

---

# СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

---

УДК 535.231.62:535.14

## ПРИЕМНИК СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН НА ИСКУССТВЕННЫХ МАТЕРИАЛАХ

*Есман А.К., Потачиц В.А., Зыков Г.Л., Кулешов В.К.*

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: ak\_esman@bntu.by

*Разработан неохлаждаемый высокоэффективный болометрический приемник на основе массива планарных резонансных элементов микро- и наноразмеров, расположенных по траектории двухзаходной спирали в строго геометрическом порядке. Показано, что предложенный приемник субмиллиметрового диапазона позволяет достичь потерь на отражение -26,4 дБ, коэффициента стоячей волны 1,1 и коэффициента полезного действия ~ 98 %.*

**Ключевые слова:** приемник субмиллиметрового диапазона длин волн, массив планарных резонансных элементов, потери на отражение, коэффициент стоячей волны, коэффициент полезного действия.

### Введение

В последнее время активно развиваются пути совершенствования параметров и характеристик приемников электромагнитного излучения, находящегося между оптическим и СВЧ диапазонами, на основе неохлаждаемых детекторов, интегрированных в планарные антенны. Технологий производства терагерцовых чувствительных элементов достаточно много, но практически наиболее востребованными являются микроболометры и ферроэлектрики (тонкопленочные и толстопленочные) [1].

В настоящее время микроболометры имеют преимущество перед ферроэлектриками, что подтверждается ориентацией производителей на использование микроболометров [2, 3]. Микроболометры производятся двух типов: охлаждаемые и неохлаждаемые, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки, но, по критерию «цена – эффективность» лидирующие позиции занимают неохлаждаемые микроболометры, которые будут рассмотрены в данной работе. Принцип работы таких детекторов основан на

регистрации изменений электрических свойств чувствительного элемента в зависимости от количества попадающей на его поверхность тепловой энергии соответствующего электромагнитного диапазона длин волн [4].

В последние годы широкое применение находят искусственные материалы, так называемые метаматериалы, обладающие уникальными свойствами, которые отсутствуют в природных материалах [5]. Такие среды позволяют управлять свойствами электромагнитных волн и тем самым открывают широкие возможности по созданию оригинальных преобразователей с улучшенными параметрами и характеристиками [6].

Цель работы – исследование и оптимизация микроболометра, интегрированного в планарную двухзаходную спиральную антенну, выполненную на основе массивов периодически расположенных резонаторов микро- и наноэлементов, в форме спиральных фрагментов, размеры которых существенно меньше длины волны принимаемого электромагнитного излучения.

### Структура микроболометра

Предложенный микроболометр конструктивно представляет собой приемную часть, выполненную на основе массива планарных резонансных элементов 2 и 7, расположенных по траектории двухзаходной спирали в строго геометрическом порядке (рисунок 1). Термочувствительный элемент 5 содержит микрорезонансные элементы на кремниевой подложке 1 в виде фрагментов левых и правых спиралей 2 и 7. Вдоль всех сторон термочувствительного элемента располагаются спирали микрометровых размеров.

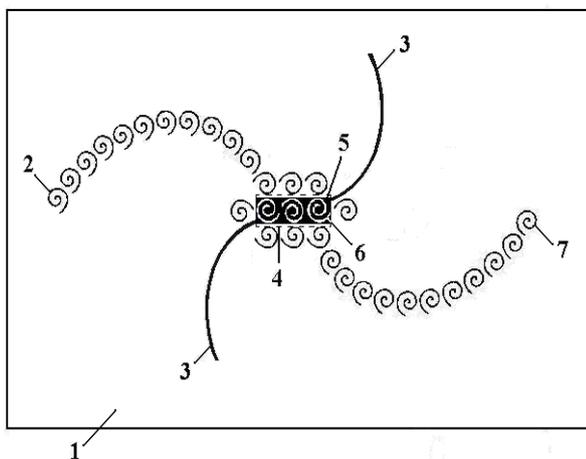


Рисунок 1 – Неохлаждаемый приемник терагерцового излучения: 1 – подложка; 2 – массив левых спиральных фрагментов; 3 – выводы; 4 – поглотитель; 5 – термочувствительный элемент; 6 – микрорезонаторы; 7 – массив правых спиральных фрагментов

Микроболометр располагается на кремниевой подложке 1 с относительной диэлектрической проницаемостью 11,9. Длина и радиус резонансных спиральных элементов из хрома равны 1,8 витка и 0,8 мкм соответственно. Термочувствительный элемент 5 с размерами 3,4 мкм × 10,9 мкм × 50 нм и выводы 3 с длиной, шириной и толщиной соответственно 93 мкм, 1,2 мкм и 1 мкм также выполнены из хрома с удельной проводимостью  $\sim 1,3 \times 10^{-7}$  Ом·м. Термочувствительный элемент 5 содержит щели в виде трех фрагментов спиралей.

В рассматриваемом приемнике входное электромагнитное излучение поступает на массив левых 2 и правых 7 спиральных фрагментов и микрорезонаторы 6, эффективно поглощаются ими, т.е. практически без отражения, так как

изменение показателя преломления на границе раздела незначительно. При этом входное излучение, прошедшее через термочувствительный элемент 5, возвращается обратно после отражения от тыльной стороны подложки 1 для повторного поглощения. Поглощенное электромагнитное излучение наводит в микрорезонаторах 6 спиральной формы электрические токи, которые нагревают термочувствительный элемент 5. Так как удельное сопротивление термочувствительного элемента 5 зависит от температуры, то электрический информационный сигнал с выхода устройства формируется стандартным образом путем измерения сопротивления между выводами 3.

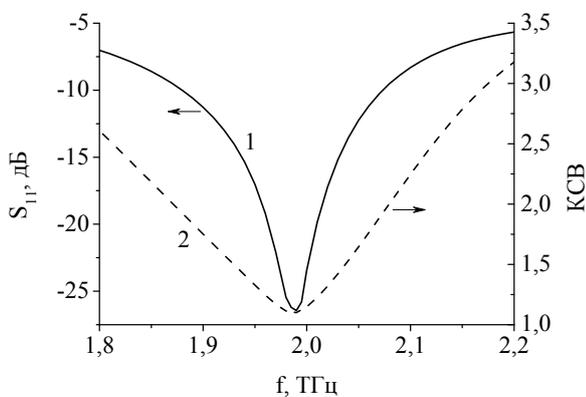
### Компьютерное моделирование

Моделирование электродинамических основных ожидаемых параметров и характеристик болометрического приемника проводилось с помощью стандартизированного в промышленности программного пакета *Ansoft HFSS* [7]. Моделирование в *HFSS* основано на использовании метода конечных элементов, включающего адаптивное генерирование и деление ячеек, и является достаточно эффективным при исследовании всех необходимых параметров и характеристик микроболометра. В тех местах, где происходят значительные изменения амплитуды электромагнитного поля, осуществляется дополнительное разбиение элементов. Это разбиение в ряде случаев позволяет уменьшить число итераций для выполнения критерия сходимости, а также уменьшить конечное число элементов – тетраэдров в сетке разбиения, что, как следствие, приводит к экономии времени моделирования или позволяет разработчику получить более мелкое локальное разбиение модели, а это, в свою очередь, определяет точность результатов. В то же время аппаратные ресурсы компьютера, на котором выполняется компьютерный эксперимент, определяют время расчета основных параметров и характеристик предложенного приемника.

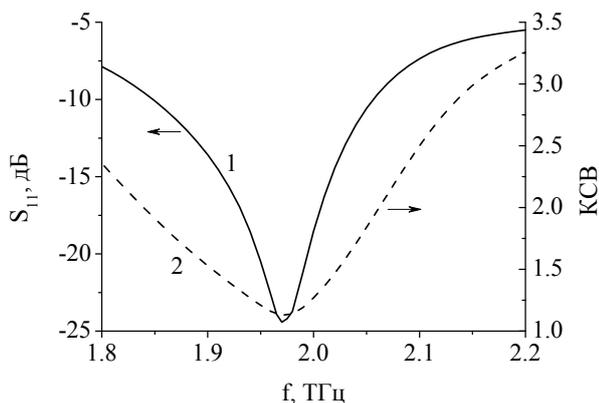
### Анализ полученных результатов

Частотные зависимости потерь излучения за счет отражения ( $S_{11}$ ) и коэффициента стоячей волны (КСВ) микроболометрического приемника для двух значений ширины  $b$  резонансных спиральных элементов приведены на рисунке 2.

Экстремальные значения  $S_{11} = -26,45$  дБ и  $KCB = 1,11$  достигаются на частоте 1,99 ТГц при  $b = 475$  нм, а  $S_{11} = -24,42$  дБ и  $KCB = 1,13$  достигаются на частоте 1,97 ТГц при  $b = 400$  нм. Увеличение ширины  $b$  от 200 до 475 нм и одновременное уменьшение расстояния  $h$  между ними и термочувствительным элементом от 300 до 25 нм приводит к увеличению мощности, поглощаемой термочувствительным элементом, от  $7,98 \times 10^7$  до  $4,37 \times 10^9$  Вт/м<sup>2</sup> (вставка на рисунке 3). Частотные зависимости напряженности  $E$  и мощности  $P$  термочувствительного элемента при ширине  $b = 475$  нм и расстоянии  $h = 25$  нм приведены на рисунке 3. Показано, что их максимальные значения  $2,12 \times 10^6$  В/м и  $4,37 \times 10^9$  Вт/м<sup>2</sup> соответственно достигаются на частоте 1,9 ТГц.



а



б

Рисунок 2 – Частотные зависимости потерь на отражение электромагнитного излучения  $S_{11}$  (1) и коэффициента стоячей волны (2) болометрического приемника с шириной резонансных спиральных элементов, равной 475 (а) и 400 (б) нм

Из рисунка 3 следует, что значения ширины резонансных спиральных элементов

$b = 475$  нм и расстояния между ними и термочувствительным элементом  $h = 25$  нм являются оптимальными.

На частотах, при которых достигаются экстремальные значения  $S_{11}$  и  $KCB$ , для двух различных значений ширины  $b$  рассчитаны угломестные диаграммы направленности исследуемого приемника (рисунк 4). Коэффициент направленного действия (КНД) достигает значения 5,84 на частоте 1,99 ТГц при азимутальном угле  $\varphi = 237^\circ$ , угле места  $\theta = 180^\circ$  и ширине  $b = 475$  нм.

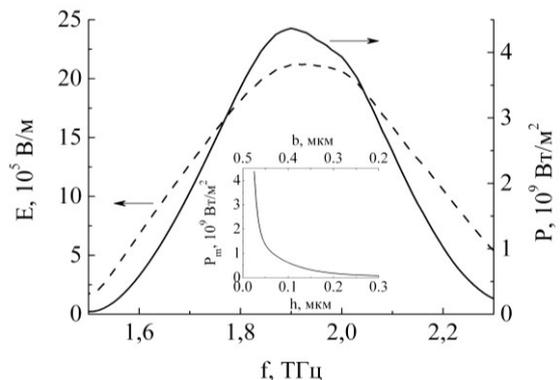


Рисунок 3 – Частотная зависимость напряженности  $E$  (сплошная линия) и мощности, поглощаемой термочувствительным элементом,  $P$  (штриховая линия). На вставке – зависимость максимальных значений мощности, поглощаемой термочувствительным элементом,  $P_m$  от ширины резонансных элементов  $b$  и расстояния  $h$  между ними и термочувствительным элементом

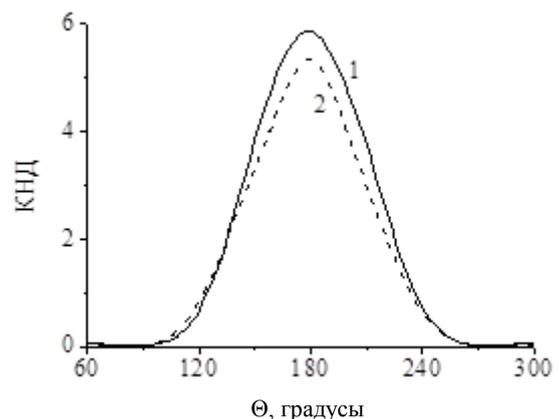


Рисунок 4 – Угломестные диаграммы направленности приемника субмиллиметрового излучения для азимутального угла  $\varphi = 237^\circ$  и частот  $f = 1,99$  (1) и  $1,97$  (2) ТГц при ширине спиральных элементов 475 (1) и 400 (2) нм

Расчетная зависимость коэффициента полезного действия приемника субмиллиметрового излучения от толщины используемой кремние-

вой подложки  $d_n$ , при оптимальных значениях ширины резонансных спиральных элементов и расстояния между ними и термочувствительным элементом, приведена на рисунке 5. Из полученного результата следует, что оптимальное значение толщины подложки  $d_n$  составляет 45 мкм, при которой КПД достигает  $\sim 98\%$ .

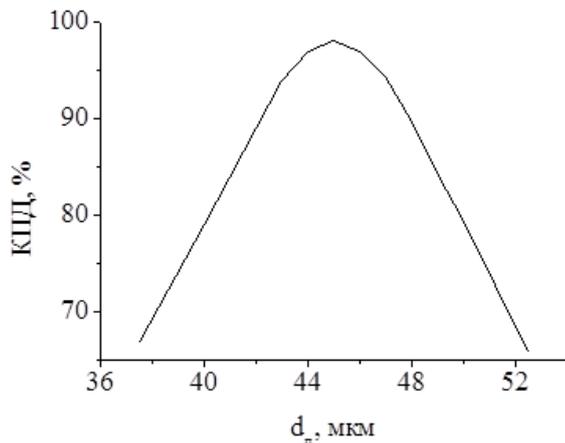


Рисунок 5 – Зависимость КПД приемника субмиллиметрового излучения от толщины подложки  $d_n$

### Заключение

Показано, что разработанный неохлаждаемый болометрический приемник на основе массивов периодически расположенных резонаторов микронных и нанометровых размеров, представляющих собой искусственно структурированные материалы, элементы которых существенно меньше длины волны принимаемого электромагнитного излучения, позволяет достичь потерь на отражение  $-26,4$  дБ, коэффициента стоячей волны 1,1 и коэффициента полезного действия  $\sim 98\%$ .

### Список использованных источников

1. Корнеева, М.Д. Современное состояние и новые направления полупроводниковой ИК-фотэлектроники (Часть 1) / М.Д. Корнеева, В.П. Пономаренко, А.М. Филачев // Прикладная физика. 2011. – № 2. – С. 47–60.
2. Cherepenin, V.A. Hot-electron superconducting nanobolometers-sensors and arrays of them for high sensitive terahertz frequency range imaging radiometers / V.A. Cherepenin [et al.] // Journal of radio electronics. – 2011. – № 3. – P. 12–16.
3. Karasik, B.S. Nanobolometers for THz photon detection / B.S. Karasik, A.V. Sergeev, D.E. Prober // IEEE Transactions on Terahertz Science. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 97–111.
4. Приемник терагерцового излучения: патент 15640 Респ. Беларусь, МПК G 01 J 5/02 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л.Зыков; заявитель ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси». № а 20100740; заявл. 15.05.2010, опубл. 30.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 140–141.
5. Гуляев, Ю.В. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения / Ю.В. Гуляев, А.Н. Лагарьков, С.А. Никитов // Вестник Российской академии наук. – 2008. – Т. 78, № 5. – С. 438–457.
6. Болометрический детектор инфракрасного излучения: патент 18656 Респ. Беларусь, МПК G 01J 5/20 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков, В.Б. Залесский; заявитель ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси». № а 20120708; заявл. 07.05.2012, опубл. 30.10.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 5. – С. 98.
7. Банков, С.Е. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS / С.Е. Банков, Э.М. Гутцайт, А.А. Курушин. – М. : Оркада, 2012. – 250 с.

## DETECTOR FOR SUBMILLIMETER WAVELENGTH RANGE ON THE BASIS OF THE MAN-MADE MATERIALS

Esman A.K., Potachits V.A., Zykov G.L., Kuleshov V.K.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus  
e-mail: ak\_esman@bntu.by

**Abstract.** The uncooled high-performance bolometric detector based on an array of planar resonant elements, located on the double-threaded spiral trajectory in a strictly geometrical order, with micro- and na-

noscales is developed. It is shown that the proposed detector for submillimeter wavelength range can reach the reflection losses of  $-26,4$  dB, the standing wave ratio of 1,1 and conversion efficiency of  $\sim 98$  %.

**Keywords:** detector for submillimeter wavelength range, array of planar resonant elements, reflection losses, standing wave ratio, conversion efficiency.

### References

1. Korneeva M.D., Ponomarenko V.P., Filachev A.M. [The current status and new directions of the semiconductor infrared photonics (Part 1)]. *Prikladnaya fizika*, 2011, no. 2, pp. 47–60 (in Russian).
2. Cherepenin V.A. et al. Hot-electron superconducting nanobolometers-sensors and arrays of them for high sensitive terahertz frequency range imaging radiometers. *Journal of radio electronics*, 2011, no. 3, pp. 12–16.
3. Karasik B.S., Sergeev A.V., Prober D.E. Nanobolometers for THz photon detection. *IEEE Transactions on Terahertz Science*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 97–111.
4. Esman A.K., Kuleshov V.K., Zykov G.L. *Priyomnik teragercovogo izlucheniya* [The receiver of terahertz radiation]. Patent RB no. 15640, 2012.
5. Gulyaev Yu.V., Lagarkov A.N., Nikitov S.A. [Metamaterials: basic research and application prospects]. *Byulleten' Rossijskoj akademii nauk*, 2008, vol. 78, no. 5, pp. 438–457.
6. Esman A.K., Kuleshov V.K., Zykov G.L., Zalessky V.B. *Bolmetricheskij detector infrakrasnogo izlucheniya* [Bolometer infrared detector]. Patent RB no. 18656, 2014.
7. Bankov S.E., Gutzait E.M., Kurushin A.A. *Reshenie opticheskikh i SVCH zadach s pomoschyu HFSS* [Solution of the optical and microwave problems using HFSS]. Moscow: Orkada Publ., 2012. 250 p.

*Поступила в редакцию 08.12.2014.*