

## Автоматизированное проектирование элемента электронно-чувствительной ПЗС-матрицы

*Борисов И. С., Костюков Е. В., Пугачёв А. А.*

*Матричные электронно-чувствительные приборы с зарядовой связью являются перспективной элементной базой для ЭОП 5-ого поколения. С помощью приборно-технологического моделирования проведён анализ множества конструкторско-технологических вариантов прибора и подобраны параметры технологического процесса, обеспечивающие его функционирование при заданных ограничениях на технологический процесс и управляющие напряжения.*

### **Введение**

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) широко используются в аппаратуре приёма низкоуровневых сигналов. Для ЭОП 5-ого поколения создан электронный формирователь изображения на основе матричного электронно-чувствительного (ЭЧ) прибора с зарядовой связью (ПЗС) [1]. Изготовление ЭЧ матричного ПЗС-модуля проводится по технологии изготовления ПЗС с объёмным каналом [2].

ЭЧ матричный ПЗС-модуль представляет собой ЭЧ ПЗС-матрицу с межстрочным переносом, размещённую на вакуумно-плотном металлокерамическом основании. Формат ПЗС-матрицы составляет 2/3 дюйма, количество элементов 532(Г)х596(В), из которых 500(Г)х576(В) – чувствительные, а остальные – темновые. Размер ПЗС-элемента 17(Г)х11(В) мкм<sup>2</sup>. Электронно-чувствительный элемент матрицы включает диод, имеющий омический контакт с алюминиевой площадкой, которая выведена на поверхность кристалла. Алюминиевая площадка осуществляет приём электронов и формирует апертуру электронно-чувствительного элемента. Попадающие на площадку электроны накапливаются на ёмкости, являющейся суммой ёмкостей диода и площадки. По завершении стадии накопления электроны переносятся в вертикальные сдвиговые регистры, которые затем передают их на выход матрицы.

Для создания унифицированного ряда электронно-чувствительных преобразователей наиболее перспективным является ЭОП с матрицей стандартного телевизионного формата при числе элементов 752(Г)х576(В). Такая полноформатная ПЗС-матрица должна иметь отношение длин сторон 4:3, поэтому элемент матрицы при сохранении шага элементов по горизонтали должен иметь размеры 17х17 мкм<sup>2</sup>. Соответственно диагональ матрицы увеличивается с 11 мм до 17 мм.

### **Элемент электронно-чувствительной ПЗС-матрицы**

Модель структуры элемента электронно-чувствительной ПЗС-матрицы, которая применялась при автоматизированном проектировании, изображена на рис. 1. В модель вошли только те части структуры, которые оказывают влияние на распределение электростатического потенциала в объёме полупроводника.

Вертикальный сдвиговый регистр 5 проходит перпендикулярно плоскости области моделирования и имеет четырёхфазную конструкцию. Одна ячейка регистра поочерёдно принимает зарядовые пакеты от двух фотодиодов. Область II, охватывающая области затвора и подложки между диодом III и регистром I, называется областью разрешающего затвора. Подзатворная система регистра – двухслойная, состоит из окиси кремния и

нитрида кремния. Разделение ячеек по горизонтали осуществляется с помощью ионнолегированного матричного стоп-канала 6. Контакт к области вертикального регистра находится вне области моделирования, изображённой на рис. 1. Область диода не имеет омического контакта и является «плавающей».

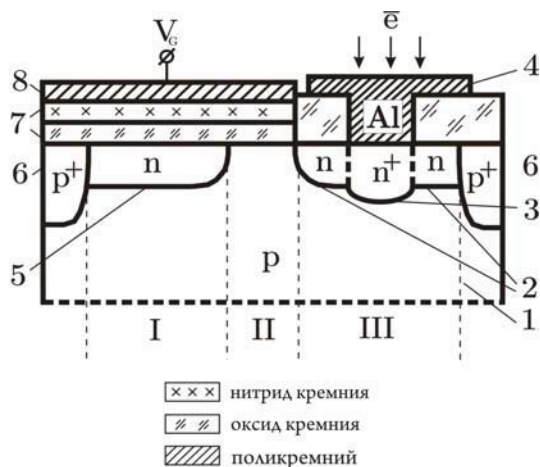


Рис. 1

Модель структуры элемента электронно-чувствительной ПЗС-матрицы:

1 – подложка р-типа; 2 – накапливающий диод (Д); 3 – высоколегированная n+-область диода; 4 – алюминиевая площадка; 5 – вертикальный сдвиговый регистр n-типа (РГ); 6 – стоп-каналы р+-типа; 7 – подзатворная система; 8 – разрешающий затвор; I – область вертикального регистра; II – область разрешающего затвора; III – область диода

### Средства и методы моделирования ЭЧ ПЗС

Проектирование ЭЧ ПЗС-элемента проводилось с применением программных средств двумерного приборно-технологического моделирования [3]. Для моделирования электростатического потенциала в объёме ПЗС-элемента применяется метод статического «Пуассон-анализа» [4]. Моделирование производится в приближении статических условий при нулевых токах, что для ПЗС соответствует условию постоянства в пространстве и времени неравновесных значений квазиуровней Ферми (КУФ). Двумерное локально-постоянное (ступенчатое) распределение неравновесных «мгновенных» значений квазиуровней Ферми задаётся с помощью специального алгоритма [3]. С помощью данного распределения неравновесных КУФ устанавливаются режим обеднения ПЗС-элементов и режим «заполнения» их потенциальных ям «фотогенерированными» носителями заряда.

Для задания ступенчатого двумерного распределения КУФ в области моделирования внутри каждой диффузионной области располагается специальный топологический объект, условно называемый «фиктивным контактом». Потенциал «фиктивного контакта» задаёт значение квазиуровня Ферми для всего объёма диффузионной области, в которой он размещается. Сами «фиктивные контакты» не входят в структуру и топологию прибора и только указывают, какое управляющее напряжение приложено к реальному контакту диффузионной области. Причём, что крайне важно, физически этот омический контакт располагается вне выбранной для моделирования плоскости (области моделирования), рассекающей ПЗС-элемент, либо отсутствует.

Применение «фиктивных контактов» позволяет решить следующие ключевые проблемы моделирования ПЗС:

- исключить из моделей структур ПЗС-элементов диоды, задающие обратное смещение каналов переноса;
- моделировать диффузионные области с «плавающим потенциалом» в неравновесном состоянии без применения специальных алгоритмов и моделей;
- свести трёхмерные модели структур ПЗС-элементов к двумерным;
- имитировать процессы локального накопления «фотогенерированных» носителей заряда в произвольно выбираемых областях элементов.

Критерием завершения процесса моделирования элемента является его правильное функционирование, а именно: выполнение элементом функций восстановления потенциала области накопления, накопления заряда, хранения заряда в области накопления и его передачи на выход матрицы при заданных значениях управляющих напряжений и параметрах технологического процесса. Выполнение или невыполнение элементом указанных выше функций определяется по потенциальным диаграммам (ПД) распределений потенциала в полупроводнике. Данные ПД показывают, каким образом в объёме фотоприёмного элемента распределены потенциальные ямы и барьеры. Сочетания ям и барьеров определяют места нахождения зарядовых пакетов и демонстрируют возможности их перемещения в заданном направлении. ПД оцениваются сначала визуально по графическим изображениям двумерных распределений потенциала, так как зачастую они имеют сложную конфигурацию, которая плохо поддаётся автоматизированному анализу. Затем с двумерных распределений потенциала снимаются числовые значения.

Временные затраты на расчёт одного варианта конструкции ПЗС-элемента, которые включают моделирование профилей легирующих примесей по аналитическим двумерным моделям процесса ионного легирования и диффузии примесей и моделирование двумерного распределения потенциала при фиксированных управляющих напряжениях, составляют порядка 2-5 минут, что позволяет проанализировать десятки конструкторско-технологических решений без нарушения графика проектирования.

Условия правильного функционирования ЭЧ ПЗС-элемента определяются величинами потенциальных барьеров между потенциальной ямой диода и потенциальной ямой под принимающим электродом вертикального регистра и поверхностным потенциальным барьером потенциальной ямы под принимающим электродом вертикального регистра. Они рассчитываются из двумерных распределений потенциала, полученных для каждого режима работы. Условия правильного функционирования ЭЧ ПЗС-элемента приведены в таблице.

Условия правильного функционирования ЭЧ ПЗС-элемента строчно-кадровой матрицы

Режим	Напряжение затвора, В	Напряжение фиктивного контакта регистра, В	Напряжение фиктивного контакта диода, В	Потенциальный барьер диод-регистр, В
Накопление в Д, начало	0.0	30.0	20.0	> 0,5
Накопление в Д, окончание	0.0	30.0	Подбирается из условия: $Q_d = Q_{rg}$	> 0,5
Хранение в РГ	0.0	Подбирается из условия: $\Delta\phi_s^{RG} = 0,25$ В	20.0	> 0,5
Параллельный перенос и восстановление потенциала диода	15.0	30.0	Подбирается из условия: $\Delta\phi^{D-RG} = 0,5$ В	0.0

**Правила моделирования элемента в режимах накопления, параллельного переноса и восстановления**

Элемент ЭЧ ПЗС отличается от элемента строчно-кадровой матрицы с фотодиодным накопителем [5] тем, что фотодиод ПЗС-элемента строчно-кадровой матрицы состоит

из поверхностной высоколегированной p<sup>++</sup>-области и области n-типа, в которой накапливается информационный заряд, в то время как фотодиод ЭЧ ПЗС-элемента в центре n-области имеет высоколегированную n<sup>+</sup>-область (область подлегирования). Данные отличия в структурах определяют отличия в электрических режимах функционирования.

#### Режим накопления в диоде

После стадии восстановления напряжение на разрешающем затворе устанавливается равным 0 В и начинается стадия накопления. На момент начала накопления потенциал диода равен его потенциалу в момент окончания восстановления. При этом полного обеднения области диода нет, т. е. обеднённый слой занимает только часть n-области диода. Следует отметить, что при идентичности n-областей фотодиода элемента строчно-кадровой и электронно-чувствительной матриц зарядовая ёмкость системы диод+алюминиевая площадка ЭЧ ПЗС-элемента будет больше.

Полное сохранение заряда диода в регистре гарантируется при условии:

$$Q_{\max \text{ РГ}} \approx (1,1 \div 1,2) \times Q_{\max \text{ Д}}. \quad (1)$$

Формальным условием накопления максимального заряда области диод+площадка является ограничение на потенциальный барьер из диода в регистр  $\Delta\varphi^{\text{Д-РГ}}(Q)$ :

$$\Delta\varphi^{\text{Д-РГ}}(Q) = 0,5 \text{ В}. \quad (2)$$

Ёмкость диода рассчитывается как разность зарядов электронов в диоде в момент начала накопления и в момент, когда выполнится одно из условий – (1) или (2):

$$Q_{\max \text{ Д}} = Q_{\text{Д}}(\text{начало накопления}) - Q_{\text{Д}}(\text{условие 1 или 2}). \quad (3)$$

#### Режим параллельного переноса и восстановления потенциала диода

В данном режиме производится перенос сигнальных зарядов, накопленных диодами, в вертикальные регистры с одновременным восстановлением потенциала диода. Перенос происходит одновременно (параллельно) для всех диодов ПЗС-матрицы. Перенос заряда из Д в РГ обеспечивается подачей на разрешающие затворы РГ (8 - рис. 1) положительного напряжения +15 В. Потенциальный барьер из Д в РГ  $\Delta\varphi^{\text{Д-РГ}}(Q)$  понижается и накопленный в Д заряд перетекает в РГ до тех пор, пока потенциальный барьер  $\Delta\varphi^{\text{Д-РГ}}(Q)$  не станет уравнивать диффузионный и дрейфовый токи. Условием, определяющим момент окончания процесса параллельного переноса и восстановления диода ЭЧ ПЗС-элемента, является:

$$V_{\text{з}} = V_{\text{п}}; \quad Q_{\text{рг}}=0; \quad \Delta\varphi^{\text{Д-РГ}}=0,5 \text{ В}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{з}}$  – напряжение на затворе,  $V_{\text{п}}$  – напряжение параллельного переноса, равное 15 В,  $Q_{\text{рг}}$  – информационный заряд в регистре;  $\Delta\varphi^{\text{Д-РГ}}$  – потенциальный барьер фотодиод-регистр. Ограничение на  $\Delta\varphi^{\text{Д-РГ}}$  известно из теории ПЗС [5].

Таким образом, момент окончания стадии восстановления, определяемый условием (4), может быть корректно смоделирован с помощью статического Пуассон-анализа, так как в этот момент ток из диода в регистр становится равным 0, что отвечает условию постоянства квазиуровней Ферми.

По сравнению со строчно-кадровой матрицей [5] потенциал диода ЭЧ ПЗС-элемента после отбора накопленного заряда будет повышаться незначительно, а сам процесс переноса заряда из Д в РГ не заканчивается его полным обеднением.

#### Режим вертикального переноса

Режим вертикального переноса в ЭЧ ПЗС-матрице идентичен такому же режиму в строчно-кадровой матрице видимого диапазона. Соответственно моделирование режима

вертикального переноса ЭЧ-элемента не имеет особенностей по сравнению с аналогичным режимом для строчно-кадровой матрицы.

### *Результаты моделирования*

Были решены следующие задачи моделирования ЭЧ ПЗС-элемента:

1. подбор конечно-разностной сетки для выбранной модели объёмной структуры элемента;
2. моделирование распределения потенциала в момент окончания стадии восстановления диода;
3. расчёт зарядовой ёмкости области электрода вертикального регистра, принимающего заряд из диода;
4. анализ распределения потенциала на стадии накопления в диоде и расчёт зарядовой ёмкости диода;
5. моделирование распределения потенциала в момент окончания стадии параллельного переноса заряда из диода в вертикальный регистр.

Подбор конечно-разностной сетки (КРС) является ответственным этапом, обеспечивающим достоверность результатов моделирования и хорошую сходимость итерационного процесса решения нелинейного дифференциального уравнения Пуассона. Взаимосвязь распределения узлов КРС по области моделирования с распределением легирующих примесей в объёме полупроводника и граничными условиями не вполне изучена, в связи с чем сам процесс подбора КРС для каждой конкретной задачи моделирования является эмпирическим.

Как было отмечено выше, работоспособность элемента и его электрические параметры определяются из двумерных распределений электрического потенциала в объёме полупроводника. На рисунках 2-6 приведены некоторые из них.

На рис. 2 приведена двумерная картина линий равного уровня потенциала в момент окончания стадии восстановления диода при напряжении затвора регистра +15 В. Показаны линии равного уровня потенциала и металлургические границы р-п переходов. Слева – область регистра, справа – область диода. Видно, что обеднённые области регистра и диода в данном режиме имеют значительную глубину – порядка 4,5 мкм и объединяются, однако области стоп-каналов ограничивают данные обеднённые области, изолируя соседние столбцы друг от друга.

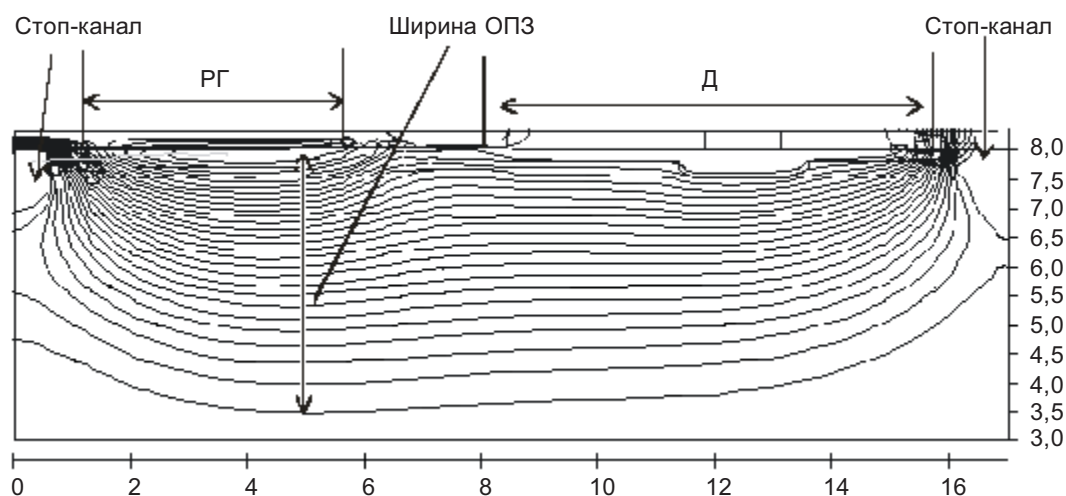


Рис. 2

Линии равного уровня потенциала в момент окончания стадии восстановления диода

На рис. 3 изображено распределение поверхностного потенциала, полученное из двумерного распределения сечением по границе раздела окисел-кремний со значением координаты  $y = 8$  мкм, а также обозначено направление потока электронов в процессе стадии восстановления.

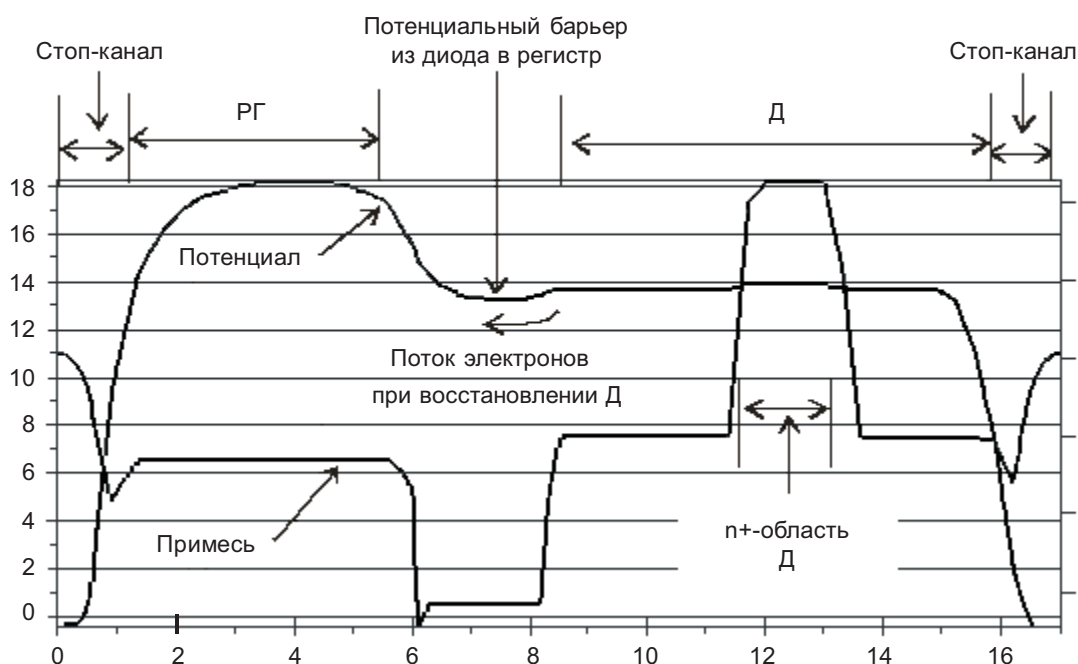


Рис. 3

Распределение поверхностного потенциала в момент окончания стадии восстановления

На рис. 4 дано изображение линий равного уровня потенциала в момент начала стадии хранения в регистре после окончания стадии переноса заряда из диода в регистр при напряжении разрешающего 0 В. На распределении видны хорошо изолированные друг от друга потенциальная яма под электродом вертикального регистра и яма диода. С помощью нескольких одномерных распределений потенциала, полученных из двумерного распределения путём его сечений параллельно и перпендикулярно границе раздела окисел-кремний, оценено значение потенциального барьера регистр-диод, равное 2,5 В. Такой барьер обеспечивает надёжную изоляцию зарядовых пакетов регистра от области диода. Точка потенциального барьера обозначена знаком «+». На рис. 5 дано одномерное распределение потенциала, полученное из двумерного распределения путём его горизонтального сечения через точку потенциального барьера с координатой  $y = 7,38$  мкм, показанную на рис. 4. На рис. 6 дано распределение потенциала в глубь кристалла в области регистра, показывающее объёмный механизм канала переноса.

Таким образом, с помощью средств автоматизированного проектирования для базового технологического процесса получено конструкторско-технологическое решение ЭЧ ПЗС-элемента со следующими статическими электрическими параметрами, определяющими его работоспособность при управляющих напряжениях вертикального регистра 0 В, 5 В и +15 В: зарядовая ёмкость ячейки регистра (размеры электрода  $4 \times 4$  мкм<sup>2</sup>) 62500 электронов, потенциал обеднения регистра (при напряжении затвора 0,0 В) 5,7 В, потенциал насыщения регистра (при полной зарядовой ёмкости) 3,2 В, потенциал восстановления диода 13,5 В, изменение потенциала диода при накоплении 62500 электронов 0,25 В.



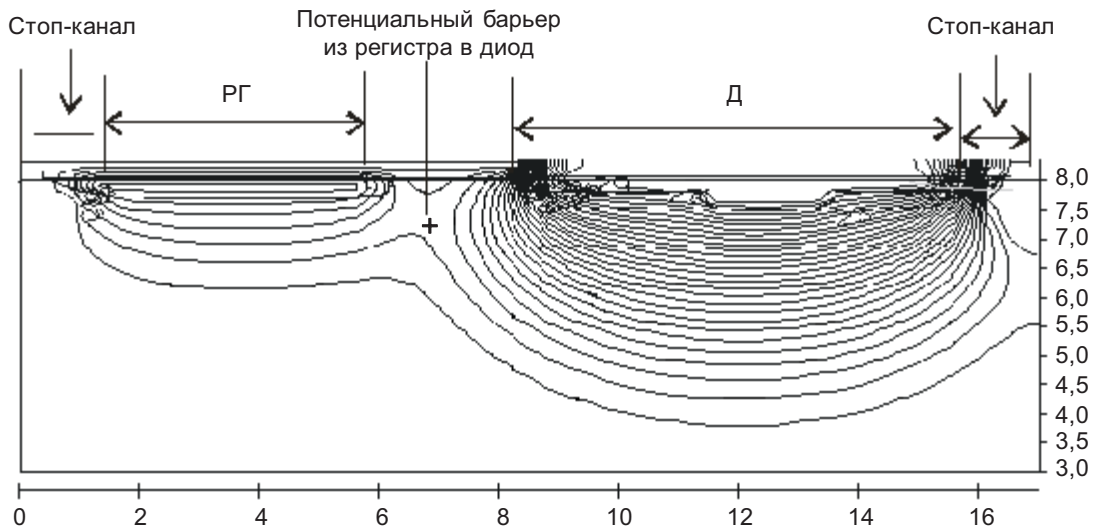


Рис. 4

Линии равного уровня потенциала в момент начала стадии хранения заряда в вертикальном регистре

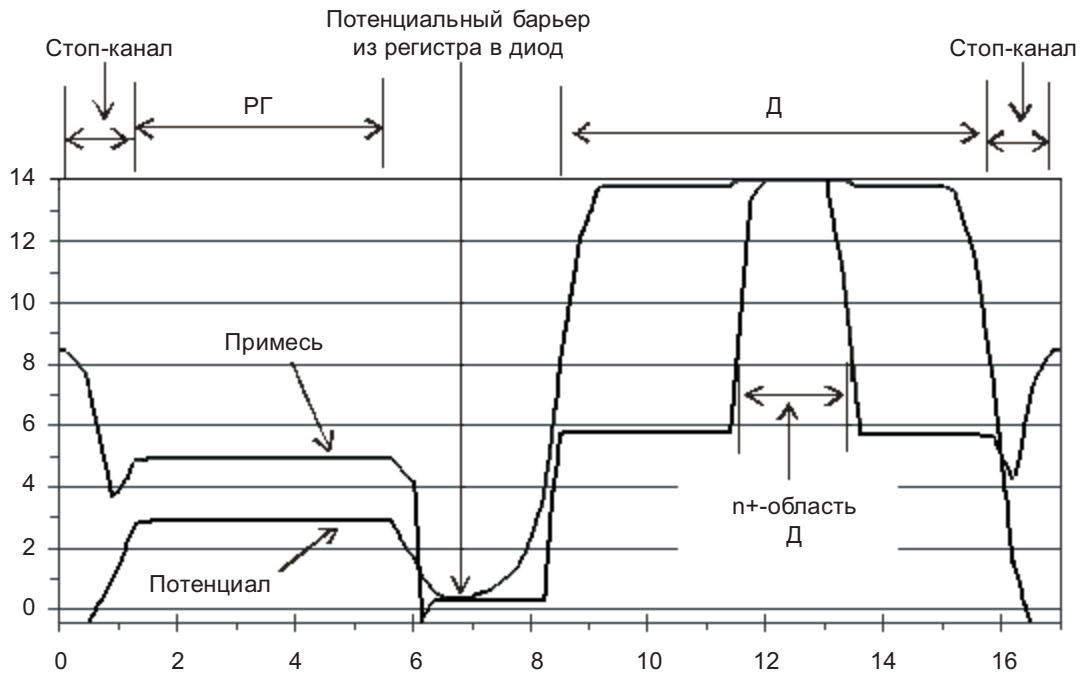


Рис. 5

Распределение потенциала в горизонтальном направлении через точку потенциального барьера в момент начала стадии хранения в вертикальном регистре ( $y = 7,38$  мкм)

### Заключение

Приборно-технологическое моделирование позволяет организовать эффективный процесс автоматизированного проектирования. Выработанные правила моделирования элемента электронно-чувствительного прибора с зарядовой связью позволили провести анализ ряда конструкторско-технологических вариантов прибора и подобрать параметры технологического процесса, обеспечивающие его функционирование при заданных ограничениях на технологический процесс и управляющие напряжения.

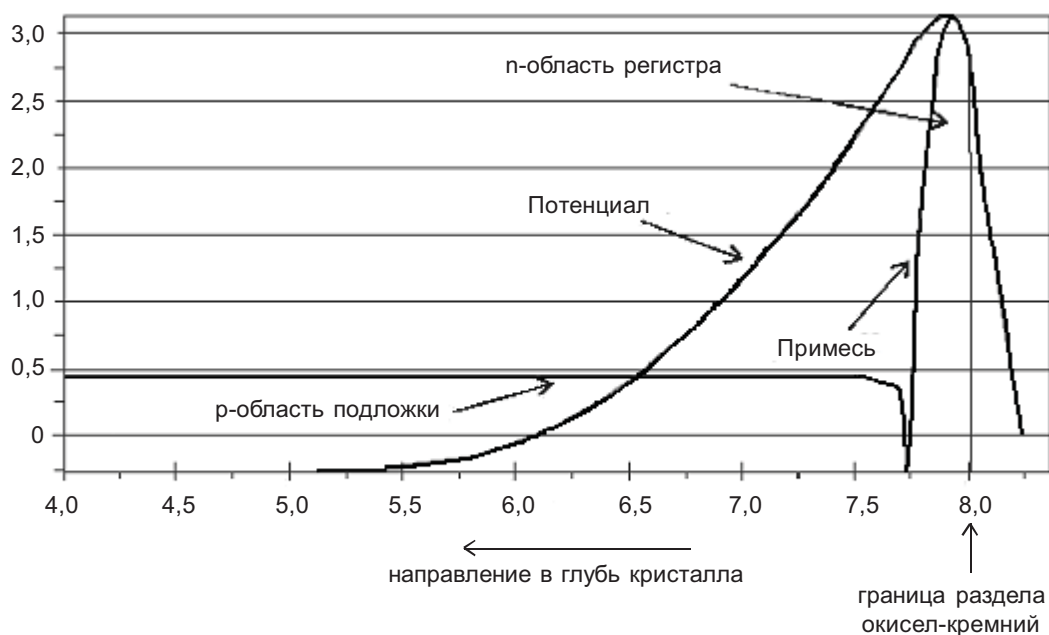


Рис. 6

Распределение потенциала в глубь кристалла через точку максимума потенциала регистра в момент начала стадии хранения в вертикальном регистре ( $x = 3,70$  мкм)

### Литература

1. П. Б. Константинов, Ю. А. Концевой, Е. В. Костюков, А. С. Скрылев и др. Электронно-чувствительная матрица с переносом заряда для электронно-оптических преобразователей (варианты). – Патент № RU 232 4256, Опубл. 10.05. 2008, Бюл. № 13.
2. Е. В. Костюков, А. М. Маклаков, А. С. Скрылев. Семейство крупноформатных линейных фоточувствительных приборов с зарядовой связью с разрешением 38,5 пар лин/мм. – Оптический журнал, том 76, № 12, 2009, с. 20-26.
3. Пугачёв А. А. Двумерное моделирование потенциала и заряда в сложных структурах БИС на ПЗС. – Электронная промышленность, №6-7, 1993, с. 80-86.
4. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов // Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1998, 496 с.
5. Van de Steeg M.J.H., Peek H.L., Bakker J.G.C., Pals J.A, Dillen G.M.H., Oppers J.M.A.M// A frame-transfer CCD color imager with vertical antiblooming/ IEEE Transactions on Electron Devices, 1985, Volume 32, Issue 8, p.p. 1430-1438.