

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКИСЛЕНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛЕНКИ ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР

© 2004 В.А.Рожков, М.А.Родионов,¹ А.В.Пашин²

Исследовано влияние температуры окисления двухслойной пленки из редкоземельных металлов на электрофизические свойства МДП-структур $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$, изготовленных методом термического распыления редкоземельного элемента на кремниевую подложку с последующим термическим окислением полученной пленки редкоземельных металлов на воздухе при температурах 500, 600, 700, 800 °С. Определены плотность поверхностных состояний, величины скорости поверхностной генерации и времени жизни неосновных носителей заряда у исследуемых структур.

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 ($\epsilon=8\text{--}20$) и удельного сопротивления ($\rho = 10^{13}\text{--}10^{16}$ Ом·см), обладают хорошей адгезией к поверхности кремния. На их основе разработаны МДП-варикапы и фотоварикапы [1, 2, 3], МДП-транзисторы [4], электрические и тепловые переключатели [5], термостойкие и эффективные просветляющие и пассивирующие диэлектрические покрытия для фотоэлектрических приборов [6]. Целью настоящей работы являлось исследование влияния температуры окисления двухслойной пленки редкоземельных металлов на электрофизические свойства МДП-структур.

Образцы для исследования изготавливались на кремниевых монокристаллических подложках марки КЭФ-5 с ориентацией (111). Перед нанесением диэлектрика кремниевые пластины проходили ультразвуковую мойку в ацетоне в течение 10 минут и затем сушились на воздухе. Пленки РЗЭ наносились методом термического распыления редкоземельного металла в вакууме при давлении $(2\text{--}3)\cdot 10^{-5}$ Тор из молибденовой лодочки на установке типа ВУП-5. На кремниевые подложки последовательно напылялись слои

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

²Пашин Алексей Владимирович (Pashin@ssaba.smr.ru), кафедра физики Самарской архитектурно-строительной академии, 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194.

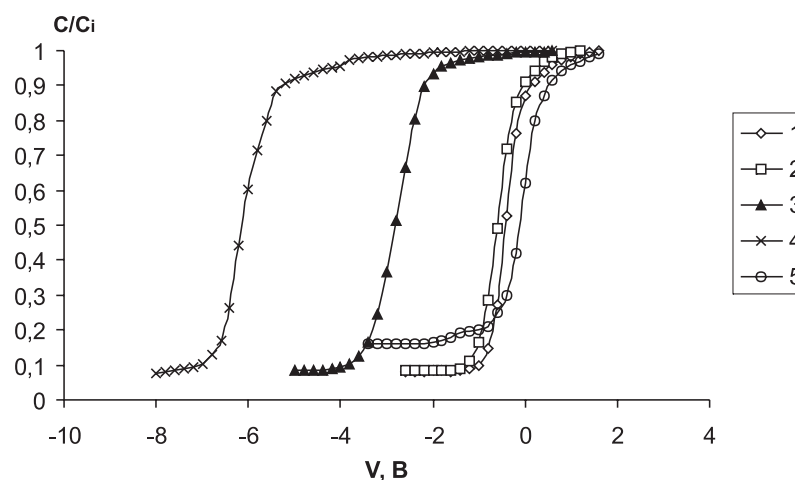


Рис. 1. Нормированные к емкости диэлектрика вольтфарадные характеристики МДП-структур $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$, полученных при различных температурах окисления пленки РЗЭ: 1–500 °С, 2–600 °С, 3–700 °С, 4–800 °С, 5–идеальная ВФХ

иттрия и диспрозия. При этом пленки редкоземельных металлов наносились на разные подложки в одном технологическом цикле и имели одинаковую толщину. Полученные слои РЗЭ окислялись в трубчатой муфельной печи типа СУОЛ-0.4.4 на воздухе при температурах 500, 600, 700, 800 °С в течение 40 минут. Толщина каждого диэлектрического слоя оксида РЗЭ в исследуемых структурах лежала в пределах 350–450 Å. Контакты к диэлектрической пленке изготавливались вакуумным термическим распылением 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.

Вольтфарадные характеристики (ВФХ) структур $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$, зависимости активной составляющей проводимости G и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ от напряжения V измерялись на частоте измерительного сигнала 1 МГц при комнатной температуре с помощью измерителя L, C, R типа Е7-12. Исследование неравновесных процессов, протекающих в приповерхностной области полупроводника МДП-структуры, проводилось методом кинетических зависимостей емкости при нестационарном обеднении поверхности полупроводника основными носителями заряда.

На рис. 1 изображены нормированные к емкости диэлектрика вольтфарадные характеристики МДП-структур $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$, полученных при различных температурах окисления металлической пленки РЗЭ, а также теоретически рассчитанная ВФХ для идеальной МДП-структуры [7]. Как видно из рисунка, с повышением температуры окисления крутизна характеристик существенно не меняется, что свидетельствует о неизменной плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела по-

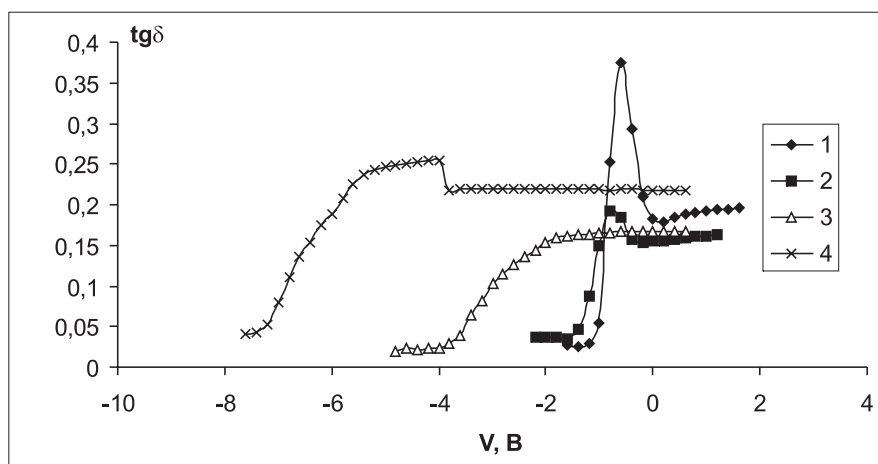


Рис. 2. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения МДП-структур $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$, полученных при различных температурах окисления пленки РЗЭ: 1–500 °С, 2–600 °С, 3–700 °С, 4–800 °С

лупроводник-диэлектрик. При этом емкость диэлектрика уменьшается, что обусловлено частичным окислением поверхности кремния и образованием диэлектрического подслоя из двуоксида кремния при более высоких температурах. На графике наблюдается сдвиг экспериментальной вольтфарадной кривой относительно идеальной, это свидетельствует о наличии встроенного положительного заряда в диэлектрике и на границе раздела полупроводник-диэлектрик, присутствие которого характерно для термически выращенных окислов [8]. Вычисленные из нормированных ВФХ величины плотности поверхностных состояний и фиксированного заряда в диэлектрике для образцов, изготовленных при различных температурах, приведены в таблице. Как видно из таблицы, значения фиксированного заряда в диэлектрике и плотности поверхностных состояний возрастают с увеличением температуры окисления пленки РЗЭ. Представленные результаты свидетельствуют о том, что оптимальным является температурный режим окисления 500–600 °С, а дальнейшее увеличение температуры приводит к резкому ухудшению качества границы раздела полупроводник-диэлектрик. Подобный результат может быть объяснен возрастанием механических напряжений между диэлектрической пленкой и полупроводниковой подложкой, которые могут приводить к образованию дополнительных поверхностных состояний [9].

Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ и активной составляющей проводимости G от приложенного напряжения V при частоте измерительного сигнала 1 МГц для исследуемых образцов представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Как видно из рисунков, наименьшие потери наблюдаются у МДП-структур, полученных при температурах окисления двухслойной пленки РЗЭ, равных 600 и 700 °С. Следует также отметить, что указанные структуры обладали и наилучшими изолирующими

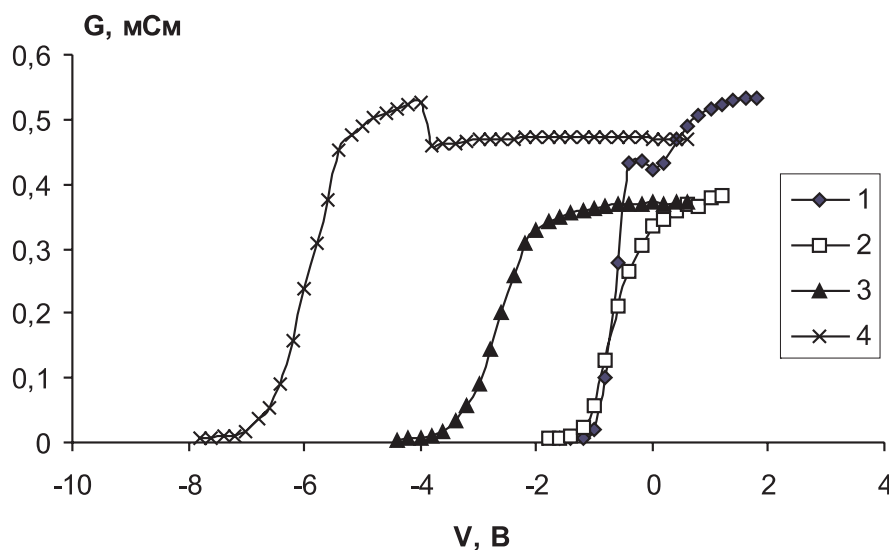


Рис. 3. Зависимости активной составляющей проводимости от напряжения МДП-структур $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$, полученных при различных температурах окисления пленки РЗЭ: 1–500 °C, 2–600 °C, 3–700 °C, 4–800 °C

свойствами. Снижение температуры окисления пленки РЗЭ до 500 °C, как и повышение ее до 800 °C, приводило к резкому ухудшению изолирующих свойств структуры и увеличению тангенса угла диэлектрических потерь. Подобное ухудшение может быть обусловлено неполным окислением пленки РЗЭ при низких температурах и поликристаллизацией при высоких температурах окисления пленок оксидов РЗЭ, что затрудняло получение на их основе высококачественных МДП-структур. Значения проводимости для исследуемых структур при различных напряжениях лежат в пределах от 0,0032 до 0,534 мСм. Величина $\text{tg } \delta$ изменяется в пределах от 0,022 до 0,374.

Для определения скорости поверхностной генерации и времени жизни неосновных носителей заряда проведено измерение кинетической зависимости емкости $C(t)$ при неравновесном обеднении поверхности полупроводника основными носителями заряда, создаваемом прямоугольными импульсами напряжения по методике, описанной в [10]. Типичные кинетические зависимости емкости $C(t)$ МДП-структуры $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$, изготовленной при температуре окисления 600 °C, при различных величинах приложенного постоянного обедняющего напряжения приведены на рис. 4. Представленные зависимости регистрировались в темноте при комнатной температуре. Объемное время жизни и скорость поверхностной генерации неосновных носителей заряда рассчитывались по методике Цербста [10]. Для этого полученные зависимости $C(t)$ перестраивались в координатах Цербста $-\frac{d}{dt} \left(\frac{C}{C_i} \right)^2$ от $\left(\frac{C}{C_\infty} - 1 \right)$, в которых характеристики имеют прямолинейный вид. Здесь C , C_i , C_∞ — емкость МДП-структуры, диэлектрика, рав-

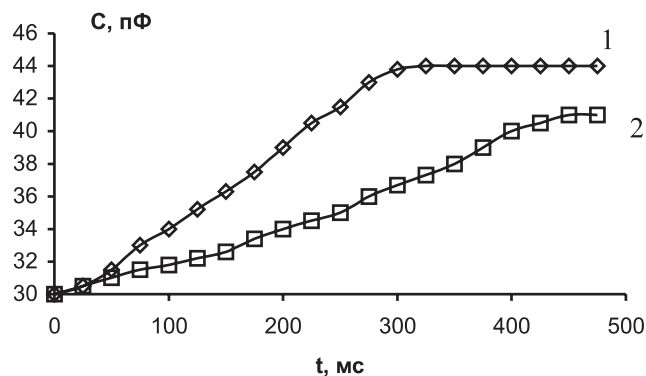


Рис. 4. Кинетические зависимости емкости МДП-структуры $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$ при различных величинах приложенного постоянного обедняющего напряжения: 1–2 В, 2–4 В

новесное значение емкости при инверсии соответственно. 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. Значения S и τ для исследуемых структур приведены в таблице. Как видно, скорость поверхностной генера-

Таблица 1

Характеристики МДП-структур, полученных при различных температурах окисления пленок РЗЭ

$t_{ok}, ^\circ\text{C}$	$Q_{ss}, 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$	$N_{ss}, 10^{11} \text{ см}^{-2}$	$S, \text{ см/с}$	$\tau, 10^{-7} \text{ с}$
500	4,8	3	29	2,8
600	6,9	4,3	35	3
700	32,7	20,4	134	0.8
800	76,6	47,5	305	9

ции возрастает от 29 до 305 см/с с увеличением температуры окисления пленки РЗЭ от 500 до 800 $^\circ\text{C}$. Подобная зависимость обусловлена возникновением на поверхности кремния дополнительных генерационных центров при повышении температуры окисления. График зависимости скорости поверхностной генерации от плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик приведен на рис. 5. Как видно из рисунка, эта зависимость удовлетворительно аппроксимируется прямой линией, что свидетельствует о линейной зависимости скорости поверхностной генерации от плотности поверхностных состояний. С повышением температуры окисления пленок РЗЭ значение объемного времени жизни неосновных носителей заряда изменялось незначительно. Данный результат свидетельствует об отсутствии существенного влияния температуры окисления на число дефектов в ОПЗ полупроводника.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что оптимальными электрофизическими свойствами обладают МДП-структуры, темпе-

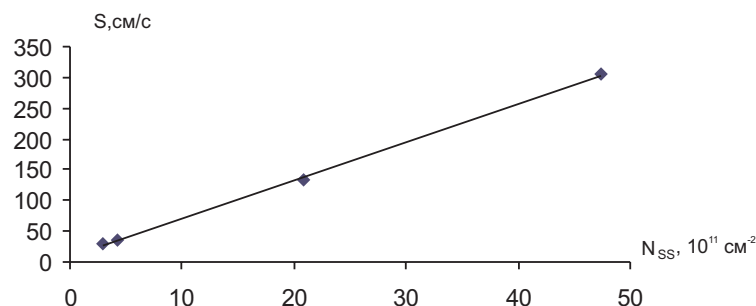


Рис. 5. Зависимость скорости поверхностной генерации от плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик структуры $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3\text{-nSi}$.

ратура окисления пленки РЗЭ которых изменяется в интервале от 500 до 700 °С. Причем пленки, полученные при температурах 600 и 700 °С, характеризуются большей электрической прочностью, а МДП-системы на их основе имеют наименьшие значения тангенса угла диэлектрических потерь и проводимости в области напряжений, соответствующих обогащению поверхности полупроводника основными носителями заряда. Наилучшими генерационно-рекомбинационными параметрами обладают структуры с диэлектриком, изготовленным при температуре 500 °С.

Литература

- [1] Рожков В.А., Трусова А.Ю., Гончаров В.П. и др. МДП-вариакпы и фотовариакпы на основе структуры $\text{Al-Sm}_2\text{O}_3\text{-Si}$ // Журнал техн. физики. 1995. Т. 65. Вып. 8. С. 183.
- [2] Кутолин С.А., Чернобровкин Д.И. Пленочное материаловедение редкоземельных соединений. М.: Металлургия, 1981. 180 с.
- [3] Бережной И.Г., Гончаров В.П., Рожков В.А. и др. Кремниевые МДП-вариакпы с диэлектриком из оксида самария, иттрия и лютеция // Электродинамика слоисто-неоднородных структур СВЧ: Межвуз. сборник науч. тр. Самара: Изд-во СамГУ, 1995. С. 82–88.
- [4] Гуттиерез У. Возможность использования окислов РЗМ при создании пленочных емкостных элементов и тонкопленочных активных элементов // Зарубежная радиоэлектроника. 1966. №1. С. 86–90.
- [5] Рожков В.А., Петров А.И., Милюткин Е.А. Переключение проводимости и память в кремниевых МДП-структурах на основе пленок двуокиси церия // Микроэлектроника. 1984. Т. 13. №3. С. 247–251.
- [6] 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.

- [7] Goetzberger A. Ideal MOS-curves for silicon // Bell System Technical Journal. 1966. Vol. 45. No. 7. P. 1097–1121.
- [8] Вдовин О.С., Кирьяшкина З.И., Котелков В.Н. и др. Пленки оксидов редкоземельных элементов в МДМ- и МДП-структурах. Саратов: Саратов. госуниверситет, 1983. 160 с.
- [9] Корзо В.Ф., Черняев В.Н. Диэлектрические пленки в микроэлектронике. М.: Энергия, 1977. 368 с.
- [10] Zerst M. Relaxationseffekte an Halbleiter-Isolator-Grenzflächen // Zeitschrift angew. Phys. 1966. Band. 22. No. 1. P. 30–33.

Поступила в редакцию 3/II/2004;
в окончательном варианте — 3/II/2004.

THE EFFECT OF DOUBLE-LAYERED RARE-EARTH METAL FILM OXIDATION TEMPERATURE ON MIS-STRUCTURE CHARACTERISTICS

© 2004 V.A. Rozhkov, M.A. Rodionov,³ A.V. Pashin⁴

The effect of the rare earth metal film oxidation temperature on the electrophysical properties of MIS-structures Al-Dy₂O₃-Y₂O₃-nSi observed by the method of thermal pulverization of the rare-earth element on the silicon backing with the following thermal oxidation of the rare-earth metal films obtained in the air at 500, 600, 700, 800 °C is studied. The density of skin conditions, skin generation speed amounts and life time of not general charge transmitters of studied structures are determined.

Paper received 3/II/2004.

Paper accepted 3/II/2004.

³Rozhkov Victor Arkad'evich (rozhkov@ssu.samara.ru), Rodionov Maksim Alexandrovich (rodionow@rambler.ru), Dept. of Solid State Electronics, Samara State University, Samara 443011, Russia.

⁴Pashin Alexey Vladimirovich (Pashin@ssaba.smr.ru), Dept. of Physics, Samara State Academy of Architecture and Building, Samara 443001, Russia.