

УДК 621.315.592

А. В. Войцеховский¹, д-р физ.-мат. наук, проф.,
С. Н. Несмелов¹, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Н. А. Кульчицкий², д-р техн. наук, проф.,
А. А. Мельников², д-р физ.-мат. наук, проф.,
П. П. Мальцев³, д-р техн. наук, проф., директор,
¹Томский государственный университет,
(г. Томск) e-mail vav@elefot.tsu.ru,
²Московский государственный институт
радиотехники, электроники и автоматике,
³Институт сверхвысокочастотной
полупроводниковой электроники РАН,
e-mail n.kulchitsky@gmail.com, a.melnikov@mirea.ru

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Поступила в редакцию 05.09.2011

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.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, детекторы, прямое детектирование, гетеродинное детектирование, полоса частот, чувствительность

Введение

Терагерцовое 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 диапазон длин волн 0,1...3 ТГц (3 мм...100 мкм) [1, 2]. В данной работе принимается, что терагерцовый диапазон находится в пределах 0,1...10 ТГц и включает терагерцовую 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) [1—4]. Исследование излучения в этой спектральной области иг-

рает 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 терагерцового 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 детектированием в инфракрасном диапазоне заключается в малой энергии фотонов.

Серьезная проблема, которая ограничивает применение гетеродинных матриц в субмиллиметровой спектральной области, т. е. для приложений 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 (ЛО) мощности или гетеродина. Из-за значительного ослабления терагерцовые волны не очень полезны для дальней связи, но вследствие сильного поглощения большинством материалов терагерцовое излучение предоставляет информацию о физических свойствах материалов.

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

Все терагерцовые 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 дает возможность также реализовать наивысшие характеристики чувствительности детектора и его спектрального разрешения. Некогерентные системы обнаружения позволяют определять 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 $NEP \sim 10^{-18} \dots 10^{-20}$ Вт/Гц^{0,5} (мощностью, эквивалентной шуму) при рабочей температуре $T = 100 \dots 200$ 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 $10^{-9} \dots 10^{-11}$ Вт/Гц^{0,5}.

Терагерцовая спектральная полоса активно осваивается космической астрономией на внешних платформах, расположенных вне атмосферы Земли. Максимум космического реликтового излучения, которое несет информацию о космическом пространстве, галактиках, звездах и формировании планет, расположен в терагерцовом 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 ($f \sim 1 \dots 30$ ГГц), которые затем усиливаются малошумящими усилителями. В основном эти системы являются селективными (узкополосными) системами обнаружения.

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 от-

кликом детекторов ($\tau \sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$ с). Поэтому даже детекторы, действующие при комнатной температуре с относительно большим временем отклика ($\tau \sim 10^{-2} \dots 10^{-3}$ с) и умеренной чувствительностью, могут быть использованы в системах прямого детектирования.

Среди таких детекторов для формирования терагерцовых изображений применяют, например, ячейки Голя и пироэлектрические детекторы, болометры и микроболометры, которые используют антенны для связи с малыми поглощающими тепловое излучение областями. Значение NEP для неохлаждаемых детекторов обычно составляет от 10^{-10} до 10^{-9} Вт/Гц^{1/2} (табл. 1). В этой таблице использованы следующие обозначения: HEMT — транзисторы с высокой подвижностью электронов, MOSFET — МОП полевые транзисторы, 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 ($\tau \sim 10^{-6} \dots 10^{-8}$ с) и $NEP \approx 10^{-13} \dots 5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{0,5} при рабочей температуре $T < 4$ К. Различные разработки болометров, охлаждаемых до $T \sim 100 \dots 300$ мК, обладают наибольшей чувствительностью среди других детекторов прямого действия в субмиллиметровом и миллиметровом 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, а также используются в субмиллиметровом спектральном диапазоне. Их пороговая мощность может

Таблица 1

Параметры некоторых неохлаждаемых терагерцовых детекторов

Тип детектора	Частота модуляции, Гц	Рабочая частота, ТГц	NEP , Вт/Гц ^{0,5}
Ячейка Голя	≤ 20	≤ 30	$10^{-9} \dots 10^{-10}$
Пьезоэлектрические	$\leq 10^2$	≤ 30	$\approx (1 \dots 3) \cdot 10^{-9}$ (уменьшается с увеличением ν)
Микроболометры	$\leq 10^2$	≤ 30	$\approx 10^{-10}$ (уменьшается с увеличением ν)
Nb микроболометры	—	≤ 30	$5 \cdot 10^{-11}$
Диоды Шоттки	$\leq 10^{10}$	≤ 10	$\leq 10^{-10}$ (уменьшается на несколько порядков при увеличении ν от 0,1 до 10 ТГц)
GaAs HEMT	$\leq 2 \cdot 10^{10}$	≤ 30	10^{-10} (зависит от длины затвора и напряжения на затворе)
Si MOSFET	$3 \cdot 10^4$	0,645	$3 \cdot 10^{-10}$
SHEB	10^8	0,03...2	$4 \cdot 10^{-10}$ (зависит от ν)

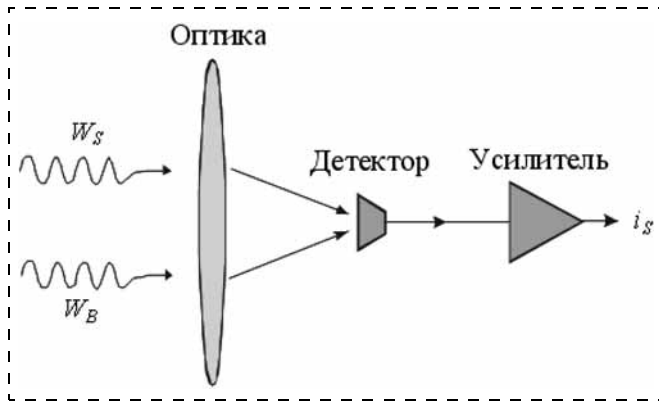


Рис. 1. Схематическое представление прямого детектирования: W_S — сигнальная мощность и W_B — мощность фонового излучения; i_S — сигнальный ток [1]

достигать $NEP \approx 5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{0,5} при $\lambda = 150$ мкм и рабочей температуре $T = 2$ К.

Схематическое представление прямого детектирования показано на рис. 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) определяется формулой

$$W_{S, dir}^{\min} = \left(\frac{2h\nu}{\eta} W_B \Delta f \right)^{0,5}, \text{ Вт,}$$

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 могут 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 гетеродинными детек-

торами, 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.

Одной из характеристик качества для миллиметровых и субмиллиметровых детекторов является NEP, которая является функцией шума и чувствительности и определяется как среднеквадратичное значение входной мощности сигнала 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 $(\Delta f)^{0,5}$,

$$NRP_{dir} = \left(\frac{2h\nu}{\eta} W_B \right)^{0,5}, \text{ Вт/Гц}^{0,5}.$$

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.

Детекторы с гетеродинным обнаружением

В гетеродинных детекторах сигналы с терагерцовыми или субтерагерцовыми частотами преобразуются в сигналы с более низкими промежуточными частотами (IF), предоставляя информацию об амплитуде и фазе входного излучения. На протяжении нескольких десятилетий такие детекторы применяются для высокоразрешающих спектроскопических исследований, космического дистанционного зондирования, а относительно недавно стали использоваться для формирования изображения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [7].

Схема гетеродинного детектирования показана на рис. 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 LO 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 излучения локального осциллятора взаимодействуют при ис-

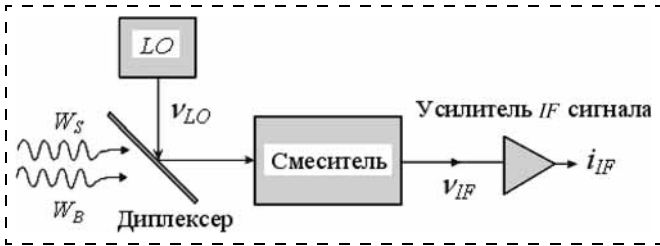


Рис. 2. Упрощенное схематическое представление гетеродинного приемника:

W_S — мощность сигнала с частотой v_S ; W_B — мощность фонового излучения; W_{LO} — мощность излучения локального осциллятора с частотой v_{LO} и v_{IF} — промежуточная частота [1]

Таблица 2

Ограничения современных технологий с одним источником LO, действующим при 300 и 120 К

Выходная частота, ГГц	Выходная мощность (опубликованные данные)*, мкВт	Выходная мощность (возможная)*, мкВт	Число пикселей для различных смесителей**		
			Шоттки	SIS	HEB
800	1000/2000	2000/4000	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

* Значения выходной мощности для температур 300 К/120 К.
 ** Значения числа пикселей для температур 300 К/120 К.

пользовании 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 мощности локального осциллятора 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 120 К. Расчеты предполагают, что импульсная мощность LO, требуемая для смесите-

лей Шоттки, составляет 1 мВт, для смесителей сверхпроводник — диэлектрик — сверхпроводник (SIS) — 40 мкВт и для смесителей на основе болтометров с горячими электронами (HEB) — 2 мкВт. Предполагались потери связи локального осциллятора, равные 3 дБ [8].

Основным преимуществом систем гетеродинного детектирования является то, что информация о частоте и фазе сигнала с частотой v_S преобразуется в частоту v_{IF} , которая находится в намного более низкочастотном диапазоне ($v_{IF} \ll v_S$), соответствующем времени отклика электроники. Это преобразование ($v_S \rightarrow v_{IF}$) называется гетеродинным переходом (конверсией). Если частоты сигнала и локального осциллятора равны между собой, то $v_{IF} = 0$ (т. е. вырождается в постоянный сигнал), и 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 применяют приборы, имеющие сильную электрическую квадратичную нелинейность. Примерами являются прямосмещенные диоды Шоттки, сверхпроводник — диэлектрик — сверхпроводник (SIS) с туннельным переходом, полупроводниковые и сверхпроводниковые болометры HEB, сверхрешетки (SL). Схематические вольт-амперные характеристики таких приборов показаны на рис. 3.

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 ($f \sim 1...30$ ГГц).

При большой мощности локального осциллятора 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 $S/N = 1$

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

а для минимальной обнаруживаемой энергии имеем $E_{S,het}^{min} = \frac{h\nu}{\eta}$.

Для эффективности связи $\eta = 1$ означает квантовый предел обнаружения сигнала, так как при этом энергия одного фотона, принимаемая не

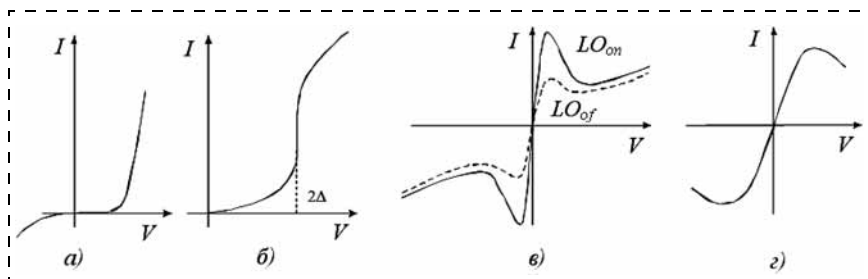


Рис. 3. Схематические вольт-амперные характеристики нелинейных элементов, на которых основаны терагерцовые гетеродинные приемники:

а — диод Шоттки; б — SIS; в — HEB; г — SL [2]

фотопроводящим детектором, трансформируется в кинетическую энергию одного электрона, который затем пересекает барьер.

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

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

Заметим, что для гетеродинного детектирования единицами измерения NEP являются Вт/Гц вместо 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:

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

где k_B — постоянная Больцмана.

Для спектральной зоны $\lambda \approx 3$ мм ($\nu \approx 100$ ГГц), где есть окно прозрачности атмосферы, значение $T_S^{min} = E_{S,het}^{min} / k_B = h\nu / k_B \approx 4,8$ К является фундаментальным пределом шумовой температуры, следующим из принципа неопределенности любых одновременных измерений амплитуды и фазы электромагнитной волны.

Предельные значения шумовой температуры гетеродинных терагерцовой 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 терагерцовых 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 $50 h\nu / k_B$ в частотном диапазоне ниже 3 ТГц (рис. 4). Свыше 3 ТГц происходит 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 НЕВ-смесителей. На рис. 4 изображены селективные шумовые температуры таких приемников. SIS-смесители на основе Nb обеспечивают почти квантово-ограниченные характеристики до частоты 0,7 ТГц.

В отличие от смесителей SBD и SIS смесители НЕВ являются тепловыми детекторами. До 2,5 ТГц шумовая температура близка к линии $10 h\nu / k_B$. По сравнению с барьерами Шоттки смесители на ос-

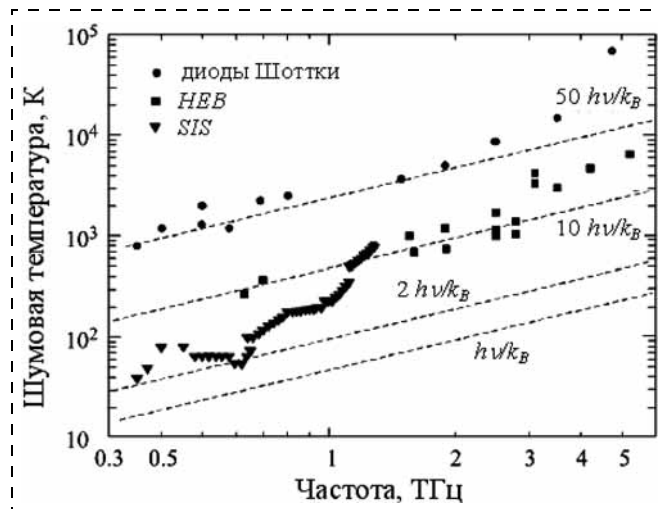


Рис. 4. Шумовая температура смесителей на основе барьеров Шоттки, SIS-смесителей и НЕВ-смесителей, действующих в терагерцовом спектральном диапазоне [1, 9]

нове НЕВ требуют на три или четыре порядка меньшую мощность локального осциллятора.

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

Сравнение гетеродинного и прямого детектирования

Гетеродинное детектирование предлагает высокое спектральное разрешение $\nu/\Delta\nu \sim 10^5 \dots 10^6$. Очень высокое спектральное разрешение возможно, пока $\nu_{IF} \ll \nu$. Но для гетеродинных систем, особенно для SBD-приемников в терагерцовой 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 $\nu/\Delta\nu \approx 10^3 \dots 10^4$ 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, поскольку 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 фоновыми характеристиками с $NEP \sim (0,4...3) \cdot 10^{-19} \text{ Вт/Гц}^{0,5}$ 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 следующие:

- 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 (со смесителями SIS или SBD), как правило, ограничены в детектировании сигналами с частотами, превышающими 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.

Электромагнитная связь

В видимом или ИК диапазонах чувствительные элементы непосредственно поглощают излучение. Но в субмиллиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, как правило, антенная электри-

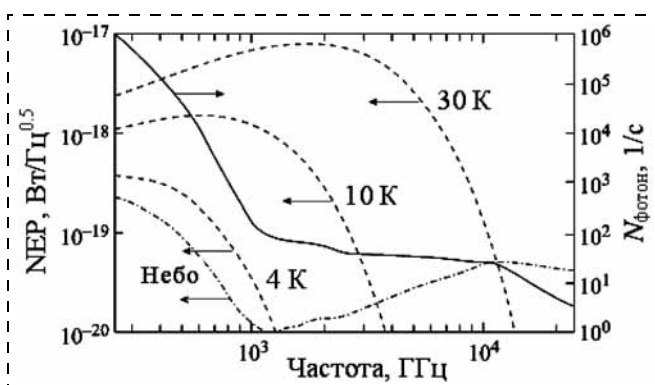


Рис. 5. NEP для детекторов, ограниченных фотонным шумом, от фона и от излучения от телескопа (зеркал) (5% — излучательная способность, температура зеркала 4 К, 10 К и 30 К) для спектрометра с умеренным разрешением ($\nu/\Delta\nu = 1000$) и потока падающих фоновых фотонов ($N_{\text{фотон}}$) в зависимости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

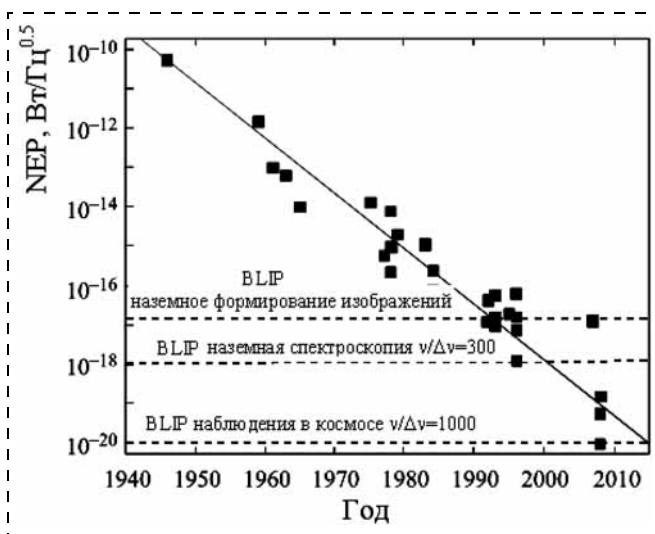


Рис. 6. Картина, показывающая улучшение NEP-болометров в два раза каждые два года [1]

ческая связь предпочтительнее для введения электромагнитной мощности в чувствительный элемент, объем которого может быть на много порядков меньше длины волны. Этот метод состоит из переноса полученной антенной мощности к сенсору. С начала 1980-х годов 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.

Результаты расчетов NEP для терагерцовых тепловых детекторов, включающие предел фонового шума, показаны на рис. 5 для низкой температуры фона. Число фотонов не мало даже для космического фона, и уменьшение NEP детектора для обнаружения индивидуальных терагерцовых фотонов должно сопровождаться уменьшением влия-

ния потока флуктуаций излучения от объекта и фонового излучения при использовании, например, узкополосного охлаждаемого фильтра или охлаждения частей объекта.

Применение тепловых детекторов, характеризующихся малой тепловой проводимостью в рабочих условиях глубокого охлаждения детектора ($T < 200$ мК), позволяет достичь значений $NEP \approx 10^{-19} \dots 10^{-20}$ Вт/Гц^{0,5} и предоставляет возможность для реализации режима счета фотонов в терагерцовом частотном диапазоне. На рис. 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.

Заключение

Настоящий прогресс в технологии терагерцовых 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, NEB, TES и болометры на холодных электронах (СЕВ)) близки к предельным характеристикам при низком уровне фона. Они охватывают весь терагерцовый 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 детекторы НЕВ характеризуются хорошими темновыми характеристиками, гигагерцовой скоростью счета и, кроме того, перспективны как счетчики отдельных фотонов в широком ИК спектральном диапазоне. Сомнительно, что сверхпроводящие НЕВ, действующие при высоких температурах, достигнут чувствительности низкотемпературных сверхпроводящих НЕВ 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 спектральных диапазонах, но их сложно объединить в матрицы с большим числом пикселей вследствие отсутствия мощных компактных твердотельных источников локальных осцилляторов (>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 терагерцовой технологии являются неохлаждаемые или слегка охлаждаемые терагерцовые 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 $10^{-9} \dots 10^{-11}$ Вт/Гц^{0,5}. Представляют интерес и исследования, направленные на создание новых разработок терагерцовых 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 [20].

Неохлаждаемые или слегка охлаждаемые сенсоры на основе, например, плазмонного резонанса 2D-электронов в HEMTs перспективны для использования в крупноформатных матрицах в системах с низкой стоимостью [1, 2]. Другие разработанные или разрабатываемые неохлаждаемые терагерцовые тепловые детекторы прямого обнаружения с $NEP \sim 10^{-10} \dots 10^{-11}$ Вт/Гц^{0,5} могут быть использованы во многих низкоразрешающих спектроскопических применениях и системах активного наблюдения.

Работа была поддержана в рамках следующих программ: АБЦП "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.

Список литературы

1. Sizov F. THz radiation sensors // Opto-Electronics Review. 2010. Vol. 18. N 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. N 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., Gershenson M. E. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics // Nat. Nanotechnol. 2008. N 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. М.: ФГУП "НПО Орион", 2011. 204 с.

12. Сизов Ф. Ф., Апатская М. В., Гуменок-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 терагерцового 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 // Тез. докл. российской конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотонической электроники "Фотоника-2011", Новосибирск, 22–26 августа 2011. С. 41.

14. Спиринов К. Е., Жолудев М. С., Антонов А. В., Румянцев В. В., Гавриленко В. И., Михайлов Н. Н., Дворецкий С. А. Терагерцовая фотопроводимость в гетероструктурах HgTe/CdHgTe(013) с квантовыми ямами // Тез. докл. российской конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотонической электроники "Фотоника-2011", Новосибирск, 22–26 августа 2011. С. 43.

15. Сизов Ф. Ф., Забудский В. В., Цыбрий 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 // Тез. докл. российской конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотонической электроники "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 // Тез. докл. российской конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотонической электроники "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 // Тез. докл. российской конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотонической электроники "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 // Тез. докл. российской конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотонической электроники "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 // Тез. докл. российской конф. и школы по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотонической электроники "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. 877–883.

УДК 681.586

С. П. Тимошенков¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф., e-mail: spt@miee.ru,

Д. С. Гаев², канд. хим. наук, доц., e-mail: dahir@mail.ru,

А. Н. Бойко¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: ant_nico@mail.ru,

Н. М. Горшкова¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: gorshkovan@bk.ru,

¹Национальный исследовательский университет "МИЭТ",

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ГАЗОПОГЛОЩАЮЩИХ СТРУКТУР В СОСТАВЕ МЭМС

Поступила в редакцию 06.09.2011

Рассматриваются способы применения пористого кремния при создании газопоглощающих структур в составе микроэлектромеханических систем. Предлагаемые способы позволяют создавать газопоглощающие структуры с высоким значением эффективной поверхности и сорбционной емкости, совместимые с технологиями микросистемной техники.

Ключевые слова: пористый кремний, МЭМС, газопоглощающие структуры, геттеры, наноструктурирование

Введение

Одно из первых применений пористого кремния (PSi) в микромеханике — его использование в качестве жертвенного слоя [1–3]. Сегодня возможности его применения в технологии МЭМС существенно расширились: пористый кремний используется для создания трехмерных микромеханических структур (мембран, консольных балок и т. д.) [4–7], как функциональный материал в составе различных сенсоров [8], а также как диэлектрик [9]. Достоинства использования пористого кремния в микромеханике — простота получения, возможность применения планарных процессов, совместимость с технологиями микрообработки.

Многие микроэлектромеханические системы и устройства требуют контроля газовой среды или поддержания вакуума в рабочем объеме и, соответственно, применения газопоглотителей (геттеров). Одно из условий эффективности газопоглотителя — наличие развитой поверхности, увеличивающей его сорбционную емкость. Площадь эффективной поверхности пористого кремния с порами нанометрового диапазона составляет до $1000 \text{ м}^2/\text{см}^3$ [10], и хотя кремний не является эффективным геттерным материалом, весьма перспективным представляется комбинация PSi и активных металлов.

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по