

УДК 621.383

Оптимизация отношения сигнал/шум КРТ фотоприемных устройств на базе прямоинжекционной микросхемы считывания

С. А. Дворецкий, А. В. Зверев, Ю. С. Макаров, Е. А. Михантьев

Представлена модель для расчета отношения сигнал/шум КРТ ФПУ на базе канала считывания фотосигнала с прямоинжекционным входным каскадом, работающего в ITR и IWR режимах. Модель позволяет рассчитать и оптимизировать шумовые характеристики ФПУ при наличии экспериментальных параметров фотодиода и характеристик кремниевой технологии изготовления микросхемы считывания. В модели учтены следующие механизмы шума: дробовой шум фотодиода, обусловленный флуктуациями потока излучения и темнового тока; тепловые шумы фотодиода и основных узлов канала считывания; шумы сброса; $1/f$ -шумы фотодиода и основных узлов канала считывания. Также в модели учитывается эффективность инжекции фототока и влияние паразитных емкостей шин мультиплексирования.

PACS: 85.60 Dw; 85.60 Gz

Ключевые слова: ИМСС, зарядочувствительный усилитель, эффективность инжекции, сигнал, шум, ОСШ, КРТ, IWR.

Введение

Матричные фотоприемные устройства (ФПУ) на основе твердых растворов HgCdTe (КРТ) представляют собой гибридную сборку матрицы фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и кремниевой интегральной микросхемы считывания сигнала (ИМСС). Основной задачей ИМСС является регистрация фототока, пропорционального интенсивности потока ИК-излучения, падающего на матрицу фоточувствительных элементов, и последующий вывод полученной информации для построения изображения и его анализа внешним модулем электронной обработки.

В средневолновом ИК (СВИК) и длинноволновом ИК (ДВИК) диапазонах необходимо регистрировать слабый сигнал от теплового объекта в условиях сильной фоновой засветки. В данных

условиях для достижения наилучших характеристик необходимо как можно больше увеличивать отношение сигнал/шум (ОСШ) ФПУ.

В СВИК и ДВИК ФПУ широкое применение нашли ИМСС с прямоинжекционным входным каскадом [1, 2]. Ключевой характеристикой таких ИМСС является зарядовая емкость накопительной ячейки, которая определяет максимальное время интегрирования фототока. Для достижения предельных характеристик ФПУ необходимо вести интегрирование фототока в течение всего времени кадра. Однако величина зарядовой емкости ограничена и, как следствие, ограничено время интегрирования, что не позволяет в полной мере выделить полезную составляющую фотосигнала на фоне шума. Обычно в крупноформатных матрицах время последовательного вывода информации значительно превышает время интегрирования. Современное развитие кремниевой технологии позволяет изготавливать ИМСС с частотой вывода аналогового сигнала до 20 МГц [3, 4]. При выводе информации на данной частоте в режиме считывания после интегрирования (Integrate Then Read — ITR) вклад времени интегрирования в общее время кадра становится существенным. В СВИК фотоприемниках, работающих на данных частотах, время интегрирования может даже превышать время последовательного вывода сигнальной информации. Поэтому для увеличения кадровой час-

Дворецкий Сергей Алексеевич, зав. лабораторией.
Зверев Алексей Викторович, научный сотрудник.
Макаров Юрий Сергеевич, инженер.
Михантьев Евгений Анатольевич, инженер.
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.
Россия, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.
Тел. (383) 333-22-76. E-mail: makarov@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 29 июля 2016 г.

© Дворецкий С. А., Зверев А. В., Макаров Ю. С.,
Михантьев Е. А., 2016

тоты актуально вести интегрирование фототока во время вывода информации с предыдущего кадра (режим Integrate While Read — IWR).

Уровень шума и ОСШ являются основными характеристиками ИМСС и ФПУ. Оптимизация конструкции канала считывания фотосигнала на этапе разработки ИМСС с помощью аналитических количественных оценок позволяет спроектировать оптимальный проект ИМСС. При этом вероятность успешного выпуска микросхемы, имеющей прогнозируемые характеристики после первого цикла производства, существенно повышается, что приводит к заметному снижению стоимости проектирования и производимой микросхемы.

Целью данной работы является разработка аналитической модели канала считывания фото-

сигнала для прогнозирования и оптимизации максимального ОСШ ФПУ.

Канал считывания фотосигнала

На рис. 1 представлена принципиальная электрическая схема анализируемого канала считывания. Рабочая точка фотодиода задается с помощью напряжения V_{INJ} на затворе n -МОП транзистора прямой инжекции $VT1$. Для реализации режима IWR в накопительную ячейку устанавливается дополнительный конденсатор выборки/хранения $C2$, с которого осуществляется вывод информации, полученной во время предыдущего кадра. В режиме ITR вывод информации ведется с общей емкости $C1 + C2$.

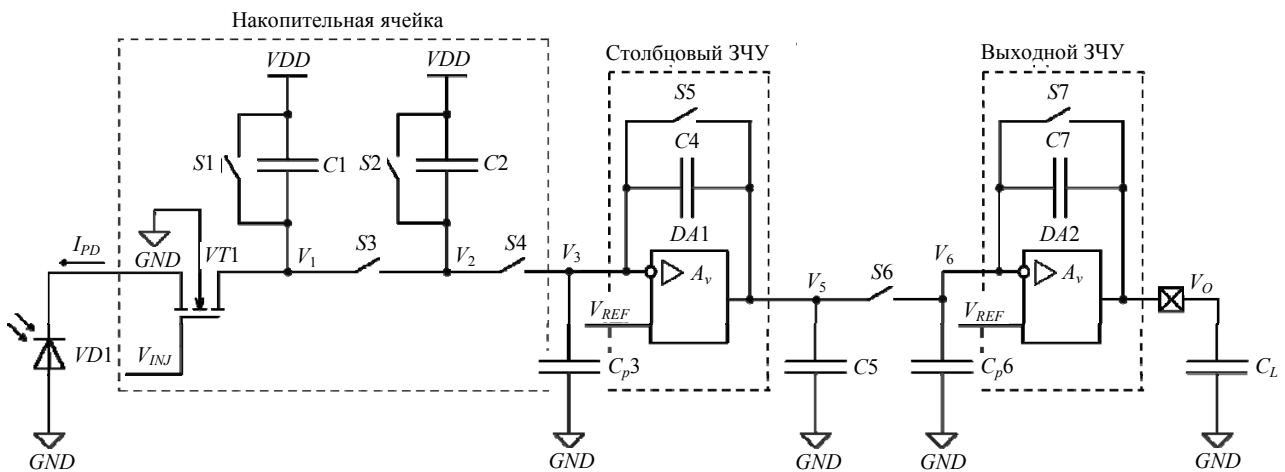


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема канала считывания фотосигнала. $VD1$ — фотодиод; $VT1$ — n -МОП транзистор прямой инжекции; $C1$ — накопительный конденсатор; $C2$ — конденсатор выборки/хранения результата интегрирования в режиме IWR; C_{p3} — паразитная емкость столбцовой шины; $C4, C7$ — конденсаторы в цепях обратной связи зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ); $C5$ — емкость выборки/хранения результата преобразования заряда в напряжение; C_{p6} — паразитная емкость шины мультиплексирования; $DA1, DA2$ — операционные усилители; $S1, S2, S5, S7$ — ключи сброса; $S3$ — ключ выборки/хранения; $S4$ — ключ адресации строки; $S6$ — ключ адресации столбца; I_{PD} — ток через фотодиод.

Выходным сигналом накопительной ячейки является заряд, который преобразуется в напряжение с помощью зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ), установленного на столбцовой шине. Благодаря этому в качестве накопительной емкости в ячейке можно использовать нелинейные конденсаторы в полном диапазоне напряжений (rail-to-rail). В крупноформатных ИМСС использование ЗЧУ на столбце позволяет избежать необходимости установки истокового повторителя на выходе ячейки и, соответственно, позволяет использовать максимум площади ячейки под накопительную емкость [5]. Во время выборки столбца выходной ЗЧУ преобразует заряд, хранящийся на конденсаторе $C5$, в выходное напряжение. При данной реализации не происходит перезарядки паразитной емкости шины мультиплексирования C_{p6} , что по-

зволяет снизить мощность столбцовых ЗЧУ и, соответственно, общее энергопотребление ИМСС.

Эффективность инжекции фототока

Важным параметром ячеек ИМСС с прямой инжекцией является коэффициент ввода тока — эффективность инжекции. На рис. 2 показана низкочастотная эквивалентная схема входного каскада ФПУ с прямой инжекцией [6]. Инжектируемый входным транзистором ток фотодиода I_{PD} ослабляется на коэффициент инжекции η_{DI} .

$$I_{IN} = \eta_{DI} \cdot I_{PD}, \quad (1)$$

где I_{IN} — инжектированный ток, А.

На низких частотах эффективность инъекции равна [1, 2]:

$$\eta_{DI} = \frac{R_{PD}g_M}{1 + R_{PD}g_M}, \quad (2)$$

где R_{PD} — сопротивление фотодиода в рабочей точке, Ом; g_M — крутизна передаточной характеристики входного МОП-транзистора, 1/Ом.

Входной МОП-транзистор прямой инъекции VT1 (рис. 1) работает в области умеренной инверсии. Для вычисления крутизны транзистора воспользуемся формулами из общепризнанной EKV-модели [7, 8], которые применимы для любой области инверсии:

$$g_M = \frac{qI_{IN}}{\zeta k_B T} \left(1 + \frac{I_{IN}}{I_S} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{I_{IN}}{I_S}} \right)^{-1/2}, \quad (3)$$

$$I_S = 2 \left(\frac{k_B T}{q} \right)^2 \zeta \mu C'_{OX} \frac{W}{L}, \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{C_{OX} + C_{DEP} + C_{SS}}{C_{OX}}, \quad (5)$$

где q — заряд электрона, Кл; k_B — постоянная Больцмана, Дж/К; T — температура, К; I_S — специфический ток, А; μ — подвижность носителей заряда в канале, м²/(В с); W/L — ширина/длина канала, м; C'_{OX} — удельная емкость подзатворного диэлектрика, Ф/м²; ζ — емкостной фактор; C_{OX} — емкость подзатворного диэлектрика, Ф; C_{DEP} — емкость обедненного слоя, Ф; C_{SS} — емкость поверхностных состояний [9, 10], Ф.

Значение емкостного фактора ζ при комнатной температуре обычно лежит в диапазоне от 1 до 2 и изменяется в зависимости от температуры и геометрии транзистора [1]. Однако фирмы-изготовители ИС редко указывают значение ζ , вместо него обычно приводятся подпороговый размах напряжения (subthreshold swing) либо его обратная величина — наклон подпороговой характеристики S (subthreshold slope) [9—11]:

$$S^{-1} = \frac{\partial V_{GS}}{\partial (\lg I_D)} = \zeta \left(\frac{k_B T}{q} \right) \ln(10), \quad (6)$$

где V_{GS} — напряжение затвор-исток, В; I_D — ток стока, А. Модель для вычисления значения ζ можно найти в [8].

Как видно из формулы (1), инжектированный ток I_{IN} зависит от эффективности инъекции (2), которая, в свою очередь, тоже зависит от величины I_{IN} , входящей в уравнение (3). Таким обра-

зом, для нахождения эффективности инъекции необходимо численным методом разрешить систему уравнений относительно I_{IN} .

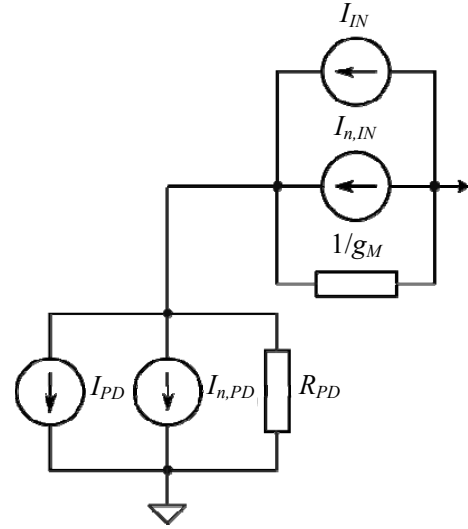


Рис. 2. Низкочастотная эквивалентная схема входного каскада ФПУ с прямой инъекцией: $I_{n,PD}$ — шумовой ток фотодиода; R_{PD} — сопротивление фотодиода в рабочей точке, I_{IN} — инжектированный ток; $I_{n,IN}$ — шумовой инжектированный ток; g_M — крутизна передаточной характеристики входного МОП-транзистора.

Передаточная характеристика канала считывания

Для вычисления ОСШ ФПУ необходимо разделить напряжение на выходе канала считывания, порождаемое оптическим сигналом за время интегрирования, на среднеквадратическое значение напряжения шума. Максимальное время интегрирования фототока ограничено величиной зарядовой емкости ячейки:

$$N_{well} = \frac{1}{q} \int_0^{VDD} C_{INT}(V) dV, \quad (7)$$

где N_{well} — зарядовая емкость ячейки ИМСС, электрон (e^-); VDD — напряжение питания, В; $C_{INT}(V)$ — накопительная емкость, Ф. Для режима IWR $C_{INT}(V) = C_1$, для режима ITR $C_{INT}(V) = C_1 + C_2$.

Ток через фотодиод I_{PD} равен сумме темного тока I_{dark} и фототока I_{ph} . Следовательно, выражение для вычисления максимального времени интегрирования τ_{max} , в течение которого выработается 100 % зарядовой емкости, запишется в виде:

$$\tau_{max} = \frac{qN_{well}}{\eta_{DI} \cdot (I_{ph} + I_{dark})}, \quad (8)$$

Фототок, генерируемый падающим излучением, равен [1]:

$$I_{ph} = q\eta Q_F A_{det}, \quad (9)$$

где η — квантовая эффективность фотодиода; Q_F — число фотонов, падающее на фотодиод, фотон/(м² с); A_{det} — активная площадь фотодиода, м².

За время интегрирования фототок разряжает накопительную емкость ячейки на заряд равный:

$$N_{ph}(\tau_i) = \frac{\eta_{DI} \cdot I_{ph}}{q} \tau_i, \quad (10)$$

где $N_{ph}(\tau_i)$ — генерируемый фототоком заряд в ячейке, e-; τ_i — время интегрирования, с.

В режиме IWR фототок интегрируется на конденсаторе C_1 , затем сигнальный заряд переносится на конденсатор C_2 , с которого в дальнейшем производится считывание информации, в то время как на C_1 вновь происходит интегрирование. В результате перераспределения заряда между конденсаторами C_1 и C_2 установится равенство по напряжению, из которого можно вычислить считываемый с ячейки фотозаряд $N_{SH}(\tau_i)$:

$$N_{SH}(\tau_i) = K_C N_{ph}(\tau_i), \quad (11)$$

где $K_C = C_2/(C_1 + C_2)$. Величина K_C показывает, какую долю от общей емкости ячейки занимает емкость выборки/хранения C_2 .

Так как в режиме ITR считывание производится с обоих конденсаторов C_1 и C_2 , то считываемый с ячейки фотозаряд $N_{SH}(\tau_i) = N_{ph}(\tau_i)$.

Накопительная емкость сбрасывается до напряжения питания VDD и затем разряжается фототоком. Следовательно, максимальной засветке соответствует минимальное напряжение на выходе ячейки и максимальное напряжение на выходе столбцового ЗЧУ, инвертирующего сигнал. При коэффициенте усиления $DA1 \gg 1$ после считывания заряда из накопительной ячейки на выходе $DA1$ установится напряжение, пропорциональное интенсивности ИК-излучения, падающего на фотодиод в течение времени интегрирования:

$$\Delta V_5(\tau_i) = \frac{q N_{SH}(\tau_i) + C_{SH}(VDD - V_{ref})}{C_4} - V_{ref}, \quad (12)$$

где $C_{SH} = C_2$ в режиме IWR; в режиме ITR $C_{SH} = C_1 + C_2$.

Перед считыванием столбцов заряд $N_5(\tau_i) = C_5 V_5(\tau_i)/q$ будет заперт на конденсаторе выборки/хранения C_5 посредством ключа S_6 . Выходной ЗЧУ также инвертирует сигнал, в результате чего

после считывания столбца напряжение сигнала на выходе канала считывания будет равно:

$$\Delta V_O(\tau_i) = VDD - \frac{(C_5 + C_7) \cdot V_{ref} - C_5 \Delta V_5(\tau_i)}{C_7}, \quad (13)$$

Шум канала считывания

Средний квадрат шумового тока фотодиода $I_{n,PD}^2$ вычисляется по формуле:

$$I_{n,PD}^2 = 2qI_{PD}\Delta f + \frac{4k_B T}{R_{PD}}\Delta f + (\alpha \cdot I_{dark}^\beta)^2 \ln \frac{f_2}{f_1}, \quad (14)$$

где Δf — ширина шумовой полосы частот, Гц; α, β — постоянные $1/f$ -шума; f_1 и f_2 — нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания, Гц.

Первый член выражения (14) представляет собой дробовый шум фотодиода, вызванный флуктуациями потока излучения и темнового тока, второй член — тепловой шум фотодиода [1]; третий член — формула Тобина для $1/f$ -шума фотодиода [12, 13].

Средний квадрат шумового тока МОП транзистора $I_{n,M}^2$ [14, 15]:

$$I_{n,M}^2 = 4k_B T \gamma g_M \Delta f + \frac{K}{C'_{OX} WL} \ln \left(\frac{f_2}{f_1} \right) g_M^2, \quad (15)$$

где γ — постоянная белого шума МОП-транзистора; K — параметр, зависящий от технологии, В²Ф.

С учетом $\Delta f = 1/2\tau_i$ и формул (14), (15) запишем выражения для квадратов заряда, генерируемых за время интегрирования шумовыми токами фотодиода $N_{n,PD}^2(\tau_i)$ и входного МОП-транзистора $N_{n,MOS}^2(\tau_i)$:

$$N_{n,PD}^2(\tau_i) = \frac{I_{ph} + I_{dark}}{q} \tau_i + \frac{2k_B T}{q^2 R_{PD}} \tau_i + \frac{(\alpha \cdot I_{dark}^\beta)^2}{q^2} \ln \left(\frac{n_{frames} \tau_{frame}}{\tau_i} \right) \cdot \tau_i^2, \quad (16)$$

$$N_{n,M}^2(\tau_i) = \frac{2k_B T \gamma g_M}{q^2} \tau_i + \frac{K}{C'_{OX}} \ln \left(\frac{n_{frames} \tau_{frame}}{\tau_i} \right) \frac{g_M^2}{q^2} \cdot \tau_i^2, \quad (17)$$

где n_{frames} — число измеряемых кадров; τ_{frame} — время кадра, с.

В режиме IWR время кадра τ_{frame} ограничено временем вывода сигнальной информации τ_{read} ($\tau_{frame} = \tau_{read}$), в режиме ITR $\tau_{frame} = \tau_i + \tau_{read}$.

Перед началом интегрирования выполняется сброс конденсаторов $C1$ и $C2$ посредством ключей $S1$ и $S2$, что породит шумовой заряд, квадрат которого равен выражению:

$$N_{n,RST}^2 = \frac{k_B T}{q^2} (C_1 + C_2), \quad (18)$$

Учитывая эффективность инъекции, запишем квадрат шумового заряда, накапливающегося в ячейке за время интегрирования [6]:

$$N_{n,i}^2(\tau_i) = \eta_{DI}^2 N_{n,PD}^2(\tau_i) + (1 - \eta_{DI})^2 N_{n,M}^2(\tau_i) + N_{n,RST}^2, \quad (19)$$

В режиме IWR величина считываемого с ячейки шумового заряда $N_{n,SH}(\tau_i)$ по аналогии с уравнением (11) равна значению:

$$N_{n,SH}(\tau_i) = K_C \cdot N_{n,i}(\tau_i). \quad (20)$$

В режиме ITR считываемый с ячейки шумовой заряд $N_{n,SH}(\tau_i) = N_{n,i}(\tau_i)$.

$N_{n,SH}(\tau_i)$ преобразуется в напряжение шума на выходе $DA1$ аналогично (12):

$$V_{n,TR1}(\tau_i) = \frac{q \cdot N_{n,SH}(\tau_i) + C_{SH}(VDD - V_{ref})}{C_4} - V_{ref}, \quad (21)$$

где $V_{n,TR1}(\tau_i)$ — напряжение шума на выходе $DA1$, эквивалентное шумовому заряду ячейки, В.

Средний квадрат напряжения теплового шума столбцового ЗЧУ $V_{n,JN1}^2$ вычисляется по формуле [2, 16, 17]:

$$V_{n,JN1}^2 = \frac{2\gamma k_B T}{C_4} \left[\frac{C_{SH} + C_{P3} + C_4}{C_5 + \frac{(C_{SH} + C_{P3}) \cdot C_4}{C_{SH} + C_{P3} + C_4}} \right]. \quad (22)$$

Средний квадрат напряжения $1/f$ -шума столбцового ЗЧУ $V_{n,f1}^2(\tau_i)$ равен [14, 15, 18, 19]:

$$V_{n,f1}^2(\tau_i) = \left(1 + \frac{C_{SH} + C_{P3}}{C_4} \right)^2 \frac{2K}{C'_{OX} W_1 L_1} \ln \left[\frac{\tau_i}{\tau_{DA1}} \right], \quad (23)$$

где τ_{DA1} — время работы столбцового зарядочувствительного усилителя, с; W_1/L_1 — длина/ширина входных транзисторов $DA1$, м.

Шум сброса ЗЧУ подробно рассмотрен в [20]. Столбцовый ЗЧУ сбрасывается посредством ключа $S5$, что порождает дополнительный шум на выходе $DA1$:

$$V_{n,RST1}^2 = \frac{k_B T}{C_4} \left[1 + \frac{C_{P3} \cdot C_5}{C_4 \cdot (C_{P3} + C_4 + C_5)} \right], \quad (24)$$

где $V_{n,RST1}^2$ — средний квадрат напряжения шума сброса столбцового ЗЧУ.

Выходной ЗЧУ считывает заряд $N_5(\tau_i) = C_5 \times V_5(\tau_i)/q$, запертый ключом $S6$ на конденсаторе $C5$ до момента выборки. Следовательно, среднеквадратическое значение шумового заряда $N_{n,5}(\tau_i)$ на конденсаторе $C5$ также пропорционально напряжению шума на выходе $DA1$:

$$N_{n,5}(\tau_i) = \frac{C_5}{q} \sqrt{V_{n,TR1}^2(\tau_i) + V_{n,JN1}^2 + V_{n,f1}^2(\tau_i) + V_{n,RST1}^2}, \quad (25)$$

$N_{n,5}(\tau_i)$ преобразуется в напряжение шума на выходе $DA2$ аналогично (13):

$$V_{n,TR2}(\tau_i) = VDD - \frac{(C_5 + C_7) \cdot V_{ref} - q \cdot N_{n,5}(\tau_i)}{C_7}. \quad (26)$$

Средний квадрат напряжения теплового шума выходного ЗЧУ $V_{n,JN2}^2$ равен:

$$V_{n,JN2}^2 = \frac{2\gamma k_B T}{C_7} \left[\frac{C_5 + C_{P6} + C_7}{C_L + \frac{(C_5 + C_{P6}) \times C_7}{C_5 + C_{P6} + C_7}} \right]. \quad (27)$$

Средний квадрат напряжения $1/f$ -шума выходного ЗЧУ $V_{n,f2}^2(\tau_i)$ равен:

$$V_{n,f2}^2(\tau_i) = \left(1 + \frac{C_5 + C_{P6}}{C_7} \right)^2 \frac{2K}{C'_{OX} W_2 L_2} \ln \left[\frac{\tau_{DA1}}{\tau_{DA2}} \right], \quad (28)$$

где τ_{DA2} — время работы выходного ЗЧУ; W_2/L_2 — длина/ширина входных транзисторов $DA2$, м.

Общий шум канала считывания запишется в виде:

$$V_{n,FPA}(\tau_i) = \sqrt{V_{n,TR2}^2(\tau_i) + V_{n,JN2}^2 + V_{n,f2}^2(\tau_i) + V_{n,RST2}^2}, \quad (29)$$

где $V_{n,RST2}^2 = \frac{k_B T}{C_L}$ — шум сброса выходного ЗЧУ.

Результаты моделирования

В диапазоне длин волн от 8 до 10 мкм при температуре фона 300 К и поле зрения 30° число фотонов в потоке излучения, вычисленное по формуле Планка, составляет $1,85 \times 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Около 35 % излучения будет отражаться от границы раздела воздух—подложка. Тогда по формуле (9) при площади фотодиода $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ и квантовой эффективности 0,65 данный поток излучения будет генерировать фототок $I_{ph} = 5 \text{ нА}$. При величине темнового тока $I_{dark} = 1 \text{ нА}$, соответствующей температуре жидкого азота, сопротивлению фотодиода в рабочей точке $R_{PD} = 10^8 \text{ Ом}$ и $\zeta = 5,5$; $W = 1,4 \text{ мкм}$; $L = 2,6 \text{ мкм}$; $C'_{OX} = 2,75 \text{ фФ/мкм}^2$; $\mu = 500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ эффективность инжекции составила 93 %.

Выражение для вычисления ОСШ канала считывания равно:

$$SNR(\tau_i) = \frac{\Delta V_O(\tau_i)}{V_{n,FPA}(\tau_i)}, \quad (30)$$

Для достижения максимального ОСШ в режиме IWR необходимо подобрать оптимальное значение соотношения емкостей $K_C = C_2/(C_1 + C_2)$ при известной ограниченной величине $C_1 + C_2$, которую возможно разместить в ячейке. С одной стороны, необходимо увеличивать зарядовую емкость N_{well} , которая определяется величиной C_1 ,

для увеличения времени интегрирования и снижения вклада дробового шума фотодиода, вызванного флуктуациями потока излучения и темнового тока. Однако, с другой стороны, будет снижаться величина считываемого заряда N_{SH} (11). В какой-то момент произойдет такое снижение уровня выходного сигнала ячейки, на фоне которого вклад шума последующего узла канала считывания (столбцовый ЗЧУ) станет более значительным и приведет к снижению ОСШ ФПУ. Был проведен теоретический расчет зависимости ОСШ в режиме IWR от величины K_C , а также его производной (см. рис. 3, а) при следующих входных параметрах модели: температура ФПУ $T = 77 \text{ К}$; $K_f = 10^{-25}$; $\gamma = 1$; $\alpha = 10^{-4}$; $\beta = 1$; $VDD = 5 \text{ В}$; $V_{REF} = 2,5 \text{ В}$; $C_1 + C_2 = 0,51 \text{ пФ}$; $C_{P3} = 2 \text{ пФ}$; $C_4 = C_{SH}$; $C_5 = 1 \text{ пФ}$; $C_{P6} = 3 \text{ пФ}$; $C_7 = 1 \text{ пФ}$; $C_L = 10 \text{ пФ}$; $\tau_{read} = 2,5 \text{ мс}$; $\tau_{DA1} = 3 \text{ мкс}$; $\tau_{DA2} = 50 \text{ нс}$, $n_{frames} = 100$. Как видно, максимум ОСШ находится в точке $K_C = 0,17$.

Вклад основных механизмов шума в IWR и ITR режимах представлен на рис. 3, б и в соответственно. Максимальное время интегрирования в режиме IWR составило $\approx 380 \text{ мкс}$, ОСШ при котором равно 69,1 дБ. В режиме ITR максимальное время интегрирования $\approx 460 \text{ мкс}$, ОСШ 70,5 дБ. В обоих режимах доминирующим механизмом шума является дробовой шум фотодиода. В режиме IWR заметно увеличение вклада шума столбцового ЗЧУ.

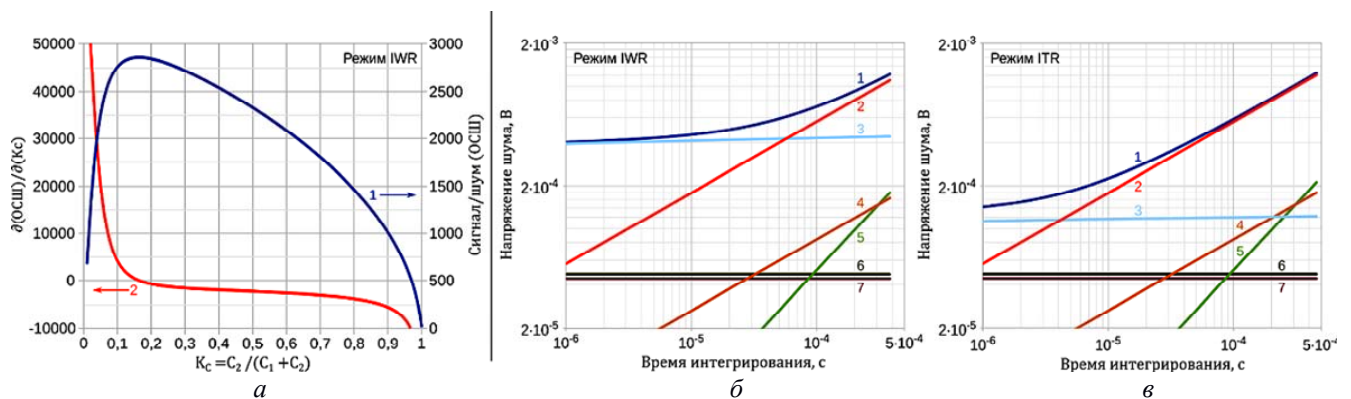


Рис. 3. Результаты моделирования: а) кривая 1 — зависимость максимального значения ОСШ от $K_C = C_2/(C_1 + C_2)$; кривая 2 — первая производная от ОСШ по K_C . б) и в) — зависимости основных механизмов шума от времени интегрирования в режиме IWR и ITR, соответственно: кривая 1 — общий шум ФПУ; 2 — дробовой шум фотодиода; 3 — общий шум столбцового ЗЧУ; 4 — тепловой шум фотодиода; 5 — $1/f$ -шум фотодиода; 6 — общий шум выходного ЗЧУ; 7 — шум сброса ячейки.

Заключение

В работе представлен и проанализирован аналоговый канал считывания фотосигнала с прямоинжекционным входным каскадом. Разработана модель, позволяющая рассчитать предельное ОСШ ФПУ на базе данного канала считывания в режимах ITR/IWR при наличии эксперименталь-

ных параметров фотодиодов и характеристик кремниевой технологии изготовления ИМСС. В модели учтены следующие механизмы шума: дробовой шум фотодиода, обусловленный флуктуациями потока излучения и темнового тока; тепловые шумы фотодиода и основных узлов канала считывания; шумы сброса; $1/f$ -шумы фотодиода и основных узлов канала считывания. В статье про-

демонстрировано применение модели для нахождения оптимальной доли от общей емкости накопительной ячейки, отведенной на емкость выборки/хранения, $K_C = C_2/(C_1 + C_2)$ для IWR режима. При фототоке 5 нА, темновом токе фотодиода 1 нА, общей емкости накопительной ячейки $C_1 + C_2 = 0,51$ пФ и рабочем напряжении ИМСС 5 В максимальное ОСШ ФПУ в режиме IWR составило 69,1 дБ при $K_C = 17$ %. В режиме ITR максимальное ОСШ ФПУ составило 70,5 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A Infrared Detectors – 2nd ed., (pp. 662, 744, 876 p.) — CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
2. Lester J. Kozlowski, Walter F. Kosonocky Handbook of Optics, Second Edition Volume I, Chapter 23: Infrared Detector Arrays. — McGraw-Hill, 1995.
3. Zverev A. V., Makarov Yu. S., Mikhantiev E. A., Sabinina I. V., Sidorov G. Yu., Dvoretzkiy S. A. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 643. P. 012055.
4. Sofradir Company LWIR Detectors Archives [электронный ресурс] // <http://www.sofradir.com/products/>
5. Mottin B., Pantigny P., Boch R. // Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications. 1997. Vol. XXIII. P. 117.
6. Lee I. I. and Polovinkin V. G. Mathematical Modeling of Multi-Element Infrared Focal Plane Arrays Based on the System ‘Photodiode – Direct-Injection Readout Circuit’, Photodetectors, Dr. Sanka Gateva (Ed.), — InTech. 2012. ISBN: 978-953-51-0358-5.
7. Enz C., Krummenacher F., Vittoz E. // Journal on Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 1995. P. 83. — Kluwer Academic Publishers.
8. Harrison R. R. MOSFET Operation in Weak and Moderate Inversion. — EE 5720/University of Utah.
9. Sze S. M., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition, 2006.
10. Зверев Г. И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: Учебное пособие. — М.: МИФИ, 2008.
11. Baker R. J. CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation, 3rd Edition, 2010.
12. Tobin S. P., Iwasa S., and Tredwell T. J. // IEEE Trans. ED. 1980. Vol. 27. P. 43.
13. Soo Ho Bae, Sang Jun Lee. // Journal of Electronic Materials, 2000. Vol. 29. No. 6.
14. Carusone T. C., Johns D. A., Kenneth W. M. Analog Integrated Circuit Design – 2nd ed. — John Wiley & Sons, Inc., 2011.
15. Behzad Razavi Design of Analog CMOS Integrated Circuits, Second Edition. — Published by McGraw-Hill Education, July 2015.
16. Kozlowski L. J., Luo J. and Tomasini A. Performance Limits in Visible and Infrared Imager Sensors. — Rockwell Science Center Thousand Oaks, CA 91360 USA, IEDM 99-869.
17. Schreier Richard // IEEE Transactions on Circuits and Systems–I: Regular papers. 2005. Vol. 52. No. 11.
18. Noulis T., Siskos S., Sarrabayrouse G. // IET Circuits Devices Syst. 2008. Vol. 2. No. 3. P. 324.
19. Helmuth Spieler. Electronics I – Amplifiers, Noise, and Signal Processing [Electronic resource], Solid State Detectors and Electronics – Electronics I, TRIUMF Summer Institute. 2007 (URL:http://www-physics.lbl.gov/~spieler/TSI-2007/PDF/Electronics_I.pdf).
20. Van Blerkom D. A. // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 8012. P. 80120G-1.

Signal-to-noise ratio optimization for MCT FPA based on the direct injection ROIC

S. A. Dvoretzkiy, A. V. Zverev, Yu. S. Makarov, and E. A. Mikhantiev

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS
13 Lavrentieva av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: makarov@isp.nsc.ru

Received July 29, 2016

The analytical model for evaluation of the signal-to-noise ratio for the MCT FPA based on direct injection readout channel operation in the ITR and IWR modes is presented. The considered readout channel consists of the direct injection MOS, storage and sample capacitors, column and output charge sensitive amplifiers. The proposed model includes contributions of shot, thermal and 1/f noise of photodiode, thermal and 1/f noise of the main parts of the ROICs, and reset noise. The model takes into account the injection efficiency of the photocurrent and the influence of parasitic capacitances of multiplexing buses.

PACS: 85.60 Dw; 85.60 Gz

Keywords: ROIC, CSA, injection efficiency, signal-to-noise ratio, MCT, HgCdTe, IWR.

REFERENCES

1. A. Rogalski, *Infrared Detectors – 2nd ed.*, (CRC Press Taylor & Francis Group, 2011), pp. 662, 744, 876.
2. L. J. Kozlowski and Walter F. Kosonocky, *Handbook of Optics, Second Edition Volume I, Chapter 23: Infrared Detector Arrays* (McGraw-Hill, 1995).
3. A. V. Zverev, Yu. S. Makarov, E. A. Mikhantiev, I. V. Sabinina, G. Yu. Sidorov, and S. A. Dvoretzkiy, *J. Phys.: Conf. Ser.* 643, 012055 (2015).
4. Sofradir Company, *LWIR Detectors Archives* (<http://www.sofradir.com/products>)
5. B. Mottin, P. Pantigny, and R. Boch, *Proc. SPIE 3061, Infrared Technology and Applications XXIII*, 117 (1997).
6. I. I. Lee and V. G. Polovinkin. *Mathematical Modeling of Multi-Element Infrared Focal Plane Arrays Based on the System 'Photodiode – Direct-Injection Readout Circuit', Photodetectors*, Dr. Sanka Gateva (Ed.), ISBN: 978-953-51-0358-5, (InTech., 2012).
7. C. Enz, F. Krummenacher, and E. Vittoz, *Journal on Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 83 (1995).
8. R. R. Harrison, *MOSFET Operation in Weak and Moderate Inversion* (EE 5720/University of Utah).
9. S. M. Sze and K. Ng. Kwok, *Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition*, (2006).
10. G. I. Zverev, *Physical Foundations of the Silicon Nanoelectronics* (MIFI, Moscow, 2008) [in Russian].
11. R. J. Baker, *CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation, 3rd Edition*, (2010).
12. S. P. Tobin, S. Iwasa, and T. J. Tredwell, *IEEE Trans. ED* 27, 43 (1980).
13. Bae Soo Ho and Lee Sang Jun, *Journal of Electronic Materials*, 29 (6), (2000).
14. Carusone Tony Chan, Johns D. A., and W. M. Kenneth, *Analog Integrated Circuit Design – 2nd ed.*, (John Wiley & Sons, Inc., 2011).
15. Razavi B., *Design Of Analog CMOS Integrated Circuits, Second Edition*, (Published by McGraw-Hill Education, July 2015).
16. L. J. Kozlowski, J. Luo and A. Tomasini, *Performance Limits in Visible and Infrared Imager Sensors*, (Rockwell Science Center Thousand Oaks, CA 91360 USA, IEDM 99-869).
17. R. Schreier, *IEEE Transactions On Circuits and Systems–I: Regular Papers* 52 (11), (2005).
18. T. Noulis, S. Siskos, and G. Sarabayrouse, *IET Circuits Devices Syst.* 2, 324 (2008).
19. Helmuth Spieler, *Electronics I – Amplifiers, Noise, and Signal Processing [Electronic resource], Solid State Detectors and Electronics – Electronics I*, (TRIUMF Summer Institute 2007) URL:http://www-physics.lbl.gov/~spieler/TSI-2007/PDF/Electronics_I.pdf.
20. D. A. Van Blerkom, *Proc. of SPIE* 8012, 80120G-1 (2011).