

УДК 621.382.323

СЕЛЕКТИВНЫЙ ПРИЕМНИК ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

SELECTIVE RECEIVER OF THE TERAHERTZ RADIATION

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

B.I. Stepanov Institute of Physics of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Предложена оригинальная конструкция селективного высокоэффективного приемника терагерцового излучения на основе диода Шоттки с балочными выводами и показано, что при оптимизации размеров его элементов и расположении в эластичном слое диэлектрика периодических решеток можно достичь потерь на отражение -38 дБ, эффективности преобразования 97% и резонансной частоты детектирования $-36,5$ ТГц.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, низкобарьерный диод Шоттки с нулевым смещением, слой эластичного диэлектрика, объемная проводимость, n^+ -слой, эпитаксиальный слой n -типа.

An original design of a selective high-efficiency receiver on the basis of the Schottky diode with beamed outputs is proposed. It is shown that the optimization of the sizes of its elements and location of the periodic lattices in the layer of elastic dielectric lead to the reflection losses -38 dB, conversion efficiency 97% and resonance frequency detection of 36,5 THz.

Keywords: terahertz radiation, low-barrier zero-bias Schottky diode, layer of the elastic dielectric, bulk conductivity, n^+ -layer, epitaxial layer of n -type.

Введение

В последнее десятилетие проводятся интенсивные исследования по разработке и созданию высокоэффективных твердотельных приемников в терагерцовой (ТГц) области частот на основе низкобарьерных диодов Шоттки. Для микроволнового излучения в неохлаждаемых приемниках у них практически нет конкурентов [1], [2]. Область электромагнитных волн указанного диапазона привлекает к себе внимание исследователей, как с теоретической, так и с практической точки зрения из-за её востребованности в различных областях науки и техники. Поэтому открываются перспективы создания оптоэлектронной техники нового поколения не только в космической отрасли, но и в биомедицинских приложениях, системах безопасности жизнедеятельности, системах неразрушающего контроля материалов, диагностирования раковых заболеваний и многих других областях.

Так как на ТГц частотах предварительное усиление сопряжено со значительными трудностями, то чувствительность и быстродействие детектора являются основными параметрами, определяющими его практическую пригодность. Особенно активно развивается подход к конструированию приемников ТГц диапазона на основе δ -легированных низкобарьерных диодов Шоттки с балочными выводами без смещения [3], [4], встроенных в планарные антенны: логопериодические и спиральные (широкополосные) или дипольные и щелевые [5]. Расширение рабочего диапазона в сторону увеличения

частоты затруднено из-за ряда существенных ограничений. С одной стороны предельная частота детектирования определяется сопротивлением потерь и емкостью перехода, а с другой – качеством пластин исходного материала, уровнем развития технологии и паразитными параметрами, зависящими от его конструкции. Уменьшение последовательного сопротивления потерь путем увеличения легирования полупроводника ограничено достигнутым значением концентрации легирующих примесей [6]. Емкость перехода диода без смещения с площадью активной области в единицы квадратных микрон составляет в настоящее время единицы фемтофард. Одним из основных паразитных параметров является конструктивная емкость диода, которая определяется диэлектрической проницаемостью и структурой эластичного диэлектрика, расположенного между катодным и анодным балочными выводами, а также их размерами и взаимным расположением. Известно, что диоды Шоттки с низким потенциальным барьером используются в качестве детекторов инфракрасного излучения для области длин волн 8–14 мкм, однако эффективность их при комнатной температуре недостаточная для широкого практического применения [7]–[9].

Целью работы является улучшение основных параметров и характеристик приемника ТГц излучения на основе диода Шоттки с балочными выводами за счет оптимизации его конструкции путем изменения конфигурации эластичного слоя.

1 Конструкция приемника

В работе рассматривается один из возможных путей решения поставленной задачи за счет совершенствования структуры эластичного диэлектрика низкобарьерного диода Шоттки с δ -легированием и балочными выводами без смещения [10]. Предложенная конструкция приемника на основе диода Шоттки с балочными выводами представлена на рисунке 1.1, где в полупроводниковой подложке 9 друг над другом сформированы n^+ -слой 8 и n -слой 7. На поверхности n -слоя 7 нанесена пленка диэлектрика 6 с вырезом, над которым расположен анодный балочный вывод 5 с контактом 11 к слою полупроводника 7. А катодный балочный вывод 4 расположен на пленке диэлектрика 6 с катодным контактом 10 к слою полупроводника 8. Сверху на катодном 4 и анодном 5 балочных выводах выполнен слой эластичного диэлектрика 2, имеющий в центре над подложкой 9 окно 3, а по краям – периодические решетки 1, каждая из которых содержит четыре отверстия прямоугольной формы.

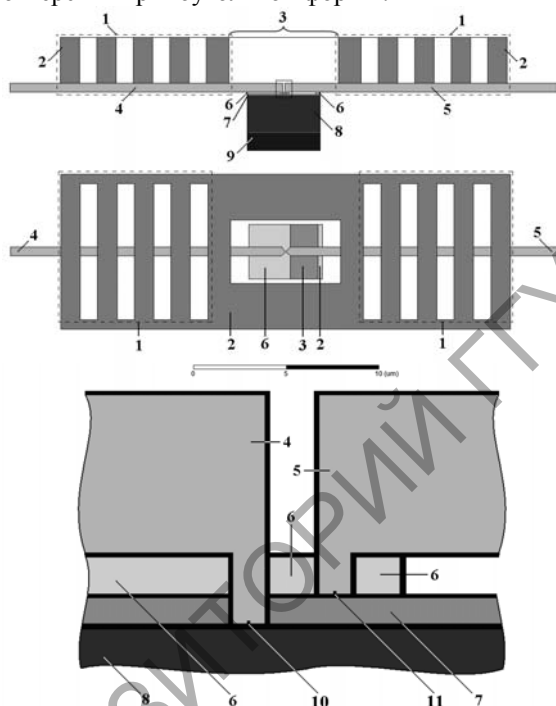


Рисунок 1.1 – Схематическое изображение сечений приемника ТГц излучения по горизонтали (верхнее) и вертикали (среднее), а также его увеличенный фрагмент (снизу), где:

- 1 – периодические решетки,
- 2 – слой эластичного диэлектрика,
- 3 – окно,
- 4 – катодный балочный вывод,
- 5 – анодный балочный вывод,
- 6 – пленка диэлектрика,
- 7 – n -слой,
- 8 – n^+ -слой,
- 9 – подложка,
- 10 – катодный контакт,
- 11 – анодный контакт

2 Результаты компьютерного эксперимента

Компьютерный эксперимент по исследованию параметров и характеристик приемника ТГц излучения проводился с использованием программы HFSS, которая позволяет вычислять одно- и многомодовые S -параметры и электромагнитные поля в трехмерных структурах произвольной формы [11], [12]. При моделировании использовались следующие данные: геометрические размеры подложки 9, n^+ -слоя 8, n -слоя 7 и пленки диэлектрика 6 в окне 3 составляли $4 \text{ мкм} \times 3 \text{ мкм}$ с толщинами соответственно – 1 мкм , 2 мкм , $0,1 \text{ мкм}$ и $0,1 \text{ мкм}$. Пленка диэлектрика 6 выполнена из диоксида кремния, а n^+ -слой 8 и n -слой 7 – из арсенида галлия с объемными проводимостями $14,3 \times 10^4 \text{ См/м}$ и $45,45 \times 10^3 \text{ См/м}$ соответственно. Размеры выреза в пленке диэлектрика 6 под анодным балочным выводом 5 выбраны следующие: $1,5 \text{ мкм} \times 3 \text{ мкм} \times 0,1 \text{ мкм}$. Оптимальные общие геометрические размеры (длина, ширина и толщина) балочных выводов 4 и 5, выполненных из золота, составляли $30 \text{ мкм} \times 0,5 \text{ мкм} \times 0,5 \text{ мкм}$. Слой эластичного диэлектрика 2 выполнен из полиимида длиной $24,5 \text{ мкм}$, шириной $8,5 \text{ мкм}$, а толщина его варьировалась в пределах от 2 мкм до 3 мкм . Оптимизация рассматриваемой конструкции приемника осуществлялась за счет введения в слой эластичного диэлектрика 2 периодических решеток 1 и выбора соответствующих размеров выреза в пленке диэлектрика 6, балочных выводов 4, 5 и окна 3.

Численный расчет проводился в пределах ограниченной области пространства с учетом требуемых граничных условий для данной конструкции, при мощности входного излучения, равной 1 мВт . Размеры области моделирования и расстояние между источником излучения и детекторным диодом задавались не менее одной четверти резонансной длины волны принимаемого электромагнитного излучения с целью обеспечения требуемой точности вычислений.

На рисунке 2.1 приведены зависимости резонансной частоты приемника ТГц излучения от толщины слоя эластичного диэлектрика 2 и геометрических размеров прямоугольных отверстий периодических решеток 1, расположенных в этом слое. Из приведенных на рисунке 2.1 зависимостей резонансных частот f_{res} от толщины слоя эластичного диэлектрика d с периодическими решетками (сплошная линия) и без них (штриховая линия) следует, что максимальные значения резонансных частот f_{res} достигаются при $d = 2,5 \text{ мкм}$ и $2,3 \text{ мкм}$ и составляют $36,5 \text{ ТГц}$ и $30,9 \text{ ТГц}$ соответственно. При этом на вставке, приведенной на рисунке 2.1, показано, что резонансная частота f_{res} приемника с периодическими решетками 1 принимает максимальное значение $36,5 \text{ ТГц}$ при ширине w прямоугольных отверстий периодических решеток 1, равной $1,1 \text{ мкм}$.

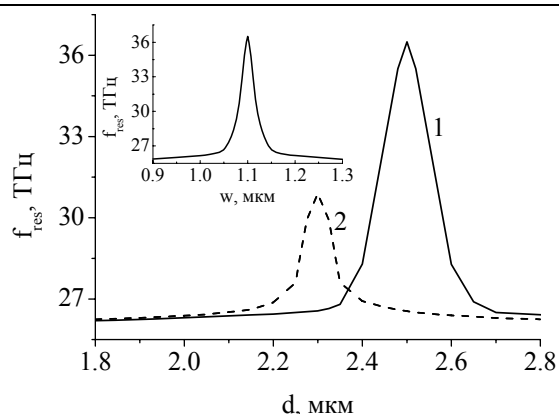


Рисунок 2.1 – Зависимость резонансной частоты f_{res} приемника с периодическими решетками (1) и без них (2) от толщины слоя эластичного диэлектрика. На вставке – зависимость резонансной частоты f_{res} его с периодическими решетками от ширины отверстий в них

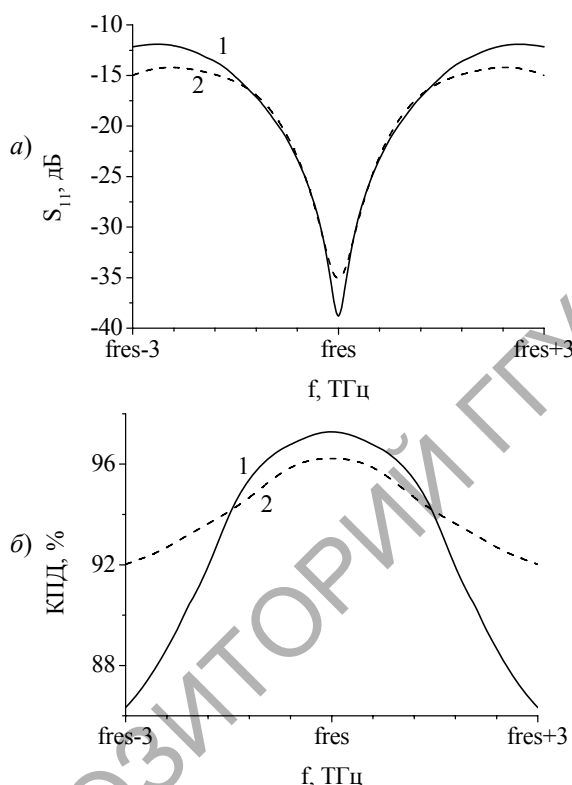


Рисунок 2.2 – Частотная зависимость потерь на отражение S_{11} приемника (а) с периодическими решетками (1) (сплошная линия) и без них (2) (штриховая линия) и коэффициента полезного действия (б) соответственно: с решетками (1) – сплошная линия и без них (2) – штриховая линия

Частотные зависимости потерь на отражение S_{11} и коэффициента полезного действия (КПД) приемника с указанными выше размерами приведены на рисунке 2.2. Откуда следует, что на резонансных частотах f_{res} потери на отражение для диода с периодическими решетками 1 в

эластичном диэлектрике 2 составляют $-38,81$ дБ и без них $-35,05$ дБ (рисунок 2.2 а), а КПД – $97,32\%$ и $96,22\%$ (рисунок 2.2 б) соответственно.

Предлагаемая конструкция приемника ТГц излучения на основе диода Шоттки с балочными выводами позволяет эффективно согласовать его по входу и выходу, т.е. снизить потери на отражение и увеличить поглощение на резонансной частоте за счет использования двух периодических решеток 1, каждая из которых содержит четыре отверстия прямоугольной формы. А один из вариантов физической реализации разработанной конструкции приемника без гальванических связей с остальными компонентами может быть выполнен, как в [13].

Заключение

Проведенный компьютерный эксперимент показал, что при расположении в эластичном слое диэлектрика диода Шоттки с балочными выводами периодических решеток и оптимизации его конструкции можно повысить резонансную частоту приемника до $36,5$ ТГц при уменьшении потерь на отражение до -38 дБ и увеличить КПД до 97% . Предложенная конструкция на основе диода Шоттки может быть использована не только при создании селективных, высокоэффективных, малогабаритных неохлаждаемых приемников ТГц излучения, но и в качестве элементной базы детекторных и смесительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fast THz detectors based on InGaAs Schottky Diodes* / C. Sydlo [et al.] // *Frequenz*. – 2008. – Vol. 62. № 5–6. – P. 107–110.
2. *Ferguson, B. Materials for terahertz science and technology* / B. Ferguson, X.-C. Zhang // *Nature Materials*. – 2002. – № 1. – P. 26–33.
3. *Шашкин, В.И. Диагностика низкобарьерных диодов Шоттки с приповерхностным δ -легированием* / В.И. Шашкин, А.В. Мурель // *Физика и техника полупроводников*. – 2008. – Т. 42, вып. 4. – С. 500–502.
4. *Sassen, S. Barrier height engineering on GaAs THz schottky diodes by means of high – low doping, InGaAs – and InGaP – layers* / S. Sassen, B. Witzigmann, C. Wolk, H. Brugger // *IEEE Transaction on Electron Devices*. – 2000. – Vol. 47. – P. 24–32.
5. *Brown, E.R. A system-level analysis of Schottky diodes for incoherent THz imaging arrays* / E.R. Brown // *Solid-State Electronics*. – 2004. – Vol. 48, Issue 10–11. – P. 2051–2053.
6. *Pure rotational spectrum of HCM in the terahertz region: use of a new planar schottky diode multiplier* / F. Maiwald [et al.] // *J. Mol. Spectrosc.* – 2000. – Vol. 202. – P. 166–168.
7. *Электрические свойства диодов Шоттки на основе узкозонного HgMnTe* / Л.А. Косяченко

[и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, вып. 10. – С. 1217–1224.

8. Шевчик-Шекера, А.В. Реальная и предельная чувствительность некоторых приемников излучения ТГц/суб-ТГц-диапазонов / А.В. Шевчик-Шекера // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2012. – № 1. – С. 3–6.

9. *First THz and IR characterization of nanometer-scaled antenna-coupled InGaAs/InP Schottky-diode detectors for room temperature infrared imaging* / H. Kazemi [et al.] // Proc. of SPIE. – 2007. – Vol. 6542. – P. 65421J–1–4.

10. Детекторный диод с балочными выводами: патент на пол. модель 9936 Респ. Беларусь, МПК Н 01L 29/86 / А.К. Есман, В.К. Кулешов, Г.Л. Зыков ; заявитель ГНУ «Институт физики

им. Б.И. Степанова НАН Беларуси», № 020130690; заявл. 20.08.13, реш. о выдаче 04.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 1.

11. *HFSS v12.0 User Manual*. Pittsburgh, PA: Ansoft Corporation, 2009.

12. Банков, С.Е. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS / С.Е. Банков, Э.М. Гутцайт, А.А. Курушин А.А. – М. : ООО «Оркада», 2012. – 250 с.

13. *A Planar-Diode Frequency Tripler at 1.9 THz* / A. Maestrini [et al.] // IEEE MTT-S Digest. – 2003. – № 3. – P. 747–750.

Поступила в редакцию 28.03.14.