

## ПРИЁМНИК ИЗЛУЧЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ НА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНАХ

<sup>1</sup> Ю. Е. Каменев, <sup>2</sup> Ф. Ф. Сизов, <sup>2</sup> В. Н. Добровольский

<sup>1</sup> *Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова, НАН Украины,  
12 ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [ire@ire.kharkov.ua](mailto:ire@ire.kharkov.ua)*

<sup>2</sup> *Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины,  
41, пр. Науки, Киев, 03028, Украина  
E-mail: [sizov@isp.kiev.ua](mailto:sizov@isp.kiev.ua)*

Предложен болометрический приемник на горячих носителях заряда (электронах) миллиметрового и субмиллиметрового излучений с прямым детектированием сигналов, функционирующий при комнатной или пониженной температурах, при которых еще существует в нем биполярная проводимость. Функционирование приемника основано на изменении проводимости под действием излучения в биполярной плазме узкощелевого полупроводника. Выполненные эксперименты продемонстрировали возможность регистрации излучения таким приемником излучения при 300 К и частотах излучения  $\nu = 0,036, 0,039, 0,055, 0,075, 0,89$  и  $1,58$  ТГц, а также при понижении температуры до  $-80$  °С. Ил. 3. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** болометр, биполярная проводимость, горячие носители, терагерцы.

Разработка приемников излучения (ПИ) для миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн активно ведется на протяжении последних десятилетий. Технологии миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов спектра необходимы, например, в биологии для неразрушающего исследования биологических объектов, контроле содержания почтовых отправок, диагностике плазмы и спектроскопии газов, в системах безопасности для обнаружения скрытых взрывчатых веществ и оружия, астрономии (наблюдение галактик, излучения галактической пыли, фонового излучения) и др. [1-3].

По принципам регистрации сигналов чувствительные элементы приемников излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов спектра в основном такие же, как и для остальных спектральных диапазонов: возбуждение электронной подсистемы чувствительного элемента – квантовые (фотонные) приемники излучения; тепловое воздействие электромагнитного излучения на чувствительный элемент – тепловые приемники излучения. В последнем случае в данных участках спектра ввод мощности излучения во многих случаях осуществляется с помощью микроантенн.

Также в этих спектральных диапазонах используются ПИ выпрямляющего типа, в которых из-за нелинейности вольтамперных характеристик (ВАХ) создаваемое падающим излучением высокочастотное напряжение приводит к появлению составляющей тока, которая соответствует плотности мощности излучения. К этому классу ПИ относятся, например, ПИ на основе барьеров Шоттки, ПИ на основе туннельных переходов сверхпроводник/полупроводник, ПИ на основе нелинейности туннельного тока квазича-

стиц в переходах сверхпроводник / изолятор / сверхпроводник (СИС) [1, 4].

Типичные значения эквивалентной шуму мощности (*noise equivalent power* - (*NEP*)) ПИ выпрямляющего типа, которые функционируют в основном в области низких и сверхнизких температур ( $T < 4$  К), в зависимости от спектрального диапазона, режима и температуры функционирования находятся в пределах  $NEP \sim 10^8 - 10^{16}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> [4, 5].

При температурах, близких к комнатной основными неохлаждаемыми ПИ выпрямляющего типа в миллиметровой и субмиллиметровой областях спектра остаются точечно-контактные и планарные диоды Шоттки, *NEP* которых находится в пределах  $3 \cdot 10^{10} - 10^8$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при  $\nu = 891$  ТГц [4]. Среди наиболее чувствительных приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн являются смесители на основе нелинейности туннельного тока квазичастиц в СИС переходах [1, 6]. Эти ПИ эксплуатируются, однако лишь при криогенных температурах  $T \leq 2$  К.

ПИ – смесители на основе СИС – ограничены сверху по полосе частот  $\nu \approx (0,7 - 1,25)$  ТГц [6, 7], что связано с механизмом отклика – туннелированием нормальных электронов, стимулированным СВЧ фотонами. Например, для ниобия эта частота составляет  $\nu \approx 0,7$  ТГц и по порядку величины соответствует его энергетической щели.

ПИ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, функционирующие в более коротковолновом субмиллиметровом диапазоне вплоть до оптической области спектра, являются смесители на горячих электронах (болометры на горячих электронах – *hot electron bolometers* (*HEB*)), граничная частота отклика которых не имеет вы-

раженной частотной границы. Практически важными для этих детекторов являются тонкие пленки NbN ( $d = 30-35 \text{ \AA}$ ) на подложках Si или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Время релаксации энергии электронов в этих объектах составляет  $\tau \sim 10^{-11}$  при температурах, близких к критической ( $T_c \approx 10 \text{ K}$ ) [7]. *HEB*-приемники излучения из сверхпроводящих пленок NbN являются одними из наиболее чувствительных детекторов субмиллиметрового диапазона. В области частот функционирования  $\nu \approx (0,4-2,5) \text{ ТГц}$  их чувствительность достигает значений шумовой температуры  $T_{ш} \approx 10 \cdot h\nu/k_B$  [8]. При повышении частоты излучения их чувствительность ухудшается.

Несмотря на высокую чувствительность использование ПИ с криогенным охлаждением в матричном или многоэлементном исполнении в повседневной аппаратуре затруднено. Поэтому актуальными являются задачи создания хоть и меньшей чувствительности, но более удобных в эксплуатации неохлаждаемых или незначительно охлаждаемых ПИ для портативных систем видения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

В работе [9] была развита модель ПИ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, основанная на явлении разогрева биполярной плазмы в узкощелевых полупроводниках. Разогретые излучением свободные носители заряда изменяют их генерационные и рекомбинационные характеристики. Это приводит к уменьшению их числа и повышению сопротивления ПИ. В развитой модели полупроводникового болометра на горячих носителях заряда (*semiconductor hot electron bolometer* – (*SHEB*)) в полупроводниках с биполярной проводимостью и сильно различающихся по величине подвижностью электронов и дырок время ответа близко к времени жизни носителей заряда ( $\tau \sim 10^{-7}-10^{-8} \text{ с}$ ). Такие ПИ с прямым детектированием не требуют глубокого охлаждения (их температура функционирования  $T \geq 77 \text{ K}$ ) и из них можно конструировать матричные приемники излучения, так как их размеры должны быть соизмеримы или меньше удвоенной длины амбиполярной диффузии  $D_a$  (в данном случае  $D_a \leq 15-20 \text{ мкм}$ ).

Известны разработанные уже давно [10] болометры на горячих носителях в полупроводниках с монополярной проводимостью и высокой концентрацией электронов. Однако они могут функционировать лишь при криогенных температурах, а чувствительность их быстро уменьшается при продвижении в субмиллиметровую область спектра.

Из предварительных оценок [9] предлагаемый ПИ на основе узкощелевых полупроводников  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  ( $x \sim 0,2$ ) с биполярной проводимостью может функционировать в диапазоне температур  $T \approx 78-300 \text{ K}$  (диапазоне температур,

при которых сохраняется биполярная проводимость) без ограничения спектрального диапазона. Выполненные при  $T = 300 \text{ K}$  и  $\lambda = 8 \text{ мм}$  эксперименты (размеры ПИ  $a \times b = 50 \times 50 \text{ мкм}^2$ , толщина  $d \sim 8 \text{ мкм}$ ) показали, что чувствительность таких ПИ излучения достигает  $S_\nu = 2 \text{ В/Вт}$ , а эквивалентная шуму разность температур *NEP*, рассчитанная как  $NEP = U_{\text{noise}}/S_\nu$  при  $\Delta f = 1 \text{ ГГц}$ , составляла  $NEP \sim 3,5 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}$ , что соответствует *NEP* неохлаждаемых ПИ выпрямляющего типа в миллиметровой и субмиллиметровой областях спектра [4]. Рассчитанные значения *NEP* более чем на два порядка меньше оцененных теоретически из модельных представлений, что объясняется влиянием контактных площадок, служащих микроантеннами в миллиметровой и субмиллиметровой областях спектра.

Нами была исследована чувствительность линейки из таких ПИ (10 элементов в линейке) при  $300 \text{ K}$  и более высоких частотах вплоть до терагерцовая диапазона ( $\nu = 0,039, 0,055, 0,075, 0,89$  и  $1,58 \text{ ТГц}$ ) в зависимости от приложенного смещения, а также их температурная чувствительность при  $\nu = 0,89 \text{ ТГц}$  при разных смещениях.

Типичные зависимости сигналов одной чувствительной площадки линейки болометров от тока смещения показаны на рис. 1 для  $\nu = 0,89 \text{ ТГц}$  и  $\nu = 1,58 \text{ ТГц}$  при  $T = 300 \text{ K}$ . В качестве источника излучения с  $\lambda = 337 \text{ мкм}$  использован HCN лазер. Промодулированная с  $f = 600 \text{ Гц}$  выходная мощность линейно поляризованного излучения с диаметром луча  $\varnothing \approx 40 \text{ мм}$  была  $W \approx 5 \text{ мВт}$ . Плотность мощности падающего излучения с  $\nu = 1,58 \text{ ТГц}$  была в 5 раз меньше по сравнению с плотностью мощности излучения с  $\nu = 0,89 \text{ ТГц}$ .

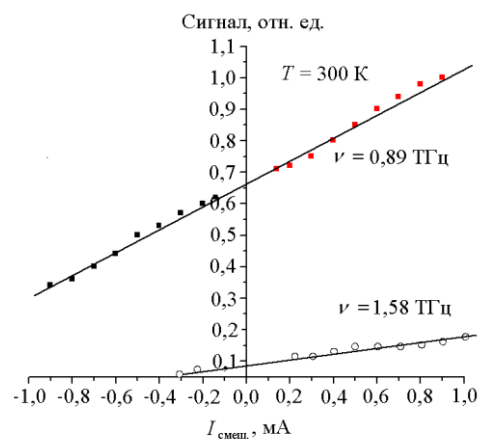


Рис. 1. Типичные зависимости выходного сигнала болометра на горячих электронах от тока смещения для излучения с  $\nu = 0,89 \text{ ТГц}$  ( $\lambda = 337 \text{ мкм}$ ) и  $\nu = 1,58 \text{ ТГц}$  ( $\lambda = 190 \text{ мкм}$ );  $T = 300 \text{ K}$

Из рис. 1 видно, что сигнал ПИ не обращается в нуль при отсутствии смещения, и это на-

блюдается при любых поляризациях излучения по отношению к контактным площадкам, что обусловлено различающимися площадями контактных площадок, служащих микроантеннами. Влияние асимметрии площадей контактных площадок более заметно в субмиллиметровой области спектра и практически исчезает в области длин волн  $\lambda \geq 5$  мм ( $\nu < 75$  ГГц) (см. рис. 2). Сигналы болометра могут как уменьшаться, так и увеличиваться с понижением температуры в зависимости от направления приложенного смещения (рис. 3).

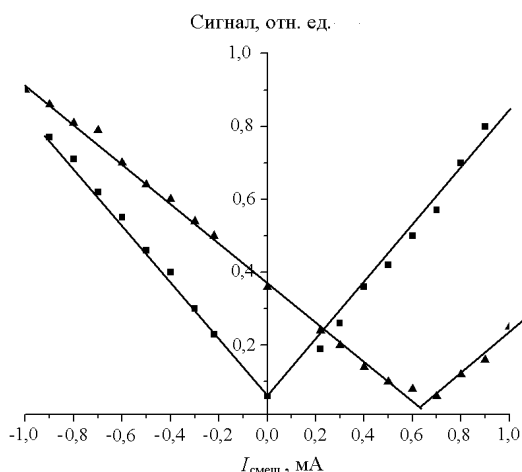


Рис. 2. Выходные сигналы болометра на горячих электронах в зависимости от тока смещения при  $\nu = 55$  ГГц ( $\lambda = 5,45$  мм) и  $\nu = 75$  ГГц ( $\lambda = 4,0$  мм);  $T = 300$  К. (■ – 55 ГГц; ▲ – 75 ГГц)

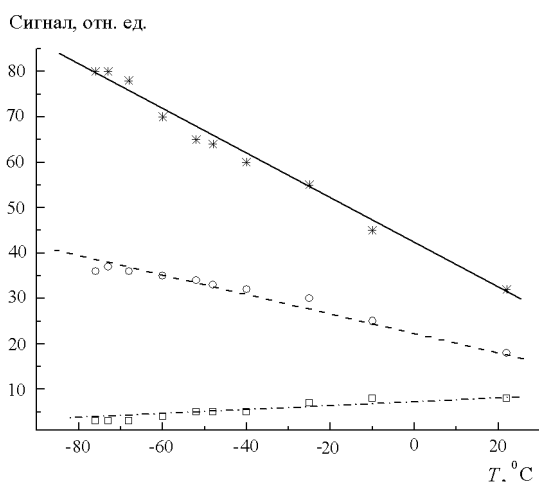


Рис. 3. Температурные зависимости сигналов болометра на горячих электронах при  $\nu = 0,89$  ТГц ( $\lambda = 337$  мкм) и разных токах смещения: □ – 0,9 мА; ○ – 0 мА; \* – +0,9 мА

Величина сигнала зависит также от ориентации электрического вектора волны по отношению к длинной оси электрических контактов к чувствительному элементу болометра. При параллельной и перпендикулярной ориентациях в зави-

симости от длины волны излучения детектируемые сигналы могут различаться в несколько раз.

**Выводы.** Концепция использования разогрева электронного газа излучением в собственном узкощелевом полупроводнике (биполярная проводимость) открывает возможность создания неохлаждаемых или слабоохлаждаемых и относительно быстрых ПИ излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов спектра, из которых могут быть созданы многоэлементные линейчатые или матричные приемники излучения даже при отсутствии прикладываемого смещения к чувствительным элементам. Для увеличения чувствительности болометра, как показывают оценки, размеры его чувствительной площадки должны быть уменьшены в несколько раз.

1. Mittleman D. Sensing with terahertz radiation. Berlin - N.-Y.: Springer-Verlag, 2003. - 337 p.
2. Brown E. R. Fundamentals of Terrestrial Millimeter-Wave and THz Remote Sensing // Terahertz Sensing Technology. - N.-Y.: World Scientific. - 2003. - 2. - P. 1-103.
3. Siegel P. H. THz technology: an overview // Intern. J. High Speed Electronics and Systems. - 2003. - 13. - P. 351-394.
4. Божков В. Г. Полупроводниковые детекторы, смесители и умножители частоты терагерцового диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. - 2003. - 46, №8-9. - С. 702-731.
5. Розанов Б. А., Розанов С. Б. Приемники миллиметровых волн. - М.: Радио и связь, 1989. - 169 с.
6. Кошелев В. П., Шитов С. В., Филиппенко Л. В. и др. Интегральные сверхпроводниковые приемники субмиллиметровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. - 2003. - 46, №8-9. - С. 687-701.
7. Гольцман Г. Н., Лудков Д. Н. Сверхпроводниковые смесители на горячих электронах терагерцового диапазона и их применение в радиоастрономии // Изв. вузов. Радиофизика. - 2003. - 46, №8-9. - С. 671-686.
8. Semenov A., Gol'tsman G. N., Sobolewski R. Hot-electron effect in superconductors and its applications for radiation sensors // Supercond. Sci. Technol. - 2002. - 15. - P. R1-R16.
9. Dobrovolsky V. N., Sizov F. F. Room temperature, or moderately cooled, fast THz semiconductor hot electron bolometer // Semicond. Sci. Technol. - 2007. - 22. - P. 103-106.
10. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Методы и техника / Под ред. Р. А. Валитова, Б. И. Макаренко. - М.: Радио и связь, 1984. - 149 с.

## MILLIMETER AND SUBMILLIMETER RANGE RECEIVER ON HOT ELECTRONS

Yu. E. Kamenev, F. F. Sizov, V. N. Dobrovolsky

A bolometric receiver of the millimeter and submillimeter radiation on hot charge carriers (electrons) with the direct detecting of signals is proposed. The device is functioning at room and lower temperatures at which the bipolar conductivity still exists in it. Operation of the receiver is based on changing the conductivity under the influence of radiation in bipolar plasma of a narrow-slot semiconductor. The experiments which have been carried out demonstrate the possibility to record the radiation by using this receiver at 300 K and the radiation frequencies  $\nu = 0,036, 0,039, 0,055, 0,075, 0,89$  и  $1,58$  THz and also at the lower temperatures up to  $-80$  °C.

**Key words:** bolometer, bipolar conductivity, hot carriers, terahertz.

ПРИЙМАЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ  
МІЛІМЕТРОВОГО ТА СУБМІЛІМЕТРОВОГО  
ДІАПАЗОНІВ НА ГАРЯЧИХ ЕЛЕКТРОНАХ

Ю. Ю. Каменев, Ф. Ф. Сизов,  
В. М. Добровольський

Запропоновано болометричний приймач на гарячих носіях заряду міліметрового та субміліметрового випромінювань з прямим детектуванням сигналів, який функціонує при кімнатних або понижених температурах, при яких ще існує в

ньому біполярна провідність. Функціонування приймача базується на зміні провідності під впливом випромінювання в біполярній плазмі вузькощільного напівпровідника. Проведені експерименти продемонстрували можливість реєстрації випромінювання таким приймачем при 300 К та частотах випромінювання  $\nu = 0,036, 0,039, 0,055, 0,075, 0,89$  та 1,58 ТГц, а також при зниженні температури до  $-80$  °С.

**Ключові слова:** болометр, біполярна провідність, гарячі носії, терагерц.

*Рукопись поступила 3 марта 2008 г.*