

Разработка фоточувствительных приборов с зарядовой связью на основе линейки фотодиодов, оснащённой устройством антиблуминга и электронного затвора

Борисов И. С., Климентова М. И., Костюков Е. В., Маклаков А. М.

Рассмотрены вопросы моделирования работы фотоячейки, выходного сдвигового регистра и выходного устройства линейного фоточувствительного прибора с зарядовой связью.

Для построения линейных ФПЗС наиболее рациональной представляется архитектура, при которой с одной стороны линейки фотодиодов параллельно ей располагается устройство антиблуминга, а с другой - буферная область накопления и сдвиговый регистр. На рис. 1 изображено поперечное сечение ячейки линейного ФПЗС. Выбор слоя поликремния для затворов определяется условием самосовмещения ионно-легированных областей под ними без использования фоторезистных масок при имплантации ионов. При этом в область фотодиода попадают не только специально имплантируемые для его создания примеси n- и p-типов, но и примеси, используемые для сдвигового ПЗС-регистра.

Столь сложная структура требует тщательного моделирования с последующей оптимизацией топологии и параметров ионного легирования с целью обеспечения работы прибора при заданных напряжениях. Расчёты выполнены для двух основных режимов работы ячейки: накопления фотогенерированного заряда до уровня, заданного напряжением на затворе антиблуминга, и принудительного прекращения накопления при переполнении фотоячеек, число которых превышает допустимое для конкретного применения (электронный затвор).

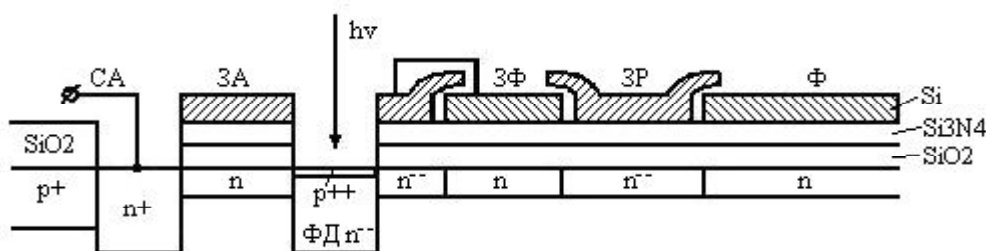


Рис. 1.

Схематическое поперечное сечение линейного ФПЗС:

*CA - сток антиблуминга; ЗА - затвор антиблуминга; ФД - фотодиод; ЗФ - фотозатвор;
ЗР - затвор разрешающий; Ф - приёмная фаза регистра*

Для моделирования линейного ФПЗС использована специализированная система автоматизированного приборно-схемотехнического моделирования (САПСМ) отечественной разработки, включающая в себя программу для расчёта двумерного примесного профиля «CONC2D», программу двумерного распределения потенциалов «PO2000», графический постпроцессор для визуализации результатов расчёта потенциалов «GRAF3D», схемный графический редактор «SHEMO», программу для схемотехнического моделирования «AELIS».

Пакет прикладных программ позволяет рассчитать следующие характеристики элементов ПЗС:

- двумерные и одномерные профили распределения примесей после легирования с учётом температурной разгонки и деформаций на последующих высокотемпературных технологических операциях;

- распределения потенциалов в объёмном канале передачи ПЗС;
- зарядовую ёмкость элементов ПЗС с поверхностным и объёмным каналами;
- статические и динамические характеристики элемента ввода и элементов вывода.

Цели оптимизации

1. Определение параметров технологического процесса (доз и энергий ионной имплантации при создании активных областей фотоячеек и прибора в целом), а также геометрии фотоприёмной ячейки с целью обеспечения работоспособности во всех режимах при условии минимизации уровней управляющих напряжений и максимизации управляющей способности (зарядовой ёмкости).

2. Достижение максимального быстродействия выходного устройства и прибора в целом при условии достижения высокой чувствительности прибора.

Оптимизируемые параметры

Для каждой рабочей области ячейки оптимизируются следующие параметры. Для области ПЗС-регистра: доза легирования n-области - Dn_{pr} , энергия легирования n-области - En_{pr} . Для области фотодиода: доза легирования n-области - Dn_{fd} , энергия легирования n-области - En_{fd} , доза легирования p⁺-области - Dp^{+fd} , энергия легирования p⁺-области - Ep^{+fd} .

Алгоритм оптимизации

1. Задание ограничений технологических параметров, связанных с выбором технологического маршрута изготовления линейного ФПЗС.

2. Задание исходных параметров легирования ПЗС-регистра.

3. Задание исходных топологических размеров и управляющих напряжений для ПЗС-регистра.

4. Проверка обеспечения полного переноса заряда в ПЗС-регистре.

5. Задание исходных параметров легирования фотодиода (ФД).

6. Задание исходных управляющих напряжений элементов устройства антиблуминга.

7. Проверка обеспечения режима накопления заряда с учётом работы антиблуминга и режима электронного затвора.

8. Коррекция данных по п.п. 2-7.

9. Повтор цикла оптимизации.

Начальные этапы моделирования

При изготовлении линейных ФПЗС используется высокоомная подложка p-типа КДБ-20, имеющая типовой разброс удельного сопротивления 20%.

Доза легирования канала регистра влияет на параметры как фоточувствительной области, так и выходного устройства. В результате моделирования получено оптимальное значение дозы при условии обеспечения импульсного управления фазами ПЗС-

регистра амплитудой не более 5-ти вольт.

На рис. 2а представлено распределение примеси в области фотодиода, полученное с помощью программы CONC2D. Выбрано сечение вдоль линии фотодиодов. Области между фотодиодами - стоп-каналы. Для увеличения ёмкости фотодиода используется конструкция HAD-диода (p^+n^-p). В результате между n -областью и поверхностью, а также n -областью и подложкой образуются два параллельно включённых p - n перехода, что увеличивает ёмкость фотодиода почти в два раза. Для создания самосовмещённых областей фотоячейки в область фотодиода имплантируются четыре примеси: две примеси, используемые для создания сдвигового регистра, и две примеси для создания самого HAD-диода. Дозы и энергии легирования всех примесей подбирались таким образом, чтобы их распределение в области фотодиода выглядело, как для двух примесей в обычном HAD-диоде (рис. 2б).

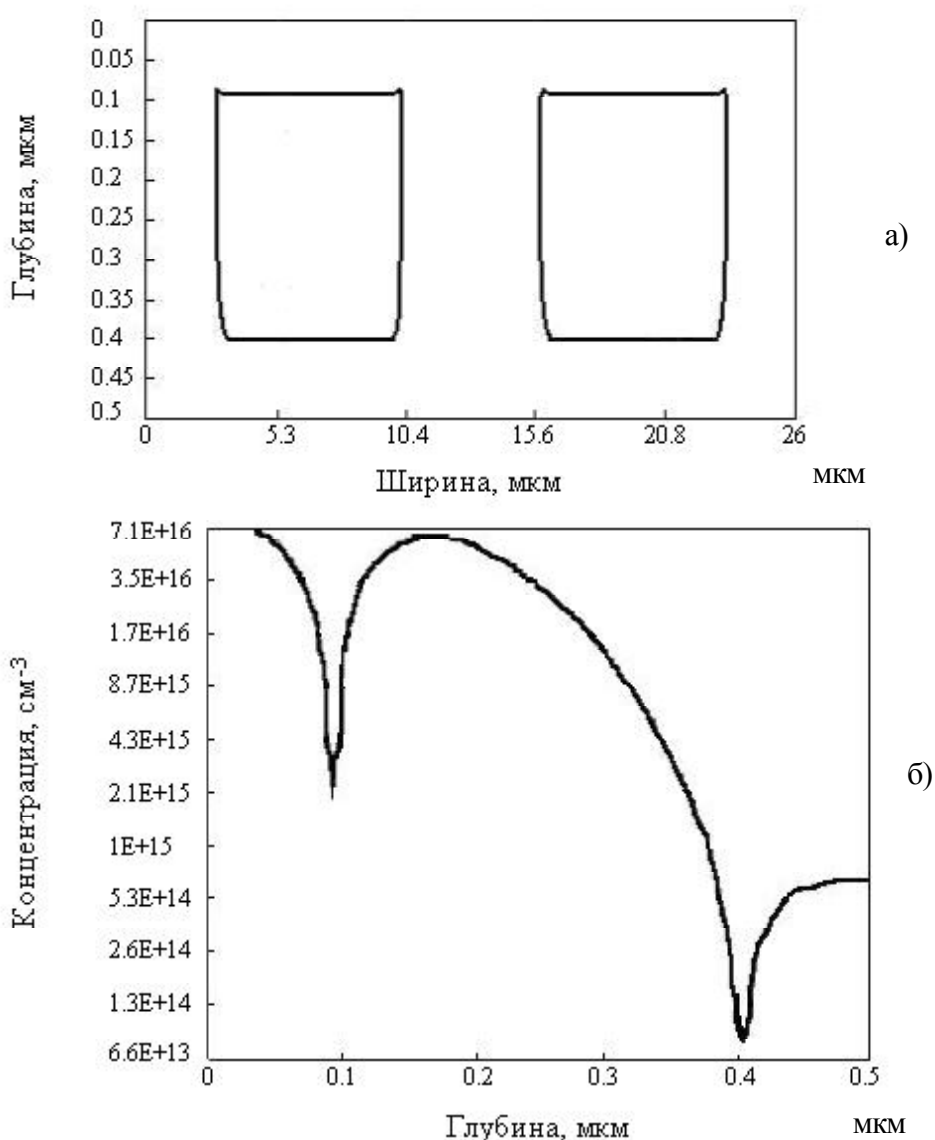


Рис. 2.

Распределение примеси в области линейки фотодиодов:

- а) картина металлургических границ p - n переходов в поперечном сечении вдоль линии фотодиодов;
- б) распределение примеси в вертикальном сечении области HAD-диода

При проведении первых расчётов двумерного распределения потенциала обнаружена зависимость результата от конфигурации конечно-разностной сетки, которой покрывается топология прибора. Проведены специальные расчётные эксперименты и подобраны индивидуальные параметры сеток для расчёта зарядовых ёмкостей фотодиода и регистра.

Правильность работы фотоприёмной ячейки определяется по двумерному распределению потенциала. Для каждого режима работы (накопление заряда в фотоячейке, стекание избыточного заряда в сток антиблуминга, электронный затвор) производится расчёт потенциальных барьеров между потенциальными ямами областей фотодиода и фотозатвора с одной стороны, и антиблуминга и фотодиода - с другой.

Так как при небольшом размере ячейки в ней содержится несколько областей, то для более точного моделирования электрофизических характеристик необходимо разбить ячейку на несколько частей и проводить моделирование каждого узла в отдельности:

- от середины стока антиблуминга до середины фотодиода;
- от середины фотодиода до середины электрода хранения фотозатвора.

Результаты моделирования

Рис. 3 иллюстрирует распределение потенциала в области двухфазного сдвигового ПЗС-регистра. Анализ распределения потенциала показывает, что условие полного переноса заряда выполняется, причём наличие градиента потенциала в области отдающего электрода обеспечивает высокую скорость переноса.

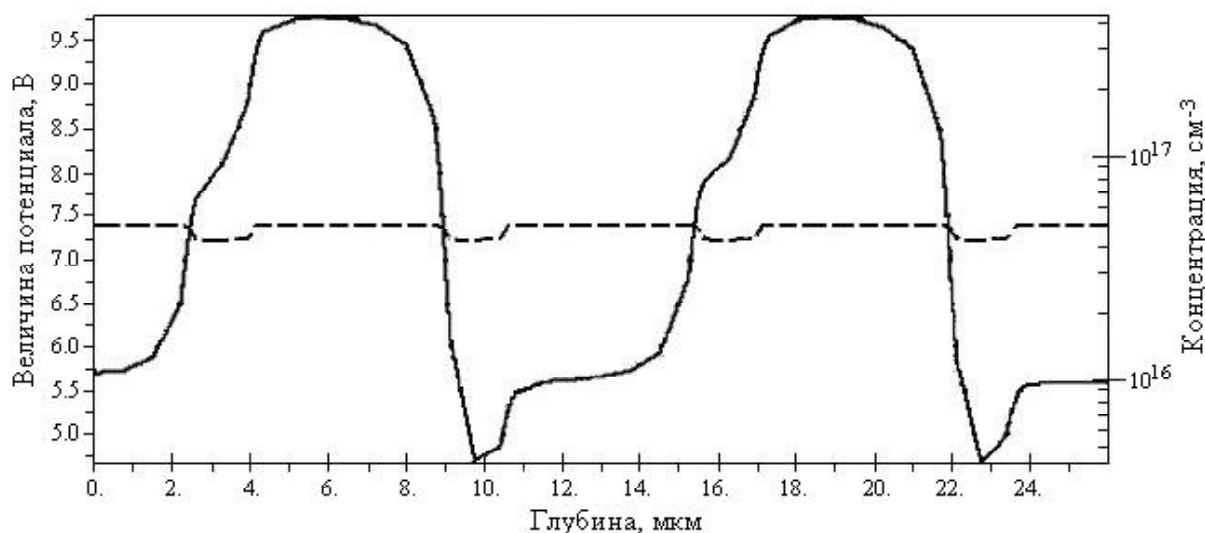


Рис. 3.

Распределение потенциала (----) и концентрации примеси (---) n-типа в направлении переноса на глубине 0,25 мкм

Рис. 4 - 7 иллюстрируют работу ячейки прибора в основных режимах. В режиме накопления фотогенерированный заряд стекает из области фотодиода в область под фотозатвором, что продемонстрировано на рис. 4.

Наличие под затвором антиблуминга потенциального барьера, препятствующего перетеканию заряда в сток антиблуминга в режиме накопления фотогенерированного

заряда, показано на рис. 5.

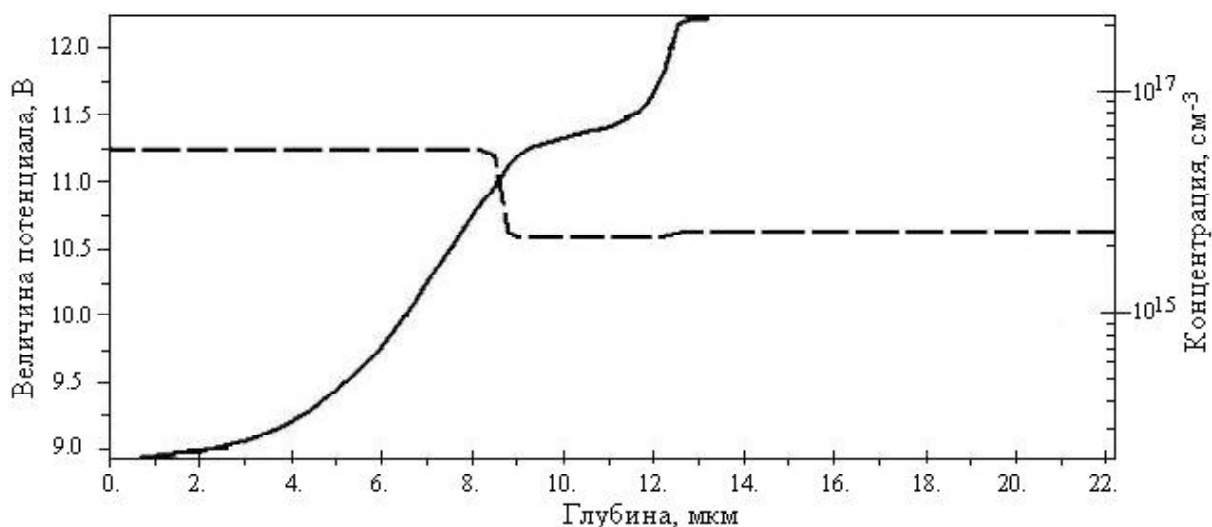


Рис. 4.

Распределение потенциала (----) и концентрации примеси (- - -) в направлении переноса на глубине 0,25 мкм в области фотозатвора при режиме накопления

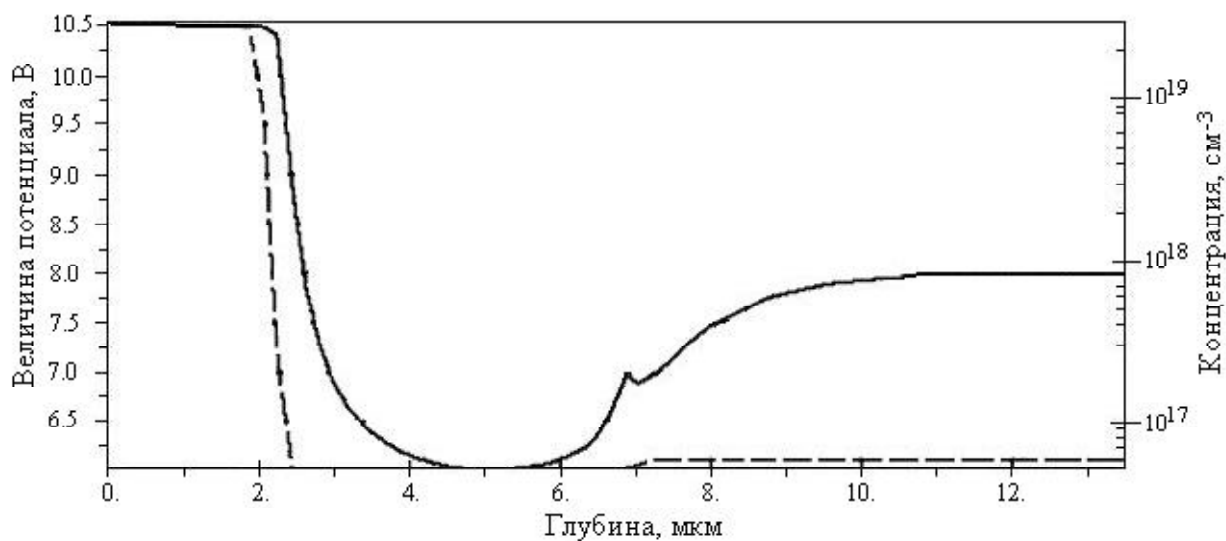


Рис. 5.

Распределение потенциала (----) и концентрации примеси (- - -) на глубине 0,25 мкм от границы раздела кремний-диэлектрик в области устройства антиблуминга при режиме накопления

В режиме электронного затвора происходит сброс всего фотогенерированного заряда в сток антиблуминга. Этот режим представлен на рис. 6, где дано распределение потенциала в области устройства антиблуминга, и на рис. 7, иллюстрирующем распределение потенциала в области фотозатвора.

На рис. 7 имеется потенциальный барьер величиной порядка 2,3 В, препятствующий стеканию накопленного фотогенерированного заряда из сильнолегированной области под составным фотозатвором через слаболегированную его область в фотодиод и далее в сток антиблуминга.

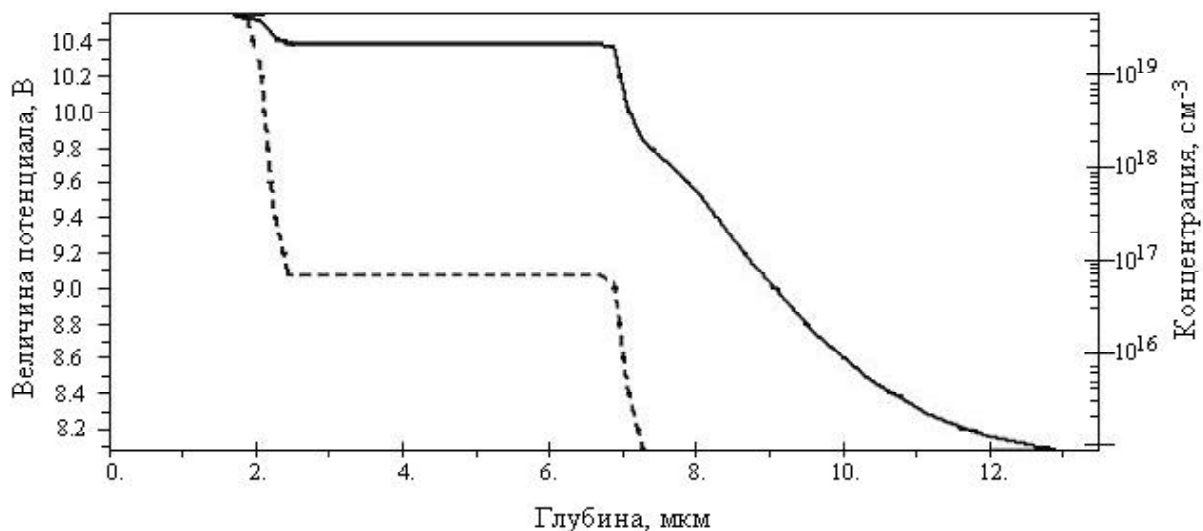


Рис. 6.

Распределение потенциала (—) и концентрации примеси (---) на глубине 0,25 мкм в области устройства антиблуминга при режиме электронного затвора

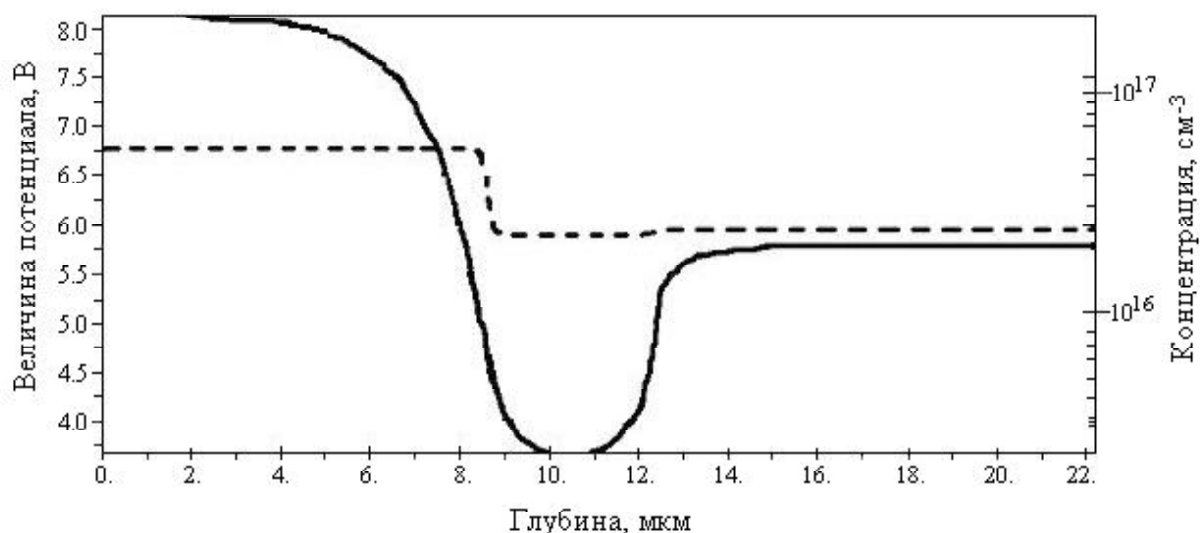


Рис. 7.

Распределение потенциала (—) и концентрации примеси (---) на глубине 0,25 мкм в области фотозатвора при режиме электронного затвора

Моделирование выходного устройства

Для того, чтобы обеспечить высокое быстродействие линейных ФПЗС (до 40 МГц) при максимальной крутизне преобразования заряда в сигнальное напряжение, в качестве выходного устройства был выбран 2,5-каскадный истоковый повторитель.

Для схмотехнического моделирования выходного устройства с использованием программы AELIS была синтезирована принципиальная электрическая схема с помощью программы SHEMA (рис. 8).

Перетекание зарядовых пакетов различной величины из регистра в плавающую диффузионную область (ПДО) узла детектирования моделируется током пилообразной

формы (рис. 9), протекающим с момента выталкивания зарядового пакета из-под последнего фазного электрода до начала переднего фронта импульса напряжения, прикладываемого к затвору восстанавливающего транзистора.

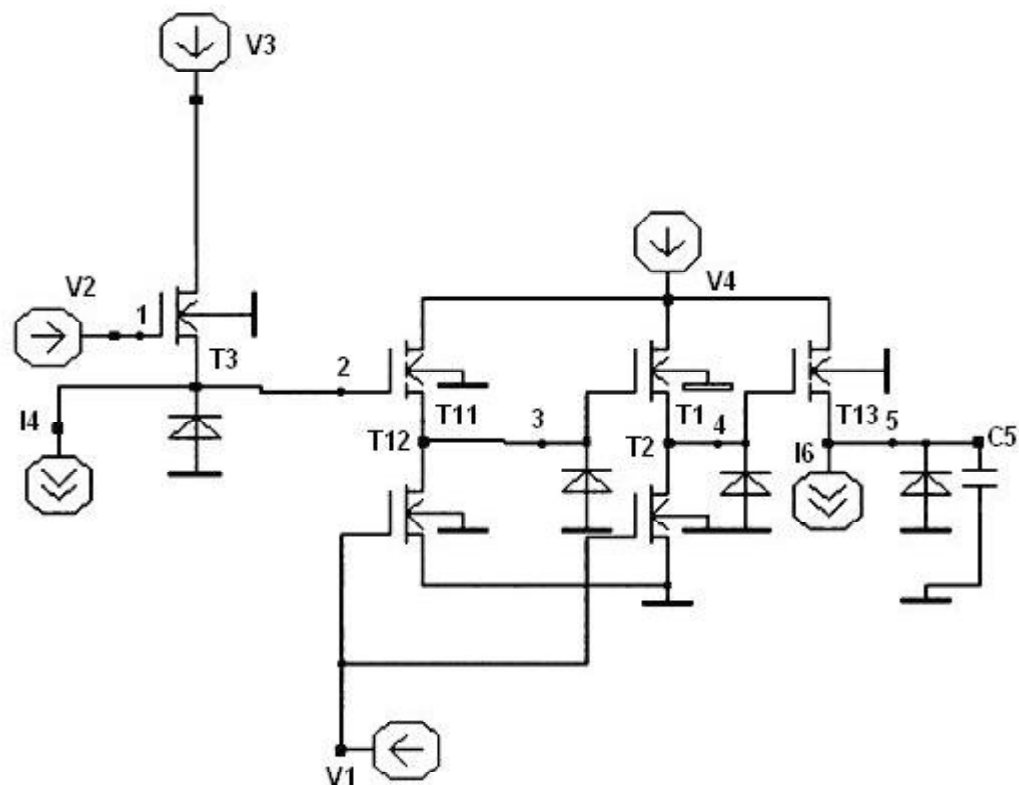


Рис. 8.

Принципиальная электрическая схема выходного устройства

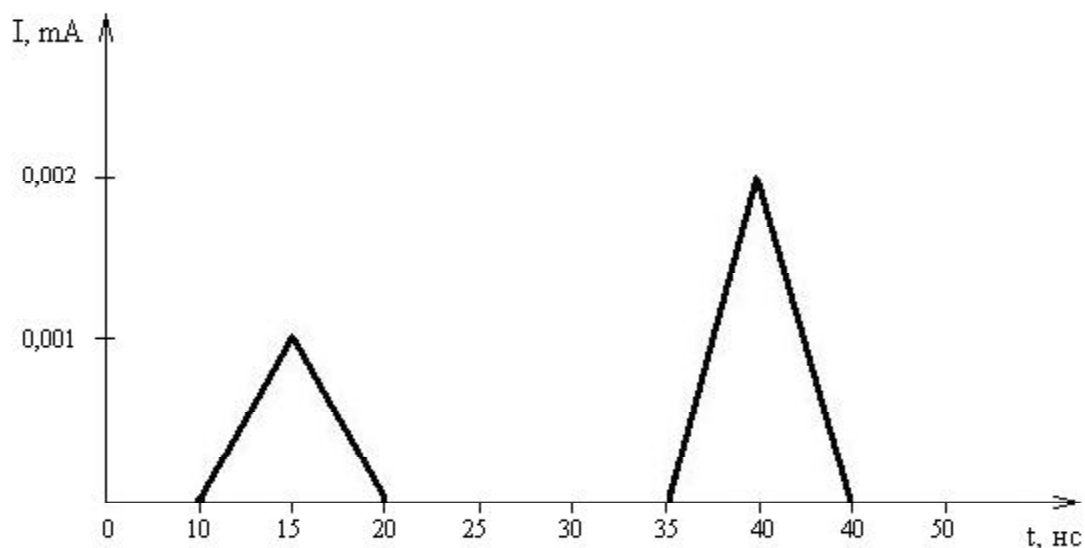


Рис. 9.

Эюра тока генератора (14 на схеме), моделирующая перетекание заряда из регистра в ПДО

С помощью программы визуализации результатов расчёта получены эпюры напряжений в узлах схемы, пронумерованных цифрами от 1 до 5, при частоте считывания 40 МГц (рис. 10).

Ёмкость монтажа (C5 на схеме) составляет 10 пФ, а ток генератора, имитирующего внешнюю нагрузку (16 на схеме), составляет 10 мА. На первом графике рисунка 10 (узел 1 рис. 8) представлена эпюра напряжения, управляющего транзистором - восстановителем потенциала ПДО. Далее представлены эпюры напряжений на узле считывания (узел 2 рис. 8), а также в выходных узлах 1-го, 2-го и 3-го каскадов (3, 4 и 5 узлов рис. 8 соответственно). Из сравнения графиков 2 и 5 следует, что коэффициент передачи выходного устройства составляет 0,8 при максимальном напряжении выходного сигнала порядка 1,2 В. Наличие плоского участка на кривой выходного напряжения в последнем узле повторителя показывает, что достигается заданное быстродействие. По результатам моделирования можно сделать вывод, что схема удовлетворяет всем заданным требованиям, а именно: высокой частоте работы, высокому коэффициенту передачи.

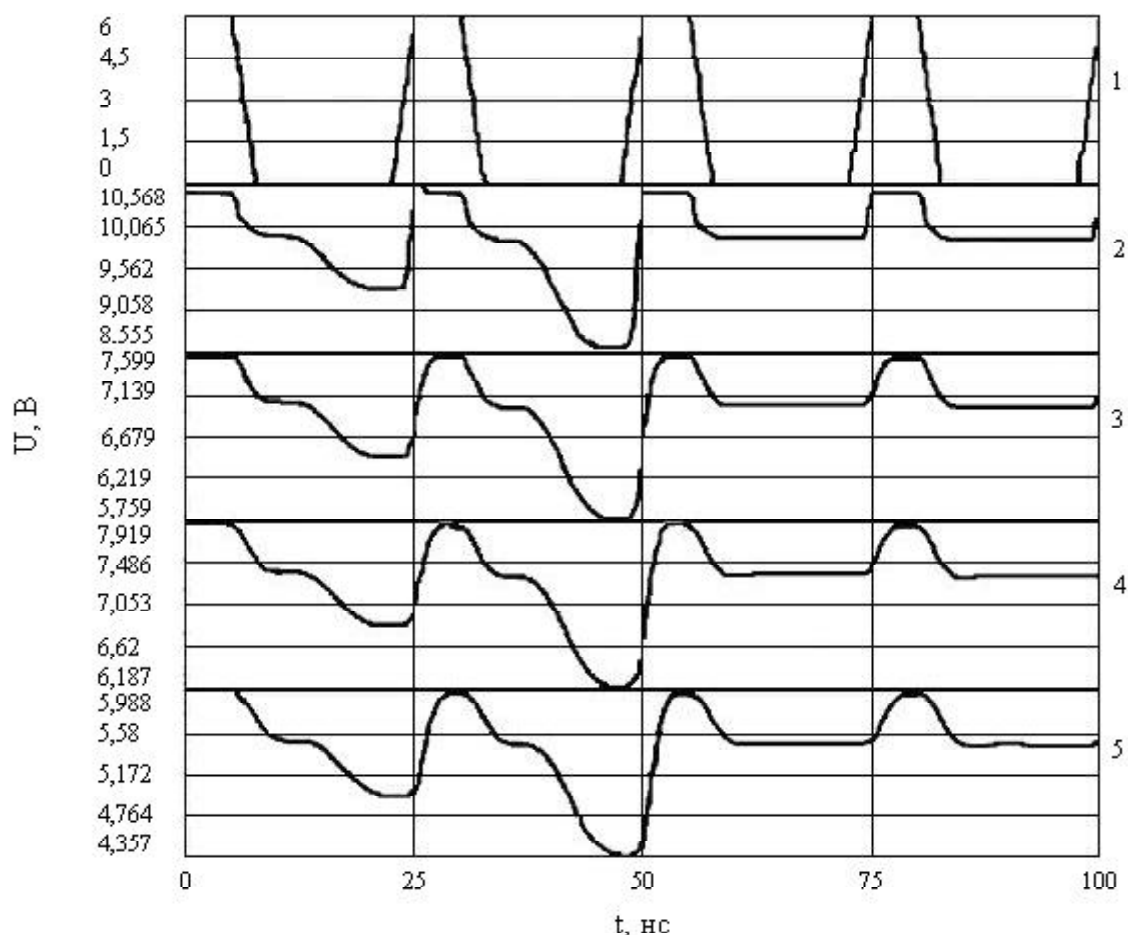


Рис. 10.

Эпюры напряжений в узлах схемы

Выводы

Результаты физико-топологического и схемотехнического моделирования показали, что технические решения, заложенные в конструкции прибора, позволяют выполнить разработку серии линейных ФПЗС на современном уровне.

Литература

1. Р. К. Кирдяшев, Е. В. Костюков, А. М. Маклаков, А. С. Скрылёв, Н. В. Федуква, Ю. М. Череменский, С. В. Трунов. Линейные фотоприёмники видимого диапазона на основе приборов с зарядовой связью. - Тезисы научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли», Адлер, 2004.

2. Р. К. Кирдяшев, Е. В. Костюков, М. А. Поспелова, А. С. Скрылёв, Н. В. Федуква, С. В. Трунов. Линейные фотоприёмники с зарядовой связью. - Тезисы докладов XVIII международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2004.

3. В. В. Воронов, М. И. Какоулин, Е. В. Костюков, Ю. А. Кузнецов, А. М. Маклаков, А. С. Скрылёв, А. А. Тихонов, С. В. Трунов, А. А. Пугачёв, В. В. Чернокожин, В. А. Шилин. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью - современная элементная база фотонных систем. - Электронная промышленность, 2003, вып. 2, стр 166.

4. Е. В. Костюков, А. А. Пугачёв, А. С. Скрылёв, В. А. Шилин. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. - Электронные компоненты, 2003, вып. 4, стр 83-88.

5. Е. В. Костюков. Линейные фоточувствительные приборы с зарядовой связью с разрешением до 50 пар лин./мм. - Интеграл, 2007, вып. 1, стр 3-8.