

Основные параметры ФПУ ФУР129Л и ФУР129Л-01 представлены ниже.

Материал фотоприемники	PbSe
Спектральный диапазон, мкм	3—5
Размер фоточувствительного элемента, мкм	100×100 или 90×100
Число элементов	2×32 или 1×64
Обнаружительная способность в максимуме спектральной чувствительности при $T_{env}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{Вт}^{-1}\cdot\text{см}\cdot\text{Гц}^{1/2}$	до $(2-5)\cdot 10^{10}$
Вольтовая чувствительность, В/Вт, не менее	$5\cdot 10^7$
Напряжение питания ФПУ/ток, В/А	6/0,08
Напряжение/ток 2-каскадного ТЭО, В/А	3/0,9
Полоса пропускания предусилителей, Гц	30—15000
Коэффициент усиления предусилителей	~200
Габаритные размеры, мм	48×62×34
Масса, г, не более	180

Выводы

1. Разработано и освоено в мелкосерийном производстве ФПУ на основе 64-элементных фоточувствительных структур на селениде свинца (PbSe).
2. Опыт организации производства таких ФПУ в ФГУП «НПО "Орион"» и применение у потребителя показали их технологичность, относительно высокие фотоэлектрические параметры при низкой цене, малые массогабаритные характеристики при низкой потребляемой мощности, что является определяющим фактором при создании недорогих, малогабаритных переносных тепловизоров, а также другой тепловизионной аппаратуры.

Литература

1. Буткевич В. Г., Бочков В. Д., Глобус Е. Р. Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе поликристаллических и эпитаксиальных пленок халькогенидов свинца// Прикладная физика. 2001. № 6. С. 66—113.
2. Аракелов Г. А., Магнусевский В. Р., Сивенкова В. Н. Конструкция многоплощадочного фотоприемника с термоэлектрическим охлаждением// Там же. 2002. № 2. С. 69—76.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Photodetective assembly (PDA) on the base of 64-elements PbSe-photosensitive structures

V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, M. L. Chrapounov
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

In the report it is informed about the small-size PDA development for use in commercial thermovision devices, spectrometers, devices for guard etc. PDA is producing in two versions in dependence on photosensitive areas topology. ФУР-129Л — 2×32 elements arranged by chess-board fashion. ФУР-129Л-01 — 1×64 with one-line arrangement of photosensitive elements. High values of D^ and S_v parameters were achieved in the gas-filled design on two-stage thermoelectric cooler with improved parameters, that are allowed to obtain the cooling temperature $-55\pm-67\text{ }^{\circ}\text{C}$ by $T_{env} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. High threshold sensitivity and noise immunity were obtained by use of build-in preamplifiers. Main photoelectric PDA parameters and characteristics are presented.*

УДК 621.384

Источники шумов многоэлементных фотодиодов из антимонида индия

И. Н. Мирошникова, А. М. Гуляев

Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

Рассмотрены вопросы оптимизации технологического процесса во вновь разрабатываемых приборах, применяемых в тепловизионных устройствах. Данный анализ проведен на основе исследований шумовых свойств приборов, выпускаемых в настоящее время.

В период отработки базовой технологии изделия ФУЛ-132 на заводе "Сапфир" в тесной связи со специалистами НИИПФ проводились две

НИР "Днестр" [1] и "Берилл" [2] по оптимизации технологии фотодиодов на основе антимонида индия. В ходе этой работы были изготов-

лены несколько фотоприемных устройств (ФПУ), фоточувствительные элементы (ФЧЭ) которых были получены диффузией или ионной имплантацией, а их поверхность защищена анодными окислами (АО), выращенными в электролитах на основе персульфата аммония или сернистого натрия, лимонной и фосфорной кислот с последующим нанесением дополнительных диэлектриков (SiO_x , Al_2O_3 , SiO_2 , CdTe). При изготовлении контактов использовались комбинации $\text{Cr}+\text{Au}$ или $\text{Ti}+\text{Al}$. Топология этих элементов также варьировала: вводился дополнительный p - n -переход (охранное кольцо), по периметру выхода перехода на поверхность диэлектрика наносилось непрозрачное металлическое покрытие, индивидуальное для каждого ФЧЭ или общее для всех ФЧЭ. У последней конфигурации была предусмотрена возможность подачи потенциала на верхний электрод.

По результатам НИР была выбрана базовая технология, включающая ионную имплантацию, охранный p - n -переход, анодное окисление в электролите на основе Na_2S , в качестве дополнительного диэлектрика — SiO_x с металлическим покрытием и контактами $\text{Cr}+\text{Au}$. В последние годы эта технология не претерпела значительных изменений и с успехом применяется на ОАО «МЗ "Сапфир"».

Главным критерием, по которому выбиралась данная технология, было минимальное возрастание шума ФЧЭ на частоте 800 Гц при термовоздействии [3]. Однако изменение условий применения приборов и необходимость более тщательного анализа способности приборов со-

хранять свои параметры в течение длительного времени, оговоренного техническими заданиями, заставляет еще раз вернуться к вопросам оптимизации технологического процесса во вновь разрабатываемых приборах, применяемых в тепловизионных устройствах. Требуемый анализ может быть проведен на основе исследований шумовых свойств ранее сделанных и выпускаемых в настоящее время приборов и предполагает выяснение природы шумов ФЧЭ.

Результаты исследований

Результаты работ [1, 2] показали, что термовоздействие на ФПУ приводит к изменению вольт-шумовых и вольт-амперных характеристик при постоянстве чувствительности приборов. Это дало основание обратить особое внимание именно на шумовые свойства приборов, в том числе и в низкочастотной области спектра, что особенно эффективно дается спектральной плотностью мощности шума (СПМШ) приборов.

Измерение СПМШ проводилось на установке, разработанной на кафедре "Полупроводниковая электроника". Схема установки приведена на рис. 1. В основе ее работы лежит измерение временного ряда шумового сигнала с регистрацией на ПЭВМ и последующим быстрым преобразованием Фурье [4].

В основе анализа природы шумов положено сравнение измеренных в настоящее время СПМШ с результатами измерений, проведенных в 1992—1993 гг.

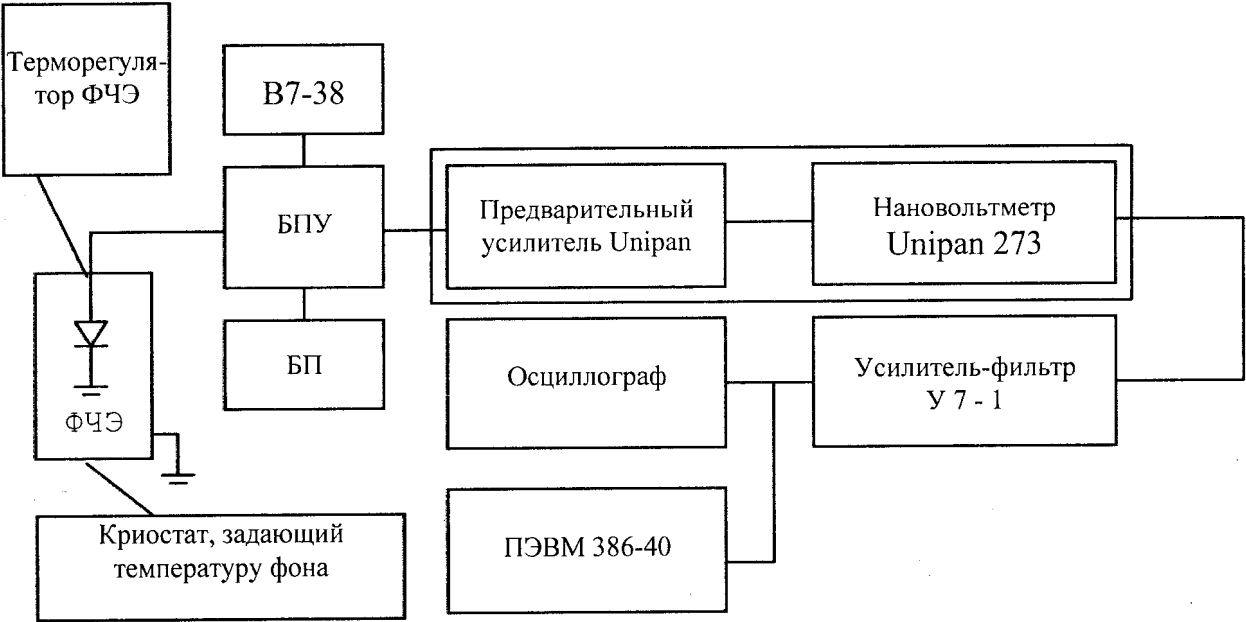


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

На рис. 2 представлены СПМШ, измеренные в 1992 г., ФЧЭ с ионно-имплантированными переходами, окисленные в электролите на основе персульфата аммония, при нулевом смещении (см. рис. 2, кривая 1), а также при смещении -30 и -100 мВ, соответственно (см. кривые 2 и 3).

Топология этих приборов планарная, что облегчает защиту p - n -перехода.

Следует отметить, что шум ФЧЭ при нулевом и малых обратных смещениях определяется дробовой составляющей, зависящей от фототока. Следует обратить внимание, что шум $1/f$ при нулевом смещении и -30 мВ весьма мал и возрастает в диапазоне 1 – 10 Гц при смещении -100 мВ. Очевидно, что для последующего анализа имеет смысл сравнивать характеристики только при смещении -100 мВ. Такое свойство является характерным, что подтверждается сравнением с четырьмя ФЧЭ одной линейки (рис. 3, а).

Следующим этапом анализа было сравнение влияния топологии и технологии изготовления ФЧЭ на СПМШ.

На рис. 3, б представлены СПМШ ФЧЭ, окисленных в электролите на основе персульфата аммония с экранирующей "рамкой" по периферии перехода. Из сравнения рис. 3, а и б следует, что введение металлического экрана приводит к уменьшению разброса в частотных зависимостях, но оставляет значительной компоненту шума типа $1/f$ – $(8$ – $12) \cdot 10^{-25}$ А²/Гц на частоте 1 Гц.

Аналогичные спектры для ФЧЭ, окисленных в электролите на основе сернистого натрия, представлены на рис. 3, в. Легко заметить, что в этом случае при смещении -100 мВ не только уменьшается разброс графиков СПМШ различных ФЧЭ линейки, но и снижается компонента низкочастотного шума [5].

В 2004 г. были повторно исследованы спектры фотодиодов, изготовленные в конце 80-х годов XX века. Исследовались приборы с вариациями конструкции и технологии изготовления ФЧЭ, представленными в таблице.

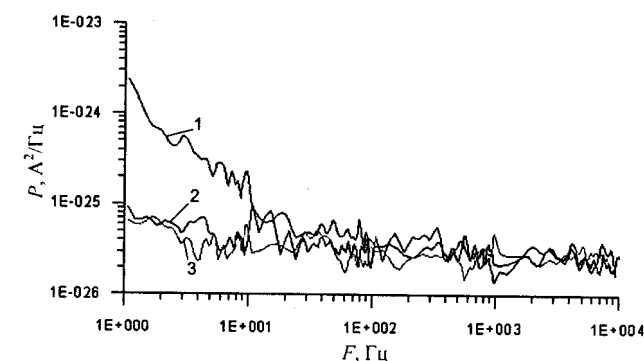
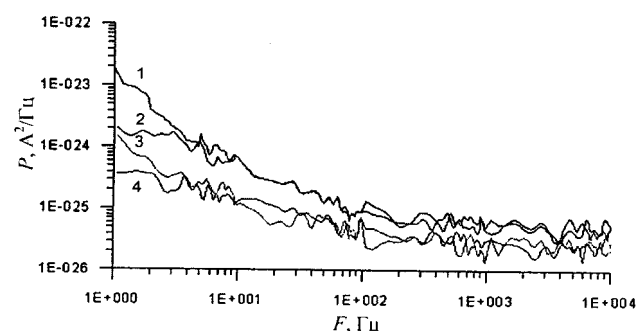
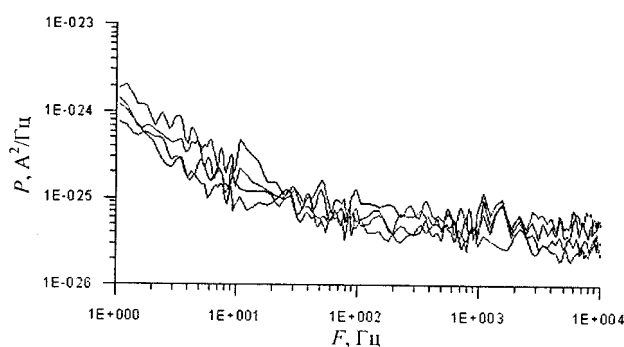


Рис. 2. СПМШ ФЧЭ линеек, окисленных в электролите на основе персульфата аммония:

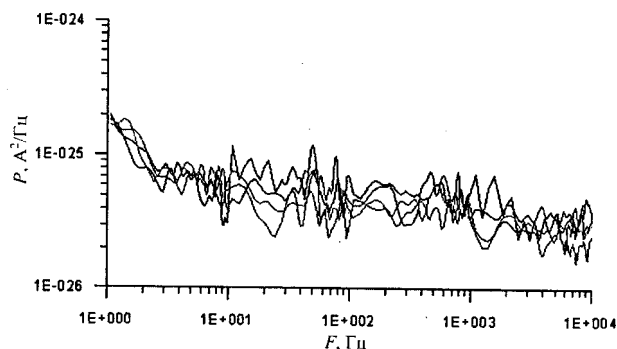
1 — при нулевом смещении; 2, 3 — при смещении -30 и -100 мВ, соответственно



а



б

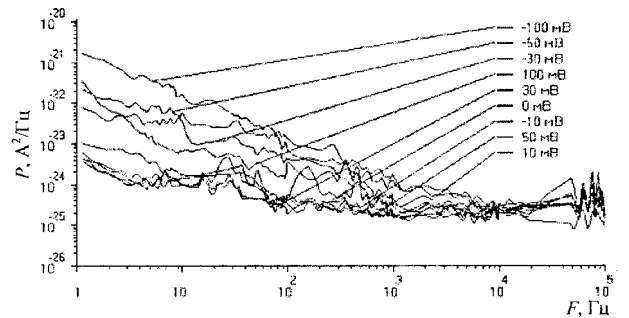


в

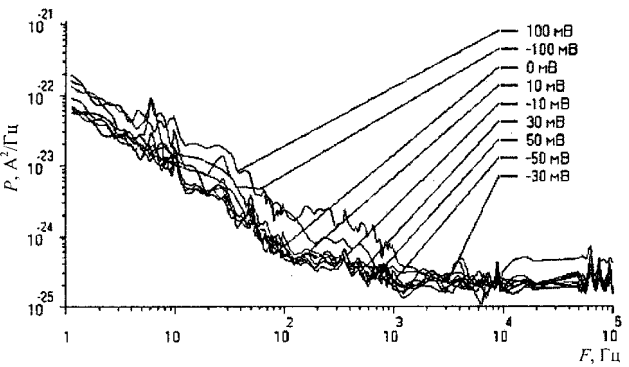
Рис. 3. СПМШ четырех ФЧЭ, окисленных при смещении -100 мВ в электролите на основе: а — персульфата аммония; б — персульфата аммония с "рамкой" по периферии p - n -перехода; в — сернистого натрия

Номер прибора	Топология	Метод создания <i>p-n</i> -перехода	Анодный окисел на основе
01763	Меза-структура	Диффузионный	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈
1300	Планарная структура без охранного <i>p-n</i> -перехода	Ионная имплантация	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈
3637	Планарная структура с охранным <i>p-n</i> -переходом	То же	Na ₂ S
4462	Планарная структура с охранным <i>p-n</i> -переходом + "рамка"	"	Na ₂ S

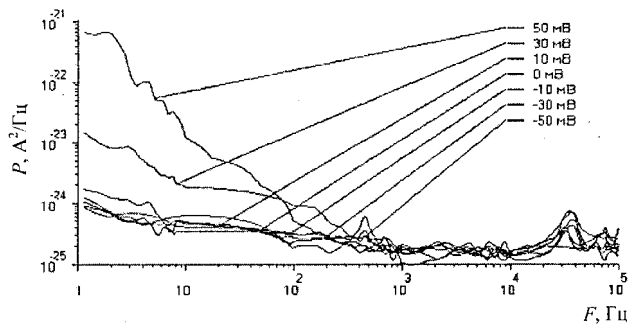
На рис. 4, а представлены СПМШ фотодиодов (ФД) с диффузионными переходами, окисленными в электролите на основе персульфата аммония. Как следует из этого рисунка, при нулевом смещении и прямых смещениях до 50 мВ преобладает дробовая компонента, определяемая фоновым током. При обратных смещениях практически во всем частотном диапазоне преобладает шум типа 1/*f*.



а



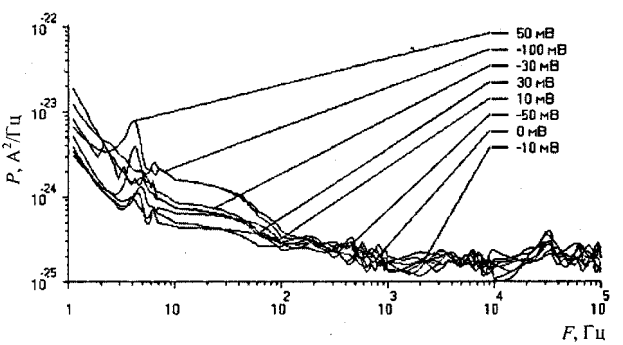
б



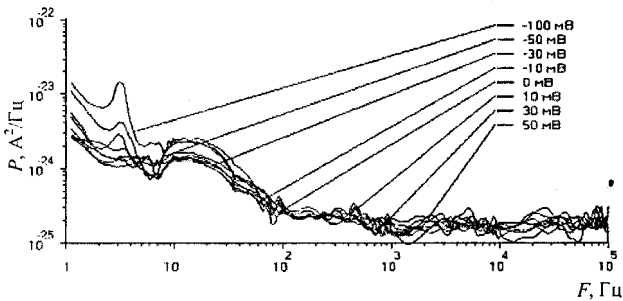
в

Рис. 4. СПМШ:

а — ФЧЭ № 23 прибора № 01763; б — ФЧЭ прибора № 01763; в — ФЧЭ прибора № 1300



г



д

Рис. 4. СПМШ:

г — ФЧЭ прибора № 3637; д — ФЧЭ прибора № 4462

У значительного числа ФЧЭ наблюдались спектры, аналогичные представленным на рис. 4, б. У этих элементов весьма значителен шум типа 1/*f* в диапазоне до 1000 Гц, который практически не зависит от смещения.

Переход к технологии с ионной имплантацией изменил шумовые характеристики ФЧЭ. Это изменение можно показать на характеристиках ФД № 1300, изготовленного по той же схеме, что и прибор № 01763, только диффузия кадмия была заменена на имплантацию бериллия. Электролит же для анодного окисления по-прежнему выполнен на основе персульфата аммония, как и у прибора № 01763. В высокочастотной области (10³–10⁵ Гц) СПМШ при различных смещениях совпали друг с другом (см. рис. 4, в). В низкочастотной области наблюдается шум типа 1/*f*^α только при прямом (30–50 мВ) смещении, при этом значение α меньше единицы. На частоте 1 Гц значения квадрата тока шума в зависимости от смещения варьировались от 9·10⁻²⁵ до 7·10⁻²² А²/Гц.

Следующим исследовали прибор ФД № 3637 (см. рис. 4, г). Наряду с ионно-имплантированным

ным переходом здесь была использована топология ФЧЭ с дополнительным закороченным с внешней стороны охранным p - n -переходом, а анодный окисел формировался в электролите на основе сернистого натрия. На рис. 4, $г$ представлено семейство СПМШ типичного элемента. Так же как и у прибора № 1300, на СПМШ в низкочастотной области наблюдается шум типа $1/f^\alpha$, где α больше единицы. Видимо наличие шума этого типа не должно вызывать тревоги, так как оно характерно для наиболее надежных приборов как с глубоко-, так и с мелкозалегающими переходами, что было показано ранее [6]. Отметим, что значения I_n^2 на 1 Гц находятся в диапазоне $2 \cdot 10^{-24}$ — $2 \cdot 10^{-22}$ А²/Гц. Происхождение пиков на 4 Гц мы затрудняемся объяснить, вероятно, это — наводки в измерительном тракте.

Влияние экранирования области выхода перехода на поверхность хорошо прослеживается на примере прибора № 4462 (см. рис. 4, $д$). У этого ФД ионно-имплантированный переход, закороченный охранный p - n -переход, АО выращен в электролите на основе Na_2S , а периметр перехода экранирован металлической "рамкой". На рис. 4, $д$ представлено семейство СПМШ типичного элемента этого прибора.

Для этого ФЧЭ можно отметить следующие характерные особенности: хорошее совпадение СПМШ при различных смещениях; шум типа $1/f^\alpha$, где $\alpha \approx 1$, относительно невелик, находится в диапазоне 1—100 Гц и составляет на 1 Гц $(2-6) \cdot 10^{-24}$ А²/Гц.

Сравнение спектров на рис. 2—3 и 4, $а-д$, снятых с промежутком в 12 лет, показывает, что в процессе хранения у фотодиодов возрастает шум типа $1/f$, а точка перехода к белому шуму переходит в высокочастотную область.

Исследования состава АО методом Оже-электронной спектроскопии, проведенные непосредственно после изготовления, показали, что в зависимости от состава электролита и режимов анодирования изменяется элементный состав на границе АО—InSb [7]. Высказано предположение, что высокое напряжение расшумливания, определенное по вольтовой характеристике шума, и термостойкость фотодиодов связаны с концентрацией сурьмы с неполностью окисленными связями. Минимальная концентрация сурьмы на границе раздела АО—InSb наблюдалась у образцов, окисленных в электролите на основе Na_2S (рис. 5, $а, б$). На этих рисунках представлены графики относительного распределения элементов по глубине АО. По оси X отложено время травления пленок. В качестве примера выбраны АО, выращенные при постоянной плотности тока в процессе анодирования для пленок толщиной d и имеющие коэффициент преломления n . Аналогичные кривые получены для вольтстатического и комбинированного режимов анодирования. Необходимо подчеркнуть, что у образцов, окисленных в электролите на основе Na_2S , был минимальный положительный или даже отрицательный встроенный заряд.

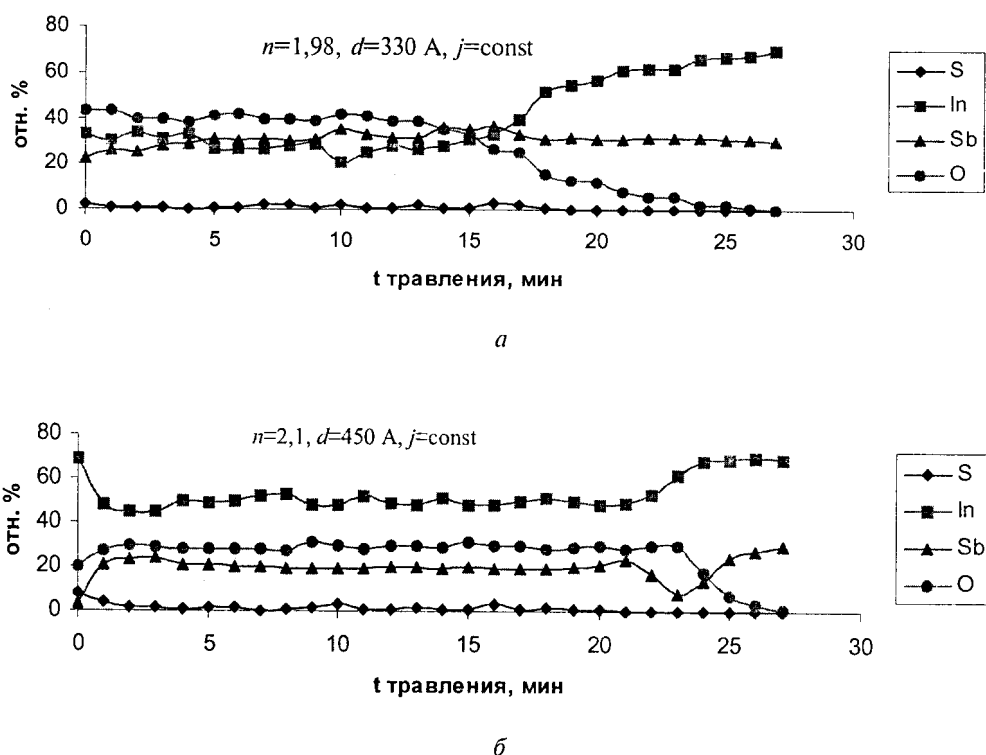


Рис. 5. Состав АО, выращенного в электролите на основе:
а — персульфата аммония; б — сернистого натрия

Обсуждение результатов

Проведенные исследования СПМШ показали, что вольтшумовые характеристики определяются переходом от дробовой составляющей при нулевом смещении к шуму типа $1/f$ — при прямом и обратном смещениях.

При обратном смещении увеличение шума типа $1/f$ мы связываем с накоплением кластеров сурьмы с неполностью окисленными связями на границе АО—InSb. При малых концентрациях кластеров возможен туннельный механизм перехода электронов от кластера к кластеру, приводящий, согласно модели Пиллигрини [8, 9], к шуму типа $1/f$.

Сурьма в процессе хранения ФЧЭ накапливается вблизи границы раздела АО—InSb, что приводит к увеличению положительного заряда в диэлектрике. При превышении некоторого порогового значения у фотодиодов резко возрастают туннельные токи через p - n -переход. Это приводит к возрастанию "белых" шумов фотоприемников на несколько порядков (рис. 6). На этом рисунке представлены СПМШ ФД, успешно прошедшего испытания на теплоустойчивость при смещении -1 В (см. рис. 6, кривая 3). У надежных элементов при столь значительных смещениях растет компонента шума типа $1/f$ пропорционально смещению, но выше 3 кГц сохранился "белый" шум на уровне 10^{-25} А²/Гц. На этом же графике представлены СПМШ полностью деградировавшего фотодиода при нулевом смещении (см. рис. 6, кривая 2) и при смещении -100 мВ (см. рис. 6, кривая 1). Такой шум сопровождается спрямлением ВАХ фотодиода.

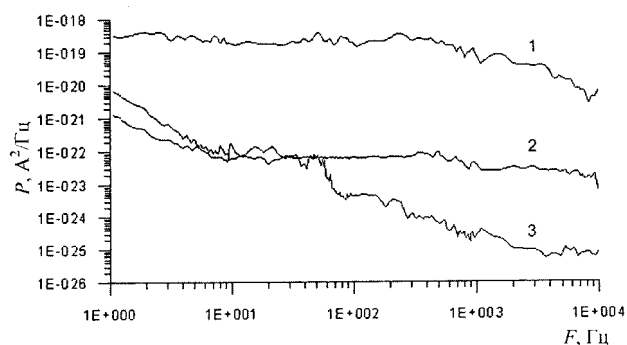


Рис. 6. СПМШ фотодиодов

Выводы

1. Показано, что шум ФЧЭ при смещениях, близких к нулевым, определяется дробовой составляющей, зависящей от фонового тока.

2. При обратных смещениях шум "белый" дробовой переходит в шум типа $1/f$. Этот шум, вероятно, определяется туннелированием электронов между островками (кластерами) сурьмы с неполностью скомпенсированными связями.

3. При возрастании концентрации кластеров шум возрастает на несколько порядков и превращается в "белый", определяемый токами поверхностной утечки. В последнем случае наблюдается спрямление ВАХ фотодиодов.

Литература

1. Исследование влияния особенностей конструкции и технологии фоточувствительного элемента на фотоэлектрические характеристики в целях повышения надежности изделий ФУЛ132, ФУЛ134 по результатам межведомственных испытаний: Отчет по теме. Шифр "Берилл"— М., Завод "Сапфир", 1986.
2. Усовершенствование технологии изготовления изделий типа ФУЛ132 в целях исключения нестационарных шумов и повышения надежности ФПУ: Отчет по теме. Шифр "Днестр"/ ПО "Сапфир", 1987.
3. Мирошникова И. Н., Соколик С. А., Гуляев А. М. Повышение надежности фотодиодов из антимонида индия. — В кн.: Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Матер. докл. науч.-техн. семинара. — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 1993. С. 124—128.
4. Соколик С. А., Гуляев А. М., Мирошникова И. Н. Совершенствование установки для исследования низкочастотного шума полупроводниковых приборов и структур// Измерительная техника. 1996. № 12. С. 57—61.
5. Мирошникова И. Н., Соколик С. А., Варлашов И. Б., Гуляев А. М. О природе взрывных и избыточных шумов в фотодиодах на основе антимонида индия. — В кн.: Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Матер. докл. науч.-техн. семинара. — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, МЭИ, 1994. С. 208—216.
6. Мирошникова И. Н. Проблемы современных фотодиодов — от вольт-амперных характеристик к спектрам плотности мощности шума// Радиотехника. 2004. № 6. С. 66—69.
7. Мирошникова И. Н., Соколик С. А., Варлашов И. Б., Гуляев А. М. Анализ путей повышения надежности фотодиодов из антимонида индия. — В кн.: Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: Матер. докл. науч.-техн. семинара. — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, МЭИ, 1994. С. 121—125.
8. Pellegrini B. One model of Flicker, burst, and generation-recombination noise// Phys. Rev. 1981. V. B24. P. 7071—7083.
9. Pellegrini B. Is $1/f$ noise an unsolved problem? (Invited Paper)// 15th Internat. Conf. On Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations 23—26 August 1999. Hong Kong. Ed. C. Surya. P. 303—309.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Radiants of noise of the InSb multi-element photodiodes

I. N. Miroshnikova, A. M. Gulyaev
Moscow Energy Institute, Moscow, Russia

Consideration is made to the problems of a manufacturing process optimization for the new developed device used in thermal imagers. This analysis takes into account the examinations of noise properties of devices manufactured now.

УДК 621.383

Субматричные фоторезисторы из гетероэпитаксиальных структур КРТ 0,1 эВ, полученных методом МЛЭ, с мультиплексором в холодной зоне

Е. В. Сусов, О. В. Смолин, И. Ю. Ларцев
ФГУП "Альфа", Москва, Россия

Ю. Г. Сидоров, В. С. Варавин, Н. Н. Михайлов
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Показано, что гетероэпитаксиальные структуры кадмий—ртуть—теллур (КРТ), полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), на подложке из GaAs вида GaAs—CdZnTe—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0,35-0,25}—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0,215-0,285}—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0,85} с рабочим слоем толщиной $d \leq 4$ мкм открывают возможности создания субматричных и матричных фоторезисторов, эффективность которых по перекрытию спектрального диапазона 8—14 мкм в 2 раза выше, чем у фотодиодных матриц. Рассмотрены особенности малоразмерных пикселей — фоточувствительной площади (ФЧП) $A \leq 30 \times 30$ мкм. Оптимальные величины времени жизни τ_{eff} КРТ лежат в диапазоне $(0,1-2,5) \cdot 10^{-7}$ с, обеспечивая высокие значения вольтовой чувствительности $S_u \geq 3 \cdot 10^5$ В/Вт при малых токах смещения $I_{dis} \sim (0,25-0,6) \cdot 10^{-3}$ А и потребляемой мощности субматрицы 288×2 (144×4) Р-45 мВт. Разработанный мультиплексор, работающий в холодной зоне ($T = 80$ К), потребляет не более 150 мВт.

Для малоразмерных площадей фоточувствительных элементов (пикселей) $A \leq 30 \times 30$ мкм целесообразно использовать гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) КРТ, полученные методом МЛЭ с толщиной рабочего слоя КРТ ≤ 4 мкм с временем жизни неравновесных носителей $\tau_0 = (1-2,5) \cdot 10^{-7}$ с, что позволяет получить высокие значения вольтовой чувствительности $\geq 3 \cdot 10^5$ В/Вт при малых токах смещения $(0,24-0,6) \cdot 10^{-3}$ А и снизить мощность, потребляемую ФЧЭ формата 288×2 (144×4) до ~ 10 мВт. Разработан кремниевый мультиплексор, стыкуемый с субматрицей фоторезисторов через индиевые столбики. Постоянная составляющая исключается с помощью мостовой схемы, в плечи которой включены пиксели, находящиеся вне светового потока.

Полученные методом МЛЭ на подложке из GaAs с буферным слоем CdZnTe ГЭС КРТ высокого качества, содержащие нижний варизонный слой КРТ, тонкий слой КРТ постоянного

состава $x \approx 0,215$, верхний варизонный слой КРТ и субмикронный слой КРТ постоянного состава, близкого к теллуриду кадмия, открыли возможности разработки многоэлементных, субматричных и матричных фоторезисторов.

Высокое сопротивление фоторезисторов $R = (250-450)$ Ом обеспечило высокую вольтовую чувствительность $S_{u,m} \geq (300-400) \cdot 10^3$ В/Вт, что позволило применить в зоне ФЧЭ КМОП мультиплексор для субматричного фоторезистора формата 288×2 (144×4); $A = 30 \times 30$ мкм (A — площадь пикселя), $\lambda_{co} \sim (12,5-13)$ мкм. Мощность тепловыделения при токах смещения $0,25 \cdot 10^{-3} \pm 0,6 \cdot 10^{-3}$ А, $R_T = 300$ Ом составляет $P_{FSE} \approx 45-250$ мВт; мощность, потребляемая мультиплексором, — $P_m = 150$ мВт. Постоянная составляющая исключается с помощью мостовой схемы. Соединение ФЧЭ с мультиплексором осуществляется методом гибридной сборки с индиевыми столбиками.