

Переключения тока в бистабильных структурах: высоколегированный n^+ -поликремний–туннельно-прозрачный окисный слой– n -кремний

© В.Ю. Осипов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в Редакцию 10 июня 1996 г.)

В структурах высоколегированный n^+ -поликремний–туннельно-тонкий окисел– n -кремний наблюдается эффект переключения из состояния с режимом стационарного неравновесного обеднения и малой величиной протекающего тока во "включенное" состояние с большой величиной протекающего тока и малым падением напряжения на структуре. Структуры изготовлялись на подложках из n -кремния с удельным сопротивлением $25 \Omega \cdot \text{см}$. Переключение структуры с толщиной окисла 23 \AA может осуществляться как под действием импульса излучения при малой величине обратного смещения на структуре (50 V), так и в темновых условиях путем повышения обратного смещения до $250\text{--}300 \text{ V}$. Во "включенном" состоянии в качестве внутреннего источника неосновных носителей, необходимого для компенсации туннельной утечки дырок в n^+ -поликремний и поддержания квазиравновесного инверсионного слоя дырок на границе $n\text{-Si-SiO}_2$, выступает процесс Оже-генерации носителей.

Интерес к исследованию МДП-диодов, т.е. структур металл–диэлектрик–полупроводник с толщиной диэлектрического слоя менее 50 \AA , в которой нельзя пренебречь его проводимостью, возник более 25 лет назад и был связан вначале с изучением механизмов токопрохождения, в особенности туннелирования. В последние годы интерес к исследованию такого рода МДП-структур с проводящим туннельным диэлектриком (металл–туннельный диэлектрик–полупроводник) обусловлен целым рядом обстоятельств. К ним можно отнести создание МДП-транзисторов с туннельным эмиттером и разработку МДП-переключателей и МДП-генераторов, работающих на эффекте туннельной поверхностно-барьерной неустойчивости.

Впервые о наблюдении эффекта переключения в структурах алюминий–туннельно–тонкий SiO_2 – n -кремний сообщалось в 1981 г. в [1]. При этом переключение из высокоомного состояния в низкоомное вызывалось оптическим излучением, а последнее состояние сохранялось после снятия внешнего облучения. В [1], кроме того, детально обсуждалась физическая природа данного эффекта.

В дальнейшем исследования эффектов переключения в структурах с туннельным диэлектриком проводились в основном на структурах с верхним металлическим электродом [2]. В то же время изучение эффектов переключения в структурах ПТДП (полупроводник–туннельный диэлектрик–полупроводник) с поликремниевым затворным электродом представляется более актуальным по сравнению с изучением этих эффектов в МДП-структурах с металлическим (например, алюминиевым) верхним электродом. Это связано с тем, что структуры с поликремниевым электродом имеют, как правило, более низкую результирующую дефектность и более высокую надежность, чем структуры с металличе-

ским электродом. Последнее обусловлено тем, что в первом случае наиболее полно сохраняются свойства выращенных сверхтонких окисных слоев при нанесении затворного электрода вследствие использования для него материала, слабо взаимодействующего с поверхностью диэлектрика, а во втором случае ввиду химической реакции металла затвора (например, алюминия) с кислородом окисла имеет место изменение структуры окисла в области, прилегающей к затворному электроду. Ввиду этого использование поликремниевого электрода актуально для практики, так как основным вопросом технологии создания МДП-структур является получение сверхтонких диэлектрических слоев двуокиси кремния со стабильными и воспроизводимыми параметрами.

Интерес к приборным структурам с поликремниевым электродом вызван также и рядом других обстоятельств: прозрачность поликремниевого электрода в соответствующем спектральном диапазоне делает его более удобным по сравнению с металлическим электродом при изучении фотоэлектрических эффектов и для прикладных применений, технология изготовления поликремниевых затворов и проводящих шин в настоящее время получила широкое распространение в микроэлектронике.

Экспериментальные результаты

В настоящей работе сообщается о наблюдении оптически индуцированного переключения в структурах высоколегированный n^+ -поликремний (Si^*)–туннельно-прозрачный SiO_2 – n -кремний. Туннельно-прозрачный окисный слой толщиной 23 \AA выращивался на подложках n -кремния марки КЭФ-25 с удельным сопротивлением $25 \Omega \cdot \text{см}$. Выращивание окисла производилось методом термического окисле-

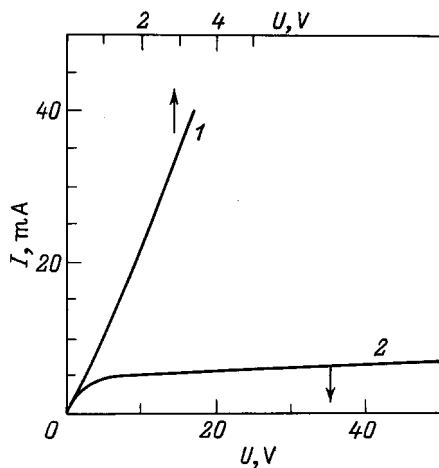


Рис. 1. ВАХ структуры в области прямых (до 3.6 В) и обратных (до 50 В) приложенных смещений. $T = 293$ К. 1 — прямое смещение, 2 — обратное смещение.

ния поверхности (100) кремния в потоке сухого кислорода при температуре 700°C . Длительность экспозиции пластины в атмосфере кислорода составляла 5 min. Далее на поверхность окисла наносился методом разложения моносилана при температуре 630°C слой поликремния толщиной $0.5\ \mu\text{m}$. Легирование поликремния фосфором производилось до уровня $(2-4) \cdot 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$. Диаметр структуры составлял 6 mm. Контакт к слою поликремния служил кольцевой алюминиевый электрод. Используемая технология выращивания бездефектных туннельно-тонких окисных слоев толщиной $17-50\ \text{\AA}$ и методика изготовления высококачественных туннельных структур $\text{Si}^+-\text{SiO}_2-\text{Si}$ описывалась ранее в [3-5]. В изготовленных структурах на поверхности n -кремния в ситуации нулевого внешнего смещения реализуется небольшой обедняющий изгиб зон.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) $n^+-\text{Si}^+-\text{SiO}_2-n\text{-Si}$ структуры в диапазоне от -50 до $+3.5$ В (в отсутствие освещения) показана на рис. 1. Видно, что в области прямых приложенных смещений величина протекающего тока намного больше, чем при обратном смещении. Остановимся на анализе участка ВАХ, получаемого при обратном смещении.

При увеличении обратного смещения от 0 до -50 В протекающий через структуру темновой ток плавно растет до величины $\cong 7.0\ \text{mA}$ (кривая 2 на рис. 2). Под действием света из области собственного поглощения n -кремния и при смещении на образце, равном -50 В, происходит переключение структуры из состояния с малой величиной протекающего тока ($I \leq 10\ \text{mA}$) в состояние с большой величиной протекающего тока ($I \geq 20\ \text{mA}$). При этом в низкоомном состоянии ($20 < I < 100\ \text{mA}$) на структуре падает напряжение, не превосходящее $2.9-3.0$ В. Низкоомное состояние сохраняется и после окончания импульса

освещения. ВАХ структуры в низкоомном состоянии показана кривой 1 на рис. 2.

Поясним физику наблюдаемого процесса переключения. В высокоомном состоянии большая часть прикладываемого к структуре обратного смещения падает на слое обеднения n -кремния, и лишь очень малая часть — на диэлектрике (не более $0.5\ \text{V}$). При этом реализуется так называемая ситуация стационарного неравновесного обеднения, когда в области n -кремния имеется обедненный слой, толщина которого W растет с увеличением напряжения U на структуре как $W \sim (U + U_c)^{1/2}$, а инверсионный слой дырок у границы $\text{SiO}_2-n\text{-Si}$ не образуется вследствие высокого темпа их туннельного оттока в n^+ -поликремний (рис. 3, а). Здесь U_c — напряжение плоских зон структуры. Скорости тепловой генерации неосновных носителей в обедненной области n -кремния при этом недостаточно для поддержания слоя инверсии.

Под действием света на границе $n\text{-Si}-\text{SiO}_2$ накапливаются неосновные фотогенерированные носители (дырки). На границе раздела при этом формируется неравновесный инверсионный слой дырок, а толщина слоя обеднения при этом сильно уменьшается (рис. 3, б). Приложенное к структуре напряжение перераспределяется между областью обеднения n -кремния и диэлектриком. На диэлектрике и инверсионном дырочном слое в новой ситуации падает большая часть напряжения, а на слое обеднения — меньшая. В конкретной экспериментальной ситуации значительная часть напряжения (около $47\ \text{V}$) падает и на нагрузочном сопротивлении, включенном последовательно со структурой. После окончания им-

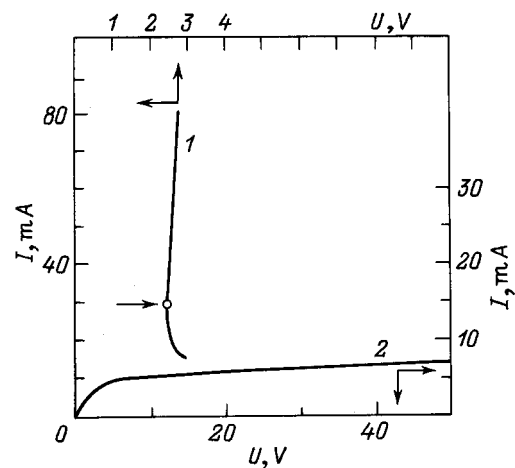


Рис. 2. Кривые переключения структуры в области обратных приложенных смещений. Переключение осуществлялось под действием источника "белого" света при смещении 50 В. $T = 293$ К. 1 — ВАХ во "включенном" состоянии с большой величиной протекающего тока, 2 — ВАХ в состоянии стационарного неравновесного обеднения. Светлым кружком обозначена точка на ВАХ во "включенном" состоянии, соответствующая минимальному удерживаемому напряжению.

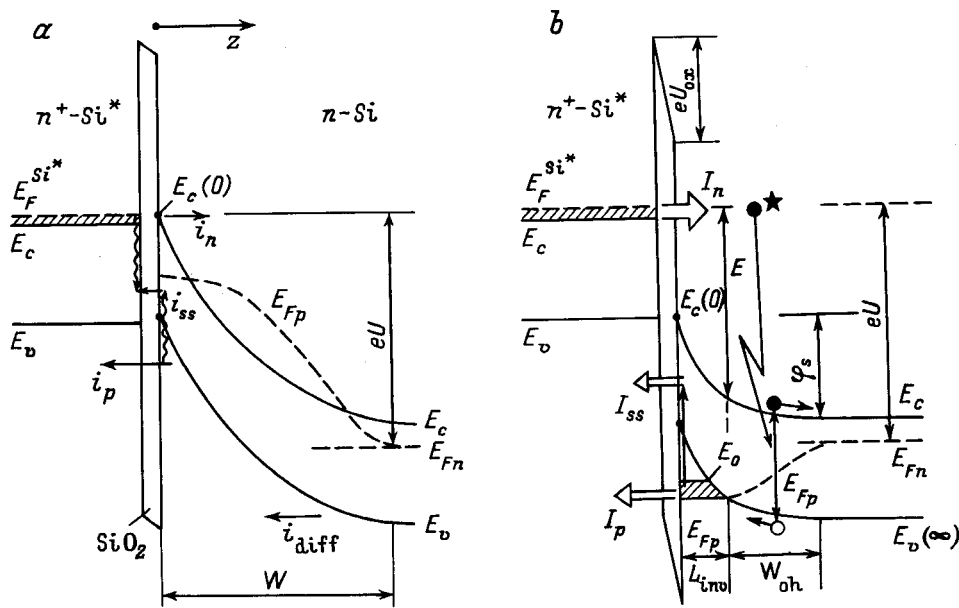


Рис. 3. Энергетическая диаграмма структуры $n^+ - Si^* - SiO_2 - n - Si$ в состоянии стационарного неравновесного обеднения (а) и во "включенном" состоянии (б). а) E_{Fn} — уровень Ферми для основных носителей в n -кремнии, E_{Fp} — ход квазиуровня Ферми для дырок в области обедненного слоя толщиной W , i_{diff} — диффузионный ток дырок, текущий из n -подложки к границе раздела $n - Si - SiO_2$, i_n — туннельный ток электронов из зоны проводимости n^+ -полукремния в зону проводимости n -кремния, i_p , i_{ss} — токи дырок из n -кремния в n^+ -полукремний, связанные соответственно с прямым туннелированием и туннельно-рекомбинационными процессами на границах раздела, $E_F^{Si^*}$ — уровень Ферми основных носителей в n^+ -полукремнии, $E_c(0)$ — положение края зоны проводимости кремния на границе $n - Si - SiO_2$. Диаграмма построена в случае смещения, равного $U = 2.5 \text{ V}$, при этом разность $E_F^{Si^*} - E_c(0) \cong 0$. При большом обратном смещении эта разность будет уже $E_F^{Si^*} - E_c(0) > 0$. б) L_{inv} — толщина дырочного инверсионного слоя, W_{on} — толщина обедненной области в n -кремнии во "включенном" состоянии, E_0 — положение основного уровня размерного квантования для дырок в потенциальной яме, образованной слоем инверсии, E_{Fp} — ход квазиуровня Ферми для дырок в области слоя обеднения и слоя инверсии, φ_s — величина поверхностного изгиба зон в n -кремнии, E — энергия "горячего" электрона, туннельно-инжектированного из полукремния в n -кремний, к моменту прохода им инверсионного слоя. Диаграмма построена для случая внешнего смещения $U = 2.5 \text{ V}$ и падения напряжения на окисле $U_{ox} = 1.2 \text{ V}$. Во "включенном" состоянии в области слоя инверсии $E_{Fp} \approx \text{const}$ и $E_{Fn} - E_{Fp} > 0$. Диффузионный ток дырок, текущий из инверсионного слоя в толщу n -кремния, не показан.

пульса освещения "включенное" низкоомное состояние поддерживается за счет того, что в качестве внутреннего источника неосновных носителей (дырок), требующихся для поддержания инверсионного слоя на границе $n - Si - SiO_2$, выступает уже процесс Оже-генерации носителей в приповерхностной области n -кремния (рис. 3, б).

Справедливости ради отметим, что процесс Оже-генерации носителей был привлечен для объяснения эффектов переключения и поддержания "включенного" состояния в структурах алюминий-туннельно-тонкий окисел- n -кремний уже в первых работах [1,2]. В свою очередь в [6] дан детальный теоретический анализ процесса Оже-генерации неосновных носителей в структурах $Al - SiO_2 - n - Si$. Поясним физику данного процесса.

Во "включенном" состоянии на диэлектрике падает напряжение (U_{ox}) свыше 1.2 V . При этом электроны, туннелирующие из зоны проводимости n^+ -полукремния, становятся "горячими" вблизи гра-

ницы $n - Si - SiO_2$. Часть из этих "горячих" носителей за счет ударной ионизации создает электронно-дырочные пары, которые разделяются электрическим полем области объемного заряда n -кремния (рис. 3, б). При этом дырки накапливаются около границы $n - Si - SiO_2$. Таким образом, темпа Оже-генерации хватает для компенсации туннельной утечки дырок в валентную зону n^+ -полукремния и поддержания слоя инверсии. Величина протекающего тока в таком состоянии определяется в основном туннелированием электронов из зоны проводимости n^+ -полукремния в зону проводимости n -кремния (ток I_n). При этом электроны переходят из полукремния в кремний из области энергий, лежащей ниже уровня Ферми в n^+ -полукремнии и выше края зоны проводимости полукремния. При падении напряжения на диэлектрике свыше 1.2 V имеет место также процесс туннелирования электронов из валентной зоны n^+ -полукремния в зону проводимости n -кремния, однако вклад в ток от этого процесса экспоненциально

мал в меру меньшей вероятности туннелирования через окисел для электронов с нижележащими состояниями на шкале энергий. Приближенно можно считать, что из n^+ -поликремния через окисел в n -кремний инжектируются в основном "горячие" электроны, энергия которых равна $E_F^{\text{Si}^*} - E_c(z=0)$, т.е. определяется падением напряжения на диэлектрике $U_{\text{ок}}$. Здесь $E_F^{\text{Si}^*}$ — положение уровня Ферми в n^+ -поликремнии, $E_c(z=0)$ — положение края зоны проводимости n -кремния на границе раздела $n\text{-Si-SiO}_2$ при $z=0$, z — продольная координата, отсчитываемая от границы раздела $n\text{-Si-SiO}_2$ в направлении, перпендикулярном плоскости интерфейса. Как правило, лишь несколько процентов (2–5%) от общего числа носителей, вносящих вклад в ток I_n , вызывает Оже-генерацию электронно-дырочных пар [2].

Во "включенном" состоянии за счет накопления неосновных носителей на границе раздела $n\text{-Si-SiO}_2$ и возникновения неравновесного инверсионного слоя дырок положение квазиуровня Ферми для дырок E_{Fp} в области инверсионного слоя оказывается ниже, чем положение уровня Ферми в объеме n -полупроводника. В результате во "включенном" состоянии всегда имеет место диффузионный отток дырок от поверхности в глубь полупроводника (ток $I_{\text{диф}}$). Ток $I_{\text{диф}}$ имеет направление, противоположное току туннельной утечки дырок I_p из инверсионного слоя в n^+ -поликремний (рис. 3, б). Дополнительно отметим, что имеет место еще один канал туннельной утечки дырок из инверсионного слоя в запрещенной зоне n -кремния (ток I_{ss}). В отсутствие подсветки условие существования "включенного" состояния имеет вид

$$P > \frac{I_p + I_{ss}}{I_n}.$$

Здесь P — доля носителей (от общего числа носителей, давших вклад в ток I_n), производящих ударную ионизацию и вносящих вклад в ток Оже-генерации. Иными словами, это условие означает, что ток Оже-генерации (PI_n), который играет роль внутреннего источника поступления дырок к границе раздела $n\text{-Si-SiO}_2$, должен быть больше, чем ток туннельной утечки дырок в поликремний ($I_p + I_{ss}$). Положительная разность этих токов $PI_n - (I_p + I_{ss})$ определяет диффузионный отток дырок от границы раздела $I_{\text{диф}}$. Заметим, что величина P зависит от энергии инжектированных "горячих" носителей и растет с увеличением напряжения на структуре во "включенном" состоянии.

Интересно отметить, что минимальное напряжение, при котором еще удерживается "включенное" состояние, составляет 2.5 В. Оно превосходит величину $E_{\text{thr}} = 1.4\text{--}1.5\text{eV}$, которая определяет пороговую кинетическую энергию "горячего" носителя,

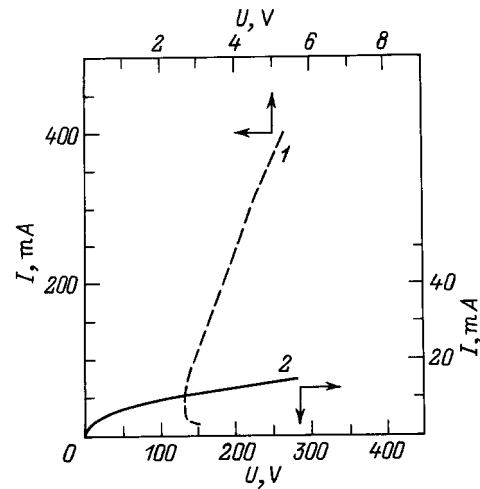


Рис. 4. ВАХ структуры при переключении в результате приложения большого обратного смещения. $T = 293\text{K}$. 1 — ВАХ во "включенном" состоянии в интервале напряжений от 2.5 до 5 В, 2 — ВАХ в состоянии стационарного неравновесного обеднения в интервале напряжений от 0 до 270 В.

требующуюся для ударной ионизации в кремнии. Из рассмотрения энергетической диаграммы структуры во "включенном" состоянии (рис. 3, б) следует, что минимальное напряжение удержания определяется суммой падения напряжения на диэлектрике $U_{\text{ок}}$ и поверхностного изгиба зон в n -кремнии (φ_s) в точке порога удержания. Сумма падений напряжений на дырочном инверсионном слое и обедненном слое в n -кремнии определяет поверхностный изгиб зон φ_s . На пороге удержания "включенного" состояния инжектированный "горячий" носитель может иметь на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-}n\text{-Si}$ кинетическую энергию, еще недостаточную для ударной ионизации, так как может оказаться, что при $z=0$ $E_F^{\text{Si}^*} - E_c(0) < E_{\text{thr}}$. Лишь пройдя инверсионный дырочный слой, толщина которого не превосходит 100\AA , он приобретает дополнительную энергию, равную изгибу зон в области инверсионного слоя, и станет способным к ударной ионизации [6]. Из вышперечисленного следует, что в экспериментально реализованной ситуации часть напряжения (до 0.7 В) во включенном состоянии падает и на слое обеднения, толщина которого $W_{\text{он}}$ значительно уменьшена по сравнению с ситуацией "высокоомного" состояния ($W_{\text{он}} \ll W$). Электрическое поле обедненной области во "включенном" состоянии осуществляет разделение Оже-генерированных электронно-дырочных пар.

Отметим, что структура может быть переведена во "включенное" состояние и в темновых условиях путем дальнейшего повышения обратного смещения до 250–300 В (рис. 4). С повышением обратного смещения увеличиваются толщина обедненного слоя в n -кремнии и эффективное электрическое

поле на границе раздела SiO_2 - n -Si. Это электрическое поле ускоряет в области n -кремния электроны, туннельно-прошедшие из зоны проводимости n^+ -поликремния сквозь SiO_2 в зону проводимости n -кремния. Туннельно-прошедшие сквозь SiO_2 электроны ускоряются за счет того, что на длине испускания оптического фонона в кремнии они получают в электрическом поле области пространственного заряда большую энергию, чем энергия оптического фонона ($E_{\text{ph}} = 0.063 \text{ eV}$ при $T = 300 \text{ K}$), которую они теряют. При напряжении около 250 V в структуре уже создаются условия для генерации необходимого количества неосновных носителей за счет Оже-ионизации. Это напряжение значительно меньше напряжения, при котором в резком p^+ - n -переходе происходит лавинный пробой n -кремния с удельным сопротивлением $25 \Omega \cdot \text{cm}$. Отметим, что одновременно с увеличением толщины W области пространственного заряда (ОПЗ) растет ток тепловой генерации дырок (J_{rg}) в ОПЗ, величина которого пропорциональна толщине ОПЗ и концентрации носителей в собственном полупроводнике.

При увеличении напряжения на структуре во "включенном" состоянии от 2.5 до 5 V растет величина положительного заряда дырок в инверсионном слое и падает напряжение на окисле. Как следствие повышаются энергия инжектированных в n -кремний электронов и эффективность процесса Оже-генерации. Как видно из рис. 4 (кривая 1), величина протекающего тока практически линейно зависит от приращения напряжения в интервале от 3 до 5 V .

Экспериментально наблюдаемый эффект переключения в n^+ -Si*- SiO_2 - n -Si-структурах с минимальным напряжением удержания "включенного" состояния около 2.5 V свидетельствует о высоком качестве изготовленных структур и туннельно-тонкого окисла. На некоторых структурах с $d = 23 \text{ \AA}$, выращенных на подложках КЭФ-25, экспериментально наблюдались и большие значения минимальных напряжений удержания (вплоть до 4 - 5 V), а в ряде случаев — меньшие (1.6 - 2.2 V). Последний факт заслуживает более пристального внимания. Так, наличие переключений в структурах с минимальным напряжением удержания около 1.6 V , по всей видимости, означает, что в этих структурах во "включенном" состоянии на слое обеднения падает не более 0.15 V , толщина его сильно уменьшена, а квазиуровень Ферми для дырок в области слоя инверсии E_{Fp} находится вблизи края валентной зоны n -кремния E_v ($z \rightarrow \infty$).

По результатам проведенной работы необходимо сделать следующие заключительные замечания.

1) Наличие n^+ -поликремниевое электрода вместо металлического обуславливает дополнительную специфику. Так, присутствие запрещенной зоны в материале затворного электрода практически полностью

блокирует в режиме стационарного неравновесного обеднения канал токопереноса, связанный с переходом неосновных носителей—дырок из валентной зоны n -кремния в материал затвора через поверхностные состояния границы раздела n -Si- SiO_2 (рис. 3, а). Поэтому в случае поликремниевое электрода условие $E_{Fm} - E_c(0) > 0$ выполняется в режиме стационарного неравновесного обеднения легче, чем в случае металлического электрода [7]. Во "включенном" состоянии аналогично: чем меньше величина тока туннельной утечки дырок (I_{ss}) через поверхностные состояния на границе n -Si- SiO_2 , тем больше величина заряда, накопленного в квазиравновесном дырочном слое, и, следовательно, больше напряжение, падающее на диэлектрике.

2) Отметим, что в структурах высоколегированный p^+ -поликремний—туннельно-прозрачный окисел— p -кремний эффекты переключения не наблюдаются [8–11].

3) Использование структур n^+ -Si*- SiO_2 - n -Si актуально при создании пороговых детекторов оптического излучения.

Список литературы

- [1] S.K. Lai, P.V. Dressendorfer, T.P. Ma, R.C. Barker. Appl. Phys. Lett. **38**, 1, 41 (1981).
- [2] E.R. Fossum, R.C. Barker. IEEE Trans. Electron Devices **ED-31**, 9, 1168 (1984).
- [3] А.Я. Вуль, Т.Л. Макарова, В.Ю. Осипов, Ю.С. Зинчик, С.К. Бойцов. ФТП **26**, 1, 111 (1992).
- [4] С.К. Бойцов, В.Ю. Осипов. Микроэлектроника **24**, 1, 13 (1995).
- [5] С.К. Бойцов, В.Ю. Осипов, Т.Л. Макарова. Микроэлектроника **22**, 5, 86 (1993).
- [6] Е.В. Остроумова, А.А. Рогачев. ФТП **28**, 8, 1411 (1994).
- [7] А.Я. Вуль, А.Т. Дидейкин, С.К. Бойцов, Ю.С. Зинчик, А.В. Саченко. ФТП **26**, 2, 295 (1992).
- [8] С.К. Бойцов, А.Я. Вуль, В.Ю. Осипов, А.Т. Дидейкин, Ю.С. Зинчик, Т.Л. Макарова. ФТТ **33**, 6, 1784 (1991).
- [9] А.Я. Вуль, А.Т. Дидейкин, В.Ю. Осипов, С.К. Бойцов, Ю.С. Зинчик, Т.Л. Макарова. ФТП **26**, 1, 146 (1992).
- [10] С.К. Бойцов, Т.Л. Макарова, В.Ю. Осипов. ФТТ **34**, 5, 1475 (1992).
- [11] С.К. Бойцов, В.Ю. Осипов. Микроэлектроника **23**, 3, 90 (1994).