

зон УО. Увеличение до ОСШ=2,0 приводит к расширению диапазона УО до 0,02—0,47 при одновременном снижении частоты ЛО практически до нуля. При снижении до ОСШ = 0,75 диапазон УО сужается до 0,19—0,32, а при дальнейшем снижении до ОСШ $\approx$ 0,5 уверенное обнаружение отсутствует практически во всем относительном частотном диапазоне. Следует также отметить, что для равномерного шума параметры обнаружения несколько выше, чем для гауссова шума хотя, с точки зрения практической реализации, этот факт существенного значения не имеет.

Таким образом, можно констатировать, что предлагаемый способ вполне приемлем для работы с сильно зашумленными сигналами, по крайней мере, до ОСШ $\approx$ 0,7...0,8. Следует учесть, что практическая реализация способа весьма проста и не требует значительных вычислительных затрат, поскольку используются только арифметические операции суммирования и вычитания, однако необходим дополнительный буфер для хранения промежуточных результатов фильтрации. Также отметим, что подсчет НВП необходимо проводить по фиксированному числу отсчетов, что с учетом особенностей используемых фильтров требует увеличения объема исходной выборки на сумму порядков фильтров.

Литература

1. Кедем Б. Спектральный анализ и различение сигналов по пересечениям нуля // ТИИЭР. 1986. Т. 74. № 11. С. 6—24.
2. Левенец А. В., Чернявский Е. А., Чье Ен Ун. Оценки спектра сигнала методом выделения скрытых периодичностей по пересечениям нуля // Измерительная техника. 1996. № 9. С. 13—16; Levenets A. V., Chernyavskii E. A., Ch'e En Un. Estimating signal spectra with a method of determining concealed periodicities in zero crossings // Measurement techniques. 1996. V. 39. N 9. P. 909—913.
3. Левенец А. В. Применение метода выделения скрытых периодичностей по пересечениям нуля для обнаружения сигнала с известной частотой // Информатика и системы управления. 2001. № 1. С. 28—31.
4. Иванов В. Э., Левенец А. В. Простой способ обнаружения гармонических составляющих в шумовом сигнале // Вестник Тихоокеан. гос. ун-та. 2009. № 3(14). С. 55—62.
5. Иванов В. Э., Левенец А. В., Чье Ен Ун. Обработка данных в информационно-измерительных системах: спектральное оценивание, сжатие, классификация. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010.

Дата принятия 15.04.2013 г.

621.372.821.3:669.018.5

Терагерцовый приемник на основе электромагнитных материалов

А.К. ЕСМАН, В.К. КУЛЕШОВ, Г. Л. ЗЫКОВ

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: lomoi@inel.bas-net.by

Показано, что выполнение детекторной и антенной частей неохлаждаемого терагерцового приемника на основе субмиллиметровых и нанометровых резонансных структур в виде спиральных фрагментов и микрорезонаторов в форме круглых отверстий позволяет достичь потерь на отражение $-24,29$ дБ, коэффициента стоячей волны 1,13 и эффективности преобразования 99,63 %.

Ключевые слова: термочувствительный элемент, микрорезонатор, двухзаходная спиральная антенна, терагерцовое излучение.

It is shown that the performance of the detector and the antenna parts of uncooled terahertz detector based on submillimeter and nanometer resonance structures in the form of the spiral fragments and microresonators in the form of round holes allows to reach the reflection losses $-24,29$ dB, the standing wave ratio 1,13 and conversion efficiency 99,63 %.

Key words: heat-sensitive element, microresonator, double-thread spiral antenna, terahertz radiation.

Широкий спектр потенциальных возможностей практического использования терагерцового (ТГ) излучения обусловлен тем, что индивидуальные частоты молекул любого вещества лежат именно в промежутке между радиочастотным и оптическим диапазонами. Для практической реализации ТГ-технологий необходимы высокочувствительные, простые, надежные и недорогие приемники излучения. В последнее время активно исследуются пути их построения и

создания на основе искусственных сред, относящихся к классу композитных метаматериалов. Такие электромагнитные материалы, содержащие элементы специальной формы с размерами, малыми по сравнению с длиной волны электромагнитного излучения, и обеспечивающие возбуждение электрических токов, характеризуются уникальными электро-, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Эти свойства обуслов-

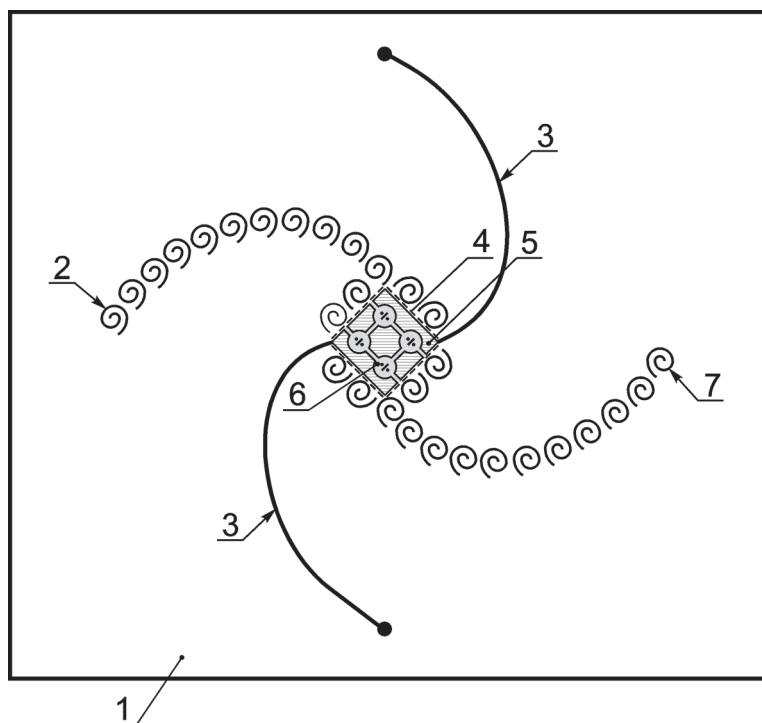


Рис. 1. Неохлаждаемый приемник терагерцового излучения:

1 — подложка; 2, 7 — массивы соответственно левых и правых спиральных фрагментов; 3 — выводы; 4 — поглотитель; 5 — термочувствительный элемент; 6 — микрорезонаторы

лены резонансным взаимодействием электромагнитной волны с гетерогенной средой, состоящей из массива искусственных резонансных элементов, воспринимающих излучение как сплошную электромагнитную среду [1—4].

Цель данной работы — разработка и исследование одного из возможных путей построения интегрального неохлаждаемого ТГ-приемника, детекторная и антенная части которого выполнены на основе субмилли- и нанометровых резо-

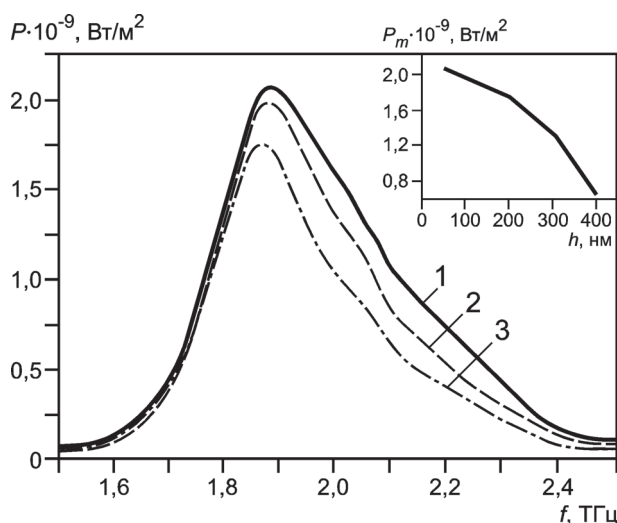


Рис. 2. Частотные зависимости поглощаемой мощности P термочувствительным элементом при расстоянии между ним и спиральными фрагментами $h = 50, 100$ и 200 нм, соответственно кривые 1 — 3. На вставке — зависимость максимальной значения мощности P_m от h

нансных структур в виде спиральных фрагментов и микрорезонаторов в форме круглых отверстий.

Конструктивное исполнение предложенного интегрального неохлаждаемого приемника приведено на рис. 1. Непосредственно на подложке 1 сформированы в строго геометрическом порядке массивы левых 2 и правых 7 спиральных фрагментов по траектории логопериодической спирали. Выводы 3 выполнены в виде двухзаходной архимедовой спирали. Поглотитель 4 содержит микрорезонаторы 6 — четыре круговые фрагмента — и расположен на термочувствительном элементе (ТЭ) 5, по периметру которого определенным образом размещены спиральные фрагменты 2 и 7.

Для компьютерного исследования ожидаемых основных параметров и характеристик рассматриваемого приемника ТГ-излучения применена программа Ansoft HFSS v. 12. Численный пакет трехмерного электродинамического моделирования для решения уравнений Максвелла основан на методе конечных элементов с тетраэдральным разбиением исследуемой модели, что позволяет рассчитывать распределение электромагнитных полей и является надежным инструментом при разработке высокоэффективных компонентов [5, 6]. Каждый элемент сетки разбиения в отдельности можно выполнить из любого материала базы данных, что дает возможность анализировать сложные конструкции с различными электродинамическими параметрами.

Численный расчет интегрального неохлаждаемого приемника выполняли с учетом граничных условий — при отсутствии отраженных волн в ограниченном объеме

открытого пространства и мощности входного электромагнитного излучения 1 мВт. Источником электромагнитного излучения служил волновой порт (Wave Port), расположенный параллельно плоскости приемника. Минимальное расстояние между границами излучаемого пространства и приемником составляло не менее одной четверти резонансной длины волны для обеспечения высокой точности расчета. При проведении компьютерного эксперимента использовали следующие данные: кремниевые подложка 1 и ТЭ 5 с относительными диэлектрическими проницаемостями

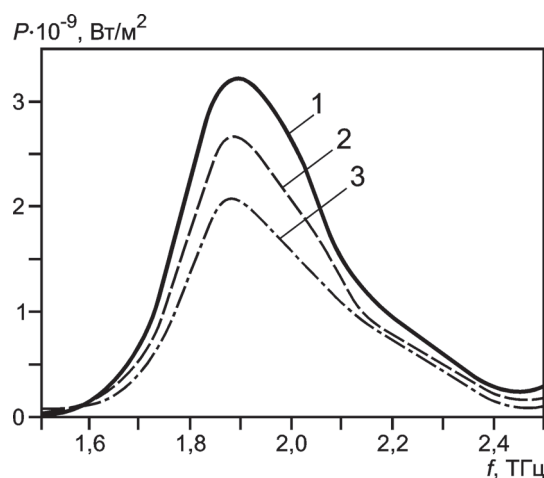


Рис. 3. Частотные зависимости поглощаемой мощности термочувствительным элементом при расстоянии между отдельными спиральными фрагментами, расположенными по траектории логопериодической двухзаходной спирали, равном 100 (1) и 250 (2, 3) нм, и их количестве — 24 (1, 3) и 22 (2)

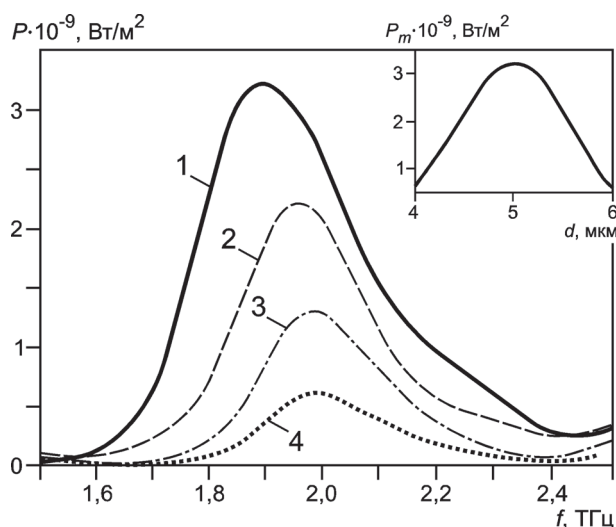


Рис. 4. Частотные зависимости поглощаемой мощности термочувствительным элементом при толщине спиральных фрагментов $d = 5; 4,5; 5,5$ и 4 мкм, соответственно кривые 1 — 4. На вставке — зависимость максимального значения поглощаемой мощности P_m от d

ми 11,9 и удельными проводимостями при комнатной температуре соответственно 0 и 120 См/м; массивы левых 2 и правых 7 спиральных фрагментов длиной 1,8 витка и радиусом 0,8 мкм выполнены из титана; ТЭ 5 размерами $10 \times 10 \times 1$ мкм имел внутри четыре соединенных между собой круглых микроотверстия радиусом 1,9 мкм; выводы 3 — полосковые линии из титана длиной 169, шириной 0,9 и толщиной 1 мкм. Геометрические размеры спиральных фрагментов 2 и 7, количество их и расположение на подложке 1 определяют как диапазон рабочих частот, так и основные параметры.

Оптимальное расстояние из диапазона 50—400 нм между ТЭ 5 и спиральными фрагментами 2, 7 выбирали в зависимости от поглощаемой в них мощности электромагнитного излучения (рис. 2). При этом расстояние между отдельными спиральными фрагментами составляло 250 нм, а их ширина и толщина соответственно 0,475 и 5 мкм. Из рис. 2 следует, что расстояние $h = 50$ нм между спиральными фрагментами и ТЭ является оптимальным. Результаты

оптимизации расстояния между отдельными спиральными фрагментами и их количества приведены на рис. 3. Максимальное значение мощности на ТЭ достигается при расстоянии между отдельными спиральными фрагментами 100 нм и их количестве 24. Частотные зависимости мощности на ТЭ при различных толщинах спиральных фрагментов показаны на рис. 4. При толщине спиральных фрагментов $d = 5$ мкм она достигает максимального значения $3,225 \cdot 10^9$ Вт/м² на частоте 1,86 ТГц. Для выбранных оптимальных геометрических размеров и расположения спиральных фрагментов на подложке относительно ТЭ рассчитанные максимальные значения основных параметров неохлаждаемого ТГ-приемника составили: потери на отражение $S_{11} = -24,29$ дБ, коэффициенты стоячей волны и полезного действия соответственно 1,13 и 99,63 %.

Выполнение антенной части приемника на основе предложенной конструкции позволяет улучшить его основные параметры и характеристики. Приемник ТГ-излучения можно использовать в различных сферах: информационных и коммуникационных технологиях; биологии и медицине; неразрушающем контроле изделий; безопасности жизнедеятельности; контроле качества пищи и сельскохозяйственных продуктов; мониторинге окружающей среды.

Литература

1. Гуляев Ю. В., Лагарьков А. Н., Никитов С. А. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Вестник РАН. 2008. Т. 78. № 5. С. 438—457.
2. Tao H. e.a. Recent progress in electromagnetic metamaterial devices for terahertz applications // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2010. V.17. N 1. P. 92—101.
3. Naumova E. V. e.a. Manufacturing chiral electromagnetic metamaterials by directional rolling of strained heterofilms // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2009. V. 11. N 7. P. 074010-1—074010-5.
4. Лагарьков А. Н. и др. Сверхразрешение и усиление в метаматериалах // УФН. 2009. Т. 179. № 9. P. 1018—1027.
5. Банков С. Е., Курушин А. А. Расчет антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS Ansoft. М.: НПП «Родник», 2009.
6. Sharma V. e.a. A metamaterials inspired miniaturized phi-shaped antenna // Int. J. Phys. Sci. 2011. V. 6. N 18. P. 4378—4381.

Дата принятия 04.04.2013