

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ КОНФИГУРАЦИЙ ОКИСЛЕННОГО ПОЛИКРЕМНИЕВОГО ЗАТВОРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗОВ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМЫХ МАТРИЦ ПАМЯТИ В РЕЖИМЕ ХРАНЕНИЯ

© Г. В. Перов

АО «Новосибирский завод полупроводниковых приборов с ОКБ», 630082, г. Новосибирск, ул. Дачная, 60

Разработан алгоритм определения критических конфигураций затвора в горизонтальной и вертикальных плоскостях с учётом увеличения электронной и ионной проводимости окисла на его неоднородной поверхности. Выполнен расчёт наведённого поля мобильного заряда  $Na^+$ ,  $K^+$ , накопленного на остриях в рамках модели моноэлектрета.

**Ключевые слова:** электрофизические свойства окисла поликремния, перенос мобильного заряда в окисле кремния, неоднородность окисленного поликремния, моноэлектрет в диэлектриках

**Сведения об авторах:** Перов Геннадий Васильевич к.т.н., доцент, mef@ngs.ru

---

## DETERMINATION OF THE CRITICAL CONFIGURATIONS OF AN OXIDIZED POLYSILICON GATE TO REDUCE THE PROBABILITY OF FAILURES IN STORED NONVOLATILE MEMORY ARRAYS

G.V. Perov

JSC «Novosibirsk factory of semiconductor devices with the Special design centre»,  
630082, Novosibirsk, Dachnaya street, 60

An algorithm for determining the critical gate configurations in the horizontal and vertical planes is developed, taking into account the increase in the electronic and ionic conductivity of the oxide inhomogeneous surface. The induced electrical field of the mobile charge  $Na^+$ ,  $K^+$ , accumulated at the tips was calculated using the monolectret model.

**Keywords:** electrophysical properties of polysilicon oxide, transport of a mobile charge in silicon oxide, heterogeneity of oxidized polysilicon, monolectret in dielectrics

**Data of authors:** Perov Gennady Vasilyevich, Ph.D., associate professor, mef@ngs.ru

### Введение

Конструкции современных энергонезависимых перепрограммируемых матриц памяти, сохраняющих возможности записи-стирания в течение многочисленных циклов перезаписи, чрезвычайно многообразны.

В связи с интенсивными зарубежными разработками по проектированию,

конструированию, технологии изготовления ППЗУ для отечественной электронной промышленности задача их импортозамещения является весьма актуальной.

Формируемые по планарной МОП технологии параметры ячейки перепрограммируемой памяти в значительной степени определяются качеством окисла под затвором и межуровневой изоляции, формируемых терми-

ческим окислением кремния и поликремния (ПК) соответственно. Физико-химические, электрофизические свойства на кремнии хорошо известны. Ограничения, связанные с увеличением электронной и ионной проводимости окисных плёнок поликремния (ОПК) с неоднородной границей в рабочих режимах перезаписи и хранения при долговременном функционировании и термополевых нагрузках, исследованы в меньшей степени.

Целью настоящей работы является определение допусков по неоднородности затворов для обеспечения работоспособности энергонезависимой памяти в режиме хранения.

### ***Возможные конструкция, топология, принцип работы МОП ячейки энергонезависимой памяти***

Конструкции энергонезависимой памяти в настоящее время чрезвычайно многообразны [1, 2]. Например, ячейки памяти типа SuperFlash с расщеплённым затвором «split gate» первого и второго поколений, ячейки SuperFlash третьего поколения с четырьмя затворами: плавающим (ПЗ), управляющим (УЗ), стирающим (ЗС) и затвором связи – ЗС (СрG – couple gate) и другие. Для стирания таких ячеек используется FN-туннелирование (Fowler-Nordheim туннелирование – механизм проводимости туннелированием через потенциальный барьер ультратонкого оксида) электронов из ПЗ в затвор выбора, а для программирования – инжекция горячих электронов в ПЗ со стороны истока (SS CHE injection). Ячейка NIMOS-памяти программируется боковой инжекцией горячих электронов со стороны истока (SSI – source – side injection). Информация стирается FN-туннелированием. Один из вариантов стирания пакета заряда – туннелирование электронов через межзатворный оксид с края плавающего затвора.

Конструктивно и пространственно ячейки формируются по-разному, однако в подавляющем большинстве случаев в межуровневой изоляции используется термический окисел, который формируется на рельефном затворе.

### ***Неоднородности на поверхности окисленного поликремния***

В работе [3] предполагается образование дефектов на фазовой границе ОПК-ПК во время термического окисления по следующим механизмам:

1. «бугры», возникающие при аномальной кристаллизации в области локального загрязнения подложки;
2. «протуберанцы», возникающие при окислении зёрен ПК;
3. включения неокисленного кремния внутри окисла.

Верхняя поверхность окисла в области «бугра» повторяет конфигурацию поверхности поликристаллического кремния, так что номинальная толщина окисла в этом месте остаётся постоянной. Характерный размер «бугра» – 100 нм.

В противоположность «буграм» верхняя поверхность окисла над «протуберанцем» остаётся плоской и толщина окисла в этой области уменьшается более чем на 50 %.

Другие возможные изменения рельефа в активной структуре микросхем с поликремниевым затвором – утоньшение окисла на рёбрах и углах затворов, особенно при низких температурах окисления в парах воды [4].

### ***Ограничения, связанные с увеличением электронной проводимости окисла поликремния в межуровневой изоляции***

Карта электрических полей и оценка электронной проводимости для окисла толщиной 10-50 нм на поликремнии рассчитана в среде Tcad Sentaurus для горизонтальной поверхности затвора и неоднородности в виде эллипсоида вращения в данной работе [5].

Результаты расчёта показывают, что экстремальные изменения электрических полей в диэлектрической среде происходят в локальной области распределения  $E_x$  на острие 2-3 нм («корона»). Изменений электрических полей на его периферии по отношению к значениям в объёме практически не происходит. Соотношение электрических полей на острие геометрического профиля увеличивается по отношению к периферии в 1,5-10 раз в зависимости

от изменений неоднородности рельефа  $j$  (отношение высоты ( $a$ ) к ширине ( $b$ ) неоднородности). При выравнивании геометрического рельефа поверхности затвора, то есть увеличения диаметра неоднородности, либо за счёт уменьшения высоты зерна соотношение электрических полей уменьшается и составляет менее 50 %. Степень усиления электрического поля на острие имеет тенденцию к увеличению для супертонких диэлектриков (5 нм), начиная со значения неоднородности  $j = 2$ .

Критическое состояние по электрическому полю возникает после соприкосновения «короны» с внешней поверхностью окисла.

Моделирование выявило два крайних случая формирования критической неоднородности в диэлектрике с образованием короны на острие:

1. максимальная неоднородность  $j \approx 10$ . Возможен локальный электрический пробой плёнки по механизму лавинного умножения в области резкого увеличения электрического поля и образование точечного дефекта в этой области;

2. неоднородность крайне близка к внешней поверхности плёнки. В этом случае возникает проникающий дефект диэлектрической плёнки на острие в области «короны».

### Расчёт электрического поля, наведённого мобильным зарядом в окисле на неоднородной поверхности затвора

Присутствие в окисной плёнке примесей положительно заряженных ионов, мобильных в условиях электрических и термических нагрузок и скапливающихся на остриях, приводит к возникновению наведённого дополнительного электрического поля.

При изменении конфигурации блокирующей поверхности распределение мобильного заряда и его наведённое электрическое поле будут повторять контуры фигуры неоднородности.

Воздействие мобильного заряда проявляется в долговременных режимах рабочего состояния ЭП, то есть в режиме хранения. В кратковременных циклах записи-стирания и считывания информации, которые продолжаются в течение нескольких наносекунд, миграционные процессы не проявляются.

Можно предположить, что в результате релаксационных процессов при термополевых нагрузках, связанных с перемещением и накоплением на блокирующей границе с поликремниевым затвором мобильного положительного заряда  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  окисную плёнку можно рассматривать как моноэлектрет (рис. 1).

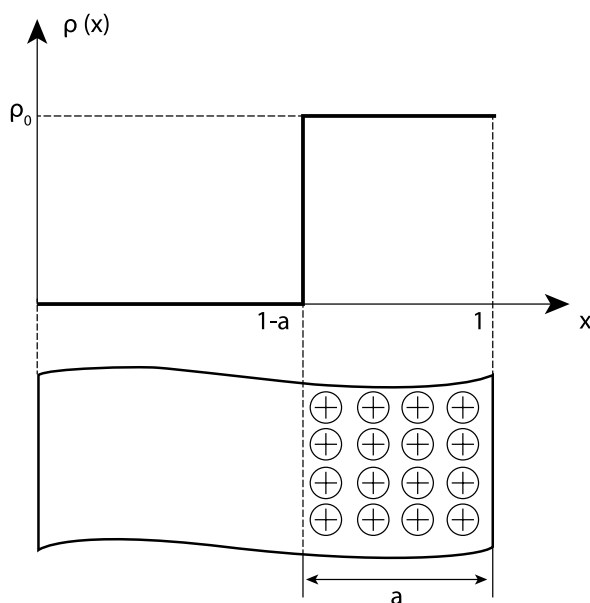


Рис. 1

Свободный электрет с «прямоугольным» распределением объёмного заряда

В [6] рассмотрена одномерная задача расчёта электрического поля домена с положительным зарядом в моноэлектрете, накопленного вблизи блокирующей границы.

Для плёнки диэлектрика толщиной  $l$  с положительным зарядом ионов, накопленным на плоской поверхности, распределение заряда  $\rho(x)$  имеет вид дельта-функции Дирака  $\delta(x)$  (рис. 1):

$$\rho(x) = \rho_0, \quad 1-a \leq x \leq l; \quad \rho(x) = 0, \quad x < 1-a.$$

В общем случае поле внутри электрета неоднородно в горизонтальном направлении и в соответствии с уравнением Максвелла для вектора индукции  $D$  электростатического поля  $E$ :

$$\operatorname{div} D = \rho. \quad (1)$$

Или для одномерного случая:

$$dD/dx = \rho(x). \quad (2)$$

С учётом связи векторов  $D$  и  $E$  и значений диэлектрических проницаемостей материала подложки  $\varepsilon$  и вакуума  $\varepsilon_0$ :

$$\varepsilon \varepsilon_0 dE/dx = \rho(x). \quad (3)$$

Для зазора электрета, где нет пространственного заряда:

$$\varepsilon_0 \varepsilon_1 dE_1/dx = \rho(x). \quad (4)$$

Электрическое поле  $E$  будет однородным. Система дифференциальных уравнений (3, 4), дополненная двумя граничными условиями:

$$D_1 - D = 0 \text{ или } \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot E_1 - \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E = 0$$

$$\text{и } \int_0^s E(x) dx + s_1 E_1 = 0 \quad (5)$$

Интегрируя по  $x$  (3) и (4), общее решение для расчёта  $E(x)$ :

$$E(x) = 1/\varepsilon \varepsilon_0 \int_0^x \rho(\zeta) d(\zeta) + C_1, \quad E_1 = C_2, \quad (6)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  постоянные интегрирования.

Решая систему уравнений и определяя постоянные интегрирования  $C_1$ ,  $C_2$ , можно получить выражения для электрических полей моноэлектрета:

$$E(x) = -1/\varepsilon \varepsilon_0 \int_{1-a}^l \rho_0 d(x) = -\rho_0 a / \varepsilon \varepsilon_0, \quad (x < 1-a) \quad (7)$$

$$E(x) = 1/\varepsilon \varepsilon_0 \int_{1-a}^x \rho_0 d \zeta - 1/\varepsilon \varepsilon_0 \int_{1-a}^l \rho_0 dx = -\rho_0 / \varepsilon \varepsilon_0 (L-x),$$

$$(1-a < x < l). \quad (8)$$

### **Принципы определения критических конфигураций неоднородных границ раздела межуровневой изоляции затворов по ионной составляющей**

Для неоднородной блокирующей границы величина и темп изменения наведённого электрического поля мобильного положительного заряда накопленного на остриях определяется его концентрацией и положением вблизи неоднородности и будет повторять распределение внешнего электрического поля.

В настоящей работе проведена оценка наведённого электрического поля мобильного заряда на острие  $E_a$  и периферии неоднородности  $E_o$  по соотношению (8) для двух состояний рельефа неоднородности – в виде иглы ( $j=2,5$ ) и плоской поверхности ( $j=0,5$ ) (рис. 2). Процесс нагревания микросхемы считается завершённым и она находится в режиме хранения. В

расчётах предположено, что на острие и периферии (точки а и б) концентрация мобильного заряда в окисле составляет  $N_a$ ,  $N_b$  (табл.). Выбор численных значений  $N_a$ ,  $N_b$  обусловлен тем, что внешние электрические поля на острие и периферии  $E_a$ ,  $E_b$  могут отличаться на порядок [6].

Расчётная величина наведённого электрического поля мобильного заряда в окисле над остриём в рамках линейной модели электрета (7) составила  $E_a = 4,8 \cdot 10^{-2}$  МВ/см и  $E_b = 1,5 \cdot 10^{-3}$  МВ/см для «иголки» и «плоского» рельефа соответственно.

Из приведённых оценок можно сделать заключение, что выравнивание поверхности окисленного поликремния позволяет

снизить на порядок наведённое электрическое поле мобильного заряда. Критические значения наведённого электрического поля на острие  $E_a$  более 5 МВ/см возникают для «иголки» в области значений объёмной плотности ионного заряда порядка  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

### Заключение

Таким образом, методология определения критических конфигураций неоднородных границ раздела диэлектрика и затворов транзисторов включает: а) подбор исходных параметров неоднородностей структуры, определяющих электрические характеристики элемента памяти, например, характер-

Таблица

Результаты оценки изменений наведённого электрического поля мобильного заряда для двух состояний рельефа неоднородности в виде «иголки» ( $j = 2,5$ ) и «плоской» поверхности ( $j = 0,5$ ) для допускаемых на острие и периферии концентрациях  $N_a$ ,  $N_b$ . Расстояние от точек а и б в окисле до поверхности поликремниевой неоднородности выбрано 1 нм при толщине окисла 50 нм. Расстояние от точек а и б в окисле до поверхности ОПК – 1 нм при толщине окисла 50 нм

Рельеф	$N_a$ , над остриём (точка а), см <sup>-3</sup>	$N_b$ , на периферии (точка б), см <sup>-3</sup>	$E_a$ , над остриём (точка а), МВ/см	$E_b$ , на периферии (точка б), МВ/см
«Плоский» (рис. 2а)	$3,2 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
«Игла» (рис. 2б)	$10^{18}$	$10^{15}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$

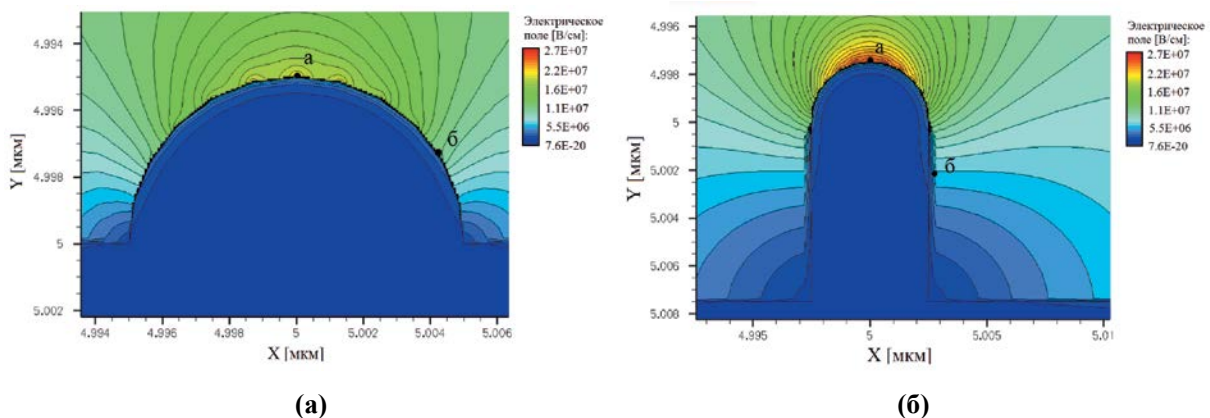


Рис. 2

Схема расчёта наведённого электрического поля мобильного заряда в окисле  $E_a$ ,  $E_b$  вблизи поверхности раздела с поликремниевой неоднородностью различной степени  $j$ : а)  $j = 4$ , б)  $j = 10$ . Расстояние от точек а и б в окисле до поверхности ОПК – 1 нм при толщине окисла 50 нм

ные значения параметров неоднородности горизонтальной поверхности и кромки поликремниевого затвора относительно управляющего затвора; б) расчёт или измерение концентрационных профилей мобильного заряда в стационарных температурных и электрических полях, например, в полях 1 МВ/см, 5 МВ/см, 10 МВ/см и температурных нагрузках  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; в) расчёт наведённых электрических полей мобильного заряда в рамках модели электрета.

### *Литература*

1. Лукичев В. Ф. Современная элементная база запоминающих устройств / В. Ф. Лукичев, Ю. Л. Шиколенко // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 11 (184). – С. 40-53.
2. Лукичев В. Ф. Постоянные запоминающие устройства на основе хранения заряда / В. Ф. Лукичев, Ю. Л. Шиколенко // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 10 (183). – С. 40-53.
3. Marcus R. B., Sheng T. T., Lin P. Polysilicon/SiO<sub>2</sub> Interface microtexture and dielectrical breakdown / J. of the Electrochem. Soc., 1982, v. 129, № 6, pp. 1283-1289.
4. Groesneken G., Maes H. E. A quantitation model for the conduction in oxides thermally grown polycrystalline in silicon // IEEE Trans. on El. Dev., 1986, v. ED-33, № 7, p. 1028-1042.
5. Перов Г. В., Егоркин А. В. Определение рабочего диапазона неоднородности поверхности окисленного поликремния по распределению электрических полей в ультратонком диэлектрике в среде Sentaurus Tcad // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2015. – Вып. 2-3 (236-237) – С. 89-95.

дниковые приборы. – 2015. – Вып. 2-3 (236-237) – С. 89-95.

6. Электреты / G. M. Broadhurst, G. T. Davis, B. Gross et. al.; под редакцией G. M Sessler. – М.: Мир, 1983. – С. 25-32. – (Проблемы прикладной физики).

### *References*

1. Lukichev V. F., Shikolenko Yu. L. Modern elemental base of memory devices. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and micro-system engineering], 2015, № 11 (184), pp. 40-53.
2. Lukichev V. F., Shikolenko Yu. L. Permanent memory devices based on charge storage. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and micro-system engineering], 2015, № 10 (183), pp. 40-53.
3. Marcus R. B., Sheng T. T., Lin P. Polysilicon/SiO<sub>2</sub> Interface microtexture and dielectrical breakdown / J. of the Electrochem. Soc., 1982, v. 129, № 6, pp. 1283-1289.
4. Groesneken G., Maes H. E. A quantitation model for the conduction in oxides thermally grown polycrystalline in silicon // IEEE Trans. on El. Dev., 1986, v. ED-33, № 7, pp. 1028-1042.
5. Perov G. V., Egorkin A. V. Determination of operation range of oxidized polysilicon surface inhomogeneity by the distribution of electric fields in ultra-thin dielectric in Sentaurus TCAD environment. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2015, № 2-3 (236-237), pp. 89-95.
6. Broadhurst G. M., Davis G. T., Gross B. et. al. *Elektrety* [Electrets] / edited by G. M Sessler. Moscow, Mir Publ., 1983, pp. 25-32, (Applied Physics Issues).