

УДК 621.396.621

## ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

© 2013 г.

*В.Л. Вахс, Е.Г. Домрачева, А.А. Ластовкин,  
С.И. Приползин, Е.А. Собакинская, М.Б. Черняева, В.А. Анфертьев*

Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

vax@ipm.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 29.08.2013

Специфика ТГц-диапазона, как промежуточного между микроволновым и ИК, позволяет выделить два основных подхода к разработке методов детектирования: продвижение «вверх» по диапазону электронных микроволновых приборов и перенос «вниз» методов создания оптоэлектронных устройств. В статье проведен обзор существующих методов приема излучения ТГц-диапазона.

*Ключевые слова:* ТГц частотный диапазон, детекторы на квантовых ямах, точках и сверхрешетках, приемники на основе резонансного туннелирования с участием фотонов, одноэлектронный транзистор, детекторы на поверхностных волнах, НЕВ-смеситель, детекторы на основе диодов Шоттки, электрооптическое детектирование и фотопроводящие антенны.

### Введение

Важнейшими элементами спектрометров, определяющими как их принцип действия, так и их параметры, являются источники и приемники излучения [1–3]. Традиционно используемые в микроволновом и ИК диапазонах приемники излучения [4, 5], работающие при температурах, близких к комнатной (пьезоэлектрические детекторы, болометры, термопары и др.), имеют неплохую чувствительность в ТГц-диапазоне, но их применение в ТГц-системах ограничивается низким быстродействием и в лучшем случае составляет десятки миллисекунд. Поэтому разработка приемных систем для ТГц-диапазона с высокими быстродействием и чувствительностью представляет собой актуальную задачу. Специфика ТГц-диапазона, занимающего промежуточное положение между микроволновым и ИК диапазонами, накладывает отпечаток и на подходы при разработке методов детектирования. Первый связан с продвижением «вверх» по диапазону электронных микроволновых приборов, что приводит к созданию структур с размерами порядка нанометров. Второй – с переносом «вниз» по частоте методов, на основе которых создаются оптоэлектронные устройства. При надлежащем выборе материала и дизайна наноструктур (квантовых точек, сверхрешеток и т.д.) [6, 7] можно подобрать расстояние между активными энергетическими состояниями (где разрешены переходы), чтобы оно было порядка величины кванта ТГц-излучения. Таким образом, методы электроники и фотоники можно объединить с помощью полупроводниковых

нанотехнологий [7, 8], которые в настоящее время играют ключевую роль в создании ТГц-приборов [9, 10]. За последние несколько лет были предложены различные способы детектирования ТГц-излучения, основанные на таких физических принципах, как межподзонные переходы и связанные с ними явления в квантовых ямах, сверхрешетках и точках; на туннелировании с участием фотона в резонансных туннельных диодах; регистрации фотонов с помощью одноэлектронных транзисторов и поверхностных волн в транзисторах с высокой подвижностью электронов и др.

### Основная часть

#### 1. Детекторы на квантовых ямах, точках и сверхрешетках

Возможность детектирования ИК-излучения приемниками на основе квантовых ям исследовалась во многих работах [11, 12]. Для перехода в ТГц-диапазон в работе [13] предложено использовать межподзонные переходы в периодических структурах на квантовых ямах – сверхрешетках. Благодаря модуляции блоховских осцилляций электронов в мини-зонах, эти структуры могут быть использованы как широкополосные ТГц-детекторы [14, 15]. Применение методов на основе другого явления – циклотронного резонанса и квантового эффекта Холла позволило создать ТГц-детекторы с чувствительностью  $1.1 \cdot 10^7$  В/Вт и обнаружительной способностью  $4.0 \cdot 10^{13}$  см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ /Вт при 4.2 К [16].

Аналогичный механизм детектирования может быть получен в структурах на квантовых

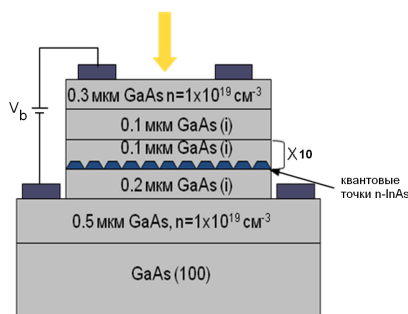


Рис. 1. Детектор на квантовых точках

точках [17, 12]. Одновременно с развитием технологии формирования квантовых точек на основе молекулярной пучковой эпитаксии или металлоорганической газофазной эпитаксии ведутся исследования по применению квантовых точек InAs, InGaAs на GaAs для детектирования излучения среднего и дальнего ИК-диапазона [18, 19]. Пример устройства, с помощью которого был зарегистрирован отклик на длине волны 17 мкм (при 90 К) [20], представлен на рис. 1.

Для повышения чувствительности вместо одного слоя квантовых точек могут быть использованы структуры на сверхрешетках с квантовыми точками [21]. По сравнению с квантовыми ямами, которые, согласно соответствующим правилам отбора, не восприимчивы к нормально падающим фотонам [11, 22], квантовые точки могут регистрировать такое излучение, вызывающее межподзонные переходы. Дискретная плотность состояний и уменьшенное фонное рассеяние в квантовых точках должны дать возможность перестраиваемой, узкополосной регистрации с высокой эффективностью и малым темновым током.

Фотоотклик детектора определяется отношением времени жизни носителей к времени переноса [3, 4]. При заданной структуре и материале детектора вольт-ваттная чувствительность может быть повышена за счет увеличения времени жизни носителей. Например, в сверхчувствительном фотодетекторе на квантовых точках InAs среднего ИК-диапазона время жизни носителей было увеличено за счет использования латеральной структуры (рис. 2) [23]. Продольное электрическое поле отталкивает носители заряда от квантовых точек, поддерживая заряд квантовых точек и ток на более длительное время.

## 2. Приемники на основе резонансного туннелирования с участием фотонов

Процесс резонансного туннелирования, сопровождающийся поглощением или испусканием одного или нескольких фотонов, используется для регистрации фотонов низких энергий [24]. Туннелирование с участием фотонов

(ТУФ) наблюдалось во многих структурах: джозефсоновских контактах, полупроводниковых сверхрешетках, резонансных туннельных диодах, квантовых точках и др. [12, 25]. Стандартный подход в теоретических исследованиях этого явления заключается в добавлении гармонического члена вида  $V \cos \omega t$  в гамильтониан системы, что приводит к появлению боковых полос  $n\omega\hbar$  ( $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) без изменения пространственного распределения волновых функций [26]. Падающее излучение меняет вероятность туннелирования, что может быть зафиксировано по изменению величины туннельного тока. С использованием механизма ТУФ в резонансном туннельном диоде с интегрированной ТГц-антенной были зарегистрированы ТГц-фотоны при комнатной температуре [27]. Необходимо отметить, при комнатной температуре энергия квантов ТГц-излучения меньше, чем  $kT$ , что отражает селективность процесса резонансного туннелирования.

Эффект резонансного туннелирования в джозефсоновских контактах сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник (SIS) позволил создать целый класс приборов для регистрации излучения в диапазоне 0.1–1.4 ТГц. Были разработаны приемники на основе сверхпроводящих смесителей [28–30], чувствительность которых близка к квантовому пределу [31, 32]. Полоса их приема составляет порядка 10%. Для более высоких частот чувствительность SIS-приемников на порядок меньше. Примером таких систем являются SIS-смесители на основе туннельных переходов Nb-AlO<sub>x</sub>-Nb, разрабатываемые в ИРЭ РАН [33–35]. Шумовая температура лучших образцов SIS-смесителей составляет 26 К при 500 ГГц, 70 К при 680 ГГц, 220 К при 950 ГГц и 350 К при 1.1 ТГц. Использование в качестве гетеродина джозефсоновских генераторов (250–700 ГГц) позволило создать сверхчувствительный приемник излучения в диапазоне 550–650 ГГц [36]. Системы на основе SIS-смесителей в основном используются в астрономии и работают на многих наземных телескопах: APEX, CSO, ALMA, PdB, SMA и др. [37, 38].

Эффективным способом детектирования ТГц-излучения может стать применение ТУФ в одноэлектронных транзисторах (ОЭТ) на квантовых ямах, которые по существу являются самыми чувствительными фотоэлектронными приборами [39]. Впервые эффект ТУФ в квантовых ямах наблюдался при использовании GaAs /AlGaAs одноэлектронного транзистора с расщепленным затвором, что позволило зарегистрировать излучение микроволнового диапазона [40]. Механизм ТУФ в квантовых точках изображен на рис. 3 [40]. Добавление одного электрона в квантовую яму приводит к повышению энергии

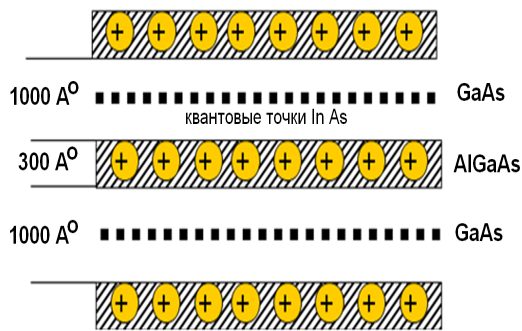


Рис. 2. Схематическое изображение фотодетектора на квантовых точках

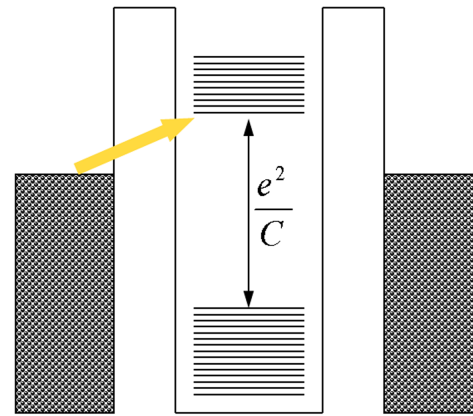


Рис. 3. Энергетическая диаграмма квантовой точки с «добавленным» электроном

тических уровней на величину энергии заряда  $e^2/C$ . При поглощении фотона падающего излучения с частотой  $\omega$  может произойти туннелирование электрона из левого резервуара в квантовую точку. Если за этим следует туннелирование из квантовой ямы в правый резервуар, то такой процесс вносит вклад в измеряемый ток. При выполнении условия  $|\varepsilon_i - \varepsilon_f| < \omega\hbar$  ( $\varepsilon_i$  – начальное состояние с наибольшей энергией,  $\varepsilon_f$  – конечное состояние с наименьшей энергией) возможно наблюдение туннелирования с участием одного фотона. В эксперименте изменением напряжения затвора добиваются выполнения условия однофотонного резонанса  $|\varepsilon_i - \varepsilon_f| = \omega\hbar$ , при этом в токе стока появляются пики проводимости.

Для детектирования ТГц-излучения разработаны ОЭТ с затвором Шоттки на GaAs/AlGaAs [41]. Два затвора Шоттки размером порядка нанометра обернуты вокруг нанопроволоки GaAs, образуя двойные туннельные барьеры с квантовой точкой посередине.

Продвижение в область детектирования высоких частот ТГц-диапазона может быть связано с применением механизма ТУФ в квантовых точках на углеродных нанотрубках (УНТ). По сравнению с традиционно используемыми квантовыми точками на основе сверхпроводников или полупроводников, квантовые точки на УНТ имеют ряд преимуществ. В частности, их зарядовая энергия обычно достигает 10 мэВ (~2.4 ТГц). Такой энергетический диапазон почти в 10 раз больше, чем у обычных квантовых точек, что позволяет работать при более высоких температурах. Пример эффекта ТУФ в квантовых точках на УНТ в диапазоне 1.4÷4.2 ТГц (при  $T=4$  К) представлен в [42].

### 3. Детекторы единичных фотонов на основе ОЭТ

Использование высокочувствительных однопериодных транзисторов и сильного маг-

нитного поля позволило создать приемник единичных фотонов [43]. Под влиянием приложенного магнитного поля в квантовой точке образуется тонкая структура уровней Ландау. При поглощении одного фотона на двух соседних уровнях Ландау образуется электрон-дырочная пара, что ведет к поляризации затвора. Наведенная поляризация сдвигает пик проводимости транзистора. Достаточно длительное время жизни поляризации может дать большую чувствительность детектора. Основным недостатком такого детектора излучения является необходимость использования сильных магнитных полей. В работе [44] с использованием фотоиндуцированного переноса между параллельными квантовыми точками было продемонстрировано детектирование единичного фотона в субТГц-диапазоне (500 ГГц) без использования магнитного поля. Детекторы единичных фотонов в ТГц-диапазоне с наилучшими характеристиками среди аналогичных детекторов (экспериментальные значения  $NEP=10^{-21}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, высокая токовая чувствительность –  $10^6-10^{10}$  А/Вт) представлены в работе [45].

### 4. Детекторы на поверхностных волнах

В подходе на основе оптоэлектронных методов ограничения на максимальную частоту регистрации связаны с временем переноса носителей и постоянной времени прибора. Один из способов преодоления этих ограничений – применение подхода бегущих волн, аналогичного используемому в лампах бегущей волны [46]. Есть перспективы в использовании поверхностных волн двумерного электронного газа в традиционных транзисторах с высокой подвижностью электронов, экранированных проводящей плоскостью. Плазменные волны распространяются быстрее, чем электроны, и ограничения, связанные с временем переноса, отсутствуют. Одна из проблем применения такого подхода –

Таблица 1

## Технические характеристики НЕВ-детекторов различных типов

Характеристика	Широкополосный детектор	Скоростной детектор
Спектральный интервал	1 – 2000 мкм	1 – 1000 мкм
Чувствительность	50 В/Вт	4 В/Вт
Эквивалентная мощность шума	$10^{-11}$ Вт/Гц <sup>-1/2</sup>	$10^{-10}$ Вт/Гц <sup>-1/2</sup>
Динамический диапазон	10 – 100	300
Импеданс	50 Ом	50 Ом
Постоянная времени	1 нс	20 пс
Рабочая температура	4.5 К	7 – 10 К
Ток смещения	5 мА	5 мА

наличие затухания волн из-за столкновений, приводящего к понижению чувствительности ТГц-приемника по сравнению с теоретическими оценками [47]. Для повышения чувствительности в работе [48] резонансный туннельный транзистор объединен с устройством на плазменных волнах. Кроме того, сложности реализации детекторов на поверхностных волнах связаны с низкой эффективностью связи падающего излучения с плазмонными возбуждениями и проблемой конвертации поглощенной энергии в электрический сигнал. Для усиления связи излучения с плазмонами используются полевые транзисторы с решетчатым затвором, что позволяет модулировать плотность носителей заряда. Применение таких детекторов позволяет получить чувствительность порядка 1 В/Вт [49].

##### 5. Детекторы и смесители на горячих электронах

Особый интерес в настоящее время вызывают смесители и детекторы на горячих электронах (Hot Electron Bolometer (НЕВ)), работающие при гелиевых температурах [50–54]. В основе их работы лежит эффект разогрева электронов в тонких пленках сверхпроводников при поглощении ими электромагнитного излучения. Использование этого явления позволяет объединить в одном приемном устройстве короткое время отклика с высокой чувствительностью к излучению, приближающейся к величине квантового предела. Существующие НЕВ-системы работают до 6 ТГц. В диапазоне выше 1.4 ТГц их чувствительность (порядка  $20h\nu/k$ ) лучше, чем у SIS-приемников.

В качестве примера приведем НЕВ смесители и детекторы, разрабатываемые в МГПИ

[55–57]. Детектор объединен на одной подложке с планарной частотно-независимой антенной, излучение на которую собирается иммерсионной линзой, прижатой к подложке, или внешней короткофокусной линзой, и помещен в гелиевый криостат с оптическими окнами. Детектор представляет собой чувствительный элемент, включенный в логарифмическую спиральную антенну, которая прижата к плоской стороне вытянутой сферической линзы. На сегодняшний день в диапазоне 1–6 ТГц эти смесители не имеют себе равных – их типичная температура шума изменяется от 1000 К на частоте 700 ГГц до 8800 К на частоте 5.2 ТГц. Технические характеристики НЕВ-детекторов двух типов, занимающих крайние положения в спектре приборов, приведены в табл. 1.

НЕВ-смесители активно используются в ТГц-системах с гетеродинным приемом, где роль гетеродина играет, например, квантово-каскадный лазер [58, 59]. Разработан вариант гетеродинного ТГц-приемника на основе NbN НЕВ-смесителя, где в качестве генератора гетеродина применена охлаждаемая полупроводниковая сверхрешетка [60].

##### 6. Детекторы на основе диодов Шоттки

Широкое распространение получили детекторы на основе диодов с барьером Шоттки [61, 62]. Компания Microtech Inc. (США) производит детекторы на основе GaAs в диапазоне 0.2–1.0 ТГц. Их чувствительность ( $10^{-9}$ – $10^{-10}$ ) на порядок хуже, чем у сверхпроводящих приемников. Основными преимуществами этих детекторов являются быстрое действие (до 20 ГГц) и работа при комнатных температурах.

Таблица 2

## Сравнительные характеристики методов ЭД и ФП детектирования ТГц-излучения

Параметр	ЭД	ФП
Требуемая мощность	25 мВт	40 мВт
Отношение $c/\text{ш}$ *	$10^4$	$10^4$
Полоса	$\sim 4$ ТГц**	$\sim 3$ ТГц
Сканирование в режиме реального времени	Да***	Да
МГц прерывание	Да	Нет
Вспомогательные устройства	Да	Минимум
Стабильность	++	+
Простота регулировки	++	+

## Примечание

\* Синхронное детектирование с  $\tau \approx 100$  мс.

\*\* При использовании других ТГц-генераторов может быть достигнута более широкая полоса.

\*\*\* При условии наличия быстрого прерывания и системы синхронизации.

## 7. Электрооптическое детектирование и фотопроводящие антенны

Для регистрации импульсного излучения, в основном, применяются электрооптическое детектирование (ЭД) на основе эффекта Поккельса и фотопроводящие переключатели (ФП) [55, 59]. Принцип детектирования с помощью фотопроводящих антенн сходен с методом генерации излучения. Излучение фемтосекундного лазера генерирует носители заряда в полупроводнике. Приходящие ТГц-импульсы приводят к ускоренному движению зарядов по направлению к электродам и к появлению тока величины от нескольких сотен пА до десятков нА. Сравнение методов детектирования представлено в табл. 2 [56].

## Заключение

Проведенный анализ показывает, что большинство представленных ТГц-приемников находится на стадии разработок, но существуют образцы, уже используемые во многих приложениях. К ним относятся SIS-смесители и НЕВ-смесители, работающие при гелиевых температурах, а также детекторы на диодах Шоттки и сверхрешетках, работающие при температурах, близких к комнатной. Для приема импульсного излучения используются детекторы на основе электрооптического детектирования и фотопроводящих антенн.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственный контракт № 14.740.11.1134).*

## Список литературы

1. Зайдель А.Н., Островская Г.В., Островский Ю.И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976. 375 с.
2. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения. СПб.: Политехника, 1991. 240 с.
3. Ишанин Г.Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 175 с.
4. Справочник по инфракрасной технике / Ред. У. Волф, Г. Цисис. Пер. с англ. В 4-х т. Т. 3. Приборная база ИК-систем. М.: Мир, 1999. 472 с.
5. Красильников А.А., Куликов Ю.Ю., Рыскин В.Г., Щитов А.М. Микроволновые приемники для диагностики малых газовых составляющих земной атмосферы // Изв. АН. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 12. С. 1786–1791.
6. Prasad P.N. Nanophotonics. N.Y.: John Wiley & Sons, 2004. 300 p.
7. Ohtsu M., Kobayashi K., Kawazoe T., et al. Principles of Nanophotonics (Optics and Optoelectronics). London: Taylor and Francis, 2008. 248 p.
8. Handbook of Semiconductor Nanostructures and Nanodevices / Eds. A.A. Balandin, K.L. Wang. N.Y.: Amer. Sci. Publ., 2006. 2500 p.
9. Bollaert S. Nano-devices for THz applications // Unpublished data. sylvain.bollaert@iemn.univ-lille1.fr.
10. Салех Б., Тейх М. Основы фотоники: Пер. с англ. Долгопрудный, МО: Изд-во «Интеллект», 2009.
11. Levine F. Quantum-well infrared photodetectors // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. P. R1–R81.
12. Rostami A. et al. Terahertz Technology. Lecture Notes in Electrical Engineering, 77. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 246 p.
13. Tomlinson A.T., Chang C.C., Stone R.J. et al. Intersubband transitions in GaAs coupled-quantum-wells for use as a tunable detector at THz frequencies // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. № 12. P. 1579–1581.
14. Klappenberger F., Ignatov A.A., Winnerl S., et al. Broadband semiconductor superlattice detector for THz radiation // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. № 12. P. 1673–1675.
15. Ignatov A.A., Klappenberger F., Schomburg E. and Renk K.F. Detection of THz radiation with Semiconductor Superlattices at Polar-Optic Phonon Frequencies // J. Appl. Phys. 2002. V. 91. № 3. P. 1281–1286.
16. Kawaguchi Y., Hirakawa K., Saeki M., et al. Performance of High-Sensitivity Quantum Hall Far Infrared Photodetectors // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. № 1. P. 136–139.
17. Ryzhii V. The theory of quantum-dot infrared phototransistors // Semicond. Sci. Technol. 1996. V. 11. P. 759–765.
18. Maimon J., Finkman E., Bahir G., et al. Intersublevel transitions in InAs/GaAs quantum dots

- infrared photoconductors // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. № 14. P. 2003–2005.
19. Ye Z., Campbell J.C., Chen Z., et al. Voltage-Controllable Multiwavelength InAs Quantumdot Infrared Photodetectors for Mid- and Far-Infrared Detection // *J. Appl. Phys.* 2002. V. 92. № 7. P. 4141–4143.
20. Phillips J., Kamath K., Bhattacharya P. Far-Infrared Photoconductivity in Self-organized InAs Quantum Dots // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 72. № 16. P. 2020–2022.
21. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // *ФТП.* 1998. Т. 32. № 1. С. 3–18.
22. Kwong-Kit Choi. *The Physics of Quantum Well Infrared Photodetectors* (Series in Modern Condensed Matter Physics, V. 7). Singapore: World Scientific Publ. Comp., 1997. 420 p.
23. Lee S.-W., Hirakawa K., Shimada Y. Bound-to-continuum intersubband photoconductivity of self-assembled InAs quantum dots in modulation-doped heterostructures // *Appl. Phys. Lett.* 1999. V. 75. № 10. P. 1428–1430.
24. Мурзин В.Н., Митягин Ю.А. Резонансное тунелирование, электрические и оптические явления в длиннопериодных полупроводниковых сверхрешетках // *УФН.* 1999. Т. 169. С. 464–468.
25. Ю П., Кардона М. *Основы физики полупроводников.* М.: Изд-во URSS, 2002. 557 с.
26. Tien P., Gordon J. Multiphoton Process Observed in the Interaction of Microwave Fields with the Tunneling between Superconductor Films // *Phys. Rev.* 1998. V. 129. P. 647–651.
27. Oguma Y., Sashinaka N., Asada M. Terahertz Response with Gradual Change from Square-Law Detection to Photon-Assisted Tunneling in Triple-Barrier Resonant Tunneling Diodes // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999. V. 38. № 7A. P. L717–L719.
28. Iosad I.I., Roddatis V.V., Polyakov S.N. et al. Superconducting Transitional Metal Nitride Films for THz SIS Mixers // *IEEE Trans. Appl. Superconduct.* 2001. V. 11. P. 3832–3835.
29. Uzawa Y., Wang Z., Kawakami A. Development of Superconducting Niobium Nitride SIS Mixers at Terahertz Frequencies // *J. Commun. Res. Lab.* 1998. V. 45. № 3. P. 155–164.
30. Biny M., Gaidisy M.C., Zmuidzinasy J., et al. THz SIS mixers with normal-metal Al tuning circuits // *Supercond. Sci. Technol.* 1995. V. 8. P. A136–A139.
31. Feldman M.J. Theoretical considerations for THz SIS mixers // *Intern. J. Infrared and Millimeter Waves.* 1987. V. 8. № 10. P. 1287–1295.
32. Dieleman P. Fundamental limitations of THz and Niobiumnitride SIS mixers. PhD Thesis. Department of Applied Physics of the University of Groningen, 1997. P. 124.
33. Koshelets V.P., Ermakov A.B., Filippenko L.V. et al. Integrated Submillimeter Receiver for TELIS // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2007. V. 17. P. 336–342.
34. Кошелец В.П., Шитов С.В., Филиппенко Л.В. и др. Сверхпроводниковые интегральные приемники субмм волн // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2003. Т. XLVI. С. 687–701.
35. Koshelets V.P., Birk M., Boersma D. et al. Integrated SubmmWave Receiver: Development and Applications // Chapter 10 in book: *Fundamentals of Superconducting Nanoelectronics.* Springer, 2011. 338 p.
36. Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Sobolev A.S., et al. Linewidth of Josephson flux flow oscillators // *Physica C.* 2002. V. 372–376. P. 316–321.
37. <http://fcrao.astro.umass.edu/instrumentation/sequoia/seq.html>.
38. Phillips T., Keene J. Submillimeter astronomy // *Proc. IEEE.* 1992. V. 80. P. 1662–1678.
39. De Franceschi S., Kouwenhoven L., Schönberger C. and Wernsdorfer W. Hybrid superconductor–quantum dot devices // *Nature Nanotechnology.* 2010. V. 5. P. 703–711.
40. Kouwenhoven L.P., Jauhar S., Orenstein J., McEuen P.L. Observation of photon-assisted tunneling through a quantum dot // *Phys. Rev. Lett.* 1994. V. 73. P. 3443–3446.
41. Hasegawa H., Kasai S. Sensing Terahertz Signals with III–V Quantum Nanostructures // *Proc. SPIE.* 2003. V. 4999.
42. Kawano Y., Fuse T., Toyokawa S. et al. Terahertz photon-assisted tunneling in carbon nanotube quantum dots // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103. P. 034307.
43. Komiyama S., Astafiev O., Antonov V. et al. A single-photon detector in the far-infrared range // *Nature.* 2000. V. 403. P. 405–407.
44. Astafiev O., Komiyama S., Kutsuwa T. Single-photon detector in the microwave range // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 80. P. 4250–4252.
45. Komiyama S. Single-Photon Detectors in the Terahertz Range // *IEEE Journ. of Selected Topics in Quantum Electronics.* 2011. V. 17. № 1. P. 54–66.
46. Жуков Б.С., Перегонов С.А. *Лампы бегущей волны.* М.: Сов. радио, 1967. 46 с.
47. Shur M.S., Lu J.-Q. Terahertz sources and detectors using two-dimensional electronic fluid in high electron-mobility transistors // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2000. V. 48. P. 750–756.
48. Ryzhii V., Khmyrova I., Shur M. Resonant detection and frequency multiplication of terahertz radiation utilizing plasma waves in resonant-tunneling transistors // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 88. P. 750–756.
49. Shaner E.A., Lee M., Wanke M.C. et al. Tunable THz detector based on a gating gated field-effect transistor // *Proc. SPIE.* 2005. V. 6120. P. 612006.
50. Jiang L., Shiba S., Shimbo K. et al. Development of 0.8 THz and 1.5 THz Waveguide NbTiN HEB Mixers // *Proc. 19-th Intern. Symp. on Space Terahertz Technology.* Groningen, 28–30 April 2008. P. 54–57.
51. Baselmans J.J.A., Hajenius M., Gao J.R. et al. Doubling of sensitivity and bandwidth in phonon cooled hot electron bolometer mixers // *Applied Physics Letters.* 2004. V. 84. № 11. March.
52. Khosropanah P., Gao J.R., Laauwen W.M. et al. Low noise NbN hot electron bolometer mixer at 4.3 THz // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 221111.
53. Loudkov D., Tong C.-Y.E., Blundell R. et al. Performance of the NbTiN hot electron bolometer mixer with AlN buffer layer at terahertz frequency range // *IEEE Trans. Appl. Superconductivity.* 2005. V. 15. № 2.
54. Karasik B.S., Sergeev A.V., and Prober D.E. Nanobolometers for THz Photon Detection // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology.* 2011. V. 1. № 1. P. 97–111.

55. Morozov D.V., Smirnov K.V., Smirnov A.V. et al. Millimeter / submillimeter phonon-cooled hot electron bolometer mixer based on two-dimensional electron gas in AlGaAs/GaAs heterostructure // ФТП. 2005. Т 39. № 9. С. 1117–1121.
56. Гершензон Е.М. Детекторы и смесители на эффекте разогрева электронов излучением. URL: <http://perst.issph.kiae.ru/Inform/HiTech/Gersh.htm>.
57. Ralph S.E., Grischkowsky D. THz spectroscopy and source characterization by optoelectronic interferometry // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. P. 1070–1072.
58. Gao J.R., Hovenier J.N., Yang Z.Q. et al. Terahertz heterodyne receiver based on a quantum cascade laser and a superconducting bolometer // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 244104.
59. Zhang W., Khosropanah P., Hovenier J.N. et al. Demonstration of a heterodyne receiver for detection of OH line at 3.5 THz based on a superconducting HEB mixer and a distributed feedback quantum cascade laser // Proc. 19-th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. Groningen, The Netherlands, April, 2008.
60. Пентин И.В., Смирнов А.В., Рябчун С.А. и др. Полупроводниковая сверхрешетка – твердотельный терагерцовый гетеродинный источник для электронно-разогревного NbN-смесителя // Журн. технической физики. 2012. Т. 82. Вып. 7. С. 75–78.
61. Ткаченко В.В., Ижко Н.С., Угрин М.И. Арсенид-галлиевые диоды на кристаллодержателе для детекторов 5- и 8-мм диапазонов длин волн // Техника и приборы СВЧ. 2008. № 1. С. 50–51.
62. Wen Ruming, Sun Hao, Teng Teng et al. An InP-based heterodimensional Schottky diode for terahertz detection// Journ. of Semiconductors. 2012. V. 33. № 10 P. 104001-(1–4).

### RECEIVERS OF THz FREQUENCY RANGE

*V.L. Vaks, E.G. Domracheva, A.A. Lastovkin, S.I. Pripolzin,  
E.A. Sobakinskaya, M.B. Chernyaeva, V.A. Anfertiev*

There are two basic approaches to the development of detection methods in THz frequency range lying between microwave and infrared frequencies: «moving up» the operation range of electron microwave devices and «bringing down» the methods for the development of optoelectronic devices. An overview of existing methods for receiving terahertz radiation is presented.

*Keywords:* THz frequency range; quantum well, quantum dot, and superlattice detectors; photon-assisted resonant tunneling receivers, single-electron transistor, surface wave detectors, HEB mixer, Schottky diode detectors, electro-optic detection and photoconducting antennas.