

Фотоэлектронике “Пульсара” - 40 лет! (продолжение)***Васильев А. Г., Скрылёв А. С., Константинов П. Б.***

1971 год. В «Пульсаре» создаётся новое научно-техническое направление – фотоэлектроника. В течение ряда лет разработаны уникальные приборы – мишени вакуумных передающих телевизионных трубок, работающие в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн, и фоточувствительные приборы с зарядовой связью (ПЗС). Первая фоточувствительная линейка на 64 элемента появляется на свет в 1973 году. От этого момента до сегодняшних дней разработаны ПЗС-линейки до 12288 элементов, ПЗС-матрицы до 1024x1024 элементов и ПЗС ВЗН до 960x32 элемента, а также ФПУ на их основе. Разработаны глубокоохлаждаемые гибридные фоточувствительные схемы дальнего ИК-диапазона на примесном кремнии. В настоящее время разрабатываются специальные линейные и матричные фоточувствительные ПЗС для ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов и фотоприёмные модули на их основе, а также совершенно новые приборы – электронно-чувствительные ПЗС для электронно-оптических преобразователей 5-го поколения и других гибридных вакуумных приборов.

Введение

Отделение фотоэлектроники было сформировано в Пульсаре в 1971 году, а уже в 1973 году начинаются работы по созданию ПЗС-приборов, которые, как и работы по созданию мишеней, развивались исключительно высокими темпами. Первые в СССР фоточувствительные линейки на 64 элемента были изготовлены под руководством к.т.н. Ф. П. Пресса инженерами М. М. Крымко и А. В. Вето. В дальнейшем в 70-80-х годах работы по созданию фоточувствительных ПЗС проводились под руководством Ю. А. Кузнецова, Ф. П. Пресса и А. В. Вето. Решением многоплановых задач по расчёту, проектированию, технологическому и конструкторскому обеспечению, метрике, испытаниям, внедрению в производство занимался коллектив талантливых специалистов, среди которых, в первую очередь, помимо уже упомянутых, следует отметить к.т.н. А. С. Скрылёва, к.т.н. Е. В. Костюкова, к.т.н. В. В. Чернокожина, к.т.н. В. Н. Мордковича, С. А. Левина, Л. М. Василевскую, А. Н. Маркова, В. С. Жильцова, А. Г. Мордовского, к.ф-м.н. Ю.И. Завадского, а также представителей вузовской науки: профессора В. А. Шилина, к.т.н. А. А. Пугачёва, к.т.н. Е. Ф. Певцова. Начиная с 90-х годов до настоящего времени эти работы успешно продолжают в отделении фотоэлектроники под руководством к.т.н. А. С. Скрылёва.

Разработка приборов с зарядовой связью

Изобретение в 1969 году приборов с зарядовой связью сотрудниками Bell Laboratories (США) Уиллардом Бойлом (Willard S. Boyle) и Джорджем Смитом (George E. Smith), получившим Нобелевскую премию по физике за 2009 год, явилось крупнейшим событием в развитии мировой полупроводниковой электроники [15]. Простой принцип, заложенный в основу работы этих приборов, обеспечил их необычайную гибкость и универсальность. На их основе созданы первые твердотельные приёмники изображения, устройства обработки информации, оперативные запоминающие устройства большого объёма, линии задержки, фильтры и пр. Только благодаря ПЗС удалось решить проблему создания растровых безвакуумных передающих телевизионных устройств – аналогов видикона. С момента появления первых работ по ПЗС-приборам во всех развитых странах работы по созданию ПЗС велись широкомасштабно и успешно [16].

В «Пульсаре» работы по разработке ПЗС технологии развивались весьма успешно. К концу 1973 года были изготовлены первые фоточувствительные линейки на 64 элемента с молибденовыми затворами.

Дальнейшим шагом в направлении разработки фоточувствительных ПЗС было создание 128-элементной линейки с выходным истоковым повторителем. При формировании подзатворного диэлектрика в этой линейке использовался вновь разработанный процесс высокотемпературного «хлорного» окисления. На этой линейке впервые в СССР было получено телевизионное изображение, для этого были разработаны электронный блок и механический сканер [17].

По технологии с молибденовыми затворами были изготовлены и первые матричные приборы: матрица 128x128 элементов с кадровым переносом и матрица для регистрации движущегося изображения, работающая в режиме временной задержки и накопления заряда – ВЗН 128x32 элемента. Это были приборы с поверхностным каналом переноса. На этом этапе работ с ПЗС первого поколения решались конструктивные и физико-технологические задачи: отработка технологии фотолитографии на кристаллах большой площади с линейными размерами 2 мкм и менее, создание технологии и оборудования термического окисления с применением хлористого водорода, что позволило получить плотность поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO₂ менее чем 10¹¹ см⁻², отработка технологии ионного легирования кремния бором, фосфором, мышьяком.

С конца 1975 года на «Пульсаре» началась эра ПЗС с поликремниевыми электродами. Преимущество поликремниевой технологии перед молибденовой определялось несколькими факторами. Во-первых, формирование электродов каждой из 3-х фаз в своём слое поликремния позволило уменьшить зазоры между электродами почти на порядок (с 2,0 до 0,25 мкм), что привело к кардинальному улучшению эффективности переноса заряда. Во-вторых, поликремниевые электроды прозрачны в области 0,45-1,1 мкм, что обеспечило высокую фоточувствительность и 100-процентное использование площади фоточувствительной ячейки. В-третьих, благодаря высокому качеству термического оксида кремния, выращенного на поликремниевых электродах, вероятность возникновения коротких замыканий между слоями поликремния, которые могли бы выводить прибор из строя, существенно уменьшилась.

Реализация трёхслойной *p*-канальной поликремниевой технологии потребовала разработки процесса нанесения плёнок поликремния, их легирования фосфором и гетерирования тяжёлых примесей из кремниевых подложек. С начала 1975 года разработаны серии линейных фоточувствительных ПЗС, в том числе и спектрозональные на 1024 и 2048 элементов. Созданы матричные фоточувствительные ПЗС с числом элементов от 288x256 до 800x800 для малокадрового телевидения с микрохолодильником в корпусе и линейные ФПЗС с пониженным уровнем темнового тока на 1024 и 2048 элементов с микрохолодильником в корпусе. Разработки сопровождались созданием метрологии и измерительной базы.

Разработки ПЗС с режимом ВЗН продолжались, и в 1977 году разработанными по этому направлению приборами была укомплектована первая оптико-электронная аппаратура дистанционного зондирования Земли с космических аппаратов. За цикл этих работ ряд исполнителей получили правительственные награды, была присуждена Государственная премия.

В 1980 году начались работы по созданию приборов 3-го поколения на основе низкотемпературной *n*-канальной технологии. Технология ФПЗС с поверхностным *p*-каналом исчерпала свои возможности, когда потребовались приборы, работающие с

частотой более 10 МГц и потерями заряда менее 10^{-4} на один перенос. Для решения этой задачи была разработана и внедрена в производство технология изготовления ФПЗС с объёмным n -каналом. Этот цикл работ позволил к 1985 году серийно выпускать значительную номенклатуру линейных и матричных ПЗС. Матричные ПЗС с кадровым переносом были одними из первых приборов, разработанных и освоенных в производстве на заводе: это матрицы формата 288x230 элементов, матрица с числом элементов 576x360 и матрица формата 800x800 элементов; матричные бескорпусные ПЗС с ВЗН для гибридных сборок серии Б1200 ЦП 3,4-3 формата 108x32, серии Б1200 ЦП5,6-3 формата 168x64, серии Б1200 ЦП9,10-3 формата 256x128 с электронной регулировкой чувствительности; матрица формата 288x256 со встроенным в каждый столбец устройством антиблуминга и функцией межкадрового вычитания, обеспечивающей селекцию движущегося изображения.

С 1986 года начинаются разработки линейных двухфазных ФПЗС на основе строки фотодиодов в фотообласти и скрытоканальных сдвиговых ПЗС-регистров с ионнолегированными барьерами, обеспечивающими однонаправленность переноса. Применение билинейной конструкции позволяет вдвое увеличить разрешение, если оно ограничено размером ячейки. Второй ПЗС-регистр располагается с другой стороны фотодиодов, при этом размер фотодиода вдоль линии переноса заряда уменьшается вдвое и вдвое уменьшается число переносов в ПЗС-регистре.

Основными результатами, полученными в этом направлении деятельности, являются освоенные в производстве опытного завода «Пульсар» и выпускавшиеся до 1995 г. приборы двойного применения 1200ЦЛ5 и 1200ЦЛ6 на 1024 и 2048 элементов соответственно. Одновременно выпускались опытные образцы линейного ФПЗС типа А1155, шедшего на замену изделия 1200ЦЛ6 и имевшего существенно улучшенные характеристики. На основе кристаллов ЛФПЗС типа А1155 был разработан уникальный фоточувствительный прибор ФПП310Л с встроенным в специализированный корпус термоэлектрическим охлаждением. Прибор обеспечивал возможность работы при температуре +85 °С без потери динамического диапазона и был успешно использован Московским научно-исследовательским телевизионным институтом для сканирующих систем авиационного базирования, устанавливаемых в нагретых зонах носителя.

Нельзя не упомянуть ещё одну замечательную разработку в области линейных ФПЗС – прибор К1200ЦЛ7, имевший вытянутый фотоэлемент с соотношением сторон 40:1. Прибор пользовался высоким спросом у потребителей, разрабатывающих различные спектральные аппараты и измерители линейных размеров.

В это же время начинается разработка матричных ФПЗС с межстрочным переносом. В приборах этого типа функции накопления и переноса заряда пространственно разделены. В такой структуре перенос кадра из областей накопления в экранированные от света области хранения происходит за один такт. Изображение следующего кадра накапливается в фотодиодах, а за это время зарядовые пакеты предыдущего кадра переносятся в экранированных от света вертикальных сдвиговых регистрах и построчно считываются выходным горизонтальным регистром.

Первым крупным успехом явилось создание матричного прибора ФПЗС14М на 440x576 элементов, опытные образцы которого выпускались заводом под номером А1117. В качестве фоточувствительного элемента использовалась изящная МДП-структура фотозатвора с обкладкой из очень тонкого (порядка 50 нм) легированного в процессе роста поликремния, обеспечивавшая высокое пропускание в синей области видимого диапазона спектра. Появление матричного прибора, способного формировать сигнал

для получения цветного изображения, вызвало необходимость создания группы по разработке цветокодирующих фильтров. Первые образцы таких абсорбционных RGB-фильтров были созданы на основе окрашенного желатина, нанесённого на стекло. Была сконструирована специальная установка для прецизионного совмещения и последующего монтажа цветокодирующего фильтра в специально разработанное Йошкар-Олинским заводом полупроводниковых приборов металлокерамическое основание. В результате на основе первого в отечественной практике матричного прибора с межстрочным переносом, оснащённого цветокодирующим фильтром, было получено цветное изображение. В дальнейшем цветокодирующие фильтры изготавливались методом фотолитографии непосредственно на кристаллах ФПЗС в составе пластин на основе окрашенных слоёв полиимида как в основных R-G-B, так и дополнительных цветах Ye-Cy-Mg.

В процессе работы над многоэлементным фотоприёмником для твердотельных видеокамер-камкордеров был разработан очень удачный вариант матрицы A1157 с ячейкой на основе HAD-диода с вертикальным антиблумингом и трёхуровневым управлением матричными фазами, а также многоканальная ПЗС-линия задержки для формирования сигналов яркости и цветности, на базе которых был создан действующий макет цветной видеокамеры.

Работы в эти годы не ограничивались разработками различного типа мишеней видиконов и ФПЗС. Технология ПЗС открыла перед разработчиками широкие возможности по созданию, по существу, многофункциональных систем на одном кристалле. Кроме приёма оптического изображения стали возможны его первичная обработка, подавление расплывания заряда из-за пересветок, оптимизация экспозиции, запоминание последовательных кадров изображения, их взаимное вычитание и сложение в аналоговом виде. Эти наработки позволили, в частности, провести в 1982-1984-х г.г. разработку оптоэлектронного модуля повышенной точности наведения с использованием ПЗС. Эта работа была интересна тем, что «Пульсар» разрабатывал не только элементную базу, идеология построения и работы подсистемы также были наши, поэтому удалось часть функций оптоэлектронного модуля перенести на разрабатываемый ПЗС. Была проведена сложнейшая комплексная работа, включающая в себя расчёты и проектирование блоков оптоэлектронного модуля, создание специализированной ПЗС-матрицы, разработку и изготовление специальной оснастки для полунатурных и натуральных испытаний, проведение большого объёма механических испытаний. И в конце концов были осуществлены успешные испытания разработанной аппаратуры в полевых условиях.

Другой пример. Разработка глубокоохлаждаемых гибридных ИК-сенсоров на основе Si:Ga фотоприёмников и мультиплексоров на приборах с зарядовой связью. Опять комплексная работа. На поисковом этапе разработаны конструкция, топология и технология фотоприёмника, разработан ПЗС-мультиплексор на 128 каналов, работающий при температурах существенно ниже температуры жидкого азота с минимальным тепловыделением, изготавливаются первые кристаллы ПЗС-мультиплексоров. Проводятся исследования характеристик примесного кремния применительно к поставленной задаче. В целом показано, что существует возможность создания гибридной фоточувствительной схемы на основе примесного кремния с требуемыми характеристиками, пригодной для работы в составе тактического тепловизора. Сборка разработанных изделий ведётся в условиях экспериментального сборочного производства, и в конце 1989 года работы завершаются успешными испытаниями на полигоне. Семидесятые-восьмидесятые годы – годы расцвета оптоэлектроники в «Пульсаре». В это время работы велись по многим направлениям, в том числе по созданию монолитных ИК-фотоприёмников с диодами на

основе силицида палладия, разработке фототранзисторов для видеоманитофонов и другие.

Необходимо отметить, что по направлению работ по созданию приборов с зарядовой связью были подготовлены и успешно защищены одна докторская и семь кандидатских диссертаций.

Фотоэлектроника «Пульсара» после 1990 г.

Начиная с 1992 года началась новая история фоточувствительных приборов в «Пульсаре» по разработке серий современных матричных и линейных ФПЗС.

Особо следует отметить, что линейный ФПЗС типа ФПЗС14Л – прибор А1155 – выпускается мелкосерийно и успешно эксплуатируется в составе системы «Искандер», аппаратуре для программы «Открытое небо» и ряде других систем.

Совершенствование характеристик разрабатываемых приборов потребовало разработки систем физико-технологического и приборно-схемотехнического моделирования и проектирования ФПЗС. На базе разработанных моделей и алгоритмов расчёта, а также известных технологических моделей процессов легирования полупроводников, физических моделей прохождения света через многослойное покрытие электродной системы ПЗС, моделей шумов в ПЗС было развито программное обеспечение, предназначенное для проектирования элементов ПЗС с поверхностным и объёмным каналами. Прикладные программы содержат два уровня: проектирование элементов ПЗС и проектирование ПЗС, содержащих внутрикристалльное электронное обрамление на МДП-транзисторах.

Базовая технология фоточувствительных приборов с зарядовой связью, разработанная специалистами «Пульсара», позволяет создавать ФПЗС российского производства, включающие практически всю палитру типономиналов известных линейных и матричных приёмников изображения. Создание и освоение производства стратегически важных для России ФПЗС открывает принципиально новые возможности в научных исследованиях, оборонной технике, медицине, промышленности и сельском хозяйстве.

В таблицах 1 и 2 приведена номенклатура линейных и матричных ФПЗС, разработанных и выпускаемых ФГУП «НПП «Пульсар» с использованием фаундри-услуг ОАО «НИИМЭ и Микрон»[18].

Таблица 1

Номенклатура линейных фотоприёмников					
Тип фотоприёмника	Обозначение	Число выходов	Число фотоэлементов	Размер фотоэлемента, мкм	Общая частота вывода, МГц
MPL256B	A-1227	2	256	13x13	12
MPL1024B	ФПЗС13Л	2	1024	13x13	12
MPL2048B	ФПЗС14Л	2	2048	13x13	12
MPL1024S	ФПЗС11Л	1	1024	13x13	20
MPL2048S	A-1228	1	2048	13x13	20
MPL4096S	ФПЗС12Л	1	4096	13x13	20
MPL3072BH	A-1233	4	3072	13x13	24
MPL4096BH	A-1234	4	4096	13x13	24
MPL6144BH	A-1235	4	6144	13x13	24
MPL4096H	ФПЗС15Л	2	4096	6,5 x 6,5	20
MPL6144H	ФПЗС16Л	4	6144	6,5 x 6,5	40
MPL8192H	ФПЗС17Л	4	8192	6,5 x 6,5	40
MPL12288H	ФПЗС18Л	4	12288	6,5 x 6,5	40

Таблица 2

Номенклатура матричных фотоприёмников				
Тип фотоприемника	Обозначение	Число фотоэлементов (ГхВ)	Шаг элемента, мкм	Частота вывода, МГц
МРМ 500 IL-11	ФПЗС 23М	500x582	17x11	9,6
МРМ 756 IL-11	ФПЗС 24М	756x581	11x11	15
МРМ 752 IL-8,45	ФПЗС 25М	752x582	8,6x8,3	15
МРМ 756 IL-17	A-1240	752x582	17x17	15
МРМ 1024 IL-17 (4 выхода)	A-1241	1024x1024	12x12	100 (25МГц на один выход)
МРМ 1280 FT - 11	A-1249	1280x2048	6,8x6,4	30
МРМ 768x128 TDI 7x7	A-1248	768 × 128	7x7	15
МРМ 1024x128x1 TDI 6x6 (1 выход)	A-1247	1024 x 128	6x6	15
МРМ 1024x128x2 TDI 6x6 (2 выхода)	A-1244	1024 × 128	6x6	30 (15 МГц на один выход)
МРМ 960x32 TDI 7x7 (32 выхода)	A-1245	1024 x 128	6x6	
	A-1246	960 x 32	7x7	160 (5 МГц на один выход)

В целом, говоря о современных направлениях работ по созданию фотоэлектронных приборов двойного назначения, следует отметить разработки по видимому диапазону:

- линейные и матричные;
- приёмники лазерного излучения;
- фоточувствительные модули и фотоприёмные устройства

и разработки специальных фотоприёмников:

- электронно-чувствительные матричные фотоприёмники;
- фотоприёмники дальнего ИК-диапазона;
- фотоприёмники среднего ИК-диапазона;
- фотоприёмники УФ-диапазона;
- микросхемы поддержки (мультиплексоры);
- фоточувствительные модули и фотоприёмные устройства ИК-диапазона.

С 2003 года в отделении фотоэлектроники начинаются новые работы по созданию электронно-чувствительных матриц для электронно-оптических преобразователей (ЭОП) 5-го поколения.

Известно [19,20], что ЭОП, являющиеся основными элементами приборов ночного видения (ПНВ), обычно содержат фотоэмиттирующий катод для эмиссии потока электронов, соответствующих потоку излучения, которое проецируется на фотоэмиттирующий катод, ускоряющие и фокусирующие электроды и люминесцентный экран. Кроме того, современные ЭОП зачастую содержат в своём составе микроканальную пластину (МКП), расположенную между фотоэмиттирующим катодом и люминесцентным экраном.

Улучшение характеристик ЭОП, в частности, было связано с поиском путей более совершенного, чем в люминофорном экране, преобразования электронного изображения в видимое. В результате такого поиска уже в 90-х годах сформировалась концепция построения ПНВ четвёртого поколения, основанная на использовании телевизионного выхода. В ПНВ четвёртого поколения в его схему вводится многоэлементный фотоприёмник на основе ПЗС, обеспечивающий электронный выход получаемого изображения на телевизионный монитор. Схема такого прибора включает фотокатод, микроканальную

пластину, люминесцентный экран, волоконно-оптический элемент (ВОЭ), включённый между экраном ЭОП и ПЗС-фотоприёмником, и соответственно ПЗС-фотоприёмник.

Поиск более совершенных конструкций ЭОП привёл к идее построения ЭОП 5-го поколения, в которых ПЗС-матрица помещается внутрь вакуумируемого корпуса ЭОП вместо экрана. При этом рабочей поверхностью у матрицы является её тыльная сторона, бомбардируемая электронами, и, таким образом, сенсор выполняется по схеме электронно-бомбардируемого ПЗС (electron-bombarded CCD-EBCCD).

Высокоэнергетичные фотоэлектроны поглощаются в теле матрицы, энергия электронов, как и в конструкции суперкремникона, тратится на рождение пар электрон-дырка, диффундирующих к накопительным элементам матрицы. Ясно, что для получения в этом случае необходимого разрешения требуется существенное утонение матрицы до величины порядка 10-15 мкм.

В описываемых ЭОП принимаемое изображение преобразуется ПЗС-матрицей в видеосигнал и может наблюдаться на дистанционно удалённом дисплее. ЭОП такой конструкции выпускаются, в частности, фирмой HAMAMATSU и превосходят остальные типы ЭОП по информационной ёмкости и пороговой освещённости. Тем не менее, приборы такого типа подвергаются серьёзной справедливой критике [21], так как им присущ ряд существенных недостатков, связанных с малой толщиной матрицы и высокой энергией фотоэлектронов.

В «Пульсаре» был развит другой подход к формированию ЭОП 5-го поколения, в конструкции которого ЭЧПЗС-матрица обращена к падающему электронному потоку лицевой стороной [22, 23]. В этом случае представляется возможность замены матрицы с кадровым переносом на матрицу с межстрочным переносом и, кроме того, использования режимов работы с пониженным (по сравнению с обычным) напряжением, подаваемым на вакуумный промежуток между МКП и поверхностью матрицы. В результате отпадает необходимость утонения матрицы, существенно упрощается процесс изготовления матрицы и её монтажа в корпусе ЭОП, устраняется «смаз» изображения и ликвидируются все негативные последствия от применения высоких электрических полей в пространстве МКП – ЭЧПЗС-матрица.

В основу ряда проработанных вариантов ЭЧПЗС-матрицы [24] были положены конструкции и технологический процесс изготовления ПЗС-матриц с объёмным каналом. В качестве металлокерамического вакуумного держателя для размещения ЭЧПЗ-матрицы используется специально разработанный металлокерамический держатель.

В разработанном варианте держатель состоит из двух керамических деталей: основания и пьедестала. Необходимая плоскопараллельность поверхности пьедестала и присоединительной к ЭОП поверхности основания достигается благодаря тому, что обе детали предварительно отшлифованы. Для соединения пьедестала с основанием и ЭЧПЗС-матрицы с пьедесталом был разработан защищённый патентом [26] специальный метод прецизионного соединения твердотельных материалов и структур [27].

Сборки ЭЧПЗС-матриц на металлокерамическом держателе получили название «формирователь сигнала изображения электронный» (ФСИЭ).

Были изготовлены и исследованы образцы работоспособных ФСИЭ с матрицами оптического формата 2/3 дюйма с количеством элементов 532x596 и оптического формата один дюйм с количеством элементов 756x580.

Для измерения динамических характеристик ЭЧПЗС-матриц специалистами ФГУП «НПП «Пульсар», МИРЭА и ЗАО «УНПП «Атомикс» был разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий перепрограммировать тактовую диаграмму управления

СБИС.

Следует упомянуть также серию работ, проведённую в 1999-2003-х г.г. по разработке кремниевых фотопреобразователей для солнечных батарей. Работы велись совместно с основными создателями солнечных батарей в России – ФГУП НПО «Квант», а также в обеспечение разработки, проводимой Государственным научно-производственным ракетно-космическим центром «ЦСКБ-Прогресс», в части создания специальных фотоэлектрических преобразователей, предназначенных для работы на космических аппаратах в условиях сконцентрированного потока солнечной энергии. Работа была направлена на совершенствование энерго-массовых характеристик систем энергоснабжения космических аппаратов, основанных на фотопреобразовании солнечной энергии в электрическую. Следует отметить, что на сложность возникших на этом направлении проблем указывал тот факт, что несмотря на огромный объём публикаций в ведущих технически развитых странах, посвящённых этой проблеме, темп роста эффективности серийно изготавливаемых солнечных элементов (СЭ), тем не менее, чрезвычайно низок.

Для достижения поставленной цели был проведён комплекс расчётных, методических, метрологических и экспериментальных работ, направленных на отработку основных технологических операций изготовления кремниевых СЭ. При этом была разработана технология получения кремниевых полупроводниковых структур мембранного типа с толщиной активной области 80...120 мкм, предназначенных для изготовления солнечных элементов космического назначения [28], и разработана уникальная технология прецизионного утонения фронтального n -слоя n - p -структур СЭ с точностью 5 нм [29], изменена конструкция металлизационной сетки, наносимой на фронтальную поверхность СЭ, созданы методика и программа, позволяющие оптимизировать параметры антиотражающих покрытий СЭ, исследована возможность использования алмазоподобных плёнок в качестве антиотражающих и защитных покрытий СЭ, созданы методика, программа и аппаратура, позволяющие измерять комплекс параметров СЭ. В целом, по этому направлению были разработаны конструкция и технология изготовления кремниевых СЭ с рекордной по тем временам эффективностью более 15 % (в условиях АМО), изготовлены и исследованы образцы СЭ с такими параметрами.

Были разработаны конструкция и технологическая последовательность изготовления образцов фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), работающих в условиях сконцентрированного излучения и позволяющих проводить последовательное соединение СЭ, входящих в состав ФЭП. В настоящее время эти работы прерваны.

Особое место в период после 2000 года занимают поисковые работы в области нанотехнологии, которые были направлены на разработку на основе наноплёнок из линейно-цепочечного углерода высокоэффективных электронно-чувствительных ПЗС-матриц для принципиально нового класса оптико-электронных систем и приборных комплексов экологического мониторинга местности, нефтегазопроводов, линий электропередач, радиационного загрязнения, медицинской диагностической аппаратуры, а также оптико-телевизионных систем охраны особо важных государственных объектов. Работы проводились в тесном сотрудничестве с МГУ им. М. В. Ломоносова, Чебоксарским государственным университетом, ОАО «НПО Геофизика НВ».

Конкретная цель работы заключалась в исследовании характеристик наноплёнок на основе линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) и особенностей их нанесения на структуры электронно-чувствительных ПЗС-матриц. В процессе работы в Чебоксарском государственном университете выращивались sp^1 -углеродные плёнки методом импульсно-плазменного ионностимулированного осаждения. Суть метода заключается в том, что

осаждение углерода проводится из плазменных сгустков. Частота импульсов варьируется в пределах 1-30 Гц, длительность импульса – 100 мкс. Рост плёнки sp^1 -углерода стимулируется дополнительным облучением ионами аргона. Энергия ионов аргона, облучающих поверхность растущей плёнки, может варьироваться в пределах от 50 до 5000 эВ. Технология позволяет растить линейно-цепочечные плёнки с высокой скоростью осаждения.

Атомная структура плёнок изучалась в МГУ в просвечивающем электронном микроскопе JEM-100С со специальной гониометрической приставкой, позволяющей поворачивать плоскость плёнки относительно электронного луча на угол $\pm 50^\circ$. Плёнки исследовались в режиме дифракционного контраста. Проведённые исследования позволили установить связь структуры получаемых плёнок с условиями их получения. Было показано, что плёнки ЛЦУ имеют слоистую структуру: слои состоят из линейных фрагментов цепочек, предположительно разделённых коррелированными изломами. Изломы подчиняются статистически-случайному распределению углов и положений вдоль цепочки. Раманспектроскопия этих плёнок показывает пик в области 2100 см^{-1} , который однозначно характеризует линейные sp^1 -связи. Сканирующая туннельная микроскопия показала туннельную прозрачность плёнок ЛЦУ. Это означает, что плёнка ЛЦУ состоит из непересекающихся высокопроводящих цепочек.

Исследование электропроводности плёнок ЛЦУ показало наличие их высокой анизотропии. В поперечном направлении плёнки являются диэлектриками с прыжковым механизмом проводимости. Малая величина проводимости плёнок в продольном направлении доказывает наличие в них квантовой (баллистической) проводимости в этом направлении.

Было проведено исследование совместимости вариантов технологического процесса формирования наноплёнок на основе ЛЦУ с конструкцией ЭЧПЗС-матрицы. Установлено высокое качество адгезии углеродных плёнок ЛЦУ ко всем материалам, используемым в конструкции ЭЧПЗС-структур. Установлено также, что существующие фоточувствительные ПЗС-структуры, изготовленные по технологии, аналогичной технологии создания ЭЧПЗС-структур, выдерживают технологическую обработку, связанную с нанесением углеродных наноплёнок, в широком диапазоне режимов нанесения без заметного изменения исследованных характеристик.

На основе результатов исследований была предложена конструкция ЭЧПЗС-матрицы с резистивным слоем для улучшения коэффициента использования чувствительной поверхности. Особенностью этой конструкции является то, что её резистивный слой выполнен из плёнки линейно-цепочечного углерода. При этом используется уникальное свойство анизотропии удельного сопротивления плёнки, при которой её поперечное и продольное удельные сопротивления отличаются примерно на пять порядков. На предложенную конструкцию получен патент на изобретение [30]. Следует отметить, что, как показали патентные исследования, впервые в мировой практике предложено твердотельное электронное устройство, в конструкции которого используется наноплёнка на основе ЛЦУ.

В соответствии с предложенной конструкцией были изготовлены кристаллы ЭЧПЗС-матриц с встроенным в их структуру нанослоем на основе ЛЦУ. Собраны макетные образцы ЭЧПЗС-матриц на металлокерамическом основании ЭОП. Измерены их статические и динамические характеристики. Установлена работоспособность разработанных образцов в фотоэлектрическом режиме с использованием телевизионных тест-таблиц.

Анализ физических свойств наноплёнок на основе ЛЦУ под углом зрения их возможного использования при создании ЭОП позволил наметить ещё ряд интересных направлений для дальнейшего развития работ и выработать соответствующие рекомендации [31]. Во всех этих новых технических решениях используется либо анизотропия удельной электропроводности плёнок в продольном и поперечном направлениях, либо высокий коэффициент вторичной эмиссии плёнок на прострел.

К своему 40-летию фотоэлектроника «Пульсара» интенсивно развивает новое направление – матричные фотоприёмники и мультиплексоры для гибридных фотоприёмников на основе комплементарных металл-окисел полупроводниковых (КМОП) структур, разработан ряд КМОП-мультиплексоров для гибридных ИК-фотоприёмников (таблица 3) и образцы матричных фотоприёмников формата от 256x256 до 1024x1024 элементов [32].

Таблица 3

Номенклатура криогенных КМОП мультиплексоров для гибридных фотоприёмников									
Номер МС	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип входного транзистора	p	n	p	n	p	p	p	n	p
Количество каналов, ячеек	2x64	1x128	32x288	4x288	128x 128	256x 256	320x 256	320x 256	640x512
Период каналов, ячеек, мкм	60	80	140x20	43x28	50x50	35x35	30x30	30x30	20x20
Зарядовая емкость, Me-	100-2	200-20	1	160-80	20	20	10	5 - 50	>5
Количество диф. выходов	2 или 4	1	4	4	1	4 или 8	4 или 8	4	4 или 8
Время интегрирования, % от цикла измерения (кадра, строки)	95	95	99,9%; snapshot	Аналоговое ВЗН	99,9	0,4%; 99,9%; snapshot	0,4%; 99,9%; snapshot	От 0,01-До 2%;	Snap shot
Макс. тактовая частота, МГц	5	5	> 4	5	7	>10	>10	>4	>10
Рассеиваемая мощность, мВт	60	30	10	20	35	<50	<50	<20	<80
Сред. кв. шум, $e_{-1/2}$ (мкВГц)	5000	(0,3)	150	1000	1000	800	800	800	<1000

Ещё один шаг в развитии направления был сделан с созданием в отделении фотоэлектроники отдела по разработке телевизионных модулей, видеокамер и фотоприёмных устройств, и эти изделия уже нашли своего потребителя [33,34].

В настоящее время отделение фотоэлектроники решает задачи развития и освоения технологии и создания перспективных конструкций линейных и матричных фотоприёмников на основе ПЗС и КМОП-структур видимого диапазона; создаёт специализированные фотоприёмники УФ, видимого и ИК-диапазонов, осуществляет разработку и производство

функционально законченных изделий – телевизионных модулей и фотоприёмных устройств на базе фотоприёмников.

Заключение

Итак, за сорок лет пройден интереснейший путь развития фотоэлектроники в «Пульсаре», созданы уникальные приборы, работающие в ультрафиолетовом, видимом, ближнем, среднем и дальнем ИК-диапазонах. Создана базовая технология фоточувствительных приборов с зарядовой связью. Усовершенствованы существующие технологические процессы создания приборов и разработаны новые. Разработана система физико-топологического и приборно-схемотехнического моделирования и проектирования фоточувствительных ПЗС – современной элементной базы фотонных систем. Создание и освоение производства стратегически важных фоточувствительных приборов широкой номенклатуры открывает новые возможности в научных исследованиях, оборонной технике, промышленности и сельском хозяйстве. На базе этих приборов разработана и разрабатывается уникальная аппаратура для исследований в космосе, экологии, биологии, медицине, созданы аэрокосмические и наземные системы технического зрения для промышленности. Нарботанный опыт в области создания фотоэлектронных приборов и устройств на их основе позволяет решать всё более сложные задачи разработки многофункциональных систем как для нужд обороны, так и народного хозяйства, техники и науки.

Литература

15. W. S. Boyle, G. E. Smith. Charge Couple Semiconductor Devices // BSTI. – 49. – 1970. – P. 587-593.
16. К. Секеи, М. Томпсет. Приборы с переносом заряда // М.: Мир. – 1978.
17. Я. А. Федотов, Ф. П. Пресс, А. В. Вето и др. Фотопреобразователь на основе приборов с зарядовой связью // Физика и техника полупроводников. – 1976. – Т. 10. – Вып. 2. – С. 361-363.
18. В. В. Воронов, М. И. Какоулин, Е. В. Костюков и др. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью – современная элементная база фотонных систем // Электронная промышленность. Наука, технологии, изделия. – 2003. – Т. 2. – С. 155-168.
19. С. В. Куклев, Д. С. Сколов, И. Н. Зайдель // «Электронно-оптические преобразователи». – М. – 2004.
20. Ю. К. Грузевич, Ю. Н. Гордиенко, В. А. Солдатенков // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2005. – С. 51-60.
21. В. П. Бегучёв, А. Л. Чапкевич, А. М. Филачёв // «Прикладная физика». – 1999. – № 2.
22. Международный патент WO 03/032358A1 от 17.04.2003г. R. G. Benz, N. L. Thomas, A. W. Smith.
23. Патент на изобретение №2324256 от 17.11.2006. П. Б. Константинов, Ю. А. Концевой, Е. В. Костюков, А. С. Скрылёв, В. В. Чернокожин, Е. В. Дегтярёв, А. С. Терехов, Г. Э. Шайблер, С. Н. Косолобов.
24. П. Б. Константинов, Е. В. Костюков, В. В. Чернокожин, А. С. Скрылёв, И. С. Борисов, А. М. Маклаков. Электронный формирователь сигнала изображения для электронно-оптических преобразователей 5-го поколения // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2009. – Вып. 2 (223). – С. 62-68.
25. И. С. Борисов, Е. В. Костюков, А. А. Пугачёв. Автоматизированное проектирование элемента электронно-чувствительной ПЗС-матрицы // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – Вып. 2(225). – С. 61-68.
26. Патент на изобретение №2342231 от 07.11.2006. П. Б. Константинов, Ю. А. Концевой, В. В. Чернокожин, О. В. Сопов.
27. П. Б. Константинов, Ю. А. Концевой, В. В. Чернокожин, О. В. Сопов. Способ прецизионного соединения твердотельных материалов и структур // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – Вып. 2(225). – С. 38-41.
28. П. Б. Константинов, Ю. А. Концевой, Ю. А. Максимов // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – № 1. – С. 19-23.
29. П. Б. Константинов, Ю. А. Максимов // Сборник XV научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления «Датчик-2003». – М. – МГИЭМ. – 2003. – С. 129-130.
30. Патентное изобретение №2366031 от 20.09.2007. П. Б. Константинов, Ю. А. Концевой, Е. В. Костюков, Ю. И. Завадский, А. С. Скрылёв, В. В. Чернокожин и др.
31. Отчет о НИР «Субвенция». № госрегистрации УДК 621.383.8-022.532 Инв. №3-0-01.168.24.042-17. – М. – 2007.