

Исследование EMCCD детектора v. 1.1 (current)

Б. Сафонов

18 июля 2013 г.

Данный документ представляет собой отчет об исследовании EMCCD детектора iXon+897 (модель DU-897E-CS0-#BV, серийный номер X-5947), предназначенного для установки в камере высокого разрешения. Исследование проводилось либо с темновыми кадрами, либо равномерно освещенными.

Документ разбит на две части. Первая посвящена измерению базовых параметров детектора, которые легко поддаются сравнению со спецификациями: коэффициент преобразования preAmp [e^-/ADU], шум считывания σ_R [e^-], коэффициент электронного усиления G . Во второй приведено исследование других, более специфических характеристик детектора: термогенерация, стабильность подложки, плоское поле, стабильность чувствительности, линейность, эффективность вертикального переноса, СИС-шум.

1 Основные параметры детектора

Коэффициент преобразования preAmp [e^-/ADU] был измерен методом аппроксимации прямой линией зависимости дисперсии сигнала от самого сигнала для разных его значений [1] (параметры оценивались в области, свободной от искажений, см. раздел о плоском поле), пример такой зависимости приведен на рис. 1. Наклон получающейся прямой, как известно, равен $1/\text{preAmp}$. preAmp мы измерили для нескольких режимов работы усилителей, результаты приведены в табл. 1. Измерения для EM-усилителя были выполнены при $G = 1$ (устанавливается $\text{EMGainMode}=0$, $\text{EMGain}=0$). Как видно, эти параметры находятся в полном соответствии со спецификациями.

Шум считывания был измерен по кадрам подложки (полученным в режимах, которые использовались в предыдущем параграфе), как дисперсия их разности, деленная на $\sqrt{2}$. Результаты также в табл. 1.

Таблица 1: Сравнение параметров детектора, приведенных в [2], и измеренных нами.

усилитель	предусиление	коэф. преобразования, [e^-/ADU]		шум считывания, [e^-]	
		измеренный	приведенный в [2]	измеренный	приведенный в [2]
conv, 3MHz	0	10.1 ± 0.7	10.05		
	1	3.85 ± 0.08	3.97	11.1 ± 0.2	10.56
	2	1.72 ± 0.04	1.75		
EM, 10MHz	0	61 ± 2	61	95.7	93.33
	1	25.3 ± 1.6	25.14	58.5	58.58
	2	11.38 ± 0.2	11.57	51.2	49.5

Коэффициент электронного усиления был измерен для режима EM-усилитель, 10MHz, $\text{preAmp}=2$. Сначала был измерен сигнал при некотором малом уровне освещенности и $G=1$. Затем мы устанавливали разные коэффициенты электронного усиления (в режиме RealGain) и смотрели, как изменяется сигнал. К сожалению, динамического диапазона детектора хватает только до $G=100$. Более высокие значения усиления были измерены относительно уровня сигнала при $G=100$ при меньшей освещенности. Результаты измерений приведены в таблице 2. Как видно, измеренные усиления G отличаются от

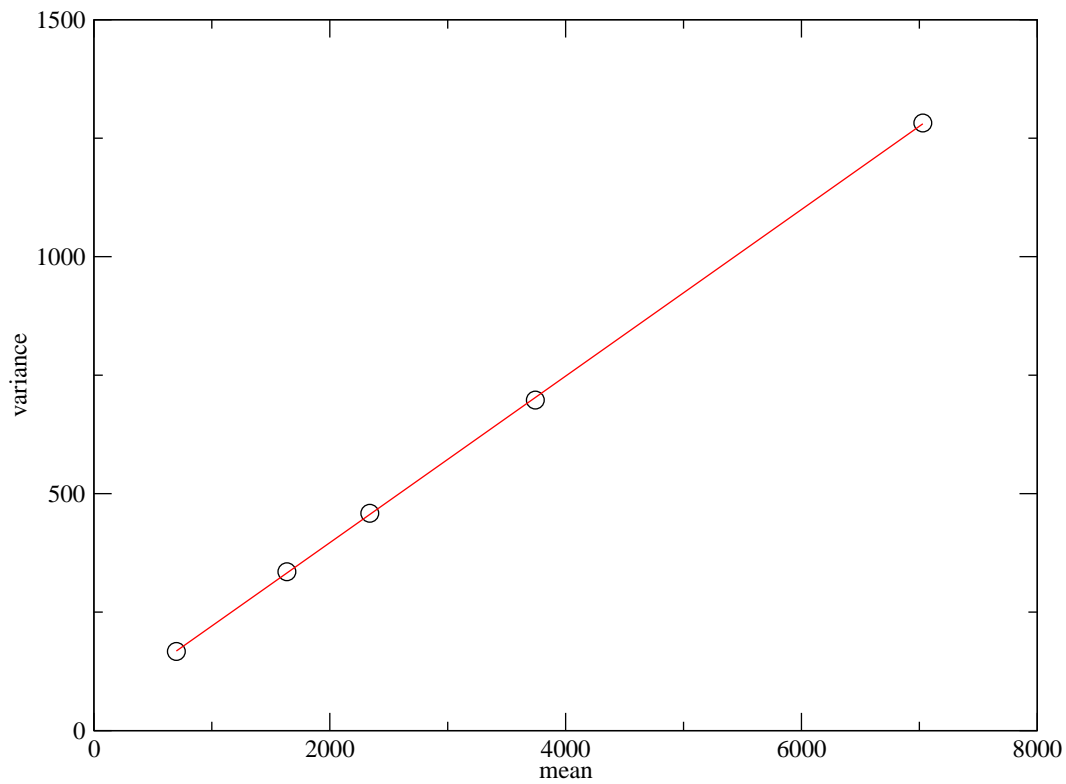


Рис. 1: Зависимость дисперсии разности отсчетов двух кадров от среднего отсчета в этих же кадрах для разных уровней освещенности (кружки). Прямая — линейная аппроксимация

Таблица 2: Сравнение коэффициента электронного усиления, устанавливаемого программно и измеренного.

уст.	6	10	15	20	30	50	75	100	150	200	300	500	750	950
изм.	5.7	9.7	14.5	19.4	29.0	48.4	72.3	96.0	148.0	199.0	302	516	789	1004

устанавливаемых на 2-5%, причем при малых значениях отклонение в меньшую сторону, а при больших наоборот.

Также упомянем некоторые особенности электронного усиления. Усиление уменьшается с температурой. Якобы электроника детектора это учитывает и поднимает напряжение на регистре усиления (технология RealGain), но это не было проверено, т.к. мы все равно будем работать всегда при -80°C . При очень высоких температурах — порядка -20°C — компенсация за температуру перестает работать и камера начинает выдавать отсчет ровно 100 по всему кадру.

2 Более специфические параметры детектора

Термогенерация Для оценки темпа термогенерации и его зависимости от температуры мы получили несколько темновых кадров и кадров подложки при следующих температурах: 1.229°C , -4.612°C , -9.155°C , -14.347°C . Мы исправили эти кадры за подложку, а также перевели отсчеты в единицы фотоэлектронов/сек. Для самой высокой температуры мы проделали это для двух экспозиций: 10с и 20с. На рисунке 2, левый приведена гистограмма получившихся потоков для обоих экспозиций. Сразу бросается в глаза то, что гистограммы мультимодальны, а также то, что они имеют значительное число т.н. горячих пикселей, в ярчайших из которых которых термогенерация достигает 300 событий/сек. Также видно, что гистограммы, соответствующие разным экспозициям, почти совпадают, что согласуется с тем, что сигнал линейно растет при накоплении. Чтобы убедиться в этом, мы построили распределение попиксельного отношения потоков, измеренных при разных экспозициях. Как видно, у этого распределения отсутствуют “хвосты”, значит, все горячие пиксели имеют “термогенерационную” природу.

Чтобы выяснить, как темп термогенерации меняется с температурой, мы построили гистограммы

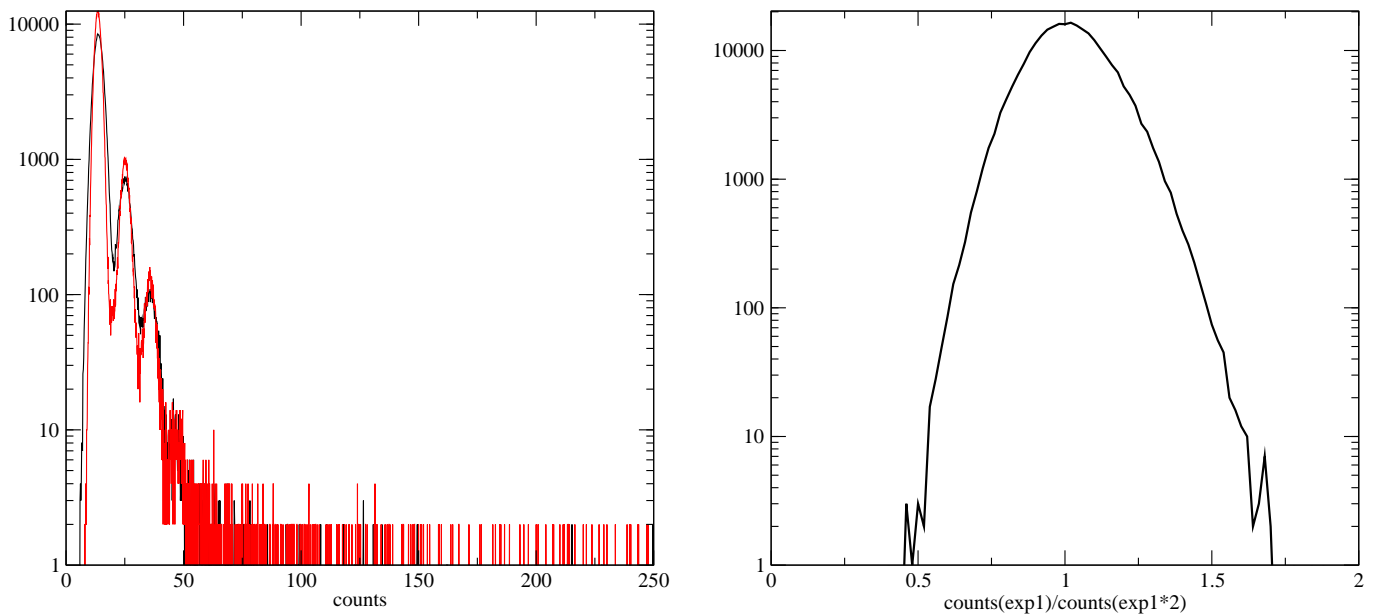


Рис. 2: Слева: распределения темпа термогенерации электрон/сек при температуре 1.229°C, измеренные при экспозициях 10с (черная кривая) и 20с (красная кривая). Справа: распределение попиксельного

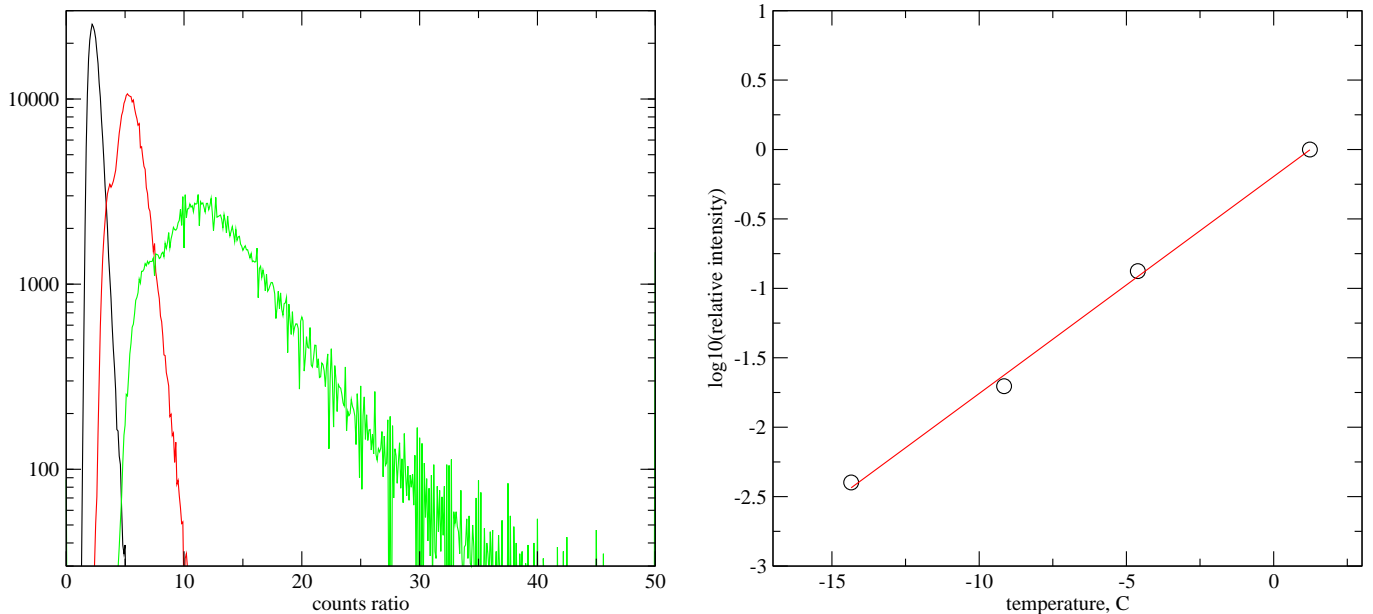


Рис. 3: Слева: гистограммы попиксельного отношения темпа термогенерации при температуре 1.229°C к темпам термогенерации при температурах -4.612°C (черная кривая), -9.155°C (красная кривая), -14.347°C (зеленая кривая). Справа: отношение темпов термогенерации для температур -14.347, -9.155 и -4.612 °C к темпу термогенерации при температуре 1.229°C в зависимости от температуры. Красная линия — аппроксимация $10^{0.156T}$.

попиксельного отношения темпа термогенерации при температуре 1.229°C к темпам термогенерации при температурах -4.612°C, -9.155°C, -14.347°C, см. рис. 3. По этим распределениям оценим, во сколько примерно раз падает термогенерация при температурах -4.612°C, -9.155°C, -14.347°C по сравнению с 1.229°C: 2.4, 5.5, 11.0, соответственно. Эти значения хорошо аппроксимируются степенной зависимостью: $10^{0.156T}$ (см. рис. 3, правый). Итак, термогенерация падает в 10 раз на каждые 6.4 градуса. Падение между 0°C и рабочей температурой -80°C составляет 3×10^{12} . Вспомнив, что ярчайшие из

горячих пикселей дают 300 событий/сек при 0°C, можно сказать, что при рабочей температуре мы сможем себе позволить экспозиции не более 300 лет, иначе придется учитывать влияние термогенерации.

Стабильность подложки Для определения стабильности подложки мы использовали две серии по 50 кадров подложки, полученных при следующих обстоятельствах: EM-усилитель, 10MHz, preamp=2, EMGain отключен. Между сериями прошло примерно полчаса в течении которых многократно изменялись режимы работы камеры, однако температура не менялась. На рис. 4 показана разность попиксельных медиан этих серий. Как видно, флуктуации подложки во времени составляют ± 5 отсчетов, т.е. они примерно равны шуму считывания, а значит, в EM-режиме не будут играть никакой роли.

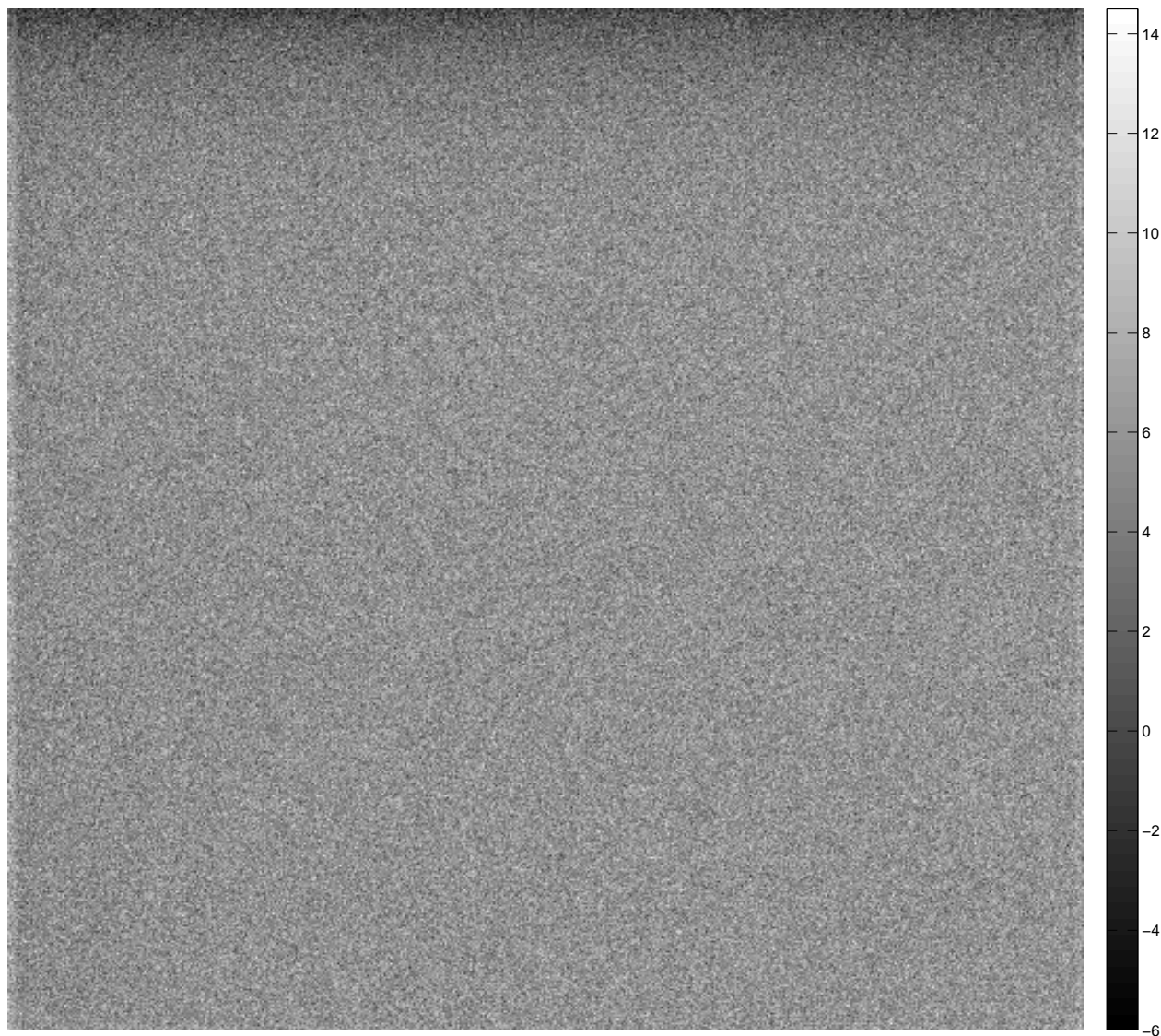


Рис. 4: Разность попиксельных медиан двух серий подложек, полученных в одинаковых режимах и при одинаковой температуре, с промежутков времени около 30 мин (см. текст).

Также мы исследовали стабильность подложки внутри длинной серии. Некоторые детекторы того же типа, что и используемый нами, показывают существенное отличие первых кадров серии от всех последующих. Чтобы проверить наличие этого эффекта для нашего детектора мы получили серию длиной 200 кадров и вычислили среднее во всей серии. Затем мы разделили первый кадр подложки и среднее из пяти первых кадров на полное среднее. Результат представлен на рис. 5.

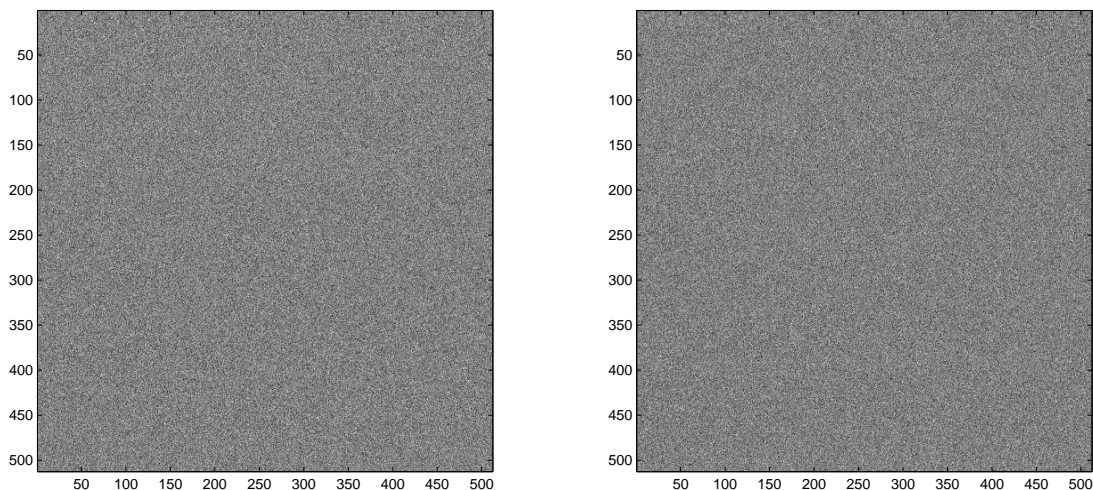


Рис. 5: Отношение первого кадра подложки (слева) и среднего по 5 первым кадрам (справа) к полному среднему серии длиной 200 кадров.

Плоское поле Плоские поля, полученные при освещении синим, зеленым и красным цветом приведены на рисунках 11, 12 и 13, соответственно (в конце отчета). Можно выделить следующие детали:

- Поярчание в центре скорее всего вызвано бликом внутри установки.
- Темные пятна относительно большого диаметра — грязь/пыль на покровном стекле
- Темные точки — пиксели с пониженной чувствительностью (на 5-30%). Заметим, что пиксели с нулевой чувствительностью на детекторе отсутствуют.
- Полосатая структура — погрешности полировки кристалла. Её амплитуда в синих лучах порядка 2-3%, в зеленых и красных — значительно меньше.

Стабильность чувствительности В литературе встречаются свидетельства [3] о том, что у EMCCD детекторов произведение коэффициента преобразования на электронное усиление может меняться при интенсивном считывании, что объясняется разогревом электроники. Конкретнее, авторы статьи [3] наблюдали рост отсчетов и выход на некоторое насыщение в течении ≈ 10 сек после начала считывания. При этом общая амплитуда изменения отсчетов была значительная — 10%.

Чтобы проверить, подвержен ли рассматриваемый детектор такому эффекту, мы получили серию из 700 полных кадров при следующих обстоятельствах: EM-усилитель, 10 MHz, preamp=2, EMGain=60, T=-60°C, экспозиция 29мс, режим полнокадрового переноса, уровень освещения был установлен, так, чтобы отсчет был ≈ 4300 . При этом частота кадров составила 35 кадров в секунду. Заметим, что никаких проблем, связанных со считыванием или записью, в процессе исследования не возникло, несмотря на большой объем генерируемого файла — 350 Мб.

На рисунке 6 приведена зависимость среднего по кадру отсчета от номера кадра. Как видно, ширина шумовой дорожки полностью согласуется с уровнем фотонного шума. Также виден небольшой тренд в самом начале, суммарная амплитуда которого в пределах 0.1%, что вполне приемлемо для наших целей.

Нелинейность У EMCCD детектора ожидается 3 типа нелинейности. Первая связана с конечностью диапазона АЦП. Вторая — с конечностью глубины потенциальной ямы пикселей рабочей области детектора. И, наконец, третья — с конечностью глубины потенциальной ямы регистра усиления. Все эти нелинейности можно наблюдать по отдельности, устанавливая подходящие режимы работы детектора.

Однако третий тип нелинейности скорее всего нас не будет волновать. Действительно, ожидаемая глубина потенциальной ямы регистра усиления 800000 электронов, а пикселей рабочей области —

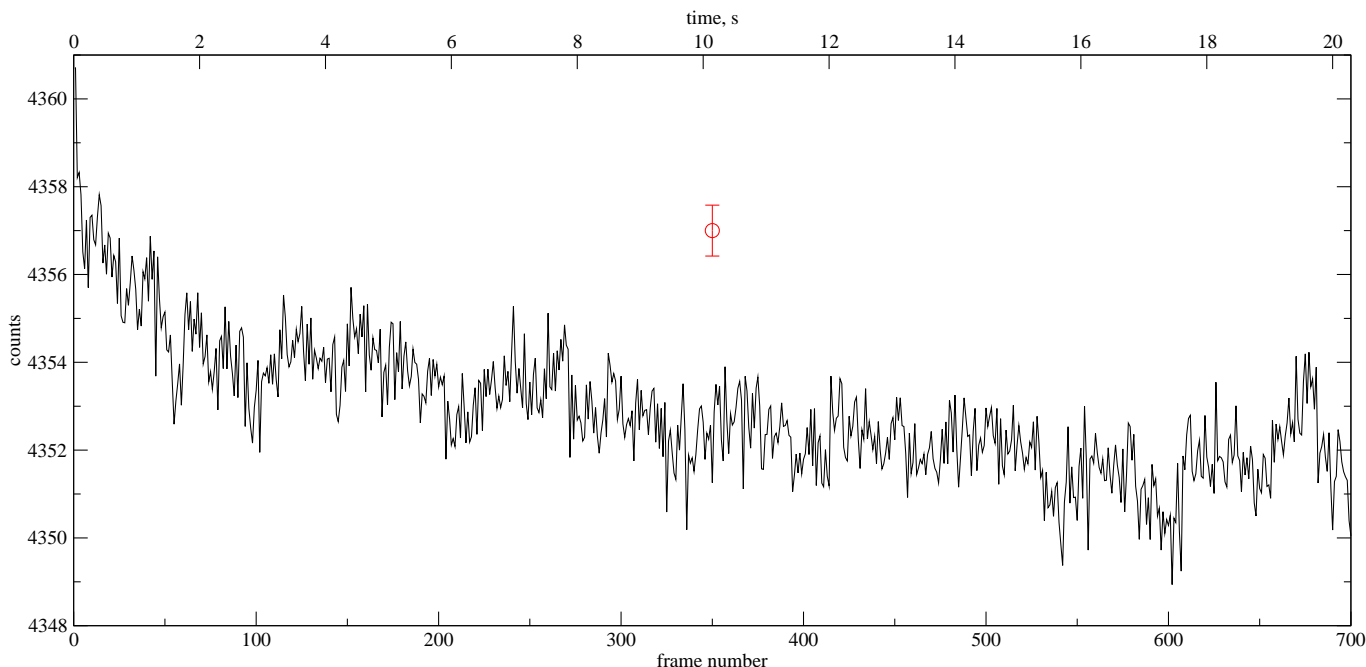


Рис. 6: Зависимость среднего по кадру отсчета от номера кадра в непрерывной серии. Сверху также отмечено время от начала измерений. Красный интервал ошибок соответствует удвоенной дисперсии ожидаемого фотонного шума при таких отсчетах.

160000 электрон [4]. Таким образом, чтобы этот тип нелинейности проявился, мы должны использовать усиление $G > 5$ при очень больших потоках, что нецелесообразно (при таких потоках становится выгоднее использовать conv.-усилитель, т.к. он не увеличивает фотонный шум, который доминирует в этой области). Итак, рассмотрим первые два типа нелинейности.

Нелинейность конечности диапазона АЦП будем изучать в режиме: conv.-усилитель, 3MHz, preamp=2. В этом случае ожидаемый предел диапазона АЦП 16384 будет соответствовать 29000 фотоэлектронам, что довольно далеко от насыщения пикселей рабочей области детектора (163000 по спецификации). Мы получили несколько световых кадров при одинаковой освещенности, варьируя при этом экспозицию. Эти кадры были исправлены за подложку и для них был оценен сигнал в области, свободной от искажений, см. раздел о плоском поле. Результаты приведены на рис. 7, левый верхний. Как видно, выход на насыщение происходит очень резко, само насыщение наступает несколько раньше, чем ожидается — при 16010 отсчетах (исходя из 14-битности АЦП и уровня подложки, ожидается ≈ 16280). Относительная нелинейность при меньших отсчетах (рис. 7, левый нижний) не превосходит 0.5%, что находится глубоко под фотонным шумом (дисперсия которого отмечена прерывистой линией).

Нелинейность, связанную с конечностью глубины потенциальной ямы пикселей рабочей области, будем исследовать в режиме EM-усилитель, 10MHz, preamp=1, EMGain отключен. Этот режим удобен в данном случае, т.к. соответствующий коэффициент преобразования довольно велик — 25.1 электрон/ADU. Далее были проведены измерения и анализ, полностью аналогичные тем, что описаны в предыдущем абзаце. Результаты приведены на рис. 7, правый. Как видно, измеренная глубина ямы оказалась 210000 e^- , в отличие от указанной в спецификации 163000. Существенная нелинейность начинает проявляться только при заряде 200000 электронов, до этого она не превосходит 0.5%, что также находится под фотонным шумом.

Итак, можно сделать вывод, что данный детектор линеен в интересующих нас режимах.

СIS-шум Для оценки SIS-шума мы получили 50 кадров подложки при следующих параметрах: EM-усилитель, 10MHz, preAmp=2, EMGain=1000. Затем мы вычислили 25 попарных разностей этих кадров и построили их общую гистограмму отсчетов, см. рис. 8. Из рисунка видно, что на кадрах представлено большое количество событий, явно превосходящих уровень шума считывания. Эти события и есть SIS-шум, неотличимый от реальных одиночных фотонов.

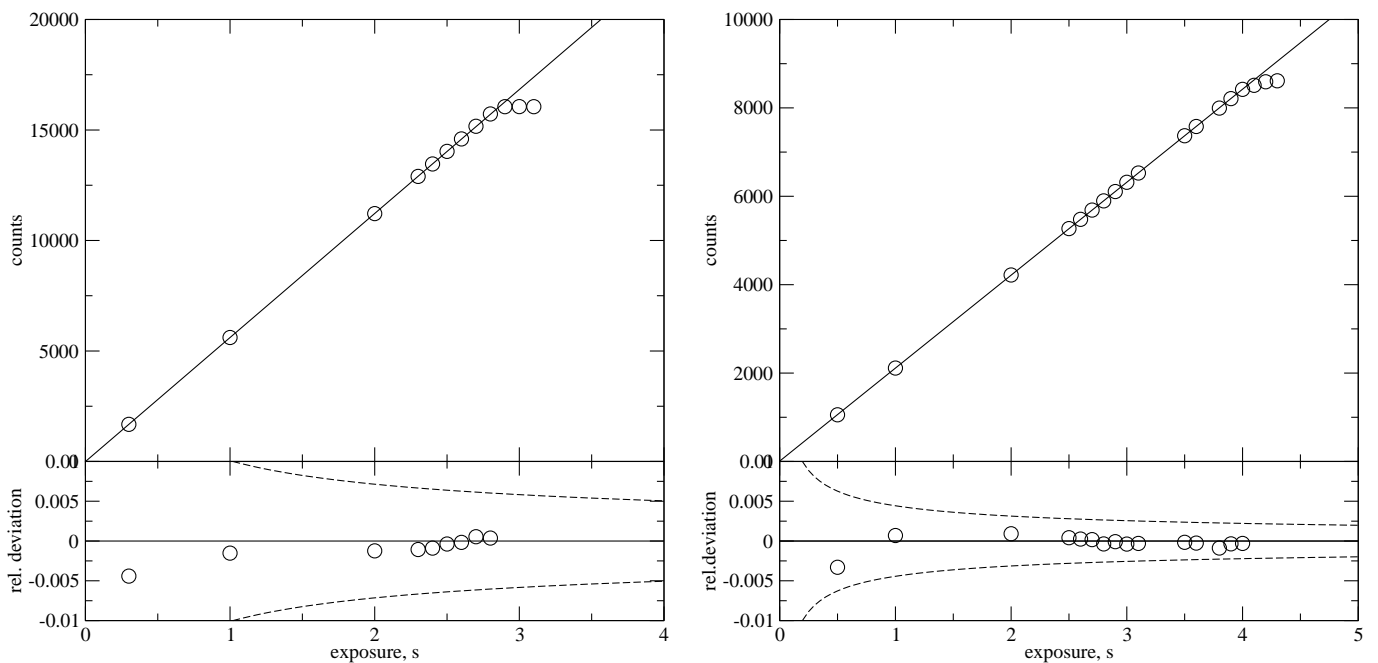


Рис. 7: Слева: нелинейность при приближении к границе диапазона оцифровки АЦП. Справа: при приближении к насыщению пикселей в области накопления изображения. Вверху — абсолютные отсчеты, внизу — их относительное отклонение от линейной зависимости. Прерывистыми линиями обозначено среднеквадратическое отклонение потока в одном пикселе, вызванного фотонным шумом.

Итак, мы аппроксимировали центральную часть этой гистограммы распределением Гаусса. Все отсчеты, отклоняющиеся от нуля более чем на 5σ , где σ — дисперсия этого Гаусса, будем считать СИС-шумом. Отметим, что в этом случае мы не учитываем ту часть СИС-шума, которая меньше шума считывания, однако т.к. она не отличима от него, то и не интересует нас. Итак, в данном случае СИС-шум составил 1700 событий/кадр или 4.2×10^{-3} событий/пиксел.

Также некоторый интерес представляет вопрос, есть ли на матрице горячие пиксели в смысле СИС-шума. Для ответа на него мы вычислили попиксельную медиану для 50 кадров подложки и построили ее гистограмму, см. рис. 9. Как видно, у распределения отсутствуют хвосты, а значит горячих пикселей нет (на самом деле, строго говоря, нет пикселей, которые дают СИС-событие чаще, чем в половине случаев).

Эффективность вертикального переноса В руководстве по эксплуатации детектора [4] сказано, что для минимизации СИС-шума нужно увеличивать скорость вертикального переноса. Однако большая скорость вертикального переноса может приводить к снижению его эффективности, что компенсируется увеличением напряжения тактирования, что в свою очередь увеличивает СИС-шум. Т.ч. здесь нужно искать некоторый компромисс.

Но сначала определим, при каких параметрах вертикального переноса он становится неэффективен. Для этого мы получили несколько световых кадров при следующих обстоятельствах: EM, 10MHz, preAmp=2, exp=1 с, EMGain=50 и различных скоростях и напряжениях вертикального переноса (электроника детектора позволяет устанавливать скорости переноса 0.3, 0.5, 0.7, 1.5, 3.5 мкс и напряжения условно обозначаемые 0,+1,+2,+3,+4). На рис. 10 приведены некоторые из полученных кадров (кадры, полученные при других параметрах демонстрируют нормальный перенос). Как видно, перенос становится неэффективен при скорости сдвига 0.3 мкс и напряжениях 0,+1,+2. Таким образом, для работы мы должны выбрать другие параметры, причем те, которым соответствует наименьший уровень СИС-шума.

СИС-шум уменьшается при увеличении скорости переноса и уменьшении напряжения тактирования. Поэтому очевидно, что стоит выбор между парами (скорость 0.5 мкс, напряжение 0) и (скорость 0.3 мкс, напряжение +3). Мы получили темновые кадры для этих параметров и просуммировали число шумовых СИС-электронов возвышающихся над шумом считывания (см. предыдущий параграф): по-

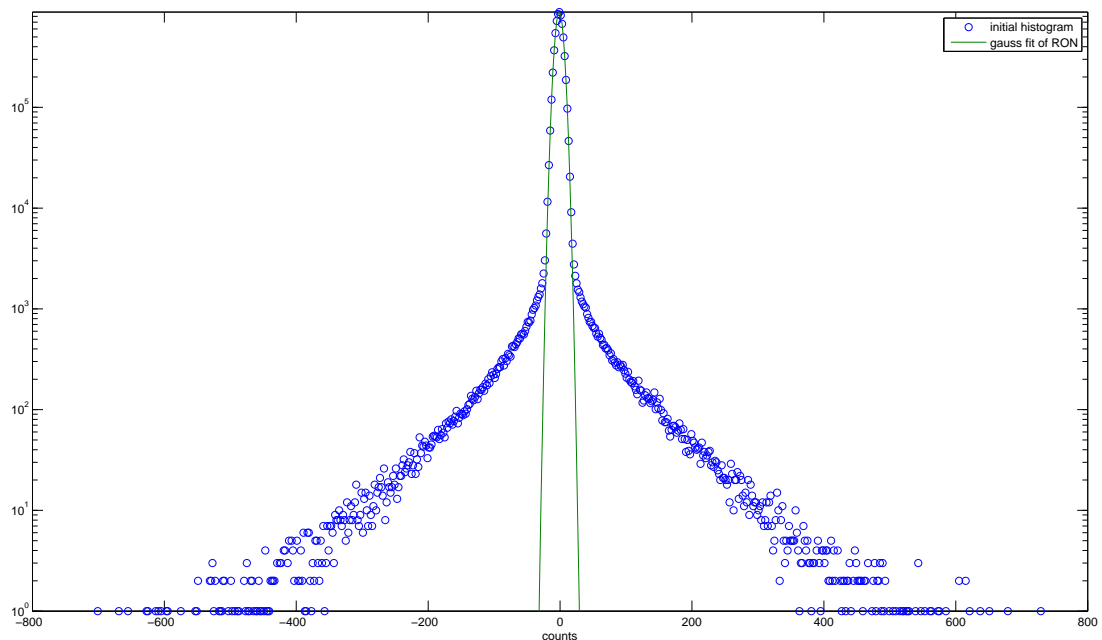


Рис. 8: Синие точки — гистограмма разностей отсчетов 25 пар кадров подложки, полученных при следующих параметрах: EM, 10MHz, preAmp=2, EMGain=1000. Зеленая кривая — аппроксимация Гауссом центральной части гистограммы, соответствующей шуму считывания.

лучилось 1710 электрон для пары параметров (скорость 0.5 мкс, напряжение 0) и 2860 для (скорость 0.3 мкс, напряжение +3). Итак, в качестве параметров вертикального переноса выбираем скорость 0.5 мкс, напряжение 0.

3 Заключение

Итак, можно сделать вывод, что рассмотренный детектор в основном соответствует спецификациям [2]. На данный момент не обнаружено причин, по которым он не может быть применен в астрономических наблюдениях.

Примерный список дальнейших исследований:

1. Нелинейность при наблюдении яркого точечного источника (требуется точечный источник).
2. Эффективность переноса при наблюдении яркого точечного источника (требуется точечный источник).
3. Спектральная характеристика (требуется спектрофотометр), в том числе в смысле квантовой эффективности.
4. Работоспособность при температурах ниже нуля.
5. Дрейф подложки, говорят, играет роль. Необходимо проверить возможность его отслеживания по закадровой области.

Список литературы

- [1] Howell, S. B., [*Handbook of CCD Astronomy*] (Apr. 2000).

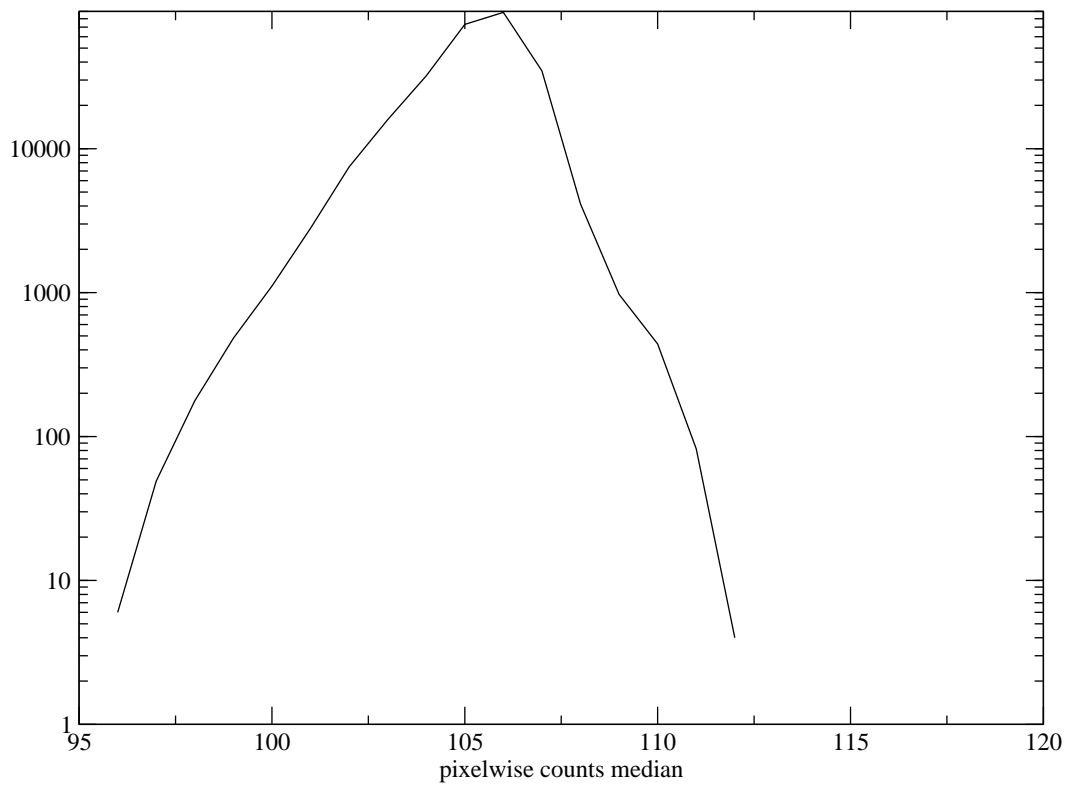


Рис. 9: Гистограмма попиксельных медиан отсчетов 50 кадров подложки.

- [2] Andor, “Andor iXon+897 X-5947 Performance sheet,”
- [3] Maksimov, A. F., Balega, Y. Y., Dyachenko, V. V., Malogolovets, E. V., Rastegaev, D. A., and Semernikov, E. A., “The EMCCD-based speckle interferometer of the BTA 6-m telescope: Description and first results,” *Astrophysical Bulletin* **64**, 296–307 (July 2009).
- [4] Andor, “Andor iXon+ hardware guide v 1.2,”

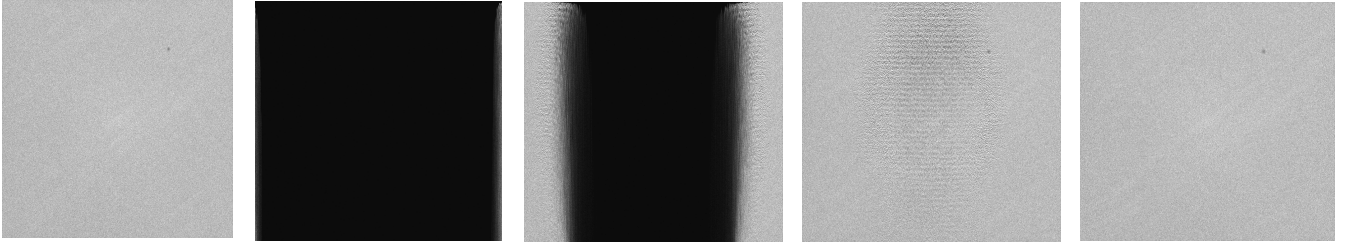


Рис. 10: Кадры полученные при различных параметрах вертикального переноса, слева направо: (скорость 0.5, напряжение 0), (скорость 0.3, напряжение 0), (скорость 0.3, напряжение +1), (скорость 0.3, напряжение +2), (скорость 0.3, напряжение +3). Изменение яркости от черного до белого на всех картинках соответствует одинаковому диапазону отсчетов: от 0 до 2000.

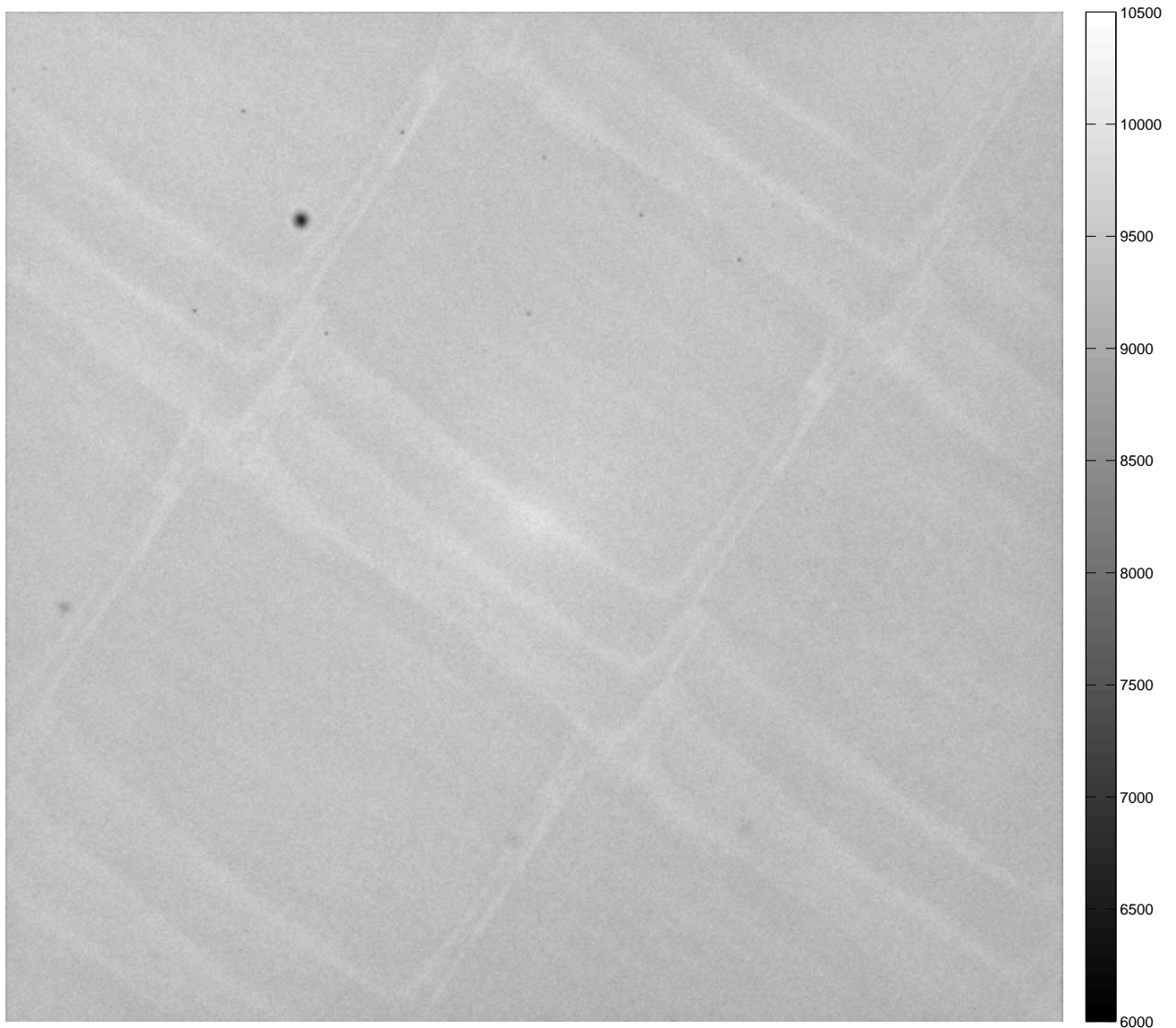


Рис. 11: Кадр плоского поля при освещении синим диодом.

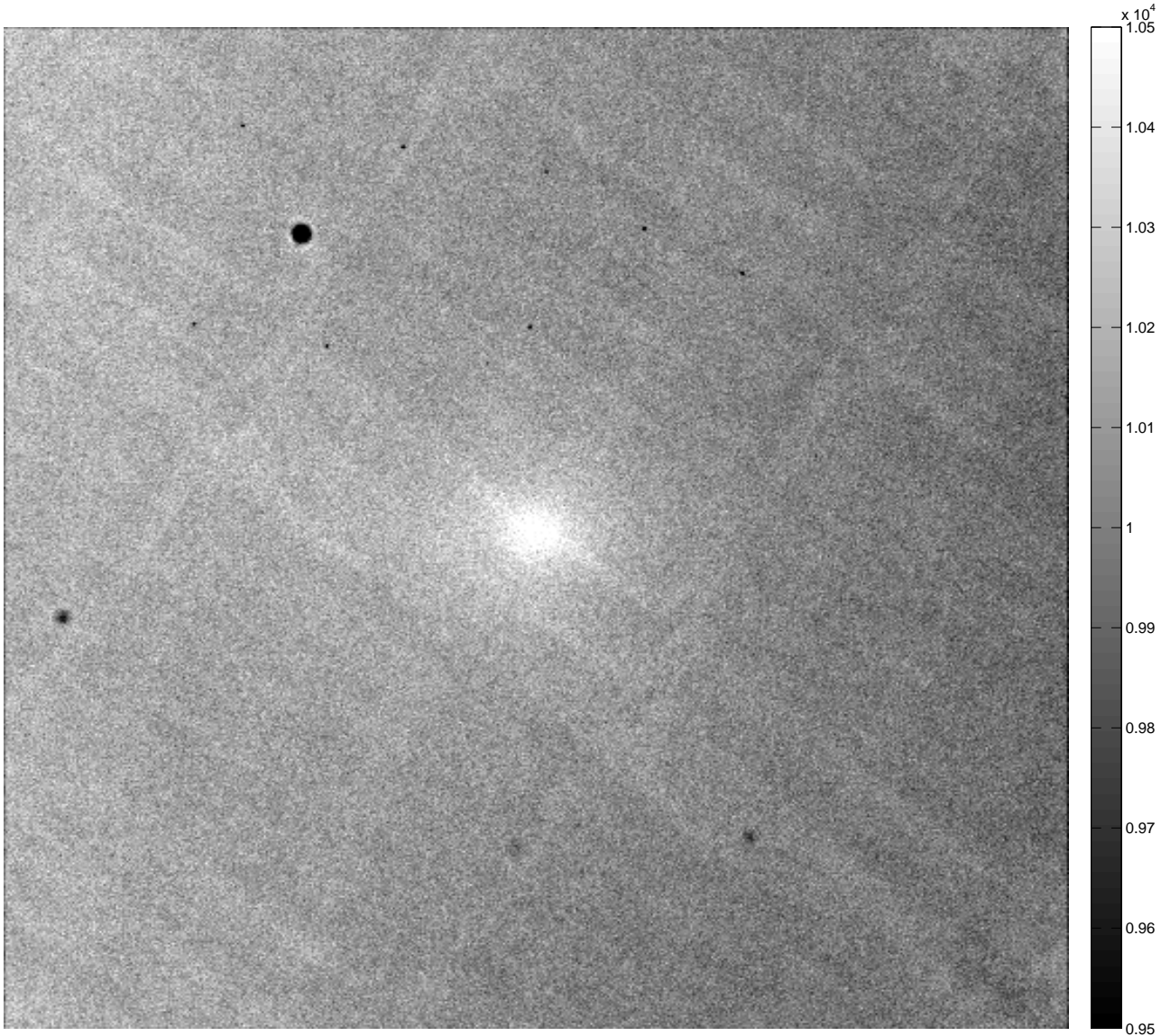


Рис. 12: Кадр плоского поля при освещении зеленым диодом.

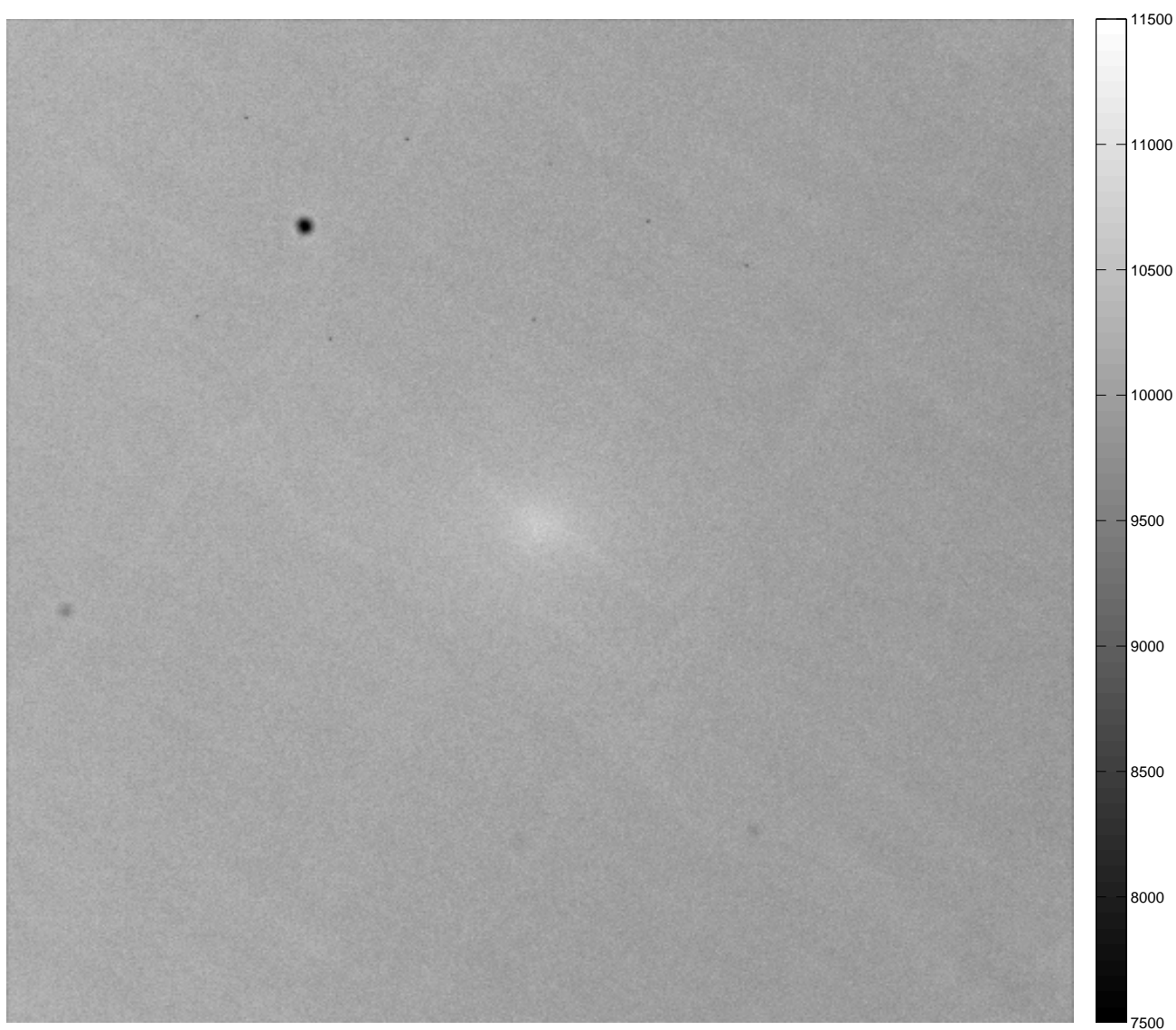


Рис. 13: Кадр плоского поля при освещении красным диодом.