вследствие короткого времени электрон-фононной релаксации эти материалы являются перспективными для широкополосных приборов.

Неохлаждаемые и охлаждаемые гетеродинные SBD детекторы могут обеспечивать относительно высокую чувствительность и подходят для многих применений в миллиметровом и субмиллиметровом спектральном диапазоне, но сложно их объединить в матрицы с большим числом пикселей вследствие отсутствия мощных компактных твердотельных LO источников (>1 мВт). Сегодня доступны системы с однопиксельными когерентными SBD детекторами или только со средним числом пикселей, но важной проблемой является их эффективное применение при $\nu > 1$ ТГц, что обусловлено увеличением уровня шума из-за физических ограничений их работы.

Одной из важных компонент ТГц технологии являются неохлаждаемые или слегка охлаждаемые ТГц сенсоры, требующие дальнейшего улучшения чувствительности, которое сделает системы менее сложными и громоздкими. В большинстве миллиметровых и субмиллиметровых спектрометров со средним разрешением часто используются неохлаждаемые детекторы, действующие в широкой полосе частот. Преимущества неохлаждаемых детекторов заключаются в относительной простоте схемы, а также в их способности действовать при комнатной температуре в широкой полосе частот. Их NEP находится в диапазоне 10^{-9} - 10^{-11} Вт/Гц^{0.5}. Представляют интерес и исследования, направленные на создание новых разработок терагерцевых и субмиллиметровых детекторов, например, на основе низкоразмерных структур из HgCdTe [11-15], на основе PbSnTe:In [16-18], на основе квантовых колец [19] и квантовых точек Ge/Si.

Неохлаждаемые или слегка охлаждаемые сенсоры на основе, например, плазмонного резонанса 2D электронов в NEMTs перспективны для использования в крупноформатных матрицах в системах с низкой стоимостью [1,2]. Другие разработанные или разрабатываемые неохлаждаемые ТГц тепловые детекторы прямого обнаружения с NEP $\sim 10^{-10}$ - 10^{-11} Вт/Гц^{0.5} могут быть использованы во многих низкоразрешающих спектроскопических приложениях и системах активного наблюдения.

Работа была поддержана в рамках следующих программ: АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» (рег. №2.1.2/12459), ФЦП «Научные и научно-инновационные кадры инновационной России» (проекты ГК 02.740.11.0444, ГК 02.740.11.0562), а также поддержана проектом по гранту НШ-4297.2010.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sizov F. THz radiation sensors// Opto-Electronics Review, 2010, Vol.18, №1, P.10-36.
2. Sizov F., Rogalsky A. THz detectors// Progress in Quantum Electronics, 2010, Vol.34, P.278-347.
3. Sizov F., Rogalsky A. Terahertz detectors and focal plane arrays// Opto-Electronics Review, 2011, Vol.19, №3, P.346-404.
4. Rogalsky A. Infrared detectors / 2nd. ed., New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. 876 p.
5. Wei J., Olaya D., Karasik B.S., Pereverzev S.V., Sergeev A.V., Gershenzon M.E. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics// Nat. Nanotechnol, 2008, №3, P.496-500.
6. Siegel P.H. Terahertz technology, IEEE T. Microw. Theory, 2002, Vol.50, P.910-928.
7. Siegel P.H., Dengler R.J. Terahertz heterodyne imaging. Introduction and techniques// Int. J. Infrared Milli. Waves, 2006, Vol.27, P.465-480.
8. Chattopadhyay G. Future of heterodyne receivers at sub-millimeter wavelengths// Digest IRMMW-THZ-2005 Conf., 2005, P.461-462.
9. Hubers H.W. Terahertz heterodyne receivers // IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron, 2008, Vol.14, P.378-391.
10. Karasik B.S., Olaya D., Wei J., Pereverzev M.E., Kawamura J.H., McGrath W.R., Sergeev A.V. Record-low NEP in hot-electron titanium nanobolometers// IEEE T. Appl. Supercon., 2007, Vol.17, P.293-297.
11. Стафеев В.И. Теллуриды кадмия-ртути: фотоприемники инфракрасного диапазона, другие приборы. Москва, ФГУП «НПО»Орион, 2011, 204 с.
12. Сизов Ф.Ф., Апатская М.В., Гуменюк-Сычевская Ж.В., Забудский В.В., Момот Н.И., Смолий М.И., Цыбрий З.Ф., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Сахно Н.В. Многоэлементные приемники терагерцевого излучения на CdHgTe// Прикладная физика, 2011, №2, С.61-67.
13. Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Швец В.А., Сидоров Ю.Г. Рост HgTe квантовых ям для приемников ИК и ТГц излучения // Тезисы докладов российской конференции и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоники «Фотоника-2011», Новосибирск, 22-26 августа 2011, С.41.
14. Спирин К.Е., Жолудев М.С., Антонов А.В., Румянцев В.В., Гавриленко В.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А. Терагерцевая фотопроводимость в гетероструктурах HgTe/CdHgTe(013) с квантовыми ямами // Тезисы докладов российской конференции и

- школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники «Фотоника-2011», Новосибирск, 22-26 августа 2011, С.43.
15. Сизов Ф.Ф., Забудский В.В., Цибрий З.Ф., Бунчук С.Г., Момот Н.И., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А. Регистрация ТГц.суб-мм излучения структурами с квантовыми ямами на основе КРТ // Тезисы докладов российской конференции и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники «Фотоника-2011», Новосибирск, 22-26 августа 2011, С.123.
16. Долженко Д.Е., Черничкин В.И., Рябова Л.И., Никорич А.В., Касьян В.А., Дашевский З.М., Ганичев С.Д., Данилов С.Н., Бельков В.В., Хохлов Д.Р. «Терагерцовая фотопроводимость и новый тип локальных состояний в легированных сплавах на основе теллурида свинца», Тезисы докладов российской конференции и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники «Фотоника-2011», Новосибирск, 22-26 августа 2011, С.17.
17. Климов А.Э., Шумский В.Н. «Матричные фотоприемники PbSnTe:In на кремнии для дальнего ИК и терагерцового диапазонов», Тезисы докладов российской конференции и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники «Фотоника-2011», Новосибирск, 22-26 августа 2011, С.18.
18. Акимов А.Н., Климов А.Э., Пашин Н.С., Шумский В.Н. «Особенности динамики фототока в пленках PbSnTe:In в терагерцовой области спектра», Тезисы докладов российской конференции и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники «Фотоника-2011», Новосибирск, 22-26 августа 2011, С.113.
19. Зиновьев В.А., Кучинская П.А., Ненашев А.В., Двуреченский А.В., Володин В.А., Liu C.W. «Квантовые кольца Ge/Si для приемников ИК и терагерцового излучения», Тезисы докладов российской конференции и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники «Фотоника-2011», Новосибирск, 22-26 августа 2011, С.33.
20. Жукова Е.С., Горшунов Б.П., Юрьев В.А., Арапкина Л.В., Чиж К.В., Чапнин В.А., Калинушкин В.П., Прохоров А.С., Михайлова Г.Н. Поглощение терагерцового излучения в гетероструктурах Ge/Si(001) с квантовыми точками// Письма в ЖЭТФ, Т.92, №12, С.87.

НЕ

А.Ю

1 d

2 ФГУ

Разр
нитных
ви на н
определе
ких магн
нитной
ных поле
ванных у

Deve
ern magi
research
netic disl
ated. Tec
on rigid i
mation o
as offers
presentec

ВВЕДЕ

Совр
ки харак
логий, з
рости об
использо
с целью
ции. Ма
риалов с
нитных
цессы и
относят
секрете.
проведя
леночны
нитных
ловой м
намагни
ла. В за
ченность
изменяет
кА/м [1]
няемого
ко от его
чия пром