

ПЛАНАРНАЯ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2012 г. А. К. Есман, доктор физ.-мат. наук; В. К. Кулешов, канд. техн. наук;
Г. Л. Зыков, канд. физ.-мат. наук; В. Б. Залесский, канд. техн. наук

ГНУ “Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси”,
г. Минск, Беларусь

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

Показано, что выполнение системы регистрации субмиллиметрового излучения на основе планарных открытых микрорезонансных структур в виде аподизированных диэлектрических решеток с коэффициентом заполнения, изменяющимся по линейному закону, связанных через трансформатор импеданса с низкобарьерным детекторным диодом Шоттки без смещения, позволяет достичь

- потерь на отражение – $-26,5$ дБ,
- коэффициента стоячей волны – $1,1$,
- эффективности преобразования – $98,6\%$ при шумовой эквивалентной мощности $NEP - 8,05 \times 10^{-12}$ Вт Гц $^{-1/2}$.

Ключевые слова: аподизированная диэлектрическая решетка, низкобарьерный диод Шоттки с нулевым смещением, субмиллиметровое излучение, трансформатор импеданса.

Коды OCIS: 040.2235, 040.6808, 110.3080.

Поступила в редакцию 17.10.2011.

Актуальность разработки и создания устройств регистрации субмиллиметрового электромагнитного излучения с длиной волны λ от 10^{-3} до 5×10^{-5} м (3×10^{11} – 6×10^{12} Гц) обусловлена не только современными проблемами безопасности, мониторинга окружающей среды, медицины, но и новыми возможностями, которые открываются для решения ряда задач, например, радиоастрономии, космических исследований и т. д. Из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния электромагнитные волны этого диапазона проникают через пластмассы, бумагу, сухую древесину и мелкодисперсные материалы, а кроме того, они безвредны для человека [1].

Рассматриваемый частотный интервал электромагнитных волн является самым сложным в практическом освоении, так как для него пока отсутствует эффективная, миниатюрная и дешевая элементная база. Это связано с тем, что в данной спектральной области плохо работают как радиофизические методы (со стороны длинных волн), так и оптические методы (со стороны коротких волн). До настоящего времени в области миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн в качестве чувствительных элементов используются раз-

личного типа болометры, оптико-акустические приемники и приемники на базе кристаллических диодов. Преимущество их перед супергетеродинами заключается в относительной простоте и возможности работать без подстройки в широком интервале частот. Типичная пороговая чувствительность этих и других неохлаждаемых приемников лежит в пределах 10^{-11} – 10^{-10} Вт/Гц $^{1/2}$ [2, 3].

В настоящее время активно развивается подход к конструированию приемников терагерцового диапазона длин волн на базе низкобарьерных диодов Шоттки, интегрированных в планарные антенны [4]. Эффективность преобразования используемых разновидностей таких антенн, как дипольные, бабочки, квадратные спиральные, логопериодические, невысока и составляет 20, 37, 25 и 46% соответственно [5].

В то же время для коммерциализации инновационного продукта необходимо создание компактного, селективного, недорогого с быстрым откликом датчика, а это является непростой задачей.

В работе рассматриваются возможности альтернативных подходов построения приемной части антенного типа в виде планарных откры-

тых микрорезонансных структур на основе аподизированных решеток с коэффициентом заполнения, изменяющимся по линейному закону для эффективной регистрации субмиллиметрового излучения [6].

Предложенная планарная система регистрации электромагнитного излучения в указанном диапазоне длин волн конструктивно представляет собой приемную часть антенного типа 1, связанную через трансформатор импеданса 2 с низкочастотным детекторным диодом Шоттки без смещения 3 (рис. 1).

Электрический ток в приемной части антенного типа, наведенный внешним переменным электрическим полем, после детектирования преобразуется в постоянное напряжение, величина которого пропорциональна напряженности электрического поля. Максимальная эффективность этого преобразования достигается при оптимальном согласовании приемной части с окружающим пространством и детекторным диодом.

Компьютерный эксперимент по исследованию ожидаемых основных параметров и характеристик предложенной системы проводился с использованием современного мощного пакета программ HFSS, обеспечивающего моделирование сложных трехмерных конфигураций произвольной формы. Проектирование с использованием указанной программы дает высокую гарантию того, что реальные характеристики будут такими же, как и полученные при моделировании [7, 8]. На исследуемых частотах производилась начальная генерация сетки, и весь объем модели разбивался на конечные элементы. Для данной сетки вычисля-

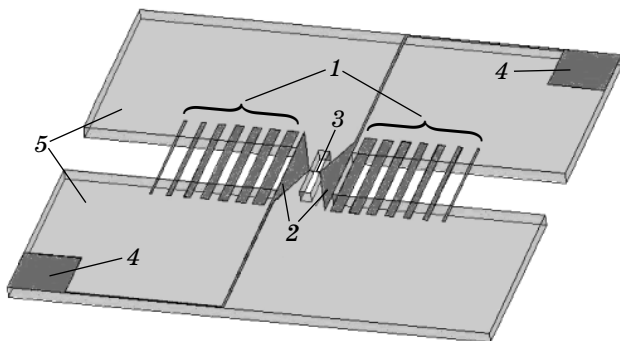


Рис. 1. Структурная схема системы: 1 – приемная часть антенного типа, 2 – трансформатор импеданса, 3 – детекторный диод, 4 – выходные контакты, 5 – подложка.

лись электромагнитное поле и обобщенная матрица рассеяния. Далее выполнялся процесс измельчения сетки и указанные характеристики вычислялись для новой сетки. Данный процесс повторялся до тех пор, пока степень различия матриц рассеяния не становилась меньше значения, при котором результаты расчетов отвечали необходимой точности.

Проведено моделирование приемной части антенного типа 1 в виде аподизированных диэлектрических и металлических открытых нано- и микрорезонансных структур прямоугольной формы. Геометрические размеры приемной части 1 составляли $105 \text{ мкм} \times 105 \text{ мкм} \times 80 \text{ нм}$. Для согласования детекторного диода 3 с приемной частью 1 использовался трансформатор импеданса 2, выполненный в виде несимметричной нерегулярной полосковой линии трапецеидальной формы микронных размеров. Волновое сопротивление такой линии меняется вдоль ее длины за счет изменения ширины. Для обеспечения оптимального согласования приемной части антенного типа 1 с детекторным диодом 3 углы при основании равнобедренной трапеции нерегулярной полосковой линии выбраны равными 20° . Минимальные потери на отражение достигались при высоте этой трапеции, равной $19,13 \text{ мкм}$. В качестве детекторного элемента использовался низкочастотный диод Шоттки с нулевым смещением. В настоящее время он является одним из основных нелинейных элементов, который широко используется для преобразования субмиллиметрового излучения и пока практически не имеет конкурентов в рассматриваемом диапазоне электромагнитных волн [9]. Диэлектрическая проницаемость подложки 5 составляла $2,17$, толщина – 10 мкм , тангенс угла потерь – $0,0009$. Геометрические размеры выходных контактных площадок 4 составляли $50 \text{ мкм} \times 50 \text{ мкм} \times 80 \text{ нм}$ при общей длине планарной системы регистрации субмиллиметрового излучения $258,26 \text{ мкм}$. Материал трансформатора импеданса 2 и контактных площадок 4 – золото.

Численный расчет предложенной системы осуществлялся в пределах ограниченной области пространства и в заданном частотном диапазоне. Период аподизированных диэлектрических и металлических открытых нано- и микрорезонансных структур прямоугольной формы составлял 15 мкм . Материалом для диэлектрических решеток приемной части ан-

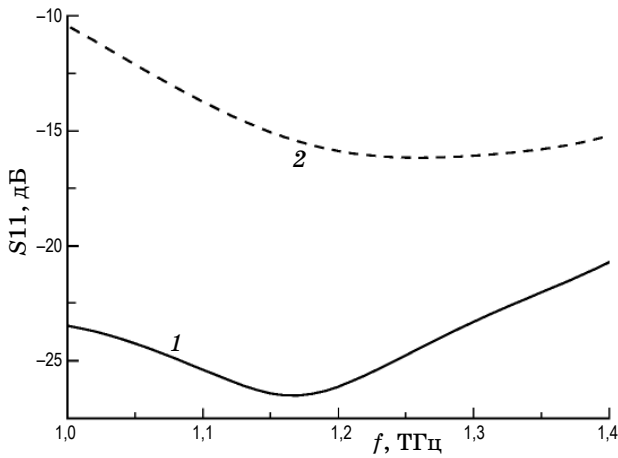


Рис. 2. Частотная зависимость потерь на отражение планарной системы регистрации электромагнитного излучения для приемной части антенного типа из арсенида галлия (1) и никеля (2).

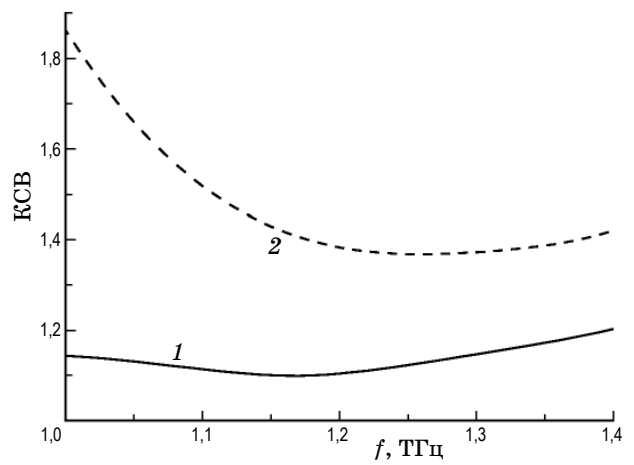


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента стоячей волны планарной системы регистрации электромагнитного излучения для приемной части антенного типа из арсенида галлия (1) и никеля (2).

тенного типа 1 был выбран арсенид галлия, а для металлических – никель с одинаковыми размерами по толщине – 80 нм.

На рис. 2 и 3 приведены соответственно частотные зависимости рассчитанных потерь на отражение (S_{11}) и коэффициента стоячей волны (КСВ) предложенной планарной системы регистрации электромагнитного излучения, приемная часть которой выполнена из аподизированных решеток арсенида галлия (1) и никеля (2). Потери на отражение на резонансной частоте $f_{рез} = 1,17$ ТГц составили $-26,5$ дБ для приемной части, выполненной из арсенида галлия, и на $f_{рез} = 1,26$ ТГц – $-16,17$ дБ для приемной части, выполненной из никеля. При этом КСВ на собственных резонансных частотах составил соответственно 1,1 и 1,37.

Для приведенных выше аподизированных решеток рассчитаны зависимости коэффициента усиления на резонансных частотах от угла места θ при азимутальном угле $\varphi = 0$ (1), 45° (2) и 90° (3) (рис. 4). Максимальные значения коэффициентов усиления при $\theta = 180^\circ$ составляют соответственно 39,1 и 37,9 для арсенида галлия и никеля. Влияние азимутального угла φ на ширину главного лепестка $\Delta\theta_{0,5}$ по уровню 0,5 приведено на рис. 5. Видно, что с увеличением азимутального угла от 0 до 90° происходит расширение по уровню 0,5 главного лепестка для арсенида галлия с $24,7^\circ$ до $31,5^\circ$, а для никеля – с 21° до $28,7^\circ$.

Максимальная эффективность преобразования входного электромагнитного излучения субмиллиметрового диапазона длин волн на

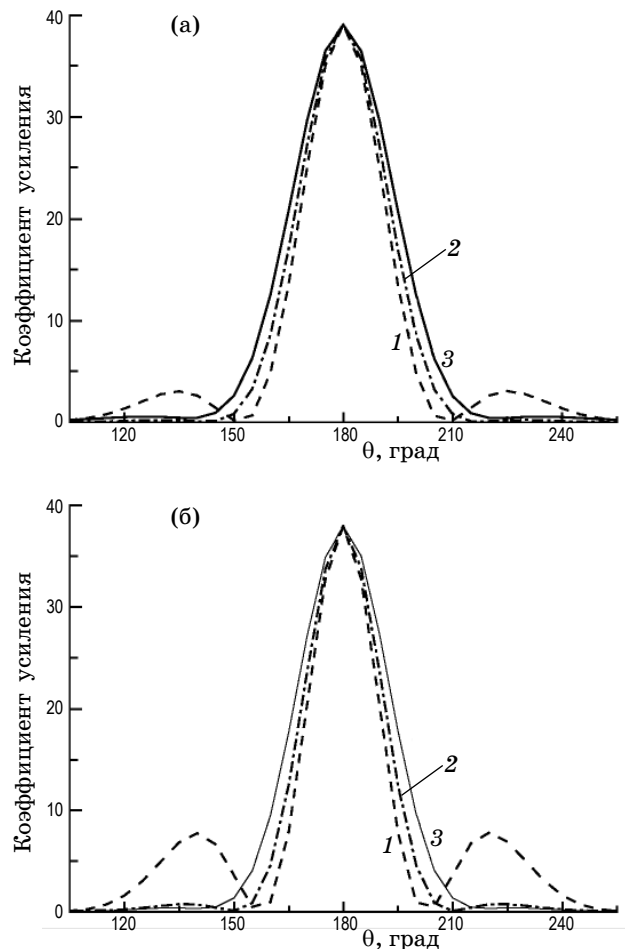


Рис. 4. Зависимость коэффициентов усиления планарной системы регистрации электромагнитного излучения для приемной части антенного типа из арсенида галлия (а) и никеля (б) от угла места θ при азимутальном угле $\varphi = 0$ (1), 45° (2) и 90° (3) на резонансных частотах 1,17 (а) и 1,26 ТГц (б).

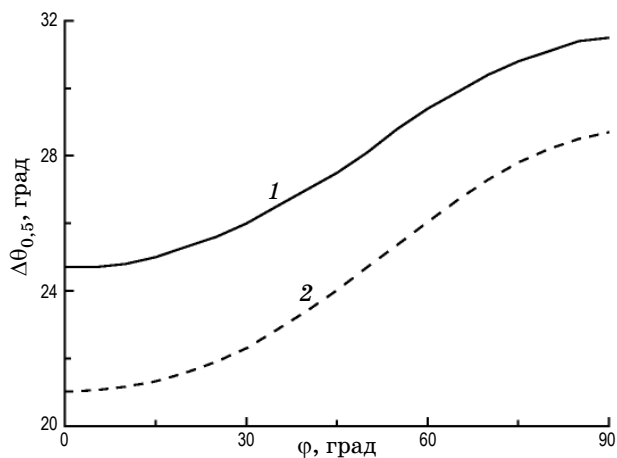


Рис. 5. Зависимость ширины главного лепестка $\Delta\theta_{0,5}$ по уровню 0,5 для приемной части антенного типа, выполненной из арсенида галлия (1) и никеля (2) от азимутального угла φ на резонансных частотах 1,17 (1) и 1,26 ТГц (2).

резонансных частотах и шумовая эквивалентная мощность (NEP) рассматриваемой системы для указанных материалов приведены в таблице. При этом шумовая эквивалентная мощность вычислялась по методике, описанной в [10].

Таким образом, использование предложенной системы регистрации субмиллиметрового излучения с приемной частью из арсенида галлия позволяет достичь следующих основных параметров:

- потери на отражение – –26,5 дБ,
- коэффициент стоячей волны – 1,1,

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Маремьянин К.В., Ермолаев Д.М., Фатеев Д.В., Морозов С.В., Малеев Н.А., Земляков В.Е., Гавриленко В.И., Попов В.В., Шаповал С.Ю. Широкоапертурный детектор терагерцового излучения на основе транзисторной структуры GaAs/InGaAs со щелевым решеточным затвором большой площади // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 8. С. 39–47.
2. Momot N., Zabudsky V., Tsybrii Z., Apats'ka M., Smoliiy M., Dmytruk N. Zero bias terahertz and subterahertz detector operating at room temperature // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2010. V. 13. № 2. P. 166–169.
3. Ruonan Han, Yaming Zhang, Coquillat D., Hoy J., Videlier H., Knap W., Brown E., Kenneth K.O. 280-GHz Schottky diode detector in 130 nm digital CMOS // 2010 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, San Jose, California, USA, 2010. P. 619–623.
4. Giovine E., Casini R., Dominijanni D., Notargiacomo A., Ortolani M., Foglietti V. Fabrication of Schottky diodes for terahertz imaging // Microelectronic Eng. 2011. V. 88. № 8. P. 2544–2546.
5. Gonzalez F.G., Boreman G.D. Comparison of dipole, bowtie, spiral and log-periodic IR antennas // Infrared Physics and Technology. 2005. V. 46. № 5. P. 418–428.

Коэффициент полезного действия и шумовая эквивалентная мощность планарной системы регистрации электромагнитного излучения для приемной части антенного типа из различных материалов

Материал	КПД, %	NEP, 10^{-12} Вт Гц $^{-1/2}$
Никель	94,1	32,6
Арсенид галлия	98,6	8,05

- шумовая эквивалентная мощность (NEP) – $8,05 \times 10^{-12}$ Вт Гц $^{-1/2}$,
- коэффициент усиления – 39,1.

Проведенный компьютерный эксперимент показывает, что применение планарных открытых микрорезонансных структур на основе аподизированных диэлектрических решеток с коэффициентом заполнения, изменяющимся по линейному закону, в качестве приемной части антенного типа и низкobarьерных детекторных диодов Шоттки без постоянного смещения открывает возможности создания перспективных простых интегральных высокоэффективных систем получения изображения в субмиллиметровом диапазоне для целей всепогодной навигации, систем безопасности, медицины и т. д. Это могут быть как пассивные системы, в которых происходит прием естественного теплового излучения источника, так и активные, в которых исследуемый объект облучается указанным излучением и производится прием, детектирование и анализ отраженных или прошедших лучей.

6. *Есман А.К., Кулешов В.К., Зыков Г.Л.* Детектирующая антенна терагерцового диапазона // Патент Республики Беларусь на полезную модель № 7220. 2011.
 7. HFSS v12.0 User Manual. Pittsburgh, PA: Ansoft Corporation, 2009.
 8. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. М.: ЗАО “НПП “Родник”, 2009. 256 с.
 9. *Sydlo C., Cojocari O., Schonherr D., Goebel T., Meissner P., Hartnagel H.L.* Fast THz detectors based on InGaAs Schottky diodes // *Frequenz*. 2008. V. 62. № 5–6. P. 107–110.
 10. *Shashkin V.I., Drjagin Y.A., Zakamov V.R., Krivov S.V., Kukin L.M., Murel A.V., Chechenin Y.I.* Millimeter-wave detectors based on antenna-coupled low-barrier Schottky diodes // *Intern. J. of Infrared and Millimeter Waves*. 2007. V. 28. № 11. P. 945–952.
-