

УДК 520.2; 520.66

ШИРОКОФОРМАТНАЯ КАМЕРА «НЕВА9090» НА БАЗЕ КМОП GPIXEL 9 К×9 К ДЛЯ ОБЗОРНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

© 2022 А. С. Шугаров^{1*}, Е. Л. Бирюков², Д. А. Руппель², В. Е. Шмагин¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

²ООО «Научно-производственная компания «Фотоника», Санкт-Петербург, 192249 Россия

Поступила в редакцию 18 мая 2022 года; после доработки 29 августа 2022 года; принята к публикации 1 сентября 2022 года

Дано описание нового широкоформатного КМОП компании GPIXEL 9 К×9 К и сравнение с зарубежными ПЗС-чипами аналогичного размера. Представлены параметры перспективного широкоформатного фотоприемного устройства компании «НПК Фотоника» «НЕВА9090» на базе данного КМОП. Камера может быть использована в качестве детектора для современных высокопроизводительных широкоугольных телескопов. Представлены параметры телескопа с апертурой 1 м и светосилой $F : 1.3$ при работе с новой камерой «НЕВА9090».

Ключевые слова: *телескопы: обзорные — инструменты: детекторы*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире вводится в эксплуатацию все больше широкоугольных телескопов, однако задача ежедневного обзора всей доступной небесной сферы с прониканием глубже 20^m пока не решена из-за отсутствия достаточного количества телескопов с апертурой около 1 м, работающих в единой сети.

Для создания подобной сети широкоугольных телескопов метрового класса необходимо внедрять новые технологии для достижения более высокой производительности единичного узла, то есть увеличивать поле зрения и скорость обзора. С другой стороны, необходимо поддерживать сложность и стоимость одного узла в разумных пределах.

Один из путей увеличения соотношения производительность/цена единичного узла — применение новых цельных детекторов большой площади вместе с новыми оптическими схемами с апертурой около 1 м. Использование мозаики размером около 90 мм для метрового телескопа, состоящей, например, из четырех чипов, является более дорогим, и, видимо, неоправданным решением по сравнению с использованием новых цельных ПЗС или КМОП.

В настоящее время доступны два ПЗС указанного размера — CCD290-99 (Великобритания) и STA1600 (США).

В этом году были показаны первые КМОП китайской компании GPIXEL формата 9 К×9 К размером 90 мм. В НАОС (Пекин) ведутся работы

по проектированию охлаждаемых КМОП-камер как на одиночном чипе, так и в варианте мозаики из четырех КМОП для перспективного проекта SiTian — сети метровых телескопов системы Шмидт с полем зрения 5°×5°.

2. ДЕТЕКТОРЫ КЛАССА 9 К В СОСТАВЕ СОВРЕМЕННЫХ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

В последнее десятилетие появление одночиповых широкоформатных ПЗС класса 9 К позволило создать несколько телескопов класса 1 м с хорошим соотношением производительность/цена.

На рынке доступна ПЗС-камера 1110S фирмы Spectral Instruments (США), охлаждение сенсора осуществляется с помощью элементов Пельтье или криомашины. Эта ПЗС-камера в различных модификациях используется в качестве детектора на разных широкоугольных телескопах класса 0.5–1 м.

В качестве примера можно привести обзорный телескоп ATLAS¹ (Tonry et al. 2018). Телескоп системы Шмидта с апертурой 50 см спроектирован для работы с самой большой цельной ПЗС — STA 1600 размером 95 мм (рис. 1). Просветляющее покрытие на ПЗС нанесено в ITL (Imaging Technology Lab, Steward Observatory).

Основные параметры ПЗС-камеры 1110S CCD телескопа ATLAS:

¹Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System: <https://atlas.fallingstar.com/home.php>

*E-mail: shugarov@inasan.ru

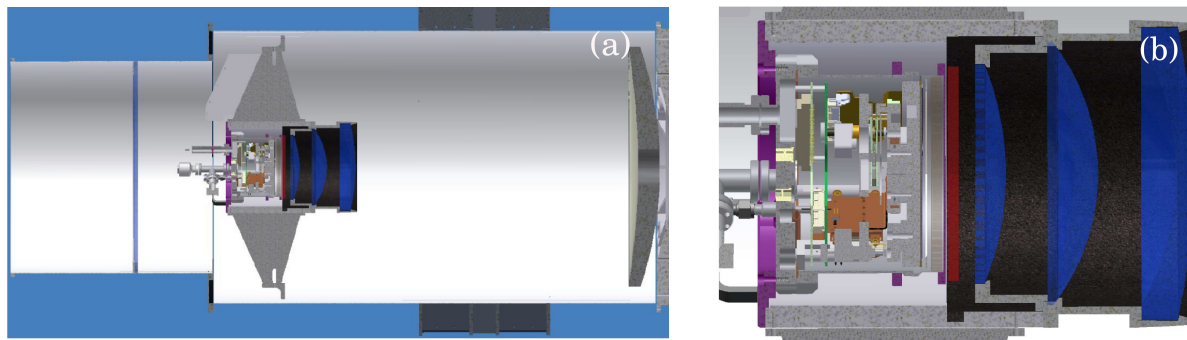


Рис. 1. 50-см телескоп проекта ATLAS (а) и его фокальный узел с ПЗС-камерой Spectral Instruments 1110S CCD (б).

- спектральный диапазон 300–1000 нм с пиковой квантовой эффективностью $QE=95\%$ на 550 нм;
- формат детектора $10\,560 \times 10\,560$ пикселей размером 9 мкм;
- шум считывания $11\,e^-$ СКО при частоте 1 МГц с использованием 16 выходов, время считывания 9 с;
- емкость ячейки $80\,000\,e^-$;
- наводки между каналами $2E-4-3E-5$;
- неплоскостность детектора 4.9 мкм СКО (18.36 мкм PV);
- темновой ток $0.8\,e^-c^{-1}$ при $-50^\circ C$.

Среди конструктивных особенностей ПЗС-камеры можно отметить:

- 1) два двухступенчатых элемента Пельтье с водяным охлаждением для минимизации тепловыделения внутри трубы телескопа;
- 2) три пикомотора (пьезоэлектрические) и линейные датчики Холла для тонких подвижек ПЗС;
- 3) рабочее давление 10^{-3} торр, контроль давления, ионный насос и газопоглотитель из цеолита;
- 4) окно камеры из кварца толщиной 10 мм, расстояние от окна до ПЗС 6 мм.

Электронный контроллер камеры расположен на расстоянии 0.5 м от фоточувствительной головки, видеосигнал от ПЗС преобразуется в дифференциальную форму для передачи в электронный контроллер. Габариты камеры составляют 200 мм в диаметре и 200 мм в длину, масса 7 кг.

В выбранной оптической схеме телескопа ATLAS в фокальном узле отсутствует место для электромеханического затвора. Для считывания

ПЗС на входе трубы телескопа размещен электромеханический затвор больших габаритов.

В качестве примера использования крупноформатного детектора с обратной засветкой CCD290-99 от Teledyne-e2v можно привести телескоп T80 (Oliveira et al. 2019). Основная цель проекта — высокоточная фотометрия в 12 полосах. T80 — это телескоп с апертурой 80 см с корректором в фокусе Кассегрена. Поле зрения составляет два квадратных градуса (диаметр $1^\circ 7'$, 110 мм), поле зрения на ПЗС составляет $1^\circ 4' \times 1^\circ 4'$, масштаб изображения 0.55 угл. сек. пиксель $^{-1}$.

Основные параметры ПЗС-камеры CCD1110 телескопа T80:

- спектральный диапазон 330–1000 нм;
- формат детектора 9232×9216 пикселей размером 10 мкм;
- считывание через 16 выходных усилителей, четыре скорости считывания, два коэффициента усиления, возможность бинирования 2×2 ;
- основной режим считывания: скорость 500 кГц, коэффициент усиления $0.95\,e^- ADU^{-1}$, шум считывания $3.43\,e^-$ СКО, время считывания 16.57 с;
- при скорости считывания 1 МГц шум составляет $5.27\,e^-$ СКО, время считывания 10.54 с.
- температура ПЗС $-100^\circ C$.

В телескопе T80 используется фокус Кассегрена, это позволило спроектировать габаритный фокальный узел с двумя колесами светофильтров (рис. 2). Охлаждение ПЗС с помощью криомашины, достаточно медленное считывание и мелкий масштаб позволили улучшить точность фотометрии широкоугольного телескопа. Обратная сторона выбранной концепции — недостаточная производительность для построения сети телескопов с целью обзора всего доступного неба каждые сутки.

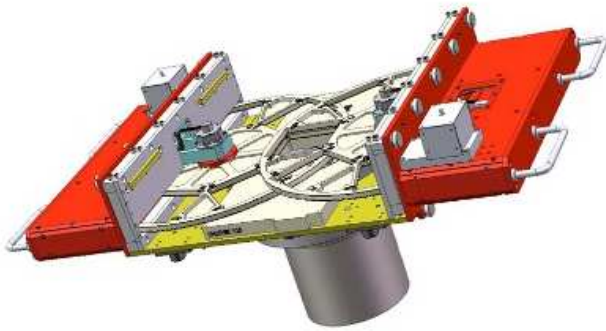


Рис. 2. Фокальный узел телескопа Т80 с ПЗС-камерой 1110S CCD на чипе CCD290-99.

В качестве примера использования КМОП размером около 90 мм можно упомянуть мозаичный детектор космического проекта ULTRASAT² (Asif et al. 2021). Оптимизированный для УФ-диапазона телескоп Шмидта с апертурой 33 см и полем зрения 200 будет оснащен КМОП-мозаикой из четырех чипов (рис. 3), разработанных и изготовленных компаниями Tower Semiconductor Ltd. (TJ) и Analog Value Ltd. (AV) в Израиле. Ключевой особенностью данного КМОП является высокая квантовая эффективность в ближнем УФ-диапазоне. КМОП-чип с обратной засветкой имеет специальное диэлектрическое покрытие high-K для улучшения внутреннего квантового выхода и второе просветляющее покрытие для уменьшения коэффициента отражения КМОП в УФ-диапазоне.

Основные технические характеристики КМОП-мозаики ULTRASAT:

- фоточувствительная область каждого КМОП 45.011 × 45.011 мм;
- общая фоточувствительная область мозаики 90 × 90 мм;
- формат одного КМОП-чипа 4738 × 4738 пикселей размером 9.5 мкм;
- шум считывания с высоким коэффициентом усиления 3.5 e⁻ СКО;
- время считывания не более 20 с;
- емкость ячейки при низком коэффициенте усиления 140 000 e⁻, при высоком — 16 000 e⁻;
- темновой ток 0.026 e⁻ с⁻¹ пиксель⁻¹ при -73°С;
- пиковый квантовый выход более 60% в диапазоне длин волн 220–280 нм;

²<https://www.weizmann.ac.il/ultrasat/project-&-technology/ultrasat-system-design/the-ultrasat-wide-field-uv-telescope>

- строковый затвор;
- разрядность встроенного АЦП 14 бит.

Из-за короткого фокусного расстояния телескопа КМОП-мозаика должна иметь неплоскостность на уровне 10 мкм, точность фокусировки телескопа 50 мкм. КМОП-чипы охлаждаются внешним радиатором с использованием тепловых труб, тепловой поток составляет 8 Вт.

У телескопа отсутствует электромеханический затвор, используется только электронный затвор КМОП-чипов.

Размер фокального узла составляет 135 × 135 × 120 мм, масса — 5.6 кг. Электронный контроллер КМОП-мозаики расположен снаружи трубы телескопа.

3. НОВЫЙ КРУПНОФОРМАТНЫЙ КМОП КОМПАНИИ GPIXEL 9 К × 9 К

Для применения в астрономических приборах требуются КМОП с улучшенными фотометрическими характеристиками, широким динамическим диапазоном и высокой чувствительностью.

Новый КМОП GPIXEL 9 К × 9 К — это первый сенсор научного уровня китайской компании GPIXEL размером 90 мм формата 9 К × 9 К, который может стать заменой CCD290-99. Новый сенсор позволит улучшить соотношение производительность/цена обзорных телескопов.

Разрядность встроенных в чип АЦП составляет 16 бит, что делает его конкурентоспособным наравне с классическими ПЗС-камерами, поскольку отпадает необходимость двойного считывания с двумя коэффициентами усиления, как это было на предыдущих КМОП серии GSENSE.

Основные технические характеристики КМОП GPIXEL 9 К × 9 К:

- фоточувствительная область 89.0 × 91.2 мм;
- формат 8900 × 9120 пикселей размером 10 мкм;
- шум считывания 5 e⁻ СКО;
- полная емкость ячейки 90 000 e⁻;
- разрядность встроенного АЦП 16 бит;
- темновой ток 0.02 e⁻ с⁻¹ пиксель⁻¹ при -70°С;
- пиковый квантовый выход 95% на 550 нм;
- строковый затвор;
- кадровая частота 0.34 кадра в секунду при использовании двух пар LVDS на частоте 250 МГц;
- потребляемая мощность 1 Вт при считывании полного кадра на максимальной скорости.

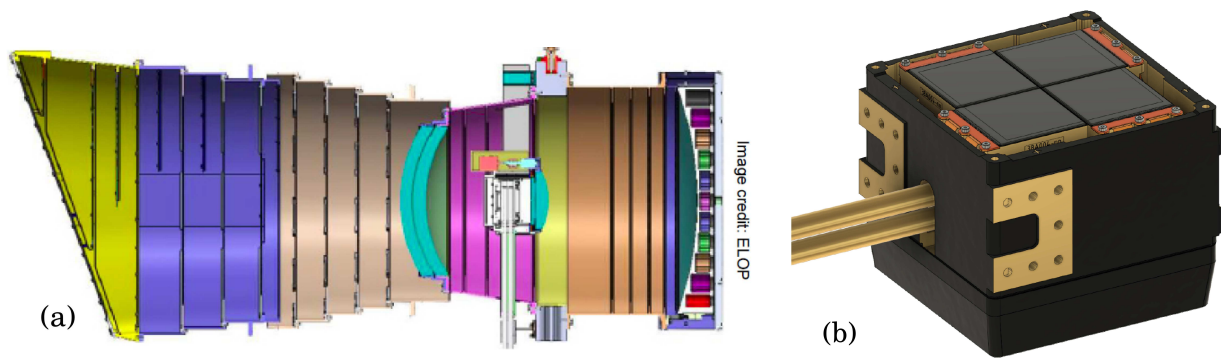


Рис. 3. Широкоугольный УФ-телескоп ULTRASAT (a) и КМОП-мозаика этого проекта размером 90×90 мм (b).

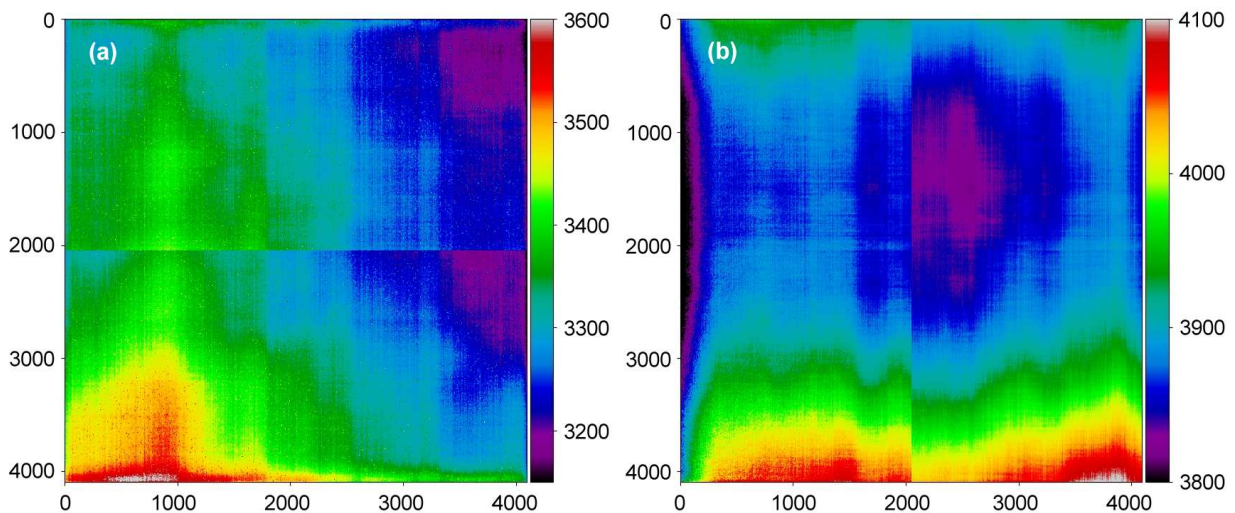


Рис. 4. Кадры темного тока камеры «НЕВА4040» фирмы «НПК Фотоника» с высоким (a) и низким (b) усилением при температуре чипа -25°C .

КМОП GPIXEL $9\text{K} \times 9\text{K}$ имеет прецизионный корпус из карбида кремния с тремя свободными сторонами для стыковки в мозаику, на четвертой стороне расположен гибкий шлейф; имеется встроенный датчик температуры.

Архитектура КМОП свободна от эффекта растекания заряда по пикселям при пересветке, в отличие от CCD290-99 и STA1600, которые не имеют антиблужинга. При использовании КМОП в составе широкоугольного телескопа наличие антиблужинга становится особенно актуальным по мере увеличения апертуры телескопа и его поля зрения.

Среди недостатков КМОП, от которых свободны ПЗС, следует отметить невозможность уменьшить темновой ток ниже определенного уровня даже при глубоком охлаждении, неравномерность характеристик пикселей, возможные наводки по строкам и столбцам от ярких объектов.

По предварительной информации, охлаждение КМОП GPIXEL $9\text{K} \times 9\text{K}$ ниже -70°C не

приводит к дальнейшему уменьшению темнового тока. Однако для наземного обзорного телескопа класса 1 м с масштабом изображения около 1 угл. сек. пиксель $^{-1}$ фон неба будет значительно превышает темновой ток КМОП.

Другой неотъемлемой проблемой КМОП-детекторов по сравнению с ПЗС является неоднородность параметров пикселей, которая сложно поддается калибровке.

В работе Karov et al. (2020) описан ряд особенностей КМОП, влияющих на фотометрическую точность. Например, для камеры Andor Magana на основе КМОП GSENSE400BSI обнаружена засветка с углов чипа.

При работе с КМОП фирмы GPIXEL компания ООО «НПК Фотоника» также столкнулась с рядом особенностей. На рис. 4 представлены кадры темнового тока КМОП GSENSE4040, полученные на камере «НЕВА4040» путем сложения 1000 кадров с экспозицией 30 с каждый при температуре чипа -25°C . На кадрах видна засветка в нижней

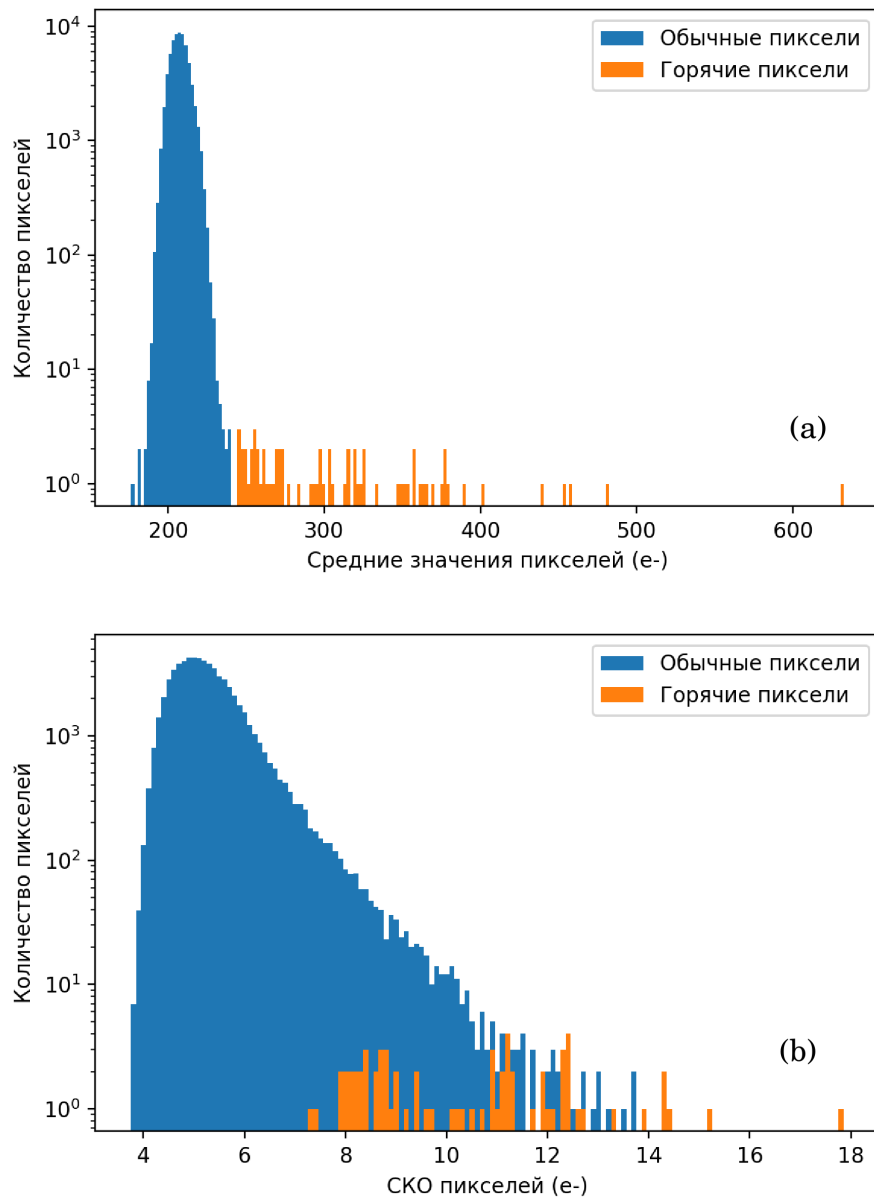


Рис. 5. Статистика по кадру темнового тока камеры «НЕВА4040».

части чипа, причем ее форма сильно зависит от коэффициента усиления при считывании (HiGain или LowGain). Помимо этого, видны небольшие скачки темнового тока вблизи середины кадра, их форма также зависит от выбранного коэффициента усиления.

Анализ случайной выборки из 65 536 пикселей по кадру темнового тока показывает, что по 4σ -критерию 0.1% пикселей являются горячими, распределение обычных и горячих пикселей приведено на рис. 5.

Эффект остаточного изображения от ярких объектов, описанный в работе Кагров et al. (2020),

вероятно, будет присутствовать на новом КМОП GPIXEL $9K \times 9K$, его величина будет измерена после появления первых образцов чипа.

Совокупность описанных выше факторов ограничивает фотометрическую точность КМОП-камер. Тем не менее для обзорных широкоугольных телескопов, основной целью которых является поиск новых объектов, фотометрические параметры нового КМОП с 16-разрядным АЦП будут находиться на достаточном уровне.

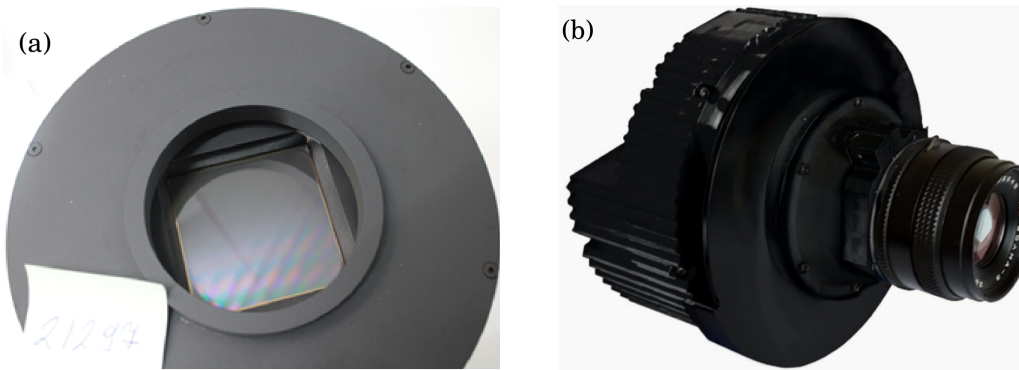


Рис. 6. КМОП-камера «НЕВА6060» фирмы «НПК Фотоника» с Пельтье-охлаждением с КМОП GSENSE6060.

4. АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОХЛАЖДАЕМАЯ КМОП-КАМЕРА «НЕВА9090»

Появление больших (размером 40–60 мм) относительно недорогих КМОП научного уровня и охлаждаемых КМОП-камер позволило начать их массовое внедрение на широкоугольных поисковых телескопах небольшой апертуры (20–65 см).

В 2019 г. компания «НПК Фотоника» представила камеру «НЕВА6060» на базе самого крупного на то время КМОП китайской компании GPIXEL GSENSE6060 (рис. 6). В камере были реализованы следующие технические решения:

- малозумящая электроника;
- герметичный объем для КМОП-чипа с элементом Пельтье;
- герметичный корпус камеры;
- высокоскоростной интерфейс передачи видеоданных;
- синхронизация по времени.

КМОП-камера с термоэлектрическим охлаждением на основе нового широкоформатного КМОП GPIXEL 9K × 9K может быть разработана на базе дизайна камеры «НЕВА6060» с внедрением новых технических решений:

- малогабаритное устройство для регулировки положения фоточувствительной поверхности КМОП;
- эффективный отвод тепла от регулируемого КМОП-чипа;
- частота кадров от 0.5 до 100 Гц (в оконном режиме);
- высокоскоростная обработка данных;
- оптический интерфейс передачи данных 10 Гбит;

- электромеханический затвор (опция).

Чтобы свести к минимуму рассеивание тепла в области фокального узла телескопа, для охлаждения КМОП будет использоваться термоэлектрический охладитель с вынесенным жидкостным воздушным теплообменником.

Новая камера «НЕВА9090» будет иметь механическую трехточечную систему регулировки для выравнивания фоточувствительной плоскости КМОП-сенсора относительно монтажного фланца камеры.

Проектные габариты камеры — 190 мм в диаметре и 200 мм в длину.

Планируемый срок разработки и производства камеры «НЕВА9090» составляет 2 года.

5. ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НОВОЙ КАМЕРЫ «НЕВА9090» НА СОВРЕМЕННОМ ШИРОКОУГОЛЬНОМ ТЕЛЕСКОПЕ С АПЕРТУРОЙ 1 М

В 2017 г. компания «ASA Astrosysteme» изготовила телескоп AZ1000WF с апертурой 1 м с корректором в главном фокусе, обеспечивающим линейное поле зрения 3° (130 мм). Телескоп был спроектирован для работы с ПЗС-камерой CCD1110 с ПЗС STA1600 формата 10 × 10 К, поле зрения детектора составляет 4 квадратных градуса. Для данного телескопа ООО «Астросиб» разработало блок сменных светофильтров с восемью фильтрами размером 120 мм.

В 2021 г. компания «ASA Astrosysteme» спроектировала и начала изготовление улучшенной версии телескопа EQ1000WF F1.3 (Shugarov 2021), который будет установлен в ЮАР в 2022 г.

Основные параметры EQ1000WF F1.3 при работе совместно с перспективной КМОП-камерой «НЕВА9090» на базе КМОП GPIXEL 9K × 9K следующие:

- апертура телескопа 1 м, оптическая схема с корректором в фокусе главного зеркала;
- спектральный диапазон 370–1000 нм;
- поле зрения телескопа (диаметр) $3^{\circ}84$ (87 мм);
- поле зрения на детекторе 11.6 кв. град.;
- масштаб изображения 1.59 угл. сек. пиксель⁻¹, размер пикселя 10 мкм;
- расчетное качество изображения при использовании асферической оптики (D_{80}) 8 мкм (менее 1 пикселя).

Благодаря новому усовершенствованному корректору с асферическими элементами и главному зеркалу, светосила была увеличена до $F : 1.3$. По сравнению с AZ1000WF поле зрения на детекторе 90 мм было увеличено почти в три раза до 11.6 квадратных градусов, при этом сохранилась общая концепция построения системы: телескоп с корректором в главном фокусе, возможность разместить телескоп в 6-м куполе, относительно простой фокальный узел с камерой на цельном чипе размером 90 мм и блоком светофильтров 120 мм.

Достаточно большой задний фокальный отрезок телескопа (65 мм) для столь светосильной системы позволяет разместить до шести фильтров и (при необходимости) электромеханический затвор. Блок светофильтров может наследовать архитектуру от телескопа AZ1000WF.

Телескоп использует хорошо зарекомендовавшую себя вилочную монтировку с прямым приводом от AZ1000WF, но в экваториальной конфигурации, что позволяет отказаться от деротатора поля.

Данный инструмент является примером реализации концепции создания телескопа метрового класса с детектором класса 9 К с достаточно большим полем зрения, не прибегая к использованию полноапертурных линзовых корректоров и мозаичных детекторов.

Высокая скорость монтировки (6° с^{-1}) в сочетании с быстрым считыванием КМОП (3 с) позволит минимизировать мертвое время между экспозициями на соседних площадках.

В обзорном поисковом режиме без использования светофильтров, при экспозиции на каждой площадке 30 с и временем между экспозициями для считывания КМОП и перенаведения телескопа 10 с производительность составит 10 000 квадратных градуса за ночь с проницанием не менее 20^m . Этого достаточно для решения следующих научных задач:

- 1) обнаружение декаметровых астероидов, приближающихся к Земле, на расстоянии нескольких миллионов километров, то есть за несколько дней до их до возможного столкновения с Землей;
- 2) обнаружение и отслеживание объектов мало-размерного околоземного космического мусора;
- 3) астрофизические задачи, в том числе поиск оптических компонентов различных событий, поиск сверхновых и т.д.

В режиме многоцветного обзора производительность телескопа снизится до нескольких тысяч квадратных градусов за ночь с проницанием до 20^m , что также представляет научный интерес.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До настоящего времени широкоугольные телескопы метрового класса оснащались широкоформатными ПЗС или ПЗС-мозаиками.

Анонсирование нового крупноформатного КМОП компании GPIXEL формата 9К × 9К со встроенным 16-разрядным АЦП позволит создать КМОП-камеру научного уровня для замены классических ПЗС-камер для широкоугольных телескопов. По сравнению с существующими ПЗС класса 9К новый КМОП GPIXEL 9К × 9К может сократить время считывания до 3 с и повысить чувствительность системы благодаря низкому шуму считывания ($5e^-$ СКО) по сравнению с классической ПЗС того же размера, обеспечивая при этом приемлемую фотометрическую точность и хороший динамический диапазон.

Приведенный в статье пример комбинации нового светосильного 1-м телескопа ASA EQ1000WF F1.3 и перспективной КМОП-камеры «НЕВА9090» с чипом GPIXEL 9К × 9К является одним из способов повышения соотношения производительность/цена единичного узла сети телескопов для проведения обзоров с проницанием более 20^m .

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-11013.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Asif, M. F. Barschke, B. Bastian-Querner, et al., SPIE Conf. Proc. **11821**, id. 118210 (2021).
2. S. Karpov, A. Bajat, A. Christov, et al., SPIE Conf. Proc. **11454**, id. 114540 (2020).
3. C. Mendes de Oliveira, T. Ribeiro, W. Schoenell, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **489**, 241 (2019).
4. A. S. Shugarov, INASAN Science Reports **6**, 55 (2021).
5. J. L. Tonry, L. Denneau, A. N. Heinze, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **130** (988), id. 064505 (2018).

Advanced 9 K×9 K GPIXEL-based “NEVA9090” Camera for Wide-Field Survey Telescopes

A. S. Shugarov¹, E. L. Biryukov², D. A. Ruppel², and V. E. Shmagin¹

¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

²NPK Fotonika, Saint Petersburg, 192249 Russia

We describe a new wide-field GPIXEL 9 K×9 K, CMOS and compare it with foreign-made chips of similar size. We report the parameters of the advanced “NEVA9090” wide-field detector based on this CMOS and manufactured by “NPK Fotonika”. The camera can be used as a detector for modern high-performance wide-field telescopes. We present the parameters of a telescope with an aperture of 1 m and a focal ratio of $F : 1.3$ when operated with the new “NEVA9090” camera.

Keywords: *telescopes: wide-field—instrumentation: detectors*