

УДК 621.382.01, 621.382.2

**ПАРАМЕТРЫ МИКРОВОЛНОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
НА ОСНОВЕ НИЗКОБАРЬЕРНЫХ ДИОДОВ МОТТА
ДЛЯ МАТРИЧНЫХ СИСТЕМ РАДИОВИДЕНИЯ**

В. И. Шашкин, А. В. Мурель, Н. В. Востоков

Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород

Получена 27 июня 2013 г.

Аннотация. В работе приводятся экспериментальные результаты исследования детекторов миллиметрового диапазона длин волн (94 ГГц) на основе низкобарьерных диодов на арсениде галлия, изготовленных с применением техники приповерхностного изотипного дельта-легирования. Варьированием параметров дельта-слоя возможно изменение в широком диапазоне эффективной высоты барьера диодов, что актуально для получения матриц систем радиовидения из детекторов, работающих без напряжения смещения. Оптимальными характеристиками обладают детекторы с диодами, имеющими эффективную высоту барьера ~ 0.3 эВ, что показано теоретически и подтверждено экспериментом. Определены зависимости параметров детекторов от входной мощности, поляризации сигнала и температуры.

Ключевые слова: арсенид галлия, диод, детектор, дифференциальное сопротивление, вольт-ваттная чувствительность.

Abstract: The paper presents experimental results of a study of detectors millimeter-wave (94 GHz) based on low-barrier gallium arsenide diodes made with the use of technology of the surface isotype-delta doping. By varying the parameters of the delta-layer diodes is possible to obtain a wide range of values of the barrier height, which is important for microwave imaging matrix systems that require detectors working without bias. Optimum performance of the detectors are diodes having the effective barrier height of ~ 0.3 eV as shown theoretically and confirmed by

experiment. Dependence parameters of microwave detectors on the input power, signal polarization and temperature was studied.

Key words: gallium arsenide, diode, detector, differential resistance, responsivity.

Введение

Чувствительные детекторы миллиметрового диапазона длин волн находят применение в матричных системах радиовидения. Особый интерес для таких матриц представляют **direct detecting zero-bias diodes** (детектирующие диоды, работающие без источника смещения), поскольку они не требуют цепей смещения, чем значительно упрощают конструкцию создаваемых матриц. Кроме того, отсутствие напряжения смещения устраняет проблемы, связанные с индуцированными током фликкер- и дробовыми шумами, что делает возможным создание квадратичных детекторов с малым уровнем шумов при комнатной температуре (менее 10^{-12} Вт/Гц^{1/2}) [1]. Существуют различные технологии создания таких низкобарьерных диодов: обращенные диоды на основе Sb-гетероструктур InAs/AlSb/GaSb [2], диоды с планарно-легированными барьерами [3], диоды на основе переходов полуметалл-полупроводник на основе ErAs:InAlGaAs [4], резонансно-туннельные диоды InGaAs/AlAs/InP [5], диоды с сильно-легированными слоями InGaAs, InGaP на GaAs [6]. Однако, все они требуют достаточно сложных технологий молекулярно-лучевой эпитаксии. В статье будут рассмотрены детекторы на основе разработанных нами низкобарьерных диодов с приповерхностным изотипным дельта-легированием на основе структур Al/GaAs, которые изготовлены методом металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ).

2. Технология изготовления микроволновых детекторов

Теоретическое обоснование и методы изготовления диодов с приповерхностным изотипным дельта-легированием на основе арсенида галлия были неоднократно описаны нами в литературе [7,8]. Низкобарьерные диоды (НБД) Мотта выращивались на подложках арсенида галлия методом МОГФЭ.

Поскольку дельта-слой кремния, обеспечивающий туннельный механизм токопереноса и снижение эффективной высоты барьера, располагается на достаточно малом (4-5 нм) расстоянии от поверхности, то необходимым условием сохранения характеристик границы металл-полупроводник (МП) является осаждение металлического контакта без прерывания ростового процесса. Это достигается осаждением слоя алюминия (~100 нм) *in situ* из диметилэтиламиналана при температуре около 200°С. Диоды были изготовлены с применением фотолитографии и имели площадь анода ~10 мкм². Диоды включались в центре планарной щелевой антенны (рис.1), конструкция и характеристики которой описаны в [9]. Детекторы имели резонансную характеристику с полосой около 8 ГГц вблизи центральной частоты 94 ГГц. Было показано, что минимальные значения $NEP \approx 10^{-12}$ Вт Гц^{-1/2} достигаются для диодов с дифференциальным сопротивлением при нулевом смещении в диапазоне 2÷6 кОм.

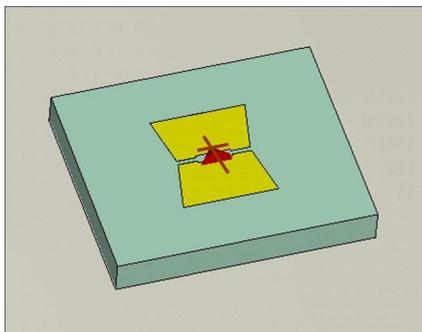


Рис. 1. Схематическое изображение планарного детектора - щелевой антенны с диодом, смонтированным в центре. Лепестки щелевой антенны расположены на диэлектрическом слое с металлизацией обратной стороны.

3. Характеристики микроволновых детекторов на основе низкобарьерных диодов

3.1. Определяемые параметры детекторов

Для получения высокой чувствительности детекторного приёмника, работающего без применения напряжения смещения (zero-bias detectors),

необходимо, чтобы вблизи нулевого смещения диод обладал сильной нелинейностью вольт-амперной характеристики (ВАХ) и его дифференциальное сопротивление при нулевом напряжении находилось в пределах 10^3 - 10^6 Ом.

Нелинейность детекторного диода (current-voltage curvature) характеризует параметр:

$$\alpha = \frac{d^2 I}{dV^2} \bigg/ \frac{dI}{dV}, \quad (1)$$

определяющий ампер-ваттную чувствительность диода (current responsivity)

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2 I}{dV^2} \bigg/ \frac{dI}{dV} = \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

Для стандартного диода Шоттки при комнатной температуре величина

$$\beta \leq \frac{e}{2kT} \approx 20 \frac{A}{W}.$$

Вольт-ваттная чувствительность (voltage responsivity) диода связана с ампер-ваттной соотношением:

$$\gamma[V/W] = \beta[A/W] \cdot R_d[\Omega],$$

- где дифференциальное сопротивление диода R_d – рассчитывается из ВАХ

$$R_d = \partial V / \partial I. \quad (3)$$

Микроволновая чувствительность детектора [V/W] – чувствительность, измеряемая при приёме сигнала рабочей частоты (94 ГГц), которая может быть измерена:

а) как напряжение на выходе видеоусилителя, сопряженного с детектором и нормированное на коэффициент усиления видеоусилителя и величину падающей мощности;

б) непосредственно по сдвигу статической ВАХ диода по напряжению, измеренной без сигнала и при его наличии, и приведённой к величине падающей мощности.

Расчёт падающей мощности проводится по методике, описанной в работе [9]. Микроволновая чувствительность детектора отличается от её величины на

низких частотах γ из-за наличия ёмкости и последовательного сопротивления диода и потерь на согласование диода с антенной.

3.2. Выбор оптимальной эффективной высоты барьера диода

Для эффективной работы диода в качестве квадратичного детектора необходимо его согласование с источником сигнала, в данном случае – антенной. Технология низкобарьерных диодов с приповерхностным δ -легированием с её уникальной возможностью варьирования в широком диапазоне эффективной высоты барьера диода (и, соответственно, дифференциального сопротивления) позволяет провести оптимизацию согласования. Основываясь на простой малосигнальной модели детектора, вольт-ваттную чувствительность можно записать как [9]:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{R_d \cdot R_L}{R_d + R_L + R_S} \cdot \frac{R_d}{R_d + R_S} \cdot \frac{R_d(1 - |\Gamma|^2)}{(1 + R_S / R_d)^2 (1 + (f / f_{ci})^2)}, \quad (4)$$

$$f_{ci} \equiv \frac{(1 + R_S / R_d)^{1/2}}{2\pi C (R_S / R_d)^{1/2}},$$

где f – частота детектируемого сигнала, C – ёмкость диода, R_S – последовательное сопротивление диода, R_L – сопротивление нагрузки (500 кОм), Γ – потери на рассогласовании антенны с диодом, f_{ci} – частота отсечки. Нелинейность диода α , вычисляемая по формуле (1) является удобной величиной для описания квадратичных детекторов, так как прямо указывает на предельно достижимую чувствительность и вычисляется непосредственно из ВАХ диода. Для низкобарьерных диодов, работающих без смещения, желательно иметь наибольшую нелинейность α при нулевом напряжении. На рис.2 приведены экспериментальные зависимости ампер-ваттной чувствительности (а) и дифференциального сопротивления (б) для микроволновых диодов с различной эффективной высотой барьера. В частности видно, что диоды с большой высотой барьера (≥ 0.6 эВ) требуют для работы подачи смещения, т.к. при нулевом смещении их нелинейность очень мала из-за влияния тока утечки, шунтирующего нелинейность. Для

низкобарьерных диодов будем использовать величину чувствительности $\gamma_0 = \gamma(V=0)$, вычисляемую при нулевом смещении, где параметры диода также берутся при равном нулю напряжении (рис.2).

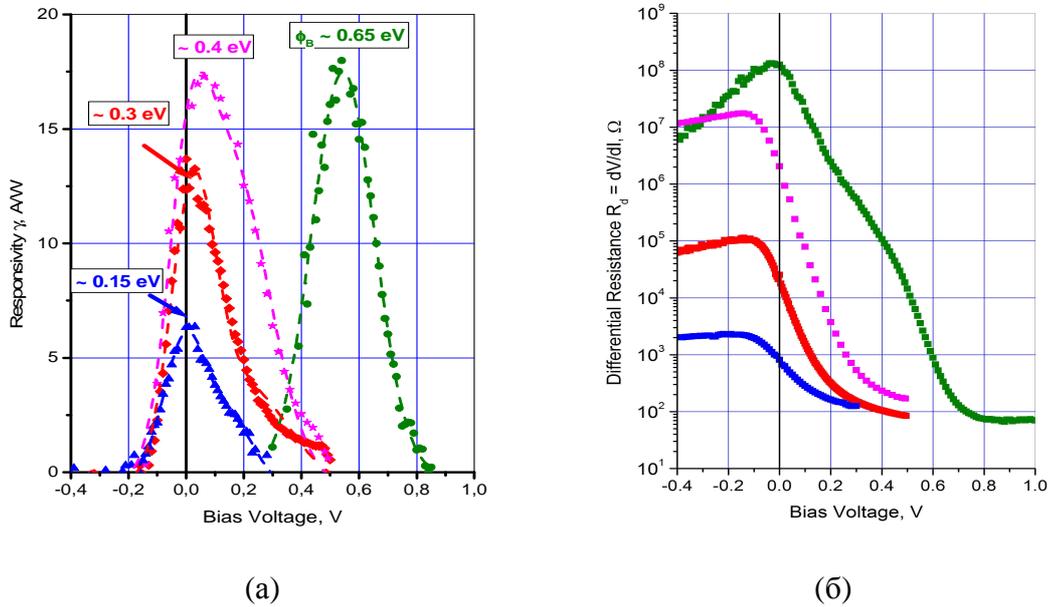


Рис. 2. Экспериментальные зависимости нелинейности (а) и дифференциального сопротивления (б) от напряжения для диодов с различной эффективной высотой барьера (~ 0.6 ; ~ 0.4 ; ~ 0.3 и ~ 0.15 эВ).

Для оптимизации детектора необходимо проанализировать его чувствительность, вычисляемую по формуле (4), в зависимости от параметров как диода, так и источника сигнала (антенны) и выходного усилителя. При этом на основании результатов работы [9] предполагаем, что падающая мощность близка к поглощённой. За исключением ёмкости диода C , которая может варьироваться в небольших пределах за счёт разброса площади анода различных диодов (15-20 фФ), все параметры, входящие в выражение (4) можно определить из ВАХ диодов. Величина C может быть определена из частотной зависимости импеданса диода в гигагерцовом диапазоне. Для нахождения импеданса, диод клеивался проводящим клеем в разрыв сигнального проводника отрезка копланарного волновода, который подключался к векторному анализатору цепей E8361A (Agilent Technologies) для

определения матрицы рассеяния. По частотным зависимостям матриц рассеяния копланарного волновода с диодом и копланарного волновода с замкнутым разрывом сигнального проводника, был найден импеданс диода. Процедура нахождения параметров диодов с помощью измерения матрицы рассеяния описана, например, в [10, 11]. Зависимость мнимой части импеданса одного из диодов от частоты показана на рис. 3 символами, линией показана аппроксимация в простейшей малосигнальной модели. В результате аппроксимации найдена емкость диода: $C = 17$ фФ.

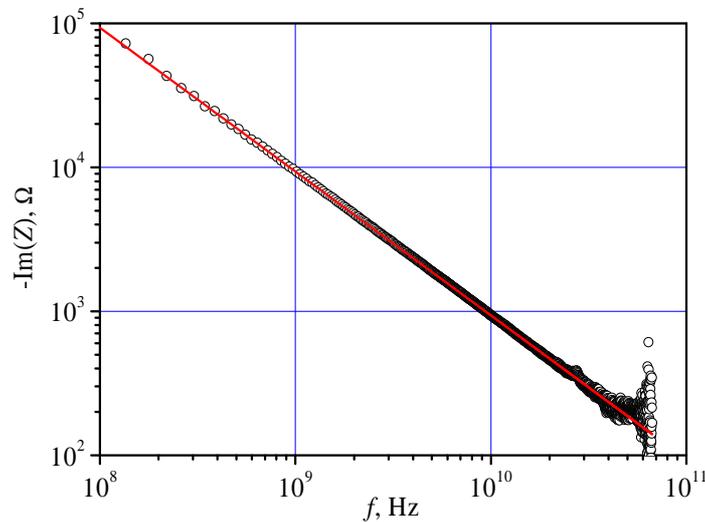


Рис. 3. Зависимость мнимой части импеданса микроволнового диода от частоты. Символы – эксперимент, линия – аппроксимация для $C = 17$ фФ.

Определим максимум функции (4) при остальных фиксированных параметрах для используемой нами частоты 94 ГГц, полагая эмпирическую зависимость коэффициента нелинейности при нулевом смещении $\alpha_0(R_{d0})$, полученную ранее из экспериментальных ВАХ микроволновых диодов, в виде [9]:

$$\alpha_0(R_{d0}) \approx 7.21 \lg(R_{d0}) - 10.6,$$

где R_{d0} подставляется в Омах. Спад коэффициента нелинейности с уменьшением дифференциального сопротивления отражает тот факт, что в

эксперименте наблюдается рост фактора неидеальности диода с уменьшением высоты барьера, причины которого здесь не обсуждаются.

Решение дает значения оптимального дифференциального сопротивления $R_{d0} = 10...50 \text{ кОм}$, что соответствует эффективной высоте барьера на границе М-П диодов в диапазоне $\sim 0.25...0.3$ эВ. Поэтому параметры уровня легирования и расположения дельта-слоя выбирались таким образом, чтобы были достигнуты приведенные значения. Рис. 4 иллюстрирует сказанное выше об оптимальном значении выбора эффективной высоты барьера (~ 0.3 эВ), полученные для детекторов на частоте 94 ГГц.

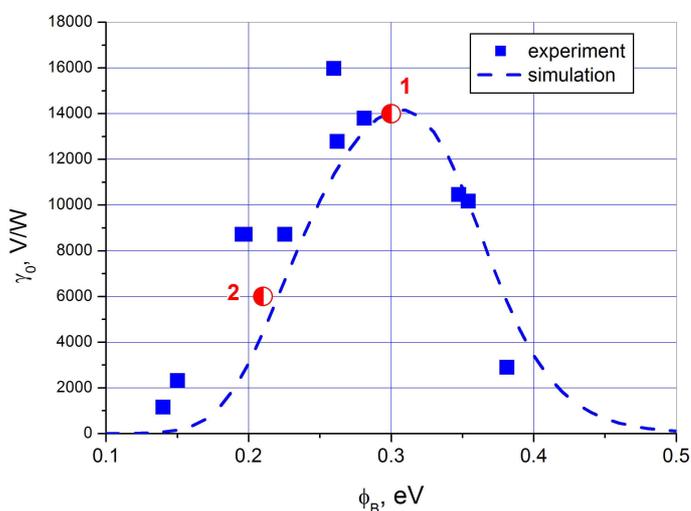


Рис. 4. Экспериментальные и расчётные зависимости чувствительности детекторов с диодами с различной эффективной высотой барьера ($f=94$ ГГц).

Детекторы 1, 2 – исследованные в данной работе.

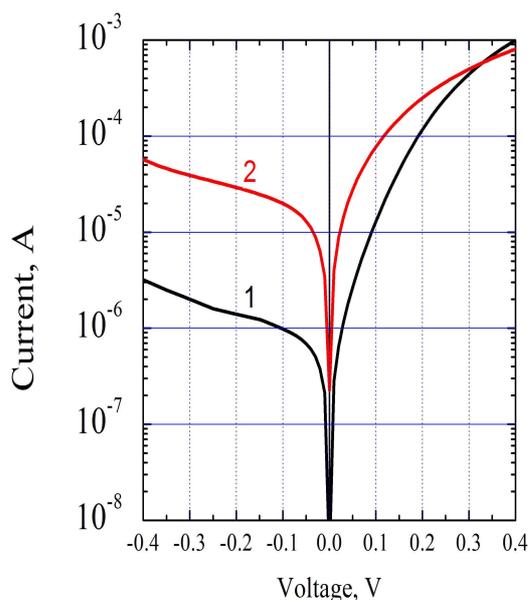
3.3. Микроволновые характеристики детекторов

Для детального изучения параметров детекторов были отобраны два микроволновых диода, имеющие характеристики, близкие к оптимальным, причём второй диод был выбран более низкобарьерным. На рис. 4 выбранные для изучения детекторы с этими диодами показаны цифрами 1 и 2. Соответствующие ВАХ диодов приведены на рис. 5а, а в табл.1 приведены основные параметры исследуемых диодов. Как видим, диод 1 соответствует по своим параметрам оптимальному случаю, в то время как диод 2 имеет

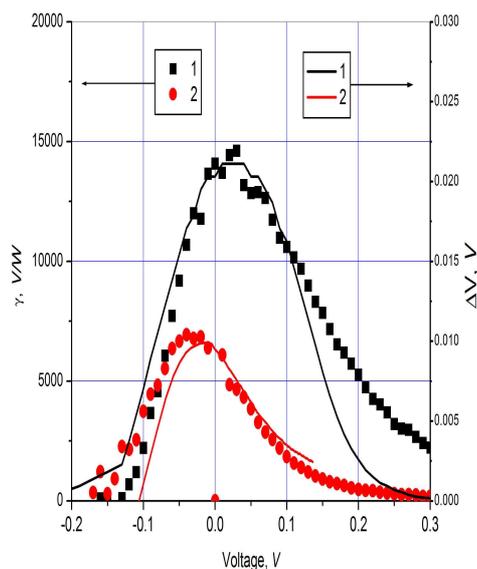
характеристики ниже оптимальных, что и проявляется в его меньшей чувствительности.

Таблица 1. Основные параметры диодов, используемых в исследованных детекторах (ток насыщения I_s , фактор неидеальности n , нелинейность α_0 , дифференциальное сопротивление R_{d0} , эффективная высота барьера ϕ^{eff} , вольт-ваттная чувствительность γ_0).

	I_s , А	n	α_0 , 1/В	R_{d0} , кОм	ϕ^{eff} , эВ	γ_0 , В/Вт
#d1	7.9×10^{-7}	1.4	27	50	0.3	14000
#d2	2.4×10^{-5}	2.6	15	3	0.21	6000



(a)



(б)

Рис. 5. ВАХ исследованных диодов (а) и зависимости чувствительности детекторов от напряжения смещения (б). Символы – эксперимент, линии – расчёт.

На рис. 5б показана зависимость вольт-ваттной чувствительности γ от постоянного напряжения смещения для исследуемых детекторов, определенная из ВАХ по формуле (4) и следующих значений параметров: $r_s = 10$ Ом, $C \approx 15$

фФ (левая ось). Частота сигнала составляет 94 ГГц. Правая ось соответствует детектируемому напряжению, определенному из сдвига ВАХ по оси напряжений при фиксированной величине тока при воздействии микроволнового излучения. Ход экспериментальных зависимостей достаточно хорошо совпадает с рассчитанными характеристиками, из чего можно сделать вывод, что уменьшение γ связано главным образом с уменьшением коэффициента нелинейности ВАХ диода при подаче напряжения смещения как положительной, так и отрицательной полярности. Наблюдаемое отклонение в области положительных напряжений для диода №1 связано, по-видимому, с ростом емкости диода, обусловленное уменьшением области пространственного заряда, что не учитывается в расчете. Максимум чувствительности детекторов, как видно из рис. 5б, находится вблизи нулевых напряжений, что и требуется для создания детекторных матриц.

Величина чувствительности γ зависит от температуры детектора, и как следует из анализа формулы (4) определяется, в основном, температурной зависимостью дифференциального сопротивления, что подтверждается данными рис.6. Зависимость чувствительности от температуры имеет монотонный характер и падает примерно в 2 раза с ее ростом в диапазоне от -40 до +80 °С. Аналогичное поведение характерно и для зависимости от температуры дифференциального сопротивления (правая ось рис. 6).

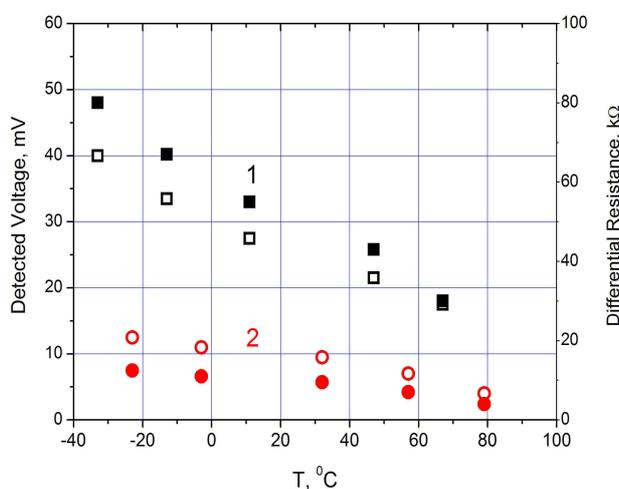


Рис. 6. Температурные зависимости микроволновой чувствительности детекторов (заполненные символы) и дифференциального сопротивления (незаполненные символы) соответствующих диодов 1,2.

Были изучены рабочие характеристики микроволновых детекторов от принимаемой мощности излучения в диапазоне до 100 мкВт. Из рис. 7 видно, что детектор ведёт себя как квадратичный вплоть до значений падающей мощности ~ 1 мкВт, где вольт-ваттная чувствительность превышает значение 10000 В/Вт. Отклонение от линейной зависимости протектированного сигнала на величину 3 дБ соответствует входной мощности около 10 мкВт.

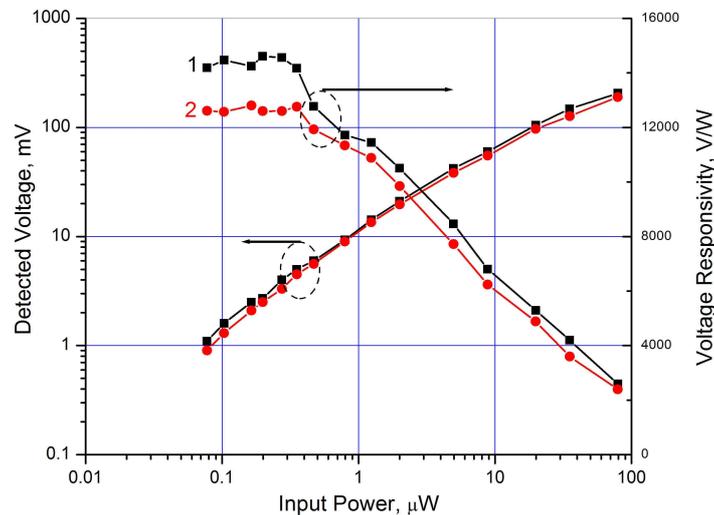


Рис. 7. Зависимость величины детектируемого сигнала и соответствующей чувствительности от величины падающей СВЧ-мощности для двух микроволновых детекторов (частота 94 ГГц, $T=300$ К).

Данные микроволновые детекторы являются поляризационно-чувствительными, что подтверждается экспериментом, проиллюстрированным на рис. 8. ВАХ диода практически не изменяется при засветке излучением с ортогональной поляризацией, и становится чувствительной при повороте угла поляризации на 90 градусов (рис. 8а). Соответственно, на рис. 8б показана

рассчитанная чувствительность детектора при взаимно-ортогональных направлениях поляризации. Это свойство детекторов может быть использовано для создания приборов, использующих поляризационные эффекты.

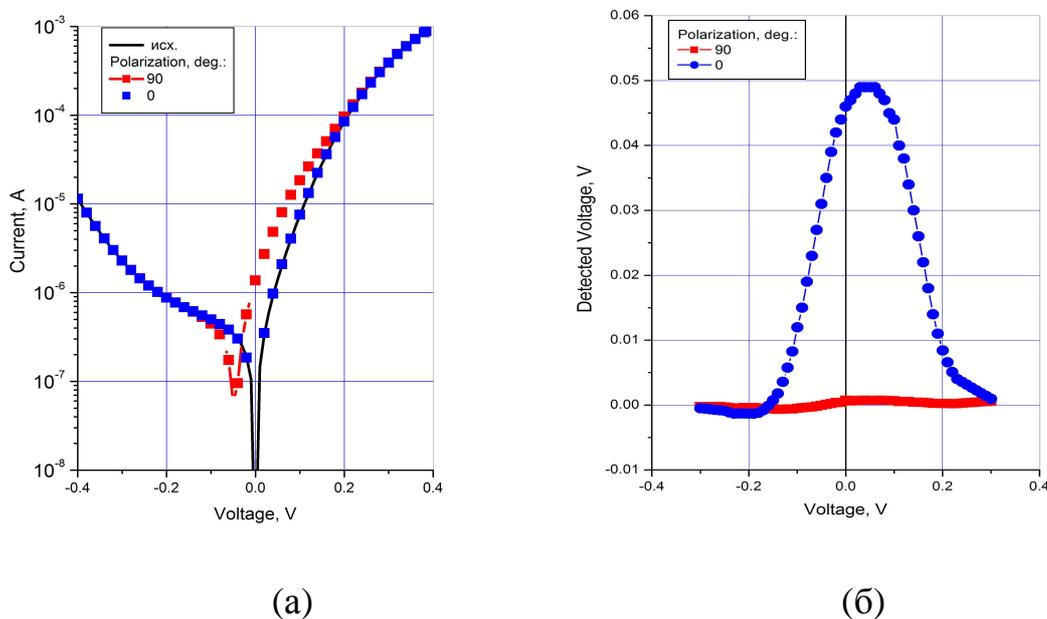


Рис. 8. Поляризационная зависимость (а) вольт-амперной характеристики и (б) чувствительности детектора.

На основе описанных детекторов были созданы линейки (8x1, 40x1) и матрицы (8x8) для систем радиовидения в миллиметровом диапазоне, работа и основные характеристики которых были описаны в работах [12, 13].

4. Выводы

Проведено исследование микроволновых детекторов миллиметрового диапазона длин волн (94 ГГц) на основе низкобарьерных диодов на арсениде галлия, изготовленных с применением техники приповерхностного изотипного дельта-легирования. Экспериментально и теоретически показано, что оптимальная высота барьера диода Мотта составляет ~ 0.3 эВ для детекторов, работающих без напряжения смещения, что необходимо при создании матриц радиовидения. Исследованы рабочие характеристики детекторов в зависимости от параметров входного сигнала и температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-02-00572, 12-02-12006-офи_м).

Авторы выражают благодарность В.М. Данильцеву за выращивание эпитаксиальных структур, Ю.И. Чеченину за изготовление диодов и В.Р. Закамову за помощь в изготовлении планарных детекторов.

Литература

1. E. R. Brown, "A system-level analysis of Schottky diodes for incoherent THz imaging arrays" // *Solid-State Electronics*, 2004, Vol. 48, P. 2051-2053.
2. J. N. Schulman, V. Kolinko, M. Morgan, C. Martin, J. Lovberg, S. Thomas, III, J. Zinck, and Y. K. Boegeman, "W-Band Direct Detection Circuit Performance With Sb-Heterostructure Diodes" // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2004, Vol. 14, N. 7, P. 316-318.
3. M. J. Kearney, and I. Dale, "GaAs Planar Doped Barrier Diodes for Mixer and Detector Applications" // *GEC J. Res.*, 1990, Vol. 8, N. 1, P. 1-12.
4. C. Young, J. D. Zimmerman, E. R. Brown, and A. C. Gossard, "Semimetal-semiconductor rectifiers for sensitive room-temperature microwave detectors" // *Appl. Phys. Lett.*, 2005, Vol. 87, 163506.
5. P. Chahal, F. Morris, G. Frazier, "Zero Bias Resonant Tunnel Schottky Contact Diode for Wide-Band Direct Detection" // *IEEE Electron. Dev. Lett.*, 2005, Vol. 26, P. 894-896.
6. S. Sassen, B. Witzigmann, C. Wolk, H. Brugger, "Barrier Height Engineering on GaAs THz Schottky Diodes by Means of High-Low Doping, InGaAs- and InGap-Layers" // *IEEE Electron. Dev.*, 2000, Vol. 47, P. 24-31.
7. В. И. Шашкин, А. В. Мурель, "Обобщенная теория токопереноса в низкobarьерных диодах Мотта с приповерхностным дельта-легированием: сопоставление с экспериментом" // *Микроэлектроника*, 2010, Т. 39, С. 348-355.

8. В. И. Шашкин, А. В. Мурель, “Теория туннельного токопереноса в контактах металл-полупроводник с приповерхностным изотипным дельта-легированием” // ФТП, 2004, Т.38, №5, С. 574-579.
9. V. I. Shashkin, Yu. A. Drjagin, V. R. Zakamov, S.V. Krivov, L. M. Kukin, A.V. Murel, Y. I. Chechenin, ”Millimeter-Wave Detectors Based on Antenna-coupled Low-Barrier Schottky Diodes” // Int. J. Infrared Milli. Waves., 2007, V.11, N.11, 945-952.
10. Tero Kiuru, Juha Mallat, Antti V. Raisanen, and Tapani Narhi, “Schottky Diode Series Resistance and Thermal Resistance Extraction From *S*-Parameter and Temperature Controlled *I-V* Measurements” // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, Vol. 59, N. 8, P. 2108-2116.
11. K. Zeljami, J. Gutierrez, J. P. Pascual, T. Fernandez, A. Tazon, and M. Boussouis, “Characterization and Modeling of Schottky Diodes up to 110 GHz for Use in Both Flip-Chip and Wire-Bonded Assembled Environments” // Progress in Electromagnetics Research, 2012, Vol. 131, P. 457-475.
12. В. Р. Закамов, А. В. Мурель, В. И. Шашкин, “Матричный детекторный приёмник плотной компоновки для систем видения миллиметрового диапазона длин волн” // Контроль. Диагностика, 2009, №5, С. 15-20.
13. В. И. Шашкин, Ю. И. Белов, П. В. Волков, А. В. Горюнов, В. Р. Закамов, И. А. Илларионов, “Экспериментальное исследование матрицы детекторов системы радиовидения 3-мм диапазона длин волн” // Письма в ЖТФ, 2013, Т. 39, Вып. 12, С. 44-49.