

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР МЕТАЛЛ–ОКСИД ЭРБИЯ–КРЕМНИЙ

© 2004 В.А.Рожков, М.А.Родионов<sup>1</sup>

Исследованы электрофизические свойства структур алюминий–оксид эрбия–кремний ( $Al - Er_2O_3 - Si$ ). Установлено, что электропроводность структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) на постоянном токе удовлетворительно описывается механизмом Пула–Френкеля. Плотность поверхностных состояний, определенная методом вольт–фарадных характеристик, равнялась  $7,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Величины скорости поверхностной генерации и времени жизни неосновных носителей заряда, определенные по методике Цербста, лежали в пределах  $380\text{--}400 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$  и  $0,1\text{--}0,3 \text{ мкс}$  соответственно. Показана перспективность использования исследованных структур в качестве МДП-варикапов с высоким значением коэффициента перекрытия емкости.

Развитие микроэлектроники вызывает необходимость поиска новых перспективных диэлектрических материалов. К таким материалам относятся оксиды редкоземельных элементов (РЗЭ), которые характеризуются высокой химической и термической стойкостью, большими значениями диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления ( $\rho = 10^{13} - 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ), обладают хорошей адгезией к поверхности кремния. На их основе разработаны металл–диэлектрик–полупроводник (МДП)-варикапы и фотоварикапы [1], МДП-транзисторы [2], электрические и тепловые переключатели [3], термостойкие и эффективные просветляющие и пассивирующие диэлектрические покрытия для фотоэлектрических приборов [4]. Несмотря на большое число работ, свойства пленок оксидов редкоземельных элементов и МДП-систем, полученных на их основе, до настоящего времени изучены недостаточно полно. В частности, по-прежнему остаются нерешенными вопросы, связанные с выяснением механизмов процессов, протекающих на поверхности и в области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника, поиском и разработкой новых систем диэлектрик–полупроводник. В связи с этим целью данной работы являлось исследование электрофизических свойств кремниевых МДП-структур с диэлектрическими пленками из оксида эрбия.

<sup>1</sup>Рожков Виктор Аркадьевич ([rozhkov@ssu.samara.ru](mailto:rozhkov@ssu.samara.ru)), Родионов Максим Александрович ([rodionow@rambler.ru](mailto:rodionow@rambler.ru)), кафедра электроники твердого тела Самарского государственного университета, 443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

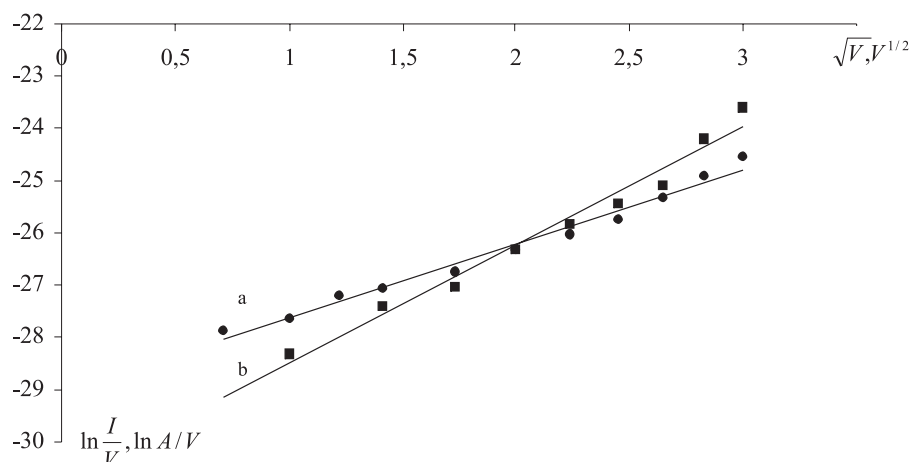


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика структуры  $Al - Er_2O_3 - nSi$ , построенная в координатах Пула—Френкеля

Образцы для исследования изготавливались на кремниевых монокристаллических подложках марки КЭФ-5 и КДБ-4,5 с ориентацией (111) и (100) соответственно. Пленки эрбия наносились методом термического распыления редкоземельного металла в вакууме при давлении  $(2-3) \cdot 10^{-5}$  Тор из молибденовой лодочки на установке типа ВУП-5. Полученные пленки РЗЭ окислялись в трубчатом кварцевом реакторе, помещенном в муфельную печь типа СУОЛ-0.4.4, на воздухе при температуре  $650^\circ C$  в течение 40 минут. Толщина диэлектрического слоя оксида эрбия у исследуемых структур лежала в пределах 35–75 нм. Контакты к диэлектрическому слою изготавливались вакуумным термическим напылением алюминия через трафарет. Площадь металлического электрода составляла  $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ . С противоположной стороны кремниевой пластины наносился сплошной контакт из алюминия.

На рис. 1 представлена типичная вольт-амперная характеристика (ВАХ) для структуры  $Al - Er_2O_3 - nSi$ , построенная в координатах Пула—Френкеля, для положительной (а) и отрицательной (b) полярности напряжения. Установлено, что ВАХ МДП-структур, измеренные на постоянном токе, практически симметричны, а электропроводность образцов удовлетворительно описывается механизмом Пула—Френкеля, который представляет собой термическую генерацию электронов из объемных ловушек в зону проводимости диэлектрика, облегченную электрическим полем. Коэффициенты выпрямления для различных образцов лежали в пределах 1,1–2,5. Величины удельного сопротивления пленок оксида эрбия, определенные из ВАХ, составляют  $10^{13} - 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

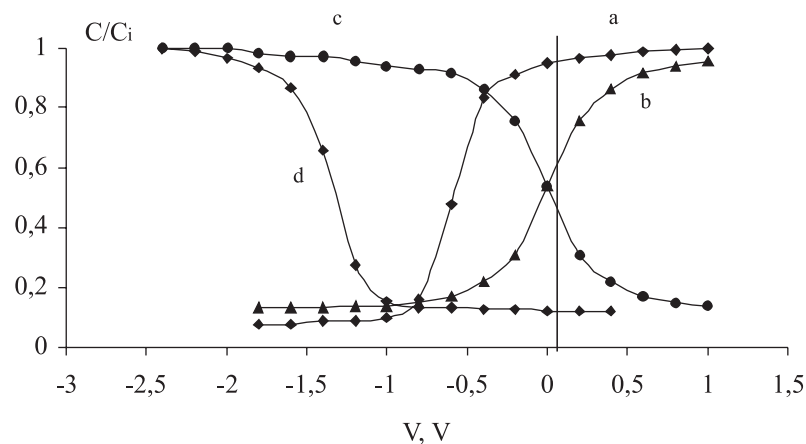


Рис. 2. Нормированные к емкости диэлектрика вольт-фарадные характеристики для структуры  $Al-Er_2O_3-nSi$  (а, б) и  $Al-Er_2O_3-pSi$  (с, д): б, с — теоретические зависимости, а, д — экспериментальные зависимости

Исследование свойств границы раздела полупроводник-диэлектрик в МДП-структурах осуществлялось с помощью измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик. На рис. 2 изображены типичные вольт-фарадные характеристики МДП-систем  $Al-Er_2O_3-Si$  нормированные к емкости диэлектрика, а также теоретически рассчитанные характеристики для идеальной МДП-структуры [5]. Из графиков видно, что для исследуемых образцов экспериментальные кривые смещены относительно идеальных в сторону отрицательных напряжений, что свидетельствует о наличии встроенного положительного заряда в диэлектрике и на границе раздела полупроводник-диэлектрик. Наличие положительного встроенного заряда характерно для термически выращенных окисных пленок [6]. Величина поверхностной плотности встроенного заряда в диэлектрике  $Q_{ss}$ , определенная для случая плоских зон на поверхности полупроводника, равнялась  $1,2 \cdot 10^{-7}$  Кл·см<sup>-2</sup>. Плотность поверхностных состояний в исследованных образцах составляла  $7,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Величины коэффициентов перекрытия по емкости  $K = \frac{C_{max}}{C_{min}}$  для исследованных структур лежали в пределах 12–13, где  $C_{max}$  и  $C_{min}$  — максимальное и минимальное значение емкости соответственно.

Исследование зависимости тангенса угла диэлектрических потерь  $\tan \delta$  от приложенного напряжения  $V$  при частоте измерительного сигнала 1 МГц показало, что  $\tan \delta$  характеристики от  $V$  имеют максимум при напряжении плоских зон и тенденцию к насыщению в области напряжений, соответствующих аккумуляции и инверсии на поверхности полупроводника. Активная составляющая проводимости  $G$  плавно увеличивается при переходе от обед-

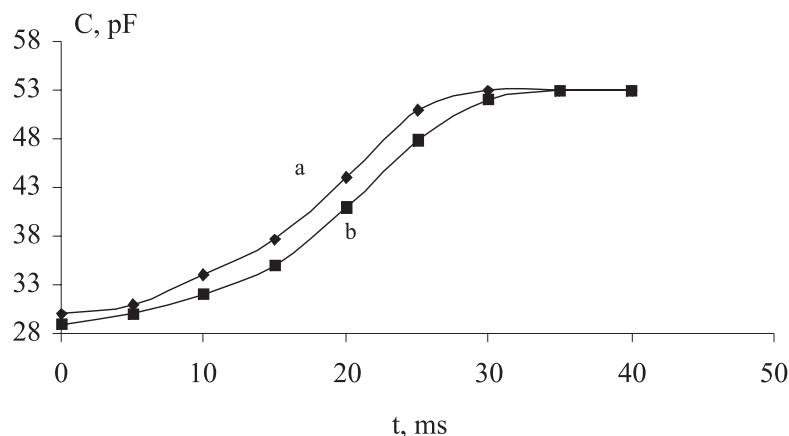


Рис. 3. Кинетические зависимости емкости МДП-структуры  $Al - Er_2O_3 - nSi$  при различных величинах постоянного напряжения: а — 6 В, б — 8 В. Амплитуда прямоугольного обедняющего импульса — 4 В

носящих к обогащающим поверхность полупроводника основными носителями заряда напряжениям и выходит на насыщение в области напряжений, соответствующих инверсии и аккумуляции на поверхности полупроводника. Величины проводимости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов в области напряжений, соответствующих аккумуляции, превышали аналогичные значения для области инверсии на поверхности полупроводника. При аккумуляции на поверхности полупроводника наблюдается некоторое уменьшение значений тангенса угла диэлектрических потерь по сравнению с состоянием плоских зон. Эта закономерность обусловлена тем, что при переходе от напряжений, соответствующих состоянию плоских зон, к области аккумуляции реактивная составляющая проводимости структуры увеличивается быстрее активной. На кривой  $G$  от  $V$  подобного спада не наблюдается. Это свидетельствует о сравнительно низкой плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик. Значения проводимости для исследуемых структур при различных напряжениях лежат в пределах от 0,009 до 1,35 мСм. Величина  $\tan \delta$  изменяется в пределах от 0,043 до 0,4.

Для определения скорости поверхностной генерации и времени жизни неосновных носителей заряда проведено измерение кинетических зависимостей емкости  $C(t)$  при неравновесном обеднении поверхности полупроводника основными носителями заряда, создаваемом прямоугольными импульсами напряжения, по методике, описанной в [7]. Типичные осциллограммы кривых  $C(t)$  в темноте при комнатной температуре для МДП-структуры  $Al - Er_2O_3 - nSi$  при различных величинах приложенного постоянного на-

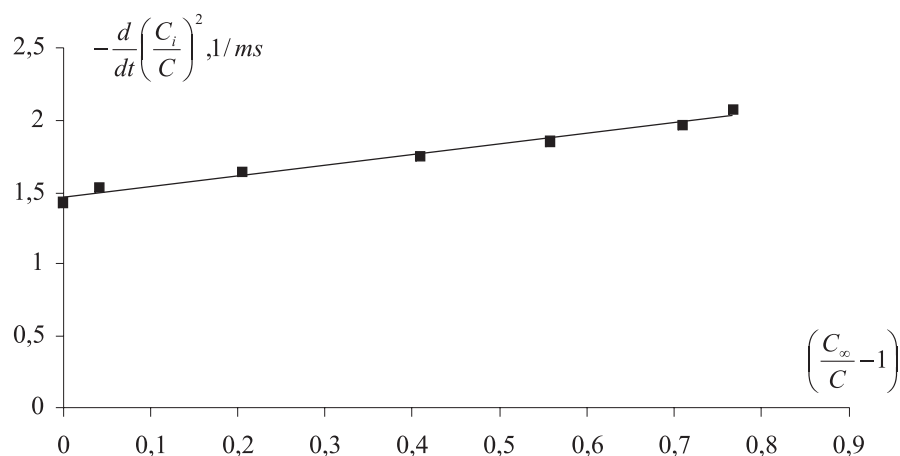


Рис. 4. Релаксационная зависимость емкости структуры  $Al - Er_2O_3 - nSi$  в координатах Цербста

пряжения приведены на рис. 3. При приложении к структуре импульсного обедняющего напряжения наблюдался быстрый спад значения емкости МДП-структуры, обусловленный увеличением толщины слоя ОПЗ в кремнии, после которого емкость возрастала до равновесного значения. Дальнейшее увеличение значения емкости структуры со временем обусловлено термической генерацией электронно-дырочных пар в ОПЗ и на поверхности полупроводника, которые разделяются в приповерхностной области полупроводника электрическим полем. В результате неосновные носители заряда накапливаются у поверхности, образуя инверсионный слой, а основные носители перемещаются к краю обедненной области, где они нейтрализуют ионизованные примесные центры. При этом толщина обедненной области уменьшается, а емкость структуры увеличивается.

Объемное время жизни  $\tau$  и скорость поверхностной генерации неосновных носителей заряда  $S$  рассчитывались по методике Цербста [7]. Для этого полученные зависимости  $C(t)$  перестраивались в координатах Цербста  $-\frac{d}{dt}\left(\frac{C_i}{C}\right)^2$  от  $\left(\frac{C_\infty}{C} - 1\right)$ , где характеристики имеют прямолинейный вид (рис. 4). Здесь  $C_\infty$  и  $C$  — емкости МДП-структуры в равновесии и в момент времени  $t$  соответственно,  $C_i$  — емкость диэлектрика МДП-структуры. Из значения тангенса угла наклона полученной прямой находилось объемное время жизни неосновных носителей заряда, а из пересечения ее с осью ординат рассчитывалась скорость поверхностной генерации. Величины  $S$  и  $\tau$  для исследуемых структур лежат в пределах  $380-400 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$  и  $0,1-0,3 \text{ мкс}$  соответственно.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что изученные структуры обладают высокими значениями коэффициента перекрытия по

емкости, а также хорошими изолирующими свойствами и перспективны для создания МДП-варикапов.

## Литература

- [1] Рожков В.А. и др. МДП-варикапы и фотоварикапы на основе структуры  $Al - Sm_2O_3 - Si$  // Журнал технической физики. 1995. Т. 65. С. 183–186.
- [2] Гуттиерез У. Возможность использования окислов РЗМ при создании пленочных емкостных элементов и тонкопленочных активных элементов // Зарубежная радиоэлектроника. 1966. №1. С. 86–90.
- [3] Рожков В.А., Петров А.И. Эффект переключения проводимости и память в структуре  $Al - Gd_2O_3 - Si$  // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 1. С. 49–52.
- [4] Аношин Ю.А., Петров А.И., Рожков В.А. и др. Просветляющие покрытия из оксидов редкоземельных элементов для кремниевых фотоэлектрических приборов // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 10. С. 54–58.
- [5] Goetzberger A. Ideal MOS-curves for silicon // Bell System Technical Journal. 1966. V. 45. №7. P. 1097–1121.
- [6] Вдовин О.С., Кирьяшкина З.И., Котелков В.Н. и др. Пленки оксидов редкоземельных элементов в МДМ- и МДП-структурах. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 160 с.
- [7] Zerst M. Relaxationseffekte an Halbleiter-Isolator-Grenzflächen // Zeitschrift angew. Phys. 1966. Band. 22. №1. S. 30–33.

Поступила в редакцию 28/VIII/2004;  
в окончательном варианте — 28/VIII/2004.

## ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF METAL-ERBIUM OXIDE-SILICON STRUCTURES

© 2004 V.A. Rozhkov, M.A. Rodionov<sup>2</sup>

The electrical properties of aluminum-erbium oxide-silicon ( $Al-Er_2O_3-Si$ ) structures are studied. The conductivity of these metal-insulator-semiconductor (MIS) structures is satisfactorily described by the Poole-Frenkel mechanism. The density of surface states determined by the method of capacitance-voltage characteristics is  $7,5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ . The kinetics curves of the capacitance are investigated. The surface generation rate and lifetime of the minority charge carriers, determined by using the Zerbst method, are within  $380-400 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  and  $0.1-0.3 \text{ }\mu\text{s}$ , respectively. The structures studied are promising materials for MIS varactors with a high capacity variation coefficient.

Paper received 28/VIII/2004.

Paper accepted 28/VIII/2004.

---

<sup>2</sup>Rozhkov Victor Arkad'evich ([rozhkov@ssu.samara.ru](mailto:rozhkov@ssu.samara.ru)), Rodionov Maksim Alexandrovich ([rodionow@rambler.ru](mailto:rodionow@rambler.ru)), Dept. of Solid State Electronics, Samara State University, Samara, 443011, Russia.