

УДК 538.935

О ТРАНСПОРТЕ ЗАРЯДА В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ ОКСИДОВ ГАФНИЯ И ЦИРКОНИЯ*

Д. Р. Исламов^{1,2}, В. А. Гриценко^{1,2}, А. Чин³

¹*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13*

²*Новосибирский государственный университет,
630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

³*National Chiao Tung University,
University Road 1001, Hsinchu, 300, Taiwan ROC
E-mail: damir@isp.nsc.ru*

Исследован механизм транспорта заряда в МДП-структурах на основе тонких плёнок оксидов гафния и циркония. Показано, что в изучаемых материалах транспорт лимитируется фонон-облегчённым туннелированием между ловушками. Из сравнения экспериментальных вольт-амперных характеристик МДП-структур $n\text{-Si}/\text{HfO}_2/\text{Ni}$ и $n\text{-Si}/\text{ZrO}_2/\text{Ni}$ с рассчитанными определены термическая и оптическая энергии ловушек. Продемонстрировано, что вакансии кислорода являются центрами локализации (ловушками) носителей заряда в HfO_2 и ZrO_2 .

Ключевые слова: аморфные плёнки, диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью, оксид гафния, оксид циркония, транспорт.

DOI: 10.15372/AUT20170212

Введение. Масштабирование проектной нормы технологического процесса полупроводникового производства в сторону уменьшения привело к резкому повышению туннельной прозрачности оксида кремния SiO_2 — классического диэлектрика кремниевой технологии. В качестве альтернативы SiO_2 несколько лет назад были предложены диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (high- κ диэлектрики) [1]. Так, твёрдые растворы на основе оксида гафния HfO_2 уже внедрены в производство современных микропроцессоров в качестве подзатворного диэлектрика КМОП-транзисторов [2–6] и блокирующего диэлектрического слоя в элементах флеш-памяти на структурах кремний—оксид—нитрид—оксид—кремний [7, 8]. High- κ оксид циркония ZrO_2 наряду с HfO_2 является одним из перспективных материалов для активной среды элемента энергонезависимой резистивной памяти [9–12]. Резистивная память в перспективе может стать универсальной в электронных приборах, заменив собой современные виды запоминающих устройств: оперативную память, жёсткие диски, энергонезависимую флеш-память на базе транзисторов с плавающим затвором [13–17]. Другой претендент на роль универсальной памяти — сегнетоэлектрическая память. Внедрение классических сегнетоэлектриков (например, цирконата-титаната свинца $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3)$) в кремниевую технологию является трудноразрешимой задачей даже на современном уровне полупроводникового производства. В 2011 году у оксида гафния, который на протяжении более ста лет считался параэлектрическим материалом, был впервые обнаружен сегнетоэлектрический эффект [18, 19], который наблюдался

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.575.21.0027, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0027) и Российского научного фонда (грант № 16-19-00002).

в тонких плёнках толщиной $\sim(6-10)$ нм при условии их легирования различными элементами (Si, Al, Y, Gd, La и др.) и последующего высокотемпературного отжига (~ 1000 °C).

Несмотря на активное изучение электронных свойств HfO_2 и ZrO_2 и растворов на их основе, природа дефектов, ответственных за локализацию носителей заряда (а значит, и за перенос заряда), и физические механизмы транспорта в этих материалах являются дискуссионными вопросами. В работах [20, 21] показано, что общепринятая модель ионизации заряженного кулоновского центра в диэлектриках по Френкелю не описывает экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) и металл—диэлектрик—металл с тонкими слоями HfO_2 . Предложенные модели транспорта в HfO_2 [21] сложны и требуют ресурсоёмких численных квантово-химических расчётов, за которыми скрывается физический смысл протекающих процессов.

Цель данной работы — выявление механизмов переноса заряда в тонких плёнках HfO_2 и ZrO_2 , а также определение параметров ловушек, ответственных за транспорт.

Методика эксперимента. Исследуемые образцы представляли собой МДП-структуры $n\text{-Si}/\text{HfO}_2/\text{Ni}$ и $n\text{-Si}/\text{ZrO}_2/\text{Ni}$. Для изготовления тестовых структур плёнки HfO_2 и ZrO_2 толщиной 20 нм выращивались методом физического перепыления/осаждения на кремниевых подложках с ориентацией (100) n -типа. Суть метода заключается в нагреве мишени чистого HfO_2 или ZrO_2 электронным пучком с последующим распылением оксида на подложку. Толщина и однородность распределения диэлектрических плёнок по площади подложки контролировались кварцевыми микровесами. Для предотвращения роста подслоя SiO_2 выращенные плёнки не отжигались. Структурный анализ методом дифракции рентгеновских лучей при скользящем падении показал, что синтезированные плёнки HfO_2 и ZrO_2 имеют аморфную структуру. Для транспортных измерений на осаждённые плёнки HfO_2 и ZrO_2 методом электронно-лучевого испарения через теневую маску напылялся электрод Ni толщиной 50 нм круглой формы с радиусом 70 мкм.

Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики синтезированных МДП-структур измерялись при различных температурах в диапазоне $-40 \dots 200$ °C с помощью универсального измерителя характеристик полупроводниковых приборов 4155В (фирмы "Hewlett Packard").

Результаты и обсуждение. На рис. 1, *a* символами представлены экспериментальные ВАХ структуры $n\text{-Si}/\text{HfO}_2/\text{Ni}$ при различных температурах T в полулогарифмическом масштабе $\log(J) - U$ (J — плотность тока), а на рис. 1, *b* — ВАХ структуры $n\text{-Si}/\text{ZrO}_2/\text{Ni}$ при различных температурах. Видно, что для обеих структур ток экспоненциально зависит от приложенного напряжения и температуры. Для описания транспортных характеристик в изучаемых плёнках используется монополярная система уравнений Шокли — Рида — Холла [22]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla(n\mathbf{v}) + n_t P_{\text{ion}} - \sigma n v (N - n_t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_t}{\partial t} = \sigma n v (N - n_t) - n_t P_{\text{ion}} + \left(\frac{\partial n_t}{\partial t}\right)_{\text{tun}} \quad (2)$$

и уравнение Пуассона с граничными условиями

$$\Delta\varphi = -e \frac{n + n_t}{\kappa\epsilon_0}; \quad \mathbf{F} = -\nabla\varphi; \quad \varphi|_{z=0} = 0; \quad \varphi|_{z=d} = U, \quad (3)$$

где n — концентрация электронов в зоне проводимости; t — время; \mathbf{v}, v — дрейфовая скорость электронов (векторная и скалярная); n_t — концентрация заполненных ловушек;

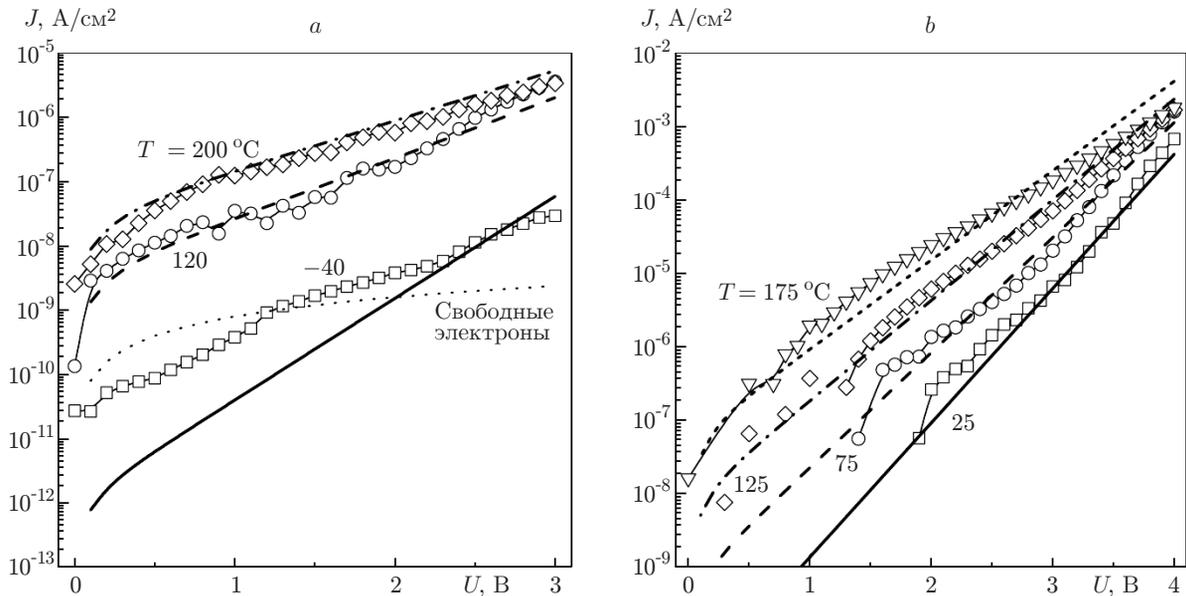


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики МДП-структур при различных температурах: *a* — $n\text{-Si}/\text{HfO}_2/\text{Ni}$ (тонкая пунктирная линия соответствует расчётному вкладу свободных электронов при $T = -40$ °C); *b* — $n\text{-Si}/\text{ZrO}_2/\text{Ni}$

P_{ion} — частота ионизации ловушки (переход электрона с ловушки в зону проводимости); σ — сечения захвата электрона на ловушку; N — концентрация ловушек; φ — электростатический потенциал; e — заряд электрона (по модулю); κ — статическая диэлектрическая проницаемость плёнки; ε_0 — электрическая постоянная; \mathbf{F} — электрическое поле; d — толщина диэлектрической плёнки; U — приложенное к структуре напряжение. Последнее слагаемое уравнения (2) описывает переходы электронов между ловушками без ионизации в зону проводимости. В явном виде это слагаемое можно получить, рассмотрев переходы между соседними ловушками в одномерной цепочке:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_i}{\partial t} = & n_{i-1}(1 - n_i/N)P_{i-1}^i - n_i(1 - n_{i-1}/N)P_i^{i-1} + \\ & + n_{i+1}(1 - n_i/N)P_{i+1}^i - n_i(1 - n_{i+1}/N)P_i^{i+1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь n_i — концентрация заполненных ловушек в i -м узле расчётной сетки; P_i^j — частота электронных переходов из i -го узла в j -й. Заменяя в уравнении (4) линейно-разностное представление функции дифференциальным

$$f(x \pm a) = f(x) \pm af'(x),$$

в общем виде будем иметь

$$\left(\frac{\partial n_t}{\partial t}\right)_{\text{tun}} = -a\nabla\left(n_t(N - n_t)P_{\text{tun}}\frac{\mathbf{F}}{F}\right), \quad (5)$$

где $a = N^{-1/3}$ — среднее расстояние между ловушками; P_{tun} — частота туннелирования носителей заряда между ловушками; \mathbf{F}/F — единичный вектор, направленный вдоль электрического поля. Сравнивая выражения (1), (2) и (5) с уравнением непрерывности

$$\frac{\partial(n + n_t)}{\partial t} = -\frac{1}{e}\nabla\mathbf{J},$$

получаем выражение для ВАХ

$$J = env + \frac{e}{a^2} \frac{n_t}{N} \left(1 - \frac{n_t}{N}\right) P_{\text{tun}}. \quad (6)$$

Первое слагаемое в (6) отвечает за ток свободных электронов в зоне проводимости, второе — за ток туннелирующих между ловушками электронов. В случае большого количества ловушек в диэлектрике $N > 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ток свободных носителей оказывается мал по сравнению с вкладом туннелирующих между ловушками электронов в силу малого значения $n \sim 10^5\text{--}10^{12} \text{ см}^{-3}$ [23]. В этом случае основной вклад в транспорт вносит механизм туннелирования носителей заряда между ловушками.

Многофононная модель туннелирования заряда между ловушками в диэлектриках (модель фонон-облегчённого туннелирования между ловушками) описана в работе [24]. На рис. 2 приведена конфигурационная диаграмма туннелирования электрона из одной фонон-связанной ловушки в другую на расстоянии a в присутствии внешнего электрического поля. Жирные линии соответствуют начальному состоянию системы (до туннелирования), тонкие — конечному (после туннелирования). Законы дисперсии системы локализованный электрон—фононы изображены сплошными парабололами $U_b(Q)$ с минимумом $Q_0 = \sqrt{2(W_{\text{opt}} - W_t)}$, штрихпунктирные параболы $U_f(Q)$ с минимумом $Q = 0$ соответствуют законам дисперсии электронов в зоне проводимости (Q — конфигурационная координата, W_t — термическая энергия ловушки, W_{opt} — оптическая энергия ловушки). Во внешнем поле уровни электронов (наклонные линии $\varepsilon(Q)$) в соседних ловушках не совпадают, поэтому туннельный переход (горизонтальная штриховая стрелка на рис. 2) должен сопровождаться неупругими процессами — испусканием или поглощением фононов, для того чтобы скомпенсировать разность энергий. Модель фонон-связанной ловушки учитывает это обстоятельство. Частота туннелирования между фонон-связанными ловушками

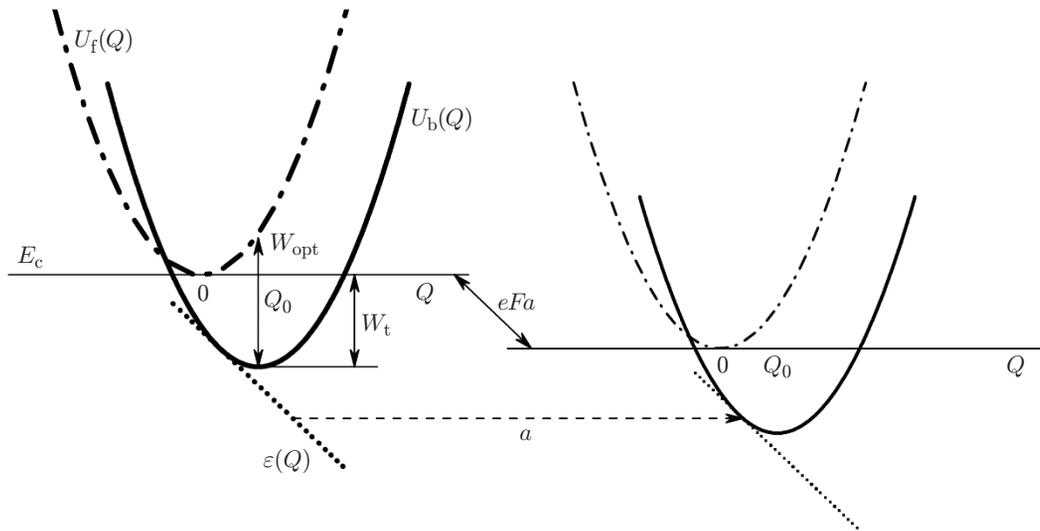


Рис. 2. Конфигурационная диаграмма туннелирования электрона из одной фонон-связанной ловушки в другую на расстоянии a в присутствии внешнего электрического поля F (сплошные термы соответствуют основному состоянию ловушки (с локализованным электроном); штрихпунктирные — возбуждённому без электрона; пунктирные наклонные линии описывают зависимость уровня энергии локализованного электрона от значения конфигурационной координаты Q ; горизонтальная штриховая стрелка отображает туннельный переход электрона из одной ловушки в другую)

имеет экспоненциальную зависимость от электрического поля и температуры:

$$P_{\text{tun}} = \frac{2\sqrt{\pi}\hbar W_t}{m^* a^2 Q_0 \sqrt{kT}} \exp\left(-\frac{W_{\text{opt}} - W_t}{2kT}\right) \cdot \exp\left(-\frac{2a\sqrt{2m^* W_t}}{\hbar}\right) \cdot \sinh\left(\frac{eFa}{2kT}\right), \quad (7)$$

где \hbar — постоянная Планка; m^* — эффективная масса носителя заряда; k — постоянная Больцмана.

Результаты моделирования в рамках описанной в данной работе модели представлены на рис. 1. Расчётные параметры ловушек: $W_t = 1,25 \pm 0,005$ эВ, $W_{\text{opt}} = 2,5 \pm 0,05$ эВ, $m^* = (0,25 \pm 0,05)m_0$, $N = (4 \pm 0,6) \cdot 10^{19}$ см⁻³ для структуры *n*-Si/HfO₂/Ni и $W_t = 1,25 \pm 0,005$ эВ, $W_{\text{opt}} = 2,5 \pm 0,05$ эВ, $m^* = (0,14 \pm 0,005)m_0$, $N = (1,2 \pm 0,2) \cdot 10^{19}$ см⁻³ для *n*-Si/ZrO₂/Ni. Значения n_t измерялись по сдвигу напряжения плоских зон изучаемых МДП-структур и составили $4 \cdot 10^{18}$ см⁻³ и $6 \cdot 10^{18}$ см⁻³ для HfO₂ и ZrO₂ соответственно. Количественное согласие экспериментальных и рассчитанных ВАХ наблюдается при одинаковых для HfO₂ и ZrO₂ величинах термической и оптической энергий ловушек $W_t = 1,25$ эВ и $W_{\text{opt}} = 2,5$ эВ. Равенства энергетических параметров ловушек в разных материалах можно обосновать изоэлектронным строением внешних оболочек Hf и Zr, с одной стороны, одинаковой структурой ловушек — с другой. Эти два объяснения дополняют друг друга, поскольку электронное строение дефектов в оксидных диэлектриках зависит только от ближайшего атомного окружения (первой координационной сферы). Принимая во внимание близость электронной структуры вакансий кислорода V_O в HfO₂ и ZrO₂ и равенство поляронной энергии вакансий кислорода в изучаемых оксидах 1,25 эВ (половина стоксовского сдвига фотолюминесценции 2,7 эВ с возбуждением 5,2 эВ) [25–29], мы делаем вывод, что вакансии кислорода являются центрами локализации (ловушками) носителей заряда в HfO₂ и ZrO₂. В твёрдом растворе Hf_{0,5}Zr_{0,5}O₂ транспорт также описывается моделью фонон-облегчённого туннелирования между ловушками (7) с термической и оптической энергиями ловушки $W_t = 1,25$ эВ и $W_{\text{opt}} = 2,5$ эВ соответственно [30, 31].

Можно заметить расхождение экспериментально измеренных ВАХ для структуры *n*-Si/HfO₂/Ni с рассчитанными для $T = -40$ °С на рис. 1, а. Такое несоответствие объясняется простотой использованной модели. При понижении температуры число фононов в атомной решётке уменьшается и вероятность многофононного процесса понижается экспоненциально согласно выражению (7). На этом фоне дрейф свободных электронов в электрическом поле может дать существенный вклад в ток (6). Для демонстрации рассматриваемого эффекта был оценён вклад свободных электронов в транспорт. Результат расчёта показан тонкой пунктирной линией на рис. 1, а. Оценка сделана при следующих значениях параметров: $n \sim 10^5$ см⁻³, $v = \min(\mu F, V_T)$, где $\mu \sim 0,1$ см²/В · с — подвижность свободных электронов в диэлектрике, V_T — тепловая скорость электронов. Можно отметить удовлетворительное согласие расчёта с экспериментальными данными, учитывая принятые упрощения (например, отсутствие зависимости n от времени и электрического поля) и значения параметров.

Заключение. Представлены результаты экспериментального изучения механизма транспорта заряда в МДП-структурах на основе аморфных тонких плёнок HfO₂ и ZrO₂. Показано, что перенос заряда описывается фонон-облегчённым туннелированием между ловушками. Установлено, что энергетические параметры ловушек одинаковы для изучаемых материалов и составляют $W_t = 1,25$ эВ и $W_{\text{opt}} = 2,5$ эВ для термической и оптической энергий соответственно. Выявлено, что V_O-центры являются ловушками носителей заряда в HfO₂ и ZrO₂. Следует отметить, что рассмотренная модель многофононного туннелирования между ловушками значительно проще, чем в [21]. В предлагаемой работе модель транспорта основана на ловушке с одним уровнем для электрона, тогда как в модели [21]

ловушка имеет спектр электронных состояний $W_t = 1,4-2,4$ эВ. Однако за сложной численной схемой скрыт физический смысл многофононного процесса при переносе заряда между ловушками. В [21] описано туннелирование с последующей релаксацией атомного окружения ловушки — вакансии кислорода. Модель [24] основана на представлениях о квазичастицах и не зависит от атомной структуры ловушки. Также можно отметить, что спектр электронных состояний ловушки [21] может быть интерпретирован в рамках модели фонон-связанной ловушки с моноуровнем как разрешённые положения уровня энергии электрона при сильном электрон-фононном взаимодействии в электрическом поле без ионизации электрона в зону проводимости (линия $\varepsilon(Q)$ на рис. 2). В [32] была предпринята попытка учесть эффект локализации электронов в диэлектрической плёнке. Однако в этой работе не отражена экспоненциальная зависимость вероятности ионизации от электрического поля, которая наблюдается в эксперименте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kar S.** High Permittivity Gate Dielectric Materials. Berlin — Heidelberg: Springer, 2013. 489 p.
2. **Robertson J.** High dielectric constant gate oxides for metal oxide Si transistors // Rep. Prog. Phys. 2006. **69**, N 2. P. 327–396.
3. **Tsormpatzoglou A., Tassis D. H., Dimitriadis C. A. et al.** Electrical characterization and design optimization of FinFETs with a TiN/HfO₂ gate stack // Semicond. Sci. Technol. 2009. **24**, N 12. 125001.
4. **Lee H.-I., Park G. S., Oh S. K. et al.** Band alignment of atomic layer deposited (HfZrO₄)_{1-x}(SiO₂)_x gate dielectrics on Si(100) // Appl. Phys. Lett. 2015. **107**, Is. 18. 182101.
5. **Ma T. P., Bu H. M., Wang X. W. et al.** Special reliability features for Hf-based high- κ gate dielectrics // IEEE Trans. Device and Mater. Reliability. 2005. **5**, N 1. P. 36–44.
6. **Pavanello M. A., Martino J. A., Simoen E. et al.** Evaluation of triple-gate FinFETs with SiO₂-HfO₂-TiN gate stack under analog operation // Solid-State Electron. 2007. **51**, Is. 2. P. 285–291.
7. **Chen L.-J., Wu Y.-C., Chiang J.-H. et al.** Comprehensive study of Pi-gate nanowires poly-Si TFT nonvolatile memory with an HfO₂ charge trapping layer // IEEE Trans. Nanotechnology. 2011. **10**, Is. 2. P. 260–265.
8. **Tsai P.-H., Chang-Liao K.-S., Liu T.-C. et al.** Charge-trapping-type flash memory device with stacked high-k charge-trapping layer // IEEE Electron Dev. Lett. 2009. **30**, Is. 7. P. 775–777.
9. **Lin C.-Y., Wu C.-Y., Wu C.-Y. et al.** Effect of top electrode material on resistive switching properties of ZrO₂ film memory devices // IEEE Electron Dev. Lett. 2007. **28**, N 5. P. 366–368.
10. **Zhang H., Gao B., Sun B. et al.** Ionic doping effect in ZrO₂ resistive switching memory // Appl. Phys. Lett. 2010. **96**, Is. 12. 123502.
11. **Goux L., Czarnecki P., Chen Y. Y. et al.** Evidences of oxygen-mediated resistive switching mechanism in TiN/HfO₂/Pt cells // Appl. Phys. Lett. 2010. **97**, Is. 24. 243509.
12. **Hou T.-H., Lin K.-L., Shieh J. et al.** Evolution of RESET current and filament morphology in low-power HfO₂ unipolar resistive switching memory // Appl. Phys. Lett. 2011. **98**, Is. 10. 103511.
13. **Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S.** The missing memristor found // Nature. 2008. **453**, N 7191. P. 80–83.
14. **Yang J. J., Pickett M. D., Li X. et al.** Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices // Nature Nanotechnol. 2008. **3**, N 7. P. 429–433.
15. **Lee M.-J., Han S., Jeon S. H. et al.** Electrical manipulation of nanofilaments in transition-metal oxides for resistance-based memory // Nano Letters. 2009. **9**, N 4. P. 1476–1481.

16. **Borghetti J., Snider G. S., Kuekes P. J. et al.** 'Memristive' switches enable 'stateful' logic operations via material implication // *Nature*. 2010. **464**, N 7290. P. 873–876.
17. **Lee M.-J., Lee C. B., Lee D. et al.** A fast, high-endurance and scalable non-volatile memory device made from asymmetric Ta₂O_{5-x}/TaO_{2-x} bilayer structures // *Nature Mater.* 2011. **10**, N 8. P. 625–630.
18. **Böscke T. S., Müller J., Bräuhäus D. et al.** Ferroelectricity in hafnium oxide thin films // *Appl. Phys. Lett.* 2011. **99**, Is. 10. 102903.
19. **Mueller S., Mueller J., Singh A. et al.** Incipient ferroelectricity in Al-doped HfO₂ thin films // *Adv. Functional Mater.* 2012. **22**, N 11. P. 2412–2417.
20. **Yu S., Guan X., Wong H.-S. P.** Conduction mechanism of TiN/HfO_x/Pt resistive switching memory: A trap-assisted-tunneling model // *Appl. Phys. Lett.* 2011. **99**, Is. 6. 063507.
21. **Vandelli L., Padovani A., Larcher L. et al.** A physical model of the temperature dependence of the current through SiO₂/HfO₂ stacks // *IEEE Trans. Electron Devices*. 2011. **58**, N 9. P. 2878–2887.
22. **Насыров К. А., Гриценко В. А.** Механизмы переноса электронов и дырок в диэлектрических плёнках // *УФН*. 2013. **183**, № 10. С. 1099–1114.
23. **Новиков Ю. Н., Гриценко В. А.** Релаксация тока в Si₃N₄: эксперимент и численное моделирование // *ФТТ*. 2017. **59**, вып. 1. С. 49–53.
24. **Насыров К. А., Гриценко В. А.** Перенос заряда в диэлектриках туннелированием между ловушками // *ЖЭТФ*. 2011. **139**, вып. 6. С. 1172–1181.
25. **Perevalov T. V., Aliev V. S., Gritsenko V. A. et al.** The origin of 2,7 eV luminescence and 5,2 eV excitation band in hafnium oxide // *Appl. Phys. Lett.* 2014. **104**, Is. 7. 071904.
26. **Gritsenko V. A., Perevalov T. V., Islamov D. R.** Electronic properties of hafnium oxide: A contribution from defects and traps // *Phys. Reports*. 2016. **613**. P. 1–20.
27. **Gritsenko V. A., Islamov D. R., Perevalov T. V. et al.** The oxygen vacancy in hafnia as a blue luminescence center and a trap of charge carriers // *The Journ. Phys. Chem. C*. 2016. **120**. P. 19980–19986.
28. **Perevalov T. V., Gulyaev D. V., Aliev V. S. et al.** The origin of 2,7 eV blue luminescence band in zirconium oxide // *Journ. Appl. Phys.* 2014. **116**, Is. 24. 244109.
29. **Исламов Д. Р., Гриценко В. А., Ченг Ч. Х., Чин А.** Механизм переноса носителей заряда в диэлектриках с высокой диэлектрической проницаемостью и основанных на них элементах резистивной памяти // *Автометрия*. 2014. **50**, № 3. С. 115–120.
30. **Islamov D. R., Perevalov T. V., Gritsenko V. A. et al.** Charge transport in amorphous Hf_{0,5}Zr_{0,5}O₂ // *Appl. Phys. Lett.* 2015. **106**, Is. 10. 102906.
31. **Исламов Д. Р., Черникова А. Г., Козодаев М. Г. и др.** Механизм транспорта заряда в тонких плёнках аморфного и сегнетоэлектрического Hf_{0,5}Zr_{0,5}O₂ // *Письма в ЖЭТФ*. 2015. **102**, вып. 8. С. 610–614.
32. **Косцов Э. Г.** Переходные токи в диэлектрике, содержащем центры захвата электронов // *Автометрия*. 1978. № 1. С. 85–91.

Поступила в редакцию 18 января 2017 г.