

УДК 621.382.21.3

Приемник субмиллиметрового излучения на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0,2$)

Ф. Ф. Сизов, В. В. Забудский, А. Б. Смирнов, Ж. В. Гуменюк-Сычевская,
В. Н. Добровольский, Н. И. Момот

В работе рассматривается прототип многоэлементного микроболометра на базе твердого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,2$) с размером чувствительного элемента 50×50 мкм, представляющего собой эпитаксиальную пленку толщиной 8 мкм. Оценена его вольт-ваттная чувствительность на длинах волн 3,18; 3,84 и 8,1 мм в температурном диапазоне 78—300 К ($\sim 10^2$ и 10^3 В/Вт, соответственно, при $T = 78$ К) при разных рабочих режимах (ток через образец от 0 до 1 мА).

PACS 07.57.Kp

Ключевые слова: приемник, субмиллиметровый, твердый раствор, КРТ.

Введение

Изучению физических свойств и созданию приборов на основе соединения КРТ как базового материала современной ИК-микроэлектроники посвящено множество публикаций (см., например, [1]). Детекторы на основе этого материала демонстрируют чувствительность, близкую к теоретически возможной, в диапазоне от ближнего ИК ($\lambda \approx 1,5$ мкм) до дальнего ИК ($\lambda \approx 25$ мкм). На базе КРТ сегодня изготавливаются многоэлементные фотоприемники с высокой частотой кадров, разрешением и обнаружительной способностью. Однако вопрос о применении этого материала для регистрации электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов пока изучен в недостаточной степени. Нами получены результаты, демонстрирующие возможность использования этого традиционного для ИК-области материала в качестве датчика миллиметрового и

субмиллиметрового излучения, использующего болометрический эффект разогрева носителей заряда — SHEB-детектора [2], причем работоспособность приемника обеспечивается при комнатных температурах или при неглубоком охлаждении (до температуры $T = 78$ К).

В работе рассматривается прототип многоэлементного ($n \leq 10$ чувствительных элементов) микроболометра на базе твердого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,2$) с размером чувствительного элемента 50×50 мкм, представляющего собой эпитаксиальную пленку толщиной 8 мкм. Один из электрических контактов каждого резистора (с сопротивлением при комнатной температуре около 20—30 Ом) имеет размеры в несколько раз большие, чем второй, и представляет собой антенну, через которую падающее излучение вводится в образец. Для проверки функционирования предложенного детектора измерена его чувствительность к излучению с длинами волн от 3,14 до 8,1 мм в температурном диапазоне 78—300 К при разных рабочих режимах (ток через образец от 0 до 1 мА).

Сизов Федор Федорович, заведующий отделом.

Забудский Вячеслав Владимирович, старший научный сотрудник.

Смирнов Александр Борисович, старший научный сотрудник.
Гуменюк-Сычевская Жанна Витальевна, старший научный сотрудник.

Добровольский Валентин Николаевич, главный научный сотрудник.

Момот Наталия Ивановна, аспирантка.

Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева. НАНУ. Украина, Киев, пр. Науки, 41.

E-mail: momotnatasha@isp.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 15 октября 2009 г.

Экспериментальные результаты

Регистрация сигналов от облучаемых образцов проводилась методом синхронного детектирования при изменяемой частоте модуляции с помощью нановольтметра — синхронного детектора с согласующим трансформатором. Мощность излучения P регулировалась в пределах от 0 до 40 мВт на выходе волновода. Для исследования температурной зависимости отклика образец помещался в криостат с фторопластовым входным окном. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

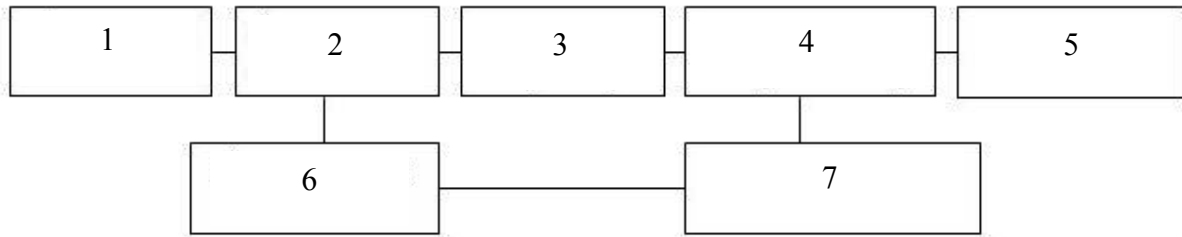


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки:

1 — источник излучения — генератор СВЧ на основе диода Ганна; 2 — аттенуатор с ослаблением до 10 дБ; 3 — механический или электрический модулятор; 4 — микроболومتر; 5 — блок смещения; 6 — контрольный детектор; 7 — измерительный блок (повышающий трансформатор с коэффициентом усиления $k = 500$, усилитель, осциллограф Tektronix 2014)

Для задания стабилизированного тока через образец использовался источник-измеритель Keithley 2400, а для регистрации выходного сигнала — усилитель-синхронный детектор Stanford Research SR830. Частота модуляции потока излучения находилась в пределах $f \leq 5 \cdot 10^3$ Гц.

На рис. 2—4 приведены экспериментальные результаты по измерению зависимости выходного сигнала от одного из микроболметров от температуры в диапазоне $T = 78—300$ К для длин волн падающего излучения 8,1; 3,84 и 3,18 мм, соответственно.

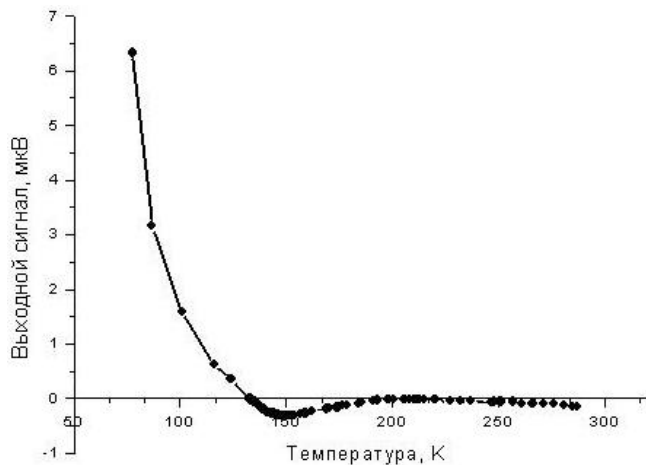


Рис. 2. Температурная зависимость выходного сигнала для одного из фоточувствительных элементов микроболметра на базе твердого раствора $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \sim 0,2$) (ток через детектор $I = 0,7$ мА, мощность излучения на выходе волновода $P = 2,95$ мВт, длина волны падающего излучения 8,1 мм)

На рис. 2 изображен детектируемый сигнал S , как функция температуры T , при задаваемом смещении через болометр $I_{bias} = 0,7$ мА при мощности излучения (на $\lambda = 8,1$ мм) $P = 2,95$ мВт.

Величина S имеет фазовую зависимость, отклик понижался в области 260 К, а в области 130 К проходил через ноль, при этом изменялся его знак. Это соответствует уменьшению сопротивления детектора при его облучении при температурах, больших 130 К, и увеличению сопротивления при температурах, меньших 130 К. Далее происходило резкое возрастание сигнала на величину до 2 по-

рядков при температуре 78 К. Подобная зависимость наблюдалась и для длин волн падающего излучения $\lambda = 3,84$ и 3,18 мм (рис. 3, 4), однако изменение знака сигнала происходило при немного большей температуре ($T \approx 140$ К). В работе [3] продемонстрирована чувствительность рассматриваемого приемника к излучению с длинами волн 337 и 190 мкм. Измеренная величина вольт-ваттной чувствительности для длины волны $\lambda = 8,1$ мм составила $S_v \approx 27$ В/Вт при $T = 300$ К и $S_v \approx 1,6 \cdot 10^3$ В/Вт при $T = 78$ К, а для длины волны $\lambda = 3,84$ мм — $S_v \approx 2$ В/Вт при $T = 300$ К и $S_v \approx 1,2 \cdot 10^2$ В/Вт при $T = 78$ К. Оценки вольт-ваттной чувствительности сделаны по отношению к площади детектора $A = 50 \times 50$ мкм.

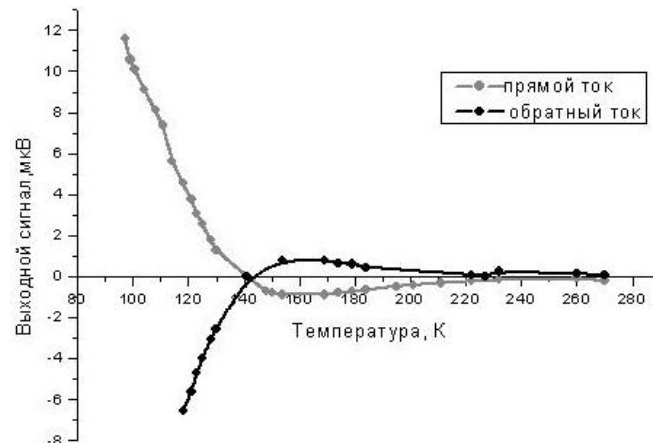


Рис. 3. Температурная зависимость выходного сигнала для одного из фоточувствительных элементов микроболметра на базе твердого раствора $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \sim 0,2$) (ток через детектор $I = 0,7$ мА, мощность излучения на выходе волновода $P = 12$ мВт, длина волны падающего излучения 3,84 мм)

В работе [2] предложена теоретическая модель функционирования рассматриваемого детектора в качестве приемника излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне длин волн. В соответствии с ней ТМ электромагнитная волна через один из контактов, представляющего собой антенну, попадает в слой полупроводника. Слой полупроводника рассматривается как волновод, вдоль которого распространяется электромагнитная вол-

на, не увеличивая температуру решетки, но разогревая электроны. Из-за уменьшения амплитуды волны при ее распространении вдоль слоя разогрев электронов является неоднородным, поэтому вдоль пленки создается градиент электронной температуры. Этот градиент приводит (I) к возникновению в пленке ЭДС типа Дембера, (II) протеканию вдоль пленки потоков электронно-дырочных пар и (III) изменению этими потоками полного числа носителей заряда, а поэтому сопротивления пленки. Первое (I) обуславливает сигнал ответа детектора даже в отсутствии тока смещения, третье (III) приводит к возникновению компоненты сигнала, зависящей от тока смещения. Вклад этих трех компонент зависит от температуры, что при ее понижении от 300 К приводит сначала к небольшому повышению амплитуды сигнала с максимумом при $T \approx (160—170)$ К, а затем к изменению знака сигнала и его резкому росту.

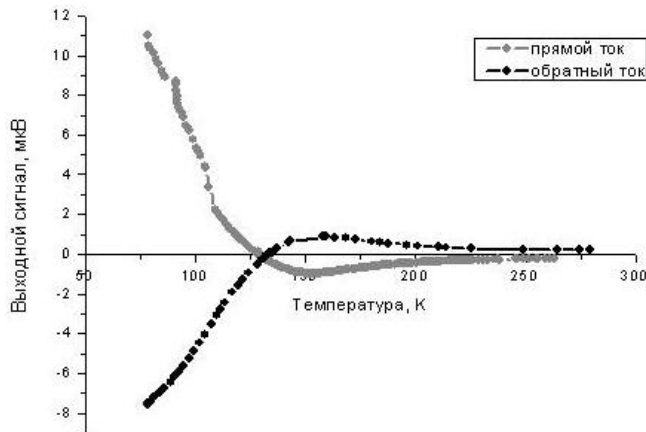


Рис. 4. Температурная зависимость выходного сигнала для одного из фоточувствительных элементов микроболюметра на базе твердого раствора $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \sim 0,2$) (ток через детектор $I = 0,5$ мА, мощность излучения на выходе волновода $P = 12$ мВт, длина волны падающего излучения 3,18 мкм)

Для характеристики приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов чаще всего используется параметр эквивалентной мощности шума, приведенной к единичному интервалу частот:

$$NEP = U_{\text{ш}} / (S_u \cdot (\Delta f)^{1/2}), \quad (1)$$

где $U_{\text{ш}}$ — напряжение шума;

S_u — вольт-ваттная чувствительность приемника излучения;

Δf — полоса пропускания измерительного устройства.

Для оценки эквивалентной мощности шума предложенного приемника во внимание принимаются джонсоновский, генерационно-рекомбинационный и фотонный шумы, характерные для фоторезисторов HgCdTe .

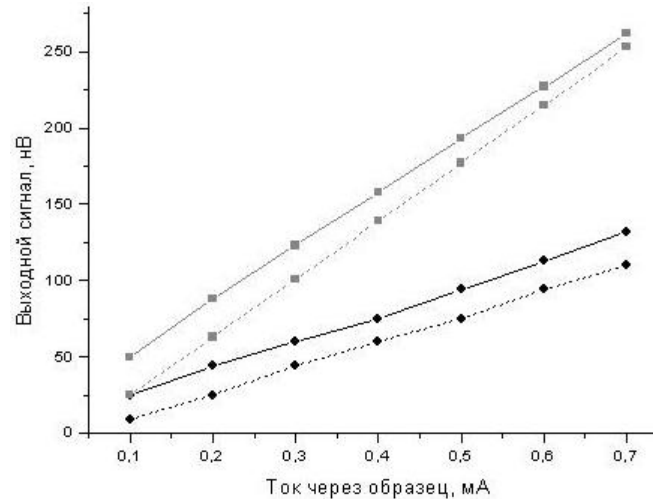


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала от тока для двух чувствительных элементов микроболюметра при "прямом" и "обратном" токе ($T = 300$ К). Сплошная линия соответствует прямому направлению тока, пунктирная — обратному. Длина волны падающего излучения — 3,84 мкм. Мощность на выходе волновода — 185 мВт/см². Разница между величинами сигналов обусловлена наличием ЭДС, возникающей в образцах при их облучении и равна половине суммы сигналов при "прямом" и "обратном" токе смещения

Выражение для среднеквадратического напряжения шума Джонсона имеет вид [4]:

$$\langle U^2 \rangle = 4 \cdot R \cdot k_B \cdot T \cdot \Delta f, \quad (2)$$

где R — сопротивление образца;

k_B — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура образца;

Δf — ширина полосы пропускания для центральной частоты.

Величина генерационно-рекомбинационного шума в фоторезисторах $n\text{-Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$ при $T = 78$ К равняется $2—6 \cdot 10^{-22}$ А²/Гц [5] и $\sim 2 \cdot 10^{-19}$ А²/Гц при $T = 300$ К в области частот модуляции потока излучения $f \leq 10^5$ Гц.

Для фотонного шума (дисперсии числа падающих на образец фотонов) в диапазоне $\lambda \approx 0—14$ мкм, где эти приемники чувствительны к ИК-излучению, справедливо:

$$U_{\text{ш}} = \langle N \rangle^{1/2} \cdot e \cdot \eta \cdot A \cdot R, \quad (3)$$

где N — поток фотонов из полусферы от АЧТ с температурой 300 К;

e — заряд электрона;

$\eta \approx 0,5$ — квантовая эффективность приемника;

A — площадь образца.

$$N(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda. \quad (4)$$

Рассчитанные по формулам (2—4) напряжения шумов в исследуемых образцах ($R_{78} \approx 40$ Ом, $R_{300} \approx 30$ Ом) при $T = 78$ и $T = 300$ К приведены в табл. 1.

Таблица 1

Рассчитанные напряжения шумов в исследуемом образце

Тип шума	Напряжение шума при $T = 78$ К, В	Напряжение шума при $T = 300$ К, В
Шум Джонсона	$4 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$
Генерационно-рекомбинационный шум	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-9}$
Фотонный шум	$3,9 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$

Общий шум в образце оценивался по формуле:

$$U_{ш} = [(U_{ш1})^2 + (U_{ш2})^2 + (U_{ш3})^2]^{1/2}. \quad (5)$$

При $T = 78$ К согласно (5) $U_{ш} = 6,3 \cdot 10^{-10}$ В. Рассчитанное по формуле (1) для приемника площадью 50×50 мкм² значение NEP в этом случае составляет $4 \cdot 10^{-13}$ и $5,3 \cdot 10^{-12}$ Вт/Гц^{1/2} для длин волн 8,1 и 3,84 мм, соответственно.

При $T = 300$ К и $T = 77$ К определяющим является генерационно-рекомбинационный шум. NEP при учете генерационно-рекомбинационного шума составляет $1 \cdot 10^{-10}$ и $1,5 \cdot 10^{-9}$ Вт/Гц^{1/2} для длин волн 8,1 и 3,84 мм, соответственно, что соответствует значениям NEP для известных приемников излучения, функционирующим в этой спектральной области (табл. 2). При оценке NEP не учитывались потери в оптике измерительной системы. Оцениваемые времена энергетической релаксации горячих электронов при $T \geq 100$ К находятся в пределах $\tau \sim 3 \cdot 10^{-11}$ с, т. е. такой приемник излучения может функционировать в широкой области частот.

Заключение

Полученные характеристики предложенного детектора сравнимы с параметрами других новых неохлаждаемых приемников излучения субмиллиметрового диапазона — *HEMT*-структур [8], однако в отличие от последних и других материалов рассматриваемые детекторы на основе узкозонного материала КРТ могут функционировать в широком спектральном и частотном диапазонах, при неглубоком охлаждении. Это продемонстрировано данными из табл. 2, где для сравнения приведены некоторые параметры известных неохлаждаемых приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов спектра.

Литература

1. Rogalski A. Infrared detectors. Amsterdam: Gordon and Breach, 2000.
2. Dobrovolsky V., Sizov F. // Semicond. Sci. Technol. 2007. V. 22. P. 103.
3. Sizov F. F., Vasiliev V. V., Dobrovolsky V. N., Gumenjuk-Sichevska J. V. et al. MCT detectors: From IR to sub-mm and mm wavelength bands // Proc. SPIE. 2008. V. 7100B-96.
4. Jonson J. B. // Phys. Rev. 1928. V. 32. P. 97.
5. Lukyanchikova N. B. Noise research in semiconductor physics. — Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 1999.
6. Huang T.-L., Schazz S. E., Rutledge D. B. // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 34. P. 773.
7. Grossman E. N. Miller A. J. Active millimeter-wave imaging for concealed weapons detection // Proc. SPIE. 2003. V. 5077. P. 62.
8. Knapp W., Teppe F., El Fatimy A., Dyakonova N., Bou-banga S. et al. Room-temperature detection and emission of terahertz radiation by plasma oscillations in nanometer size transistors // Ibid. P. 75.

Таблица 2

Параметры существующих неохлаждаемых приемников излучения в миллиметровом и терагерцовом диапазоне длин волн

Тип детектора	Частота модуляции f , Гц	Рабочая частота ν , ТГц	NEP , Вт/Гц ^{1/2}
Пирозлектрический	$\leq 10^2$	≤ 30	$\sim (1-3) \cdot 10^{-9}$ (уменьшается с увеличением ν)
Bi-микроболометр [6]	$\leq 10^6$	≤ 30	$1,6 \cdot 10^{-10}$ (убывает с f)
Nb-микроболометр [7]	—	≤ 30	$5 \cdot 10^{-11}$
Диод Шоттки	$\leq 10^6$	≤ 10	$\sim (1-4) \cdot 10^{-10}$ (уменьшается с увеличением ν)
HEMT [8]	$\leq 2 \cdot 10^{10}$	≤ 30	$\sim 10^{-10}$ (зависит от длины затвора и от напряжения на затворе)
SHEB	$< 3 \cdot 10^{11}$	$\sim (0,03-2)$	$\sim 1 \cdot 10^{-10}$ (уменьшается с увеличением ν)

The Cd_xHg_{1-x}Te ($x \sim 0,2$) detector of submillimetric radiation

F. F. Sizov, V. V. Zabudsky, A. B. Smirnov, Zh. V. Gumenyuk-Sychevskaja, V. N. Dobrovolsky, N. I. Momot

V. E. Loshkarev Institute of Semiconductor Physics, 41 Science av., Kiev, Ukraine
E-mail: momotnatasha@isp.kiev.ua

The prototype of a multiunit microbolometer on the basis of the Hg_{1-x}Cd_xTe ($x \sim 0,2$) solid solution is discussed in the paper.

PACS 07.57.Kp

Keywords: detector, submillimetric, solid solution, MCT.

Bibliography — 8 references.

Received October 15, 2009