

УДК 621.3.049.77:621.383

Оптимизация шума накопительной ячейки БИС считывания для ближнего ИК- и УФ-диапазонов

П.А. Кузнецов, С.С. Хромов

Рассматриваются методы уменьшения шума БИС считывания для ближнего инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) спектральных диапазонов. Приведены схемотехнические способы шумовой коррекции в зависимости от формата фоточувствительных матриц.

PACS: 85.60 Dw; 85.60 Gz; 07.57 Kp

Ключевые слова: фотоприемное устройство, ФПУ, большая интегральная схема, БИС считывания, трансимпедансный усилитель, двойная коррелированная выборка.

Введение

Последние 8–10 лет разработчики оптоэлектронных приборов и систем уделяют повышенное внимание к ближнему ИК- и УФ-диапазонам, в т.ч. в направлении существенного улучшения характеристик соответствующих фотоприемных устройств (ФПУ) и их элементов.

Целью данной работы является выявление рациональных методов уменьшения шума БИС считывания для ФПУ ближнего ИК- и УФ-диапазонов.

БИС считывания формата 320×256 с шагом 30 мкм

В ОАО «НПО «Орион» были разработаны и исследованы соответствующие фотоприемные устройства (ФПУ) формата 320×256, основой которых является БИС считывания с трансимпедансным входом (СТИА). В отличие от схем с прямой инжекцией для среднего и дальнего ИК-диапазонов, такие БИС считывания успешно функционируют в диапазоне сверхмалых фототоков порядка 10^{-15} – 10^{-12} А. Ближайшим зарубежным аналогом для данного формата является БИС считывания ISC9809 [1]. В табл. 1 приведены некоторые основные параметры двух типов БИС считывания для проведения сравнительного анализа.

Следует отметить, что общим недостатком указанных БИС считывания является повышенный входной шум (до 70 е), что обусловлено доминированием шума входной ячейки.

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист.
Хромов Сергей Сергеевич, начальник дизайн-центра.
ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2
Тел.: (499) 374–81–31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2013 г.

© Кузнецов П.А., Хромов С.С., 2013

Таблица 1

БИС считывания	ISC9809	ОАО «НПО «Орион»»
Шаг ФЧЭ, мкм ²	30×30	30×30
Тип входной ячейки	СТИА	СТИА
Кол-во выходов	4/ 2/ 1	8/ 4
Чувствительность S_v , мкВ/е	16 ($C_{INT}=10$ фФ) 0.8 ($C_{INT}=200$ фФ)	16 ($C_{INT}=10$ фФ) 1,6 ($C_{INT}=100$ фФ)
Входной шум при $C_{INT}=10$ фФ	≤ 70 е	≤ 70 е
«Skimming» выходного сигнала	нет	есть
Напряжение питания, В	5.5	3,3
Макс. размах выходного сигнала, В	2.8	2,4

Оптимизированная по шуму накопительная ячейка БИС считывания формата 320×256 приведена на рис 1. Она состоит из трансимпедансного усилителя и схемы двойной коррелированной выборки (ДКВ). Анализ работы трансимпедансного усилителя на рис. 1 позволяет рассчитать суммарный входной шумовой заряд (дисперсию) без учета эффекта ДКВ:

$$\langle Q_n^2 \rangle = qI_{\text{dark}} T_{\text{INT}} + (2kT/R_{\text{PD}}) T_{\text{INT}} + kTC_{\text{INT}} + kTC_{\text{INT}} C_{\text{PD}} / (C_L + C_{\text{INT}}), \quad (1)$$

где q — заряд электрона; k — постоянная Больцмана; I_{dark} — темновой ток утечки фотодетектора (PD); T_{INT} — время накопления; R_{PD} — дифференциальное сопротивление фотодетектора; C_{INT} — накопительная емкость; C_{PD} — паразитная емкость фотодетектора; C_L — емкость, ограничивающая полосу пропускания СТИА.

Первые два слагаемых (дробовой и тепловой шум) определяются фотодетектором и,

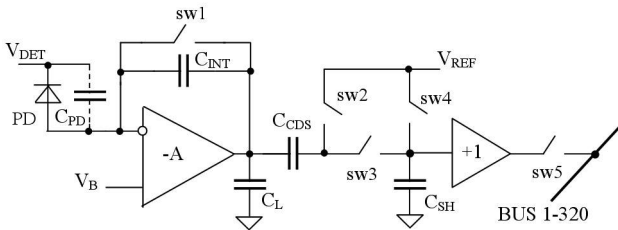


Рис. 1. Структурная схема оптимизированной по шуму накопительной ячейки.

следовательно, зависят от времени накопления. Третье и четвертое слагаемые определяют широкополосный шум накопительной ячейки БИС считывания: тепловой шум накопительной емкости или шум сброса и тепловой шум канала входного МОП-транзистора, скорректированный емкостью нагрузки C_L и приведенный к входу. Поскольку дисперсия теплового шума входного МОП-транзистора обратно пропорциональна крутизне МОП-транзистора ($\langle E_n \rangle^2 \approx 4kT/S$), а полоса усилителя с емкостной нагрузкой C_L и глубокой обратной связью прямо пропорциональна крутизне МОП-транзистора ($\Delta f \approx S/2\pi C_L$), то после интегрирования в широкой полосе теплового шума входного МОП-транзистора его крутизна в выражение (1) не входит.

Исследования показали, что в зависимости от типа фоточувствительного элемента (ФЧЭ) (на основе InGaAs/InP для ближнего ИК-диапазона и на основе AlGaIn/GaN для УФ-диапазона) выражение (1) упрощается. Поскольку ФЧЭ на основе $p-i-n$ -InGaAs/InP находятся в режиме генератора тока при смещении не менее 0,5 В, то учитывается только шумовая составляющая, обусловленная темновым током утечки I_{dark} фотодетектора. При этом тепловой шум динамического сопротивления

ния R_{PD} (с типовым значением $> 10^{14}$ Ом) становится пренебрежимо малым:

$$\langle Q_n^2 \rangle = qI_{\text{dark}} T_{\text{INT}} + kTC_{\text{INT}} + kTC_{\text{INT}} C_{\text{PD}} / (C_L + C_{\text{INT}}) \quad (2)$$

Напротив, ФЧЭ на основе AlGaIn/GaN целесообразно использовать при нулевом смещении, т.к. при этом $I_{\text{dark}} \approx 0$ и почти нет потерь в ампер-ваттной чувствительности (не более 5%) по сравнению с режимом смещения:

$$\langle Q_n^2 \rangle = (2kT/R_{\text{PD}}) T_{\text{INT}} + kTC_{\text{INT}} + kTC_{\text{INT}} C_{\text{PD}} / (C_L + C_{\text{INT}}) \quad (3)$$

Введение во входную ячейку схемы ДКВ (элементы C_{CDS} , sw2) позволяет исключить из выражений (2) и (3) тепловой шум накопительной емкости $\langle Q_T \rangle^2 = kTC_{\text{INT}}$. Таким образом:

$$\langle Q_n^2 \rangle = qI_{\text{dark}} T_{\text{INT}} + kTC_{\text{INT}} C_{\text{PD}} / (C_L + C_{\text{INT}}) \quad (4)$$

$$\langle Q_n^2 \rangle = (2kT/R_{\text{PD}}) T_{\text{INT}} + kTC_{\text{INT}} C_{\text{PD}} / (C_L + C_{\text{INT}}) \quad (5)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета шумового заряда по формулам (4) и (5) при следующих номиналах: $C_L = 800$ фФ, $C_{\text{INT}} = 10$ фФ, $C_{\text{PD}} = 200$ фФ (AlGaIn, $30 \times 30 \mu\text{m}^2$) или $C_{\text{PD}} = 50$ фФ (InGaAs, $30 \times 30 \mu\text{m}^2$).

Меньшее значение шума в ФПУ с InGaAs/InP при $T_{\text{int}} = 10$ мс (т.е. при кадровой частоте 100 Гц) объясняется большим значением паразитной емкости фотодетектора $C_{\text{PD}} = 200$ фФ в матрице AlGaIn/GaN. Для расчета удельной обнаружительной способности использовались следующие выражения [2]:

Таблица 2

$T_{\text{int}}, \text{мс}$	10	100	1000	Примеч.
Шумовой заряд в электронах, ФЭМ с AlGaIn/GaN	27	60	180	$R_{\text{PD}} = 10^{13}$ Ом
	21	27	60	$R_{\text{PD}} = 10^{14}$ Ом
	20	21	27	$R_{\text{PD}} = 10^{15}$ Ом
Шумовой заряд в электронах, ФЭМ с InGaAs/InP	114	360	1140	$I_{\text{dark}} = 2 \cdot 10^{-13}$ А
	37	114	365	$I_{\text{dark}} = 2 \cdot 10^{-14}$ А
	15	37	114	$I_{\text{dark}} = 2 \cdot 10^{-15}$ А
Тепловой шум C_{int} в электронах	40	40	40	$C_{\text{int}} = 10^{-14}$ Ф при $T = +20$ °С

Таблица 3

$T_{\text{int}}, \text{мс}$	10	100	1000	Примеч.
$D^*, \text{Вт}^{-1} \text{смГц}^{1/2}$ AlGaIn/GaN	1.7E13	2.4E13	2.5E13	$R_{\text{PD}} = 10^{13}$ Ом при $U_{\text{см.}} = 0$, $T = 300$ К
$D^*, \text{Вт}^{-1} \text{смГц}^{1/2}$ InGaAs/InP	2E13	2E13	2E13	$I_{\text{dark}} = 2 \cdot 10^{-13}$ А при $U_{\text{см.}} = 0.5$ В, $T = 300$ К

$$D_{\lambda}^* = (\lambda/hc) NEI^{-1} (\Delta f)^{1/2} A_D^{-1/2} \quad (6)$$

$$NEI = \langle Q_N^2 \rangle^{1/2} (T_{INT} \eta A_D)^{-1}, \quad (7)$$

где NEI (*noise equivalent irradiance*) — пороговая плотность потока фотонов (фотон/с·см²); η — квантовая эффективность ($\approx 50\%$); A_D — площадь фотодетектора (см²); $\langle Q_N^2 \rangle$ — шумовой заряд (дисперсия) в электронах т.е. $\langle Q_N^2 \rangle = \langle Q_n^2 \rangle / q^2$.

БИС считывания формата 640×512 с шагом 15 мкм

Основной спецификой проектирования накопительных ячеек с шагом 15 мкм является дефицит площади, необходимой для размещения компонентов ячейки: МОП-транзисторов, конденсаторов, индиевых микроконтактов, сигнальных и управляющих шин. По этой причине способы оптимизации шума накопительной ячейки, используемые в БИС считывания 320×256 с шагом 30 мкм, не могут применяться непосредственно в пределах ячейки и выносятся за границы ячейки или кристалла БИС. При этом построение усилительной части накопительной ячейки сводится к минимальному использованию МОП-транзисторов.

Для БИС считывания форматов не менее 1 мегапикселя и с шагом не более 18 мкм наибольшее распространение получила схема трехтранзисторной накопительной ячейки SFD (*source follower detector*) [3]. В данной схеме (рис. 2, а) накопление фотогенерированного заряда происходит на собственной емкости фотодетектора C_{PD} после подачи импульса сброса Res. Полученное при этом напряжение фотосигнала V_S через повторитель напряжения (*source follower*) считывается через ключ по импульсу адреса Sel на столбцовую шину BUS. Основные достоинства этой схемы:

- простота исполнения и малые габариты;
- отсутствие потребляемого тока во время накопления.

Недостатками схемы являются:

- низкая вольтовая чувствительность из-за значительно большей емкости фотодетекторов (десятки фФ) относительно емкости накопления в СТИА (единицы фФ);
- линейный динамический диапазон выходного сигнала в 2–3 раза ниже по сравнению с СТИА;
- отсутствие режима *snap-shot*, только конвейерное считывание (*rolling*).

Однако, как отмечается в зарубежной литературе [3], в СТИА за счет протекания потребляемого ячейкой тока наблюдается эффект свечения (*glow*) кремниевых *p-n*-переходов в видимом и ближнем ИК-диапазонах, что приводит к фотогенерации паразитных зарядов от фотодетекторов или кремниевых *p-n*-переходов БИС (например, сток-

подложка в МОП-транзисторе сброса) до уровня выше темнового. В накопительных ячейках SFD этот эффект, естественно, отсутствует.

Авторами был разработан и успешно применен кристалл БИС считывания формата 128×128 для фоточувствительной матрицы ближнего ИК-диапазона на базе InGaAs/InP [4]. Основу накопительной ячейки с мультиплексируемой нагрузкой составляла также трехтранзисторная схема (рис. 2, б), но со свойствами СТИА и SFD одновременно. Поскольку режим СТИА в такой ячейке существует только в момент считывания заряда (фаза Sel), накопленного на емкости C_{PD} , то при анализе шумов следует в качестве емкости нагрузки C_L в выражении (2) принять емкость столбцовой шины C_{BUS} :

$$\langle Q_n^2 \rangle = qI_{\text{dark}} T_{INT} + kTC_{INT} + kTC_{INT} C_{PD} / (C_{BUS} + C_{INT}) \quad (8)$$

Ввиду больших значений емкости C_{BUS} (3–5 пФ), высокочастотное ослабление шума усилительного МОП-транзистора будет происходить более эффективно и третьим слагаемым в (8) можно пренебречь. Второе слагаемое kTC_{INT} (шум сброса) можно устранить, но уже внешней схемой ДКВ, т.е. за пределами БИС считывания, применяя двукратное считывание кадра — в начале накопления и в конце накопления, с последующим вычитанием этих кадров (рис.3).

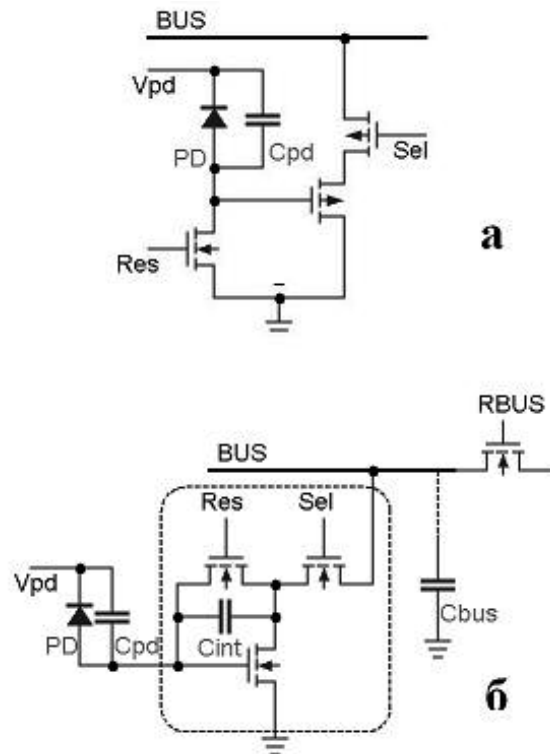


Рис. 2. Схемы транзисторной накопительной ячейки: а) схема трехтранзисторной накопительной ячейки SFD (для фотодиода *p* на *n*); б) схема трехтранзисторной накопительной ячейки с мультиплексируемой нагрузкой.

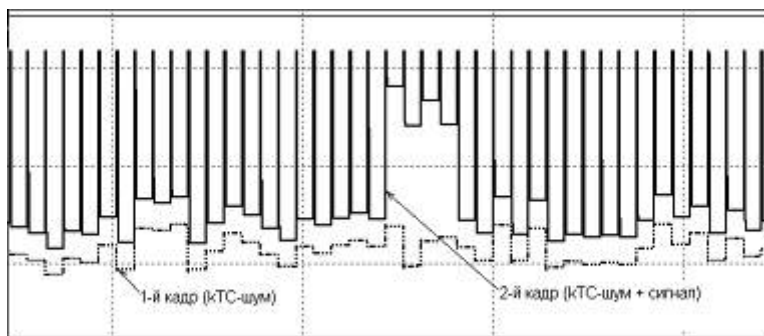


Рис. 3. Моделирование работы накопительной ячейки с имитацией шума сброса и с двукратным считыванием кадров (принцип ДКВ).

Заключение

Для минимизации шума накопительных ячеек БИС считывания, используемых в низкофоновых матричных ФПУ ближнего ИК- и УФ-диапазонов, необходимо использовать метод ДКВ. В БИС с входными ячейками большой площади ($\geq 30 \times 30$ мкм²) схема ДКВ может быть реализована непосредственно в ячейке. В ячейках меньшей площади схема ДКВ выносится за границы ячейки или кристалла БИС.

Литература

1. ISC9809 Specification — FLIR Systems Inc., www.corebyindigo.com.
2. *Reine M.B., Hairston A.* et al. // Proc. of SPIE. 2006. V. 6119. P. 611901-1.
3. *Fieque B., Sanson E.* et al. Infrared ROIC for very low flux and low noise applications. — Sofradir, www.irfu cea.fr.
4. *Зайцев А.А., Хромов С.С., Кузнецов П.А.* // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 100.

ROIC noise optimization in SWIR and UV photodetector arrays

P.A. Kuznetsov and S.S. Khromov

Orion R&P Association
46/2 Enthuziastov sh., Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Methods of ROIC noise reducing are considered. Schematic ways of noise correction in different size arrays are shown.

PACS: 85.60 Dw; 85.60 Gz; 07.57 Kp

Keywords: FPA, ROIC, CTIA, CDS

Bibliography — 4 references

Received October 10, 2013