

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МДП-СТРУКТУРЫ Al-Sm₂O₃-Si ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ИСТОЩЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА ОСНОВНЫМИ НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА

В.А. Рожков,¹ А.Ю. Трусова,² И.Г. Бережной³

Исследованы кинетические зависимости емкости кремниевых МДП структур с оксидом самария в качестве диэлектрика. Определены время жизни, скорость поверхностной генерации неосновных носителей заряда и энергетическая глубина залегания генерационных центров в кремнии.

К числу перспективных диэлектрических материалов для многослойных структур микроэлектроники относятся оксиды редкоземельных элементов (ОРЗЭ), которые обладают высокими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 8-20$) и удельного сопротивления ($\rho = 10^{12} - 10^{15}$ Ом·см) и характеризуются химической и термической стойкостью [1]. Разнообразные электрофизические свойства ОРЗЭ позволили создать на их основе тонкопленочные конденсаторы [2], МДП-транзисторы [3], электрические переключатели и элементы постоянной репрограммируемой памяти [4], МДП-варикапы и фотоварикапы [5,6].

Параметры и характеристики слоистых структур полупроводник-диэлектрик определяются качеством их границы раздела, которое существенно зависит от технологических условий изготовления диэлектрического слоя [7]. В этой связи исследование электрофизических свойств границы раздела диэлектрик-полупроводник в кремниевых МДП-структурах с диэлектрическими пленками из ОРЗЭ представляет научный и практический интерес.

В настоящей работе исследовались объемные и поверхностные параметры кремния в структурах Al-Sm₂O₃-Si методом кинетических характеристик емкости при нестационарном истощении поверхности полупроводника, а также их зависимость от температуры изготовления диэлектрического слоя.

1 Методика получения образцов и измерений

Образцы для исследования изготавливались на кремниевых монокристаллических подложках марки КЭФ-5 и КДБ-4,5 с ориентацией (111) и (100) соответственно. Перед нанесением диэлектрика кремниевые пластины обезжиривались кипячением

¹Рожков Виктор Аркадьевич, кафедра электроники твердого тела СамГУ

²Трусова Алла Юрьевна, кафедра электроники твердого тела СамГУ

³Бережной Игорь Геннадьевич, кафедра электроники твердого тела СамГУ

в толуоле с последующей ультразвуковой мойкой в ацетоне. Для снятия слоя естественного окисла подложки обрабатывались в слабом водном растворе плавиковой кислоты. На подготовленную поверхность кремниевой подложки наносилась пленка самария методом термического распыления в вакууме $(1-2) \cdot 10^{-5}$ Тор. Распыление самария проводилось из молибденовой лодочки на установке типа ВУП-5. Пленки оксида самария получались термическим окислением нанесенной металлической пленки на воздухе при температуре $500 - 550^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут. Температуры окисления $t_{ок}$ пленки самария составляли $500^{\circ}, 600^{\circ}, 700^{\circ}, 800^{\circ}, 900^{\circ}, 1000^{\circ}\text{C}$. Толщина диэлектрического слоя оксида самария в исследуемых МДП-структурах составляла 0,22-0,35 мкм. Электроды к слою оксида самария площадью $3,9 \cdot 10^{-3}\text{ см}^2$ изготавливались путем термического напыления пленки алюминия через трафарет в вакууме $(2-3) \cdot 10^{-5}$ Тор. С противоположной стороны кремниевой подложки напылялся сплошной контакт из алюминия.

Заряд в диэлектрической пленке Q_f и плотность поверхностных состояний N_{ss} на границе раздела $\text{Sm}_2\text{O}_3\text{-Si}$ определялись методом вольтфарадных характеристик (ВФХ), измеренных на частоте 1 МГц, с записью C-V кривых на двухкоординатном самописце типа ЛКД 4-003.

Измерения кинетических характеристик емкости проводилось при нестационарном истощении поверхности полупроводника прямоугольными импульсами напряжения [8] с регистрацией C-t кривых на экране осциллографа С1-99 или ленте самописца типа КСП-4. Освещение образцов осуществлялось белым светом от лампы накаливания с вольфрамовой нитью. Освещенность образцов изменялась с помощью нейтральных фильтров или путем изменения расстояния от лампы излучения до образца и измерялась с помощью люксметра типа Ю-116.

2 Результаты и их обсуждение

На рис.1 представлены типичные ВФХ структур $\text{Al-Sm}_2\text{O}_3\text{-Si}$, полученных при различных температурах изготовления оксида самария. Гистерезис C-V кривых обусловлен захватом на поверхностные состояния инжектированных в диэлектрик носителей заряда, а его величина по оси напряжений не превышала 0,2 В. Область управляющих напряжений, соответствующая изменению емкости МДП-структуры, лежит в пределах от -2 до +2 В, что указывает на малое значение фиксированного заряда в диэлектрике. Исследования ВФХ МДП-структур с оксидом самария, изготовленным при температуре окисления 500°C , дают следующие значения параметров образцов: эффективный заряд состояний в диэлектрике при потенциале плоских зон равен $Q_f = 1,4 \cdot 10^{-8}\text{ Кл/см}^2$, плотность поверхностных состояний составляет $N_{ss} = 3,4 \cdot 10^{10}\text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Эти структуры обладают высокой электрической стабильностью, ВФХ образцов хорошо воспроизводятся после длительной выдержки при положительных и отрицательных напряжениях. Вольтфарадные характеристики структур не изменяются также после воздействия электрического напряжения ($\pm 15\text{В}$) при повышенной температуре (140°C) в течение 20 минут.

С ростом температуры окисления пленки самария уменьшается крутизна ВФХ, что свидетельствует об увеличении плотности поверхностных состояний образцов. При этом емкость диэлектрика уменьшается, что обусловлено окислением поверхности кремния и образованием диэлектрического подслоя из двуоксида кремния при более высоких температурах. Рассчитанные из вольтфарадных характеристик величины плотности поверхностных состояний и фиксированного заряда в диэлектрике для образцов, изготовленных при различных температурах, приведены в табли-

це 1.

Рис.1. Вольтфарадные характеристики МДП структур Al Sm₂O₃ Si, изготовленных при различных температурах окисления плёнки самария: 500 (1); 600 (2); 700 (3); 800 (4); 900 (5); 1000^оС (6). Толщина пленки оксида самария 0,35 мкм.

Таблица 1. Плотность поверхностных состояний и фиксированный заряд в оксиде самария для различных температур окисления самария

$t_{ок.}, ^\circ\text{C}$	$Q_{\phi}, \text{ Кл}/\text{см}^2$	$N_{ss}, \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$
500	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{10}$
600	$3,8 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{11}$
700	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{11}$
800	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$3,26 \cdot 10^{11}$
900	$4,61 \cdot 10^{-8}$	$3,36 \cdot 10^{11}$
1000	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{11}$

Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ и проводимости от напряжения при частоте измерительного сигнала 1 МГц имеют максимум при напряжении плоских зон и тенденцию к насыщению в области напряжений, соответствующих аккумуляции и инверсии на поверхности полупроводника [6]. Значения $tg\delta$ в темноте при различных напряжениях лежат в пределах от 0,04 до 0,16 и существенно не изменяются при освещении. Приведенные результаты свидетельствуют

о перспективности использования исследованных структур в качестве стабильных МДП-варикапов, имеющих малые управляющие напряжения, высокие значения коэффициента перекрытия емкости, крутизны вольтемкостной характеристики и добротности.

Анализ генерационных явлений в кремниевых МДП-системах показывает, что процесс установления равновесия в полупроводнике при нестационарном обеднении его поверхности в темноте происходит путем термической генерации электронно-дырочных пар на поверхности и в области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника со скоростью [9-13]

$$U_T = sn_i + \frac{n_i}{\tau}(W(t) - W_0), \quad (1)$$

где s - скорость поверхностной генерации электронно-дырочных пар; n_i -собственная концентрация носителей; τ - объемное время жизни неосновных носителей заряда; W_0 и $W(t)$ - толщина ОПЗ в равновесии и в момент времени t . Выражая толщину ОПЗ через удельную емкость МДП-структуры, можно получить следующее выражение для плотности генерационного тока в полупроводнике:

$$J_z = \frac{dQ}{dt} = qsn_i + \frac{qn_i\epsilon_0\epsilon_n}{\tau C_0} \left(\frac{C_0}{C(t)} - 1 \right), \quad (2)$$

где q - заряд электрона, ϵ_0 и ϵ_n - диэлектрические проницаемости вакуума и полупроводника соответственно; C_0 и $C(t)$ - удельные емкости МДП-структуры в равновесии и в момент времени t соответственно. С другой стороны, ток, протекающий через МДП-структуру, при релаксации определяется скоростью изменения емкости и описывается выражением [9]

$$J_z = \frac{dQ}{dt} = -\frac{qN_d\epsilon_0\epsilon_n}{2C_D} \frac{d}{dt} \left(\frac{C_D}{C(t)} \right)^2 = \frac{qN_d\epsilon_0\epsilon_n C_D}{(C(t))^3} \frac{dC}{dt}, \quad (3)$$

где N_d - концентрация доноров в полупроводнике; C_D - удельная емкость диэлектрика МДП-структуры. Приравнявая правые части (2) и (3), получаем уравнение, которое описывает релаксационные зависимости в координатах Цербста: $-\frac{d}{dt} \left(\frac{C_D}{C(t)} \right)^2$ от $\left(\frac{C_0}{C(t)} - 1 \right)$

$$-\frac{qN_d\epsilon_0\epsilon_n}{2C_D} \frac{d}{dt} \left(\frac{C_D}{C(t)} \right)^2 = qsn_i + \frac{qn_i\epsilon_0\epsilon_n}{\tau C_0} \left(\frac{C_0}{C(t)} - 1 \right) \quad (4)$$

Графики в координатах Цербста представляют собой прямые, из наклона которых можно определить τ , а из отсечки по оси ординат - величину s .

Типичные кинетические зависимости емкости $C(t)$ образцов, изготовленных при температуре окисления пленки самария 500°C , при нестационарном истощении поверхности полупроводника основными носителями заряда при различных величинах постоянного напряжения представлены на рис.2. Для определения скорости поверхностной генерации s и времени жизни неосновных носителей заряда τ в кремнии релаксационные кривые емкости перестраивались в координатах Цербста. Рассчитанные значения скорости поверхностной генерации для различных образцов составляли $s = 20 - 50$ см/с, а объемного времени жизни неосновных носителей заряда лежали в пределах $\tau = (2 - 3) \cdot 10^{-5}$ с.

Поверхностная и объемная компоненты генерационного тока неосновных носителей описываются первым и вторым слагаемыми соотношения (2) соответственно, что позволяет оценить вклад объемной и поверхностной генерации в ток неосновных носителей заряда. Расчеты показывают, что поверхностная компонента генерационного тока составляет $5,5 \cdot 10^{-8}$ А/см² и более чем на порядок превосходит генерационный ток в ОПЗ, равный $4,5 \cdot 10^{-9}$ А/см². Малые значения скорости поверхностной генерации в исследуемых структурах, которые более чем на порядок меньше аналогичного параметра в кремниевых МДП-структурах с термическим оксидом кремния в качестве диэлектрика, свидетельствуют о хорошем качестве границы раздела полупроводник-диэлектрик.

Рис.2. Кинетика МДП емкости структуры Al Sm₂O₃ Si при различных величинах постоянного напряжения в темноте: 5 (1); 6 (2); 7 (3); 8 (4); 9 (5); 10 В (6).

Значения времени жизни и скорости поверхностной генерации неосновных носителей заряда для МДП-структур, изготовленных при различных температурах окисления пленки самария, приведены в таблице 2. Как видно, скорость поверхностной генерации возрастает от 20 см/с до 990 см/с, а время жизни неосновных носителей заряда уменьшается от $2,5 \cdot 10^{-5}$ с до $9 \cdot 10^{-7}$ с при увеличении температуры окисления пленки самария от 500⁰ С до 1000⁰ С. Данный результат указывает на возрастание числа центров рекомбинации в объеме и на поверхности полупроводника с увеличением температуры получения диэлектрической пленки.

Таблица 2. Скорость поверхностной генерации и время жизни неосновных

носителей заряда для различных температур окисления самария

$t_{ок.}, ^\circ\text{C}$	$s, \text{см}/\text{с}$	$\tau, \text{с}$
500	20	$2,5 \cdot 10^{-5}$
600	230	$2,2 \cdot 10^{-5}$
700	480	$4,6 \cdot 10^{-6}$
800	600	$4,2 \cdot 10^{-6}$
900	790	$1 \cdot 10^{-6}$
1000	990	$0,9 \cdot 10^{-6}$

Рис.3. Температурные зависимости логарифмов постоянной времени релаксационного процесса (1) и $-\frac{d}{dt}\{\frac{C_d}{C}\}^2$ (2) структуры Al-Sm₂O₃-Si.

Для определения энергии активации генерационных центров измерялись кинетические характеристики емкости при различных температурах. Исследования показывают сильную зависимость времени переходного процесса от температуры образца. Так, при понижении температуры от 293 К до 219 К время релаксации емкости увеличивалось на два порядка. Температурные зависимости логарифмов времени релаксации емкости T_T и величины пропорциональной генерационному току $-\frac{d}{dt}\{\frac{C_d}{C}\}^2$ приведены на рис.3. Как видно, обе характеристики спрямляются в используемых координатах, что свидетельствует об экспоненциальной зависимости указанных величин от температуры. Величины энергии активации генерационных

центров, рассчитанные из этих характеристик, совпадают между собой и лежат в пределах 0,4 - 0,43 эВ.

Рис.4. Кинетика МДП-емкости структуры Al-Sm₂O₃-Si при разных освещенностях: 1 (1); 25 (2); 180 (3); 600 (4); 1500 (5); 5000 лк (6).

При освещении образцов светом из области фундаментального поглощения полупроводника с интенсивностью P возникает дополнительная оптическая генерация электронно-дырочных пар со скоростью

$$U_c = (1 - R)\beta P, \quad (5)$$

где R - коэффициент отражения света; β - квантовый выход. Сильное электрическое поле в приповерхностной области полупроводника вызывает практически мгновенное разделение попавших в ОПЗ пар свободных носителей заряда. В результате неосновные носители локализуются у поверхности, образуя инверсионный слой или захватываясь на поверхностные состояния, а основные - выводятся в объем полупроводника. Это приводит к усилению экранировки внешнего поля, уменьшению толщины истощенного слоя и увеличению емкости структуры. Поскольку в области действия поля можно пренебречь рекомбинацией электронно-дырочных пар, то в первом приближении кинетика релаксационного процесса в этом случае описывается общим темпом генерации носителей: темновым U_T и световым U_c :

$$U(t) = U_T + U_c = U_T + (1 - R)\beta P, \quad (6)$$

а постоянная времени определяется выражением

$$T_c = \frac{T_T U_T}{U_T + (1 - R)\beta P}, \quad (7)$$

где T_T и T_c - эффективные времена релаксации в темноте и на свету соответственно. Как видно, при подсветке должна наблюдаться гиперболическая зависимость постоянной времени переходного процесса от интенсивности света.

На рис.4 представлены кинетические зависимости емкости при различной освещенности. Время переходного процесса уменьшается более чем на два порядка при освещении структуры светом с освещенностью 5000 лк.

Рис.5. Зависимость T_T/T_c от освещенности W для структуры Al-Sm₂O₃-Si.

На рис.5 приведена экспериментальная зависимость T_T/T_c от освещенности. Наблюдается хорошее согласование экспериментальных результатов с полученным теоретическим соотношением.

Высокая чувствительность образцов к свету свидетельствует о перспективности использования их в качестве фотоприемников.

Литература

- [1] Вдовин О.С., Кирьяшкина З.И., Котелков В.Н. и др. Пленки оксидов редкоземельных элементов в МДМ- и МДП-структурах. Саратов: Саратов. ГУ, 1983. 159 с.
- [2] Крикоров В.С., Красов В.Г., Маркарянц А.Е. //Электронная техника. 1971. Сер.12. Вып.1(12). С.79.
- [3] Sing P., Baishya // Thin Solid Films. 1987. V.147. P.25.
- [4] Рожков В.А., Петров А.И.//Письма в ЖТФ. 1985. Т.11. Вып.1. С.49.
- [5] Рожков В.А., Гончаров В.П., Трусова А.Ю. // Письма в ЖТФ. 1995. Т.21. Вып.2. С.6.

- [6] Рожков В.А., Трусова А.Ю., Гончаров В.П., Бережной И.Г. // ЖТФ. 1995. Т.65. Вып.8. С.183.
- [7] Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник. Киев: Наукова думка, 1978. 313 с.
- [8] Рожков В.А., Панфилов Б.А., Свердлова А.М. // ПТЭ. 1971. N6. С.127.
- [9] Zerst M. // Angew. Phys. 1966. V.22. N1. P.3039.
- [10] Heiman F.P. // IEEE Trans. El. Dev. 1967. V.14. N11. С.781.
- [11] Свердлова А.М., Рожков В.А., Панфилов Б.А. и др. // Электронная техника. 1971. Вып.4(61). С.92.
- [12] Литовченко В.Г., Серба А.А., Горбань А.П. // Полупроводниковая техника и микроэлектроника. 1971. Вып.5. С.11.
- [13] Рожков В.А. // Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. 1982. Вып.5(156). С.28.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF MIS STRUCTURES Al-Sm₂O₃-Si DURING THE NON-STATIONARY DEPLETION OF THE SEMICONDUCTOR SURFACE WITH THE MAIN CARRIER OF CHARGE.

V.A. Rozhkov,¹ A.Yu. Trusova,² I.G. Berezhnoy,³

The kinetical dependences of the capacitance of silicon MIS structures with samarium oxide as insulator have been investigated. The life time and rate of surface generation of minority carriers and also the energy level of generating centers in silicon were determined.

¹Victor Arkad'evich Rozhkov, Dept. of Solid State Electronics Samara State University

²Alla Yur'evna Trusova, Dept. of Solid State Electronics Samara State University

³Igor Gennad'evich Berezhnoy, Dept. of Solid State Electronics Samara State University