

*На правах рукописи*

**АЛЫМОВ ОЛЕГ ВИТАЛЬЕВИЧ**

**ЛИНЕЙНЫЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ С ПЕРЕНОСОМ  
ЗАРЯДА ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО  
СОЛНЦУ**

Специальность – 05.11.07

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2013

Работа выполнена в ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Электрон» и в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор ***Быстров Юрий Александрович***, профессор кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор ***Афанасьев Валентин Петрович***, зав. кафедрой квантовой электроники и оптико-электронных приборов СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

доктор физико-математических наук, профессор ***Иванов Владислав Георгиевич***, ведущий научный сотрудник Военного научно-исследовательского института Воздушно-космической академии им. Можайского

**Ведущая организация:** ОАО «Светлана»

Защита состоится «20» ноября 2013 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.238.08 при Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.238.08  
к.т.н. доцент

Смирнов Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Приборы с переносом заряда были изобретены в 1969 г. В. Бойлем и Дж. Смитом и тем самым было положено начало развитию нового научно-технического направления в области твердотельной фотоэлектроники. За свои работы в этой области В. Бойль и Дж. Смит в 2009 г. были удостоены Нобелевской премии по физике за изобретение оптических полупроводниковых сенсоров, как это сформулировано Нобелевским комитетом.

Приборы с переносом заряда (ППЗ) или, как их часто называют, приборы с зарядовой связью (ПЗС) наибольшее применение нашли для преобразования излучения в электрический сигнал. ППЗ фактически заменили собою вакуумные фотоэлектрические приборы в телевидении, фотоаппаратуре и специальных областях применения. Это стало возможно благодаря уникальным параметрам и свойствам ППЗ, таким как: малые геометрические размеры, простота управления и низкие управляющие напряжения, жесткий геометрический растр и ударопрочность, нечувствительность к магнитным полям и др.

Большой вклад в развитие физики и технологии фотоприборов с переносом заряда, создание новых конструкций этих приборов внесли российские ученые и инженеры: Сурис Р.А., Федотов Я.А., Пресс Ф.П., Носов Ю.Р., Шилин В.А., Кузнецов Ю.А., Крымко М.М., Вето А.В., Костюков Е.В., Степанов Р.М., Арутюнов В.А., Вишневский Г.И., Черемухин Г.С. и др.

Приборы с переносом заряда также применяются в космической технике в качестве датчиков систем ориентации космических аппаратов (КА) по Солнцу. Освоение электронной промышленностью производства линейных фотоприемников с переносом заряда (ЛФППЗ) позволило создать базу для разработки статических приборов ориентации по Солнцу без механически перемещающихся элементов. Однако практика использования ЛФППЗ общего применения показала, что для систем ориентации КА по Солнцу необходимо использовать приборы, специально разработанные для этой цели, обладающие повышенной устойчивостью к воздействию космического излучения (здесь и далее радиационной стойкостью), способные работать при изменении освещенности в широких пределах, имеющие повышенную геометрическую стабильность и большой срок службы.

Поэтому проблема разработки прогрессивных конструкций и технологии производства ЛФППЗ для систем ориентации КА по Солнцу является актуальной и имеет большое практическое значение. Актуальность данной проблемы подтверждается и на государственном уровне. В частности, разработана и принята Федеральная целевая программа «Развитие оборонно-промышленного комплекса на период 2011-2020 г.г.», в которой в разделе

№5 «Разработка комбинированных устройств электроники» обращается внимание на создание ЛФППЗ специального назначения.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является исследование и разработка научно обоснованных конструкторских и технологических решений, направленных на создание линейных фотоприемников с переносом заряда для ориентации космических аппаратов в пространстве по Солнцу.

В соответствии с поставленной целью основными направлениями работы являлись:

- разработка архитектуры ЛФППЗ, реализующей высокую надежность, радиационную стойкость и способность работать при освещенности до 180000 лк;
- исследование способов предотвращения растекания электронного пакета и разработка оптимальной конструкции антиблуминга;
- разработка системы переноса с большой зарядовой емкостью и высокой эффективностью переноса;
- исследование влияния параметров ЛФППЗ на точность измерения угловой координаты;
- разработка технологии производства радиационностойких, с высокой эффективностью переноса ЛФППЗ;
- организация производства ЛФППЗ, предназначенных для применения в системах ориентации КА в пространстве по Солнцу.

### **Методы исследования и использованная аппаратура**

При решении поставленных задач применялись следующая аппаратура и основные методы исследований:

- анализ и обобщение литературных данных расчета и конструирования, а также технологии производства линейных фотоэлектрических приборов с переносом заряда;
- методы математического анализа;
- комплекс оборудования для измерения фотоэлектрических параметров ЛФППЗ;
- приборы для спектральных исследований;
- импульсные приборы и осциллографическая техника для визуализации быстропротекающих процессов;
- комплекс технологического оборудования, предназначенного для изготовления ЛФППЗ;
- средства вычислительной техники для обработки экспериментальных результатов.

### **На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Разработанные ЛФППЗ, предназначенные для ориентации космических аппаратов по Солнцу, имеют погрешность измерения угловой координаты менее  $10 \div 15$  угл. сек в диапазоне углов  $\pm 80^\circ$ , вызванную неодинаковой чувствительностью отдельных элементов, разбросом их

размеров, а также углом падения светового луча на фоточувствительную поверхность.

2. Созданные линейные фоточувствительные приборы с переносом заряда при работе антиблуминга в режиме электронного экспонирования со временем накопления заряда порядка 50 мкс в сочетании с нейтральным фильтром с коэффициентом пропускания 0,03 обеспечивают измерение угловой координаты при освещенности до 180000 лк.
3. Двухслойный подзатворный диэлектрик, выращенный методом пирогенного окисления и состоящий из слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной 10-15 нм и слоя  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 150-160 нм, имеет радиационную стойкость в 2-2,1 раза большую по сравнению с ранее используемым диэлектриком ( $\text{SiO}_2$  – 65 нм,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 75 нм).

#### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Осуществлен анализ влияния угла падения светового луча, неодинаковой чувствительности и разброса размеров фоточувствительных элементов ЛФППЗ на точность измерения угловой координаты.
2. Показано, что применение антиблуминга в режиме электронного экспонирования в сочетании с нейтральным фильтром обеспечивает работу ЛФППЗ в системе ориентации КА по Солнцу при освещенности до 180000 лк.
3. Разработана последовательность и режимы технологических операций, позволяющие обеспечить радиационную стойкость созданного ЛФППЗ до  $10^6$  рад.
4. С использованием пакета прикладных программ TAURUS WORKBENCH, осуществлено моделирование наиболее важных узлов ЛФППЗ: обедненные фотодиоды, секция накопления, секция антиблуминга, узел передачи заряда из секции накопления в сдвиговой регистр. В процессе моделирования определялись распределение легирующих примесей по глубине кристалла, распределение потенциального рельефа отдельных элементов структуры, уровни управляющих напряжений.
5. Разработаны конструкция и технология изготовления ЛФППЗ для систем ориентации космических аппаратов по Солнцу с высокой надежностью, радиационной стойкостью и способных работать при изменении освещенности в широких пределах.
6. Разработана конструкция «обедненного» фотодиода, область  $p^{++}$  которого подключена к подложке, что обеспечивает стабильность апертурных, спектральных и темновых характеристик ЛФППЗ.

#### **Практическая значимость диссертационной работы**

1. Разработана архитектура линейных фоточувствительных приборов с переносом заряда, предназначенных для ориентации космических аппаратов по Солнцу.

2. Предложена и внедрена в производство технология изготовления ЛФППЗ, которая позволяет повысить радиационную стойкость приборов, обеспечить большой срок службы, свыше 100000 ч, снизить неэффективность переноса и увеличить точность измерения угловой координаты.
3. Разработано и освоено в опытном производстве несколько типов ЛФППЗ для ориентации КА по Солнцу: ФППЗ-8Л, ФППЗ-30Л, ФППЗ-32Л.
4. С использованием разработанных ЛФППЗ созданы системы ориентации КА по Солнцу, которые применяются в аппаратах «Ямал», «Канопус», «Электро» и др.

Практическая новизна предложенных конструкторско-технологических решений отмечена на государственном уровне выдачей авторского свидетельства и патента на полезную модель

#### **Апробация работы**

Результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на:

- 8-ой НТК «Системы наблюдения и дистанционного зондирования Земли». Москва, 2011;
- 8-ой МНТК «Телевидение: передача и обработка изображений». СПб, 2011;
- 21-ой МНТК «Фотоэлектроника и приборы ночного видения». Москва, 2010;
- 9-ой НТК «Твердотельная электроника и сложные функциональные блоки РЭА». Зеленоград, 2010;
- 7-ой НТК «Системы наблюдения и дистанционного зондирования Земли». Москва, 2010;
- 10-ой МНТК «Современное телевидение и радиоэлектроника». Москва, 2012.

#### **Реализация и внедрение результатов исследований**

Внедрение результатов исследований диссертационной работы осуществлялось по нескольким направлениям.

С использованием ЛФППЗ-30Л разработаны оптико-электронные приборы ориентации по Солнцу статического типа 201М и 202М, которые применяются в космических аппаратах системы ГЛОНАСС. Прибор обеспечивает выдачу информации о положении КА относительно Солнца при одновременном попадании в поле обзора излучения Земли, Луны, звезд яркостью до  $10^5$  кд/м<sup>2</sup>. По программе «Создание оптико-электронных приборов ориентации и навигации нового поколения для перспективных космических аппаратов» разработан прибор ориентации по Солнцу типа 338К, в котором используется ЛФППЗ-32Л. Прибор 338К предназначен для работы в составе систем ориентации КА типа «Электро», «Канопус», «Спектр», «Экспресс».

На основе разработанных и освоенных в опытном производстве линейных фоточувствительных приборов с переносом заряда типа 8Л был создан прибор для угловых измерений типа ЗЧ-30.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 19 научных работ, из них 4 статьи в научно-технических журналах, в том числе три публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, сделано 13 докладов на Международных и Российских научно-технических конференциях, получены авторское свидетельство на изобретение и патент на полезную модель. **Личный вклад автора** заключается в определении цели и разработке методов исследований, проведении расчетов и моделировании процессов, протекающих в ЛФППЗ, необходимых для конструирования и разработки технологии приборов, проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных результатов, а также участие в организации производства линейных фоточувствительных приборов с переносом заряда, предназначенных для ориентации космических аппаратов по Солнцу.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Она содержит 154 страницы машинописного текста, включает 55 рисунков и 8 таблиц. Список литературы насчитывает 91 наименование.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** раскрываются области применения и современное состояние исследований и разработок ЛФППЗ, используемых в системах ориентации КА по Солнцу. Обосновывается актуальность темы, отмечаются цель и задачи работы, определяются научная новизна и практическая значимость, перечисляются методы исследования, приводятся сведения об апробации работы и структуре диссертации, сформулированы научные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены вопросы ориентации космических аппаратов в пространстве. Отмечено, что в большинстве отечественных и зарубежных КА для трехосной ориентации в орбитальной системе координат (опорной системе координат) используют информацию об угловом отклонении от нее системы координат, жестко связанной с КА. В качестве датчиков первичной информации о взаимном положении этих систем координат используют оптоэлектронные приборы (астроприборы), определяющие угловое положение аппарата относительно астрономических источников излучения: Земли, звезд, Солнца.

Поскольку Земля, как тип астроориентира может выступать двояко в зависимости от диапазона длин волн используемого излучения, приборы ориентации по Земле подразделяются на приборы видимого и приборы инфракрасного (ИК) диапазона. Приборы ориентации по Земле видимого

диапазона не получили широкого распространения ввиду их серьезного недостатка – ограничения по времени работы из-за изменения для наблюдателя условий освещения Земли Солнцем вплоть до полного отсутствия такого освещения. Приборы ориентации по Земле в ИК диапазоне строятся либо на основе одноэлементных приемников излучения и системы оптико-механического сканирования, либо с использованием микроболометрических матриц. Недостатком таких систем является необходимость довольно частой калибровки их чувствительности в полете.

В систему ориентации КА может входить неавтономная навигационная радиосистема с использованием GPS или ГЛОНАСС, работающих в сантиметровом диапазоне длин волн.

Для звездных приборов ориентации основным типом приемника является матрица ФППЗ, а средством обработки информации – микропроцессор с очень высоким быстродействием и большой памятью. Из всей совокупности требований, которые предъявляются к звездным приборам ориентации, основными являются: способность работать в условиях сильных световых помех и обеспечение высокой точности конечных измерений при сравнительно низкой точности значения положения рабочей звезды перед началом работы оптоэлектронного прибора. Так как приборы ориентации КА по звездам подвержены значительному воздействию помех, при работе таких приборов большое внимание уделяется режиму селекции.

Солнечные приборы ориентации и навигации КА работают в видимом диапазоне спектра. В таких системах вопрос о выделении полезного сигнала на фоне помех практически не стоит, поэтому при их создании отсутствуют ограничения, вытекающие из требований оптимизации пространственно-временной обработки по критерию минимизации влияния помех.

В качестве фоточувствительных элементов в системах ориентации по Солнцу могут использоваться как матричные, так и линейные ФППЗ. Темп поступления информации с матричного приемника на 2-3 порядка выше, чем с линейного, во столько же раз больше объем первичной информации для обработки. Это приводит к необходимости применять для матричного приемника средств вычислительной техники большой производительности и с существенным объемом памяти, а это, в свою очередь, увеличивает потребляемую мощность, габаритные размеры и массу.

При использовании линейного ФППЗ существенную часть обработки информации удастся выполнить на уровне оптического сигнала. В результате объем поступающей в процессор информации и темп ее поступления значительно меньше, чем при использовании матричного приемника.

Проведенный в первой главе анализ существующих систем ориентации КА позволил обосновать перспективность использования ЛФППЗ в устройствах ориентации по Солнцу и определить пути дальнейшего совершенствования таких систем.

**Во второй главе** изложены результаты исследований, направленные на создание конструкции ЛФППЗ, предназначенного для работы в условиях



открытого космоса. При разработке архитектуры прибора в основу были положены следующие критерии: максимальный измеряемый угол, радиационная устойчивость, способность работать при значительной освещенности, минимальная неэффективность переноса, простота системы управления, долговечность и др.

Для обеспечения большого срока службы (более 10 лет) в архитектуре прибора использован принцип резервирования. С этой целью на кремниевой полупроводниковой пластине сформированы два одинаковых линейных преобразователя, расположенные параллельно друг другу. Кроме того, предусмотрено использование двух сдвиговых регистров для обслуживания одной линейки фоточувствительных элементов. Это также повышает надежность ЛФППЗ в целом, поскольку отказ одного из регистров не приводит к выходу из строя всего устройства.

В разработанной конструкции для повышения радиационной стойкости в качестве фоточувствительных элементов используются обедненные фотодиоды (в зарубежной литературе *pinned photodiode (PPD)*). В них  $n^+$  область обычного фотодиода заменена на  $n^-$  область и примыкающую к ней  $p^{++}$  область малой толщины. Такая конструкция не содержит зон фотогенерации и генерации темнового тока, расположенных на границе раздела  $Si-SiO_2$ , которые характеризуются невысокой радиационной стойкостью, поскольку  $p^{++}$  область подключена к подложке через стопорные  $p^+$  области. Относительное легирование  $p^-$  и  $n^-$  областей выбрано так, чтобы  $n^-$  область была полностью обеднена, а в  $p^-$  области находился объемный заряд дырок. Таким образом, обедненный фотодиод может рассматриваться как беззатворная версия скрытого канала. Разработанная конструкция фотодиода, в которой отсутствует полевой электрод и использована система скрытого канала, позволяет повысить радиационную стойкость ЛФППЗ.

Фоточувствительное поле одного из разработанных крупноформатных приборов состоит из 2600 фоточувствительных и 44 служебных элементов, рис. 1.



Рис. 1 Структура фоточувствительной линейки

Служебные элементы позволяют предотвратить влияние краевого эффекта на работу линейки активных элементов, уменьшить погрешность измерения угловой координаты, обусловленной темновым сигналом регистра и темновым сигналом фоточувствительных элементов.

Особенностью предложенной и реализованной архитектуры ЛФППЗ для ориентации КА по Солнцу является наличие дополнительной структуры, предназначенной для производственных проверок работоспособности основной фоточувствительной секции и периодического контроля в процессе длительной эксплуатации устройства в целом.

В работе с использованием теории размерных цепей рассмотрено влияние неодинаковой интегральной чувствительности фотоэлементов ЛФППЗ и разброса их геометрических центров на точность измерения угловой координаты.

Осуществлен анализ влияния угла падения монохроматического светового луча на метрологические характеристики измерительного устройства с использованием ЛФППЗ. Получено расчетное соотношение, устанавливающее зависимость погрешности измеряемого угла  $\Delta\alpha$  от коэффициента поглощения света в кремнии  $k$ , угла падения светового луча  $\alpha$ , коэффициента преломления покровного стекла или воздушного промежутка  $n_1$  и кремния  $n_2$ , а также расстояния между плоскостью, формирующей световой луч, и фоточувствительной поверхностью  $d$

$$\Delta\alpha = \operatorname{arctg} \frac{1}{dk} \left( 1 - e^{-l k \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha} \right), \quad (1)$$

где  $l$  – глубина проникновения света в кремниевую подложку.

На рис. 2 представлены рассчитанные с использованием соотношения (1) зависимости погрешности  $\Delta\alpha$  от угла падения светового штриха при различной длине волны.

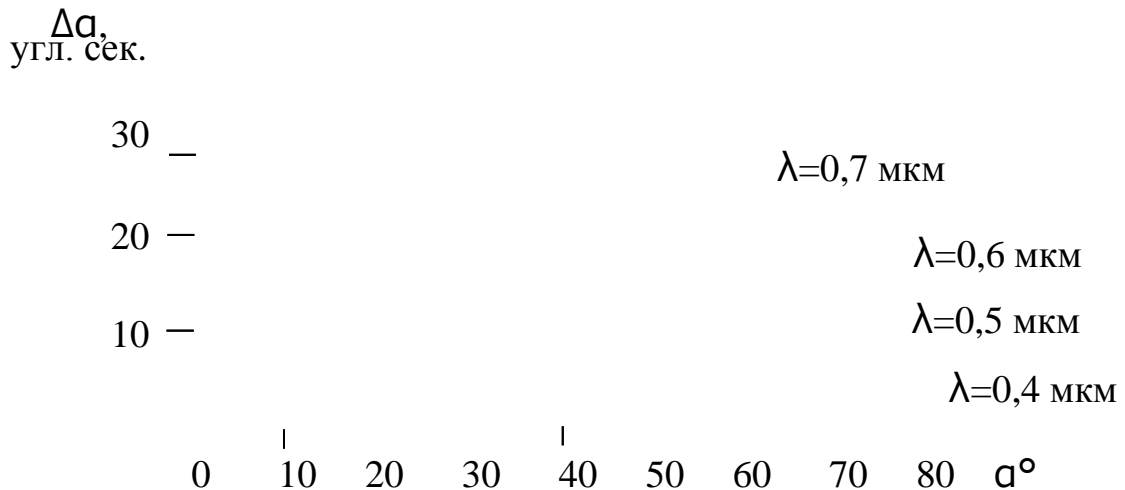


Рис. 2. Зависимость погрешности  $\Delta\alpha$  от угла падения светового штриха при различной длине волны

Предложен и реализован способ измерения угловой координаты при освещенности до 180000 лк, что соответствует режиму работы системы ориентации КА по Солнцу. Это достигается путем использования нейтрального фильтра с коэффициентом пропускания  $k_{\text{пр}} = 0,03$  и работой антиблуминга в режиме электронного экспонирования. При этом режиме на

затвор антиблуминга подается не постоянное, а импульсное напряжение переменной длительности. В этом случае время накопления можно изменять в широких пределах, поскольку оно определяется длительностью паузы между импульсами, поступающими на затвор антиблуминга. При средних параметрах разработанных ЛФППЗ (интегральная чувствительность  $S_v = 10 \text{ В}/(\text{лк}\cdot\text{с})$ , напряжение насыщения  $U_{\text{нас}} = 2,5 \text{ В}$ ) и максимальной освещенности  $E = 180000 \text{ лк}$ , а также наличии нейтрального фильтра с  $K_{\text{пр}} = 0,03$  время накопления составляет  $t_{\text{нак}} \sim 50 \text{ мкс}$ .

Снятые экспериментально свет-сигнальные характеристики показали, что в режиме электронного экспонирования они являются линейными, начиная с  $t_{\text{нак}} \geq 20 \text{ мкс}$ . Таким образом, система ориентации с использованием разработанных ЛФППЗ может работать при изменении освещенности Солнца в пределах  $180000 \text{ лк}$  и выше.

Рассмотрены вопросы повышения эффективности передачи зарядовых пакетов и преобразования их в выходной сигнал. Проведенный сравнительный анализ существующих конструкций сдвиговых регистров показал, что для работы в условиях космоса предпочтительным является использование четырехфазного регистра. Такой регистр имеет простую схему генератора тактовых импульсов, к форме которых не предъявляются жесткие требования. Зарядовая емкость такого регистра больше емкости его электродов. Подзатворный диэлектрик имеет одинаковую толщину, что способствует повышению радиационной стойкости. Кроме того, использование регистра с четным числом фаз позволяет осуществлять мультиплексирование считываемых зарядов простейшим образом.

Естественно, что в силу известных преимуществ в разработанных приборах используется объемный (скрытый) канал переноса.

Экспериментально исследовались такие характеристики регистра, как неэффективность переноса, зарядовая емкость, быстродействие и др. При измерении неэффективности переноса электрический заряд вводился в регистр через систему электродов антиблуминга – сток, затвор антиблуминга и осциллографировался выходной сигнал, рис. 3.

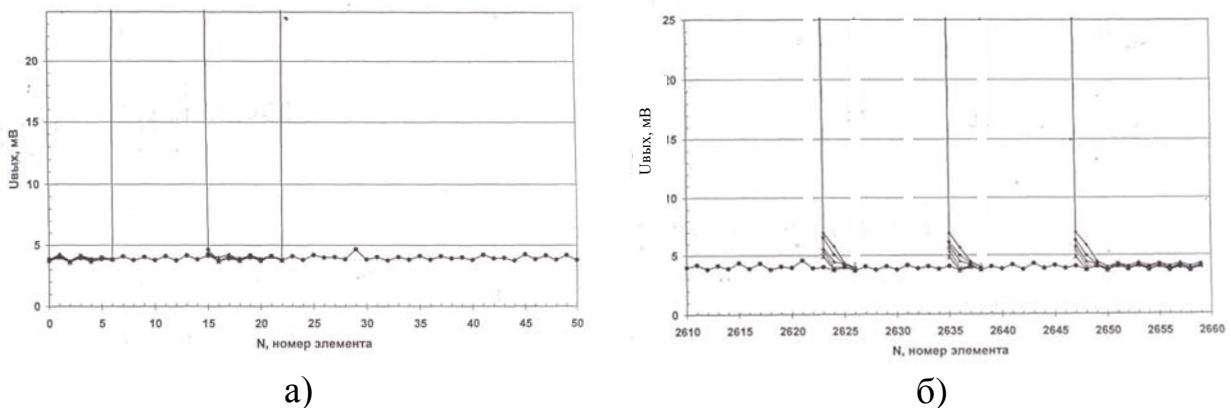


Рис. 3. Видеосигнал с начальных (а) и с конечных (б) элементов регистра

Из него следует, что сигнал с конечных элементов регистра имеет «хвост», обусловленный неэффективностью переноса. Измеренная с

использованием данной методики неэффективность составляет величину  $2,4 \cdot 10^{-7}$  на один перенос.

Для преобразования зарядовых пакетов в выходной сигнал в разработанных ЛФППЗ применена система, состоящая из плавающей диффузионной области и двухкаскадного истокового повторителя. С использованием экспериментально снятых характеристик  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{ТС}})$ , где  $I_{\text{ТС}}$  – ток в цепи транзистора сброса, рассчитана крутизна преобразования выходного узла  $S_q$ , которая лежит в пределах  $S_q = 1,4 \div 1,8$  мкВ/ē.

Экспериментально определенная минимальная длительность фронта усиливаемых импульсов  $t_f$ , составляет порядка 50 нс.

В работе проведены широкие исследования, направленные на создание радиационностойкого подзатворного диэлектрика, поскольку в нем при воздействии радиации происходит накопление положительного заряда, который оказывает влияние на глубину потенциальных ям, приводит к сдвигу пороговых напряжений, увеличивает неэффективность переноса. При разработке радиационностойкого подзатворного диэлектрика за основу была выбрана двухкомпонентная структура: оксид кремния  $\text{SiO}_2$  и нитрид кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

При измерениях количественной мерой радиационной стойкости была выбрана величина сдвига плоских зон  $U_{\text{п.з.}}$ .

В процессе исследований на полупроводниковой подложке, которая применялась при изготовлении ЛФППЗ, создавались МДП-структуры, отличающиеся толщиной диэлектрических слоев  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Изготовленные структуры подвергались гамма облучению с использованием кобальтовой установки К-120000.

В результате проведенных исследований было установлено, что по сравнению с применявшимся ранее диэлектриком ( $\text{SiO}_2$  – 65 нм,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – 75 нм) структура, состоящая из слоя  $\text{SiO}_2$  толщиной 10-15 нм и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 150-160 нм имеет более высокую радиационную стойкость, табл. 1.

Таблица 1.

Доза, рад.	Напряжение плоских зон, В	
	Диэлектрик $\text{SiO}_2$ – 65 нм $\text{Si}_3\text{N}_4$ – 75 нм	Диэлектрик $\text{SiO}_2$ – 10 нм $\text{Si}_3\text{N}_4$ – 150 нм
0	-1	-1
$3 \cdot 10^4$	-1,9	-1,2
$5 \cdot 10^5$	-2,8	-1,4
$10^6$	-4,3	-2,0

Заключительным этапом исследований явилось определение радиационной стойкости разработанных ЛФППЗ в целом. Экспериментально определялось влияние ионизирующего излучения на основные параметры

приборов: напряжение насыщения, интегральная чувствительность, неравномерность выходного сигнала, динамический диапазон и др.

Максимальная доза облучения составляла  $10^5$  рад.

Установлено, что наиболее сильно ионизирующее излучение оказывает влияние на относительную неравномерность темнового сигнала, динамический диапазон и напряжение насыщения. Интегральная чувствительность и относительная неравномерность выходного сигнала изменяются в пределах 15%.

**Третья глава** посвящена разработке технологии производства, а также вопросам моделирования основных узлов ЛФППЗ для ориентации КА по Солнцу. Моделирование осуществлялось с использованием пакета прикладных программ TAURUS WORKBENCH.

Процесс приборно-топологического моделирования использовался для получения требуемых параметров оптимального технологического процесса изготовления ЛФППЗ, таких как, распределение потенциального рельефа отдельных элементов структуры, уровня управляющих напряжений. Эти данные были использованы для разработки новых технологических режимов, позволяющих получить структуры с нужными параметрами, например, режимы ионных имплантаций и последующих термических операций.

Были определены наиболее важные узлы прибора, процессы в которых моделировались. К ним относятся фотодиоды, секция накопления, секция антиблуминга, узел передачи заряда из секции накопления в сдвиговый регистр.

Для каждого из названных узлов прибора разработаны модели тестовых структур, которые наиболее точно отражают происходящие процессы.

В качестве примера на рис. 4 приведена тестовая структура, с помощью которой моделировался процесс передачи зарядового пакета из секции накопления (электрод FS) через затвор AG и далее в сток антиблуминга (электрод AD). Электрод SS – контакт к подложке.

На рис. 5 показано распределение потенциала в тестовой структуре в режиме накопления заряда

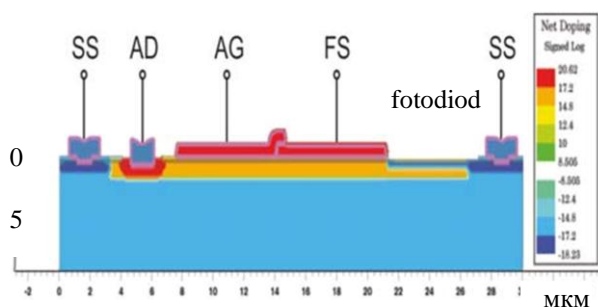


Рис. 4. Тестовая структура для моделирования передачи зарядового пакета из секции накопления в сток антиблуминга

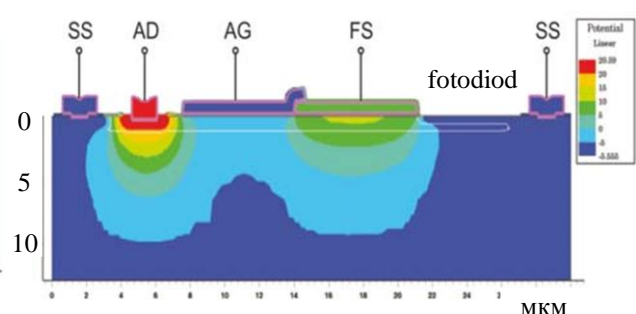


Рис. 5. Распределение потенциалов в тестовой структуре в режиме накопления заряда

Выполненное моделирование позволило определить основные параметры технологического процесса изготовления ЛФППЗ, которые в диссертации представлены в виде блоков: формирование каналов переноса, формирование радиационностойкого диэлектрика и электродов переноса заряда, формирование выходного узла, формирование фоточувствительного элемента, формирование металлизации. Заключительным этапом изготовления приборов является измерение электрических параметров и корпусирование.

В диссертации приведены конкретные данные, характеризующие отдельные этапы технологического процесса и последовательность технологических операций изготовления ЛФППЗ, предназначенных для использования в системах ориентации КА по Солнцу.

По разработанной технологии создано и освоено в опытном производстве ОАО ЦНИИ «Электрон» три типа приборов: ФППЗ-8Л, ФППЗ-30Л, ФППЗ-32Л. Они отличаются количеством фоточувствительных элементов ( $2 \times 1000 \div 2 \times 2600$ ), их размерами ( $13 \times 500 \div 12 \times 100$  мкм), крутизной преобразования выходного узла ( $0,9 \div 1,6$  мкВ/е), а также интегральной чувствительностью ( $10 \div 16$  В/лк·с). Управляющие напряжения всех трех типов приборов находятся в пределах ( $-5 \div 5$  В).

Разработанные приборы применяются в различных системах ориентации космических аппаратов по Солнцу: «Юбилейный-2», «Глонасс-К», «Электро», «Глобус», «Ямал» и др.

### **Заключение**

Основным итогом диссертационной работы явилось решение актуальной научной задачи – исследование, разработка и внедрение новых конструкций и технологий в производство линейных фоточувствительных приборов с переносом заряда, предназначенных для работы в системах ориентации космических аппаратов по Солнцу. В ней изложены научно обоснованные технические и технологические решения, послужившие основой создания радиационностойких, с большим сроком службы, способных работать в условиях значительной освещенности, обеспечивающих измерение угловой координаты с высокой точностью ЛФППЗ.

Результаты работы более детально могут быть сформулированы следующим образом:

1. Разработана конструкция ЛФППЗ, в которой для обеспечения большого срока службы использован принцип резервирования, заключающийся в том, что на подложке созданы два одинаковых линейных преобразователя, расположенных параллельно.
2. Исследовано влияние конструкции ЛФППЗ на точность измерения угловой координаты. С использованием теории размерных цепей рассчитана погрешность измерения угловой координаты, обусловленная неодинаковой фоточувствительностью фотоячеек, а также разбросом их геометрических размеров.

3. Исследовано влияние угла падения светового штриха на точность измерения угловой координаты. Получено аналитическое выражение, устанавливающее зависимость погрешности измеряемого угла от коэффициента поглощения света в кремнии, угла падения светового луча, а также расстояния между плоскостью, формирующей световой луч и фоточувствительной поверхностью.
4. Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований условий работы ЛФППЗ при изменении освещенности до уровня 180000 лк. Показано, что эта задача может быть решена при использовании нейтрального фильтра и работы системы антиблуминга в режиме электронного экспонирования.
5. Проведенный сравнительный анализ существующих конструкций показал, что для работы в условиях космоса предпочтительным является использование четырехфазного регистра с объемным каналом. Такой регистр обладает высокой зарядной емкостью, подзатворный диэлектрик имеет одинаковую толщину, что повышает радиационную стойкость прибора, схема управления и мультиплексирование осуществляются простейшим образом.
6. Рассмотрены вопросы повышения радиационной стойкости ЛФППЗ. В разработанной конструкции для уменьшения влияния радиации предложено использовать в качестве фоточувствительных элементов обедненные диоды, в которых отсутствуют зона фотогенерации на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> и смещающий полевой электрод. Проведены исследования, направленные на разработку радиационностойкого подзатворного двухслойного диэлектрика SiO<sub>2</sub>-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Для количественной оценки радиационной стойкости использован метод вольт-фарадных характеристик.
7. Проведено приборно-технологическое моделирование наиболее важных узлов ЛФППЗ, предназначенных для ориентации космических аппаратов по Солнцу. С использованием разработанных тестовых структур определено распределение легирующих примесей в обедненных фотодиодах и каналах переноса, распределение потенциального рельефа отдельных элементов структуры, установлен уровень управляющих напряжений.
8. Разработана технология изготовления линейных ФППЗ, обеспечивающая большой срок службы приборов (до 100000 ч.), способность работы в условиях открытого космоса, при изменении освещенности в широких пределах (до 180000 лк), высокую стабильность геометрических размеров элементов и их взаимное расположение.
9. Освоено опытное производство ЛФППЗ, предназначенных для работы в системах ориентации КА по Солнцу, и осуществляется поставка приборов заказчикам со спецприемкой.

### **Публикации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Алымов О.В. Фоточувствительная секция линейного ФППЗ для систем ориентации по Солнцу [Текст] Известия вузов России. Радиоэлектроника, 2011, вып.6, с. 84-88.
2. Алымов О.В. Линейный фотоэлектрический прибор с переносом заряда для систем космического базирования [Текст] Известия вузов России. Радиоэлектроника, 2012, вып.5, с. 71-76.
3. Алымов О.В. Фотоприемные устройства телевизионных и оптоэлектронных систем для экологического мониторинга [Текст] / Алымов О.В., Чулков В.Л., Левко Г.В., Чукавина Ю.Г. // Известия Южного федерального университета. Технические науки IV2011, 9(122), с. 161-168.

#### **Другие статьи и материалы конференций:**

4. Алымов О.В. Радиационностойкий матричный ФППЗ для прикладных телевизионных систем [Текст] / Алымов О.В., Костюнина О.М., Сень И.Ю., Молев Ф.В., Стерлядкин О.К. // Научно-технический сборник «техника средств связи», серия «Техника телевидения», Москва, 2011, с. 73-78.
5. Алымов О.В. Телевизионная фотоэлектроника для космоса [Текст] / Алымов О.В., Степанов Р.М. // Материалы конференции «Планетоходы, космическая робототехника и наземные роверы». Санкт-Петербург, 2010, с. 54.
6. Алымов О.В. Энергетические и пространственные характеристики большеформатных ЛФППЗ для систем ДЗЗ [Текст] / Алымов О.В., Арутюнов В.А., Богатыренко Н.Г., Илисавская Е.Ю., Левко Г.В., Прокофьев А.Е., Карпачева Т.А. // Материалы VIII НТК «Системы наблюдения и дистанционного зондирования Земли». Москва, 2011, с. 287.
7. Алымов О.В. Специализированная телевизионная система на крупноформатном ФППЗ с числом элементов 4096x4096 [Текст] / Алымов О.В., Карпов Е.К., Левко Г.В., Стерлядкин О.К., Минкин В.А. // Материалы МНТК «Телевидение: передача и обработка изображений», СПб, 2011, с. 40-43.
8. Алымов О.В. Пути развития фотоэлектронных приборов в ОАО ЦНИИ «Электрон» [Текст] / Алымов О.В., Степанов Р.М. // Тезисы докладов 21-ой Международной конференции «Фотоэлектроника и приборы ночного видения», Москва, 2010, с. 8-9.
9. Алымов О.В. ЛФППЗ с числом элементов 12000 и фотодиодами 6,5x6,5 мкм для сканирующих систем [Текст] / Алымов О.В., Арутюнов В.А., Богатыренко Н.Г., Прокофьев А.Е., Карпачева Т.А. // Материалы 9-ой НТК «Твердотельная электроника и сложные функциональные блоки РЭА», Зеленоград, 2010, с. 126.



10. Алымов О.В. Линейный ФППЗ для космического базирования [Текст] / Алымов О.В., Арутюнов В.А., Богатыренко Н.Г., Илисавская Е.Ю., Прокофьев А.Е., Карпачева Т.А. // Материалы 7-ой НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», Москва, 2010, с. 256-266.
11. Алымов О.В. Высокочувствительные ЛФПЗС для спектральных измерений [Текст] / Алымов О.В., Богатыренко Н.Г., Большакова И.В., Грибов А.С., Лапук В.В., Честнаков С.А. // Тезисы докладов 11-ой Всесоюзной НТК по фотоэлектронным приборам. Ленинград, 1990, с. 76-77.
12. Алымов О.В. Линейные ФППЗ для специальных телевизионных систем [Текст] / Алымов О.В., Арутюнов В.А., Богатыренко Н.Г., Левко Г.В., Илисавская Е.Ю., Прокофьев А.Е., Карпачева Т.А. // Материалы 8-ой МНТК «Телевидение: Передача и обработка изображений», СПб, 2011, с. 36-40.
13. Алымов О.В., Минкин В.А., Левко Г.В., Стерлядкин О.К., Карпов Е.К. Перспективы создания сверхформатных ФПУ для систем ДЗЗ на основе ФПЗС с числом элементов 4Кх4К и освещенности со стороны подложки [Текст] Материалы 8-ой НТК «Системы наблюдения и дистанционного зондирования Земли», Москва, 2011, с. 284.
14. Алымов О.В. Высокочувствительные широкоформатные датчики космических телевизионных систем [Текст] / Алымов О.В., Плахов С.А., Левко Г.В., Лапушкина Л.В., Коновалов П.И., Выгон В.Г., Мирзоянц А.С. // Материалы 8-ой НТК «Системы наблюдения и дистанционного зондирования Земли», Москва, 2011, с. 285-286.
15. Алымов О.В. Разработка и технология получения фотокатодов на основе AlGaIn [Текст] / Алексеев А.Н., Айнбунд М.Р., Жмерин С.И., Мизеров А.М., Иванов С.В., Пашук А.В., Петров С.И., Петров А.С. // 8-ая Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структура и приборы», СПб, 2011, с. 29.
16. Алымов О.В. Радиационностойкий матричный ФППЗ для телевизионных систем [Текст] / Алымов О.В., Костюнина О.М., Сень И.Ю., Стерлядкин О.К. // Материалы VII НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», Москва, 2010, с. 272-274.
17. Алымов О.В. Фоточувствительный прибор [Текст] / Алымов О.В., Грибов А.С., Сорокин О.В. // Авторское свидетельство СССР №1632301, опубл. 01.11.1990, бюлл. №31.
18. Алымов О.В. Двухфазный прибор с зарядовой связью [Текст] / Алымов О.В., Арутюнов В.А., Богатыренко Н.Г., Прокофьев А.Е. // Патент на полезную модель №110545, опубл. 20.11.2011, бюлл. №32.
19. Алымов О.В. ЛФППЗ для телевизионных систем автоматики [Текст] / Алымов О.В., Арутюнов В.А. // Сборник докладов 10-ой МНТК «Современное телевидение и радиоэлектроника», Москва, 2012, с. 110-112.