



Фотоника

Научно-производственная компания

ООО «НПК «Фотоника»
197022, г. Санкт-Петербург,
ул. Инструментальная, дом. 3, литер Б, помещение 01Н
Тел./факс.: +7 (812) 740-71-28
www.npk-photonica.ru

Перспективы использования КМОП-сенсоров в аппаратуре для космоса.

В настоящее время фотосенсоры с активными пикселями не находят широкого применения в космической аппаратуре, особенно произведённой в Европе. Выбор всё-таки остаётся в пользу ПЗС-сенсоров, которые отличаются высокой чувствительностью, низким уровнем темнового тока и малыми шумами считывания при крупном формате матрицы, выполненной по технологии МОП, надёжность которой доказана на протяжении последних 50 лет. Однако есть все же лётные модели КМОПов, и они используются для выполнения навигационных задач в составе скорее звёздных датчиков, нежели в научной космической аппаратуре.

При рассмотрении возможности использования того или иного типа сенсоров определяющим критерием выбора является качество картинки. В основном, лучшее качество картинки в состоянии обеспечить ПЗС-сенсоры, однако благодаря значительному усовершенствованию технологии производства различий между работой КМОП-сенсоров и ПЗС-сенсоров становится всё меньше. Выбор какого-либо типа из двух, прежде всего, должен зависеть от задач, обусловленных применением прибора, а также после анализа преимуществ и недостатков каждой технологии. Одним из предполагаемых преимуществ сенсора с активными пикселями является то, что его качественные характеристики меньше деградируют после облучения по сравнению с ПЗС-сенсором, что может предоставить шанс КМОП-сенсору быть применённым в проектах, связанных с работой в условиях повышенной радиации, например: на солнечной орбите или орбите Юпитера. Поэтому определение показателей работы КМОП-сенсора при его реакции на радиационное облучение очень важно для дальнейшего развития технологии.

Характеристики готовых приборов, покидающих производство, могут отличаться от номинальных показателей вследствие неодинаковых условий в их изготовлении, поэтому очень важно проводить их верификацию после того, как приборы сошли с конвейера. Верификация приборов осуществляется в системе показателей, на основе которой проводится сравнение между ними, и определяется их пригодность к использованию в тех или иных условиях. Также может быть полезным определение параметров работы приборов в условиях, не предполагаемых производителем, например: рентгеновская спектроскопия, а также следует проводить верификацию приборов для определения их применимости в любых известных условиях. Характеристики приборов даже из одной партии, не говоря уже о разных партиях, могут зачастую отличаться из-за незначительных колебаний в производственной среде и процедурах при изготовлении, поэтому каждый прибор может иметь особенности, которые следует выявлять.

Несмотря на преимущество повышенной устойчивости КМОП-сенсоров к радиационному облучению, они мало сегодня используются в космосе. Выбор ПЗС-сенсоров для научной аппаратуры обусловлен их лучшим качеством работы и подтверждённой надёжностью. Но всё же при сокращении разрыва в параметрических характеристиках к между КМОП- и ПЗС-сенсорами использование первых может быть преимущественным благодаря их низкому энергопотреблению и высокой устойчивости к радиационному облучению, что уже обеспечивает им некоторую нишу в применении в составе научной аппаратуры для работы:

- в условиях повышенной радиации, например: при полётах к Солнцу и Юпитеру;
- в условиях, где требуется энергоэффективность, например: кубсаты и межпланетные роверы;
- в условиях высокоскоростной съёмки, например: счётчиков солнечных фотонов.

Абстрагируясь от множества специфических задач, можно определить два типа основных научно-космических применений фоточувствительных сенсоров, а именно:

1) слежение за слабыми источниками излучения обычно на тёмном фоне, характеризующимися потоками фотонов малой интенсивности, что в большей степени относится к астрономическим наблюдениям, для которых больше подходят малозумящие приборы с длительными периодами накопления;

2) отслеживание сильных источников или событий с потоками фотонов высокой интенсивности, генерирующих излучения с диапазоном пространственных и спектральных характеристик, что может относиться к дистанционному зондированию Земли или других планет и требовать коротких периодов накопления, большой глубины потенциальной ямы, а также накладывает ограничения по шумам (требование широкого динамического диапазона), так как часто возникает необходимость фиксировать малейшие изменения.

Примером первого типа применения для слежения за событиями низкой протонной интенсивности может служить астрометрический проект ГАЙА (GAIA), с 106 собранными в единую фокальную плоскость ПЗС сенсорами CCD91-72 компании e2v. Результативность сенсоров с зарядовой связью во многом зависит от конкретного режима работы и частоты считывания с известным уровнем шума считывания на плоскости не выше 11 e^- при частоте 833 кГц и 3 e^- при частоте 64 кГц. С пиковой глубиной потенциальной ямы в 350 ke^- показатели динамического диапазона достигают 90 дБ и 101 дБ соответственно.

Спектрометр, разработанный для аппаратуры GMES проекта SENTINEL-4 в составе зонда Метеосат

Третье Поколение (Meteosat Third Generation – MTG), может быть представлен примером второго типа применения. Аппаратура предназначена для наблюдения за качеством воздуха и включает в себя два спектрометра в диапазонах 305 – 500 нм (УФ – видимый) и 750 – 775 нм (ближний ИК). ПЗС-сенсоры адаптированы к каждому спектрометру, но оба разрабатывались одновременно для обеспечения единства структуры. Прототип ПЗС УФ – видимого диапазона изготовлен в e2v.

Для описанных проектов были заведомо выбраны ПЗС-сенсоры неинвертированного типа, способных функционировать при температуре 215K, что обеспечивает максимальное снижение радиационного повреждения в теле полупроводника. Определение газовых примесей в атмосфере – например: NO₂, O₃ – происходит через выявление узких линий поглощения в сплошном спектре. Для этого главное, чтобы влияние шумов было незначительным, сохранялась высокая эффективность переноса заряда и низкий уровень послесвечения фотосенсора. Сенсоры подвергались гамма и протонному облучению для подтверждения того, что снижение уровня эффективности переноса заряда не превышает десятых долей на один кадр.

В течение последних 10-ти лет ЕКА совместно с производителями разрабатывало КМОП-сенсоры, способные заменить ПЗС-сенсоры в научно-космическом применении и в ДЗЗ. Процесс внедрения КМОП-сенсора для научных высокотехнологических проектов и применений замедлился из-за требуемых параметров, которые зачастую характеризуют такие модели, вовсе не соответствующие массовому производству, обусловленному потребностями более обширного рынка бытовых камер, автомобильной, медицинской и охранной отраслям. Требования к возможности накопления большого заряда и обеспечению широкого динамического диапазона в области ультрафиолета, высокой квантовой эффективности и радиационной стойкости обуславливают производство детекторов крупных форматов с большим пикселем и сложной схемотехникой. Ограниченные возможности литейных мощностей удовлетворять такие требования пока являются непреодолимым препятствием. Обращение «недоразвитых» производителей к различным сервисным организациям обеспечивает относительную гибкость системы, но может привести и к определённой уязвимости цепочки поставок, проигрывая уже сложившимся процессам при производстве ПЗС-сенсоров.

Работы в условиях высокой протонной интенсивности (ДЗЗ или планетные исследования) требуют приборов с разрешением не менее 1000 x 1000, глубиной потенциальной ямы 0,5 – 1,0 Me⁻, шумом считывания менее 50 e⁻ (лучше 10 – 20 e⁻), способных работать в режиме IWR (Integrate While Read – считывание во время накопления), с обратной засветкой и частотой кадров не менее 10 Гц. Требования к приборам, работающим в условиях низкой протонной интенсивности, не отличаются, однако допускаются приборы с глубиной потенциальной ямы 50-100 ke⁻, шумом считывания не более 5 e⁻ и меньшей кадровой частотой. В обоих случаях идеальными являются приборы с отсутствием дефектов, великолепной однородностью (2 – 3%), с минимизированным и

приемлемым уровнем деградации под воздействием обычного радиационного облучения на время продолжительных космических полётов.

Параллельно внедрению КМОП-сенсоров для космического применения идёт освоение гибридных инфракрасных детекторов, в частности, матриц на основе теллурида ртути-кадмия (HgCdTe). Гибридные детекторы с кремниевыми (Si) фотодиодами представляются наиболее привлекательными благодаря уже имеющемуся опыту их работы в ИК и преимуществам, относящихся к возможности отдельной оптимизации функций формирования изображения и считывания. Если же спектральный отклик детекторов на основе HgCdTe расширить до области ультрафиолета путём исключения подложки, то это позволит использовать их с той же схемотехникой в гиперспектральной аппаратуре с диапазоном 400-2500 нм с двумя спектрометрами, как на спутнике PRISMA. Но придётся тогда поступиться температурным диапазоном (150К) – он может стать приемлемым, если такое же охлаждение будет работать в канале ближнего ИК – и классностью по дефектам.

Первые разработки, ведущиеся в IMEC и финансируемые ЕКА, были направлены на получение прибора, который мог бы быть и монолитным КМОП-сенсором с кадровым затвором и обратной засветкой, и контуром считывания для гибридного детектора. Как результат интенсивной опытной работы по достижению требуемых характеристик были получены две модели с показателем динамического диапазона около 75 дБ и глубиной потенциальной ямы 350 ke^- для монолитного образца и 950 ke^- , а позже и $1,75 \text{ Me}^-$ для гибридного образца. С использованием изоляционных бороздок достигнуты великолепные показатели уровня перекрёстных помех у гибридного образца, но в обоих случаях для получения наилучшей квантовой эффективности ещё предстоит наладить процесс обработки задней поверхности сенсора.

Наш поставщик – e2v technologies (UK) – ведёт успешную работу по расширению возможностей КМОП-фоточувствительных сенсоров (CIS – CMOS Imaging Sensor), перенося весь накопленный опыт производства ПЗС-сенсоров на CIS приборы с учётом требований космической квалификации. Целью такой работы является создание КМОП-приборов для таких применений, в которых проявятся преимущества технологии КМОП, а именно: способность считывания окон интереса, наличие АЦ преобразователей на чипе или присущая CIS устойчивость к снижению эффективности переноса заряда, вызываемого радиацией.

В настоящее время подразделение Космического приборостроения компании работает над рядом проектов, из которых стоит упомянуть Панель фоточувствительных детекторов на мягких шлейфах для спутника «Метеосат Третье Поколение» (Meteosat Third Generation) и камеру Янус (Janus) в рамках проекта Европейского космического агентства «Ледяные спутники Юпитера» (Jupiter's Icy Moons).

Вообще-то работы по освоению космической темы в разрезе CIS в компании начались с Геостационарного зонда наблюдения за водной поверхностью (GOCI – Geostationary Ocean Color Instrument), размещённого на южнокорейском спутнике COMS-1. Зонд был оснащён КМОП-сенсором разрешением 2 Мп, переданного компании e2v сторонним производителем. e2v, предоставив свои мощности по корпусировке, юстировке и космической квалификации, поставила лётные модели для нужд программы. В рамках похожей программы e2v осуществила постпроизводственную доводку и квалификационные мероприятия для мультилинейного КМОП-сенсора видимого и ближнего ИК диапазона спутника SENTINEL 2, запуск которого был запланирован на 2015 г. В процессе постпроизводственной доводки компания внедрила технологию нанесения чёрного покрытия на поверхность фотоприёмника для минимизации его отражающей способности.

За время, прошедшее с этих первых шагов, e2v полностью освоила процесс верификации параметров КМОП-сенсоров с утончённым задним слоем в симуляторе космической среды, включая определение их радиационной стойкости. Работы проводились на прототипе с разрешением 2000 x 1500, с шагом пикселя 7 мкм CIS107, имеющим 3Т и 4Т пиксельную структуру в целях оценки более широкого диапазона параметров. В итоге оказалось, что возможно получать до 80% квантовой эффективности в диапазоне 450-750 нм с пиковым значением КЭ более 90%, что подтвердило теоретические предпосылки, основанные на показателях КЭ ПЗС-сенсора с утончённым задним слоем.

Структура пикселя CIS107 была выбрана для разработки собственного фирменного CIS115, предназначенного для камеры Янус миссии ЕКА к Юпитеру. Работы по космической квалификации CIS с утончённым задним слоем окончены в 2015 году. Теперь наступает черёд работ над CIS передней засветки. Компания Thales Alenia Space выступает подрядчиком по разработке, внедрению и производству КМОП-сенсоров с космической квалификацией для спутника «Метеосат Третье Поколение».

Серийные КМОП-сенсоры семейства *eye-on-Si* прошли верификацию радиационной стойкости под воздействием гамма лучей, протонов и тяжёлых ионов в рамках нескольких малых космических программ. Они производятся по КМОП-технологии Tower 0.18 мкм (Израиль) и имеют архитектуру 5Т вместе с постолбцовым параллельным 10-ти разрядным АЦП и шагом пикселя от 5,8 мкм до 4,5 мкм. Прибор серии JADE (EV76C454) испытан на воздействие гамма и протонного излучения в составе миссий Open University 3, CNES, Onera 4 и JPL5. Три «SAPPHIRE» (EV76C560) были запущены в составе прибора C3D на Ukube-1 – британском кубсате. Также в дополнение к испытаниям на Ukube-1 «сапфиры» были протестированы на предмет одиночного случайного сбоя (SEE – Single Event Effect) на Open University7. Данные мероприятия оказались полезными при сравнении серийных технологий и определили методологию производства радиационно-стойких моделей CIS

с космической квалификацией, например: CIS115 с утончённым задним слоем с такими характеристиками:

Разрешение:	1500 x 2000
Размер пикселя:	7 мкм
Архитектура пикселя:	4Т
Контур считывания:	4 порта, аналоговый
Шум считывания:	$<5e^-$ (при строковом затворе)
Ёмкость потенциальной ямы:	30 ke^-
Суммарная предельная доза:	250 крад(Si) $2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (10 МэВ протон)

А. В. Птицын

Источники:

Dryer, Ben (2013). *Characterisation of CMOS APS Technologies for Space Applications*. PhD thesis Open University. www.oro.open.ac.uk

Alice Reinheimer, Senior Applications Engineer, e2v (2015): e2v Space-Qualified CMOS Image Sensor Capability and Roadmap.

R.Meynart et al. Requirements, developments and challenges for CCD and CMOS image sensors for space applications http://imagesensors.org/Past%20Workshops/2013%20Workshop/2013%20Papers/08-3_075-Meynart_paper_revised.pdf