

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Крупноформатные системы регистрации изображений на базе твердотельных детекторов в оптической астрономии

В.В. Власюк, И.В. Афанасьева, В.И. Ардиланов, В.А. Мурзин,
Н.Г. Иващенко, М.А. Притыченко, С.Н. Додонов

Анализируются вопросы развития технологии создания твердотельных детекторов излучения различных типов для оптической астрономии. Рассматриваются принципы построения астрономических фотоприёмных систем на основе крупноформатных ПЗС- (прибор с зарядовой связью) и КМОП- (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник) приёмников. Приведены примеры наиболее результативных проектов с их применением. Изложена история создания оптических детекторов для отечественных телескопов, кратко приводится описание и характеристики разработанных систем. Представлены результаты испытаний в ходе реальных исследований. Обсуждаются перспективы создания крупноформатных систем на базе ПЗС- и КМОП-детекторов отечественного и зарубежного производства.

Ключевые слова: инструменты, фотоприёмное устройство, система регистрации изображений, ПЗС-приёмник, КМОП-приёмник, контроллер, сбор данных

PACS numbers: 07.50.Qx, 42.79.Pw, **95.55**. – n

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2023.04.039575>

Содержание

1. Введение (432).
2. Приборы с зарядовой связью — от первых образцов к гигантским "идеальным" изделиям (433).
 - 2.1. ПЗС с фронтальной засветкой (front-illuminated CCD).
 - 2.2. Внедрение ПЗС с обратной засветкой (back-illuminated CCD).
 - 2.3. ПЗС с обратной засветкой с глубоким обеднением кремния (deep-depletion CCD).
 - 2.4. ПЗС с внутренним электронным усилением (electron-multiplying CCD).
 - 2.5. Стыкуемые ПЗС и мозаики на их основе в астрономии.
3. Приборы КМОП в астрономии (438).
 - 3.1. Принцип работы КМОП-приёмников.
 - 3.2. Первые гибридные КМОП-приёмники для оптической астрономии.
 - 3.3. КМОП-сенсоры с обратной засветкой.
 - 3.4. Крупноформатные КМОП-приёмники научного класса больших форматов.
 - 3.5. Синтез ПЗС и КМОП — LACera™ от Teledyne Imaging.
4. Разработки фотоприёмных систем в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (440).

- 4.1. ПЗС-системы на базе прибора EEV CCD42-40.
 - 4.2. Системы регистрации изображений на базе E2V CCD42-90.
 - 4.3. ПЗС-системы для телескопа LAMOST (КНР).
 - 4.4. Система регистрации изображений на основе CCD231-84.
 - 4.5. ПЗС-система на базе CCD261-84.
 - 4.6. Фотоприёмные устройства с детекторами GSENSE4040 и GSENSE6060.
 5. Перспективы создания отечественных крупноформатных систем регистрации для оптической астрономии (443).
 6. Заключение (444).
- Список литературы (444).

1. Введение

Авторы работы не ставят перед собой цель описать всё разнообразие систем регистрации изображений на основе твердотельных детекторов, применявшихся в астрономических исследованиях за 40-летнюю историю с момента появления первых приборов. Наша задача — дать представление об основных идеях и технических решениях, которые позволили некогда скромным малоформатным и сложным в эксплуатации устройствам стать почти идеальными приёмниками света с практически неограниченными возможностями. Мы постараемся включить в обзор как ПЗС- (приборы с зарядовой связью, Charge Coupled Device — CCD), так и КМОП- (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник, Complementary Metal–Oxide–Semiconductor — CMOS) приёмники.

Вплоть до последнего десятилетия ПЗС-детекторы занимали безоговорочно лидирующие позиции во всех астрономических проектах, предполагающих использование светоприёмников крупного габарита, не преследующих целей высокого временного разрешения.

В.В. Власюк^(a), И.В. Афанасьева^(b), В.И. Ардиланов^(c),
В.А. Мурзин^(d), Н.Г. Иващенко^(e), М.А. Притыченко^(f),
С.Н. Додонов^(g)

Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
369167 Нижний Архыз, Зеленчукский район,
Карачаево-Черкесская республика,
Российская Федерация

E-mail: ^(a) vvlassao@gmail.com, ^(b) riv615@gmail.com,
^(c) valery@sao.ru, ^(d) vamur@sao.ru, ^(e) ivanick@sao.ru,
^(f) pma@sao.ru, ^(g) dodo@sao.ru

Статья поступила 21 апреля 2023 г.

В настоящее же время наблюдается бум развития широкоформатных КМОП-детекторов, которые начинают замещать ПЗС-матрицы в ряде приложений как в качестве отдельных монолитных приборов, так и в качестве мозаичных систем. И всё же в ряде астрофизических задач ПЗС-приёмники по-прежнему являются основной "рабочей лошадкой".

Разработки, осуществлённые в Специальной астрофизической обсерватории (САО) Российской академии наук (РАН) с середины 1980-х гг., в целом следовали основным мировым тенденциям с поправками на доступность тех или иных технологий и с оглядкой на финансовую сторону вопроса.

2. Приборы с зарядовой связью — от первых образцов к гигантским "идеальным" изделиям

2.1. ПЗС с фронтальной засветкой (front-illuminated CCD)

Собственно принцип работы ПЗС, основанный на переносе заряда из одной ячейки полупроводника в другую, был открыт У. Бойлом и Д. Смитом [1], работавшими в Лабораториях Белла (США), и первоначально не предполагал многообещающего астрономического развития: авторы работали над проблемами связи и передачи сигналов. Первое астрономическое применение было отмечено в 1974 г., когда с помощью ещё несовершенного прибора формата 100×100 элементов, изготовленного в компании Fairchild Semiconductor, на восьмидюймовом телескопе был получен снимок Луны.

А уже через два года зафиксировано первое профессиональное использование подобного прибора для получения снимков Юпитера, Сатурна и Урана на 61-дюймовом телескопе обсерватории Маунт Бигелоу в Аризоне [2].

С 1976 года на пятиметровом телескопе Хейла Паломарской обсерватории и телескопах Китт-Пикской национальной обсерватории и Интерамериканской обсерватории Сьерра-Тололо (с 1978 г.) началось регулярное применение детекторов Texas Instruments и RCA Corporation с матрицами из 400×400 и 320×580 элементов, охлаждаемых жидким азотом до температур ниже -120°C [3–7]. Тем не менее шумы считывания таких приборов превышали величину $40–50 e^-$. Общий вид приборов первого поколения приведён на рис. 1.

И хотя технология изготовления приборов совершенствовалась, точностные и шумовые параметры улучшались, габариты детекторов оставались относительно скромными почти до конца 1980-х гг. [8], пока не началась конкуренция между производителями за растущие заказы потребителей — астрономов и создателей космических миссий самого различного назначения. Уже к 1990 г. формат приёмника 1024×1024 элементов стал обыденным, а три технологических лидера: Kodak, Tektronix и Ford Aerospace — начали выпуск детекторов еще большего формата — 2048×2048 элементов [9]. На этом этапе в лидеры вышла корпорация Ford Aerospace, освоившая в сотрудничестве с компанией Photometrics изготовление приборов формата 4096×4096 7,5-мкм элементов. Им удалось достичь рекордно низкого показателя шума считывания — менее $1 e^-$ за счёт многократного неразрушающего считывания заряда с элемента приёмника. Практические значения шума составили около $2–3 e^-$ при скорости считывания детектора по-

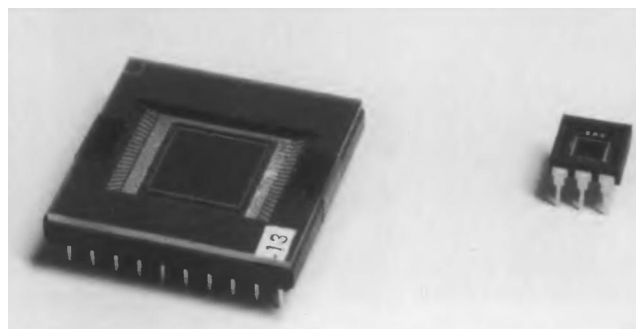


Рис. 1. Первые доступные ПЗС-приборы: TH7895 (Thomson), состоящий из 262164 элементов (слева) и TI211 (Texas Instruments) из 31680 элементов (справа).

рядка 50 кГц (при увеличении скорости на порядок шум обычно возрастают в полтора-два раза) [10].

Прогресс в создании монолитных детекторов большого формата в 1990-х гг. связан с компаниями Semiconductor Technology Associates (STA) и Fairchild Imaging.

Собственно, истоки компании Fairchild Imaging находятся в Fairchild Semiconductor, одной из пионерских компаний, создававших первые ПЗС ещё в 1973 г. Пройдя впоследствии череду слияний и поглощений, она унаследовала профильные подразделения от фирм Loral и Ford Aerospace, и к 2000 г. сконцентрировала производство крупных монолитных детекторов для промышленных, медицинских и научных приложений [11].

И, как результат, спустя несколько лет компания начала массовый выпуск крупнейших ПЗС-приборов, умещавшихся на формате кремниевой пластины диаметром 125 мм — от CCD485/486 с матрицей из 4096×4096 15-мкм элементов (показан на рис. 2) до CCD595 с матрицей из 9216×9216 8,75-мкм элементов.

Вся разработанная линейка приборов, за исключением CCD486 (в данной модели была опция использования обратной засветки детектора), как и более ранние разработки, использовала технологии фронтальной засветки, когда часть рабочей поверхности закрыта электродами и остаётся малочувствительной к падающему излучению, что ограничивает квантовую эффективность регистрации величиной $45–50\%$.

К 2004 году прибор CCD486 от Fairchild Imaging оставался крупнейшим в мире коммерчески реализуемым ПЗС-прибором (приборы типа CCD595 выпускались в ограниченном количестве и, скорее всего, только в интересах ведомств США). Он обладал возможностью одновременного считывания сигнала со всех четырёх углов с прекрасной эффективностью переноса заряда — не хуже $0,999995$ по каждой координате, а благодаря специальным легирующим добавкам к кремнию разработчикам удалось существенно снизить термогенерационный (темновой) ток — до $0,02 e^-/с$ при температуре кристалла -60°C . Величина шума считывания прибора составляла около $5 e^-$ при скорости считывания в 50 кГц и лучше $10 e^-$ при скорости в 1 МГц .

В отличие от Fairchild Imaging — крупной компании с богатой историей, небольшая компания STA — детище одного талантливого разработчика детекторов — Р. Бредтауэра, существующая с 1999 г. Его опыт разработок крупноформатных детекторов с 1975 г. в Lockheed Martin, Loral, Ford Aerospace и Rockwell для миссий Mars

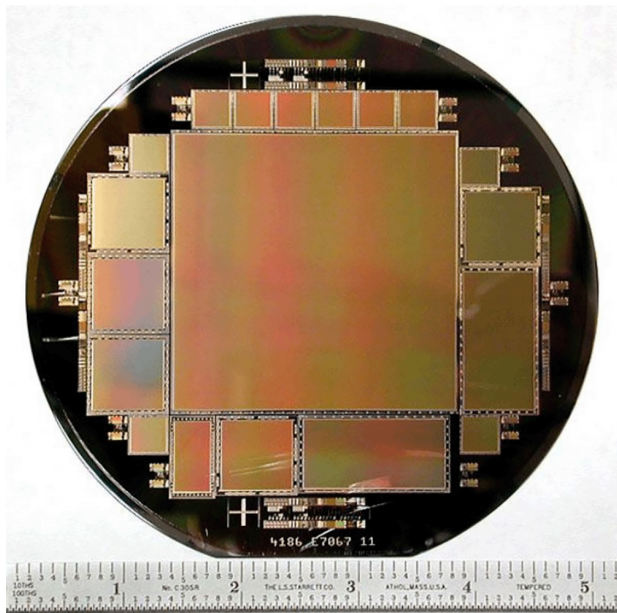


Рис. 2. Вид прибора Fairchild CCD486 на кремниевой пластине диаметром 125 мм.

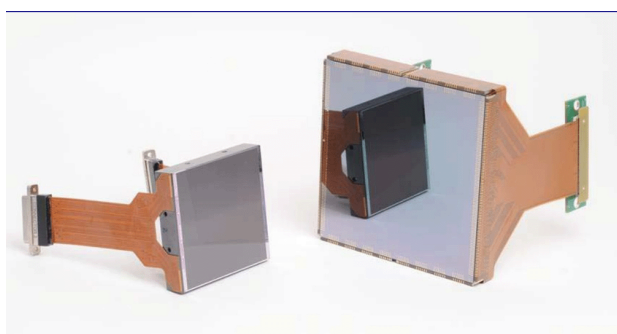


Рис. 3. Детектор STA1600B (справа) в сравнении с 4K × 4K прибором E2V CCD231.

Pathfinder, Cassini, Хаббловского космического телескопа позволил STA за 10 лет выйти на производство крупнейших в мире монокристаллических ПЗС с превосходными параметрами. Так, прибор STA1600B с линейным размером 95×95 мм, состоящий из матрицы в 10560×10560 9-мкм элементов [12] (приведён на рис. 3 справа), благодаря 16 малому шумам обеспечивает максимальную скорость считывания около 1 кадр/с. Шумы считывания на малых скоростях составляют около $3 e^-$, а при скорости в 1 МГц шумы возрастают до $5-7 e^-$.

Несмотря на такие превосходные параметры, STA удалось войти лишь в несколько крупных астрономических проектов [13–15], продолжая тиражирование своих успешных разработок.

Из фирм, осуществляющих свою деятельность в данной технологической сфере вне пределов США, следует упомянуть Sony Semiconductor (Япония) и Marconi, впоследствии — EEV, затем — E2V Technologies (Великобритания), сейчас — Teledyne e2v (США). И если Sony внесла значительный вклад в совершенствование технологий производства ПЗС и затем перешла в 2000-х гг. к разработкам КМОП-приёмников, то фирма из Великобритании уже к началу 2010-х годов захватила большую

часть рынка крупноформатных ПЗС-детекторов, применяемых в астрономии.

Возвращаясь к началу раздела, упомянем, что заслуги первооткрывателей ПЗС были по достоинству оценены через 40 лет — Бойл и Смит были удостоены Нобелевской премии по физике в 2009 г. за вклад в создание технологии приборов с зарядовой связью.

2.2. Внедрение ПЗС с обратной засветкой (back-illuminated CCD)

Квантовый выход регистрации фотонов в ПЗС-структуре может быть кратно увеличен (в зависимости от диапазона — до 3–5 раз) при условии, если использовать более тонкий слой кремния и направлять свет "с обратной стороны". Тогда потери света на поглощение и отражение от поверхности электродов, формирующих электрическое поле в светочувствительном слое, будут устранены. В диапазоне длин волн менее 450–500 нм эффективность регистрации будет кратно лучше, в диапазоне длин волн более 650–700 нм эффективность приборов начинает сравниться из-за большей глубины поглощения света. Так как поверхность чистого кремниевого слоя отражает почти 30% падающего света, применение специальных многослойных антиотражающих покрытий позволяет добиться существенного повышения квантовой эффективности.

В ПЗС-матрицах с обратной засветкой изображение фокусируется на обратной стороне кремниевой подложки, минуя структуру управляющего электрода. Однако для достижения эффективности толстая подложка, на которой расположена ПЗС-матрица, должна быть практически полностью истончена, поскольку эффективно собирать можно только электроны, генерируемые вблизи управляющих электродов. Толщина подложки таких ПЗС-матриц не превышает 10–12 мкм.

Впервые такой подход на практике удалось реализовать М. Лессеру из Аризонского университета во второй половине 1990-х гг. [16, 17]. Он применил технику селективного химического травления, дающую в итоге деталь с толщиной порядка 10–20 мкм с низкой плотностью дефектов. Контроль толщины кремния осуществляется благодаря разности в скорости травления сильно легированной подложки и слоя выращенного кремния. Для применения к крупноформатным приборам этот метод был доработан авторами совместно с STA, Fairchild Imaging и Imager Labs [18]. Разумеется, при производстве приборов большого формата налагаются более жёсткие требования к свойствам используемых материалов, что неизбежно увеличивает стоимость производства таких изделий.

Совместная работа позволила компании Fairchild Imaging внедрить эту технологию у себя при производстве приборов большого формата, в частности, для CCD486 [19], которая стала популярной в целом ряде астрономических проектов: KeplerCam [20], LCOGT [21], Lick AGN Monitoring Project [22].

Ещё успешнее внедрила методику обратной засветки в свои приборы компания Teledyne e2v. Высокое качество приборов, налаженное взаимодействие с производителями камер, наконец, большие объёмы производства позволили ей включиться в большинство реализуемых астрономических проектов. Упомянем лишь малую часть работ, в которых применяются одиночные приборы производства Teledyne e2v CCD231 формата 4K × 4K (она

изображена на рис. 3 слева). Среди них — интегральный полевой спектрофотометр PMAS для 3,5-м телескопа обсерватории Калар-Альто [23], многомодовый 24-канальный инструмент MUSE для телескопа VLT [24], полевой и мультиобъектный спектрограф MEGARA для 10-м телескопа GTC [25].

2.3. ПЗС с обратной засветкой с глубоким обеднением кремния (deep-depletion CCD)

Попытки создать приборы с обратной засветкой и достаточно глубоким слоем обеднённого кремния для повышения эффективности регистрации в длинноволновом диапазоне были начаты в середине 1990-х гг. в Национальной лаборатории Лоуренс Беркли (Lawrence Berkeley National Laboratory — LBNL) в Калифорнии, США [26]. Последующие исследования показали заметные преимущества такого типа регистрации изображений. Типичная толщина кремния в 200–300 мкм приводит в результате к высокой квантовой эффективности в красной части спектра, позволяет существенно подавить интерференционные эффекты при исследованиях в этом диапазоне [27]. Аппаратный контур — реакция на попавший фотон — чётко определён и зависит от времени прохождения фотогенерированных дырок в электрическом поле, которое распространяется по всей толщине устройства [28, 29].

В 2004 г. Национальная лаборатория Лоуренс Беркли совместно с канадской фирмой Dalsa Semiconductor сообщили о разработке технологии производства крупноформатных приборов для астрономических задач, обладающих необходимыми свойствами — повышенной чувствительностью в красной части спектра, практически полным отсутствием интерференционной картины [30, 31]. Приборы формата $2K \times 4K$ с 15-мкм элементом дали значения шума считывания $4,5 e^-$, темнового тока — около $7 e^-/\text{час}$ на элемент, значение эффективности переноса заряда лучше 0,999995, глубины потенциальной ямы — более $160 Ke^-$ при рабочей температуре -140°C . При этом квантовая эффективность составила $\sim 60\%$ на $\lambda = 400 \text{ нм}$, более 90% на $\lambda = 700\text{--}900 \text{ нм}$, 60% на $\lambda = 1000 \text{ нм}$. Приборы такого класса формата 800×1980 элементов и 2048×2048 элементов были использованы для астрономических наблюдений на телескопах Китт-Пикской обсерватории [32].

Успешное внедрение метода глубокого обеднения толстой кремниевой подложки послужило стимулом для разработчиков в других странах. Двумя годами позже японские разработчики сообщили о создании полностью стыкуемого прибора Hamamatsu Photonics формата $2K \times 4K$ для создания мозаики для 8,2-м телескопа Subaru. При толщине кремниевого слоя в 200 мкм им удалось достичь значения эффективности переноса заряда лучше 0,999995 и шума считывания меньше $5 e^-$ при скорости считывания в 150 кГц. При этом среднеквадратичная величина диффузии заряда не превышала значения 7,5 мкм, плоскостность детектора была лучше 15–20 мкм, а темновой ток составлял несколько $e^-/\text{час}$ на элемент при рабочей температуре -100°C [33].

Примерно в то же время компания E2V Technologies сообщила о разработке собственного варианта крупноформатного прибора ПЗС на основе высокорезистивного кремния [34] с глубиной обеднения порядка 100 мкм. При этом толщина подложки составляла до 600 мкм, а на-

пряжения, подаваемые на электроды, составляли около 70 В. Исследования были проведены для приборов формата $2K \times 512$ и $2K \times 4K$ элементов. Упомянутые работы стали основой выпускаемой данной фирмой линейки изделий с глубоким обеднением — DD (deep depletion CCD).

2.4. ПЗС с внутренним электронным усилением (electron-multiplying CCD)

Принцип электронного внутреннего усиления заряда непосредственно на ПЗС-кристалле (точнее, в её выходном регистре) впервые был реализован компанией E2V Technologies в 2001 г. [35, 36]. Благодаря модификации выходного регистра ПЗС-прибора и подаче на его электроды повышенного напряжения (до 30–40 В вместо стандартных 10 В) создаётся возможность ускорения фотоэлектронов при прохождении каждого элемента и повышения вероятности (до 2%) генерирования второго электрона путём лавинного умножения. После прохождения нескольких сотен элементов итоговая величина усиления может составить несколько сотен или несколько тысяч. На выходе регистра шум считывания, создаваемый выходным усилителем, делится на это общее усиление, в результате эффективный шум считывания составляет доли электрона.

Уже в первые годы компания E2V Technologies выпустила линейку таких приборов под именем L3CCD (Low-Level-Light CCD) размерами от 128×128 до 1024×1024 элементов размера 16 мкм. Такие детекторы могут иметь как фронтальную, так и обратную засветку (с утончённой кремниевой структурой). Второй производитель — компания Texas Instruments — также выпустил детекторы с очень похожей технологией умножения электронов под торговой маркой Imprastron. У них есть множество доступных устройств формата до 1024×1024 элементов с 8-мкм размером [37].

Благодаря снижению шума считывания ПЗС-матрицы с электронным умножением (Electron Multiplying CCD — EM CCD) представляют собой важный шаг в повышении производительности систем регистрации и обладают значительным потенциалом для определённых астрономических применений. EM CCD обладают всеми преимуществами обычных ПЗС-матриц с точки зрения квантовой эффективности, эффективности переноса заряда, темнового тока, косметического качества и т.д.

Единственным существенным недостатком EM CCD является искажение пуассоновской статистики света в результате наложения статистики процесса умножения, связанного с вероятностной природой механизма усиления, основанного на явлении ударной ионизации. Эффект дисперсии, возникающий в результате процесса стохастического умножения, приводит к увеличению шума считывания в $\sqrt{2}$ раз [38].

Таким образом, можно ожидать, что EM CCD с обратной засветкой — устройство, сочетающее в себе как технологию электронного умножения, так и технологию обратной засветки — обеспечит как чувствительность обнаружения одиночных фотонов (благодаря устранению шума считывания), так и максимальную эффективность преобразования фотонов. Устройство EM CCD с обратной засветкой теоретически может обеспечить улучшение соотношения сигнал/шум в два и более раз (в зависимости от длины волны) по сравнению с устройством EM CCD с фронтальной засветкой.

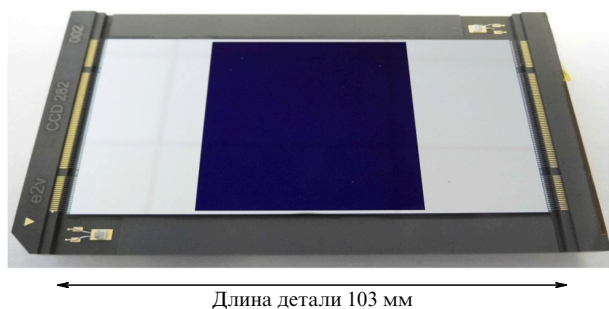


Рис. 4. Общий вид прибора с электронным усилением CCD282. Слева и справа от активной области приёмника — экранированные секции памяти, обеспечивающие кадровый перенос накопленного изображения. Длина всего кристалла — 103 мм.

Компания Andor была первым коммерческим поставщиком цифровых научных ПЗС-камер, использующих такую инновационную технологию, и выпустила серию научных камер Andor Technology iXon, продаваемых под брендом EM CCD. Эти приборы стали активно применяться в научных исследованиях, требовательных к шумам регистрации и высокому скоростям получения данных: получении изображений с высокой кадровой частотой для улучшения углового разрешения [37], скоростной фотометрии [39], спектроскопии высокого разрешения [40–43].

Среди последующих разработок в этой области следует отметить создание компанией E2V Technologies крупноформатного детектора с обратной засветкой и электронным усилением (BI EM CCD) CCD282 формата $4K \times 4K$ элементов 12-мкм размера [44]. Вид прибора показан на рис. 4.

Этот детектор был изготовлен по заказу Монреальского университета и применён для создания сканирующего интерферометра Фабри–Перо, устанавливаемого на телескопе NTT Европейской южной обсерватории (European Southern Observatory — ESO) и более крупных телескопах [45, 46]. Для повышения скорости опроса детектора в нём использован режим кадрового переноса и 8 параллельных выходных узлов. Несмотря на такие размеры, в нём обеспечена скорость считывания 5 кадр/с при субэлектронном шуме считывания.

2.5. Стыкуемые ПЗС и мозаики на их основе в астрономии

Максимальный размер отдельного ПЗС-детектора определяется диаметром кремниевой пластины, которая может быть изготовлена по существующим технологиям. В 1990-х гг. эта величина составляла 125 мм (см. рис. 2), в 2000-х гг. стало возможным использование качественных пластин диаметром 150 мм , в последнее десятилетие их диаметр составляет уже 200 мм . Для создания фотоприёмных систем большего размера требуется создавать мозаичные приёмники, что и обусловило развитие детекторов с трёх- и четырёхсторонней стыкуемостью. Большинство выпускаемых в настоящее время моделей ПЗС-детекторов обладают такой возможностью (см., например, рис. 3).

Из большого числа мозаичных систем, разработанных для астрономических задач, остановимся лишь на

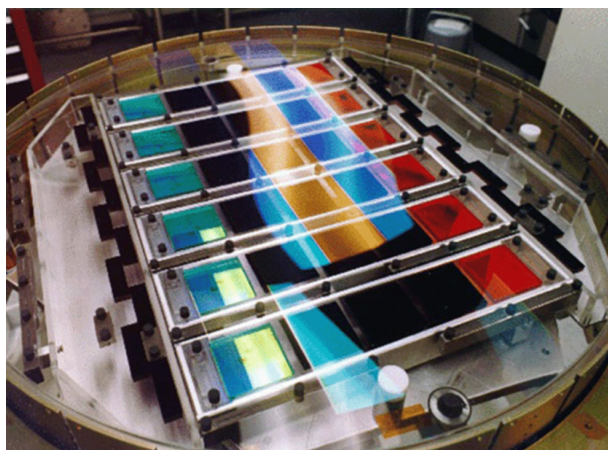


Рис. 5. Вид камеры Слоановского обзорного телескопа из 30 ПЗС-матриц в сборе.

наиболее значимых разработках, проложивших дорогу последующим проектам.

Одной из таких систем — скромных по габаритам, но революционных для своего времени — можно считать камеру широкого поля Хаббловского телескопа — WF/PC (после модернизации с заменой приборов в 1993 г. — WFPC2), исследования на которой были начаты в 1990 г. В каждой из модификаций использовались четыре прибора формата 800×800 элементов (первоначально — производства Texas Instruments, затем — Loral) [47]. Результаты, полученные с их помощью, позволили астрономам по-новому взглянуть на нашу Вселенную и описаны в тысячах научных работ. В силу нерешённых проблем стыкуемости ПЗС-приборов разделение поля на отдельные приборы производилось оптически.

Подготовка к полностью цифровому фотометрическому и спектральному обзору неба велась ещё в 1990-е годы, и в 2000 г. проведение Слоановского обзора (Sloan Digital Sky Survey — SDSS) было начато на специализированном $2,5\text{-м}$ телескопе, расположенном в обсерватории Апач-Пойнт (США). Телескоп был оснащён широкоугольной мозаичной ПЗС-камерой (рис. 5) и парой двойных спектрографов с оптоволоконным вводом. К новым особенностям телескопа относятся: фокальная плоскость размером 3° (в линейной мере — $0,65\text{ м}$), которая обеспечивает превосходное качество изображения, малые геометрические искажения в широком диапазоне длин волн ($300\text{–}1060\text{ нм}$).

Камера обработки изображений собирает фотометрические данные, используя массив из 30 ПЗС-матриц SITE/Tektronix размером 2048×2048 элементов, расположенных в шесть столбцов по пять ПЗС в каждом, выровненных по столбцам самих ПЗС-матриц. Элементы детекторов имеют размер 24 мкм , а шумы считывания не превышают 5 e^- при соответствующей скорости. При съёмке прибор работает в режиме дрейфового сканирования: камера медленно считывает изображения, в то время как изображения объектов перемещаются вдоль столбцов ПЗС-приёмников со скоростью вращения небесной сферы. Таким образом камера создаёт пять изображений данного объекта во всех цветах обзора [48].

SDSS предоставил учёным данные для детальных исследований распределения светящейся и несветящейся

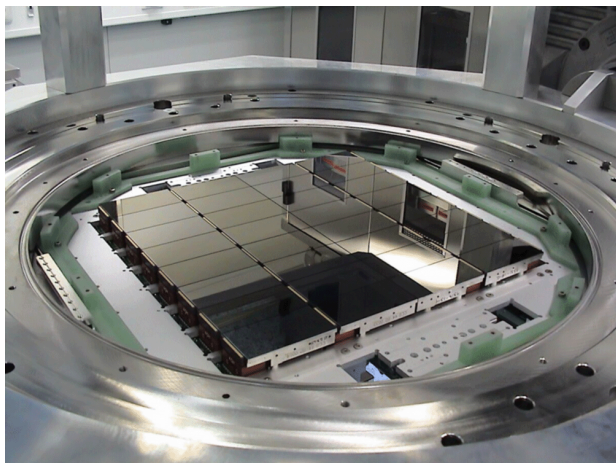


Рис. 6. Вид мозаичного прибора OmegaCAM.

материи во Вселенной: фотометрически и астрометрически откалиброванное цифровое изображение π стерadians небесной сферы выше 30° галактической широты в пяти оптических диапазонах и спектроскопический обзор около 10^6 самых ярких галактик и 10^5 самых ярких квазаров, обнаруженных в каталоге фотометрических объектов [49, 50].

С начала 2000-х гг. благодаря новым технологическим возможностям, частично изложенным ранее, началось практически взрывной рост количества создаваемых мозаичных систем для астрономических задач.

Так, в 2006 г. ESO сообщила о создании OmegaCAM — мозаики 8×4 из 32 приборов CCD44-80 производства e2v формата $2K \times 4K$ элементов 15-мкм размера (показана на рис. 6). OmegaCAM была установлена на обзорном 2,5-м телескопе ESO VST и обеспечила поле зрения размером в 1° с превосходным качеством — $0,21''$ на элемент [51].

Космическая миссия Кеплер, целью которой был поиск и исследование экзопланет у звезд солнечного типа в пределах площадки размером около 100 град^2 с помощью телескопа с 1-м апертурой, была выведена на орбиту в 2009 г. [52, 53]. Она была оснащена крупнейшей для своего времени мозаикой из 42 ПЗС-приёмников производства e2v формата 2200×1024 элементов 27-мкм размера общим размером 95 млн элементов. За четырёхлетний период работы миссии в её данных было открыто несколько тысяч планет у других звезд.

Примерно в одно время с проектом Кеплер была начата работа над камерой для поиска тёмной энергии (Dark Energy Camera — DECam), предназначенной для наземных исследований в первичном фокусе 4-м телескопа обсерватории Сьерра-Тололо. Она представляет собой массив из 62 детекторов из высокорезистивного кремния (BI DD) совместного производства канадской компании Dalsa и LBNL формата $2K \times 4K$ элементов 15-мкм размера [54]. Рабочее поле камеры из 520 млн элементов имеет линейный размер около 0,5 м и позволяет одновременную регистрацию площадки в 3 град^2 на небесной сфере.

В результате первого обзора DECam, проведённого в 2013–2019 гг., было опубликовано около 200 научных работ, позволивших уточнить характеристики распределения тёмной материи и сопоставить их с результатами исследований реликтового излучения (в частности, [55,

56]). На этой камере продолжают исследования в рамках других обзоров (см., например, [57]).

Один из важнейших поставщиков актуальной информации о нестационарных объектах во Вселенной — первый широкоугольный телескоп сети Pan-STARRS — начал регулярные исследования с 2010 г. Он состоит из первичного зеркала диаметром 1,8 м со светосилой $f/4,4$ и вторичного зеркала диаметром 0,9 м, обеспечивающего поле зрения более 3° . Оптическая конструкция обеспечивает низкие искажения и минимальное виньетирование даже по краям рабочей области. Из первоначально запланированной сети к настоящему времени введены в строй два таких телескопа.

Камера Pan-STARRS-1 состоит из $\sim 1,4$ млрд элементов и представляет собой мозаику из 60 ПЗС-приборов с обратной засветкой формата 4846×4868 элементов CCD58, изготовленных в лаборатории Линколна при Массачусетском технологическом институте [58]. Размер элементов ПЗС-матрицы 10 мкм, что соответствует $0,258''$ на небесной сфере, толщина кремниевого слоя 70 мкм. Все детекторы считываются с помощью специализированного ПЗС-контроллера, время считывания составляет 7 с для получения полного кадра. Величина шума считывания для всех приборов при такой скорости составляет около $5 e^-$. Активные, пригодные для использования элементы мозаики занимают около 80 % поля зрения [59].

В заключение раздела следует упомянуть два крупнейших проекта, реализация которых ожидается в ближайшее время.

JPCam (Javalambre Panoramic Camera) — мозаичная камера из 1,2 млрд элементов. Она создаётся для оснащения 2,6-м обзорного телескопа обсерватории Хава-ламбре и включает 14 приборов большого формата производства e2v CCD290-99 — $9,2K \times 9,2K$ элементов 10-мкм размера. Криостат для мозаики также разработан в e2v. Камера будет установлена в касегреновском фокусе телескопа и обеспечит полное поле зрения диаметром 3° с масштабом $0,23''$ на элемент [60].

Основная задача этого инструмента — проведение фотометрического обзора северного неба в 54 узкополосных фильтрах для получения с беспрецедентной точностью фотометрических красных смещений миллиардов слабых галактик на площади около 8000 град^2 . Тестовые испытания показали, что вся мозаика считывается за время 10–15 с, и при этом реализуется шум считывания порядка $5 e^-$ [61].

Камера Большого синоптического обзорного телескопа (LSST — Large Synoptic Survey Telescope) с мозаикой из 3,2 млрд элементов. Завершается десятилетняя работа по созданию крупнейшего обзорного телескопа LSST. Для реализации поставленной перед проектом задачи — обеспечить рабочее поле размером в 3° при диаметре главного зеркала в 8,4 м — разработчикам пришлось использовать трёхзеркальную систему с очень большой светосилой $f/1,234$ и трёхлинзовый корректор [62].

Оптическая схема была оптимизирована таким образом, чтобы реализовать большое поле зрения при предельном качестве изображения в широком диапазоне длин волн (320–1050 нм). Падающий свет собирается кольцевым первичным зеркалом, имеющим наружный диаметр 8,4 м и внутренний диаметр 5 м, создавая эффективно заполненную апертуру размером



Рис. 7. Мозаичная камера из 3,2 млрд элементов для LSST в сборочном цехе.

~ 6,4 м. Собранный свет отражается на выпуклое 3,4 м вторичное зеркало, от него — на вогнутое третичное зеркало диаметром 5 м и, наконец, на три преломляющие линзы камеры. Трёхэлементная преломляющая оптика камеры корректирует хроматические аберрации, вызванные необходимостью использования толстого входного окна криостата, и выравнивает фокальную поверхность.

Камера LSST содержит мозаику размером в 3,2 млрд элементов, состоящую из 189 ПЗС-матриц CCD250-82 производства Teledyne e2v формата 4K × 4K с 10-мкм элементами [44] (показана на рис. 7). Такой выбор обусловлен необходимостью перекрыть всё поле зрения диаметром 0,64 м с разрешением в 0,2 на элемент. Собственно ПЗС-матрицы представляют собой устройства из высокорезистивного кремния с глубоким обеднением с обратной засветкой (BI DD CCD) и сильно сегментированной архитектурой, которая позволяет считывать всю матрицу за 2 с при шумах считывания не хуже $5 e^-$. Детекторы сгруппированы в блоки размером 3 × 3, каждый из них содержит свою собственную специализированную электронику. Эти блоки установлены на решётке из карбида кремния внутри вакуумного криостата с индивидуальной системой терморегулирования, поддерживающей рабочую температуру ПЗС-приборов около 173 К (см. [63–66]).

3. Приборы КМОП в астрономии

3.1. Принцип работы КМОП-приёмников

Идея использования комплементарного металлооксидного полупроводника в технологии создания двумерных массивов светочувствительных пикселей насчитывает почти 40 лет. Однако первые КМОП-матрицы были разработаны исключительно для использования в гибридных детекторах инфракрасного диапазона и поэтому были слишком экзотичными и дорогими, чтобы получить широкое распространение. Технология КМОП была превосходна для инфракрасного диапазона, где кремний прозрачен, а элементы были крупными. Как следствие, к середине 1990-х гг. стали доступны большие гибридные массивы с форматом до 1К × 1К элементов. Примерно в то же время технология КМОП-элементов достигла достаточно малых размеров, что позволило создавать монолитные КМОП-сенсоры с небольшими

элементами и хорошей производительностью. Но только спустя годы КМОП-сенсоры стали способны достигать высокого уровня производительности ПЗС-матриц. К середине 2000-х гг. КМОП-датчики изображения составляют значительную долю рынка коммерческих сенсоров и могут быть найдены в различных потребительских устройствах. Кроме того, гибридная технология КМОП получила дальнейшее развитие в виде многомегаэлементных матриц как для инфракрасного, так и для видимого диапазона.

Как и ПЗС-матрицы, КМОП-детекторы используют фотоэлектрический эффект в объёме полупроводника для преобразования фотонов в электрические заряды. Однако, в отличие от ПЗС, КМОП-сенсоры не ограничены кремнием в качестве материала детектора. Вместо этого ряд различных материалов может быть гибридован с интегральной схемой считывания КМОП для обеспечения чувствительности к ультрафиолетовому, видимому или инфракрасному излучению.

Обе технологии используют фотодиод для генерации и разделения зарядов в каждом элементе, но затем начинаются различия. Во время считывания ПЗС-матрицы перемещают построчно собранный заряд к выходному регистру, а затем в каждой строке все заряды последовательно перемещаются к единому выходному узлу, где один усилитель генерирует соответствующие выходные напряжения. С другой стороны, КМОП-детекторы имеют независимый усилитель в каждом элементе, который преобразует накопленный заряд в напряжение и таким образом устраняет необходимость передавать заряд от элемента к элементу. Вместо этого напряжения мультиплексируются на общую шину с помощью встроенных КМОП-переключателей. Аналоговые и цифровые выходы датчиков возможны при использовании либо усилителя видеовыхода, либо аналого-цифрового преобразователя.

Существенным преимуществом технологии КМОП-сенсоров является её высокий уровень гибкости. Маленькие и простые элементы с тремя или четырьмя транзисторами используются для регистрации сигнала, а более крупные и сложные элементы с сотнями транзисторов обеспечивают аналого-цифровое преобразование и другие возможности обработки изображений непосредственно на уровне элементов.

Как правило, детекторы на основе КМОП не нуждаются в механическом затворе, поскольку время накопления контролируется электронным способом. Интересной особенностью является то, что пиксели могут считываться без разрушения сигнала встроенного детектора (неразрушающее считывание). Последнее позволяет считывать каждый элемент несколько раз, тем самым снижая шум при считывании за счёт усреднения нескольких считываний. В отличие от ПЗС, КМОП-матрицу можно сканировать несколькими различными способами, включая произвольный доступ к любому элементу в любое время [67].

КМОП-детекторы разделяются на два класса: монолитные и гибридные. Монолитные КМОП-сенсоры — это микросхемы датчиков изображения, которые объединяют фотоприёмники и схему считывания на одном и том же фрагменте кремния. По сравнению с гибридными сенсорами монолитные матрицы дешевле в изготовлении, но их чувствительность ограничена видимым и ближним инфракрасным диапазоном длин волн. В моно-

литном КМОП-сенсоре фотодиоды делят площадь элемента с транзисторами. По данной причине коэффициент заполнения всегда меньше 100 %. Кроме того, для КМОП-детекторов с фронтальной засветкой ограничена чувствительность в красном цвете из-за относительно слабого поглощения фотонов кремнием.

У гибридного прибора, оптимизированного для оптического диапазона, матрица детекторов $p-i-n$ состоит из толстой (~ 185 мкм) активной области из высокочистого кремния, расположенной между областями, легированными p -типом и n -типом [68]. Как правило, регистрация проходит в области, легированной n -типом, а сторона, примыкающая к схеме считывания, легирована добавками p -типа. К устройству прикладывается сильное обратное смещение, в результате чего образуется сильное электрическое поле, разделяющее электронно-дырочные пары, создаваемые фотонами, поглощаемыми в области с высоким удельным сопротивлением. Основная часть матрицы детекторов почти полностью обеднена, обеспечивая превосходное качество на длинных волнах и хорошие передаточные характеристики.

3.2. Первые гибридные КМОП-приёмники для оптической астрономии

К середине 2000-х гг. определился явный технологический лидер в производстве КМОП-приёмников для широкого спектра приложений — корпорация Rockwell Scientific Company (RSC), известная астрономическому сообществу прежде всего линейкой детекторов инфракрасного диапазона HAWAII, используемых во многих системах инфракрасного (ИК) диапазона.

Для оптического диапазона RSC разработала два типа гибридных приёмников: из $HgCdTe$ с удалённой подложкой, выращенного методом эпитаксии молекулярным пучком, и кремниевой матрицы $p-i-n$. В то время как $HgCdTe$ с удалённой подложкой обеспечивает непрерывное покрытие видимого и инфракрасного диапазонов, прибор на базе $p-i-n$ матрицы позволяет регистрацию только оптического излучения, но по более низкой стоимости и при азотных температурах охлаждения.

Его квантовая эффективность превышает 80 % в диапазоне 500–900 нм и достигает значения более 50 % в диапазоне 900–1000 нм благодаря толщине слоя кремниевых детектора. Приборы такого типа демонстрируют высокий процент работоспособных элементов ($> 99,99$ %), шум считывания одиночных приборов — менее $13 e^-$ при тактовой частоте 100 кГц, темновой ток менее $0,001 e^-/\text{элемент}/\text{с}$ при рабочей температуре 140 К [69].

Практическое применение КМОП-приёмников такого типа было ограничено значительной (по сравнению с ПЗС-приборами) поэлементной неоднородностью и проблемами с калибровкой данных. В течение около 10 лет они позиционировались как системы для вспомогательных задач, в которых не требуется высокая фотометрическая точность [70–73].

3.3. КМОП-сенсоры с обратной засветкой

В 2014 г. компания E2V Technologies объявила о создании крупноформатного КМОП-сенсора CIS113 с трёхсторонней стыкуемостью. Вначале прибор обладал фронтальной засветкой, а впоследствии был выпущен вариант с обратной засветкой. Прибор состоит из 1920×4608 элементов с размером 16 мкм. Прибор обладает восемью независимыми выходами с возможностью обеспечения

считывания отдельных областей прибора с частотой 20 Гц. При этом обеспечивается шум считывания не хуже $5 e^-$ и низкий темновой ток. Благодаря технологии обратной засветки квантовая эффективность регистрации достигает 90 % [44].

Такие характеристики, сочетающие возможности КМОП-приёмника и ПЗС-технологий, были обусловлены требованиями проекта TAOS-II — слепого обзора затмений для измерения размеров транснептуновых объектов в диапазоне от 300 м до 30 км. TAOS-II будет наблюдать до 10000 звёзд с частотой 20 Гц тремя телескопами с 1,3-м зеркалами одновременно в поле диаметром $1^\circ,7$ [74].

Благодаря возможности прямой адресации строк и столбцов прямоугольные области размером 8×8 элементов в каждом датчике могут дискретизироваться с частотой 20 Гц или выше со скоростью до 1 млн элемент/с на канал. Это позволит производить до 20 млрд фотометрических измерений за ночь, а за год построить около 70 млн кривых блеска.

Для реализации проекта для каждого телескопа была изготовлена КМОП-мозаика с криогенным охлаждением из десяти приборов CIS113 с размером $9K \times 9K$ элементов [75].

3.4. Крупноформатные КМОП-приёмники научного класса больших форматов

Образованная лишь в 2012 г. компания Gpixel Inc. (КНР) уверенно заняла часть рынка крупноформатных приёмников, выпустив к 2022 г. линейку приборов КМОП под именем GSENSE. Практический интерес для астрономии представляют приборы GSENSE4040 формата $4K \times 4K$ девятимикронных элементов, GSENSE6060 формата $6K \times 6K$ десятимикронных элементов и GSENSE1081BSI¹ формата $9K \times 9K$ также десятимикронных элементов (рис. 8). Эти приборы, кроме последнего, выпускаются в вариантах с передней и обратной засветкой, GSENSE1081BSI — только с обратной засветкой. Модели с обратной засветкой благодаря антиотражающим покрытиям обеспечивают квантовую эффективность регистрации выше 95 % в пике чувствительности на длине волны около 600 нм.

Указанные приборы имеют ряд особенностей, позволяющих давать им предпочтение при решении конкретной задачи. Так, приборы GSENSE4040 и GSENSE6060 имеют меньшие линейные размеры, допускают охлаждение только до -55°C , имеют заметные темновые токи — около $0,02 e^-/\text{с}$ на элемент, но могут работать на кадровых частотах более 20 Гц с шумом считывания около $2,5 e^-$. Зато прибор GSENSE1081BSI благодаря более глубокому охлаждению (до -70°C) имеет в пять раз меньший темновой ток и допускает трёхстороннюю стыкуемость, хотя уступает младшим моделям по шуму считывания почти в два раза и считывает полный кадр за три секунды.

Приборы линейки GSENSE в большинстве астрономических приложений в состоянии потеснить ПЗС-детекторы, даже в самых требовательных методах [76]. Все эти модели могут охлаждаться посредством элементов Пельтье, что упрощает их эксплуатацию.

Основной нерешённой проблемой для КМОП-приборов является обеспечение сопоставимого с ПЗС-детекто-

¹ <https://www.gpixel.com/products/area-scan-en/gsense/gsense1081bsi>



Рис. 8. КМОП-прибор GSENSE1081BSI из $9K \times 9K$ элементов в оправе из карбида кремния.

рами динамического диапазона выходного сигнала. Для реализации полного динамического диапазона каждый элемент считывается дважды с различным значением усиления, а затем производится "склейка" этих отсчётов. Как правило, в таком случае происходит некоторая потеря точности результата.

3.5. Синтез ПЗС и КМОП — LACera™ от Teledyne Imaging

В последние годы корпорация Teledyne Imaging подтвердила свои претензии на лидерство в создании детекторов оптического диапазона "hi-end" класса, объявив о разработке технологии LACera™, объединяющей преимущества ПЗС- и КМОП-приёмников [77].

Как отмечалось ранее, в ходе конкуренции этих технологий за последние десятилетия КМОП-детекторы потеснили ПЗС-приборы, в особенности в научных применениях, связанных с объектами с низкой освещённостью и необходимостью коротких экспозиций. Хотя технология ПЗС по-прежнему предпочтительнее для таких применений, как спектроскопия и астрономия, она ограничена относительно более высоким уровнем шума считывания и низкой кадровой частотой (за исключением ПЗС с электронным усилением). Технология КМОП может преодолеть указанные ограничения, однако создание всё более крупных приборов также сталкивается с технологическими ограничениями и в результате даёт более медленные и шумящие устройства (как, например, приборы GSENSE — см. выше).

В Teledyne Imaging успешно объединили преимущества технологий, применяемых в ПЗС-приборах, с преимуществами архитектуры КМОП-сенсоров. Технология LACera™ обеспечивает глубокое охлаждение и низкий уровень шума для сенсоров большого формата, возможности обратной засветки и глобального затвора, как у ПЗС, высокий динамический диапазон и технологию уменьшения свечения. В этой технологии сочетается наличие индивидуальных усилителей для каждого элемен-

та (как в КМОП) и аналого-цифрового преобразователя для отдельной строки приёмника (как у ПЗС).

Данная технология была интегрирована в оптимизированную для астрономии широкоформатную КМОП-камеру COSMOS. Сочетая все преимущества технологии LACera™ в одном полностью интегрированном устройстве, COSMOS предпочтителен для астрономических приложений, требующих более высокой частоты кадров, высокой чувствительности и низкого уровня шума, при этом предлагая сенсоры самых различных форматов с высокой скоростью опроса — от $3K \times 3K$ (кадровая частота 50 Гц) до $8K \times 8K$ (с частотой 10 Гц) с 10-мкм элементом. Достигнутые при таких скоростях шумы считывания составляют значение $0,7 e^-$, что сопоставимо с параметрами для ПЗС с электронным усилением. При 18-битной оцифровке результата достигнут динамический диапазон в 94 дБ.

Всё перечисленное делает камеры COSMOS идеальным решением для наземных астрономических приложений, таких как исследования с высоким временным разрешением, контроль околоземного пространства, компенсация атмосферной турбулентности методами адаптивной оптики и спекл-интерферометрии.

4. Разработки фотоприёмных систем в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Исследования и разработки в области применения матричных фотоприёмников в астрономических наблюдениях ведутся в лаборатории перспективных разработок САО РАН более 40 лет [78–82]. Специалисты подразделения разрабатывают и производят криостатируемые фотоприёмные системы для широкоформатных малошумящих твердотельных фотодетекторов научного класса, используемых в составе светоприёмной аппаратуры крупнейшего российского телескопа БТА с 6-м зеркалом, оптических телескопов Российской Федерации и других стран.

Главными направлениями исследований являются:

- способы достижения высокой чувствительности фотоприёмника (минимизация термогенерационного тока и шума считывания), которая необходима при наблюдениях предельно слабых объектов;

- методы получения максимальной стабильности и линейности передаточной характеристики свет – цифровые отсчёты видеоканала в изменяющихся внешних условиях;

- принципы построения универсальных контроллеров, способных работать с фотоприёмниками различных типов, форматов и конфигураций, в том числе мозаичными.

Анализ требований, выдвигаемых самыми высокоточными астрономическими методами исследований, показывает, что фотометрическая воспроизводимость по ансамблю полученных изображений при исследовании слабых объектов в течение нескольких часов или даже ночей должна быть не хуже 0,002 %, что соответствует примерно 0,05 % для единичной экспозиции. В своих разработках сотрудники лаборатории стремятся достичь столь точных показателей.

Разработка пяти поколений универсальных контроллеров семейства DINACON (DSP-based INtelligent Array CONtroller) позволила создать фотоприёмные устройства (ФПУ) на основе фотодетекторов различных типов: ПЗС-

матриц и мозаик на их основе, ПЗС с внутренним умножением заряда, быстрых гибридных ПЗС (pnCCD), матричных мультиплексируемых детекторов ИК-диапазона и др. В частности, созданы системы с фотоприёмниками, обладающими высокой чувствительностью в красной и ближней ИК-областях спектра [80, 82].

Основными фотоприёмниками, наиболее доступными в настоящее время в наблюдательной астрономии (в том числе в САО РАН), являются широкоформатные ПЗС научного класса производства E2V Technologies с форматом от $2K \times 2K$ и более. Как правило, это приборы с тонкой подложкой с засветкой с обратной стороны и приборы на основе обеднённого кремния.

4.1. ПЗС-системы на базе прибора EEV CCD42-40

К 1999 г. в САО РАН была разработана ПЗС-система нового поколения [78], реализующая возможности регистрации изображений с минимальным шумом считывания, измерения зарядового рельефа, создаваемого световым потоком, с предельной точностью и стабильностью, необходимыми для высокоточной фотометрии, и обеспечивающая гибкое управление широкоформатными малошумящими ПЗС-матрицами произвольного формата и топологии, а также мозаичными детекторами.

В ПЗС-контроллере DINACON-I реализованы инновационные способы снижения шума считывания и повышения точности измерения заряда за счёт реализации цифровой согласованной фильтрации и коррекции видеосигнала в реальном времени считывания заряда. Его новизна заключалась как в возможности измерения спектральной плотности шума для определения параметров цифрового фильтра и оптимизации режима выходного МОП-транзистора, так и в применении гибкой многопроцессорной архитектуры. В сравнении с предшественниками новый контроллер обеспечил двукратное снижение шума считывания и увеличение динамического диапазона, на порядок снижение нелинейности преобразования заряда в отсчёты и десятикратное улучшение стабильности коэффициента усиления. Все эти параметры характеризуют передаточную характеристику видеоканала [83].

В 2002–2003 гг. на телескопах САО РАН были введены в эксплуатацию две ПЗС-системы с фотоприёмником EEV CCD42-40 формата $2K \times 2K$ элементов с размером $13,5 \text{ мкм}$. Одна из них используется в составе многорежимного фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO телескопа БТА [84], а вторая — в составе навесного оборудования телескопа Цейсс-1000 [85]. В этих системах были достигнуты следующие точностные показатели: шум считывания — $1,7 \text{ e}^-$ на скорости 18 К элемент/с; $2,4 \text{ e}^-$ на скорости 55 К элемент/с, нестабильность встроенного нуля $< 1 \text{ e}^-$, нестабильность усиления видеоканала — $0,02 \%$.

4.2. Системы регистрации изображений на базе E2V CCD42-90

С 2007 г. на телескопе БТА начата эксплуатация крупноформатных высокочувствительных ПЗС-систем на базе приборов E2V CCD42-90 формата $4,5K \times 2K$ элементов с размером $13,5 \text{ мкм}$. ПЗС-система с детектором CCD42-90 VI, обладающая повышенной чувствительностью в синей области спектра, вошла в состав Основного звёздного спектрографа (ОЗСП), установленного в

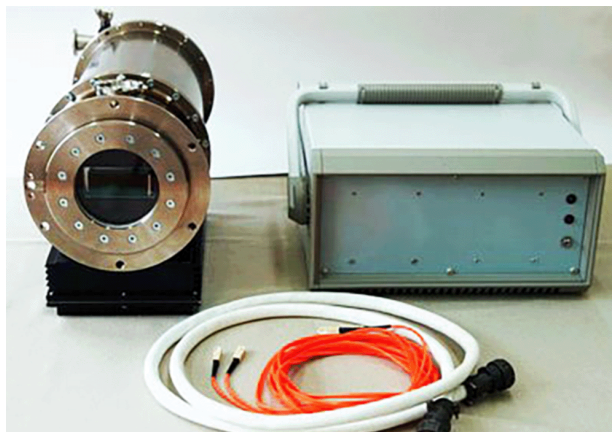


Рис. 9. Система регистрации изображений на основе приёмника CCD42-90-1-G01 DD.

фокусе Нэсмит-2 [86]. ПЗС-система с детектором CCD42-90 DD, обладающая повышенной чувствительностью в красной области спектра, вошла в состав универсального спектрографа SCORPIO-2 [87], устанавливаемого в первичном фокусе телескопа. Управление системами осуществляется с помощью модернизированных контроллеров DINACON-II.

В этих системах были достигнуты следующие точностные показатели: шум считывания — $1,85 \text{ e}^-$ на скорости считывания 25 К элемент/с; $2,8 \text{ e}^-$ на скорости 100 К элемент/с, нестабильность встроенного нуля — $0,25 \text{ e}^-$, нестабильность усиления видеоканала — $0,02 \%$, значение термогенерационного тока при температуре -125°C — $0,003 \text{ e}^-/\text{с}/\text{элемент}$. Квантовая чувствительность приборов соответствовала паспортным значениям: 89% на длине волны 650 нм (в пике для CCD42-90 DD) и 94% на длине волны 650 нм (CCD42-90 VI).

Измерения неплоскостности ПЗС-детекторов методом трёхмерной лазерной триангуляции показали, что прибор CCD42-90 DD имеет отклонения относительно плоскости фоточувствительной поверхности около 2 мкм и наклон относительно базовой посадочной плоскости 14 мкм , а поверхность CCD42-90 VI имеет ярко выраженную куполообразную неплоскостность с отклонением 7 мкм и наклоном 20 мкм .

В 2018 г. на эшелле-спектрометре высокого разрешения НЭС в фокусе Нэсмит-2 внедрена ПЗС-система с матрицей CCD42-90-1-G01 с толстой подложкой из обеднённого кремния, обладающая высокой чувствительностью в красной области спектра (рис. 9). Система управляется контроллером DINACON-IV, имеет оптоволоконный интерфейс Camera Link с пропускной способностью до $6,8 \text{ Гбит с}^{-1}$. Фотометрические характеристики системы таковы: шум считывания — $2,2 \text{ e}^-$ при скорости считывания 115 К элемент/с, максимальная квантовая эффективность — более 90% на длине волны 750 нм , термогенерационный ток при температуре -130°C — $0,002 \text{ e}^-/\text{с}/\text{элемент}$, нелинейность видеоканала — $1,0 \%$.

4.3. ПЗС-системы для телескопа LAMOST (КНР)

В 2008 г. лабораторией перспективных разработок были изготовлены два пилотных образца ПЗС-систем для мультиобъектного спектрографа LRS (Low Resolution



Рис. 10. ПЗС-системы для телескопа LAMOST.

Spectrograph) телескопа LAMOST Китайской академии наук [88, 89] (рис. 10).

LRS является двойным спектрографом с дихроичным разделением пучка на два диапазона: 370–590 нм (синий канал) и 570–900 нм (красный канал). Особенностью оптической схемы является расположение фотоприёмников во внутреннем фокусе камеры Шмидта. В разработанной конструкции камеры реализован требуемый малый профиль вынесенной оптической головки камеры при размещении в ней широкоформатного приёмника и установленной перед ним корректирующей линзой.

В качестве приёмников изображения использовались два ПЗС-прибора CCD203-82 фирмы E2V Technologies формата 4K × 4K элементов с размером 12 мкм, с различным покрытием: один детектор имеет чувствительность в синей, второй — в красной области спектра (см. рис. 34 в работе [88]).

Для управления фотоприёмником использован контроллер DINACON-III. Цифровая фильтрация сигнала в видеоканале, а также предварительные усилители видеосигнала, расположенные в головке камеры, позволили добиться низкого шума при высокой скорости считывания. Различные режимы считывания реализуются через четыре видеовыхода приёмника, при этом достигнуты значения шума считывания: 3,3 е⁻ на скорости 50 К элемент/с; 8 е⁻ на скорости 1000 К элемент/с.

Для короткофокусной оптической системы спектрографа LRS крайне важным параметром является неплоскостность широкоформатного приёмника. В данном случае размах неплоскостности поверхности приёмника не должен был превышать 30 мкм. Реальное значение неплоскостности "синего" детектора составляет 1 мкм, а "красного" — 8 мкм.

4.4. Система регистрации изображений на основе CCD231-84

На основе контроллера DINACON пятого поколения и модернизированной криостатируемой камеры с увеличенным входным окном в 2019 г. создана система регистрации изображений для оптоволоконного спектрографа высокого разрешения на телескопе БТА (рис. 11).

В этой системе была применена широкоформатная ПЗС-матрица CCD231-84 производства E2V Technologies формата 4K × 4K элементов с размером 15 мкм с обратной засветкой, подложкой из высокорезистивного

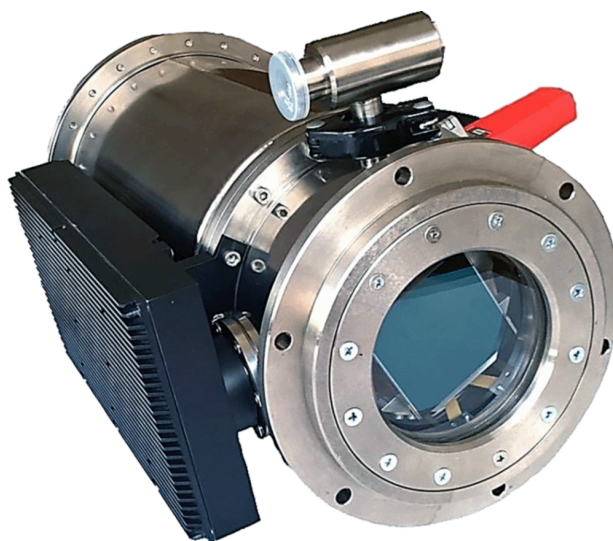


Рис. 11. Криостатируемая камера с фотоприёмником CCD231-84 с блоком камерной электроники.

кремния толщиной 40 мкм и покрытием Astro Multi-2. Фотоприёмник имеет высокую чувствительность в красной и ближней ИК-областях спектра с пиковой квантовой эффективностью 94 % на 750 нм. Шум считывания составляет 2,48 е⁻ на скорости 135 К элемент/с, а термогенерационный ток — 0,0005 е⁻/с/элемент.

Отличительной особенностью фотоприёмника является большая ёмкость потенциальной ямы в элементе (более 200 Ke⁻), что наряду с низким шумом канала обеспечивает очень высокий динамический диапазон сигнала в единичном кадре, равный 75000, или 97,5 дБ.

Поскольку ПЗС-камера с детектором CCD231-84 является стационарной и находится в помещении с контролируемой температурой, это позволяет добиться высокой стабильности передаточной характеристики видеоканалов контроллера. Среди конструктивных особенностей ПЗС-камеры можно отметить, что для светоприёмника такого формата потребовалось использовать входное окно диаметром 120 мм из просветлённого кварца толщиной 14 мм, а расстояние от внутренней поверхности окна до прибора — 6 мм.

Первые научные результаты, полученные на оптоволоконном спектрографе телескопа БТА с применением созданной системы регистрации, подтвердили как высокую позиционную точность доплеровских измерений лучевых скоростей звёзд, так и заявленные разработчиками характеристики ПЗС-камеры [90].

4.5. ПЗС-система на базе CCD261-84

В 2021 г. на телескопе БТА введена в постоянную эксплуатацию ПЗС-система с повышенной чувствительностью в красной области спектра для многорежимного фокального спектрографа низкого и среднего разрешения [87]. В этой системе регистрации изображений впервые используется детектор CCD261-84 с особо толстой (200 мкм) подложкой из высокорезистивного кремния. Основные фотоэлектрические характеристики, принципы работы и результаты исследований ПЗС-системы описаны в работе [82].

В 2022 г. криостатируемая камера данной системы была заменена на камеру с улучшенными эксплуатацион-

ными характеристиками. Конструкция нового азотного сосуда камеры снижает риск образования холодной течи, а система очистки активированного угля от скопившихся газов позволяет быстро восстановить работу крионасоса без необходимости разгерметизации камеры. За счёт модернизации системы теплоизоляции и увеличенного объёма азотного сосуда снижен расход жидкого азота, а время работы системы охлаждения от одной заправки хладагентом увеличено с 16 до 21 ч.

4.6. Фотоприёмные устройства с детекторами GSENSE4040 и GSENSE6060

Исследование рынка КМОП-фотоприёмников показывает, что упомянутые ранее приборы серии GSENSE больше подходят для решения задач, требующих высокого временного разрешения, по сравнению с КМОП-приёмниками Teledyne E2V (США). При сопоставимых характеристиках научные фотоприёмники серии GSENSE доступны для приобретения, имеют значительно меньшую цену, а также более просты для реализации управления.

В результате проектирования и последующих этапов разработки и изготовления в САО РАН были созданы опытные образцы ФПУ rCam4040 и rCam6060 на основе КМОП-контроллера и двух широкоформатных КМОП-фотоприёмников: GSENSE4040CMT с фронтальной засветкой и GSENSE6060BSI с обратной засветкой. Архитектура нового контроллера, структура двух ФПУ и их характеристики подробно описаны в работах [81, 91]. Реализовано специальное программное обеспечение [92], позволяющее управлять охлаждением камеры и всеми режимами работы фотоприёмника, считывать и сохранять видеоданные, производить телеметрию параметров работы ФПУ, автоматизировать процесс наблюдений.

Фотоприёмники охлаждаются термоэлектрическим модулем. Соединение с управляющим компьютером осуществляется по оптоволоконной линии связи на расстоянии до 300 м. Электроника контроллера и блока питания герметизирована по стандарту IP66, что соответствует требованиям астрономических наблюдений, проводимых на открытом воздухе.

Для фотометрической системы на базе GSENSE4040 при рабочей температуре -25°C в режиме высокого усиления удалось достичь значения шума считывания $4,4 e^{-}$, темнового тока $0,05 e^{-}/\text{с}/\text{элемент}$. Нелинейность передаточной функции составила 1,2 %, а динамический диапазон системы в этом режиме — около 750. Благодаря применению микролинз квантовая эффективность регистрации для данного прибора с фронтальной засветкой составила 74 % на длине волны 600 нм.

Проведение исследований ФПУ выявило определённую особенность в поведении фотодетектора при наблюдении ярких объектов в режимах с длительной экспозицией с накоплением большой величины заряда. Последующие кадры экспозиции содержат остаточное изображение предыдущего яркого объекта (см. рис. 2 в работе [81]). Такая особенность проявляется у детекторов с фронтальной засветкой и не характерна для ВІ-детекторов.

Основными преимуществами разработанной КМОП-системы являются: высокая скорость считывания кадров (на два порядка выше в сравнении с ПЗС-системами), высокая чувствительность (сравнимая с ПЗС) и крупный формат приёмника, что позволяет применять эту систему регистрации изображений для панорамного обзора

небесной сферы, получения информации о быстропеременных астрономических объектах спектральными и фотометрическими средствами, для метода спекл-интерферометрии, компенсации искажений волнового фронта.

В настоящее время на мировом рынке фотоприёмных систем предлагается широкий спектр систем на базе детекторов GSENSE: Kepler KL4040, Kepler KL6060 (FLI, США), QHY4040Pro, QHY6060 (QHY, КНР), PX4040A/B, PX6060 (PixelX, КНР), MX377 (XIMEA GmbH, Германия), NEVA4040, NEVA6060 ("НПК Фотоника", Российская Федерация) и др. Среди конкурентных преимуществ камер rCam4040 и rCam6060 по сравнению с аналогами: расширенный динамический диапазон (84 дБ) и оптимизированный кадр в режиме расширенного динамического диапазона (HDR), герметичная конструкция камеры со степенью защиты IP66, режим пониженного темнового тока во время накопления, наличие интерфейса связи типа 10 Gigabit Ethernet с длиной оптического кабеля до 300 м.

5. Перспективы создания отечественных крупноформатных систем регистрации для оптической астрономии

Достаточно очевидно, что эффективность астрономических исследований во многом зависит от возможностей применяемых систем регистрации изображений. Как показано выше, все прорывные астрофизические исследования, как наземные, так и космические, использовали все потенциальные возможности новых детекторов излучения, как по точности и воспроизводимости результатов, так и в части их информационной ёмкости. Это относится и к геометрическим размерам детекторов и мозаик из них, и к получению данных с предельно достижимой фотометрической точностью, привязкой временной шкалы и т.п.

Поэтому объясним интерес исследователей к системам, созданным на переднем крае современных технологий. До недавних лет отечественным исследователям был доступен практически весь рынок такой продукции, за исключением разве что инфракрасных систем научного уровня. Последние мировые события и определённая монополизация рынка научных детекторов для оптической астрономии закрывают эти возможности, может быть, временно. И дело не только в ценовой политике.

Сейчас перед разработчиками и пользователями систем регистрации оптического излучения встала проблема выбора перспективных технических решений. Большинство существующих оптических телескопов страны оснащены системами на основе ПЗС-детекторов различного класса. Задача их модернизации, как и проблема оснащения новых создаваемых инструментов, требует внедрения новых, чаще всего крупноформатных, систем регистрации. Приходится констатировать тот факт, что при недоступности как детекторов большого формата, так и систем на их базе, выпускаемых западными производителями, следует выполнить "разворот на Восток" и переориентировать пользователей либо на отечественные изделия, либо на продукцию, выпускаемую в КНР.

Требованиям, предъявляемым к фотоприёмным системам фотоприёмными системами в современных экспериментах, в настоящее время удовлетворяют только КМОП-приборы большого формата серии GSENSE.

Системы регистрации на их основе могут приобретаться как у китайских производителей (QHY, PixelX и др.), так и у отечественных (НПК "Фотоника", "Растр Технологии", НПК "СПП", САО РАН). О ПЗС-приборах от китайских производителей с аналогичными параметрами у нас информации нет. В Российской Федерации остались компетенции в части производства крупноформатных ПЗС-сенсоров — НПП "ЭЛАР" выпускает такие детекторы ещё с конца 1990-х гг. Правда, их характеристики пока не дотягивают до мирового уровня хотя бы из-за отсутствия технологий создания приборов с обратной засветкой и с применением толстых подложек с обеднённым кремнием. В результате имеет место почти двукратная потеря эффективности при регистрации слабых оптических потоков. Такой уровень на Западе был достигнут почти 40 лет назад, нам же крайне важно пройти этот этап в ближайшие годы, обратив внимание государства на данную проблему, что позволит решить вопрос повышения эффективности научных исследований и в нашей стране, и у наших партнёров — стран БРИКС, вынужденных также опираться на собственные разработки.

6. Заключение

В настоящем обзоре рассмотрены вопросы реализации современных технологий создания высокоэффективных крупноформатных фотоприёмных систем различных типов, обозначены основные тенденции в мировом приборостроении. Они проиллюстрированы на примере наиболее продуктивных научных приборов, реализованных для решения задач оптической астрономии. Проведён краткий анализ крупноформатных систем для отечественных и зарубежных телескопов, созданных авторами за последние 20 лет в САО РАН, и показано, что по своим эксплуатационным параметрам они не уступают зарубежным аналогам. Обсуждается проблема создания в стране новых перспективных систем регистрации изображений с использованием собственных возможностей.

Мы получили часть наблюдательных данных на уникальной научной установке Большой телескоп альт-азимутальный САО РАН и выполнили работу по обработке наблюдательных данных в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

Список литературы

- Boyle W S, Smith G E *Bell Syst. Tech. J.* **49** 587 (1970)
- Smith B A, in *Proc. of the JPL Conf. on Charge-Coupled Device Technology and Applications, Nov. 30–Dec. 2, 1976, Washington, DC* (Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, 1976) p. 135
- Young P J et al. *Astrophys. J.* **221** 721 (1978)
- Pritchett C *Astrophys. J.* **231** 354 (1979)
- Oke J B *Proc. SPIE* **290** 45 (1981)
- Goad L E, Ball W F *Proc. SPIE* **290** 130 (1981)
- Perryman M A C et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **201** 957 (1982)
- Janesick J R et al. *Opt. Eng.* **26** 268692 (1987) <https://doi.org/10.1117/12.7974139>
- Bredthauer R A *Proc. SPIE* **1161** 61 (1989)
- Janesick J R et al. *Proc. SPIE* **1242** 223 (1990)
- Vu P, Onishi S, Potter R *Proc. SPIE* **5499** 250 (2004)
- Bredthauer R et al. *Proc. SPIE* **8453** 84531M (2012)
- Dorland B N, Foltz R, Waczynski A *Proc. SPIE* **5902** 59020E (2005)
- Kwiatkowski M et al. *Proc. SPIE* **7124** 71240F (2008)
- Marin-Franch A et al. *Proc. SPIE* **8450** 84503S (2012)
- Lesser M P, in *Proc. of the Conf. on Recent Developments in Scientific Optical Imaging* (Eds M B Denton, R E Fields, Q S Hanley) (London: Royal Society of Chemistry, 1996) p. 62
- Lesser M P, Iyer V *Proc. SPIE* **3355** 446 (1998)
- Lesser M P *Proc. SPIE* **5499** 131 (2004)
- Lesser M P, Vu P *Proc. SPIE* **4306** 196 (2001)
- Szentgyorgyi A H et al. *Bull. Am. Astron. Soc.* **37** 1339 (2005)
- Tufts J R et al. *Proc. SPIE* **7021** 70210A (2008)
- Bentz M C et al. *Astrophys. J.* **705** 199 (2009)
- Roth M M et al. *Proc. SPIE* **7742** 774209 (2010)
- Reiss R et al. *Proc. SPIE* **8446** 84462P (2012)
- Castillo-Dominguez E et al. *Proc. SPIE* **8446** 84465Y (2012)
- Holland S E et al., IEDM Technical Digest (1996) p. 911
- Groom D E et al. *Proc. SPIE* **3649** 80 (1999)
- Holland S E et al., in *Proc. of the 1997 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors, June 5–7, 1997 Bruges, Belgium*; <https://www.imagesensors.org/Past%20Workshops/1997%20Workshop/1997%20Papers/40%20Holland%20et%20al.pdf>
- Groom D E et al., in *Proc. of the 4th ESO Workshop, Optical Detectors for Astronomy, Germany, 13–16 September, 1999*
- Holland S E et al. *IEEE Trans. Electron Dev.* **50** 225 (2003)
- Bebek C J et al. *Proc. SPIE* **5499** 140 (2004)
- Bebek C J et al. *Proc. SPIE* **5167** 50 (2004)
- Kamata Y et al. *Proc. SPIE* **6276** 62761U (2006)
- Jorden P et al. *Proc. SPIE* **6276** 627604 (2006)
- Janesick J R *Scientific Charge-Coupled Devices* (Bellingham, WA: SPIE Press, 2001)
- Jerram P et al. *Proc. SPIE* **4306** 178 (2001)
- Mackay C, Basden A, Bridgeland M *Proc. SPIE* **5499** 203 (2004)
- Robbins M S, Hadwen B J *IEEE Trans. Electron Dev.* **50** 1227 (2003)
- Smith N et al. *Proc. SPIE* **5499** 162 (2004)
- Daigle O et al. *Proc. SPIE* **5499** 219 (2004)
- Daigle O, Carignan C, Blais-Ouellette S *Proc. SPIE* **6276** 62761F (2006)
- Wen Y et al. *Proc. SPIE* **6276** 62761H (2006)
- Ives D et al. *Proc. SPIE* **7021** 70210B (2008)
- Jorden P R et al. *Proc. SPIE* **9154** 91540M (2014)
- Gach J-L et al. *Proc. SPIE* **9154** 91540A (2014)
- Daigle O et al. *Proc. SPIE* **10709** 107090A (2018)
- Holtzman J A et al. *Publ. Astron. Soc. Pacific* **107** 156 (1995)
- Gunn J E et al. *Astron. J.* **116** 3040 (1998)
- York D G et al. *Astron. J.* **120** 1579 (2000)
- Gunn J E et al. *Astron. J.* **131** 2332 (2006)
- Iwert O et al. *Proc. SPIE* **6276** 62760A (2006)
- Caldwell D A et al. *Proc. SPIE* **7731** 773117 (2010)
- Koch D G et al. *Astrophys. J. Lett.* **713** L79 (2010)
- Cease H et al. *Proc. SPIE* **7014** 70146N (2008)
- Dark Energy Survey Collab., Abbott T et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **460** 1270 (2016)
- Brout D et al. *Astrophys. J.* **874** 150 (2019)
- Wang F et al. *Astrophys. J.* **839** 27 (2017)
- Tonry J L et al. *Proc. SPIE* **7021** 702105 (2008)
- Magnier E A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **251** 6 (2020)
- Robbins M S et al. *Proc. SPIE* **9908** 990811 (2016)
- Marin-Franch A et al. *Proc. SPIE* **12184** 121840M (2022)
- Angel R et al., in *Imaging the Universe in Three Dimensions* (Astron. Soc. of the Pacific Conf. Ser., Vol. 195, Eds W van Breugel, J Bland-Hawthorn) (San Francisco, CA: Astronomical Society of the Pacific, 2000) p. 81
- O'Connor P et al. *Proc. SPIE* **7021** 702106 (2008)
- Kahn S M et al. *Proc. SPIE* **7735** 77350J (2010)
- Doherty P E et al. *Proc. SPIE* **9154** 915418 (2014)
- Ivezić Ž et al. *Astrophys. J.* **873** 111 (2019)
- Hoffman A, Loose M, Suntharalingham V, in *Scientific Detectors for Astronomy 2005. Explorers of the Photon Odyssey* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 336, Eds J E Beletic, J W Beletic, P Amico) (Dordrecht: Springer, 2006) p. 377, https://doi.org/10.1007/1-4020-4330-9_42
- Bai Y et al. *Proc. SPIE* **4028** 174 (2000)

69. MacDougal M H et al., in *Scientific Detectors for Astronomy 2005. Explorers of the Photon Odyssey* (Astrophysics and Space Science Library, Vol. 336, Eds J E Beletic, J W Beletic, P Amico) (Dordrecht: Springer, 2006) p. 403, https://doi.org/10.1007/1-4020-4330-9_43
70. Simms L M et al. *Proc. SPIE* **6690** 66900H (2007)
71. Bai Y et al. *Proc. SPIE* **7021** 702102 (2008)
72. Bai Y et al. *Proc. SPIE* **8453** 84530M (2012)
73. Downing M et al. *Proc. SPIE* **9154** 91540Q (2014)
74. Lehner M J et al. *Proc. SPIE* **8444** 84440D (2012)
75. Wang S et al. *Proc. SPIE* **12184** 121840S (2022)
76. Shen C, Ma C, Gao W *Sensors* **22** 9991 (2022)
77. Melle M T, McCarthy E *Proc. SPIE* **11716** 117162F (2021)
78. Markelov S V et al. *Astron. Astrophys. Trans.* **19** 579 (2000)
79. Мурзин В А и др. *Успехи прикладной физики* **4** 500 (2016)
80. Ardilanov V I et al., in *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proc. of the All-Russian Conf., 21–25 September, 2020, Nizhny Arkhyz, Russia* (Eds I I Romanyuk et al.) (Nizhny Arkhyz: Special Astrophysical Observatory of the RAS, 2020) p. 115, https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_115
81. Ardilanov V I et al., in *Astronomy at the Epoch of Multimessenger Studies, Proc. of the VAK-2021 Conf., 23–28 August, 2021, Moscow* (Eds A M Cherepashchuk et al.) (Moscow: Yanus-K, 2022) p. 52, <https://doi.org/10.51194/VAK2021.2022.1.1.008>
82. Afanasieva I et al. *Photonics* **10** 774 (2023)
83. Howell S B *Handbook of CCD Astronomy* 2nd ed. (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006)
84. Афанасьев В Л, Моисеев А В *Письма в Астрономический журн.* **31** 214 (2005); Afanasiev V L, Moiseev A V *Astron. Lett.* **31** 194 (2005)
85. Комаров В В и др. *Астрофиз. бюлл.* **75** 547 (2020); Komarov V V et al. *Astrophys. Bull.* **75** 486 (2020)
86. Панчук В Е и др. *Изв. вузов. Приборостроение* **59** 1018 (2016)
87. Afanasiev V L, Moiseev A V *Baltic Astron.* **20** 363 (2011)
88. Xiang-Qun C et al. *Res. Astron. Astrophys.* **12** 1197 (2012)
89. Zou S, Wang G *Proc. SPIE* **6269** 626922 (2006)
90. Valyavin G et al. *Photonics* **9** 950 (2022)
91. Ардиланов В И и др., в сб. *Системный синтез и прикладная синергетика. X Всероссийская научная конф., 28 сентября–02 октября 2021 г., Нижний Архыз. Сборник научных трудов* (Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2021)
92. Афанасьева И В *Астрофиз. бюлл.* **70** 244 (2015); Afanasieva I V *Astrophys. Bull.* **70** 232 (2015)

Large-format imaging systems based on solid-state detectors in optical astronomy

V.V. Vlasjuk^(a), I.V. Afanas'eva^(b), V.I. Ardilanov^(c), V.A. Murzin^(d), N.G. Ivashchenko^(e), M.A. Pritychenko^(f), S.N. Dodonov^(g)
Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences,
 369167 Nizhny Arkhyz, Zelenchukskiy region, Karachai-Cherkessian Republic, Russian Federation
 E-mail: ^(a) vvlassao@gmail.com, ^(b) riv615@gmail.com, ^(c) valery@sao.ru,
^(d) vamur@sao.ru, ^(e) ivanick@sao.ru, ^(f) pma@sao.ru, ^(g) dodo@sao.ru

The development of technologies for creating various types of solid-state detectors for optical astronomy is reviewed. The principles of designing astronomical photodetector systems with large-format sensors based on charge-coupled device (CCD) and complementary metal oxide semiconductor (CMOS) structures are analyzed. Examples of the most advanced projects in which they have been applied are given. The history of the creation of optical detectors for telescopes operated in Russia is described, and a brief description and characteristics of the systems developed are presented. The results of testing in real research are displayed. The prospects for creating large-format systems based on CCD and CMOS detectors manufactured in Russia and abroad are discussed.

Keywords: instruments, photodetectors, imaging systems, CCDs, CMOSs, controllers, data acquisition

PACS numbers: 07.50.Qx, 42.79.Pw, **95.55**. – n

Bibliography — 92 references

Received 21 April 2023

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **194** (4) 432–445 (2024)

Physics – Uspekhi **67** (4) (2024)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.04.039575>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2023.04.039575>