

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 535.215.1 : 538.97 : 53.082.52

Б. Г. Вайнер

(Новосибирск)

**ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ
НА ПОВЕРХНОСТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЛОКАЛЬНОГО ФОТООТКЛИКА В МДП ПЗИ-ЯЧЕЙКАХ,
ЧАСТИЧНО ЭКРАНИРОВАННЫХ ОТ ЛАТЕРАЛЬНОЙ ЗАСВЕТКИ**

Приведены результаты исследований фотоотклика МДП-ячеек приборов с зарядовой инжекцией (ПЗИ) с применением сканирующего инфракрасного зонда малых размеров. Локальная засветка разных участков ПЗИ-элементов, созданных на основе арсенида индия, позволила выявить различие пороговых напряжений смещения для фотоответа, генерируемого в центре чувствительной площадки и на ее периферии. Показано, что при наличии открытых (не экранированных от излучения) участков, окружающих полупрозрачный полевой электрод, латеральный локальный фотоотклик может достигать 50–60 % от значений сигнала, измеренного в центре площадки. С учетом выявленных особенностей периферийной чувствительности количественно определена структура интегрального фотоответа, полученного при однородной (фоновой) засветке многоэлементных ПЗИ. Обсуждены физические модели, отражающие полученные результаты. В частности, показано, что пороговое напряжение смещения МДП-структур с низкотемпературной двуокисью кремния, используемой в качестве двухслойного диэлектрика, не описывается простой моделью накопления положительного заряда в объеме пленок при их синтезе. Продемонстрирована определяющая роль диффузии неосновных носителей вдоль поверхности полупроводника в эффектах генерации избыточного фотоответа ПЗИ-элементов на основе InAs. В структурах, характеризующихся избыточным латеральным фотооткликом, показано существование рабочего диапазона напряжений, внутри которого тем не менее может быть обеспечено высокое пространственное разрешение многоэлементных МДП ПЗИ. Обращено внимание на возможность проявления подобных эффектов в приборных структурах, созданных на других полупроводниковых материалах.

Введение. Физические принципы работы фоточувствительных МДП-ячеек в приборах с зарядовой инжекцией (ПЗИ) предусматривают периодическую подачу на полевой электрод импульсов напряжения, приводящих к неравновесному обеднению приповерхностной области полупроводника, на фоне постоянного смещения V_G [1]. Величину V_G подбирают обычно так, чтобы, с одной стороны, обеспечить исходное состояние обеднения (или сла-

бой инверсии) поверхности под полевым электродом, а с другой – не вызвать при этом появления заметных сквозных токов через диэлектрик и не способствовать возникновению дополнительного шума и дополнительных механизмов полевой генерации неосновных носителей в зоне неравновесной потенциальной ямы. Последнее условие становится существенным в случаях, когда исходный встроенный в диэлектрик заряд велик и требует подачи достаточно больших напряжений для его компенсации. В многоэлементных приемниках излучения оптимизацию значений управляющих напряжений ПЗИ-ячеек проводят обычно с целью достижения наибольшей и стабильной во времени фоточувствительности.

При изменении V_G полевая нестабильность фотоответа МДП-структур, изготовленных на основе узкозонных полупроводников типа A^3B^5 , в значительной степени связана с процессами инжекции и накопления заряда в подзатворном диэлектрике [2–7]. Величина фотоотклика, в свою очередь, существенно зависит от глубины подэлектродной потенциальной ямы, хотя известны и некоторые паразитные эффекты, приводящие к увеличению фотоответа. Они бывают обусловлены процессами тангенциального растекания заряда по диэлектрику [8]; возможно также «подключение» к МДП-ячейке периферийных участков поверхности полупроводника, примыкающих к внешней границе ПЗИ-элемента и вносящих вклад в суммарный фотоответ [1, 9]. В количественном отношении влияние последнего эффекта обычно малоизвестно, поскольку при аттестации многоэлементных устройств довольно часто обходятся лишь измерениями фотоэлектрических характеристик в режиме однородной засветки сразу всей площади линейчатого или матричного фотоприемника.

В данной работе проведено экспериментальное исследование полевой зависимости фотоотклика ПЗИ-ячеек, созданных на основе арсенида индия, при реализации режима локальной (точечной) засветки МДП-структуры как в пределах границ ее полевого электрода, так и в зоне периферийных областей.

Выбор арсенида индия для исследуемых модельных систем обусловлен тем, что в сравнении с другими узкозонными материалами для него в настоящее время достаточно хорошо отработана технология создания МДП-структур [10]. Кроме того, многоэлементные линейки и матрицы на базе таких структур убедительно продемонстрировали свою практическую значимость в качестве высокочувствительных детекторов в современных приборах инфракрасной техники (см., например, [11–13]).

Методика эксперимента и образцы. Для формирования светового пятна малых размеров использовался зеркальный оптический прибор, построенный на базе промышленного инфракрасного облучателя ИКО-1, который имел два оптических канала. В одном формировалось центрально-симметричное пятно (ИК-зонд) с эффективным диаметром 18–20 или 27–28 мкм. Форма распределения интенсивности излучения в пятне имела вид узкого колокола, так что основная доля энергии была сосредоточена в его центральной части. Микрометрические подачи с цифровым отсчетом позволяли позиционировать ИК-зонд с точностью 1 мкм. С помощью другого канала можно было обеспечить однородную (фоновую) засветку ПЗИ-ячейки на площади, существенно превышающей ее конструктивные размеры. Источником излучения служил глобар. Ширина рабочего спектрального диапазона, заданного интерференционным фильтром, составляла около 0,2 мкм вблизи длины вол-

ны $\lambda = 2,8-2,9$ мкм, т. е. спектральная область измерений лежала недалеко от края фундаментального поглощения InAs, соответствующего температуре кипения жидкого азота, при которой находился образец, помещенный в оптический криостат. Интенсивность засветки обеспечивала работу ПЗИ-ячеек в режиме их линейной характеристики чувствительности.

Конфигурация экспериментальных образцов ПЗИ МДП-структур показана на рис. 1, а. Полупрозрачный полевой электрод 1 представлял собой легированную оловом пленку In_2O_3 (см., например, [14, 15]), наносимую путем ионно-плазменного напыления. Он был изолирован от выращенного на сильнолегированной InAs подложке эпитаксиального слоя арсенида индия (с концентрацией электронов $(3 \pm 2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) слоем пиролитической двуокиси кремния толщиной около 120 нм («тонкий» диэлектрик). Проводящая металлическая шина 2, ведущая к МДП-ячейке, создавалась методами фотолитографии на диэлектрике SiO_2 толщиной около 400 нм («толстый» диэлект-

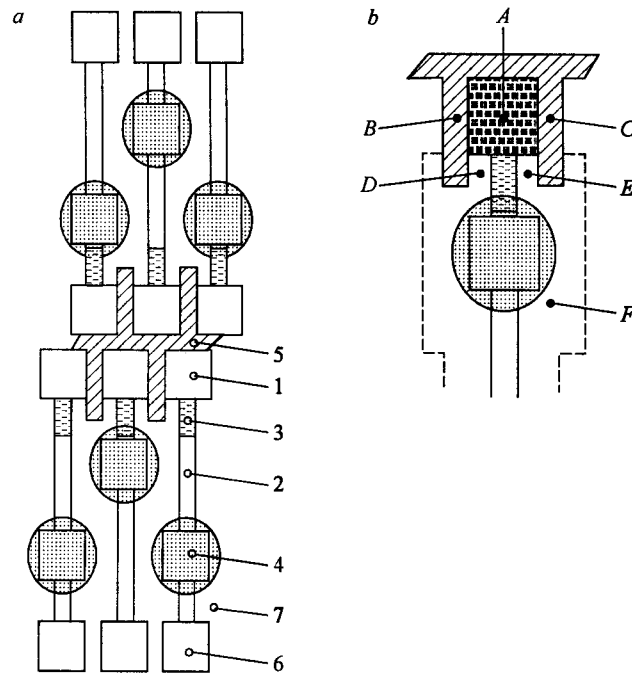


Рис. 1. Схематическое изображение фрагмента исследованной многоэлементной двухрядной линейки МДП ПЗИ-структур (вид сверху): 1 – полупрозрачный полевой электрод (In_2O_3), лежащий на «тонком» диэлектрике SiO_2 ; 2 – проводящая металлическая шина, лежащая на «толстом» диэлектрике SiO_2 ; 3 – место соединения полевого электрода с проводящей шиной (через окно в толстом диэлектрике); 4 – контактная площадка с индиевым столбиком для соединения с выводной шиной, лежащей выше на пластине из лейкосапфира (условно показано, что столбик слегка раздавлен в процессе гибридной сборки); 5 – светозащитная металлическая пленка (экран), нанесенная на внешнюю поверхность толстого диэлектрика; 6 – технологические контактные площадки для предварительного тестирования линеек; 7 – эпитаксиальный слой n -InAs (выращенный на n^+ -InAs подложке) с нанесенными на него пленками тонкого и толстого диэлектриков SiO_2 (а); A, B, C, D, E, F – контрольные точки в окрестности фоточувствительного элемента (б)

рик). Диэлектрические пленки получали окислением моносилана в кислороде при температуре около 200 °С. Внешние (не показанные на рисунке) шины, лежащие на несущей прозрачной подложке из лейкосапфира толщиной 0,2 мм, соединяли с помощью встречных индиевых столбиков шины 2 с соответствующими ячейками кремниевого мультиплексора, обеспечивающего последовательное считывание сигналов с фоточувствительных МДП-элементов линейки. Значительная часть зоны, расположенной вокруг полевого электрода, была закрыта металлической пленкой 5, лежащей, как и контактная шина 2, на толстом диэлектрике и экранирующей межэлектродные промежутки от излучения. Существенно, что в окрестности точек *D* и *E* (рис. 1, *b*) экран отсутствовал. Такие технологические зазоры были предусмотрены, чтобы исключить возможность случайных закороток экрана с проводящими шинами или с раздавленными при сборке гибридной микросхемы индиевыми столбиками.

Следует отметить, что в исследованных образцах величина зазора между соседними полевыми электродами составляла 20 мкм и была сравнима с эффективным диаметром ИК-зонда. По этой причине излучение, сосредоточенное в пятне, помещенном в точку *B* или *C* (см. рис. 1, *b*), не экранировалось в полной мере защитной металлической пленкой и частично могло попадать на края фоточувствительных областей ячеек ПЗИ. Этот эффект принимался во внимание при анализе результатов.

Экспериментальные результаты. На рис. 2 приведены экспериментально полученные зависимости величины фотоответа U_s от приложенного постоянного напряжения смещения V_G , измеренные при расположении ИК-зонда в контрольных точках *A–F*, окружающих ячейку и отмеченных на рис. 1, *b*. Для каждой кривой последовательное изменение величины V_G переводило приповерхностную область МДП-емкости из состояния обогащения к инверсии. Данный режим полевого воздействия был выбран из соображений обеспечить воспроизводимость результатов путем снижения роли зарядовых ловушек в диэлектрике, ответственных за слабополевую нестабильность МДП-структур на основе узкозонных полупроводников [16]. Относительно постоянного смещения V_G на полевой электрод подавались отрицательные импульсы неравновесного обеднения, сбрасываемые положитель-

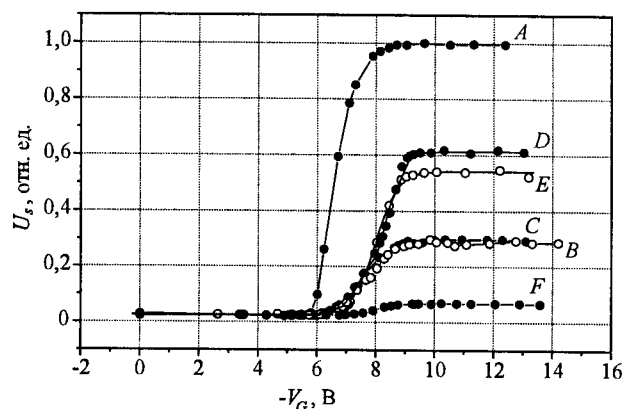


Рис. 2. Зависимость фотосигнала в контрольных точках, отмеченных на рис. 1, *b*, от постоянного напряжения смещения, приложенного к полевому электроду МДП-структуры

ными импульсами инжекции (амплитудой около 2 В) накопленного в ячейке заряда.

Форма кривых, приведенных на рис. 2, качественно соответствует виду высокочастотных вольт-фарадных характеристик МДП-структур. В левой части графика приповерхностная область МДП-структуры находится в состоянии сильного обогащения и полезный сигнал (фотоответ) отсутствует. В области электрических полей, соответствующих правой части графика, при достаточно больших значениях V_G импульсы неравновесного обеднения подаются на фоне глубокой инверсии поверхности; при этом наблюдается насыщение фотосигнала. Начало перехода поверхности из обогащения к инверсии примерно соответствует напряжению плоских зон МДП-структур, хотя для данных экспериментов правильнее говорить о некотором локальном (в области расположения ИК-зонда) пороговом напряжении, поскольку оно зависит, в частности, от величины встроенного в диэлектрик заряда в окрестности пятна излучения.

Из рис. 2 видно, что в области насыщения периферийный фотоответ может достигать значений до 60 % сигнала, измеряемого в центре площадки. При этом следует учитывать, что коэффициент пропускания используемых пленок In_2O_3 (прозрачность которых находится в прямой связи с их проводимостью) достаточно велик (около 94 %) в рабочем спектральном диапазоне, т. е. наблюдаемый факт сравнительно высокого латерального фотоответа нельзя интерпретировать от обратного, а именно с позиции сравнительно низкого локального фотоотклика в зоне полевого электрода. В связи с этим обнаруженную чувствительность периферийной области МДП-структуры необходимо расценивать как весьма значительную по отношению к чувствительности рабочей (подэлектродной) области.

Другой результат, который следует из данных рис. 2, – это отличие порогового напряжения в центральной части площадки от порога в любой иной области на периферии. Более убедительно этот эффект представлен на рис. 3, где все кривые рис. 2 нормированы путем приведения к своему макси-

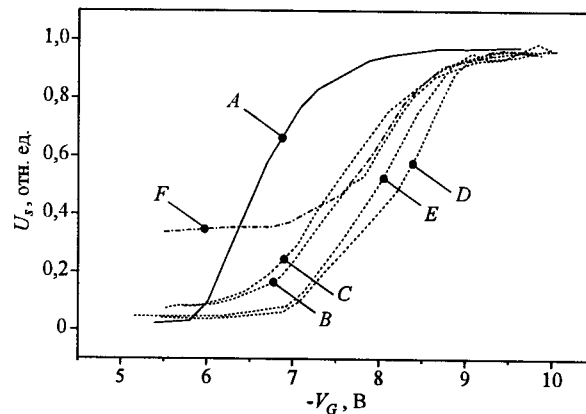


Рис. 3. Нормированные на максимум сигнала экспериментальные зависимости рис. 2, количественно отражающие сдвиг порогового напряжения фотоответа на участках латеральной засветки МДП-ячеек по отношению к локальной засветке центральной части элемента. A, B, C, D, E, F – контрольные точки, показанные на рис. 1, b

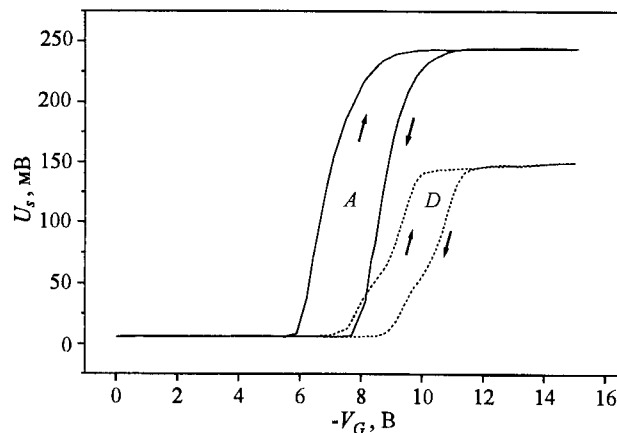


Рис. 4. Гистерезис зависимостей локального фототовета от постоянного смещения на полевом электроде, наблюдаемый при расположении ИК-зонда в центре фоточувствительной площадки (A) и в области контрольной точки D, отмеченной на рис. 1, b. Стрелки показывают направление изменения величины V_G при записи характеристик

мальному значению, принятому за единицу. Надежно регистрируемый сдвиг пороговых напряжений на периферии относительно порога в центре полевого электрода превышает по величине 1 В, а в среднем составляет около 1,5 В. Для четных и нечетных элементов линейки результаты качественно совпадают.

Наблюдаемый эффект нельзя отнести к погрешности, связанной с влиянием остаточного заряда в диэлектрике, обуславливающего низковольтный гистерезис вольт-фарадных характеристик. Экспериментальные результаты, исключающие это предположение, приведены на рис. 4, из которого следует, что при переходе от одной контрольной точки поверхности к другой кривая $U_s(V_G)$ периферийной фоточувствительности смещается вдоль оси V_G относительно кривой в центре площадки синхронно со «своим» индивидуальным низковольтным гистерезисом.

Абсолютная величина исходного встроенного в диэлектрик заряда также не влияет на наблюдаемый эффект сдвига периферийных зависимостей $U_s(V_G)$. Это продемонстрировано на рис. 5 для разных ПЗИ-модулей, укомплектованных InAs-линейками с отличающимися значениями начального порогового напряжения.

Латеральная фоточувствительность МДП ПЗИ-ячеек, как отмечалось выше, может существенно влиять на величину суммарного (интегрального) фототовета, измеряемого при сплошной (или фоновой) засветке фотоприемной линейки (матрицы). Поскольку число квантов в приходящем излучении и величину результирующего сигнала часто определяют или оценивают, учитывая лишь конструктивные размеры полевого электрода, то наблюдаемое подключение паразитных каналов (дополнительных источников фототовета) в области границ контактных площадок должно, несомненно, привести к неадекватности подобных расчетов.

Подтверждением тому, что периферия МДП-элемента заметно участвует в структуре интегрального фототовета при однородной засветке многоэлементного ПЗИ, служат экспериментальные данные, приведенные на рис. 6. Здесь однородная засветка фотоприемника производилась при такой интен-

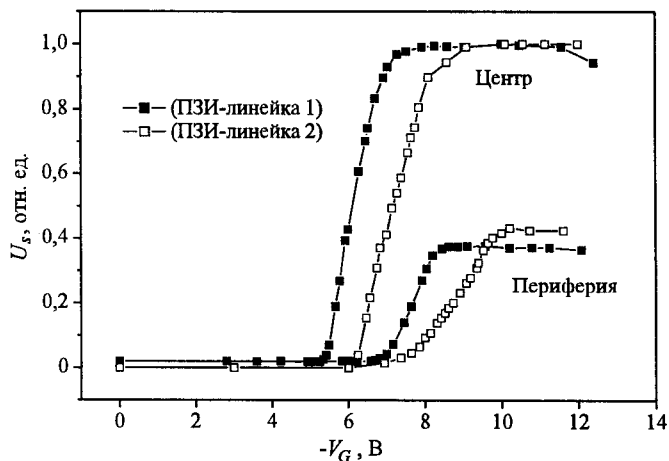


Рис. 5. Сравнение зависимостей фотоответа от приложенного смещения для двух разных ПЗИ-модулей, демонстрирующее отсутствие влияния величины исходного встроенного в диэлектрик МДП-структур заряда на эффект разнесения пороговых напряжений полевых зависимостей локальной фоточувствительности в центре и в области периферии ПЗИ-ячейки

сивности ИК-излучения, чтобы максимальная величина сигнала оказалась близкой к максимальному сигналу, измеряемому в альтернативном режиме — при локальной засветке МДП-ячейки. Хорошо видно, что при малых напряжениях смещения (зона I) интегральный фотоответ, соответствующий фоновому облучению, возрастает качественно точно так же, как происходит рост фотоответа при расположении пятна излучения в центре площадки. Затем

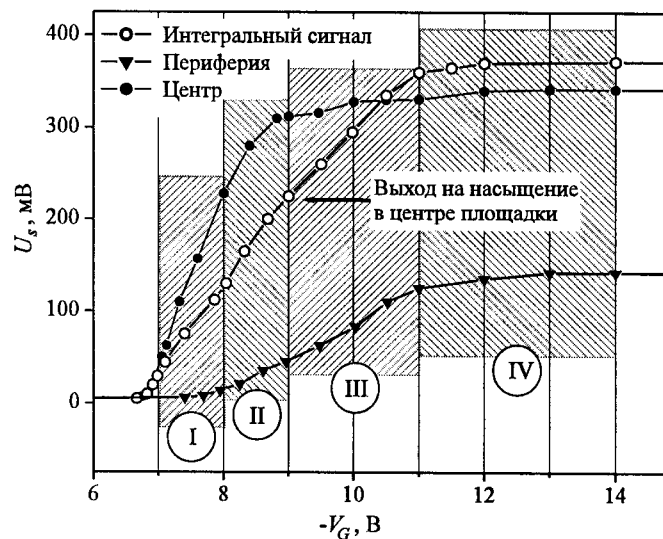


Рис. 6. Сопоставление полевых зависимостей фотоответа при однородной (фоновой) и локальных засветках МДП-ячейки. В режиме локальной засветки ИК-зонд помещался в центр полевого электрода или в область периферии ПЗИ-элемента. Отмеченные римскими цифрами зоны изменения фотосигнала прокомментированы в тексте

(зона II), начиная (в рассматриваемом примере) приблизительно с $V_G = -8$ В, подключается периферия, и фоновый сигнал приобретает дополнительный рост. При переходе локального сигнала в центре площадки в область насыщения (зона III) фоновый фотоответ все еще продолжает расти в полном соответствии с характеристикой роста периферийного сигнала и лишь при выходе последнего на насыщение (зона IV, $|V_G| > 11$ В) сам насыщается. Привлекает внимание такой факт, что у экранированной казалось бы почти со всех сторон ПЗИ-ячейки суммарный вклад периферийных областей в интегральный фотоответ при больших напряжениях смещения составляет около 70 % (!) сигнала, который вырабатывается к моменту, когда локальный фотоответ, измеряемый в центральной зоне полевого электрода, уже выходит на насыщение. Стрелка на рис. 6 отражает описанную структуру интегрального фотоответа, условно разделяя его на части, в одной из которых доминирует центральная область полевого электрода, а в другой сигнал практически полностью обусловлен периферийной фоточувствительностью.

Особенности деградации периферийного фотосигнала при уменьшении напряжения смещения хорошо выявляются на координатных характеристиках локальной чувствительности, измеренных при сканировании фотоприемного модуля ИК-зондом вдоль линий, проходящих поперек линейки в промежутках между соседними полевыми электродами одного ряда. Соответствующие зависимости приведены на рис. 7. Здесь начало координат выбрано на оси, пересекающей центры полевых электродов линейки.

Пик, соответствующий началу координат и отмеченный на графике рис. 7 стрелкой 1, обусловлен частичным попаданием пятна излучения на фоточувствительные площадки (смежные полевые электроды), о чем говорилось выше при описании методики эксперимента. Уменьшение высоты

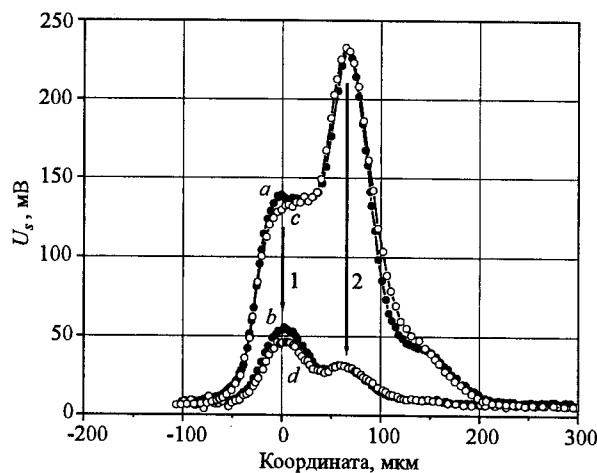


Рис. 7. Полевая зависимость формы координатных характеристик чувствительности, измеренных вдоль линий, проходящих поперек линейки между МДП-ячейками. Положительное направление координат выбрано от центральной оси линейки в сторону контактных площадок: *a, b* – сигнал с четного элемента (№ 102) при сканировании между элементами № 101 и № 102; *c, d* – сигнал с нечетного элемента (№ 101) при сканировании между элементами № 100 и № 101. Напряжение на полевым электроде: -11 В (*a, c*), $-7,5$ В (*b, d*)

этого пика при изменении напряжения соответствует данным, приведенным на рис. 2 для контрольных точек *B* и *C*. Необычным является то, что в представленном диапазоне напряжений локальный фотоответ, регистрируемый непосредственно в центре полевого электрода, практически сохраняется по величине (см. рис. 2). Соответственно можно сделать вывод о том, что локальная фоточувствительность неоднородна по площади полевого электрода, а периферийная область даже в пределах конструктивно-однородной пленки In_2O_3 отличается по свойствам от центральной части ячейки. Приведенный на рис. 7 сильный спад локальной фоточувствительности вблизи боковых границ полевого электрода (стрелка 1) является ответственным за сужение эффективной ширины колоколообразных координатных характеристик ПЗИ-элементов при уменьшении напряжения смещения, рассмотренное нами в [17].

Пик чувствительности, отмеченный на рис. 7 стрелкой 2, имеет существенно более выраженный спад с уменьшением V_G по сравнению с пиком 1 и, вполне можно предположить, имеет иную по сравнению с пиком 1 природу, поскольку соответствует открытой (незащищенной металлическим экраном) области поверхности, расположенной к тому же сравнительно далеко от границ In_2O_3 , на который подано рабочее напряжение. Идентичность формы и локализации пиков 1 и 2 для четных и нечетных ПЗИ-элементов линейки свидетельствует об их независимости от местоположения контактной площадки, на которой выращен индиевый столбик (см. рис. 1, *a*), в отличие от формы координатных характеристик, полученных при сканировании ИК-зондом поперек линейки вдоль осей симметрии ПЗИ-ячеек [17].

Представленные экспериментальные результаты указывают на существование определенного диапазона напряжений V_G , внутри которого вклад периферийного фотоответа даже при сплошной засветке МДП-линейки незначителен и потому практически не искажает пространственную разрешающую способность многоэлементных ПЗИ. В приведенных примерах это интервал шириной около 1–1,5 В вблизи значения $V_G = -7$ В. К сожалению, в многоэлементных фотоприемниках на основе узкозонных полупроводников практическое использование данного факта может осложниться тем, что разброс пороговых напряжений МДП-ячеек даже в пределах одного прибора (линейки или матрицы) способен сам варьироваться в диапазоне 1–1,5 В и более, т. е. существенно изменяться как раз в том интервале напряжений, где должна выбираться рабочая точка по V_G . В результате при фиксированном значении V_G , выбранном согласно представленным рекомендациям внутри интервала напряжений, свободного от выявленных эффектов избыточной фоточувствительности, может иметь место сильный разброс фотоотклика ПЗИ-элементов. В то же время в многоэлементных фотоприемниках, где в пределах всей микросхемы обеспечен малый (на уровне десятых долей вольта) разброс значений напряжения плоских зон или где обсуждаемый интервал напряжений достаточно широк, положительный эффект при учете и использовании описанного свойства очевиден.

Специально созданные контрольные ПЗИ-ячейки, где целиком вся периферийная область была экранирована от влияния внешнего излучения (без оставления каких-либо технологических зазоров), показали отсутствие латерального фотоотклика при любых значениях приложенного напряжения V_G . Соответствующий сравнительный график, полученный при сканировании в направлении поперек линейки фотоприемников (т. е. параллельно длинной стороне фоточувствительного элемента), приведен на рис. 8.

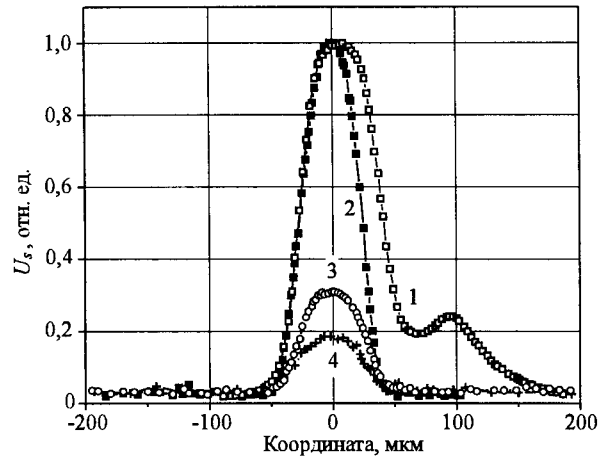


Рис. 8. Демонстрация возможности полного устранения латеральной фоточувствительности ПЗИ-элементов путем бесщелевого экранирования периферийных участков, прилегающих к полювому электроду МДП-структур. Координатные характеристики измерены в направлении поперек линейки: 1 – вдоль оси симметрии ПЗИ-ячейки с конфигурацией, представленной на рис. 1; 2–4 – на контрольных ячейках с бесщелевой конфигурацией (2 – вдоль оси симметрии ячейки, 3 – вдоль оси, отнесенной от оси симметрии и ранее соответствующей сечению с максимальной латеральной фоточувствительностью, 4 – вдоль оси, проходящей в точности между соседними элементами линейки (сравнить с кривыми *a*, *c* на рис. 7)). Положительное направление координат выбрано от центральной оси линейки в сторону контактных площадок. Напряжение на полювом электроде во всех случаях имеет близкие значения и составляет около -13 В

На рис. 9 показана координатная характеристика чувствительности для таких же (бесщелевых) контрольных ячеек, полученная при проходе ИК-зонда через фоточувствительный электрод в направлении вдоль фотоприемной линейки с небольшим смещением оси сканирования от середины этого электрода в сторону контактных площадок. Хорошо заметный провал сигнала в центре характеристики связан с наличием в соответствующей локальной области технологического непрозрачного участка размером 13×13 мкм. График, представленный на рис. 9, показывает не только отсутствие избыточного латерального фотоответа и перекрестных наводок в направлении вдоль линейки в исследуемых МДП ПЗИ многоэлементных фотоприемниках, но также демонстрирует достаточно высокую пространственную разрешающую способность использованной в работе методики.

Обсуждение. При анализе представленных экспериментальных данных возникает вопрос, какие физические механизмы являются доминирующими, отвечая за наблюдаемую периферийную фоточувствительность МДП-структур и ее полювую активацию или деградацию? Обсудим, а также исключим некоторые из них.

Сам факт различия полювых зависимостей локального фотоотклика в центре элемента и в краевых областях дает возможность исключить из рассмотрения модель, когда периферия предполагается вовсе нечувствительной, а латеральный локальный фотосигнал обусловлен отражением света от индиевых столбиков или других конструктивных элементов гибридной мик-

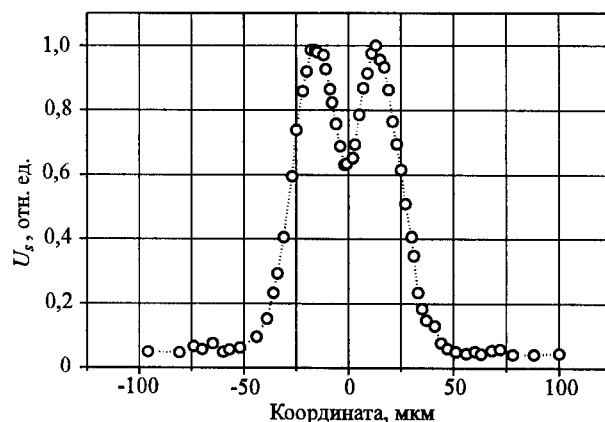


Рис. 9. Результат сканирования ИК-зондом в направлении вдоль линейки ПЗИ-фотоприемников, сконструированной из ячеек с бесщелевой конфигурацией. Ось сканирования пересекает непрозрачные технологические «островки», встроенные в полевые электроды МДП-структур. Шаг линейки 75 мкм

росхемы и последующим попаданием этого ИК-излучения на полевой электрод. Если бы это имело место, пороговые напряжения основной и «паразитной» вольт-сигнальных характеристик должны были бы совпадать. Правда, можно и в этом случае изобрести модель, когда гипотеза переотражения могла бы оказаться непротиворечивой. Предположить, например, радиально-неоднородное распределение заряда под полевым электродом и при этом условиться, что отраженный пучок засвечивает главным образом лишь края электрода, но почти не попадает в его центр. Однако такое предположение в силу известной конструкции реальной ПЗИ-ячейки представляется весьма искусственным.

Полученные экспериментальные результаты дают основание обсудить известное предположение о влиянии исходного зарядового состояния диэлектрика на пороговые напряжения, характерные для МДП ПЗИ-структур с многоуровневой металлизацией, пример которых представлен на рис. 1.

Прежде всего отметим, что напряжение плоских зон V_{FB} исследованных МДП-структур отрицательно, следовательно, положительный встроенный заряд в этом явлении доминирует. Логично предположить, что если заряд встраивается в объем диэлектрика в процессе синтеза последнего, то его величина пропорциональна толщине пленки. Одно лишь это позволяет ожидать, что под контактными шинами ПЗИ-ячеек, лежащими на толстом диэлектрике, обогащение поверхности подложки, изготовленной из n -InAs, более глубокое, чем под полупрозрачным полевым электродом. Поскольку отрицательное напряжение V_G в условиях нашего эксперимента подается на полевой электрод с плавным увеличением по абсолютной величине, в ПЗИ-ячейке сначала «подключается» область поверхности под полевым электродом (зона тонкого диэлектрика) и лишь затем – область под контактными площадками, лежащими на толстой пленке SiO_2 . Пока V_G еще мало, фотогенерированные вне полевого электрода (в частности, в области периферии элемента и под контактными площадками) неосновные носители успевают рекомбинировать с основными носителями обогащенного слоя и вклада в

фотоответ не дают. В свою очередь, при переходе этого слоя в состояние обеднения или инверсии латеральные неосновные носители становятся участниками суммарного фотоотклика ячейки. Как видно из рис. 6, такое «участие» может увеличивать на 70 % величину собственного интегрального фотоответа, измеряемого в режиме фоновой засветки элемента.

Вместе с тем попытаемся оценить ожидаемый сдвиг порогового напряжения характеристик фотосигнала в области контактных площадок по отношению к подэлектродной области, исходя из известного соотношения толщин диэлектрика и высказанного выше предположения о линейной зависимости величины встроенного объемного заряда от толщины пленки. Учтем также, что в формировании напряжения плоских зон не последнюю роль может играть заряд, сосредоточенный вблизи полупроводника, причем иногда считают (см., например, [10]), что в МДП-структурах на основе арсенида индия именно он, локализованный на расстоянии около 15 нм, определяет исходный сдвиг V_{FB} .

Аналогично тому, как это получено для более простой системы в [18], можно записать выражение для напряжения плоских зон V_{FB} МДП-структуры, содержащей два слоя подзатворного диэлектрика с распределенными однородно вдоль поверхности разнотипными зарядами:

$$V_{FB} = \varphi_{ms} - \frac{\sigma_s}{\varepsilon_0} \left(\frac{d_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right) - \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0} \left(\frac{d_1 - x_1}{\varepsilon_1} + \frac{d_2}{\varepsilon_2} \right) - \frac{\sigma_{12} d_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_2} - \frac{\sigma_2 x_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_2}. \quad (1)$$

Здесь φ_{ms} – контактная разность потенциалов между металлом (материалом полевого электрода) и полупроводником; индексы 1 и 2 обозначают параметры диэлектрических слоев, прилегающих соответственно к полупроводнику и металлу; d_1, d_2 – толщина каждого слоя; ε_0 – электрическая постоянная; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – относительная диэлектрическая проницаемость слоя; σ_s – поверхностная плотность заряда, сосредоточенного на границе раздела полупроводник–диэлектрик и вблизи нее на расстояниях, много меньших толщины диэлектрика; σ_1, σ_2 – поверхностная плотность объемного заряда, встроенного в диэлектрик; σ_{12} – поверхностная плотность заряда, сосредоточенного на границе раздела диэлектрических слоев; x_1, x_2 – положение центроида, встроенного в слой объемного заряда, где x_1 отсчитывается от полупроводника, а x_2 – от металла.

Будем считать, что тонкий и толстый слои SiO_2 обладают одинаковой диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$) и одинаковым образом (однородно по объему) накапливают заряд при синтезе. Введем коэффициент $k = d_2/d_1$, тогда согласно рассматриваемой модели $\sigma_2 = k\sigma_1$, $x_1 = d_1/2$, $x_2 = d_2/2 = kd_1/2$. С учетом последнего легко из (1) получить выражения для напряжения плоских зон, соответствующего наличию одного подзатворного (тонкого) диэлектрического слоя (V_{FB}^*) и подконтактной пары слоев (V_{FB}^{**}):

$$V_{FB}^* = \varphi_{ms} - \frac{\sigma_s d_1}{\varepsilon_0 \varepsilon} - \frac{\sigma_{01} d_1}{2\varepsilon_0 \varepsilon}, \quad (2)$$

$$V_{FB}^{**} = \varphi_{ms} - \frac{\sigma_s d_1}{\epsilon_0 \epsilon} (k+1) - \frac{\sigma_{01} d_1}{2\epsilon_0 \epsilon} (k+1)^2 - \frac{\sigma_{12} d_1}{\epsilon_0 \epsilon} k. \quad (3)$$

Учитывая, что контактная разность потенциалов имеет порядок десятых долей вольта, а наблюдаемое в эксперименте напряжение плоских зон (см. рис. 2, 3) около 7–8 В, пренебрежем величиной φ_{ms} в (2) и (3), после чего придем к соотношению

$$V_{FB}^{**} = V_{FB}^* (k+1) - \frac{\sigma_{01} d_1}{2\epsilon_0 \epsilon} (k+1) - \frac{\sigma_{12} d_1}{\epsilon_0 \epsilon} k. \quad (4)$$

Из соотношения (4) видно, что в условиях нашего эксперимента, когда $k = 4000/1200 \approx 3,3$, подконтактная область должна подключаться (становиться фоточувствительной), по меньшей мере, при напряжениях смещения в $(k+1) \approx 4,3$ раза превосходящих напряжение V_{FB}^* , соответствующее подключению приповерхностной области полупроводника под полевым электродом, т. е. при $|V_{FB}^{**}| > 30$ В. Мы же видим, что пороговые напряжения разнесены не на 23 В, как того требует рассматриваемая модель, а всего лишь на 1–1,5 В.

Столь сильное расхождение может быть обусловлено двумя факторами. Во-первых, в выражении (4) пограничный заряд σ_{12} имеет отрицательный знак и компенсирует почти весь сдвиг V_{FB} в область положительных значений. Во-вторых, зарядовое состояние МДП-структуры не соответствует вышеописанной и обычно предполагаемой модели. Даже если заряд, встроенный в объем диэлектриков, вообще исключить из рассмотрения, все равно один лишь приповерхностный заряд σ_s , если он сохраняет свою величину при нанесении толстого слоя, должен был бы в соответствии с (4) привести к увеличению V_{FB} в $(k+1)$ раз. Расхождение модели и полученных экспериментальных данных может являться аргументом в пользу того, что при нанесении толстого диэлектрика приповерхностный заряд σ_s претерпевает существенные изменения. Процесс металлизации также может вносить новый заряд в пленку или вызывать перераспределение существующего. Все эти вопросы, инициированные приведенными экспериментальными данными, требуют самостоятельного изучения.

Весьма интересным представляется выявленное неоднородное распределение порогового напряжения по поверхности полевого электрода. На это явно указывает смещение кривых B, C относительно кривой A на рис. 3, поскольку появление сигналов B, C связано именно с засветкой области площадки In_2O_3 «крыльями» ИК-пятна, когда последнее локализовано на экраняющей металлической полоске, лежащей между соседними МДП-структурами. На неоднородность распределения порогового напряжения по поверхности полевого электрода, зависящую от приложенного смещения, указывают и результаты работы [17], где на ПЗИ-ячейках, аналогичных приведенным на рис. 1, показано, что пространственный «колокол» фоточувствительности зоны, занятой полевым электродом, начинает пороговым образом сужаться при напряжениях $|V_G| < 9$ В.

Объяснение этому факту можно искать, вероятно, при детальном рассмотрении деформации приповерхностной области пространственного заряда InAs в процессе изменения напряжения на затворе. Можно ожидать, что сильное обогащение, окружающее полевой электрод, приводит к ощутимой неоднородности электрического поля вдоль поверхности, и в диапазоне пока еще слабых полевых воздействий часть фотозаряда неосновных носителей, генерированных под полевым электродом недалеко от его границ, имеет возможность оттекать наружу за счет диффузионной компоненты (в сторону сильнолегированной подложки и в радиальном направлении) и там рекомбинировать.

Наконец, обсудим еще одно явление, которое отражают представленные экспериментальные результаты. Как следует из рис. 2, регистрируемый латеральный фотоответ имеет тот же порядок величины, что и ответ, измеренный при локализации ИК-зонда непосредственно на полевом электроде. Это означает, что число фотогенерированных неосновных носителей, подтекающих в потенциальную яму из области периферии, сравнимо с числом носителей, генерируемых непосредственно в этой яме и в своем большинстве, естественно, уже остающихся в ней вплоть до подачи импульса инжекции. Ввиду того, что ниже тонкого рабочего эпитаксиального слоя InAs расположена эквипотенциальная зона проводящей сильнолегированной подложки, разумно предположить, что область краевого электрического поля неравновесной потенциальной ямы может выступать за пределы полевого электрода вдоль поверхности не более чем на единицы микрон. В связи с этим количественное соотношение сигналов, приведенных на рис. 2, дает возможность считать, что заряд подтекает в потенциальную яму из периферии преимущественно за счет диффузионных процессов. Поскольку контрольные точки D , E , F располагались на расстояниях около 8–20 мкм от полевого электрода или от ведущей к нему по толстому диэлектрику шины, можно ожидать, что длина диффузии для наблюдаемых процессов (миграции неосновных носителей вдоль обогащенной поверхности полупроводника) меньше или сравнима по порядку величины с приведенным выше значением. В сводных справочных материалах по свойствам полупроводников [19], составленных ФТИ им. А. Ф. Иоффе, приведена похожая цифра (10–20 мкм) для длины диффузии дырок в объеме n -InAs с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что при поглощении ИК-излучения с длиной волны вблизи 2,8–2,9 мкм фотогенерированные носители (дырки) продвигаются вдоль обогащенной поверхности n -InAs подобно тому, как они диффундируют в объеме материала.

Поскольку толщина эпитаксиального слоя InAs, в котором разыгрываются все описанные явления, составляет в исследованных образцах всего 6–10 мкм, этот факт сам по себе является в определенной степени неожиданным. Действительно, с учетом данных, полученных в [20, 21], на длинах волн 2,8–2,9 мкм при азотных температурах значение коэффициента поглощения используемого в работе InAs может быть оценено близким к $3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$. Следовательно, основная доля излучения поглощается в слое толщиной около 3 мкм, т. е. на удалении лишь нескольких единиц микрон как от сильно обогащенной поверхности, способной привести к быстрой рекомбинации фотогенерированных дырок, так и от сильнолегированной подложки, в которую могла бы оттекать весьма заметная часть неосновных носителей, генерированных светом в области периферии. Тем не менее эксперимент показывает,

что ни тот, ни другой механизм (из тех, которые могли бы снизить латеральный фотоответ) не доминируют по отношению к механизму, осуществляющему транспорт дырок из периферии к неравновесной потенциальной яме.

Заключение. Изучение локального фотоотклика чувствительных к ИК-излучению приборов микроэлектроники, в частности, многоэлементных МДП ПЗИ-структур на основе узкозонных полупроводников с помощью сканирующего ИК-зонда малых размеров позволяет выявить многие особенности функционирования этих устройств, скрытые при исследовании их интегральных характеристик.

Вариация напряжения смещения при локальной засветке конструктивно-неравноценных участков ПЗИ-ячеек позволила обнаружить расхождение в значениях порогового напряжения фотоотклика, измеряемого в центре фоточувствительной площадки и на ее периферии. Экспериментально показано, что в области незранированных от внешнего излучения периферийных по отношению к полевому электроду участков поверхности локальный фотоответ при больших напряжениях смещения может достигать 50–60 % от значений сигнала, измеренных в центре фоточувствительной площадки. В этом случае количественно определена структура интегрального фотоответа, получаемого при однородной (фоновой) засветке многоэлементных ПЗИ, и показано, что периферия способна на 70 % увеличивать сигнал дополнительно к тому, который обусловлен чувствительностью зоны, ограниченной прозрачным полевым электродом.

Обсуждение физических моделей, которые могут быть привлечены к интерпретации полученных результатов, в частности, показывает, что величина порогового напряжения смещения МДП-структур с двухслойной низкотемпературной двуокисью кремния не связана с однородным накоплением положительного заряда в объеме изолирующих пленок при их синтезе.

Продемонстрирована определяющая роль диффузионно обусловленной миграции неосновных носителей заряда (дырок) вдоль поверхности полупроводника в эффектах генерации избыточного фотоотклика ПЗИ-элементов на основе InAs. Показано, что в структурах, которым свойственен латеральный фотоответ, тем не менее существует диапазон рабочих напряжений, внутри которого реализуется возможность обеспечения высокой разрешающей способности многоэлементных МДП ПЗИ.

Экспериментальные результаты, полученные в работе при исследовании реальных приборных МДП ПЗИ-ячеек, демонстрируют, что не только качественные рассуждения, но и упрощенные количественные оценки относительно величины периферийной чувствительности многоэлементных фотоприемных устройств, в особенности создаваемых на основе полупроводников типа A^3B^5 и их эпитаксиальных слоев, не всегда могут соответствовать действительному положению дел и потому могут оказаться некорректными. В этом смысле данной работой показана необходимость более глубокого изучения состояния приповерхностной области в подобного рода материалах и образцах в условиях внешних полевых воздействий.

В качестве практических рекомендаций, вытекающих из полученных результатов, можно выделить следующие. При использовании InAs–МДП ПЗИ-структур в качестве одиночных фотоприемников в несканирующих системах целесообразно обеспечить доступ излучения к конструктивным границам структуры. Это существенно увеличит вырабатываемый прибором фотоответ. В свою очередь, для повышения пространственного разрешения

фотоприемных устройств, использующих многоэлементные линейки или матрицы, а также одиночные ячейки в системах с оптическим сканированием, необходимо добиться полного экранирования периферийных областей МДП-структур. Последнее требование может быть ослаблено, если для данных ПЗИ удастся найти такой, достаточно широкий, диапазон напряжений смещения, когда область под контактными площадками и шинами остается в состоянии обогащения и периферия становится практически нечувствительной к внешнему излучению.

Автор глубоко признателен коллективу технологов за изготовление экспериментальных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Приборы** с зарядовой связью: Пер. с англ. /Под ред. Д. Ф. Барба. М.: Мир, 1982.
2. **Hung R. Y., Yon E. T.** Surface study of anodized indium antimonide // Journ. Appl. Phys. 1970. **41**, N 5. P. 2185.
3. **Вавилов В. С., Плотников А. Ф., Шубин В. Э.** Перезарядка ловушек оксида InSb в структурах Au – оксид InSb – InSb // ФТП. 1971. **5**, № 11. С. 2064.
4. **Vuxo J., Esteve D., Farre J. et al.** A model for the large-amplitude hysteresis in MIS structures on InSb // Appl. Phys. Lett. 1978. **33**, N 11. P. 969.
5. **Вайнер Б. Г.** МДП-структуры на основе InSb в условиях сильного электрического поля. 1. Особенности накопления заряда и методика его регистрации. Новосибирск, 1982. (Препр. /ИФП СО АН СССР; 6-82).
6. **Вайнер Б. Г.** Особенности проявления зарядовой нестабильности МДП-структур n-InSb(n-InAs)–SiO₂–Al в сильном электрическом поле при отрицательном смещении // Тр. IX Всесоюз. симп. «Электронные процессы на поверхности и в тонких слоях полупроводников». Новосибирск, 15–17 июня 1988. Новосибирск: СО АН СССР, 1988. Ч. 1. С. 66.
7. **Вайнер Б. Г.** МДП-структуры на узкозонных полупроводниках типа A³B⁵ в сильном электрическом поле // 35 Intern. Wissenschaftliches Koloquium, 22–25.10.1990. TH, Imenau, DDR, 1990. P. 44.
8. **Вайнер Б. Г., Костин В. В., Курышев Г. Л.** Увеличение фотоответа в структурах металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) после приложения сильного электрического поля // ФТП. 1983. **17**, № 10. С. 1885.
9. **Вайнер Б. Г.** Влияние встроенного в диэлектрик заряда на пространственное разрешение многоэлементных InAs-ПЗИ-структур // Физика окисных пленок: Тез. докл. III Всесоюз. науч. конф. Петрозаводск: ПГУ им. О. В. Куусинена, 1991. Ч. 1. С. 50.
10. **Матричные** фотоприемные устройства инфракрасного диапазона /В. Н. Овсяк, Г. Л. Курышев, Ю. Г. Сидоров и др. Новосибирск: Наука, 2001.
11. **Kogan E., Kovchavtsev A., Kurishev G. et al.** IR spectrometer with 512 InAs-cell MOS detector // Opto-92. Douziemes Journees Professionnelles. Fibres Optiques, Lasers, Optique, Visualization, Optoelectronique. Palais des Congres, 14–16 Avril, 1992. Paris: ESI publications, 1992. P. 620.
12. **Курышев Г. Л., Ковчавцев А. П., Вайнер Б. Г. и др.** Медицинский тепловизор на основе матричного ФПУ 128 × 128 для диапазона длин волн 2,8–3,05 мкм // Автометрия. 1998. № 4. С. 5.
13. **Vainer B. G.** Narrow spectral range infrared thermography in the vicinity of 3 μm operating wavelength // Proc. Quantitative InfraRed Thermography 5, Eurotherm Seminar 64, QIRT'2000, Reims, France, July 18–21, 2000 /Ed. by D. Balageas, J.-L. Beaudoin, G. Busse, G. M. Carlomagno. France: UTAP URCA, 2000. P. 84.

14. **Chopra K. L., Major S., Pandya D. K.** Transparent conductors – a status review // *Thin Solid Films*. 1983. **102**. P. 1.
15. **Nath P., Bunshah R. F.** Preparation of In_2O_3 and tin-doped In_2O_3 films by a novel activated reactive evaporation technique // *Thin Solid Films*. 1980. **69**. P. 63.
16. **Вайнер Б. Г., Курышев Г. Л.** Механизмы зарядовой неустойчивости в МДП-структурах на основе InSb с диэлектриками, синтезированными при низкой температуре // *Микроэлектроника*. 1981. **10**, № 4. С. 327.
17. **Vainer B. G.** Excess lateral photo-response caused by technological and constructive defects in the IR-sensitive hybrid microcircuits // *Journ. Cryst. Growth*. 2000. **210**, N 1–3. P. 356.
18. **Вайнер Б. Г., Курышев Г. Л.** Определение высоты барьера $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ и положения центроида накопленного заряда в МДП-структурах на основе InSb // *Микроэлектроника*. 1981. **10**, № 4. С. 367.
19. <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/InAs/electric.html#Recombination>
20. **Dixon J. R., Ellis J. M.** Optical properties of n-type indium arsenide in the fundamental absorption edge region // *Phys. Rev.* 1961. **123**, N 5. P. 1560.
21. **Зотова Н. В., Наследов Д. Н., Неуймина Л. Д.** Край поглощения n- InAs при 300 и 100 °К // *ФТП*. 1971. **5**, № 11. С. 2111.

*Институт физики полупроводников ОИФП СО РАН,
E-mail: bgv@isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
11 июня 2002 г.*