

УДК 621.383.45: 621.793.09

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-06-58-66

Фоторезисторы с эксклюзией носителей заряда для спектрального диапазона 8–16 мкм из гетероэпитаксиальных структур $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

© 2018 г. **А. В. Филатов, канд. техн. наук; Е. В. Сусов, канд. техн. наук;**
В. В. Карпов, канд. физ.-мат. наук

АО «Московский завод «САПФИР», Москва

E-mail: info@mzsapfir.ru

Поступила в редакцию 13.02.2018

В условиях неравновесного режима эксклюзии неосновных носителей заряда исследована в широком диапазоне фонового излучения работа фоторезисторов из гетероэпитаксиальных структур $n\text{-Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x = 0,187\text{--}0,215$) постоянного состава с варизонными слоями, полученными молекулярно-лучевой эпитаксией. В пикселе размером 50×50 мкм фоторезистора определены зависимости концентрации электронов и времени жизни носителей заряда от напряжения смещения при температуре жидкого азота. Установлено, что концентрация электронов в режиме эксклюзии снижается до величины, близкой к собственной концентрации носителей заряда. Для фоторезисторов из структур $x = 0,203$ в режиме эксклюзии получены вольтовая чувствительность более $2,4 \times 10^7$ В/Вт и удельная обнаружительная способность $5,3 \times 10^{11}$ смГц^{1/2}/Вт при 77 К и плоском угле зрения 14°. Показано, что для создания высокоэффективных быстродействующих фоторезисторов на диапазон спектра 16–17 мкм, охлаждаемых не ниже температуры жидкого азота, перспективно использовать режим эксклюзии неосновных носителей заряда.

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

Коды OCIS: 230.5160, 040.3060, 160.6840.

ВВЕДЕНИЕ

Первая работа [1] по эффекту эксклюзии в фоторезисторах из материала кадмий-ртуть-теллур (КРТ) была опубликована в 1985 г. Эти исследования были развиты для фоторезисторов с изотипными ($n^+ - n$) слоями (переходами) под контактами [2, 3]. Работа инфракрасных фотодетекторов в неравновесных условиях изучена в работе [4]. Фотоприёмники с обеднением зоны фотопроводимости в магнитном поле исследованы в работе [5]. В работе [6] было показано теоретически, что для фоторезистора с рабочей температурой 180 К и $\lambda_{\text{max}} = 12$ мкм при эксклюзии неосновных носителей заряда достигается VLIP режим (Background Limited Infrared Photodetector), если концентрации электрически активных фоновых примесей менее 5×10^{13} см⁻³, что существенно превышает технологические возможности при изготовлении КРТ для фоторезисторов (приблизительно 3×10^{14} см⁻³).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы было исследование параметров фоточувствительных элементов фоторезисторов в режиме эксклюзии неосновных носителей заряда.

Фоточувствительные элементы (ФЧЭ) фоторезисторов изготавливались из гетероэпитаксиальных структур КРТ постоянного состава с градиентом состава в тонком (0,3–0,4 мкм) верхнем варизонном слое $\Delta x/\text{мкм} \approx 0,55$, полученных в Институте физики полупроводников Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН) с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (ГЭС КРТ МЛЭ) [7]. В таблице приведены основные фотоэлектрические параметры использованного в данной работе материала КРТ. Концентрация основных носителей заряда в материале электронного типа проводимости, определенная по эффекту Холла, принята соответствующей уровню электрически активных фоновых примесей ($N_D - N_A$) при температуре 77 К. Размер фоточувствительной площадки ФЧЭ

Основные фотоэлектрические параметры ГЭС КРТ МЛЭ электронного типа проводимости при 77 К

№ п/п	Мольная доля CdTe, x	Концентрация основных носителей заряда ($N_D - N_A$), см^{-3}	Подвижность основных носителей заряда μ_n , $\text{см}^2/\text{Вс}$	Время фотоответа при $2\beta \approx 0^\circ$, мкс	Толщина эпитаксиального слоя d , мкм
1	0,212	$3,2 \times 10^{14}$	$0,97 \times 10^5$	2,3–3,9	9,2
2	0,213	$4,1 \times 10^{14}$	$0,86 \times 10^5$	1,0–1,3	8,4
3	0,215	$4,3 \times 10^{14}$	$0,83 \times 10^5$	2,2	8,7
4	0,215	$2,0 \times 10^{14}$	$0,80 \times 10^5$	5,4	9,25
5	0,187	$5,7 \times 10^{14}$	$2,15 \times 10^5$	0,21	10,1
6	0,203	$3,4 \times 10^{14}$	$0,51 \times 10^5$	7,0–7,7	7,6

составлял 50×50 мкм. Стандартная технология изготовления ФЧЭ фоторезисторов без эсклюзии носителей заряда, включающая разделение ионным травлением фоточувствительных площадок и электролитическое осаждение индиевых контактов на поверхность слоя КРТ постоянного состава, обработанную ионами аргона, приведена в работах [8, 9]. При изготовлении ФЧЭ фоторезисторов с эсклюзией носителей заряда ионная обработка не использовалась на всех стадиях технологического процесса. Для разделения ФЧЭ на элементы использовалось химическое травление КРТ в растворе на основе брома и бромистоводородной кислоты. Контакты создавались на фронтальной поверхности варизонного слоя или к слою постоянного состава электрохимическим осаждением индия.

Параметры ФЧЭ при различных фоновых потоках исследовались с помощью вольтамперных характеристик (ВАХ) на переменном токе, а также с помощью измерений зависимостей от напряжения смещения вольтовой чувствительности, шумов, удельной обнаружительной способности в максимуме спектральной характеристики и эффективного времени жизни носителей. Поток фонового излучения изменялся сменой охлаждаемых диафрагм в зоне фоточувствительного элемента, охлаждаемого жидким азотом. Измерения выполнялись при комнатной температуре окружающей среды.

Величина темнового сопротивления при различных значениях напряжения смещения и зависимость $R_m(U)$ определялась из ВАХ при аппроксимации её полиномом пятого порядка. Зависимость концентрации основных носителей заряда от напряжения смещения определялась в соответствии с выражением

$$n(U) = 1 / (ed\mu_n R(U)), \quad (1)$$

где d — толщина ФЧЭ, μ_n — подвижность основных носителей заряда.

Зависимость вольтовой чувствительности от напряжения смещения в отсутствие эсклюзии носителей заряда при сопротивлении нагрузки,

намного превышающем темновое сопротивление фоторезистора, описывается выражением [10]

$$Su = \frac{\eta U \tau}{h\nu(n + p_F)Lad}, \quad (2)$$

где η — квантовая эффективность в отсутствие просветляющего покрытия на ФЧЭ принята равной 0,7–0,75; U — напряжение смещения, прикладываемое к ФЧЭ; τ — эффективное время жизни носителей; $h\nu$ — средняя энергия падающего кванта 2×10^{-20} Дж; n — концентрация основных носителей заряда в ФЧЭ; p_F — концентрация носителей заряда, генерируемых в ФЧЭ фоновым излучением; L, a, d — длина, ширина и толщина ФЧЭ соответственно. Эффективное время жизни носителей в отсутствие пролёта носителей определялось с учётом времени поверхностной рекомбинации из соотношения

$$1/\tau = 1/\tau_v + 2S_1/d + 2S_2/a, \quad (3)$$

где τ_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 для материала КРТ электронного типа проводимости при $\mu_n \gg \mu_p$, ($\mu_a \approx \mu_p$)

$$\tau = L^2 / (\mu_p U), \quad (4)$$

где μ_p — дрейфовая подвижность дырок, μ_a — амбиполярная дрейфовая подвижность.

При расчёте зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения для ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ с варизонными слоями на нижней и верхней сторонах принималась $S_1 = 0$. Концентрация носителей заряда, генерируемых в ФЧЭ фоновым излучением [10]

$$p_F = \eta \Phi \tau / d, \quad (5)$$

где Φ — фоновый поток носителей в диапазоне спектра 2–14 мкм для температуры фона 300 К, равный 1×10^{18} фотонов/см²с.

В режиме эксклюзии неосновных носителей заряда вольтовая чувствительность ФЧЭ определяется из соотношения

$$Su = \frac{\eta U \tau(U)}{h \nu n(U) L a d}. \quad (6)$$

В режиме пролёта носителей небольшие изменения скорости поверхностной рекомбинации и времени жизни носителей заряда в объёме полупроводника не влияют на точность определения концентрации основных носителей заряда из зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения, так как вольтовая чувствительность, в этом случае, определяется концентрацией основных носителей заряда и амбиполярной подвижностью (подвижностью дырок).

Для измерения эффективного времени жизни носителей ФЧЭ фоторезисторов на длине волны 10,6 мкм использовался импульсно-периодический СО₂-лазер модели «ИЛ-100». Длительность импульса излучения была 75 нс по уровню 0,5 с энергией в импульсе $(1,5-2,1) \times 10^{-6}$ Дж/см² (менее 0,02 Вт/см²). Эффективное время жизни неосновных носителей определялось по спаду амплитуды сигнала в 2,72 раза. Из сравнения экспериментальных данных зависимости эффективного времени жизни неосновных носителей заряда от напряжения смещения для ФЧЭ из образцов ГЭС КРТ МЛЭ и теоретической зависимости в соответствии с (3, 4) определялась величина амбиполярной подвижности дырок μ_a .

Экспериментальные результаты

Вольтамперная характеристика в режиме эксклюзии

Типичная для режима эксклюзии в фоторезисторе осциллограмма ВАХ ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,212$ с двумя индиевыми изотипными ($n^+ - n$) контактами к варизонному слою, при температуре жидкого азота и апертуре 180° представлена на рис. 1. В отсутствие фонового излучения ВАХ имеет линейный вид, что свидетельствует об омических контактах, а также о постоянстве подвижности и концентрации основных носителей в использованном диапазоне напряжений смещения. ВАХ ФЧЭ фоторезисторов без эксклюзии носителей заряда всегда имели линейную зависимость от напряжения смещения в исследуемом диапазоне напряжения.

Концентрация электронов в ФЧЭ в режиме эксклюзии

Зависимости концентрации основных носителей заряда от напряжения смещения ФЧЭ ($x = 0,212$) с контактами на фронтальной поверхности варизонного слоя при различных потоках (угловых

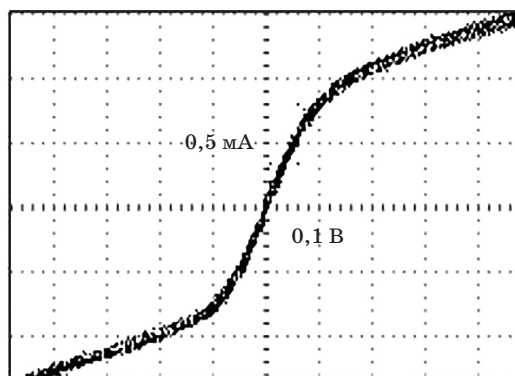


Рис. 1. ВАХ при температуре жидкого азота ФЧЭ в режиме эксклюзии с угловой апертурой 180°, выделенного химическим травлением, с двумя индиевыми изотипными $n^+ - n$ контактами к варизонному слою.

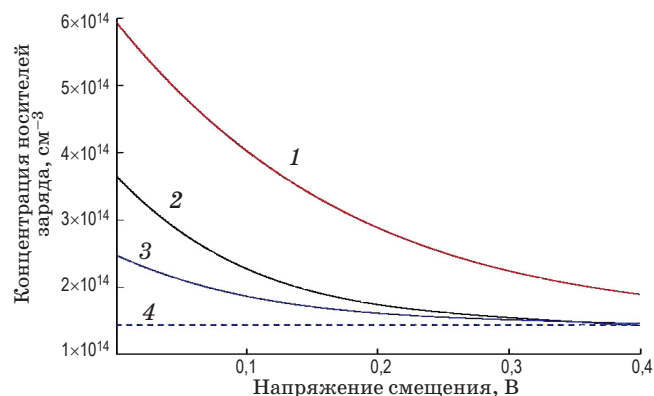


Рис. 2. Зависимость концентрации основных носителей заряда в режиме эксклюзии неосновных носителей заряда ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,212$ от напряжения смещения при потоках фонового излучения в угловых апертурах 2β. Кривая 1 — 180°, 2 — 42°, 3 — 14°, 4 — без фона.

апертурах 2β) фонового излучения, полученные в соответствии с выражением (1), представлены на рис. 2. Аналогичные зависимости получены для ФЧЭ с контактами ($n^+ - n$) к слою постоянно состава.

Результаты исследования большого количества ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ, параметры которых приведены в таблице, показали, что при эксклюзии неосновных носителей заряда концентрация основных носителей заряда, вычисленная в соответствии с выражением (1) в отсутствие фонового излучения, лежит в пределах $(1,0-2,0) \times 10^{14}$ см⁻³. Эта величина ниже уровня электрически активных фоновых примесей ($N_D - N_A$) при температуре 77 К (табл.), определенная из гальваномагнитных измерений. Из рис. 2 видно, что уменьшение потока фонового излучения (плоского угла зрения ФЧЭ) приводит к снижению напряжения смещения, при котором концентрация основных носителей заряда приближается к концентрации, соответствующей от-

сутствию фонового излучения (кривая 4 на рис. 2). В ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ с меньшим временем релаксации фотопроводимости влияние фонового излучения уменьшается и при увеличении напряжения смещения концентрация основных носителей быстрее приближается к виду зависимости без фона.

Эффективное время жизни носителей заряда ФЧЭ в режиме эксклюзии

Зависимости эффективного времени жизни неосновных носителей заряда от напряжения смещения для ФЧЭ $x = 0,212$ при угловой апертуре 14° в отсутствии (кривая 1) и при эксклюзии (кривая 2) неосновных носителей приведены на рис. 3. Расчётные зависимости эффективного времени жизни неосновных носителей заряда от напряжения смещения получены из выражений (3, 4). Экспериментальные значения хорошо совпадают с расчётными зависимостями для кривой 1 (рис. 3) при $S_2 = 1000$ см/с, $\tau_v = 5,2$ мкс, $\mu_a = 530$ см²/Вс, а для кривой 2 — при $S_2 = 700$ см/с, $\tau_v = 3,7$ мкс, $\mu_a = 340$ см²/Вс. Таким образом, при эксклюзии наблюдается значительное снижение амбиполярной подвижности носителей заряда. Это может быть объяснено наблюдаемым при эксклюзии уменьшением равновесной концентрации основных носителей заряда в ФЧЭ.

Амбиполярная дрейфовая подвижность носителей заряда ФЧЭ в режиме эксклюзии

Зависимость амбиполярной дрейфовой подвижности носителей заряда от концентрации основных носителей заряда даётся известным выражением, полученным при решении уравнения непрерывности [11], которую в нашем случае ($\mu_n \gg \mu_p$, разность концентрации электрически активных

донорных и акцепторных примесей $n = N_D - N_A$) можно записать в виде

$$\mu_a = \frac{(N_D - N_A) - n_i^2 / (N_D - N_A)}{(N_D - N_A) / \mu_p}, \quad (7)$$

где n_i — собственная концентрация носителей заряда при данной температуре, $\mu_p = 530$ см²/Вс. На рис. 4 приведены расчётные зависимости амбиполярной дрейфовой подвижности от температуры в режиме эксклюзии для ФЧЭ трёх составов ГЭС КРТ МЛЭ. При расчёте в соответствии с выражением (7) использовались зависимости ширины запрещённой зоны E_g и собственной концентрации носителей заряда от температуры для $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, приведённые в обзоре [12]

$$E_g = -0,302 + 1,93x - 0,81x^2 + 0,832x^3 + 5,35 \times 10^{-4}(1 - 2x)T, \quad (8)$$

$$n_i = (5,585 - 3,82x^3 - 0,001753T - 0,001364x^3T) \times 10^{14} E_g^{3/4} T^{3/2} \exp(-E_g / 2kT). \quad (9)$$

Расчёт зависимости амбиполярной дрейфовой подвижности носителей заряда от температуры и концентрации основных носителей ($N_D - N_A$) в режиме эксклюзии показал, что в ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,212$ (кривая 1 на рис. 4) при температуре 78,5 К и величине амбиполярной дрейфовой подвижности, равной 430 см²/Вс, концентрация основных носителей должна быть $6,5 \times 10^{13}$ см⁻³. Эта величина концентрации основных носителей значительно ниже концентрации, полученной из ВАХ (1) в предположении постоянства дрейфовой подвижности электронов (табл.) при эксклюзии неосновных носителей заряда. Аналогичные результаты получены для ФЧЭ,

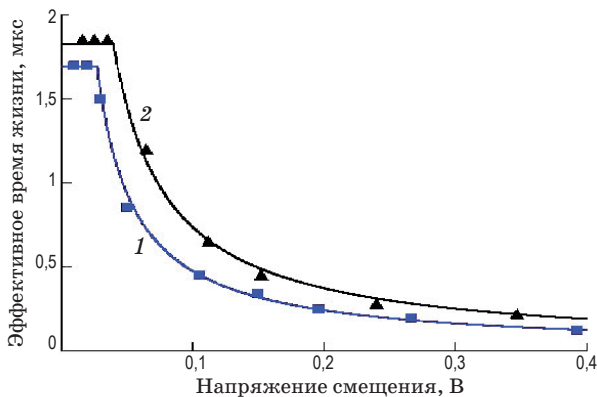


Рис. 3. Зависимость эффективного времени жизни носителей от напряжения смещения для двух ФЧЭ состава $x = 0,212$ с угловой апертурой 14° в отсутствии эксклюзии (кривая 1) и при эксклюзии (кривая 2).

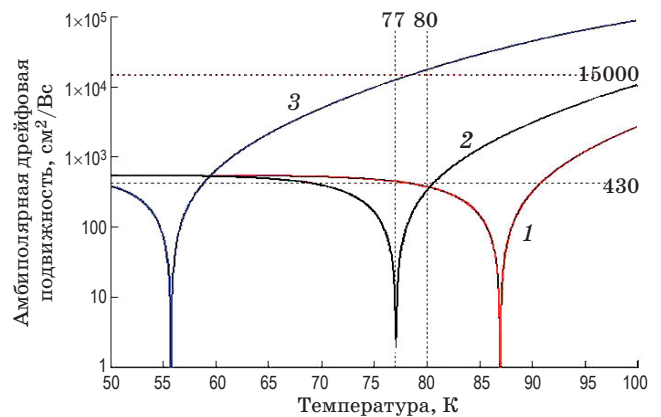


Рис. 4. Зависимость амбиполярной дрейфовой подвижности носителей заряда от температуры для КРТ. Кривая 1 — $x = 0,212$ при $n = 6,5 \times 10^{13}$ см⁻³, 2 — $x = 0,203$ при $n = 6,5 \times 10^{13}$ см⁻³, 3 — $x = 0,187$ при $n = 7,9 \times 10^{13}$ см⁻³.

изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ других составов. Экспериментально полученные зависимости эффективного времени жизни носителей и концентрации основных носителей заряда от напряжения смещения, значения амбиполярной дрейфовой подвижности, полученные в соответствии с выражениями (3, 4), позволяют в соответствии с выражением (6) рассчитать зависимость вольтовой чувствительности от напряжения смещения в режиме эксклюзии.

Вольтовая чувствительность фоторезистора в режиме эксклюзии

На рис. 5 приведены измеренные и расчётные зависимости вольтовой чувствительности ($Su_{\lambda_{\max}}$) от напряжения смещения для трёх ФЧЭ в режиме эксклюзии из ГЭС КРТ МЛЭ составов $x = 0,212$, $x = 0,213$ и $x = 0,187$, а также для ФЧЭ без эксклюзии состава $x = 0,212$. Измерения вольтовой чувствительности проведены при воздействии различных потоков фонового излучения комнатной температуры. Как видно из рис. 3, для ФЧЭ в режиме эксклюзии (кривые 2–5) характерно резкое увеличение вольтовой чувствительности по сравнению с $Su_{\lambda_{\max}}$ для ФЧЭ без эксклюзии (кривая 1). Измеренные величины вольтовой чувствительности ФЧЭ $x = 0,212$ (кривая 2) с высокой точностью ложатся на зависимость $S_{\lambda_{\max}}(U)$, полученную расчётным путём при $S_2 = 600$ см/с, $\mu_a = 460$ см²/Вс с учётом увеличения τ_v (Оже-рекомбинация) при уменьшении концентрации основных носителей заряда ФЧЭ в режиме эксклюзии с увеличением напряжения смещения. При напряжении смещения 0,2 В концентрация основных носителей заряда составила $1,5 \times 10^{14}$ см⁻³. Для зависимости $Su_{\lambda_{\max}}(U)$, относящейся к кривой 3, экспериментальные значения с большой точностью совпадают с расчётными при $S_2 = 800$ см/с, $\tau_v = 1,3$ мкс, $\mu_a = 430$ см²/В. При напряжении смещения 0,2 В концентрация основных носителей заряда в данном ФЧЭ в режиме эксклюзии составила $7,2 \times 10^{13}$ см⁻³. Для зависимости $Su_{\lambda_{\max}}(U)$, относящейся к кривой 4, хорошее совпадение с расчётными значениями при параметрах $S_2 = 700$ см/с, $\tau_v = 3,7$ мкс, $\mu_a = 340$ см²/В. При напряжении смещения 0,2 В концентрация основных носителей заряда ФЧЭ составила $6,1 \times 10^{13}$ см⁻³. Зависимость $Su_{\lambda_{\max}}(U)$ для ФЧЭ в отсутствие эксклюзии, рассчитанная в соответствии с выражением (2), приведена на рис. 5 (кривая 1) для $n = 3,6 \times 10^{14}$ см⁻³, $S_2 = 1000$ см/с, $\tau_v = 5,2$ мкс, $\mu_p = 530$ см²/Вс при плоском угле зрения 14°. Как видно из рис. 5, имеется хорошее соответствие между экспериментальными данными и значениями вольтовой чувствительности, рассчитанными по полуэмпирическим формулам в широком диапазоне напряжения смещения и фонового излучения. Полученные экспериментальные результаты в режиме эксклюзии

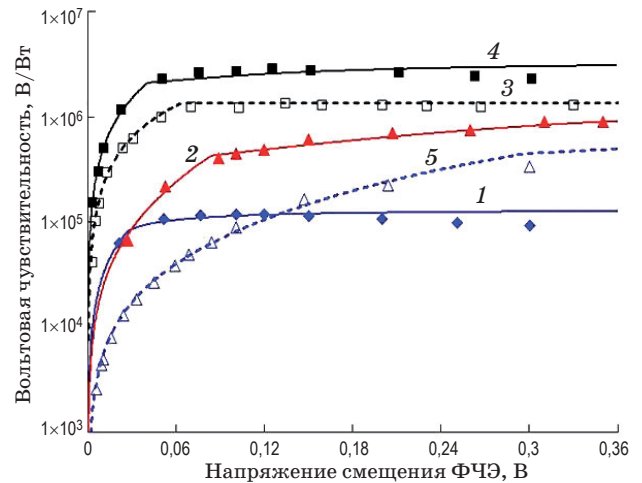


Рис. 5. Зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения для ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ с $x = 0,212$ (кривые 1, 2, 4) и $x = 0,213$ (кривая 3) с угловой апертурой 14° (кривые 1, 3, 4) и с угловой апертурой 180° (кривая 2), $x = 0,187$ с угловой апертурой 42° (кривая 5).

невозможно рассчитать, используя параметры материала ГЭС КРТ МЛЭ, измеренные на исходных образцах (таблица).

При расстоянии между контактами фоторезистора, соизмеримым с диффузионной длиной, в режиме эксклюзии равновесные величины концентрации носителей заряда отличаются от равновесных величин в отсутствие эксклюзии. Уменьшение концентрации основных носителей заряда и связанным с этим уменьшением амбиполярной дрейфовой подвижности в фоторезисторе из ГЭС КРТ МЛЭ электронного типа проводимости при эксклюзии неосновных носителей приводит к уменьшению влияния пролёта носителей. Уменьшение амбиполярной дрейфовой подвижности приводит также к увеличению напряжения смещения, при котором пролёт носителей заряда ограничивает время релаксации фотопроводимости и рост сигнала при увеличении напряжения смещения. Эксклюзия неосновных носителей заряда, генерируемых фоновым излучением при $\Delta n_F = \Delta p_F$, приводит к нелинейности ВАХ, которая обусловлена изменением вклада фоновых носителей Δn_F (рис. 1). Зависимости $n(U)$, полученные из ВАХ в соответствии с соотношением (1), дают качественную картину изменения концентрации основных носителей заряда в ФЧЭ, так как одновременно с уменьшением концентрации основных носителей заряда происходит увеличение дрейфовой подвижности.

Удельная обнаружительная способность фоторезистора в режиме эксклюзии

На рис. 6 приведены экспериментальные данные и расчётные зависимости удельной обнаружительной способности от величины плоского угла зре-

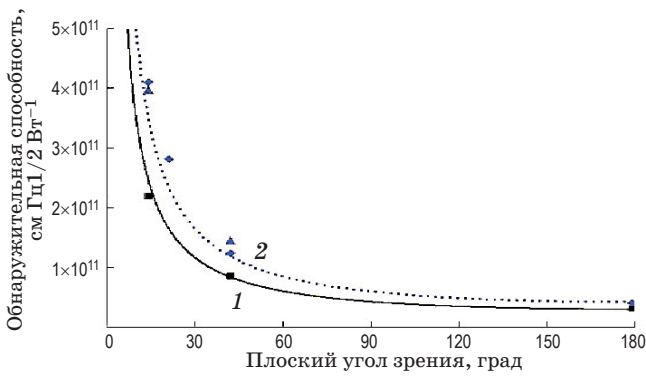


Рис. 6. Зависимости удельной обнаружительной способности от величины потока фонового излучения (плоского угла зрения 2β) для ФЧЭ с $x = 0,212$ в отсутствие эксклюзии неосновных носителей заряда (кривая 1) и при эксклюзии (2).

ния 2β (потока фонового излучения) для двух ФЧЭ $x = 0,212$ без эксклюзии (кривая 1) и с эксклюзией носителей заряда (кривая 2) при напряжении смещения, соответствующем началу влияния пролёта носителей заряда. Экспериментальные значения удельной обнаружительной способности получены для ФЧЭ с просветляющим покрытием (квантовая эффективность $\eta = 0,98$). Зависимость удельной обнаружительной способности от плоского угла зрения (мощности потока фонового излучения комнатной температуры) в VLIP режиме [13] для ФЧЭ с $x = 0,212$ в отсутствие эксклюзии (кривая 1, рис. 6) получена из соотношения

$$D^*_{\lambda_{\max}} = 3 \times 10^{10} / \sin\beta. \quad (10)$$

Экспериментальные значения обнаружительной способности при эксклюзии неосновных носителей заряда хорошо соответствуют расчётным величинам (кривая 2, рис. 6) при

$$D^*_{\lambda_{\max}} = 3 \times 10^{10} \sqrt{2} / \sin\beta. \quad (11)$$

Как видно из рис. 6, эксклюзия неосновных носителей заряда, генерируемых фоновым излучением Δp_F , приводит к повышению обнаружительной способности в $\sqrt{2}$ раз за счёт уменьшения рекомбинационного вклада носителей заряда статистических флуктуаций плотности фотонов фонового излучения.

Низкая концентрация основных носителей заряда в условиях эксклюзии дырок позволяет получить высокоэффективные фоторезисторы из ГЭС КРТ МЛЭ при температуре жидкого азота для составов ГЭС КРТ МЛЭ менее $x \approx 0,205$. Это связано со значительным изменением амбиполярной дрейфовой подвижности носителей заряда. Зависимости амбиполярной дрейфовой подвижности носителей заряда от температуры, рассчитанные в соответствии с выражениями (7–9), для ГЭС КРТ МЛЭ с $x = 0,187$ при $n = 7,9 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и

для $x = 0,203$ при $n = 6,5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ представлены на рис. 4. Амбиполярная дрейфовая подвижность носителей заряда при температуре жидкого азота для составов $x = 0,187$ и $x = 0,203$ отличается более чем на три порядка и для состава $x = 0,203$ составляет менее $10 \text{ см}^2/\text{Вс}$. Спектральные характеристики чувствительности ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ составов $x = 0,212$; $0,203$ и $0,187$, приведены на рис. 7. Длина волны максимальной чувствительности λ_{\max} для данных составов лежит в диапазоне $10,5\text{--}11,5 \text{ мкм}$, $12,0\text{--}13,0 \text{ мкм}$ и $16,0\text{--}17,5 \text{ мкм}$ соответственно. Расчёт длинновой границы чувствительности по уровню $0,5$ ($\lambda_{co} = 1,24/E_g$) в диапазоне температуры $77\text{--}80 \text{ К}$ даёт для составов ГЭС КРТ МЛЭ при $x = 0,212$ $\lambda_{co} = (12,0\text{--}12,1) \text{ мкм}$, при $x = 0,203$ $\lambda_{co} = (14,0\text{--}14,1) \text{ мкм}$ и при $x = 0,187$ $\lambda_{co} = (19,7\text{--}20,1) \text{ мкм}$. Данные величины λ_{co} находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами (рис. 7).

Экспериментальные результаты для ФЧЭ с $x = 0,187$ в режиме эксклюзии хорошо соответствуют расчётным значениям вольтовой чувствительности при $h\nu = 1,3 \times 10^{-20} \text{ Дж}$, $S_2 = 500 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $\tau_v = 6,5 \text{ нс}$, $\mu_a = 13000 \text{ см}^2/\text{Вс}$. При напряжении смещения $0,2 \text{ В}$ концентрация основных носителей заряда в данном ФЧЭ в режиме эксклюзии составила $1,18 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Длительность импульса излучения используемого CO_2 -лазера (75 нс) не позволила определить зависимость эффективного времени жизни носителей от напряжения смещения. При напряжении смещения 30 мВ и плоском угле зрения 42° без учёта потерь на отражение ($\eta = 0,98$) были получены $D^*(\lambda_{\max}, 1200, 1) = 3,5 \times 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ и $Su_{\lambda_{\max}} \approx 2,3 \times 10^4 \text{ В}/\text{Вт}$. В режиме эксклюзии вольтовая чувствительность ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,187$ достигает величины более $2,8 \times 10^5 \text{ В}/\text{Вт}$ при смещении $0,2 \text{ В}$ (рис. 5, кривая 5).

Таким образом, фотоэлектрические параметры фоторезисторов в режиме эксклюзии неосновных носителей заряда с $\lambda_{\max} = 16\text{--}17 \text{ мкм}$, охлаждаемых не ниже температуры жидкого азота, имеют

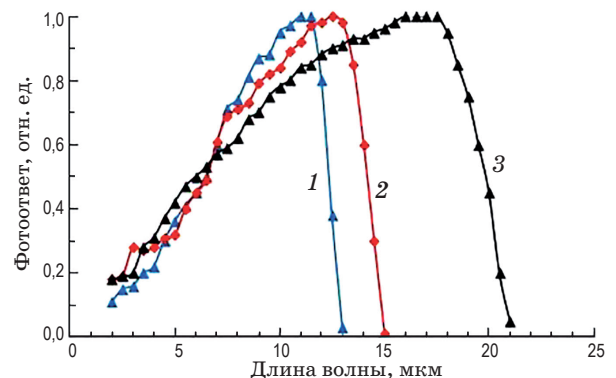


Рис. 7. Спектральные характеристики чувствительности ФЧЭ, изготовленных из ГЭС КРТ МЛЭ. Кривая 1 — $x = 0,212$, кривая 2 — $x = 0,203$ и кривая 3 — $x = 0,187$.

параметры, сопоставимые с параметрами фоторезисторов с классической конструкцией ФЧЭ и $\lambda_{\max} = 10\text{--}11$ мкм, изготовленных по стандартной технологии [8].

Экспериментальные данные и расчётные зависимости вольтовой чувствительности и эффективного времени жизни носителей от напряжения смещения для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$ (табл.) при плоском угле зрения 14° , представлены на рис. 8. На зависимости вольтовой чувствительности и эффективного времени жизни носителей от напряжения смещения (рис. 8) можно выделить три диапазона. В диапазоне напряжений смещения до 1,0 В происходит быстрый рост вольтовой чувствительности и постоянной времени фотоответа, что связано с уменьшением концентрации основных носителей заряда вследствие эксклюзии неосновных носителей заряда. При напряжении более 1,0 В концентрация основных носителей заряда выходит на постоянное значение $n = 7,5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, равное разности концентрации электрически активных донорных и акцепторных примесей. При этом постоянная времени фотоответа определяется временем жизни носителей заряда и скоростью рекомбинации носителей на боковых стенках ФЧЭ, а вольтовая чувствительность линейно увеличивается с ростом напряжения смещения. Уменьшение постоянной времени фотоответа из-за пролёта носителей сказывается при увеличении напряжения смещения более 2,1 В. Столь высокое напряжение смещения, при котором постоянная времени фотоответа определяется пролётом носителей, связано с резким падением в режиме эксклюзии амбиполярной подвижности дырок, в данном случае, до $\mu_a \approx 3 \text{ см}^2/\text{Вс}$. При этом, для КРТ состава $x = 0,203$ при температуре 77 К собственная концентрация

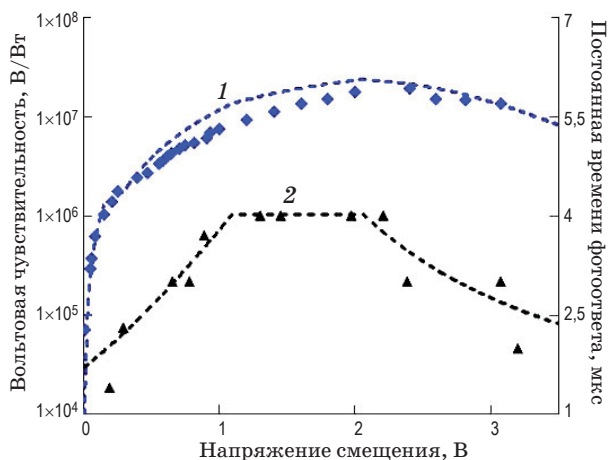


Рис. 8. Зависимости вольтовой чувствительности (кривая 1) и эффективного времени жизни носителей (кривая 2) от напряжения смещения при угловой апертуре 14° для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$.

основных носителей заряда в соответствии с (8, 9) составляет $n_i = 7,52 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Расчёт зависимости вольтовой чувствительности от напряжения смещения (кривая 1 на рис. 8) проведён в соответствие с выражением (6) с использованием экспериментальных зависимостей постоянной времени фотоответа и концентрации основных носителей заряда от напряжения смещения при $\mu_a = 3 \text{ см}^2/\text{Вс}$, $S_2 = 300 \text{ см/с}$, $\tau_v = 7,7 \text{ мкс}$, $\eta = 0,7$. Из приведённых результатов и расчётов следует, что в объёме ФЧЭ при эксклюзии неосновных носителей заряда реализуются параметры, близкие к параметрам собственного полупроводника.

Экспериментальные зависимости от напряжения смещения удельной обнаружительной способности $D^*(\lambda_{\max}, 1200, 1)$, приведённой к квантовой эффективности $\eta = 0,98$, и значения напряжения шума в единичной полосе для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$, при плоских углах зрения 14° и 42° приведены на рис. 9 и 10.

Из сопоставления рис. 8 и рис. 9 видно, что на участке напряжений от 1 до 2 В происходит увеличение удельной обнаружительной способности. Рост обнаружительной способности определяется как значительным снижением уровня шума (рис. 10), так и растущей вольтовой чувствительностью за счёт увеличения напряжения смещения. Можно качественно объяснить полученные результаты одновременным изменением концентрации основных и неосновных носителей заряда в пикселе фоторезистора в режиме эксклюзии с увеличением напряжения смещения. Для случая, когда концентрация электрически активных донорных примесей (или точечных дефектов) существенно превышает концентрацию электрически активных акцепторных примесей ($N_D \gg N_A$), предполагаемое изменение от смещения концен-

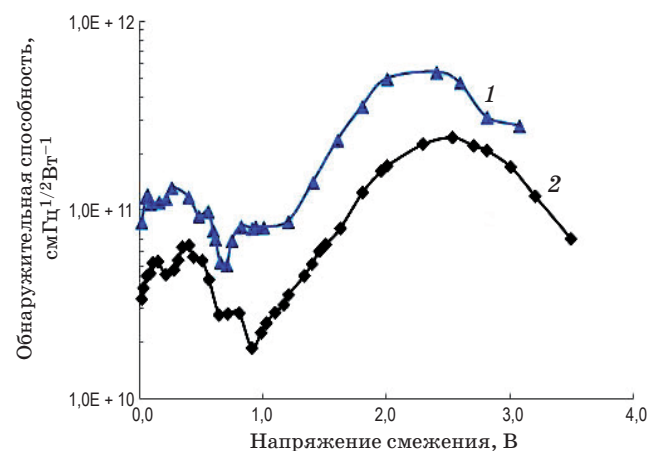


Рис. 9. Экспериментальные зависимости удельной обнаружительной способности от напряжения смещения для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$ при плоском угле зрения. Кривая 1 — 14° , кривая 2 — 42° .

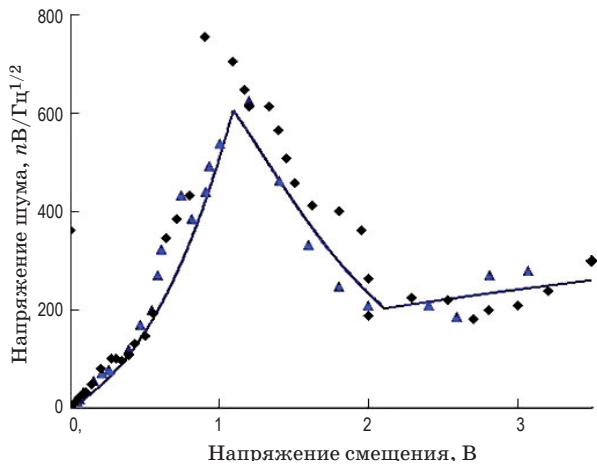


Рис. 10. Зависимость напряжения шума в единичной полосе от напряжения смещения для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$ при плоском угле зрения 14° .

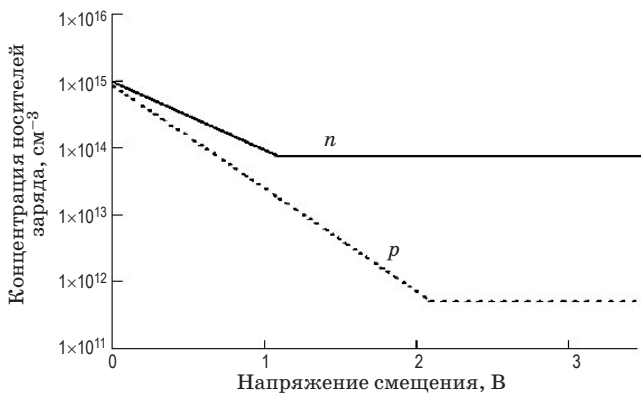


Рис. 11. Зависимость концентрации основных n и неосновных носителей заряда p в режиме эксклюзии в ФЧЭ из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$ от напряжения смещения при низких потоках фонового излучения.

трации основных и неосновных носителей заряда в условиях слабой фоновой засветки, соответствующее экспериментальным данным по фотопроводимости, приведено на рис. 11. С увеличением напряжения смещения в режиме эксклюзии экспоненциально уменьшается суммарная концентрация неосновных носителей заряда, связанная с их фоновой и тепловой генерацией, до постоянного уровня, равного уровню N_A . Следствием этого является экспоненциальное уменьшение концентрации основных носителей заряда в зоне эксклюзии, связанное с их фоновой генерацией, до постоянного уровня, равного N_D . Для почти собственного полупроводника напряжение генерационно-рекомбинационного шума описывается выражением [14]

$$U_{g-r} = \frac{2U}{n(Lad)^{1/2}} \left[p_F + \frac{pn}{n+p} \right] \tau \Delta f \quad (12)$$

Полагая равными концентрацию фоновых носителей заряда p_F и неосновных носителей заряда, связанных с тепловой генерацией p при эксклюзии, а также учитывая их экспоненциальную зависимость от напряжения смещения, был проведён расчёт напряжения генерационно-рекомбинационного шума в полосе $\Delta f = 1$ Гц. Зависимость напряжения генерационно-рекомбинационного шума от напряжения смещения для ФЧЭ, изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$, при малом потоке фонового излучения (плоский угол зрения — 14°) приведена на рис. 10 (кривая 1). При расчёте были использованы экспоненциальные зависимости $p_F(U) = 8,8 \times 10^{14} \exp(-3,55U)$ до величины $N_A = 5,0 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $n(U) = 9,8 \times 10^{14} \exp(-2,35U)$ до величины $N_D = 7,52 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчётов, приведённых на рис. 8, 9 показывает, что максимальные величины обнаружительной способности имеют место быть при напряжениях, отвечающих началу пролёта носителей заряда между контактами. Для ФЧЭ с просветляющим покрытием ($\eta = 0,98$), изготовленного из ГЭС КРТ МЛЭ состава $x = 0,203$, $D^*(\lambda_{\max}, 1200, 1)$ могут достигать $5,3 \times 10^{11} \text{ см}^2/\text{Вт}$ ($Su_{\lambda_{\max}} \approx 2,4 \times 10^7 \text{ В/Вт}$) при плоском угле зрения 14° и $2,4 \times 10^{11} \text{ см}^2/\text{Вт}$ ($Su_{\lambda_{\max}} \approx 9,4 \times 10^6 \text{ В/Вт}$) при плоском угле зрения 42° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование химического травления для разделения малоразмерных пикселей, исключение ионного травления и всех других видов обработки ионами аргона из процессов изготовления фоторезисторов на основе ГЭС КРТ МЛЭ в совокупности с контактной системой, образованной электрохимическим осаждением индия к варизонному слою или к слою постоянного состава, позволяет реализовать в таких фоторезисторах режим эксклюзии неосновных носителей при низкой исходной концентрации основных носителей заряда и высоком времени жизни неравновесных носителей заряда в рабочем слое n -типа проводимости. 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 увеличивается время жизни неравновесных носителей и уменьшается амбиполярная дрейфовая подвижность, что приводит к повышению порога эффекта пролёта носителей под действием электрического поля смещения. В итоге, вольтовая чувствительность может достигнуть уровня 10^7 В/Вт . Режим эксклюзии приводит к снижению шума фоторезистора в $\sqrt{2}$ раз за счёт рекомбинационной составляющей фотонного шума фоторезистора и позволяет получить предельную обнаружительную

способность $D_{\lambda_{\max}}^*(14^\circ, 1200, 1) = 5 \times 10^{11} \text{ смГц}^{1/2}/\text{Вт}$ при $\lambda_{\max} = 12 \text{ мкм}$ и высокие параметры фоторезисторов ($D_{\lambda_{\max}}^* \geq 3,5 \times 10^{10}$, $\lambda_{\max} = 16\text{--}17 \text{ мкм}$) на основе наиболее узкозонных составов ГЭС КРТ МЛЭ ($x = 0,187$) при температуре не ниже 77 К.

Авторы выражают признательность сотрудникам ИФП СО РАН Сидорову Ю.Г., Дворецкому С.А., Михайлову Н.Н. и Варавину В.С. за создание и исследования эпитаксиальных структур из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ для фоторезисторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ashley T., Elliott C.T. Non-equilibrium mode of operation for infrared detection // *Electron. Lett.* 1985. V. 21. P. 451–452.
2. Ashley T., Elliott C.T., White A.M. Infrared detection using minority carrier exclusion // *SPIE Proc.* 1986. V. 588. P. 62–68.
3. Djurić Z., Jović V., Matić M., Jakšić Z. IR photodetector with exclusion effect and self-filtering n+ layer // *Electronics Lett.* 1990. V. 2. P. 929–931.
4. Ashley T., Elliott C.T., Harker A.T. Non-equilibrium modes of operation for infrared detectors // *Infrared Phys.* 1986. V. 26. P. 303–315.
5. Djurić Z., Piotrowski J. Infrared photodetector with electromagnetic carrier depletion // *Opt. Eng.* 1992. V. 31. P. 1955–1960.
6. Ashley T., Elliot C.T., White A.M. Non-equilibrium devices for infrared detection // *SPIE Proc.* 1985. V. 572. P. 123–132.
7. Varavin V.S., Dvoretzky 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.
8. Филатов А.В., Сузов Е.В., Гусаров А.В., Акимова Н.М., Крапухин В.В., Карнов В.В., Шаевич В.И. Долговременная стабильность фоторезисторов спектрального диапазона 8–12 мкм, изготовленных из гетероэпитаксиальных структур CdHgTe , полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // *Оптический журнал.* 2009. Т. 76. № 12. С. 49–54.
9. Филатов А.В., Сузов Е.В., Карнов В.В. Образование, природа и отжиг дефектов в гетероэпитаксиальных структурах $\text{Cd}_{0,2}\text{Hg}_{0,8}\text{Te}$ и фоторезисторах, подвергнутых ионному травлению // *Оптический журнал.* 2017. Т. 84. № 4. С. 67–72.
10. Kinch M.A., Borrello S.R., Simmons A. 0.1 eV HgCdTe photoconductive detector performance // *Infrared Phys.* 1977. V. 17. № 2. P. 127–135.
11. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977. 672 с.
12. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. Пер. с англ. / Под ред. Войцеховского А.В. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
13. Шоль Ж., Марфан И., Мюниш Н., Торель П., Комбет П. Приемники инфракрасного излучения. Пер. с фран. / Под ред. Курбатова Л.Н. М.: Мир, 1969. 285 с.
14. Broudy R.M., Mazurczyk V.J. (HgCd)Te photoconductive detectors // *Semiconductors and semimetals. Mercury Cadmium Telluride* / Ed. by Willardson R.K., Deer A.C. N.Y.L.: Academic Press, 1981. V. 18. P. 157–199.