

# Физическая модель процесса старения МОП-структуры

© М.А. Булушева, В.Д. Попов, Г.А. Протопопов<sup>¶</sup>, А.В. Скородумова

Московский инженерно-физический институт (Государственный университет),  
115409 Москва, Россия

(Получена 31 августа 2009 г. Принята к печати 9 сентября 2009 г.)

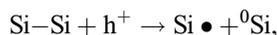
Представлена физическая модель процесса старения МОП-структуры. По результатам проведенных ускоренных испытаний найден энергетический параметр напряженной МОП-структуры — энергетический уровень напряженных связей.

## 1. Введение

В настоящее время эксплуатируется аппаратура, построенная на элементной базе, изготовленной более 15 лет. При выходе из строя отдельных блоков производится их замена, причем запасные блоки и элементы начинают использоваться после длительного хранения.

При длительном хранении МОП интегральных микросхем (ИМС) происходит накопление дефектов и, как следствие, деградация электрических характеристик, таких как пороговое напряжение, крутизна и т. д. Одними из таких дефектов являются поверхностные состояния (ПС), которые образуются в приповерхностной области полупроводника. Наиболее часто в литературе встречаются работы по образованию ПС при ионизирующем излучении. В работе [1] предлагается модель разрыва напряженных связей при воздействии ионизирующего излучения, в результате чего на границе раздела Si–SiO<sub>2</sub> образуются ПС. Существуют и другие модели. В работе [2] образование ПС объясняется захватом водорода на напряженные связи, но тоже при воздействии ионизирующего излучения. Для процессов, определяющих надежность, характерно длительное воздействие температуры. Однако работы, которые бы описывали образование ПС при длительном воздействии температуры, практически отсутствуют.

Один из основных механизмов образования ПС является разрыв напряженных валентных связей согласно реакции вида



где  $h^+$  — свободная дырка,  $\text{Si} \bullet$  — трехкоординационный кремний с одной болтающейся связью [3]. При разрыве напряженной валентной связи Si–Si возникает энергетический уровень в запрещенной зоне полупроводника, на который может захватываться заряд, что приводит к деградации МОП ИМС. Цель данной работы состоит в разработке физической модели старения МОП-структуры и определении ее параметров, рассматривая разрыв напряженных валентных связей как основной механизм образования ПС при старении.

## 2. Физическая модель процесса старения МОП-структуры

Чип ИМС покрыт пленкой оксида кремния и характеризуется наличием в нем механических напряжений [4]. Они возникают вследствие различия коэффициентов линейного расширения материалов кремния и оксида кремния, так как пленка оксида выращивается (или наносится) при повышенной температуре, а при охлаждении структуры SiO<sub>2</sub>–Si возникают механические напряжения, что вызывает деформацию структуры [5]. При этом пластина кремния оказывается растянутой, а пленка SiO<sub>2</sub> — сжатой. Причиной возникновения механических напряжений может быть также и различие в строении материалов полупроводника и диэлектрика.

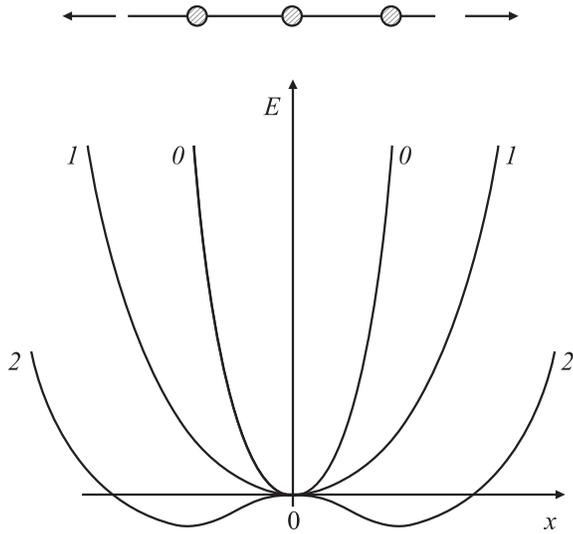
Наличие механических напряжений приводит к тому, что атомы вещества находятся в неравновесном состоянии, зафиксированном охлаждением структуры SiO<sub>2</sub>–Si после ее изготовления. Валентные связи являются напряженными, т. е. осуществляемыми на расстоянии, не соответствующем шагу решетки в кристалле, и (или) расположенными под углом, отличным от оптимального. В таких напряженных структурах возможно возникновение „неустойчивости Френкеля“. Изменение положения минимума свободной энергии атома кремния в деформированной структуре можно проиллюстрировать на примере трехатомной конфигурации (рис. 1). При возникновении механических напряжений энергетическая диаграмма видоизменяется. Атом кремния оказывается не в минимуме, а в максимуме свободной энергии, т. е. в положении неустойчивого равновесия. Напряженную валентную связь Si–Si можно рассматривать как энергетический уровень. На этот энергетический уровень напряженной связи может произойти захват дырки (уход валентного электрона), вследствие чего происходит смещение атома из локального в абсолютный минимум свободной энергии и образование дефекта — ПС.

Вероятность того, что энергетический уровень  $E$  занят электроном, выражается функцией Ферми–Дирака [6,7]:

$$f_e(E, T) = 1 / (1 + \exp\{(E - F)/(kT)\}), \quad (1)$$

где  $F$  — уровень Ферми,  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — температура. Вероятность захвата дырки на уро-

<sup>¶</sup> E-mail: g.a.protopopov@mail.ru



**Рис. 1.** Возникновение „неустойчивости Френкеля“ в трех-атомной конфигурации: энергетическая диаграмма в отсутствие механических напряжений (0), в слабо напряженной (1) и сильно напряженной (2) структурах.

вень  $E$  (отсутствие электрона) выражается следующей формулой:

$$f_p = 1 - f_e. \quad (2)$$

В течение длительного хранения МОП ИМС не наблюдается интенсивного накопления дефектов. Но при увеличении температуры скорость накопления дефектов резко увеличивается. Учитывая этот факт и выражение (1), можно сделать вывод, что энергетические уровни напряженных связей находятся в глубине валентной зоны полупроводника. К тому же выводу можно прийти, анализируя структуру энергетических уровней, возникающих при сближении атомов кремния друг с другом, (рис. 2). Из рисунка видно, что при увеличении расстояния между атомами кремния (что имеет место в напряженной МОП-структуре) энергетические уровни опускаются.

При сближении атомов кремния образуется химическая связь, энергия которой описывается следующим выражением [8]:

$$E_{\text{bond}} = 2V_2^h. \quad (3)$$

Величина  $V_2^h$  называется энергией ковалентной связи по гибридизованным орбиталям и является матричным элементом по двум гибридизованным орбиталям, направленным навстречу друг другу, т. е. участвующим в образовании химической связи между двумя соседними атомами Si. Она равна [8]

$$V_2^h = 4.37h^2/(md^2), \quad (4)$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $m$  — масса электрона,  $d$  — расстояние между атомами, образующими связь. Для ненапряженной атомарной структуры кремния  $d_0 = 2.35 \text{ \AA}$  и, следовательно,  $E_{\text{bond}0} = 12.06 \text{ эВ}$ . Для напряженной (растянутой) атомарной структуры рассто-

яние между атомами кремния  $d = d_0 + \Delta d$  и энергия связи, а значит, и энергия каждого из электронов, образующих связь, составляют

$$E_{\text{bond}} = E_{\text{bond}0} \cdot d_0^2/d^2. \quad (5)$$

Сдвиг энергетического уровня напряженной связи Si-Si относительно уровня ненапряженной (потолок валентной зоны) равняется разности выражения (5) и  $E_{\text{bond}0}$ :

$$E_{\text{SB}} = E_{\text{bond}0}d_0^2/d^2 - E_{\text{bond}0}. \quad (6)$$

Таким образом, энергетический уровень напряженной связи находится ниже потолка валентной зоны на следующую величину:

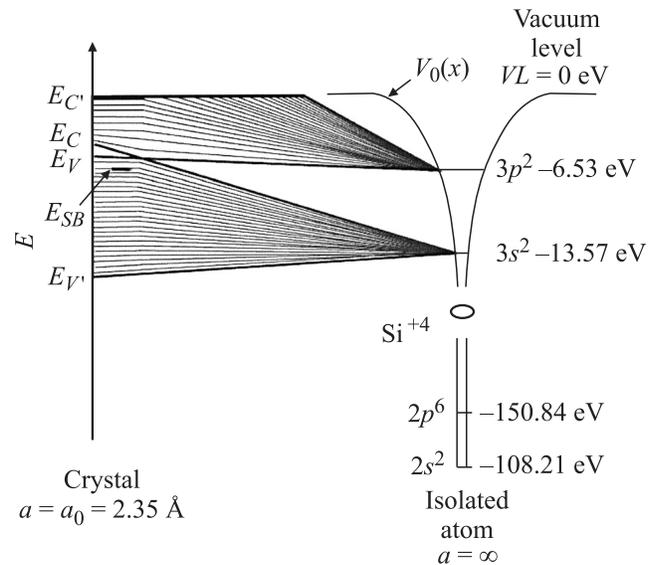
$$E_{\text{SB}} = E_{\text{bond}0} ((1 + \delta d)^{-2} - 1), \quad (7)$$

где  $\delta d = \Delta d/d_0$  — относительное удлинение валентной связи Si-Si,  $\Delta d$  — приращение длины связи Si-Si вследствие механических напряжений. На рис. 3 показана зависимость глубины залегания энергетического уровня напряженной связи  $E_{\text{SB}}$  в зависимости от относительного удлинения валентной связи Si-Si  $\delta d$ .

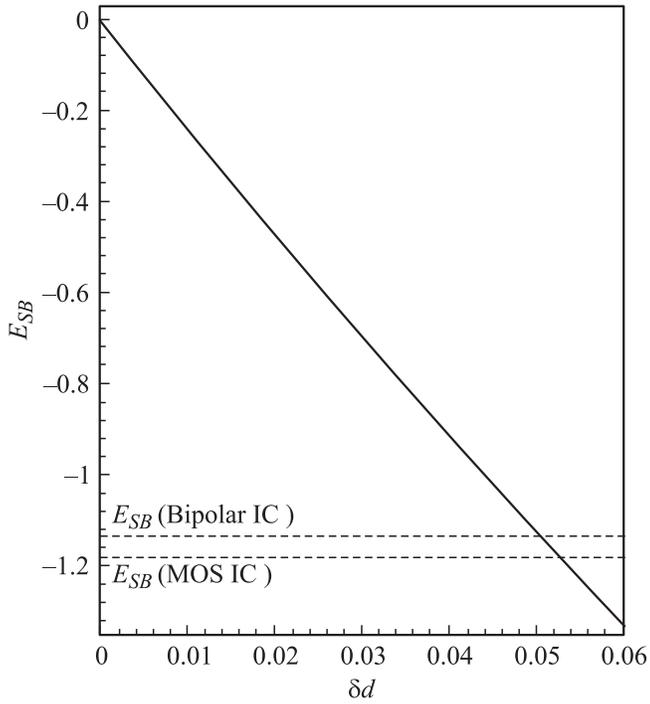
Из теории статистики рекомбинации электронов и дырок известно [6,7], что число переходов дырок в единицу объема и в единицу времени пропорционально, во-первых, концентрации дырок и, во-вторых, концентрации пустых ловушек. Поэтому выражение для темпа захвата дырок на ловушки можно записать как

$$r_p = \alpha_p N_t f_p p, \quad (8)$$

где  $\alpha_p$  — по определению, коэффициент захвата дырок на ловушки;  $N_t$  — концентрация ловушек;  $f_p$  — вероятность захвата дырок (выражение (2));  $p$  — концентрация дырок.



**Рис. 2.** Структура энергетических уровней в изолированном атоме кремния, а также схематическая структура энергетических зон, возникающих при сближении этих атомов и образовании монокристаллического кремния.



**Рис. 3.** Зависимость глубины залегания энергетического уровня напряженной связи  $E_{SB}$  в зависимости от относительного удлинения валентной связи Si–Si  $\delta d$ .

Вероятность элементарного акта рекомбинации часто выражают при помощи эффективного сечения рекомбинации [6]. При этом по аналогии с кинетической теорией газов каждый акт рекомбинации электрона с дыркой чисто формально уподобляется акту соударения электрона и частицы с некоторым сечением  $S$ . Следовательно, вместо коэффициента захвата можно ввести понятие об эффективном сечении захвата дырок на ловушки  $S_p$ . Оно, по определению, связано с  $\alpha_p$  соотношением

$$\alpha_p = S_p v_T, \quad (9)$$

где  $v_T$  — тепловая скорость дырок.

Напряженные валентные связи Si–Si можно рассматривать как ловушки для дырок, при этом концентрация дырок равна концентрации акцепторов  $N_A$  (для полупроводника  $p$ -типа). При глубоком залегании энергетического уровня напряженной связи выражения (1) и (2) для  $f_p$  можно записать в виде распределения Максвелла–Больцмана классической статистики [6], тогда вероятность захвата дырки на этот уровень описывается следующей функцией:

$$f_p = \exp((E_{SB} - F)/kT). \quad (10)$$

Тогда, учитывая тот факт, что разрыв одной связи сопровождается релаксацией напряжений в  $K_{rel} \approx 64$  валентных связях [9], и выражения (8)–(10), можно получить выражение для скорости изменения концентрации

напряженных валентных связей  $N_{SB}$  следующего вида:

$$\frac{dN_{SB}}{dt} = -\sigma_p v_T f_p K_{rel} N_A N_{SB}, \quad (11)$$

где  $\sigma_p$  — эффективное сечение захвата дырки. Значение  $\sigma_p$  можно оценить, рассматривая напряженную валентную связь Si–Si длиной  $d = d_0 + \Delta d$  как ловушку для дырок с сечением окружности диаметром  $d$ . Как будет показано далее значение  $\Delta d$  составляет  $\sim 0.1 \text{ \AA}$ . Таким образом, из выражения (11) можно получить следующее уравнение:

$$\frac{dN_{SB}}{dt} = -\omega N_{SB}, \quad (12)$$

где  $\omega$  — коэффициент, который описывается выражением

$$\omega = \pi d^2 v_T K_{rel} N_A \exp((E_{SB} - F)/kT), \quad (13)$$

где  $d$  — длина связи Si–Si,  $v_T$  — тепловая скорость дырок,  $K_{rel}$  — коэффициент связи между количеством разорванных и релаксированных связей,  $N_A$  — концентрация акцепторов в полупроводнике,  $E_{SB}$  — энергетический уровень напряженных валентных связей,  $F$  — уровень Ферми,  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — температура.

Решение дифференциального уравнения (12) имеет следующий вид:

$$N_{SB}(t) = N_{SB0} \exp(-\omega t), \quad (14)$$

где  $N_{SB0}$  — концентрация напряженных валентных связей в начальный момент времени. Изменение концентрации напряженных валентных связей за время  $t$  выражается как

$$\Delta N_{SB} = N_{SB0} (\exp(-\omega t) - 1). \quad (15)$$

Увеличение концентрации ПС связано с изменением концентрации напряженных валентных связей как  $\Delta N_{it} = -K \cdot \Delta N_{SB}$ . Следовательно, выражение для изменения концентрации ПС будет иметь следующий вид:

$$\Delta N_{it} = N_{itsat} (1 - \exp(-\omega t)), \quad (16)$$

где  $N_{itsat} = K \cdot N_{SB0}$  — значение концентрации ПС в насыщении,  $K$  — коэффициент,  $\omega$  определяет скорость образования ПС и выражается формулой (13).

Коэффициент  $\omega$  и, следовательно, скорость образования ПС сильно зависят от температуры из-за следующих факторов.

Вследствие ангармонических тепловых колебаний, с повышением температуры возрастает равновесное расстояние  $d_0$  между соседними атомами кремния по следующему закону [10]:

$$d_0 = bkT/\beta_0^2, \quad (17)$$

где  $\beta_0$  и  $b$  — квадратичный и кубический член разложения в ряд потенциальной энергии взаимодействия частиц в твердом теле соответственно,  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — температура. Для нормальных условий ( $T_0 = 21^\circ\text{C}$ )  $d_0 = 2.35 \text{ \AA}$ .

Тепловая скорость описывается следующим выражением [7]:

$$v_T = \sqrt{3kT/m}, \quad (18)$$

где  $m$  — масса дырок,  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — температура. Для нормальных условий  $v_T = 1.54 \cdot 10^7$  см/с.

Уровень Ферми зависит от температуры следующим образом [7]:

$$F = kT \cdot \ln(N_V/N_A), \quad (19)$$

где  $N_A$  — концентрация акцепторов,  $N_V$  — эффективная плотность состояний в валентной зоне, которая выражается формулой [6,7]

$$N_V = 2(2\pi m_p kT/h^2)^{3/2}, \quad (20)$$

где  $m_p$  — эффективная масса дырок,  $h$  — постоянная Планка,  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — температура. Для нормальных условий  $N_{V0} = 1.02 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Учитывая выражения (19) и (20), функцию Больцмана (выражение (10)), которая входит в выражение (13) для  $\omega$ , можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} f_p &= \exp((E_{SB} - F)/(kT)) \\ &= \exp(\{E_{SB} - kT \cdot \ln(N_V/N_A)\}/(kT)) \\ &= \exp(\{E_{SB} - kT \cdot \ln((N_{V0}/N_A)(T/T_0)^{3/2})\}/kT) \\ &= \frac{N_A}{N_{V0}} \left(\frac{T_0}{T}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_{SB}}{kT}\right). \end{aligned} \quad (21)$$

Таким образом, можно получить окончательное выражение для коэффициента  $\omega$ , которое зависит от температуры следующим образом:

$$\omega = \pi d^2 v_{T0} K_{rel} (N_A^2/N_{V0})(T/T_0) \exp(E_{SB}/(kT)), \quad (22)$$

где  $d = d_0 + 0.1 \text{ \AA}$ ,  $d_0$  — длина валентной связи Si-Si при нормальных условиях,  $v_{T0}$  — тепловая скорость дырок при нормальных условиях,  $K_{rel}$  — коэффициент связи между количеством разованных и релаксированных связей,  $N_A$  — концентрация акцепторов,  $N_{V0}$  — эффективная плотность состояний в валентной зоне при нормальных условиях,  $T_0 = 21^\circ\text{C}$  — температура при нормальных условиях,  $T$  — температура,  $E_{SB}$  — энергетический уровень напряженных связей,  $k$  — константа Больцмана.

### 3. Эксперимент и результаты

В рамках данной работы проводились ускоренные испытания партий МОП и биполярных ИМС.

#### 3.1. Испытания МОП ИМС

Для исследования процесса старения МОП-структуры использовались отечественные микросхемы 1526ЛП13

в количестве 10 штук. В состав микросхемы входят три трехходовых мажоритарных логических элемента, выполненных по технологии КМОП, предназначенные для применения в радиоэлектронной аппаратуре специального назначения.

В качестве ускоряющего фактора использовалась температура  $T = 140^\circ\text{C}$ . Испытания проводились в термостате в пассивном электрическом режиме. После выдержки при повышенной температуре в течение определенного отрезка времени образцы охлаждались 24 ч и проводились измерения сток-затворной характеристики при комнатной температуре.

Сток-затворная характеристика МОП-транзистора пологой области (когда  $|U_g - U_{th}| \leq U_d$ ) описывается выражением

$$I = S(U_g - U_{th})^2, \quad (23)$$

где  $S$  — приведенная крутизна,  $U_g$  — напряжение на затворе,  $U_{th}$  — пороговое напряжение. С помощью метода линейной регрессии рассчитывалась приведенная крутизна и пороговое напряжение  $p$ - и  $n$ -канальных транзисторов. В расчете учитывались точки утечки — ток, который равен текущему значению тока при напряжении на затворе  $U_g = 0$ .

Связь изменения плотности ПС  $\Delta N_{it}$  с изменением порогового напряжения  $\Delta U_{it}$  выражается следующей формулой:

$$\Delta U_{it} = q \cdot \Delta N_{it} \cdot d_{ox}/(\epsilon \cdot \epsilon_0), \quad (24)$$

где  $q$  — заряд электрона,  $d_{ox}$  — толщина подзатворного диэлектрика,  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика и вакуума соответственно. Значение  $\Delta U_{it}$  определялось по результатам измерения сток-затворных характеристик в подпороговой области по методике, описанной в [11]. Результаты обработки экспериментальных данных представлены в табл. 1.

Учитывая зависимость (24) и данные из табл. 1, с использованием статистического подхода определено среднее значение  $\omega$  (выражение (16)), которое оказалось равным 0.00037 1/ч. Это значение  $\omega$  соответствует

**Таблица 1.** Результаты ускоренных испытаний КМОП ИМС для 10 образцов. Указаны значения  $\Delta U_{it}$  (в вольтах) для различных значений времени ускоренного старения образцов

№	Время, ч			
	0	188	298	1176
1	0.654	0.6875	0.6875	1.093
2	0.665	0.731	0.731	1
3	0.751	0.7315	0.7315	1.1865
4	0.797	0.6275	0.6275	1.038
5	0.681	0.6735	0.6735	1.1485
6	0.6465	0.6425	0.6425	1.111
7	0.797	0.628	0.628	1.0375
8	0.7975	0.6275	0.6275	1.038
9	0.654	0.6875	0.6875	1.093
10	0.665	0.731	0.731	1

уровню энергии напряженных связей ниже границы валентной зоны на уровне  $E_{SB} = -1.18$  эВ, который указан на рис. 3. С помощью выражения (7) определены значения относительного удлинения валентной связи Si–Si и приращения длины связи Si–Si вследствие механических напряжений, которые оказались равны 0.053 и 0.12 Å соответственно, что подтверждает предположение, приведенное выше.

### 3.2. Испытания биполярных ИМС

Для исследования процесса старения биполярных транзисторов использовались 10 образцов ИМС типа 134ЛА2Б, в состав ИМС входит два элемента 4И–НЕ и элемент НЕ. В схеме используются многоэмиттерный транзистор на входе и сложный инвертор на выходе.

В качестве ускоряющего фактора использовалась температура  $T = 140^\circ\text{C}$ . Испытания проводились в термостате в пассивном электрическом режиме. После выдержки при повышенной температуре в течение определенного отрезка времени образцы охлаждались 24 ч и проводилось измерение выходного напряжения высокого уровня  $U_{out1}$  при комнатной температуре, выражение для расчета которого имеет вид

$$U_{out1} = U_{sup} - 2U^* - I_{d1}R_2/(\beta \cdot n + 1), \quad (25)$$

где  $U_{sup}$  — напряжение питания ИМС,  $U^*$  — падение напряжения на транзисторе в режиме насыщения,  $I_{d1} = n \cdot I_{in}$  — нагрузочный ток,  $n$  — число входов (в данном случае  $n = 4$ ),  $I_{in}$  — входной ток,  $R_2$  — сопротивление в коллекторной цепи входного транзистора сложного инвертора, которое можно вычислить с помощью выражения

$$R_2 = (U_{sup} - 2U^*)/(\beta \cdot \beta_I \cdot I_{in}), \quad (26)$$

где  $\beta_I$  — коэффициент усиления тока базы в инверсном режиме. Используя выражения (25) и (26), можно получить коэффициент усиления базового тока:

$$\beta = 4(U_{sup} - 2U^* + U_{sh}^*)/[\beta_I(4\beta + 1)(U_{sup} - 2U^* - U_{out})], \quad (27)$$

который является квадратным уравнением относительно  $\beta$ . Решение уравнения имеет вид [12]

$$\beta = \left( \left[ \frac{64(U_{sup} - 2U^* + U_{sh}^*)}{\beta_I(U_{sup} - 2U^* - U_{out})} + 1 \right]^{1/2} - 1 \right) / 8. \quad (28)$$

Значение  $\beta$  определяется следующими параметрами [13]:

$$1/\beta = (sA_{sur}l_b)/(D_pA_{em}) + (G_b l_b)/(G_{em}L_{em}) + 0.5(l_b/L_b)^{1/2}, \quad (29)$$

где  $s$  — скорость поверхностной рекомбинации,  $A_{sur}$  — эффективная площадь поверхности базы,  $A_{em}$  — площадь эмиттерного перехода,  $D_p$  — коэффициент диффузии дырок,  $G_b$  и  $G_{em}$  — проводимости областей базы

**Таблица 2.** Результаты обработки данных испытаний биполярных ИМС

$t, \text{ч}$	Среднее значение $U_{out1}, \text{В}$	Среднее значение $\beta$	$\Delta N_{it} \cdot 10^9 \text{см}^{-2}$
0	2.855	22.67	0
100	2.843	22.49	1.771
500	2.841	22.46	1.886
1135	2.838	22.41	1.541

и эмиттера,  $L_{em}$  и  $L_b$  — длины диффузии в эмиттере и базе,  $l_b$  — ширина базы.

Первое слагаемое в (29), зависящее от скорости поверхностной рекомбинации, отражает процесс поверхностной рекомбинации в базе, второе и третье — эффективность эмиттера и процесс объемной рекомбинации в базе соответственно.

Скорость поверхностной рекомбинации связана с плотностью ПС следующим соотношением [14]:

$$s = 0.5v_T\pi kT(\sigma_n\sigma_p)^{1/2}N_{it}, \quad (30)$$

где  $v_T$  — тепловая скорость,  $k$  — константа Больцмана,  $T$  — температура,  $\sigma_n$  и  $\sigma_p$  — сечения захвата электронов и дырок соответственно.

Сопоставление (29) и (30) показывает, что значение обратно пропорционально плотности ПС, что позволяет оценить изменение их плотности  $\Delta N_{it}$  при условии постоянства параметров во втором и третьем слагаемых выражения (29). Результаты расчета представлены в табл. 2.

Данные в табл. 2 показывают рост плотности ПС в биполярных ИМС, как и в случае МОП ИМС.

По зависимости изменения плотности ПС от времени с использованием статистического подхода определено среднее значение  $\omega$  (выражение (16)), которое оказалось равным 0.001 1/ч. Это значение  $\omega$  соответствует уровню энергии напряженных связей ниже границы валентной зоны на уровне  $E_{SB} = -1.14$  эВ, который указан на рис. 3.

## 4. Заключение

В работе была представлена физическая модель процесса старения МОП-структуры и расчетно-экспериментальным путем получена энергетическая характеристика структуры (уровень энергии напряженных связей), которая определяет кинетику процесса накопления ПС. Полученные значения уровней энергии напряженных связей от МОП и биполярных ИМС практически одинаковы ( $-1.18$  и  $-1.14$  эВ), и можно предположить, что уровень энергии напряженных связей для любых ИМС лежит в этих пределах.

## Список литературы

- [1] В.Д. Попов, Н.М. Ройзин. Микроэлектроника, **1** (6), 552 (1973).
- [2] J.R. Schwank, D.M. Fleetwood, P.S. Winokur, P.V. Dressendorfer, D.C. Turpin, D.T. Sanders. IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-34**, № 6, 1152 (1987).
- [3] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в ИМС* (М., Энергоатомиздат, 1988).
- [4] В.И. Эннс, Ю.М. Кобзев. *Проектирование аналоговых КМОП-микросхем*. Краткий справочник разработчика (М., Горячая линия-телеком, 2005).
- [5] Д.А. Барышников, Г.А. Жукова, В.Н. Мордкович. Электрон. техн., сер. 2, Полупроводниковые приборы, № 5 (148), 19 (1981).
- [6] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1967).
- [7] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [8] У. Харрисон. *Электронная структура и свойства твердых тел* (М., Мир, 1983) т. 1.
- [9] В.А. Болисов, Л.Н. Патрикеев, В.Д. Попов. Микроэлектроника, **12** (5), 477 (1983).
- [10] Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. *Справочник по физике* (М., Наука, 1977) с. 269.
- [11] P.J. McWhorter, P.S. Winokur. Appl. Phys. Lett., **48** (2), (1), 133 (1986).
- [12] М.М. Малышев, В.Д. Попов, В.Н. Сурин, Д.В. Шубин. В сб.: *Вопросы атомной науки и техники*. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру (М., ФГУП ЦНИИатоминформ, 2007) вып. 3–4, 33 (2007).
- [13] Л.Н. Патрикеев, Б.И. Подлепецкий, В.Д. Попов. *Радиационная стойкость полупроводниковых приборов и интегральных схем* (М., МИФИ, 1975).
- [14] E.H. Snow, A.S. Grove, D.F. Fitzgerald. Proc. IEEE, **55** (7), 1168 (1967).

Редактор Л.В. Беляков

## Physical model of MOS-structure aging process

*M.A. Bulusheva, V.D. Popov, G.A. Protopopov,  
A.V. Skorodumova*

Moscow Engineering Physics Institute  
(State University),  
115409 Moscow, Russia

**Abstract** The physical model of MOS-structure aging process is discussed. Energetic parameter of strained MOS-structure — strained bonds energy level was found using the results of accelerated testing.