

# Интегральная схема датчика положения на основе фотоприемной линейки со считыванием на ПЗС со скрытым каналом

В.Л. Перевертайло, А.А. Елифанов

ГП НИИ микроприборов НТК "ИМК" НАНУ, г. Киев, Украина, detector@carrier.kiev.ua

**Аннотация** — Рассматривается интегральная схема линейного датчика координаты на основе фотоприемной линейки со считыванием сигнала с помощью прибора с зарядовой связью со скрытым каналом. Представлена структура ИС, проведен теоретический анализ быстродействия ячейки сдвигового регистра ПЗССК и выполнено моделирование параметров его ячейки, выбраны конструктивно-топологические параметры ячейки. Описаны параметры экспериментальных образцов. Микросхема предназначена для управления режущим инструментом на рабочем поле стола станка для раскроя тканей.

Интегральные схемы датчика положения изготовлены по технологии ПЗС со скрытым каналом, которая позволяет получить значения максимальной тактовой частоты не менее 20 МГц и неэффективности зарядового переноса не более  $10^{-4}$ .

## I. ВВЕДЕНИЕ

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) позволяют построить системы определения координат без использования аналого-цифровых преобразователей (АЦП) [ 1], [ 2 ].

Поскольку в данной работе решалась задача разработки датчика положения для системы, работающей в режиме реального времени, когда стандартные АЦП не позволяют реализовать такой режим работы из-за их недостаточного быстродействия, нами была выбрана конструкция фотоприемной линейки со считыванием сигнала с помощью ПЗС. Для повышения быстродействия была выбрана линейка на основе ПЗС со скрытым каналом (ПЗССК) [ 1], [ 2 ], позволяющая достигнуть частот 20-50 МГц и обеспечить работу робототехнических устройств в режиме реального времени.

## II. КОНСТРУКЦИЯ МИКРОСХЕМЫ ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ

Регистрация координаты датчиком положения происходит при его освещении сфокусированным источником света с плоской геометрией луча. Для выполнения функции регистрации координаты в датчике имеется секция накопления зарядовых пакетов, состоящая из 128 элементов. В качестве

элементов накопления заряда используются МДП-конденсаторы с поликремниевыми электродами уменьшенной толщины. Электроды секции накопления имеют большую ширину (200 мкм) для повышения чувствительности при регистрации луча света с плоской геометрией (лазерный штрих).

Секция накопления зарядов состыкована со считывающей линейкой ПЗС (регистром считывания) и отделена от регистра считывания управляющим затвором вдоль всей ее длины. После подачи на управляющий затвор импульса разрешения считывания, накопленные в секции накопления зарядовые пакеты передаются в регистр считывания параллельным переносом, где под управлением тактовых импульсов передаются на выходное устройство датчика и преобразуются обычным образом в уровни напряжения на выходе ИС.

Регистр считывания построен на основе ПЗС со скрытым каналом с полуторафазным управлением переносом. Для питания ИС необходим источник напряжения 12÷15 В. Для смещения подложки необходим источник отрицательного напряжения  $-(5 \div 8)$  В. Регистр считывания закрыт от света дополнительным слоем металла, что обеспечивает хорошие темновые характеристики прибора.

## III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЯЧЕЙКИ СЧИТЫВАЮЩЕЙ ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ПЗС СО СКРЫТЫМ КАНАЛОМ

Разработка потребовала проведения расчета и исследования временных и зарядовых характеристик основных схмотехнических узлов фоточувствительной и темновой частей микросхемы.

Быстродействие ячейки ПЗС тесно связано с кинетикой и эффективностью переноса заряда. Следует отметить, что при разработке БИС считывающей линии правильный выбор геометрических параметров ее элементарной ячейки приобретает очень важное значение, так как требование минимизации длины электродов хранения для повышения быстродействия ПЗС вступает в некоторое противоречие с необходимостью передачи

по сдвиговому регистру достаточно большого информационного заряда, который можно было бы без труда протестировать на выходе прибора.

Известно, что вследствие инерционности процесса переноса заряда, а также наличия в пределах активной области ПЗС центров захвата подвижных носителей заряда каждый раз при передаче заряда с (k-1)-го на k-й элемент линии задержки какая-то часть заряда остается непереданной. Обычно эту непереданную часть заряда, отнесенную к исходному заряду, называют неэффективностью переноса.

В ряде работ [1], [2] показано, что влияние неэффективности переноса N-каскадной линии ПЗС эквивалентно действию фильтра с амплитудно-частотной характеристикой:

$$A_N(f) = \exp \{ -N \cdot \varepsilon \cdot [1 - \cos(2\pi f/f_t)] \}, \quad (1)$$

где:  $A_N$  – нормированная амплитуда;

$\varepsilon = \rho\alpha$  – потери на один каскад линии ПЗС;

$\alpha$  – потери на один перенос (неэффективность переноса);

$\rho$  – число фаз тактового питания ПЗС;

$f_t$  – тактовая частота.

Из выражения (1) видно, что значение верхней граничной частоты любой линии ПЗС или аналоговой линии задержки (АЛЗ) на ее основе однозначно определяется значением неэффективности зарядового переноса.

Выше отмечалось, что в любом ПЗС неэффективность зарядового переноса определяется двумя физическими причинами различной природы. Составляющая неэффективности переноса, которая связана с захватом носителей заряда, зависит главным образом от технологии изготовления прибора и может быть учтена с известной степенью достоверности только на основе экспериментальных исследований структур ПЗС. Более того, основной задачей при разработке технологии любой ИС на основе ПЗС как раз и является уменьшение указанной составляющей неэффективности до приемлемого значения.

Вторая составляющая неэффективности переноса проявляется при достаточно высоких тактовых частотах и существует в любом ПЗС, в том числе и в идеальном, где нет центров захвата носителей заряда. Эту составляющую обычно называют неэффективностью свободного переноса, поскольку она зависит только от конструктивно-топологических и электрофизических параметров ПЗС. При проектировании БИС фотолинейки на ПЗС основные конструктивно-топологические параметры структуры ПЗС выбраны исходя из допустимого значения неэффективности свободного переноса не более  $10^{-4}$ .

В ряде работ [3]-[5] показано, что в качестве достоверного критерия быстродействия любого ПЗС

можно использовать время пролета единичного носителя заряда под тактовыми электродами в результате действия тянущего электрического поля, возникающего в структуре ПЗС при приложении к указанным электродам управляющих импульсов. Сравнение рассчитанных значений времени пролета с характерным временем переноса заряда в ячейке ПЗС ( $t_d$ ) [3], полученным на основании результатов точного численного моделирования кинетики свободного переноса заряда в различных структурах ПЗС, позволило установить количественную связь между этими параметрами.

Таким образом, использование указанного соотношения позволило, не прибегая к весьма сложному и трудоемкому моделированию кинетики переноса заряда, обосновать выбор конструктивно-топологических параметров ячейки АЛЗ только на основании результатов двумерного численного моделирования электрических полей.

Учитывая требования ТЗ по быстродействию и количеству управляющих фаз, в качестве базовой при проектировании БИС выбрана структура ПЗС со скрытым каналом, полупроводниковым управлением переносом и поликремниевыми электродами, расположенными на слое однородного по толщине диэлектрика вдоль передающей цепочки. Геометрия элементарной ячейки выбранной структуры ПЗС показана на рис. 1. Для численного моделирования распределения электрических полей в указанной структуре предложена модель, включающая систему уравнений Лапласа-Пуассона для потенциала электрического поля и соответствующие граничные условия.

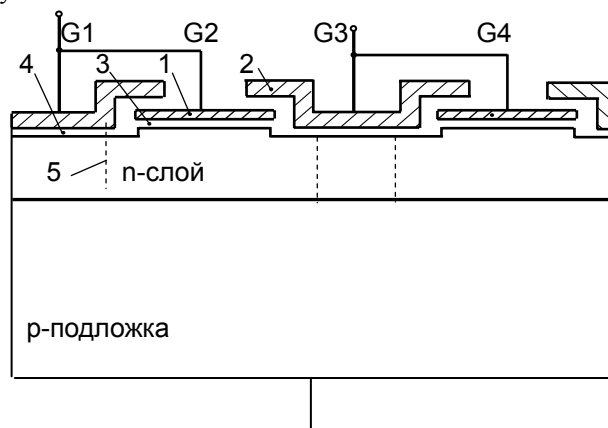


Рис. 1. Геометрия элементарной ячейки ПЗС со скрытым каналом

- 1 – электроды поликремния 1 уровня;
- 2 – электроды поликремния 2 уровня;
- 3 – диэлектрик;
- 4 – граница раздела полупроводник-диэлектрик;
- 5 – граница раздела областей n-канала с разным уровнем легирования.

Записанная краевая задача дискретизована на неравномерной прямоугольной сетке с использованием общепринятого пятиточечного шаблона. Полученная в результате указанной процедуры система конечно-разностных уравнений решена итерационным методом, использующим алгоритм последовательной верхней релаксации [5], [11].

Таким образом, получены двумерные распределения потенциала электрического поля в структуре ПЗС и распределения вдоль передающей цепочки: положения канала в скрытом слое  $x_{ch}(y)$  (рис. 2), величины потенциала в канале  $\varphi_{ch}(y)$  (рис. 3), тангенциальной составляющей электрического поля в канале  $E_{ch}(y)$  (рис. 4) и величины потенциального барьера “канал-поверхность раздела полупроводник-диэлектрик”  $U_{sch}(y)$  (рис. 5).

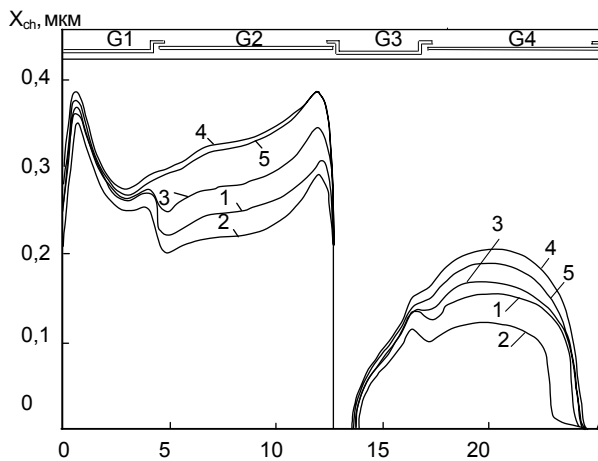


Рис. 2. Распределение вдоль передающей цепочки ПЗССК положения канала в скрытом слое. Номера кривых 1-5 относятся к используемым при расчете профилям примесей, представленных на рис.7

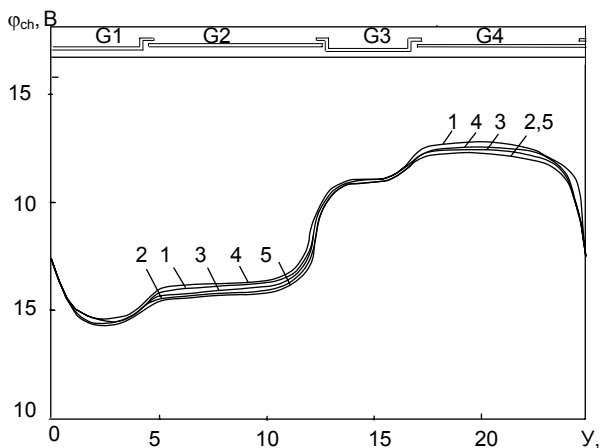


Рис. 3. Распределение вдоль передающей цепочки ПЗССК электрического потенциала в канале.

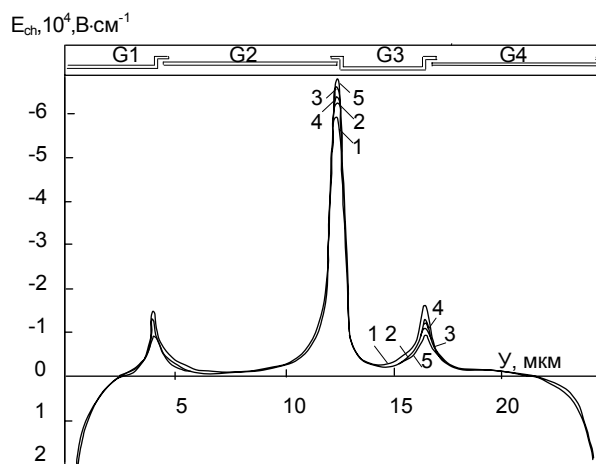


Рис. 4. Распределение вдоль передающей цепочки ПЗССК тангенциальной составляющей электрического поля в канале

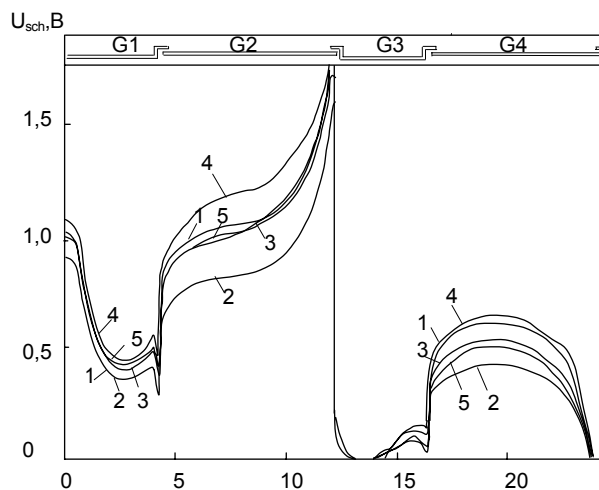


Рис. 5. Распределение вдоль передающей цепочки ПЗССК электрического потенциального барьера канал-поверхность раздела

Расчеты проведены для целого ряда структур ПЗС со скрытым p-каналом, различающихся конструктивно-топологическими параметрами и электрофизическими характеристиками: длиной тактовых электродов, толщиной p-слоя, уровнем легирования подложки, профилями распределения примеси в глубь скрытого слоя под электродами первого и второго уровня поликремния. Распределения, показанные на рис. 2, 3, 4, 5 рассчитаны для цепочек ПЗС со скрытым каналом с так называемыми плавными профилями легирующей примеси в скрытом слое под электродами первого и второго уровня поликремния. Профили такого типа получаются, если при изготовлении микросхем после имплантации примеси на малую глубину проводится достаточно продолжительная ее разгонка (см. рис. 7).

Исходя из полученных распределений  $\chi_{ch}(y)$  и  $\varphi_{ch}(y)$  нетрудно оценить величину управляющей способности (т.е. максимальную величину зарядового пакета, который может храниться и передаваться в цепочке ПЗС) цепочки ПЗССК с данными параметрами, т.е. распределение  $U_{sch}(y)$  позволяет оценить, в какой мере данный ПЗС имеет именно скрытый канал. Если потенциальный барьер между каналом и поверхностью раздела проводник-диэлектрик мал (менее 10 КТ/е, К – постоянная Больцмана, Т- абсолютная температура, е- заряд электрона), то возможны процессы захвата-выброса носителей заряда из канала на поверхностные ловушки. А это, как известно, приводит к возрастанию неэффективности зарядового переноса и ухудшению частотных характеристик ПЗС.

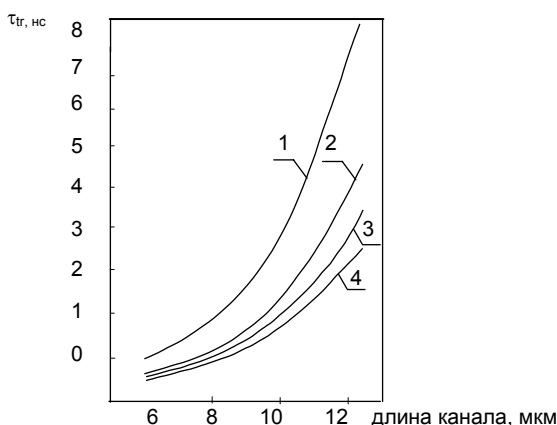
Выше отмечено, что на основании полученных распределений  $E_{ch}(y)$  можно оценить реальное быстродействие любой цепочки ПЗС, так как указанные распределения позволяют легко вычислить время пролета  $\tau_{tr}$  единичного носителя заряда из-под электрода хранения одной фазы под электрод другой фазы:

$$\tau_{tr} = \int \frac{dy}{\mu E_{ch}(y)} \quad (2)$$

где:  $\mu$  - подвижность носителей заряда.

Интегрирование в выражении (2) распространяется на всю область пролета (например, для рис. 4 оно включает электроды G2 и G3).

Зависимость времени пролета от длины электродов хранения для различных ПЗССК показана на рис.6. В данном случае профиль легирующей примеси в скрытом канале под электродами первого и второго уровня поликремния взят плавного характера.



**Рис. 6. Зависимость быстродействия ПЗССК от длины канала электродов хранения элементарной ячейки при различных значениях управляющих напряжений на тактовых электродах. 1-3 – для приборов, изготовленных на подложке типа КДБ-10, 4-КДБ –20**

На основании представленных выше зависимостей выбраны основные конструктивно-топологические параметры регулярной ячейки ПЗС со скрытым каналом: длина электродов хранения 8 мкм, длина зазоров между ними 4 мкм, ширина канала – 200 мкм.

#### IV. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Технология фотоприемной линейки совмещается с технологией считывающей ПЗС линейки. Из анализа технических требований, предъявленных к БИС фотоприемной линейки, видно, что их можно выполнить, используя технологию ПЗС со скрытым каналом [1], [2]. Данная технология позволяет повысить быстродействие и уменьшить неэффективность переноса по сравнению с технологией ПЗС с поверхностным каналом. Это достигается тем, что зарядовый пакет движется не по границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>, а смещен от нее в глубину кристалла кремния, где количество дефектов значительно меньше, а подвижность носителей заряда больше [1]-[4]. Быстродействие ПЗС увеличивается также за счет значительных краевых полей, возникающих при работе схемы. Но улучшение характеристик ПЗС вызывает усложнение технологии: вводятся дополнительные операции, увеличиваются требования к их точности.

Одной из основных дополнительных операций является ионное легирование фосфором для создания ионнолегированных барьеров в канале. Эта операция во многом определяет параметры получаемого скрытого слоя, а значит, и параметры микросхемы в целом. В работе [6] частично рассмотрены требования, предъявляемые к данной операции. На базе технологии “Сорплатос” разработана технология изготовления БИС на ПЗССК.

Активные области схемы формируются по этой технологии с помощью локального окисления. Толщина полевого окисла равна (1,1 ± 0,1) мкм, а толщина подзатворного окисла 0,1 мкм. Все операции окисления проводятся в хлорсодержащей среде, что позволяет улучшить качество границы раздела Si-SiO<sub>2</sub> [7]. Кроме того, перед локальным окислением введен дополнительный отжиг в азоте для уменьшения дефектности в пассивных областях БИС и, что очень существенно, на границе p-n-переходов [8].

Как уже отмечалось, очень важной является операция ионного легирования фосфором, которая определяет параметры скрытого канала. Выбран следующий режим легирования: доза 0,2 мкКл, энергия 100 кэВ.

Последующие операции направлены на формирование электродной структуры. Причем

режим получения подзатворного диэлектрика под второй уровень поликремния при пониженных температурах и во влажной среде позволяет получить межэлектродный окисел значительно толще, чем выращенный подзатворный диэлектрик [9]. Это дает возможность уменьшить межэлектродные емкости и увеличить напряжение пробоя между электродами схемы.

С целью устранения разрывов токоведущих шин межслойная изоляция между алюминиевой и поликремниевыми разводками выполняется из фосфорно-силикатного стекла. Последующий отжиг уменьшает разброс высот рельефа в БИС, а также сглаживает переходы поликремний - полевой окисел.

Одной из наиболее сложных операций является фотолитография по контактным окнам с применением утолщенного фоторезиста.

Последующие операции обеспечивают формирование алюминиевой разводки и нанесение защитного покрытия. Для уменьшения дефектности р-п-переходов применяется алюминий с 2% добавкой кремния.

Пассивирующее покрытие микросхемы выполняется из нитрида кремния толщиной порядка 1 мкм, полученного плазмохимическим способом.

Профили распределения легирующей примеси (фосфор) вглубь ионно-имплантированного скрытого слоя под электродами первого и второго уровня поликремния показаны на рис. 7, где кривые 1-5 относятся к электродам первого уровня поликремния, а кривая 6 – к электродам второго уровня поликремния. Материал подложки КДБ-10.

Отметим, что номера кривых на рисунках 2-5 относятся к соответствующим номерам кривых для профилей примеси на рис. 7, т.е. при расчете использовался соответствующий профиль примеси.

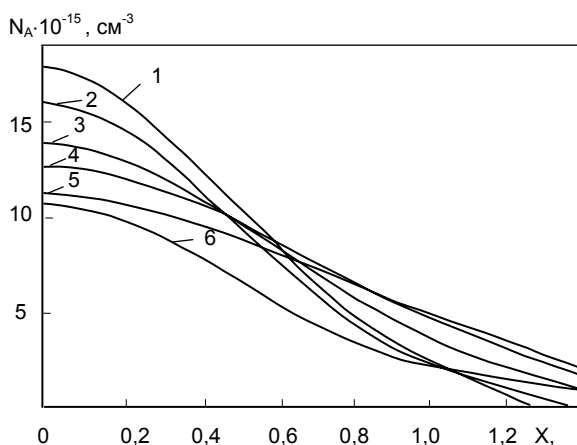


Рис. 7. Профили распределения концентрации легирующей примеси вглубь скрытого слоя под электродами первого уровня поликремния (1-5) и второго уровня поликремния (6)

Как видно из приведенных ниже гистограмм, полученные технологические параметры в основном удовлетворяют предъявленным схмотехническим требованиям. В дальнейшем была проведена доработка технологии, направленная на уменьшение разброса напряжений отсечки в скрытом канале, который в последующих партиях существенно меньше благодаря использованию модели и расчетов, предложенных в работе [10]. Микросхема функционировала с сохранением основных шумовых параметров и динамического диапазона не ниже 60 дБ до частоты 20 МГц.

Распределение напряжений отсечки транзисторов с затворами по первому и второму уровням поликремния, пороговых напряжений паразитных транзисторов показаны на рисунках 8-10.

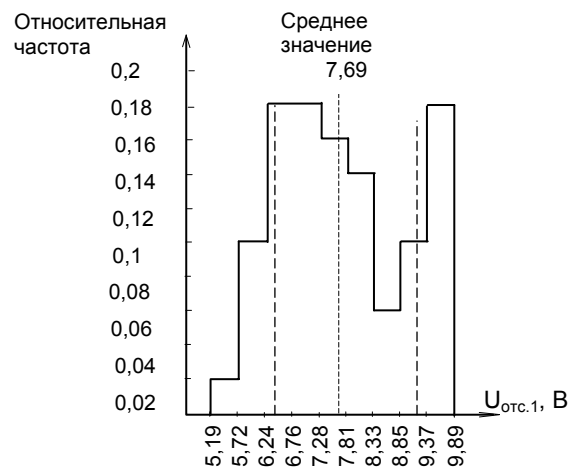


Рис. 8. Распределение напряжения отсечки транзисторов со скрытым каналом  $U_{\text{отс.1}}$  по первому уровню поликремния при  $U_{\text{подл.}} = -5\text{В}$

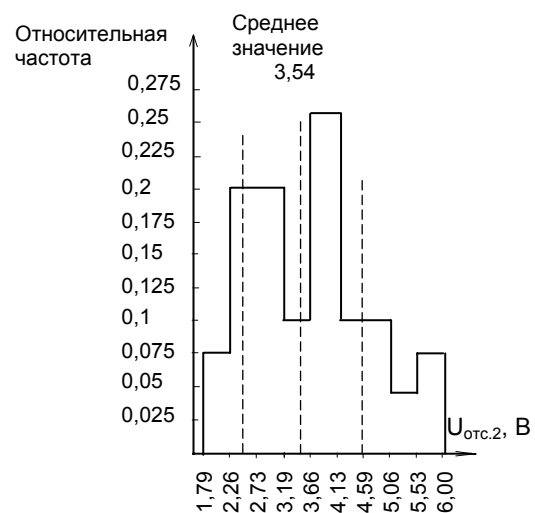
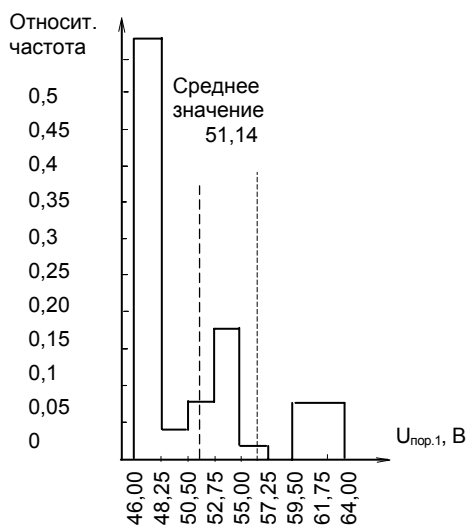
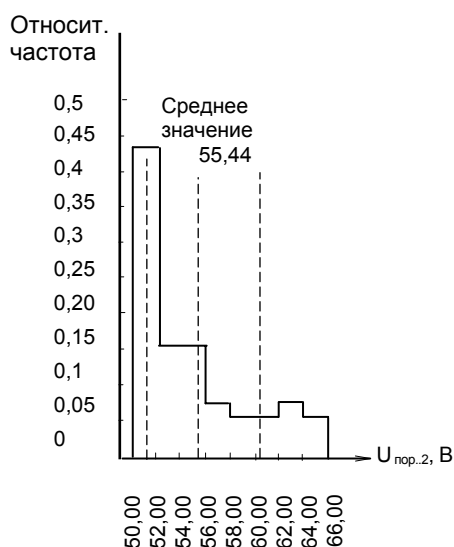


Рис. 9. Распределение напряжения отсечки транзисторов  $U_{\text{отс.2}}$  по второму уровню поликремния при  $U_{\text{подл.}} = -5\text{В}$



а)



б)

**Рис. 10. Распределение порогового напряжения паразитных транзисторов по второму (а) и первому (б) уровням поликремния при  $U_{подл.} = -5В$**

## V. ВЫВОДЫ

1. Обоснован выбор технического решения датчика положения для работы в режиме реального времени и выбрана структура и общая архитектура ИС, реализующей датчик.

2. Проведен теоретический анализ быстродействия ячейки сдвигового регистра на ПЗС со скрытым каналом в качестве считывающего устройства датчика положения и выполнено моделирование параметров ячейки ПЗССК. По результатам

моделирования выбраны основные конструктивно-топологические параметры ячейки ПЗССК.

3. Разработана технология изготовления микросхемы датчика положения, совмещающая формирование фоточувствительной линейки и сдвигового регистра считывания сигналов на ПЗС со скрытым каналом. Изготовлены образцы микросхемы с параметрами, удовлетворяющими требованиям работы датчика положения в режиме реального времени.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Приборы с зарядовой связью / Под редакцией М. Хоувза, Д. Моргана. - М.: Энергоиздат, 1981. - 376 с.
- [2] Секен К. Томпсет М. Приборы с переносом заряда. - М.: Мир, 1978. - 327 с.
- [3] Carnes I.E., Kosonocky W.F., Ramberg E.G. Free charge transfer in charge-coupled devices // IEEE Trans. Electron Devices. - 1972. - V. ED-19. - № 6. - P. 798-808.
- [4] El-Sissi H, Cobbold R.S.C. Potentials and fields in buried-channel CCD's.: a two-dimensional analysis and design study // IEEE Trans. Electron Devices. - 1975. - V. ED-22. - № 3. - P. 79-90.
- [5] Епифанов А.А., Фролов О.С. Расчет параметров приборов с зарядовой связью со скрытым каналом // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. - 1977. - Вып. 6 (72). - С. 37-49.
- [6] Chatterjee P.K., Taylor G.W. Optimum scaling of buried-channel CCD's // IEEE Trans. Electron Devices. - 1980. - V. ED-27. - № 3. - P. 553-562.
- [7] Takeshi Hattori. TCE Oxidation for the elimination of oxidation-induced stacking faults in silicon // Solid-State Technology. - Nov. 1979. - P. 85-89.
- [8] Kishino S., Isomae S., Tamura M., Maki M. Suppression of oxidation-stacking faults generation by preannealing in N2 atmosphere // Appl. Phys. Lett. - 1978. - V. 32. - № 1. - P. 1-3.
- [9] Hideo Sunami, Mitsumasa Koyanagi and Norikazu Hashimoto. Intermediate Oxide formation in double polysilicon gate MOS Structure // J. Electrochem. Soc. - 1980. - V. 127. - № 11. - P. 2499-2505.
- [10] Перевертайло В.Л., Фролов О.С. Напряжение отсечки МДП структуры со скрытым каналом // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. - 1984. - Вып. 5. - С. 78-82.
- [11] Епифанов А.А. Численное моделирование двухфазных ПЗС со скрытым каналом // Тезисы докладов конференции "Технология и проектирование функционально сложных БИС" // Микроэлектроника. - Сер. 3. - 1987. - Вып. 2 (262). - С. 97.