

06.2

Электрофизические свойства структур металл—оксид диспрозия—оксид гадолиния—кремний

© В.А. Рожков, М.А. Родионов

Самарский государственный университет
E-mail: rozhkov@ssu.samara.ru*Поступило в Редакцию 3 ноября 2003 г.
В окончательной редакции 28 декабря 2003 г.*

Исследованы электрофизические свойства структур алюминий—оксид диспрозия—оксид гадолиния—кремний ($\text{Al}-\text{Dy}_2\text{O}_3-\text{Gd}_2\text{O}_3-\text{Si}$). 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 $5.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Величины скорости поверхностной генерации и времени жизни неосновных носителей заряда, определенные по методике Цербста, лежали в пределах $47-67 \text{ см/с}$ и $0.3-0.6 \mu\text{s}$ 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 ($\epsilon = 8-20$) и удельного сопротивления ($\rho = 10^{13}-10^{16} \Omega \cdot \text{см}$), 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 двухслойными диэлектрическими пленками из оксидов редкоземельных элементов. Применение в микроэлектронике двухслойных диэлектрических пленок таких, как оксид РЗЭ– SiO_2 и Si_3N_4 – SiO_2 , позволяет улучшить электрическую стабильность МДП-приборов.

Образцы для исследования изготавливались на кремниевых монокристаллических подложках марки КЭФ-5 и КДБ-4.5 с ориентацией (111) и (100) соответственно. Пленка РЗЭ наносилась методом термического распыления редкоземельного металла в вакууме при давлении $(2-3) \cdot 10^{-5}$ Торг из молибденовой лодочки на установке типа ВУП-5. На кремниевые подложки последовательно напылялись слои гадолиния и диспрозия. Полученные пленки РЗЭ окислялись в трубчатой муфельной печи типа СУОЛ-0.4.4 на воздухе при температуре $500-520^\circ\text{C}$ в течение 40 min. Толщина каждого диэлектрического слоя оксида РЗЭ в исследуемых структурах лежала в пределах $350-400 \text{ \AA}$. Контакты к диэлектрическому слою изготавливались вакуумным термическим распылением алюминия через графарет. Площадь металлического электрода составляла $2.7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$. С противоположной стороны кремниевой пластины наносился сплошной контакт из алюминия.

Установлено, что вольт-амперные характеристики (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. Величины удельного сопротивления пленок оксидов РЗЭ, определенные из ВАХ, составляют $10^{12}-10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$.

Исследование свойств границы раздела полупроводник–диэлектрик в МДП-структурах осуществлялось с помощью измерения высокочастотных вольт-фарадных характеристик. На рис. 1 изображены типичные вольт-фарадные характеристики МДП-системы $\text{Al}-\text{Dy}_2\text{O}_3-\text{Gd}_2\text{O}_3-\text{Si}$, 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,

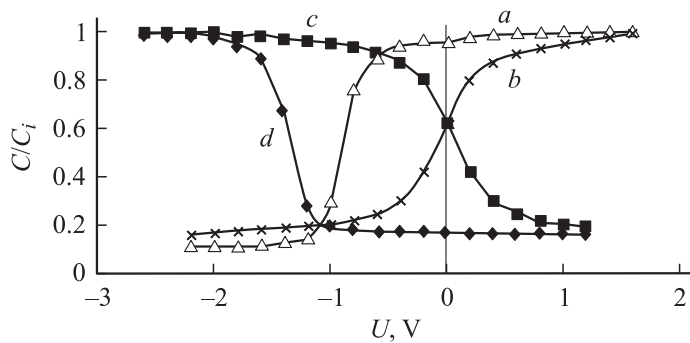


Рис. 1. Нормированные к емкости диэлектрика вольт-фарадные характеристики для структуры $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-nSi}$ (a, b) и $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3\text{-pSi}$ (c, d); b, c — теоретические зависимости, a, d — экспериментальные зависимости.

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 $8.9 \cdot 10^{-8} \text{ C/cm}^2$. Плотность поверхностных состояний в исследованных образцах составляла $5.6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Величины коэффициентов перекрытия по емкости $K = \frac{C_{\max}}{C_{\min}}$ для исследованных структур лежали в пределах 8–12, где C_{\max} и C_{\min} — максимальное и минимальное значения емкости соответственно.

Исследование зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ от приложенного напряжения U при частоте сигнала 1 МГц показало, что характеристики $\text{tg } \delta$ от U 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 обедняющих 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, соответствующи-



Рис. 2. Кинетические зависимости емкости МДП-структуры $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3-\text{Gd}_2\text{O}_3-n\text{Si}$ при различных величинах постоянного напряжения в темноте: $a - 2$, $b - 4$, $c - 6$ В. Амплитуда прямоугольного импульса — 3 В.

ших 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 U 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 0.0028 до 0.72 мС. Величина $\text{tg } \delta$ изменяется в пределах от 0.018 до 0.381.

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 $\text{Al-Dy}_2\text{O}_3-\text{Gd}_2\text{O}_3-n\text{Si}$ при различных

величинах приложенного постоянного напряжения приведены на рис. 2. 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. 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 τ и скорость поверхностной генерации неосновных носителей заряда S рассчитывались по методике Цербста [7]. Для этого полученные зависимости $C(t)$ перестраивались в координатах Цербста, где характеристики имеют прямолинейный вид. 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 τ для исследуемых структур лежат в пределах 47–67 см/с и 0.3–0.6 μ s соответственно.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что изученные структуры обладают высокими коэффициентами перекрытия по емкости, а также хорошими изолирующими свойствами и перспективны для создания МДП-варикапов. Высокое качество границы раздела полупроводник–диэлектрик позволяет использовать пленки исследованных оксидов РЗЭ в качестве пассивирующих пленок полупроводниковых приборов и подзатворного диэлектрического слоя полевого МДП-транзистора.

Список литературы

- [1] Рожков В.А. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. В. 8. С. 183–186.
- [2] Гуттиерез У. // Зарубежная радиоэлектроника. 1966. № 1. С. 86–90.
- [3] Рожков В.А., Петров А.И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 1. В. 1. С. 49–52.
- [4] Аношин Ю.А., Петров А.И., Рожков В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 10. С. 54–58.

- [5] *Goetzberger A.* // Bell System Technical Journal. 1966. V. 45. N 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. Саратовский университет, 1983. 160 с.
- [7] *Zerbst M.* // Zeitschrift angew. Phys. 1966. B. 22. N 1. S. 30–33.