

## Модель шума фоточувствительной матрицы Dalsa CM42M

В. В. Матюхин, Д. Г. Паринов, Е. А. Татарина

*Исследование спектра шумов всех элементов рентгенологической системы может позволить оптимизировать методику медицинских измерений, что открывает перспективы для дальнейшего уменьшения лучевой нагрузки на пациента во время проведения исследований. В настоящей работе экспериментально исследовались факторы, вносящие вклад в шум цифровых изображений, возникающих в фоточувствительных сенсорах высокого разрешения на примере фотосенсора Dalsa CM42M с размером пикселя 50 мкм. Выполнена классификация модельных шумов матрицы фотосенсора в зависимости от природы их появления, рассмотрены основные факторы, вносящие вклад в шум цифровых изображений, описан суммарный шум, получаемый при оцифровке сигналов. Построена качественная модель, позволяющая определить оптимальные параметры для регистрации изображения. В последовательных сериях автоматизированных измерений проведено тестирование фоточувствительной матрицы Dalsa CM42M. На основе экспериментальных данных измерены значения основных параметров изображения применительно к исследуемому сенсору. Установлено, что исследуемая система отвечает всем предъявляемым стандартам качества обработки изображений для медицинских задач.*

*Ключевые слова:* фоточувствительный сенсор, КМОП технология, плоскопанельный детектор, шум в полупроводниковых фотосенсорах.

### Введение

Появление фоточувствительных сенсоров на основе полупроводниковых устройств с зарядовой связью (ПЗС), а впоследствии и на комплементарных структурах металл-оксид-полупроводник (КМОП-технология) спровоцировало бурное развитие цифровых систем регистрации изображений [1]. Это привело к появлению целого класса новых задач по обработке и анализу данных.

Современные плоскопанельные рентгеновские детекторы позволяют делать снимки с высокой чувствительностью и пространственным разрешением, что открывает новые перспективы для развития методов рентгеновской диагностики. Основная схема детектирования рентгеновского излучения предполагает использование сцинтилляторов, преобразующих излучение в видимый

свет [2], и фоточувствительной матрицы для его регистрации.

Сложность этой задачи заключается в комбинации высоких требований как к пространственному разрешению детектора, так и к динамическому диапазону [3]. Одной из основных задач ранней медицинской диагностики в этой области является регистрация мелких злокачественных образований в мягких тканях. Это приводит к необходимости получения изображений с высоким пространственным разрешением и контрастом, что, в свою очередь, предполагает высокий динамический диапазон детектора. Одна из определяющих возможностей технического применения КМОП-матриц лимитируется уровнем и спектром шума [4]. Оптимизация уровня случайного шума при разработке подобных систем ведется на каждом этапе, начиная с оптимизации дизайна кремниевых чипов и заканчивая подбором параметров съемки. Последнее может менять качество изображения в несколько раз, поэтому построение модели шума, возникающего в фотосенсоре при регистрации цифрового изображения, является ключевой задачей.

Рассмотрим, как работает фоточувствительная матрица. При открытом затворе фотоны концентрируются в фоточувствительную область пикселя при помощи микролинзы, установленной на каждом пикселе. Фотон, попадая на фотодетектор

---

Матюхин Владислав Вячеславович, студент.  
Паринов Даниил Геннадьевич, студент.  
Татарина Елена Александровна, научный сотрудник, к.т.н.  
Московский физико-технический институт (государственный университет).  
Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.  
E-mail: tatarinova.ea@mipt.ru

Статья поступила в редакцию 3 октября 2017 г.

© Матюхин В. В., Паринов Д. Г., Татарина Е. А., 2017

фотодиода, выбивает электроны, которые накапливаются в потенциальных ямах, что создает разность потенциалов. По синхронизирующим сигналам с генератора импульсов происходит считывание накопленных зарядов. Существует опция считывания заряда как из отдельного пикселя, так и из всех одновременно. Уровень сигнала от одного пикселя низок, поэтому в схеме реализовано попиксельное усиление. После этого происходит обработка аналогового сигнала и преобразование его в цифровой. Затем в цифровом процессоре сигналов происходит предобработка. Впоследствии полученные данные преобразуются в пользовательский формат [1].

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование факторов, вносящих вклад в шум цифровых изображений, возникающих в фоточувствительных сенсорах высокого разрешения, на примере фотосенсора Dalsa CM42M с размером пикселя 50 мкм. Также построена качественная модель, позволяющая определить оптимальные параметры для регистрации изображения.

### Классификация модельных шумов матрицы

Усложнение и миниатюризация интегральных схем, равно как и увеличение рабочих частот, может приводить к существенным искажениям сигнала, например, к таким как шумы в источнике питания, наводки в цепях заземления, электромагнитная интерференция, наводки в подложке и т. п. Устранение или сведение этих шумов к минимуму является основной задачей отработки дизайна кремниевого чипа. Однако в любой системе существуют внутренние шумы, возникающие вследствие таких фундаментальных физических явлений, как температурные флуктуации, дробовой и фликеровский (1/f) шумы. Понимание и оценка этих шумов имеют первостепенное значение, т. к. позволяют определить предельные возможности системы [6].

### Типы шумов

Шумы в полупроводниковых фотосенсорах можно разбить на несколько категорий в зависимости от природы их появления:

- шум считывания;
- шум системы предусиления;
- дробовой и тепловой шум.

### Шум считывания

Этот шум возникает во время считывания и оцифровки сигнала в матрице на этапе мульти-

плексирования, предусиления и оцифровки, в основном, вследствие тепловых флуктуаций [7]. Каждая из этих компонент имеет различную природу, однако зависит не от условий накопления, а определяется электрическими параметрами чипа и условиями считывания фотосенсора. Поэтому эти эффекты вносят постоянный вклад в шум изображения при каждом считывании и могут быть описаны гауссовым распределением со средним квадратичным отклонением

$$\sigma_R = \sigma_0 \sqrt{N_R}, \quad (1)$$

где  $N_R$  – количество считываний матрицы за время экспозиции,  $\sigma_0$  – нормировочная константа.

### Шум системы предусиления

Такой шум возникает в системе накопления заряда в пикселе и буферных усилителях. В первом приближении этот шум можно описать, как флуктуацию чувствительности пикселей. Поэтому он пропорционален уровню результирующего сигнала, т. е. заряду, накопленному в пикселе за время экспозиции  $t$ :

$$\sigma_A = \alpha (I_D + I_S) t \quad (2)$$

где  $I_D$ ,  $I_S$  – ток утечки и фототок в пикселе соответственно,  $\alpha$  – константа, характеризующая величину флуктуаций в системе предусиления.

### Дробовой шум

Он возникает в результате конечного количества фотоэлектронов, накопленных в каждом пикселе за время экспозиции. В отличие от шума предусиления, этот шум пропорционален квадратному корню от количества считываемых электронов:

$$\sigma_{sh} = \beta \sqrt{(I_d + I_s) t}, \quad (3)$$

где  $\beta$  – константа, определяемая емкостью конденсатора.

Суммарный шум, получаемый при оцифровке сигнала, складывается из трех описанных выше компонент и может быть описан уравнением для суммарной дисперсии:

$$\sigma^2 = \sigma_R^2 + \sigma_A^2 + \sigma_{sh}^2. \quad (4)$$

Подставляя соотношения (1)–(3) в формулу (4), получим:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 N_R + \alpha^2 (I_D + I_S)^2 t^2 + \beta^2 (I_D + I_S) t. \quad (5)$$

Полученное выражение зависит от трех ключевых параметров, которые можно варьировать при проведении эксперимента:

- интегральная доза;
- интенсивность сигнала;
- количество считываний за время измерения.

### Шумы в активных фотодиодных пиксельных сенсорах

В КМОП-матрицах шумы могут зависеть от времени, что связано, в первую очередь, с температурными изменениями сопротивлений элемен-

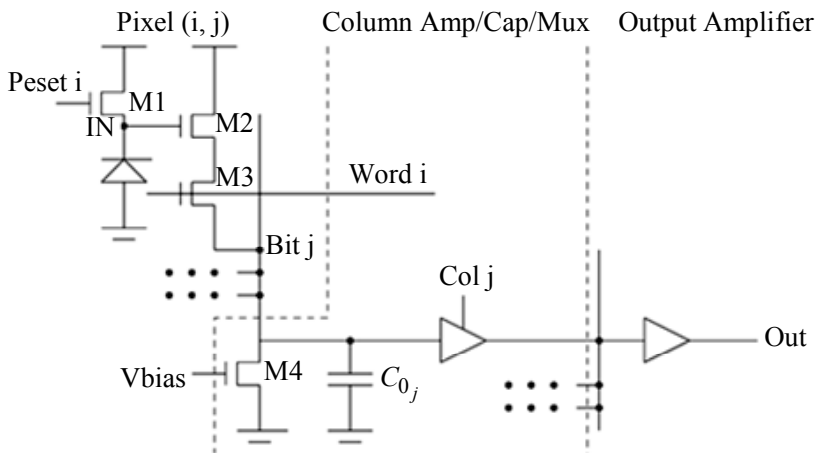


Рис. 1. Упрощенная структура сенсора с 3Т-схемой пикселя.

В начале цикла подается сигнал на вход сброса, что приводит к перезарядке пикселя до стандартного напряжения смещения фотодиода. После этого начинается стадия интегрирования, во время которой фототок, протекая через фотодиод, уменьшает потенциал в точке IN на затворе буферного транзистора M2. По окончании времени интегрирования подается сигнала выбора и заряд, накопленный в каждом пикселе, считывается транзистором M2 и переносится в накопительный конденсатор  $C_{0j}$ . После этого напряжение на накопительном конденсаторе усиливается системой предусиления и подается на усилитель системы считывания и оцифровки. В такой схеме каждая колонка имеет собственный усилитель, что позволяет производить построчное считывание матрицы. После окончания считывания пиксели сбрасываются, и цикл начинается заново.

В результате того, что каждая колонка считывается отдельным усилителем, она обладает как индивидуальной чувствительностью, так и индивидуальной систематической погрешностью считывания. Это приводит к возникновению фиксированного шума (Fixed Pattern Noise, FPN). Несмотря на то, что вариация уровня сигнала в результате этого эффекта весьма значительна, она

фиксирована в стационарном режиме. Это позволяет, однажды измерив чувствительность каждого пикселя, избавиться от FPN при помощи нормировки исходного изображения. Таким образом, FPN не влияет на качество изображения, однако его наличие нежелательно, поскольку вариация чувствительности пикселей приводит к уменьшению динамического диапазона [9].

Для анализа временного шума при регистрации изображения необходимо просуммировать шумы, возникающие на каждом этапе работы сенсора. Поскольку разработчики кремниевых чипов стараются создать систему предусиления, вносящую минимальный вклад в вариацию сигнала, основной компонентой в результирующем шуме изображения является шум, возникающий в самом пикселе. Этот факт дополнительно усугубляется тем, что требование к максимизации фактора заполнения пикселей накладывает жесткие ограничения на размеры транзисторов в пикселе. Это приводит к увеличению уровня их шума по сравнению с периферийной электроникой, в первую очередь, как результат уменьшения емкости накопительного конденсатора  $C$  и шума в тракте мультиплексирования. Последний также вносит вклад в общие шумы, однако, как было сказано выше, этот

- сброс;
- интегрирование;
- считывание.

Тем не менее, обычно для каждой матрицы (или режима ее работы) можно определить квазистационарный режим, после выхода на который параметры шума и всей системы можно считать стационарными.

В настоящем исследовании авторами рассматривается фотосенсор со стандартной 3Т-схемой пикселя (см. рис. 1). На каждый пиксель подается два сигнала: сброс (Reset) и выбор (Word). Их состояния разделяют работу сенсора на три этапа:

вклад не зависит от параметров работы матрицы и обобщенно может быть описан упрощенным выражением (1). Поскольку оптимизация электрической схемы считывания является отдельной задачей, решение которой тесно связано с особенностями конкретного технологического процесса, используемого при производстве кремниевых сенсоров, доскональное исследование шумов в периферийной электронике выходит за рамки данной работы, и их учет будет иметь исключительно эмпирический характер.

Вторым параметром, заданным технологией производства, является фликеровский шум. Поскольку он является существенным только на низких частотах, т. е. при очень длительных временах накопления, то этот шум определяется в основном фиксированным уровнем токов утечки и может быть включен в константу дробового шума [10].

## Экспериментальная методика

### Описание установки

Тестирование проводилось на стенде для исследования фотосенсоров КМОП. Стенд представляет собой электронную схему для управления и считывания матрицы, помещенную внутрь светозащитного кожуха, на верхней крышке которого размещен зеленый светодиод для равномерной засветки фотосенсора. Максимум спектра излучения светодиода имеет длину волны 550 нм, что совпадает с максимумом квантовой эффективности исследуемого кремниевого фотосенсора. Интенсивность излучения управляется при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ) тока питания светодиода, что обеспечивает высокую линейность средней интенсивности излучения, не зависящую от вольтамперной характеристики (ВАХ) конкретного светодиода.

Система управления стенда позволяет считывать матрицу при разных временах накопления, а также менять количество считываний, сохраняя общую выдержку неизменной. Это позволяет исследовать характеристики матрицы, меняя независимо только время накопления или количество снимаемых кадров. Вместе с регулировкой мощности интенсивности сигнала экспериментальная установка позволяет независимо контролировать все три основных параметра, вносящих вклад в шум изображения в соответствии с формулой (5).

Другой важной особенностью системы управления стенда является возможность выполнения последовательности команд управления, что создает возможности для автоматизации измерений. Все полученные данные были сняты в после-

довательных сериях автоматизированных измерений. Это позволяет утверждать, что каждая точка в такой серии была снята при абсолютно одинаковых настройках сенсора, что минимизирует неконтролируемую вариацию параметров эксперимента.

### Калибровка фиксированного шума

Тепловые флуктуации и неоднородности свойств, возникающие при производстве матрицы, приводят к тому, что каждый пиксель имеет свою чувствительность и уровень постоянного сигнала. Это приводит к сильной вариации сигнала при одинаковой засветке различных пикселей. Поскольку эта вариация постоянна, то ее можно учесть, введя калибровку для каждого пикселя. Такая калибровка хорошо аппроксимируется линейной функцией, поэтому в описанных ниже экспериментах она проводилась следующим образом:

1. для заданного времени накопления производилась фиксация двух кадров, а именно: с нулевой освещенностью и с засветкой, близкой к насыщению.

2. значение в каждом пикселе аппроксимировалось линейной функцией и вычислялось две матрицы коэффициентов, соответствующих чувствительности пикселей и фону.

3. для получения исследуемого кадра после его регистрации проводилось обратное преобразование, нормирующее интенсивность всех пикселей матрицы.

### Калибровка светодиода

Для определения шумов сенсора от уровня освещенности необходимо знать зависимость тока  $I_S$ , генерируемого в пикселе освещением светодиода, от среднего тока питания  $I_{LED}$  за время накопления, равного 100 мс. Аналитически это можно выразить следующим образом:

$$I_{LED} = \gamma_{PWM} \frac{U_{LED}}{R_{LED}}, \quad (6)$$

где  $U_{LED}$ ,  $I_{LED}$  – напряжение и ток питания светодиода, а  $\gamma_{PWM}$  – коэффициент скважности ШИМ.

Для определения уровня сигнала в пикселе при заданной интенсивности снималась последовательность из 20 одинаковых изображений. Значение в каждом пикселе усреднялось по полученной серии. После этого проводилась нормировка фиксированного шума и определялось среднее значение по всем пикселям в выбранной центральной области матрицы размером 1500×2000.

Такая процедура не учитывает вклад «горячих» пикселей, интенсивность в которых существенно отличается из-за неидеальности технологического процесса. Однако поскольку количество таких пикселей мало, для целей определения

интенсивности светодиода их вкладом в среднее можно пренебречь.

На графике рис. 2 можно увидеть характерную экспериментальную линейную зависимость интенсивности от среднего тока светодиода с коэффициентом наклона  $k = 13550 \text{ мА}^{-1}$ .

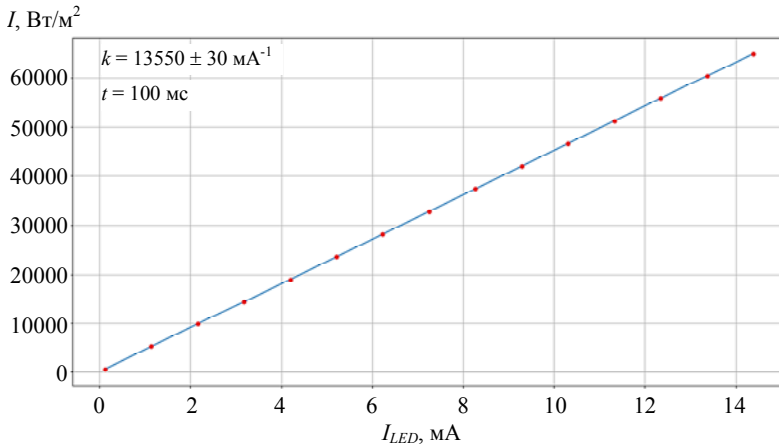


Рис. 2. Зависимость интенсивности  $I$  от среднего тока светодиода  $I_{LED}$ .

### Методика определения параметров шума

В соответствии с (5), суммарный шум в пикселе определяется общей формулой:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 N_R + \alpha^2 (I_D + I_S)^2 t^2 + \beta^2 (I_D + I_S) t.$$

При условии того, что изображения нормируются на фиксированный шум, второе слагаемое в (5) обнуляется, и формула для шума приобретает вид:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 N_R + \beta^2 (I_D + I_S) t. \quad (7)$$

Здесь неизвестными коэффициентами, подлежащими определению, являются шум считывания и коэффициент дробового шума  $\beta$ . При этом, в общем случае, последний может отличаться для тока утечки  $I_D$  и тока сигнала  $I_S$  из-за, например, вклада фликеровского шума или других физических механизмов флуктуации сигнала. Поэтому (7) можно переписать в виде:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 N_R + \beta^2 I_D t + \beta^2 I_S t. \quad (8)$$

Для определения этих параметров нужно провести следующие процедуры.

1. При фиксированном времени накопления ( $t = \text{const}$ ) и отсутствии освещенности ( $I_S = 0$ ) провести регистрацию изображения с разным количеством считываний. При этом время накопления  $\tau$  каждого промежуточного кадра

$$\tau = \frac{t}{N_R}. \quad (9)$$

Далее построить квадрат шума полученных изображений от количества считываний для разных времен накопления. Из наклона полученных графиков можно вычислить  $\sigma_0$ .

2. При  $N_R = 1$  и в отсутствие засветки снять кадры для различных времен накопления и построить зависимость квадрата шума от времени накопления. Это позволит вычислить коэффициент дробового шума  $\beta_D$ , а свободный член (значение при  $t \rightarrow 0$ ) равен значению параметра  $\sigma_0$ .

3. При  $N_R = 1$  и фиксированном времени накопления ( $t = \text{const}$ ) снять кадры для различных уровней засветки и построить зависимость квадрата шума от интенсивности освещения. Это позволит вычислить коэффициент дробового шума  $\beta_S$ .

4. Для вычисления уровня шума проводилась следующая процедура: сначала кадр нормировался на фиксированный шум, что позволяло учесть вариацию чувствительности пикселей и неравномерности засветки. После этого рассчитывалось среднеквадратичное отклонение значений всех пикселей.

### Результаты измерений

Зависимость квадрата уровня шума от количества считываний представлена на рис. 3. Как и ожидалось, зависимость от количества считываний является линейной, причем наклон этой зависимости не зависит от времени накопления в то время, как общий уровень шума существенно меняется в зависимости от  $t$ . Из этих зависимостей было получено значение шума считывания, равное 12 уровням АЦП.

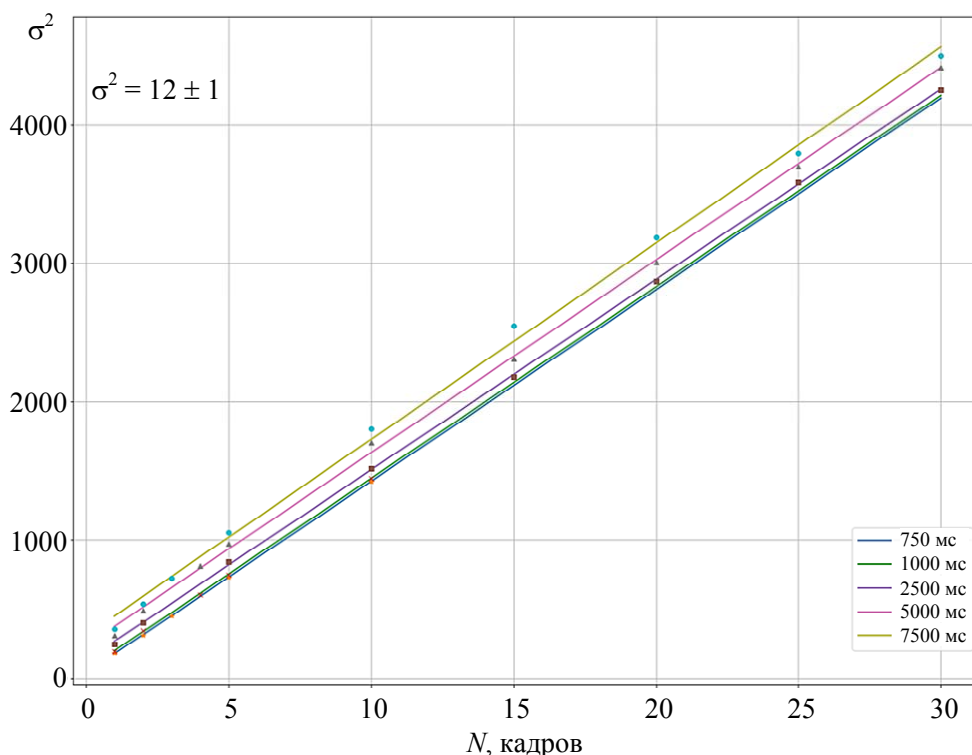


Рис. 3. Зависимость уровня шума  $\sigma^2$  от количества считывания для различных времен накопления.

Рассмотрим теперь результаты измерений компонент дробового шума, отображенные на рис. 4 и рис.5. Коэффициент дробового шума  $\beta_S = 7$  единиц АЦП, тогда как коэффициент дробового шума  $\beta_S = 17$  единиц АЦП. Теперь рассмотрим шум считывания, который вычисляется из экспериментальных зависимостей экстраполяцией  $I \rightarrow 0$  (рис. 4) или  $t \rightarrow 0$  (рис. 5). Полученные значения для шума считывания находятся в преде-

лах погрешности и дают значение параметра  $\sigma_0 = 12$ . Это означает, что в исследуемой матрице шум считывания, как и предполагалось, является постоянным. Кроме того, значения для  $N_R = 1$ , полученные из зависимостей на рис. 3, полностью совпадают с соответствующими значениями времени накопления на рис. 5. Это означает, что общий уровень темнового тока является стабильным и слабо меняется во времени.

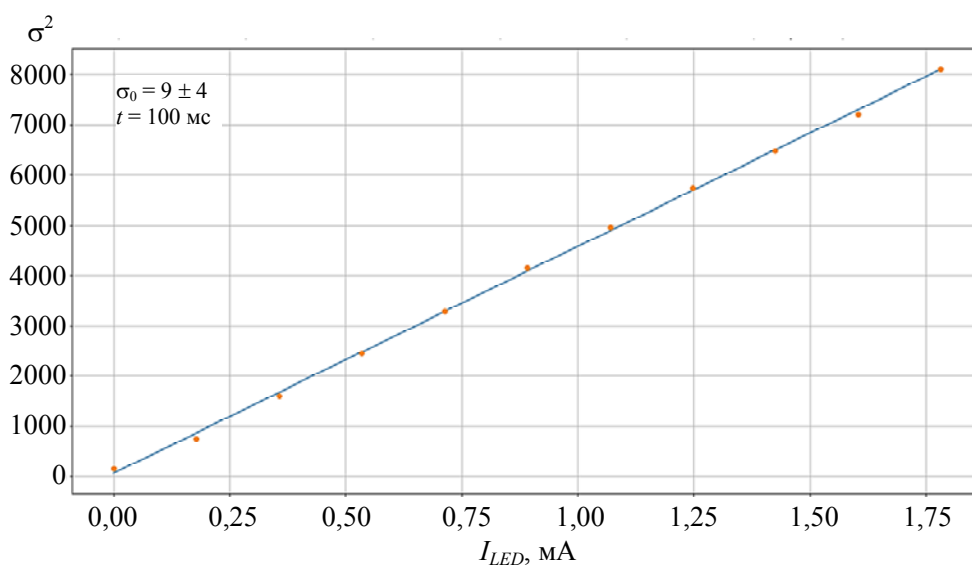


Рис. 4. Зависимость уровня шума  $\sigma^2$  от интенсивности освещения (от тока светодиода).

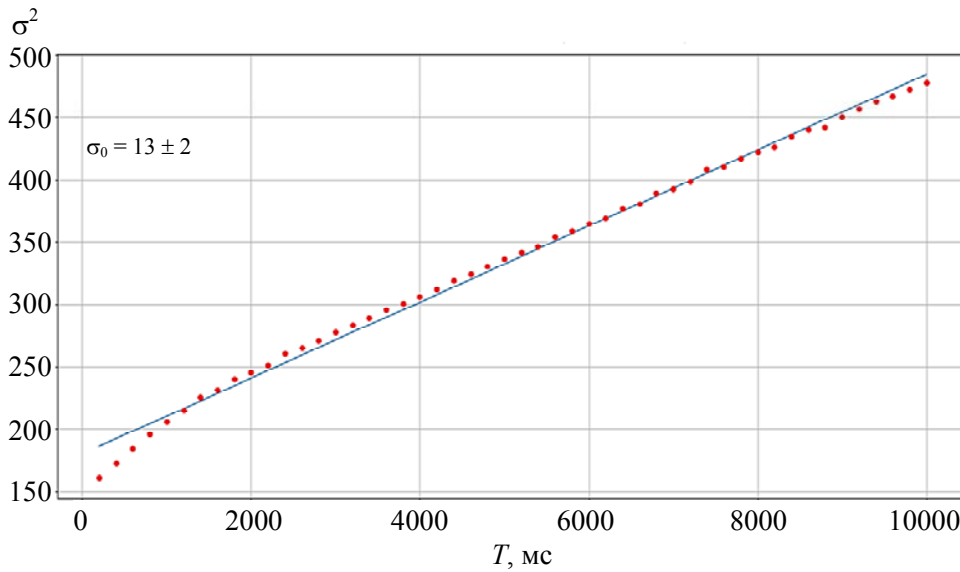


Рис. 5. Зависимость уровня шума  $\sigma^2$  от времени накопления  $T$ . Красные точки — эксперимент. Синяя прямая линия — аппроксимация.

### Заключение

Исследование спектра шумов всех элементов рентгенологической системы может позволить оптимизировать методику медицинских измерений, что открывает перспективы для дальнейшего уменьшения лучевой нагрузки на пациента во время проведения исследований.

В настоящей работе было показано, что спектр шумов фоточувствительной матрицы Dalsa CM42 явным образом декомпозируется согласно теории (8). Можно утверждать, что исследуемая система отвечает всем предъявляемым стандартам качества обработки изображений для медицинских задач. Тем не менее, задача оптимизации еще не решена.

Одной из возможных проблем при совмещении цифровой и аналоговой электроники на одном кремниевом чипе могут быть существенные колебания напряжения питания, которые через транзистор M2 (рис. 1) усиливаются пропорционально сигналу. Быстрые переключения большого количества затворов в цифровой части создают большую емкостную нагрузку, что приводит к высокому потреблению тока в момент переключения и неоднородности потенциала шины питания в пределах чипа. Такие колебания могут порождать паразитные потенциалы, влияющие на усиление аналогового сигнала до оцифровки или нестабильность референсного напряжения АЦП.

Альтернативным источником шума может быть фликеровский шум. Благодаря своей природе, основанной на поверхностных токах утечки, эта компонента очень чувствительна к температуре. Кроме того, мелкие примесные центры на поверхности фотодиода с небольшой энергией активации могут иметь время жизни, сравнимое с

характерными временами накопления. В этом случае такие процессы будут вносить существенный вклад в флуктуации темнового тока, особенно на больших временах накопления.

При тестировании прототипов особое внимание также стоит уделить спектру шума и его зависимости от температуры и колебаний напряжения питания. В первую очередь, должен быть проанализирован шум в системе предусиления пикселя до тракта мультиплексирования. Большой шаг фоточувствительных элементов открывает возможности не только для уменьшения уровня шумов за счет увеличения емкости накопительного конденсатора  $C$ , но и увеличения максимального накапливаемого заряда. Такой подход может привести к существенному увеличению динамического диапазона и соотношения сигнал/шум.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 (договор № 02.G25.31.0143).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Fossum E. R., Donald B. H. // IEEE Journal of the electron devices society. 2014. Vol. 2. No. 3. P. 33.
2. Шенорик П. Ю. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Часть 3. Введение в физику сцинтилляторов. Учебное пособие. — Иркутск: изд-во Иркут. гос. ун-та. 2013.
3. Bigasa M., Cabruja E., Forestb J., Salvib J. // Microelectronics Journal. 2006. No. 37. P. 433.
4. Kawai N., Kawahito S. // IEEE Transactions on electron devices. 2004. Vol. 51. No. 2. P. 185.

5. Fossum E. R. // IEEE Transactions on electron devices. 1997. Vol. 44. No. 10. P. 1689.
6. Lundberg K. H. Noise Sources in Bulk CMOS [Электронный ресурс, 2002] <http://web.mit.edu/klund/www/CMOSnoise.pdf>.
7. Hynccek J. // IEEE Trans. Electron Devices. 1990. Vol. 37 (3). P. 640.
8. Gamal A. El., Eltoukhy H. // IEEE Circuits devices magazine. 2005. P. 6.
9. Tian H. PhD dissertation, Department of Electrical Engineering, Stanford University, 2000.
10. Tian H., Fowler B., Gamal A. El. // IEEE J. of Solid-State Circ. 2001. Vol. 36. No. 1. P. 92.

PACS: 87.59.-e

## Noise model of the Dalsa CM42M photosensitive matrix

V. V. Matyukhin, D. G. Parinov, and E. A. Tatarinova

Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia  
E-mail: tatarinova.ea@mipt.ru

Received October 3, 2017

*Research of the noise spectrum of all elements of a radiographic system can allow optimizing a technique of medical measurements that offers prospects for further decrease of beam load of the patient during researches. In the present work, the factors contributing to the noise of digital images appearing in photosensitive high-resolution sensors by the example of the Dalsa CM42M photosensor with a pixel size of 50  $\mu\text{m}$  were experimentally investigated. Classification of the model noise of the photosensor matrix depending on the nature of their appearance is performed, the main factors contributing to the noise of digital images are considered, the total noise resulting from the digitization of signals is described. A qualitative model is constructed, which allows determining optimal parameters for image recording. In a series of automated measurements, the photosensitive matrix Dalsa CM42M was tested. Based on the experimental data, the values of the main image parameters for the sensor under study were measured. It is established that the system under study meets all the standards of quality of image processing for medical tasks.*

*Keywords:* photosensitive sensor, CMOS technology, flat panel detector, noise in semiconductor photosensorsnull.

### REFERENCES

1. E. R. Fossum and B. H. Donald, IEEE Journal of the electron devices society **2** (3), 33 (2014).
2. R. Yu. Shendrik, *Methods of Experimental Physics of Condensed State. Part 3*. (Irkutsk Univer., Irkutsk, 2013) [in Russian].
3. M. Bigasa, E. Cabrujaa, J. Forestb, and J. Salvib, Microelectronics Journal, No. 37, 433 (2006).
4. N. Kawai and S. Kawahito, IEEE Transactions on electron devices **51** (2), 185 (2004).
5. E. R. Fossum, IEEE Transactions on electron devices **44** (10), 1689 (1997).
6. K. H. Lundberg, *Sources in Bulk CMOS*, (2002) / <http://web.mit.edu/klund/www/CMOSnoise.pdf>
7. J. Hynccek, IEEE Trans. Electron Devices **37** (3), 640 (1990).
8. A. El. Gamal and H. Eltoukhy, IEEE Circuits devices magazine, 6 (2005).
9. H. Tian, PhD dissertation (Department of Electrical Engineering, Stanford University, 2000).
10. H. Tian, B. Fowler, and A. El. Gamal, IEEE J. of Solid-State Circ. **36** (1), 92 (2001).