

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ БАРЬЕРЫ НА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦАХ В МДП-СИСТЕМЕ $Al - Er_2O_3 - Si$

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

Методом внутренней фотоэмиссии носителей заряда в диэлектрик определены энергетические барьеры для электронов на границах раздела  $Al - Er_2O_3$  (3,13-3,21 эВ),  $Si - Er_2O_3$  (3,29-3,35 эВ) в кремниевых металл-диэлектрик-полупроводник структурах с диэлектриком из оксида эрбия.

Широкое применение металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) систем в полупроводниковых дискретных приборах и интегральных схемах вызывает необходимость поиска и исследования свойств новых перспективных диэлектрических материалов. Оксиды редкоземельных элементов (РЗЭ), пленки которых обладают большими значениями диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления ( $\rho = 10^{13} - 10^{16}$  Ом·см) и характеризуются термической и химической стойкостью, представляют научный и практический интерес. Проведенные исследования показали возможность создания на основе этих материалов кремниевых МДП-варикапов с высоким коэффициентом перекрытия емкости, электрических переключателей с памятью, эффективных просветляющих и пассивирующих покрытий для кремниевых фотоэлектрических приборов. Важным этапом при исследовании МДП-систем является определение высот энергетических барьеров на межфазных границах металл-диэлектрик и диэлектрик-полупроводник, знание которых позволяет построить энергетическую зонную диаграмму МДП-структуры и предсказать ее свойства и характеристики. В работах [1, 2, 3] определены энергетические барьеры в МДП-структурах с диэлектриками из оксида самария, оксида иттербия, оксида иттрия и оксида гадолиния. Однако значения потенциальных барьеров на границах фаз в структуре  $Al - Er_2O_3 - Si$  до настоящего времени не установлены. Целью данной работы являлось определение высот энергетических барьеров на границах раздела оксидной пленки в кремниевых МДП-структурах с оксидом эрбия в качестве диэлектрика.

МДП-структуры типа  $Al - Er_2O_3 - Si$  изготавливались на кремниевых монокристаллических подложках марки КЭФ-5 и КДБ-4.5 с ориентацией

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

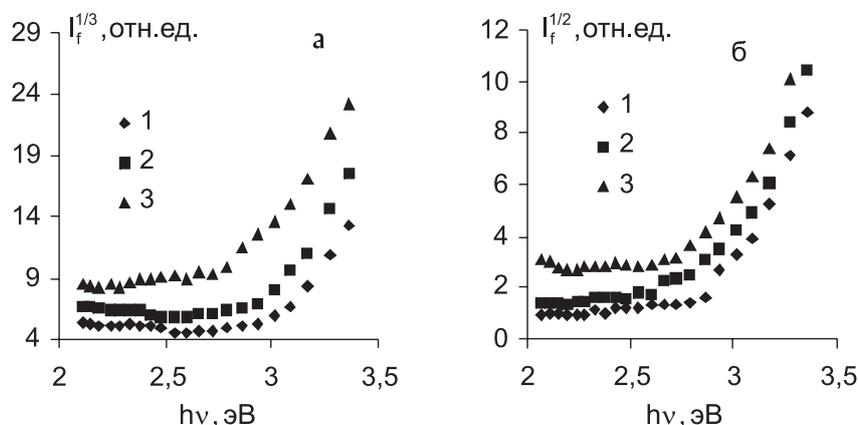


Рис. 1. Зависимости приведенного фототока структуры  $Al-Er_2O_3-Si$  от энергии падающих фотонов при положительных (а):  $V=4(1), 5(2), 7В(3)$  и отрицательных напряжениях (б):  $V = -3(1), -5(2), -7В(3)$

поверхности в направлении (111) и (100) соответственно. Перед нанесением диэлектрической пленки полированные кремниевые пластины обезжиривались ультразвуковой мойкой в четыреххлористом углероде. Пленки оксида эрбия толщиной  $d=80-100$  нм получались путем термического распыления металлического эрбия из молибденовой лодочки в вакууме  $(2-3) \cdot 10^{-5}$  Тор на установке типа ВУП-5 с последующим термическим окислением полученного слоя РЗЭ при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течение 40 минут. Полупрозрачные электроды площадью  $2,7 \cdot 10^{-3}$  см<sup>2</sup> к пленке  $Er_2O_3$  изготавливались методом термического распыления алюминия через трафарет в вакууме  $(4-5) \cdot 10^{-5}$  Тор. С противоположной стороны на шлифованную поверхность кремниевой подложки напылялся сплошной контакт из алюминия.

Энергетические барьеры на границах раздела металл-оксид эрбия и кремний-оксид эрбия определялись методом внутренней фотоэмиссии электронов в диэлектрик [4, 5] из спектральных и вольт-амперных зависимостей фототока. Фотоэмиссионные токи измерялись электрометром типа ЭД-05М с чувствительностью порядка  $10^{-15}$  А при освещении образцов монохроматическим светом, получаемым с помощью ксеноновой лампы ДКсЭл 1000-5 и светосильного монохроматора типа МДР-2.

На рис. 1 представлены типичные зависимости приведенного на один фотон фототока  $I_f^{1/n}$  от энергии фотона  $h\nu$  для структуры  $Al-Er_2O_3-Si$ , построенные в координатах  $I_f^{1/n}$  от  $h\nu$  для различных величин положительного ( $n = 3$ ) и отрицательного ( $n = 2$ ) напряжения  $V$ . Как видно, для каждой кривой в области энергии фотонов шириной около 10 кТ  $I_f^{1/n}$  линейно возрастает при увеличении энергии фотонов. Характеристики при положи-

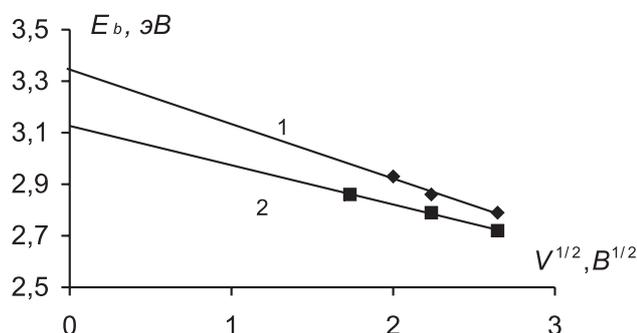


Рис. 2. Зависимость  $E_b$  от  $V^{1/2}$  структуры  $Al-Er_2O_3-Si$  для положительного (1) и отрицательного (2) электрического напряжения

тельном напряжении на электроде (рис. 1,а) соответствуют фотоэмиссии электронов из кремния. В работе [4] отмечается, что дырочная эмиссия из металла в этом случае пренебрежимо мала. Кроме того, при протекании фототока через диэлектрик, как показывают вольт-фарадные характеристики, наблюдается захват отрицательного заряда на глубокие ловушки в  $Er_2O_3$ . Пороговая энергия фотонов соответствует величине энергии потенциального барьера  $E_b$  на границе раздела  $Si-Er_2O_3$  при данном приложенном напряжении. Характеристики для отрицательных смещений на полевом электроде (рис. 1,б) соответствуют эмиссии электронов из металла. В этом случае в диэлектрическом слое также накапливается отрицательный заряд. Величина пороговой энергии фотонов для этих кривых равна энергии потенциального барьера на границе раздела металл-оксид эрбия при данной величине напряжения. Как показали исследования, зависимость величины потенциального барьера  $E_b$  от квадратного корня из приложенного напряжения имеет прямолинейный вид (рис. 2), а фототок при электрических полях в диэлектрике, больших  $10^5 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$ , описывается следующим выражением:

$$I_f = A(h\nu - E_{b0} + kV_d^{1/2})^n,$$

где  $E_{b0}$  — высота потенциального барьера при нулевом электрическом поле в диэлектрике;  $k$  — коэффициент Шоттки;  $V_d$  — падение напряжения в диэлектрике;  $A$  — коэффициент, зависящий от  $h\nu$ . Экстраполяция прямолинейных зависимостей  $E_b$  от  $V^{1/2}$  до пересечения с осью  $E_b$  позволяет определить энергетические барьеры на границах оксида эрбия при отсутствии напряжения.

На рис. 3 представлены типичные вольтаические зависимости фотоинжекционного тока из кремния в пленку оксида эрбия для двух различных энергий фотонов, построенные в координатах  $I_f^{1/n}$  от  $V^{1/2}$ . Характеристики хо-

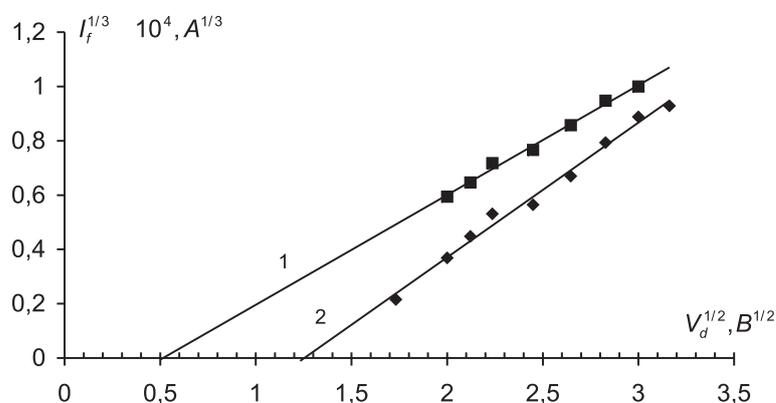


Рис. 3. Вольтаические зависимости фототока при различных энергиях фотонов: 1 —  $h\nu = 3,13$  эВ, 2 —  $h\nu = 2,91$  эВ

Таблица

**Энергетические барьеры на межфазных границах  
в МДП-структурах**

Граничающая с $Er_2O_3$ фаза	Энергетическая высота барьера, эВ
Al	3,13-3,21
Si	3,29-3,35

рошо спрямляются в указанных координатах, что подтверждает справедливость приведенной аналитической зависимости для фотоэмиссионного тока. Величины энергетических барьеров на межфазных границах пленки  $Er_2O_3$ , определенные из этих зависимостей по методике, описанной в [6], практически совпадали со значениями, полученными из спектральных зависимостей фототока. Величины энергетических барьеров на границах диэлектрика в МДП-структурах с оксидом эрбия сведены в таблицу.

Таким образом, проведенные исследования показали, что исследуемые структуры обладают высокими энергетическими барьерами на межфазных границах. Это свидетельствует о хороших электрических свойствах и характеристиках исследованных систем.

## Литература

- [1] Рожков В.А., Трусова А.Ю., Бережной И.Г. Энергетические барьеры и центры захвата в кремниевых МДП-структурах с диэлектриком из оксида самария и иттербия // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 6. С. 54–58.

- [2] Рожков В.А., Пилюшов В.А. Электрофизические свойства кремниевых МДП-систем с диэлектрической пленкой из оксида иттрия // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2001. Т. 4. Вып. 3. С. 49–52.
- [3] Рожков В.А., Петров А.И., Шаварина Е.А. Электрофизические свойства кремниевых МДП-варикапов с диэлектрической пленкой из оксида гадолиния // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2000. Т. 3. Вып. 1. С. 57–61.
- [4] Deal B.E., Snow E.H., Mead C.A. Barrier energies in metal-silicon dioxide-silicon structures // J. Phys. Chem. Sol. 1966. V. 27. No. 11/12. P. 1873–1879.
- [5] Powell R.J. Photoinjection into SiO<sub>2</sub>: use of optical interference to determine electron and hole contribution // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. No. 13. P. 1093–1101.
- [6] Powell R.J. Interface barrier energy determination from voltage of photo-injected current // J. Appl. Phys. 1969. V. 41. No. 6. P. 2424–2432.

Поступила в редакцию 6/X/2004;  
в окончательном варианте — 6/X/2004.

## ENERGY BARRIERS ON THE INTERPHASE BOUNDARIES IN A MIS-SYSTEM

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

The energy barriers for electrons on the interfaces  $Al - Er_2O_3$  (3,13–3,21 eV),  $Si - Er_2O_3$  (3,29–3,35 eV) are determined by the method of internal photoemission of carriers in erbium oxide isolator in the silicon metal-isolator-semiconductor structures.

Paper received 6/X/2004.  
Paper accepted 6/X/2004.

---

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