Влияние радиации на ключевые параметры матричных фотоприёмных устройств

А. А. Кобелева, С. В. Воронков, С. А. Прохорова

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: akobeleva.ikiran@gmail.com*

Характеристики звёздного датчика во многом определяются матричным фотоприёмным устройством (ФПУ), лежащим в его основе. К ключевым характеристикам ФПУ относятся чувствительность, линейность и неравномерность чувствительности, а также динамический диапазон и собственный шум. Воздействие ионизирующих излучений космического пространства приводит к деградации этих характеристик. В данной статье приводятся методики измерения фотометрических параметров (темнового сигнала в отдельных пикселях, среднего значения темнового сигнала и среднеквадратичного отклонения темнового сигнала по кадру, структурной составляющей шума, неравномерности чувствительности пикселей, линейности чувствительности). Рассмотрена природа собственного шума ФПУ. Определена связь измеряемых параметров ФПУ с природой шума. Выделены основные факторы, влияющие на величину шума: температура, ионизация, дефекты в структуре полупроводника и время экспонирования. В звёздных датчиках семейства БОКЗ применяются ФПУ двух типов: ПЗС-матрицы с виртуальной фазой и КМОП-матрицы с 8-транзисторной структурой ячейки. Проведено сравнение радиационных эффектов в КМОП- и ПЗС-матрицах. Поднимается проблема выбора температурного режима работы ФПУ, в том числе во время радиационных испытаний. Рассмотрены плюсы (снижение собственного шума ФПУ, увеличение динамического диапазона) и минусы (уменьшение количества отжигаемых дефектов) понижения рабочей температуры ФПУ.

Ключевые слова: звёздный датчик, фотоприёмное устройство, шум, ионизирующее излучение космического пространства, дозовые эффекты, эффекты смещения, отжиг, КМОП, ПЗС

Одобрена к печати: 16.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-80-88

Введение

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) имеет большой опыт создания и лётной эксплуатации звёздных датчиков семейства БОКЗ (блок определения координат звёзд). Первые образцы, построенные на основе ПЗС-матриц (прибор с зарядовой связью), выполняют задачу ориентации в космосе с 1999 г. За это время существенно менялись требования по точности, быстродействию, стойкости к внешним воздействующим факторам и надёжности. Всё это привело к появлению широкой линейки приборов, различающихся как конструкцией, так и компонентной базой. Новое поколение БОКЗ имеет в своей основе КМОП-матрицы (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник), что позволяет уменьшить габариты, повысить точность и быстродействие.

Звёздные датчики предназначены для определения углового положения космического аппарата (КА) в инерциальном пространстве и устанавливаются на внешней поверхности КА под экрановакуумной теплоизоляцией, где постоянно подвергаются воздействию ионизирующих излучений космического пространства (ИИКП). Характеристики прибора во многом зависят от фотоприёмного устройства (ФПУ), лежащего в его основе. Таким образом, при разработке приборов уделяется особое внимание исследованию радиационной стойкости ФПУ. Результаты исследований и испытаний опубликованы в статьях (Аванесов и др., 2009; Белинская и др., 2018; Кобелева и др., 2017).

При воздействии ИИКП чувствительность ФПУ может снижаться за счёт изменения концентрации и времени жизни носителей, а также возникновения дефектов в структуре полупроводника. Кроме того, в результате радиационных эффектов может расти неравномерность чувствительности.

Динамический диапазон ФПУ определяется как отношение максимально возможного сигнала, сгенерированного ФПУ, к его собственному шуму. В то время как максимально возможный сигнал ограничен, динамический диапазон в большей степени зависит от собственного шума ФПУ. Поэтому в данной статье акцент делается на зависимость собственного шума ФПУ от совокупности внешних воздействующих факторов. Рассмотрены виды шумов, связь измеряемых параметров ФПУ и природы шума, влияние ИИКП на величину шума и вопрос снижения этого влияния за счёт выбора соответствующего температурного режима.

Виды шумов

На практике для любого типа ФПУ, имея темновой кадр (кадр в отсутствии засветки), можно измерить темновой сигнал в отдельных пикселях, среднее значение темнового сигнала по кадру (или фрагменту кадра) и среднеквадратичное отклонение темнового сигнала по кадру (*англ.* DSNU — Dark Signal Non-Uniformity) в единицах младшего разряда (ЕМР) АЦП (аналого-цифровой преобразователь). Для серии темновых кадров, в свою очередь, можно выделить структурную составляющую шума (*англ.* FPN — Fixed Pattern Noise) по формуле:

$$\text{FPN} = \sqrt{\frac{N \cdot \text{CKO}_N^2 - \text{CKO}_1^2}{N - 1}}, \quad (1)$$

где CKO_N — среднеквадратичное отклонение кадра, усреднённого по N кадрам; CKO_1 — среднеквадратичное отклонение одиночного кадра.

Наряду с неравномерностью темнового сигнала по кадру существует также неравномерность чувствительности пикселей (*англ.* PRNU — Pixel Response Non-Uniformity). Измерения PRNU проводятся по аналогии с измерением DSNU при равномерной засветке для заданного времени экспонирования.

Также при проверках ФПУ контролируется линейность чувствительности. Для измерения линейности чувствительности обрабатывается серия кадров при равномерной засветке с различным временем экспонирования. Время экспонирования выбирается таким образом, чтобы среднее значение сигнала по кадру менялось во всём динамическом диапазоне. Критерием равномерности является коэффициент достоверности линейной аппроксимации для графика зависимости среднего значения от времени экспонирования (квадрат коэффициента корреляции Пирсона).

Для определения внешних факторов, влияющих на динамический диапазон ФПУ, рассмотрим виды шумов, возникающих при формировании цифрового изображения, определим, чем они вызваны и выделим различия между КМОП- и ПЗС-матрицами.

Темновой ток вызван термоэлектронной эмиссией и равен числу термически сгенерированных электронов в общем сигнале. Число термически сгенерированных электронов, в свою очередь, зависит от дефектов в структуре полупроводника, температуры и времени экспонирования. Темновой ток приводит к появлению «подставки» на темновом кадре и определяет среднее значение темнового сигнала. Структурные дефекты приводят к неравномерности темнового тока от пикселя к пикселю, что, в свою очередь, ведёт к росту структурной составляющей шума.

Тепловой шум обусловлен хаотическим движением носителей заряда в объёме полупроводника и их взаимодействием с кристаллической решёткой, определяется по формуле: $\langle U^2 \rangle = 4kTR \cdot \Delta f$, где k — постоянная Больцмана; T — температура; R — активное сопротивление; Δf — полоса частот (Лебедев, 2008). Данный вид шума является случайным, но вносит также свой вклад в среднее значение темнового сигнала.

Генерационно-рекомбинационный шум вызван флуктуациями концентрации свободных носителей заряда, которые появляются и исчезают в полупроводнике в результате процессов генерации и рекомбинации (Букингом, 1986). Этот вид шума вызван присутствием атомов примесей или нарушениями кристаллической решётки кремния, которые приводят к появлению

локальных разрешённых уровней в запрещённой зоне. Из описания видно, что генерационно-рекомбинационный шум носит случайный характер, но зависит от структуры кремния, поэтому вносит вклад как в случайную, так и в структурную составляющую шума.

Дробовой шум — это флуктуации тока, вызываемые электронами, которые эмитируются случайно и независимо друг от друга (Букингем, 1986). К дробовым шумам можно отнести также фотонный шум (в настоящей статье не рассматривается). Данный шум носит случайный характер и вносит вклад в случайную составляющую шума.

Шум переноса характерен для ПЗС-матриц, так как во время переноса зарядового пакета по элементам ПЗС некоторая часть электронов теряется. Они захватываются на дефектах и примесях, существующих в кристалле. Шум переноса равен $\sqrt{2\epsilon n N}$, где ϵ — это неэффективность отдельного акта переноса; n — число переносов; N — количество переносимых зарядов (Неизвестный, Никулин, 1999). Шум переноса вносит вклад в структурную составляющую шума.

Следующие два вида шумов примечательны тем, что возникают в выходном устройстве и вносят вклад в структурную составляющую шума. В ПЗС-матрицах выходное устройство, как правило, представляет собой ёмкость считывания, диод, транзистор сброса и выходной усилитель.

Шум считывания возникает, когда сигнал, накопленный в элементе, выводится из матрицы, преобразуется в напряжение и усиливается (Неизвестный, Никулин, 1999).

Шум сброса (kTC -шум) зависит только от температуры T и ёмкости C детектирующего узла (Лазовский, 1992). Импульс сброса соединяет диод с источником опорного напряжения, после чего транзистор сброса закрывается и диод становится плавающим (т. е. потенциал диода может изменяться при поступлении в него заряда). Каждый раз после размыкания ключа исходный потенциал считывающей ёмкости будет разным, а среднеквадратичная величина этого шума будет равна $(kT/C)^{1/2}$ (Лазовский, 1992).

Основной вклад в суммарный шум необлучённых ПЗС-матриц вносят шум переноса и шумы выходного устройства (считывания и kTC -шум).

Для КМОП-матриц аналогом шума выходного устройства является *системный шум*. Отличие от ПЗС-матриц заключается в том, что каждый пиксель имеет свой преобразователь заряда в напряжение и усилитель, что приводит к неоднородности от пикселя к пикселю; таким образом, системный шум вносит вклад в структурную составляющую шума. Ещё одно отличие заключается в том, что КМОП-матрица имеет встроенную периферию: АЦП, пользовательские регистры, драйверы, мультиплексоры и т. д., т. е. на выходе получается цифровой сигнал, прошедший предобработку. В приборах звёздной ориентации семейства БОКЗ используются КМОП-матрицы с 8-транзисторной структурой пикселя, их преимуществом является устранение kTC -шума за счёт двойной коррелированной выборки.

Из описания шумов можно выделить основные факторы, влияющие на величину шума: температура, ионизация, дефекты в структуре полупроводника и время экспонирования. При этом каждый измеряемый параметр имеет зависимость от совокупности этих факторов. Отсюда можно предположить, что рост шума за счёт увеличения любого из факторов можно нивелировать за счёт снижения другого.

Далее рассмотрим и сравним влияние ионизирующих излучений на каждый из применяемых типов ФПУ.

Влияние ИИКП на величину шума

В звёздных датчиках используются ПЗС-матрицы с виртуальной фазой (рис. 1, см. с. 83) и встроенным модулем охлаждения и КМОП-матрицы с 8-транзисторной структурой пикселя (рис. 2, см. с. 83). Основной вклад в деградацию фотометрических характеристик ФПУ вносят ИИКП, такие как протоны и электроны естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ), а также протоны и тяжёлые заряженные частицы (ТЗЧ) солнечных и галактических космических лучей (СКЛ и ГКЛ).

Рис. 1. Топология ячейки ПЗС-матриц, применяемых в звёздных датчиках

Рис. 2. Схема 8-транзисторной ячейки КМОП-матрицы

Можно выделить два основных вида радиационных эффектов, влияющих на величину шума ФПУ: ионизационные (дозовые) и эффекты смещения (дефектообразование). В настоящей статье из рассмотрения исключены одиночные радиационные эффекты (ионизационный отклик, одиночный сбой, тиристорный эффект и т.д.), так как в звёздных датчиках предусмотрены схемотехнические и программные меры их парирования.

Рассмотрим возможные эффекты в ПЗС-матрице:

1. Дозовые эффекты. В процессе поглощения излучения в окисле генерируются электрон-дырочные пары, часть которых рекомбинирует за время порядка 10^{-12} с. Избегавшие рекомбинации электроны и дырки разделяются электрическим полем. Дырки под действием электрического поля испытывают стохастические переходы (Чумаков, 2004). В ПЗС-матрице это приводит к росту: 1) темнового тока, 2) генерационно-рекомбинационного шума, 3) дробового шума.
2. Эффекты смещения (дефектообразование). Ядерная частица, взаимодействуя с веществом, приводит к смещению атомов из узлов кристаллической решётки. При возникновении эффекта смещения в чувствительной области в пикселе (или группе пикселей) происходит локальный рост темнового тока, что приводит к увеличению среднего значения темнового сигнала и структурной составляющей шума. Кроме того, смещение атомов приводит к изменению ёмкости детектирующего узла, удельного сопротивления, времени жизни неравновесных носителей заряда и подвижности основных носителей заряда, в результате чего возрастает тепловой шум и kTC -шум (шум сброса). В случае попадания частицы в стоп-каналы наблюдается снижение эффективности переноса, что приводит к растеканию заряда (рис. 3, см. с. 84).

Рис. 3. Фрагмент кадра, полученного ПЗС-матрицей в составе макета прибора БОКЗ-М60 после воздействия потока нейтронов флюенсом $5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$

Темновой ток, тепловой шум и шум сброса имеют прямую зависимость от температуры, поэтому снизить рост шума от радиации можно за счёт понижения температуры кристалла ФПУ. При этом темновой ток растёт как в процессе ионизации, так и вследствие дефектообразования, а основным механизмом роста теплового шума и шума сброса являются эффекты смещения.

В отличие от ПЗС-матриц в КМОП-матрицах решена проблема kTC -шума (шума сброса) и шума переноса. Таким образом, основной вклад в суммарный шум КМОП-матриц вносят системный и тепловой шумы (которые растут в результате эффектов смещения), темновой ток (в результате ионизации проявляет себя как рост темнового сигнала по кадру; из-за эффектов смещения появляется неравномерность темнового сигнала от пикселя к пикселю) и дробовой шум (растёт в результате ионизации).

Ранее уже было показано, что снизить рост шума в результате воздействия радиации можно за счёт снижения рабочей температуры. Вопрос выбора температурного режима работы ФПУ рассмотрен в следующем разделе.

Выбор рабочей температуры

При выборе температурного режима работы ФПУ следует учитывать деградацию его фотометрических характеристик, таких как чувствительность и динамический диапазон при воздействии радиации. Объективно оценить влияние радиации на характеристики ФПУ можно, проведя испытания на стойкость к дозовым эффектам и эффектам смещения. Однако возникает вопрос, в каком же температурном режиме должны проводиться радиационные испытания.

Стоит разделять два вида испытаний: определительные и сертификационные (рис. 4, см. с. 85).

Если определительные испытания должны охватывать диапазон рабочих температур для дальнейшего принятия решения о температуре ФПУ в составе прибора, то при сертификационных испытаниях необходимо руководствоваться тепловым расчётом (какую температуру на кристалле имеет компонент, находящийся во включённом приборе, при максимальной температуре посадочного места). Опыт испытаний КМОП-матриц показал, что определительные испытания необходимо проводить как минимум для трёх точек: нормальные климатические условия (25°C), повышенная и пониженная температура посадочного места.

Рис. 4. Виды испытаний

Во время активной работы ФПУ выделяемая мощность приводит к нагреву кристалла. Для корректного измерения температуры кристалла при испытаниях ФПУ без встроенного охлаждения важно руководствоваться температурой со встроенного термодатчика, а не термометром, установленным на корпусе или рядом с ним.

Ещё один фактор, который следует учитывать при выборе рабочей температуры ФПУ, — это отжиг. Как известно, в процессе лётной эксплуатации вместе с набором поглощённой дозы и структурных повреждений происходит отжиг радиационных эффектов. Под отжигом при этом понимается термическая необратимая диссоциация дефекта, в результате которой частично восстанавливаются электрические и фотометрические характеристики ФПУ. Для того чтобы определить оптимальную температуру отжига, воспользуемся данными, приведёнными в статье (Гайдар, 2012). А именно сведениями об отжиге радиационных дефектов, которые образуются при взаимодействии вакансий и межузельных атомов кремния с атомами фоновых и легирующих примесей, присутствующих в кристаллах. Можно выделить следующие группы дефектов: комплекс вакансии + кислород (А-центр, VO), дивакансия (V2), комплекс донор + вакансии (Е-центр), комплекс бор + вакансии (В-В). Температура отжига ряда радиационных дефектов, приведённая в табл. 1 статьи (Гайдар, 2012), для удобства сведена в рис. 5.

Рис. 5. Температура отжига ряда радиационных дефектов в кремнии

На рис. 5 можно заметить, что при температурах 300 К (27 °С) и ниже отжигается часть радиационных дефектов (не менее 11 типов). Это подтверждается на практике: даже при нормальных климатических условиях можно заметить восстановление фотометрических характеристик ФПУ. Чем выше температура отжига, тем больше радиационных дефектов можно устранить. Однако нагрев компонента свыше предельно допустимой температуры вместо восстановления может привести к катастрофическому отказу. Предельно допустимая температура, как правило, лежит в диапазоне от 70 до 150 °С. Отсюда можно сделать вывод, что максимальный нагрев позволит отжечь от двух до четырёх типов дефектов. Эффективность такого отжига будет зависеть от количества дефектов каждого типа.

В звёздных датчиках используются ПЗС-матрицы с встроенным модулем охлаждения, температура кристалла которых, как правило, составляет порядка -20 °С. При такой температуре будет отжигаться девять типов дефектов. Для увеличения отжига можно отключать прибор. Чаще всего максимальная температура посадочного места равна примерно 45 °С, что

обеспечит отжиг почти половины видов дефектов. Дополнительный нагрев до 100 °С не даст существенного преимущества, поэтому является нецелесообразным.

Зачастую звёздные датчики работают непрерывно, но даже при температурах 240–250 К (–33...–23 °С) будут отжигаться не менее 9 типов дефектов. Дальнейшее снижение температуры будет уменьшать количество отжигаемых дефектов. Поэтому важно найти компромисс между снижением собственного шума ФПУ за счёт уменьшения температуры и количеством отжигаемых дефектов.

Заключение

Основными воздействующими факторами, влияющими на шумовые характеристики фотоприёмных устройств и, как следствие, на точность звёздных датчиков, являются радиация и температура. Эффекты, возникающие в результате воздействия радиации, можно разделить на дозовые и структурные (эффекты смещения).

Дозовые эффекты приводят к росту темнового тока (среднего значения темнового сигнала по кадру), а также генерационно-рекомбинационного и дробового шумов, которые, в свою очередь, приводят к росту случайной составляющей шума.

Однако наибольший вклад в деградацию фоточувствительных характеристик ФПУ вносят эффекты смещения, вызванные воздействием протонов и ТЗЧ космического пространства. Эффекты смещения приводят к росту темнового тока в отдельных пикселях или кластерах пикселей, теплового шума, шума переноса и kTC -шума, в результате происходит увеличение структурного шума и среднего значения темнового сигнала. Перечисленные выше виды шума имеют прямую зависимость от температуры кристалла, поэтому рост их вследствие радиации можно нивелировать за счёт снижения температуры кристалла.

Рабочая температура кристалла должна выбираться с учётом результатов определительных испытаний ФПУ на стойкость к эффектам смещения и расчёта радиационной стойкости, а также ограничений по потребляемой мощности и габаритам прибора. При выборе температуры также стоит обращать внимание на отжиг. При рабочей температуре кристалла ниже комнатной следует руководствоваться характеристиками, полученными сразу после воздействия (или после снижения наведённой радиоактивности до установленных норм). В случае если температура принимает значения ≥ 25 °С, имеет смысл учитывать восстановление характеристик в результате отжига.

Литература

1. Аванесов Г. А., Акимов В. В., Воронков С. В. Результаты испытаний ПЗС-матриц российского и зарубежного производства на источниках заряженных частиц // Всероссийская научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса. 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 447–457.
2. Белинская Е. В., Кобелева А. А., Сметанин П. С., Эльяшев Я. Д., Черняк М. Е. Сравнение эффектов структурных повреждений в матрицах КМОП и ПЗС, применяемых в звёздных датчиках, на примере CMV4000 и ФППЗ «Лев-4» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 119–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.
3. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах / пер. с англ. М.: Мир, 1986. 399 с.
4. Гайдар Г. П. Отжиг радиационных дефектов в кремнии // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48. № 1. С. 93–105.
5. Кобелева А. А., Эльяшев Я. Д., Бессонов Р. В., Куделин М. И., Аванесов Г. А., Форш А. А. Результаты испытаний фотосенсоров CMV 20000 на стойкость к воздействию ионизирующих излучений космического пространства // 5-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 5–8 сент. 2016. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 154–162.
6. Лазовский Л. Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир. 1992. 26 с. URL: <http://www.autex.spb.ru/download/sensors/ccd.pdf> (дата обращения 04.11.19).
7. Лебедев А. И. Физика полупроводниковых приборов: учеб. пособие. М.: Физмалит, 2008. 488 с.

8. *Неизвестный С. И., Никулин О. Ю.* Приборы с зарядовой связью — основа современной телевизионной техники. Основные характеристики ПЗС // *Специальная техника*. 1999. № 5. С. 30–38.
9. *Чумаков А. И.* Действие космической радиации на интегральные схемы. М: Радио и связь, 2004. 319 с.

The effect of radiation on key parameters of matrix photodetector devices

A. A. Kobeleva, S. V. Voronkov, S. A. Prokhorova

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: akobeleva.ikiran@gmail.com

The characteristics of a stellar sensor are largely determined by the matrix photodetector (FPU) underlying it. The key characteristics of the FPU include sensitivity, linearity and non-uniformity of sensitivity, as well as dynamic range and intrinsic noise. The impact of ionizing radiation from outer space leads to the degradation of these characteristics. This paper presents methods for measuring photometric parameters (dark signal in individual pixels, average value of the dark signal and standard deviation of the dark signal over the frame, structural component of noise, uneven pixel sensitivity, linearity of sensitivity). The nature of the FPU intrinsic noise is considered. The relationship between the measured parameters of the FPU and the nature of the noise is determined. The main factors affecting the magnitude of the noise are identified: temperature, ionization, defects in the structure of the semiconductor and exposure time. Two types of FPUs are used in stellar sensors of the BOKZ family: CCD arrays with a virtual phase and CMOS arrays with an 8-transistor cell structure. The radiation effects in the CMOS and CCD matrices are compared. The problem of choosing the temperature regime of FPU operation, including during radiation tests, is being raised. The advantages (reduction of FPU intrinsic noise, increase in dynamic range) and minuses (decrease in the number of annealed defects) of lowering the operating temperature of FPU are considered.

Keywords: star tracker, astrometry, photodetector, noise, ionizing radiation of outer space, dose effects, displacement effects, annealing, CMOS, CCD

Accepted: 16.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-80-88

References

1. Avanesov G. A., Akimov V. V., Voronkov S. V., Rezul'taty ispytaniy PZS-matrits rossiiskogo i zarubezhnogo proizvodstva na istochnikakh zaryazhennykh chastits (Test results of CCDs of Russian and foreign production on charged particle sources), *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (All-Russia Scientific and Technical Conf. "Modern Problems of Determining the Orientation and Navigation of Spacecraft"), Proc., Tarusa, 22–25 Sept. 2008, Moscow: IKI RAN, 2009, pp. 447–457.
2. Belinskaya E. V., Kobeleva A. A., Smetanin P. S., Elyashev Ya. D., Chernyak M. E., Sravnenie effektiv strukturnykh povrezhdenii v matritsakh KMOP i PZS, primenyaemykh v zvezdnykh datchikakh, na primere CMV4000 i FPPZ "Lev-4" (Comparison of the structural damage effects in CMOS and CCD used in star trackers by the example of CMV4000 and LEV-4 CCD), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 119–130, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.
3. Buckingham M., *Shumy v elektronnykh priborakh i sistemakh* (Noise in Electronic Devices and Systems), Moscow: Mir, 1986, 399 p.
4. Gaidar G. P., Otzhig radiatsionnykh defektov v kremnii (Annealing of radiation defects in silicon), *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2012, Vol. 48, No. 1, pp. 93–105.
5. Kobeleva A. A., Elyashev Ya. D., Bessonov R. V., Kudelin M. I., Avanesov G. A., Forsh A. A., Rezul'taty ispytaniy fotosensorov CMV 20000 na stoikost' k vozdeistviyu ioniziruyushchikh izluchenii kosmicheskogo prostranstva (CMV 20000 photosensor test results for resistance to the effects of outer space ionizing radiation), *5-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy opredeleniya*

- orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov*” (5th All-Russia Scientific and Technical Conf. “Modern Problems of Determining the Orientation and Navigation of Spacecraft”), Proc., Tarusa, 5–8 Sept. 2016, Moscow: IKI RAS, 2017, pp. 154–162.
6. Lazovskii L., *Pribory s zaryadovoi svyaz'yu: pretsizionnyi vzglyad na mir* (Charge-coupled devices: precise view of the world), 1992, 26 p., <http://www.autex.spb.ru/download/sensors/ccd.pdf>.
 7. Lebedev A. I., *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* (Semiconductor Physics), Moscow: Fizmalit, 2008, 488 p.
 8. Neizvestnyi S. I., Nikulin O. Yu., *Pribory s zaryadovoi svyaz'yu — osnova sovremennoi televizionnoi tekhniki. Osnovnye kharakteristiki PZS* (Charge coupled devices are the foundation of modern television technology. Key Features of CCD), *Spetsial'naya tekhnika*, 1999, No. 5, pp. 30–38.
 9. Chumakov A. I., *Deistvie kosmicheskoi radiatsii na integral'nye skhemy* (The effect of cosmic radiation on integrated circuits), Moscow: Radio i svyaz', 2004, 319 p.