

УДК 621.383.45: 621.793.09

# Фоторезисторы с эксклюзией носителей заряда для спектрального диапазона 3–5 мкм из гетероэпитаксиальных структур $n$ — $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

© 2020 г. А. В. Филатов, канд. техн. наук; Е. В. Сусов, канд. техн. наук;  
А. В. Гусаров; В. В. Карпов, канд. физ.-мат. наук

АО «Московский завод «САПФИР», Москва

E-mail: info@mzsapphir.ru

Поступила в редакцию 24.07.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-12-103-110

Исследованы свойства фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур  $n$  —  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  в спектральном диапазоне 3–5 мкм с размером фоточувствительных площадок  $0,05 \times 0,05$  и  $0,5 \times 0,5$  мм с индивидуальными контактами при температуре 80 К. Определены зависимости концентрации электронов и времени жизни носителей заряда в пикселях от напряжения смещения в широком диапазоне воздействия фонового излучения. В фоторезисторах с размером пикселя  $0,05 \times 0,05$  мм может быть реализован неравновесный режим работы с эксклюзией неосновных носителей заряда. Концентрация электронов в таком режиме снижается до величины  $1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Фоторезисторы из эпитаксиальных структур  $n$  —  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  ( $x \approx 0,305$ ) в режиме эксклюзии при 80 К имеют вольтовую чувствительность порядка  $10^7 \text{ В/Вт}$  и удельную обнаружительную способность около  $1,3 \times 10^{12} \text{ смГц}^{1/2}/\text{Вт}$ .

**Ключевые слова:** гетероэпитаксиальные структуры кадмий-ртуть-теллур, фоторезистор, эксклюзия носителей заряда.

**Коды OCIS:** 230.5160, 040.3060, 160.6840.

## ВВЕДЕНИЕ

Фоторезисторы и фотодиоды из КРТ  $x = 0,3$  для диапазона спектра 3–5 мкм имеют более широкий рабочий интервал температур, чем фоторезисторы и фотодиоды из антимонида индия. Фоторезисторы в спектральном диапазоне 8–12 мкм из гетероэпитаксиальных структур  $n$  —  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  (КРТ), полученных молекуллярно-лучевой эпитаксией (ГЭС КРТ МЛЭ), имеют фотоэлектрические параметры, ограниченные фоновым излучением [1]. В таких фоторезисторах с индивидуальными контактами и варизонными слоями на поверхности фоточувствительных площадок размерами не более  $50 \times 50$  мкм, выделенных химическим травлением, неравновесный режим

работы эксклюзии неосновных носителей заряда реализуется при температуре жидкого азота. При этом концентрация основных носителей заряда снижается до величины, близкой к собственной концентрации носителей заряда, а вольтовая чувствительность может достигнуть уровня  $10^7 \text{ В/Вт}$  [2, 3]. КРТ  $x \approx 0,3$  для спектрального диапазона 3–5 мкм имеет величину собственной концентрации носителей заряда (порядка  $10^8 \text{ см}^{-3}$  при 77 К) на пять порядков ниже по сравнению с КРТ  $x \approx 0,2$  для спектрального диапазона 8–12 мкм (порядка  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  при 77 К). Исследование неравновесного режима работы фоторезисторов из КРТ в спектральном диапазоне 3–5 мкм представляет научный и практический интерес.

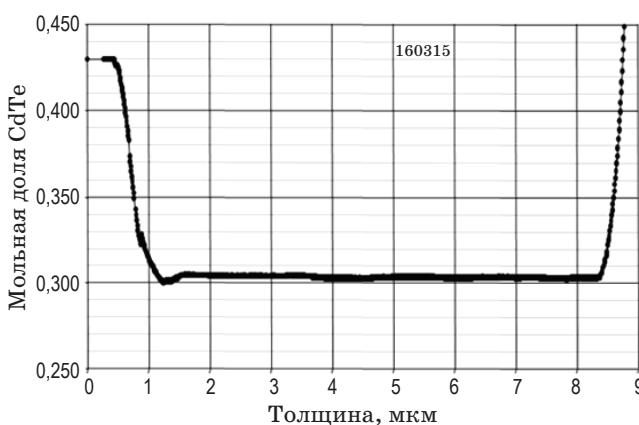
## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы было исследование параметров фоточувствительных элементов фоторезисторов из ГЭС КРТ МЛЭ в спектральном диапазоне 3–5 мкм ( $x \approx 0,3$ ), работающих в неравновесном режиме с эксклюзией неосновных носителей заряда.

Фоточувствительные элементы фоторезисторов (ФЧЭ) изготавливались из ГЭС КРТ МЛЭ, полученных в Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН) молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках из GaAs [4]. В табл. 1 приведены фотоэлектрические параметры ГЭС КРТ МЛЭ при 77 К, которые использовались для изготовления ФЧЭ. Концентрация основных носителей заряда в материале определена по эффекту Холла. Величина времени фотоответа измерена при апертуре в несколько градусов. На рис. 1 приведено стандартное распределение состава слоёв КРТ по толщине, измеренное эллипсометром в процессе их роста, начиная от буферного слоя теллурида кадмия толщиной 5,3 мкм.

Размер фоточувствительной площадки ФЧЭ составлял  $0,05 \times 0,05$  и  $0,5 \times 0,5$  мм. При изго-

товлении ФЧЭ фоторезисторов ( $0,05 \times 0,05$ ) ионная обработка не использовалась на всех стадиях технологического процесса. Для разделения ФЧЭ на элементы использовалось химическое пульверизационное травление. Контакты создавались на фронтальной поверхности варизонного слоя или к слою постоянного состава КРТ электрохимическим осаждением индия. В последнем случае варизонный слой под контактами предварительно удалялся пульверизационным травлением. Глубина травления контролировалась профилометром с субмикронной точностью. При изготовлении ФЧЭ фоторезисторов ( $0,5 \times 0,5$ ) при обработке подконтактных областей и выделении ФЧЭ использовалось низкоэнергетическое (около 1 кэВ) ионное травление [1]. Вольтамперные характеристики (ВАХ) ФЧЭ на переменном токе исследовались при различных фоновых потоках. Пороговые характеристики измерялись на стандартной установке чёрного тела с ламповым предусилителем. Входной импеданс измерительного тракта на частоте 1200 Гц – 160 кОм, шумовая полоса – 180 Гц. Поток фонового излучения изменялся сменой охлаждаемых диафрагм в зоне фоточувствительного элемента, охлаждаемого жидким азотом. Измерения выполнялись при комнатной температуре окружающей среды. Для измерения эффективного времени жизни носителей в ФЧЭ фоторезисторов на длине волны 0,9 мкм использовался светодиод из арсенида галлия, время спада импульса излучения было не более 100 нс. Эффективное время жизни неосновных носителей определялось по спаду амплитуды сигнала ФЧЭ в 2,72 раза.



**Рис. 1.** Распределение состава слоёв КРТ по толщине, измеренное эллипсометром в процессе их роста (рисунок предоставлен Н.Н. Михайловым ИФП СО РАН).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### Вольтамперные характеристики

Вольтамперные характеристики для ФЧЭ с размером фоточувствительных площадок  $0,5 \times 0,5$  мм при комнатной температуре и тем-

**Таблица 1. Фотоэлектрические параметры ГЭС КРТ МЛЭ электронного типа проводимости**

Мольная доля CdTe, $x$	Концентрация основных носителей заряда, $\text{см}^{-3}$	Подвижность основных носителей заряда, $\text{см}^2/\text{Вс}$	Время фотоответа, мкс	Толщина эпитаксиального слоя $d$ , мкм
$0,301\text{--}0,303$	$2,6 \times 10^{14}$	$2,9 \times 10^4$	6 – 14	9,8
$0,303\text{--}0,306$	$2,9 \times 10^{14}$	$1,3 \times 10^4$	2 – 4	6,2

пературе жидкого азота имели линейный вид. Вольтамперные характеристики для ФЧЭ с размером фоточувствительных площадок  $0,05 \times 0,05$  мм при комнатной температуре приведены на рис. 2, при температуре жидкого азота ВАХ практически линейны в диапазоне  $-2\text{--}+2$  В. Типичные величины темнового сопротивления ФЧЭ с размером фоточувствительных площадок  $0,5 \times 0,5$  и  $0,05 \times 0,05$  мм в зависимости от апертуры при температуре жидкого азота и напряжении 1,0 В приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, электропроводности фоточувствительных площадок  $0,5 \times 0,5$  и  $0,05 \times 0,05$  мм существенно отличаются, а для фоточувствительных площадок  $0,05 \times 0,05$  мм зависимость темнового сопротивления от фонового излучения практически отсутствует. На ВАХ ФЧЭ с варизонным слоем под индивидуальными контактами и без него принципиальных отличий не было обнаружено.

Аналогичные нелинейные ВАХ, полученные для составов ГЭС КРТ МЛЭ  $x \approx 0,3$  при комнатной температуре (рис. 2), наблюдались нами ранее для составов  $x \approx 0,21$  при температуре жидкого азота [2] и объяснялись эксклюзией неосновных фоновых носителей заряда при включении навстречу друг другу двух изотипных  $n^+-n$  переходов ФЧЭ. Поток фонового излучения в спектральном диапазоне 3–5 мкм комнатной температуры (порядка  $1 \times 10^{16}$  фотонов/ $\text{см}^2\text{с}$ ) значительно меньше, чем для спектрального диапазона 8–12 мкм (порядка  $1 \times 10^{18}$  фотонов/ $\text{см}^2\text{с}$ ). Поэтому для ФЧЭ

с фоточувствительными площадками  $0,05 \times 0,05$  мм из ГЭС КРТ МЛЭ  $x \approx 0,3$  при температуре жидкого азота в неравновесном режиме эксклюзии неосновные фоновые носители заряда полностью удалены, что проявляется в отсутствии фоновой зависимости темнового сопротивления в исследуемом диапазоне ВАХ.

Индий является донором, сильно взаимодействующим с КРТ металлом. Контакт электрохимически осаждённого индия к варизонному слою ФЧЭ обеспечивает неравновесные условия эксклюзии, также как непосредственно к КРТ постоянного состава.

### Эффективное время жизни носителей заряда ФЧЭ

Эффективное время жизни носителей в отсутствие пролёта носителей определяется следующим выражением [5]

$$1/\tau = 1/\tau_v + 2S_1/d + 2S_2/a, \quad (1)$$

где  $\tau_v$  — время жизни носителей в объёме полупроводника,  $S_1$  — скорость поверхностной рекомбинации носителей на нижней и верхней поверхности и  $S_2$  — скорость поверхностной рекомбинации на боковых гранях ФЧЭ. В условиях пролёта носителей заряда

$$\tau = L^2/(\mu_a U), \quad (2)$$

где  $\mu_a$  — амбиполярная дрейфовая подвижность.

Экспериментальные результаты и зависимости эффективного времени жизни носителей заряда от напряжения смещения ( $\tau = f(U)$ ), полученные в результате расчёта в соответствии с выражениями (1, 2), приведены на рис. 3 и 4. Расчёт проводился при  $S_1 = 0$ , так как на нижней и верхней поверхности площадки ФЧЭ расположены варизонные слои (рис. 1).

Зависимости эффективного времени фотопротивления от напряжения смещения для ФЧЭ с размером площадки  $0,5 \times 0,5$  мм имели классический вид с амбиполярной подвижностью, близкой к дрейфовой подвижности дырок. Типичная экспериментальная зависимость эффективного времени жизни носителей заряда от напряжения смещения при апертуре  $39^\circ$  приведена на рис. 3. Хорошее соответствие экспериментальным результатам получено при  $\tau_v = 5,2$  мкс,  $\mu_a = 750 \text{ см}^2/\text{Вс}$ ,  $S_2 = 200 \text{ см}/\text{с}$  (кривая 1, рис. 3).

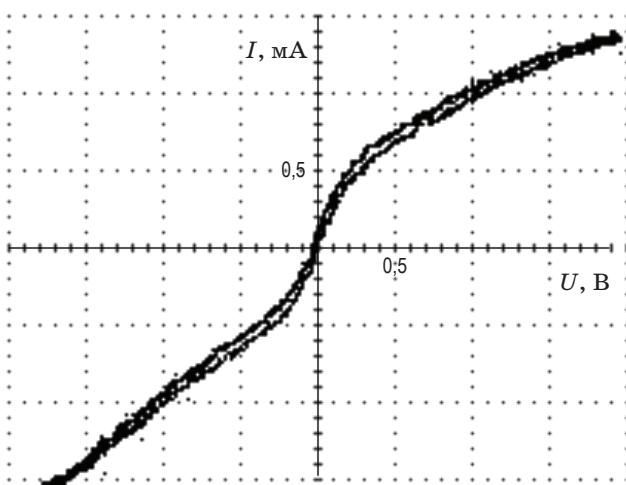
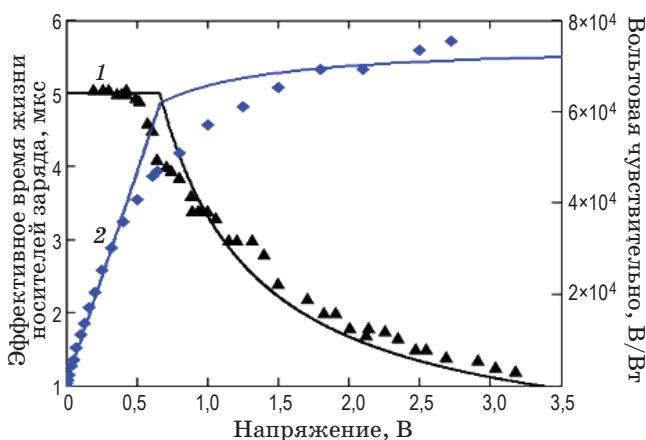
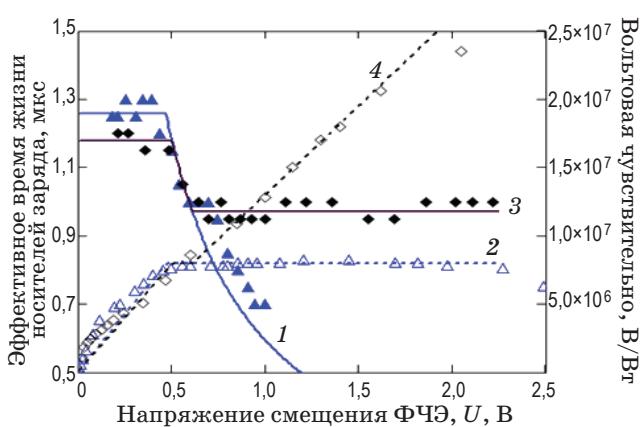


Рис. 2. ВАХ ФЧЭ при комнатной температуре. Размер фоточувствительной площадки  $-0,05 \times 0,05$  мм.



**Рис. 3.** Зависимость эффективного времени жизни носителей заряда (1) и вольтовой чувствительности (2) от напряжения смещения для ФЧЭ с размером площадки  $0,5 \times 0,5$  мм при апертуре  $39^\circ$ .



**Рис. 4.** Зависимость эффективного времени жизни носителей заряда (1, 3) и вольтовой чувствительности (2, 4) от напряжения смещения для ФЧЭ с размером площадки  $0,05 \times 0,05$  мм при апертуре  $42^\circ$  с варионным слоем под контактами (1, 2) и без варионного слоя (3, 4).

Типичные зависимости эффективного времени жизни носителей заряда от напряжения смещения для ФЧЭ с размером площадки  $0,05 \times 0,05$  мм при апертуре  $42^\circ$  приведены на рис. 4. Зависимости эффективного времени фотоответа от напряжения смещения для ФЧЭ с размером площадки  $0,05 \times 0,05$  мм как с варионным слоем под индивидуальными контактами, так и без него, также имели классический вид, но с амбиполярной подвижностью, существенно меньшей дрейфовой подвижности дырок (кривая 1, рис. 4), при напряжениях смещения  $0,2$ – $0,6$  В выходили (кривая 3, рис. 4) на постоянную величину ( $\tau_c$ ). Для экс-

периментальных результатов, приведенных на рис. 4, хорошее соответствие расчетам получено при  $\tau_v = 1,4$  мкс,  $\mu_a = 42$  см $^2$ /Вс,  $S_2 = 200$  см/с. Подобные зависимости эффективного времени жизни носителей заряда от напряжения смещения наблюдались нами на фоторезисторах из ГЭС КРТ МЛЭ ( $x \approx 0,212$ ) для спектрального диапазона  $8$ – $12$  мкм с радиальным смещением [3] при расстоянии между контактами около 14 мкм.

Зависимость амбиполярной подвижности носителей заряда от концентрации основных носителей заряда  $n$  даётся известным выражением, полученным при решении уравнения непрерывности [6], которую в нашем случае ( $\mu_n \gg \mu_p$ ) можно записать в виде

$$\mu_a = \frac{n - n_i^2/n}{n/\mu_p}, \quad (3)$$

где  $n_i$  — собственная концентрация носителей заряда при данной температуре,  $\mu_n$  и  $\mu_p$  — дрейфовые подвижности электронов и дырок соответственно. Произведение концентраций электронов и дырок для неравновесного состояния отличается от его значения для равновесного состояния.

В зоне растянутого  $n^+ - n$  перехода, образованного индивидуальным контактом к слою постоянного состава или варионному слою ГЭС КРТ МЛЭ, возникает расщепление уровня Ферми и смещение квазиуровней под действием внешнего электрического поля. Произведение концентраций электронов и дырок в таком ФЧЭ в режиме экспозиции неосновных носителей отличается от его равновесных значений. Такое отклонение системы от состояния термодинамического равновесия описывается следующим соотношением [6]:

$$np / n_0 p_0 = np / n_i^2 = e^{(\eta_n - \eta_p)}, \quad (4)$$

где  $n_0, p_0$  — концентрация равновесных электронов и дырок;  $\eta_n, \eta_p$  — квазиуровни Ферми электронов и дырок. Чем сильнее различаются квазиуровни Ферми электронов и дырок, тем сильнее отличается произведение концентраций неравновесных носителей заряда от произведения равновесных концентраций.

### Вольтовая чувствительность

Расчет вольтовой чувствительности для классического фоторезистора ( $0,5 \times 0,5$  мм) осу-

ществлялся в соответствии со следующим выражением [7]:

$$Su_{\lambda \max} = \frac{R_T R_L}{(R_T + R_L)^2} \frac{\eta U \tau}{h v (n + p_F) L a d}, \quad (5)$$

где  $\eta$  — квантовая эффективность в отсутствии просветляющего покрытия на ФЧЭ принятая равной 0,7;  $U$  — напряжение смещения на ФЧЭ;  $\tau$  — эффективное время жизни носителей;  $h v$  — средняя энергия падающего кванта  $4 \times 10^{-20}$  Дж;  $n$  — концентрация основных носителей заряда;  $p_F$  — концентрация носителей заряда, генерируемых фоновым излучением;  $L, a, d$  — длина, ширина и толщина ФЧЭ;  $R_T$  — темновое сопротивление;  $R_L$  — сопротивление нагрузки.

Концентрация носителей заряда, генерируемых фоновым излучением [7],

$$p_F = \eta \Phi \tau \sin \beta / d, \quad (6)$$

где  $\Phi$  — фоновый поток носителей в диапазоне спектра 0,5–5 мкм для температуры фона 300 К, принятый равным приблизительно  $1 \times 10^{16}$  фотонов/см<sup>2</sup>с;  $\beta$  — телесный угол зрения.

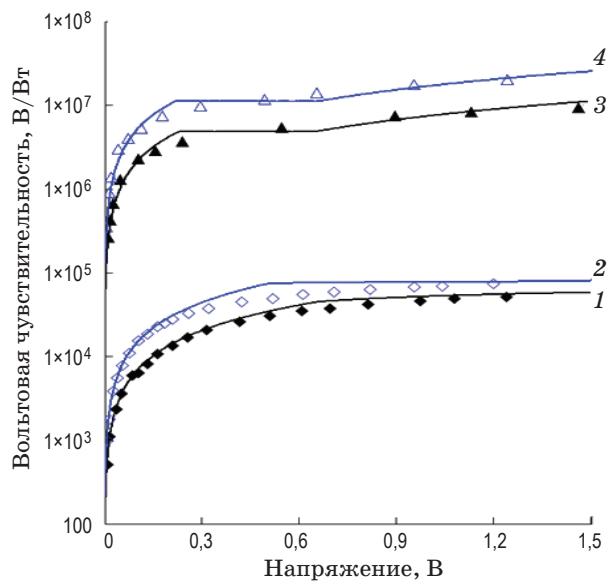
Расчёт вольтовой чувствительности для ФЧЭ с размерами фоточувствительных площадок  $0,05 \times 0,05$  мм, на ВАХ которых не сказывалось влияние фонового потока излучения, осуществлялся в соответствии с выражением:

$$Su_{\lambda \max} = \frac{R_T R_L}{(R_T + R_L)^2} \frac{\eta U \tau}{h v n L a d}. \quad (7)$$

Экспериментальные и расчётные зависимости вольтовой чувствительности ( $Su_{\lambda \max}$ ) от напряжения смещения, на ФЧЭ которых были измерены зависимости  $\tau = f(U)$ , представлены там же на рис. 3 и 4. Расчёт зависимости  $Su_{\lambda \max}$  от напряжения смещения в соответствии с (1), (2), (5), (6) для ФЧЭ с размером фоточувствительной площадки  $0,5 \times 0,5$  мм дал хорошее соответствие экспериментальным результатам при концентрации основных носителей заряда, равной  $1,3 \times 10^{14}$  см<sup>-3</sup> (кривая 2 на рис. 3). Для ФЧЭ с размером фоточувствительных площадок  $0,05 \times 0,05$  мм расчёт  $Su_{\lambda \max}$  от напряжения смещения в соответствии с (1), (2), (7) дал хорошее соответствие экспериментальным результатам при концентрации ос-

новных носителей заряда, равной  $1,0 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup> (кривые 2, 4 на рис. 4).

Зависимости  $Su_{\lambda \max}$  от напряжения смещения при апертуре  $180^\circ$  и  $14^\circ$  для других ФЧЭ приведены на рис. 5. Для ФЧЭ с  $A = 0,5 \times 0,5$  мм расчётные значения хорошо совпадают с измеренными при  $n = 1,2 \times 10^{14}$  см<sup>-3</sup>,  $\mu_a = 750$  см<sup>2</sup>/Вс,  $S_2 = 200$  см/с  $\tau_v = 5,3$  мкс с апертурой  $180^\circ$  и  $\tau_v = 7$  мкс при апертуре  $14^\circ$ . Для ФЧЭ с  $A = 0,05 \times 0,05$  мм соответствие расчётных измеренным значениям  $Su_{\lambda \max}$  получено при  $n = 1,3 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $\mu_a = 35$  см<sup>2</sup>/Вс,  $S_2 = 200$  см/с,  $\tau_v = 4,2$  мкс,  $\tau_c = 1,1$  мкс при апертуре  $180^\circ$  и  $\mu_a = 15$  см<sup>2</sup>/Вс,  $\tau_v = 14$  мкс,  $\tau_c = 2,5$  мкс при апертуре  $14^\circ$ . Как видно из рис. 5, экспериментальные величины вольтовой чувствительности ФЧЭ хорошо ложатся на зависимости  $S_{\lambda \max}(U)$ , полученные в соответствии с полуэмпирическими выражениями (1), (2), (5–7). Результаты расчётов показывают, что концентрация основных носителей заряда в ФЧЭ с размером фоточувствительной площадки  $0,5 \times 0,5$  мм близка к её значению для равновесного состояния (табл. 1). В то время как для ФЧЭ с фоточувствительной площадкой  $A = 0,05 \times 0,05$  мм концентрация основных носителей заряда более чем на порядок ниже её значения для равновесного состояния.



**Рис. 5.** Зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения при апертуре  $180^\circ$  — кривая 1 ( $A = 0,5 \times 0,5$  мм), кривая 3 ( $A = 0,05 \times 0,05$  мм) и  $14^\circ$  — кривая 2 ( $A = 0,5 \times 0,5$  мм), кривая 4 ( $A = 0,05 \times 0,05$  мм).

Таким образом, на зависимостях  $S_{U_{\lambda_{\max}}}$  от напряжения смещения для всех ФЧЭ наблюдаются участки насыщения вольтовой чувствительности, что связано с пролётом носителей между контактами. Линейный рост сигнала с увеличением напряжения смещения для ФЧЭ с фоточувствительной площадкой  $A = 0,05 \times 0,05$  мм обусловлен отсутствием пролёта носителей между контактами вследствие отсутствия зависимости постоянной времени от напряжения смещения. Для ФЧЭ с фоточувствительной площадкой  $A = 0,05 \times 0,05$  мм величина амбиполярной подвижности существенно ниже дрейфовой подвижности дырок. Амбиполярная подвижность  $\mu_a = 40 \text{ см}^2/\text{Вс}$  возможна при  $n = 1,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и дрейфовой подвижности дырок  $\mu_p = 530 \text{ см}^2/\text{Вс}$  в соответствии с выражением (3), а собственная неравновесная концентрация носителей заряда должна быть равной  $1,25 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Расчёты показывают, что при  $n = 1,259 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$  амбиполярная подвижность носителей составит  $7,55 \text{ см}^2/\text{Вс}$ , что приведёт к отсутствию зависимости эффективного времени жизни от напряжения смещения (2) до напряжения 2,64 В. Незначительное уменьшение концентрации носителей заряда с увеличением напряжения смещения может быть связано с увеличением области эксклюзии носителей заряда на большую длину фоточувствительной площадки. Отметим, что незначительное изменение состава по пластине эпитаксиальной структуры, из которой изготовлены ФЧЭ, может приводить к изменению ширины запрещённой зоны и собственной концентрации носителей заряда в неравновесных условиях и, следовательно, также к изменению величины амбиполярной подвижности (3). Считая, что собственная концентрация основных носителей заряда в неравновесных условиях работы ФЧЭ с фоточувствительной площадкой  $A = 0,05 \times 0,05$  составляет величину около  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ , а  $n_i \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$ . В этих условиях расстояние между квазиуровнями Ферми электронов и дырок в соответствии с (4) составит приблизительно 0,15 эВ при ширине запрещённой зоны, равной 0,251 эВ для  $x = 0,305$ .

Оценка дрейфовой подвижности электронов в неравновесном режиме работы ФЧЭ, исходя из величины темнового сопротивления ФЧЭ (табл. 2,  $A = 0,05 \times 0,05$  мм) и полученной концентрации основных носителей заряда

**Таблица 2. Темновое сопротивление ФЧЭ в зависимости от плоского угла зрения при температуре жидкого азота**

Размер площадки, мм	0,5×0,5			0,05×0,05		
Плоский угол зрения, град	180	39	14	180	42	14
$R_T$ , Ом	293	322	338	1531	1531	1445

$n = 1,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , даёт величину  $3,2 \times 10^5 \text{ см}^2/\text{Вс}$ , что намного больше измеренных значений в эпитаксиальных структурах (табл. 1). В твёрдых растворах КРТ  $x \approx 0,3$  величина эффективной массы электрона вблизи дна зоны проводимости в точке Г зоны Брюллюэна при  $T = 77 \text{ К}$  очень мала ( $0,015m_0$ ) [8]. Поэтому при низкой концентрации основных носителей заряда в неравновесных условиях работы таких ФЧЭ возможно значительное увеличение дрейфовой подвижности электронов.

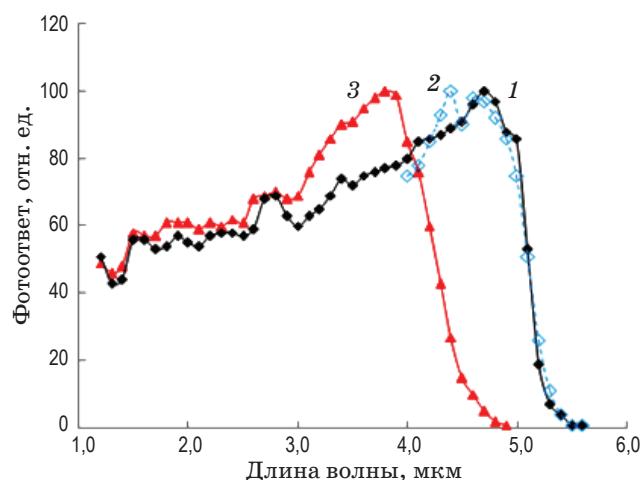
### Спектральная характеристика чувствительности и обнаружительная способность

Спектральные характеристики чувствительности ФЧЭ при комнатной температуре и при температуре жидкого азота приведены на рис. 6. Длина волны максимальной чувствительности  $\lambda_{\max}$  лежит в диапазоне 4,5–5,0 мкм. Длинноволновая граница чувствительности по уровню 0,5  $\lambda_{co}$  составляет около 5,1 мкм. Зависимость удельной обнаружительной способности фоторезисторов от плоского угла зрения (мощности потока фонового излучения комнатной температуры) при температуре жидкого азота [9]:

$$D_{\lambda_{\max}}^* = D_{\lambda_{\max}}^*(\beta = 90^\circ) / \sin \beta, \quad (10)$$

где  $D_{\lambda_{\max}}^*(\beta = 90^\circ)$  — обнаружительная способность при апертуре 180°. Для фоторезисторов с максимумом чувствительности в диапазоне 4,5–5,0 мкм  $D_{\lambda_{\max}}^*(\beta = 90^\circ)$  составляет  $(1,4\text{--}2,0) \times 10^{11} \text{ смГц}^{1/2}/\text{Вт}$  [9].

Измеренные значения удельной обнаружительной способности, приведённые к плоскости фоточувствительной площадки, при апертуре 180° составили  $D_{\lambda_{\max}}^*(1200,1) = (1,39\text{--}1,47) \times 10^{11}$ , при апертуре 42° —  $(5,73\text{--}6,05) \times 10^{11}$  и при апертуре 14° —



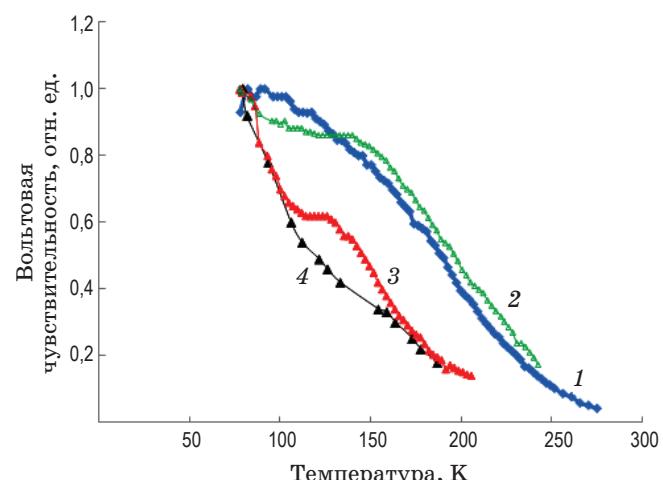
**Рис. 6.** Спектральные характеристики чувствительности при температуре жидкого азота для ФЧЭ с  $A = 0,5 \times 0,5$  мм (1),  $A = 0,05 \times 0,05$  мм (2) и при комнатной температуре  $A = 0,5 \times 0,5$  мм (3).

$(1,10-1,31) \times 10^{12}$  см Гц $^{1/2}$ /Вт, что соответствуют расчётным величинам в соответствии с выражением (10).

### Зависимость вольтовой чувствительности от температуры

Зависимость вольтовой чувствительности от температуры для ФЧЭ с площадкой  $0,5 \times 0,5$  мм и с площадкой  $0,05 \times 0,05$  мм при напряжении смещения 0,25 В, 1,6 В и 3,5 В и апертуре  $42^\circ$  приведены на рис. 7. Для ФЧЭ с размером фоточувствительной площадки  $0,05 \times 0,05$  мм с увеличением напряжения смещения наблюдается перемещение участка спада вольтовой чувствительности в область более низких температур по сравнению с ФЧЭ с размером фоточувствительной площадки  $0,5 \times 0,5$  мм.

Работа ФЧЭ в неравновесных условиях сопровождается уменьшением эффективного времени жизни носителей заряда с увеличением рабочего напряжения смещения (рис. 4) и значительным снижением концентрации основных носителей заряда. Повышение температуры ФЧЭ приводит к генерации экспоненциально электронов в зону проводимости, к росту амбиполярной подвижности и падению вольтовой чувствительности. Переход материала ФЧЭ из примесной области проводимости в собственную область с увеличением напряжения смещения происходит при более низкой температуре (рис. 7).



**Рис. 7.** Зависимость вольтовой чувствительности от температуры для ФЧЭ с площадкой  $0,5 \times 0,5$  мм (1) и с площадкой  $0,05 \times 0,05$  мм при напряжении смещения 0,25 В (2), 1,6 В (3) и 3,5 В (4).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование при изготовлении малоразмерных фоторезисторов на основе ГЭС КРТ МЛЭ в спектральном диапазоне 3–5 и 8–14 мкм химического травления и индия в качестве контактов позволяет реализовать в таких фоторезисторах режим эксклюзии неосновных носителей. В неравновесных условиях режима эксклюзии неосновных носителей происходит падение не только концентрации неосновных носителей заряда, генерируемых фоновым излучением, но также концентрации основных носителей, вследствие чего уменьшается амбиполярная дрейфовая подвижность, что приводит к повышению порога эффекта пролёта носителей под действием электрического поля смещения. В итоге, вольтоваая чувствительность достигает уровня  $10^7$  В/Вт. Поток фонового излучения в спектральном диапазоне 3–5 мкм комнатной температуры значительно меньше, чем для спектрального диапазона 8–14 мкм, поэтому для ГЭС КРТ МЛЭ  $x \approx 0,3$  при температуре жидкого азота эксклюзия неосновных фоновых носителей заряда проявляется в отсутствии фоновой зависимости темнового сопротивления. Низкая неравновесная концентрация основных носителей заряда в ФЧЭ снижает температуру перехода материала из примесной области проводимости в собственную область.

Авторы выражают признательность со-трудникам ИФП СО РАН Дворецкому С.А., Сидорову Ю.Г., Михайлову Н.Н. и Варави-

ну В.С. за создание и исследования эпитак-сиальных структур  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  для фотопризисторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Filatov A.V., Susov E.V., Kuznetsov N.S., Karpov V.V.* Photoresistors of the 2–15  $\mu\text{m}$  spectral range based on  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  heteroepitaxial structures obtained by molecular-beam epitaxy // *J. of Optical Technology*. 2016. V. 83. No. 9. P. 543–548.
2. *Filatov A.V., Susov E.V., Karpov V.V.* Photoresistors with charge-carrier exclusion for the 8–16  $\mu\text{m}$  spectral range, made from  $n - \text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  heteroepitaxial structures // *J. of Optical Technology*. 2018. V. 85. No. 6. P. 359–366.
3. *Gusarov A.V., Filatov A.V., Susov E.V., Karpov V.V., Gindin P.D.* Radially biased photoresistors with heteroepitaxial  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  structure // *J. of Optical Technology*. 2019. V. 86. No. 2. P. 108–113.
4. *Varavin V.S., Dvoretsky S.A., Liberman V.I., Mikhailov N.N., Sidorov Yu.G.* Molecular beam epitaxy of high quality  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  films with control of the composition distribution // *J. Cryst. Growth*. 1996. V. 159. P. 1161.
5. *Siliquini J.F., Fynn K.A., Nener B.D., Faraone L., Hartley R.H.* Improved device technology for epitaxial  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  infrared photoconductor arrays // *Semicond. Sci. Technol.* 1994. V. 9. P. 1515–1522.
6. Шалимова К.В. Физика полупроводников. СПб.: Лань, 2010. 400 с.
7. Kinch M.A., Borrello S.R., Simmons A. 0.1 eV HgCdTe photoconductive detector performance // *Infrared Phys.* 1977. V. 17. № 2. P. 127–135.
8. Пономаренко В.П. Квантовая фотосенсорика. М.: АО «НПО «ОРИОН», 2018. 648 с.
9. Шоль Ж., Марфан И., Мюнш Н., Торель П., Комбет П. Приёмники инфракрасного излучения. Пер. с франц. / Под ред. Курбатова Л.Н. М.: Мир, 1969. 270 с.