

# ЗАРЯДОВЫЕ СОСТОЯНИЯ МОП-СТРУКТУР

## СТАНДАРТИЗИРОВАННАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

**Практически с момента появления МОП ИС известно, что их надежность и выход годных в значительной степени зависят от вида и величины заряда в подзатворном диэлектрике. До сих пор ведущие полупроводниковые фирмы интенсивно изучают характеристики зарядовых состояний в структуре кремний–термически выращенный оксид кремния. Цель этих исследований – получить предельные значения степени интеграции, быстродействия, потребляемой мощности, надежности и т.п. В конце 70-х годов была предложена система обозначений и названий таких состояний.**

Для разработки общей стандартизированной терминологии описания зарядов в оксидах еще в 1978 году Отделением электроники Электрохимического общества и Институтом инженеров в области электротехники и радиоэлектроники был создан специальный комитет, в который вошли ведущие американские, европейские и японские специалисты в области поверхностных явлений в полупроводниках [1]. Возглавил комитет Брюс Дил (фирма Fairchild Camera and Instrument). К работе, длившейся полтора года, привлекались и специалисты в области термического окисления кремния. При выработке стандартной терминологии для описания поведения зарядов в оксиде комитет руководствовался следующим:

- система терминологии должна быть по возможности простой;
- символы и индексы, обозначающие тип заряда, должны соответствовать природе заряда и не должны совпадать с другими обозначениями, принятыми в полупроводниковой терминологии;
- символы различных типов зарядов должны быть такими, чтобы их нельзя было спутать друг с другом.

После длительных и детальных дискуссий в 1979 году терминология была согласована и принята [1]. Были установлены четыре основных типов зарядов, определяющих электрические характеристики системы Si–SiO<sub>2</sub> [2,3]. Но до сих пор в вопросах терминологии существуют серьезные разногласия. Отсутствие общепризнанной системы обозначений и названий зарядовых состояний структуры кремний–термически окисленный кремний вносит большую путаницу при обсуждении и интерпретации результатов исследований этих состояний. Что, например, понимать под состояниями, называемыми поверхностными, быстрыми, пограничными? Эти

Н.Зайцев, Г.Красников,  
О.Огурцов

термины означают одно и то же состояние или разные? И это не единственный пример.

Ниже приведены рекомендуемые обозначения и наименования четырех типов зарядов в оксиде (рис. 1).

Рекомендуемые обозначения: **Q** – эффективный заряд, приходящийся на единицу площади границы Si–SiO<sub>2</sub> (размерность – Кл/см<sup>2</sup>); **N** – число зарядов, приходящихся на единицу площади границы раздела Si–SiO<sub>2</sub> (см<sup>-2</sup>), т.е.  $N=|Q/q|$ , где  $q$  – заряд электрона.

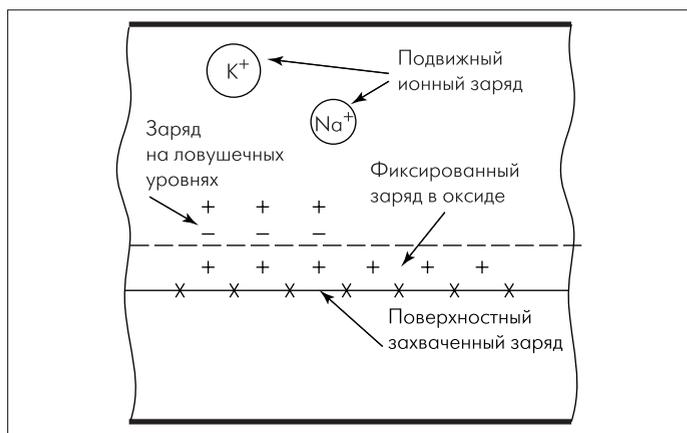
Знак перед **Q** может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от того, какие заряды преобладают – положительные или отрицательные. Величина **N**, по определению, всегда положительна. Нужно иметь в виду, что **Q** и **N** описывают эффективный заряд, приведенный к границе раздела Si–SiO<sub>2</sub>, в то время как на некотором расстоянии от этой границы действительная плотность заряда может быть значительно больше.

Предлагаемая терминология не относится к незаряженным ловушечным центрам.

**Фиксированный заряд в оксиде (Fixed Oxide Charge) – Q<sub>f</sub>, N<sub>f</sub>.** Положительный заряд, обусловленный структурными дефектами в слое оксида толщиной менее 2,5 нм у границы раздела Si–SiO<sub>2</sub>. Этот заряд появляется в процессе окисления кремния, его плотность зависит от среды и температуры окисления, условий охлаждения и ориентации кремния.

**Подвижный ионный заряд (Mobile Ionic Charge) – Q<sub>m</sub>, N<sub>m</sub>.** Обусловлен присутствием ионов примесей, таких как Li<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> и, возможно, H<sup>+</sup>. К этому типу заряда относятся также отрицательные ионы (например, гидроксильные группы и др.) и ионы тяжелых металлов, но их подвижность при температурах менее 500°C низка. Необходимо отметить, что тяжелые металлы вносят опосредованный вклад в величину заряда за счет изменения (нарушения) структуры оксида.

**Поверхностный захваченный заряд (Interface Trapped Charge) – Q<sub>it</sub>, N<sub>it</sub>.** Положительный или отрицательный заряд, обусловленный структурными дефектами поверхности, возникающими в процессе окисления кремния, примесями металлов на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub> и дефектами, вызванными радиацией или другими аналогичными процессами, приводящими к нарушению связей. Эти заряды локализованы на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub>. Поверхностные состояния, приводящие к появлению поверхностного захваченного заряда, электрически связаны с нижерасположенным кремнием и поэтому могут заряжаться или разряжаться в зависимости от поверхностного потенциала. Большую часть поверхностного захваченного заряда нейтрализует низкотемпературный (~450°C) отжиг в среде водорода. Именно этот тип заряда некоторые авторы и сегодня продолжают называть **поверхностными**



**Рис. 1. Название и расположение зарядов в термически окисленном кремнии [3]**

состояниями, быстрыми состояниями, пограничными состояниями и др.

Иногда плотность поверхностного захваченного заряда целесообразно выражать через площадь поверхности и энергию заряда в запрещенной зоне кремния. В этом случае рекомендуется использовать такое понятие, как **Interface Trap Density – поверхностная плотность ловушек**, обозначаемое  $D_{it}$  (число/см<sup>2</sup>·эВ).

**Заряд на ловушечных уровнях в оксиде (Oxide Trapped Charge) –  $Q_{ot}$ ,  $N_{ot}$ .** Может быть положительным или отрицательным в зависимости от захвата дырок или электронов ловушками, образованными в объеме оксида в процессе его формирования. Он может возникнуть и в результате радиационной ионизации, инжекционных потоков или других подобных процессов. В отличие от фиксированного заряда его также можно нейтрализовать низкотемпературным отжигом (<500°C), хотя нейтральные ловушки при этом могут остаться.

Необходимо отметить одно важное обстоятельство: при определении эффективной, приведенной к границе раздела Si–SiO<sub>2</sub> плотности поверхностного захваченного и фиксированного зарядов используют истинную поверхностную плотность, так как поверхностный захваченный заряд располагается непосредственно на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub>, а фиксированный заряд локализуется около границы Si–SiO<sub>2</sub>, в слое оксида толщиной менее 2 нм [4]. Поскольку заряд на ловушечных центрах в оксиде и подвижный ионный заряд локализованы во всем объеме оксида, то значения эффективной поверхностной плотности этих зарядов, приведенные к границе Si–SiO<sub>2</sub>, определяются из выражений [5]

$$Q_m = \frac{1}{T_{ox}} \int_0^{T_{ox}} x \rho_m(x) dx, \quad (1)$$

$$Q_{ot} = \frac{1}{T_{ox}} \int_0^{T_{ox}} x \rho_{ot}(x) dx. \quad (2)$$

где  $\rho_{ot}(x)$ ,  $\rho_m(x)$  – истинные объемные плотности захваченного в оксиде и подвижного ионного зарядов, соответственно, а  $T_{ox}$  – толщина оксида.

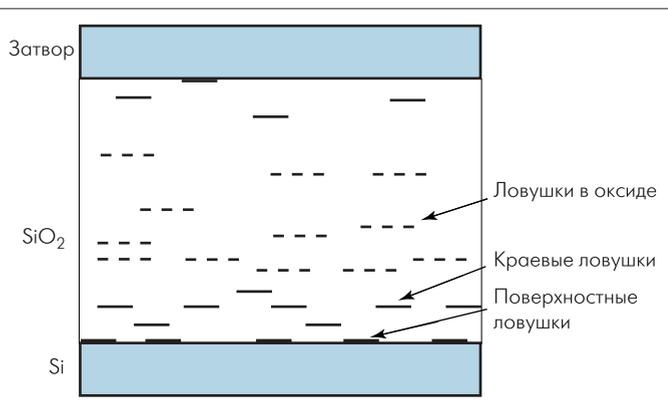
Величину заряда обычно определяют по значению напряжения “плоских зон” ( $U_{FB}$ ) высокочастотной (измеренной на частоте 1 МГц) вольт-фарадной характеристики МДП-структуры. Однако при этом получают **суммарный эффективный заряд  $Q_{eff}$**  в который входят все типы зарядов. В литературе же под ним часто понимают фиксированный заряд. Это понятие разработчики КМОП БИС широко используют при отработке технологического процесса окисления кремния. Но еще раз подчеркнем, что это эффективный сум-

марный, а не фиксированный заряд. С учетом (1) и (2)  $Q_{eff}$  можно определить как [6]

$$Q_{eff} = Q_{it} + Q_f + \frac{1}{T_{ox}} \int_0^{T_{ox}} x [\rho_{ot}(x) + \rho_m(x)] dx. \quad (3)$$

В процессе эксплуатации микросхемы могут подвергаться радиационному, термическому и другим видам воздействия. Это приводит к изменению плотности зарядов, находящихся на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub> (тип зарядов, согласно приведенной выше градации, не изменяется). Поэтому, приводя величину того или иного типа заряда, необходимо указывать, при каких условиях (эксперимента или эксплуатации) она была получена.

Предложенная терминология [1] поддержана и широко используется специалистами, о чем свидетельствуют многочисленные публикации в журналах, а также учебные пособия [4] и монографии [5]. Но иногда появляются предложения по модификации стандартизированной терминологии. Так, предложено ввести понятие **краевые ловушки (Border Traps)** (рис.2), которые автор ассоциирует с E'-центрами, расположенными вблизи границы Si–SiO<sub>2</sub> в слое толщиной около 3 нм. Эти ловушки легко обмениваются зарядом с кремнием или материалом затвора [7]. По мнению автора, такими E'-краевыми ловушками (E'-border traps) может стать часть акцепторных и донорных уровней. При этом он исключает из рассмотрения фиксированный заряд в оксиде. Но современная теория процесса окисления кремния и его кинетики построена на предположении существования этого заряда. Разработаны также модели его образования, адекватные результатам экспериментов [5].



**Рис.2. Схема расположения краевых ловушек в МОП-структуре [7]**

С нашей точки зрения, для устранения противоречий, изложенных в работе [7], достаточно ассоциировать часть акцепторных и донорных уровней с радиационно-индуцируемыми в оксиде E'-центрами, поскольку они распределены по всему объему оксида, а также с E'-центрами, относящимися к фиксированному заряду. В этом случае необходимость в ревизии терминологии Брюса Дила отпадает.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.Е. Deal. – IEEE Trans.Elect.Dev., 1980, v.ED-27, No.3.
2. В.Е. Deal. – J.Electrochem.Soc., 1974, v.121, p.188С.
3. Y.C. Cheng. – Prog. Surface Sci., 1977, v.8, p.181.
4. Зи С. Физико полупроводниковых приборов. – М., 1984.
5. Красников Г.Я., Зайцев Н.А. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. – М., 1999.
6. Y.Karzhaniin, Wei Wu. – 1997, IEEE/SEMI Advan. Semic. Manuf. Confer.
7. D.M. Fleetwood. IEEE Trans. Nucl. Science, 1992, v.39, No.2.