

УДК 621.3.049.77

Моделирование БИС считывания фотосигнала матричных инфракрасных фотоприемников с построчным накоплением

К. О. Болтарь, Ю. С. Каракозов, В. В. Полунеев

Проведено математическое моделирование ячейки секции накопления кремниевой БИС считывания матричных фотоприемных устройств с построчным накоплением с использованием программного пакета схемотехнического моделирования в формате PSpice. Исследовано влияние пульсаций напряжений управляющих сигналов на выходной сигнал. Объяснен экспериментально обнаруженный ранее дополнительный шум многорядных фотоприемных устройств, работающих в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), возникающий при неравномерном движении сканирующего устройства.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz, 42.82.Fw, 07.50.Qx

Ключевые слова: математическое моделирование электронных цепей, матричное фотоприемное устройство, БИС считывания, временная задержка и накопление, сканирующее устройство, PSpice.

Введение

Для создания различных тепловизионных систем инфракрасного (ИК) диапазона широко используются фотоприемные устройства (ФПУ) на основе матриц фотодиодов [1]. Такие фотоприемники, содержащие матрицу ИК-фотодиодов на основе узкозонных полупроводников (соединения кадмий—ртуть—теллур, антимонид индия, арсенид галлия и др.), включают в себя также кремниевую БИС считывания, механически и электрически соединенную с матрицей при помощи индиевых микроконтактов. БИС обеспечивает считывание и накопление фототока, предварительную обработку и вывод сигнала каждого ИК-фотодиода матрицы. От ее характеристик в значительной степени зависит качество ФПУ.

В работе исследована схемотехника БИС считывания матричных ИК-фотоприемников с построчным накоплением фототока [2]. БИС считывания содержит матрицу ключевых МОП-транзисторов, которая соединяется поэлементно с матрицей фотодиодов, регистр управления затворами ключей и секцию накопления.

Цель данной работы — исследование функционирования ячейки секции накопления БИС считывания посредством математического моделирова-

ния с использованием программного пакета схемотехнического моделирования и определение влияния пульсаций питающих напряжений на нагрузки выходного сигнала.

Принцип работы секции накопления БИС считывания МФПУ с построчным накоплением

Применительно к матричному фотоприемному устройству (МФПУ) рассмотрим принцип работы одной ячейки секции накопления. На рис. 1 изображена принципиальная электрическая схема, использованная при моделировании канала секции накопления БИС с построчным накоплением. Фотодиод в схеме представлен тремя элементами: собственно диод D_1 , идеальный источник тока I_1 и резистор R_1 .

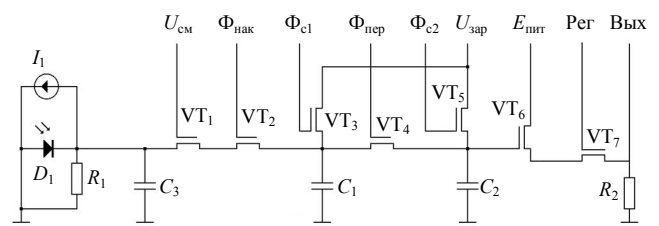


Рис. 1. Схема ячейки секции накопления

МОП-транзистор VT_2 секции накопления работает в ключевом режиме и определяет время накопления T_{is} , в течение которого ток фотодиода поступает в накопительный конденсатор C_1 . Транзистор VT_1 усиливает фотосигнал по мощности и устраняет влияние изменения напряжения на конденсаторе C_1 на режим работы фотодиода. Этот транзистор должен работать в подпороговом режиме и иметь малый уровень собственных шумов и малый разброс пороговых напряжений по длине

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, начальник НТК, профессор.

Каракозов Юрий Сергеевич^{1,2}, инженер, студент.

Полунеев Владимир Васильевич¹, главный специалист.

¹ФГУП «НПО "Орион"», ГНЦ РФ.

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел. (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, г. Долгопрудный, МО, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 20 мая 2011 г.

© Болтарь К. О., Каракозов Ю. С., Полунеев В. В., 2011

секции накопления. Регулируя напряжение на затворе транзистора VT₁, можно подбирать напряжение смещения фотодиодов. Емкость C₃ имитирует входную паразитную емкость ячейки, состоящую из емкости фотодиода, линейки стоков ключевых МОП-транзисторов и соединительной шины, которая обусловлена емкостью одной линейки матрицы ключевых МОП-транзисторов.

Перед началом периода накопления конденсатор C₁ с помощью транзистора VT₃, работающего в ключевом режиме, заряжается до начального уровня, равного напряжению источника питания U_{зар}. В процессе накопления конденсатор разряжается на величину, пропорциональную протекающему фототоку. По завершении периода накопления значение напряжения на конденсаторе накопления U₁ связано с величиной фототока I_{ph} и временем накопления T_i следующим выражением:

$$U_1 = U_{зар} - \frac{I_{ph} \cdot T_i}{C_1}.$$

Здесь не учитывается накопление заряда на паразитной емкости C₃. Ее влияние будет обсуждено в последующем.

По окончании периода накопления конденсатор C₁ через открываемый на короткое время транзисторный ключ VT₄ подключается к конденсатору хранения C₂, который предварительно заряжается до напряжения U_{зар} через транзисторный ключ VT₅. В результате такого подключения происходит перераспределение зарядов между конденсаторами C₁ и C₂ и напряжение на конденсаторах устанавливается равным:

$$U_2 = U_{зар} - \frac{I_{ph} \cdot T_i}{C_1 + C_2}. \quad (1)$$

Далее транзисторный ключ VT₄ закрывается, разделяя конденсаторы C₁ и C₂. На этом цикл работы ячейки накопления завершается и начинается новый цикл накопления фототока. Аналогичный процесс происходит во всех ячейках секции накопления кремниевой БИС считывания.

В МФПУ с построчным накоплением процесс накопления фототока на конденсаторах C₁ ячеек секции накопления происходит последовательно с каждой линейки (строки) матрицы фотодиодов. Одновременно с процессом накопления на конденсаторах C₁ фототока следующей строки фотодиодов производится последовательное считывание уровней напряжений фотосигнала предыдущей строки фотодиодов, установившихся на конденсаторе C₂. Считывание происходит с помощью транзисторных ключей VT₇, которые управляются динамическим регистром сдвига и последовательно передают напряжение на конденсаторах C₂ соот-

ветствующих ячеек на один выход за время одного цикла накопления.

Характеристики компонентов секции накопления

Параметры моделей электронных компонентов схемы в формате PSpice подобраны в соответствии с реальными характеристиками, полученными экспериментальным путем.

Определяющими для анализа схемы являются модели фотодиода и транзистора VT₁, работающего в подпороговом режиме. Остальные элементы схемы представлены традиционными моделями 1 и 2 уровня формата PSpice с параметрами, определенными из топологии БИС.

Фотодиод

Фотодиод в модели имитируется тремя элементами: диод D₁, обладающий низкой барьерной емкостью, идеальный источник тока I₁ и резистор R₁.

Источник тока имитирует различные фоновые составляющие тока, которые определяются относительным отверстием охлаждаемой диафрагмы и температурой фона вокруг цели. Ток через параллельное диоду сопротивление R₁ вместе с туннельными составляющими тока диода имитирует утечки фотодиодов, обусловленные дефектами материала КРТ и недостатками технологии изготовления фотодиода.

На рис. 2 представлена ВАХ *реального* фотодиода, полученная экспериментальным путем. На рис. 3 отражено семейство ВАХ *модели* фотодиода для различных значений дифференциального сопротивления диода. Эти кривые находятся в хорошем соответствии, что указывает на высокое качество созданной модели. Изменение сопротивления утечки и туннельного тока диода позволяет изменять дифференциальное сопротивление диода в рабочей точке (U_{оп} ≈ 50 мВ).

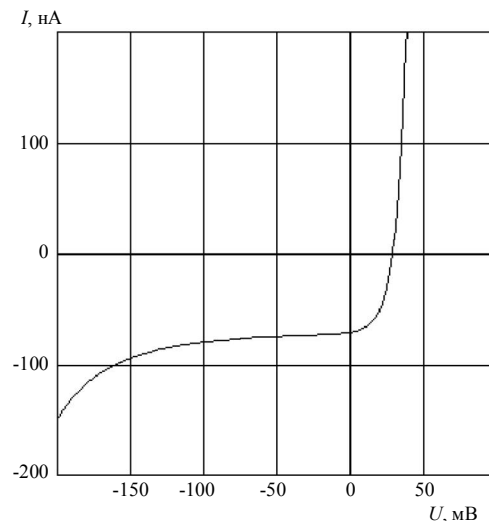


Рис. 2. Экспериментальная характеристика фотодиода

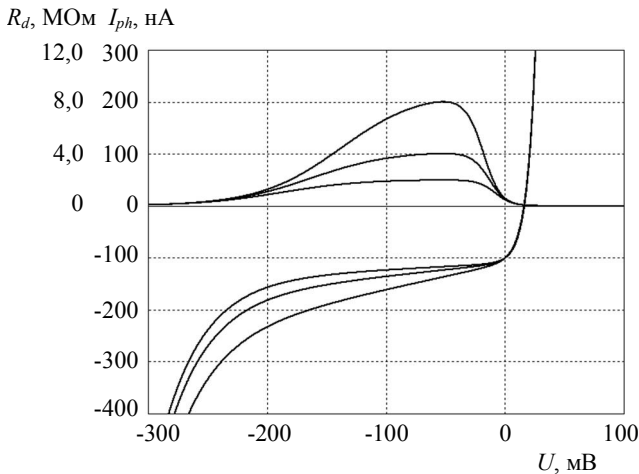


Рис. 3. Семейство ВАХ модели фотодиода

Подпороговый транзистор

Наиболее сложной и важной моделью в задаче является модель транзистора VT_1 , работающего в подпороговом режиме, который характеризуется экспоненциальной зависимостью тока стока от напряжения затвор—исток.

Зависимость тока стока от напряжения затвор—исток транзистора VT_1 вблизи порогового напряжения ($U_T = 0,6$ В) показана на рис. 4 (масштаб по току логарифмический). Как видно, модель транзистора хорошо имитирует работу в подпороговом режиме (прямой участок левее $V_T = 0,6$ В).

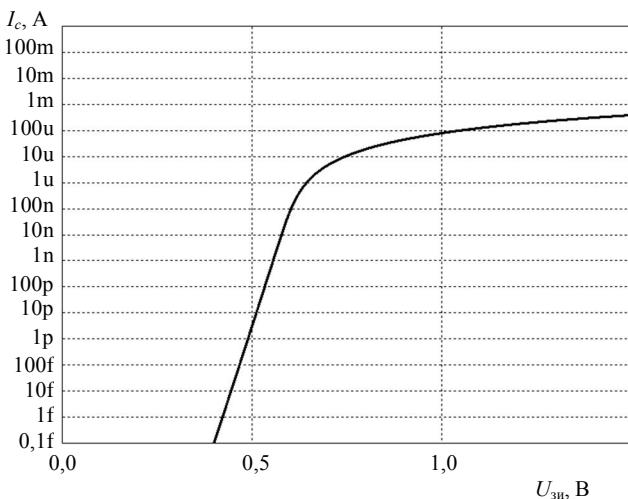


Рис. 4. Зависимость тока стока от напряжения затвор—исток "подпорогового" транзистора

При подаче на затвор транзистора напряжения $U_{см} = 0,65$ В он поддерживает напряжение на истоке равным $U_{оп} \approx 50$ мВ, тем самым стабилизируя работу диода вблизи оптимальной рабочей точки его ВАХ.

Результаты моделирования

Проведен анализ факторов, влияющих на уменьшение коэффициента преобразования фототока в выходное напряжение. Коэффициент преобразования позволяет оценить эффективность работы схемы с позиции чувствительности к сигналу.

Расчет коэффициента преобразования ток фотодиода — выходное напряжение

Малое изменение фототока i в соответствии с формулой (1) вызывает изменение напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 после распределения зарядов на следующую величину (здесь и далее малыми буквами обозначаются приращения соответствующих напряжений и токов):

$$u_1 = u_2 = \frac{i \cdot T_i}{C_1 + C_2},$$

где T_i — время накопления;
 C_1 и C_2 — емкости конденсаторов накопления и хранения, соответственно.

Коэффициент усиления истокового повторителя:

$$K_{out} = \frac{u_s}{u_g} = \frac{R \cdot g_m}{1 + R \cdot g_m}, \quad (2)$$

где g_m — крутизна транзистора, а R — сопротивление в нагрузке истокового повторителя (резистор R_4).

Получаем выражение для коэффициента преобразования:

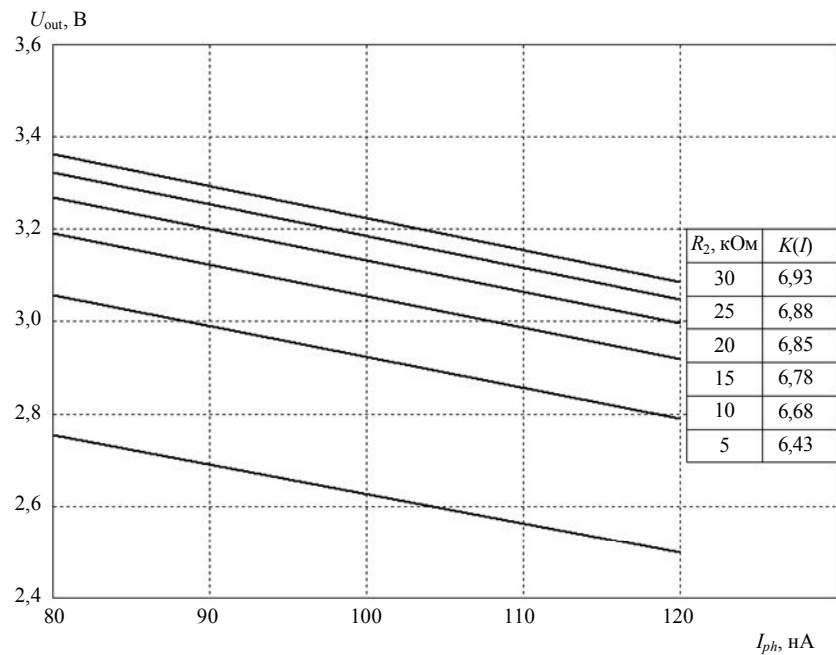
$$K(I) = \frac{u_{out}}{i} = \frac{u_2 \cdot K_{out}}{i} = \frac{T_i}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R \cdot g_m}{1 + R \cdot g_m}. \quad (3)$$

С учетом характерных для схемы значений величин, а именно, $T_i = 18$ мкс, $C_1 = 2$ пФ, $C_2 = 0,5$ пФ, $R = 20$ кОм, $g_m = 0,65$ мСм, получаем $K(I) \approx 6,69$ В/мкА.

Моделирование коэффициента преобразования ток фотодиода — выходное напряжение

На рис. 5 показана зависимость выходного напряжения от фототока при различных значениях сопротивления в нагрузке истокового повторителя. По данным графика определена зависимость коэффициента преобразования от сопротивления нагрузки, которая представлена в таблице на графике. Повышение коэффициента преобразования обусловлено увеличением коэффициента усиления истокового повторителя при увеличении сопротивления нагрузки в соответствии с формулой (2).

Рис. 5. Зависимость выходного напряжения от фототока при вариации сопротивления R_2



Малая амплитуда выходного сигнала (менее 3,5 В при напряжении заряда 6 В) обусловлена большим пороговым напряжением и малой крутизной выходного транзистора VT_6 , что свойственно схемотехнике на однополярных полевых транзисторах.

Влияние входной емкости секции на характеристики МФПУ

Оценим влияние паразитной емкости C_3 на работу ячейки секции накопления.

В процессе накопления фототока на емкости C_1 напряжение на паразитной емкости C_3 постоянно и равно напряжению рабочей точки фотодиода U_{op} . За время перерыва T_p между окончанием одного периода накопления и началом следующего, пока закрыт ключ VT_2 , емкость C_3 разряжается фототоком I_{ph} до напряжения (считается, что емкость не разряжается полностью):

$$U_{ir} = U_{op} - \frac{I_{ph} \cdot T_p}{C_3}.$$

В начале следующего цикла накопления при открытии ключевого транзистора VT_2 паразитная емкость C_3 перезаряжается до напряжения рабочей точки диода за счет падения напряжения на емкости накопления C_1 , равного

$$\Delta U = \frac{(U_{op} - U_{ir}) \cdot C_3}{C_1} = \frac{I_{ph} \cdot T_p}{C_1}.$$

Таким образом, наличие паразитной емкости C_3 эффективно увеличивает время накопления на величину T_p и, тем самым, вносит дополнительный вклад в выходное напряжение, повышая коэффициент преобразования.

Данный механизм объясняет экспериментально обнаруженный ранее дополнительный шум многорядных ФПУ, работающих в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), возникающий при неравномерном движении сканирующего устройства [3]. Дополнительный шум обусловлен накоплением фототока на паразитной емкости C_3 во время перерыва между циклами накопления, которое изменяется при неравномерном движении сканера.

Из формулы (3) следует, что $K(T_i) = \frac{u_{out}}{T_i} = \frac{I_{ph}}{C_1 + C_2} \cdot \frac{R \cdot g_m}{1 + R \cdot g_m} = 37,2 \text{ мВ/мкс}$ при $I_{ph} = 100 \text{ нА}$.

Результаты моделирования дают значение в 39,8 мВ/мкс.

На рис. 6 представлена зависимость выходного напряжения от времени перерыва T_p для различных значений паразитной емкости C_3 .

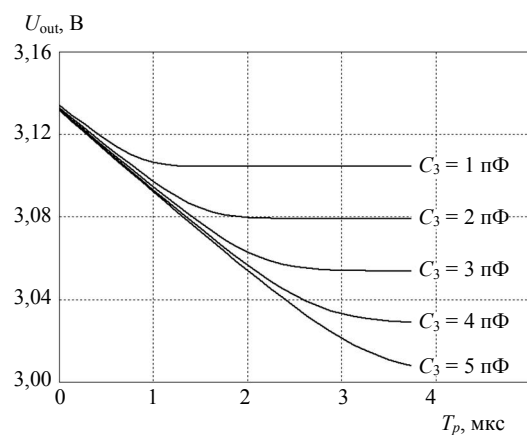


Рис. 6. Зависимость выходного напряжения от времени перерыва T_p между циклами накопления

В табл. 1 представлена зависимость от паразитной емкости C_3 помехи, обусловленной неравномерностью движения сканера. Расчеты сделаны для следующих характерных параметров сканера и тактовой диаграммы управления МФПУ формата 4×288 типа ФЭМ10М (производство ФГУП «НПО "Орион"»), а именно, тактовая частота 8 МГц, число рабочих тактов секции накопления — 152, из них 144 такта вывода информации, среднее число тактов перерыва между последующими циклами накопления — 15, неравномерность числа тактов перерыва из-за неравномерности движения сканера — 2.

Таблица 1

Величина помехи в зависимости от паразитной емкости C_3

Паразитная емкость C_3 , пФ	Величина помехи, мВ	Величина помехи при трех тактах зарядки емкости, мВ
1	29,6	0,4
2	53,3	2,3
3	69,5	6,0
4	75,4	10,6
5	77,8	15,7

Существенное уменьшение паразитной емкости затруднено, так как емкость фотодиода составляет порядка 1 пФ и не зависит от характеристик секции накопления, а уменьшение емкостей четырех областей стоков транзисторов и емкости соединительной шины фотодиод—секция (1—3 пФ) требует уменьшения нормы проектирования БИС. Оценки показывают, что величина шума на выходе секции накопления, обусловленного дробовым шумом фотодиода при характерном токе фотодиода 100 нА, составляет 0,36 мВ. Поэтому данный эффект существенно ухудшает качество тепловизионного изображения.

Для уменьшения влияния паразитной емкости необходимо изменить тактовую диаграмму управляющих сигналов таким образом, чтобы зарядка емкости накопления происходила при включенной фазе накопления и продолжалась не один такт, а три—пять тактов (в зависимости от величины паразитной емкости), во время которых паразитная емкость заряжается до напряжения рабочей точки диода независимо от времени ее разряда во время перерыва (см. табл. 1).

Влияние пульсаций напряжений управляющих сигналов на выходной сигнал

Одним из факторов, определяющих стабильность работы ячейки секции накопления, является чувствительность выходного напряжения к пульсациям напряжений различных цепей питания.

Эти данные необходимы для правильного проектирования схем управления МФПУ. В работе рассмотрены: напряжение смещения $U_{см}$, стабилизирующее напряжение рабочей точки фотодиода, напряжение заряда $U_{зар}$ емкостей хранения и накопления, напряжения питания $E_{пит}$ истокового повторителя и амплитуда управляющих сигналов A ключевых транзисторов. Чувствительность к каждому из питающих напряжений проанализирована для двух фотодиодов с дифференциальными сопротивлениями 8 и 1 МОм.

Напряжение смещения

Напряжение смещения определяет напряжение рабочей точки диода $U_d = U_{см} - U_T$, где U_T — пороговое напряжение транзистора, откуда (для малых изменений) $u_d = u_{см}$. Изменение фототока $i = \frac{u_d}{R_d} = \frac{u_{см}}{R_d}$. Таким образом, с учетом (3) получаем:

$$\frac{u_{out}}{u_{см}} = \frac{T_i}{R_d(C_1 + C_2)} \cdot \frac{R \cdot g_m}{1 + R \cdot g_m},$$

что дает значения 0,84 и 6,69 для фотодиодов с дифференциальным сопротивлением 8 и 1 МОм, соответственно. Такой подсчет является упрощением, так как не учитывает эффекты, связанные с наличием паразитных емкостей и токов утечки. Результаты моделирования дают значения в 0,65 и 4,82 для фотодиодов с R_d 8 и 1 МОм, соответственно (рис. 7). Высокое дифференциальное сопротивление фотодиода — залог стабильной работы ячейки секции накопления.

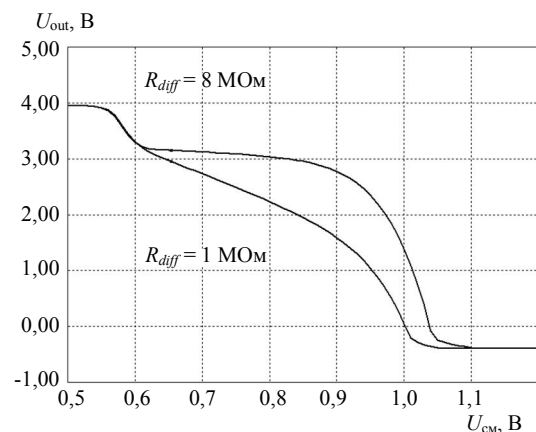


Рис. 7. Зависимость выходного напряжения от напряжения смещения подпорогового транзистора

Напряжение заряда конденсаторов

Чувствительность выходного напряжения к изменению напряжения заряда конденсаторов $U_{зар}$ равна 0,91 и не зависит от дифференциального сопротивления фотодиода (рис. 8).

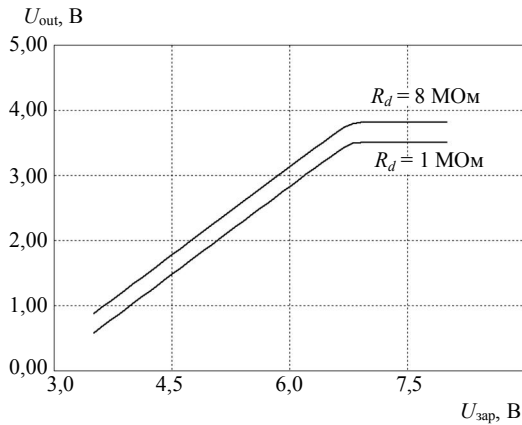


Рис. 8. Зависимость выходного напряжения от напряжения заряда конденсаторов хранения и накопления

Эта величина есть ничто иное, как коэффициент усиления истокового повторителя

$$K_{out} = \frac{u_s}{u_g} = \frac{R \cdot g_m}{1 + R \cdot g_m} = 0,93.$$

Напряжение $U_{зар}$ не должно превышать напряжение на затворах ключевых транзисторов за вычетом их порогового напряжения (7 В).

Напряжение питания истокового повторителя

На рис. 9 представлена зависимость выходного напряжения от напряжения питания истокового повторителя $E_{пит}$. Фактически это характеристика транзистора VT₆ — зависимость тока стока от напряжения сток—исток. Вариация по R_d — это вариация по напряжению затвора.

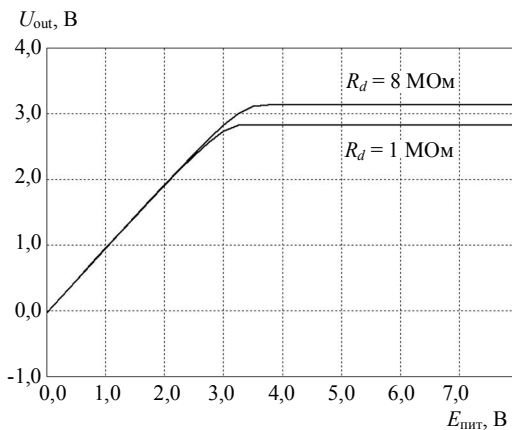


Рис. 9. Зависимость выходного напряжения от напряжения питания истокового повторителя

Для работы истокового повторителя напряжение на стоке транзистора VT₆ должно превышать напряжение на его затворе за вычетом порогового напряжения. При значении выше $E_{пит} = U_{зар} - U_T = 5$ В схема нечувствительна к его изменению, так как выходный транзистор VT₆ работает в насыщении по току стока.

Амплитуда управляющих сигналов

На рис. 10 представлена зависимость выходного напряжения от напряжения A , управляющего затворами ключей. Это напряжение должно полностью открывать транзисторы, работающие в ключевом режиме, т. е., как минимум, на их пороговое напряжение превышать все сигналы в схеме. При этом условии схема нечувствительна к пульсациям напряжения управляющих сигналов.

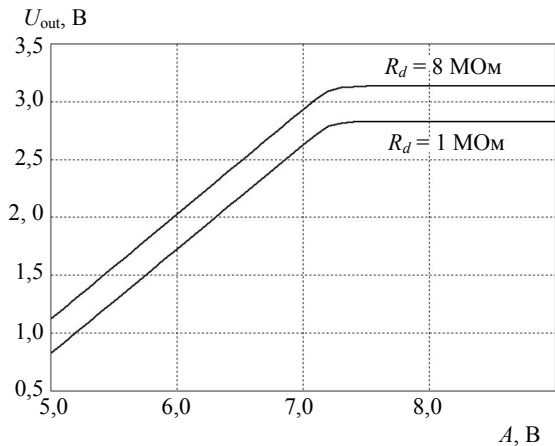


Рис. 10. Зависимость выходного напряжения от амплитуды управляющих сигналов ключевых транзисторов

В табл. 2 приведены результаты анализа чувствительности выходного напряжения к пульсациям питающих напряжений. Как видно, наибольший вклад в нестабильность выходного сигнала дают пульсации напряжения смещения подпорогового транзистора $U_{см}$, особенно для относительно малых значений дифференциального сопротивления фотодиода R_d .

Таблица 2

Чувствительность выходного напряжения U_{out} к пульсациям питающих напряжений для разных R_d

Дифференциальное сопротивление фотодиода	Напряжение смещения, $U_{см}$	Напряжение заряда, $U_{зар}$	Напряжение питания, $E_{пит}$	Амплитуда управляющих сигналов, A
$R_d = 1$ МОм	4,82	0,91	~ 0	~ 0
$R_d = 8$ МОм	0,65	0,91	~ 0	~ 0

Заключение

Разработана модель электрической схемы ячейки секции накопления, учитывающая паразитные компоненты топологии БИС считывания. По данной модели проведено математическое моделирование ячейки секции накопления с помощью программного пакета схемотехнического моделирования.

Создана электронная модель фотодиода на основе соединений кадмий—ртуть—теллур по его экспериментальным фотоэлектрическим характеристикам.

Показано, что уменьшение динамического диапазона выходного сигнала в 1,8—2,5 раза обусловлено малой крутизной выходного транзистора секции накопления, изготовленного по *n*-МОП-технологии.

Объяснен обнаруженный ранее экспериментально дополнительный шум многорядных фотоприемных устройств, работающих в режиме временной задержки и накопления, возникающий при неравномерном движении сканирующего устройства.

Показано, что наибольший вклад в пульсации выходного сигнала дает нестабильность напряжения смещения подпорогового транзистора. При уменьшении дифференциального сопротивления фотодиода от 8 до 1 МОм коэффициент передачи пульсации напряжения смещения подпорогового транзистора в выходной сигнал увеличивается от 0,65 до 4,82.

Полученные в ходе работы результаты позволяют оценить эффективность работы секции накопления и разработать направления модернизации БИС считывания фотоприемного устройства для улучшения его работы.

Литература

1. Болтарь К. О. и др. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 32.
2. Burlakov I. D. et al. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2008. V. 17. No. 1. P. 52.
3. Saginov L. D. et al. // Proceedings of SPIE. 2003. V. 5126. P. 105.

Line integration FPA's ROIC simulation

K. O. Boltar^{1,2}, Yu. S. Karakozov^{1,2}, V. V. Poluneev¹

¹Orion R&P Association,
46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111402, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology,
9 Institute al., Dolgoprudny, 141700, Russia

Mathematical simulation of line integration IR array readout integrated circuit (ROIC) has been implemented. PSpice analysis program of electronic circuits was used for the investigation. Output signal fluctuation due to control lines noise has been investigated. An additional output fluctuation effect connected with scanner jitter which was experimentally encountered earlier was explained while simulating.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz, 42.82.Fw, 07.50.Qx

Keywords: read-out IC, ROIC, time delay integration, TDI, IR array, electronic design automation, PSpice program.