

УДК 535.247.049.7:621.383.52

Гибридное фотоприемное устройство на основе линейки 1x384 InAs МДП-структур для спектрометрических применений

В. М. Базовкин, Н. А. Валишева, А. А. Гузев, В. М. Ефимов, А. П. Ковчавцев,
Г. Л. Курышев, И. И. Ли, А. С. Строганов
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Разработаны технология и конструкция линейки МДП-фотоприемников 1x384 на автоэпитаксиальной подложке InAs и приведены результаты экспериментального обследования ИК-фотоприемного устройства (ИК ФПУ), предназначенного для быстродействующих спектрометров с временами регистрации 0,1–50 мс.

Несмотря на впечатляющие успехи в области ИК ФПУ на основе неохлаждаемых болометров, основным типом в высококачественных ИК-системах остаются охлаждаемые гибридные ИК ФПУ, которые сочетают достоинства ИК-фотоприемников на узкозонных материалах или многослойных квантоворазмерных гетероструктурах с высоким качеством кремниевых устройств считывания [1–6].

Использование ИК ФПУ линейчатого типа позволяет создавать быстродействующие спектрометры, с помощью которых за короткое время (0,1–50 мс) может быть записан спектр излучения или пропускания экспериментального объекта. Использование прямозонного полупроводника — арсенида индия с шириной запрещенной зоны $\sim 0,4$ эВ при температуре жидкого азота позволяет регистрировать тепловое излучение объекта в спектральной полосе 1–3 мкм. Эта спектральная область характерна для валентных колебаний большинства известных молекул.

Технология изготовления МДП-структур на арсениде индия

При использовании МДП-структур на арсениде индия в качестве элементов линейчатых ФПУ необходимо решить две основные задачи:

- сформировать границу раздела полупроводник—диэлектрик с плотностью поверхностных состояний (ПС) ниже 10^{11} см⁻²·эВ⁻¹, временем релаксации поверхностного потенциала в МДП-структурах при неравновесном импульсном обеднении > 15 – 20 мс (при температуре 150 К), плотностью заряда медленных состояний вблизи границы раздела полупроводник—диэлектрик, вызывающих гистерезисные явления

вольтфарадных характеристик (ВФХ) меньше $5 \cdot 10^{-8}$ К/см²;

- создать диэлектрическое покрытие, пригодное для фотолитографии, обеспечивающее пассивацию границы раздела InAs—диэлектрик и выдерживающее рабочие электрические поля $> 3 \cdot 10^6$ В/см.

Основная трудность в получении требуемых и воспроизводимых параметров МДП-структур на арсениде индия связана с существованием на поверхности подложки тонкого (4–6 нм) остаточного окисла сложного нестехиометрического состава, являющегося причиной полевой нестабильности электрофизических параметров МДП-структур и высокой плотности поверхностных состояний на границе раздела InAs—диэлектрик. Существенное влияние на параметры оказывает термическая нестабильность арсенида индия, стехиометрический состав на поверхности подложек которого нарушается при температурах больше 250 °С за счет испарения мышьяка. Последнее обстоятельство задает ограничение по температуре для всех процессов, используемых при изготовлении МДП-структур на арсениде индия, и в первую очередь для метода получения диэлектрического слоя.

МДП-структуры изготавливали на автоэпитаксиальных структурах арсенида индия марок ЭСАИ-40-35-10 и ЭСАИ-92-35-10 Яе0.040 ТУ с ориентацией (111)А и концентрацией основных носителей в эпитаксиальном слое $(1-6) \cdot 10^{15}$ см⁻³, подвижностью $(5-6) \cdot 10^4$ см²·В⁻¹·с⁻¹ и временем жизни неосновных носителей (0,3–1,8) мкс.

В качестве диэлектрика использовали слои двуокиси кремния, полученные окислением моносилана кислородом при пониженном давлении (РПД-SiO₂). Понижение давления позволяет

получать слои SiO_2 при температуре 220°C с напряженностью поля пробоя $(4-6)\cdot 10^6$ В/см². Для стабилизации физико-химических свойств поверхности арсенида индия и ее защиты перед процессом осаждения SiO_2 подложки InAs подвергали анодному окислению. Окисление проводили в гальваностатическом режиме в электролитах, содержащих фторид-ионы. В качестве проводящего электрода использовали легированные слои In_2O_3 , полученные катодным напылением.

Создание на поверхности подложки арсенида индия тонкого фторированного анодного слоя позволяет получить границу раздела $\text{InAs}-\text{SiO}_2$, сравнимую с качеством границы раздела $\text{Si}-\text{термический SiO}_2$ [1]. Величина плотности поверхностных состояний, измеренная методом проводимости на переменном сигнале, составляет величину $N_{ss} < 2\cdot 10^{10}$ см⁻²·эВ⁻¹ [2]. Частотная дисперсия емкости МДП-структур отсутствует. Величина встроенного заряда в окисле составляла $\sim 10^{-7}$ К/см² (напряжение плоских зон $V_{fb} \cong \cong -3$ В). Модификация поверхности арсенида индия обеспечивает высокую воспроизводимость электрофизических свойств границы раздела в МДП-структурах.

Топология и технология изготовления фотоприемных линеек

Фоточувствительная линейка на основе InAs МДП-конденсаторов для спектрометрических задач содержит 384 фотоприемника, конструктивно выполнена в виде сдвоенной линейки 2×192 с шахматным расположением элементов и шагом 50 мкм, фоточувствительная область 26×94 мкм. Разработан вариант топологии однорядной линейки фотоприемников с шагом 25 мкм, фоточувствительная область 17×300 мкм. В этом варианте для улучшения частотно-контрастной характеристики ФПУ зазоры между фотоприемниками защищены металлическим экраном (Ti). При толщине подзатворного диэлектрика (диоксид кремния) 1400 Å емкость МДП-фотоприемника 1,7 пФ, суммарная емкость входа устройства ввода — 3,7 пФ.

Перед нанесением слоя двуокиси кремния (140 нм) на подложках арсенида индия выращивали фторсодержащий анодный подслой (10—15 нм). Затворы из окиси индия заданного размера, формирующие расположение МДП-конденсаторов в линейке, изготавливали методом “взрывной” фотолитографии. Далее наносили

слой защитного диэлектрика (300 нм), в котором вскрывали контактные окна до фоточувствительных площадок. Фотолитографией по термически напыленному титану изготавливали проводящие шины, одновременно формировали защитный металлический экран из титана. Для обеспечения сборки методом групповой холодной сварки фотолитографией по термически напыленному слою индия изготавливали индиевые столбики высотой 5—7 мкм.

Кремниевые системы считывания сигналов с многоэлементных ПЗИ элементов

Кремниевый мультиплексор типа Ф-408 обеспечивает считывание фотосигналов как с МДП-фотоприемников, так и с фотодиодов. Линейки фотоприемников могут быть двух типов: линейка фотоприемников — 1×384 элементов (с шагом 25 мкм) либо сдвоенные линейки фотоприемников 2×192 (с шагом 50 мкм и смещенные относительно одна другой на 25 мкм). Мультиплексоры изготовлены по *n*-канальной технологии с двумя уровнями поликремниевых затворов.

Принципиальная схема мультиплексора приведена на рис. 1. Мультиплексор содержит два зеркально-симметричных 192-входовых мультиплексора с шагом 50 мкм, смещенных относительно друг друга на 25 мкм. В направлении, перпендикулярном оси ФП-линейки, контактные площадки кремниевого мультиплексора разнесены на 580 мкм. Большинство одноименных управляющих контактных площадок обоих мультиплексоров, в том числе информационные выходы мультиплексоров (output), могут быть объединены.

Принцип считывания фотосигналов с МДП-фотоприемников поясняется на рис. 2. При подаче управляющих напряжений — постоянных U_b , U_{dd} , импульсных F_r , F_{inj} , F_{un} (см. рис. 2, а, б) — открываются транзисторы Т1, и затворы МДП-фотоприемников, находящихся в режиме неравновесного обеднения, заряжаются до потенциала S_{ub} , подложка Si мультиплексора заземляется. С окончанием импульса F_r и до окончания импульса F_{un} происходит привязка потенциалов затворов МДП-фотоприемников к потенциалу входной диффузионной области 1, определяемому напряжением U_b на входном затворе 2. Избыточный заряд стекает по цепи входная диффузионная область 1 — зарядно-связанные затворы 2, 3, 4- и 5 в источник питания U_{dd}

(устройство ввода с прямой инжекцией заряда, см. рис. 2, в). При подаче через разделительную емкость C_{inj} импульса инжекции F_{inj} заряд неосновных носителей, накопленный в инверсионном слое ПЗИ-элемента, инжектируется в подложку. С окончанием импульса F_{inj} МДП-фотоприемники снова переводятся в режим неравновесного обеднения. Уменьшение емкости МДП-фотоприемников приводит к уменьшению потенциала на их затворах. Заряд с последних вновь стекает по цепи входной диффузионной области 1 — зарядно-связанные затворы 2, 3 и интегрируется под затвором накопления 4 линейки зарядно-чувствительных усилителей. Потенциал затвора МДП-фотоприемника вновь

привязывается к потенциалу входной диффузионной области 1. С окончанием импульса F_{inj} , по мере накопления неосновных носителей в инверсионном слое МДП-фотоприемников, потенциал на затворах последних возрастает и изолируется от внешних источников питания — начинается новый цикл накопления. Весь режим накопления — режим с фиксированным зарядом на затворе МДП-фотоприемника. При подаче управляющих напряжений на сдвиговый регистр информационные заряды из-под затвора накопления 4 последовательно передаются на общую шину считывания Output.

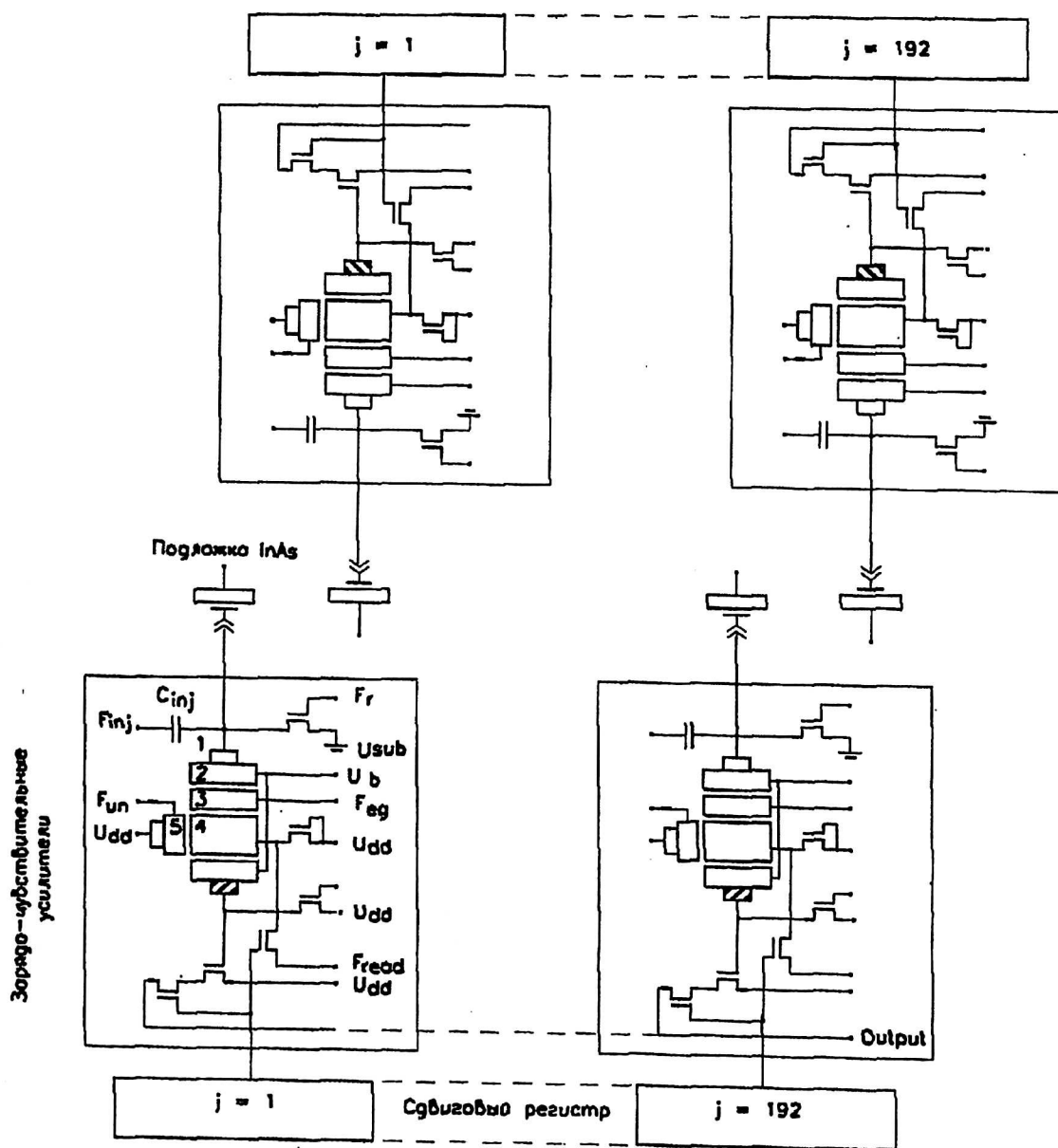
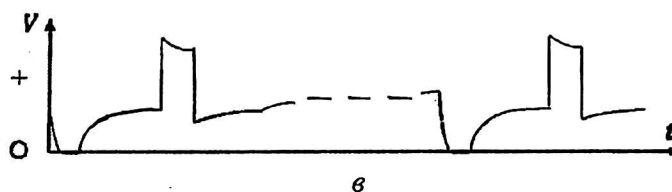
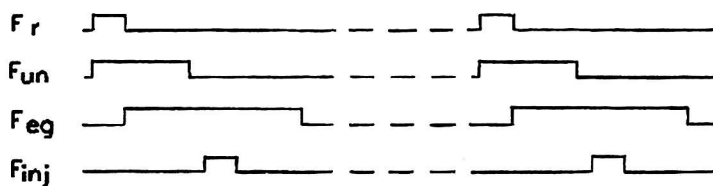
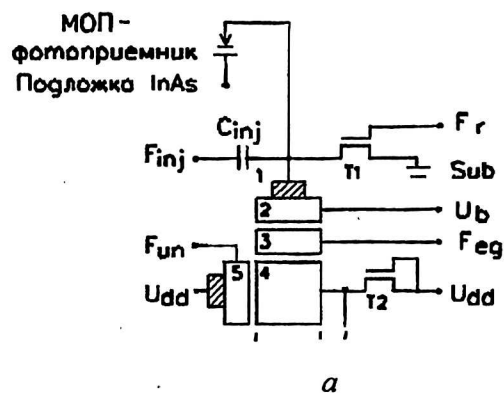


Рис. 1. Схема кремниевого мультиплексора:
1-5 — зарядно-связанные затворы

Рис. 2. Принцип считывания сигнала с МДП-фотоприемников:
a — принципиальная схема кремниевого мультиплексора; *б* — эюры управляющих напряжений; *в* — эюры напряжений на затворе МДП-фотоприемника



Как известно, шум прямоинжекционных устройств ввода определяется kTC -шумами. Число шумовых электронов можно определить по соотношению $N_n \sim (kTC_{in})^{1/2}/q$, где C_{in} — суммарная емкость входа устройства считывания; q — заряд электрона.

Основные параметры кремниевого процессора Φ 408 приведены ниже:

размер кристалла, мм	6,6×10,6
число входных контактных площадок	2×192
шаг входных устройств, мкм	50
максимальная емкость	
накопительной ячейки, электроны	1,0·10 ⁷
уровень собственных шумов, электроны, не более	600
тактовая частота, МГц, не более	5
потребляемая мощность, мВт	50
число информационных выводов	2
динамический диапазон, дБ, не менее	75

Конструкция фотоприемного модуля

Конструкция Si мультиплексора Φ 408 допускает возможность реализовать два варианта гибридной микросхемы.

В первом варианте (рис. 3, а) кристалл ФП-линейки размещается между входами двух мультиплексоров и электрически соединяется с последними In микростолбиками высотой 5—7 мкм методом flip-chip. Засветка фоточувствительных элементов осуществляется через предварительно просветленную непланарную сторону кремниевой подложки мультиплексора (подложка кремниевого мультиплексора выполняет роль фильтра, отсекающего видимое излучение). В этом конструктиве гибридного модуля спектральный диапазон 1,1—3,1 мкм; в области 0,5—1,1 мкм ограничивается поглощением в подложке Si мультиплексора. Во втором варианте (рис. 3, б) кремниевый мультиплексор разделяется на два независимых. Фотосигнал проецируется непосредственно на фотоприемники, и становится возможной реализация спектрометра на автоэпитаксиальных структурах InAs со спектральным диапазоном 0,5—3,1 мкм. Ниже приводятся экспериментальные результаты обследования модуля, собранного по первому варианту.

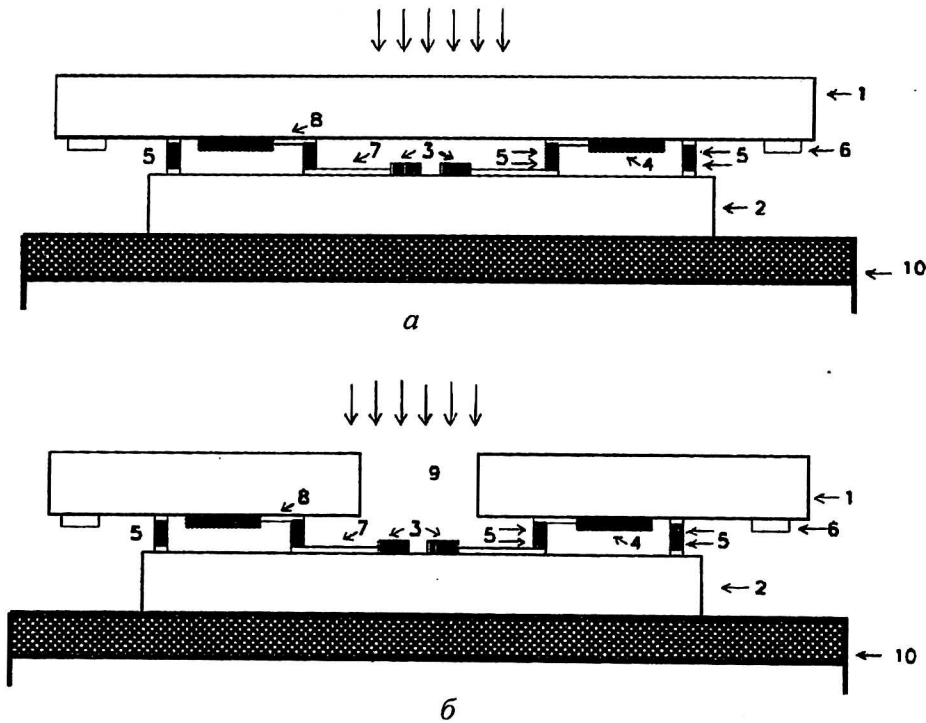


Рис. 3. Конструкция ФП-модуля:

а — ИК-излучение проходит сквозь кремниевую подложку мультиплексора; *б* — через специальное отверстие в кремниевом мультиплексоре:

- 1 — кремниевый мультиплексор; 2 — ФП-линейка МДП-конденсаторов; 3 — фоточувствительные области МДП-конденсаторов; 4 — устройство ввода; 5 — индиевые микростолбики; 6 — выходные контактные площадки шин управления и информационных сигналов; 7 и 8 — подводящие шины; 9 — отверстие в кремниевой подложке; 10 — охлаждаемый пьедестал в криостате

Криостат

Модуль ФПУ устанавливается в заливной вакуумный криостат с угольным геттером. Параметры криостата: объем жидкого азота — 0,2 л; теплоприток ~ 0,52 Вт; время непрерывной работы без дозаправки азотом — не менее 12 ч; температура платформы 78—81 К; время выхода на режим ~ 10 мин; масса (без азота) ~ 1,2 кг, габаритные размеры (*h, b, l*) — 104×83×155 мм; расстояние от ФПУ до наружной поверхности окна 3—14 мм.

Расчетное время удержания вакуума в криостате ориентировочно 11 лет.

Блок-схема спектрометрического модуля ФПУ

После установки гибридной микросхемы в криостат сначала проводилось тестирование модуля ФПУ при комнатной температуре, а затем герметизация, откачка и обезгаживание криостата с модулем ФПУ. После проверки работоспособности модуля ФПУ в криостате при температуре

жидкого азота проводились фотоэлектрические измерения модуля ФПУ в криостате.

Блок-схема спектрометрического модуля ФПУ в криостате приведена на рис. 4. Тепловое излучение объекта проходит сквозь лейкосапфированное окно криостата, предварительно просветленную непланарную сторону кремнивого кристалла мультиплексора и попадает на фоточувствительные элементы линейки модуля ФПУ, установленного в вакуумном криостате. Уровень фоновой засветки ограничен холодной диафрагмой. Все необходимые для работы ФПУ постоянные и импульсные напряжения подаются с генератора. Термодатчик (диод на кремниевом мультиплексоре) соединен с входом измерителя температуры и автомата включения напряжения смещения подложки InAs. Подача напряжения смещения на подложку InAs при температурах выше 120 К может привести к изменению встроенного в диэлектрик МДП-фотоприемника заряда и фоточувствительности элементов линейки. Чтобы этого не происходило, автомат включения напряжения срабатывает при охлаждении ФПУ до температуры ~ 90 К.

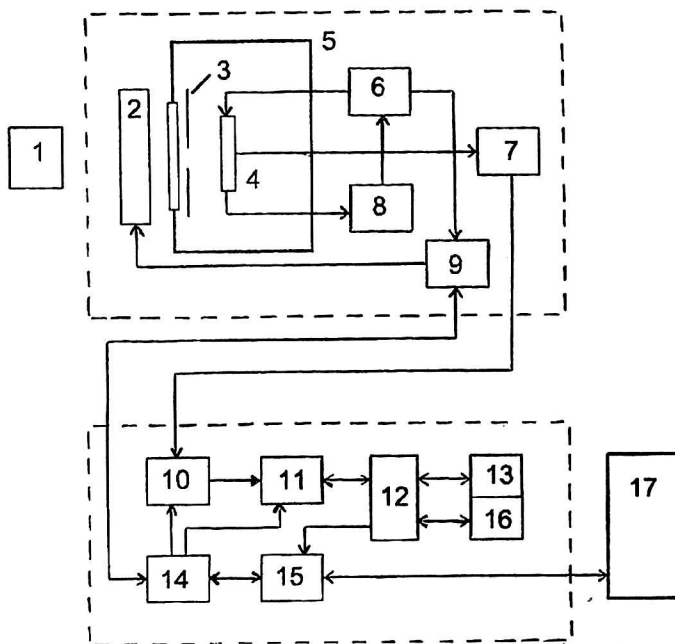


Рис. 4. Блок-схема спектрометрического модуля ФПУ в криостате:

1 — АЧТ; 2 — устройство калибровки; 3 — холодная диафрагма; 4 — линейчатое ФПУ; 5 — вакуумный криостат с просветленным окном; 6 — генератор управляющих импульсных и постоянных напряжений; 7 — усилитель с дифференциальным выходом; 8 — измеритель температуры ФПУ и автомат включения напряжения смещения подложки InAs; 9, 14 — блоки управления и синхронизации; 10 — АЦП; 11 — сумматор; 12 — диспетчер памяти; 13, 16 — банки памяти; 15 — блок связи с ЕРР параллельным портом; 17 — ЕРР параллельный порт персонального компьютера

Устройство калибровки состоит из двух подвижных шторок (зеркальной и черной), каждая из которых приводится в движение отдельным электромагнитом. Последние управляются блоком 9, который также служит для передачи в блок 14 импульсов, синхронизирующих работу АЦП, сумматора, блока связи с ЕРР параллельным портом и передачи информации о состоянии автомата 8. Команды управления электромагнитами передаются из компьютера через блоки 9, 14, 15.

Полезный сигнал с выходов ФПУ подается на вход усилителя с дифференциальным входом. Усиленный (в 70 раз) полезный сигнал подается на дифференциальный вход 12-разрядного АЦП AD9220AR фирмы Analog Devices. Выход АЦП подключен к входу сумматора, который вычисляет разность двух соседних выборок с каждого элемента ФПУ (двойная коррелированная выборка). Полученная разность складывается со значением суммы, полученной по предыдущим кадрам, хранящимся в одном из банков памяти (13, 16). Одновременно из другого банка памяти информация передается в персональный компьютер через блок связи 15 и ЕРР параллельный

порт. Назначение банков памяти для работы с сумматором и портом производится диспетчером памяти. Объем каждого банка памяти — $16K \times 16$.

Блоки 6, 8, 9 выполнены на микросхеме XC95108, а блоки 11, 12, 14, 15 — на микросхеме XC95288XL фирмы Xilinx. Усилитель 7 выполнен на микросхемах AD811 фирмы Analog Devices и OPA2658 — фирмы Burr Brown. Для уменьшения уровня помех все управляющие сигналы синхронизированы от кварцевого генератора, а аналого-цифровой преобразователь и блоки 11–16 вынесены за пределы корпуса прибора и размещены на плате связи с параллельным портом компьютера. Аналоговое напряжение сигнала передается из блока 7 в блок 10 по кабелю (витая пара). Одна из линий кабеля (двухнаправленная), соединяющая блоки 9, 14, использована для передачи смеси синхроимпульсов и команд управления шторками устройства калибровки. Четыре жилы кабеля (питание на электромагниты подается по отдельным проводам) использованы для питания прибора от блока питания компьютера. Напряжение 12 В. Потребляемая спектрометрическим модулем мощность не превышает 3,6 Вт.

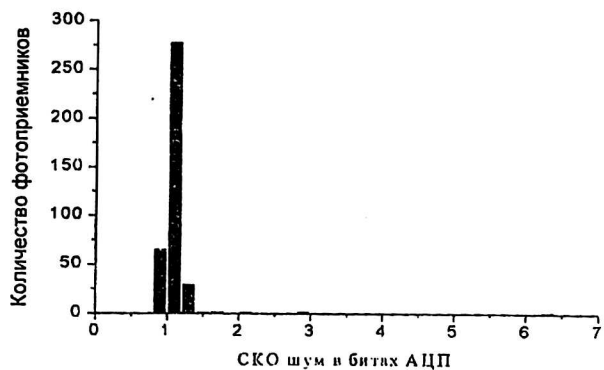
Экспериментальные результаты

В качестве источника излучения использовалось абсолютно черное тело (АЧТ) с температурой полости 573 К (300 °С).

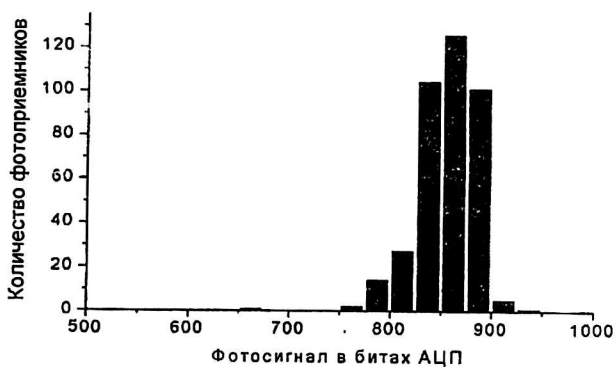
Условия измерений были следующими:

время накопления (t_{ac}), мс.....	10
температура модуля ФПУ, К.....	80
расстояние от АЧТ до фотослоя, мм.....	470
диаметр диафрагмы АЧТ, мм.....	8

Диафрагма ФПУ представляет собой узкую щель размерами 2×13 мм, расположенную на расстоянии 11 мм от фотоприемных элементов. Набор диафрагм АЧТ позволяет в широких пределах изменять величину падающего потока ИК-излучения. На рис. 5, а приведены гистограмма распределения фотосигналов линейки ФПУ при мощности падающего потока ИК-излучения $\approx 1,7 \cdot 10^{-7}$ Вт/см² и среднеквадратическое значение напряжения шума (рис. 5, б) при числе выборок 128. Шум измерялся при закрытой диафрагме АЧТ, тепловой фон в рабочем диапазоне длин волн оценивался величиной $2 \cdot 10^{-7}$ Вт/см². В этих условиях элементы ФПУ-линейки работали в режиме ограничения комнатным фоном. Рассчитанное из экспериментальных данных среднее значение обнаружительной способности $D^* \approx 1,5 \cdot 10^{12}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹, и лишь пять элементов имеют избыточные шумы, их D^* не хуже $0,5 \cdot 10^{12}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹.



а



б

Рис. 5. Гистограмма распределения:

а — фотосигналов линейки ФПУ 1×384 (в битах АЦП);
 б — напряжения среднеквадратичного шума линейки ФПУ 1×384 (в битах АЦП)

Полученные экспериментальные результаты сравнивались с теоретическими расчетами, которые проводились в рамках одномерной модели плоского МДП-конденсатора. Решалась самосогласованная задача о накоплении заряда в МДП-конденсаторе при освещении (уравнение Пуассона совместно с уравнениями непрерывности). Теоретические значения обнаружительной способности (при квантовой эффективности фотоприемников ~ 0,8) выше экспериментальных примерно в два раза. Причина, по-видимому, обусловлена потерями полезного сигнала на конструкции модуля ФПУ (отражением и поглощением полезного сигнала на кремниевом мультиплексоре, оптическом окне криостата и т. д.). Сборка фотоприемного модуля по второму варианту обеспечит уменьшение потерь и увеличит обнаружительную способность ФПУ, расширит спектральный диапазон в область коротких длин волн до 0,4 мкм. Si-мультиплексор дает возможность регулировать время накопления в пределах от $5 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-2}$ с (максимальное время накопления ограничивается зарядовой емкостью МДП-фотоприемника либо зарядовой емкостью устройства считыва-

ния), при этом обнаружительная способность меняется от 1 до $3 \cdot 10^{12}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}.

Спектральные характеристики InAs МДП-структур измерялись на базе инфракрасного спектрометра ИКС-31 при постоянной, не зависящей от длины волны мощности излучения. Точность поддержания потока излучения на заданном уровне не хуже 5 %. Частота модуляции светового потока 12,5 Гц. Длинноволновая граница чувствительности определяется краем собственного поглощения в InAs (рис. 6). В спектральном диапазоне (~2,7—2,8 мкм) видна полоса поглощения, обусловленная наличием паров воды в атмосфере (оптическая база спектрометра ~ 50 см).

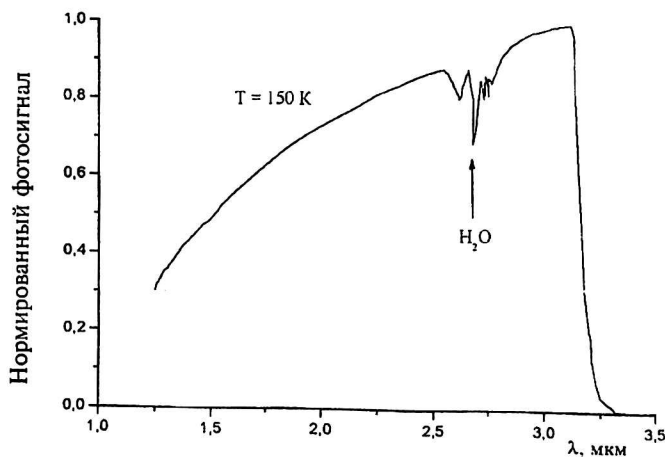


Рис. 6. Типичная спектральная характеристика фотоприемного элемента линейки при температуре 150 К

Выводы

1. Разработана технология изготовления МДП-фотоприемников на основе полупроводников InAs для решения задач ИК-спектрометрии. Технология позволяет получить воспроизводимые параметры границы раздела полупроводник—диэлектрик и реализовать практически бездефектные фотоприемные линейки.
2. Разработан и изготовлен кремниевый мультиплексор, обеспечивающий считывание и предварительную обработку сигналов с линейчатых модулей ФПУ. Мультиплексоры могут также быть использованы с другими типами фотоприемных элементов, например с *p-n*-переходами.
3. Разработана конструкция криостата, обеспечивающего длительную работу фотоприемных модулей.
4. Изготовлено ФПУ линейчатого типа 1×384, имеющее высокую обнаружительную способность $D^* \approx 1,5 \cdot 10^{12}$ см·Вт⁻¹·Гц^{1/2}, близкую к режиму ограничения чувствительности флуктуа-

циями фонового излучения (режим ОФ при фоновом потоке $2 \cdot 10^{-7}$ Вт/см²).

Литература

1. Valisheva N. A., Levitsova T. A. et al.// Surface investigation, 2000. V. 15. P. 1667—1675.
2. Курьшев Г. Л., Ковчавцев А. П., Валишева Н. А.// ФТП, 2001. Т. 35. Вып. 9. P. 1111—1119.
3. Rogalsky A. et al. Infrared Photon Detectors// The Society of Photo-Optical Engineering, 1995.
4. Beck W. A. and Fasca T. S. Current Status of Quantum Well Focal Plane Arrays// SPIE. V. 2744. P. 193—205.
5. Fossum E., Pain B. Infrared Readout Electronics for Space Science Sensors: State of the Art and Future Directions// SPIE. V. 2020; Infrared Technology XIX. P. 262—285.
6. Курьшев Г. Л. и др. Портативный быстродействующий тепловизор на основе фокальной матрицы МДП-конденсаторов на InAs// Автометрия, 1998. № 4. С. 13.

1×384 Hybrid linear infrared focal plane arrays applied to spectroscopic on InAs MIS structure

V. M. Bazoukin, N. A. Valisheva, A. A. Guzev, V. M. Efimov, A. P. Kovchavtzev,
G. L. Kuryshev, I. I. Lee, A. S. Stroganov
Institute of Semiconductors Physics, Siberian Branch of Russian Academy
of Science, Novosibirsk, Russia

Technology and design of the linear 1×384 MIS photodetectors on the InAs homoepitaxial substrate are developed. The experimental results IR focal plane arrays (IR FPA) intended for rapid IR spectrometers with time registrations 0,1—50 ms are presented.