

УДК 621.383

А. В. ШЕВЧИК-ШЕКЕРА

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников  
им. В. Е. Лашкарева НАН Украины

E-mail: shevchik\_anya@mail.ru

## РЕАЛЬНАЯ И ПРЕДЕЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НЕКОТОРЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ТГц/суб-ТГц-ДИАПАЗОНОВ

*Показано, что при расчете предельных параметров NEP приемников излучения ТГц/суб-ТГц-диапазонов, ограниченных флуктуациями потоков фонового излучения, необходимо учитывать фактор группировки фотонов при их излучении нагретыми телами и влияние дифракции, вносимой антенной при введении излучения в ПИ.*

*Ключевые слова:* NEP, приемники ТГц/суб-ТГц-диапазонов.

Терагерцевый/субтерагерцевый (ТГц/суб-ТГц) диапазоны излучения, расположенные между дальним ИК-диапазоном и микроволновым радиодиапазоном (0,03–3 мм, 0,1–10 ТГц), не изучены в полной мере. Результаты исследований в этой области спектра долгое время не находили широкого применения из-за отсутствия мощных источников ТГц/суб-ТГц-излучения и приемников, способных зарегистрировать излучение в данных областях спектра.

За последние годы с развитием фемтосекундных твердотельных лазеров (особенно лазеров на кристаллах сапфира, активированных ионами титана) и приемников ТГц/суб-ТГц-диапазонов излучения наметился существенный сдвиг в изучении этих диапазонов длин волн.

Излучение в ТГц/суб-ТГц-области может быть использовано для контроля качества пищевых продуктов, биомолекулярных исследований, создания сканеров для досмотра пассажиров в аэропортах, проверки почтовых отправок на содержание биологического оружия и др. ТГц/суб-ТГц-диапазоны являются важными для астрофизических исследований, т. к. излучение Вселенной после Большого Взрыва в данном диапазоне длин волн содержит около 98% фотонов [1].

ТГц/суб-ТГц-излучение является, в определенной мере, альтернативой рентгеновским технологиям, поскольку многие материалы (пластмасса, ткань, бумага и т. д.) прозрачны в этом спектральном диапазоне или имеют характерные полосы поглощения. К тому же, ТГц/суб-ТГц-излучение является неионизирующим.

Важным звеном в системах ТГц/суб-ТГц-излучения являются приемники излучения (ПИ), преобразующие электромагнитные волны (оптические сигналы) в электрические. Все системы приема ТГц/суб-ТГц-излучения делятся на две группы — когерентные (гетеродинные) и некогерентные (прямого детектирования) системы (см., например, [2]). Гетеродинные системы, в

отличие от систем с прямым детектированием, позволяют регистрировать не только амплитуду сигнала, но и его фазу, что дает дополнительную информацию о регистрируемом объекте. Частота принимаемых сигналов в гетеродинных системах преобразуется в значительно меньшую частоту (1–10 ГГц), при которой сигналы уже могут быть усилены малошумящими усилителями. Эти системы являются в основном селективными (узкополосными).

Одной из основных характеристик приемников ТГц/суб-ТГц-излучения является параметр NEP (noise equivalent power) — мощность, эквивалентная шуму. Значения NEP описывают минимальный поток  $W_s^{\min}$ , который может быть зарегистрирован приемником при условии, что отношение сигнала к шуму равно единице.

На сегодняшний день, опубликовано достаточно много материалов, посвященных ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов, где приведены значения их NEP. Например, в [3–6] описаны такие ПИ и их предельные значения NEP. Однако в литературных источниках нет результатов исследований, в которых учитывались бы флуктуации потоков фонового излучения для разных температур фона в случае дифракционно-ограниченных пучков.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ реальной и предельной чувствительности некоторых приемников излучения ТГц/суб-ТГц-диапазонов. Расчет значений NEP проводился без учета фактора Бозе — Эйнштейна и с его учетом, что важно для рассматриваемого диапазона [2].

### Схемы с прямым и гетеродинным детектированием сигналов

Схемы ПИ с прямым и гетеродинным типами регистрации сигналов могут быть в равной мере использованы в технических системах видения. Преимуществом приемников с прямым детектированием сигналов является простота регистра-

ции сигналов. Такие системы, как правило, являются пассивными и не требуют дополнительных источников для подсветки наблюдаемого объекта. Преимуществом гетеродинного детектирования сигналов по сравнению с прямым детектированием является более высокое отношение сигнал/шум для сигнального тока (или напряжения) из-за присутствия мощности опорного излучателя. Квантовый предел для нефоторезистивных ПИ, ограниченных флуктуациями фотонов только от опорного излучателя, равен одному фотону.

#### Схема прямого (некогерентного) детектирования сигналов (рис. 1)

Такие схемы используются в основном в спектроскопии и системах технического зрения в ультрафиолетовом, видимом, ИК-, ТГц- и мм-диапазонах спектра, т. е. в системах, не требующих сверхвысокого спектрального разрешения и «быстрых» детекторов (здесь могут применяться даже неохлаждаемые детекторы умеренной чувствительности с временем ответа  $\tau=10^{-2}-10^{-3}$  с).

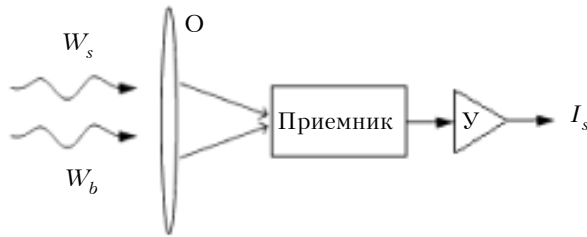


Рис. 1. Схема прямого детектирования сигнала:  $W_s$  — мощность сигнала;  $W_b$  — мощность фонового излучения; О — фокусирующая оптика; У — усилитель

В системах используются следующие приемники:

- низкотемпературные полупроводниковые болометры на горячих носителях ( $\tau \approx 10^{-6}$  с);
- неохлаждаемые тепловые приемники излучения (ячейки Голя, пироэлектрики, болометры и микроболометры с  $\tau=10^{-2}-10^{-3}$  с), их  $NEP$  обычно составляет  $10^{-11}-10^{-8}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup> [7];
- различные типы полупроводниковых детекторов (InSb-, Si- или Ge-болометры на горячих электронах, примесные приемники излучения из Si и Ge) [8] с  $\tau=10^{-6}-10^{-9}$  с и  $NEP=10^{-11}-5 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup> при температуре, меньшей чем 4 К;
- примесные фоторезисторы, которые чувствительны вплоть до длины волны  $\lambda=400$  мкм [9], с  $NEP=5 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при температуре, меньше чем 2 К;
- низкотемпературные болометры, имеющие близкую к предельной чувствительность в пределах от далекой ИК-области спектра до мм-диапазона,  $NEP=(0,4-3) \cdot 10^{-19}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup> при температуре 100–300 мК [10] и низком уровне фона.

Для нефоторезистивных ПИ, ограниченных флуктуациями фотонов только в сигнальном потоке, минимально детектируемая мощность и предельные значения  $NEP$  определяются как [2]

$$W_{s,dir}^{\min} = \frac{2h\nu}{\eta} \Delta f; \quad (1)$$

$$NEP_{dir} = \frac{W_{s,dir}^{\min}}{\sqrt{\Delta f}} = \frac{2h\nu}{\eta} \sqrt{\Delta f}, \quad (2)$$

где  $h$  — постоянная Планка;

$\nu$  — частота излучения;

$\eta$  — квантовая эффективность (коэффициент связи) приемника излучения;

$\Delta f$  — полоса пропускания.

#### Схема гетеродинного (когерентного) детектирования сигналов (рис. 2)

Такие схемы используются в основном при изучении космического фонового микроволнового излучения в мм- и ТГц-диапазонах спектра и в спектроскопии. Для них необходимы относительно мощные опорные источники излучения и «быстрые» детекторы ( $\tau=10^{-10}-10^{-11}$  с) для обеспечения выполнения условия  $W_o > W_s$  ( $W_o$  — мощность сигнала опорного излучателя LO частоты  $\nu_{LO}$ ).

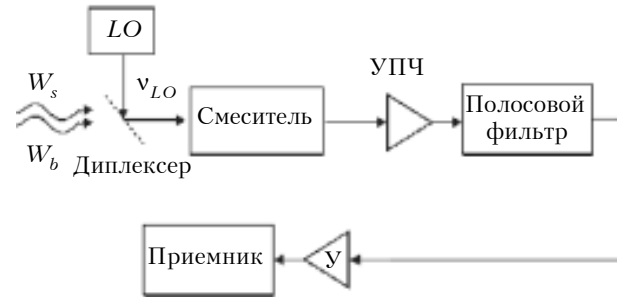


Рис. 2. Схема гетеродинного детектирования сигнала

Приемниками здесь могут служить высокочувствительные сверхпроводящие структуры, функционирующие при сверхнизких температурах (100–200 мК) с  $NEP=10^{-17}-10^{-20}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup> [10] — СИС-структуры («сверхпроводник — изолятор — сверхпроводник») или сверхпроводящий болометр на горячих носителях ( $HEB$  — hot electron bolometer).

Для нефоторезистивных ПИ, ограниченных флуктуациями фотонов только в опорном потоке, минимально детектируемая мощность и предельные значения  $NEP$  определяются как [2]

$$W_{s,het}^{\min} = \frac{h\nu}{\eta} \Delta f; \quad (3)$$

$$NEP_{het} = \frac{W_{s,het}^{\min}}{\Delta f} = \frac{h\nu}{\eta} \Delta f. \quad (4)$$

**Расчет предельных значений  $NEP$  ПИ без учета фактора Бозе—Эйнштейна и с его учетом**

Предельные значения  $NEP$  ПИ, работающих в ТГц/суб-ТГц-диапазонах, определяются фундаментальными факторами — флуктуациями фонового излучения.

Для нефоторезистивных приемников излучения прямого детектирования, когда флуктуационный шум фонового излучения превалирует над остальными шумами, минимальный детектируемый сигнал, ограниченный фоном, определяется выражением [2]

$$W_{s,dir}^{\min} = \sqrt{\frac{2h\nu}{\eta}} W_b \Delta f. \quad (5)$$

Отсюда видно, что  $W_s^{\min} \sim \Delta f^{0,5}$  и детектируемый сигнал может быть меньше мощности фонового излучения  $W_b$ .

Поскольку при переходе к низкочастотному излучению ( $h\nu \ll k_B T_b$ ) среднее число фотонов увеличивается и это приводит к их группировке, при проведении расчета  $NEP$  ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов необходимо учитывать коэффициент Бозе — Эйнштейна [2]

$$K(\lambda) = \exp \frac{hc}{\lambda k_B T_b} / \left( \exp \frac{hc}{\lambda k_B T_b} - 1 \right), \quad (6)$$

где  $c$  — скорость света;

$k_B$  — постоянная Больцмана;

$T_b$  — температура излучения фона.

При таких расчетах также нужно учитывать влияние дифракционно-ограниченных пучков излучения, падающих на антенну. Ввод излучения в ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов часто осуществляется с помощью антенн, размер которых близок к длине волны излучения, а размеры приемных чувствительных элементов намного меньше. Использование антенн улучшает ввод мощности излучения в детекторы, что позволяет отследить изменение свойств детекторов при воздействии излучения небольшой мощности. Начиная с 1980-х годов для работы в этих спектральных диапазонах начали широко использоваться планарные антенны [11].

Учитывая «теорему антенн», согласно которой  $A\Omega \geq \lambda^2$  ( $A$  — площадь антенны,  $\Omega$  — телесный угол излучения антенны) [12, с. 35], для шага интегрирования  $\Delta\lambda/\lambda=0,001$  и с учетом коэффициента Бозе — Эйнштейна выражение для расчета  $NEP$  принимает вид

$$NEP(\lambda, T_b) = \sqrt{\lambda^2 \frac{\varepsilon \tau_o}{\eta} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{4\pi h^2 c^3}{\lambda^6} K(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$ ,  $\tau_o$  — коэффициенты пропускания атмосферы и пропускания оптики соответственно.

Чувствительность гетеродинных детекторов часто приводится в терминах шумовой температуры  $T_{sys}$ , которая связана с  $NEP$  зависимостью [13]

$$NEP \approx 2k_B T_{sys} \sqrt{\frac{B_{IF}}{B_{out} \tau}}, \quad (8)$$

где  $B_{if}$  — полоса промежуточных частот;  
 $B_{out}$  — полоса частот на выходе.

На рис. 3 представлены графики зависимости значений предельных  $NEP$  ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазона, рассчитанные при  $\varepsilon\tau_o/\eta=1$  и с учетом влияния дифракционно-ограниченных пучков излучения, падающих на антенну, при  $\Delta\lambda/\lambda=0,001$ . На рисунке также отмечены экспериментальные значения  $NEP$  для ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов с прямым и гетеродинным детектированием, известные из литературы. Некоторые характеристики этих приемников приведены в таблице.

Из графиков видно, что при  $T_b=3$  К предельные значения  $NEP$ , связанные с величиной фоно-

| № ПИ                                       | Характеристики ПИ                                                                                                                                                                | $NEP$ , Вт/Гц <sup>0,5</sup> |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| ПИ с гетеродинным детектированием сигналов |                                                                                                                                                                                  |                              |
| 1                                          | Диоды Шоттки, $T_b=300$ К, $B_{IF}=4$ ГГц, $T_{sys}=2220$ К, $B_{out}=1$ Гц [13]                                                                                                 | $3,9 \cdot 10^{-15}$         |
| 2                                          | Диоды Шоттки, $T_b=300$ К, $f_{in}=2,5$ ТГц, $B_{IF}=4$ ГГц, $T_{sys}=2220$ К, $B_{out}=1$ Гц [13]                                                                               | $1,5 \cdot 10^{-14}$         |
| 3                                          | HEB, $T_b=300$ К, $f_{in}=0,1$ ТГц, $B_{IF}=10$ ГГц, $T_{sys}=3190$ К, $B_{out}=1$ Гц [13]                                                                                       | $9,4 \cdot 10^{-15}$         |
| 4                                          | HEB, $T_b=300$ К, $f_{in}=0,1$ ТГц, $B_{IF}=10$ ГГц, $T_{sys}=4100$ К, $B_{out}=1$ Гц [13]                                                                                       | $3,8 \cdot 10^{-14}$         |
| ПИ с прямым детектированием сигналов       |                                                                                                                                                                                  |                              |
| 5                                          | GaAs/AlGaAs, сверхпроводниковый одноэлектронный транзистор (superconducting SET), $T_b \approx 50$ К, $\lambda=14-16$ мкм, $T_d=4,2$ К, $\Delta\nu/\nu=0,008$ , $\eta=0,02$ [14] | $8,3 \cdot 10^{-19}$         |
| 6                                          | HgCdTe, $288 \times 4$ , $T_b \approx 300$ К, $\lambda=8-11$ мкм, $T_d \approx 80$ К, $\Delta\nu/\nu=0,315$ , $\eta=0,02$ [15]                                                   | $1,5 \cdot 10^{-14}$         |
| 7                                          | Субмиллиметровая болометрическая линейка общего пользования (SCUBA), $\lambda=850$ мкм [15]                                                                                      | $1,5 \cdot 10^{-16}$         |
| 8                                          | Массив из 48 болометрических детекторов, $\lambda=3000$ мкм [15]                                                                                                                 | $1,5 \cdot 10^{-17}$         |
| 9                                          | Датчик на краю сверхпроводящего перехода (TES), $\lambda=60$ мкм [16]                                                                                                            | $1,5 \cdot 10^{-18}$         |
| 10                                         | HEB, $\lambda=300$ мкм [17]                                                                                                                                                      | $3,0 \cdot 10^{-17}$         |
| 11                                         | MoAu-TES, Ta-TES, $\lambda=460$ мкм [18]                                                                                                                                         | $1,3 \cdot 10^{-18}$         |
| 12                                         | TES, $\lambda=460$ мкм [18]                                                                                                                                                      | $3,0 \cdot 10^{-19}$         |

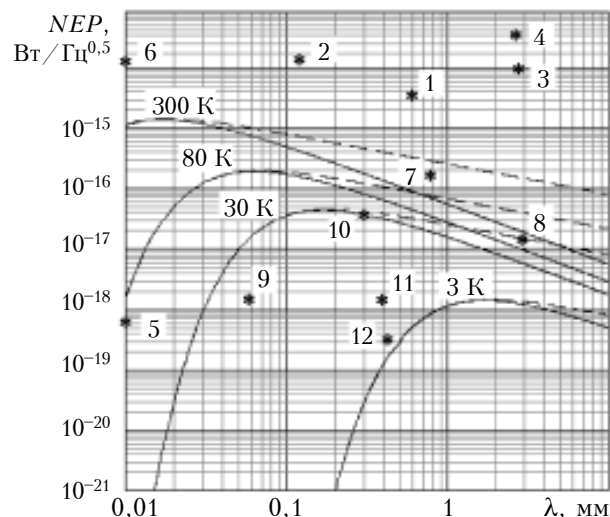


Рис. 3. Зависимости предельного  $NEP$  ПИ от длины волны, рассчитанные без учета фактора группировки фотонов (сплошные линии) и с его учетом (пунктир), а также экспериментальные значения (\*)  $NEP$  для ПИ, указанных в таблице (цифры соответствуют номеру ПИ в таблице)

вой нагрузки, ограничены длиной волны 200 мкм, а при  $T_b=30$  К — длиной волны 20 мкм. Из существующих приемников рассматриваемого диапазона наиболее чувствительными являются охлаждаемые сверхпроводниковые болометры на эффекте электронного разогрева ( $HEB$ ) и датчики на краю перехода ( $TES$ ). Они работают при низких фоновых нагрузках ( $T_b=3-30$  К), и их  $NEP$  приближается к своим предельным значениям,  $10^{-17}-10^{-19}$  Вт/Гц<sup>0,5</sup>.

Приведенные на рис. 3 данные показывают, что рассчитанные для диапазона длин волн  $\lambda=0,01-10$  мм и различных температур фона (3, 30, 80, 300 К) предельные значения  $NEP$  приемников излучения с учетом и без учета коэффициента Бозе — Эйнштейна, могут существенно отличаться друг от друга. Так, например, при  $T_b = 300$  К отличия начинают появляться при длине волны  $\lambda = 20$  мкм, а при  $\lambda = 3$  мм эти значения отличаются уже на порядок. Из результатов следует, что при расчете предельных значений  $NEP$  ПИ ТГц/суб-ТГц-диапазонов необходимо учитывать фактор группировки фотонов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Blain A. W., Smail I., Ivison R. J. et al. Submillimetre galaxies // *Physics Reports*. — 2002. — Vol. 369. — P. 111176.
2. Сизов Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения. — К.: Академперіодика, 2011. [Sizov F. F. *Fotoelektronika dlya sistem videniya*. Kiev Akadempriodika. 2011]
3. Richards P. L. Bolometers for infrared and millimeters waves // *Appl. Phys.* — 1994. — Vol. 76, N 1. — P. 1–24. <http://dx.doi.org/10.1063/1.357128>
4. Hubers H. W. Terahertz heterodyne receivers // *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* — 2008. — Vol. 14. — P. 378–391.
5. Benford D. J. Transition edge sensor bolometers for cmb polarimetry // *CMBpol Technology Whitepaper*. — 2008. [http://cmbpol.uchicago.edu/workshops/technology2008/depot/cmbpol\\_technologies\\_benford\\_jcps\\_4.pdf](http://cmbpol.uchicago.edu/workshops/technology2008/depot/cmbpol_technologies_benford_jcps_4.pdf)

6. Karasik B. S., Sergeev A. V. The hot-electron photon counter // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. — 2005. — Vol. 15, N 2. — P. 618–621. DOI: 10.1109/TASC.2005.849963

7. Sizov F., Rogalski A. THz detectors // *J. Prog. Quantum Electron.* — 2010. — Vol. 34. — P. 278–347.

8. Siegel P. H. Terahertz technology // *IEEE T. Microw. Theory.* — 2002. — Vol. 50. — P. 910–928.

9. Hübbers H. W., Pavlov S. G., Holldack K. et. al. Long wavelength response of unstressed and stressed Ge:Ga detectors // *Proc. SPIE*. — 2006. — Vol. 6275. — P. 505–603.

10. Wei J., Olaya D., Karasik B.S. et. al. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics // *Nat. Nanotechnol.* — 2008. — Vol. 3. — P. 496–500.

11. Grade J., Haydon P., van der Weide D. Electronic terahertz antennas and probes for spectroscopic detection and diagnostics // *Proc. IEEE*. — 2007. — Vol. 95. — P. 1583–1591.

12. Brown E. R. Fundamentals of terrestrial millimeter-wave and THz remote sensing // In book: *Terahertz Sensing Technology*. — N.-Y.: World Scientific. — 2003. — Vol. 2. — P. 1–103.

13. Siegel P. H., Dengler R. J. Terahertz heterodyne imaging: instruments // *J. of Infrared and Millimeter Waves*. — 2006. — Vol. 27, N 5. — P. 631–656. DOI: 10.1007/s10762-006-9109-4

14. Takeji Ueda, Zhenghua An, Susumu Komiyama. Temperature dependence of novel single-photon detectors in the long-wavelength infrared range // *IR MM THz Waves*. — 2011. — Vol. 32, N. 5. — P. 673–680.

15. Sizov F., Rogalski A. THz radiation sensors // *Progr. Quant. Electr.* — 2010. — Vol. 34. — P. 278–347.

16. Morozov D., Mauskopf P. D., Ade P. et al. Ultrasensitive TES bolometers for space based FIR Astronomy // *AIP Conf. Proc.* — 2009. — Vol. 1185. — P. 48–51.

17. Siegel P. H., Dengler R. J. THz heterodyne imaging part I: Introduction and technique // *IR MM waves*. — 2006. — Vol. 27, N. 4. — P. 456–480.

18. Karasik B. S., Cantor R. Optical NEP in hot-electron nanobolometers // *21st International symposium on Space Terahertz Technology*. — Oxford. — 2010. — P. 291–297.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 19.08.2011 г.

Shevchik-Shekera A. V. **Real and limit sensitivity of some radiation detectors of THz/sub-THz ranges.**

**Keywords:** NEP detectors, terahertz/sub-terahertz detectors.

It is shown that while calculating the NEP parameter of radiation detectors of THz/sub-THz range, the fluctuations of the background radiation flux at different temperatures of the background in the case of diffraction-limited beam should be taken into account.

Ukraine, Kiev, V. Ye. Lashkaryov institute of semiconductor physics.

Шевчик-Шекера А. В. **Реальна та гранична чутливість деяких приймачів випромінювання ТГц/суб-ТГц-діапазонів.**

**Ключові слова:** NEP, приймачі ТГц/суб-ТГц-діапазонів.

Показано, що при розрахунку параметра NEP приймачів випромінювання ТГц/суб-ТГц-діапазонів необхідно враховувати флуктуації потоків фонового випромінювання для різних температур фону в разі дифракційно-обмежених пучків.

Україна, м. Київ, ІФН ім. В. Є. Лашкар'єва НАНУ.