

# Ток утечки через подзатворный диэлектрик в транзисторах с длиной канала до 100 нм

© Т.А. Шоболова<sup>1</sup>, В.В. Гасенин<sup>2</sup>, Е.Л. Шоболов<sup>1</sup>, С.В. Оболенский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова, 603137 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Российский федеральный ядерный центр, Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607188 Саров, Россия

E-mail: shobolova.ta@mail.ru

Поступила в Редакцию 2 марта 2022 г.

В окончательной редакции 25 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Опытным путем получена зависимость тока утечки через подзатворный диэлектрик от температуры в металл-оксид-полупроводник транзисторе с проектной нормой 90 нм, изготовленном на структуре кремний-на-изоляторе. Определены вклады таких механизмов переноса носителей заряда в ток утечки через подзатворный диэлектрик толщиной 18 Å, как термоэлектронная эмиссия, полевое туннелирование и эмиссия Пула–Френкеля. Посредством численного моделирования была разработана модель транзистора, калиброванная по геометрическим, структурным и электрофизическим характеристикам изготовленного образца, определено распределение составляющих плотности тока, дрейфовой скорости и поля, ортогональных границе раздела кремний-подзатворный оксид транзистора. Определена длина волны электрона вблизи подзатворного диэлектрика транзистора при максимальной ортогональной составляющей дрейфовой скорости. Показано, что в исследуемых транзисторах основным механизмом переноса носителей заряда через подзатворный диэлектрик является полевое туннелирование. Также для определения вклада эмиссии Пула–Френкеля в ток утечки через подзатворный диэлектрик было исследовано влияние дозы  $\gamma$ -облучения на величину туннельного тока утечки через подзатворный диэлектрик. Показано, что данный вклад является незначительным, так как изменение дозы облучения слабо влияет на туннельный ток утечки. Это характерно для подзатворных диэлектриков высокого качества.

**Ключевые слова:** МОП-транзистор, кремний-на-изоляторе, высокая степень интеграции, субмикронные нормы, короткоканальный эффект, температурное воздействие, туннельный ток,  $\gamma$ -воздействие.

DOI: 10.21883/FTP.2022.07.52762.17

## 1. Введение

В металл-оксид-полупроводник (МОП) транзисторах одной из важных характеристик является ток утечки через подзатворный диэлектрик. Уменьшение проектных норм технологии изготовления интегральных схем (ИС) приводит к уменьшению толщины подзатворного диэлектрика. Таким образом, в нанометровых транзисторах (длина затвора  $\approx 100$  нм) основными механизмами токов утечки через подзатворный диэлектрик являются туннелирование и термоэлектронная эмиссия [1].

При разработке радиационно стойких интегральных схем, которые должны функционировать в широком диапазоне температур, важным фактором является анализ качества технологии изготовления подзатворного диэлектрика, а также самой конструкции транзистора, которые обуславливают утечки затвора при его эксплуатации в указанных жестких условиях. Величина токов утечки во многом будет определять допустимую степень интеграции схем, а ее резкое изменение покажет пределы используемой технологии. Рост тока утечки через подзатворный диэлектрик при увеличении температуры определяется механизмом термоэлектронной эмиссии (Шоттки) [1] и представляет собой функцию второй степени.

В данной работе исследован ток утечки через подзатворный диэлектрик в МОП-транзисторах с указанными выше проектными нормами. Оценен вклад в этот ток разных механизмов переноса носителей заряда: эмиссия Шоттки, эмиссия Пула–Френкеля, полевое туннелирование. Исследована зависимость тока утечки через подзатворный диэлектрик от температуры и дозы  $\gamma$ -облучения. Получено, что в исследуемых транзисторах при увеличении температуры в 2 раза ток утечки растет не по квадратичному закону, что приводит к расхождению результатов, полученных аналитически и эмпирически.

Увеличение дозы  $\gamma$ -облучения приводит к незначительному росту тока утечки через подзатворный диэлектрик, что связано с высоким качеством подзатворного оксида кремния и позволяет использовать исследуемые транзисторные структуры при изготовлении радиационно стойких сверхбольших интегральных схем.

## 2. Объект и методы исследования

В ходе работы исследовались характеристики МОП-транзистора с проектными нормами 100 нм, а именно

**Таблица 1.** Режимы измерений ВАХ исследуемых транзисторов

Зависимость	Режим измерения
Входная (low)	$U_d = 0.05 \text{ В}, U_s = 0, U_g = (0, 1.2) \text{ В}$
Выходные	$U_s = 0, U_d = (0, 1.2) \text{ В}, U_g = (0, 1.2) \text{ В}$

**Таблица 2.** Значения тока утечки через подзатворный диэлектрик в зависимости от длины канала и температуры

Тип транзистора	Ток утечки через подзатворный диэлектрик, нА			
	<i>n</i> -канальный транзистор		<i>p</i> -канальный транзистор	
Значение температуры, °С	W/L			
	10/10	10/0.1	10/10	10/0.1
+125	80.3	85.2	15.7	20.99
+85	70	74	15	20
-20	50	61	13	10.9
-60	47	51	8.5	10.23

Примечание. *W* — ширина, *L* — длина канала транзистора.

ток утечки через подзатворный диэлектрик при изменении температуры и дозы  $\gamma$ -облучения.

Для измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзисторных структур была использована полуавтоматическая установка измерения электрофизических параметров элементов схем — зондовая станция типа Cascade Microtech Summit, где посредством выставления зондов на контактные площадки элементов или частей схем проводилось измерение ВАХ. В работе исследовались характеристики одиночных транзисторов.

На электроды исследуемых структур в процессе получения ВАХ прикладывалось напряжение согласно режиму измерения. Изучение влияния изменения температуры на ток утечки проводилось при следующих значениях температур:  $-60, -20, +22, +85, +125^\circ\text{С}$ .

При  $\gamma$ -облучении в процессе набора дозы на электроды транзистора напряжение не подавалось. Оно подавалось только при непосредственном измерении. Измерения проводились при четырех вариантах доз  $\gamma$ -облучения:  $0, 0.1D_{\max}, 0.5D_{\max}, 1.0D_{\max}$ , где  $D_{\max}$  — максимальное значение дозы.

В ходе работы экспериментально были получены следующие характеристики: входные — зависимость тока стока от напряжения на затворе при разных напряжениях на стоке; выходные — зависимость тока стока от напряжения на стоке при разных напряжениях на затворе. В табл. 1 приведены используемые для получения ВАХ режимы [2].

Ток утечек через подзатворный диэлектрик ( $I_g$ ) — ток на затворе транзистора при напряжении на затворе  $U_g = 1.2 \text{ В}$ , напряжении на истоке  $U_s = 0 \text{ В}$ , напряжении на стоке  $U_d = 0.1 \text{ В}$ .

Посредством экспериментально полученных входных характеристик были получены значения порогового напряжения транзистора. Выходные характеристики использовались для определения тока утечек „исток-сток“. Данные характеристики использовались для калибровки разработанной модели посредством численного моделирования.

Также входная характеристика использовалась для определения тока утечки через подзатворный диэлектрик.

В табл. 2 приведены полученные значения тока утечки через подзатворный диэлектрик. Величины тока утечки *n*-канальных транзисторов в 4–5 раз превосходят значения тока *p*-канальных транзисторов вследствие отличия толщины подзатворного диэлектрика, образующейся из-за разницы скорости роста окисла на легированном разным типом примеси кремнии [2], а также вследствие разницы длин волн и масс электронов и дырок.

Для анализа полученных результатов было проведено численное моделирование транзисторной структуры, аналогичной изготовленной.

### 3. Численное моделирование

Исследование распределения тока утечек было выполнено посредством численного моделирования 2D-структуры, калиброванной по геометрическим, структурным и электрофизическим характеристикам.

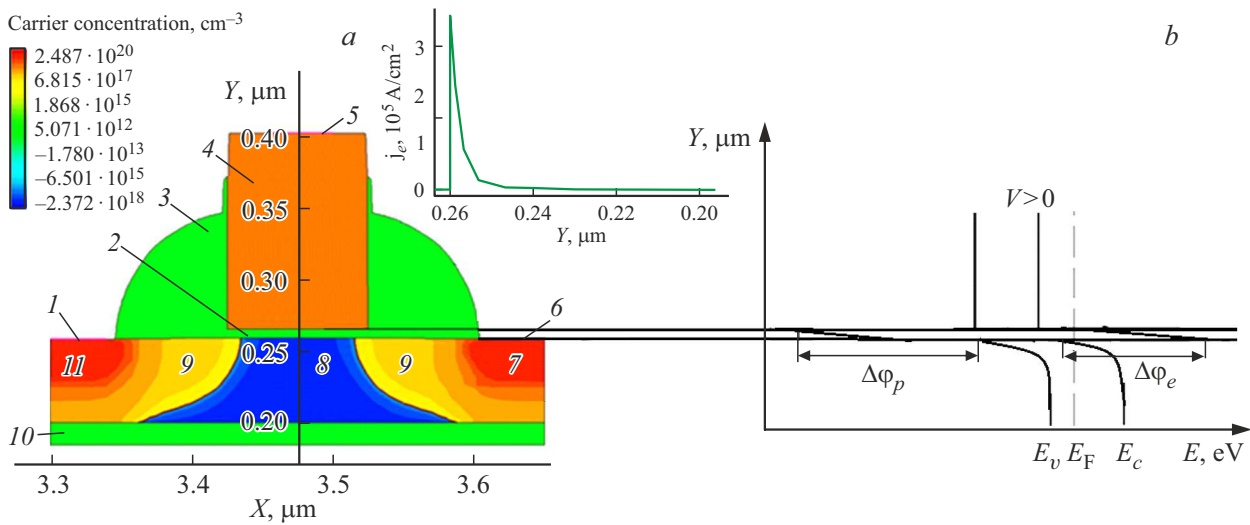
Численное моделирование заключается в решении фундаментальной системы уравнений физики полупроводниковых приборов, которая для диффузионно-дрейфового механизма переноса носителей состоит из следующих уравнений: уравнение плотности тока электронов и дырок, уравнение плотности поверхностного тока, уравнение Пуассона для распределения электростатического потенциала, уравнение темпа рекомбинации Шокли–Рида–Холла, уравнение концентрации равновесных носителей, уравнение темпа ожереккомбинации, уравнение скорости поверхностной рекомбинации, уравнение непрерывности, уравнения энергетического баланса для электронов, дырок и кристаллической решетки [2].

На рис. 1 приведено двумерное распределение концентрации носителей в рассчитанной структуре исследуемого транзистора.

В данной структуре контакт к карману топологически расположен на области истока транзистора и электрически с ним закорочен посредством одновременного покрытия этих областей сплошным слоем силицида титана.

Для расчета тока в подзатворном диэлектрике использовались численная и аналитическая модели.

При аналитическом анализе использовались опубликованные данные транзисторных структур с геометрическими параметрами, аналогичными изготовленным структурам [1]. В работе [1] приведены экспериментально полученные и теоретически рассчитанные результаты.



**Рис. 1.** Двумерное распределение концентрации носителей зарядов в транзисторе и его зонная диаграмма при  $U_s = 0, U_d = 1.2\text{ В}, U_g = 0.55\text{ В}$ , где красный и желтый цвет соответствуют распределению концентрации доноров, голубой и синий — распределению концентрации акцепторов, где 1 — контакт к истоку транзистора; 2 — спейсер — подзатворный диэлектрик; 3 — спейсер; 4 — легированный поликремниевый затвор; 5 — силицидированный контакт к затвору; 6 — силицидированный контакт к стоку; 7 — сильно легированная область стока ( $10^{20}\text{ см}^{-3}$ ); 8 — область кармана; 9 — слабо легированные области истока и стока; 10 — захороненный оксид структуры КНИ; 11 — сильно легированная область истока ( $10^{20}\text{ см}^{-3}$ );  $E_v$  — уровень валентной зоны,  $E_c$  — уровень зоны проводимости,  $E_F$  — уровень Ферми. На вставке приведено распределение плотности тока электронов, протекающих вдоль границы диэлектрика от истока к стоку, вдоль оси  $OY$  при  $x = 3.45\text{ мкм}$ . На вставке приведена зонная диаграмма МОП-структуры. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

При приложении напряжения на затвор транзистора трапециевидная энергетическая зонная диаграмма диэлектрика может принять вид треугольной. В этом случае туннельный ток, текущий через такой треугольный энергетический барьер, является током Фаулера–Нордгейма [3].

В работе [1] авторами показано, что в транзисторных структурах при толщине подзатворного диэлектрика  $< 4.7\text{ нм}$  и приложении напряжения до  $3.5\text{ В}$  на затвор транзистора доминирующую роль играет прямое туннелирование, а туннелирование по Фаулеру–Нордгейму носит второстепенный характер и вклад его незначителен. Автором работы [4] показано, что в МОП-транзисторах с толщиной подзатворного диэлектрика  $< 3\text{ нм}$  при напряженности электрического поля  $8\text{ МВ/см}$  ток Фаулера–Нордгейма составляет  $\sim 5 \cdot 10^{-7}\text{ А/см}^2$ . Поэтому далее этот ток не учитывался.

Для расчета тока утечки через подзатворный диэлектрик, определяемого механизмом полевого туннелирования и термоэлектронной эмиссии носителей заряда, использовалась модель Шенка. Данная модель используется для оксидов тоньше  $3\text{ нм}$  и полей выше  $6\text{ МВ/см}$ . Такая модель учитывает квантово-механическое туннелирование через трапециевидный барьер и прямое туннелирование. Также эта модель учитывает уменьшение туннельного барьера вследствие создания зеркального заряда.

Для сравнения, основные физические процессы, определяющие проводимость подзатворных диэлектриков, представлены следующими механизмами [5]:

эмиссия Шоттки:

$$J = A \cdot T^2 \exp \left[ \frac{-q \left( \phi_B - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_i}} \right)}{kT} \right], \quad (1)$$

эмиссия Пула–Френкеля:

$$J \sim \epsilon \exp \left[ \frac{-q \left( \phi_B - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_i}} \right)}{kT} \right], \quad (2)$$

туннельная или полевая эмиссия (модель Шенка):

$$J \sim \epsilon^2 \exp \left[ \frac{-4\sqrt{2m^*} (q\phi_B)^{3/2}}{3q\hbar\epsilon} \right], \quad (3)$$

где  $J$  — плотность тока,  $\phi_B$  — высота барьера,  $\epsilon$  — электрическое поле,  $\epsilon_i$  — динамическая диэлектрическая проницаемость изолятора,  $m^*$  — эффективная масса,  $A$  — постоянная Ричардсона,  $T$  — температура,  $q$  — элементарный заряд,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\hbar$  — постоянная Планка.

Таким образом, увеличение температуры сказывается только на эмиссии Шоттки (термоэлектронной эмиссии).

Для определения вклада полевого туннелирования носителей заряда через подзатворный диэлектрик в ток утечки затвора, при численном моделировании не учитывали разогрев электронов (увеличение температуры),

а учитывали только увеличение скорости электронов вследствие влияния электрического поля.

Для численного расчета эмиссии Пула–Френкеля на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> были размещены дефекты, концентрацией 10<sup>17</sup> см<sup>-3</sup>, и учтено  $\gamma$ -воздействие. Введение на границу раздела оксид кремния/кремний дефектов, концентрацией 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>, приводит к изменению энергетического барьера на этой границе и уровня Ферми.

При  $\gamma$ -облучении в оксиде кремния образуются свободные электроны и положительно заряженные ионы. В результате влияния электрического поля быстрые электроны утекают, тяжелые ионы также диффундируют, но более медленно. При передвижении положительно заряженные ионы могут быть захвачены существующими дефектами в оксиде, образованными вследствие разницы постоянных решеток кремния и оксида кремния. Таким образом, накапливается положительный заряд в оксиде кремния вблизи границы Si/SiO<sub>2</sub>.

#### 4. Результаты моделирования и обсуждение

Увеличение температуры приводит к увеличению тока утечки через диэлектрик только благодаря механизму термоэлектронной эмиссии [5,6]. Дефектность подзатворного диэлектрика приводит к появлению утечки тока, определяемого механизмом Пула–Френкеля. Для появления полевого туннелирования носителей заряда необходимы достаточные значения скорости носителей заряда, напряженности электрического поля и толщины диэлектрика.

В работе [7] авторы исследуют туннелирование носителей заряда в МОП-транзисторе с толщиной диэлектрика 20 Å и приводят зонную диаграмму, где напряжение подается не только на затвор, но и на исток транзистора. При напряжении затвор-исток, превышающем пороговое напряжение, валентная зона кремниевого кармана структуры выше зоны проводимости затвора, что приводит к туннелированию электронов через тонкий подзатворный диэлектрик. Аналогичное явление происходит и в рабочем режиме исследуемых транзисторов.

Для определения наличия туннельной составляющей в ток утечки через диэлектрик были получены распределение поля (рис. 2), плотности тока (рис. 3) и дрейфовой скорости (рис. 4) в подзатворном диэлектрике и канале транзистора, перпендикулярные границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> при  $U_s = 0$  В,  $U_g = 0.55$  В,  $U_d = 1.2$  В.

Из рис. 2 следует, что максимальная напряженность электрического поля вдоль оси OY наблюдается в подзатворном диэлектрике и достигает  $1.59 \cdot 10^6$  В/см, что достаточно для туннелирования сквозь узкие потенциальные барьеры на границе с диэлектриком [8].

Для определения области утечки тока из канала в поликремниевый затвор в результате численного моделирования с использованием модели Шенка было рассчитано распределение плотности тока в 2D-сечении

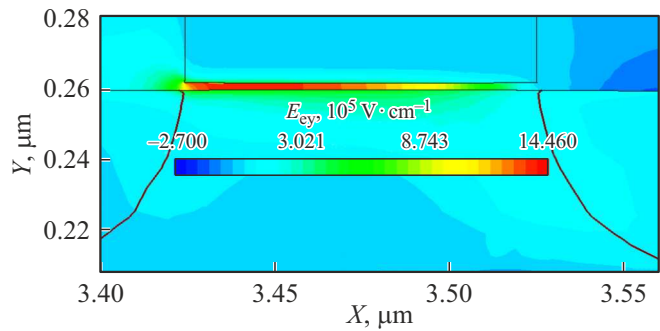


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля, сонаправленной с осью OY в области канала транзистора, при  $U_s = 0$  В,  $U_g = 0.55$  В,  $U_d = 1.2$  В.

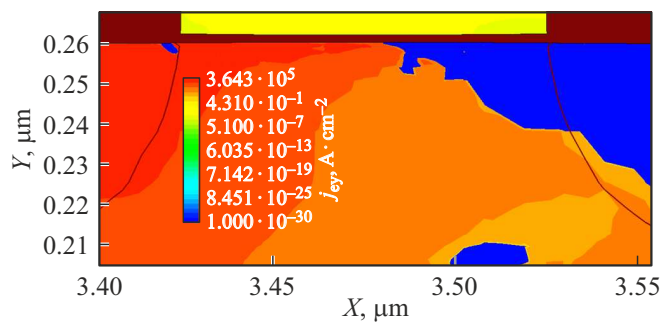


Рис. 3. Распределение плотности тока электронов  $n$ -канального транзистора, сонаправленного с осью OY, при  $U_s = 0$  В,  $U_d = 0.05$  В,  $U_g = 1.2$  В.

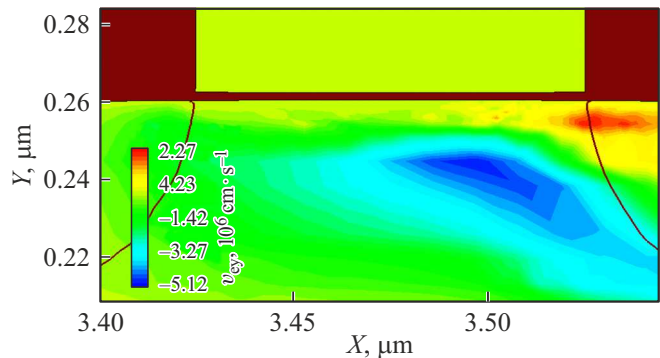


Рис. 4. Распределение скорости электронов, сонаправленной с осью OY в области канала транзистора, при  $U_s = 0$  В,  $U_d = 0.55$  В,  $U_g = 1.2$  В.

исследуемого транзистора, направленного вдоль оси OY (см. рис. 3).

Таким образом, ток утечки через подзатворный диэлектрик (в затворе) течет неравномерно, с явным максимумом в центре затвора, вследствие увеличения толщины подзатворного диэлектрика вблизи истока и стока, связанного с повторением операций окисления в маршруте изготовления транзистора после формирования подзатворного оксида. Плотность тока в затворе вблизи границы с подзатворным диэлектриком составляет 0.4 А/см<sup>2</sup>.

**Таблица 3.** Значения тока утечки через подзатворный диэлектрик при разных значениях дозы  $\gamma$ -облучения

Доза $\gamma$ -облучения, рад	<i>n</i> -канальный				<i>p</i> -канальный			
	$W = 0.26$ $L = 0.1$	$W = 0.26$ $L = 10$	$W = 10$ $L = 0.1$	$W = 10$ $L = 10$	$W = 0.26$ $L = 24$	$W = 0.26$ $L = 10$	$W = 10$ $L = 0.1$	$W = 10$ $L = 10$
$D = 0$	$5.2 \cdot 10^{-9}$	$5.4 \cdot 10^{-9}$	$53.6 \cdot 10^{-9}$	$50.0 \cdot 10^{-9}$	$-0.73 \cdot 10^{-9}$	$-0.75 \cdot 10^{-9}$	$-9.2 \cdot 10^{-9}$	$-8.7 \cdot 10^{-9}$
$D = 0.1D_{\max}$	$5.4 \cdot 10^{-9}$	$5.5 \cdot 10^{-9}$	$53.7 \cdot 10^{-9}$	$50.5 \cdot 10^{-9}$	$-0.9 \cdot 10^{-9}$	$-0.92 \cdot 10^{-9}$	$-9.4 \cdot 10^{-9}$	$-8.9 \cdot 10^{-9}$
$D = 0.5D_{\max}$	$5.4 \cdot 10^{-9}$	$5.54 \cdot 10^{-9}$	$53.7 \cdot 10^{-9}$	$50.5 \cdot 10^{-9}$	$-0.9 \cdot 10^{-9}$	$-0.92 \cdot 10^{-9}$	$-9.4 \cdot 10^{-9}$	$-8.9 \cdot 10^{-9}$
$D = D_{\max}$	$5.3 \cdot 10^{-9}$	$5.51 \cdot 10^{-9}$	$53.7 \cdot 10^{-9}$	$50.5 \cdot 10^{-9}$	$-0.91 \cdot 10^{-9}$	$-0.93 \cdot 10^{-9}$	$-9.4 \cdot 10^{-9}$	$-8.9 \cdot 10^{-9}$

Для определения длины волны электронов было получено распределение дрейфовой скорости электронов в транзисторной структуре, сонаправленной с осью  $OY$  (на рис. 4 приведена область канала), при  $U_s = 0$  В,  $U_d = 0.05$  В,  $U_g = 1.2$  В.

Так как вся кинетическая энергия электрона перешла в энергию туннелирования, то при скорости электрона  $2 \cdot 10^6$  см/с, движущегося вдоль оси  $OY$ , длина волны составляет 36 нм.

Таким образом, полученная длина волны электрона в области с максимальным значением дрейфовой скорости превосходит толщину подзатворного диэлектрика. Вследствие этого часть электронов из области канала попадает в затвор посредством прямого туннелирования через подзатворный диэлектрик. Это подтверждается авторами работы [1]. Прямое туннелирование является одним из механизмов переноса носителей заряда, присутствующих в транзисторных структурах с толщиной диэлектрика 18 Å.

Наличие прямого туннелирования носителей заряда через подзатворный диэлектрик приводит к тому, что ток утечки исследуемого транзистора состоит не только из тока утечки посредством эмиссии Шоттки, но и тока утечки посредством прямого туннелирования. Поэтому при увеличении температуры в 2 раза суммарная плотность тока увеличивается в 2 раза.

Для определения вклада эмиссии Пула-Френкеля были проведены исследования характеристик транзисторов при  $\gamma$ -облучении.

## 5. $\gamma$ -воздействие

Результаты  $\gamma$ -воздействия на характеристики исследуемых транзисторов приведены в табл. 3.

Увеличение ширины транзистора в 50 раз приводит к уменьшению плотности тока через затвор в 3.7 раз. Это свидетельствует о том, что туннелирование носителей заряда носит локальный характер.

Увеличение дозы  $\gamma$ -облучения приведет к увеличению концентрации положительных зарядов, захваченных на дефектах в оксиде кремния. В исследуемой транзисторной структуре подзатворный слой оксида кремния был образован методом термического окисления в диффузионной печи. Этот метод окисления обеспечивает минимальное значение дефектности получаемого слоя [5], что

приводит к минимизации концентрации дефектов. При определенном значении дозы облучения все дефектные уровни заняты положительными зарядами и дальнейшее увеличение дозы облучения не приводит к изменению характеристик транзистора.

Положительные заряды, образованные вследствие  $\gamma$ -облучения и захваченные на дефектах оксида кремния, приводят к уменьшению потенциального барьера кармана транзистора. Согласно формуле (3), описывающей туннельную эмиссию, уменьшение потенциального барьера приведет к экспоненциальному росту плотности тока носителей заряда.

Описанные выше факторы привели к ограничению (выходу на насыщение) туннельного тока через подзатворный диэлектрик.

Знак тока показывает на направление, например, для *n*-канального транзистора положительные значения тока указывает, что электроны туннелируют из валентной зоны кармана транзистора в его затвор.

Такое поведение, с одной стороны, связано с наличием дефектных (донорных) уровней в запрещенной зоне диэлектрика, а с другой — с влиянием положительных зарядов на изгиб энергетических зон вблизи его границ.

При положительном напряжении на затворе заряды при  $\gamma$ -облучении образуются вблизи границы Si/SiO<sub>2</sub> и наблюдается сдвиг напряжения плоских зон в сторону отрицательных напряжений, при отрицательном — вблизи границы поликремний/SiO<sub>2</sub> [5]. Вследствие этого *n*-канальные транзисторы менее чувствительны к туннельным утечкам через подзатворный диэлектрик, чем *p*-канальные транзисторы.

Например, для транзистора с шириной канала 10 мкм и с длиной канала 0.1 мкм характерны следующие значения тока утечки без  $\gamma$ -воздействия: для *n*-канального — 53.6 нА, для *p*-канального — 9.2 нА (табл. 3).

Результат  $\gamma$ -облучения — образование дефектных уровней в запрещенной зоне оксида кремния. Рост тока утечки через подзатворный диэлектрик при облучении связан с эмиссией Пула-Френкеля [5,9,10]. Увеличение дозы облучения исследуемых транзисторов привело к незначительному увеличению тока утечки через подзатворный диэлектрик (см. табл. 3) вне зависимости от длины и ширины канала транзистора. Таким образом, плотность тока Пула-Френкеля равна 0.1 А/см<sup>2</sup>,

**Таблица 4.** Значения плотности тока утечки в зависимости от механизма переноса носителей заряда и типа определения [6,12]

Механизм эмиссии	Теоретические данные, А/см <sup>2</sup>	Экспериментальные данные, А/см <sup>2</sup>	Расчетные данные, А/см <sup>2</sup>
Термоэлектронная	–	1	0.1
Туннельная	3	4.12	4
Пула–Френкеля	< 10 <sup>–6</sup>	0.01	0.00003

т. е. значительно меньше туннельного тока, полученного численным моделированием.

Результатом численного моделирования стала плотность тока утечки через подзатворный диэлектрик, определяемая эмиссией Пула–Френкеля, равная 0.00003 А/см<sup>2</sup>. Так как экспериментально получаемый при нагревании ток — результат суперпозиции двух механизмов переноса: туннельного и автоэлектронной эмиссии (так как ток Пула–Френкеля пренебрежимо мал). При учете степенной зависимости (1) для *n*-канального транзистора с  $W/L = 10/0.1$  получаем, что вклад туннельного тока составляет 40.4 нА или плотность тока 4 А/см<sup>2</sup>.

Также аналитические модели не учитывают, что при увеличении температуры электроны из кармана могут перейти на акцепторный уровень в оксиде кремния и там задержаться, если энергии недостаточно для дальнейшего туннелирования в затвор. Приложенное положительное напряжение не будет давать вернуться электронам в карман транзистора. Таким образом, накопленные на ловушках электроны приведут к уменьшению потенциального барьера в кармане транзистора.

В табл. 4 приведены теоретические [9,11,12], экспериментальные и расчетные данные тока утечек, определенных разными механизмами в МОП транзисторах.

Теоретические данные были взяты из работ [1,9,12]. Данные значения приведены для транзисторов с толщиной подзатворного диэлектрика > 24 Å, что значительно превосходит толщины оксида исследуемых нами транзисторов.

Экспериментальные данные были получены из результатов, приведенных выше в работе для МОП-транзистора с подзатворным диэлектриком толщиной 18 Å, шириной транзистора 10 мкм, длиной канала 0.1 мкм, полученного на производственной линейке. Эти значения учитывают полный спектр эффектов, присущих реальным структурам, включающий дефектность оксида кремния, границ и самих кремниевых и поликремниевых слоев, неравномерность подзатворного диэлектрика и т. д. [13].

Максимальное значение плотности тока утечки, определяемое механизмом термоэлектронной эмиссии, указывает на дефектность структуры и недостаточно широкую запрещенную зону диэлектрика. Для решения данной проблемы в подобных исследуемой структурах рекомендуется использовать диэлектрики с более широкой запрещенной зоной, например Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## 6. Заключение

В работе проведено исследование механизмов тока утечки через подзатворный диэлектрик в МОП-транзисторах с толщиной диэлектрика 18 Å.

В результате анализа экспериментально полученных и рассчитанных характеристик структур оценен вклад в ток утечки следующих механизмов переноса носителей заряда через подзатворный диэлектрик: эмиссии Шоттки, Пула–Френкеля и полевого туннелирования.

Наличие полевой эмиссии показано посредством определения напряженности электрического поля, перпендикулярной границе Si/SiO<sub>2</sub>, и определения длины волны электрона в месте максимального значения перпендикулярной составляющей скорости электрона (~ 36 Å). Таким образом, при напряжении на стоке 0.05 В и напряжении на затворе 1.2 В, в месте минимальной толщины, электроны туннелируют через подзатворный диэлектрик в затвор транзистора. Концентрация электронов, обладающих скоростью, достаточной для туннелирования через оксид, при заданных условиях — небольшая, но этот механизм переноса носителей заряда вносит основной вклад в утечки тока через подзатворный диэлектрик.

В результате анализа данных, полученных при исследовании характеристик транзистора, подвергнутого  $\gamma$ -воздействию, а именно увеличение тока утечки при облучении, определены наличие и вклад механизма Пула–Френкеля в ток утечки через подзатворный диэлектрик.

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального центра физики и математики (НЦФМ).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Г.Я. Красников. *Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов* (М., Техносфера, 2002) ч. 1.
- [2] Т.А. Шоболова, В.В. Гасенин, С.В. Оболенский, Е.Л. Шоболов, С.Д. Кузнецов. *Электрон. техн., сер. 2. Полупроводниковые приборы*, 4 (263), 31 (2021).
- [3] А.И. Лебедев. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Физматлит, 2008).

- [4] Г.И. Зебрев. *Физические основы кремниевой нанозлектроники*. Учеб. пособие (М., МИФИ, 2008).
- [5] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*. Кн. 1, пер. с англ. (М., Мир, 1984).
- [6] В. Денисенко. Компоненты и технологии, **12**, 157 (2009).
- [7] Б.К. Петров, В.В. Воробьев. *Электрические параметры нанозМОП* (Воронеж, Изд.-полиграф. центр Воронеж. гос. ун-та, 2012).
- [8] Ю. Пожела. *Физика быстродействующих транзисторов*. Монография (Вильнюс, Мокслас, 1989).
- [9] В.С. Першенков, В.Д. Попов, А.В. Шальнов. *Поверхностные радиационные эффекты в ИМС* (М., Энергоатомиздат, 1988).
- [10] К. Пирс, А. Адамс, М. Кац, Дж. Цай, Т. Сейдел, Д. Макгиллис. *Технология СБИС* (М., Мир, 1986).
- [11] A. Heigl, A. Schenk, G. Wachutka. 2009 13th Int. Workshop on Computational Electronics, p. 1.  
doi: 10.1109/IWCE.2009.5091099
- [12] Е.О. Солдусова. Молодой ученый, **3** (345), 10 (2021).
- [13] Д.В. Андреев, А.А. Столяров, А.В. Романов. Наука и образование, **11**, 77-30569/251437 (2011).

Редактор А.Н. Смирнов

## Leakage current through dielectric in transistors having the channel length up to 100 nm

T.A. Shobolova<sup>1</sup>, V.V. Gasenin<sup>2</sup>, Ye.L. Shobolov<sup>1</sup>, S.V. Obolenskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Branch of FSUE „RFNC-VNIIEF“ „NIIS named after Yu.Ye. Sedakov“, 603137 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> FSUE „RFNC-VNIIEF“, 607188 Sarov, Russia

**Abstract** The present work describes that by experimental means the dependence of the leakage current through the gate dielectric on the temperature in the metal-oxide-semiconductor transistor manufactured on „silicon-on-insulator“ with 90 nm design standards were obtained. There was defined the contribution of such charge carriers transfer mechanisms to the leakage current through the gate dielectric of 18 Å thickness, as thermionic emission, field tunneling and Poole-Frenkel emission. Using numerical modeling there was developed transistor model calibrated by geometric, structural and electro-physical characteristics of the manufactured sample; distribution of the current density components, drift speed and field being orthogonal to the interface of transistor silicon-gate oxide were defined. There was also determined electron wavelength close to the transistor gate dielectric at maximum component of the drift speed. It is shown that the main mechanism for charge carriers transfer through the gate dielectric is field tunneling. During the work effect of gamma radiation dose on the value of the tunnel leakage current through the gate dielectric was also investigated for defining Poole-Frenkel emission contribution on the value of the leakage current through the gate dielectric. The result of the work is determination that the contribution is insignificant as the radiation dose variation has weak effect on the tunnel leakage current. This is typical of high quality gate dielectrics.