

УДК 621.372.821.3:53.082.722.56

Приемник субмиллиметрового излучения на основе открытых микрорезонансных структур

А. К. Есман, В. К. Кулешов, Г. Л. Зыков, В. Б. Залесский

Показано, что выполнение антенны приемника в виде открытой микрорезонансной структуры на основе планарных спиральных элементов микронных размеров, а термочувствительного элемента с щелью в виде последовательно расположенных и соединенных между собой микроотверстий круговой формы позволяет достичь потерь на отражение $-21,03$ дБ; коэффициента стоячей волны — $1,19$; эффективности преобразования — $99,21$ % при шумовой эквивалентной мощности NEP порядка 10^{-13} Вт·Гц^{-1/2} на резонансной частоте $1,97$ ТГц.

PACS: 07.07.Df, 85.80.Fi, 85.85.+j

Ключевые слова: антенна, микрорезонансные структуры, субмиллиметровое излучение, термочувствительный элемент.

Введение

Расширение сферы применения неохлаждаемых устройств регистрации теплового излучения в диапазоне длин волн 100—1000 мкм для различных областей человеческой деятельности (биология, астрономия, медицина, система безопасности и т. д.) стимулирует дальнейшее развитие направления исследований как по пути разработки нового класса приемников, так и по пути совершенствования уже известных. Один из подходов к конструированию высокоэффективных, компактных и в то же время высокочувствительных приемников в субмиллиметровом диапазоне длин волн основан на использовании интегральных планарных антенн в сочетании с термочувствительными микроэлементами в виде болометров [1, 2].

Антенный прием теплового излучения впервые был продемонстрирован в схеме с терморезистором в качестве нагрузки антенны, что позволило существенно уменьшить размеры термочувствительного элемента [3]. Среди всех типов планарных антенн спиральные имеют самый большой

показатель по соотношению усиление—размеры и конструктивно нечувствительны к погрешностям изготовления, а также способны работать в широком частотном диапазоне [4]. Более того, антенны этого типа отличаются от других антенн, обладающих направленным излучением, в первую очередь тем, что их поле имеет поляризацию, близкую к круговой. Современные неохлаждаемые приемники электромагнитных волн субмиллиметрового диапазона различных вариантов исполнения имеют NEP в диапазоне $3 \cdot 10^{-9}$ — $5 \cdot 10^{-11}$ Вт/Гц^{1/2} [5, 6].

Цель работы — развитие путей повышения эффективности неохлаждаемых болометрических приемников антенного типа субмиллиметрового излучения за счет использования открытых планарных спиральных микрорезонансных структур с распределенными параметрами для приема электромагнитных волн и щелевых термочувствительных элементов для детектирования [7].

Структурная схема приемника

В работе рассматривается приемник субмиллиметрового излучения, антенна которого (рис. 1) представляет собой открытую микрорезонансную структуру, выполненную на основе планарных спиральных элементов микронных размеров 2, расположенных в строго геометрическом порядке, а термочувствительный элемент 3 содержит щель 4 в виде последовательно соединенных между собой микроотверстий 5 круговой формы. Одна часть планарных спиральных резонансных элементов 2 расположена по траектории логоперио-

Есман Александр Константинович, главный научный сотрудник.

Кулешов Владимир Константинович, ведущий научный сотрудник.

Зыков Григорий Люцианович, старший научный сотрудник.

Залесский Валерий Борисович, заведующий лабораторией.

Институт физики им. Б. И. Степанова.

Беларусь, 220072, Минск, просп. Независимости, 68.

Тел. +375 17 2839112. E-mail: lomoi@inel.bas-net.by

Статья поступила в редакцию 17 июня 2012 г.

© Есман А. К., Кулешов В. К., Зыков Г. Л., Залесский В. Б., 2012

дической спиральной антенны, а другая — по периметру термочувствительного элемента 3, причем количество левых и правых спиральных элементов одинаково. Выводы 6 расположены по траектории архимедовой спирали и все элементы приемника субмиллиметрового излучения выполнены на кремниевой подложке 1, в которой имеется воздушная полость 7 под термочувствительным элементом 3.

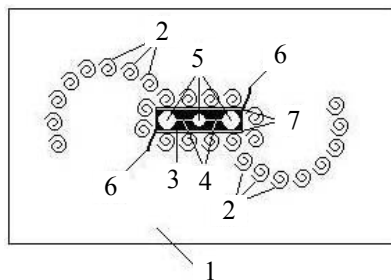


Рис. 1. Структурная схема приемника субмиллиметрового излучения:

- 1 — кремниевая подложка; 2 — спиральные элементы микронных размеров; 3 — термочувствительный элемент;
- 4 — щель; 5 — микроотверстия; 6 — выводы;
- 7 — воздушная полость

Принцип работы такого приемника заключается в следующем. При прохождении СВЧ-сигнала через термочувствительный элемент за счет наличия сопротивления его температура будет увеличиваться, вследствие этого будет меняться и само сопротивление.

Компьютерный эксперимент

Проектирование и исследование основных параметров и характеристик модели рассматриваемого приемника проводилось с использованием САПР Ansoft HFSS v. 12. Применение данного пакета программ позволяет перейти от экспериментального проектирования сложной трехмерной конструкции к компьютерному моделированию виртуального прототипа с параметрами и характеристиками реальной конструкции. Пакет HFSS является стандартизованным в промышленности инструментом для моделирования трехмерных электромагнитных полей и вычисления многомодовых *S*-параметров [4, 8]. HFSS использует для решения уравнений электродинамики метод конечных элементов, включающий адаптивное генерирование и деление ячеек. Адаптивный метод уплотнения сетки является мощным средством повышения точности решения. Начальное разбиение пространства на тетраэдральные ячейки осуществляется с помощью базовых элементов из базы данных HFSS. В результате этого разбиения выделяются области с высокими напряженностями

или с большими градиентами электромагнитных полей. Для минимизации затрат на вычисления и повышения точности получаемых результатов разбиение на ячейки уплотняется только в тех местах, где амплитуда электромагнитного поля претерпевает значительные изменения. Решающее устройство в HFSS позволяет с заданной точностью рассчитать все параметры и характеристики рассматриваемого устройства [8].

При моделировании приемника субмиллиметрового излучения использовали следующие данные: кремниевая подложка 1 с относительной диэлектрической проницаемостью 11,9, удельной проводимостью при комнатной температуре $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и толщиной 45 мкм, являющейся оптимальной для рассматриваемого диапазона длин волн; планарные спиральные элементы 2 с длиной 1,8 витка и радиусом 0,8 мкм выполнены из хрома; термочувствительный элемент 3 из хрома имеет форму прямоугольника 4×16 мкм, а также содержит щель 4 в виде трех соединенных между собой микроотверстий 5 круговой формы с радиусами 1,9 и 1,6 мкм; выводы 6 выполнены также из хрома длиной 92,8 мкм и толщиной 1 мкм.

Геометрические размеры планарных спиральных элементов 2 и микроотверстий 5, их количество и расположение на подложке определяет диапазон рабочих частот приемника субмиллиметрового излучения и его основные параметры. В качестве источника одномодового электромагнитного излучения использовался волновой порт (Wave Port) с выходной мощностью 1 мВт. Толщину термочувствительного элемента 3 в процессе компьютерного эксперимента варьировали от 20 до 140 нм.

Анализ полученных результатов

Приведенные на рис. 2 амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) — зависимости значений напряженности *E* и мощности *P* термочувствительного элемента — показывают, что их максимальные значения достигаются на частоте 1,9 ТГц. Из зависимости мощности *P*, выделяемой в термочувствительном элементе приемника, от его толщины *d*, приведенной на вставке рис. 2, следует, что ее максимальное значение достигается при *d* = 50 нм. Частотные зависимости потерь электромагнитного излучения за счет отражения (*S*₁₁) и коэффициента стоячей волны (КСВ) приемника показаны на рис. 3. Экстремальные значения *S*₁₁ = -21,03 дБ и КСВ = 1,19 достигаются на частоте 1,97 ТГц. Максимальное значение коэффициента направленного действия (КНД) достигает значения 9,65 на частоте 2,08 ТГц при азимутальном угле $\varphi = 237^\circ$ и угле места $\theta = 180^\circ$ (рис. 4). Эф-

эффективность преобразования излучения (КПД) в рассматриваемом субмиллиметровом диапазоне в зависимости от частоты приведена на рис. 5 и достигает максимального значения 99,21 %. Эквивалентная шуму мощность NEP, обусловленная только тепловыми флуктуациями (каждая из остальных компонент шума ее не превышает [9]) при температуре 300 К составляет порядка 10^{-13} Вт/Гц^{1/2}.

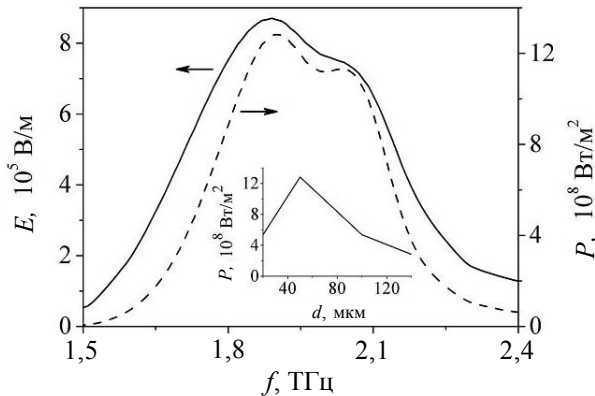


Рис. 2. Частотная зависимость напряженности E (сплошная линия) и мощности P (штриховая линия) на термочувствительном элементе при его толщине $d = 50$ нм. На вставке показана зависимость мощности P термочувствительного элемента от его толщины

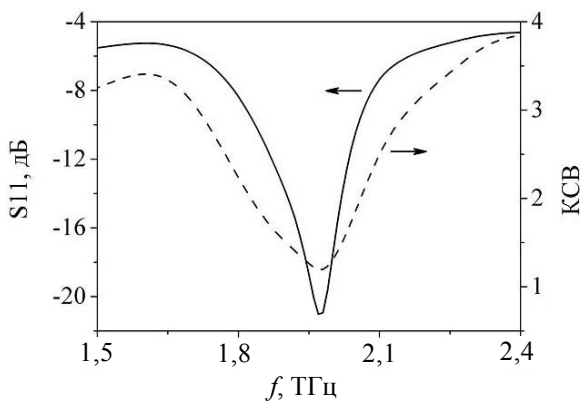


Рис. 3. Частотная зависимость потерь электромагнитного излучения за счет отражения S_{11} и коэффициента стоячей волны приемника субмиллиметрового излучения при толщине $d = 50$ нм

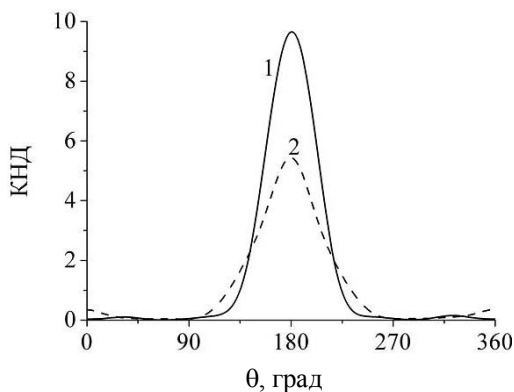


Рис. 4. Угловые диаграммы направленности приемника субмиллиметрового излучения для азимутального угла $\varphi = 237^\circ$ и частот $f = 2,08$ ТГц (1) и $1,97$ ТГц (2) при толщине $d = 50$ нм

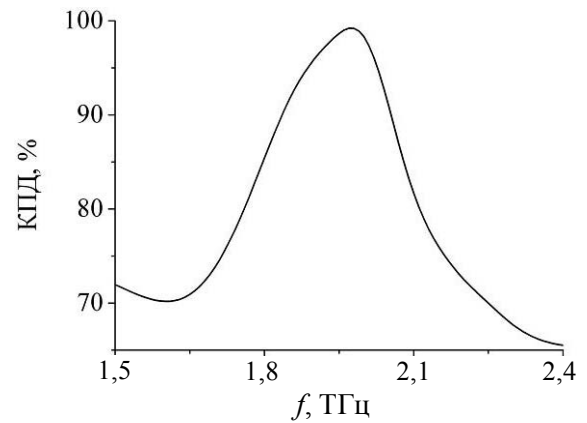


Рис. 5. Частотная зависимость коэффициента полезного действия приемника субмиллиметрового излучения при толщине $d = 50$ нм

Заключение

Предложенная конструкция неохлаждаемого планарного приемника субмиллиметрового излучения позволяет улучшить основные его параметры за счет выполнения антенной части приемника субмиллиметрового излучения в виде открытой микрорезонансной структуры на основе планарных спиральных элементов микронных размеров, а чувствительного элемента с щелью в виде связанных между собой микроотверстий круглой формы и размещения их в строго геометрическом порядке на кремниевой подложке.

Предложенная конструкция приемника субмиллиметрового излучения может быть использована для улучшения параметров разрабатываемых высокоэффективных, малогабаритных неохлаждаемых устройств для постепенного доведения их до уровня, соответствующего лучшим современным образцам.

Литература

1. Корнеева М. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.
2. Karasik B. S., Sergeev A. V., Prober D. E. // IEEE Transactions on Terahertz Science. 2011. V. 1. No. 1. P. 97.
3. Hwang T. L., Schwarz S. E., Rutledge D. B. // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 34. No. 11. P. 773.
4. Семенихина Д. В., Маркина Ю. И. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 2. С. 46.
5. Sizov F. // Opto-Electron. Rev. 2010. V. 18. No. 1. P. 10.
6. Уваров А. В., Кузьмин А. А., Шитов С. В., Коваленко А. Г. // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 3. С. 2.
7. Болонетрический приемник. Пат. 7433. А. К. Есман, В. К. Кулешов, Г. Л. Зыков. ГНУ "Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси" // Афіцыйны бюл./Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2011. № 4. С. 212.
8. Банков С. Е., Курушин А. А. Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft. — М.: ЗАО «НПП "Родник"», 2009.
9. Демьяненко М. А., Кравченко А. Ф., Овсяк В. Н. // Автоматизация. 2005. Т. 41. № 1. С. 88.

Submillimeter radiation receiver on the basis of the open microresonance structures

A. K. Esman, V. K. Kuleshov, G. L. Zykov, V. B. Zalesski

Institute of Physics named after B. I. Stepanov

68 Nezalezhnasti av., Minsk, 220072, Belarus

E-mail: lomoi@inel.bas-net.by

It is shown that the performance of the antenna of the receiver in the form of an open microresonance structure on the basis of the planar spiral elements of micron sizes, and temperature-sensitive element — with a slot in the form of successive interconnected micro-holes of circular shape allows you to reach the reflection losses -21.03 dB; standing wave ratio 1.19; conversion efficiency of 99.21 % for the noise equivalent power NEP of the order of 10^{-13} W·Hz $^{-1/2}$ at the resonance frequency of 1.97 THz.

PACS: 07.07.Df, 85.80.Fi, 85.85.+j

Keywords: antenna, microresonance structures, submillimeter radiation, temperature-sensitive element.

Bibliography — 9 references.

Received June 17, 2012