

А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков

**ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова» НАН Беларуси,
Минск, Беларусь**

МИКРОРЕЗОНАТОРНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИК-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Инфракрасное (ИК) излучение в спектре электромагнитных волн занимает диапазон длин волн λ от 0,78 мкм до 2000 мкм. Источником инфракрасного лучей является любое нагретое тело, температура которого выше абсолютного нуля (-273°C). К наиболее актуальным задачам прикладного значения относится освоение электромагнитных волн с $\lambda = 100\text{--}1000$ мкм. Причины этого обусловлены как практическими задачами современной наноэлектроники, радиосвязи, экологии, медицины, так и фундаментальными научными проблемами биологии, химии, физики конденсированных сред, астрофизики и т. д. [1–3]. Отличительная особенность этого участка спектра заключается в том, что присущие ему волны слишком длинны для применения хорошо развитой оптической техники и в то же время слишком коротки для перенесения в него радиометодов. Квантовые свойства электромагнитных колебаний, проявляющиеся при взаимодействии их с веществом и заряженными частицами, четко выражены лишь на достаточно высоких частотах. На низких частотах, наоборот, проявляются волновые свойства. Поэтому в сверхвысокочастотных (СВЧ) радиодиапазонах безраздельно господствуют классическая электродинамика и электроника, в инфракрасных – методы и средства, соответствующие квантовой электронике и оптике.

Создание конкурентоспособных приемных устройств субмиллиметрового диапазона требует разработки принципиально новых квазиоптических элементов, удовлетворяющих требованиям практики по ряду основных параметров: входному сопротивлению, потерям на отражение (S_{11}), коэффициенту стоячей волны (КСВ), коэффициенту полезного действия (КПД) и т. д. [4].

В настоящей работе предложена оригинальная планарная

конструкция преобразователя ИК-изображений в диапазоне частот 0,65...0,75 ТГц, выполненного на основе аподизированных открытых микрорезонансных металлических структур, соединенных через канонические нерегулярные линии и микрополосковые волноводы с детекторным диодом, а также проведен компьютерный расчет ожидаемых основных параметров, определяющих его практическую пригодность.

Конструктивно такой преобразователь [5] состоит из расположенных на диэлектрической подложке 1: приемной части 2, выполненной в виде двух одинаковых прямоугольных открытых аподизированных периодических металлических структур микронных размеров, обеспечивающих эффективное согласование её с окружающим пространством; канонических нерегулярных линий 3, в которых волновое сопротивление является функцией координаты, и детекторного диода 5 с микрополосковыми линиями 4 рисунок 1.

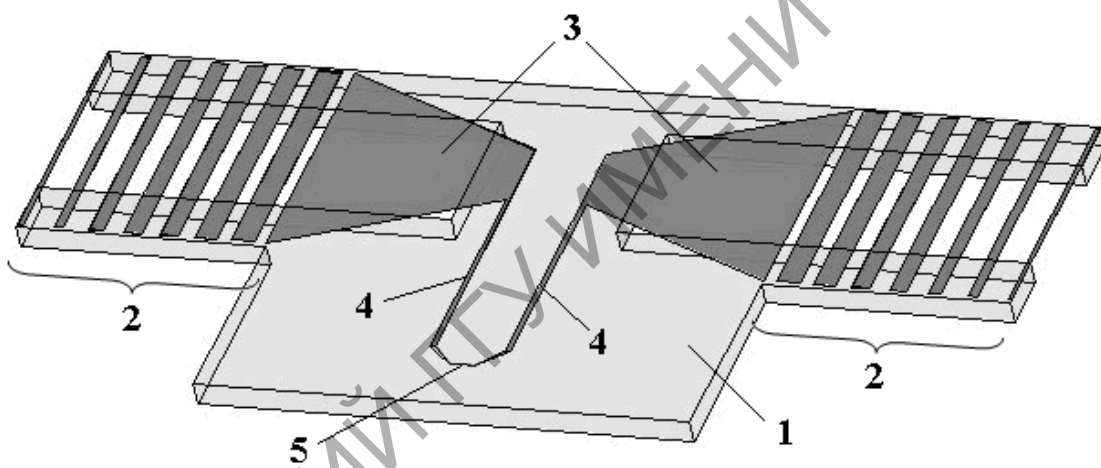


Рисунок 1 – Преобразователь ИК-изображений: 1 – диэлектрическая подложка, 2 – аподизированные периодические металлические открытые микрорезонансные структуры, 3 – канонические нерегулярные линии, 4 – микрополосковые линии, 5 – детекторный диод

Электрический ток в приемной части 2, наведенный внешним переменным электрическим полем, после детектирования диодом 5 преобразуется в постоянное напряжение, величина которого пропорциональна напряженности этого электрического поля.

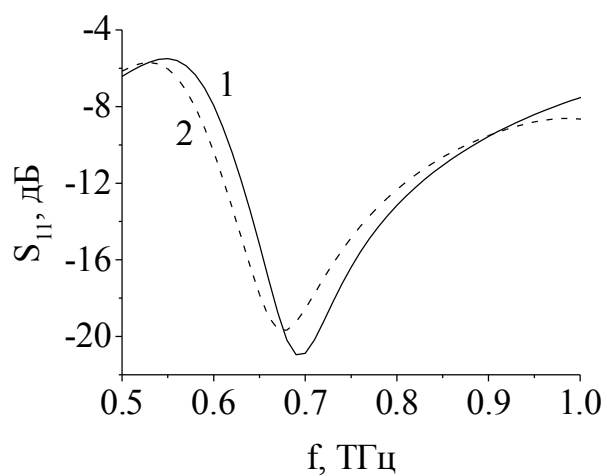
Компьютерный эксперимент по исследованию ожидаемых параметров и характеристик такой микрорезонансной структуры проводился с использованием современного мощного пакета программ – HFSS [6, 7], позволяющего конструировать, моделировать и

оптимизировать сложные трехмерные конфигурации произвольной формы. Использование данного пакета программ дает высокую гарантию того, что измеренные характеристики экспериментального образца будут практически совпадать с теоретическими. Численный расчет предложенного преобразователя осуществлялся в пределах ограниченной *области пространства и заданном частотном диапазоне*.

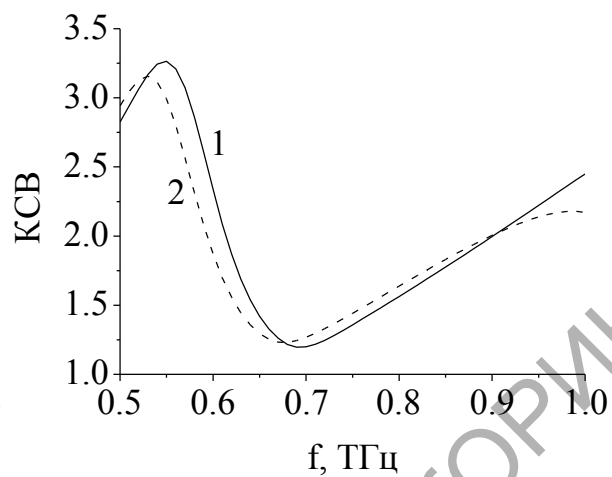
При моделировании предложенного преобразователя геометрические размеры приемной части 2 составляли $105 \text{ мкм} \times 105 \text{ мкм} \times 50 \text{ нм}$ при его общей длине – 421 мкм. Период расположения элементов в приемной части 2 выбран равным 15 мкм. В качестве проводникового материала использовалось золото толщиной 50 нм, а диэлектрик подложки 1 имел диэлектрическую проницаемость 2,17, тангенс угла потерь 0,0009 и толщину 10 мкм. Угол между продолжением боковых сторон трапеций канонических нерегулярных линий 3 выбран равным 45 градусам для уменьшения потерь на отражение и повышения волнового сопротивления на резонансной частоте [2]. Источник внешнего излучения представлял собой волновой порт – верхняя поверхность области, в пределах которой осуществлялось моделирование. В качестве детекторного диода 5 использовался низкобарьерный диод Шоттки с нулевым смещением, являющийся одним из основных нелинейных элементов, широко используемых в настоящее время, для преобразования субмиллиметрового излучения. Такой диод практически не имеет конкурентов в рассматриваемом диапазоне электромагнитных волн [8].

На рисунке 2,а приведены полученные рассчитанные характеристики, показывающие, что оптимальное согласование по входу устройства происходит на частотах 0,69 и 0,68 ТГц для резонансных микроструктур с аподизацией (1) и без (2), при потерях на отражение соответственно -21 дБ и -19,7 дБ. При этом КСВ на резонансных частотах составляют соответственно 1,2 и 1,23 (рисунок 2,б), что отвечает максимальному КПД преобразования ~ 96,5 % при наличии аподизации (рисунок 2,в).

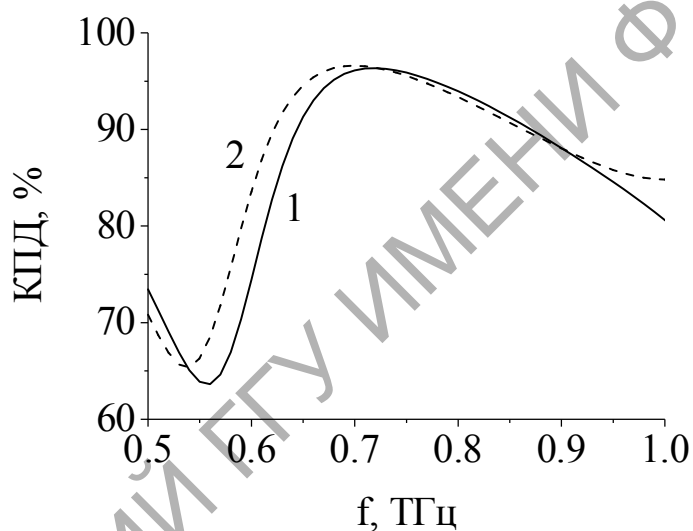
Рассчитаны также зависимости коэффициентов направленного действия (КНД) на резонансных частотах от угла места θ при азимутальном угле $\varphi = 90$ (1), 45 (2) и 0 (3) градусов – рисунок 5. Максимальные значения КНД при угле места $\theta = 180$ градусов составляют соответственно 7,06 и 7,03 для приемной части, выполненной с аподизацией и без аподизации, при чем расширение главного лепестка по уровню 0,5 с ~ 47,5 до ~ 72,8 градусов происходит в том и другом случае с уменьшением азимутального угла от 90 до 0 градусов.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Частотные зависимости: а – потеря на отражение, б – коэффициента стоячей волны и в – коэффициента полезного действия для приемной части, выполненной с аподизацией (1) и без аподизации (2)

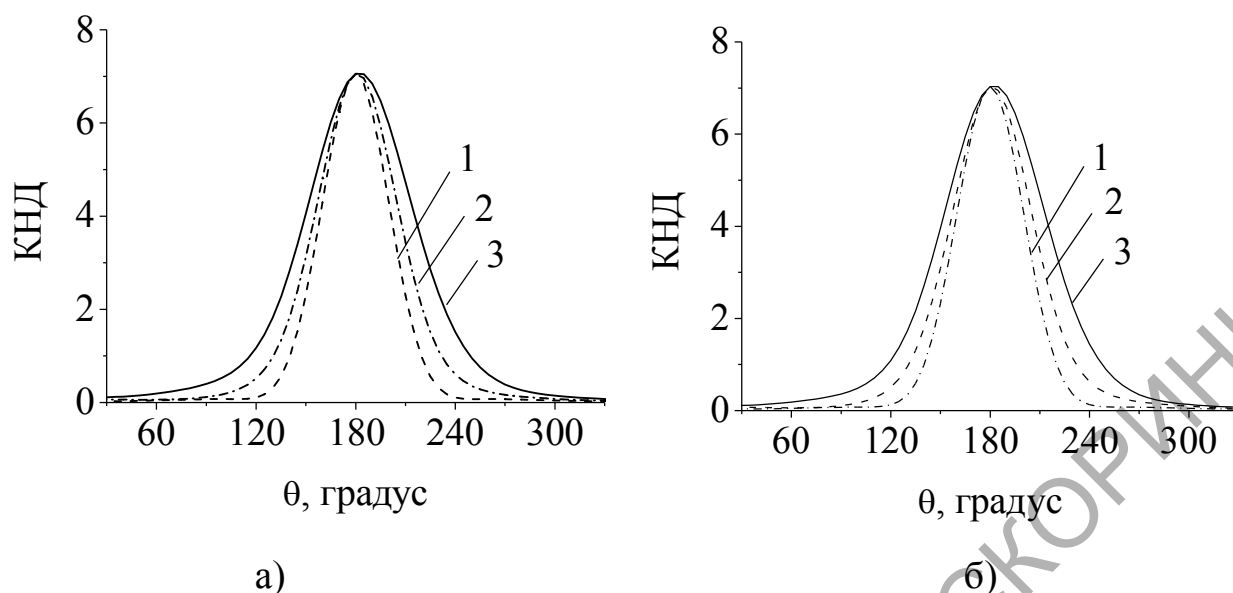


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов направленного действия для приемной части: а – с аподизацией и б – без аподизации от угла места θ при азимутальном угле $\varphi = 90$ (1), 45 (2) и 0 (3) градусов на резонансных частотах $0,69$ (а) и $0,68$ (б) ТГц

Таким образом, предложенная микрорезонансная структура для преобразования ИК-изображений в частотном диапазоне $0,65 \dots 0,75$ ТГц имеет коэффициент полезного действия $\sim 96,5$ % с потерями на отражение ~ -21 дБ, коэффициентом стоячей волны около $\sim 1,2$ и в её диаграмме направленности отсутствуют боковые лепестки.

Проведенный компьютерный эксперимент показывает, что предложенный преобразователь ИК-изображений может быть использован при разработке и производстве по хорошо отработанной планарной технологии перспективных, эффективных и конкурентоспособных приборов тепловизионной техники нового поколения субмиллиметрового диапазона.

Литература

1. Beard, M.C. Progress towards two-dimensional biomedical imaging with THz spectroscopy / M.C. Beard, G.M. Turner, C.A. Schmuttenmaer // *Physics in Medicine and Biology*. – 2002. – Vol. 47. – № 21. – P. 3841–3846.
2. Chen, Y. THz spectroscopic investigation of selected purines and amino acids / Y. Chen, H. Liu, K. Liu, X.-C. Zhang // *The Joint 30th Intern. Conf. on IR and MM Waves and 13th Intern. Conf. on Terahertz Electronics*, 2005. – Vol. 1. – P. 54–55.
3. Fitzgerald, A.J. An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation / A.J. Fitzgerald [et al.] // *Physics in Medicine and Biology*. – 2002. – Vol. 47. – № 7. – P. R67–R84.

4. Корнюхин, В.И. Синтез вибраторных антенн с периодически включенными реактивными нагрузками / В.И. Корнюхин, В.М. Седов // Антенны. – 2009. – Вып. 8. – С. 18–22.

5. Есман, А.К. Детектирующая антенна терагерцового диапазона / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков // Патент Республики Беларусь на полезную модель № 6438 МПК Н 01 Q 13/00. Заявл. 13.01.2010; опубл. 30.08.2010. – 2010. – № 4.

6. HFSS v12.0 User Manual. – Pittsburgh, PA: Ansoft Corporation, 2009.

7. Банков, С.Е. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО “НПП “Родник”, 2009. – 256 с.

8. Sydlo, C. Fast THz detectors based on InGaAs Schottky Diodes / C. Sydlo [et al.] // Frequenz. – 2008. – Vol. 62. – № 5–6. – P. 107–110.