

УДК 681.7, 537.5

## Многоэлементные приемники терагерцового излучения на CdHgTe

Ф. Ф. Сизов, М. В. Апатская, Ж. В. Гуменюк-Сычевская, В. В. Забудский, Н. И. Момот, М. И. Смолий, З. Ф. Цыбрий, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, Н. В. Сахно

*Предложен полупроводниковый КРТ-болومتر на эффекте разогрева электронного газа, который можно использовать для детектирования терагерцового и миллиметрового излучения. Оцененная эквивалентная шумовая мощность детектора сравнима по величине с NEP других известных неохлаждаемых терагерцовых приемников и составляет при комнатной температуре и нулевом смещении порядка  $5 \cdot 10^{-9}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, а при  $T = 77$  К порядка  $8 \cdot 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Проведен расчет распределения поля, наведенного планарной антенной, в системе антенна—детектирующий элемент.*

PACS: 85.30.-z, 85.60.Dw, 84.40.Ba

*Ключевые слова:* терагерцовый диапазон, болومتر на горячих электронах, антенны, многоэлементный приемник, NEP.

### Введение

На сегодняшний день терагерцовая область спектра широко изучается как с точки зрения создания источников, так и приемников излучения. ТГц-приемники — важная часть терагерцовых технологий, широко распространенных сейчас во многих областях человеческой деятельности (например, в медицине, астрономии, системах безопасности, визуализации изображений и др.). За последние два десятилетия было создано множество новых типов источников и приемников излучения, однако до сих пор актуальной остается задача создания высокочувствительного, широкопо-

лосного, неохлаждаемого или с неглубоким охлаждением, коммерчески доступного ТГц-приемника. Кроме того, большой интерес представляет создание матричных приемников для ТГц-систем видения. В ТГц-области наиболее чувствительными являются гетеродинные приемники, однако создание матриц на их основе связано с некоторыми трудностями:

- все элементы матрицы требуют общего гетеродина, и поэтому их число ограничено мощностью гетеродинного генератора;
- сейчас гетеродинные ТГц-приемники создаются преимущественно на основе сверхпроводников (структуры сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (SIS) или болометры на горячих электронах — НЭВ), которые требуют охлаждения до температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Поскольку заливные системы охлаждения дорогостоящие и неудобные в эксплуатации, а системы замкнутого цикла имеют низкую мощность охлаждения, то требование криогенных температур также ограничивает число элементов матрицы.

В конечном итоге, все ТГц-матрицы на основе гетеродинных приемников сейчас создаются с небольшим числом элементов (несколько десятков). Поэтому представляется, что матрицы на основе приемников с прямым детектированием более перспективны с точки зрения увеличения числа элементов.

Задачи этой работы — разработка и исследование такого типа приемника на основе полупроводникового соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ), которое широко используется для создания ИК-систем видения. В ходе работы был разработан и исследован приемник терагерцового и субтерагер-

---

Сизов Федор Федорович, зав. отделением.  
Апатская Мария Владимировна, научный сотрудник.  
Гуменюк-Сычевская Жанна Виталиевна, старший научный сотрудник.  
Забудский Вячеслав Владимирович, старший научный сотрудник.  
Момот Наталия Ивановна, аспирант.  
Смолий Мария Ивановна, научный сотрудник.  
Цыбрий Зиновия Федоровна, старший научный сотрудник.  
Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАН Украины.  
Украина, 03028, г. Киев, пр. Науки, 41.  
Тел./факс. (3844) 525-18-10. E-mail: sizov@isp.kiev.ua  
Дворецкий Сергей Алексеевич, ведущий научный сотрудник.  
Михайлов Николай Николаевич, старший научный сотрудник.  
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия.  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.  
Тел. (383) 333-39-50. Факс: (383) 333-27-71. E-mail: ifp@isp.nsc.ru  
Сахно Николай Вадимович, студент.  
Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко.  
Украина, 01601, Киев, ул. Владимирская, 64.  
Статья поступила в редакцию 25 сентября 2010 г.

---

© Сизов Ф. Ф., Апатская М. В., Гуменюк-Сычевская Ж. В., Забудский В. В., Момот Н. И., Смолий М. И., Цыбрий З. Ф., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сахно Н. В., 2011

цового излучения с прямым детектированием сигнала на основе  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ . Этот приемник может работать как с охлаждением до температуры жидкого азота, так и при комнатной температуре, с небольшим или нулевым смещением. К тому же он имеет микрометровые размеры. Таким образом, продемонстрировано, что на основе этого экспериментального образца может быть действительно создан компактный матричный ТГц-приемник.

### Конструкция приемника и экспериментальные результаты

Как материал для создания ТГц-приемника были использованы эпитаксиальные пленки  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}/\text{CdZnTe}$  ( $x = 0,22—0,23$ )  $p$ -типа проводимости, выращенные методами жидкофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии (на подложках из (013) GaAs с буферными слоями ZnTe и CdTe) [1] с концентрацией носителей  $3,6 \cdot 10^{15}—2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и толщиной эпитаксиального слоя 2—20 мкм. Исходя из механических и электрофизических свойств КРТ, были разработаны конструкция и технология изготовления многоэлементного приемника.

Технологический маршрут создания такой структуры состоит из следующих операций:

- контроль качества слоя КРТ с помощью оптической микроскопии и инфракрасной Фурье-спектроскопии;
- предварительная химическая обработка поверхности КРТ;
- формирование пассивационного слоя CdTe;
- фотолитография;
- металлизация с помощью взрывной фотолитографии.

Поверхность активного элемента детектора защищалась тонким слоем CdTe, нанесенным с помощью метода горячей стенки. Металлические контакты, также служащие антенной для ввода излучения, наносились на пассивационный слой. Во избежание замыкания между элементами матрицы было использовано травление мезаструктур (до высокоомной подложки). Металлические контакты между чувствительным элементом и антенной были реализованы с помощью химического травления контактных окон в пассивационном слое. Для травления тонкого пассивационного слоя был подобран специальный бромный травитель.

Матрица детекторов состоит из  $4 \times 11$  элементов (площадь активной области каждого составляет  $10 \times 50 \text{ мкм}$ ) и соединена с антенной бабочкообразной формы площадью  $568750 \text{ мкм}^2$ .

Механизм фотоотклика такого приемника был предложен в работе [2]. Здесь падающее излучение разогревает электроны в полупроводнике, в то время как температура решетки остается постоян-

ной. Разогрев влияет на генерационно-рекомбинационные процессы, вследствие чего изменяются число носителей и сопротивление полупроводника. Время отклика такого приемника определяется временем жизни носителей.

Отклик  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ -болометра был измерен в диапазоне частот  $0,037—1,58 \text{ ТГц}$  и температур  $77—300 \text{ К}$  при разных токах смещения. Экспериментальные результаты, показывающие чувствительность детектора во всем указанном диапазоне, представлены в [3]. Эти результаты показывают, что фотоотклик  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$   $p$ -типа больше, чем  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$   $n$ -типа.

На рис. 1, а представлена температурная зависимость отклика болометра на основе КРТ  $p$ -типа при концентрации акцепторов  $N_p = 7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , мольной части CdTe  $x = 0,2$  и размерах чувствительного элемента  $10 \times 50 \times 17 \text{ мкм}$ . При  $T = 77 \text{ К}$  величина фотоотклика при ненулевом смещении в несколько раз больше, чем при токе через детектор  $I = 0$ . В то же время при комнатной температуре величина фотоотклика примерно одинакова как при  $I = 1 \text{ мА}$ , так и при  $I = 0$ .

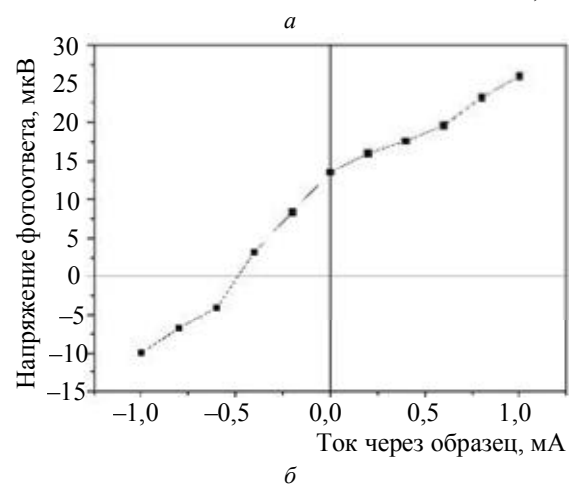
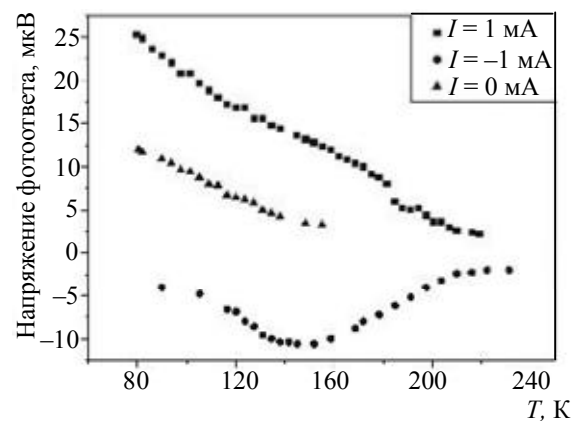


Рис. 1. Температурная зависимость фотоотклика болометра (а) и фотоотклик болометра как функция тока смещения при  $T = 77 \text{ К}$  (б).

Частота падающего излучения  $f = 78 \text{ ТГц}$ . Частота модуляции  $\Delta f = 360 \text{ Гц}$ . Плотность потока излучения в месте расположения приемника  $\sim 4,5 \text{ мВт/см}^2$

Рис. 1, б показывает фотоотклик этого болометра как функцию тока смещения. Отклонение характеристики от линейной, возможно, связано с эффектом выпрямления на контакте металла с полупроводником. Для примера на рис. 2 показаны экспериментальные результаты для другого элемента приемника: фотоотклик как функция тока смещения при  $T = 77$  К и его вольт-амперная характеристика. Для этого образца чувствительность при нулевом смещении даже больше, чем при пропускании тока.

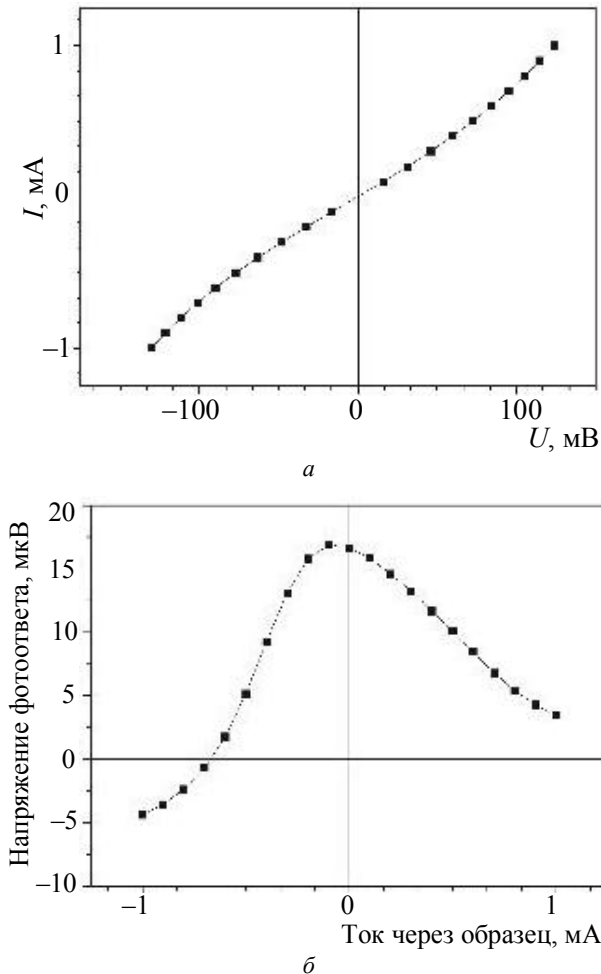


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика (а) и зависимость отклика болометра от тока смещения при  $T = 77$  К (б). Частота падающего излучения  $f = 130$  ГГц

Для характеристики приемников с прямым детектированием используется эквивалентная шумовая мощность (noise equivalent power — NEP). NEP равна мощности излучения, создающего на выходе приемника сигнал, равный шуму. Она может быть рассчитана следующим образом:

$$NEP = \frac{U_N}{S_V(\Delta f)^{1/2}}, \quad (1)$$

где  $U_N$  — напряжение шума;  
 $S_V$  — вольт-ваттная чувствительность детектора;

$\Delta f$  — ширина полосы частот измерительного тракта вблизи центральной частоты.

Для Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te-фоторезисторов нужно учитывать шум Джонсона, генерационно-рекомбинационный и фотонный шумы.

Среднеквадратичное напряжение шума Джонсона

$$\langle U_J \rangle^2 = 4Rk_B T \Delta f, \quad (2)$$

где  $R$  — сопротивление образца;

$k_B$  — постоянная Больцмана;

$T$  — температура образца.

Спектральная плотность генерационно-рекомбинационного шума при зона-зонных переходах:

$$S_I(f) = \frac{4I_c^2 (b+1)^2 n_0 p_0 \tau}{(bn_0 + p_0)^2 (n_0 + p_0)(1 + \omega^2 \tau^2)}, \quad (3)$$

где  $b = \mu_n/\mu_p$  — отношение подвижностей электронов и дырок;

$\tau$  — доминирующее время жизни;

$I_c$  — ток через образец;

$n_0$  и  $p_0$  — полное число электронов и дырок в образце при тепловом равновесии.

Напряжение генерационно-рекомбинационного шума равно

$$\langle U_{g-r} \rangle^2 = S_I R^2 \Delta f. \quad (4)$$

Для фотонного шума (дисперсии числа падающих на образец фотонов) может быть записано следующее уравнение

$$U_{phn} = (2A\eta\langle N \rangle)^{1/2} eR. \quad (5)$$

где  $N$  — плотность потока фотонов фонового излучения из полусферы;

$e$  — заряд электрона;

$\eta = 0,5$  — квантовая эффективность детектора;

$A$  — площадь чувствительного элемента;

$$N(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} d\lambda; \quad (6)$$

полный шум

$$U = \sqrt{U_{g-r}^2 + U_J^2 + U_{phn}^2}. \quad (7)$$

Напряжение шума образца было оценено по формулам (2—7) при  $\Delta f = 1$  Гц, и результаты расчетов показаны в табл. 1.

Таблица 1

Рассчитанные напряжения (В) шумов образца

Тип шума	$T = 77$ К	$T = 300$ К
Шум Джонсона	$5,1 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$
Генерационно-рекомбинационный шум	$2 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
Фотонный шум	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1,7 \cdot 10^{-12}$

При комнатной температуре превалирует генерационно-рекомбинационный шум. Поскольку генерационно-рекомбинационный шум проявляется при прохождении тока через образец, его влияние может быть исключено в режиме нулевого смещения.

В табл. 2 приведены оцененные значения эквивалентной шумовой мощности образца при токе  $I = 1$  мА и  $I = 0$ .

Таблица 2

Оцененные значения NEP, Вт/Гц<sup>1/2</sup>

Ток через детектор $I$ , мА	$T = 77$ К	$T = 300$ К
1	$4 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$
0	$8 \cdot 10^{-10}$	$5,4 \cdot 10^{-9}$

Таким образом, благодаря меньшему значению шума пороговая чувствительность детектора больше в режиме нулевого смещения, чем при приложенном токе, несмотря на меньшую величину фотоответа. Оцененная эквивалентная шумовая мощность детектора сравнима по величине с NEP других известных неохлаждаемых терагерцовых приемников.

### Моделирование интегральной системы антенна—детектирующий элемент

В отличие от видимого и инфракрасного диапазонов, где для прямого детектирования используется только приемный элемент, в милли- и субмиллиметровом диапазонах необходимо наличие антенны, электрически связанной с детектирующим элементом для ввода сигнала в область значительно меньшую, чем длина волны. Антенна со значительно большей, чем у детектора, площадью передает принятую мощность детектирующему элементу, позволяя обеспечить большую чувствительность.

Целью исследования было вычислить распределение поля, наведенного планарной антенной, в детектирующем элементе — болометре на горячих электронах на основе HgCdTe.

В используемой модели авторы рассматривали систему "антенна—детектор", состоящую из металлической бабочкообразной антенны на полупроводниковой подложке и болометрического полупроводникового элемента между лепестками антенны (рис. 3).

Так как интегральная система "антенна—болометр" имеет размеры порядка длины волны излучения, то использование ближнеполевого приближения неправомерно [4] в отличие от случаев плазмонных антенн видимого диапазона или ближнеполевых концентраторов. Необходимо применение одного из универсальных методов вычислительной электродинамики.

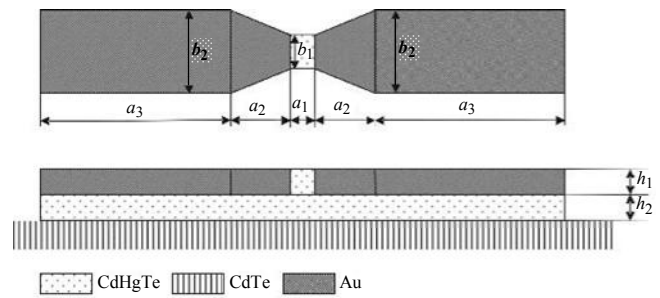


Рис. 3. Геометрия системы

"бабочкообразная антенна + детектор":

$a_1 = 10$  мкм — длина полупроводникового детектора,  $a_2 = 125$  мкм — длина лепестка антенны,  $a_3 = 875$  мкм — длина лепестка антенны;  $b_1 = 50$  мкм — ширина полупроводникового детектора,  $b_2 = 300$  мкм — ширина антенны;  $h_1 = 1$  мкм — толщина антенны и детектора,  $h_2 = 1$  мкм — толщина вспомогательного полупроводникового слоя

Существует несколько универсальных методов вычислительной электродинамики: MOM (method of momentum), FEM (finite element method), FDTD (finite difference time domain). Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Самым лучшим для расчета планарных антенн является метод MOM. В нем производятся дискретизация по металлическим поверхностям самосогласованного интегрального уравнения Липмана—Швингера и решение полученной системы линейных уравнений. С помощью принципа поверхностной эквивалентности похожее разбиение возможно и для однородных диэлектрических областей.

Преимущество метода MOM состоит в том, что в нем дискретизируется поверхность системы, а не объем. Это хорошо для тонких структур (где толщина намного меньше планарного размера). Метод FDTD не позволяет, например, дискретизовать систему с существенно отличающимся шагом по разным осям. Если структура тонкая, то однородная дискретизация требует очень больших вычислительных мощностей. Кроме того, существует проблема поглощающих граничных условий для открытых систем. Это все и обусловило выбор метода расчета, а именно MOM.

Было произведено моделирование работы системы "антенна—детектор" и получено распределение электрического поля в детекторе. Известно [5—7], что резонансная частота бабочкообразной антенны задается длиной антенны. В нашей работе изучалось влияние других (не общей длины) параметров системы. Основными результатами являются зависимости усредненного электрического поля в детекторе от частоты для различных длин детектора  $a_1$  (рис. 4, а) при прочих равных размерах. Чем короче полупроводниковый элемент, тем большее усиление поля в нем можно получить. Таким образом, для увеличения чувствительности нужно уменьшать длину детектора. Но эта зависимость не является монотонной. Изменения  $a_1$  приводят к изменению резонансной частоты и по-

явлению дополнительных максимумов. При малых значениях  $a_1$  это связано с влиянием подложки. Ближнеполевые эффекты становятся существенными при больших значениях  $a_1$ , но, в общем, ответ детектора должен уменьшаться с увеличением частоты сигнала в диапазоне от 78 ГГц до 1 ТГц, что наблюдалось экспериментально. Похожая зависимость приведена в работе [8] для болометра на горячих электронах в связи с частотными свойствами носителей тока.

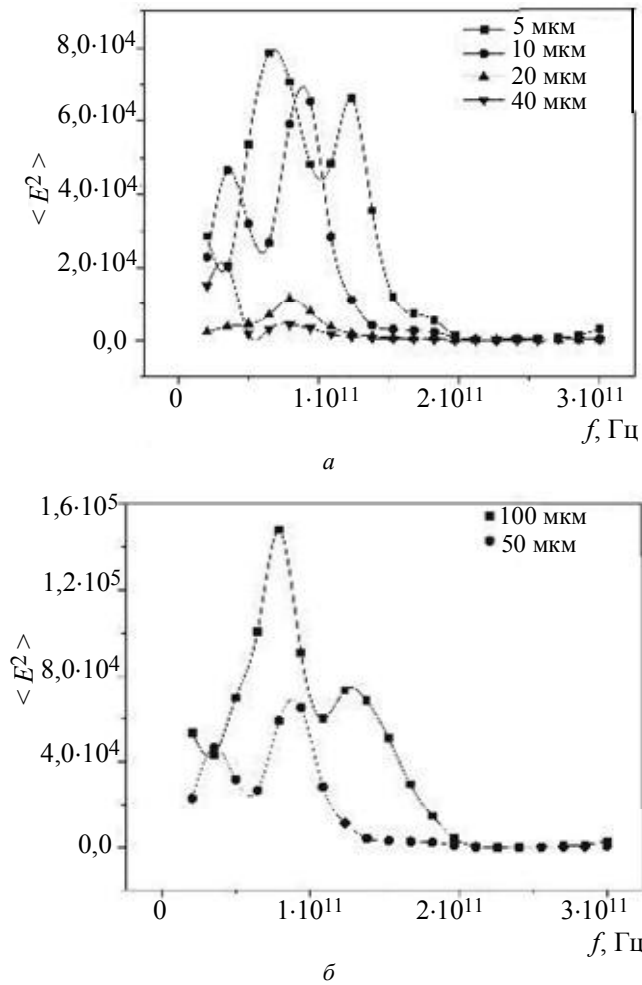


Рис. 4. Частотная зависимость усредненного квадрата электрического поля в детекторе для различных длин (а) и ширины (б) детектора

Рис. 4, б показывает, что ответ системы также зависит от ширины детектора  $b_1$ . Усиление сигнала больше, чем шире детектор. Это связано с однородностью поля в детекторе. Максимум ответа также зависит от  $b_1$ . Таким образом, при моделировании ответа системы нужно учитывать всю ее геометрию.

Распределение электрического поля в детекторе для различных частот показано на рис. 5, а. Эта зависимость симметрична относительно центра детектора. Наибольшее поле в детекторе данной конструкции получается при частоте излучения  $f = 78,9$  ГГц.

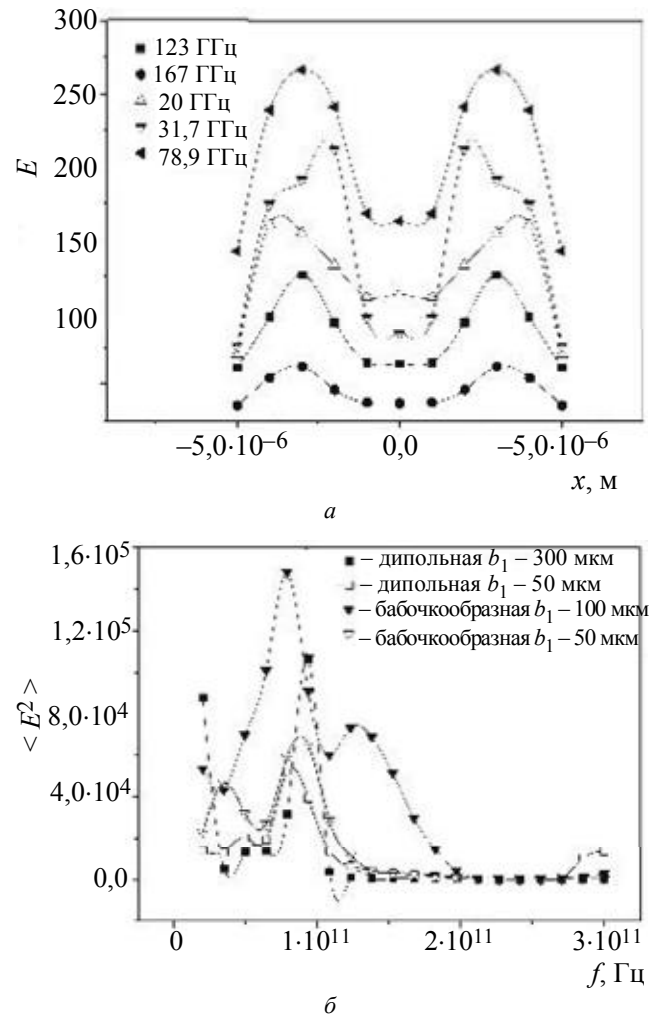


Рис. 5. Зависимость электрического поля от координаты при различных частотах для детектора с бабочкообразной антенной (а) и усредненный квадрат поля от частоты для дипольной и бабочкообразной антенн и различной ширины детектора (б)

На рис. 5, б ширина дипольной антенны  $b_1 = 300$  мкм была выбрана так, чтобы сделать равными площади ее и бабочкообразной антенны, что позволит сравнивать усиление поля. Длины антенн и детекторов были одинаковы в обоих случаях. Таким образом, бабочкообразная антенна дает усиление поля в 1,5 раза больше, чем дипольная. Разница в резонансных частотах скорее всего связана с различной шириной детектора. Когда ширины детектора одинаковы — резонансные частоты близки, но площади антенн отличаются.

### Заключение

Показано, что полупроводниковый КРТ-болометр на эффекте разогрева электронного газа можно использовать для детектирования терагерцового и миллиметрового излучения. Оцененная эквивалентная шумовая мощность детектора сравнима по величине с NEP других известных неохлаждаемых ТГц-приемников и составляет при комнатной температуре и нулевом смещении по-

рядка  $5 \cdot 10^{-9}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, а при  $T = 77$  К — порядка  $8 \cdot 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Выяснено, что планарная бабочкообразная антенна может усилить интенсивность поля в чувствительном элементе на пять порядков, по сравнению с полем падающей волны. Изменение геометрии антенны или детектора изменяет рабочую частоту и может сделать систему высокоселективной. Существенны почти все параметры антенны, а не только ее длина. Присутствие подложки уменьшает резонансную частоту. Преимущество бабочкообразной антенны — большее усиление и более узкий спектр по сравнению с дипольной антенной. Было показано, что бабочкообразная антенна дает более однородное поле в области детектора.

#### Л и т е р а т у р а

1. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сабина И. В. Молекулярно-лучевая эпитаксия твердых растворов кадмий—ртуть—теллур на "альтернативных" подложках // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1092—1101.
2. Dobrovolsky V., Sizov F., Zabudsky V., Momot N. // Terahertz Science and Technology. 2010. V. 3. No. 1. P. 33.
3. Sizov F. F., Dobrovolsky V., Zabudsky V., Kamenev Yu., Momot N., Gumenjuk-Sychevska J. // Proc. of SPIE. 2009. V. 7309.
4. Bozhevolnyi S., Lozovski V. Self-consistent model for second-harmonic near-field microscopy // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. 11139.
5. Milligan T. Modern antenna design. 2<sup>nd</sup> ed. IEEE press, Wiley Interscience, New Jersey, 2005.
6. Gonzalez F. J., Boreman G. D. Comparison of dipole, bowtie, spiral and log-periodic IR antennas // Infrared Physics & Technology. 2005. V. 46. P. 418.
7. Makarov S. Antenna and EM modeling with MATLAB, Wiley Interscience, New York, 2002.
8. Dobrovolsky V. N., Sizov F. F. A room temperature, or moderately cooled, fast THz semiconductor hot electron bolometer // Semicond. Sci. Technol. 2007. V. 22. P. 103.

## Multielement detectors of terahertz radiation on the base of CdHgTe

*F. F. Sizov, M. V. Apats'ka, J. V. Gumenjuk-Sychevska, V. V. Zabudsky,  
N. I. Momot, M. I. Smoliy, Z. F. Tsybrii*

Institute of Semiconductor Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, 41 Nauki av.,  
Kiev, 03028, Ukraine  
E-mail: sizov@isp.kiev.ua

*S. A. Dvoretzky, N. N. Mikhailov*

Institute of Semiconductor Physics, SB of the RAS, 13 Lavrentiev av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: ifp@isp.nsc.ru

*N. V. Sakhno*

Taras Shevchenko Kiev National University, 64 Volodymyrs'ka str., Kiev, 01601, Ukraine

***The hot electron bolometer on the base of MCT to be used for terahertz and sub-terahertz radiation has been proposed. Estimated noise equivalent power can be comparable with the NEP of other known non-cooled terahertz detectors. At room temperature and zero bias, it is about  $5 \cdot 10^{-9}$  W/Hz<sup>1/2</sup> and at  $T = 77$  K, the NEP is about  $8 \cdot 10^{-10}$  W/Hz<sup>1/2</sup>. The field distribution induced by planar antenna is calculated in system of antenna with detecting element.***

PACS: 85.30.-z, 85.60.Dw, 84.40.Ba

**Keywords:** terahertz region, hot-electron bolometer, antennas, multielement detector, NEP.

Bibliography — 7 references.

Received September 25, 2010