

УДК 621.383.4/5:546.48'49'24

**МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ФОРМАТА 128x128 И 384x288
НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДОВ ИЗ $Cd_xHg_{1-x}Te$**

*Л. А. Бовина, К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, С. В. Головин, В. Ю. Иванов,
Л. Д. Сагинов, В. И. Стафеев, В. М. Акимов, Е. А. Климанов*

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Орион»,
Москва, Россия

В. М. Лакеенков
«Гиредмет», Москва, Россия

Ю. Г. Сидоров
Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск, Россия

Приведены результаты разработки и исследований МФП форматов 128x128 и 384x288 на основе фотодиодов из $CdHgTe$. В качестве исходного материала использовались эпитаксиальные слои КРТ, выращенные методами как жидкостной, так и молекулярно-лучевой эпитаксии. Фотодиодная матрица стыковалась с кремниевым МОП-мультиплексором, который обеспечивал считывание, построчное накопление фотосигналов и их вывод из холодной зоны. Приведен сравнительный анализ характеристик МФП, изготовленных различными методами эпитаксии.

Матричные фотоприемники (МФП) ИК-диапазонов 3—5 и 8—12 мкм формата 128x128 и выше реализованы в настоящее время рядом фирм на основе эпитаксиальных слоев твердого раствора кадмий—ртуть—теллур (КРТ). Наиболее распространены в настоящее время МФП на эпитаксиальных слоях КРТ, выращенных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) [1—3]. В последнее время появились сообщения о создании МФП на эпитаксиальных слоях, выращенных методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [4].

Нами исследованы характеристики МФП диапазона 8—12 мкм форматов 128x128 и 384x288, изготовленных на эпитаксиальных слоях КРТ, выращенных методом МЛЭ (ИФП СО РАН) и жидкофазной эпитаксией (НПО «Гиредмет»).

Эпитаксиальные слои***Выращивание эпитаксиальных слоев методом МЛЭ***

Эпитаксиальные слои выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии типа «Обь», модернизированной для работы с ртутью. Установка имеет три технологические камеры, отличающиеся составом остаточных газов:

камера предэпитаксиальной подготовки подложек не имеет молекулярных источников. В ней производится только термическая обработка подложек при необходимой температуре. Контроль процесса осуществляется с помощью дифрактометра быстрых электронов и эллипсометра. При относительно низких температурах происходит удаление окислов с поверхности подложки. При более высоких температурах начинаются перестройка поверхности и появление сверхструктуры;

камера выращивания буферных слоев, состоящих из халькогенидов элементов второй группы. Камера оснащена дифрактометром быстрых электронов и встроенным автоматическим эллипсометром ЛЭФ 701, который служит для измерения скоростей роста $ZnTe$ и $CdTe$ и состава буферных слоев;

камера выращивания узкозонных ртутьсодержащих твердых растворов оснащена специальной системой молекулярных источников, обеспечивающих достаточно однородное распределение состава твердого состава раствора в отсутствие вращения подложки. Давление паров ртути в камере порядка 10^{-4} Па.

Наблюдение за процессами роста слоев проводилось методами дифракции быстрых электронов и эллипсометрии *in situ* с помощью эллипсометра ЛЭФ-701.

В качестве подложек использовался GaAs с ориентацией (103) с буферными слоями CdZnTe. Температура роста КРТ ~190 °С. Для измерения температуры использовался радиационный пирометр, работающий в спектральном диапазоне 25—30 мк. Скорость роста пленок КРТ 2—3 мкм/ч, так что время выращивания пленки толщиной 10 мкм составляла 3—4 ч.

Состав выращенных пленок контролировался по спектрам пропускания. Локальность измерений 25 мм². Градиент состава по площади подложки диаметром 51 мм не превышает 0,002 см⁻¹. Среднеквадратичный разброс состава составляет 1,5 %.

Электрические характеристики определялись по эффекту Холла, измеряемому по методу Ван-дер-Пау при напряженности магнитного поля 2,5 кГс.

На рис. 1 представлен пример распределения состава по толщине пленки КРТ. При составе рабочего слоя $X_{CdTe} = 0,22$ на границах рабочего слоя созданы варизонные слои, в которых содержание CdTe повышается к поверхности ГЭС и к границе с буферным слоем.

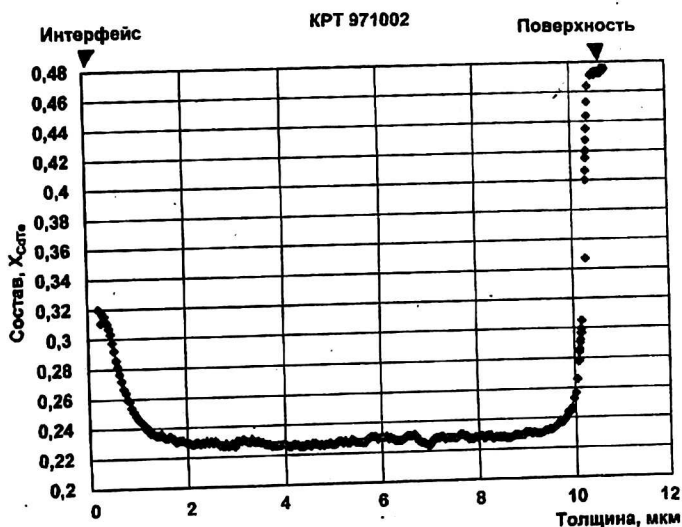


Рис. 1. Распределение состава x по толщине эпитаксиального слоя $Cd_xHg_{1-x}Te$

Непосредственно после выращивания пленки имеют *n*-тип проводимости. Концентрации носителей в пленках *n*-типа ниже 10^{15} см⁻³ при подвижностях более 100 000 см²/(В·с) для состава $X_{CdTe} = 0,22$. Времена жизни неосновных носителей в пленках после выращивания достигают 2–3 нс для того же состава.

Материал *p*-типа проводимости получался термообработкой в ампулах, заполненных гелием в двухзонной печи. Одна зона предназначалась для нагрева резервуара с ртутью, а другая — для нагрева образца. Концентрация носителей в материале *p*-типа составляла величину порядка 10^{16} см⁻³, а подвижность — более 400 см²/(В·с) при временах жизни 20—30 нс.

Выращивание эпитаксиальных слоев методом жидкофазной эпитаксии

Эпитаксиальные слои $p-Cd_xHg_{1-x}Te$ состава $x = 0,2-0,3$ диаметром 20–30 мм и толщиной 15–40 мкм выращивали на подложках ориентации (111) из

$\text{Cd}_{1-y}\text{Zn}_y\text{Te}$ ($y = 0,02-0,05$) путем принудительного охлаждения раствора-расплава на основе Te в интервале температур $510-470$ °С. Для уменьшения концентрации дырок слои подвергались отжигу в насыщенных парах ртути при температурах $340-360$ °С в течение $3-10$ ч. Состав эпитаксиальных слоев определялся по методике, основанной на измерении спектров пропускания слоев в ближней инфракрасной области при $T = 295$ К. Электрофизические измерения проводились по методу Ван-дер-Пау при $T = 295$ и 77 К в диапазоне магнитных полей $0,1-1,4$ Тл. Совершенство кристаллической структуры слоев исследовалось металлографическими и рентгеновскими методами. Путем послойного травливания тонких слоев материала изучено распределение состава и электрофизических параметров по толщине эпитаксиального слоя. Проведенные исследования показали, что полученные эпитаксиальные слои были p -типа проводимости с концентрацией дырок $7,0 \cdot 10^{15} \div 2,0 \cdot 10^{16}$ см^{-3} и подвижностью $400-650$ $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при 77 К. Разброс состава x по площади слоев составлял $0,002-0,005$ мол. долей CdTe. Включения второй фазы и малоугловые границы отсутствовали, плотность дислокаций была меньше $5,0 \cdot 10^4$ см^{-2} . Полуширина кривых качания не превышала 50 угл. с. Характеристики эпитаксиальных слоев представлены в табл. 1.

Состав и толщина

Однородность по пластине состава x и толщина эпитаксиального слоя измерялись по ИК-спектрам пропускания при комнатной температуре на Фурье-спектрометре IFS-113 фирмы "Брукер" в диапазоне волновых чисел $4000-500$ см^{-1} (диапазон длин волн $2,5-20$ $\mu\text{м}$). Диаметр пятна ИК-излучения 8 мм, что примерно соответствует размеру диагонали МФП формата 128×128 . На рис. 2 представлены ИК-спектры пропускания гетероструктуры, выращенной методом МЛЭ (кривая 1) и типичный спектр пропускания эпитаксиальной структуры, выращенной методом ЖФЭ (кривая 2).

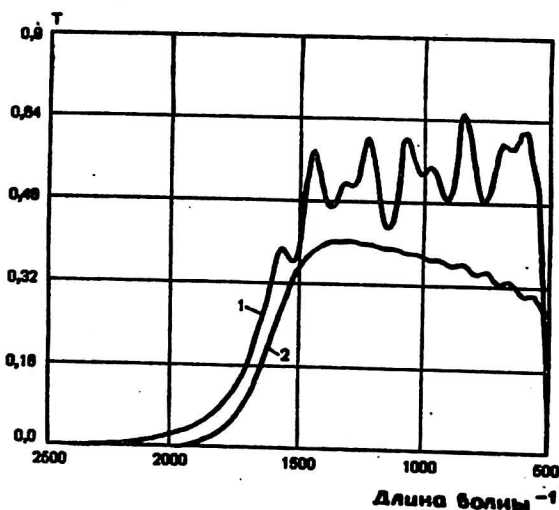


Рис. 2. ИК-спектры пропускания эпитаксиальных слоев КРТ, выращенных по методу МЛЭ (1) и ЖФЭ (2)

На спектрах пропускания отчетливо видны резкий спад пропускания в области длин волн короче 7 $\mu\text{м}$ (волновое число больше 1500 см^{-1}) и характерное

для интерференции волн в таком эпитаксиальном слое КРТ чередование минимумов и максимумов пропускания. Интерференционная картина в слоях, выращенных методом МЛЭ, более четкая, что свидетельствует о большей однородности толщины слоев. Измеренные значения максимального разброса состава x для исследованных эпитаксиальных структур представлены в табл 1.

Таблица 1

№ п/п	Состав x	Толщина, мкм	Толщина буферного слоя, мкм	Концентрация носителей, см^{-3}	Подвижность, $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	Время жизни неосновных носителей, нс
1	0,228—0,230	7,6	5,4	$6 \cdot 10^{15}$	580	20
2	0,215—0,220	7,1	6,0	$5 \cdot 10^{15}$	740	15
3	0,204—0,216	7,3	5,0	$8 \cdot 10^{16}$	400	30
4	0,210—0,220	8,4	7,0	$7,5 \cdot 10^{15}$	625	30

Неровность поверхности

Для проведения успешной стыковки неровность поверхности пластины не должна превышать половины суммарной высоты In -столбов МФЧЭ (~8 мкм) и кремниевой ИС (~5 мкм).

На рис. 3 представлена зависимость неровности поверхности (профилеграмма) центральной части пластины, выращенной методом МЛЭ, измеренная на установке "Дектак-3000". Диаметр пластины 40 мм. На базе 18 мм, достаточной для размещения МФП формата 384x288, отклонение от плоскости не превышает 2 мм, за исключением нескольких резких пиков. Максимальная высота этих отдельных пиков составляет до 17 мкм, размеры в плоскости до 100 мкм.

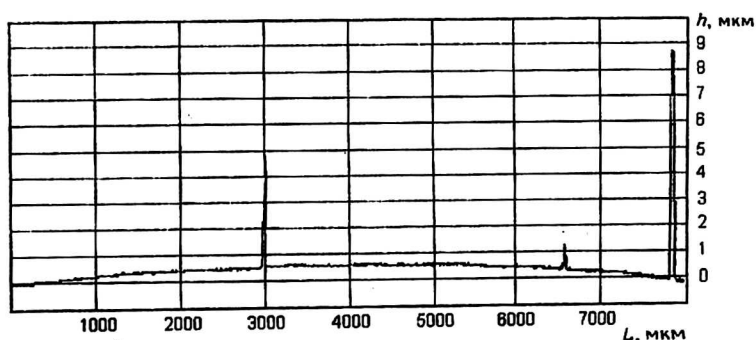


Рис. 3. Профилеграмма поверхности эпитаксиального слоя КРТ, выращенного по методу МЛЭ

Поверхность слоев КРТ, полученных по методу ЖФЭ, представляет собой чередование протяженных хребтов и впадин с характерной высотой 1–5 мкм на базе 6 мм и более 10 мкм — на базе 16 мм. Следует отметить, что при переходе на пластины диаметром 40 мм и более завалы существенно уменьшаются.

Конструкция МФП формата 128x128

МФП формата 128x128 состоит из матрицы фотодиодов, сформированных в эпитаксиальном слое КРТ p -типа проводимости методом ионной имплантации и

кремниевому МОП-мультиплексору, изготовленного по *п*-МОП-технологии, осуществляющего построчное накопление и считывание сигналов матрицы фотодиодов.

Матрица фотодиодов и МОП-мультиплексор состыкованы при помощи индиевых столбов размером 15×15 мкм суммарной высотой 10–15 мкм таким образом, что каждый фотодиод подсоединен I^+ -столбом к входу своей ячейки МОП-мультиплексора (рис. 4).

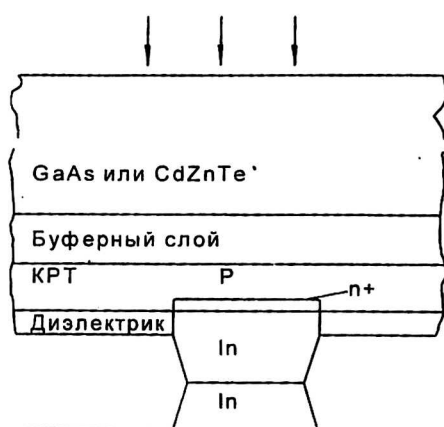


Рис. 4. Топология фотодиодов

Шаг фотодиодов в каждом направлении 40 мкм, размер имплантированных областей *п*-типа 20×20 мкм². Размер рабочей области матрицы фотодиодов $5,2 \times 5,2$ мм². Принципы функционирования МОП-мультиплексора изложены в [1].

МФП охлаждается до температуры (80 ± 3) К. Температура контролируется термодатчиками из кремниевых диодов.

МФП формата 384×288 по принципам конструкции не отличается от МФП формата 128×128 . Шаг фотодиодов в каждом направлении 35 мкм, размер имплантированных областей *п*-типа 18×18 мкм.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ)

На рис. 5, а представлены характерная вольт-амперная характеристика (ось ординат справа) и зависимость дифференциального сопротивления (ось ординат слева) фотодиода с граничной длиной волны 12,5 мкм на эпитаксиальном слое, выращенном методом МЛЭ. В области обратных смещений 20–100 мВ имеется насыщение тока, а в области обратных смещений > 100 мВ резкое увеличение тока, обусловленное характерным для фотодиодов из КРТ с граничной длиной волны более 12 мкм стимулированным ловушками туннельным механизмом (trap-assisted tunneling [5]).

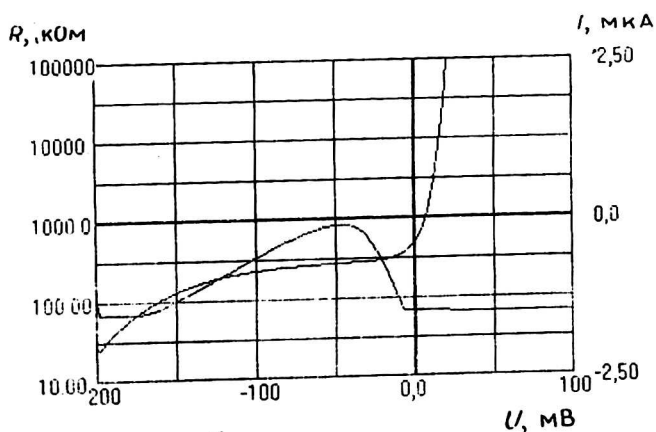
По величине фонового тока $I(0) = 370$ нА можно оценить квантовую эффективность фотодиода ~ 25 %. Наибольшее дифференциальное сопротивление $R(50) \sim 800$ кОм достигается при обратном смещении 50 мВ, которое и должно быть выбрано в качестве рабочей точки фотодиодов в МФП. Величина тока в рабочей точке $I_p = I(50) = 70$ нА, темнового $I_T = I(50) - I(0) = 300$ нА. Измеренные значения $I(50)$, $R(50)$ для нескольких других образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

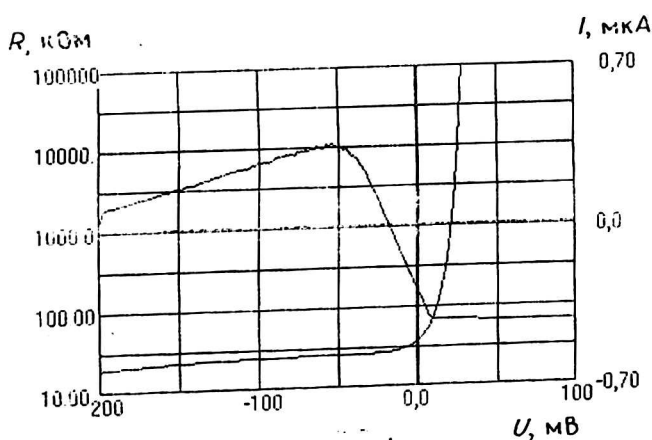
№ п/п	Номер МФП	Формат	№ слоя	Граничная длина волны, мкм	Ток в рабочей точке, нА	Дифференциальное сопротивление в раб. точке, МОм	D^* , см \cdot В $^{-1} \cdot$ Гц $^{1/2}$	Si, А/Вт	ΔT , К
1	Н19	128x128	1	9,5	220	2	$2,3 \cdot 10^{10}$	1,7	0,15
2	Н20	128x128	2	9,5	220	2	$2,3 \cdot 10^{10}$	1,7	0,15
3	Н32	128x128	3	11,5	600	1	$1,3 \cdot 10^{10}$	2,2	0,2
4	Т1	384x288	3	12,3	1000	0,8	$0,5 \cdot 10^{10}$	2,9	
5	Т3	384x288	4	12,5	700	0,8	$1,3 \cdot 10^{10}$	2,1	
6	Н30*	128x128	ЖФЭ	10,3	550	10	$2,8 \cdot 10^{10}$	3,3	0,1
7	ИФП СО РАН**	128x128		10,4			$1,5 \cdot 10^{10}$	2,2	

*МФП изготовлен из эпитаксиальной структуры ЖФЭ.

**МФП изготовлен и исследован в ИФП СО РАН [4].



а



б

Рис. 5. Вольт-амперная характеристика фотодиода: а — из эпитаксиального слоя ЖФЭ; б — из эпитаксиального слоя МЛЭ

На рис. 5, 6 представлены характерная вольт-амперная характеристика (ВАХ) и зависимость дифференциального сопротивления тестового фотодиода с граничной длиной волны 10,3 мкм МФП, изготовленного на эпитаксиальном слое, полученном ЖФЭ. Существенное уменьшение туннельной составляющей обратного тока и величины темнового тока $I_T = 60$ нА может быть объяснено уменьшением граничной длины волны с 12,5 до 10,3 мкм. По величине фонового тока $I(0) = 490$ нА можно оценить квантовую эффективность фотодиода ~ 40 %, которая существенно выше эффективности фотодиодов на МЛЭ-слоях.

Удельная обнаружительная способность тестовых фотодиодов

Удельная обнаружительная способность в максимуме спектральной фоточувствительности D^* и токовая чувствительность S_i тестовых фотодиодов изготовленных МФП, измеренных при температуре АЧТ 500 К, частоте модуляции 1200 Гц и угле поля зрения 180 °, представлены в табл. 2.

Удельная обнаружительная способность D^* для фотодиодов на слоях, полученных методом МЛЭ, с граничной длиной волны 9,5—12,5 мкм составляет $1,3\text{--}2,3 \cdot 10^{10}$ см·В⁻¹·Гц^{1/2}, что всего в 1,5—2 раза хуже, чем теоретический предел удельной обнаружительной способности D^* , ограниченный фоновым излучением в данных условиях.

Низкие значения токовой чувствительности $S_i = 1,7\text{--}2,9$ А/Вт подтверждают оценки квантовой эффективности ~ 25 %, сделанные из анализа ВАХ фотодиодов.

Значения величины удельной обнаружительной способности D^* фотодиодов МФП, изготовленных на слоях ЖФЭ, $2,8 \cdot 10^{10}$ см·В⁻¹·Гц^{1/2}, весьма близко к теоретическому пределу в данных условиях. Значение величины токовой чувствительности $S_i = 3,3$ А/Вт примерно в 1,5 раза выше, чем у фотодиодов на слоях МЛЭ.

Значения $D^* = 1,5 \cdot 10^{10}$ см·В⁻¹·Гц^{1/2} и $S_i = 2,2$ А/Вт (см. табл. 2) фотодиодов, изготовленных в ИФП СО РАН [4] на слоях МЛЭ, примерно соответствуют значениям, полученным нами на фотодиодах из таких же слоев.

Сделанные нами оценки показывают, что малая толщина слоев МЛЭ 7—8 мкм по сравнению со слоями ЖФЭ толщиной ~ 15 мкм или увеличенное число ловушек в обедненном слое фотодиодов на слоях МЛЭ (см. ВАХ фотодиодов) сами по себе не могут объяснить столь существенное ухудшение квантовой эффективности и токовой чувствительности фотодиодов на слоях МЛЭ.

Однородность ВАХ по площади

Контроль однородности ВАХ фотодиодов по площади МФЧЭ проводился с помощью гибкого зонда. Пластина со сформированными МФЧЭ охлаждается в вакуумированной камере до температуры жидкого азота. Затем тонкий проводочный зонд при помощи микрометрических подач контролирует с I_p столбом любого выбранного фотодиода и измеряется его ВАХ.

Наиболее приемлемым для определения однородности фотодиодов МФЧЭ оказался ток в рабочей точке (при смещении -50 мВ) — I_p . Он определяет максимально возможное время накопления T_n фотосигнала на накопительных емкостях C_n в секции накопления МФП:

$$T_n = \frac{U C_n}{I_p},$$

где $U \approx 5$ В — напряжение дозарядки емкостей $C_n \approx 5pF$. Если T_n меньше максимально возможного для данной кадровой частоты МФП времени накопления

T_m (128 мкс для кадровой частоты 50 Гц), то такой МФП приходится использовать с уменьшенным временем накопления, и его минимальная обнаружимая разность температур ухудшается в $\sqrt{T_m / T_n}$ раз. Кроме того, разброс токов в рабочей точке МФП, как правило, соответствует разбросу токовой чувствительности фотодиодов в МФП.

В среднем фотодиоды, изготовленные из эпитаксиальных слоев, выращенных по методу МЛЭ, имеют большие токи, чем фотодиоды, выращенные по методу ЖФЭ, однако их однородность по МФЧЭ для слоев МЛЭ лучше.

Характеристики МФП

Характеристики изготовленных МФП исследовались на стенде контроля основных параметров МФП. Стенд позволяет в автоматическом режиме изменять фоточувствительность, шум, удельную обнаружительную способность, шум, дифференциальное сопротивление каждого фотодиода МФП при значениях времени накопления T_n и напряжении смещения $U_{\text{ДАС}}$, задаваемым от ЭВМ. Напряжение смещения $U_{\text{ДАС}}$ определяет рабочую точку на ВАХ фотодиодов. В качестве источника тестового излучения использовалось АЧТ установки К 54.410 с температурой 500 К. Измерения проводились в стандартных криостатируемых корпусах с апертурой порядка 40° .

Максимальное значение $D^* = 0,8 \cdot 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2} для МФП Н32 (МЛЭ) и $D^* = 4,2 \cdot 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2} для МФП Н30 (ЖФЭ). Оптимальное значение напряжения смещения соответствует обратному смещению ВАХ фотодиодов ~ 50 мВ.

Значение удельной обнаружительной способности $D^* = 4,2 \cdot 10^{10}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2} для МФП Н30 (ЖФЭ) существенно выше, чем у диодов из этого же слоя при апертуре 180° , что обусловлено значительным уменьшением величины тока в рабочей точке из-за существенного уменьшения фонового тока $I(0)$, обусловленного наличием в МФП "холодной" диафрагмы. В МФП Н32 (МЛЭ) этого значения D^* нет, так как вклад фонового тока в величину тока в рабочей точке не преобладающий.

На рис. 6, а представлена гистограмма распределения значений D^* по элементам МФП Н32 (МЛЭ), измеренный при напряжении смещения $U_{\text{ДАС}} = 1060$ мВ и времени накопления 32 мкс.

Разница температур ΔT эквивалентной шуму на нулевой пространственной частоте определяется по формуле:

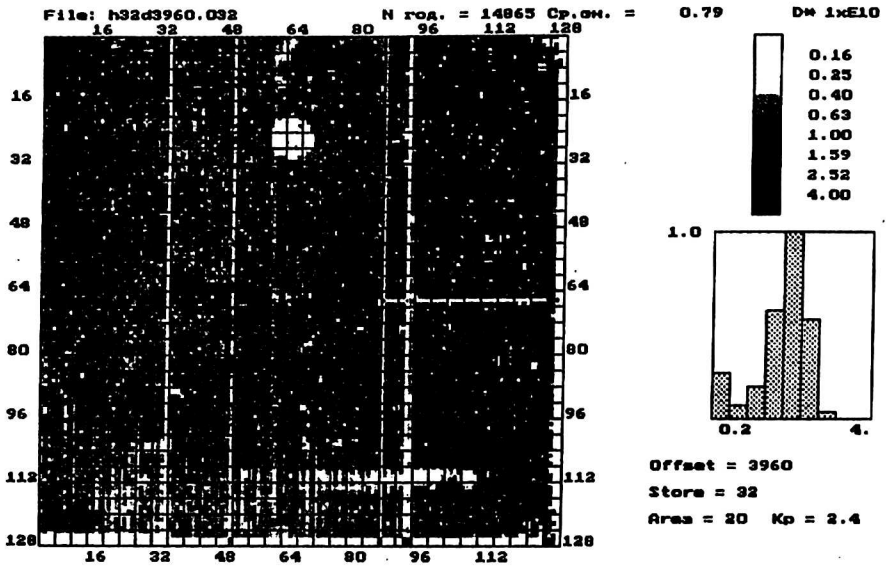
$$T_m = \frac{N (T_2 - T_1)}{S},$$

где N — среднее по МФП напряжение шума;

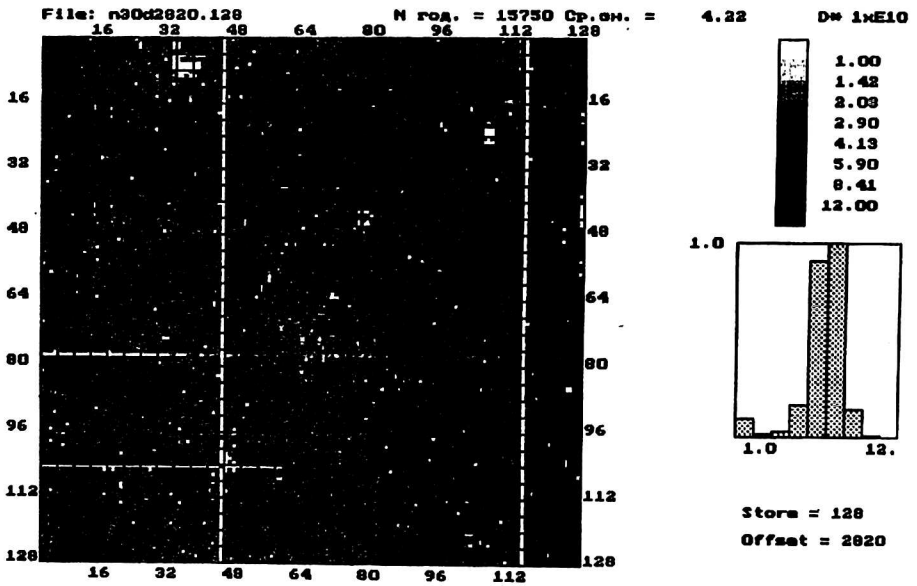
S — средний сигнал по всем элементам МФП при разности температур объектов $T_2 - T_1$.

Измерения величин N и S производились на стенде измерения параметров МФП. При измерениях температуры объектов составляли: $T_1 = 302$ К, $T_2 = T_1 + 5$ К.

Фокусное расстояние объектива 30 мм, относительное отверстие 1:1,5. Кадровая частота 50 Гц. Измеренные значения разницы температур (эквивалентной шуму ΔT) исследованных МФП представлены в табл. 2.



а



б

Рис. 6. Гистограмма распределения значения D^* :
а — по элементам МФП Н32; б — по элементам МФП Н30 (ЖФЭ)

Для сравнения на рис. 6, б приведена гистограмма распределения значений D^* по элементам МФП Н30 (ЖФЭ).

Л и т е р а т у р а

1. Бовина Л. А., Болтарь К. О. и др. Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм//Оптический журнал. 1996. № 6. С. 74—77.
2. Лакеенков В. М.//Цветные металлы. 1991. № 8. С. 55—57.
3. Kenji Awamoto, Nobuyuki Kajihara, Gen Sudo. 64x64 FPA with cutoff wavelength of 10,6 μm using LPE-grown HgCdTe.//Sci. Tech. J. 1994. V. 30. № 2. P. 129—136.
4. Васильев В. В., Войнов В. Г. и др. Фокальные фотоприемные матрицы на основе гетероэпитаксиальных слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs//Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 1. С. 80—85.
5. U nikovsky A., Nemirovsky Y. Trap-assisted tunneling in mercury cadmium telluride photodiodes//Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. № 3. P. 330—332.

STARING CdHgTe 128x128 AND 384x288 FOCAL PLANE ARRAYS

*L. A. Bovina, K. O. Boltar, I. D. Bourlakov, S. V. Golovin, V. Y. Ivanov,
L. D. Saginov, V. I. Stafeev, V. M. Akimov, E. A. Klimanov*
The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

V. M. Lakeenkov
RD&P Centre GIREDMET, Moscow, Russia

Y. G. Sidorov
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

Staring CMT 128x128 and 384x288 LWIR Focal Plane Arrays (FPA) have been developed and investigated. FPA have been developed on the base of epitaxial layers grown both by Liquid Phase Epitaxy (LPE) and Molecular Beam Epitaxy (MBE). The photodiode matrix was bonded to the silicon MOS-Multiplexer which ensured reading, store and output of photosignals from a cooled zone. Performance of FPAs produced by different epitaxial methods are analyzed.