

УДК 53.096; 53.097

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ МДП-СТРУКТУР

© Калитов Р.А.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

e-mail: romankalitov63@gmail.com

Научный руководитель: Шалимова М.Б., канд. физ.-мат. наук, доцент
*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

Ключевые слова: плотность тока утечки, туннелирование Фаулера-Нордгейма, эмиссия Шоттки, эмиссия Пула-Френкеля, МДП-структура.

Уменьшение размеров затвора и толщины диэлектрического слоя приводит к увеличению плотности тока утечки и снижению надежности затворного диэлектрика по мере миниатюризации КМОП-технологии (комплементарная металл-окисел-полупроводник технология), что особенно актуально при переходе к нанометровым нормам для уменьшения потерь мощности в интегральных схемах. Для решения проблем, связанных с ограничениями классических затворных диэлектриков (SiO_2 или SiON), которые приближаются к своим физическим пределам, в 45-нм технологическом узле и последующих поколениях применяются новые материалы с высокой диэлектрической проницаемостью (high-k).

Механизмы токов утечки, которые мы исследовали в этой работе: туннелирование Фаулера-Нордгейма, эмиссия Шоттки, эмиссия Пула-Френкеля. Эмиссия Шоттки обусловлена термически активированными электронами. При эмиссии Пула-Френкеля захваченные на ловушки в диэлектрике электроны термически возбуждаются в зону проводимости при высокой температуре, и процесс усиливается электрическим полем. Туннелирование Фаулера-Нордгейма становится доминирующим в области высокого электрического поля.

Наиболее частым механизмом тока утечки в затворных диэлектриках является эмиссия Шоттки, выражаемая в виде [1]:

$$J_{SE} = A^* T^2 \exp \left[\frac{-q(\phi_B - \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_r\epsilon_0}})}{k_B T} \right], \quad (1)$$

где J_{SE} – плотность тока, A^* – эффективная постоянная Ричардсона, $A^* = 4\pi q (m^*_{ox}) k^2/h^3 = 120 (m^*_{ox}/m_0)$, T – абсолютная температура, q – заряд электрона, $q\phi_B$ – высота барьера Шоттки (то есть, ϕ_B), E – напряженность электрического поля, $k_B = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж / К постоянная Больцмана, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка, ϵ_r – динамическая диэлектрическая постоянная (т. е. электронная компонента диэлектрической постоянной), ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства, m_0 – масса свободного электрона, m^*_{ox} – эффективная масса электрона. ϵ_r равно квадрату измеренного показателя преломления ($n = \epsilon_r^{1/2}$).

Другой механизм проводимости тока, туннелирование Фаулера-Нордгейма, может быть выражено [2]:

$$J_{FN} = BE^2 \exp \left[\frac{-8\pi(2q m^*_t)^{1/2} \phi_B^{3/2}}{3hE} \right], \quad (2)$$

где V , как правило, считается постоянной, m_r – туннельная эффективная масса электронов, и другие термины определены выше.

В этой работе в качестве основного материала использовались монокристаллические пластины кремния, относящиеся к n-типу, с удельным сопротивлением 5 Ом·см. Тонкие пленки фторидов редкоземельных элементов (РЗЭ) получались с помощью метода термического распыления порошкообразных SmF_3 и YF_3 на предварительно нагретые кремниевые подложки. Температура подложки во время распыления оказывала значительное воздействие на качество, механические и электрические свойства получаемых диэлектрических слоев. Установлено, что оптимальными свойствами обладают структуры, для которых пленки фторидов РЗЭ изготавливаются при температуре подложки $\sim 300^\circ\text{C}$. Толщина диэлектрического слоя РЗЭ в исследуемых структурах составляла 0,1 – 0,3 мкм. Верхние контакты к пленке диэлектрика изготавливались вакуумным термическим напылением алюминия через трафарет. Площадь электродов составляла $\sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$.

На рисунке приведена зависимость плотности тока от напряжения МДП-структуры $\text{Al-SmF}_3\text{-nSi}$. Анализ показывает, что на данном графике в прямом направлении с хорошей достоверностью аппроксимации наблюдается механизм туннелирования Фаулера-Нордгейма в интервале от 15 В до 21 В, и механизм Шоттки в интервале от 7 В до 10 В. Остальные области в прямом направлении имеют смешанный механизм электропроводности.

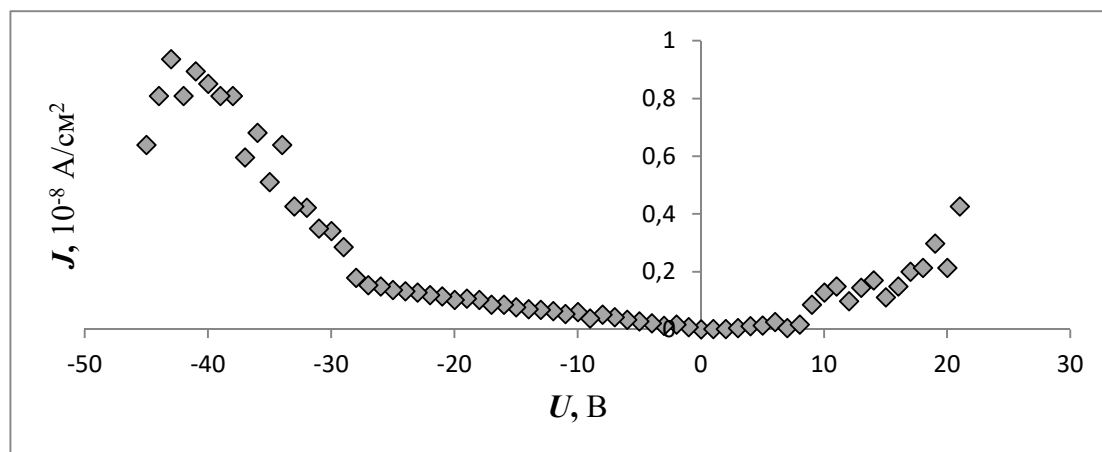


Рисунок – Зависимость плотности тока от напряжения МДП-структуры $\text{Al-SmF}_3\text{-nSi}$

В обратном направлении (–41 В) – (–24 В) – это механизм туннелирования Фаулера-Нордгейма, и (–11 В) – (–22 В) – механизм эмиссии Шоттки, остальные области в обратном направлении также имеют смешанный механизм электропроводности.

Для структуры $\text{Al-YF}_3\text{-nSi}$ в основном наблюдался механизм эмиссии Шоттки как в прямом, так и в обратном направлении.

Библиографический список

1. Lin, K.C. Leakage current conduction behaviors of 0.65 nm equivalent-oxide-thickness HfZrLaO gate dielectrics / K.C. Lin, J.Y. Chen, H.W. Hsu, H.W. Chen, C.H. Liu // Solid-State Electronics. – 2012. – V. 77. – P. 7–11.
2. Kwon, H.-M. Carrier transport mechanism in La-incorporated high-k dielectric/metal gate stack MOSFETs / H.-M. Kwon, W.-H. Choi, I.-S. Han, M.-K. Na, S.-U. Park, J.-D. Bok, C.-Y. Kang, B.-H. Lee, R. Jammy, H.-D. Lee // Microelectronic Engineering. – 2011. – V. 88. – P. 3399–3403.